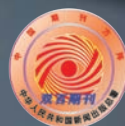


# 航空制造技术

2023年 第3期  
Vol.66 No.3



专稿  
**航空航天难加工材料切削加工  
过程模拟与智能控制综述**

封面文章  
**航空航天薄壁件铣削过程  
加工状态监测研究进展**

论坛  
**薄壁件加工状态监控与变形控制**

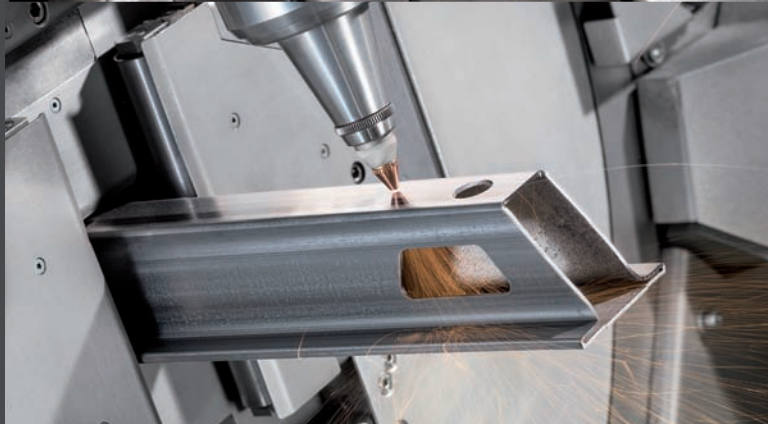
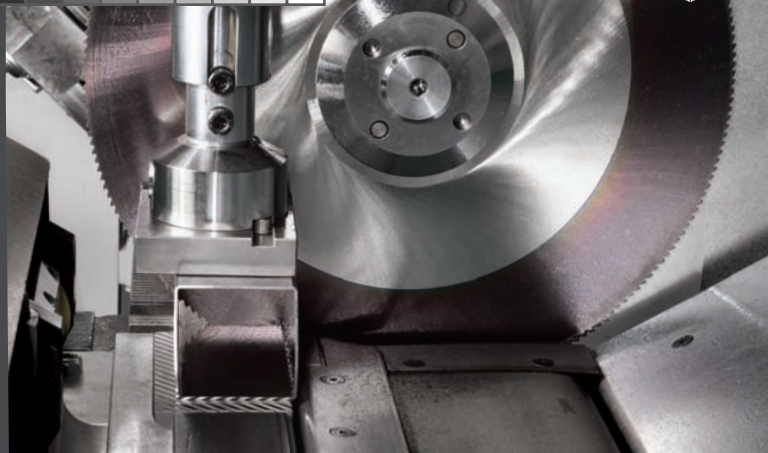
www.amte.net.cn

ISSN 1671-833X



ISSN 1671-833X CN 11-4387/V





# BLM集团:我们专注于管件

- 弯管
- 激光切割
- 锯床
- 管端成型



LT FIBER 光纤激光切管机



ELECT 弯管机 (最大加工管径为150MM)



TS72 全自动管材锯切设备



E-TURN 左右弯弯管机



SMART 左右弯弯管机

弯管 | 激光切管 | 锯床 | 管端成型 | 板管两用激光切割 | 管材切割及倒角

BLM集团中国 - 上海市闵行区外环路352号 - 电话: (021)-5446 1669 - 电子邮件地址: SALES@BLMGROUPCHINA.CN

广告索引号23-1009



BLM GROUP

CHINA

starrag

Engineering precisely what you value

—  
Starrag

# 安全性至关重要

斯达拉格为您的高效精确加工  
保驾护航

## 5倍提速

更高机床动态性能  
实现更迅速地进排气边加工



[www.starrag.com](http://www.starrag.com)

广告索引号23-1014

编委会

Editorial Board

主任 李志强  
Director Li Zhiqiang

常务副主任 王向明  
Executive Vice-Director Wang Xiangming

副主任 李涤尘 隋少春  
Vice-Director Li Dicheng Sui Shaochun

国内编委

Domestic Members

包建文 毕运波 程普强  
Bao Jianwen Bi Yunbo Cheng Puqiang  
董绍明 冯 晶 高兰宁  
Dong Shaoming Feng Jing Gao Lanling  
郭洪波 赫晓东 晋严尊  
Guo Hongbo He Xiaodong Jin Yanzun  
李金山 李克明 李 黎  
Li Jinshan Li Keming Li Li  
李文龙 刘黎明 刘雪峰  
Li Wenlong Liu Liming Liu Xuefeng  
刘战强 卿新林 沈洪才  
Liu Zhanqiang Qing Xinlin Shen Hongcai  
师俊东 石竖鲲 史玉升  
Shi Jundong Shi Shukun Shi Yusheng  
宋晓国 陶 飞 王俊升  
Song Xiaoguo Tao Fei Wang Junsheng  
王立平 王清江 王先模  
Wang Liping Wang Qingjiang Wang Xianmo  
夏峥嵘 肖贵坚 肖世宏  
Xia Zhengrong Xiao Guijian Xiao Shihong  
邢丽英 徐九华 徐正扬  
Xing Liying Xu Jiuhua Xu Zhengyang  
杨宏青 杨 辉 杨树明  
Yang Hongqing Yang Hui Yang Shuming  
姚 为 曾元松 张文武  
Yao Wei Zeng Yuansong Zhang Wenwu  
张振宇 章顺虎 赵安安  
Zhang Zhenyu Zhang Shunhu Zhao An'an  
朱继宏 朱嘉琦 朱利民  
Zhu Jihong Zhu Jiaqi Zhu Limin

国际编委

International Members

Chrsitoph Hartl (Germany) Dae-Cheol Ko (Korea)  
Jim Williams (U.S.) John Dear (UK)  
Lihui Wang (Sweden) Paulo Martins (Portugal)

AERONAUTICAL MANUFACTURING TECHNOLOGY

# 航空制造技术



1958年创刊·中文核心期刊·中国科技核心期刊·中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊

主管单位  
Competent Authority  
中国航空工业集团有限公司  
Aviation Industry Corporation of China, Ltd.

主办单位  
Sponsor  
中国航空制造技术研究院  
AVIC Manufacturing Technology Institute

出版人 李志强  
Publisher Li Zhiqiang

总编辑 罗京华  
Chief Editor Andy Luo  
执行主编 孙秀云  
Executive Editor-in-Chief Sharon Sun  
学术编辑 王燕萍/崔 静/王雪坤  
Academic Editor Emma Wang/Jaime Cui/Shirley Wang  
文字编辑 郝 爽/张晓眉/程学平  
Text Editor Seven Hao/May Zhang/Linda Cheng  
市场总监 何 欣  
Marketing Director Xin He  
设计/排版 王 艳  
Art Supervisor/Art Editors Yan Wang  
编辑出版 《航空制造技术》编辑部  
Edition Aeronautical Manufacturing Technology Magazine  
广告总代理 北京贝特里科技发展有限公司  
Advertising Agent Beijing BAMTRI Technology and Development Co., Ltd.  
通信地址 北京市340信箱(100024)  
Address P.O.Box 863, Beijing 100024 China  
邮发代号 82-26  
Subscription Code 82-26  
国外发行 中国国际图书贸易集团有限公司  
Distributor Abroad China International Book Trading Corporation  
国外代号 BM6680  
Code Abroad BM6680  
印刷 北京市宣武兴华印刷厂  
Printing Beijing Xuanwu Xinghua Printing House  
刊号 ISSN 1671-833X CODEN HGJIEO  
CN 11-4387/V  
电话 (010)85700465  
传真 (010)85700466  
在线投稿 http://www.amte.net.cn  
电子信箱 zscbyjyb@amte.net.cn

国内定价: 20.00元 国外定价: 16.00美元

版权声明: 凡投稿本刊或允许本刊登载的作品, 均视为已授权上载于www.amte.net.cn, 以及本刊授权的合作媒体使用。

# G160

## 双工位高效蜗杆砂轮磨



双工位工件  
更换时间  
仅需1.5秒！



G 160 是双工位高效蜗杆砂轮磨齿机。适用于大批量齿轮的高精度高效稳定生产，双工位工件更换时间仅需1.5秒！切削速度80m/s

面向工业4.0的机床软硬件配置，全面对机床各轴状态进行24小时监测并做预估性分析

广泛适用于新能源齿轮产品，各种乘用车变速箱齿轮，发动机齿轮和减速器行星轮的高精度，高效，高稳定性加工



埃马克(中国)机械有限公司  
地址: 太仓市陈门泾路101号工业园区2号厂房  
邮编: 215400 · 电话: 0512-53574098 · 传真: 0512-53575399  
网址: www.emag.com · 邮箱: info@emag-china.com

广告索引号22-1022



新浪微博



官方微信



编-读-往-来

## READERS & EDITORS



客座主编 岳彩旭

哈尔滨理工大学机械动力工程学院副院长,教授,博士生导师,从事智能制造、数字孪生、刀具设计相关理论和技术应用研究。

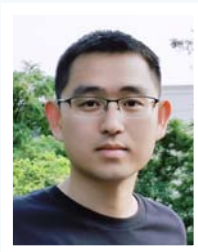
薄壁件根据结构特征可以分为复杂曲面类、整体壁板类、梁类和框体类。此类零件加工过程中由于材料去除率高或加工应力控制不良,加工后易出现尺寸超差、扭曲和翘曲等现象。当前,随着我国航空航天领域的蓬勃发展,对薄壁件的高质量加工需求愈来愈迫切,以满足航空航天装备轻量化、高精度发展的需要。加工状态的难以精确监控和加工变形的难以精准控制使得薄壁零件的加工过程面临着成本高、制造周期长的现实挑战。目前,有效解决此加工难点也是国际上科学领域和工程领域公认的难题。

本期“薄壁件加工状态监控与变形控制”邀请领域内的优势单位进行撰稿,经过严格的专家评审和期刊审查,收录8篇代表性论文。专题内容涉及薄壁件加工过程刀具磨损检测、多信号融合、动态特性分析、数字孪生模型搭建和加工变形与颤振控制等关键技术,丰富了薄壁件加工过程的基础理论、技术方法以及工程应用技术,对读者了解我国航空航天薄壁件加工过程研究进展和发展趋势具有重要参考价值。

《航空制造技术》作为航空制造行业中有影响力、有权威性的期刊,旨在为广大航空制造科研人员提供开放的学习交流平台。期刊注重对航空制造领域新兴材料、工艺、技术的报道,如对于复合材料加工制造相关科研进展及成果的报道,在思路、试验和分析方法等方面,使读者受益匪浅。

期刊专家审稿专业,编辑校正认真负责,时刻秉持对作者和读者认真负责的态度严格把关所投稿件,坚持为读者提供高质量报道。祝愿《航空制造技术》越来越好,继续为我国航空事业的发展贡献力量。

大连理工大学 杨龙允



《航空制造技术》是聚焦航空制造领域先进技术和前沿研究的综合性科技期刊和核心期刊,关注特种加工、表面强化、激光加工、先进焊接、数字化装配等多个航空制造前沿领域,为航空制造前沿技术的学习交流和推广应用提供了广阔的开放平台。

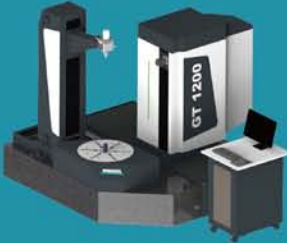
期刊审稿专家非常严谨认真,对投稿文章给出了许多专业的意见和建议,对文章质量的提高有很大帮助。编辑在作者投稿过程和进度咨询中都都非常热心地给予帮助和问题解答。真诚祝愿《航空制造技术》期刊越办越好,为航空制造领域工作人员推出更多的优质前沿成果,进一步推动我国航空制造业的发展与创新。

上海交通大学 薛贞浩





高速光学扫描测量解决方案



齿轮测量解决方案



汽车测量解决方案



无损测量工业 CT 解决方案



三坐标测量技术



3D 数字化解决方案



便携式测量解决方案



温泽测量微信公众号

温泽测量仪器(上海)有限公司

上海市青浦区崧秀路219号

电话: +86 21 5970 3088

传真: +86 21 5970 3082

邮箱: info@wenzel-cmm.cn

## 创新计量解决方案 INNOVATIONS IN METROLOGY

## 专稿 Feature

- 14 航空航天难加工材料切削加工过程模拟与智能控制综述  
赵彪 王欣 陈涛 丁文锋 傅玉灿 徐九华 赵正彩 陈清良  
A Review on Cutting Process Simulation and Intelligent Control of Difficult-to-Cut Materials in Aerospace Industry  
ZHAO Biao WANG Xin CHEN Tao DING Wenfeng FU Yucan XU Jiuhua ZHAO Zhengcai CHEN Qingliang

## 封面文章 Cover Story

- 30 航空航天薄壁件铣削过程加工状态监测研究进展  
岳彩旭 周天祥 秦怡源 王乐 胡德生  
Research Progress on Machining Condition Monitoring During Milling of Aerospace Thin-Walled Parts  
YUE Caixu ZHOU Tianxiang QIN Yiyuan WANG Le HU Desheng

## 论坛 Forum

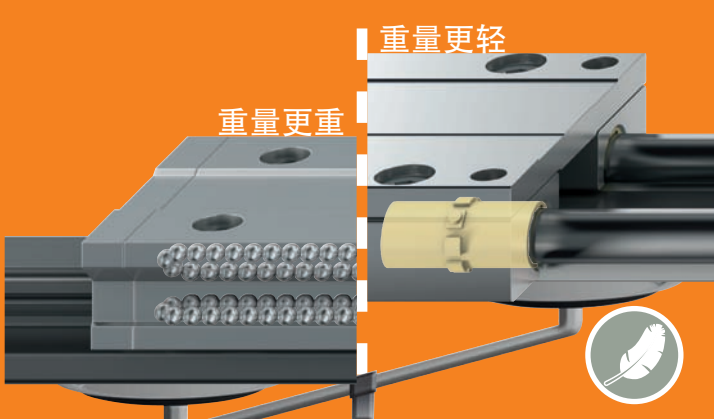

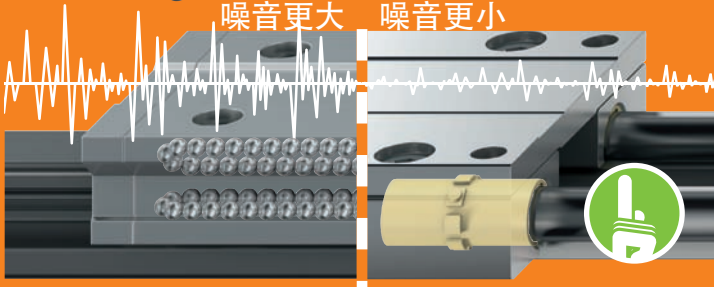
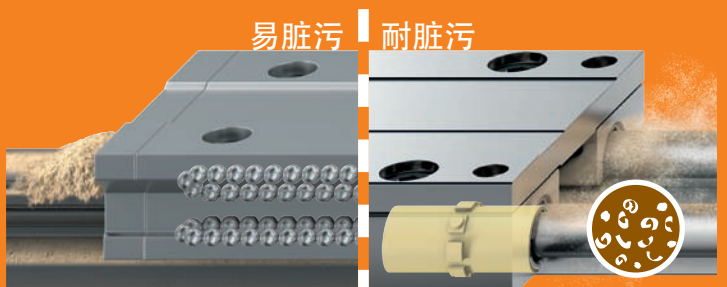
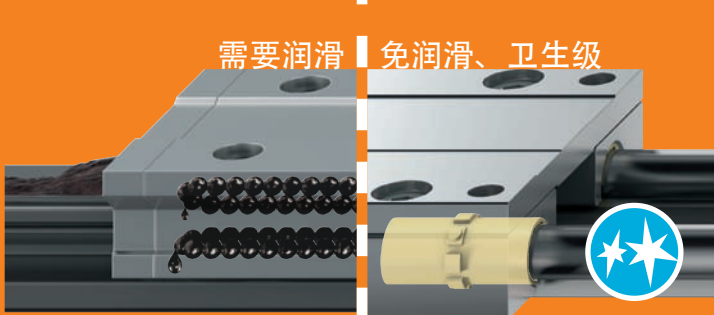
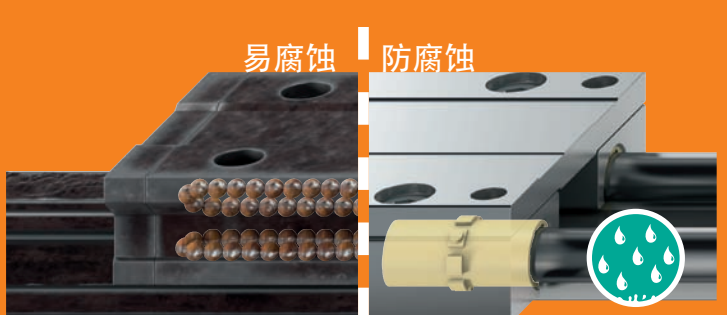
### 薄壁件加工状态监控与变形控制

#### Processing State Monitoring and Deformation Control of Thin-Walled Parts

- 46 数字孪生驱动的薄壁件铣削刀具磨损状态识别方法  
宋清华 彭业振 王润琼 刘战强  
Tool Wear State Identification Method of Thin-Walled Parts Milling Process Driven by Digital Twin  
SONG Qinghua PENG Yezhen WANG Runqiong LIU Zhanqiang
- 53 基于附加质量和电涡流阻尼的薄壁件铣削振动抑制  
刘海波 张鸿泽 王诚鑫 苗欢欢  
Vibration Suppression of Thin-Walled Parts Based on Additional Mass and Eddy Current Damping  
LIU Haibo ZHANG Hongze WANG Chengxin MIAO Huanhuan
- 61 基于高参数均匀性的叶片曲面光顺造型方法  
田野 宁涛 陈志同  
Smooth Modeling Method With Uniform Parameters for Blade Surface  
TIAN Ye NING Tao CHEN Zhitong
- 70 基于浮动装夹自适应加工工艺的薄壁件加工变形控制技术研究  
刘述明 扈博琴 张春龙 罗兆柱  
Research on Deformation Control Technology for Thin-Walled Parts Based on Responsive Fixture Adaptive Machining Process  
LIU Shuming HU Boqin ZHANG Chunlong LUO Zhaozhu

# 运动应用？用塑料！

## ...drylin®直线轴承为您节约40%成本...

 <p>重量更重   重量更轻</p>	 <p>不耐冲击   耐冲击</p>
 <p>噪音更大   噪音更小</p>	 <p>易脏污   耐脏污</p>
 <p>需要润滑   免润滑、卫生级</p>	 <p>易腐蚀   防腐蚀</p>

易格斯工程塑料轴承可在线计算其使用寿命：[www.igus.com.cn/drylin](http://www.igus.com.cn/drylin)

广告索引号23-1013



## 研究论文 Research

- 78 PVD涂层刀具铣削GH4169高温合金薄壁件性能对比  
于忠光 浦荣 韩占龙 于浩南 陈章燕  
Performance Comparison of PVD Coated Cutting Tools in Milling of GH4169 Superalloy Thin-Walled Workpiece  
YU Zhongguang PU Rong HAN Zhanlong YU Haonan CHEN Zhangyan
- 85 基于深度神经网络的机器人加工系统模态特性预测  
李法贵 王若奇 孙玉文  
Modal Characteristics Prediction of Robotic Machining Systems Based on Deep Neural Network  
LI Fagui WANG Ruoqi SUN Yuwen
- 93 面向复材构件的临时紧固件安装工艺测试与验证装置设计  
凡志磊 严晨 黄稳 王华  
Design of Testing and Verification Device for Installation Technology of Temporary Fasteners to Composite Components  
FAN Zhilei YAN Chen HUANG Wen WANG Hua
- 100 非实例化标准件消耗式装配工艺设计技术研究  
邓海洲 王大涛 王良 贾晓亮 刘明星 宋洪鹏  
Research on Consumable Assembly Process Design Technology of Non-Instantiated Standard Parts  
DENG Haizhou WANG Datao WANG Liang JIA Xiaoliang LIU Mingxing SONG Hongpeng
- 107 角盒类零件加工特征识别方法  
沙智华 李伟奇 马付建 王国庆 王紫光 张生芳  
Machining Feature Recognition Method of Corner Box Parts  
SHA Zhihua LI Weiqi MA Fujian WANG Guoqing WANG Ziguang ZHANG Shengfang
- 114 不同自动铺丝工艺参数对T800级碳纤维/环氧复合材料孔隙率的影响研究  
刘钧天 陈萍 闫超 肖鹏  
Research on Influence of Different Automatic Fiber Placement Parameters on Porosity of T800 Carbon Fiber/Epoxy Composite  
LIU Juntian CHEN Ping YAN Chao XIAO Peng
- 119 一种60 kV焊接用太空电子枪的设计研究  
王海洋 董全林 赵然 张永泰 王思展 刘业楠  
Design and Research of a Space Electron Gun for 60 kV Welding  
WANG Haiyang DONG Quanlin ZHAO Ran ZHANG Yongtai WANG Sizhan LIU Yanan

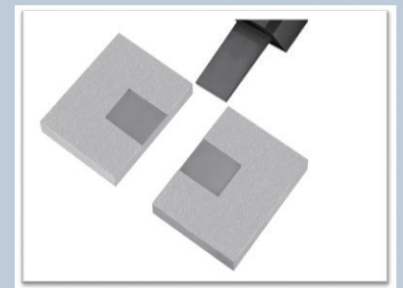
# DMNC-EDM

## ADV 600

### 精密数控电火花成形机床

### PRECISION CNC SPARK MACHINE

配置 windows 系统,自动升降油槽、丰富的数据接口可兼容机械手、电极物料架等,可方便的实现自动化及无人加工,兼容柔性线,及工厂自动化系统,可配备高精度 C轴、B轴,能进行五轴五联动精密加工,并预留六轴六联动接口



[www.dmnc-edm.com](http://www.dmnc-edm.com) 北京迪蒙数控技术有限责任公司 010-60775392

广告索引号22-1011

## 清华大学发现控制泡沫陶瓷干燥与烧结过程收缩率的新方法

泡沫陶瓷作为一种高气孔率的陶瓷,在干燥与烧结过程中的收缩率非常大,一般可超过50%,一直以来是陶瓷界的一大难题,严重影响了泡沫陶瓷器件的制备与使用。

2022年11月,清华大学材料学院杨金龙教授课题组发现了一种控制泡沫陶瓷干燥与烧结过程收缩率的新方法,利用醇类分子与氧化物表面基团的吸附作用,增强了发泡剂在颗粒表面的吸附量,通过发泡剂分子链的疏水聚集

作用,将坯体的收缩率控制在20%以下。该方法中,醇类分子对体系中界面的调节作用代替了传统酸碱调节pH值的方法,成为了一种条件温和可控的制备高强度、低收缩泡沫陶瓷材料的新方法。

传统酸碱辅助发泡制得的泡沫陶瓷,线收缩率在35.5%。文章报道的醇类分子辅助发泡剂制得的样品,在相同温度烧结后的收缩率为18.8%,并保持着94.4%的气孔率。同时,该泡沫坯体在未烧

结状态下,可承受一定的压力。烧结后,其抗压强度达到1.32~1.69 MPa。泡沫陶瓷的隔热性能为0.0635 W/(m·K)。

同时,该体系的泡沫坯体可以用于3D打印直写技术,制备不同形状的泡沫陶瓷材料。所制得的未经烧结的坯体可在水环境下维持10天(或更长时间)气孔结构不发生变化,亦可在乙醇环境下维持3天(或更长时间)气孔结构不发生变化。这说明该坯体可以被直接用做一些基体材料,如组织工程支架、多孔涂层、隔热材料等,具有广阔的工业化前景。

近日,该研究成果以 *3D printable ultra-highly porous and mechanically strong foam materials for multiple applications* 为题发表在 *Advanced Functional Materials* 上。

(本刊记者 大漠)

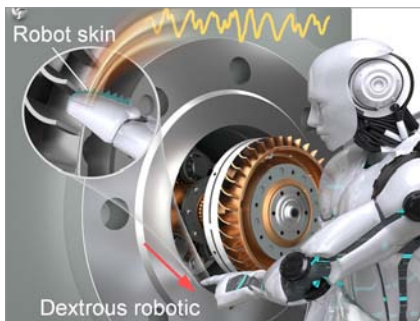
## “仿生门控”柔性传感新模式被提出

国内外学者围绕柔性传感开展了大量的研究工作,2021年诺贝尔生理学/医学奖获得者 Ardem Patapoutian 教授发现新的机械敏感离子通道。机械门控离子通道位于细胞膜上的机械力受体,能够被不同形式的机械力激活并拉动离子通道打开,使细胞外阳离子涌入细胞内,从而形成生理电信号,实现细胞膜表面应力变化的高灵敏感知。

受生物组织细胞膜上的机械门控离子通道启发,西安交通大学邵金友、陈小亮团队通过应变分布调控策略在镶嵌式导电通路内定域生成电子门控结构,开发了高灵敏度、快响应、高稳定的机器人滑觉皮肤。机器人滑觉皮肤表面的微金字塔阵列可模仿

皮肤指纹结构与物体表面进行滑动交互,将动态应变传递至机械门控感知结构实现导电通路的开闭切换,从而将触觉信息编码为电信号。嵌入式网格化的导电通路设计可有效提升感知灵敏度,同时削弱传导路径的应变,抑制敏感材料裂纹产生,实现仿生滑觉皮肤灵敏度和稳定性的协同增强。该滑觉皮肤能够灵巧识别复杂结构件表面纹理,对机械加工部件的粗糙度的辨识度优于  $R_{a0.8} \mu\text{m}$ ,能够直接识别5 mm线宽的精细表面纹理,响应频率达485 Hz,为目前相关领域报道的最优值,在机器人智能识别和交互反馈方面具有广阔的应用前景。下图为机器人皮肤滑动触觉感知。

(本刊记者 大漠)



## 中科院金属所制备出轻质高强韧高阻尼镁-Max相仿生金属陶瓷

金属和陶瓷是工程应用最广泛的两类结构材料,然而其绝对强度、刚度以及断裂韧性偏低,一定程度上限制了它们的广泛应用。

由金属和陶瓷组成的复合材料,又称金属陶瓷,有望综合两相的性能优势,同步获得轻质高强韧高阻尼性能。近日,中国科学院金属研究所材料使役行为研究部仿生材料设计团队与轻质高强材料研究部及国内外科研人员合作,选用兼具金属和陶瓷特性并且与镁界面润湿性良好的Max相陶瓷作为组元,利用含氧气氛下的可控球磨工艺将Max相剥离成亚微米尺度薄片,进而利用真空抽滤实现陶瓷薄片的择优定向排列,最后将镁熔体浸入部分烧结的多孔陶瓷骨架中,研制了具有超细尺度三维互穿类贝壳结构的新型镁-Max相仿生金属陶瓷材料。该仿生金属陶瓷材

料具有以下特点:(1)仿生空间构型。Max相薄片择优定向排列,镁填充薄片之间的空隙,有助于减弱裂纹尖端的有效应力强度水平,从而起到有效的增韧作用。(2)两相三维互穿。连续的镁有助于保留其高阻尼性能,连续的Max相有助于获得高强化效率,减轻应力集中,延缓因各单一相或两相界面损伤导致整体过早断裂。(3)超细结构尺度。镁和Max相的特征尺寸均在亚微米到纳米范围,充分发挥陶瓷组元的强化作用,并且获得高密度的两相界面,通过促进位错在界面处形成与可逆运动提高阻尼性能。

新型镁-Max相仿生金属陶瓷在承载、减振等方面具有独特优势,有望应用于航空航天、精密仪器等领域,该仿生设计思路也可开发新型高性能金属陶瓷材料提供有益启示。(本刊记者 大漠)

## 东北大学在超高强钢领域实现新突破

2023年1月13日,东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室王国栋院士/袁国教授研究团队在 *Science* 上以 *Ductile 2-GPa steels with hierarchical substructure* 为题,发表了在超高强钢铁材料增塑机制及组织创新设计方面的最新研究成果。

同时提升强度和塑性,是钢铁材料领域长期以来存在的重大理论难题,也是从基础研究到技术创新和应用实践的瓶颈。尤其当强度达到2000 MPa级别时,塑性出现断崖式下降,均匀延伸率普遍低于10%,其根本原因在于传统马氏体的初始高密度位错难以继续增殖,

且无序排列的几何取向结构微观塑性变形极不均匀,容易产生局部应力/应变集中。

面对上述挑战,研发团队创新提出“马氏体拓扑学结构设计+亚稳相调控”协同增塑新机制,成功制备出系列低成本C-Mn系新型超高强钢,打破了超高强钢对复杂制备工艺和昂贵合金成分的依赖,也突破了现有2000 MPa级马氏体高强钢抗拉强度-均匀延伸率的性能边界。同时,提出简单高效的制备工艺路线,构筑出一种全新的拓扑学双重重有序排列的马氏体和多尺度亚稳奥氏体的纳米级多层次组织结构。该组织结构通过在变形过程中

诱发板条界面位错滑移、界面塑性和相变诱发塑性(TRIP)等多种增强增塑机制,促使材料具有持续较高的加工硬化能力,大幅度提升其强度和塑性,实现了1600~1900 MPa屈服强度,2000~2400 MPa抗拉强度和18%~25%均匀延伸率的极致性能。

突破金属材料性能极限是近年来材料领域研究的热点与难点,该研究提出了马氏体/奥氏体多层次结构设计新理念,充分挖掘材料潜力,加深了对马氏体结构调控以及变形机理的理解和认识,对推动低成本、大尺寸超高强塑性钢铁材料的制备和应用具有重大现实意义。

(本刊记者 大漠)



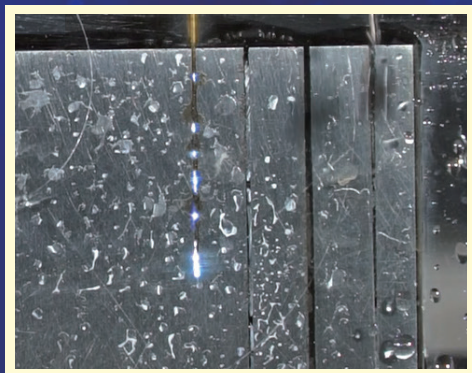
DIC<sup>®</sup>-305

# 电火花钻孔液

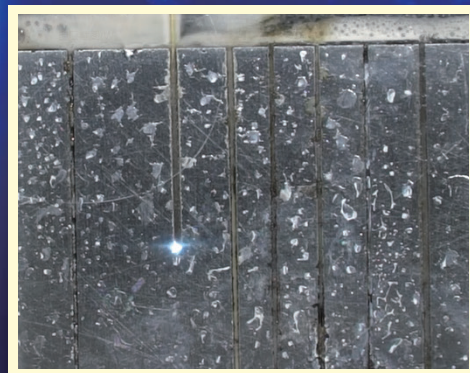
*EDM drilling fluid*

## 无锥度 电极损耗小

加工中电极不产生锥度 加工所得孔腔无锥度



采用水穿孔



采用 DIC<sup>®</sup>-305 钻孔液穿孔

北京东兴润滑剂有限公司

电话: 010-64368739 13901051209 传真: 010-64343485 邮编: 100102 广告索引号22-1004

地址: 北京市东直门外东辛店 网址: [www.dic.cn/www.bjdxr.com](http://www.dic.cn/www.bjdxr.com) E-mail: [rh6816@163.com](mailto:rh6816@163.com)

产品执行标准: Q/CY DSR 004-2012

环境体系证书编号: 00119E30065R3S/1100  
质量体系证书编号: 00119Q30178R4S/1100

## 北理工开发出一种能自发生长的水凝胶

近日,北京理工大学宇航学院张凯教授团队联合南方科技大学机械与能源工程系刘吉教授团队,受角质蛋白自生长行为的启发,提出了液态金属和水性单体溶液界面处的连续自由基聚合策略,并实现了水凝胶的自生长和再生。团队以丙烯酰胺(AAm)单体为例,用液态金属镓铟合金(EGaIn)作为引发剂,EGaIn-AAm水溶液界面处可以连续产生自由基,引发界面处单体聚合,生成PAAm水凝胶;

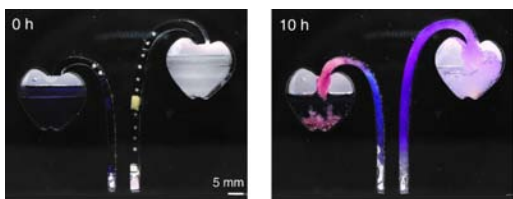
EGaIn与水反应生成氢气,PAAm水凝胶形成气孔,降低其密度,从而促进生长出的PAAm水凝胶向上移动,并在界面处生长出新的PAAm水凝胶。

该团队进一步将先前自生长得到的PAAm水凝胶添加到AAm单体溶液中,发现水凝胶可以继续生长,随着水凝胶材料的自发连续生长,在特定的容器管道内,这类自生长水凝胶可以沿着通道向上延伸,最终到达上层苹果形容器内。

该团队将上述自生长的“动力”转化为“驱动力”,设计了一种基于自生长水凝胶的高效制动器,成功将一特定容器打开(约需53 N)。该团队研发的高含水量自生长水凝胶(质量分数71.5%)不需要输入任何额外能量,而且单位体积的驱动力显著高于已报道水凝胶类制动器。基于此,这些自生长水凝胶易于使用、可控、高效,特别适合用于微型设备或自发动器。

该研究以 *Bioinspired self-growing hydrogels by harnessing the interfacial polymerization* 为题发表在 *Advanced Materials* 上。

左图为自生长水凝胶模仿自然藤本植物爬行行为。(本刊记者 大漠)



## 钛合金共格孪晶边界中溶质偏析引起的异常沉淀

针对制备钛合金的力学性能较差,许多学者试图研究 $\alpha'$ 马氏体分解与力学性能之间的关系。然而对 $\alpha'$ 分解机制和 $\beta$ 形成机制在原子尺度上的研究相对较少。日前,来自中南大学等单位的研究人员发现 $\alpha'$ 马氏体中的 $\beta$ 相在Mo分离的全相干CTBs上不均匀析出,与 $\alpha'$ 形成不寻常的Potter OR。相关论文以 *Unusual precipitation induced by solute segregation in coherent twin boundary in titanium alloys* 为题发表在 *Acta Materialia* 上。

对FFT的仔细分析表明, $\beta$ 析出相与 $\alpha'$ 马氏体及其相变孪晶之间为 $(01-1)\beta // (10-11)\alpha'$ 、T和 $[-111]\beta // [1-210]\alpha'$ 、T,也称为Potter OR,与传统上认为 $\beta$ 相的非均匀析出不同,Mo是一种典型的 $\beta$ 稳定元素,它有很强的向 $\beta$ 相分配的倾向。

$\beta$ 析出相的形成会吸引Mo原子,在析出相周围形成一个Mo耗竭区。在该析出相的上方和下方有一条连接CTB的直线,证明 $\beta$ 析出相恰好在孪晶边界的相干区域(即CTB)上形成。

在Ti-4%Mo(质量分数)合金 $\alpha'$ 马氏体中观察到Mo偏析CTBs上 $\beta$ 相的不均匀析出。在CTB上形成的 $\beta$ 析出相与马氏体及其相变孪晶均具有Potter OR。它的析出是由CTB中每个压缩位点周围的特定结构和CTB中的Mo偏析引起的。Mo在CTB中的偏析导致分离的原子列发生了不寻常的平面外位移,这不仅使中间结构与 $\beta$ 相几乎相同,而且提供了 $\beta$ 析出所需的高Mo浓度。计算结果表明,具有Mo偏析的CTB上形成的 $\beta$ 在能量上是有利的。

(本刊记者 大漠)

## 4D 打印各向异性多孔结构

水对生物的繁殖至关重要。纳库露子花(*Delosperma nakurense*) 在干旱地区可表现出显著的生存能力,其细长的细胞壁在吸湿后沿垂直于纤维素排列的方向膨胀。这种应对外界刺激的湿响应生存策略不仅对生物体本身具有重要意义,而且从湿响应驱动的角度为科学研究提供了巨大的启发。

近日,来自亚利桑那州立大学的学者报道了一种多功能的4D打印技术,即液晶模板辅助的瓮光聚合(LCT-VPP),它可以利用光聚合诱导相分离(PIPS)和液晶(LCs)电排列来制备具有湿响应能力的生物激励多孔结构。在提取非反应性LCs后,LCs/纳米填料复合材料中

的PIPS导致亚微米梯度多孔结构的形成。电场使液晶的可编程排列成为可能,反过来又延长了多孔结构并排列了纳米填料。此外,通过模板化LC可编程排列的纳米填料增强了变形程度,因此所得复合材料表现出高形状控制精度、快速动态响应和高可靠性。该研究为设计具有特殊空间分布的多孔结构的生物智能材料提供了一个新的视角。

相关文章以 *4D printing of seed capsule-inspired hygro-responsive structures via liquid crystal templating-assisted vat photopolymerization* 为题发表在 *Advanced Functional Materials* 上。

(本刊记者 大漠)

## 力学所在钛合金超高周疲劳研究中取得新进展

长寿命、高可靠是重大工程装备的重要指标,特别是以先进航空发动机和高铁车轴为代表的部件,服役寿命内承受了超过 $10^7$ 甚至 $10^{10}$ 周次的循环载荷作用,进入了超高周疲劳(即 $10^7$ 周次以上的疲劳)研究范畴,这颠覆了传统基于疲劳极限(对应 $10^7$ 周次)的疲劳强度与寿命设计理念,成为近年来疲劳研究的前沿和热点。因此,揭示超高周疲劳的微观机理和规律等科学问题,建立疲劳寿命与疲劳强度的准确预测模型,将具有重要的科学意义和工程应用价值。

力学所非线性力学国家重点实验室微结构

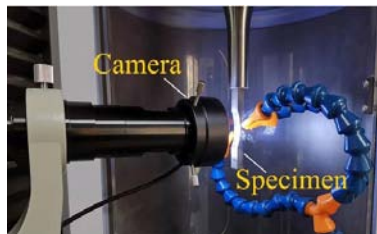
计算力学课题组以航空发动机用TC17钛合金和增材TC4钛合金为研究对象,揭示了疲劳载荷过程中形成的形变孪晶和纳米晶是钛合金超高周疲劳裂纹萌生和演化的重要因素,提出了钛合金超高周疲劳裂纹萌生和初始扩展机理;通过巧妙的变幅加载设计,测得超高周疲劳裂纹萌生和初始扩展区域的等效裂纹扩展速率在 $10^{-13}$ ~ $10^{-11}$  m/cycle量级,进而对超高周疲劳寿命进行了预测,预测结果与实验结果吻合。

研究发现,材料缺陷不仅会显著降低钛合金的疲劳性能,而且缺陷对高周和超高周疲劳行为的影响与其引入形式密切相关。对于材料内部缺陷,高周和超高周疲劳S-N曲线呈现连续下降特征,

而表面人工缺陷试样S-N曲线具有平台区特征。原位显微镜观测以及扫描电子显微镜和透射电子显微镜观测表明,与内部缺陷诱导的超高周疲劳失效不同,表面人工缺陷诱导的超高周疲劳未呈现伴随纳米晶粒形成的、缓慢的裂纹萌生和初始扩展过程;一旦裂纹萌生,裂纹将快速增长,试样在很少周次内发生失效。认为这种失效是疲劳载荷与时间相关过程(如水气影响、氢的作用等)的协同作用所致。进一步提出试样几何形状和表面缺陷对钛合金高周和超高周疲劳强度的影响模型。该模型不但能用于关联缺陷对钛合金疲劳强度的影响,而且也有效用于文献中缺陷(包括裂纹)对一些金属材料高周疲劳强度的影响。

左图为含表面人工缺陷TC17钛合金超高周疲劳原位显微镜观测。

(本刊记者 大漠)



# NORTON

®

SAINT-GOBAIN

## 诺顿助您提高生产力

We Boost Your Productivity



尖端磨削产品



专业技术服务



数字化磨削方案



机器人打磨应用



欢迎关注我们的微信

圣戈班磨料磨具中国

客户服务热线:

400 888 0198

Saint-Gobain Abrasives China

[www.saint-gobain.com.cn/abrasives](http://www.saint-gobain.com.cn/abrasives)

广告索引号23-1012

SAINT-GOBAIN

引文格式: 赵彪, 王欣, 陈涛, 等. 航空航天难加工材料切削加工过程模拟与智能控制综述[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 14-29.

ZHAO Biao, WANG Xin, CHEN Tao, et al. A review on cutting process simulation and intelligent control of difficult-to-cut materials in aerospace industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 14-29.

# 航空航天难加工材料切削加工过程模拟与智能控制综述\*

赵彪<sup>1</sup>, 王欣<sup>1</sup>, 陈涛<sup>1</sup>, 丁文锋<sup>1</sup>, 傅玉灿<sup>1</sup>, 徐九华<sup>1</sup>, 赵正彩<sup>1</sup>, 陈清良<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 随着航空航天关键构件服役性能要求的不断提升, 高性能钛合金、镍基高温合金、高强度钢等难加工材料大量应用到航空发动机等重大装备。切削加工是高强韧难加工材料的重要加工方法, 在加工过程中普遍存在切削力大、切削温度高、工具磨损严重和加工质量差的问题。针对当前航空航天难加工材料切削加工过程切削力、切削温度、工具磨损及表面质量的仿真技术与智能控制技术进行了系统性的总结和梳理, 分析了当前研究存在的主要问题与挑战, 对切削加工过程仿真模拟与控制技术的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 有限元仿真; 智能控制; 切削力; 切削温度; 刀具磨损; 表面完整性

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.014



赵彪

助理教授, 博士, 研究方向为高效精密加工技术。

随着航空航天领域高端装备及关键构件对功重比、可靠性、使用寿命等方面的要求不断提升, 对相关高性能难加工材料, 如钛合金、镍基高温合金、高强度钢等的加工质量、效率和成本等也提出了更高的要求。这些材料的加工过程普遍存在颤振、刀具崩刃、加工表面烧伤、加工质量不稳定以及效率低等一系列问题, 给加工制造带来了极大挑战。切削加工是航空航天难加工材料及关键构件加工制造的主要方法, 其技术水平对零件制造质量有重要影响。切削力、切削温度、刀具寿命、加工表面质量是切削加工研究的主要对象, 如何准确预测与控制这些加工过程量一直是切削加工领域的重点和难点问

题, 也是实现难加工材料高品质、高效率 and 低成本加工的前提条件<sup>[1-2]</sup>。

随着计算机技术的快速发展, 智能控制在切削加工中的应用也愈加广泛。有限元仿真技术功能强大, 可利用数学近似的方法对真实切削过程进行模拟, 实现加工过程量(如切削力、切削温度、刀具磨损和表面完整性)的预测, 在提高材料加工质量、加工效率和降低工业成本等方面的应用有着广阔的前景<sup>[3-4]</sup>。切削加工过程的智能控制主要包括刀具、工件以及机床的状态监测, 信息采集与分析, 采用算法和智能技术对加工状态进行判断, 通过控制模块对加工参数等进行实时调整以及采取增加刀具刚度进行夹具位置补

\* 基金项目: 国家自然科学基金(92160301, 52175415, 52205475); 航空发动机及燃气轮机基础科学中心重大项目(P2022-A-IV-002-001); 江苏省自然科学基金(BK20210295); 机械传动国家重点实验室开放基金(重庆大学)(SKLMT-MSKFKT-202101)。

偿等内容<sup>[5-8]</sup>。

近年来,国内外学者对航空航天难加工材料切削加工过程开展了大量的有限元仿真及智能控制研究,围绕材料切削过程中切削力、切削温度、刀具磨损以及加工表面完整性进行了预测和控制,如图1所示<sup>[9-19]</sup>。切削力主要受工件材料、加工参数、刀具种类及几何结构参数等的影响,是影响加工过程的主要因素之一。切削温度也是加工过程的一个重要过程量,为了降低切削区域的温度,不同隔热涂层的刀具以及冷却方法应运而生。在刀具磨损方面,开发了多种刀具预测模型以对刀具磨损进行预测和控制。同时,为了提高加工表面完整性,围绕表面粗糙度、白层、显微组织、残余应力等开展了大量研究,针对不同工况提出了一些预测方法。对于切削加工过程智能控制,各过程参量的监测是对切削过程进行有效调控的基础,其中涉及传感器技术、刀具状态监测结构设计和信号采集及提取技术,而针对切削力、切削温度、刀具磨损以及加工表面完整性的控制则需要依赖于刀具内部或外置的调控系统以及调控算法。随着大数据、人工智能和互联网的发展,针对切削过程的控制将变得更加准确、稳定和实时。

### 1 切削加工过程模拟

切削加工过程模拟常用的方法有数值模拟和物理模拟。数值模拟能反映工艺过程的变化情况,在金属切削加工过程模拟研究中已得到了广泛应用。其中,有限元仿真技术可以直观分析工件加工材料去除过程、刀具磨损过程及加工表面创成过程,获得加工过程的物理量,有利于更加深入地理解加工机理,已成为数值模拟研究中的主流方法<sup>[20]</sup>。通过有限元仿真,也可对加工参数进行优化,提高加工稳定性,从而获得更好的加工质量。切削加工有限元仿真流程

如图2所示<sup>[21]</sup>。切削加工仿真的难点在于仿真过程的近似化处理,建立贴近实体的仿真模型以及进行合适的前处理(包括选用合适的本构模型、摩擦模型、网格划分方法等),从而确保仿真结果的可靠性。切削加工物理模拟主要采用模拟件或缩小比例的试验模型来代替对产品原型的加工,能保证模型与产品原型在物理本质上的一致性,相较于产品加工试验周期短、费用低,便于测量检测<sup>[22-23]</sup>。该方法在工厂实际切削加工中应用较多,但在文献研究方面鲜见,一般在产品原型投入加工前进行加工物理模拟以对前期技术研究进行验证,为产品原型加工提供参考,提高产品加工合格率,节约成本<sup>[24]</sup>。

仿真精度是进行切削加工过程仿真研究的前提,影响有限元仿真精度的主要因素有材料本构模型、切

屑-工件基体分离准则、网格划分方法及摩擦模型等。为提高切削加工过程的仿真精度,在材料特性方面,Johnson等<sup>[25]</sup>提出了John-Cook本构模型,并在切削加工仿真中得到了广泛应用,由于该模型未考虑应变-应变率-温度场之间的耦合关系,一些学者在后续研究中对其进行了修正,提出了考虑材料流变应力的修正J-C本构模型、考虑应力-应变-应变率-温度耦合效应的TANH修正J-C本构模型及考虑材料硬度变化的J-C本构模型<sup>[26-28]</sup>。此外常用的本构模型还有Zerilli-Armstrong模型、Nemat-Nasser细观模型和Power-Law模型<sup>[29-31]</sup>。在分离准则方面,目前应用较多的主要有两种,分别是几何准则和物理准则,根据实际情况选择合适的分离准则有助于提高仿真的准确性。常见的以物理变量作为

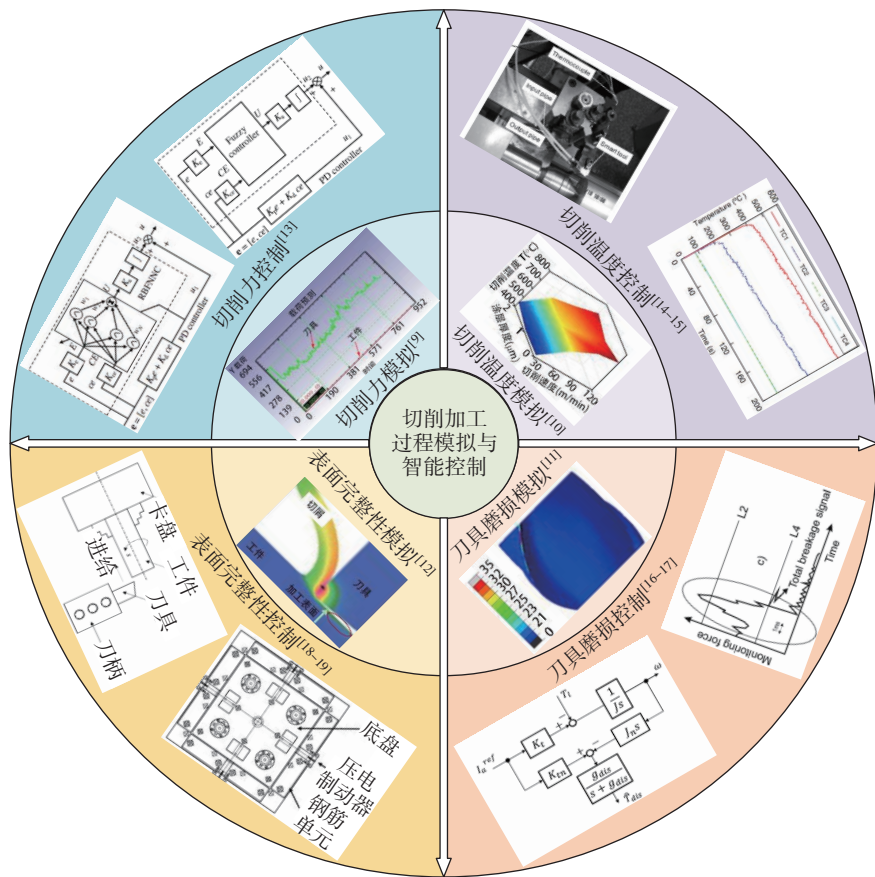


图1 切削加工过程模拟与智能控制技术研究  
Fig.1 Research on cutting process simulation and intelligent control

分离准则的物理准则有：考虑有效应变的 Cockroft-Latham 断裂准则、基于断裂能的分离准则及 J-C 模型分离准则<sup>[32-34]</sup>。在网格划分方法方面，目前主要有 4 种方法，即修正拉格朗日算法、欧拉算法、自适应拉格朗日-欧拉算法和欧拉-拉格朗日综合法<sup>[35-38]</sup>。不同网格划分方法侧重点不同，切削仿真过程可根据需要获取的特征信息选择合适的网格划分方法。在摩擦模型方面，仿真研究主要采用了一个分段函数摩擦模型，当摩擦处于黏结区时摩擦应力为剪应力；当摩擦处于滑动区时，摩擦应力为摩擦系数与法向应力的乘积，满足库仑摩擦定律。基于上述研究，学者们围绕航空航天难加工材料切削过程切削力、切削温度、刀具磨损和表面完整性的仿真开展了一系列研究，积累了诸多研究成果。

### 1.1 切削力模拟

切削力是评价材料切削加工性能的一个重要指标，对工件加工表面质量、尺寸精度和刀具使用寿命等有着重要的影响。材料特性、加工参数、刀具涂层、刀具种类及几何结构参数等是影响加工过程切削力的主要因素。

如图 3 所示，在刀具对切削力的影响研究方面，Prasad 等<sup>[9]</sup>建立了三维车削加工有限元模型(图 3(a))，采用硬质合金 TiCN 涂层刀具对钛合金 TC4 进行了加工仿真研究，并与试验结果进行了对比，两者相符。Özel 等<sup>[39]</sup>通过仿真计算对比分析了不同硬质合金涂层刀具(WC 涂层 / TiAlN 涂层/TiAlN+CBN 复合涂层)对车削加工钛合金切削力的影响，由于刀具涂层会增大刀具切削刃半径，该研究中以不同大小的刀具切削刃半径表示不同刀具涂层对切削加工仿真过程的影响，研究结果发现，多层涂层刀具相比无涂层刀具致使切削加工过程切削力增加，而单层涂层刀具作用效果相反。Zhang 等<sup>[40]</sup>建立了斜切三维有限元模型，如图 3(b)所示，模拟了刀具前角、后角角度对斜切钛合金 TC21 切削力的影响。材料模型选用了考虑热软化效应、应变及应变率的 J-C 本构模型，摩擦模型为改进的库仑摩擦模型，可根据切削过程的应力值自动确定摩擦状态，研究结果发现，随着刀具前角的增大，各方向切削力的变化趋势不同；随着刀具后角的增大，各方向上的切削力一致下降。

在材料特性与加工参数对切削力的影响研究方面，Ribeiro-Carvalho 等<sup>[41]</sup>研究了 J-C 本构模型、PL 本构模型及 PL-塑性损伤耦合模型 3 种不同材料本构模型对钛合金切削加工仿真切削力的影响，并通过试验数据对仿真结果的准确性进行了评价，研究表明，基于上述 3 种材料本构模型得到的仿真切削力与实际切削力误差小，准确性较高。Raznica 等<sup>[42]</sup>针对 Inconel718 合金切削加工仿真提出了一种新的塑性流动与损伤模型，将 J-C 本构模型与 CL 断裂准则结合用于损伤演化，损伤阈值由修正的 CL 断裂准则得来，仿真过程考虑了热边界条件和结构边界条件，如图 3(c)所示。Thi-Hoa 等<sup>[43]</sup>基于塑性应变的韧性断裂模型对铝合金高速铣削过程进行了有限元仿真研究，分析了不同切削速度、刀具间隙角等对切削力的影响，并通过田口法分析得到了加工的最佳参数。卜居安等<sup>[44]</sup>建立了难加工材料 GH4169 高速切削加工仿真模型，如图 3(d)所示，分析了加工参数对切削力的影响，结果发现，切削深度比切削速度对切削力的影响更大。从以上研究建立的仿真模型可以看出，当前车削三维仿真

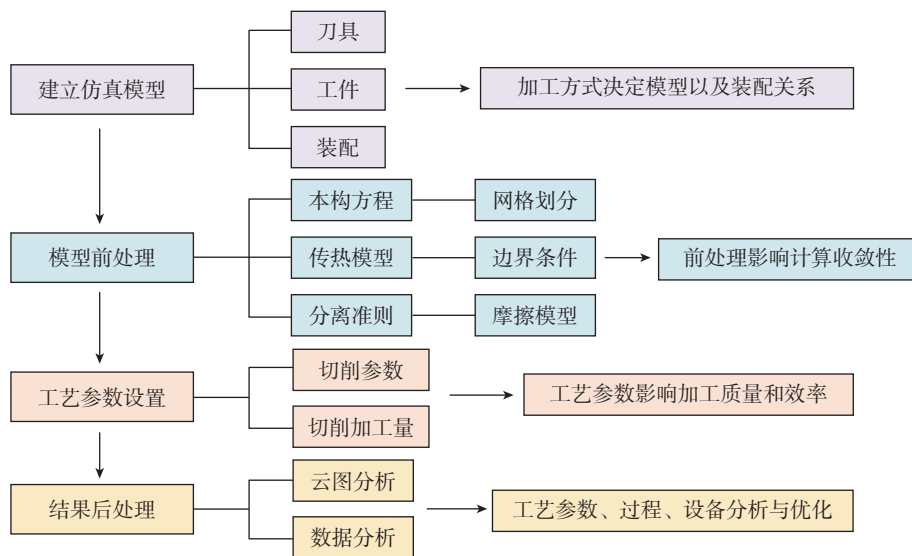


图 2 切削加工有限元仿真流程<sup>[21]</sup>  
Fig.2 Finite element simulation flow of cutting process<sup>[21]</sup>

模型居多,三维铣削模型相对较少,部分研究将三维铣削模型简化为二维模型,导致仿真精度降低。一些仿真模型考虑了刀具几何特征、刀具涂层、热边界和几何边界条件等对切削过程的影响,相比以往研究更加贴近切削加工实际条件。

## 1.2 切削温度模拟

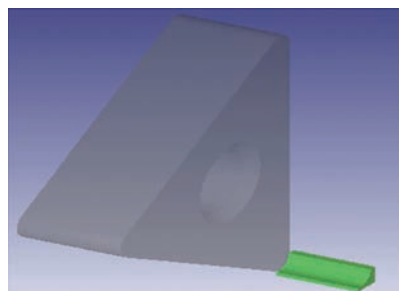
工件切削加工时,大部分机械能转化为热能,导致切削区域温度急剧上升,加快刀具磨损,严重限制了零件加工效率,影响加工表面质量<sup>[45]</sup>。因此,对切削温度进行模拟预测具有重要意义。

刀具是影响加工过程切削热的重要因素。Yen等<sup>[46]</sup>建立了不同涂层刀具的有限元模型。单层刀具涂层采用可以定义厚度和热学性能的独立薄层建模,复合涂层采用一层等效涂层来表示。基于上述模型开展了不同涂层对硬质合金刀具加工过程切削温度的影响研究,结果发现 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层对刀具的隔热作用小,但相比无涂层刀具,单层涂层和

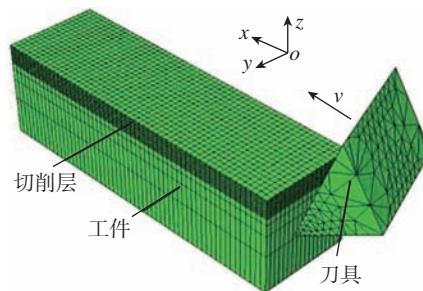
复合涂层均能降低切削过程的切削热。Zhao等<sup>[10]</sup>在研究中介绍了涂层刀具的建模方法,如图4(a)所示;探究了切削速度对切削温度的影响规律,结果如图4(b)所示。Hosseinkhani等<sup>[47]</sup>研究了不同刀具磨损阶段对温度分布规律的影响,仿真过程如图4(c)所示,结果发现切削区域的温度随着刀具磨损宽度的增加而增加。Zhang等<sup>[48]</sup>研究了单层涂层刀具( $\text{TiN}$ 、 $\text{TiAlN}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ )和多层涂层刀具( $\text{TiN/TiC/TiN}$ 和 $\text{TiAlN/TiN}$ )对H13硬化钢加工切削温度的影响,结果表明,刀具涂层材料和涂层厚度会影响涂层刀具的热导率影响稳态切削温度分布,涂层材料的热扩散率影响涂层刀具瞬态切削温度分布。郝广超<sup>[49]</sup>对 $\text{TiAlN}$ 涂层刀具在金属切削过程中形成的刀-屑接触热阻进行了研究,有限元模型中 $\text{TiAlN}$ 涂层厚度与刀具实际涂层厚度一致,刀具前刀面与切屑之间的摩擦系数由UMT-

Tribolab仪器测得。

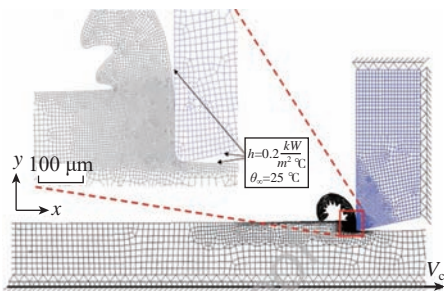
在冷却条件对加工过程切削温度影响研究方面,Zakaria等<sup>[50]</sup>对车削加工浸入式对流冷却进行了仿真分析,发现刀具冷却效果与流量大小呈正相关,而流量进出口管径大小对刀具冷却效果影响不明显。Liu等<sup>[51]</sup>通过仿真分析研究了低温液氮冷却对切削加工Ti-5553切削温度的影响,通过与干切削加工相比,发现该冷却条件可以显著降低切削温度。仿真分析中冷却过程通过换热窗口进行模拟,流体冷却效果通过在刀具-切屑接触区域设置局部冷却系数实现。Zhang等<sup>[52]</sup>在干切削和低温最小微量润滑切削两种条件下对300M钢进行了切削温度仿真和试验研究,结果表明,低温最小量润滑切削相比干式切削能显著降低切削温度。Chen等<sup>[53]</sup>为车削加工镍基高温合金仿真研究提出了一种将内冷与微量润滑冷却相结合的冷却方法,冷却介质与工件刀具之间的换热通过牛顿冷却公式计算。Shu等<sup>[54]</sup>提



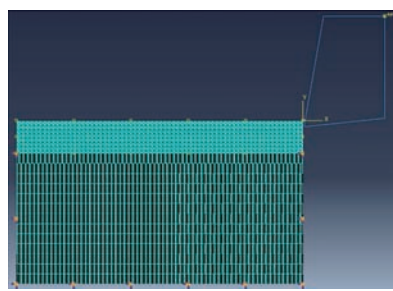
(a) 三维车削加工有限元模型<sup>[9]</sup>



(b) 斜切三维有限元模型<sup>[40]</sup>



(c) 考虑热边界条件和结构边界条件的有限元模型<sup>[42]</sup>



(d) 二维正交切削有限元模型<sup>[44]</sup>

图3 切削加工仿真模型与边界条件设置

Fig.3 Cutting simulation model and boundary condition setting

出了一种新型车刀冷却方法,该方法将内冷与喷雾冷却结合,可对车刀刀尖进行内外冷却,采用 Fluent 软件对车刀冷却性能进行了热-流-固耦合分析,仿真模型中空气和液滴的流动通过一个流体区进行模拟。刀具涂层的隔热作用有利于降低切削过程刀具的温度,降低刀具磨损速度。当前刀具磨损仿真研究能实现单层涂层的模拟,可以定义涂层的厚度和热学性能,但对于复合涂层的模拟,目前采用单层等效涂层来代替,在热力学性能定义方面仍存在偏差,影响仿真结果准确性。

### 1.3 刀具磨损模拟

刀具磨损是工件切削加工常见的问题,尤其是对一些难加工材料,严重制约着工件加工质量,增大了加工成本。因此,对切削加工刀具磨损过程进行仿真研究有利于提高刀具使用寿命,节约成本。

刀具磨损模型直接影响有限元仿真精度,有效的刀具模型可以准确预测刀具磨损,降低试验工作量。

Cappellini 等<sup>[55]</sup>建立了 PCBN 刀具车削加工 AISI 52100 钢的刀具磨损模型以研究刀具磨损对加工过程的影响,该模型能根据磨损率函数更新磨损刀具的几何形状(图 5(a)),并在有限元软件中得到了实现,仿真结果与试验结果相符。Attanasio 等<sup>[56]</sup>对切削加工镍基高温合金 718 进行了有限元建模,对常规冷却液和液氮冷却(图 5(b))两种冷却条件下加工过程刀具磨损进行了仿真分析,经试验验证,该模型能有效评估冷却条件对刀具磨损的影响。陈燕等<sup>[57]</sup>建立了高速切削加工钛合金刀具磨损仿真模型,仿真过程考虑了刀具常见的 3 种磨损形式,经试验验证,采用的有限元方法可以用来预测刀具的磨损形貌。Lotfi 等<sup>[58]</sup>针对三维车削加工提出了一种考虑刀具后角的刀具磨损率修正模型,进行了仿真分析,如图 5(c)所示,模型的有效性通过试验结果进行了验证。Liu 等<sup>[11]</sup>为钛合金端铣加工仿真研究开发了一种有效的刀具磨损模型,能将不同

类型的刀具磨损模型嵌入到有限元模型中,通过模拟计算得到刀具磨损状态和形貌(图 5(d)),并同时建立了刀具磨损经验预测公式以快速预测刀具寿命。Wang 等<sup>[59]</sup>建立了新的磨损率模型,采用特定的自定义子程序对刀具切削加工进行了有限元模拟,同时开展了加工参数对刀具磨损的影响,结果表明,切削速度对硬质合金刀具寿命的影响相比进给速度更显著,高速干切钛合金合适的切削速度和进给速度分别为 90~150 m/min 和 0.1~0.2 mm/r。徐锦泮等<sup>[60]</sup>采用有限元仿真方法研究了刀具磨损形态对 TC4 切削加工过程的影响,包括前刀面月牙洼磨损和后刀面磨损,建立了相应的刀具磨损模型,结果表明,刀具磨损为前刀面或后刀面磨损时,切削力会随着刀具磨损增加而增大,而当刀具前后刀面同时磨损时,刀尖易发生崩刀。

### 1.4 切削表面完整性模拟

切削加工过程,由于切削力切削热的作用,会使工件加工表面形貌和

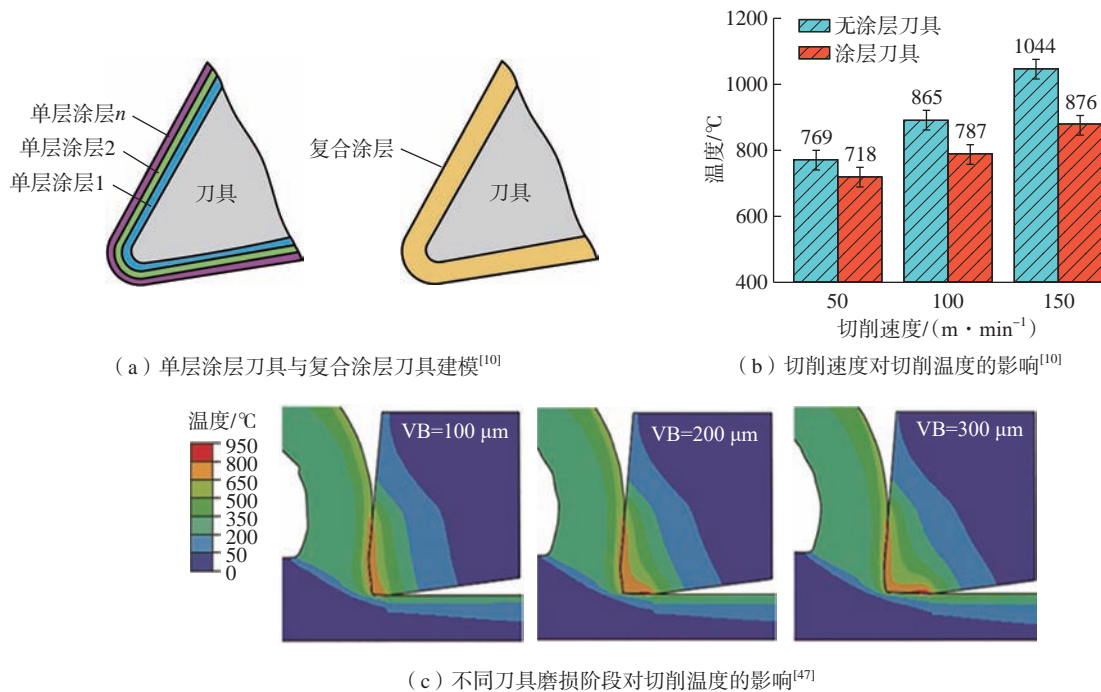


图 4 涂层刀具建模与不同加工条件对切削温度影响

Fig.4 Coated tool modeling and influence of different machining conditions on cutting temperature

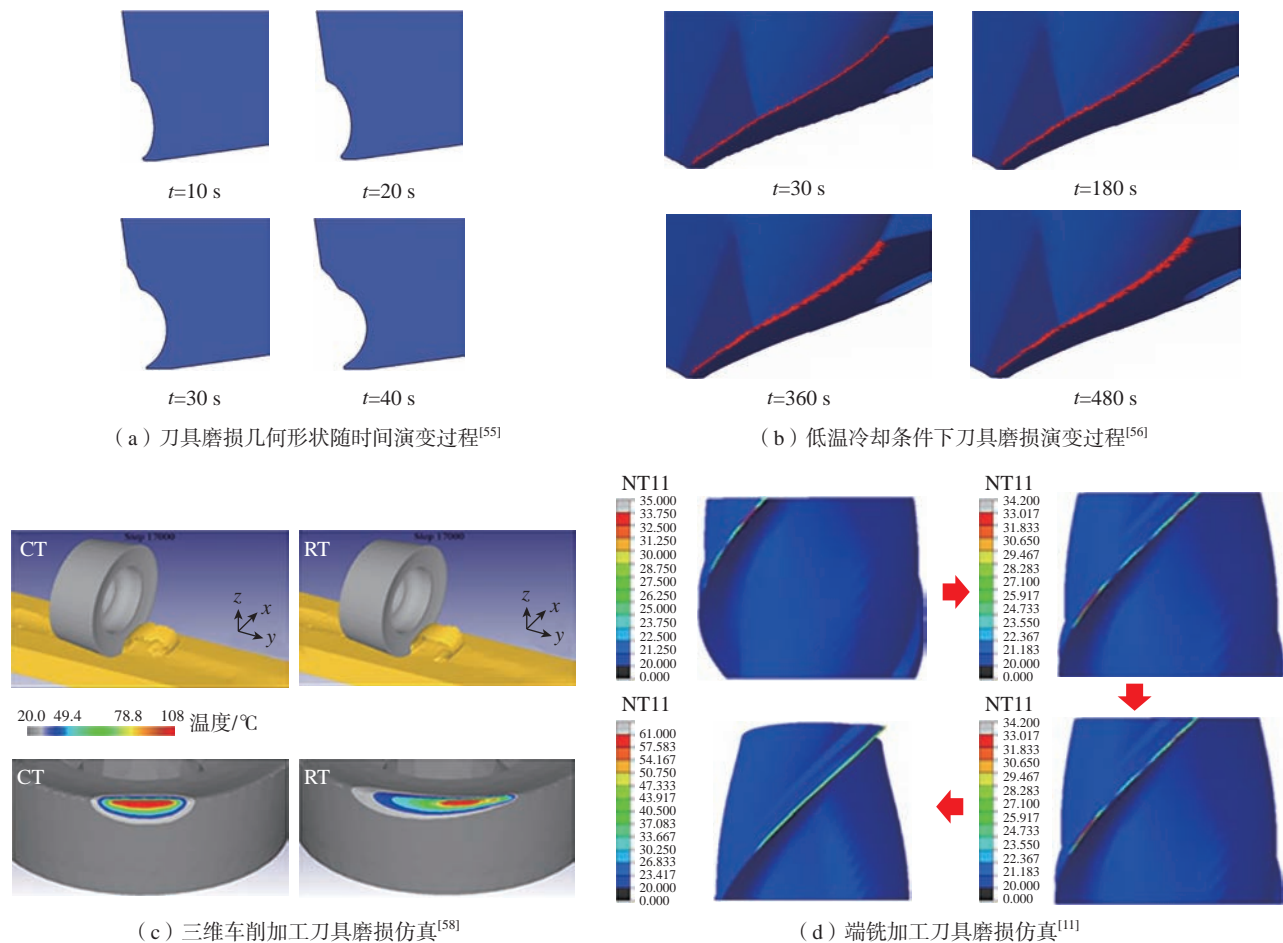


图5 不同加工条件下刀具磨损演变规律

Fig.5 Evolution law of tool wear under different machining conditions

表层材质发生变化,形成不同的表面完整性状态<sup>[12]</sup>。其中加工表面形貌可以用表面粗糙度、表面纹理、刀具划痕、宏观裂纹等表征量进行描述评价,表层材质则可以用显微裂纹、再结晶、残余应力、显微硬度等表征量进行评价。加工过程中不同的加工条件经热耦合作用导致的加工表面完整性也不尽相同,图6给出了表面完整性涉及的研究内容<sup>[61-62]</sup>。

残余应力、加工硬化、表面微结构及表面粗糙度是表面完整性研究的主要问题。Ramesh等<sup>[63]</sup>建立了切削加工 AISI 52100 钢有限元模型用于预测加工白层的深度,该模型考虑了应力-应变、相变塑性以及相变过程体积膨胀对相变温度的影响,经试验验证,预测的白层深度(图7

(a))与试验结果一致性较好。此外对残余应力进行了建模,分析了白层形成对径向和周向残余应力的影响。Outeiro等<sup>[64]</sup>通过有限元方法研究了刀具切削刃半径、刀具涂层及切削参数对 AISI 316L 钢表面残余应力分布的影响,结果表明,随着切削速度的增加,使用无涂层刀具加工时加工亚表面周向残余应力没有变化,而使用涂层刀具的加工表面周向残余应力会增加;在给定的几种刀具切削刃半径范围内,加工亚表面周向残余应力随切削刃半径增加而增加。Schulze等<sup>[65]</sup>为研究不同参数对加工表面完整性的影响,建立了适用于研究钛合金切削加工表面完整性的有限元模型,开发了一种连续网格划分方法使刀具与工件和

切屑充分接触,其中残余应力仿真云图如图7(b)所示。Wang等<sup>[66]</sup>对高速切削加工进行了系统的研究,发现在合适的加工参数下可以得到较好的加工表面质量,参数范围受工件材料、切削方式及刀具的影响。Sadeghifar等<sup>[67]</sup>讨论了切削加工残余应力及微观组织变化的预测方法,相变及晶粒硬度的仿真预测结果如图7(c)和(d)所示,解释了输入模型和参数对表面完整性的影响。张文盟等<sup>[68]</sup>对微铣削加工 GH4169 的加工硬化问题进行了仿真研究,重点分析了每齿进给量、主轴转速及铣削方式对加工表面硬化的影响。其仿真分析表明,随着加工参数的增大,硬化现象得到减弱;顺铣相比逆铣能降低表面硬化程度。

## 2 切削加工过程智能控制

智能控制一般通过在刀具周围布置传感器网络,对加工过程中的信息进行采集,并通过优化模块对加工过程进行优化。优化目标包含:切削

力、切削温度、刀具磨损和表面完整性。驱动装置根据优化结果完成对机床相关参数调整,实现对加工过程的控制。随着控制方法和技术的发展,模糊控制、学习控制、神经网络控制和预测控制等方法不断地应用于

切削加工过程的控制中。

### 2.1 切削力控制

刀具和工件相互接触和相对运动时在接触区必然会产生力的作用,作为切削加工中重要的状态信息之一,切削力和工件质量以及刀具状态

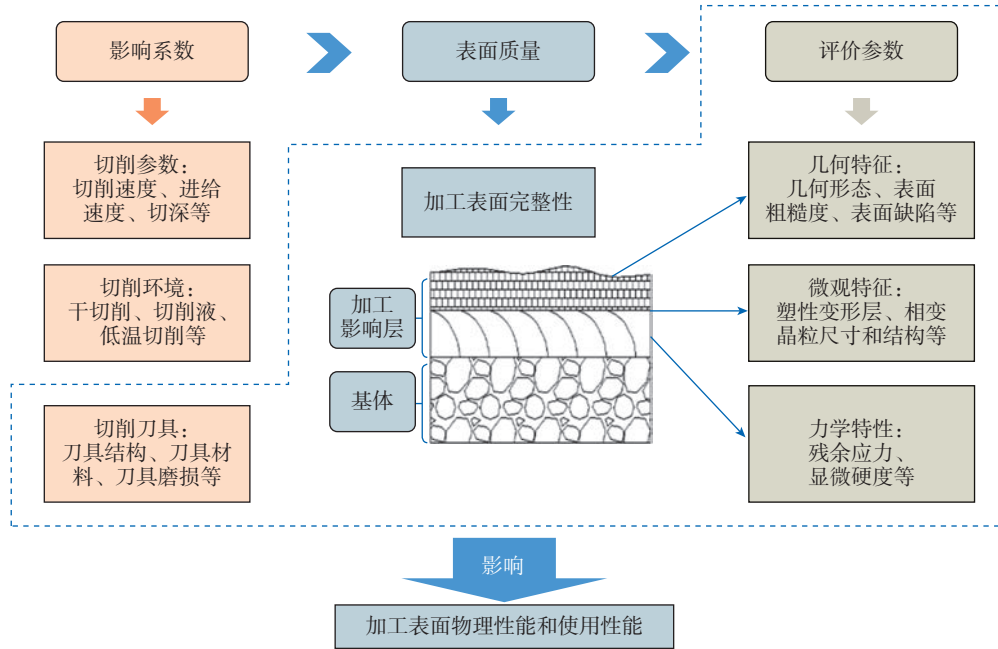
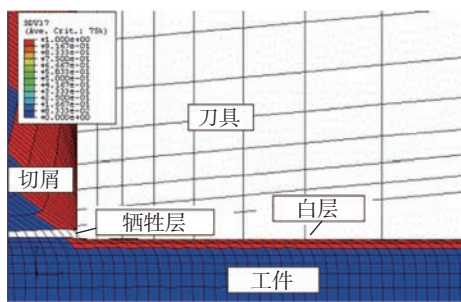
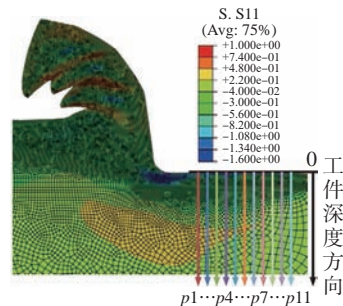


图6 表面完整性范畴<sup>[62]</sup>

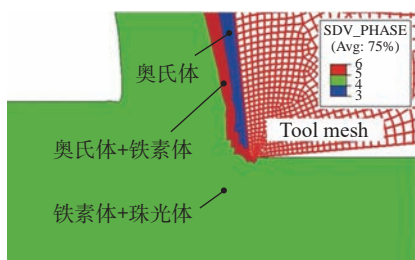
Fig.6 Scope of surface integrity<sup>[62]</sup>



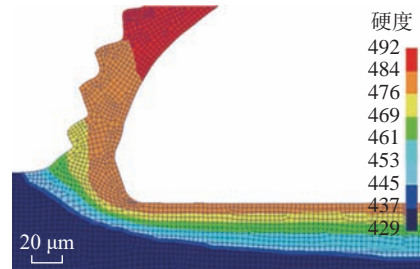
(a) 白层厚度仿真云图<sup>[63]</sup>



(b) 残余应力仿真云图<sup>[65]</sup>



(c) 相变预测<sup>[67]</sup>



(d) 晶粒硬度预测<sup>[67]</sup>

图7 加工表面完整性仿真

Fig.7 Simulation of machined surface integrity

密切相关。通过对切削力的控制可以避免因局部切削力过大引起的崩刃或断刀,并且可以减少加工中的振动,对实现高效高质加工具有重要意义<sup>[69]</sup>。

针对航空航天铝合金薄壁件加工质量差的问题,丁宏健等<sup>[70]</sup>基于恒切削力控制的办法,得到不同路径下的变工艺参量,分别针对恒进给速度、以控制切向力和控制轴向力为目标,变进给速度对切削参数进行优化,并通过控制工艺参量来控制切削力和刀具磨损。Xiong等<sup>[71]</sup>针对工业机器人低精度、弱刚度的特点,提出一种机器人铣削力控制方法,可以防止加工过程中的铣削力超调,图8(a)为试验装置,验证了该方法的有效性和准确性。Yao等<sup>[13]</sup>根据加工过程中的变量和非线性性质,提出采

用线性反馈比例-导数(PD)控制器和两种不同的非线性智能补偿器:模糊逻辑补偿器(FLC)和神经网络补偿器(NNC)对切削力进行控制,试验装置如图8(b)所示。在加工过程中的应用表明,与PID、PD和FLC相比,提出的控制器能较好地适应时变切削条件下的非线性。Liu等<sup>[72]</sup>针对一种转角铣削过程,提出了一种考虑刀具加减速度限制的多约束进给速度优化策略,并给出了基于3种策略的最优进给速度,优化后的进给速度可将铣削力控制在500N以下,能够有效地提高加工精度。

一些研究人员通过设计特殊的刀具结构对切削力进行在线调控。Herrera-Granados等<sup>[73]</sup>为了实现微槽加工过程中法向切削力的控制,研制了一种非刚性切削机构(图8

(c))。在该机构中,工具安装在悬臂梁上,加工时悬臂梁上的位移传感器发生变形,并通过作用力反馈到控制系统,从而实现对法向力的控制。装置成功实现了玻璃的无裂纹微槽的制备。

随着人工智能技术的不断发展,神经网络、遗传算法等在切削力的控制中发挥着越来越重要的作用。Zuperl等<sup>[74-76]</sup>在混合过程建模、离线优化和前馈神经控制方案(UNKS)的基础上,建立了切削参数离线优化与自适应调整组合系统(图8(d))。该自适应控制系统通过切削参数的数字自适应来控制切削力并保持被铣削表面的恒定粗糙度。

Altintas等<sup>[77]</sup>采用一种虚拟辅助的铣削过程在线控制与监控系统来模拟零件加工过程,并可以预测切

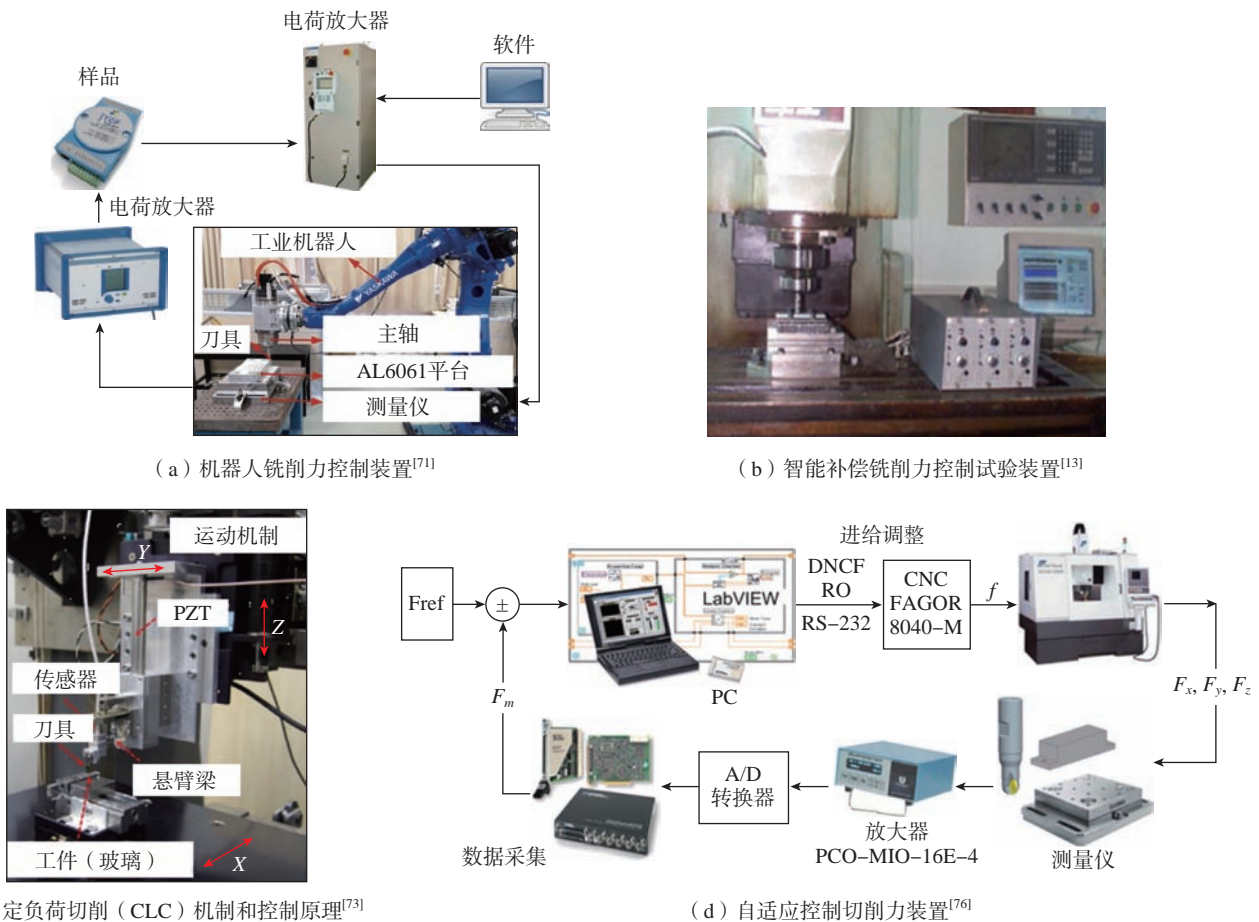


图8 切削力控制装置及原理  
Fig.8 Cutting force control device and principle

削力、扭矩、功率和切屑载荷等状态。仿真的加工状态由实时监控系访问,并通过预测数控系统提供的进给力和主轴驱动电机电流来自适应调整进给。该系统将虚拟仿真与实时测量相结合,避免了自适应控制过程中刀具故障的虚假检测和刀具的瞬态过载。

### 2.2 切削温度控制

切削温度作为切削加工过程中重要的过程参量,对工件表面质量有着重要的影响,过高的切削温度会使工件表面发生烧伤,失去服役功能;同时,过高的切削温度还会加剧刀具磨损,无论从刀具寿命和刀具效率,还是安全和高可靠性生产方面,控制金属加工过程中的切削温度都有着至关重要的意义。切削温度的控制一般从温度的产生和热量的传导两方面进行。

刘文博等<sup>[78]</sup>采用 LabVIEW 虚拟仪器实现温度的采集,并通过输出板卡反馈给变量水泵,从而实现冷却液流量的控制,如图 9 (a) 所示。同样地,舒盛荣<sup>[79]</sup>针对难加工材料高效加工要求,设计了一种内冷式智能车刀,首先运用 FEA-CFD 联合仿真法对内冷式车刀的冷却结构进行优化,再通过仿真分析研究切削参数和冷却液参数等对内冷式智能车刀冷却性能的影响规律,该内冷式智能刀具系统主要由刀具本体、冷却系统、温度传感器和加工控制系统等组成,其温度测量和冷却液流量调节结构如图 9 (b) 所示。

为了实现绿色加工, Sun 等<sup>[14]</sup>提出了一种用于干切削的内冷切削工具,该刀具的特点是在刀尖附近有一个可变内部冷却结构。内冷结构包含嵌入件和倒角适配器板,位于转

接器转角的两个微孔作为冷却液的输入和输出。这种可重构的切削工具成本低且安装便捷。

近年来,热管换热技术在切削加工中取得了显著的进展,发展出了众多类型的热管工具<sup>[80-86]</sup>。陈佳佳<sup>[84]</sup>基于热管强化换热技术和钎焊超硬磨料技术设计了轴向旋转热管砂轮和径向旋转热管砂轮,试验装置见图 9 (c),其中  $q_{in}$  为热流密度。试验结果表明,热管砂轮可将磨削温度控制在 100 °C 以下,磨削表面完整性好。同时, Liang 等<sup>[15]</sup>在普通车刀基础上安装了圆形铜质水热管,并对水冷却条件下的热管使用参数进行了优化,试验装置如图 9 (d) 所示。在相同的条件下,热管车刀的平均热流密度高于普通车刀,但热管车刀在刀屑界面处的最高温度明显低于普通车刀,热管车刀可以有效增加切削热的

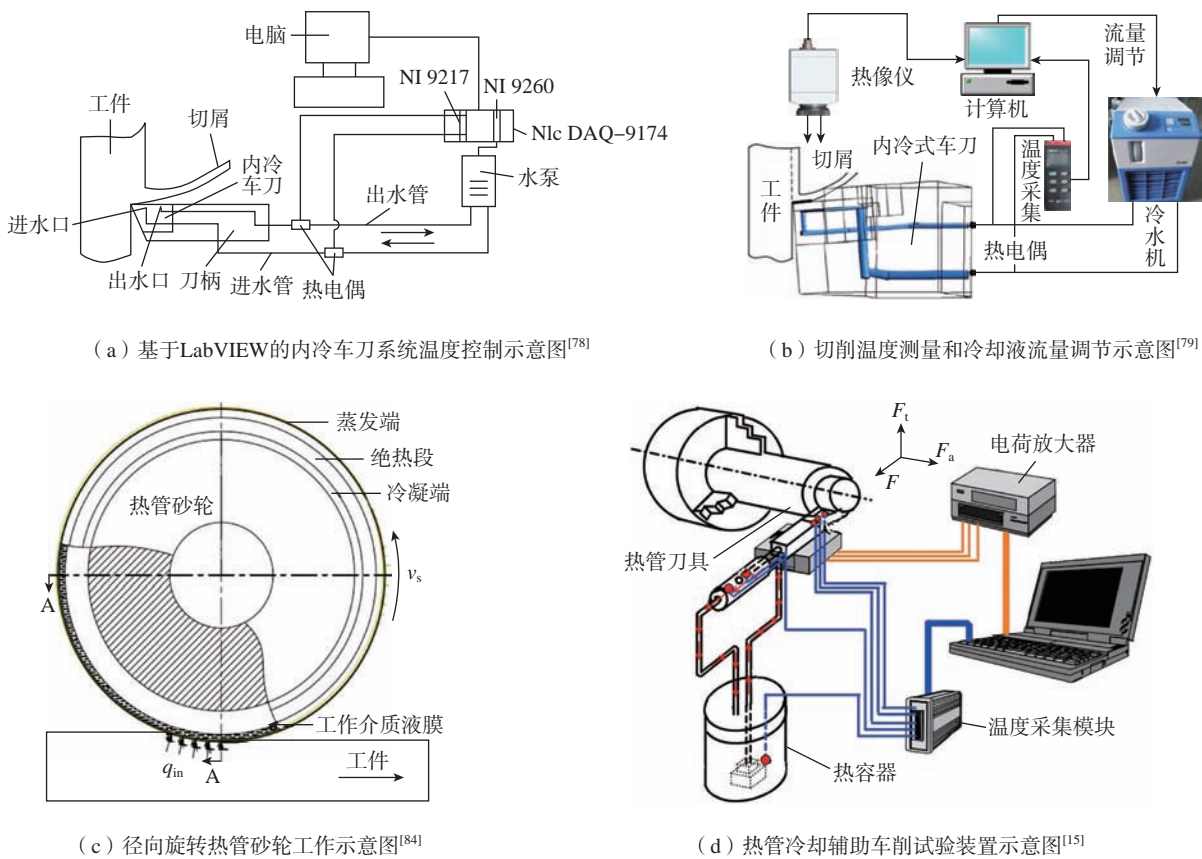


图9 切削温度控制装置示意图

Fig.9 Schematic diagram of cutting temperature control device

耗散,降低切削温度。秦超<sup>[87]</sup>采用仿真和试验结合的方式分析了轴向旋转热管成型砂轮磨削钛合金的冷却行为,不仅加深了对涡轮叶片槽型磨削过程中轴向旋转热管冷却行为的认识,而且有助于为复杂型面工业产品的绿色加工提供指导。

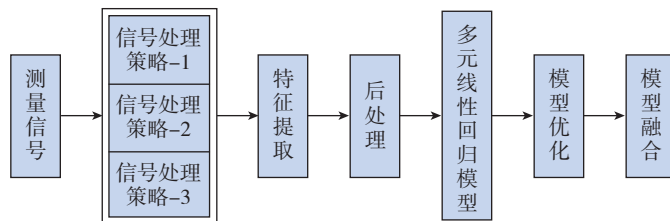
### 2.3 刀具磨损控制

切削加工中刀具磨损与机械、热和化学作用密切相关。同时,刀具的不同状态对加工过程中的切削力、切削温度和工件表面质量也存在重要影响。

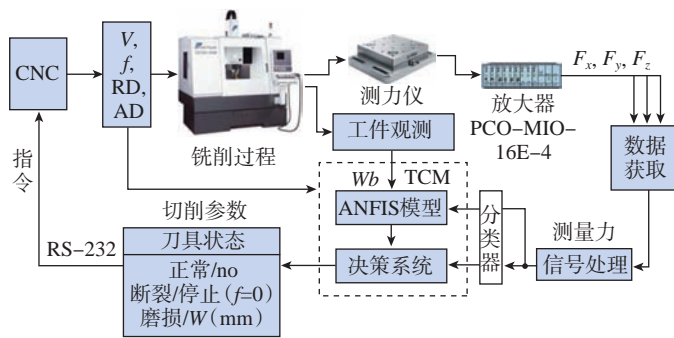
Bhattacharyya等<sup>[85]</sup>提出了利用切削力信号实时估计面铣刀磨损量的方法,采用线性滤波、时域平均和小波变换3种不同的策略从实测信号中提取相关特征,并提出了一种计算刀具磨损最坏情况概率预测的方法,用于最终刀具磨损模型的建立(图10(a))。Čuš等<sup>[16]</sup>将神经决策系统与自适应神经模糊系统(ANFIS)刀具磨损估计器相结合,开发出能够实时检测刀具破损的监测系统(图10(b))。该系统可以对加工过程进行在线监测,并根据预先设定的刀具磨损极限进行刀具更换。秦国华等<sup>[86]</sup>基于神经网络和遗传算法对铣削马氏体不锈钢过程中的刀具磨损进行了监测和控制,并通过有限的数据集建立各参数与刀具磨损之间的预测模型和使刀具磨损量为最小的切削参数优化模型。试验表明,该预测模型和控制技术能够有效提高刀具磨损量的计算效率和精度。秦超<sup>[87]</sup>采用有限元仿真对金刚石刀具超精密切削钛合金的磨损程度进行分析,并通过仿真与试验相结合的办法提出降低刀具磨损的表面微结构阵列加工方式。Koike等<sup>[17]</sup>提出了一种利用伺服信息实现铣削过程中刀具断裂实时检测的无传感器方法。通过对滚珠丝杠驱动级和主轴控制器施加扰动观测器,可在宽频范围内预测切削力和扭矩。在此基础上,进一步

将各轴上的估计信息进行集成,利用平行滑动傅里叶变换可以准确地捕捉到切削力和扭矩的变化,装置如图10(c)所示。为了提高制造系统的

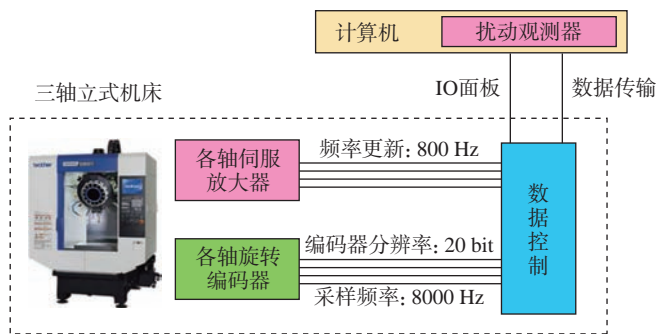
可靠性,Wang等<sup>[88]</sup>提出了一种基于多传感器数据融合和人工智能模型的虚拟刀具磨损传感技术(图10(d)),并采用降维技术和支持向量回



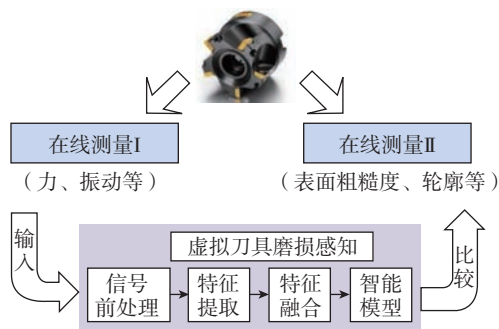
(a) 面铣刀磨损量监测模型<sup>[85]</sup>



(b) 基于神经决策系统与ANFIS的刀具磨损监测系统<sup>[16]</sup>



(c) 集成多轴伺服信息的无传感器铣削刀具断裂检测系统<sup>[17]</sup>



(d) 多感官融合虚拟工具磨损传感模型<sup>[88]</sup>

图10 刀具磨损监测模型和系统

Fig.10 Tool wear monitoring model and system

归模型,融合加工过程中的多种数据(如力、振动等),推导出难以测量的刀具磨损参数(如刀具磨损宽度)。

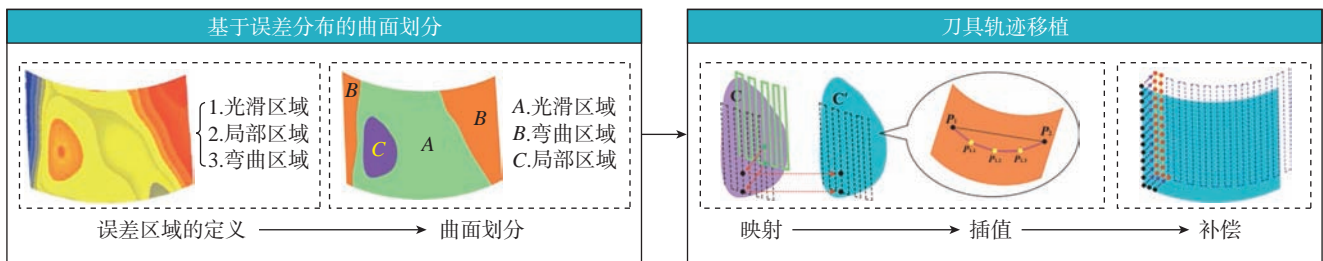
### 2.4 切削表面完整性控制

表面完整性作为切削加工中最终的评价指标,其相关研究在工业应用中不断增加,而工业界对工件的使用性能及其表面完整性提出了更高的要求,使得表面完整性的控制变得愈发重要。

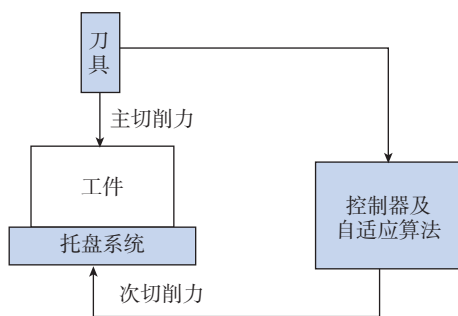
Hao 等<sup>[89]</sup>基于在线检测数据对误差分布进行了数学定义,并在标称模型的刀具轨迹基础上生成了适应工件实际形状的新刀具轨迹,根据不同曲面的误差分布采用了不同的刀具轨迹移植策略(图 11(a))。Rashid 等<sup>[18]</sup>基于自适应滤波算法开发了一种主动控制系统(图 11(b)),采用压电制动器动态控制力,通过大量的测试验证了该系统在实际重要参数控制方面的性能,改善了表面粗糙度,增加了刀具寿命。Ezugwu 等<sup>[90]</sup>建立了一种用于分析和预测镍基高

温合金 Inconel 718 高速车削过程中切削量与工艺参数之间关系的人工神经网络模型。该模型由一个 3 层前馈反向传播神经网络组成,能够很好地分析和预测金属切削中的切削条件和工艺参数间的复杂关系,并可以用于控制加工表面粗糙度。同样地,Özel 等<sup>[91]</sup>建立了基于前馈神经网络的模型,以准确预测精加工过程中的表面粗糙度和刀具磨损,利用测得的表面粗糙度试验数据对神经网络模型进行训练。训练后的神经网络模型用于预测不同切削条件下的表面粗糙度,并为后续进一步控制提供数据支撑。Jiao 等<sup>[19]</sup>提出了一种基于模糊自适应网络的车削加工表面粗糙度模型(图 11(c))。模糊自适应网络(FAN)既具有神经网络的学习能力,又具有复杂和不被很好理解的模糊现象的语言表达能力,并且可以根据日常运行数据,对初始得到的表面粗糙度模型进行不断改进。为了说明该方法的有效性,建立

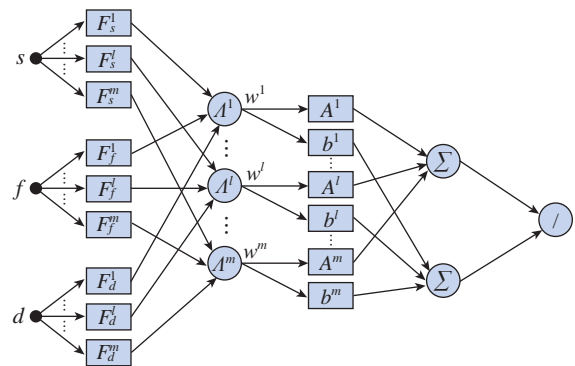
了表征加工参数对表面粗糙度影响的模型,并利用试验结果对模型进行了验证。刘学<sup>[92]</sup>采用正交试验分析了硬态切削高强度钢 Cr12MoV 过程中主要影响因素对表面完整性的影响规律,并利用 Matlab 建立可以实现实时输入与输出功能的综合预测系统,通过改进粒子群算法对残余应力、表面粗糙度、塑性变形层厚度等指标进行了参数优化,试验确定了优化算法的可靠性。Brecher 等<sup>[93]</sup>提出了一种基于过程并行的内控式刀具位移实时补偿过程力的方法。补偿软件的设计是对数控内核的扩展,从而集成到串联数控的位置控制回路中。通过这些试验优化,加工过程中塑性变形引起的几何误差显著降低了。Umamaheswara 等<sup>[94]</sup>开发了一个能够在线实时监测和控制加工表面纹理的加工系统,对被加工工件表面进行图像采集和进一步特征提取,评估精度可达到 97%。该技术能够便捷地应用至开放式结构控制的数控机



(a) 基于误差分布的大薄壁自由曲面自适应加工刀具轨迹移植方法<sup>[89]</sup>



(b) 基于托盘系统的铣削过程主动控制模型<sup>[18]</sup>



(c) 基于车削表面粗糙度预测的模糊自适应网络模型<sup>[19]</sup>

图 11 表面完整性控制方法或模型

Fig.11 Surface integrity control method or model

床上,同时可以在线调整操作参数,以减小几何公差和尺寸公差。Sato等<sup>[95]</sup>提出了一种基于工件在机测量结果的五轴加工中心转轴几何误差辨识与补偿方法。通过五轴运动工件的几何形状来识别几何误差,因为误差会对工件的几何形状产生影响,根据几何误差模型和加工形状,可以建立观测方程。通过对实际和模拟加工形状进行最小二乘法匹配,可以识别出实际的几何误差。为了验证该方法的有效性,进行了实际切削试验和仿真。结果表明,所提出的方法能够成功地识别仿真中的几何误差<sup>[91-103]</sup>。

### 3 结论与展望

本文对航空航天难加工材料切削加工过程模拟与智能控制技术的研究现状进行了讨论与分析,对切削加工过程模拟与智能控制的发展历程进行了分析与总结。在切削加工过程模拟方面,本构模型得到了较好的发展,目前已开发出一些考虑应力-应变-应变率-温度耦合效应、材料硬度变化的本构模型,在仿真精度上有了较大的提高。此外,当前的切削加工过程模拟研究内容丰富,涉及多种因素对切削性能的影响,相比之前更加贴近真实情况,仿真结果可靠性得到了提高。在切削加工过程控制方面,国内外学者对切削加工中“感知型”和“受控型”系统开展了大量研究工作,这两种系统可以实现对切削加工过程中各物理量的监测与分析,并通过对刀具的相关参数进行调节,实现切削过程的调控,但缺乏自主学习功能,未来应进一步依托大数据、人工智能和工业互联网等构建“学习型”控制系统。

尽管当前研究已取得大量成果,但仍存在一些挑战需要跟进研究,具体问题及发展方向如下。

(1) 当前研究对切削过程切削力、切削温度、刀具磨损及表面完整

性的有限元仿真分析较为独立,鲜有研究考虑了加工条件对这些重要指标的综合影响,以优选出更合适的加工参数。因此,以切削力、切削温度、刀具磨损及表面完整性为多目标的仿真分析是未来研究的重要方向之一。

(2) 当前大多数金属材料采用J-C本构模型及其修正模型,但与实际加工过程有一定差别,开发更为精准的材料本构模型数据库是实现仿真结果高精度的重要保障,同时在分离准则、网格划分方法及摩擦模型的研究方面有待跟进研究。

(3) 将有限元用于加工过程的模拟预测,将控制技术用于实际加工过程的反馈调节,开发连接控制技术与切削仿真技术的智能系统,建立切削仿真与控制技术之间的映射与反演关系,使切削仿真设置更加接近真实的加工工况,并实现加工过程的自动优化控制。

(4) 目前的切削加工控制主要局限于单目标参量的监测与控制。如何实现切削力、切削温度、刀具磨损等多表面完整性指标参量的综合控制是未来智能控制的发展趋势。借助高精度传感器、智能算法等构建多传感器信息融合模型,实现多维度、高复杂性信息的有序化是智能控制的重要基础之一。

(5) 切削过程的智能控制涉及机械、材料、力学、信息、控制等多学科交叉领域,虽然单一领域的技术发展也会促进智能控制水平的提升,但更需要融合多领域最新技术,不断提升智能控制的准确性、稳定性和实时性。

### 参考文献

[1] BRECHER C, ESSER M, WITT S. Interaction of manufacturing process and machine tool[J]. *CIRP Annals*, 2009, 58(2): 588-607.

[2] MÖHRING H C, WIEDERKEHR P, ERKORKMAZ K, et al. Self-optimizing machining systems[J]. *CIRP Annals*, 2020, 69(2): 740-763.

[3] KERSTING P, JOLIET R, KANSTEINER M. Modeling and simulative analysis of the micro-finishing process[J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(1): 321-324.

[4] JAYASEKARA D, LAI N Y G, WONG K H, et al. Level of automation (LOA) in aerospace composite manufacturing: Present status and future directions towards industry 4.0[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 62: 44-61.

[5] BRAUN S, STORCHAK M, MÖHRING H C. Using model based analytic cutting force prediction in CAM toolpath generation[J]. *Procedia CIRP*, 2019, 82: 467-472.

[6] ROUKEMA J C, ALTINTAS Y. Generalized modeling of drilling vibrations, part II: Chatter stability in frequency domain[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(9): 1474-1485.

[7] CAO H R, ZHANG X W, CHEN X F. The concept and progress of intelligent spindles: A review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 112: 21-52.

[8] ABELLAN-NEBOT J V, ROMERO SUBIRÓN F. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 47(1-4): 237-257.

[9] PRASAD K K, TAMANG S K, CHANDRASEKARAN M. Comparative study on cutting force simulation using DEFORM 3D software during high speed machining of Ti-6Al-4V[J]. *Key Engineering Materials*, 2020, 856: 50-56.

[10] ZHAO J F, LIU Z Q, WANG B, et al. Tool coating effects on cutting temperature during metal cutting processes: Comprehensive review and future research directions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 150: 107302.

[11] LIU Z B, YUE C X, LI X C, et al. Research on tool wear based on 3D FEM simulation for milling process[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2020, 4(4): 121.

[12] 沈雪红, 张定华, 姚倡锋, 等. 钛合金切削加工表面完整性形成机制研究进展[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(4): 1-16.

SHEN Xuehong, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. Research progress on formation mechanism of surface integrity in titanium alloy machining[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(4): 1-16.

- [13] YAO X F, ZHANG Y, LI B, et al. Machining force control with intelligent compensation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(5-8): 1701-1715.
- [14] SUN X, BATEMAN R, CHENG K, et al. Design and analysis of an internally cooled smart cutting tool for dry cutting[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226(4): 585-591.
- [15] LIANG L, QUAN Y M. Investigation of heat partition in dry turning assisted by heat pipe cooling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(9-12): 1931-1941.
- [16] ČUŠ F, ŽUPERL U. Real-time cutting tool condition monitoring in milling[J]. *Strojniški Vestnik—Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 57(2): 142-150.
- [17] KOIKE R, OHNISHI K, AOYAMA T. A sensorless approach for tool fracture detection in milling by integrating multi-axial servo information[J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(1): 385-388.
- [18] RASHID A, MIHAI NICOLESCU C. Active vibration control in palletised workholding system for milling[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(12-13): 1626-1636.
- [19] JIAO Y, LEI S T, PEI Z J, et al. Fuzzy adaptive networks in machining process modeling: Surface roughness prediction for turning operations[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(15): 1643-1651.
- [20] 张松, 李斌训, 李取浩, 等. 切削过程有限元仿真研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2019, 62(13): 14-28.
- ZHANG Song, LI Binxun, LI Quhao, et al. Research development of application of finite element method on cutting process[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(13): 14-28.
- [21] 赵庆军, 尹胜, 向瑶, 等. 基于 ABAQUS 切削仿真加工技术应用 [J]. *工具技术*, 2022, 56(2): 76-80.
- ZHAO Qingjun, YIN Sheng, XIANG Yao, et al. Application of cutting simulation technology based on ABAQUS[J]. *Tool Engineering*, 2022, 56(2): 76-80.
- [22] 庞佳佳, 包燕平, 华承健, 等. RH 精炼钢包底吹工艺优化物理模拟研究 [J]. *炼钢*, 2022, 38(4): 47-53.
- PANG Jiagia, BAO Yanping, HUA Chengjian, et al. Physical simulation study on optimization of bottom blowing process in RH refining ladle[J]. *Steelmaking*, 2022, 38(4): 47-53.
- [23] 林涛, 宋宏志, 孙玉豹, 等. 高温高压可视化物理模拟实验装置研制 [J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(7): 76-79.
- LIN Tao, SONG Hongzhi, SUN Yubao, et al. Exploration of high temperature and high pressure two dimensional visualization physical simulation experimental device[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2021, 40(7): 76-79.
- [24] 凡志磊, 张虎翼, 余路. 飞机机身蒙皮试验件机加制造及其精度分析研究 [J]. *科技创新与应用*, 2021, 11(31): 63-66.
- FAN Zhilei, ZHANG Huyi, YU Lu. Machining manufacture and precision analysis of aircraft fuselage skin test parts[J]. *Technology Innovation and Application*, 2021, 11(31): 63-66.
- [25] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]. *Proceedings of the 7th Int. Symposium on Ballistics. The Hague*, 1983: 541-547.
- [26] 杨晓康, 王快社, 王萌, 等. TC17 钛合金热变形行为及其修正 J-C 本构模型 [J]. *金属热处理*, 2018, 43(10): 20-24.
- YANG Xiaokang, WANG Kuaishe, WANG Meng, et al. Hot deformation behavior and modified J-C constitutive model for TC17 titanium alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43(10): 20-24.
- [27] 邓云飞, 张永, 吴华鹏, 等. 6061-T651 铝合金动态力学性能及 J-C 本构模型的修正 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(20): 74-81.
- DENG Yunfei, ZHANG Yong, WU Huapeng, et al. Dynamic mechanical properties and modification of J-C constitutive model of 6061-T651 aluminum alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(20): 74-81.
- [28] UMBRELLO D, RIZZUTI S, OUTEIRO J C, et al. Hardness-based flow stress for numerical simulation of hard machining AISI H13 tool steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 199(1-3): 64-73.
- [29] GURUSAMY M, RAO B C. A modified Zerilli-Armstrong constitutive model for simulating severe plastic deformation of a steel alloy[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2022, 236(8): 1022-1036.
- [30] DEHGAHI S, PIRGAZI H, SANJARI M, et al. High strain rate torsional response of maraging steel parts produced by laser powder bed fusion techniques: Deformation behavior and constitutive model[J]. *Mechanics of Materials*, 2022, 168: 104296.
- [31] 岳彩旭, 蔡春彬, 黄翠, 等. 切削加工过程有限元仿真研究的最新进展 [J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(4): 815-825.
- YUE Caixu, CAI Chunbin, HUANG Cui, et al. Recent advances in finite element simulation of machining processes[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(4): 815-825.
- [32] MIRGHASEMI S M, EIVANI A R, SEYEDEIN S H, et al. A comparison between routine vs. normalized Cockcroft-Latham fracture criteria for prediction of fracture during equal channel angular pressing[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 199: 721-729.
- [33] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6): 773-781.
- [34] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [35] XI Y, BERMINGHAM M, WANG G, et al. Finite element modeling of cutting force and chip formation during thermally assisted machining of Ti6Al4V alloy[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135: 061014.
- [36] YOU G Q, XUE C F. Fast identification of the hyperbolic Lagrangian coherent structures in two-dimensional flows based on the Eulerian-type algorithms[J]. *Journal of Applied Analysis & Computation*, 2022, 12(2): 568-590.
- [37] CRUTZEN Y, BOMAN R, PAPELEUX L, et al. Lagrangian and arbitrary Lagrangian Eulerian simulations of complex roll-forming processes[J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2016, 344(4-5): 251-266.
- [38] SHERBURN J A, HAMMONS M I, ROTH M J. Modeling finite thickness slab perforation using a coupled Eulerian-Lagrangian approach[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51(25-26): 4406-4413.
- [39] ÖZEL T, SIMA M, SRIVASTAVA A K, et al. Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V

- alloy with experiments and finite element simulations[J]. *CIRP Annals*, 2010, 59(1): 77–82.
- [40] ZHANG X, WU H B. Effect of tool angle on cutting force and residual stress in the oblique cutting of TC21 alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(1–4): 791–797.
- [41] RIBEIRO-CARVALHO S, HOROVISTIZ A, DAVIM J P. Material model assessment in Ti6Al4V machining simulations with FEM[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, 235(21): 5500–5510.
- [42] RAZNICA S, A M, R L, et al. FE modeling and simulation of machining alloy 718 based on ductile continuum damage[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 171: 105375.
- [43] THI-HOA P, THI-BICH M, VAN-CANH T, et al. A study on the cutting force and chip shrinkage coefficient in high-speed milling of A6061 aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(1–4): 177–188.
- [44] 卜居安, 黄树涛, 于晓琳, 等. 高速切削 GH4169 高温合金时的残留变形及切削力仿真[J]. *宇航材料工艺*, 2019, 49(5): 27–34.
- PIAO Juan, HUANG Shutao, YU Xiaolin, et al. Simulation of residual deformation and cutting force in high speed cutting of GH4169 nickel-based superalloy[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2019, 49(5): 27–34.
- [45] MAHESH K, PHILIP J T, JOSHI S N, et al. Machinability of Inconel 718: A critical review on the impact of cutting temperatures[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, 36(7): 753–791.
- [46] YEN Y C, JAIN A, CHIGURUPATI P, et al. Computer simulation of orthogonal cutting using a tool with multiple coatings[J]. *Machining Science and Technology*, 2004, 8(2): 305–326.
- [47] HOSSEINKHANI K, NG E G. Finite element simulation of cutting process under the worn tool edge geometries[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 116(11–12): 3991–4006.
- [48] ZHANG J J, ZHANG G Q, FAN G H. Effects of tool coating materials and coating thickness on cutting temperature distribution with coated tools[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2022, 19(4): 2276–2284.
- [49] 郝广超. TiAlN 涂层刀具刀-屑接触热阻及其对切削温度的影响规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- HAO Guangchao. Thermal contact resistance for TiAlN coated tool and its influencing on cutting temperature[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [50] ZAKARIA M S, MUSTAPHA M, AZMI A I, et al. Effects of submerged convective cooling in the turning of AZ31 magnesium alloy for tool temperature and wear improvement[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(5–6): 3181–3200.
- [51] LIU E L, DENG S, ZHANG C, et al. Simulation and experimental research on tool temperature field for low-temperature cutting of Ti-5553[J]. *Ferroelectrics*, 2020, 563(1): 139–147.
- [52] ZHANG H P, ZHANG Q Y, REN Y, et al. Simulation and experiments on cutting forces and cutting temperature in high speed milling of 300M steel under CMQL and dry conditions[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19(8): 1245–1251.
- [53] CHEN M L, PENG R T, ZHAO L F, et al. Effects of minimum quantity lubrication strategy with internal cooling tool on machining performance in turning of nickel-based superalloy GH4169[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 118(11–12): 3673–3689.
- [54] SHU S R, ZHANG Y, HE Y Y, et al. Design of a novel turning tool cooled by combining circulating internal cooling with spray cooling for green cutting[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2021, 15(1): JAMDSM0003.
- [55] CAPPELLINI C, ABENI A. Development and implementation of crater and flank tool wear model for hard turning simulations[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(3–4): 2055–2073.
- [56] ATTANASIO A, CERETTI E, OUTEIRO J, et al. Numerical simulation of tool wear in drilling Inconel 718 under flood and cryogenic cooling conditions[J]. *Wear*, 2020, 458–459: 203403.
- [57] 陈燕, 杨树宝, 傅玉灿, 等. 钛合金 TC4 高速切削刀具磨损的有限元仿真[J]. *航空学报*, 2013, 34(9): 2230–2240.
- CHEN Yan, YANG Shubao, FU Yucan, et al. FEM estimation of tool wear in high speed cutting of Ti6Al4V alloy[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(9): 2230–2240.
- [58] LOTFI M, AMINI S, AGHAEI M. 3D FEM simulation of tool wear in ultrasonic assisted rotary turning[J]. *Ultrasonics*, 2018, 88: 106–114.
- [59] WANG Y, SU H H, DAI J B, et al. A novel finite element method for the wear analysis of cemented carbide tool during high speed cutting Ti6Al4V process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(5–8): 2795–2807.
- [60] 徐锦渊, 黄祥辉, 陈明, 等. 刀具磨损形态对 Ti6Al4V 切削过程影响的有限元仿真研究[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(3): 14–21.
- XU Jinyang, HUANG Xianghui, CHEN Ming, et al. Finite element study on effects of tool wear patterns on the machining process of Ti6Al4V[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(3): 14–21.
- [61] LIU W T, LIU Z Q. High-pressure coolant effect on the surface integrity of machining titanium alloy Ti-6Al-4V: A review[J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(3): 032001.
- [62] WANG B, LIU Z Q. Influences of tool structure, tool material and tool wear on machined surface integrity during turning and milling of titanium and nickel alloys: A review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(5–8): 1925–1975.
- [63] RAMESH A, MELKOTE S N. Modeling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(3–4): 402–414.
- [64] OUTEIRO J C, UMBRELLO D, M' SAOUBI R. Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(14): 1786–1794.
- [65] SCHULZE V, ZANGER F. Numerical analysis of the influence of Johnson-Cook-material parameters on the surface integrity of Ti-6Al-4V[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 19: 306–311.
- [66] WANG B, LIU Z Q, CAI Y K, et al. Advancements in material removal mechanism and surface integrity of high speed metal cutting: A review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 166: 103744.
- [67] SADEGHIFAR M, SEDAGHATI R, JOMAA W, et al. A comprehensive review of finite element modeling of orthogonal machining process: Chip formation and surface integrity

- predictions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9-12): 3747-3791.
- [68] 张文盟,董长双,马世玲. GH4169 合金微细铣削加工表面硬化仿真研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(21): 151-154.
- ZHANG Wenmeng, DONG Changshuang, MA Shiling. Simulation study on surface hardening of micro-milling GH4169 alloy[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(21): 151-154.
- [69] 刘强,张海军,刘献礼,等. 智能刀具研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21): 248-268.
- LIU Qiang, ZHANG Haijun, LIU Xianli, et al. A review of research on intelligent cutting tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21): 248-268.
- [70] 丁宏健,邹斌,薛锴,等. 基于切削力控制的薄壁件变铣削工艺参数研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(9): 117-122.
- DING Hongjian, ZOU Bin, XUE Kai, et al. Research on variable milling process parameters of thin-walled parts based on cutting force control[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(9): 117-122.
- [71] XIONG G, LI Z L, DING Y, et al. Integration of optimized feedrate into an online adaptive force controller for robot milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(3-4): 1533-1542.
- [72] LIU X L, DING Y P, YUE C X, et al. Off-line feedrate optimization with multiple constraints for corner milling of a cavity[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9-12): 1899-1907.
- [73] HERRERA-GRANADOS G, MORITA N, HIDAI H, et al. Experimental stress analysis of glass cutting using a non-rigid cutting mechanism[J]. Manufacturing Letters, 2015, 6: 14-18.
- [74] ZUPERL U, CUS F, REIBENSCHUH M. Modeling and adaptive force control of milling by using artificial techniques[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(5): 1805-1815.
- [75] ZUPERL U, CUS F, REIBENSCHUH M. Neural control strategy of constant cutting force system in end milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(3): 485-493.
- [76] ZUPERL U, CUS F. System for off-line feedrate optimization and neural force control in end milling[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2012, 26(2): 105-123.
- [77] ALTINTAS Y, ASLAN D. Integration of virtual and on-line machining process control and monitoring[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 349-352.
- [78] 刘文博,李天箭,石永泉,等. 基于 LabVIEW 的内冷式智能车刀温度控制系统的设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(10): 6-8.
- LIU Wenbo, LI Tianjian, SHI Yongquan, et al. Design of temperature control system of internal cold intelligent turning tool based on LabVIEW[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018, 56(10): 6-8.
- [79] 舒盛荣. 内冷式智能车刀设计与分析及其实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- SHU Shengrong. Design and analysis of the internally cooled smart turning tool and experimental study[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [80] QIAN N, FU Y C, CHEN J J, et al. Thermal performance analysis of axial-rotating oscillating heat pipe and its prediction model based on grey system theory[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 29: 101210.
- [81] CHEN J J, FU Y C, QIAN N, et al. Investigation on cooling behavior of axially rotating heat pipe in profile grinding of turbine blade slots[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 116031.
- [82] QIAN N, FU Y C, CHEN J J, et al. Axial rotating heat-pipe grinding wheel for eco-benign machining: A novel method for dry profile-grinding of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 216-227.
- [83] QIAN N, FU Y C, ZHANG Y W, et al. Experimental investigation of thermal performance of the oscillating heat pipe for the grinding wheel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 136: 911-923.
- [84] 陈佳佳. 钎焊立方氮化硼热管砂轮的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- CHEN Jiajia. Fundamental investigation of brazed CBN heat pipe grinding wheels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [85] BHATTACHARYYA P, SENGUPTA D, MUKHOPADHYAY S. Cutting force-based real-time estimation of tool wear in face milling using a combination of signal processing techniques[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(6): 2665-2683.
- [86] 秦国华,谢文斌,王华敏. 基于神经网络与遗传算法的刀具磨损检测与控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1314-1321.
- QIN Guohua, XIE Wenbin, WANG Huamin. Detection and control for tool wear based on neural network and genetic algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1314-1321.
- [87] 秦超. 钛合金金刚石切削工艺和刀具磨损控制方法的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- QIN Chao. Investigation on the cutting technology and tool wear control methodology in diamond cutting of titanium alloy[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [88] WANG J J, XIE J Y, ZHAO R, et al. Multisensory fusion based virtual tool wear sensing for ubiquitous manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 45: 47-58.
- [89] HAO X Z, LI Y G, DENG T C, et al. Tool path transplantation method for adaptive machining of large-sized and thin-walled free form surface parts based on error distribution[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56: 222-232.
- [90] EZUGWU E O, FADARE D A, BONNEY J, et al. Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(12-13): 1375-1385.
- [91] ÖZEL T, KARPAT Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(4-5): 467-479.
- [92] 刘学. 模具钢 Cr12MoV 硬态切削表面完整性控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- LIU Xue. Control of the surface integrity of hard cutting Cr12MoV die steel[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [93] BRECHER C, WETZEL A, BERNERS T, et al. Increasing productivity of cutting processes by real-time compensation of tool deflection due to process forces[J]. Journal of Machine Engineering, 2019, 19(1): 16-27.
- [94] UMAMAHESWARA RAJU R S, RAJU V R, RAMESH R. Intelligence model based machining process classification and performance

- estimation[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2): 982–990.
- [95] SATO R, SHIRASE K. Geometric error compensation of five-axis machining centers based on on-machine workpiece measurement[J]. *International Journal of Automation Technology*, 2018, 12(2): 230–237.
- [96] 张华. 金属切削过程仿真及其在断屑槽性能研究中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- ZHANG Hua. FEM analysis on the simulation of the metal cutting process and its application in the research of chip breakers[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [97] 李冷. 高温合金切削仿真技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- LI Leng. Research of high-temperature alloy machining simulation technologies[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [98] 岳彩旭. 硬态切削过程的有限元仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010.
- YUE Caixu. Finite element simulation and experimental research of hard cutting process[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2010.
- [99] 闫凯强, 黄晓斌, 张仕杰, 等. 面铣刀铣削钛合金时切削参数对切削力影响规律的仿真[J]. *工具技术*, 2022, 56(4): 80–83.
- YAN Kaiqiang, HUANG Xiaobin, ZHANG Shijie, et al. Simulation study on influence of cutting parameters on cutting force when milling titanium alloy with face milling cutter[J]. *Tool Engineering*, 2022, 56(4): 80–83.
- [100] DENKENA B, BOUJNAH H. Feeling machines for online detection and compensation of tool deflection in milling[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 423–426.
- [101] MAIER W, MÖHRING H C, WERKLE K. Tools 4.0—Intelligence starts on the cutting edge[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 24: 299–304.
- [102] MATSUDA R, SHINDOU M, HIROGAKI T, et al. Monitoring of rotational vibration in tap and endmill processes with a wireless multifunctional tool holder system[J]. *International Journal of Automation Technology*, 2018, 12(6): 876–882.
- [103] DENKENA B, KOELLER M. Simulation based parameterization for process monitoring of machining operations[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 12: 79–84.

通讯作者: 丁文锋, 教授, 博士, 研究方向为磨削加工。

## A Review on Cutting Process Simulation and Intelligent Control of Difficult-to-Cut Materials in Aerospace Industry

ZHAO Biao<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, DING Wenfeng<sup>1</sup>, FU Yucan<sup>1</sup>,  
XU Jiuhua<sup>1</sup>, ZHAO Zhengcai<sup>1</sup>, CHEN Qingliang<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** With the continuous improvement of service performance requirements of aerospace key components, the difficult-to-cut materials, such as high-performance titanium alloy, nickel-based superalloy, high-strength steel, are widely used in the manufacturing process. Cutting process is the main machining method for these difficult-to-cut materials, whereas the problems should be faced, including the low cutting force, high cutting temperature, severe tool wear, poor machining quality. Recently, researchers have done much work on the prediction and control the cutting force, cutting temperature, tool wear and surface quality in the cutting process. This article systematically reviews the simulation and intelligent control technology of cutting force, cutting temperature, tool wear and surface quality in cutting process of difficult-to-cut materials in aerospace industry, and the problems and challenges are then analyzed. Subsequently, the future development trend of the simulation and control technology on cutting process is prospected.

**Keywords:** Finite element simulation; Intelligent control; Cutting force; Cutting temperature; Tool wear; Surface integrity

(责编 大漠)

引文格式: 岳彩旭, 周天祥, 秦怡源, 等. 航空航天薄壁件铣削过程加工状态监测研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 30-43.

YUE Caixu, ZHOU Tianxiang, QIN Yiyuan, et al. Research progress on machining condition monitoring during milling of aerospace thin-walled parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 30-43.

# 航空航天薄壁件铣削过程加工状态监测研究进展\*

岳彩旭, 周天祥, 秦怡源, 王 乐, 胡德生

(哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

[摘要] 对切削加工状态进行精准监测, 是实现航空航天薄壁件加工变形控制的重要保障。围绕航空航天薄壁件铣削加工状态监测的最新研究进展进行了评述, 详细介绍了建立加工状态监测模型的关键技术与方法, 包括加工信息采集处理、特征提取和特征融合。归纳了学者们在薄壁件加工过程中对刀具磨破损、铣削颤振、铣削变形等具体状态监测的研究进展。基于数字孪生技术, 构建了面向薄壁件铣削加工状态监测的优化系统。最后, 根据现阶段本领域发展状况对薄壁件铣削加工状态监测进行了展望。

关键词: 航空航天薄壁件; 特征提取; 刀具磨破损; 铣削颤振; 铣削变形; 数字孪生

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.030



岳彩旭

教授, 博士, 研究方向为数字化加工技术、复杂刀具设计技术。

随着航空航天工业的不断发展, 空天飞行器、特种精密仪器等对

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52175393)。

零件的稳定性及可靠性提出了更高的目标。薄壁零件因其具有质量轻、比强度高、空间结构紧凑的特点被广泛应用于航空航天工业领域。目前该类零件通常采用铣削加工方式进行<sup>[1]</sup>。因工件结构材质、刀具、机床、铣削条件和装夹等多方面因素的影响, 薄壁件在加工过程中易发生加工变形<sup>[2]</sup>。由于高温、噪声干扰等复杂工况, 更难以实现对加工状态的精准监测与控制。薄壁件加工状态的监测是以不同目标状态为导向, 利用传感器采集得到反映加工状态的信息, 经过分析处理, 最终实现对加工状态的识别及预测<sup>[3]</sup>。加工过程面临着智能化、数字化方向的发展趋势<sup>[4]</sup>, 单一的传感器信息已不能满足工作需求。Chen等<sup>[5]</sup>融合了声发射、加速度等多传感器信息, 基于深度学习方法对铣削刀具磨损状态进行了监测, 经过多次

试验, 均取得了较好的效果。Bagga等<sup>[6]</sup>利用振动、力、温度等多传感器数据融合方法对切削刀具磨损进行预测, 与实践数据相比, 具备更低的测量误差。Tran等<sup>[7]</sup>通过融合麦克风、振动传感器信息来对铣削颤振进行监测, 相较于传统监测方法, 既提高了加工精度, 又节约了生产成本。综上所述, 多传感器信息融合技术具有更好的互补性和可靠性, 将其引入加工中的状态监测, 可提高监测的精度和效率。

实现对薄壁件加工状态的在线监测, 能有效地控制薄壁件铣削过程中所产生的变形, 有利于提高工件的加工精度、质量和效率。本文基于不同目标状态(刀具磨破损、铣削颤振、铣削变形)监测方向的研究成果, 通过总结与分析指出了航空航天薄壁件的发展趋势及前景, 为薄壁件的高效、高质加工提供理论指导。

## 1 薄壁件加工特点及分类

航空航天工业的发展对专用薄壁零部件有了更高的要求,需要其具备更高精度、更高稳定性和长寿命等特性。

### 1.1 薄壁件的加工特点

薄壁件结构、材料的独特性,决定了其加工过程的特殊性。

(1) 工件特点。薄壁零件的壁厚与轮廓尺寸之比小于 1:20,是由薄型板和加强筋构成的轻量化结构,具有质量轻、强度高、形状复杂和尺寸大的特点<sup>[8]</sup>,多采用具有良好性能的铝合金或者钛合金制作<sup>[9]</sup>。在铣削过程中,随着材料去除率的增加,薄壁件的刚度逐渐降低,加工工件极易发生变形,无法保障加工精度<sup>[10]</sup>。

(2) 加工方式。由于薄壁件的结构、材料特性及高质、高精的要求,通常采用高速铣削方式加工。与常规切削方式相比,高速铣削可以大幅降低铣削力、减少热变形,有效提高薄壁件的加工效率和质量<sup>[11]</sup>。

(3) 刀具特点。薄壁件在铣削过程中是断续加工的状态,导致铣刀极易遭受冲击,降低寿命<sup>[12]</sup>。此外,薄壁件多采用难加工材料,特别是钛合金在加工过程中会产生一层氧化层,加速了刀具的磨损<sup>[13]</sup>。

(4) 装备特点。高速铣床具有较高的刚度及加工精度,在加工薄壁件时易受到高次谐波的影响,引起工件以固有频率振动,影响薄壁件的加工质量<sup>[14]</sup>。

### 1.2 薄壁件的分类

以航空航天领域飞机为例,常用的薄壁零件有整体壁板类、梁类零件和框类零件等<sup>[15]</sup>,如图 1 所示<sup>[16-18]</sup>。

(1) 整体壁板类,由筋条、凸台、蒙皮等部件组成,主要用作飞机的承力部件。

(2) 梁类零件,构形复杂,常用作飞机的受力部件。根据零件的截面形状可分为工字形、U 字形及异形截面。

(3) 框类零件,不仅是飞机横向结构的主要承力部件,还是机身成型、保障径向外形的主要结构件。

## 2 加工状态监测关键技术

实现薄壁件铣削加工状态监测的关键技术主要有:通过传感器采集得到反映加工状态的信息;对传感器信息进行相关的预处理;提取得到目标状态对应的特征。同时,为了提高加工状态监测的效率,采用多传感器信息来表征加工状态,并通过融合处理,最终实现对目标状态的监测。

### 2.1 数据预处理

通过传感器采集得到的加工状态信息数据存在样本过大、包含干扰噪音等问题,不能直接使用。数据预处理的目的是检测数据质量,降低异常数据的干扰;识别数据的背景信息,对不同工况下的数据分别进行标准化处理;降低对后续建模的影响。目前常用的数据预处理方法包括数据截断、异常值剔除、滤波降噪等。周子涵<sup>[19]</sup>使用奈奎斯特采样定

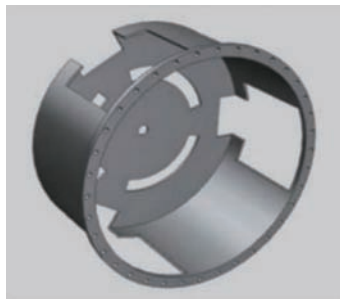
理对振动信号和切削力信号进行采样,经过预处理降低了样本总量,较为完整地反映了刀具磨损的实时状态。王莹<sup>[20]</sup>将经验小波变换与自适应滤波方法进行结合,有效地提高了传感器信号的信噪比。

### 2.2 特征提取

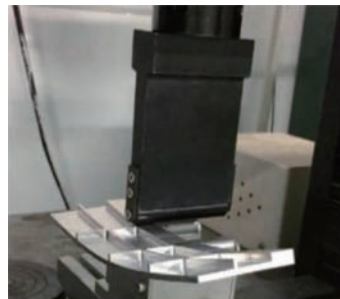
利用单个或多个传感器采集得到信号,经过预处理后提高了数据的质量,由于其数据矩阵复杂、计算成本高等问题,通常不将其直接输入算法模型进行训练,而是先提取信号的特征。特征提取的主要方法有时域分析、频域分析和时频域分析。

#### (1) 时域分析。

时域分析是指对传感器采集得到的时间序列信号进行特征提取。刘锐等<sup>[21]</sup>优选切削力信号的均方根、方差等时域特征来表征铣刀磨损状态,有效地提高了监测精度。Lu 等<sup>[22]</sup>构建了一种相对阈值算法,将加速度信号频谱和时域的方差来作为切削颤振识别的指标,如图 2 所示<sup>[22]</sup>,在不同的工况下均取得了较



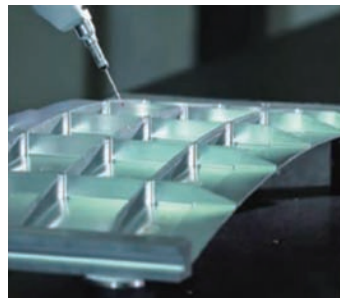
(a) 回转类薄壁零件<sup>[16]</sup>



(b) 机翼整体壁板<sup>[17]</sup>



(c) 发动机叶轮



(d) 框类壁板<sup>[18]</sup>

图 1 薄壁件分类图

Fig.1 Classification of thin-walled parts

好效果。Safi 等<sup>[23]</sup>利用时域分析方法,通过计算监测信号的方差来作为铣削颤振的检测指标,此方法更全面地预测了不同铣削参数下发生颤振的可能性,有利于对铣削颤振进行合理的控制。

### (2) 频域分析。

频域分析通过傅里叶变换将原始信号分解为简单信号的叠加,完成信号中敏感频率成分的分离。Chen 等<sup>[24]</sup>对颤振频率分量谱进行估计,并基于频率分析开发了在线颤振监测系统,经验证该系统具有良好的抗干扰性。Liu 等<sup>[25]</sup>提出了一种基于频域搜索的铣削颤振识别算法,该算法能够直接对原始信号的颤振频率进行提取,既简化了算法模型建立的过程,又节约了计算成本。Li 等<sup>[26]</sup>针对加工工况的问题,提出一种新的音频信号处理方法,分别利用短时傅里叶变换(STFT)和扩展卷积有界分量分析(ECBCA)生成频谱,并进行比较,以获得有用的刀具磨损信息,如图3所示,该预测模型能够对刀具磨损状况进行高精度分类。

### (3) 时频域分析。

时频域分析方法能够很好地处理切削过程中产生的非平稳信号,能更全面地反映信号的特征<sup>[27]</sup>。时频域分析方法提取特征的思路是,采用小波分析、经验模态分解、变分模态分解等时频分析方法将信号进行细分,从而得到关于目标状态的敏感特征<sup>[28-29]</sup>。

小波分析主要有小波变换和小波包变换两种。两者相比,小波包变换能有效解决小波变换分解高频信号存在分辨率差的问题。高鹏磊等<sup>[30]</sup>基于小波包分解理论,对切削过程中的振动信号进行分解重构,根据不同频带能量的变化来判断刀具磨损的状态,可为后续刀具磨损补偿提供保障。Yuan 等<sup>[31]</sup>提出了一种基于小波变换的小波相干函数铣削颤振监测方法,如图4所示,经试验证明该

方法能有效实现颤振的早期识别。

经验模态分解(EMD)可将信号自适应分解为设定的固有模态函数。邵强等<sup>[32]</sup>采用经验模态分解法将颤振信号分解成若干个本征模态函数分量,获得特征向量后与支持向量机结合,对切削过程中的颤振进行识别。Ji 等<sup>[33]</sup>采用集成经验模态分解(EEMD)方法将加速度信号分解成若干个本征模态函数,如图5所示,基于此对铣削过程中产生的颤振

进行了监测,此方法对铣削精度的提高有积极意义。

变分模态分解(VMD)具备高效、精准的信号处理能力,可以缓解上述方法存在的缺陷。Zhang 等<sup>[34]</sup>提出了一种基于变分模态分解对铣削颤振特征进行提取的新方法,相比于其他手段,具有更高的颤振识别精度。张添慈等<sup>[35]</sup>通过变分模态分解法来提取信号特征,并结合神经网络模型对刀具磨损状态进行了较为精

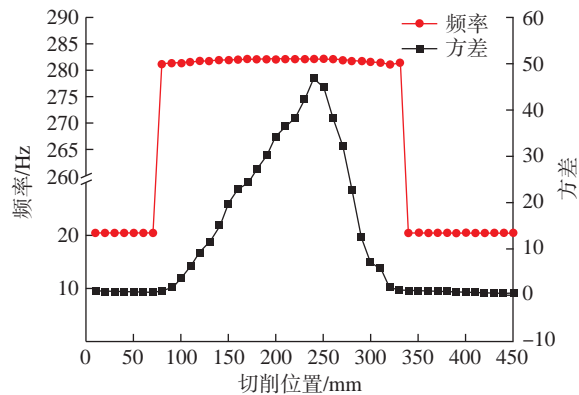


图2 加速度信号的频谱和方差分析<sup>[22]</sup>

Fig.2 Spectrum and variance analysis of acceleration signals<sup>[22]</sup>

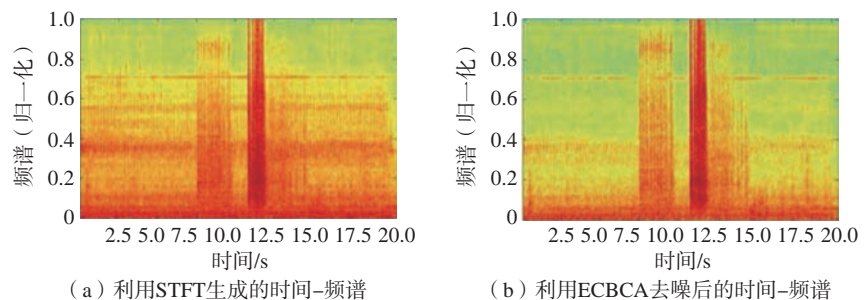


图3 由STFT和ECBCA产生的时间-频谱<sup>[26]</sup>

Fig.3 Time-spectrum produced by STFT and ECBCA<sup>[26]</sup>

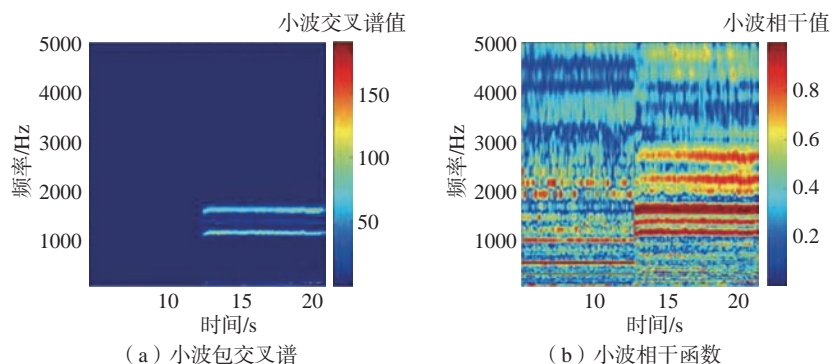


图4 加速度信号的小波交叉谱和小波相干函数<sup>[31]</sup>

Fig.4 Wavelet cross spectrum and wavelet coherence function of acceleration signals<sup>[31]</sup>

准的预测。Mou 等<sup>[36]</sup>针对航空薄壁件高速铣削过程中颤振的监测问题,采用变分模态分解方法对铣削颤振进行识别,经验证该方法具有较高的识别效率和精度,为铣削颤振监测的实现打下坚实的基础。

### 2.3 铣削刀具状态特征融合

刀具在切削过程中会产生力、振动和功率等多种物理信号。由于信号能够随着切削的进行发生相应的变化,因此可通过对信号特性进行分析,进而建立与刀具相关联的模型,映射出加工过程中刀具磨损的变化过程<sup>[37]</sup>。不同类型的传感器信号能够从不同的角度反映出刀具磨损情况,表1是切削过程中常用的一些监测信号。

单一传感器信号所含有的信息无法对刀具磨损状态进行全面描述。因此,利用单一信号来训练模型会影响其精度<sup>[38]</sup>。利用多传感器信号所包含的信息建立模型能够有效弥补这一缺点,穆殿方等<sup>[39]</sup>利用铣削力、振动及声发射信号分别建立深度学习铣刀磨损识别模型,并对比了利用单信号特征与多信号特征融合分别对铣刀磨损状态的监测效果。结果表明,多信号特征融合具有更高的识别精度。Segreto 等<sup>[40]</sup>采用BP神经网络,对声发射、振动、力信号进行信息融合,实现了对刀具磨损状态的监测。陈群涛等<sup>[41]</sup>通过监测振动信号和声发射信号来表征铣削刀具破损状态信息,并经分析验证多传感器融合

技术能有效解决噪音和信号干扰的问题。朱晓玲<sup>[42]</sup>组合了振动与声发射传感器,利用多传感器信息融合技术对高速铣削过程中的刀具磨损状态进行监测,达到了预期精度。

## 3 薄壁件加工状态监测进展

### 3.1 刀具状态监测

由于切削力、切削热等因素的综合作用,刀工接触表面会经历复杂的磨损、破损机理变化。因此,切削刀具状态是影响航空航天薄壁件铣削加工质量与效率的关键因素之一。针对铣削过程中刀具磨损、破损状态的监测,通常利用与刀具紧密相关的力、声音、振动等信号,从侧面反映刀具的实时状态,并具有较高的识别精度。

#### (1) 刀具磨损。

薄壁件多为钛合金材质,由于其结构、材料特性,一般采用高速铣削的加工方式,具有较高的加工效率。但随着铣削速度的提升,刀具磨损也会随之加剧。对刀具磨损状态进行精准监测,能有效提高薄壁件的加工精度,如图6所示。

在对切削过程中刀具磨损状态进行监测时,为提高监测的效果,学者们采用多传感器信息能更全面地描述刀具磨损的状态。实践证明,并不是传感器信息越多,监测的精度就越高,需根据不同的工况,进行合理的选择。

实现对切削过程中刀具磨损状态监测的重点是信息融合模型的选择。

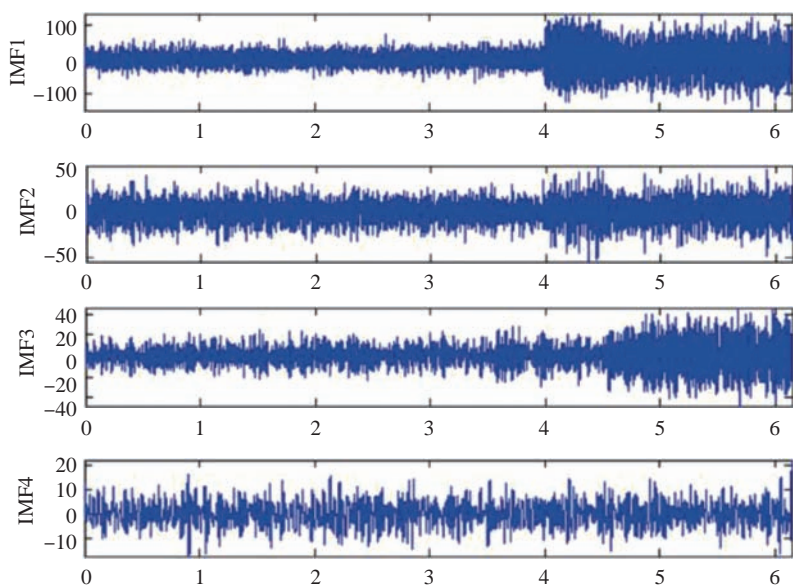


图5 基于EEMD将加速度信号分解成若干个本征模态函数<sup>[33]</sup>

Fig.5 Decomposition of acceleration signal into several eigenmode functions based on EEMD<sup>[33]</sup>

表1 常用传感器信号及其特点

Table 1 Sensor signals and characteristics used commonly

信号类型	传感器类型	特点
切削力信号	力传感器/测力仪	灵敏度高,响应快,与切削过程有至为密切的关系,能够很好地反映出刀具磨损过程
振动信号	加速度传感器	使用安装简单,灵敏度高,响应快,可实时反应监测对象的特性,成本低
声发射信号	声发射传感器	安装方便,对切削过程中刀具的异常和失效情况特别敏感
电流信号	电涡流传感器	安装简单,易于提取,易受干扰,在轻负载时灵敏度低,响应慢
温度信号	热电偶	不易安装,信号不稳定,受冷却液影响较大,当温度变化时响应慢、聚焦困难

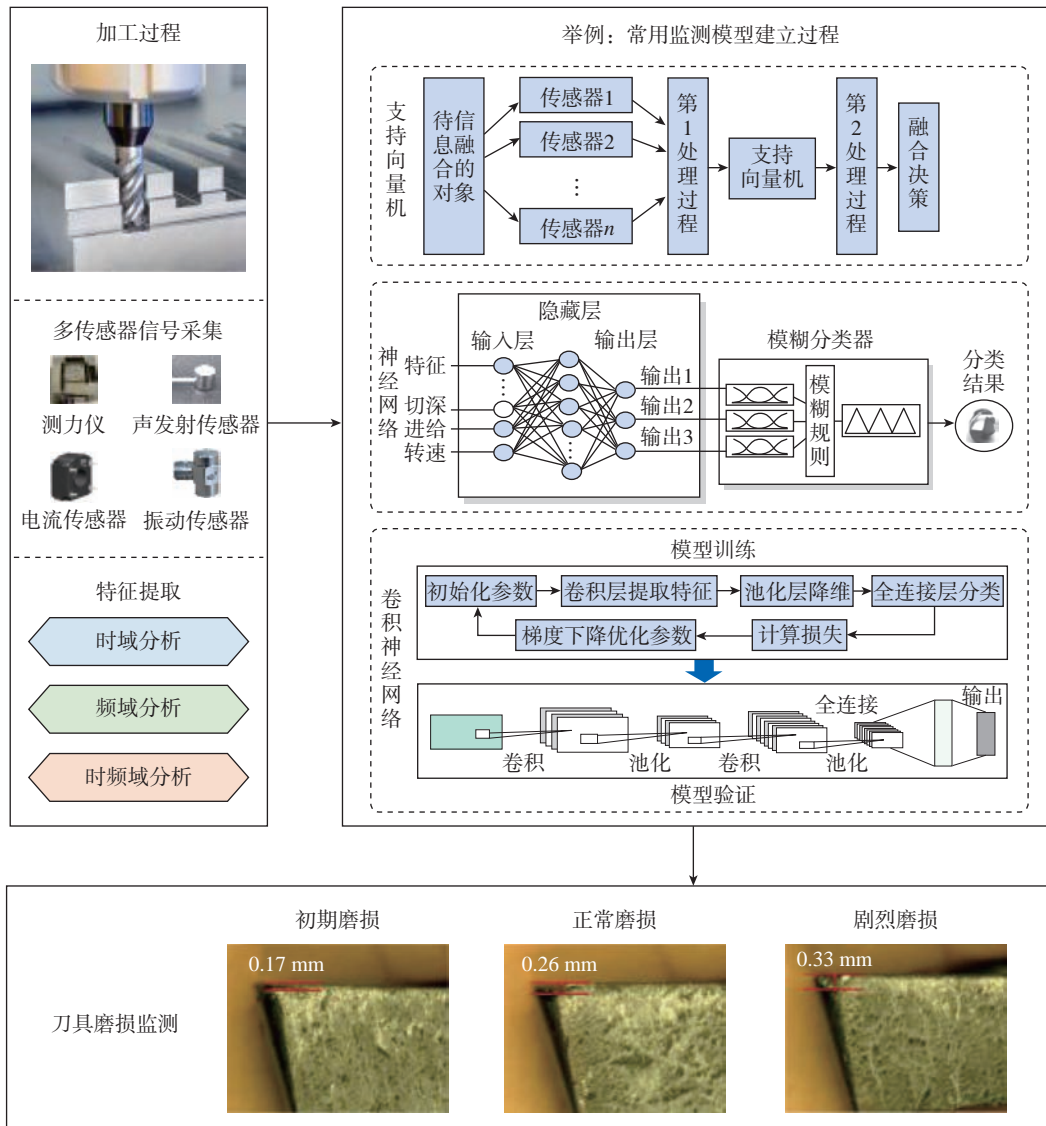


图6 刀具磨损状态监测流程图

Fig.6 Flow chart of tool wear status monitoring

深度学习方法是目前刀具磨损状态监测的主流,而卷积神经网络是其重要代表。Huang<sup>[43]</sup>、Cooper<sup>[44]</sup>、吴凤和<sup>[45]</sup>和周谦<sup>[46]</sup>等使用深度卷积神经网络模型,对切削过程中刀具磨损状态进行了监测,经过验证,平均监测精度能达到95%以上。其中Huang等<sup>[43]</sup>构建了一种基于多传感器信息驱动的重塑时间序列卷积神经网络模型(RTSCNN),如图7所示,相比于传统方法,能实现自适应特征提取,无须进行复杂的信号处理,有效提高了监测的效率。

此外,学者们还分别利用支持向量机<sup>[47]</sup>、粗糙集<sup>[48]</sup>、聚类方法<sup>[49]</sup>和EAM网络模型<sup>[50]</sup>等来实现切削过程中刀具磨损状态的监测。同时,为了提高刀具磨损监测的精度,学者们将不同的模型进行了兼容互补,如神经网络与模糊逻辑、支持向量机与遗传算法等。

#### (2) 刀具破损。

在切削过程中由于工件材料硬度不均等原因,刀具极易产生切削刃的微崩。微崩的产生往往不易察觉,随着继续加工,工件质量逐渐降低,破损部位

逐步扩大,直到完全丧失切削能力。在刀具破损监测的过程中常通过光学图像、振动、力、声发射等传感器来采集信号信息,并对相关特征进行提取,如图8所示,基于神经网络<sup>[51-52]</sup>、AR模型<sup>[53]</sup>、支持向量机<sup>[54-55]</sup>、MCCN<sup>[56]</sup>等方法实现对刀具破损状态的识别,其中Xu等<sup>[55]</sup>采用打破常规的方法,取消了外部传感器的设置,利用数控系统的间接信号,如主轴功率,来反映刀具破损状态,此方法不仅简化了系统,还能有效节约生产成本。此外,常用的方法很难在复杂工况下监测

到刀具早期发生的微崩,针对这一难题,吴琪文等<sup>[56]</sup>构建了一种多尺度卷积胶囊网络方法(MCCN),深入发掘了特征中的隐藏信息,其监测精度得到显著提升。

综上所述,多传感器信息融合技术能为刀具磨破损状态的监测提供更加全面的信息描述,使得识别效率得到进一步的提高。在传感器的选择配置中,不能盲目追求识别的效果,只侧重于传感器数量,而造成资源浪费和信息冗余,甚至对特征提取产生干扰。

### 3.2 薄壁件铣削过程颤振监测

由于薄壁件刚性较差,在加工过程中极易产生颤振,严重影响了薄壁件的加工精度。实现对薄壁件铣削颤振的精准监测,对提高抑制颤振效果和保障加工系统稳定有着重要的意义。颤振的成因错综复杂,形成机理的差异性导致了不同的颤振形式,其中再生型颤振是目前的研究重点。

#### 3.2.1 颤振早期监测

实现对颤振的早期监测,尽量避免颤振的过度发展,并采取有效的避振措施,对提高薄壁件的加工精度有着积极的作用。如图9所示,吕凯波等<sup>[57]</sup>针对传统方法的不足,提出了一种小波包能量峭度的方法来预警早期的切削颤振,试验结果表明,该方法可以有效地识别出早期颤振状态,为后续有效抑制颤振提供时间。同时, Ji等<sup>[58]</sup>在总结分析铣削颤振信号特征的基础上,构建了一种综合经验模态分解(EMD)和多指标评价的智能早期颤振识别方法。铣削试验结果表明,所提出的方法能够高效监测早期铣削颤振。此外, Hynynen等<sup>[59]</sup>采集加速度和声信号的相关函数来作为切削颤振特征,此方法经实践证明能够实现颤振的早期监测,有效提高了工件质量。早期颤振的产生不易被发掘,需采取一系列措施迅速、准确提取特征信息,尽可能提高抑制效果。

#### 3.2.2 有监督颤振识别技术

颤振识别是实现颤振在线监测的关键步骤,目前国内外学者对颤振识别的研究主要集中于有监督的识别技术,通过机械学习方法,建立信号特征与铣削加工状态之间的映射

关系,最终实现对颤振的监测。

Tran等<sup>[60]</sup>利用小波变换将铣削力信号转变为二维图像,基于深度卷积神经网络,如图10所示,实现了铣削颤振的在线监测,识别精度能达到99.67%。此外, Zhu等<sup>[61]</sup>提出一种

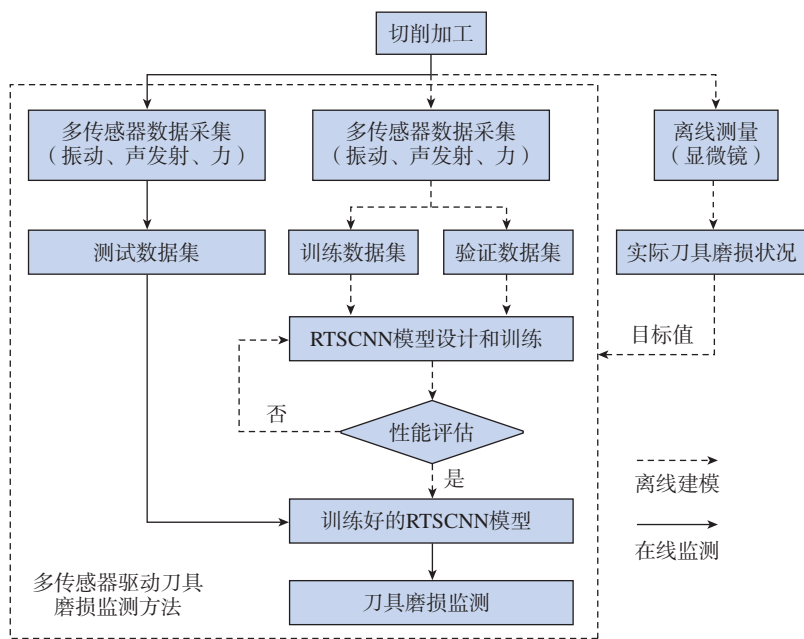


图7 基于RTSCNN的多传感器驱动刀具磨损监测方法<sup>[43]</sup>

Fig.7 Multi-sensor driven tool wear monitoring method based on RTSCNN<sup>[43]</sup>

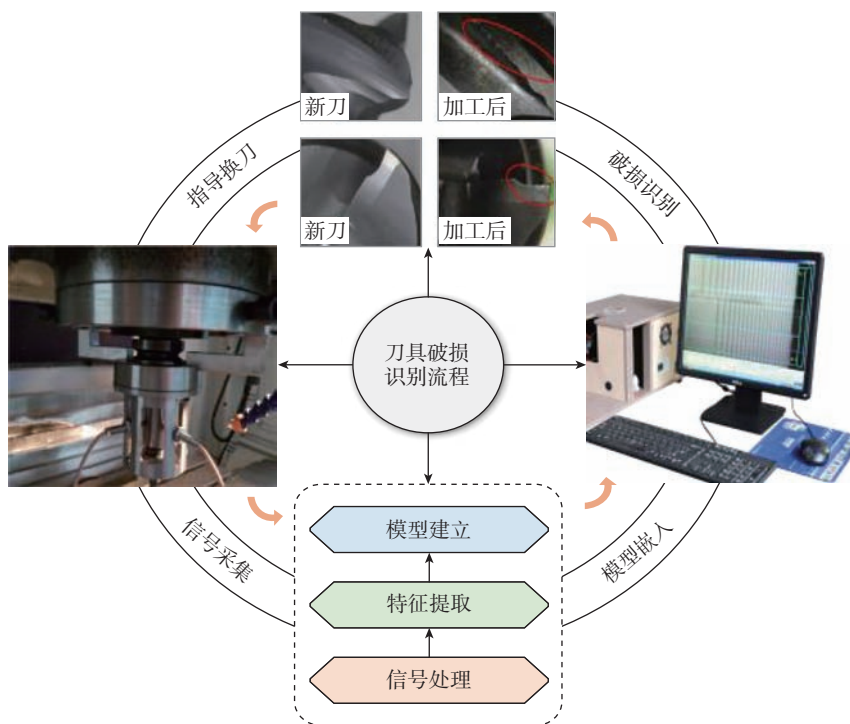
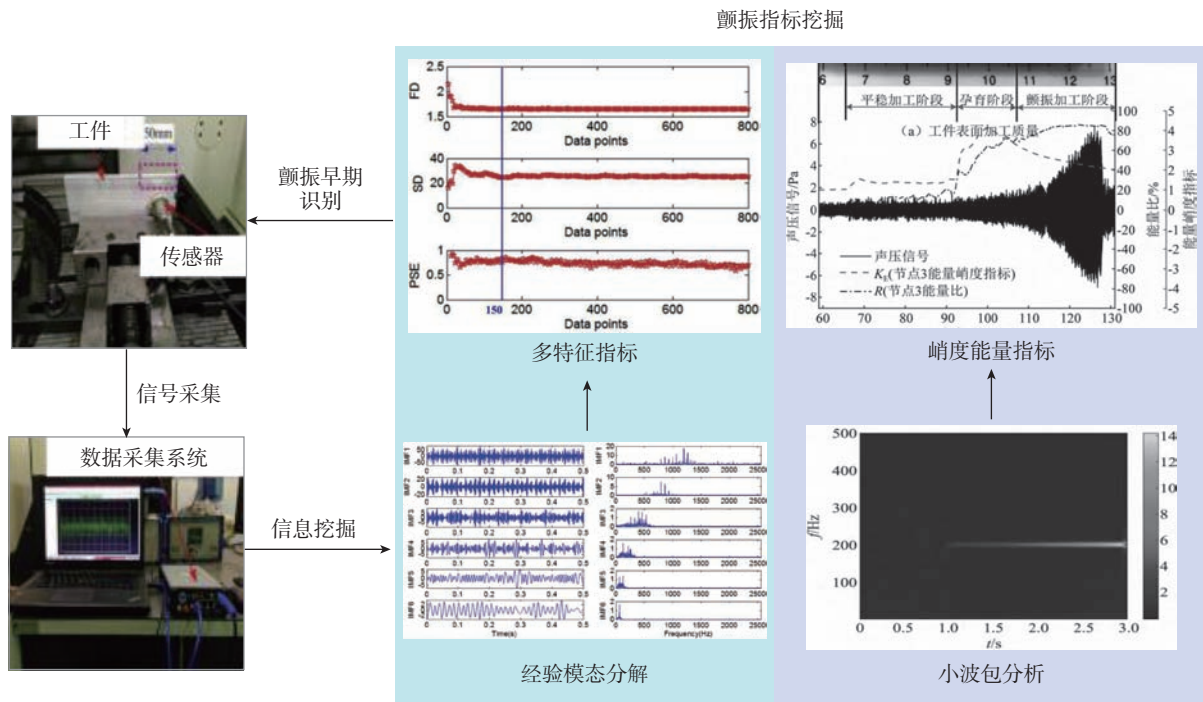
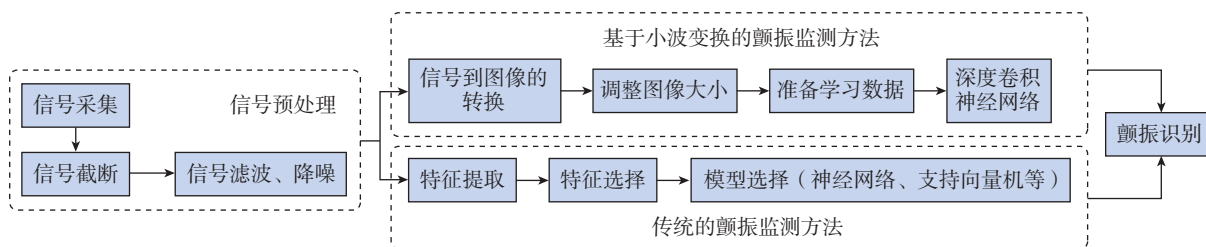


图8 刀具破损状态监测流程图

Fig.8 Flow chart of tool breakage status monitoring

图9 两种颤振早期监测方法<sup>[57]</sup>Fig.9 Two methods for early detection of chatter<sup>[57]</sup>图10 铣削颤振识别流程图<sup>[60]</sup>Fig.10 Flow chart of milling chatter identification<sup>[60]</sup>

基于卷积神经网络的铣削颤振识别方法,该方法通过采集加工表面图像对颤振进行识别,识别精度达到了98.3%,但此方法需要大量的图像来训练卷积神经网络,影响了监测的效率。

支持向量机(SVM)相比于神经网络方法具有更高的分类精度和泛化能力。Yao等<sup>[62]</sup>利用小波分析方法对特征进行了提取,基于支持向量机模型进行颤振的识别,监测精度能达到95%,且研究结果适用于不同的切削工况。此外,Li等<sup>[63]</sup>通过对图像设置距离阈值,构建了图像与颤振指标之间的映射关系,并基于支持向量机模型对铣削颤振进行识别,经

验证识别精度能达到96.66%,证明了该方案的可行性与有效性。使用图像信号来对颤振进行监测是一种新兴趋势,基于此开发的模型具有很高的精度,但在线识别的实时性不强,仍需要进一步研究。

基于神经网络和支持向量机的机械学习方法是目前最具代表性的有监督颤振识别技术。此外,学者们还构建了提升法、随机森林、决策树等颤振识别方法,其中提升法具有最佳鲁棒性,随机森林方法抗干扰能力最强,决策树方法计算最为便捷。

实现对薄壁件铣削颤振的监测,信号特征的提取是关键,信号特征必须对加工状态异常敏感。面对不同

工况,需灵活提取合适的特征,才能实现最佳的颤振监测效果。

### 3.3 薄壁件铣削变形监测

薄壁件结构复杂、刚度较低,因其独特的结构、材料特性,使得薄壁件在铣削过程中极易产生加工变形,对其进行精准监测能有效提高工件的精度。Brinksmeier等<sup>[64]</sup>指出残余应力、加工方式、工件几何形状是影响加工变形的主要因素。面对残余应力对薄壁件铣削变形的影响,学者们常使用数值模拟方法对残余应力分布情况进行仿真分析,并采取合适的手段对其进行控制。

薄壁件在铣削过程中,由于其自身特性,在铣削力的作用下极易发生

弹性变形。走刀过后,薄壁件弹性变形部位发生回弹,从而引起薄壁件的加工误差。

国内外的学者通常采用离线预测的方法对薄壁件铣削加工过程进行模拟仿真,通过获取优化的铣削参数,来提高工件的加工质量。但离线方法所使用的预测模型并不能全面描述铣削全过程,对实际的指导意义有限。为此科研人员在薄壁件铣削变形在线监测方向做了诸多尝试。Wang等<sup>[65]</sup>通过采集切削力信号,基于最小二乘拟合和提升小波变换构建了一种关于薄壁件铣削变形的在线监测系统,经验证监测误差能保持在 $10\ \mu\text{m}$ 以内。同时,靳刚等<sup>[66]</sup>构建了一种面向曲面薄壁零件的铣削加工监测系统,通过激光位移传感器采集实时铣削数据,实现了薄壁件加工变形的在线监测。

薄壁件在铣削过程中产生的加工误差主要来源于力致变形,可以根据对误差的测量来实现对铣削变形的在线监测。同时,为了降低薄壁件铣削变形的影响,学者们在实现在线监测的基础上,采取实时补偿方法予以实现。在机测量(OMM)因其具有在线测量、高效等优点,近年来在薄壁件铣削变形监测及实时补偿领域得到了大量运用。Ge等<sup>[67]</sup>构造了一种集加工状态监测、在位测量检测、加工误差建模及实时补偿为一体的自动化方法,通过补偿试验,证明了此方法能有效提高薄壁腹板的加工精度和效率。Wang等<sup>[68]</sup>为了提高薄壁件的加工质量,使用机器集成的触摸探头对工件粗/半精加工余量进行了在线测量,计算出误差后及时补偿调整,显著提高了工件的精度。Huang等<sup>[69]</sup>针对薄壁件在铣削过程中产生的加工变形,利用基于触控探针的在机测量系统对被加工工件进行了精度测量,同时通过修改刀具轨迹来补偿误差,此方法的有效性在叶轮叶片加工试验中得到了验证。

但在机测量检测系统的精度易受到机床误差的影响,如几何误差、热误差等,如何提高精度仍需进一步的研究改进。

此外,Zhang等<sup>[70]</sup>针对大型薄壁件在加工过程中产生的铣削变形影响其厚度和精度的问题,构建了一种关于工件厚度和局部变形的在线测量系统,如图11所示,通过基于改进史密斯预测器(MSP)和扰动观测器(DOB)的镜面铣削厚度误差补偿方法进行实时补偿,经试验证明,此技术能良好抑制铣削变形对薄壁件厚度和精度的影响。

通过对薄壁件加工误差进行在线测量来实现对铣削变形的监测,相比于传统的模拟预测方法,无须提供大量的铣削数据和构建复杂的模型,能够大幅提升效率。通过实时补偿的手段,能显著提高工件的质量。但是在实现在线测量的同时,需要重点考虑影响其检测精度的因素,如刀具磨损和机床误差等。

#### 4 基于数字孪生技术的加工状态监测研究

目前数字孪生技术是智能制造领域的研究热点,利用数字技术构建物理实体在数字空间的虚拟模型,并

通过两者之间信息的实时融合交互,最终实现在虚拟空间对实时加工状态进行监测<sup>[71]</sup>。利用数字孪生技术将物理空间与虚拟空间进行连接,对提高薄壁件铣削加工状态的监测精度有着重要的意义。

为了提高切削刀具磨损状态的监测精度,李聪波等<sup>[72]</sup>提出了一种基于数字孪生驱动的铣削刀具磨损实时监测方法,与常规方法相比,监测精度能保持在95%以上。Christiand等<sup>[73]</sup>构建了一种使用数字孪生技术来监测微铣削刀具磨损状态的新方法,但此方法构建的数字孪生模型并不能全面反映实时加工状态,监测效果仍有待提高。

数字孪生技术具有物理与虚拟信息高度融合且同步的特点,能在复杂多变的工况下为薄壁件铣削加工状态监测提供一定的优化和指导。基于数字孪生技术,本文构建了一种面向薄壁件铣削加工状态监测的孪生系统,如图12所示,主要由3部分组成,物理空间、孪生数据层、虚拟空间。物理空间主要有机床实体、多种传感器,并通过信号采集卡将各监测信息进行采集,使用时域、频域、时频域方法对状态特征进行提取。最后将采集得到的数据传输到孪生数

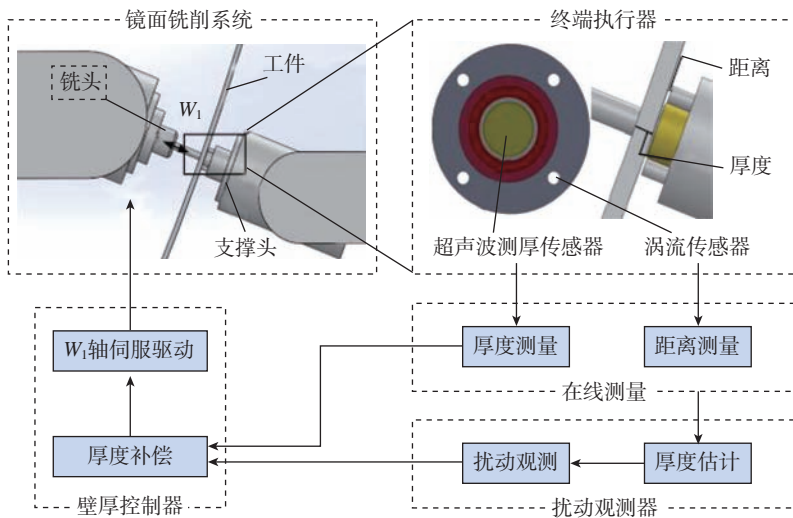


图11 在线测量及补偿系统简述<sup>[70]</sup>

Fig.11 A brief description of the online measurement and compensation system<sup>[70]</sup>

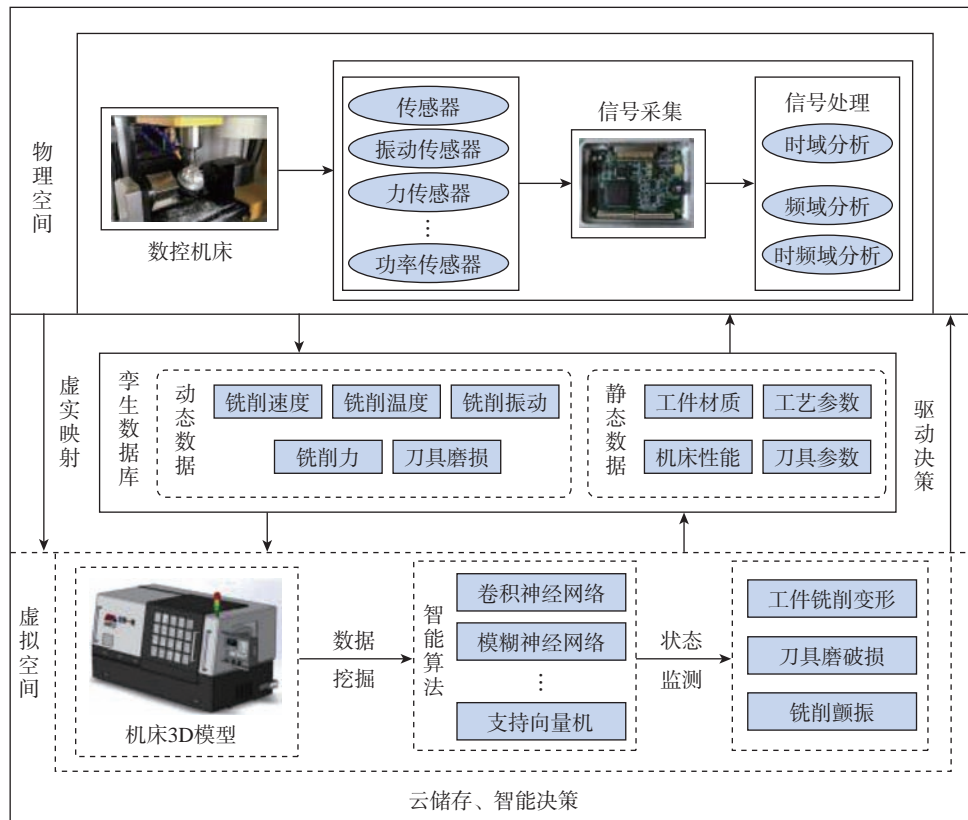


图 12 面向薄壁件铣削加工状态监测的数字孪生系统

Fig.12 Digital twin system for condition monitoring of milling of thin-walled parts

据层中。虚拟空间对数据进行分析处理后,构建虚拟机床模型,并对加工全过程进行模拟仿真,经过智能决策,在孪生数据的驱动下,实现对各目标状态的实时监测。

目前基于数字孪生技术对薄壁件加工状态监测的研究还未成熟,需要解决的难题有:(1)虚实空间信息的融合交互如何保证精度和实时性;(2)基于孪生数据构建的虚拟模型能否全面描述加工状态。

## 5 应用实例

### 5.1 航空薄壁件加工监测

以某航空公司薄壁件加工过程为例,预先考虑了薄壁件在铣削过程中产生的加工变形及弹性恢复,采取了主动补偿的方法对变形进行了有效的控制,并建立一套铣削力在线监测系统,成功应用于生产实践<sup>[74]</sup>。

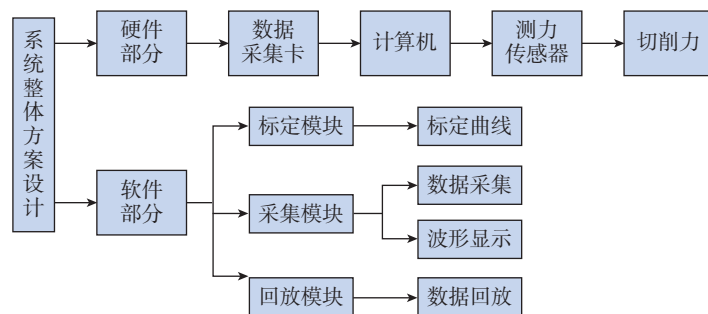
(1) 如何对在铣削力作用下产

生的弹性恢复进行补偿,是提高薄壁件加工精度的关键。在铣削加工前,通过主动补偿方法,在局部刀位点对刀具的切削深度进行了补偿,经过有限元模型的分析对比,补偿前后的刀位点最大加工误差减少达到了98.4%,且整体工件的加工误差趋于均匀化分布。(2) 为了提高薄壁件的加工精度,采用电阻式三向力传感器采集信号信息,并基于 LabVIEW

建立了铣削力在线监测系统,以便及时调整铣削参数。具体在线监测系统如图 13 所示,此系统在生产中得到较好的监测效果。

### 5.2 一种基于内嵌式压电传感器的薄壁件铣削颤振监测方法

针对薄壁件铣削颤振监测常用方法,存在实践操作不便的问题,张定华等<sup>[75]</sup>提出了一种基于内嵌式压电传感器的薄壁件铣削颤振监测方

图 13 铣削力监测系统总体设计方案框架<sup>[74]</sup>Fig.13 Framework of overall design scheme of milling force monitoring system<sup>[74]</sup>

法,将内嵌式压电传感器放置于夹具中,如图14所示,通过测试后,对薄壁件铣削过程中产生的颤振信号进行实时采集,随后对信号进行分析处理,最终实现对铣削颤振的监测。此铣削颤振监测方法,通过内置传感器避免了外界环境对信号采集的干扰。在具体的实施过程中,当监测信号中出现颤振特征时,能及时采取措施调整铣削参数,避免了颤振的继续发展。此方法不仅能有效提高薄壁件的加工精度,还能在一定程度上增加颤振监测的时效性。

### 5.3 一种面向复杂工况的薄壁件加工状态监测新方法

针对当前薄壁件加工状态的监

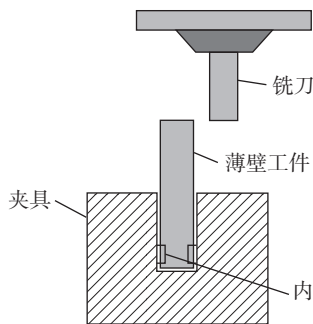


图14 内置传感器监测铣削颤振示意图<sup>[75]</sup>  
Fig.14 Schematic diagram of built-in sensor monitoring milling chatter<sup>[75]</sup>

测目标较为单一,无法解决多监测目标耦合的难题,刘长青等<sup>[76]</sup>发明了一种将多种工况进行耦合,并基于支持向量机实现对薄壁件复杂工况加工状态在线监测的新方法,如图15所示,学者使用传感器采集得到不同加工状态下的数据信息,并通过相关处理得到各加工状态的敏感频段,进而利用信号处理方法提取得到敏感频段的统计数据信息,并与试验切削参数进行融合构成特征向量,基于支持向量机进行加工状态辨识,得到不同加工状态的判别式,最终实现对不同目标状态(刀具磨破损、工件变形)耦合下的监测与识别。

### 5.4 一种基于数字孪生驱动的薄壁件铣削加工实时仿真方法与系统

航空航天薄壁件刚性较差,在铣削过程中难以通过恒定的铣削参数确保薄壁件的高质、高效加工。周光辉等<sup>[77]</sup>构建了一种基于数字孪生驱动的薄壁件铣削加工实时仿真方法与系统,如图16所示,通过数字孪生技术建立了薄壁件铣削加工实时仿真模型,获得了实时的工件变形情况,基于此,动态调整铣削参数,有效提高了工件的加工精度。同时,建立

的数控铣床数据感知模型不仅能为铣削仿真提供实时的加工数据,还能实现薄壁件铣削实时仿真和网页端的可视化。

## 6 结论与展望

本文综述了关于薄壁件铣削加工状态监测的最新研究进展,总结归纳了建立加工状态监测模型的关键技术与方法,详细阐述了加工过程中刀具磨破损、铣削颤振和铣削变形等具体状态监测的过程。基于数字孪生技术展望了薄壁件铣削加工状态监测未来的研究方向,主要结论如下。

(1)对加工信息进行合适的预处理是实现薄壁件铣削加工状态监测的基础。单一的传感器信息已无法满足目前的工作需求,引入的多传感器信息融合技术可以显著提高薄壁件加工状态监测的精度和可靠性。但在实际应用中仍存在许多问题,如信息融合模型的精度不高,传感器的使用具有一定的局限性等,需从理论入手研究,以提高多传感器信息融合技术的实效性。

(2)使用智能算法等方法是实现薄壁件铣削过程加工状态监测

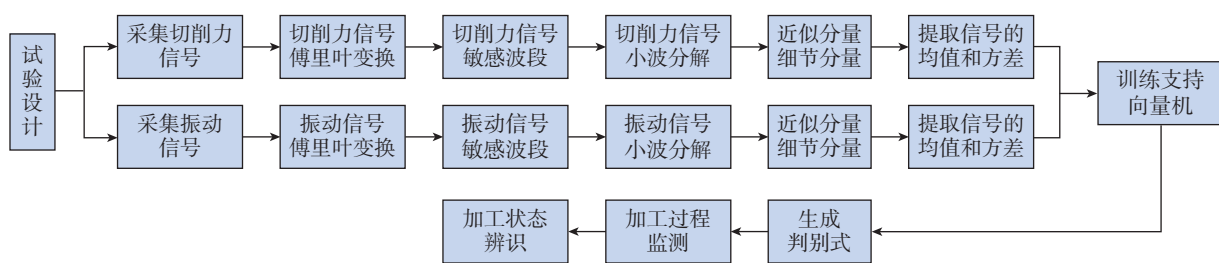


图15 复杂工况加工状态监测示意图<sup>[76]</sup>

Fig.15 Schematic diagram of processing condition monitoring in complex working conditions<sup>[76]</sup>

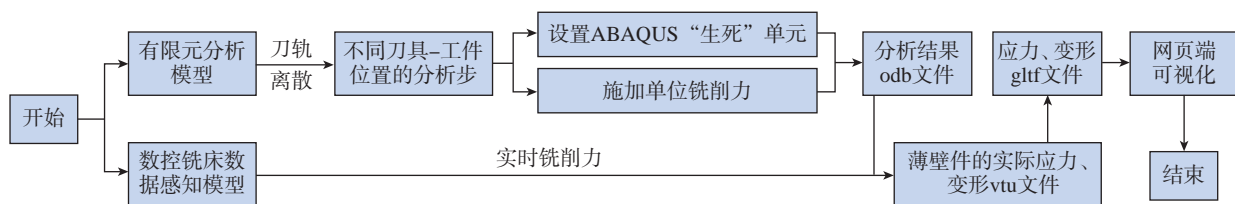


图16 基于数字孪生驱动的薄壁件铣削加工实时仿真方法与系统示意图<sup>[77]</sup>

Fig.16 Real-time simulation method and system diagram of thin-walled milling process based on digital twin drive<sup>[77]</sup>

的关键。在构建刀具磨破状态监测模型时,合理选择传感器获取刀具状态信息是重点,应避免过多传感器信息冗余对特征提取产生干扰。此外,在未来的研究中,如何利用更高精度的设备检测刀具的实时磨破状态是关键所在。在对铣削颤振进行监测时,相关信息采集及处理方面仍存在的问题,无法真正实现颤振的在线识别监测。另外,有监督颤振识别技术存在成本过高,监测实时性、准确性欠佳的问题,如何解决仍需进一步研究。

(3) 在对薄壁件铣削变形进行监测时,模拟仿真预测加工误差的方法虽然成本低、效果尚可,但其仿真结果并不能直接应用于生产实际。而在线测量加工误差的手段不仅能适应复杂多变的工况,还能通过实时补偿技术有效提高薄壁件的加工质量。在线检测的精度仍受到多种因素的影响,如何提高其精准性是未来需要解决的问题。

(4) 基于数字孪生技术实现对薄壁件铣削加工状态的高质、高效监测是未来研究的热点,目前在此领域的研究并未深入。同时,孪生数据的精准融合、虚拟模型的精细化是未来亟待解决的问题。

## 参考文献

- [1] 唐倩,李金凤,孙造,等.薄壁类零件加工工艺和应用[J].新型工业化,2021,11(5):225-226.  
TANG Qian, LI Jinfeng, SUN Zao, et al. Processing technology and application of thin-walled parts[J]. The Journal of New Industrialization, 2021, 11(5): 225-226.
- [2] 赵明伟,岳彩旭,陈志涛,等.航空结构件铣削变形及其控制研究进展[J].航空制造技术,2022,65(3):108-117.  
ZHAO Mingwei, YUE Caixu, CHEN Zhitao, et al. Research progress on milling deformation and control of aviation structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(3): 108-117.
- [3] 滕洪钊,邓朝晖,吕黎曙,等.多传感器信息融合的加工过程状态监测研究[J].机械工程学报,2022,58(6):26-41.  
TENG Hongzhao, DENG Zhaozhui, LÜ Lishu, et al. Research of process condition monitoring based on multi-sensor information fusion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(6): 26-41.
- [4] 周济.智能制造是“中国制造2025”主攻方向[J].企业观察家,2019(11):54-55.  
ZHOU Ji. Intelligent manufacturing is the main direction of “Made in China 2025” [J]. Business Watcher, 2019(11): 54-55.
- [5] CHEN Y X, JIN Y, JIRI G. Predicting tool wear with multi-sensor data using deep belief networks[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5-8): 1917-1926.
- [6] BAGGA P J, CHAVDA B, MODI V, et al. Indirect tool wear measurement and prediction using multi-sensor data fusion and neural network during machining[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 51-55.
- [7] TRAN M Q, LIU M K, ELSISI M. Effective multi-sensor data fusion for chatter detection in milling process[J]. ISA Transactions, 2022, 125: 514-527.
- [8] 陈熹.浅析薄壁类零件加工[J].机电元件,2018,38(1):23-25.  
CHEN Xi. An analysis of the processing of thin wall parts[J]. Electromechanical Components, 2018, 38(1): 23-25.
- [9] 武永,陈明和.钛合金薄壁件热塑性成形工艺研究进展[J].航空制造技术,2021,64(20):78-87.  
WU Yong, CHEN Minghe. Progress of hot metal plastic forming technology for titanium alloy thin-walled parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(20): 78-87.
- [10] 冯佳彬.大型薄壁件内壁加工方法及加工工艺的研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2016.  
FENG Jiabin. Research on the processing method and technology of large thin wall parts[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2016.
- [11] 孟锐.薄壁件高速铣削加工工艺[J].金属加工(冷加工),2022(3):34-36.  
MENG Rui. High speed milling process for thin-walled parts[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2022(3): 34-36.
- [12] 田汝坤.铣削钛合金薄壁件刀具结构设计研究[D].济南:山东大学,2012.  
TIAN Rukun. Tool structures design for milling titanium thin-walled parts[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [13] 王刚,童刚,毛金城,等.航空薄壁件原位检测与补偿加工方法研究[J].装备制造技术,2017(10):56-63.  
WANG Gang, TONG Gang, MAO Jincheng, et al. The research on on-site inspection and compensation machining method for aviation thin-walled parts[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(10): 56-63.
- [14] 李跃.薄壁零件高速铣削工艺与仿真研究[D].沈阳:东北大学,2008.  
LI Yue. Study on technology and simulation for high-speed milling of thin-walled workpiece[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [15] 王颖.薄壁件高速铣削加工变形误差预测及有限元分析[D].天津:河北工业大学,2013.  
WANG Ying. The error prediction and finite element analysis of thin-walled parts machining deformation in high speed milling[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [16] 罗宇.大型薄壁件加工变形预测及其影响因素研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
LUO Yu. Machining deformation prediction and research of influence factors for large thin-walled workpiece[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [17] 张敏,田锡天,李波.整体壁板压弯成形的形状控制[J].航空学报,2020,41(7):623620.  
ZHANG Min, TIAN Xitian, LI Bo. Shape control for press bend forming of integral panels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(7): 623620.
- [18] 岳彩旭,张俊涛,刘献礼,等.薄壁件铣削过程加工变形研究进展[J].航空学报,2022,43(4):106-131.  
YUE Caixu, ZHANG Juntao, LIU Xianli, et al. Research progress on machining deformation of thin-walled parts in milling process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 106-131.
- [19] 周子涵.基于多传感器信息融合的工具磨损状态和剩余寿命预测[D].太原:太原科技大学,2021.  
ZHOU Zihan. The prediction of tool wear condition and RUL based on multi-sensor information fusion[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2021.
- [20] 王莹.基于成分分解的自适应滤波降噪方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

学, 2017.

WANG Ying. Research on adaptive filter denoising method based on component decomposition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[21] 刘锐, 王玫, 陈勇. 基于优选特征的刀具磨损监测方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(3): 59-61.

LIU Rui, WANG Mei, CHEN Yong. A methodology of tool-wear detection based on optimal feature selection[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2010(3): 59-61.

[22] LU K B, LIAN Z S, GU F S, et al. Model-based chatter stability prediction and detection for the turning of a flexible workpiece[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 100: 814-826.

[23] SAFI S M, AMIRABADI H, LIRABI I, et al. A new approach for chatter prediction in robotic milling based on signal processing in time domain[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 346: 45-51.

[24] CHEN D, ZHANG X J, ZHAO H, et al. Development of a novel online chatter monitoring system for flexible milling process[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 159: 107799.

[25] LIU C, XU W W, GAO L. Identification of milling chatter based on a novel frequency-domain search algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(9-12): 2393-2407.

[26] LI Z X, LIU R, WU D Z. Data-driven smart manufacturing: Tool wear monitoring with audio signals and machine learning[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 48: 66-76.

[27] 李悦. 多传感器信息融合在刀具磨损在线监测中的应用研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2020.

LI Yue. Research on application of multi-sensor information fusion in tool wear condition monitoring[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2020.

[28] 张尔卿, 傅攀, 李威霖. 不完备先验知识下的刀具磨损状态评估方法研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(3): 418-422.

ZHANG Erqing, FU Pan, LI Weilin. Tool wear condition assessment based on incomplete priori knowledge[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(3): 418-422.

[29] 林杨, 高思煜, 刘同舜, 等. 基于

深度学习的高速铣削刀具磨损状态预测方法[J]. 机械与电子, 2017, 35(7): 12-17.

LIN Yang, GAO Siyu, LIU Tongshun, et al. A deep learning-based method for tool wear state prediction in high speed milling[J]. Machinery & Electronics, 2017, 35(7): 12-17.

[30] 高鹏磊, 库祥臣. 数控机床刀具磨损状态特征参数提取[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(6): 65-67.

GAO Penglei, KU Xiangchen. Characteristic parameters extraction of CNC machine tool wear state[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(6): 65-67.

[31] YUAN Y J, JING X B, LI H Z, et al. Chatter detection based on wavelet coherence functions in micro-end-milling processes[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(9): 1934-1945.

[32] 邵强, 胡红英, 李文龙. 基于 EMD 和 SVM 的切削颤振识别方法研究[J]. 煤矿机械, 2017, 38(2): 68-70.

SHAO Qiang, HU Hongying, LI Wenlong. Study on method of chatter recognition based on EMD and SVM[J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(2): 68-70.

[33] JI Y J, WANG X B, LIU Z B, et al. EEMD-based online milling chatter detection by fractal dimension and power spectral entropy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(1-4): 1185-1200.

[34] ZHANG P F, GAO D, LU Y, et al. Online chatter detection in milling process based on fast iterative VMD and energy ratio difference[J]. Measurement, 2022, 194: 111060.

[35] 张添慈, 陈兴文. 基于变分模态与神经网络的刀具寿命预测研究[J]. 山西电子技术, 2022(1): 79-80, 83.

ZHANG Tianci, CHEN Xingwen. Application research of tool life prediction based on VMD and neural network[J]. Shanxi Electronic Technology, 2022(1): 79-80, 83.

[36] MOU W P, ZHU S W, JIANG Z X, et al. Vibration signal-based chatter identification for milling of thin-walled structure[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1): 204-214.

[37] ABELLAN-NEBOT J V, ROMERO SUBIRÓN F. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010,

47(1-4): 237-257.

[38] DIMLA D E Snr. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—A review of methods[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(8): 1073-1098.

[39] 穆殿方, 刘献礼, 岳彩旭, 等. 深度学习与多信号融合在铣刀磨损状态识别中的研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(10): 1581-1589.

MU Dianfang, LIU Xianli, YUE Caixu, et al. Study on wear state recognition of milling cutter via deep learning and multi-signal fusion[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(10): 1581-1589.

[40] SEGRETO T, SIMEONE A, TETI R. Multiple sensor monitoring in nickel alloy turning for tool wear assessment via sensor fusion[J]. Procedia CIRP, 2013, 12: 85-90.

[41] 陈群涛, 石新华, 邵华. 基于多传感器信息融合方法的刀具破损识别[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(10): 61-65.

CHEN Quntao, SHI Xinhua, SHAO Hua. Tool breakage monitoring based on information coordination from multi-sensors[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(10): 61-65.

[42] 朱晓岭. 多传感器信息融合技术在铣削过程监测中的应用研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2010.

ZHU Xiaoling. Research on the application of multi-sensor information fusion technology on milling process monitoring[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2010.

[43] HUANG Z W, ZHU J M, LEI J T, et al. Tool wear predicting based on multisensory raw signals fusion by reshaped time series convolutional neural network in manufacturing[J]. IEEE Access, 7: 178640-178651.

[44] COOPER C, WANG P, ZHANG J J, et al. Convolutional neural network-based tool condition monitoring in vertical milling operations using acoustic signals[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 49: 105-111.

[45] 吴凤和, 钟浩, 章钦, 等. 基于卷积门控循环神经网络的刀具磨损状态监测[J]. 计量学报, 2021, 42(8): 1034-1040.

WU Fenghe, ZHONG Hao, ZHANG Qin, et al. Tool Wear condition monitoring based on convolution-gated recurrent neural network[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(8): 1034-1040.

[46] 周谦, 国凯, 孙杰. VGG13 卷积神

- 神经网络在刀具磨损监测中的应用[J]. 工具技术, 2022, 56(6): 112-116.
- ZHOU Qian, GUO Kai, SUN Jie. Application of VGG13 convolution neural network in tool wear monitoring[J]. Tool Engineering, 2022, 56(6): 112-116.
- [47] LIU C Q, LI Y G, ZHOU G Y, et al. A sensor fusion and support vector machine based approach for recognition of complex machining conditions[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018, 29(8): 1739-1752.
- [48] XIE N, ZHENG B R, XIE X W, et al. Research on the multi-sensor fusion-based tool condition recognition system[C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shenyang, 2014.
- [49] TORABI A J, ER M J, LI X, et al. Application of clustering methods for online tool condition monitoring and fault diagnosis in high-speed milling processes[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(2): 721-732.
- [50] LIU C, WANG G F, LI Z M. Incremental learning for online tool condition monitoring using Ellipsoid ARTMAP network model[J]. Applied Soft Computing, 2015, 35: 186-198.
- [51] 庄子杰, 王海丽, 汤为. 刀具破损状态声发射信号的多分辨率分析[J]. 机械设计与研究, 2009, 25(3): 87-89.
- ZHUANG Zijie, WANG Haili, TANG Wei. Tool breakage monitoring based on multi-resolution analysis of acoustic emission signals[J]. Machine Design & Research, 2009, 25(3): 87-89.
- [52] JIANG Kuosheng, XU Guanghua, TAO Tangfei, et al. Research on self-adaptive alarm technology of tool breakage based on wavelet packet and probabilistic neural network[C]//Applied Computing, Computer Science, and Computer Engineering (ACC2011V2). Malaysia, 2011.
- [53] 阚洪龙. 叶轮加工过程中铣刀破损在线监测方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- KAN Honglong. On-line monitoring method investigation of milling cutter breakage in the process of impeller machining[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [54] 王欣, 强云玥. 铣刀在铣削加工中破损特征的识别方法研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(10): 65-70.
- WANG Xin, QIANG Yunyue. Identification method for milling cutter breakage features in milling process[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018, 56(10): 65-70.
- [55] XU G D, CHEN J H, ZHOU H C. A tool breakage monitoring method for end milling based on the indirect electric data of CNC system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(1-4): 419-434.
- [56] 吴琪文, 周学良, 吴瑶. 多尺度卷积胶囊网络在刀具破损监测中的应用[J/OL]. 机械科学与技术. [2022-08-18]. <http://arxiv.org/abs/2008.00239>.
- WU Qiwen, ZHOU Xueliang, WU Yao. Application of multi-scale convolutional capsule network in tool breakage monitoring[J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering. [2022-08-18]. <http://arxiv.org/abs/2008.00239>.
- [57] 吕凯波, 娄培生, 谷丰收, 等. 基于声压信号能量峭度的早期切削颤振预警技术研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 50-55.
- LÜ Kaibo, LOU Peisheng, GU Fengshou, et al. A study on early chatter monitoring based on energy kurtosis index of acoustic signals[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(20): 50-55.
- [58] JI Y J, WANG X B, LIU Z B, et al. Early milling chatter identification by improved empirical mode decomposition and multi-indicator synthetic evaluation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 433: 138-159.
- [59] HYNYNEN K M, RATAVA J, LINDH T, et al. Chatter detection in turning processes using coherence of acceleration and audio signals[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(4): 044503.
- [60] TRAN M Q, LIU M K, TRAN Q V. Milling chatter detection using scalogram and deep convolutional neural network[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(3-4): 1505-1516.
- [61] ZHU W G, ZHUANG J C, GUO B S, et al. An optimized convolutional neural network for chatter detection in the milling of thin-walled parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(9-10): 3881-3895.
- [62] YAO Z H, MEI D Q, CHEN Z C. On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(5): 713-719.
- [63] LI D D, ZHANG W M, LI Y S, et al. Chatter identification of thin-walled parts for intelligent manufacturing based on multi-signal processing[J]. Advances in Manufacturing, 2021, 9(1): 22-33.
- [64] BRINKSMEIER E, SÖLTER J, GROTE C. Distortion engineering—Identification of causes for dimensional and form deviations of bearing rings[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 109-112.
- [65] WANG G F, YANG X H, WANG Z. On-line deformation monitoring of thin-walled parts based on least square fitting method and lifting wavelet transform[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9-12): 4237-4246.
- [66] 靳刚, 张鑫雨, 李占杰, 等. 曲面薄壁零件铣削加工监测装置: CN213052899[P]. 2021-04-27.
- JIN Gang, ZHANG Xinyu, LI Zhanjie, et al. Monitoring device for milling processing of curved thin-walled parts: CN213052899[P]. 2021-04-27.
- [67] GE G Y, DU Z C, YANG J G. On-machine measurement-based compensation for machining of thin web parts[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 48: 844-851.
- [68] WANG G, LI W L, TONG G, et al. Improving the machining accuracy of thin-walled parts by online measuring and allowance compensation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5-8): 2755-2763.
- [69] HUANG N D, BI Q Z, WANG Y H, et al. 5-Axis adaptive flank milling of flexible thin-walled parts based on the on-machine measurement[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 84: 1-8.
- [70] ZHANG S K, BI Q Z, JI Y L, et al. Real-time thickness compensation in mirror milling based on modified Smith predictor and disturbance observer[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 144: 103427.
- [71] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [72] 李聪波, 孙鑫, 侯晓博, 等. 数字孪生驱动的数控铣削刀具磨损在线监测方法

[J]. 中国机械工程, 2022, 33(1): 78–87.

LI Congbo, SUN Xin, HOU Xiaobo, et al. Online monitoring method for NC milling tool wear by digital twin-driven[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(1): 78–87.

[73] CHRISTIAND, KISWANTO G. Digital twin approach for tool wear monitoring of micro-milling[J]. Procedia CIRP, 2020, 93: 1532–1537.

[74] 林文强, 石峰, 冯战巨, 等. 航空薄壁件切削加工变形控制与实时监测研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(23): 42, 82–85.

LIN Wenqiang, SHI Feng, FENG Zhanju, et

al. Research on deformation control and real time monitoring of aeronautical thin-walled part cutting machining[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(23): 42, 82–85.

[75] 张定华, 孙午阳, 罗明, 等. 基于内嵌式压电传感器的薄壁件铣削加工振动监测方法: CN109894925B[P]. 2020–11–20.

ZHANG Dinghua, SUN Wuyang, LUO Ming, et al. Vibration monitoring method for milling of thin-walled parts based on embedded piezoelectric sensor: CN109894925B[P]. 2020–11–20.

[76] 刘长青, 李迎光, 周鑫, 等. 薄壁

零件复杂工况加工状态监测方法: CN103941645A[P]. 2014–07–23.

LIU Changqing, LI Yingguang, ZHOU Xin, et al. Processing condition monitoring method for complex working conditions of thin-walled parts: CN103941645A[P]. 2014–07–23.

[77] 周光辉, 魏智博, 张超, 等. 一种数字孪生驱动的薄壁件铣削加工实时仿真方法及系统: CN113714539A[P]. 2021–11–30.

ZHOU Guanghui, WEI Zhibo, ZHANG Chao, et al. A real-time simulation method and system for milling of thin-walled parts driven by digital twin: CN113714539A[P]. 2021–11–30.

## Research Progress on Machining Condition Monitoring During Milling of Aerospace Thin-Walled Parts

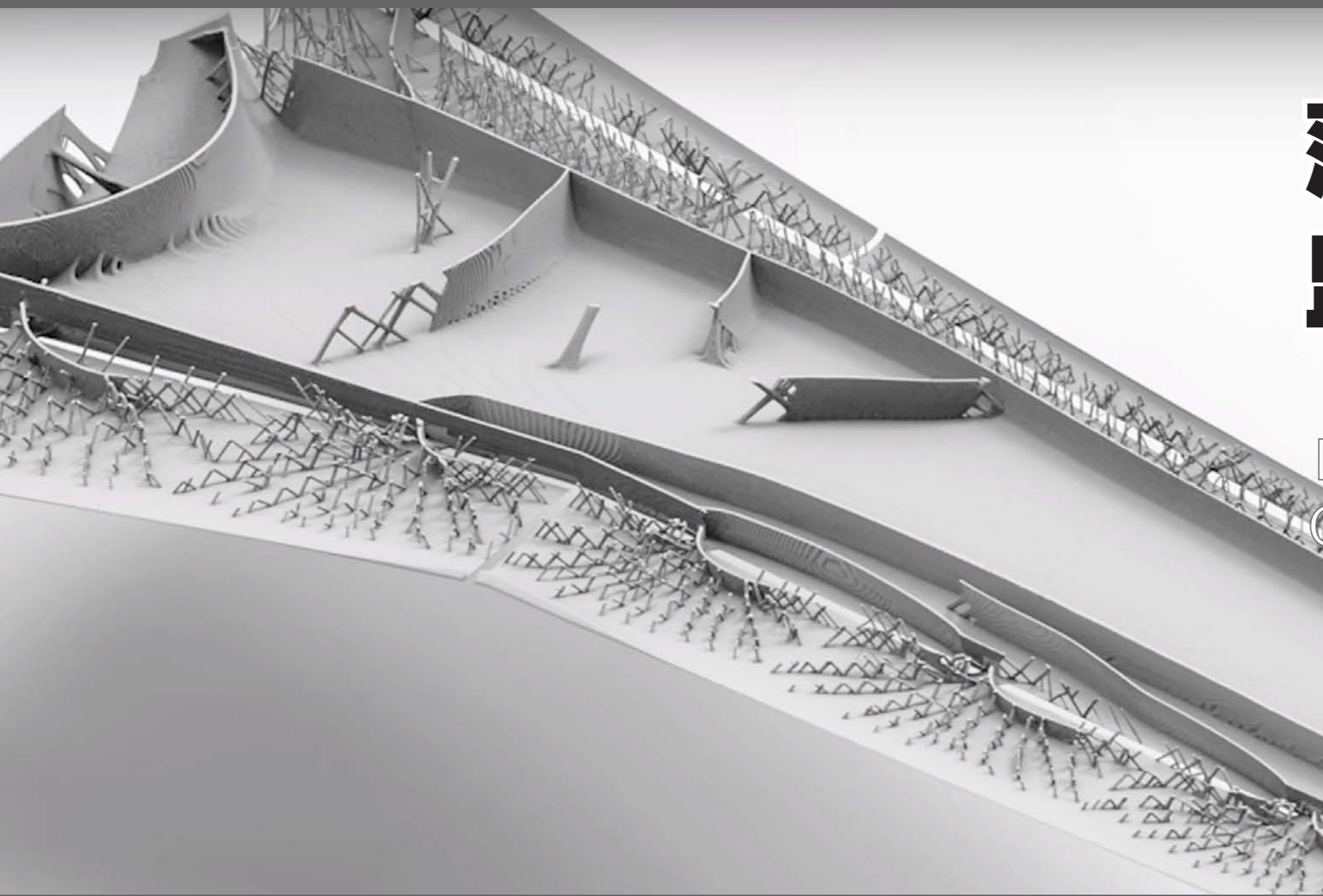
YUE Caixu, ZHOU Tianxiang, QIN Yiyuan, WANG Le, HU Desheng

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**[ABSTRACT]** Precise monitoring of machining status is the premise and guarantee for realizing deformation control of thin-walled parts. The latest research progress of milling machining condition monitoring of aerospace thin-walled parts is reviewed, and the key technologies and methods for establishing machining condition monitoring models are introduced in detail, including information collection and processing, feature extraction and feature fusion. It summarizes the development status and defects of scholars at home and abroad in the process of thin-walled parts processing on the specific state monitoring of tool grinding damage, milling flutter, milling deformation and so on. And based on the digital twin technology, a twin system for monitoring the milling processing status of thin-walled parts is constructed. Finally, according to the current development level of this field, the status monitoring of milling processing of thin-walled parts is prospected.

**Keywords:** Aerospace thin-walled parts; Feature extraction; Tool wear and damage; Milling chatter; Milling deformation; Digital twin

(责编 大漠)



# 薄壁件加工状态 监控与变形控制

Processing State  
Monitoring and Deformation  
Control of Thin-Walled Parts

薄壁零件结构复杂、刚度低，在铣削过程中易发生变形，因此精准预测与控制薄壁件的加工变形是机加工领域亟须解决的工艺难题。基于数字孪生技术的加工状态监测正成为薄壁件高性能加工的研究热点。



引文格式: 宋清华, 彭业振, 王润琼, 等. 数字孪生驱动的薄壁件铣削刀具磨损状态识别方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 46-52, 60.  
SONG Qinghua, PENG Yezhen, WANG Runqiong, et al. Tool wear state identification method of thin-walled parts milling process driven by digital twin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 46-52, 60.

# 数字孪生驱动的薄壁件铣削刀具磨损状态识别方法\*

宋清华<sup>1,2</sup>, 彭业振<sup>1,2</sup>, 王润琼<sup>1,2</sup>, 刘战强<sup>1,2</sup>

(1. 山东大学, 济南 250061;

2. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061)

[摘要] 薄壁零件由于其本身的弱刚性, 铣削过程中极易发生颤振、变形, 从而加剧刀具磨损, 为提高薄壁零件的铣削加工效率和表面质量, 提出了一种数字孪生与支持向量机(SVM)融合驱动的刀具磨损状态识别方法。利用时、频域分析和小波包变换提取特征向量, 通过网格搜索与交叉验证(GSCV)的方法进行超参数寻优, 结合SVM算法构建薄壁零件铣削刀具磨损状态识别模型。试验结果表明, SVM算法在高维小样本数据的分类识别问题中优势明显, 对于不同铣刀磨损状态的识别准确率分别达到96%和90.16%, 具有较好的泛化能力。结合机器学习算法构建高保真、轻量化的数字孪生体, 并将其嵌入薄壁零件铣削过程监测平台, 以解决加工过程中信号实时监测和刀具磨损状态在线识别的问题。

关键词: 数字孪生; 支持向量机; 刀具磨损; 小波包变换; 在线识别; 薄壁件

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.046



宋清华

教授, 博士, 研究方向为高性能加工技术与装备、加工过程智能监控、生物医用器械。

随着德国“工业4.0”和“中国制造2025”等战略的相继提出, 在大数据分析、数字孪生、机器学习等技术推动下, 传统制造业正在从基于知识的智能制造向数据驱动和知识赋能的智能制造转型, 第四次工业革命即将到来<sup>[1-2]</sup>。

薄壁零件与传统零件相比具有质量小、强度大的优点<sup>[3]</sup>。但由于薄壁零件的弱刚性, 铣削过程中极易引起薄壁结构的变形、失稳和颤振, 造成刀具磨损量急剧增大, 从而降低加工精度, 甚至影响工件的疲劳寿命, 并且加工过程中薄壁零件的时变特性难以在线预测<sup>[4-5]</sup>。因此研究薄壁件加工过程中刀具磨损状态实时监

测, 对提高薄壁零件(如航空发动机零件)的加工精度和加工效率具有十分重要的意义。

传统的刀具磨损状态识别, 通常是基于信号分析, 不涉及大数据, 大多依靠专家经验和现场检查, 效率低、准确度低<sup>[6]</sup>。随着大数据分析技术的崛起, 基于机器学习的刀具磨损状态识别方法具有很高的识别准确度, 成为近年来机械加工过程中刀具健康管理领域的研究热点<sup>[7]</sup>。利用多传感器采集加工过程中的切削信号、数字图像等, 结合大数据流式处理、自然语言处理等机器学习算法, 确定信号特征集与刀具磨损之间的映射关系, 从而建立数据驱动模型,

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52275445); 山东省重大科技创新工程(2020CXGC010204)。

识别刀具加工过程中的磨损状态,并将其反馈给数控加工平台,准确选择换刀时机。此方法不仅可以提高刀具本身的利用率,而且极大地提高了薄壁件的加工效率和表面质量<sup>[8-9]</sup>。Li等<sup>[10]</sup>通过对振动信号的频谱分析,得到一组监测指标,并通过模糊神经网络描述了刀具磨损条件与这些指标之间的关系,得出了可行性结果。Li等<sup>[11]</sup>通过相关性分析选择了14个时域特征,建立了 $\nu$ -支持向量回归( $\nu$ -SVR)预测模型来监测刀具磨损,试验结果表明, $\nu$ -SVR模型的预测准确率高达96.76%。廖小平等<sup>[12]</sup>提出了一种利用核主成分分析法实现特征降维,基于灰狼优化算法优化SVM的刀具磨损状态识别模型,该模型具有较好的泛化能力。

基于机器学习的刀具磨损状态监测提高了识别精度,但多数研究高度依赖仿真数据和离线数据来优化刀具路径和加工过程,缺少在加工过程中利用在线数据做出实时有效的决策。同时,机床加工过程与虚拟数据之间缺乏交互,从而使得数据驱动的刀具磨损状态识别模型具有一定的滞后性,造成识别结果的片面性。

在目前制造模式向数字化、网络化和智能化发展的大背景下,机床加工过程实时监测以及刀具状态诊断管理的智能性、主动性和预测性是亟待解决的问题。数字孪生(Digital twin, DT)技术是以多维模型和融合数据为驱动,通过实时连接、映射等方式在数字空间对物理世界的物体模型进行描述、诊断、预测和决策<sup>[13-14]</sup>。

近年来,数字孪生的出现为连接物理世界和虚拟世界提供了有效的技术手段<sup>[15]</sup>。Atluru等<sup>[16]</sup>开发了智能机床状态监测系统,通过优化加工前、加工中和加工后的加工参数,最大限度地缩短了加工时间,提高了产品质量。Zhuang等<sup>[17]</sup>提出了一种基于数字孪生驱动的车削过程刀具磨损监测与预测方法,该方法建立了

与实际刀具系统完全匹配的对称虚拟刀具系统,实现了刀具磨损的高精度监测和预测。Christiand等<sup>[18]</sup>提出了一种利用电流数据监测微型刀具磨损情况的数字化孪生方法。尽管数字孪生技术的应用越来越广泛,但应用于薄壁件铣削加工过程监测的研究工作相对较少。

基于数字孪生技术,利用实时数据驱动刀具磨损状态识别模型,可全方位、多角度预测薄壁件铣削过程中刀具磨损状态。因此,本文提出一种数字孪生与GSCV-SVM算法融合驱动的薄壁件铣削加工过程中刀具磨损状态识别方法,基于数字孪生的理念,利用其虚实融合、实时交互的优点,构建机床加工过程中的数字孪生体,融合GSCV-SVM算法,借助MySQL数据库,实现了薄壁件铣削过程信号实时监测以及刀具磨损状态的在线识别。该方法可保障薄壁件铣削加工过程稳定、高效地进行,对促进加工质量和加工效益的提升具有重要意义。

## 1 刀具磨损状态识别模型建立

### 1.1 数字孪生驱动下的识别框架

如图1所示,物理空间与虚拟空间通过数字孪生技术实现了信息传输与决策反馈。根据物理空间中数控铣床的几何参数,搭建数控铣削加工平台模型。在保证高保真的前提下,利用拓扑轻量化方法,使用最少的点线面重构原模型,实现模型的减面。然后将三维模型的面铺平展开成一个对应的二维( $U$ 、 $V$ )坐标图像,进行纹理贴图,进一步优化模型,为数字孪生体的构建提供模型保障。通过传感器采集铣削加工过程中的切削信号(加速度、力和声音等),经特征提取与滚动时间窗口切片实现降采样处理后传输至数据库。在虚拟空间中,结合机器学习算法与高保真模型构建机床加工过程数字孪生体。利用HTML、CSS和JavaScript

搭建可视化平台,并将孪生体嵌入进去,实现薄壁零件铣削过程的信号实时监测和刀具磨损状态的在线识别。根据刀具磨损所处的状态,将换刀指令反馈给数控机床,从而实现实时数据的交互。

### 1.2 基于SVM的刀具磨损状态识别

对铣削过程中的切削信号经过特征提取和选择后,就可对数据集进行分类,即识别刀具磨损状态,将刀具磨损分为3类:初期磨损、正常磨损和剧烈磨损。因此,可以借助多类SVM实现对多种磨损状态的识别<sup>[19]</sup>。

给定一组带标签的训练样本 $\{(x_k, y_k)\}_k$ ,其中, $x_k$ 为第 $k$ 个训练样本( $x_k \in R^n$ ); $y_k$ 为训练样本对应的分类标签(假设 $y_k \in \{E_0, E_1\}$ , $E_0$ 为初期磨损状态; $E_1$ 为正常磨损状态),如图2所示,假设属于 $E_0$ 的特征均满足方程 $w \cdot x_k + b > 0$ ;属于 $E_1$ 的特征均满足 $w \cdot x_k + b < 0$ 。其中, $w$ 为 $n$ 维权重向量; $b$ 为偏置值。SVM的目标是寻找一个最优的决策面,在保证正确分开两种磨损状态的同时,分类间隔最大<sup>[20]</sup>,该最优决策平面可表示为

$$f(x) = w \cdot x_k + b = 0 \quad (1)$$

假设最优决策平面分别上下移动 $c$ ,经等式变换,得到对应间隔上下边界的方程 $w \cdot x_k + b = 1$ 和 $w \cdot x_k + b = -1$ ,称为正负决策平面。训练样本中距离最优决策平面最近的数据点称为支持向量,由图2可知分类间隔为 $2/\|w\|$ ,由此根据最大分类间隔,确定SVM优化模型为

$$\min_{w,b} \frac{w^2}{2}, \quad (2)$$

$$\text{s.t. } y_k((w \cdot x_k) + b) \geq 1, k = 1, 2, \dots, l$$

如图3所示,如果训练样本中出现了异常状态点,特别是异常状态点出现在了另外一类状态分类标签中,此时若仍不放松对最大间隔的要求,则无法将两类样本线性分开,为此引入松弛变量 $\zeta_k$ ,从而在偏离最大间隔一定范围内允许异常状态点存在,此时约束转变为

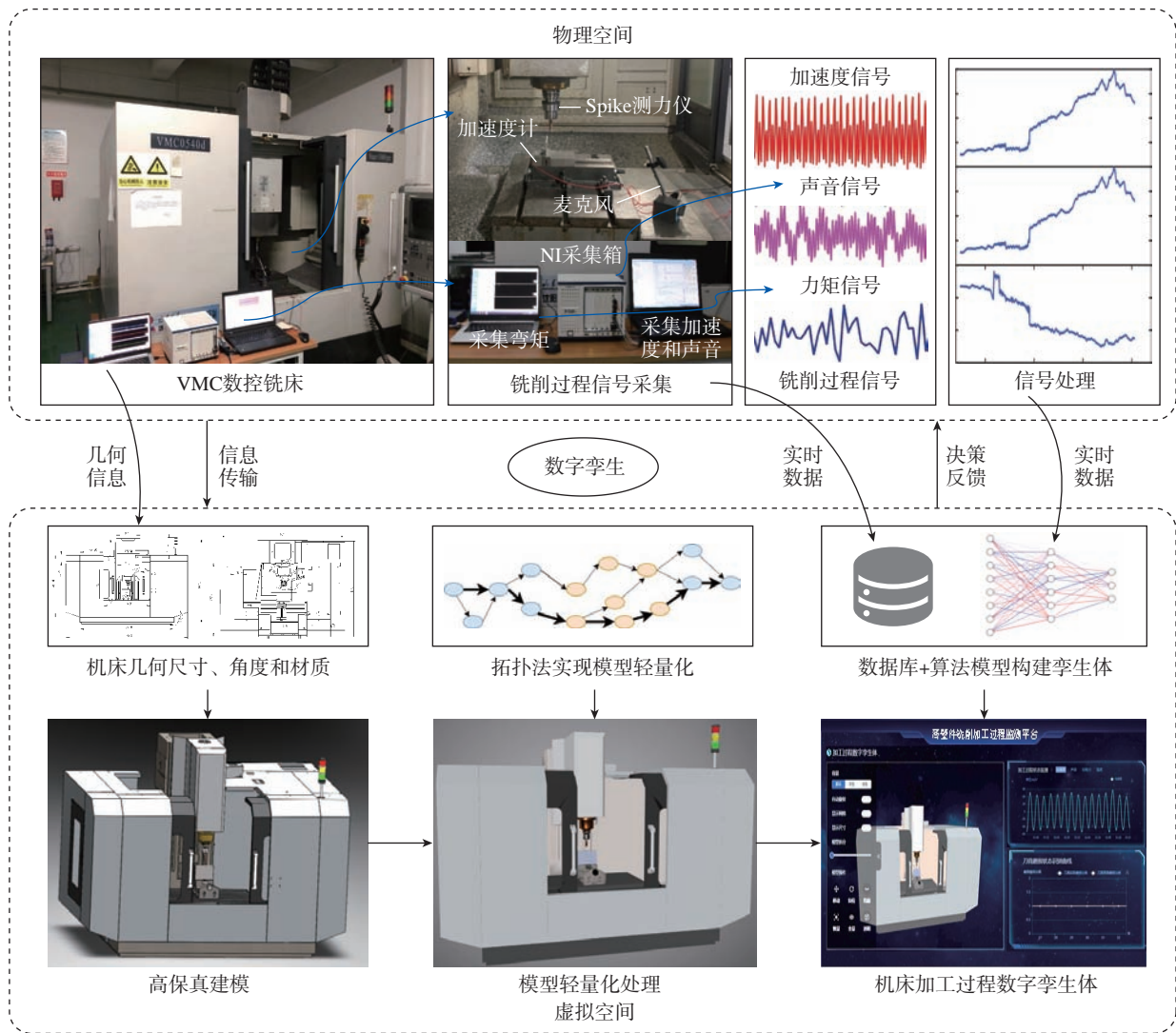


图1 数字孪生驱动的工具磨损状态识别框架

Fig.1 Tool wear state recognition framework driven by digital twin

$$y_k((w \cdot x_k) + b) \geq 1 - \zeta_k \quad (3)$$

在目标函数中考虑异常状态点的离群带来的损失,就需要加入一个惩罚因子  $C$ ,二者呈正相关,此时 SVM 优化模型变为

$$\min_{w,b} \frac{w^2}{2} + C \sum_{k=1}^l \zeta_k, \quad (4)$$

s.t.  $y_k((w \cdot x_k) + b) \geq 1 - \zeta_k, k = 1, 2, \dots, l$   
 式中,松弛变量  $\zeta_k > 0$ ; 惩罚因子  $C > 0$ 。

式(4)为一个凸约束问题,可以通过拉格朗日乘法,将原问题转化为对偶问题进行求解。

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^l y_k y_j a_k a_j K(x_k \cdot x_j) - \sum_{k=1}^l a_k,$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^l y_k a_k = 0, 0 \leq a_k \leq C, k = 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

式中,  $K(x_k \cdot x_j)$  为核函数,所提出的工具磨损状态识别方法中的核函数为径向基函数,即  $K(x_k \cdot x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_k - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \sigma > 0$ 。

由于识别对象是3种磨损状态,因此采用多分类的方法,即1对1法(One vs one, OvO)。本文构造了3个二元分类器,每个分类器都由两个对应磨损状态的数据训练。当对一个未知状态的训练数据进行分类时,最后

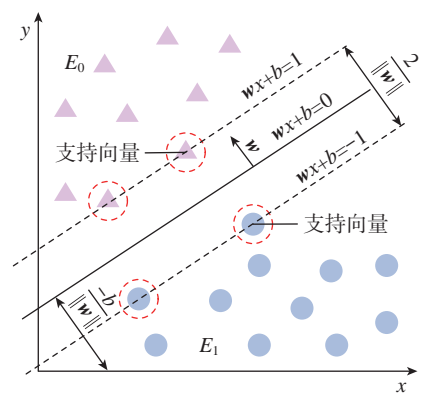


图2 支持向量机分类原理

Fig.2 Classification principle of support vector machine

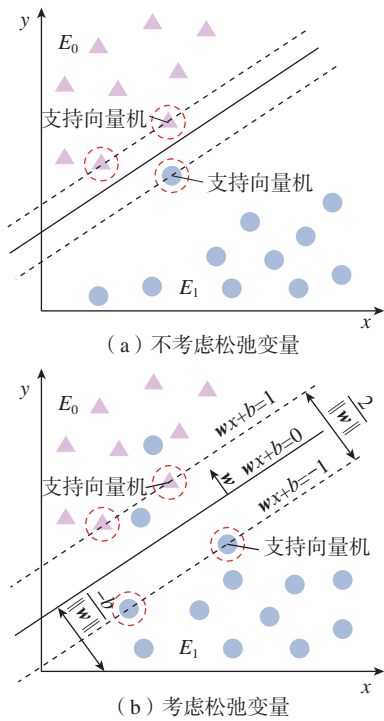


图3 松弛变量的影响

Fig.3 Effects of relaxation variables

得票数最多的是样本的预测标签。

## 2 试验验证

### 2.1 数据采集与处理

本文采用的铣削试验数据来源于2010年PHM公开数据集,试验装置及过程如图4所示。铣削加工参数如表1所示。

每次走刀的铣削工艺参数相同,且工件形状、尺寸一致,因此每次走刀时间间隔相等。通过NI数据采集卡采集铣削过程中的加速度、声音以及切削力信号,同时利用显微镜测量并记录每次走刀后铣刀的后刀面磨损量。该数据集收集了6把独立铣刀(编号为C1~C6)全生命周期的加工数据,每次试验记录315次走刀。本文通过分析C4铣刀试验数据集中 $x$ 方向加速度信号,构建了基于GSCV-SVM算法的刀具磨损状态识别模型,并对C6铣刀的磨损状态进行了预测辨识。图5所示为C4铣刀3个切削刃的平均磨损量变化曲线,结合铣削加工过程的实际情况,确定前20次走刀为初期磨损阶段;21~215

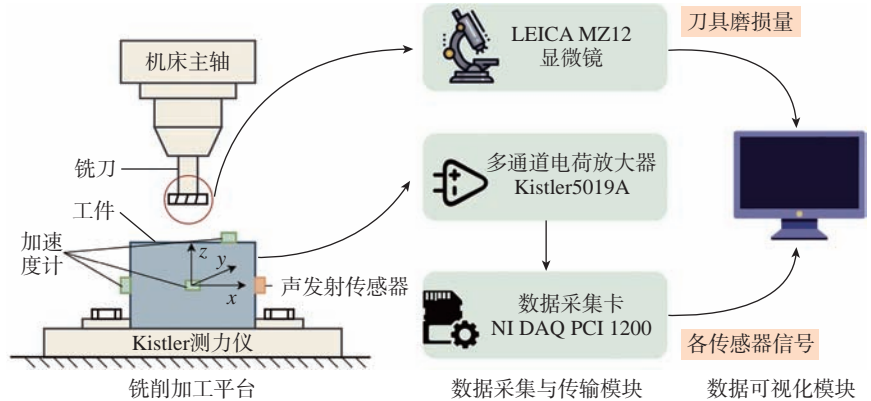


图4 试验系统和主要设备

Fig.4 Experimental system and main equipment

表1 铣削工艺参数

Table 1 Milling process parameters

主轴转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	进给速度/ ( $\text{mm} \cdot \min^{-1}$ )	径向切削 宽度/mm	轴向切削 深度/mm	采样频率/kHz
10400	1555	0.125	0.2	50

次走刀为正常磨损阶段;215次走刀后进入剧烈磨损阶段。

本文通过时、频域分析,提取铣削振动信号的标准差、均方根和均方频率,作为反映刀具磨损的时域和频域特征,如表2所示。3个特征值随磨损量变化的规律如图6所示。

小波包分解是在小波分析的基础上,根据信号特征和分析要求,对信号的高频和低频空间均进行了分解,从而在更大范围内找出与信号频谱相匹配的合适频段<sup>[21]</sup>。使用小波包分析法分析此加速度信号时,频带分辨率应小于518 Hz,试验中信号的采样频率为50 kHz,利用db3小波滤波器进行分解,由式(11)求得小波包的分解层数为6。

$$f_{\min} = F_s / 2^{n+1} \quad (6)$$

式中, $F_s$ 为信号采样频率; $n$ 为小波包分解层数; $f_{\min}$ 为最小频段。

通过铣削振动信号的频谱分析,可知振动频率大多分布在10 kHz以内,因此取64个频带中的前32个频带(1~12.51 kHz)能量作为时频域特征。图7为部分频带能量和小波包能量熵随刀具磨损量变化情况,均

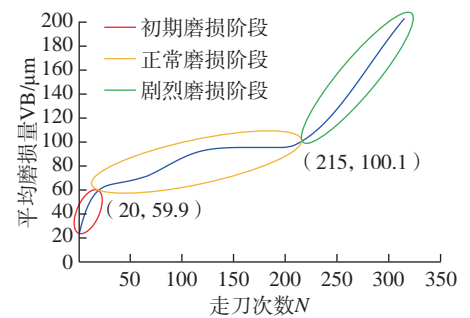


图5 C4铣刀平均磨损量变化曲线

Fig.5 Variation curve of average wear of C4 milling cutter

表2 时域、频域信号的特征值及表达式

Table 2 Features and expressions of time domain and frequency domain signals

特征值	表达式
标准差	$p_1 = \sqrt{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X_i(t) - \mu_X(t)]^2}$
均方根	$p_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2(t)}$
均方频率	$p_3 = \frac{\int_0^{\infty} f^2 S(f) df}{\int_0^{\infty} S(f) df}$

较好地反映了刀具磨损状态的变化。利用相关系数法,计算32个频带能量和小波包能量熵以及时域、频域中

的特征向量与磨损量之间的相关系数  $|\rho_{xy}|$ , 最终确定出 14 个  $|\rho_{xy}| > 0.9$  的特征向量, 部分特征向量与磨损量的相关性如表 3 所示, 组成特征向量集

$T = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{14}]$  作为 GSCV-SVM 模型的输入向量。

## 2.2 刀具磨损状态识别

根据上文对 C4 铣刀磨损状态

的划分情况, 从 3 种状态中分别随机抽取 10 组、150 组、80 组特征向量构成训练集, 共计 240 组; 剩余 75 组数据构成测试集, 基于 GSCV-SVM 的刀具磨损状态识别算法流程图如图 8 所示。

分别对训练集和测试集进行归一化处理, 利用网格搜索法查找范围内所有的点进行参数寻优, 得到尽可能多的超参数组合, 再通过交叉验证 (K-fold cross-validation, K-CV) 重复 3 次, 找出使得测试集分类准确度最高的 C、g 超参数组合。寻优结果如图 9 所示, 最终确定惩罚因子  $C=4$ 、核参数  $g=2$ 。利用得到的最优参数, 结合 SVM 算法训练刀具磨损状态识别模型, 用测试集检验分类器的性能, 识别结果如图 10 (a) 所示, 识别准确率为 96% (72/75)。

利用 C6 铣刀数据集进一步检验模型的泛化能力, 通过对数据集进行特征提取和特征选择, 确定特征向量集, 并进行归一化处理后, 作为测试集验证基于 GSCV-SVM 的刀具磨损状态识别模型的泛化能力, 识别结果如图 10 (b) 所示, 识别率为 90.16% (284/315)。

综上识别结果分析, 薄壁零件铣削刀具磨损状态模型中仅有两个参数需要寻优, 且样本数量较少。而支持向量机 (SVM) 具有使用非线性核/泛化能力强和训练样本量小等特点。此外, 所提方法考虑松弛变量的影响, 使得模型具有较好的鲁棒性。同时利用循环遍历的网格搜索, 根据模型精度确定最佳超参数, 交叉验证过程中防止训练过拟合, 从而使得模型具有较高的识别精度和泛化能力。

## 3 结论

为了实现薄壁零件铣削过程的刀具磨损状态在线识别, 提出了一种数字孪生与 GSCV-SVM 算法融合驱动的刀具磨损状态识别方法, 通过试验验证了方法的有效性, 针对薄壁

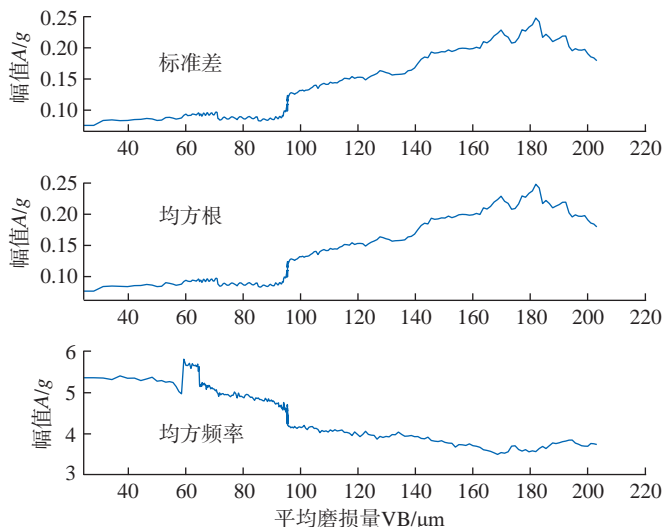


图 6 时域、频域特征参数变化图

Fig.6 Variation diagram of characteristic parameters in time domain and frequency domain

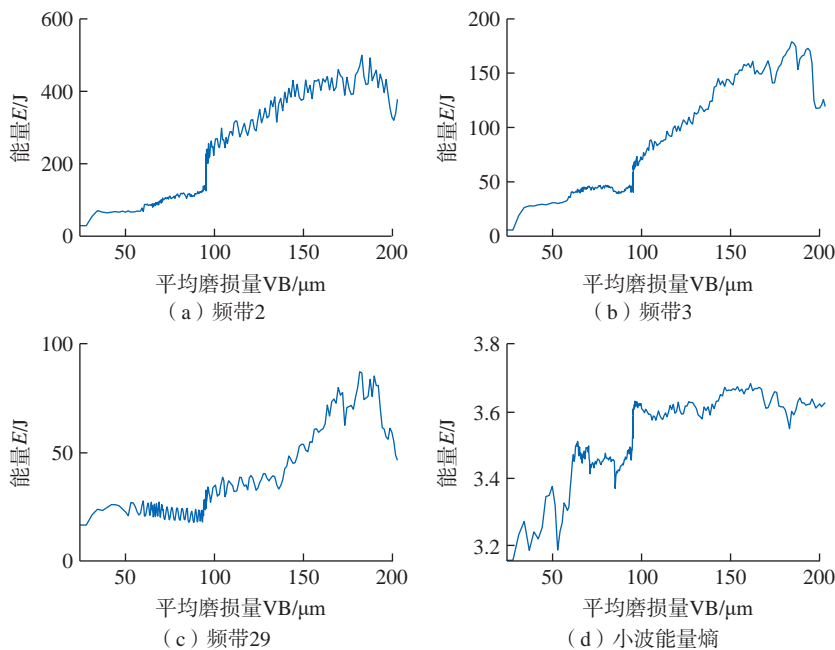


图 7 时频域特征参数变化图

Fig.7 Variation diagram of characteristic parameters in time-frequency domain

表 3 特征向量与磨损量的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between eigenvector and wear

时域特征		频域特征	时频域特征			
标准差 ( $p_1$ )	均方根 ( $p_2$ )	均方频率 ( $p_3$ )	频带 2 ( $p_4$ )	频带 3 ( $p_5$ )	...	能量熵 ( $p_{14}$ )
0.9328	0.9325	-0.9014	0.9305	0.9311	—	0.9021

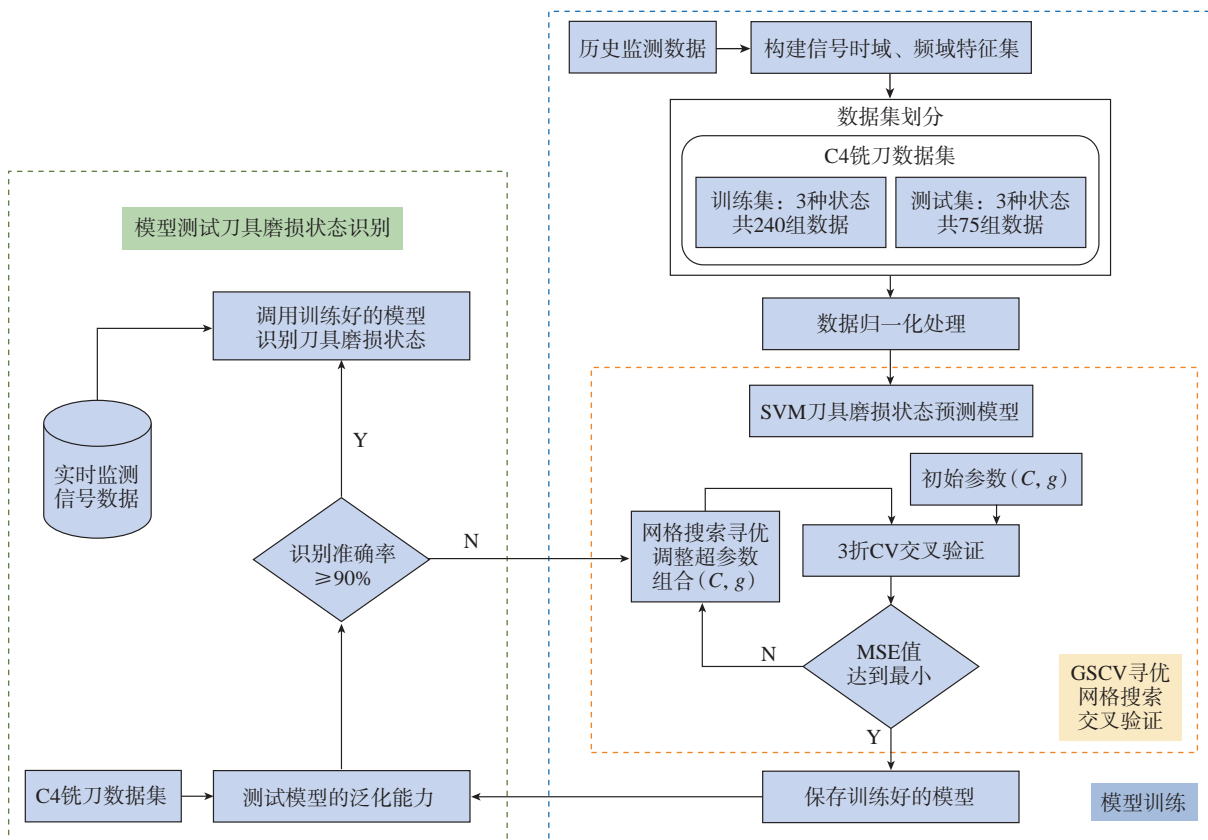


图 8 刀具磨损状态识别算法流程图

Fig.8 Flow chart of tool wear state recognition algorithm

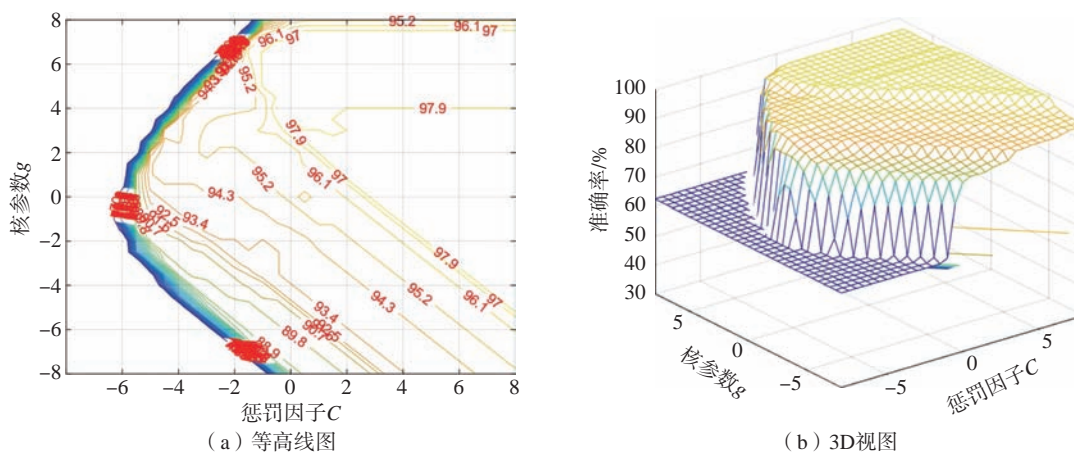


图 9 超参数  $C$ 、 $g$  寻优结果

Fig.9 Optimization results of super parameters  $C$  and  $g$

零件铣削中的刀具磨损,该方法具有较高的识别精度和泛化能力。本文的主要内容总结如下。

(1) 所提出的方法通过网格搜索与交叉验证 (GSCV) 的寻优方式,最终确定了超参数组合惩罚因子  $C=4$ 、核参数  $g=2$  是全局最优解,避免了局

部最优。在此超参数组合下,模型的识别精度与泛化能力较好。

(2) 通过对薄壁零件铣削过程中加速度信号的时域、频域以及时频域特征提取,建立信号特征与刀具磨损的实时映射关系,从而准确识别了刀具磨损状态。试验结果表明,不同

铣刀磨损状态的识别准确率分别为 96% 和 90.16%,具有识别准确率高,且模型具有较好的泛化能力,进一步验证了 SVM 在小样本分类识别问题的优越性。

(3) 利用数字孪生技术,经模型轻量化处理后,结合 GSCV-SVM 算法构

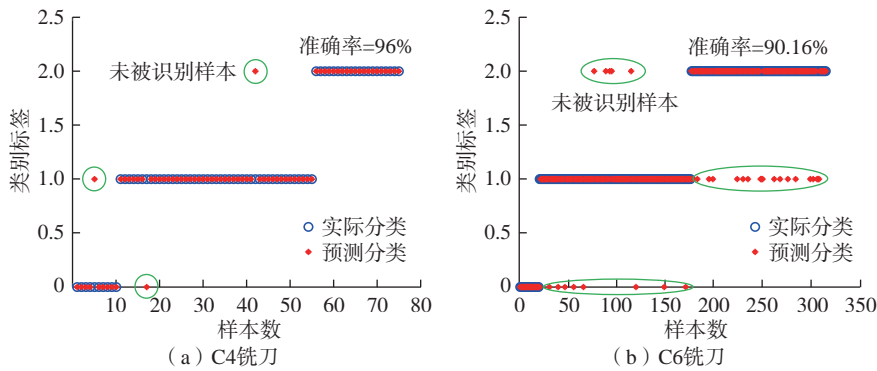


图 10 两种铣刀磨损状态识别结果

Fig.10 Identification results of two types of milling cutter wear state

建高保真的数字孪生体,将物理空间中机床加工过程映射到虚拟空间,实现了薄壁零件铣削过程的信号实时监测以及刀具磨损状态的在线识别。

除此之外,在今后的研究中也应考虑到该方法的几个局限性。首先,所提出的试验验证方法需要改进,设计不同铣削参数的薄壁零件铣削试验,进一步验证模型在不同工况条件下的泛化能力。其次,该方法在大样本的条件下有一定的局限性,可以考虑结合随机梯度下降法(Pegasos)优化SVM算法。

### 参考文献

[1] KUSIAK A. Smart manufacturing[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(1-2): 508-517.

[2] CHOBAKHLOO M. The future of manufacturing industry: A strategic roadmap toward Industry 4.0[J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2018, 29(6): 910-936.

[3] 谭瑞亮,王凡,姜增辉.薄壁件铣削加工动力学研究的现状[J].航空制造技术, 2014, 57(1-2): 103-106.

TAN Ruiliang, WANG Fan, JIANG Zenghui. Present situation of thin-walled part milling dynamics research[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(1-2): 103-106.

[4] GAO J, SONG Q H, LIU Z Q. Chatter detection and stability region acquisition in thin-walled workpiece milling based on CMWT[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(1-4): 699-713.

[5] WANG R Q, SONG Q H, LIU Z Q, et al. Multi-condition identification in milling

Ti-6Al-4V thin-walled parts based on sensor fusion[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 164: 108264.

[6] QIAO Q Z, WANG J J, YE L K, et al. Digital twin for machining tool condition prediction[J]. Procedia CIRP, 2019, 81: 1388-1393.

[7] FARIAS A, ALMEIDA S L R, DELLIACOVI S, et al. Simple machine learning allied with data-driven methods for monitoring tool wear in machining processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(9-12): 2491-2501.

[8] WANG R Q, SONG Q H, LIU Z Q, et al. A novel unsupervised machine learning-based method for chatter detection in the milling of thin-walled parts[J]. Sensors, 2021, 21(17): 5779.

[9] 刘辉,张超勇,戴稳.基于堆叠稀疏去噪自动编码网络与多隐层反向传播神经网络的铣刀磨损预测模型[J].计算机集成制造系统, 2021, 27(10): 2801-2812.

LIU Hui, ZHANG Chaoyong, DAI Wen. Prediction model of milling cutter wear based on SSDAE-BPNN[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(10): 2801-2812.

[10] LI Y G, LIU C Q, HUA J Q, et al. A novel method for accurately monitoring and predicting tool wear under varying cutting conditions based on meta-learning[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 487-490.

[11] LI N, CHEN Y J, KONG D D, et al. Force-based tool condition monitoring for turning process using  $\nu$ -support vector regression[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1-4): 351-361.

[12] 廖小平,黎宇嘉,陈超逸,等.基于核主成分和灰狼优化算法的刀具磨损状态识别[J].计算机集成制造系统, 2020, 26(11):

3031-3039.

LIAO Xiaoping, LI Yujia, CHEN Chaoyi, et al. Tool wear condition recognition based on kernel principal component and grey wolf optimizer algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(11): 3031-3039.

[13] LIU Y, PENG Y, WANG B, et al. Review on cyber-physical systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(1): 27-40.

[14] TAO F, CHENG J F, QI Q L, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9-12): 3563-3576.

[15] LUO W C, HU T L, ZHU W D, et al. Digital twin modeling method for CNC machine tool[C]//2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control. Zhuhai: IEEE, 1-4.

[16] ATLURU S, HUANG S H, SNYDER J P. A smart machine supervisory system framework[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(5-8): 563-572.

[17] ZHUANG K, SHI Z C, SUN Y, et al. Digital twin-driven tool wear monitoring and predicting method for the turning process[J]. Symmetry, 2021, 13: 1438.

[18] CHRISTIAND, KISWANTO G. Digital twin approach for tool wear monitoring of micro-milling[J]. Procedia CIRP, 2020, 93: 1532-1537.

[19] 肖鹏飞,张超勇,罗敏,等.基于自适应动态无偏最小二乘支持向量机的刀具磨损预测建模[J].中国机械工程, 2018, 29(7): 842-849.

XIAO Pengfei, ZHANG Chaoyong, LUO Min, et al. Modeling method for tool wear prediction based on ADNLSSVM[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(7): 842-849.

[20] KUANG R, GU J Y, CAI H, et al. Improved prediction of malaria degradomes by supervised learning with SVM and profile kernel[J]. Genetica, 2009, 136(1): 189-209.

[21] 刘成颖,吴昊,王立平,等.基于PSO优化LS-SVM的刀具磨损状态识别[J].清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(9): 975-979.

LIU Chengying, WU Hao, WANG Liping, et al. Tool wear state recognition based on LS-SVM with the PSO algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(9): 975-979.

(下转第 60 页)

引文格式: 刘海波, 张鸿泽, 王诚鑫, 等. 基于附加质量和电涡流阻尼的薄壁件铣削振动抑制[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 53–60.  
LIU Haibo, ZHANG Hongze, WANG Chengxin, et al. Vibration suppression of thin-walled parts based on additional mass and eddy current damping [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 53–60.

# 基于附加质量和电涡流阻尼的薄壁件 铣削振动抑制\*

刘海波, 张鸿泽, 王诚鑫, 苗欢欢

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024)

[摘要] 针对薄壁件铣削颤振问题, 提出了基于附加质量和电涡流阻尼的振动抑制方法。首先建立了薄壁件铣削加工动力学模型, 通过颤振稳定性分析, 获得附加质量和电涡流阻尼对加工稳定域的影响规律; 然后提出了薄壁件附加质量优化方法, 获取最佳附加质量布局和质量占比; 最后设计了一套薄壁件加工抑振装置, 开展了薄壁件铣削加工试验, 试验表明, 当同时添加附加质量组合 [15, 10, 15] 和电涡流阻尼时, 薄壁件加工振动得到明显抑制, 验证了所提出方法的抑振效果。

关键词: 薄壁件; 振动抑制; 附加质量; 电涡流阻尼; 模态分析

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.053



刘海波

教授, 博士生导师, 教育部青年长江学者, 主要研究方向为测量-加工一体化制造方法与装备, 在机/在位精密测量技术与系统, 相变固持自适应加工方法与技术。

薄壁件广泛应用于航空航天等领域高端装备中, 具有结构复杂、刚性弱、时变性强等特点, 但其在铣削过程中易产生颤振现象, 从而导致加工效率与精度降低, 表面完整性差, 降低了服役性能, 因此, 薄壁件加工颤振抑制一直以来是学者们研究和关注的焦点。施加阻尼是抑制薄壁件加工颤振的主要方式, 常见阻尼包括磁流变阻尼、调谐质量阻尼(TMD)和电涡流阻尼。

磁流变阻尼是利用磁流变液励磁固化后的阻尼特性, 增强薄壁件铣削局部阻尼状态, 从而抑制颤振, 实现薄壁件柔性装夹。Ma等<sup>[1]</sup>设计了一种磁流变阻尼柔性夹具, 基于拉格朗日方程建立了薄壁件-柔性夹具系统动力学模型, 并通过切削试验验证了磁流变阻尼的抑振效果。Liu等<sup>[2]</sup>采取模态仿真和锤击试验相结合的

方法, 研究了磁流变阻尼对薄壁件模态参数的影响规律, 通过调节励磁电流增强磁流变阻尼从而抑制加工颤振, 提升了薄壁件的加工精度和表面质量。Guo等<sup>[3]</sup>提出了一种薄壁件磁流变阻尼-机械复合装夹方法, 切削试验结果表明, 薄壁件加工颤振得到了明显抑制。

调谐质量阻尼是通过振动能量的转移来实现颤振抑制, 主要由质量块、阻尼和刚度元件组成<sup>[4]</sup>。Yuan等<sup>[5]</sup>设计了一种可调变刚度TMD, 考虑了薄壁件材料去除效应, 基于等峰优化设计原理, 对不同加工阶段的阻尼器参数进行了优化, 试验结果表明, 可调变刚度TMD能够有效提升薄壁件加工稳定性。Qin等<sup>[6]</sup>利用多个TMD抑制薄壁壳体工件加工颤振, 基于模态叠加法优化了TMD的布局 and 参数, 显著提升了薄壁壳体工

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51975093); 辽宁省自然科学基金优青(2020-YQ-09)。

件的加工稳定性。马鹏举等<sup>[7]</sup>基于TMD抑振原理设计了一套薄壁机匣抑振辅助夹具,有效抑制了薄壁机匣加工振动。

此外,一些学者研究了使用电涡流阻尼抑制颤振的方法,即利用洛伦兹力来实现加工颤振抑制。Ransom等<sup>[8]</sup>将电涡流阻尼应用于铣削加工平台结构中,使加工系统的模态阻尼比提升了229%。Yang等<sup>[9]</sup>设计了一种薄壁工件铣削加工抑振装置,利用固定铜管与永磁铁之间的相对运动产生电涡流阻尼,有效抑制了薄壁件铣削加工振动。程明迪等<sup>[10]</sup>利用电涡流阻尼抑制薄壁圆盘加工振动,建立了薄壁圆盘-电涡流耦合动力学模型,并对阻尼器参数进行优化,切削试验结果表明,电涡流阻尼具有良好的加工抑振效果。

以上阻尼方法虽能够实现薄壁件加工颤振抑制,但是由于其结构的局限性,难以满足一些工况抑振的结构需求。因此,本文提出了一种基于附加质量和电涡流阻尼的薄壁件加工颤振抑制方法。首先进行了薄壁件铣削动力学建模与分析,然后结合颤振稳定性分析对附加质量参数进行优化,最后通过切削试验对所提出方法的抑振效果进行验证。

## 1 薄壁件铣削动力学建模与分析

### 1.1 薄壁件铣削动力学模型

本文以悬臂式薄壁件为研究对象,且附加质量和薄壁件的材质均为非铁磁性金属,提出基于附加质量和电涡流阻尼的颤振抑制方法。其中,电涡流阻尼抑振原理如图1所示,薄壁件加工振动使附加质量跟固定永磁铁发生相对运动,在附加质量表面诱发产生电涡流,永磁铁磁场与电涡流相互作用产生电涡流阻尼,实现振动能量的耗散。

假设刀具为刚性,当附加质量和电涡流阻尼共同作用时,薄壁件铣削

加工动力学模型如图2所示,附加质量固连在薄壁件非加工表面,永磁铁位置固定并与附加质量相对。

受附加质量的影响,薄壁件质量及系统刚度矩阵发生变化,假设附加质量的个数为 $n$ ,则薄壁件振动系统的动能 $D$ 与势能 $V$ 可以表示为

$$D = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}}^T \left\{ \mathbf{m}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{m}_i \right\} \dot{\mathbf{r}} \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{r}^T \left\{ \mathbf{k}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{k}_i \right\} \mathbf{r} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{m}_0$ 、 $\mathbf{k}_0$ 分别为薄壁件的初始质量矩阵和刚度矩阵; $\Delta \mathbf{m}_i$ 、 $\Delta \mathbf{k}_i$ 为第 $i$ 个附加质量对 $\mathbf{m}_0$ 、 $\mathbf{k}_0$ 的改变量; $\mathbf{r}$ 为广义坐标下的薄壁件振动位移向量; $\dot{\mathbf{r}}$ 为薄壁件振动速度向量;上标 $T$ 为刀刃切削频率。

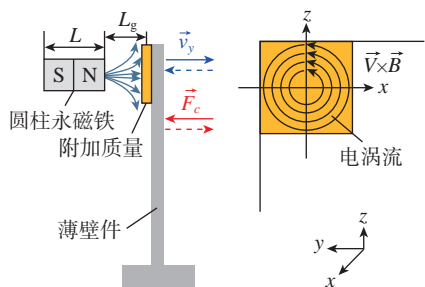
电涡流阻尼会改变薄壁件的阻尼特性,假设第 $i$ 个电涡流阻尼对原始阻尼矩阵 $\mathbf{c}_0$ 的改变量为 $\Delta \mathbf{c}_i$ ,则薄壁件振动系统的瑞利耗散函数 $R$ 为

$$R = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}}^T \left\{ \mathbf{c}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{c}_i \right\} \dot{\mathbf{r}} \quad (3)$$

利用能量法建立薄壁件铣削动力学模型,将式(1)~(3)代入第2类拉格朗日方程,可得薄壁件的铣削加工动力学方程为

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{c} \dot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{k} \mathbf{r}(t) = \mathbf{F}(t) = \mathbf{F}_d(t) + \mathbf{F}_0(t) \quad (4)$$

式中, $\ddot{\mathbf{r}}(t)$ 为薄壁件振动加速度向



注:  $L$ 为永磁铁长度;  $L_g$ 为永磁铁和附加质量之间的垂直间隙;  $\vec{v}_y$ 为薄壁件 $y$ 向振动速度;  $\vec{F}_c$ 为电涡流阻尼力;  $\vec{V} \times \vec{B}$ 为薄壁件振动速度与永磁铁磁感应强度之间的叉乘。

图1 电涡流阻尼抑振原理  
Fig.1 Principle of vibration suppression by eddy current damping

量;  $\mathbf{m} = \mathbf{m}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{m}_i$ 、 $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{k}_i$

和 $\mathbf{c} = \mathbf{c}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{c}_i$ 分别表示添加 $n$ 个附加质量和电涡流阻尼后薄壁件的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 表示广义坐标下的铣削力向量; $\mathbf{F}_d(t)$ 、 $\mathbf{F}_0(t)$ 分别表示铣削力的动态分量和静态分量。

基于模态叠加法,经模态坐标变换 $\mathbf{r}(t) = \mathbf{Q}(\omega) \cdot \mathbf{q}(t)$ ,可进一步求得模态空间中的薄壁件铣削动力学方程为

$$M \ddot{\mathbf{q}}(t) + C \dot{\mathbf{q}}(t) + K \mathbf{q}(t) = \mathbf{Q}(\omega) \mathbf{F}(t) \quad (5)$$

式中, $M$ 、 $C$ 和 $K$ 分别为薄壁件的模态质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{q}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{q}}(t)$ 、 $\mathbf{q}(t)$ 分别为模态坐标下薄壁件的振动加速度、振动速度、振动位移; $\mathbf{Q}(\omega)$ 为薄壁件的模态振型矩阵。

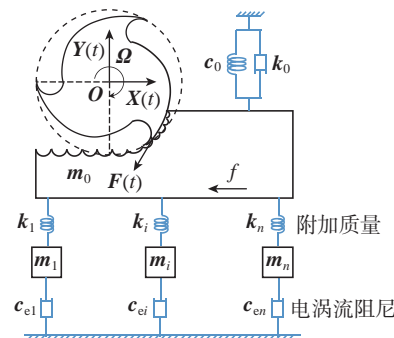
### 1.2 薄壁件铣削颤振稳定性分析

薄壁件在铣削过程中主要发生沿壁厚方向的振动,且加工稳定性由铣削力动态分量 $\mathbf{F}_d(t)$ 决定,薄壁件铣削加工的再生颤振模型如图3所示。

仅考虑铣削力动态分量 $\mathbf{F}_d(t)$ 对薄壁件加工稳定性的影响,则铣削颤振稳定性特征方程<sup>[11]</sup>可表示为

$$\det \left\{ 1 - \frac{N}{4\pi} K_t a_p (1 - e^{i\omega_c T}) \alpha_{yy} \Phi_{yy} \right\} = 0 \quad (6)$$

式中, $K_t$ 为切向切削力系数; $a_p$ 为极



注:  $t$ 为时间;  $X(t)$ 、 $Y(t)$ 分别为 $OX$ 轴、 $OY$ 轴随时间不断移动;  $f$ 为刀具进给;  $c_e$ 为等效电涡流阻尼系数。

图2 薄壁件铣削加工动力学模型  
Fig.2 Dynamic model of milling of thin-walled parts

限轴向切深;  $\omega_c$ 为颤振频率;  $\alpha_{yy}$ 为Y方向的平均动态铣削力系数;  $\Phi_{yy}$ 为刀具-工件接触区域的传递函数; 上标T为刀刃切削频率;  $N$ 为铣刀刀刃数。

由式(6)可以进一步推出传递函数  $\Phi_{yy}$  和极限轴向切深  $a_p$  的关系为

$$\Phi_{yy} = \frac{4\pi}{NK_t \alpha_{yy} (1 - e^{-i\omega_c T})} \quad (7)$$

传递函数  $\Phi_{yy}$  的实部  $A_R(\omega)$  可表示为<sup>[12]</sup>

$$A_R(\omega) = \frac{1 - r^2}{K[(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2]} \quad (8)$$

式中, 频率比  $r = \omega/\omega_n$ , 其中  $\omega_n$  为薄壁件固有频率; 模态阻尼比  $\zeta = C/2\sqrt{KM}$ 。

根据式(6)~(8)可进一步求得极限轴向切深  $a_p$  的表达式为

$$a_p = \frac{2\pi}{NK_t \alpha_{yy} A_R(\omega_c)} = \frac{2\pi}{NK_t \alpha_{yy} \cdot \frac{K \cdot (1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}{1 - r^2}} \quad (9)$$

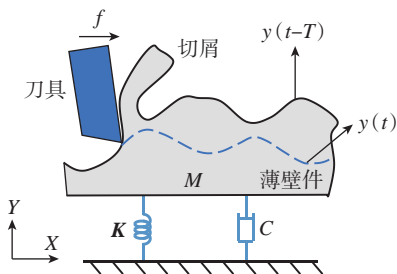
式中,  $\omega_c$  为颤振频率。

由式(9)可得出, 利用附加质量和电涡流阻尼增大薄壁件的模态刚度  $K$  和模态阻尼比  $\zeta$ , 可以获得更大的极限轴向切深  $a_p$ , 提升薄壁件铣削加工稳定性。

## 2 薄壁件附加质量优化方法

### 2.1 薄壁件附加质量布局优化

附加质量可看作对薄壁件结构和动力系统的修改, 通过动态特性灵敏度分析, 获取附加质量对薄壁件固有频率影响较大的区域, 来实现附加质量的布局优化。



注:  $y(t-T)$  为上一铣刀刀齿的振动位移;  $y(t)$  为当前铣刀刀齿的振动位移。

图3 铣削再生颤振模型

Fig.3 Regenerative chatter model of milling

考虑到实际系统阻尼的复杂性, 忽略薄壁件动力学系统阻尼。在Z自由度无阻尼实模态系统中, 薄壁件第s阶固有频率和模态振型之间有如下关系<sup>[13]</sup>:

$$(-\omega_s^2 \mathbf{m}_0 + \mathbf{k}_0) \mathbf{U}_s = 0 \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{m}_0$ 、 $\mathbf{k}_0$  分别为薄壁件的初始质量、初始刚度矩阵;  $\omega_s$  为薄壁件第s阶固有频率;  $\mathbf{U}_s$  为薄壁件第s阶模态振型向量, 可表示为  $\mathbf{U}_s = (u_{1,s}, u_{2,s}, \dots, u_{N,s})^T$ 。

为求得薄壁件固有频率对质量的灵敏度, 将式(10)对质量参数  $m_{i,j}$  求导, 可以得到

$$\left( -2\omega_s \frac{\partial \omega_s}{\partial m_{i,j}} - \omega_s^2 \frac{\partial \mathbf{m}_0}{\partial m_{i,j}} + \frac{\partial \mathbf{k}_0}{\partial m_{i,j}} \right) \mathbf{U}_s + (-\omega_s^2 \mathbf{m}_0 + \mathbf{k}_0) \frac{\partial \mathbf{U}_s}{\partial m_{i,j}} = 0 \quad (11)$$

式中,  $m_{i,j}$  表示薄壁件初始质量矩阵  $\mathbf{m}_0$  第i行和第j列的元素。

根据无阻尼系统动力学特征方程  $-\mathbf{U}_s \omega_s^2 \mathbf{m}_0 + \mathbf{U}_s \mathbf{k}_0 = 0$ , 可得

$$-2\omega_s \frac{\partial \omega_s}{\partial m_{i,j}} - \omega_s^2 \mathbf{U}_s^T \frac{\partial \mathbf{m}_0}{\partial m_{i,j}} \mathbf{U}_s +$$

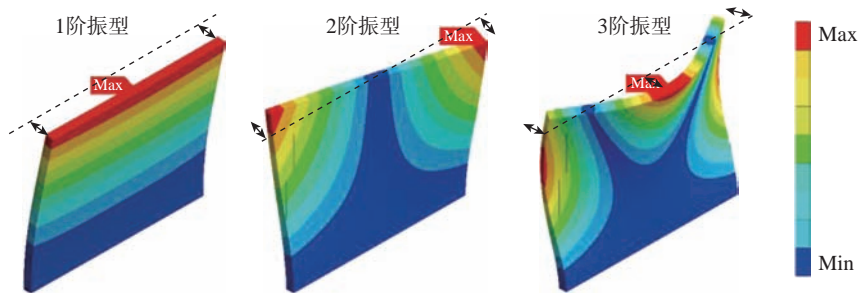


图4 薄壁件模态振型

Fig.4 Modal shapes of thin-walled parts

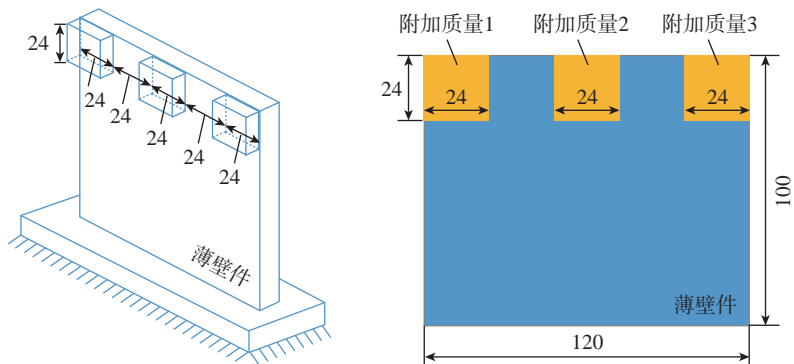


图5 附加质量优化布局(mm)

Fig.5 Optimized layout of added mass (mm)

$\mu=0.33$ ,弹性模量  $E=115 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。

## 2.2 基于响应面法的附加质量占比优化

根据薄壁件颤振稳定性分析结果,可知添加附加质量能够增强薄壁件模态刚度,从而扩大稳定切削域,最终提高薄壁件铣削稳定性。但附加质量与薄壁件模态刚度之间呈现非线性关系,建立优化模型过程复杂烦琐,效率较低。响应面方法可以简化复杂的建模过程,高效准确地建立附加质量与薄壁件模态刚度间的关联模型,从而降低优化难度<sup>[14]</sup>。

响应面优化模型中,设计变量为各附加质量占薄壁件总质量的百分比,记为  $\mathbf{x}=[x_1, x_2, x_3]$ ,  $x_i \in [5 \ 15]$ 。为获得更高的铣削稳定性,选取薄壁件的前两阶模态刚度,构建目标响应  $\Theta=K_1+K_2$ 。之后,基于 BBD 试验设计方法,确定构建响应面优化模型所需的附加质量组合,对添加不同附加质量组合的薄壁件进行有限元模态分析,得到薄壁件模态刚度值,从而求得目标响应值  $\Theta$ 。具体的试验方案设计如表 1 所示。

对所得试验数据进行拟合处理,得到包含交叉项的响应面近似函数为

$$\bar{\omega}(\mathbf{x})=4.31 \times 10^5 - 2156x_1 + 31314x_2 + 2246x_3 - 12x_1x_2 + 2159x_1x_3 - 16x_2x_3 - 1129x_1^2 - 1359x_2^2 - 1132x_3^2 \quad (14)$$

对所得响应面近似函数进行统计学精度检验,可得决定系数  $R^2$  为 0.9972,伴随决定系数  $R_{\text{adj}}^2$  为 0.9936,均接近于 1,说明该近似函数具有较高的拟合精度。因此,面向附加质量占比的响应面优化模型可以写为

$$\begin{cases} \text{求 } \mathbf{x} \in \mathbf{E}^n \\ \text{使 } \bar{\omega}(\mathbf{x}) = \Theta \rightarrow \max \\ \text{s.t. } 5 \leq x_1 \leq 15 \\ \quad 5 \leq x_2 \leq 15 \\ \quad 5 \leq x_3 \leq 15 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{E}^n$  是响应面优化模型的设计变量域。

求解上述响应面优化模型,得到附加质量占比优化结果如表 2 所示。

表 1 试验方案设计

Table 1 Design of experimental scheme

序号	设计变量/%			目标响应 $\Theta/(N \cdot m^{-1})$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	10	15	15	601490
2	10	10	10	639520
3	5	15	10	591457
4	10	15	5	591457
5	15	10	15	646627
6	10	5	5	552154
7	15	10	5	529069
8	5	10	15	528916
9	10	5	15	563793
10	15	15	10	601588
11	15	5	10	563703
12	5	5	10	552394
13	5	10	5	627224

表 2 附加质量占比优化结果

Table 2 Optimization results of proportion of added mass

最优附加质量占比			预测值 $\tilde{\Theta}^{\text{op}}/(N \cdot m^{-1})$	实际值 $\Theta^{\text{op}}/(N \cdot m^{-1})$	误差 $\epsilon/\%$
$x_1^{\text{op}}/\%$	$x_2^{\text{op}}/\%$	$x_3^{\text{op}}/\%$			
15	10.32	14.97	653839	649583	0.7

可以看出,薄壁件目标响应的实际值  $\Theta^{\text{op}}$  与预测值  $\tilde{\Theta}^{\text{op}}$  之间的误差不到 1%,证明响应面法能够准确预估薄壁件的模态刚度,优化附加质量相对于薄壁件总质量的占比。针对附加质量的布局和质量占比进行离线优化,此优化过程可视作对附加质量参数的调整,从而获得更高的铣削稳定性。

## 3 薄壁件加工试验验证

### 3.1 薄壁件加工抑振试验装置设计

基于电涡流阻尼原理,设计薄壁件加工抑振装置,如图 6 所示,主要包括底座、支架、永磁铁、附加质量等。其中,底座采用具备良好力学性能和焊接性能的 Q235 钢制成,底座两侧各焊接一个马蹄形结构,配合紧

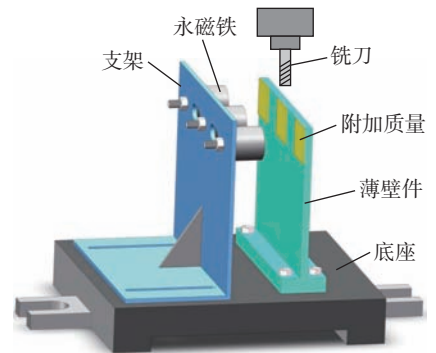


图 6 加工抑振装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of processing vibration suppression device

固螺栓和 T 型槽将底座固连在机床工作台上,底座表面上开有多个 M5 螺纹孔,薄壁件通过 4 个 M5 螺钉与底座固连。支架材料为铝合金 6061,通过螺钉固定在底座上,支架竖直面

上开有圆形通孔和槽型通孔,圆形通孔用于安装永磁铁,槽型通孔用于安装位移传感器,可通过移动支架调节附加质量与永磁铁之间的距离,肋板用于增加支架刚度。贴合于薄壁件非加工表面的附加质量,材质为T2紫铜;永磁铁材质为钕铁硼 NdFeB-52,固定在支架上且正对附加质量。

### 3.2 加工稳定域预测

为获得薄壁件的模态参数,采用DASP模态测试系统对薄壁件进行模态锤击测试,模态锤击试验装置如图7所示。

测得薄壁件模态参数如表3所示,组合 $[a, b, c]$ 代表各附加质量的质量分数,对响应面法求得的最优附加质量组合取近似值可得 $[a, b, c]=[15, 10, 15]$ ;  $\omega_{n1}$ 、 $\omega_{n2}$ 、 $\zeta$ 分别代表薄壁件的1阶固有频率、2阶固有频率和模态阻尼比。在附加质量和电涡流阻尼的综合作用下,薄壁件的固有频率降低,模态阻尼比增加。

由于材料去除率较小,不考虑薄壁件动态特性随刀具位置的变化<sup>[15]</sup>。利用所得模态参数,参考文献[16]的算法,绘制铣削稳定性叶瓣图,所得结果如图8所示,其中,“有阻尼”表示添加电涡流阻尼;“无阻尼”表示不添加电涡流阻尼。可以看出,在附加质量和电涡流阻尼的综合作用下,薄壁件的稳定切削域扩大,铣削稳定性增强。与普通附加质量组合相比,利用响应面法得到的最优附加质量组

合能获得更大的薄壁件模态刚度,从而能够获得更大的铣削稳定域。只添加最优附加质量 $[15, 10, 15]$ 而不添加电涡流阻尼时,铣削稳定域增加幅度会减小。

另外,综合考虑机床工作范围与工件尺寸,在图8中选取 $Q$ 点,其横坐标代表主轴转速 $2500\text{ r/min}$ ,纵坐标代表轴向切深 $1.5\text{ mm}$ 。由叶瓣图可知,当抑振参数为“最优附加质量 $[15, 10, 15]$ ,有电涡流阻尼”时,点 $Q$ 在铣削稳定域内,说明薄壁件在此组参数作用下切削稳定;而当抑振参数为“最优附加质量 $[15, 10, 15]$ 、

无电涡流阻尼”以及“普通附加质量 $[10, 10, 10]$ ,有电涡流阻尼”时,点 $Q$ 在铣削稳定域外,说明薄壁件在这两组参数作用下切削不稳定。

### 3.3 薄壁件加工抑振试验

为验证附加质量和电涡流阻尼的综合抑振效果,开展薄壁件铣削加工试验,试验设置如表4所示,1~3组加工试验均根据叶瓣图中的点 $Q$ 来选择切削参数,所选主轴转速为 $2500\text{ r/min}$ ,轴向切深为 $1.5\text{ mm}$ ,径向切深为 $0.5\text{ mm}$ ,刀具进给速度为 $300\text{ mm/min}$ ,铣削方式为顺铣。另外,为尽可能增大电涡流阻尼,可通过移

表3 模态测试结果  
Table 3 Result of modal test

附加质量组合	电涡流阻尼	$\omega_{n1}/\text{Hz}$	$\omega_{n2}/\text{Hz}$	$\zeta/\%$
[0, 0, 0]	无	360.57	715.65	1.36
[10, 10, 10]	有	314.05	595.73	2.95
[15, 10, 15]	有	263.67	496.17	3.87
[15, 10, 15]	无	262.45	494.64	1.83

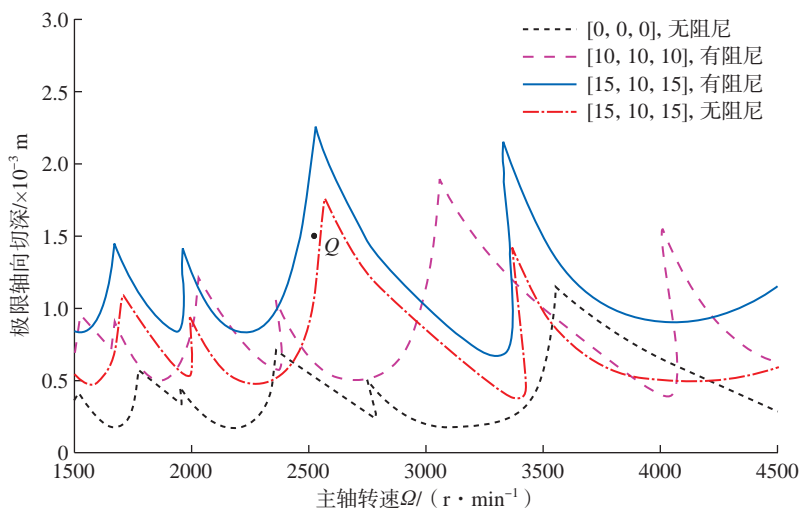


图8 稳定性叶瓣图  
Fig.8 Stability lobe diagram

表4 铣削加工试验具体设置  
Fig.4 Specific settings for milling experiments

试验组号	附加质量组合	电涡流阻尼	附加质量与永磁铁的间距/mm
1	[10, 10, 10]	有	1.5
2	[15, 10, 15]	有	1.5
3	[15, 10, 15]	无	—



图7 模态锤击试验装置

Fig.7 Modal hammering experimental device

动支架调整永磁铁和各附加质量的间距为 1.5 mm,在第 2 组试验中,处于中间位置的永磁铁需要添加 5 mm 厚的垫圈来保证间距一致。

切削试验所采用的铣刀型号为 WIDIA-HANGITA 5013,材质为硬质合金,刀齿数 3、直径 10 mm、长度 100 mm,其中悬伸长度设置为 50 mm,目的是提高铣刀刚度,从而忽略铣刀振动对切削过程的影响。薄壁件铣削加工试验现场如图 9 所示,位移传感器安装在支架上用来采集加工振动信号,前置器可将薄壁件振动位移转换为电压输出信号,位移传感器型号为 MIRAN-ML33-A-V1-3;数据采集卡需配合位移传感器和信号采集软件共同使用,其型号为 ADLINK-USB-1902。

依次进行 3 组薄壁件铣削加工试验,每组试验完成后需要更换相同规格的薄壁件,重新找正对刀后添加对应的附加质量和电涡流阻尼,方可进行下一组试验。对采集到的振动信号进行处理,得到的振动位移时域信号以及 FFT 频谱如图 10 所示。图 10 中,“SF”代表主轴转速频率;

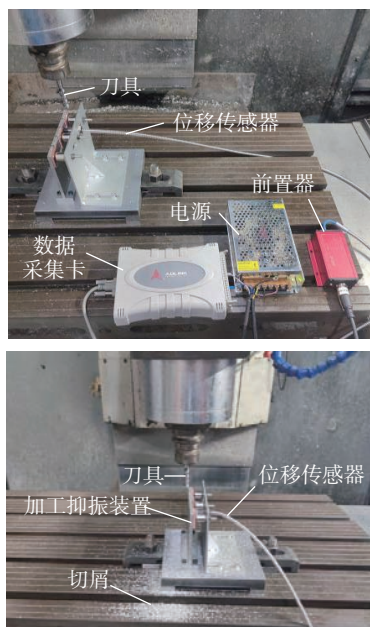
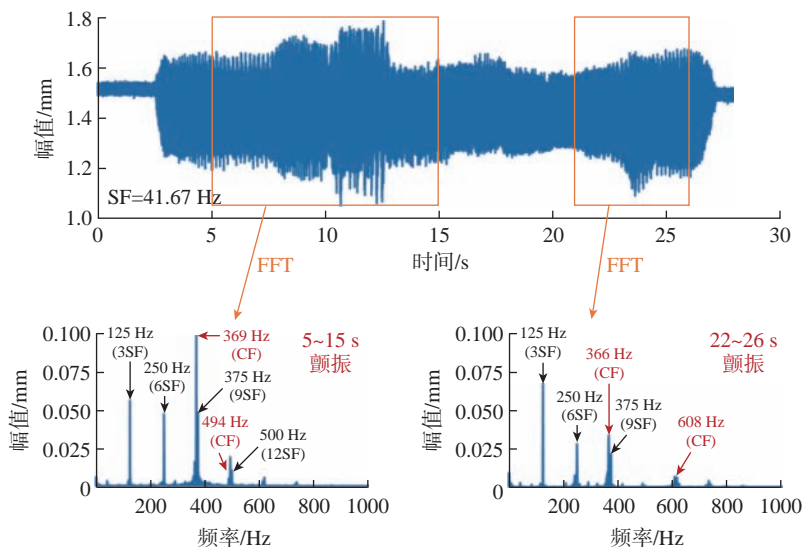
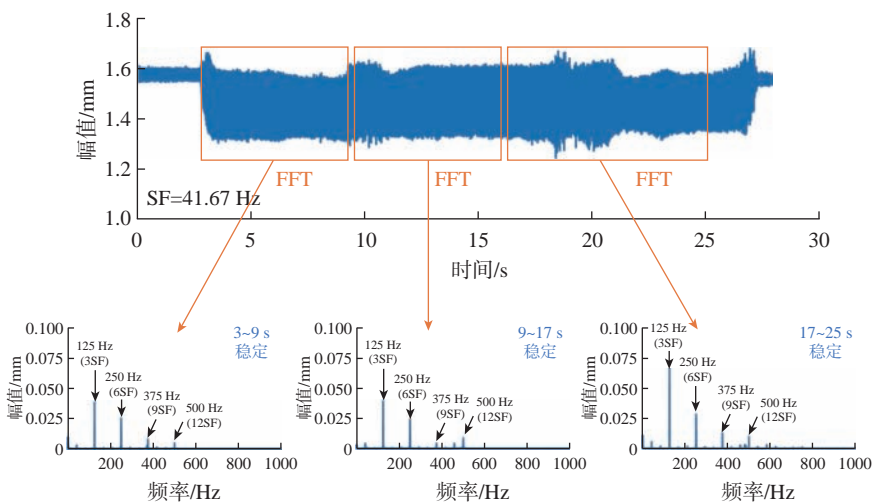


图 9 薄壁件铣削加工试验现场

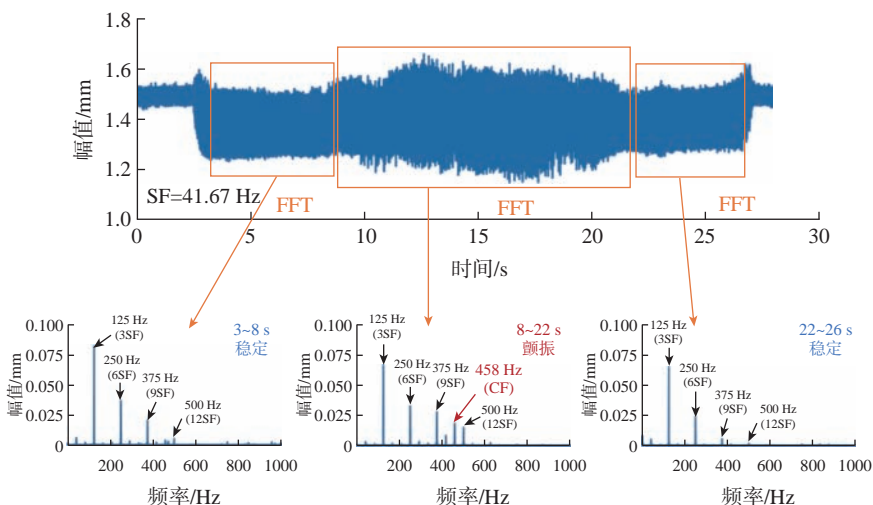
Fig.9 Experiment site of milling processing of thin-walled parts



(a) 第1组(附加质量组合[10, 10, 10], 有电涡流阻尼)



(b) 第2组(附加质量组合[15, 10, 15], 有电涡流阻尼)



(c) 第3组(附加质量组合[15, 10, 15], 无电涡流阻尼)

图 10 3 组试验结果

Fig.10 Three groups of test results

“CF”代表铣削颤振频率,其中 125 Hz(刀齿切削频率)、250 Hz、375 Hz 和 500 Hz 均为主轴转速频率的谐波频率。

在第 1 组试验中(图 10(a)),当同时添加普通附加质量组合 [10, 10, 10] 和电涡流阻尼时,在频率 369 Hz、494 Hz、366 Hz、608 Hz 处振幅较大,说明薄壁件加工过程失稳并出现颤振,这与稳定性叶瓣图中颤振预测结果相吻合。

在第 2 组试验中(图 10(b)),当同时添加优化附加质量组合 [15, 10, 15] 和电涡流阻尼时,薄壁件铣削振动得到明显抑制,加工过程较为稳定,频谱图中刀齿切削频率及其倍频处振幅较大,且低频幅值相对较高,说明薄壁件加工振动能量主要集中在低频范围内,加工过程没有出现颤振。

另外,在第 3 组切削试验中(图 10(c)),只添加优化附加质量组合 [15, 10, 15] 但不添加电涡流阻尼时,薄壁件加工振动幅值有一定程度的升高,加工开始阶段(3~8 s)较为稳定,但随后出现颤振。由 8~22 s 频谱可知 458 Hz 为颤振频率,振动位移时域信号幅值明显增加且不平稳。这说明不添加电涡流阻尼时薄壁件的铣削稳定性会降低,更容易发生颤振。

基于上述薄壁件切削试验结果,说明同时添加优化附加质量组合 [15, 10, 15] 和电涡流阻尼能更好地提升薄壁件铣削加工稳定性,获得更好的加工抑振效果。同时通过对试验结果的对比分析验证了所提出附加质量优化方法的可行性。

## 4 结论

(1) 针对薄壁件铣削加工颤振的问题,利用附加质量和电涡流阻尼增强薄壁件铣削加工稳定性,实现了铣削颤振抑制。建立了薄壁件铣削加工动力学模型,通过颤振稳定性分析得出附加质量和电涡流阻尼对铣

削稳定域的影响规律。

(2) 开展薄壁件动态特性灵敏度分析,结合薄壁件 1、2 阶模态振型确定附加质量的优化布局。之后利用响应面方法优化各附加质量的质量占比,获得了更大的薄壁件模态刚度和铣削稳定域,从而进一步提升了薄壁件铣削加工稳定性。

(3) 设计了一套薄壁件加工抑振试验装置,通过模态试验获得薄壁件模态参数,绘制稳定性叶瓣图用来选择切削参数,进行了多组薄壁件铣削加工试验,试验结果表明,附加质量和电涡流阻尼能够有效抑制薄壁件铣削加工颤振。

## 参考文献

- [1] MA J J, ZHANG D H, WU B H, et al. Vibration suppression of thin-walled workpiece machining considering external damping properties based on magnetorheological fluids flexible fixture[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(4): 1074-1083.
- [2] LIU H B, WANG J P, LUO Q, et al. Effect of controllable magnetic field-induced MRF solidification on chatter suppression of thin-walled parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(9-12): 2881-2890.
- [3] GUO W C, ZHANG Y, JIANG X H, et al. Improvement of stiffness during milling thin-walled workpiece based on mechanical/magnetorheological composite clamping[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 1047-1059.
- [4] 杨毅青, 裴行政, 刘强. 被动阻尼减振技术及数控加工应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(18): 16-23.
- [5] YANG Yiqing, PEI Xingzheng, LIU Qiang. Passive vibration control technology and applications in CNC machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(18): 16-23.
- [6] YUAN H, WAN M, YANG Y, et al. A tunable passive damper for suppressing chatters in thin-wall milling by considering the varying modal parameters of the workpiece[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(9-12): 4605-4616.
- [7] QIN P, LIU Y N, WANG M, et al. Milling vibration control of semiconical shell workpiece with multiple distribution tuned mass dampers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(7-8): 2175-2190.
- [8] 马鹏举, 徐汶, 高延, 等. 薄壁机匣铣削加工颤振抑制研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(11): 16-23.
- [9] MA Pengju, XU Wen, GAO Yan, et al. Research on chatter suppression in thin-walled casing milling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(11): 16-23.
- [10] RANSOM T, HONEYCUTT A, SCHMITZ T. A new tunable dynamics platform for milling experiments[J]. Precision Engineering, 2016, 44: 252-256.
- [11] YANG Y Q, XU D D, LIU Q. Vibration suppression of thin-walled workpiece machining based on electromagnetic induction[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(7): 829-835.
- [12] 程明迪, 郭家杰, 李卓, 等. 基于电涡流阻尼的薄壁盘加工振动抑制[J]. 机械工程学报, 2018, 54(17): 76-84.
- [13] CHENG Mingdi, GUO Jiajie, LI Zhuo, et al. Vibration suppression for thin-wall plate machining using eddy current damping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(17): 76-84.
- [14] ALTINTAS Y, STEPAN G, MERDOL D, et al. Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008, 1(1): 35-44.
- [15] TANG A J, LIU Z Q. Three-dimensional stability lobe and maximum material removal rate in end milling of thin-walled plate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(1-2): 33-39.
- [16] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [17] FU Zhifang, HUA Hongxing. Theory and application of modal analysis[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.
- [18] 隋允康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [19] SUI Yunkang, YU Huiping. Improvement of response surface methodology and its application to engineering optimization[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [20] 王民, 曹帅鹏, 咎涛. 基于切削稳定理论的铣削材料去除率[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(5): 674-677.
- [21] WANG Min, CAO Shuaipeng, ZAN

Tao. Milling material removal rate based on machining stability theory[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(5): 674-677.  
[16] DING Y, ZHU L M, ZHANG X J, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(5): 502-509.

## Vibration Suppression of Thin-Walled Parts Based on Additional Mass and Eddy Current Damping

LIU Haibo, ZHANG Hongze, WANG Chengxin, MIAO Huanhuan

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the chatter problem of milling thin-walled parts, a vibration suppression method based on additional mass and eddy current damping is proposed. Firstly, a dynamic model of milling machining of thin-walled parts is established, and the influence law of additional mass and eddy current damping on the machining stability region is obtained through flutter stability analysis; Then an optimization method for added mass of thin-walled parts is proposed to obtain the optimal added mass layout and mass proportion; Finally, a set of thin-walled parts processing vibration suppression device was designed, and the thin-walled parts milling experiment was carried out. The research results show that when the additional mass combination [15,10,15] and eddy current damping are added at the same time, the thin-walled workpiece machining vibration is significantly suppressed, which verifies the effectiveness of the proposed vibration suppression method.

**Keywords:** Thin-walled parts; Vibration suppression; Additional mass; Eddy current damping; Modal analysis

(责编 七七)

(上接第 52 页)

## Tool Wear State Identification Method of Thin-Walled Parts Milling Process Driven by Digital Twin

SONG Qinghua<sup>1,2</sup>, PENG Yezhen<sup>1,2</sup>, WANG Runqiong<sup>1,2</sup>, LIU Zhanqiang<sup>1,2</sup>

(1. Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Shandong University, Ministry of Education, Jinan 250061, China)

**[ABSTRACT]** Due to its weak rigidity, thin-walled parts are prone to chatter and deformation in the milling process, which aggravates tool wear. In order to improve the milling efficiency and surface quality of thin-walled parts, a tool wear state recognition method driven by the fusion of digital twin and support vector machine (SVM) is proposed. The feature vectors are extracted by time-frequency domain analysis and wavelet packet transform. The super parameters are optimized by grid search and cross validation (GSCV). Combined with SVM algorithm, the wear state recognition model of milling tool for thin-walled parts is constructed. The experimental results show that SVM algorithm has obvious advantages in the classification and recognition of high-dimensional and small sample data. The recognition accuracy of different milling cutter wear states reaches 96% and 90.16% respectively, and has good generalization ability. Combined with machine learning algorithm, a high fidelity and lightweight digital twin is constructed and embedded into the milling process monitoring platform of thin-walled parts, so as to solve the problems of real-time signal monitoring and online recognition of tool wear state in the machining process.

**Keywords:** Digital twin; Support vector machine; Tool wear; Wavelet packet decomposition; Online identification; Thin-walled parts

(责编 晓月)

引文格式: 田野, 宁涛, 陈志同. 基于高参数均匀性的叶片曲面光顺造型方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 61-69.

TIAN Ye, NING Tao, CHEN Zhitong. Smooth modeling method with uniform parameters for blade surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 61-69.

# 基于高参数均匀性的叶片曲面光顺造型方法\*

田野<sup>1</sup>, 宁涛<sup>2</sup>, 陈志同<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院复杂曲面先进加工技术实验室, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院飞行器制造工程实验室, 北京 100191)

**[摘要]** 为进一步优化叶片的曲面模型质量, 提出一种基于高参数均匀性的叶片曲面光顺建模方法。首先根据叶片的曲率特征, 将单层数据点分成叶盆、叶背、前缘和后缘 4 个部分, 通过叶片前缘和后缘的曲线拟合, 获得拟合圆圆心, 并以此生成叶片中弧线的诱导曲线。进而通过改进的牛顿迭代法获得一系列叶片截面轮廓线内切圆圆心, 从而获得中弧线, 对中弧线进行光顺处理以及弧长参数化, 并利用中弧线-厚度分布的方式, 结合过渡曲线生成光顺的截面轮廓线, 保证过渡处曲率连续。最后, 通过放样及融合优化算法快速自动地生成光顺的叶片曲面模型。利用该方法对某型号发动机叶片数据点进行曲面造型与加工验证, 结果表明, 优化后的曲面模型具有良好的光顺性, 避免了由于模型不光顺导致的刀轨波动问题。

**关键词:** 航空发动机叶片; 参数均匀; 光顺造型; 弧长参数化; 曲率连续

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.061



田野  
博士研究生, 主要研究方向为 CAD/  
CAM 理论与技术。

复杂曲面类零件被广泛应用于航空发动机、直升机螺旋桨、汽轮机、汽车精密模具等关键部件的生产制造中。航空发动机具有高复杂度和高精密性的特点, 其制造技术是国防实力的重要衡量标准。航空发动机叶片的质量很大程度上决定了发动机的核心性能。叶片曲面的光顺造型对后续的加工流程极为重要, 光顺的曲面造型更有利于生成平滑的刀轨, 提高加工精度与加工效率。因此叶片的曲面造型不是仅停留在对数据点的简单拟合来获得其大致外形, 更重要的是对数据点进行一系列的优化, 自动快速地获得光顺曲面。国内外学者关于曲面的光顺造型开展了一系列研究。

在叶片光顺曲面造型方面, 根据叶片几何特征间约束的表达可分为基于曲线变形的曲面造型方法与基

于曲线拟合的曲面造型方法。曲线变形方法包含七段圆弧法、非刚性配准法、分段高斯映射法等。七段圆弧法最早由 Mohaghegh 等<sup>[1]</sup>提出, 通过单层二维截面上数据点的划分来拼接构造七段圆弧以获得完整截面轮廓线。从特征约束的角度出发, Mohaghegh 等<sup>[2]</sup>提出了叶片曲面重构的 3 个基本步骤来构造叶片曲面。Piya 等<sup>[3]</sup>提出分段高斯映射法并在机翼上应用且取得了成功。Li 等<sup>[4]</sup>提出的非刚性变形配准方法可在一定的精度条件下重构多层截面轮廓线。Zhao 等<sup>[5]</sup>提出基于自由变形的叶片截面线重构方法重构截面轮廓线。曲线拟合方法中较有代表性的方法为 Werghi 等<sup>[6-7]</sup>提出的直线和圆弧特征在叶片截面轮廓线中的约束拟合法。Ke 等<sup>[8]</sup>提出了基于 B 样条等自由曲线的约束拟合方法。

\* 基金项目: 国家重大项目(GJXM92579)。

Khamencifar 等<sup>[9]</sup>给出了基于数据点不确定度的最小波动线拟合方法。

在曲面造型这一领域,国内也进行了相当多的研究工作。莫堃等<sup>[10]</sup>提出了结合流场约束的隐式曲面重构方法,保证了重构曲面的几何精度要求。吕学庚<sup>[11]</sup>提出一种航空发动机叶片流曲面重构方法,降低了叶片曲面重构的不确定性。曲学军等<sup>[12]</sup>利用统计学知识给出了平面轮廓线数据的B样条曲面拟合算法并对平面轮廓线扫描数据进行B样条曲面拟合。张云<sup>[13]</sup>给出了一种改进的中弧线-厚度分布方法,可用于精锻叶片自适应重构。施恒涛等<sup>[14]</sup>提出了一种基于多项式的曲率连续前缘造型方法,通过给定叶片前后缘和叶身交点过渡部分的中弧线和厚度分布的各阶导数来保证截面轮廓线曲率连续。周承号等<sup>[15]</sup>对点云数据进行数据处理,并对数据进行了流场的数据模拟,完成了涡轮叶片的曲面造型。黄攀<sup>[16]</sup>基于叶片二维翼型及三维叶片泛函集成表达理论,利用NURBS节点控制向量构建了风力机叶片曲面模型。

上述研究中依旧存在一些问题,具体表现在:(1)通常将每层截面轮廓线作为整体来进行优化,生成的整张封闭曲面往往需要在调整数据点位置时,同时控制其逼近精度,导致算法异常复杂,影响在实际工程中的应用;(2)忽视了参数均匀性对叶片曲面造型的影响,除了沿截面轮廓线的周向参数外,叶片曲面沿径向的参数均匀性也会很大程度上影响曲面质量。

为了进一步解决由于参数不均匀导致的曲面不光顺问题,本文提出了一种基于高参数均匀性的叶片曲面光顺造型方法:(1)通过生成4张曲面以代替整张封闭曲面,实现了对叶片造型过程的解耦,避免叶片边缘过渡部分与叶身的过度约束;(2)以弧长参数化方式构造关键曲线,在保

证造型精度的前提下使多层截面轮廓线光顺,达到叶片周向和径向同时参数均匀对齐的效果,提升了曲面的光顺程度;(3)用户输入数据点,应用优化算法即可高效自动地生成光顺叶片曲面,极大程度上简化了叶片的建模流程。通过对某型号发动机叶片数据点进行曲面造型与实际加工,对提出方法进行了验证。

## 1 基于高参数均匀性的叶片曲面光顺造型方法

在航空发动机叶片模型构造过程中,可能会面临两方面问题。(1)初始数据点通常沿径向分层分布,每一层数据点均位于同一平面上,层与层之间相互平行。在构建叶片截面轮廓线时,如直接用封闭曲线拟合,在首尾相接处极易出现不光顺现象,边缘部分曲率变化越剧烈,得到封闭曲线的精度越低,进而导致构造的曲面发生扭曲或自交叉。(2)目前曲

线的参数化方式多为积累弦长参数化,在数据点曲率变化较大的部分,实际弦长与实际弧长的差值变大,故需要对积累弦长参数化方法进行改进以提高参数均匀性,具有高均匀性的参数可以保证叶片曲面各层截面轮廓线的周向和径向参数准确对齐,避免曲面起伏或局部厚度变化而导致整体造型结果不理想,本文提出一种叶片曲面光顺造型方法。算法输入为叶片初始数据点信息,通过数据预处理进行初步区域划分,进而利用样条拟合以及非线性方程组的迭代求解获取关键曲线参数,进而结合中弧线-变半径厚度圆的曲线包络理论生成光顺叶片曲面,整体构造流程如图1所示,需要说明的是,每个前置条件衍生出的所有后置条件均需全部满足,才能进入下一流程。

### 1.1 光顺叶片截面轮廓线的快速生成

#### 1.1.1 诱导曲线的构造

本文采用中弧线-厚度分布函

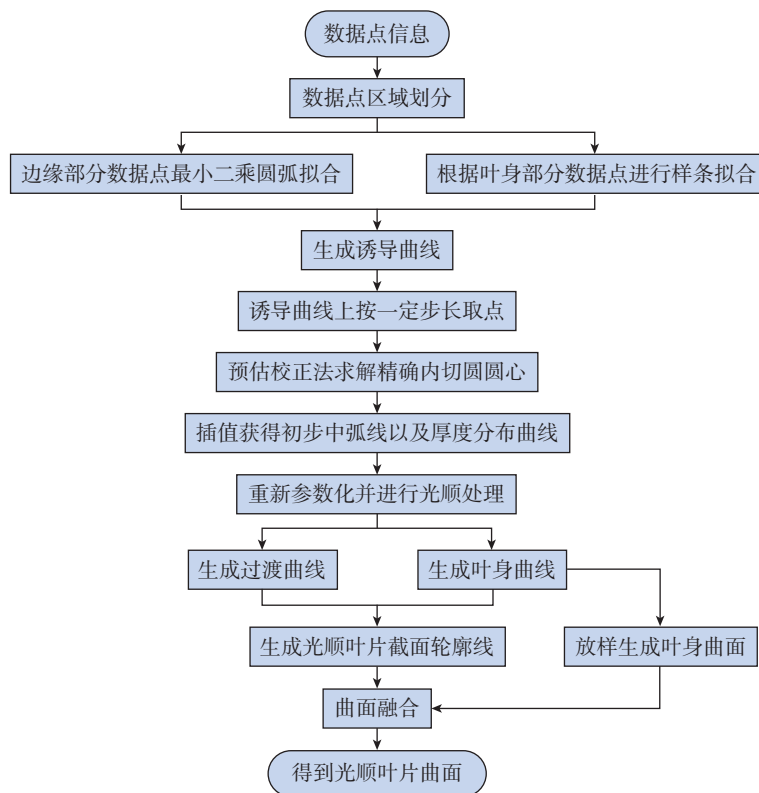


图1 叶片光顺曲面造型流程

Fig.1 Process of blade smooth surface modeling

数的形式来生成叶片截面轮廓线,在输入仅有数据点的前提下,首先将数据点大致分为叶盆、叶背、前缘、后缘4个部分,叶盆曲线与叶背曲线统称为叶身曲线,对前缘和后缘部分的数据点分别进行最小二乘圆弧拟合,得到其拟合圆圆心;接着对叶身部分的数据点进行样条拟合,以获得叶身曲线的大致轮廓;最后由两拟合圆圆心以及其连线的中垂线与叶身曲线的两个交点的中点生成中弧线的诱导曲线。诱导曲线生成算法具体步骤如下。

(1) 将数据点分为左右两个半区,需要先获取这组数据点集的最小二乘直线。对于同一平面上的数据点集,最小二乘直线是指已知的数据点集到该直线距离的平方和最小,即具有最小二乘解。在获得最小二乘直线  $L_A L_B$  后,可以获取数据点集中距离最小二乘直线距离最大的测量点,记为  $P_A$ ,过  $P_A$  做  $Y$  轴的平行线  $L_P$ ,找到数据点集中距离  $L_P$  最近的一点,记为  $P_B$ ;以  $P_A$  和  $P_B$  将数据点分为左右半区,申请两组容器 pntsL 和 pntsR 来储存左右半区的数据。

(2) 为将数据点分为叶盆、叶背、前缘、后缘4个区域,需要选取4个特征点。首先找到数据点的精确公切线,由于仅寻找公切线,会有很多可行解,因此需要加上一个限制条件:两个切点分别位于左右半区的下侧。得到的精确公切线 CT 和切点  $P_{CL}$ 、 $P_{CR}$ ,如图2所示,选取  $P_{CL}$ 、 $P_{CR}$  作为两个特征点。利用已获取的公切线,遍历数据点集,寻找左右半区两端在公切线方向向量上投影

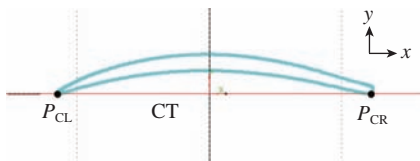


图2 截面轮廓线数据点的精确公切线  
Fig.2 Exact common tangent of contour data points

的极值点作为另外两个特征点,文中取  $x$  坐标的极大值点  $P_M$  与极小值点  $P_N$ ,图3给出了后缘部分的特征点  $P_N$ 。获取了全部4个特征点后,将数据点集分为4部分并存储在4组容器中,后缘、叶盆、前缘和叶背部分数据点分别对应存储容器 pnts1、pnts2、pnts3 和 pnts4,点区间的选取规则为左闭右开。

(3) 利用步骤(2)存储容器 pnts1 和 pnts3 中的点进行最小二乘圆弧拟合,得到叶片前缘与后缘部分的最小二乘拟合圆弧。值得注意的是,进行一次拟合很难满足精度要求,因此需要给定一定的容差  $\delta$  来进行迭代拟合,容差由叶片造型允许误差决定。得到满足精度要求的最小二乘拟合圆弧后,可以获得两侧的拟合圆圆心,记为  $O_1$  和  $O_2$ 。

(4) 利用步骤(2)存储容器 pnts2 和 pnts4 中的点,以样条插值方式得到近似的叶身曲线,记为  $C_A$  和  $C_B$ 。连接  $O_1$  和  $O_2$ ,得到线段  $\overline{O_1 O_2}$  并计算出其中垂线  $T$ ,中垂线  $T$  与  $C_A$ 、 $C_B$  分别交于  $P_U$  和  $P_D$  两点,取  $P_U$  和  $P_D$  的中点,记为  $P_O$ ;以  $O_1$ 、 $P_D$ 、 $O_2$  3点插值出诱导曲线  $L_G$ ,如图4所示。

### 1.1.2 弧长参数化方式光滑中弧线的获取

根据1.1.1节中生成的诱导曲线,利用改进的牛顿迭代法生成初始中弧线,进而对中弧线进行弧长参数化,最后进行给定容差的光滑处理,可以得到容差范围内的光滑中弧线以及厚度分布函数。

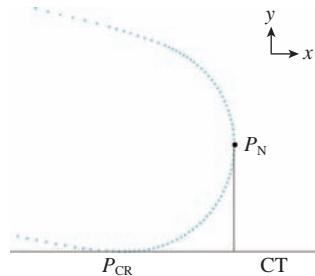
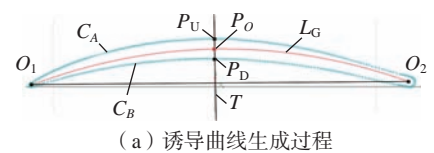


图3 后缘部分的特征点  
Fig.3 Feature points of trailing edge

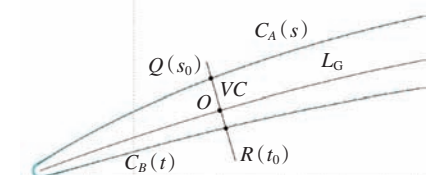
诱导曲线的参数区间 Interval 为  $u \in [0, 1]$ ,在诱导曲线上按照一定的步长取点,过这些点分别作诱导曲线的垂线,内切圆圆心一定在垂线上。叶背曲线  $C_A$  的含参数表达式为  $C_A(s)$ ,叶盆曲线  $C_B$  的含参数表达式为  $C_B(t)$ , $O(x_0, y_0)$  为诱导曲线上的点,将其作为内切圆圆心的初始点,内切圆半径为  $r_0$ ,其初始值设为左侧最小二乘圆弧的半径,直线  $VC$  为过  $O$  点的诱导曲线的垂线且满足方程  $Ax_0 + By_0 + C = 0$ , $Q(s_0)$  与  $R(t_0)$  分别为  $VC$  与  $C_A$  和  $C_B$  的交点,将其作为切点初始值; $C_A'(s_0)$  和  $C_B'(t_0)$  为曲线在该处的切矢,则可列出非线性方程组,即

$$\begin{cases} (Q(s_0) - O, C_A'(s_0)) = 0 \\ \|Q(s_0) - O\| = r_0 \\ Ax_0 + By_0 + C = 0 \\ \|R(t_0) - O\| = r_0 \\ (R(t_0) - O, C_B'(t_0)) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

通过具有预估-校正格式的改进牛顿迭代法可求解上述非线性方程组,初始值上文已经给出。通过试验得知,上文的初始值迭代运算次数一般在3次以内,可以快速收敛至近似解。可以得到一系列内切圆圆心  $\{O_i\}$  以及内切圆半径  $\{r_i\}$ ,  $i=0, 1, \dots, n$ ,其中,  $n$  为按给定步长选取的参数点数量,进而利用3次样条插值的方法获得精确中弧线,其参数表达式为  $MC^{ac}(u)$ 。对生成的精确中



(a) 诱导曲线生成过程



(b) 中弧线获取

图4 精确中弧线的获取  
Fig.4 Generation of accurate camber curve

弧线进行光滑处理和弧长参数化,首先利用改进的能量法,对中弧线进行给定容差的光滑处理,得到更加平滑的中弧线,按示例叶片的加工要求,建模允许误差应比最大允许加工误差降低一个数量级,因此其偏差控制在 0.001 mm 以内,针对不同叶片的加工要求,光滑偏差可灵活调整,图 5 给出了光滑前后的中弧线曲率梳分析。

目前曲线的参数化多为积累弦长参数化方式,即用弦长近似代替弧长,这种参数化方式在参数的末端边界部分会产生较大的积累误差。为了消除由于算法本身所带来的误差,对光滑中弧线进行重新参数化,即由积累弦长参数化转变为弧长参数化。具体分为以下 4 个步骤。

(1) 计算出光滑中弧线的总弧长,然后按照上文给定的参数步长在中弧线上取点,记录下这些数据点  $\{D_i\}$ ,以及对应中弧线上的参数  $\{u_i\}$ ,其中,  $i=0,1, \dots, n$ 。

(2) 依次计算从中弧线起始点到数据点  $\{D_i\}$  的弧长与曲线总弧长的比值,以这个比值来代替原先的参数,记为  $\{u'_i\}$ ,  $i=0,1, \dots, n$ 。

(3) 计算  $\{u'_i\}$  与  $\{u_i\}$  的差值,当所有差值均小于给定容差(针对文中算例,容差取  $10^{-6}$  mm)时弧长参数化结束,令  $u_i = u'_i$ ,否则回到步骤(1),直到满足差值小于给定容差,其中,  $i=0,1, \dots, n$ 。

(4) 用给定点串和参数的方式插值步骤(3)中最终得到的数据点,其参数和节点矢量均固定,最终得到弧长参数化的光滑中弧线  $MC(u)$ 。

### 1.1.3 光滑叶片截面轮廓线生成

在生成弧长参数化的光滑中弧线后,首先利用中弧线-厚度分布函数的方式构造叶身曲线,然后在叶片截面轮廓线的前缘和后缘部分生成过渡曲线,并保证过渡曲线与叶身曲线  $G_1$  连续,最终得到光滑的叶片截面轮廓线。具体实现步骤如下。

(1) 求解厚度分布函数。对内切圆半径集合  $\{r_i\}$ ,其中,  $i=0,1, \dots, n$  以及 1.1.2 节中最终得到的中弧线上的参数集合  $\{u_i\}$  进行 3 次样条插值可以得到  $r-u$  曲线,即厚度分布函数曲线。

(2) 厚度分布函数曲线的光滑与弧长参数化。利用改进的能量法,对步骤(1)中生成的  $r-u$  曲线进行给定容差的光滑处理,得到更加平滑的中弧线,其偏差控制在 0.001 mm 以内。利用与 1.1.2 中相同的弧长参数化方法对厚度分布函数曲线进行弧长参数化。图 6 给出了光滑前后的厚度分布函数曲线以及以曲率为参数的曲率梳分析。

(3) 生成叶身曲线。利用 1.1.2 中得到的中弧线  $MC(u)$  以及步骤(2)中得到的光滑厚度分布函数曲线生成叶身曲线。首先计算一系列内切圆圆心,中弧线起点记为  $O_0^{MC}$ ,其参数  $u_0^{MC}=0$ ,终点记为  $O_1^{MC}$ ,其参数  $u_1^{MC}=1$ ,取参数中点  $u_{mid}^{MC}=(u_0^{MC}+u_1^{MC})/2$ ,然后得到对应内切圆圆心  $O_{mid}^{MC}$ ,计算

$O_{mid}^{MC}$ 到  $O_0^{MC}$ 与  $O_1^{MC}$  连线之间的距离,当距离大于给定容差时(针对文中算例,容差取  $10^{-4}$  mm),记  $O_{mid}^{MC}$ 、 $u_{mid}^{MC}$  分别为  $O_3^{MC}$ 、 $u_3^{MC}$ ,  $O_3^{MC}$  将中弧线分为两部分,对这两部分中弧线重复上述过程,直至所有相邻 3 个内切圆圆心均小于给定容差,计算结束。

最终得到内切圆圆心集合  $\{O_i^{MC}\}$ ,以及对应中弧线上参数  $\{u_i^{MC}\}$ ,  $i=0,1, \dots, p$ 。其中,  $p$  为最终得到的内切圆圆心数量。

通过上述计算得到的厚度分布函数曲线方程以及一系列内切圆方程可以看作单参数曲线族  $F(x, y, c)=0$ ,其中,  $c$  为参数,对应中弧线上的参数  $u$ ,  $F(x, y, c)$  对  $x, y, c$  连续可微。由包络曲线的定义可以得到

$$\begin{cases} F(x, y, c) = 0 \\ F'_c(x, y, c) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

在式(2)中消去参数而得到的方程  $F(x, y)=0$ ,所表示的曲线即为单参数曲线族  $F(x, y, c)=0$  的包络曲线。依此求解可得到叶盆和叶背上的点,然后利用样条插值得到叶身

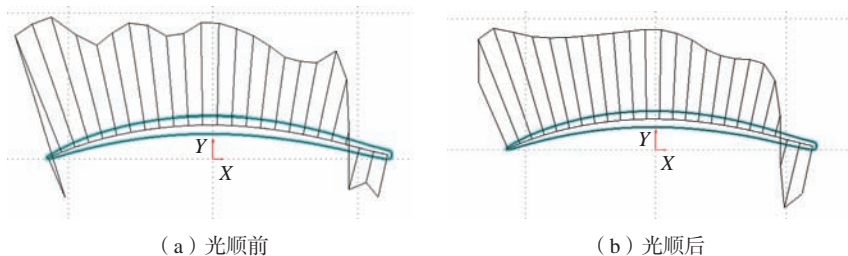


图 5 中弧线曲率梳分析  
Fig.5 Analysis of curvature combs of camber curve

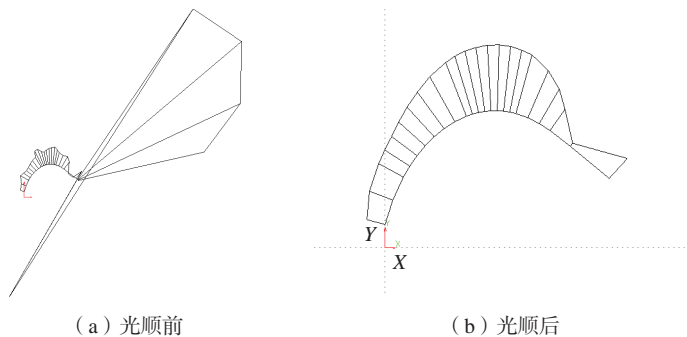


图 6 厚度分布函数曲线曲率梳分析  
Fig.6 Analysis of curvature combs of thickness distribution function curve

曲线,如图7所示。

(4)生成过渡曲线。在得到叶身曲线后,需要生成前缘和后缘部分的过渡曲线,可得到完整的叶片截面轮廓线;下文以生成叶片的前缘过渡曲线为例,后缘部分的过渡曲线生成方法完全相同。分别取叶身曲线的左端点 $M$ 和 $N$ 作为生成过渡曲线的两个控制顶点,并生成端点在曲线处的切线 $T_M$ 和 $T_N$ ,过1.1.1节中步骤(3)得到的拟合最小二乘圆弧的所有数据点做两条切线的投影,在 $T_M$ 和 $T_N$ 上找到距离叶身左端点最近的投影点 $V_A$ 与 $V_B$ ,以此作为拟合过渡曲线的另两个控制顶点。

以4个控制顶点 $M$ 、 $N$ 、 $V_A$ 、 $V_B$ 生成3次Bezier曲线作为初始过渡曲线,为保证生成的过渡曲线与叶身曲线的连续性,将3次Bezier曲线进行两次升阶操作,即5次Bezier曲线;对5次Bezier曲线以1.1.1节中步骤(3)得到的拟合最小二乘圆弧的数据点为参考点进行迭代的逼近与光顺处理,直至过渡曲线与叶身曲线的搭接部分误差小于 $10^{-8}$  mm,以得到与叶身曲线 $G_1$ 连续的过渡曲线,如图8所示。

值得指出的是,若直接用拟合最小二乘圆弧的所有数据点进行迭代逼近与光顺处理,会面临点串越界的情况,即部分数据点位于 $M$ 和 $N$ 的

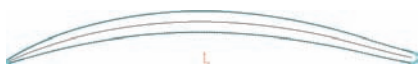


图7 叶身曲线  
Fig.7 Profile of blade

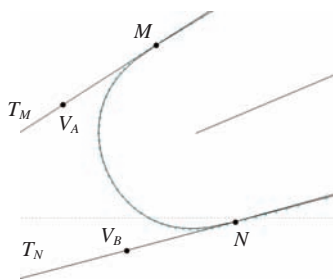


图8 过渡曲线的生成  
Fig.8 Generation of transition curve

右侧,因此在进行逼近和光顺之前,对拟合最小二乘圆弧的数据点集进行了处理,剔除掉越界的点。

## 1.2 光顺叶片曲面的生成

### 1.2.1 叶身曲面造型

在得到光顺的叶片截面轮廓线后,通过曲面放样可获得叶盆和叶背两张曲面。曲面放样中沿 $v$ 方向参数化的具体方法:对1.1.3节中生成的叶身曲线进行反算,得到其B样条的控制顶点,如图9所示,以叶盆曲线的一部分为例,RB和RB'为相邻两层叶盆曲线的一部分,  $\{CP_i\}$ 和  $\{CP'_i\}$  ( $i=0,1,\dots,6$ )为对应的控制顶点,求解相邻两层对应的控制顶点之间的实际距离占所有不同层对应控制顶点的实际距离之和的比例作为 $v$ 方向的控制参数。由于同一层截面线上的控制顶点均在同一平面上,且经过1.1.3节中步骤(3)的算法处理,所有的叶身曲线非常接近于弧长参数化,极大地减小了积累弦长参数化引起的不同层截面线之间的 $u$ 方向误差,因此可以确保 $v$ 方向的参数对齐且不会出现参数曲线扭曲的情况,生成的放样曲面如图10所示。

### 1.2.2 前后缘过渡曲面造型

拾取两张曲面,两条脊线和多条过渡曲线进行融合操作。以前缘过渡曲面生成为例,其具体步骤如下。

(1)如图11所示,拾取叶盆曲面SE和叶背曲面SX,以两曲面的左边界SC与SC'作为前缘过渡曲面的脊线,相邻两层过渡曲线为 $TC_0$ 与 $TC_1$ 。 $TC_0$ 与SC、SC'交于 $IP_0$ 、 $IP'_0$ 并取连线中点 $O_0$ 作为原点,过 $O_0$ 作平面 $P_V$ 垂直于线段 $IP_0IP'_0$ ,过 $IP_0$ 作SC的切线 $T_0$ ,过 $IP'_0$ 作SC'的切线 $T'_0$ ,

将 $T_0$ 与 $T'_0$ 求平均并投影到平面 $P_V$ ,投影所得向量为 $x$ 轴,以平面 $P_V$ 中 $x$ 轴的垂线方向为 $z$ 轴,利用右手定则得到 $y$ 轴建立局部坐标 $O_0xyz$ 。同样的方法用于 $TC_1$ 建立局部坐标系 $O_1xyz$ 。

(2)取曲线SC在 $IP_0$ 与 $IP'_0$ 之间的部分取参数中点,得到 $IP_2$ ,对SC'采用相同的策略,获得 $IP'_2$ ,用步骤(1)中的方法建立局部坐标系 $O_2xyz$ ,将 $TC_0$ 与 $TC_1$ 在 $O_2yz$ 面内的投影曲线进行加权平均,并对其添加限制条件,令其两个端点分别与 $IP_2$ 、 $IP'_2$ 两点重合,且端点处与SE、SX与 $O_2yz$ 平面的交线保持 $G_1$ 连续,利用迭代逼近的方法得到插值曲线 $TC_2$ 。

(3)对全部相邻的过渡曲线重复步骤(2),直至满足密度要求,得到曲线组 $\{TC_0, TC_1, \dots, TC_n\}$ ,其中, $n$ 为给定曲线密度,以得到的曲线组生成平滑过渡曲面。

文中算法均在CAM5曲面造型系统中进行开发,在叶片的光顺造型过程中,用户选择航空发动机叶片的数据点文件,系统读取数据点后,在用户操作下,自动进行叶片曲面光顺造型相关操作,包含诱导曲线的构造、弧长参数化方式光顺中弧线的获取、光顺叶片截面轮廓线生成、叶身曲面造型以及前后缘过渡曲面造型,直到完成叶片曲面光顺造型。

## 2 结果分析

### 2.1 理论分析

假设给出某条曲线的参数表达式 $C(u)$ ,  $a \leq u \leq b$ ,其中, $a \in R$ ,  $b \in R$ ,曲线上的数据点集为 $\{p_i\}$ ,其中, $i=0,1,\dots,n$ ,则按照积累弦长参

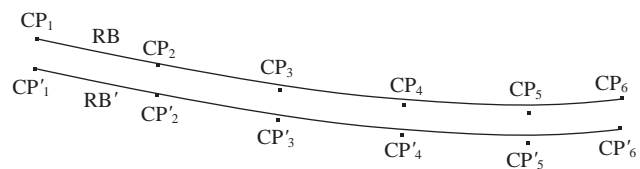


图9 反算B样条的控制顶点  
Fig.9 Inverse computation of B-splines control points

数化所得到的参数区间为

$$\begin{cases} u_0 = 0 \\ u_i = u_{i-1} + \overline{p_{i-1}p_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\overline{p_{i-1}p_i}$  为  $p_{i-1}$ 、 $p_i$  两点间的距离, 即弦长。其受曲线整体长度、数据点集分布、曲线局部的曲率变化率影响

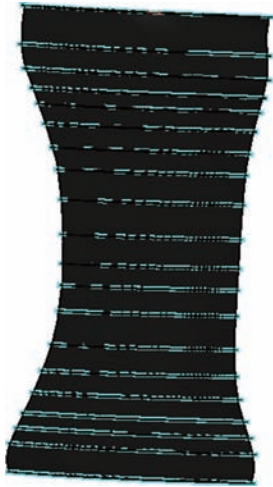


图 10 放样曲面  
Fig.10 Lofted surface

较大。

对于曲线  $C(u)$ , 弧长参数表示式为

$$\begin{cases} C = C(s) \\ s(t) = \begin{cases} \int_a^t |C'(t)| dt, t > a \\ -\int_a^t |C'(t)| dt, t < a \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $s$  为弧长参数;  $a$  为曲线初始参数左边界;  $t$  为积分参数;  $s(t)$  为一个确定的极限, 与曲线整体长度、数据点集分布、曲线局部的曲率变化率无关, 因此其精度高于积累弦长参数化。本文的优化方法构造了弧长参数化的光滑中弧线以及叶身曲线, 选择合适的曲面放样方法得到叶身曲面。在边缘过渡部分, 由于曲线整体长度较短, 且脊线参数分布合理 (为叶身曲面的边界), 故采取积累弦长参数化方式, 为尽量消除曲率变化率对精度的影响, 在参数化时采取了加密的策略。数据点的参

数经上述步骤完全确定, 在 4 张曲面上的数据点沿双方向等参数曲线率变化平滑, 避免了曲面的扭曲现象, 达到光滑的效果。

## 2.2 造型实例分析

为验证本文提出的叶片曲面光滑造型方法的正确性, 选取具有 20 层截面轮廓线的某型号航空发动机叶片数据点为例, 进行了叶片曲面光滑造型试验验证, 叶片的加工最大允许误差为  $-0.03 \sim +0.05$  mm。通过对造型结果以及实际加工效果的分析, 验证了所提出方法的正确性。结果分析从以下 4 方面进行。

(1) 精度分析。计算所有数据点到生成曲面的距离, 为简洁起见, 图 12 中仅展示叶背曲面的 100 个数据点及后缘过渡曲面的 100 个数据点。其中数据点到叶身曲面的最大距离为 0.008915 mm, 到前缘后缘过渡曲面最大距离为 0.006173 mm, 均满足叶片建模的精度要求。

(2) 曲面曲率分析。分别对初始叶片曲面和经过手工调整的模型曲面以及利用文中算法生成的光滑叶片曲面进行曲率分析。图 13 中曲面由左至右分别是 UG 初始建模曲面、人工调整的曲面和光滑造型曲面。从分析结果可以看出, UG 直接通过插值曲线和曲线组方式建模, 将

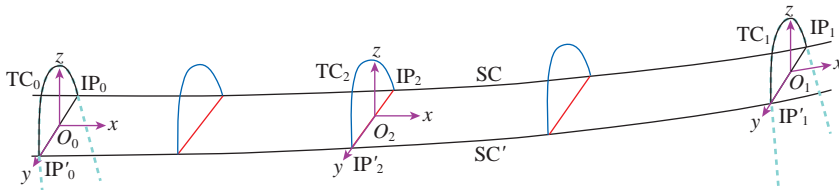
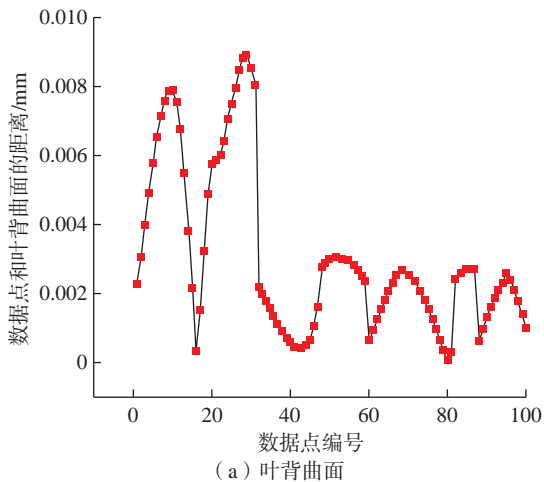
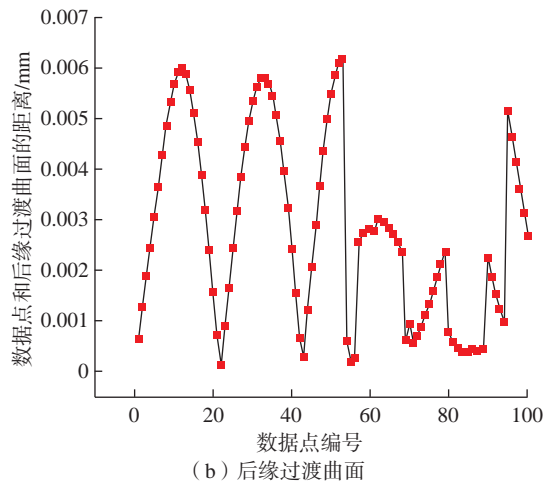


图 11 融合曲面  
Fig.11 Blend surface



(a) 叶背曲面



(b) 后缘过渡曲面

图 12 数据点到曲面的距离

Fig.12 Distance of data point to surface

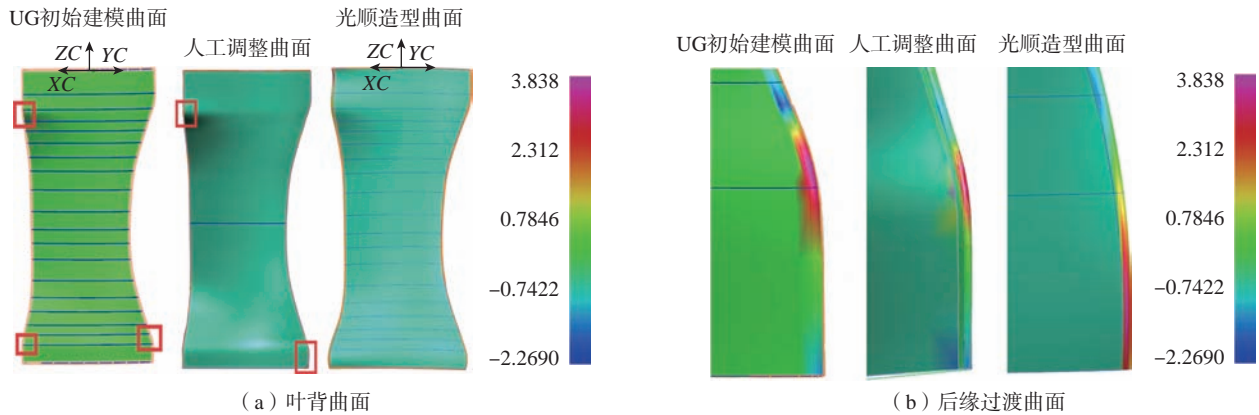


图 13 曲面的曲率分析

Fig.13 Curvature analysis of surfaces

叶片模型作为一个整体来进行曲面建模,其在前缘和后缘部分有曲率突变并延伸到了叶身部分(图 13(b)),人工调整的模型曲面有同样的问题,而通过文中方法进行的叶片光顺曲面建模是由叶盆、叶背、前缘、后缘 4 个部分构成,通过精确的分区避免了曲率突变问题,较剧烈的曲率变化被严格地限制在边缘过渡曲面部分,在边缘和叶身过渡部分曲率变化更加平滑,曲面的整体也更加光顺。

(3) 截面轮廓线曲率梳分析。截面轮廓线的曲率梳分析最能说明曲线的光顺性,以曲率为参数对 3 个模型均进行了相同参数位置的截面轮廓线曲率梳生成。初始模型的截面轮廓线在前后缘过渡部分保持了  $G_1$  连续,但叶身曲线曲率变化不平滑;手工调整模型是根据加工经验,通过人工修改数据点使其符合加工要求,可以看到,其叶身曲率变化不平滑,且在前后缘过渡部分无法保证  $G_1$  连续。虽然可以生成较为平滑的刀轨,但是对于曲面建模而言具有很大的风险与不确定性。通过分析对比(图 14)可以得到结论:应用文中算法进行快速建模的光顺叶片曲面模型,其截面轮廓线曲率变化平滑,且在前缘后缘部分保持  $G_1$  连续,具有良好的几何性质。

(4) 刀轨平滑性分析。应用控制变量法,分别在 3 个模型中生成的叶

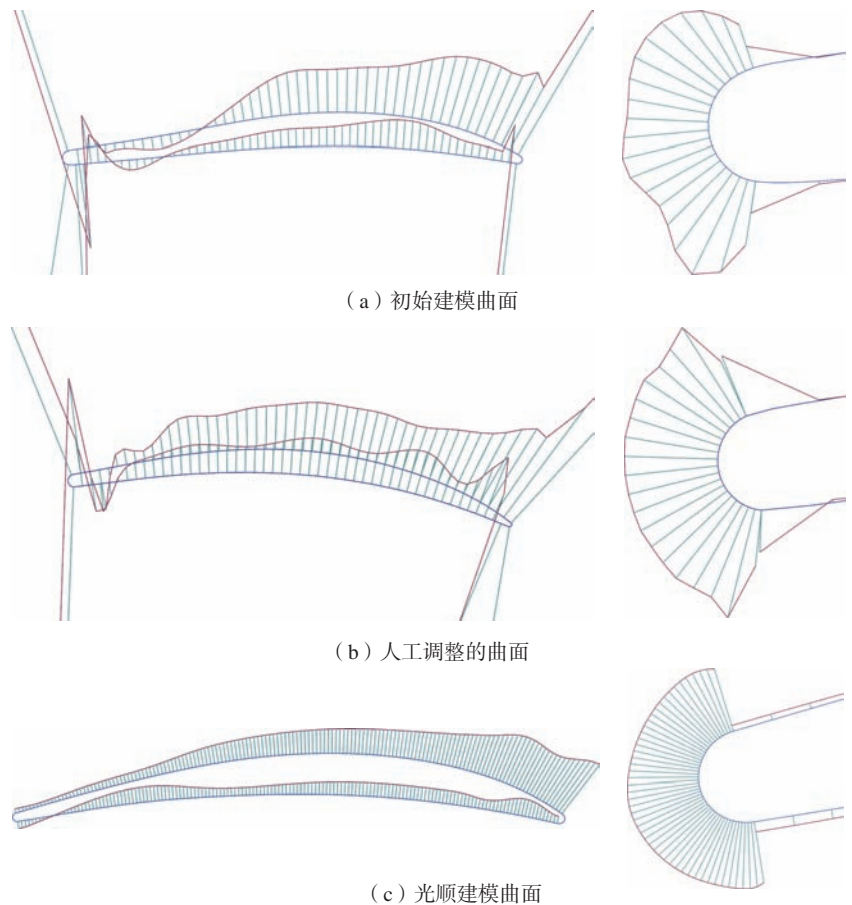
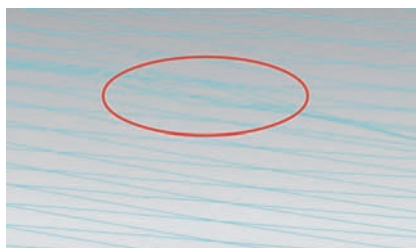


图 14 截面轮廓线曲率梳分析

Fig.14 Curvature comb of profile curves

片曲面上相同区域选取相同的加工参数生成刀轨,在初始模型中生成的刀轨有回折,从而引起刀轴突变,因此试件加工后表面会有振纹,加工效果很差。而应用文中算法生成的叶片表面上的刀轨平滑无回折,加工效

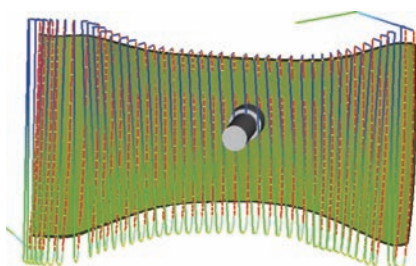
果较好且满足加工要求,如图 15 和 16 所示。由此可以得到结论:利用文中优化方法快速自动生成的光顺叶片曲面具有良好的参数均匀性及光顺度,减少了刀轨的波动性,从而大幅提高加工质量、减少机床磨损。



(a) 初始建模曲面



(b) 人工调整的曲面



(c) 光顺建模曲面

图 15 刀具轨迹的生成  
Fig.15 Generation of toolpaths



图 16 经过加工的叶片  
Fig.16 Machined blade

### 3 结论

(1) 本文以航空发动机叶片为研究对象,对叶片曲面造型中存在的问题进行分析,将叶片特征之间的关系解耦与特征曲面均匀参数化相结合,提出了基于高参数均匀性的叶片曲面光顺造型方法。考虑到叶片目前的整体造型过程较为烦琐,将优化算法集合于曲面造型系统中,用户可以通过简易操作自动高效地获取光顺的叶片曲面。

(2) 本文提出优化算法通过生成 4 张曲面以代替整张封闭曲面,实现了对叶片造型过程的解耦,避免了叶片边缘过渡部分和叶身部分的过度约束,在使算法流程简化的同时保证了造型精度,利于在实际工程中的应用。

(3) 在叶片造型过程中实现特征曲面双向均匀参数化,有效提升了曲面的光顺程度,便于后续的加工。在叶片曲面上具有相同  $v$  参数的点可以构成等  $v$  参数线族,在实际加工中可以进一步研究此曲线族与加工方法的关系。文中提出的方法还可以推广至其他具有复杂曲面特征的典型航空类零件的曲面造型。

(4) 在输入数据点后,用户只需要进行简单的操作即可应用优化算法快速自动地生成光顺叶片曲面,解决了叶片曲面造型整体流程烦琐的问题。将优化方法应用于某型号叶片的实际加工,数据分析和加工效果验证了方法的正确性。

### 参考文献

[1] MOHAGHEGH K, SADEGHI M H, ABDULLAH A. Reverse engineering of turbine blades based on design intent[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(9-10): 1009-1020.

[2] MOHAGHEGH K, SADEGHI M H, ABDULLAH A, et al. Improvement of reverse-engineered turbine blades using construction geometry[J]. The International Journal of

Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(5-8): 675-687.

[3] PIYA C, WILSON J M. Virtual repair geometric reconstruction for remanufacturing gas turbine blades[C]//ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Washington, 2011: 895-904.

[4] LI Y, NI J. Constraints based nonrigid registration for 2D blade profile reconstruction in reverse engineering[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2009, 9(3): 31005.

[5] ZHAO Z C, FU Y C, LIU X, et al. Measurement-based geometric reconstruction for milling turbine blade using free-form deformation[J]. Measurement, 2017, 101: 19-27.

[6] WERGI N, FISHER R, ROBERTSON C, et al. Modelling objects having quadric surfaces incorporating geometric constraints[C]//Computer Vision—ECCV' 98, 1998: 185-201.

[7] WERGI N, FISHER R, ROBERTSON C, et al. Object reconstruction by incorporating geometric constraints in reverse engineering[J]. Computer-Aided Design, 1999, 31(6): 363-399.

[8] KE Y L, FAN S Q, ZHU W D, et al. Feature-based reverse modeling strategies[J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(5): 485-506.

[9] KHAMENEIFAR F, FENG H Y. Airfoil profile reconstruction under the uncertainty of inspection data points[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1-4): 675-683.

[10] 莫堃, 尹周平. 流场速度和距离函数混合约束的流曲面重构方法[J]. 现代制造工程, 2011(2): 1-5, 102.

MO Kun, YIN Zhouping. Stream surface reconstruction based on mixed constraints of fluid velocity and distance function[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011(2): 1-5, 102.

[11] 吕学庚. 航空发动机叶片流曲面重构及修复方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

LÜ Xuegeng. Research on reconstruction and repair methods of aeroengine blade stream surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[12] 曲学军, 宁涛, 席平. 逆向工程中平面轮廓线数据的 B 样条曲面拟合[J]. 计算机工程, 2004, 30(10): 14-15, 19.

QU Xuejun, NING Tao, XI Ping. B-spline surface fitting for plane profile data in reverse

engineering[J]. Computer Engineering, 2004, 30(10): 14–15, 19.

[13] 张云. 叶轮叶片几何自适应加工技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2016.

ZHANG Yun. Research on geometric machining technology of impeller blades[D]. Beijing: Beihang University, 2016.

[14] 施恒涛, 刘宝杰, 于贤君. 基于多项式的曲率连续前缘造型方法及应用[J]. 航空动力学报, 2020, 35(2): 397–409.

SHI Hengtao, LIU Baojie, YU Xianjun. Polynomial-based continuous-curvature leading

edge design method and its application[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(2): 397–409.

[15] 周承号, 王家兴, 宋嘉程, 等. 涡轮叶片曲面重构与流体动力学数值分析[J]. 科技创新与应用, 2021(9): 54–56.

ZHOU Chenghao, WANG Jiaying, SONG Jiacheng, et al. Surface reconstruction of turbine blades and numerical analysis of fluid dynamics[J]. Technology Innovation and Application, 2021(9): 54–56.

[16] 黄攀. 水平轴风力机叶片复杂曲面

建模与等几何分析研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.

HUANG Pan. Research on modeling and isogeometric analysis of complex surface of horizontal axis wind turbine blades[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.

通讯作者: 宁涛, 副教授, 博士, 主要研究方向为 CAD/CAM 理论与技术、计算机图形学与虚拟仿真等。

## Smooth Modeling Method With Uniform Parameters for Blade Surface

TIAN Ye<sup>1</sup>, NING Tao<sup>2</sup>, CHEN Zhitong<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Advanced Machining Technology of Sculptured Surface,

School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Laboratory of Aircraft Manufacturing Engineering, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** In order to further optimize the quality of the blade surface model, a blade surface smooth modeling method with uniform parameters is proposed. First, according to the curvature characteristics of the blade, the data points of each layer of section curves are divided into four parts: pressure side of blade, suction side of blade, the leading edge and the trailing edge. The center of the circle is used to generate the induced curve of the camber curve of the blade. Then, a series of inscribed circle centers of the profile of the blade section are obtained by the Newton iteration method, so as to obtain the camber curve, which is smoothed and arc length parameterized. Using the method of camber curve-thickness distribution, combined with the transition curve to generate a smooth cross-sectional contour curve to ensure the continuous curvature. Finally, a smooth blade surface model is generated by lofting and fusion optimization algorithms. This method is used for model construction and processing of data points of a certain engine blade. The result analysis shows that the optimized surface model has better smoothness, which avoids the problem of tool path fluctuation caused by the unsmooth model.

**Keywords:** Aero-engine blade; Unification of parameters; Smooth styling; Arc length parameterization;

Continuous-curvature

(责编 七七)

引文格式: 刘述明, 扈博琴, 张春龙, 等. 基于浮动装夹自适应加工工艺的薄壁件加工变形控制技术研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 70-77.  
LIU Shuming, HU Boqin, ZHANG Chunlong, et al. Research on deformation control technology for thin-walled parts based on responsive fixture adaptive machining process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 70-77.

# 基于浮动装夹自适应加工工艺的薄壁件加工变形控制技术研究

刘述明, 扈博琴, 张春龙, 罗兆柱

(中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 哈尔滨 150066)

[摘要] 航空薄壁件尺寸大、壁薄、材料去除率高, 极易发生加工变形问题, 严重影响零件加工质量, 因此航空薄壁件的加工变形控制具有重要的意义。以某传扭转接盘作为研究对象, 基于加工过程中的监测变形力重构毛坯全局残余应力分布, 优化了零件的加工位姿, 并结合浮动装夹自适应加工工艺实现了零件的加工变形有效控制。实际加工试验将零件的平面度和平行度分别控制在 0.11 mm 和 0.04 mm, 结果表明, 该方法能显著控制工件加工变形。

关键词: 薄壁零件; 变形控制; 残余应力; 浮动装夹; 变形力

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.070



刘述明

高级工程师, 硕士, 研究方向为航空扁平类机匣加工变形控制、航空箱体类机匣高效加工工艺、航空机匣类零件数字化制造技术。

航空薄壁件一般指的是壁厚与内径曲率半径(或轮廓尺寸)之比小于 1:20 的零件<sup>[1]</sup>, 是航空航天器的重要组成部分, 这类零件具有重量

轻、节约材料、结构紧凑等特点, 但在制造过程中易发生弯曲、扭转以及弯扭组合等复杂的加工变形问题。加工变形问题一直是材料领域、设计领域和制造领域共同关注的研究热点。航空薄壁件加工的技术水平和生产能力是国家制造业实力和国防科技工业现代化水平的综合体现<sup>[2]</sup>, 同时新一代飞机追求更为极致的综合性能, 也对航空航天构件的加工精度提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。然而, 现有的变形控制方法对大型结构件加工变形控制仅能达到每米零件 0.2 mm, 而新一代飞机结构件的最大允许变形量为每米零件 0.05 mm, 这对现有制造技术提出了严峻挑战。

国内外专家学者与技术人员针对加工变形问题开展了大量研究, 这些研究按控制方法的决策方式可主要分为基于经验试错的方法和基于加工仿真的离线加工变形控制方法。基于经验试错的方法进展如下: 经

过大量工程技术人员的不懈努力与反复尝试, 许多的工艺措施得到了实施和完善, 有很多精度要求较高的薄壁零件在传统的车、铣、刨、磨的加工方法下制造成功, 确保了零件的加工质量<sup>[4]</sup>。林勇等<sup>[5]</sup>在零件装夹时预先给零件施加一个与之变形方向相同的应力, 零件加工时, 内部残余应力与零件克服装夹预应力相互耦合, 最终实现零件加工变形控制, 其中, 装夹预应力大小根据薄壁弧形框精加工后侧弯收缩量约为 0.6 mm 的经验确定。由于薄壁件种类繁多, 而且多为小批量生产, 这种依靠经验试错的方法需要在正式生产前对零件进行大量的试切试验确定, 耗费大量的人力、物力与时间。此外, 由于材料批次的差异、加工过程中切削参数变化等不稳定因素的影响, 这类通过经验确定的工艺策略往往伴随着很大的随机性, 难以保证零件的合格率。

基于加工仿真的离线加工变形控制方法的进展如下:经过多年的研究,在金属切削理论、切削加工模型建立以及加工仿真方面的研究均取得了很大的进展。因此加工仿真也成为加工变形控制的重要方式,其主要是借助有限元模拟技术对切削过程中薄壁件侧壁、腹板、整体变形进行加工仿真,预测该工艺下的加工变形规律,从而预先调整工艺减小加工变形。Wang等<sup>[6]</sup>使用有限元软件MSC模拟了铝合金材料的加工去除过程,分析了加工变形产生的原因,提出残余应力的释放是大型薄壁件加工变形的主要原因。Cerutti等<sup>[7]</sup>通过分层法获得铝合金毛坯初始残余应力分布,并基于FORGE开发了一种新的加工仿真方法,将测量应力输入仿真模型获得了加工变形,最终仿真变形与试验变形有良好的一致性。Abdullah等<sup>[8]</sup>针对薄壁件变形预测问题,通过有限元方法分析材料去除过程,并使用统计回归方法建立切削残余、零件属性与变形的关系,获得Ti-6Al-4V合金零件侧壁的加工挠度。林锋等<sup>[9]</sup>建立加工变形的力学模型及其相应的有限元方法,揭示毛坯初始几何误差对零件变形的影响规律,以最小变形为目标建立加工位置的优化模型,根据相邻两个加工位置的增量不超出阈值这一条件,提出了优化模型的步长递减算法。孙启梦等<sup>[10]</sup>针对径厚比较大的铝合金薄壁件易加工变形的问題,开展基于有限元显式动力学的铣削过程仿真研究,在相同材料去除率下,分析了转速、切深及每齿进给量的组合条件对切削力与变形的影响。张春燕等<sup>[11]</sup>利用有限元软件ABAQUS模拟了铣削过程,建立了单因素试验和4因素3水平正交试验,分析了检具铣削时各工艺参数对工件加工变形和材料去除率的影响规律。以上,相较于经验试错方法,

基于加工仿真的方法建立了零件加工变形的机理模型,通过数值分析可得出更为稳健的加工变形控制工艺策略。同时加工仿真代替了经验试错方法中的试切试验,可大大减少产品生产的准备周期,降低生产成本。

残余应力作为引起加工变形的关键因素,是加工仿真的重要基础。准确测量残余应力是保证加工仿真准确性的关键所在。残余应力的测量方法主要包括破坏性试验法和非破坏性试验法:破坏性试验法主要有钻孔法<sup>[12-13]</sup>、剥层法<sup>[14-15]</sup>、纳米压痕法<sup>[16-17]</sup>等,这类方法的原理就是释放存在材料内部的原始应力,通过测量该过程所产生的应变位移并反求出残余应力值,该方法的问题是残余应力测量后零件的结构也会遭到破坏,无法进一步使用;非破坏性试验法主要有X射线衍射法<sup>[18-19]</sup>、超声法<sup>[20-21]</sup>、中子衍射法<sup>[22-23]</sup>等无损检测方法,但这类方法目前只能检测表面或近表面的残余应力。通过以上分析,残余应力测量方法大多比较复杂且昂贵,测量范围和精度受限,而且不同毛坯件的残余应力分布也存在较大差异。

综上所述,现有残余应力测量方法仍存在很大的局限性,迫切需要一种精确在线推断航空薄壁件初始残余应力场的方法。基于监测变形力重构当前毛坯全局残余应力场的方法是精确获取当前零件残余应力的重要途径,以变形量预测精度作为残余应力场推断误差评价指标,该方法与钻孔破坏法相比,求解结果的均方根误差平均降低了87.1%<sup>[24]</sup>。因此,本文针对航空薄壁件加工变形问题,以某传扭转接盘作为研究对象,采用上述基于变形力的残余应力重构法对当前加工零件的初始残余应力场进行推断实现残余应力重构,进而结合浮动装夹自适应加工工艺实时调整优化加工变形控制策略,可有效控制零件的变形。

## 1 残余应力场重构方法

### 1.1 浮动装夹自适应加工原理

浮动装夹加工工艺是一种集监测、装夹、浮动于一体的加工工艺方法,具有在加工过程自适应释放、监测并消除零件变形的功能。在切削加工的间隙,浮动装夹可以根据装夹装置监测到的装夹作用力,在保证定位基准的条件下,自适应调整装夹和加工工艺,通过进一步的加工工艺消除零件变形。浮动装夹自适应加工原理主要包含自适应装夹与数据监测两部分。

浮动装夹通过将零件脱离工作台进行加工,使零件在加工过程中可以充分释放变形,同时通过固定装夹单元保证工件定位基准,保证加工工件的加工质量。浮动装夹自适应加工的装夹原理如图1所示,中间3个固定装夹单元完全定位零件,保证加工的基准,周围的浮动装夹单元和辅助支撑单元则能够保证变形释放并重新装夹。

装夹装置中嵌入压力传感器,能够在零件加工的过程中监测装夹点的零件与装夹装置之间作用力的变化。通过监测零件的变形力的变化,一方面了解零件的整体变形状态和变形趋势,分析在当前变形状态下夹紧零件是否能够在毛坯包络体内加工出合格的零件;另一方面,根据零件的整体变形状态,分析零件变形的规律,从而根据零件的变形量调整加工工艺,进一步减小加工零件的整体变形。与传统预测方法相比,浮动装夹将由不确定性因素导致的加工变形精确预测难题转化为基于变形力、加工变形监测数据等确定性因素的问题求解,为加工变形的精确控制提供了新的思路。

### 1.2 基于变形力重构当前毛坯全局残余应力场

毛坯制造过程中会经历不均匀的温度变化,其内部会发生不均匀的

弹塑性变形、相变等,会产生残余应力场。初始状态下,毛坯内残余应力保持平衡,零件不会发生变形。但在加工过程中随着材料的去除,工件内部的应力平衡被打破,应力场发生重平衡,零件发生变形,如图2所示。

根据弹性力学,零件材料去除后不平衡的初始残余应力叠加会形成弯矩  $M_y$ 、 $M_{yx}$ 、 $M_{xy}$ 、 $M_x$  和剪力  $F_y$ 、 $F_x$ , 零件受上述弯矩和剪力的作用发生变形,即

$$\begin{cases} M_x(x, y) = \int_0^h \sigma_x(x, y, z)zdz \\ M_{yx}(x, y) = \int_0^h \tau_{yx}(x, y, z)zdz \\ M_{xy}(x, y) = \int_0^h \tau_{xy}(x, y, z)zdz \\ M_y(x, y) = \int_0^h \sigma_y(x, y, z)zdz \\ F_x(x, y) = \int_0^h \tau_{xz}(x, y, z)zdz \\ F_y(x, y) = \int_0^h \tau_{yz}(x, y, z)zdz \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $M_y$ 、 $M_{yx}$ 、 $M_{xy}$ 、 $M_x$  表示不平衡的初始残余应力形成的弯矩;  $F_y$ 、 $F_x$  表示不平衡的初始残余应力形成的剪力;  $\sigma_x(x, y, z)$ 、 $\sigma_y(x, y, z)$  分别表示材料内部  $x$  向残余应力和  $y$  向残余应力;  $\tau_{yx}(x, y, z)$ 、 $\tau_{xy}(x, y, z)$ 、 $\tau_{yz}(x, y, z)$  分别表示材料内部3个方向的切应力;  $z$  表示厚度方向坐标;

$h$  表示材料厚度。在加工过程中,随着零件材料的去除,零件内部残余应力会发生重平衡,由于夹具的限制,夹具的装夹力与残余应力平衡,装夹力发生变化,将由残余应力引起的装夹力变化值记作变形力(变形力是与零件残余应力场相关的物理量,可以通过在夹具中布置力传感器监测零件变形)。

工件内部不平衡残余应力的等效外载荷为

$$q(x, y) = \frac{\partial^2 M_y}{\partial^2 y} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_x}{\partial^2 x} \quad (2)$$

式中,  $q(x, y)$  为等效外载荷。当变形受到约束时,等效外载荷作用在装夹点上产生变形力,因此等效外载荷等于变形力  $q(x, y)$ , 即

$$q(x, y) = \frac{\partial^2 \int_0^h \sigma_y(x, y, z)zdz}{\partial^2 y} + 2 \frac{\partial^2 \int_0^h \tau_{xy}(x, y, z)zdz}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \int_0^h \sigma_x(x, y, z)zdz}{\partial^2 x} \quad (3)$$

基于变形力可以根据反问题求解方法求解零件残余应力场,基本流程如下:根据残余应力场在线推断方法,在保证不影响零件最终尺寸

的条件下,根据加工余量设计加工区域,用于重构残余应力场,之后在仿真环境下建立变形力与残余应力之间的求解矩阵  $K$ ,在实际加工过程中,采集加工过程中产生的变形力数据  $F$ ,最后通过变形力数据  $F$  与求解矩阵  $K$  重构毛坯的残余应力场  $\sigma$ ,流程如图3所示。

$$\sigma = K \cdot F \quad (4)$$

## 2 试验过程与讨论

以某传扭转接盘为研究对象,材料为 7475-T7351 铝合金,弹性模量与泊松比分别为 71.7 GPa 和 0.33,零件长约 560 mm,宽约 400 mm,最大厚度约 15 mm,最薄厚度约 4.5 mm,其几何形状如图4所示。

本文将加工过程划分为重构残余应力场、粗加工、精加工3个阶段,如图5所示,首先在重构残余应力场阶段,基于变形力重构当前毛坯全局残余应力场,进而结合 ABAQUS 有限元软件迭代优化,确定零件在毛坯中所处的最佳加工位置,实现粗加工过程中的余量分配,同时结合浮动装夹自适应加工方法<sup>[25]</sup>,在粗加工过程中控制零件产生的加工变形。在精加工阶段,零件将被装夹在工作台上完成剩余的加工步骤,得到最终的零件。

### 2.1 重构残余应力场

根据毛坯尺寸与零件尺寸设计

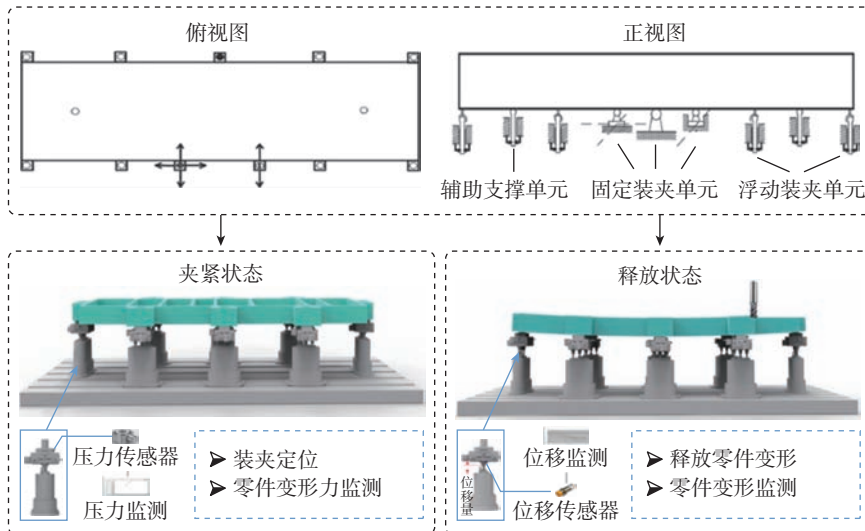
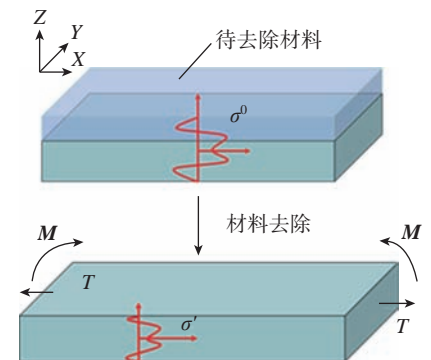


图1 浮动装夹自适应加工原理

Fig.1 Floating fixture adaptive processing principle



注:  $M$  为弯矩;  $T$  为合力;  $\sigma_0$  为毛坯中自相平衡的初始残余应力;  $\sigma'$  为材料去除后毛坯中的残余应力。

图2 加工变形机理

Fig.2 Mechanism of machining deformation

出用于重构残余应力场的零件,如图6所示,该零件留有充足余量,可以包络住最终所需的零件,不影响最终零件加工。

首先在仿真环境下建立变形力与残余应力之间的求解矩阵  $K$  ( $50 \times 200$ ),在实际加工过程中,采集加工过程中产生的变形力数据,采集数据的设备采用浮动夹具,该装备具有数据采集(加工过程中采集的变形力数据如表1所示)、自适应装夹等多种功能,变形力监测布置如图7所示。将变形力数据表示为  $200 \times 1$  的矩阵,基于残余应力层分布假设(毛坯每层的残余应力分布一致),通过变形力数据与求解矩阵重构毛坯的残余应力场(式(4)),零件全局残余应力场的重构结果如图8所示。

### 2.2 粗加工过程

该传扭转接盘在厚度方向上,毛坯尺寸约是零件尺寸的1.6倍,因此可通过优化零件在毛坯中的位置,实现对零件加工变形的控制。基于重

构得到的残余应力数据,在ABAQUS仿真环境下进行变形仿真,根据零件在厚度方向的加工余量,以一定划分精度对零件进行网格划分,共得到11个加工位置,如图9所示。通过比较不同加工位置的加工变形大小,选择变形最小的加工余量分配策略,从仿真结果可以看出,当加工位置选择7mm时,即零件上层分配7mm加工余量时,加工变形最小(图9(h))。

同时为进一步减小变形,在加工过程中还使用了浮动装夹自适应加工方法,将整个粗加工过程划分成若干个阶段,根据加工位置优化该零件为上层余量为7mm,下层加工余量为3mm,而精加工余量设置为2mm,即在粗加工阶段上层加工5mm,下层加工1mm,粗加工阶段采用层加工工艺,每次向下加工1mm,每加工完1mm,打开浮动装夹,零件释放变形,再重新自适应装夹,在反复的释放变形过程中,减小零件产生的加工变形,加工现场如图10(a)所示。

### 2.3 精加工过程

精加工是零件加工的最后一道工艺,对保证最终零件的加工质量至关重要。为保证精加工精度,零件需要以工作台为基准平面进行加工,同时零件的定位基准也应在粗加工结

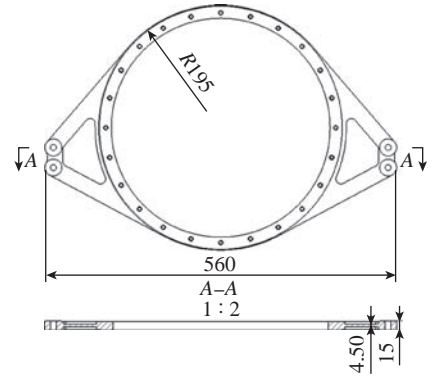


图4 零件几何形状(mm)  
Fig.4 Geometry of part (mm)

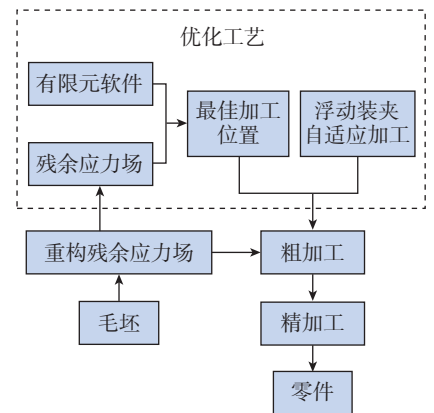


图5 某传扭转接盘加工过程  
Fig.5 Machining process of transmission reverse disc

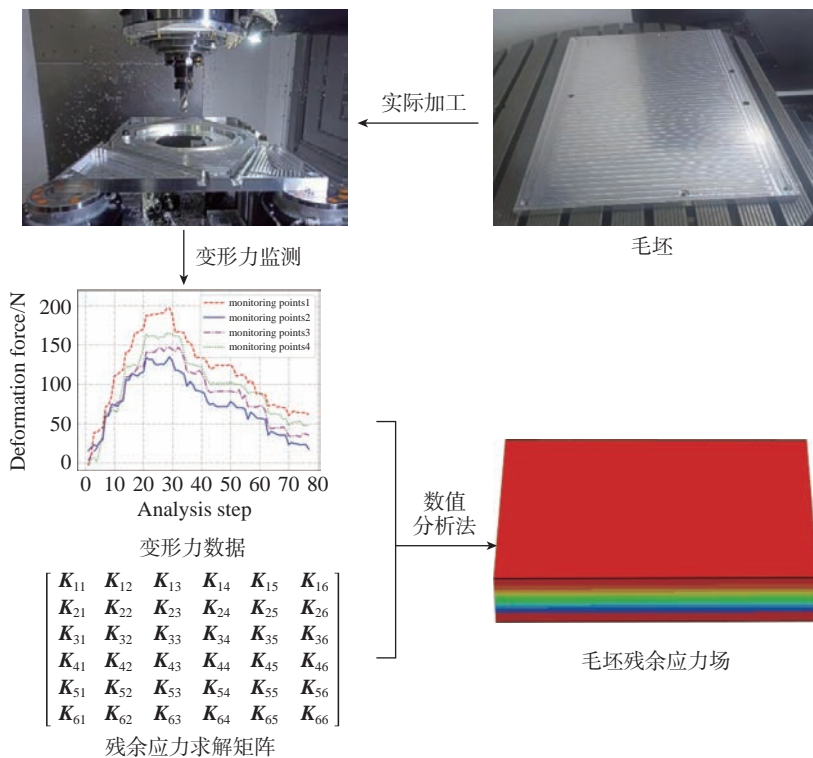


图3 重构当前毛坯全局残余应力场流程图

Fig.3 Flow chart of reconstructing the global residual stress field of the current blank

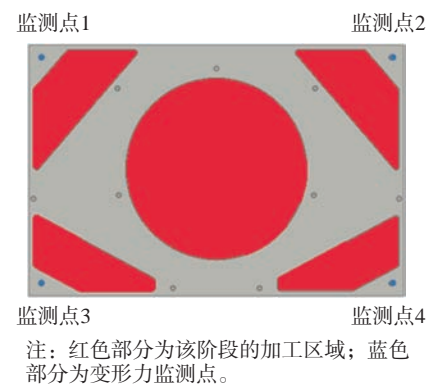


图6 用于重构残余应力场的零件

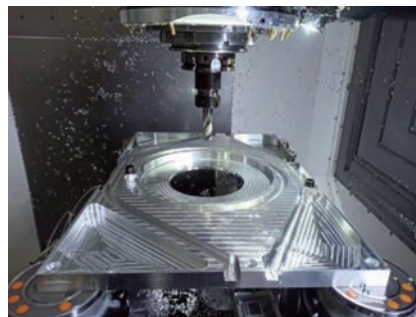
Fig.6 Parts used to reconstruct residual stress fields

表 1 变形力数据

Table 1 Deformation force data

N

序号	监测点 1	监测点 2	监测点 3	监测点 4
1	-12.897	10.633	-4.949	3.273
2	-11.995	-13.691	-5.851	4.312
3	-19.786	-14.71	-17.983	10.858
4	-19.335	-15.151	-13.181	-25.137
5	-40.631	-31.762	-40.915	-34.359
6	-8.389	6.125	-1.048	0.745
7	-4.341	-10.349	-1.646	0.598
8	-6.889	-8.741	-10.799	5.361
9	-5.988	-8.594	-3.302	-19.345
10	10.643	3.499	10.496	5.057
11	-8.997	10.339	-2.401	1.343
12	-4.655	-3.646	-1.95	0.598
13	-8.85	-1.313	-11.093	6.39
14	-6.9	-1.313	-2.244	-16.807
15	3.145	8.888	6.302	4.459
16	-8.693	6.419	-3.156	1.333
17	-2.392	-7.135	-4.204	0.294
18	-7.948	-6.557	-11.398	2.675
19	-5.694	-4.518	-2.401	-12.936
20	-6.9	-3.783	-7.497	-1.627
21	-6.752	6.556	-3.156	1.49
22	-4.949	-2.038	-2.852	-0.147
23	-7.193	-0.578	-15.298	-2.528
24	-9.447	-2.038	-12.75	1.343
25	-6.145	0.441	-9.301	8.624
26	-5.243	4.371	0.147	0.891
27	-6.596	2.773	-0.157	-0.451
28	-6.439	5.243	-3.45	-1.196
29	-5.694	9.477	2.244	6.399
30	-10.339	15.739	8.839	10.564
31	-1.059	-4.802	1.793	-0.597
32	-4.802	1.019	1.95	-2.077
33	-1.5	2.774	9.29	-12.054
34	-0.902	3.352	6.448	-4.165
35	-5.851	2.627	3.292	-1.342
36	16.935	-8.291	4.949	0.735
37	12.593	7.291	4.802	0.441
38	16.337	10.054	26.225	-10.721
39	17.689	10.936	23.226	11.603
40	10.643	6.125	17.395	7.879



(a) 加工现场



(b) 浮动夹具

图 7 重构残余应力场

Fig.7 Reconstruct residual stress field

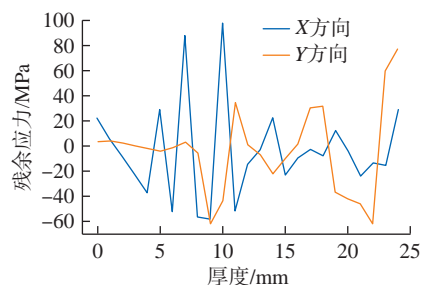


图 8 毛坯全局残余应力重构结果

Fig.8 Results of global residual stress reconstruction of blank

束后重修一次,保证零件在工作台上准确定位装夹,装夹布局如图 10 (b) 所示,之后按照要求精铣外形,得到最终零件。最后测量零件的加工变形量,测量现场如图 10 (c) 所示,根据设计要求,需要满足两个精度指标:基准 A 的平面度小于 0.15 mm;基准 D 对基准 A 的平行度小于 0.12 mm。基准 A 与基准 D 的位置如图 11 所示,零件最终的加工精度:基准 A 平面度为 0.11 mm;基准 D 对基准 A 平行度为 0.04 mm。

根据零件以往的加工情况,主要采用固定装夹加工工艺方法,通过粗加工过程中正反两面反复修整基准

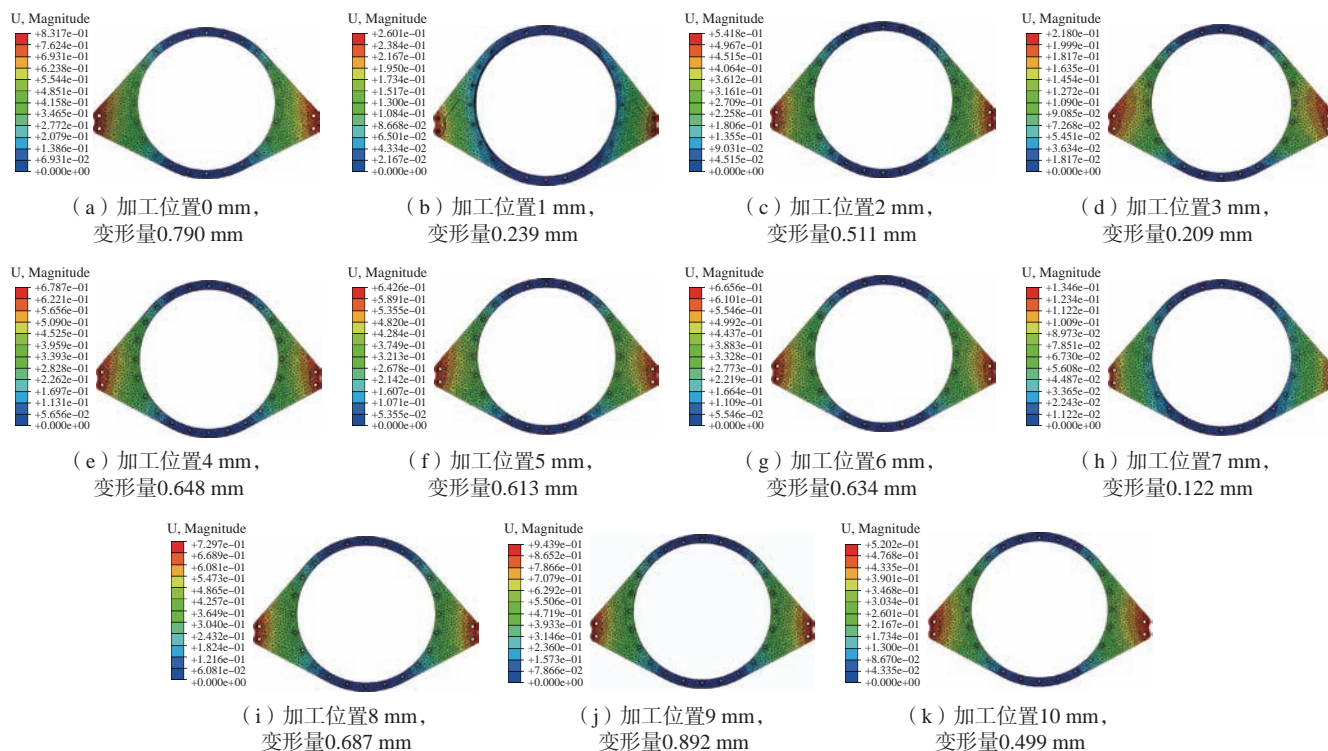


图9 不同加工余量分配策略的加工变形仿真

Fig.9 Simulation of machining deformation with different machining allowance allocation strategies

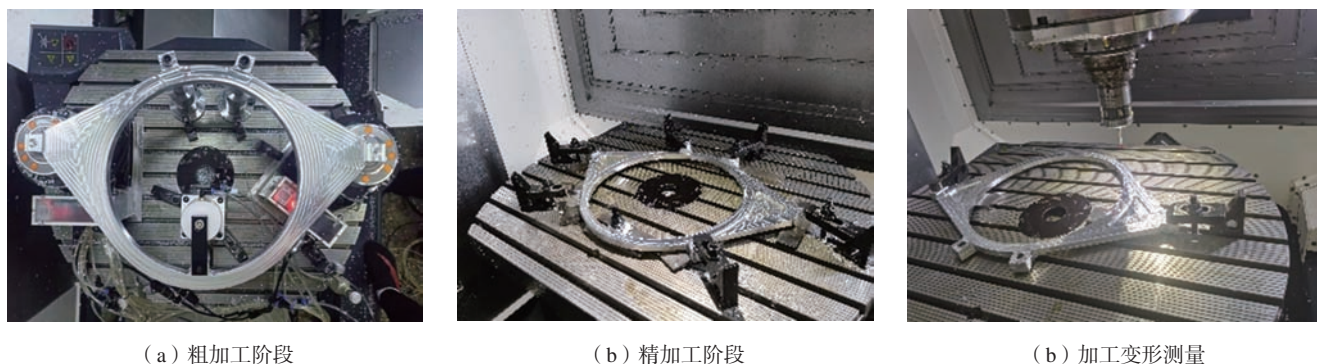


图10 零件加工

Fig.10 Parts manufacturing

去除余量进行零件变形控制,所能达到的加工变形控制精度:基准A的平面度为0.2 mm;基准D对基准A的平行度为0.2 mm。本文提出的加工变形控制方法,通过残余应力重构优化了零件在毛坯中所处的位置,本质上通过平均水平更低的残余应力保证了零件的整体变形控制水平;所采用的浮动装夹自适应加工方法在保证加工基准的基础上,通过释放并消除变形的的方法,进一步提高了变形控制精度。可以看出,

本文方法较以往的加工方法取得了更好的变形控制效果,并满足了零件的加工精度要求。

#### 2.4 讨论

本文针对航空薄壁件加工变形问题,以某传扭转接盘作为研究对象,采用上述基于变形力的残余应力重构法对当前加工零件的初始残余应力场进行推断,进而结合浮动装夹加工工艺实时调整优化加工变形控制策略,将由不确定性因素导致的加工变形精确预测难题转化为基于变

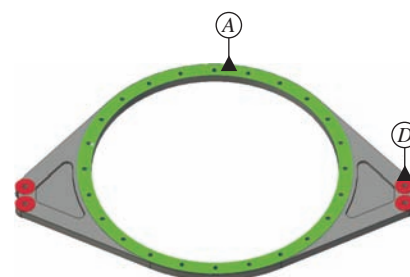


图11 基准A与基准D位置示意图

Fig.11 Schematic diagram of position of base A and base D

形力监测数据等确定性因素的问题求解,实现变形的有效控制,但本文

方法仍有两点需要注意。

(1) 本文方法中,残余应力场重构阶段中的求解矩阵  $K$  通过仿真环境获得,仿真环境中的设置应尽量接近实际环境,以确保所重构的残余应力可有效指导零件的加工变形控制。

(2) 复杂的加工环境给变形力的精确测量带来了挑战,极易导致变形力的测量产生较大的误差。潜在的解决方法包括在残余应力场重构中引入正则化项,提升残余应力场重构的准确性,这也是本文后续的研究内容。

### 3 结论

本文针对航空薄壁板类零件的加工变形问题展开研究,并通过对其传扭转接盘的工艺研究与实际加工,得出两点结论。

(1) 基于监测变形力数据,采用最新的重构毛坯全局残余应力场方法,在线求解了当前零件毛坯的残余应力场。该方法为毛坯全局残余应力的获取提供了新思路,可有效结合多种加工变形控制方法,指导零件的加工变形控制。本文分析了加工位置对加工变形的影响,根据重构的残余应力场,结合仿真软件得到不同加工位置的加工变形情况,进而确定了最优加工位置,控制了加工变形,将由不确定性因素导致的加工变形精确预测难题转化为基于变形力监测数据等确定性因素的问题求解,最终零件基准  $A$  的平面度为  $0.11\text{ mm}$ ,基准  $D$  对基准  $A$  平行度为  $0.04\text{ mm}$ ,满足加工精度要求。

(2) 通过使用浮动装夹自适应加工工艺,在切削加工的间隙监测零件的加工变形力,在保证定位基准的前提下松开装夹,释放工件的加工变形,并自适应调整装夹后夹紧工件,通过进一步的加工消除工件变形。本文将该方法应用于传扭转接盘的加工变形控制,得到了良好的加工变形控制效果。此外,该

方法同样可应用于其他结构零件的加工变形控制,如航空发动机盖板、结构件等。

### 参考文献

[1] 史昊天,张东风,杨俊学,等.航空铝合金薄壁件批量加工工艺探究[J].北华航天工业学院学报,2021,31(3):11-13.

SHI Haotian, ZHANG Dongfeng, YANG Junxue, et al. Batch processing technology for thin-walled parts of aviation aluminum alloy[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2021, 31(3): 11-13.

[2] 巫成.航空铝合金铣削仿真及薄壁框件加工变形的研究[D].兰州:兰州理工大学,2021.

WU Cheng. Research on milling simulation of aviation aluminum alloy and machining deformation of thin-walled frame parts[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.

[3] 关智洪.面向航空薄壁件的铣削加工动态特性仿真与实验分析[D].沈阳:东北大学,2019.

GUAN Zhihong. Simulation and experimental analysis of dynamic characteristics in milling process for aeronautical thin-wall parts[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.

[4] 王志厚.薄壁零件加工中防止变形的措施[J].宝成技术,1991(2):20-37,8.

WANG Zhihou. Measures to prevent deformation in machining thin wall parts[J]. Baocheng Technology, 1991(2): 20-37, 8.

[5] 林勇,罗育果,汤立民.航空薄壁弧形框加工变形控制方法研究[J].机械设计与制造,2012(2):107-109.

LIN Yong, LUO Yuguo, TANG Limin. Research on machining deformation control methodology for thin-wall arc shaped frame[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(2): 107-109.

[6] WANG Z J, CHEN W Y, ZHANG Y D, et al. Study on the machining distortion of thin-walled part caused by redistribution of residual stress[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(2): 175-179.

[7] CERUTTI X, ARSENE S, MOCELLIN K. Prediction of machining quality due to the initial residual stress redistribution of aerospace structural parts made of low-density aluminium alloy rolled plates[J]. International

Journal of Material Forming, 2016, 9(5): 677-690.

[8] ABDULLAH R. Hybrid deflection prediction for machining thin-wall titanium alloy aerospace component[D]. Melbourne: RMIT University, 2011.

[9] 林锋,姚婉,秦国华,等.飞机整体结构件加工变形的初始残余应力-初始几何误差耦合影响与控制[J].兵工学报,2021,42(12):2731-2742.

LIN Feng, YAO Wan, QIN Guohua, et al. Coupling effect of initial residual stress-initial geometric error on machining deformations of aeronautical monolithic components and its control[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(12): 2731-2742.

[10] 孙启梦,李蓓智,周亚勤,等.极大径厚比薄壁件的加工变形仿真与试验研究[J].东华大学学报(自然科学版),2022,48(1):85-92.

SUN Qimeng, LI Beizhi, ZHOU Yaqin, et al. Simulation and experimental research on machining deformation of thin-walled parts with large diameter to thickness ratio[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2022, 48(1): 85-92.

[11] 张春燕,许丰,程德俊,等.薄壁件加工变形仿真及工艺参数优选[J].组合机床与自动化加工技术,2020(6):154-158.

ZHANG Chunyan, XU Feng, CHENG Dejun, et al. Simulation of machining deformation and optimization of process parameters for thin-walled parts[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(6): 154-158.

[12] MAXWELL A S, TURNBULL A. Measurement of residual stress in engineering plastics using the hole-drilling technique[J]. Polymer Testing, 2003, 22(2): 231-233.

[13] 张鹏飞.国产铝合金构件横截面残余应力分布研究——6061-T6焊接成型箱型截面[D].西安:西安工业大学,2021.

ZHANG Pengfei. Research on residual stress distribution of cross section of domestic aluminum alloy components—6061-T6 box-section[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.

[14] BENDEK E, LIRA I, FRANÇOIS M, et al. Uncertainty of residual stresses measurement by layer removal[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48(12): 1429-1438.

[15] 杜吉星,杨吟飞,朱金鹏,等.面向应力剥层测量的铝合金电解工艺研究[J].

工具技术, 2019, 53(7): 50–55.

DU Jixing, YANG Yinfei, ZHU Jinpeng, et al. Research on aluminum alloy electrolysis process for stress stripping measurement[J]. Tool Engineering, 2019, 53(7): 50–55.

[16] CHEN X, YAN J, KARLSSON A M. On the determination of residual stress and mechanical properties by indentation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 416(1–2): 139–149.

[17] 卜家贺, 冯露, 张静. 残余应力及尺寸效应对纳米压痕力学性能的影响研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(6): 2325–2331, 2690.

BU Jiahe, FENG Lu, ZHANG Jing. Effect of residual stress and size effect on the mechanical properties of nanoindentation[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(6): 2325–2331, 2690.

[18] KIRCHLECHNER C, MARTINSCHITZ K J, DANIEL R, et al. X-ray diffraction analysis of three-dimensional residual stress fields reveals origins of thermal fatigue in

uncoated and coated steel[J]. Scripta Materialia, 2010, 62(10): 774–777.

[19] 方杰, 陈平, 高攀, 等. 2024 铝合金喷丸残余应力松弛规律研究[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 808–812.

FANG Jie, CHEN Ping, GAO Pan, et al. Relaxation rule for shot peening residual stress of 2024 aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 808–812.

[20] JAVADI Y, AKHLAGHI M, NAJAFABADI M A. Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates[J]. Materials & Design, 2013, 45: 628–642.

[21] 王晓, 李国爱, 王亮, 等. 淬火水温对铝合金残余应力影响规律的超声表征[J]. 有色金属工程, 2021, 11(12): 1–7.

WANG Xiao, LI Guoai, WANG Liang, et al. Ultrasonic evaluation of effect of temperature of quenching water on residual stress of aluminum alloy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021,

11(12): 1–7.

[22] JIANG W C, WOO W, AN G B, et al. Neutron diffraction and finite element modeling to study the weld residual stress relaxation induced by cutting[J]. Materials & Design, 2013, 51: 415–420.

[23] 王宇, 耿长建, 由宝财, 等. 基于中子衍射技术的涡轮后机匣内部残余应力评估[J]. 航空发动机, 2022, 48(3): 116–120.

WANG Yu, GENG Changjian, YOU Baocai, et al. Assessment of interior residual stress of turbine rear casing based on neutron diffraction technology[J]. Aeroengine, 2022, 48(3): 116–120.

[24] ZHAO Z W, LIU C Q, LI Y G, et al. A new method for inferencing and representing a workpiece residual stress field using monitored deformation force data[J]. Engineering, 2022.

[25] LI Y G, LIU C Q, HAO X Z, et al. Responsive fixture design using dynamic product inspection and monitoring technologies for the precision machining of large-scale aerospace parts[J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 173–176.

## Research on Deformation Control Technology for Thin-Walled Parts Based on Responsive Fixture Adaptive Machining Process

LIU Shuming, HU Boqin, ZHANG Chunlong, LUO Zhaozhu

(AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin 150066, China)

**[ABSTRACT]** Aeronautical thin-walled parts are characterised by large dimensions, thin walls and high material removal rates, which is highly susceptible to machining deformation problems. Machining deformation seriously affects the quality of the parts machined, therefore, the machining deformation control of aviation thin-walled parts is of great importance. In this paper, a transmission reverse disc is used as the object of study, to optimise the machining position of the part by reconstructing the global residual stress distribution of the blank based on the monitored deformation forces during the machining process, at the same time, combined with the responsive fixture adaptive machining process, which enable effective control of the machining deformation of the part. The actual machining tests control the flatness and parallelism of the part to 0.11 mm and 0.04 mm respectively. The results show that the method can significantly control the machining deformation of the part.

**Keywords:** Thin-walled parts; Deformation control; Residual stress; Responsive fixture; Deformation force

(责编 七七)

引文格式: 于忠光, 浦荣, 韩占龙, 等. PVD 涂层刀具铣削 GH4169 高温合金薄壁件性能对比[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 78-84.  
 YU Zhongguang, PU Rong, HAN Zhanlong, et al. Performance comparison of PVD coated cutting tools in milling of GH4169 superalloy thin-walled workpiece[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 78-84.

# PVD 涂层刀具铣削 GH4169 高温合金薄壁件性能对比

于忠光, 浦 荣, 韩占龙, 于浩南, 陈章燕  
 (国宏工具系统(无锡)股份有限公司, 无锡 214101)

[摘要] 为解决高温合金薄壁件加工时颤振大和磨损大的问题, 研究了不同成分体系涂层对铣削刀具的影响。采用电弧离子镀的方法在硬质合金刀具表面沉积了 AlTiN/TiAlN、AlCrN/TiAlN 和 TiSiN/TiAlN 3 种双层涂层。采用扫描电子显微镜、纳米压痕仪与微米划痕仪表征了 3 种涂层的表面形貌与力学性能, 在高性能铣床进行了涂层刀具的铣削试验, 采集了刀具后刀面磨损照片与对应切削力, 分析了不同涂层在铣削时的性能表现。研究表明, TiSiN/TiAlN 涂层具有最高的硬度与耐磨因子, 在铣削 24 m 后, 后刀面磨损最小, 但涂层表层易与高温合金发生黏结; AlCrN/TiAlN 涂层硬度与耐磨因子稍低, 铣削 24 m 后, 刀具接近失效, 但与高温合金黏结并不严重; AlTiN/TiAlN 涂层硬度与耐磨因子最小, 铣削后磨损最严重, 铣削 12 m 时刀具已经失效, 但涂层与高温合金黏结最为轻微。因此, 使用硬度与耐磨因子较大的涂层能够有效减小刀具铣削高温合金时的磨损, 进而提高刀具寿命。

关键词: 高温合金; 铣削; 涂层; 磨损; 切削力; 薄壁件

## Performance Comparison of PVD Coated Cutting Tools in Milling of GH4169 Superalloy Thin-Walled Workpiece

YU Zhongguang, PU Rong, HAN Zhanlong, YU Haonan, CHEN Zhangyan  
 (Guohong Tools System (Wuxi) Co., Ltd., Wuxi 214101, China)

[ABSTRACT] To solve the problem of high vibration and severe wear when milling superalloy thin-walled workpiece, the influence of different coating systems on milling tools was studied. AlTiN/TiAlN, AlCrN/TiAlN and TiSiN/TiAlN double-layer coatings were deposited on the carbide tools by arc ion plating. The morphology and mechanical properties of three coatings were characterized by scanning electron microscope, nano indentation instrument and micron scratch instrument. Milling tests of coated tools were carried out on a high-performance milling machine. The tool wear condition and cutting forces were collected, and the performance of different coatings during milling was analyzed. The results show that TiSiN/TiAlN coating has the highest hardness and wear resistance factor, and the wear of flank surface is the smallest after 24 m of milling, but the coating is easy to bond with the superalloy. Compared with TiSiN/TiAlN, the hardness and wear resistance factor of AlCrN/TiAlN coating are smaller, and the tool is close to failure after 24 m of milling, but the bond with superalloy is not so serious; AlTiN/TiAlN coating has the smallest hardness and wear resistance factor, and the most severe wear condition. The tool has failed after milling of 12 m, but the bond between the coating and the superalloy is the slightest. Therefore, coating with higher hardness and wear resistance factor can effectively reduce the wear of the tool when milling superalloys and prolong tool life.

Keywords: Superalloy; Milling; Coating; Wear; Cutting force; Thin-walled workpiece

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.078

高温合金是指能在高温下长期服役工作,是铁基、镍基以及钴基高温合金具有良好高温力学性能、化学稳定性与抗氧化性能的合金材料,其中镍基高温合金应用最为广泛。高温合金使用温度一般可以达到 600 °C,而镍基高温合金更是能达到 1000 °C 以上,出色的高温性能使其常被应用于航空、国防与核工业领域<sup>[1-2]</sup>。

高温合金加工的难点在于切削阻力大、切削温度和加工硬化严重。与传统加工材料相比,高温合金塑性变形抗力大,其切削力通常比钢大,但导热系数却只有钢的 1/3,因此切削时刀尖易产生高温,影响刀具高温强度<sup>[3-4]</sup>。除此之外,高温合金切削时加工硬化现象明显,表面硬化层的存在增大了崩刃的风险,这在端面铣时尤为明显。高温合金切削时刀具常见的失效方式包括黏结磨损、磨粒磨损、氧化磨损和扩散磨损。薄壁件因重量轻、结构利用率高等特点而被广泛用于航空航天、汽车工业与国防领域,但薄壁件在铣削加工时常会遇到表面质量差、加工精度低、工件变形大、残余应力大等问题,这是由于刀具在铣削薄壁件时,系统整体刚性低、阻尼弱,除了正常振动外还会造成不良颤振,严重影响刀具的加工稳定性<sup>[5-7]</sup>。薄壁件的颤振会导致刀具与被加工材料产生周期性的相互挤压,加剧刀具后刀面位置的黏结磨损与磨粒磨损,加速崩口的产生与刀具的失效<sup>[8]</sup>。因此,如何抑制刀具磨损的同时并减小颤振带来的影响是提高高温合金薄壁件切削寿命的关键。

涂层在高温合金切削时可以起到隔绝热量与减磨耐磨的效果,涂层刀具与未涂层刀具相比,具有明显的寿命提升,较为常见的高温合金切削用涂层有 AlCrN、TiAlN、TiSiN 和 TiAlSiN 等<sup>[9-11]</sup>。涂层中较高的铝含量能够有效提高其硬度与高温抗氧化能力。Ucun 等<sup>[12]</sup>在 K20 和 K50 硬质合金表面制备了 AlCrN、AlTiN、AlCrN/TiAlN 和 DLC 等涂层,并进行了不同涂层用于 Inconel 718 镍基高温合金的切削性能的对比,试验证明,所有涂层刀具均较裸刀有明显的性能提升,在涂层刀具中,AlCrN 涂层无论在低速还是高速下都表现出了较好的抗磨损能力,而 DLC 涂层则在抗黏结方面表现突出。Li 等<sup>[13]</sup>认为, TiAlSiN 涂层因较 TiAlN 具有更好的力学性能与耐热性能而更适合用于高温合金的切削,因此,采用磁控溅射 (HiPIMS) 技术制备了 5 种不同的 TiAlSiN 涂层,包括高硬单层结构、高结合力单层结构、双层结构、4 层结构和 8 层结构,并测试了在 60 m/min 线速度下加工 Inconel 718 时的涂层性能,结果表明,高硬单层结构与 8 层结构的涂层具有较好的切削表现。Reolon 等<sup>[14]</sup>采用阴极电弧沉积 (CAD) 与高功率脉冲 HiPIMS 两种工艺分别制备了 Al<sub>0.6</sub>Ti<sub>0.4</sub>N 涂层,两种涂层在化学成分上几乎一致,但通过 HiPIMS 工艺

制备的涂层具有更小的孔隙率、更高的抗塑性变形因子、更高的结合强度与更好的抗氧化性能,在对 Inconel 718 镍基高温合金的精加工测试中,HiPIMS 工艺制备的涂层刀具也有更长的切削寿命,本研究认为,这种整体性能上的提升来源于 HiPIMS 工艺下涂层在物理以及化学稳定性上的增强。除此之外,许多学者也提出了其他的适合高温合金切削用涂层,包括 AlCrSiN<sup>[15]</sup>、CrAlYN<sup>[16]</sup>、TiZrN<sup>[17]</sup> 和 TiAlN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[18]</sup> 等。

目前,高温合金切削用涂层的研究仍主要集中在涂层制备与理论分析上,实际应用于切削工具上的研究鲜有报道。本研究采用电弧离子镀工艺制备不同成分体系的 PVD 涂层,通过比较涂层刀具在不同阶段的磨损情况,分析研究涂层在铣削中的作用与影响,为 GH4169 高温合金薄壁件铣削用涂层的选择提供参考依据。

## 1 涂层刀具的制备

### 1.1 涂层刀具制备

采用电弧离子镀工艺在硬质合金基体上制备了 3 种双层涂层。涂覆设备为 Balzers Ingeina 涂层炉,所用靶材包含外层用靶 Ti<sub>0.33</sub>Al<sub>0.67</sub>、Ti<sub>0.80</sub>Si<sub>0.20</sub>、Al<sub>0.70</sub>Cr<sub>0.30</sub> 以及内层用靶 Ti<sub>0.50</sub>Al<sub>0.50</sub>。沉积温度为 550 °C,基体偏压为 -80 V,涂层炉内保持 3.5 × 10<sup>-4</sup> MPa 的氮气偏压,沉积时间 30~45 min,刀具绕大盘公转的同时自身保持自转以获得均匀的涂层厚度,3 种涂层厚度控制在 2 μm 左右。为保证涂层与基体具有良好的结合力,涂层前需经专用清洗剂超声漂洗,烘干备用。涂层前在高真空状态下进行离子刻蚀以获得活化表面,刻蚀电压 -800 V。为提高表面质量,涂层刀具冷却出炉后采用抛光后处理去除表面液滴及炉灰。

### 1.2 涂层表征

通过扫描电子显微镜 (Zeiss EVO18) 获得涂层截面形貌与涂层刀具铣削后表面磨损特征,并分析涂层失效机理;采用 X 射线能谱仪 (Bruker Xflash 6130) 分析涂层铣削前后元素组成分布;采用纳米压痕仪 (Bruker Hysitron TI Premier) 分析涂层硬度及弹性模量,最大载荷 8000 μN,压头选用 Berkovich 低载金刚石锥形头,每个涂层标块采集 8~10 个点,取平均值作为最终结果。

### 1.3 涂层刀具试切

铣削用刀具为自研四刃锥度球头铣刀,刀具刃径为 5.5 mm,球头部位前角角度为 0°、后角角度 13°、螺旋角 17°、刃口钝化值 10~20 μm。试验采用高性能加工中心 (Fanuc α-D14MiB) 进行镍基高温合金薄壁件平面铣削性能测试,具体铣削参数如表 1 所示。被加工材料为 GH4169 高温合金长方形薄板,薄板长 125 mm、宽 50 mm、厚 4 mm,其主要化学成分及力学性能参数如表 2 和

3所示。为了获得涂层刀具铣削状态,采用多通道测力仪收集刀具铣削时产生的力信号,并使用 Dynoware 软件对数据信号分析处理,并结合刀具后刀面磨损照片进行综合分析。为了保证试验结果的可靠性,整体铣削试验装置如图 1 所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层形貌与成分

AlTiN/TiAlN、AlCrN/TiAlN 与 TiSiN/TiAlN 3 种涂层的表面形貌如图 2 所示,3 种涂层厚度分别为 1.97  $\mu\text{m}$ 、1.88  $\mu\text{m}$  和 2.07  $\mu\text{m}$ ,涂层内部均匀致密,无孔隙缺陷,且均与基体间具有良好的结合,界面位置无裂纹。

表 1 铣削参数  
Table 1 Cutting parameters

切深/ mm	切宽/ mm	主轴转 速/( $\text{r} \cdot$ $\text{min}^{-1}$ )	进给/ ( $\text{mm} \cdot$ $\text{min}^{-1}$ )	加工 面倾角/ ( $^\circ$ )	刀轴 摆角/ ( $^\circ$ )	冷却 方式
0.5	0.3	2500	800	15	0	6% 乳化液

表 2 GH4169 高温合金物理性能  
Table 2 Physical properties of GH4169 superalloy

熔点/ $^\circ\text{C}$	硬度 (HRC)	弹性模量/ GPa	剪切模量/ GPa	抗拉强度/ MPa
1260~1320	40.5	199.9	77.2	965

表 3 GH4169 高温合金化学成分(质量分数)  
Table 3 Chemical composition of GH4169 superalloy  
(mass fraction) %

Ni	Cr	Mo	Nb	Fe
54.1	18.3	2.7	4.8	20.1

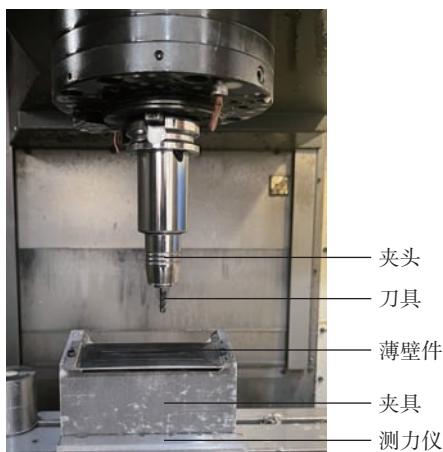


图 1 铣削试验装置

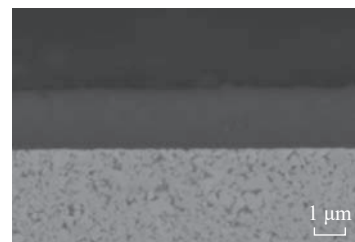
Fig.1 Experimental setup for milling

对 3 种涂层表面进行了 EDX 分析,涂层外层成分分别为  $\text{Al}_{0.63}\text{Ti}_{0.37}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.67}\text{Cr}_{0.33}\text{N}$  与  $\text{Ti}_{0.85}\text{Si}_{0.15}\text{N}$ ,为便于表示,取涂层中金属元素原子比作为涂层的名义成分。由于外层涂层厚度足够大,在该测试条件下探测深度小于 1.5  $\mu\text{m}$ ,因此内层 TiAlN 涂层并不会影响外层成分分析结果。结果表明,3 种涂层外层中成分均与所用靶材成分相近,但 Ti 原子所占比例在 AlTiN/TiAlN 和 TiSiN/TiAlN 涂层中均略高于靶材中对应金属原子比,而 Cr 原子所占比例在 AlCrN/TiAlN 涂层中也略高于靶材中对应金属原子比,这是由于原子离化率不同所造成的, Ti 与 Cr 的平均电荷数与离化率都较 Si 与 Al 大很多,因此数量更多、能量更大的 Ti 离子与 Cr 离子能够到达刀具表面<sup>[19]</sup>。

### 2.2 涂层力学性能

涂层的硬度  $H$ 、弹性模量  $E$ 、 $H/E$  和膜破力是衡量涂层切削性能的重要力学参数,通过测试分析这些参数可以获得涂层的耐磨性能以及结合力性能,并以此作为涂层综合切削性能的评判依据<sup>[20]</sup>。

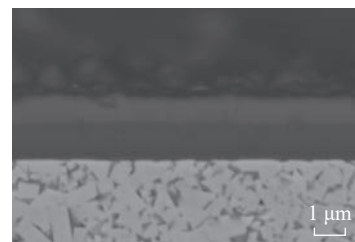
通过纳米压痕仪测得了 3 种涂层的硬度以及弹性模量,并计算得到了耐磨因子参数  $H/E$ ,如图 3 所示。



(a) AlTiN/TiAlN



(b) AlCrN/TiAlN



(c) TiSiN/TiAlN

图 2 涂层截面 SEM 形貌

Fig.2 SEM morphology of coatings

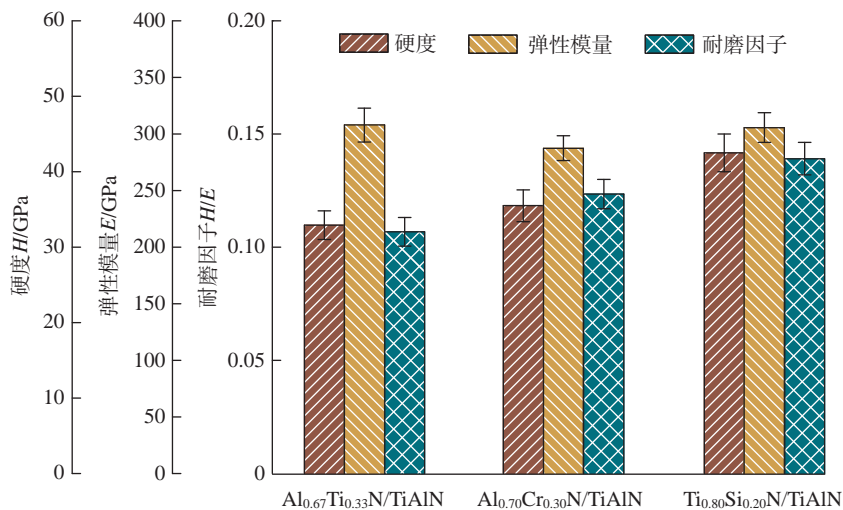


图3 涂层硬度、弹性模量与耐磨因子的对比

Fig.3 Hardness, elastic modulus and wear resistance factor of coatings

$\text{AlTiN}/\text{TiAlN}$ 、 $\text{AlCrN}/\text{TiAlN}$  和  $\text{TiSiN}/\text{TiAlN}$  3种涂层硬度分别为 32.9 GPa、35.5 GPa 和 42.5 GPa；弹性模量分别为 307.9 GPa、287.4 GPa 和 305.7 GPa。上述3种涂层中， $\text{TiSiN}/\text{TiAlN}$  涂层表现出了最高的纳米硬度与较小的弹性模量，这也使得其拥有最大的耐磨因子， $H/E$  达到了 0.139。 $\text{AlTiN}/\text{TiAlN}$  涂层拥有最低的纳米硬度与耐磨因子  $H/E$ ， $H/E$  仅为 0.107。而  $\text{AlCrN}/\text{TiAlN}$  涂层的纳米硬度与耐磨因子则介于前两者之间， $H/E$  为 0.124。 $\text{TiSiN}/\text{TiAlN}$  涂层之所以能够拥有较高的硬度与较低的弹性模量与其特殊的内部结构有关，过量的 Si 原子在涂层中形成了非晶态的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  相，这些非晶相能够在 TiN 晶粒周围包裹并形成连续的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜，抑制晶粒长大的同时也阻碍了晶粒内位错的运动<sup>[21]</sup>。而连续的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  非晶相又为涂层提供了良好的弹性变形能力，在受到变形时能通过弹性变形吸收较多的载荷而不发生断裂。因此，这种高硬度、低弹性模量的特征使得  $\text{TiSiN}/\text{TiAlN}$  涂层在理论上具有了较好的耐磨性。

### 2.3 刀具磨损分析

试验收集了  $\text{AlTiN}/\text{TiAlN}$ 、 $\text{AlCrN}/\text{TiAlN}$  和  $\text{TiSiN}/\text{TiAlN}$  3种涂层刀具在铣削 GH4169 高温合金时不同时间状态下的磨损状况与切削力信号。在加工 4 m、8 m、12 m、16 m、20 m 以及 24 m 后，分别采集了刀具后刀面的磨损照片，测量了磨损宽度，并绘制了刀具后刀面磨损曲线。依据刀具实际铣削寿命，将后刀面最大磨损宽度  $\text{VB}=0.2\text{ mm}$  作为刀具失效判定标准。在实际铣削中， $\text{VB}$  在小于 0.2 mm 时，刀具刃口一般为均匀磨损，能观察到逐渐磨钝的过程； $\text{VB}$  大于 0.2 mm 时，刀具刃口稳定性急剧下降，开始出现崩口形式磨损。

如图4所示，3种涂层中磨损最小的是  $\text{TiSiN}/\text{TiAlN}$

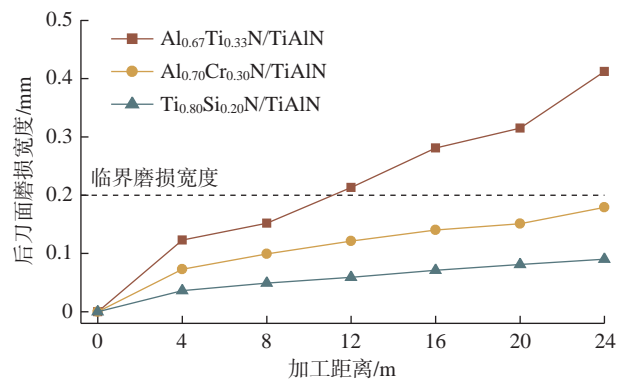


图4 3种涂层刀具后刀面磨损曲线

Fig.4 Wear curves of three coated tools

涂层，磨损最大的是  $\text{AlTiN}/\text{TiAlN}$  涂层，而  $\text{AlCrN}/\text{TiAlN}$  则介于两者之间。 $\text{AlTiN}/\text{TiAlN}$  涂层刀具在铣削 4 m 后处于稳定磨损阶段，在铣削 8 m 后开始进入快速磨损阶段，刃口处已经可以观察到较大的磨损甚至是崩口，这些不规则的崩口会改变切屑的形状与排屑路径，高温高速的切屑会沿着崩口不断地与涂层下的硬质合金基体挤压、摩擦， $H/E$  加速崩口的扩张，在铣削 12 m 后已经超过了  $\text{VB}=0.2\text{ mm}$  的失效判定标准，随后便一直处于不稳定磨损状态；在铣削 24 m 后，甚至可以观察到崩口区贯穿了整个后刀面，该状态下继续铣削容易在加工面留下线纹，严重影响工件表面质量； $\text{AlCrN}/\text{TiAlN}$  涂层刀具在铣削 4 m 后，后刀面磨损以月牙状分布，月牙的宽度与长度随着铣削的进行不断变大，在铣削 16 m 后能观察到月牙区靠里侧出现密集的表层小崩口，这些崩口虽然远离刃口部位不会影响加工稳定性，但是一定程度上增大了刀具基体与被加工材料的接触面积与摩擦系数，增大铣削时的阻力，在铣削 24 m 后磨损宽度

达到了 0.18 mm, 刃口开始出现较大的崩口, 接近失效; TiSiN/TiAlN 涂层刀具后刀面磨损曲线最为平缓, 在 24 m 处磨损宽度为 0.09 mm 左右, 仅能观察到细长的月牙形磨钝特征, 后刀面亦无浅层崩口出现, 刀具仍处于稳定磨损阶段且具有较长的加工寿命。

图 5 为 3 种涂层刀具在铣削 24 m 后, 扫描电镜下的后刀面磨损形貌图。不同的相组成在背散射电子模式下具有不同的衬度, 通过这一特点可以清楚地分辨出涂层、基体以及黏屑的分布情况。图 5 (a) 为 AlTiN/TiAlN 涂层刀具铣削 24 m 的后刀面磨损形貌, 从中可以明显观察到三角状的基体磨损区与磨损区右侧的黏结区。黏结区主要是由加工时工件回弹造成的黏结磨损所造成, 靠近薄壁件固定端振动回弹较小, 远离固定端振动回弹较大。图 5 (a) 中的浅色相是涂层被黏起后漏出小块基体, 深色相是残留在基体表面的涂层, 而灰色相则是附着在基体表面的小块高温合金黏屑, 这种黏结磨损会破坏涂层的完整性, 加速三角状磨损区的向内扩张。对黏结区灰色相进行 EDS 点分析, 结果如图 6 所示, 灰色相除了涂层元素外, 主要成分为 Ni、Cr、Fe 与 O, 证明了在该区域存在黏结磨损与氧化磨损。磨损区主要由靠近刃口的磨钝区与构成平行于刀面的贝壳状崩口区。磨钝区是铣削时磨粒磨损造成的带状区域, 特征是存在垂直与刃口的梳状耕犁痕迹, 属于正

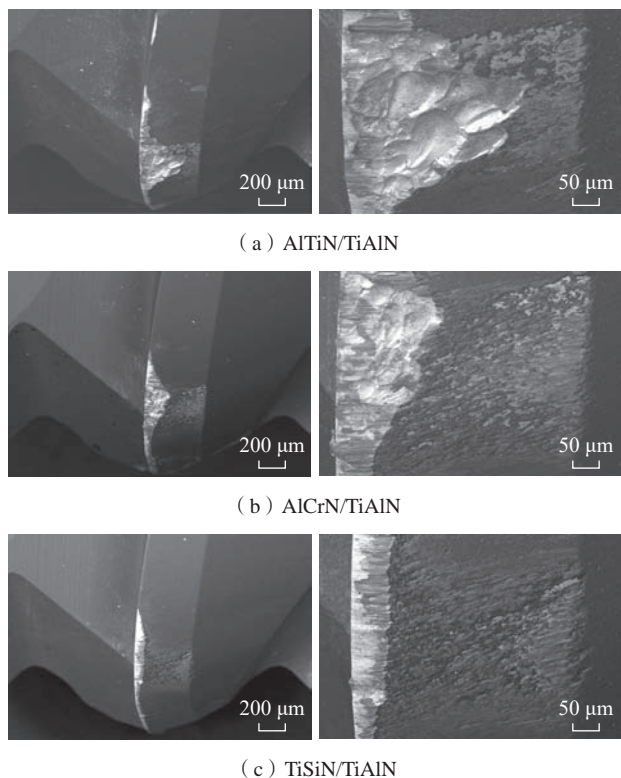


图 5 涂层刀具后刀面磨损形貌  
Fig.5 Flank wear of coated tools

常磨损。崩口区则是由铣削时平行于后刀面的剪切力较大所造成, 属于不正常磨损。在磨损区内部还存在大量的黏屑附着于基体表面, 这些黏屑会堆积在崩口的阶梯处, 加速基体磨损。图 5 (b) 为 AlCrN/TiAlN 涂层刀具铣削 24 m 的后刀面磨损形貌, 其磨损特征与 AlTiN/TiAlN 涂层类似, 但三角状磨损区面积要小得多, 且黏结区磨损较为轻微。从图 5 (b) 中还可以看到, 磨损区内部崩口的宽度、深度也要更小。图 5 (c) 为 TiSiN/TiAlN 涂层刀具铣削 24 m 的后刀面磨损形貌, 与前两种涂层刀具相比具有更小的基体磨损区与黏结区, 可以看出, 黏结区涂层缺失较少, 仅有部分 TiSiN 外层被粘走, 底层 TiAlN 层主体完整, 仍然对基体提供保护, 磨损区呈月牙状分布, 且内部无明显崩口存在, 刃口部位甚至能观察到清晰完整的涂层-基体阶梯面, 在裸露的基体表面存在少量的黏屑。

#### 2.4 刀具切削力分析

试验收集了 3 种涂层刀具的切削力信号, 并对力学信号进行了 FFT 处理, 得到了对应的切削力-时间图与振幅-频率图。在 3 个方向分力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  中, 进给方向分力  $F_y$  随加工时间变化不稳定, 而切深方向分力  $F_z$  则数值整体较小, 因此本研究选用数值较大且能明显判断出切削力上升的切宽方向分力  $F_x$  作为研究对象, 采集加工 24 m 时切削力信号对比分析涂层刀具状态, 结果如图 7 所示。

对比 3 种涂层刀具“切削力-时间”图可以发现, AlTiN/TiAlN 涂层刀具切削力振幅最大, 达到了 120 N 左右, 且波形较为复杂; AlCrN/TiAlN 涂层刀具切削力振幅较小, 为 100 N 左右, 但波形同样较为复杂; TiSiN/TiAlN 涂层刀具切削力振幅最小, 仅为 90 N 左右, 且波形较为整齐。

本研究试验主轴转速为 2500 r/min, 即 SF (主轴频率) 为 41.7 Hz, 2 阶主轴频率为 83.3 Hz, TPF (过齿频率) 为 166.6 Hz。因试验所用刀具为具有长短齿的四刃

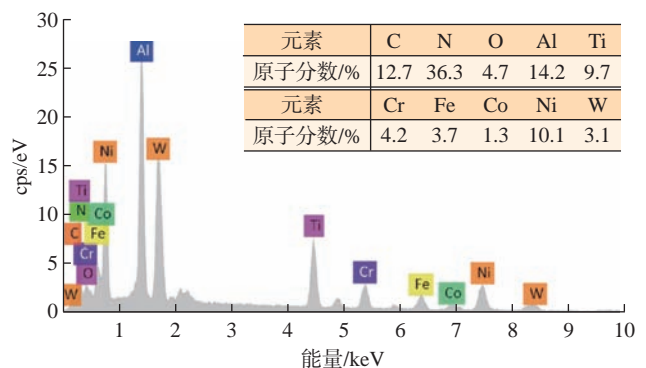


图 6 涂层刀具表面黏屑成分  
Fig.6 Composition of materia adhesion on surface of coated tool

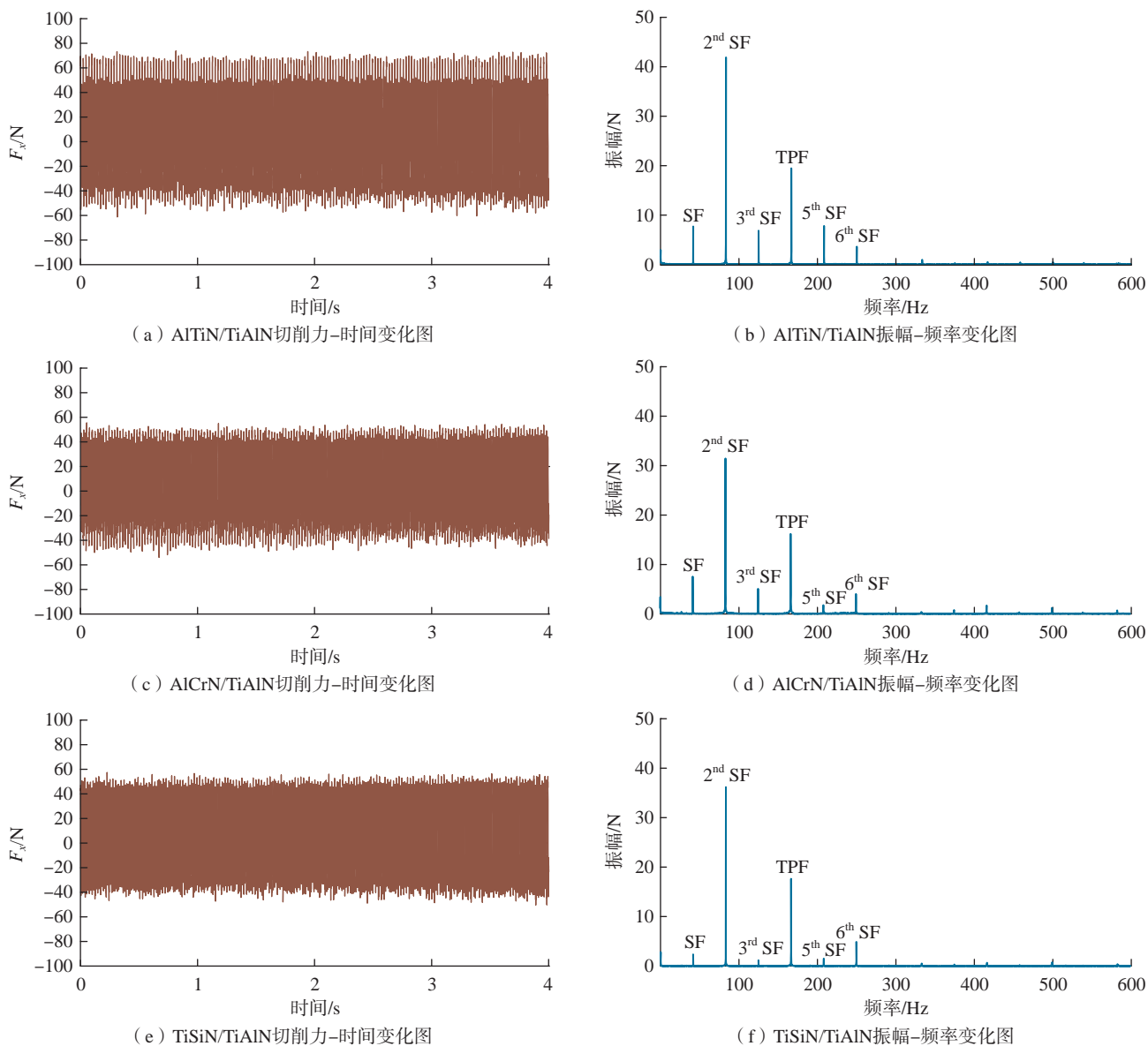


图7 涂层刀具切削力信号

Fig.7 Cutting force signal of coated tools

刀具,因此其过齿频率振幅会较2阶主轴频率稍小。结合对应位置的“振幅-频率”图(图7(b))后进一步发现,AlTiN/TiAlN涂层刀具除了在83.3 Hz和166.6 Hz处存在较大的振幅外,在41.7 Hz、125.0 Hz、208.3 Hz和250.0 Hz处也存在较为明显的振幅,频率分别为主轴频率的1阶、3阶、5阶和6阶谐波。其中3阶与5阶等奇数阶谐波是主轴频率有关的谐波,其振幅大小一定程度上能够反映刀具的磨损状态,各刃上的磨损越大越不均匀,所造成的奇数阶谐波就越明显,刀具加工时稳定性越差<sup>[22]</sup>。从图7(b)中可以看出,其奇数阶谐波振幅均较大,且5阶谐波振幅明显大于主轴频率振幅,这意味着刀具已经出现了较为严重的磨损;同样的情况在AlCrN/TiAlN涂层刀具上也可观察到(图7(d)),虽然图中各频

率整体振幅水平较低,但是奇数阶谐波相对明显,刀具可能已经存在少量磨损;TiSiN/TiAlN涂层刀具“振幅-频率”图(图7(f))中偶数阶谐波较为明显,虽然单个频率下振幅较AlCrN/TiAlN涂层刀具更大,但其奇数阶谐波非常小,表明刀具磨损可能较小,刀具铣削稳定性非常高。3种涂层刀具力学信号反应特征与前文中铣削24 m后刀具后刀面磨损形貌相匹配,进一步证实了3种涂层刀具的铣削性能差异。

### 3 结论

本文研究了涂层成分体系对铣削高温合金薄壁件的影响,制备了AlTiN/TiAlN、AlCrN/TiAlN和TiSiN/TiAlN 3种涂层,分析了涂层的结构与力学性能,并通过

对比加工过程中的刀具后刀面磨损宽度与切削力信号,分析讨论了涂层刀具在铣削时的性能差异,结论如下。

(1) 涂层成分体系对于刀具铣削 GH4169 高温合金薄壁件寿命具有较大影响,涂层硬度越高,耐磨因子越大的涂层抗磨损性能越好,涂层刀具寿命越高。

(2) TiSiN/TiAlN 涂层具有较高的硬度与耐磨因子,分别达到了 42.5 GPa 与 0.139。在铣削 24 m 后刀具后刀面磨损最为轻微,无明显崩口出现,且加工稳定性最高。

(3) GH4169 高温合金铣削时存在的刀具磨损形式有磨粒磨损、黏结磨损和氧化磨损,其中磨粒磨损与黏结磨损为主要磨损形式。

### 参考文献

[1] THELLAPUTTA G R, CHANDRA P S, RAO C S P. Machinability of nickel based superalloys: A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2): 3712–3721.

[2] 吴明阳,王博,程耀楠,等. 高温合金材料特性及加工技术进展[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2015, 20(6): 24–31.

WU Mingyang, WANG Bo, CHENG Yaonan, et al. Development of the material properties and machining technology of superalloy[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2015, 20(6): 24–31.

[3] 李健明,王相宇,乔阳,等. 高温合金切削加工的研究进展[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(3): 203–210.

LI Jianming, WANG Xiangyu, QIAO Yang, et al. Research progress in superalloy machining[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2020, 34(3): 203–210.

[4] 刘均伟. 镍基高温合金 Inconel718 高速切削实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.

LIU Junwei. Experimental study on high speed cutting of nickel-based superalloy Inconel718[D]. Jinan: Shandong University, 2018.

[5] 岳彩旭,张俊涛,刘献礼,等. 薄壁件铣削过程加工变形研究进展[J]. *航空学报*, 2022, 43(4): 106–131.

YUE Caixu, ZHANG Juntao, LIU Xianli, et al. Research progress on machining deformation of thin-walled parts in milling process[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(4): 106–131.

[6] JIA Z Y, LU X H, GU H, et al. Deflection prediction of micro-milling Inconel 718 thin-walled parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 291: 117003.

[7] WU G, LI G X, PAN W C, et al. A state-of-art review on chatter and geometric errors in thin-wall machining processes[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 454–480.

[8] 陈跃威,邹中妃. 切削高温合金 GH4169 的硬质合金刀具磨损机理[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(9): 1–3, 7.

CHEN Yuewei, ZOU Zhongfei. Wear mechanism of cemented carbide tool for cutting superalloy GH4169[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(9): 1–3, 7.

[9] 李锋,刘维伟,余斌高,等. TiAlN 涂层刀具高速铣削 GH4169 刀具磨损形貌及机理分析[J]. *航空精密制造技术*, 2016, 52(1): 34–38.

LI Feng, LIU Weiwei, YU Bingao, et al. Analysis of wear morphology and mechanism in high-speed milling alloy GH4169 by using coated carbide

TiAlN tool[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2016, 52(1): 34–38.

[10] 季思源,万维财,彭卓豪,等. 切削高温合金用涂层的研究进展[J]. *工具技术*, 2022, 56(2): 3–10.

Ji Siyuan, WAN Weicai, PENG Zhuohao, et al. Research progress of coatings for cutting superalloy[J]. *Tool Engineering*, 2022, 56(2): 3–10.

[11] SHOKRANI A, BETTS J, JAWAHIR I S. Improved performance and surface integrity in finish machining of Inconel 718 with electrically charged tungsten disulphide MQL[J]. *CIRP Annals*, 2022, 71(1): 109–112.

[12] UCUN İ, ASLANTAS K, BEDIR F. An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy[J]. *Wear*, 2013, 300(1–2): 8–19.

[13] LI G D, SUN J F, XU Y, et al. Microstructure, mechanical properties, and cutting performance of TiAlSiN multilayer coatings prepared by HiPIMS[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 353: 274–281.

[14] REOLON L W, AGUIRRE M H, YAMAMOTO K, et al. A comprehensive study of Al<sub>0.6</sub>Ti<sub>0.4</sub>N coatings deposited by cathodic arc and HiPIMS PVD methods in relation to their cutting performance during the machining of an inconel 718 alloy[J]. *Coatings*, 2021, 11(6): 723–730.

[15] CHEN Y, DU H, CHEN M, et al. Structure and wear behavior of AlCrSiN-based coatings[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 370: 176–183.

[16] LIU S Y, YANG Y, NG F L, et al. Oxidation behaviour of CrAlYN coatings at elevated temperatures[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 320: 357–361.

[17] NEDIC B, ERIC M. Cutting temperature measurement and material machinability[J]. *Thermal Science*, 2014, 18(1): 259–268.

[18] 龙重旺,陈领,郭智兴,等. TiAlN 涂层与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层刀具高温合金切削性能研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2020(9): 154–157.

LONG Chongwang, CHEN Ling, GUO Zhixing, et al. Research on super alloy machinability between TiAlN series coating tools and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating tools[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2020(9): 154–157.

[19] BROWN I G, GODECHOT X. Vacuum arc ion charge-state distributions[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1991, 19(5): 713–717.

[20] CHEN X J, DU Y, CHUNG Y W. Commentary on using H/E and H<sup>3</sup>/E<sup>2</sup> as proxies for fracture toughness of hard coatings[J]. *Thin Solid Films*, 2019, 688: 137265.

[21] DUAN L L, WU H, GUO L M, et al. The effect of phase on microstructure and mechanical performance in TiAlN and TiSiN films[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(6): 066401.

[22] FAASSEN R. Chatter prediction and control for high-speed milling[J]. *Eindhoven: Eindhoven University of Technology*, 2007, 362: 151243.

通讯作者: 于忠光,工程师,硕士,研究方向为难加工材料切削用刀具设计及涂层工艺开发。

(责编 七七)

引文格式: 李法贵, 王若奇, 孙玉文. 基于深度神经网络的机器人加工系统模态特性预测[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 85-92, 124.  
LI Fagui, WANG Ruoqi, SUN Yuwen. Modal characteristics prediction of robotic machining systems based on deep neural network[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 85-92, 124.

## 基于深度神经网络的机器人加工系统模态特性预测

李法贵, 王若奇, 孙玉文

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024)

**[摘要]** 串联式工业机器人具有工作空间大且灵活性强的特点, 被广泛应用于飞机蒙皮、航空透明件等大型结构件的加工。然而, 工业机器人存在刚度弱、动态特性空间分布差异大的问题, 导致其铣削稳定性极限低, 不同加工区域的铣削性能变化明显, 可供选择的工艺参数窗口狭窄的问题。研究机器人铣削系统加工过程中的动态特性, 建立位姿相关模态预测模型对提升机器人加工性能有重要意义。本文以 ABB 机器人加工系统为研究对象, 提出了一种基于深度神经网络的模态预测方法。首先, 采用多普勒测振仪对机器人加工系统进行了模态试验, 对多阶模态的空间变化加以分析。随后, 根据机器人实际工作空间, 设计测试试验组从而获取位姿相关的频响函数集, 并利用有理多项式法准确辨识相关模态参数。在此基础上, 采用超参数优化法建立深度神经网络预测模型, 最终实现工业机器人工作空间内位姿相关的多阶模态参数准确预测。试验结果表明, 该方法预测精度可达 80% 以上。

**关键词:** 机器人加工; 模态预测; 神经网络模型; 超参数优化; 薄壁件

### Modal Characteristics Prediction of Robotic Machining Systems Based on Deep Neural Network

LI Fagui, WANG Ruoqi, SUN Yuwen

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education,  
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**[ABSTRACT]** Due to large working space and strong flexibility, serial industrial robots are widely used in the machining of large structural parts such as aircraft skin and aviation transparent part. However, the low stiffness of industrial robots and large differences in the spatial distribution of dynamic characteristics lead to low limits of their milling stability, significant variations in milling performance in different machining regions, and narrow windows of available process parameters. It is important to study the dynamic characteristics of the robot milling system during machining and to establish a positional correlation modal prediction model to improve the robot machining performance. In this paper, a modal prediction method based on deep neural network is proposed for an ABB robotic machining system. Firstly, the modal experiment of the robot processing system is carried out by using the Doppler vibrometer, and the spatial variation of each order modal is analyzed. Then, according to the actual working space of the robot, an experiment is designed to obtain the frequency response function set related to the pose, and the related modal parameters are accurately identified by the rational polynomial method. On this basis, the hyperparameter optimization method is used to establish a deep neural network prediction model, which can accurately predict the pose-dependent modal parameters in the robot workspace. Finally, the experimental results show that the prediction accuracy of this method can reach more than 80%.

**Keywords:** Robotic machining; Modal prediction; Neural network model; Hyperparameter optimization; Thin-wall parts

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.085

工业机器人具有灵活性高、成本低等优点,已经被广泛应用于工业制造领域,但由于机器人存在刚性相对弱、空间分布差异大的局限性<sup>[1-2]</sup>,使其在加工大尺寸变壁厚复杂曲面件时易发生颤振,从而影响加工效率和质量。此外,机器人加工系统工作空间大且其模态特性与位姿存在关系<sup>[3]</sup>,如何准确预测其位姿相关的全域模态特性,是机器人高效加工尤其是铣削加工中须需解决的问题之一。

国内外学者针对机器人加工系统动力学特性开展了相关研究。岳超<sup>[4]</sup>综合考虑了机器人关节静刚度、主轴装配区及刀具刚度建立了机器人整体刚度场,并分析了其在工件平面内的刚度性能分布。田莉莉<sup>[5]</sup>运用DH法建立了六自由度串联工业机器人的运动学建模,分析了机器人姿态对固有频率的影响,并得出第2~4关节的变化对机器人固有频率影响较大。Mousavi等<sup>[6]</sup>给出了机器人动力学分析的简化模型,得出了机器人固有频率沿刀具路径变化较大的结论。Tunc等<sup>[7]</sup>探究了六足机器人的不同区域固有频率及相应振幅的变化规律,发现两者在不同区间内均呈现出明显变化的趋势。随后,Tunc等<sup>[8]</sup>在考虑到刀尖动力学的不对称性和位置依赖性的情况下,探究了进给方向对加工稳定性的影响。

在深入了解机器人模态特性的基础上,对于机器人模态特性的预测,主要有2种方法:解析建模法和统计学习方法。解析建模法主要通过理论分析、有限元建模等来预测机器人模态特性,但分析过程复杂建模困难;统计学习法是将理论与试验相结合,通过模态试验所辨识的模态参数进行统计学习,是大数据理论发展所新兴的趋势。Mousavi等<sup>[9]</sup>使用3D欧拉-伯努利梁单元建立了一个简化的多体模型,用于预测机器人的动态特性,并将柔性关节和柔性体方法与矩阵结构分析方法相结合,建立了预测姿态相关的自适应动力学模型。Nguyen等<sup>[10]</sup>提出了一种运行模态分析方法,用于识别机器人在运行过程中的频响函数,在此基础上提出了一种预测工作空间内机器人的模态特性的新方法。Chen等<sup>[11]</sup>提出了一种新的扩展模型,用于计算六自由度机器人在任何姿态下刀尖的频响函数,并通过响应耦合子结构法将刀具和刀柄的频响函数耦合在内。深度学习神经网络作为一种处理大数据的有效方法,能有效处理多输入多输出问题,并已应用于图像和声学<sup>[12]</sup>、机器人定位误差补偿<sup>[13]</sup>、复杂零件特征识别<sup>[14]</sup>等领域,也可用于机器人位姿相关的模态参数预测。机器人加工系统本体存在多阶模态,但国内外学者的研究主要还是考虑机器人的单模态,而考虑机器人整个工作空间、对多模态等因素的动力学特性研究和预测较少。此外,频响函数矩阵的交叉耦合项也会影响系统的动态特性<sup>[15]</sup>。

为准确获取机器人加工系统位姿相关的模态参数,本文考虑到多模态和交叉耦合项对动力学模型的影响,提出了一种基于深度神经网络的机器人加工系统全域多模态预测方法。首先,以使用多普勒测振仪进行模态试验所获取的位姿相关的频响函数为基础,采用超参数优化法建立的神经网络为预测模型;其次,以利用有理多项式法对频响函数辨识出的相关模态参数作为训练集,完成模型的训练和测试。最终通过设计试验验证了所提方法的准确性。

## 1 机器人加工系统模态特性分析

机器人加工系统由ABB IRB6660工业机器人、末端执行装置等组成,具有工作空间大、运动灵活等优点,但在加工薄壁件过程中其自身弱刚性特点易诱发颤振,进而影响加工精度与质量。同时机器人加工系统的模态特性依赖于机器人的空间位姿,且难以通过模态锤击试验获取完整工作空间内的模态参数。因此,需要准确辨识机器人加工系统的各阶模态参数,并分析其空间变化规律分析,为后续机器人加工系统模态参数预测提供基础。机器人加工系统如图1所示。

机器人铣削系统模态呈现空间分布差异大、位姿依赖性强的特点,为探究其在运动空间内的变化规律,在 $z=810\text{ mm}$ 的平面内,选取25个位置进行模态试验。随后对试验获取的频响函数进行模态辨识,得到固有频率、阻尼比、模态刚度等模态参数,并对不同位姿下模态参数空间分布规律进行分析。 $X$ 方向的模态参数在 $z=810\text{ mm}$ 平面内的变化如图2所示。

可以看出,机器人本体模态参数在不同位置处差异较大,位姿依赖明显且存在多阶模态。机器人第1阶模态中固有频率 $8\sim 20\text{ Hz}$ 、阻尼比 $0.5\%\sim 3\%$ 、模态刚度 $5\times 10^6\sim 1.5\times 10^8\text{ N/m}$ ;机器人第2阶模态中固有频率 $20\sim 25\text{ Hz}$ 、阻尼比 $1\%\sim 2.5\%$ 、模态刚度 $2\times 10^6\sim 1.2\times 10^7\text{ N/m}$ 。模态参数随位置发生变化,但在某些小区间内,模

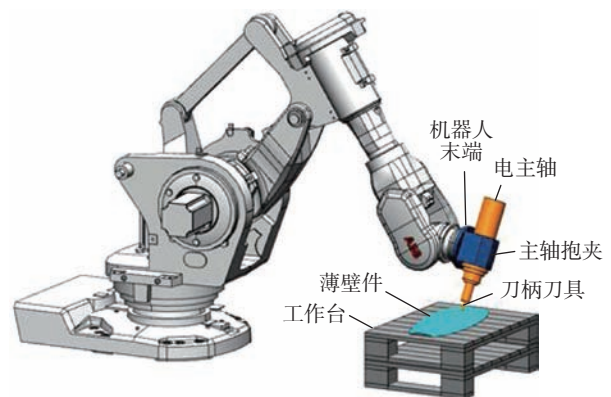


图1 机器人加工系统  
Fig.1 Robotic processing system

态参数变化较小。

在上述试验基础上,选取机器人在3个不同姿态下X、Y、Z方向的试验结果,对同一方向不同姿态和同一姿态不同方向频响函数进行了分析,所选位姿为 Pose1=(1450 mm, -500 mm, 810 mm), Pose2=(1675 mm, -190 mm, 810 mm), Pose3=(1900 mm, 120 mm, 810 mm),各方向频响函数及试验位置如图3所示,得出以下结论。

(1)不同位姿相同方向机器人本体频响差异明显。

(2)同一位姿不同方向的频响函数呈现各向异性。

机器人加工系统是一个典型的多模态系统,且模态呈现出各向异性、位姿依赖性强的特点,准确预测不同位姿下机器人加工系统的动态特性是研究机器人的加工性能及稳定加工工况的基础。

## 2 基于深度神经网络的机器人加工系统模态预测

机器人模态参数是动力学建模的重要基础,但其模态参数随位姿变化明显,通过敲击试验获取加工系统在大型薄壁件加工区间内模态参数十分耗时。本文针对典型机器人加工系统,提出一种基于深度神经网络的模态预测方法,并结合多普勒激光测振仪开展模态试验获取相关参数,完成机器人加工系统位姿相关的全域内多模态参数预测。

### 2.1 神经网络预测模型

神经网络模型是应用最广泛的智能算法,在获取部分试验数据情况下能够利用多输入多输出的机器学习模型,完成机器人加工系统的全域多阶模态参数预测,

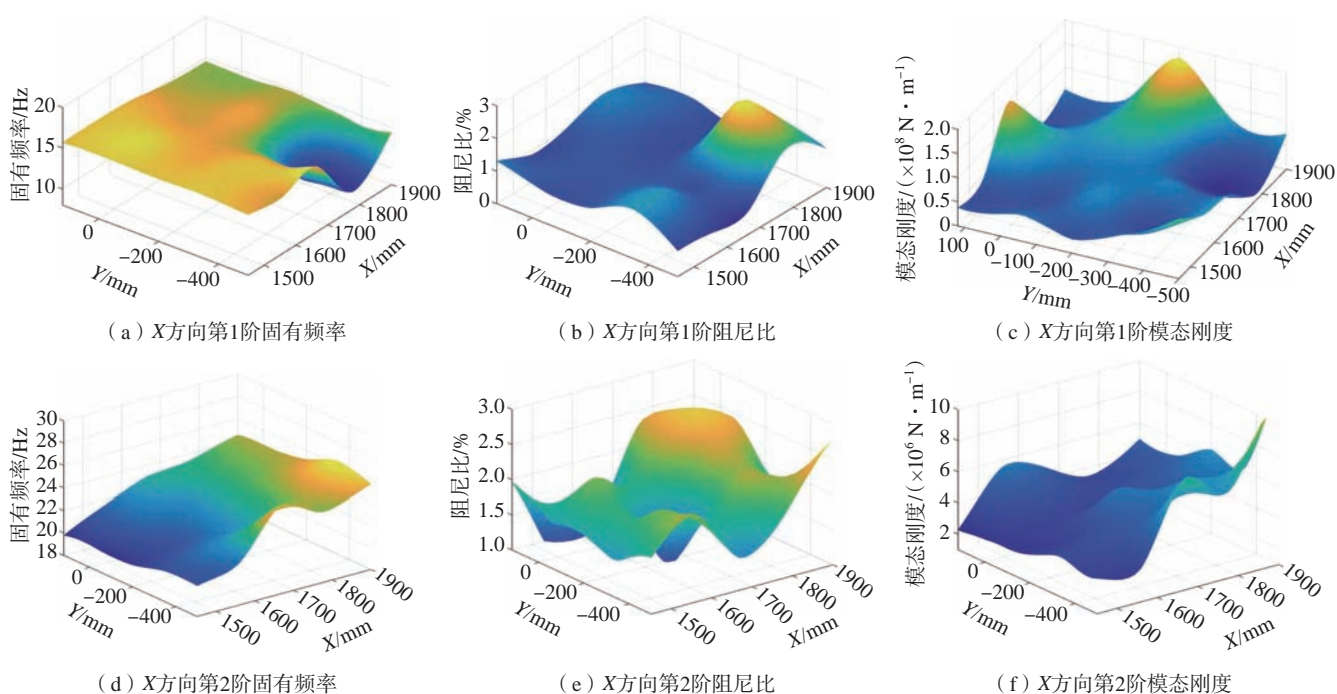


图2 X方向机器人本体模态参数  
Fig.2 Modal parameters of robot body in X direction

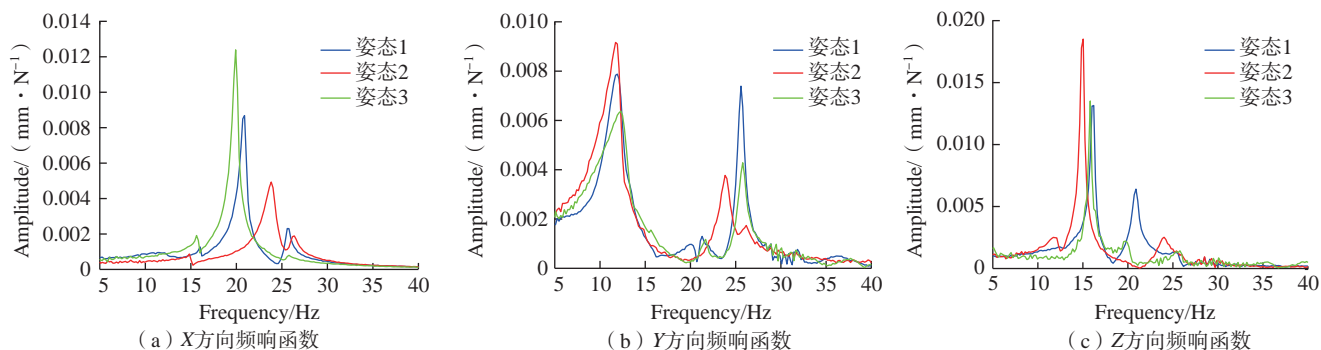


图3 不同姿态下机器人频响函数  
Fig.3 Frequency response function of robot under different attitudes

结合超参数优化算法,本文提出一种基于深度神经网络的模态预测方法,流程图如图4所示。

DNN神经网络由输入层、隐藏层、输出层组成,输入层和输出层由模型特征维度决定;隐藏层结构是神经网络模型的核心。假设DNN包含 $t$ 层,则第 $t$ ( $t=1, \dots, N+1$ )层输出为

$$a^t = \sigma(z^t) = \sigma(W^t a^{t-1} + b^t) \quad (1)$$

式中, $b^t$ 为第 $t$ 层节点的偏倚向量; $\sigma(z^t)$ 为激活函数; $W^t$ 为第 $t$ 和 $t-1$ 层的连接权值矩阵; $a^{t-1}$ 为第 $t-1$ 层的输出。

张仕良等<sup>[16]</sup>研究表明,DNN激活函数、网络结构、学习率的选择对模型预测精度和性能有着显著影响。激活函数是DNN激活函数能解决非线性问题的关键,常用激活函数有Sigmoid、Tanh、ReLU等,不同的激活函数会导致模型预测精度不同。隐藏层的节点和层数直接影响模型的泛化能力,虽然隐藏层数增加,模型预测精度会得到提高,但也容易带来“过拟合”问题。学习率的大小直接影响模型收敛的速度和最优解的获取。

机器人末端执行器的实际位姿是由机器人各关节轴正向运动学变换得到的,输入是机器人关节轴角度,而非执行器末端位置。将机器人各关节轴都作为输入势必会增加模型的复杂性,且无法获得机器人所有位姿下的模态参数,考虑到各关节轴对模态参数的不同贡献,过滤贡献度低的关节轴以减少模型的复杂性<sup>[17]</sup>,采用2和3关节轴角度作为输入即可有较高的预测精度。

为建立具有较高预测精度和泛化能力的神经网络模型,本文对传统神经网络模型进行超参数优化,选择最优激活函数、隐藏层结构及学习率进行建模。

神经网络超参数优化伪代码的输入部分中A为激活函数;L为学习率;N为节点数;M为隐藏层数。在代码的输出部分,P为超参数最优组合,其深度学习学习伪代码则显示为

数据预处理

Function model (A, L, N, M):

for i = 1 to M

set the activation, dropout rate, and optimizer search spaces [A, L]

add a drop out layer

add a hidden layer

combination of nodes from space

Return best model

Best model=Search (model (A, L, N, M))

P[i]=Extract Network Parameters (Best model)

Acc.[i]=Test Evaluate (model[i])

首先,在每个方向上构造独立的DNN模型,将试验样本数据随机划分为70%训练数据和30%测试数据。采用优化隐藏层超参数,选择具有最优隐藏层结构、学习率、激活函数的DNN模型进行固有频率、阻尼比、模态刚度、模态质量、模态阻尼的训练。

$$CNNs = \{Cf(w_n), Cf(\xi), Cf(C), Cf(K), Cf(M)\} \quad (2)$$

式中, $Cf(x)$ 表示一个神经网络预测模型; $w_n$ 为固有频

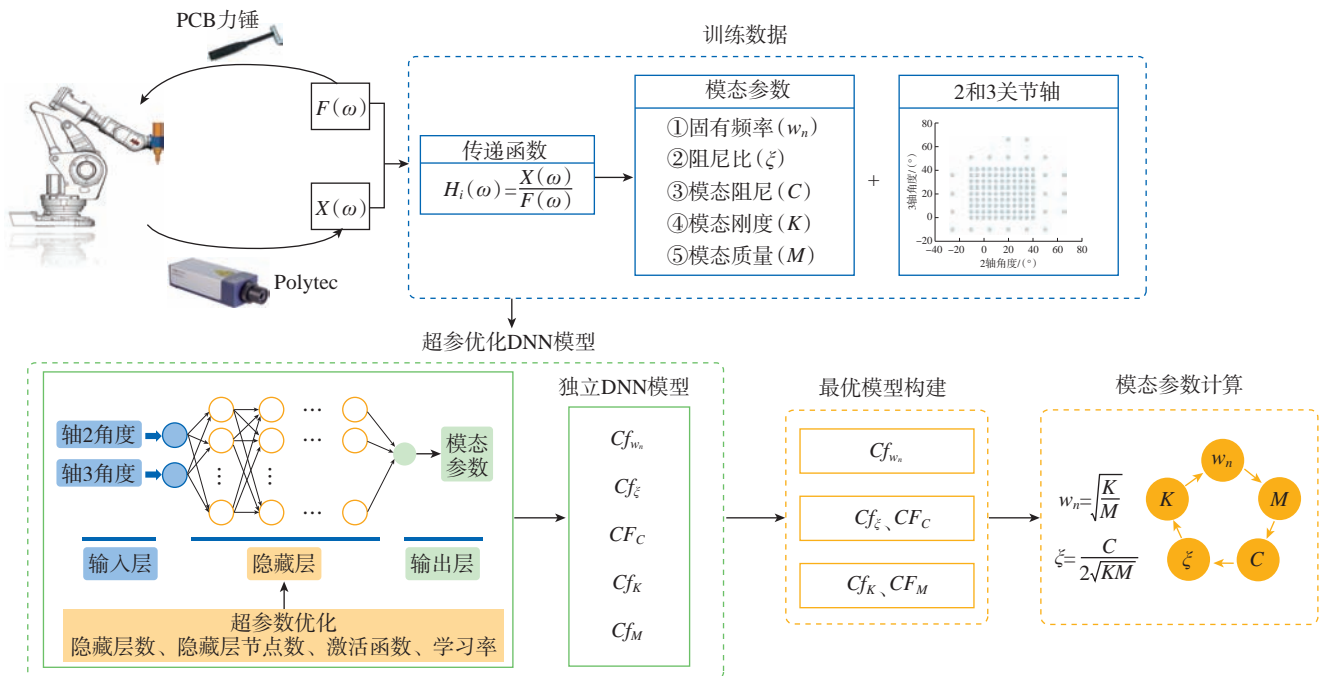


图4 多模态预测方法流程图

Fig.4 Flowchart of multimodal forecasting method

率;  $\xi$  为阻尼比;  $C$  为模态阻尼;  $K$  为模态刚度;  $M$  为模态质量; CNNs 为所有神经网络模型组成的集合。

其次,使用  $R^2$  作为模型的评估函数,每个模型对应一个  $R^2$  系数,如  $R_{w_n}^2$ 、 $R_{\xi}^2$ 、 $R_C^2$ 、 $R_K^2$ 、 $R_M^2$  分别为固有频率、阻尼比、模态阻尼、模态刚度、模态质量的评估函数。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (f_j - y_j)^2}{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (3)$$

式中,  $y_j$  为样本训练值;  $f_j$  为模型预测值;  $\hat{y}_j$  为训练值的平均值。

再次通过  $R^2$  选择阻尼比与模态阻尼、模态刚度与模态质量模型中精度高的模态参数进行修正。

$$CNNs_{end} = \{Cf(w_n); [Cf(\xi), Cf(C)]; [Cf(K), Cf(M)]\} \quad (4)$$

继续结合模态参数理论,将  $CNNs_{end}$  中具有较高精度的预测参数代入以下方程中计算其他模态参数,以补偿机器学习模型的预测精度损失。

$$w_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{C}{2\sqrt{KM}} \quad (6)$$

最后,输出具有最高预测精度的模态参数  $\Psi_{out}$ ,完成加工系统频响函数预测。

$$\Psi_{out} = \{w_n, \xi, C, K, M\} \quad (7)$$

## 2.2 模型训练集的获取

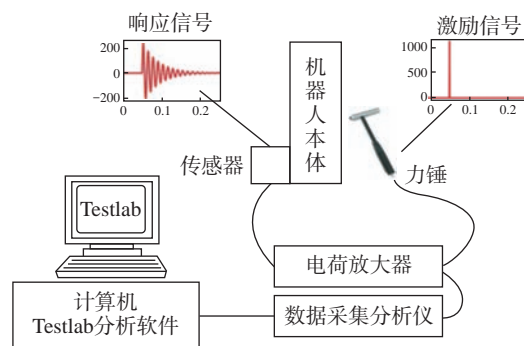
模态锤击试验是获取机器人模态参数常用的方式,本文考虑到加速度传感器在低频段模态测试时出现响应会失真的问题,无法准确辨识机器人加工系统的模态,因此采用能够精确获得机器人本体在激励下的振动速度和振幅的多普勒测振仪进行试验,模态测试系统如图 5 所示。

机器人轴 2 的可达范围为  $-42^\circ \sim 85^\circ$ ,轴 3 的可达范围为  $-20^\circ \sim 120^\circ$ 。试验选点方案:(1)可达空间内试验位置点均布。2 轴在  $-35^\circ \sim 75^\circ$  内,间隔  $10^\circ$  选取试验点,3 轴依据 2 轴角度,在无干涉情况下间隔  $10^\circ$  选取试验位置点,如图 6 中的红色数据点。(2)工件加工空间内试验点拓展。当 2 轴在  $-10^\circ \sim 40^\circ$ ; 3 轴在  $0^\circ \sim 40^\circ$  时,机器人在工件加工空间内,间隔  $5^\circ$  选取试验点,如图 6 中蓝色数据点。通过区分出不同采样点的试验设计方法,在保证关键姿态下模态参数的预测精度的同时,拓展模型的使用范围,减少了试验引入的误差,提升了效率。试验中,使用力锤在 XY 平面内,从正交方向激励机器人末端法兰,同时使用多普勒测振仪和激光位移传感器同时测量直接方向与交叉方向响应位移。

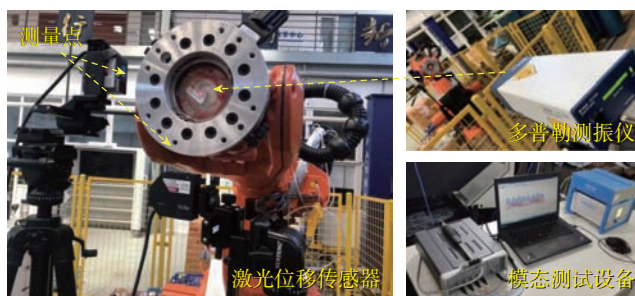
机器人在  $10 \sim 30$  Hz 频段内存在多阶模态,普通单模态辨识方法无法准确辨识其模态参数,而基于最小二乘原理的有理分式多项式法能够同时拟合多个模态,辨识结果更加准确,能够有效解决多模态辨识的问题。故本文将时域内测得的激励力及响应位移通过快速傅里叶变换转变为频域信号,在频域内采用有理分式多项式法对模态进行辨识<sup>[18]</sup>,将辨识获得的模态参数作为训练集,用于上述模型的训练。

## 2.3 模型准确性验证

为验证所提方法的有效性,本文将 X 方向的预测模态参数与实测模态参数拟合在图 7 中,可以看出:(1)



(a) 系统连接示意图



(b) 试验现场图

图 5 机器人模态测试系统

Fig.5 Robot modal testing system

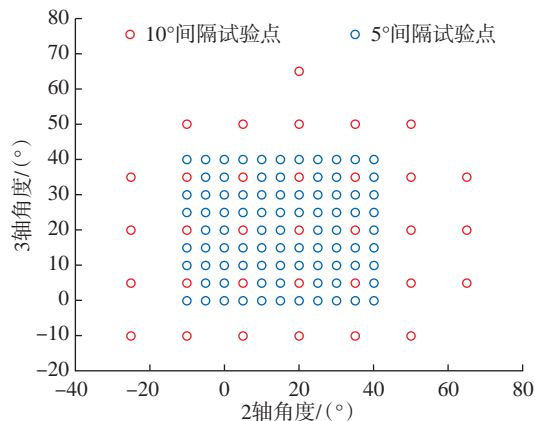


图 6 机器人 2 和 3 轴角度组合

Fig.6 Angle combination of joint 2 and 3

XX

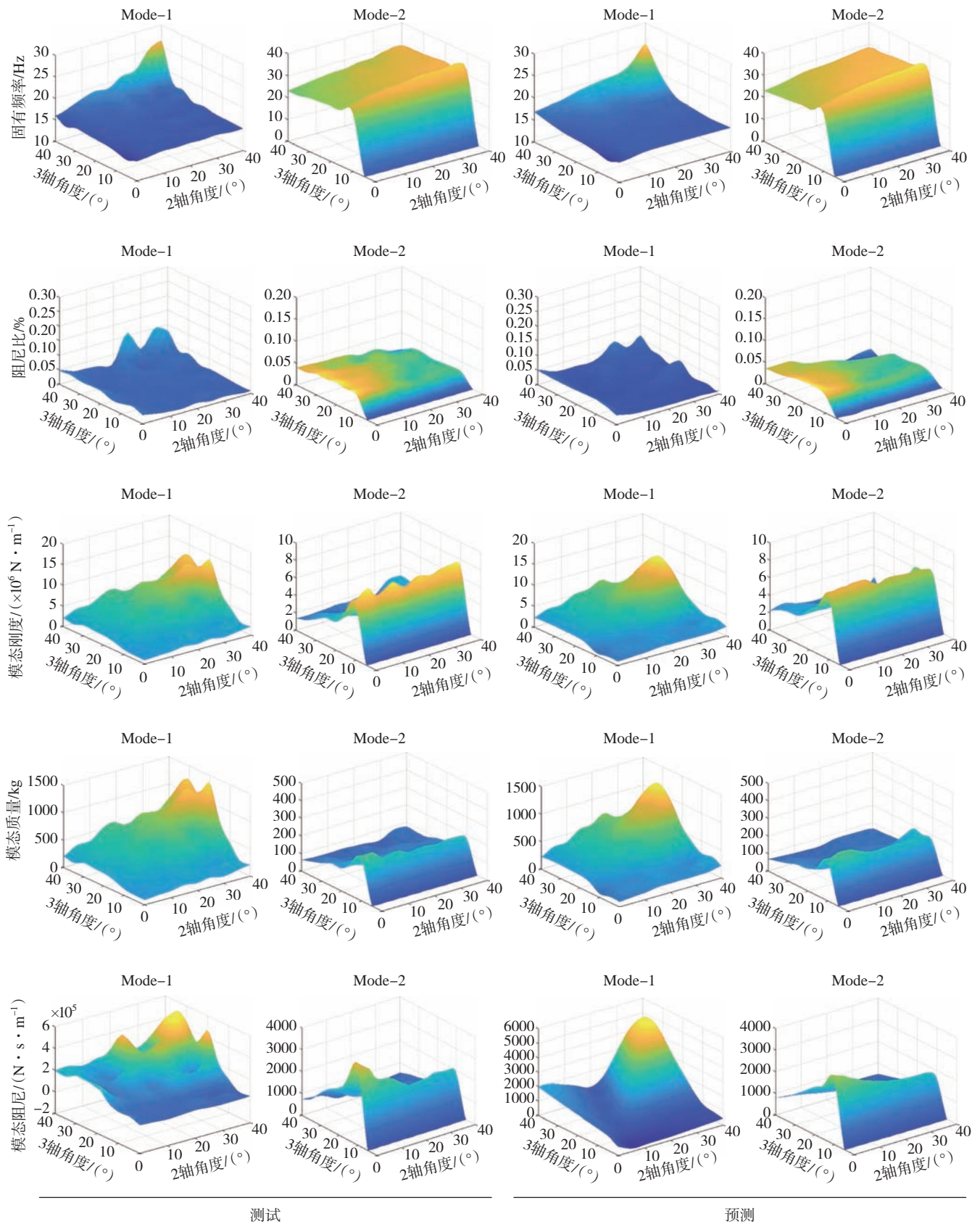


图7 X方向实测模态参数与预测模态参数对照

Fig.7 Comparison between measured and predicted modal parameters in X directions

固有频率的预测模型具有最好的预测效果；(2)阻尼比预测模型比模态阻尼预测模型精度高；(3)模态刚度和模态质量预测模型在少数位姿处的预测精度低,尤其是模态参数突变处,但通过模态理论的修正,较好地补偿了机器学习模型的精度损失。总体来说,模态参数预测值和实际值的趋势具有良好的一致性。表1为测试集的平均准确率,其中固有频率的预测精度最高,最优模态参数集合准确率均达到80%以上。

为评价上述预测方法对机器人加工系统频响函数预测效果,图8对比了超参数优化深度神经网络模型预测频响、普通神经模型预测频响及试验所得频响函数,所用数据如表2所示。超参数优化深度神经网络模型的预测精度相比普通神经网络模型预测精度要高,因为优化后深度神经网络结构具有更好的学习预测能力。模态参数的预测结果中,固有频率相较于其他参数预测效果更好,虽然拟合曲线存在一定误差,但仍在相对误

差范围内。

### 3 结论

本文针对典型机器人加工系统模态特性位姿变化大且全域模态参数获取困难的问题,进行了相关研究。本文的主要研究成果如下。

(1)提出一种基于深度神经网络的机器人加工系统模态预测方法。采用超参数优化建立深度神经网络预测模型并进行训练学习,实现机器人工作空间内位姿相关的模态预测。

(2)基于上述模型,准确预测了多模态系统及其交叉耦合方向的模态参数,为机器人加工稳定性预报提供了基础。

通过对加工系统进行模态试验,验证了该方法具有较高预测精度,模态参数集合的准确率达80%以上,能够有效预测机器人工作空间内位姿相关的全域多阶

表1 模态参数预测准确率

Table 1 Accuracy of modal parameter prediction

%

方向	Mode	固有频率	阻尼比	模态刚度	模态质量	模态阻尼
XX	1	95.74	85.37	81.86	83.27	78.83
	2	97.21	87.71	80.18	80.83	77.76
XY	1	95.46	86.55	85.66	83.63	78.87
	2	96.89	83.24	80.02	81.66	84.36
YX	1	94.49	84.33	79.83	82.48	81.33
	2	97.33	80.88	82.34	83.57	79.69
YY	1	93.46	81.44	82.03	85.65	83.26
	2	95.22	80.87	80.16	85.79	84.33

表2 机器人加工系统模态参数预测比较

Table 2 Comparison of modal parameter prediction of robot processing system

模态参数		方向							
		XX		XY		YX		YY	
固有频率/ Hz	测试	17.51	24.49	17.12	24.88	15.01	27.20	10.16	27.88
	超参优化模型预测	17.79	24.46	17.24	24.97	14.94	27.51	10.02	27.65
	未超参优化模型预测	17.10	23.75	16.54	23.73	16.02	26.84	11.05	27.98
阻尼比/ %	测试	2.38	3.37	1.15	1.25	0.55	2.60	8.90	1.12
	超参优化模型预测	2.37	3.47	1.02	1.15	0.65	2.43	8.49	1.33
	未超参优化模型预测	2.10	3.70	0.80	0.97	0.67	2.33	9.22	1.43
模态刚度/ (N·m <sup>-1</sup> )	测试	2.33 × 10 <sup>6</sup>	1.03 × 10 <sup>6</sup>	1.44 × 10 <sup>7</sup>	2.66 × 10 <sup>7</sup>	1.31 × 10 <sup>7</sup>	1.74 × 10 <sup>7</sup>	2.27 × 10 <sup>6</sup>	3.32 × 10 <sup>6</sup>
	超参优化模型预测	2.28 × 10 <sup>6</sup>	0.99 × 10 <sup>6</sup>	1.39 × 10 <sup>7</sup>	2.62 × 10 <sup>7</sup>	1.37 × 10 <sup>7</sup>	1.76 × 10 <sup>7</sup>	2.15 × 10 <sup>6</sup>	3.14 × 10 <sup>6</sup>
	未超参优化模型预测	2.08 × 10 <sup>6</sup>	1.19 × 10 <sup>6</sup>	1.66 × 10 <sup>7</sup>	2.32 × 10 <sup>7</sup>	1.01 × 10 <sup>7</sup>	1.95 × 10 <sup>7</sup>	2.55 × 10 <sup>6</sup>	2.87 × 10 <sup>6</sup>

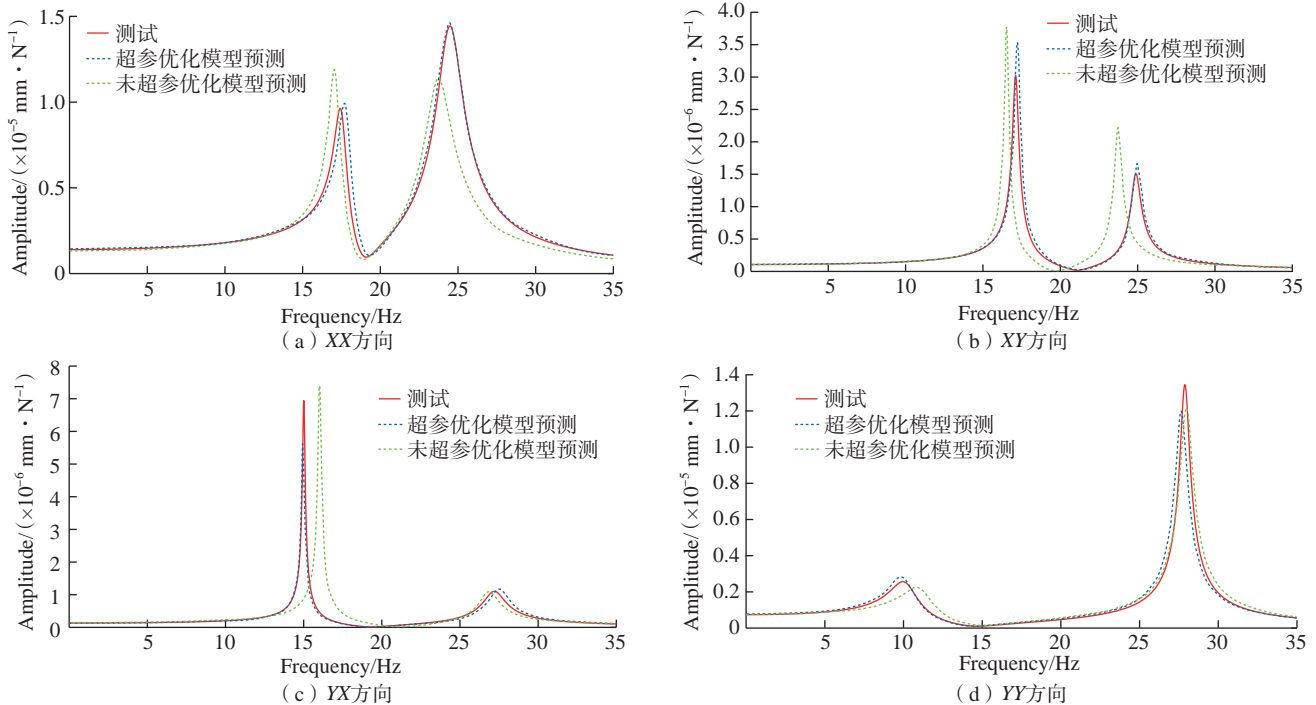


图8 由试验和预测的模态参数所拟合的 FRFs

Fig.8 FRFs that fitted by measured and predicted modal parameters

模态参数,可为后续大型薄壁透明件的动力学建模与稳定性分析提供所需的参数,进一步指导其高效稳定加工。

### 参考文献

[1] 朱灵盛. 基于机器人的飞机蒙皮切边技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
 ZHU Lingsheng. Study of aircraft skins trimming technology based on industrial robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.  
 [2] 李超. 某型飞机主起落架交点孔机器人镗孔加工系统稳定性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
 LI Chao. Research on the stability of robot boring system of the aircraft landing gear's junction hole[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.  
 [3] LI J, LI B, SHEN N Y, et al. Effect of the cutter path and the workpiece clamping position on the stability of the robotic milling system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9-12): 2919-2933.  
 [4] 岳超. 工业机器人加工系统刚度特性分析及铣削稳定性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
 YUE Chao. Research on stiffness characteristic and milling stability of industrial robot machining system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.  
 [5] 田莉莉. 串联机器人动力学特性及结构优化设计研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.  
 TIAN Lili. Research on dynamic characteristics and structural optimization design of tandem robot[D]. Jinan: Shandong University, 2020.  
 [6] MOUSAVI S G, GAGNOL V, BOUZGARROU B C, et al. Dynamic

behavior model of a machining robot[C]//Duisburg: ECCOMAS Multibody Dynamics, 2013.

[7] TUNC L T, SHAW J. Experimental study on investigation of dynamics of hexapod robot for mobile machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5-8): 817-830.  
 [8] TUNC L T, STODDART D. Tool path pattern and feed direction selection in robotic milling for increased chatter-free material removal rate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9-12): 2907-2918.  
 [9] MOUSAVI S, GAGNOL V, BOUZGARROU B C, et al. Stability optimization in robotic milling through the control of functional redundancies[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 50: 181-192.  
 [10] NGUYEN V, MELKOTE S N. Identification of industrial robot frequency response function for robotic milling using operational modal analysis[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 48: 154-158.  
 [11] CHEN C, PENG F Y, YAN R, et al. Rapid prediction of posture-dependent FRF of the tool tip in robotic milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 64: 101906.  
 [12] NASIR V, SASSANI F. A review on deep learning in machining and tool monitoring: Methods, opportunities and challenges[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(9-10): 2683-2709.  
 [13] 花芳芳, 田威, 胡俊山, 等. 基于深度神经网络的机器人定位误差补偿方法 [J]. 航空制造技术, 2020, 63(17): 78-85.  
 HUA Fangfang, TIAN Wei, HU Junshan, et al. Robot positioning error compensation method based on deep neural network[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(17): 78-85.

(下转第 124 页)

引文格式: 凡志磊, 严晨, 黄稳, 等. 面向复材构件的临时紧固件安装工艺测试与验证装置设计[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 93-99.  
FAN Zhilei, YAN Chen, HUANG Wen, et al. Design of testing and verification device for installation technology of temporary fasteners to composite components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 93-99.

## 面向复材构件的临时紧固件安装工艺测试与验证装置设计\*

凡志磊<sup>1</sup>, 严晨<sup>2</sup>, 黄稳<sup>1</sup>, 王华<sup>3</sup>

(1. 中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 201324;  
2. 上海交通大学上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室, 上海 200240;  
3. 上海应用技术大学, 上海 201418)

**[摘要]** 临时紧固件过大的夹紧力会给复材孔周带来损伤, 严重影响结构的静态承载及动态疲劳性能, 航空复材装配现场需要对临时紧固件的安装夹紧力进行控制。因此针对临时紧固件气动安装工具输出扭矩的波动性特点, 设计了一种面向复材构件的临时紧固件安装工艺测试与验证装置, 以探讨其安装工艺与夹紧力之间的关系。通过电气比例阀控制气动安装工具的输入气压, 通过扭矩传感器和夹紧力传感器监测临时紧固件安装过程中的扭矩和夹紧力。对所搭建的装置进行了测量系统分析, 利用皮尔逊相关系数公式验证了其重复性, 并用 Bessel 公式计算了其不确定度。结果表明, 所设计的装置可以用于复材构件临时紧固件的安装工艺测试与验证。这将为航空复材装配现场的临时紧固工艺的制定提供方法和依据。

**关键词:** 复合材料; 临时紧固件; 安装工艺; 扭矩; 夹紧力; 测量系统分析

### Design of Testing and Verification Device for Installation Technology of Temporary Fasteners to Composite Components

FAN Zhilei<sup>1</sup>, YAN Chen<sup>2</sup>, HUANG Wen<sup>1</sup>, WANG Hua<sup>3</sup>

(1. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;  
2. Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-Walled Structures, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
3. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

**[ABSTRACT]** Excessive clamping force of temporary fasteners will cause damage to the composite holes and seriously affect the static load-bearing and dynamic fatigue performance of the structure. The clamping force of the temporary fasteners needs to be controlled at the aviation assembly site. Therefore, in view of the fluctuation characteristics of the output torque of the temporary fasteners pneumatic installation tool, a test and verification device for the installation of temporary fasteners for composite structures was designed to explore the relationship between the installation process and the clamping force. The input air pressure of the pneumatic installation tool is controlled by an electric proportional valve, and the torque and clamping force during the installation of temporary fasteners are monitored by a torque sensor and a clamping force sensor. The measurement system of the built device is analyzed, the repeatability is verified by the Pearson correlation coefficient formula, and the uncertainty is calculated by the Bessel formula. The results show that the designed device can be used to test and verify the installation process of temporary fasteners for composite components. This will provide a method and basis for the formulation of temporary fastening technology at the assembly site of aeronautical composite materials.

**Keywords:** Composite materials; Temporary fastener; Installation process; Torque; Clamping force; Measurement system analysis

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.093

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51775350)。

装配质量对于飞机的安全性能至关重要<sup>[1]</sup>,在航空碳纤维增强树脂基复合材料部件预装配中,对于空间受限的位置常常采用临时紧固件进行单边定位、夹紧<sup>[2]</sup>。临时紧固件提供的夹紧力,有利于消除零件间间隙、增加部件刚度、抑制机械加工过程中的窜动、促进密封剂的流通等<sup>[3]</sup>。但由于复合材料属脆性材料且临时紧固件与复材夹紧接触面积较小,过大的夹紧力会给复材孔周带来损伤,严重影响零件的静态承载及动态疲劳性能,因此需要探明临时紧固件安装工艺与夹紧力之间的关系,从而在航空装配现场对临时紧固件的安装夹紧力进行控制。

临时紧固件的安装是一个典型的扭矩施加在螺纹上从而形成夹紧力的过程。近年来,国内外学者对于扭矩与夹紧力关系的研究多以螺栓为主要对象。王赛等<sup>[4]</sup>利用压力传感器设计了螺栓预紧力的简易测试装置,并证明了其有效性。邵国强等<sup>[5]</sup>利用阿特拉斯拧紧轴搭建了高精度螺栓连接试验台,能够模拟不同材料和不同规格的螺栓装配过程。Omiya等<sup>[6]</sup>针对管道法兰的螺栓拧紧工艺进行了研究,重点讨论了拧紧顺序、扭矩偏差、垫片材料对螺栓预紧力的影响规律。董达善等<sup>[7]</sup>利用扭矩扳手和应变片研究了M36高强度螺栓的扭矩系数。王晓斌等<sup>[8]</sup>利用德国Schatz模拟装配试验系统研究了螺栓安装时的扭矩-预紧力曲线,并对比了拧螺栓与拧螺母的区别。赵兵等<sup>[9]</sup>搭建了航空发动机九级盘连接模拟装配环境,探究了充分润滑、局部润滑、无润滑对螺栓预紧力的影响规律,结果证明了润滑对于降低摩擦系数、提高系数稳定性的积极意义。李小强等<sup>[10]</sup>基于航空发动机中TC4钛合金单螺栓连接工艺试验,利用瑞典Atlas Copco的拧紧装配工具系统研究了不同拧紧策略对装配预紧力大小及稳定性的影响,并探索了螺栓预紧力短时衰减规律。

综上所述,国内外学者大多是采用电动拧紧系统对螺栓的拧紧工艺与预紧力的关系进行了研究,并重点讨论了预紧力离散度的影响因素等问题。然而在航空临时紧固现场,由于具有体积小、质量轻、成本低廉、操作方便、维护便捷等优点,气动安装工具仍是主流。与电动拧紧系统相比,气动工具由于气动冲击的特性,所输出的扭矩难免存在误差,因而会导致临时紧固件夹紧力的波动。这种输出的偏差特性是电动拧紧系统所没有的,因此现有的电动拧紧系统并不适用于临时紧固件的安装工艺研究。

本文设计了一种既能精确控制安装气压,又能准确测量安装扭矩与夹紧力的试验装置,以实现临时紧固件安装工艺的探究。

## 1 临时紧固件结构

临时紧固件一般由壳体、弹性爪、螺纹杆、螺纹帽、挡圈、弹簧等组成,如图1所示,该型临时紧固件壳体内为六棱柱,底部装有橡胶保护套,其在临时紧固时与复材构件1接触,保护复合材料不受损伤。弹性爪是临时紧固件的关键零件,其底部为向内收缩的圆形夹紧脚。螺纹杆上半部分加工有双螺纹,中间为六棱柱与壳体内形间隙配合,下半部分为圆柱光杆,底部为带锥面的挡头。弹簧装在螺纹杆六棱柱与弹性爪头部之间。螺纹帽外形为六棱柱,加工有内螺纹,当转动螺纹帽时,由于六棱柱限制了螺纹杆的周向转动,其只能轴向移动,挡头带动夹紧脚往后缩,此时因为弹簧给弹性爪提供推力,夹紧脚经锥面撑开,直到与挡头接触,随后在挡头的带动下,弹性爪收缩,钩住复材构件2,夹紧叠层结构。由于螺纹帽在螺纹柱上的可移动距离大于弹性爪最长伸出壳体距离,因此临时紧固件的夹紧行程范围为0至弹性爪最长伸出壳体的距离,可以满足不同厚度叠层的临时紧固需求。

## 2 临时紧固件安装工艺

图2为一类典型的复材构件装配流程:(1)复材构件1和2在各自的型架上定位后,型架移动至预先设定好的位置;(2)测量此时复材构件1和2之间的间隙,加工、打磨垫片,并将垫片装入间隙内;(3)安装钻模板并制初孔,拆除复材构件,下架去毛刺;(4)将复材构件再次上架,涂密封剂,扩孔、铰孔并进行螺栓连接。其中,在安装钻模板时需临时紧固件进行定位夹紧,后续制初孔、扩孔、铰孔时为避免制孔轴向力打开间隙,影响制孔质量,需每隔一定距离就安装一个临时紧固件<sup>[11]</sup>。

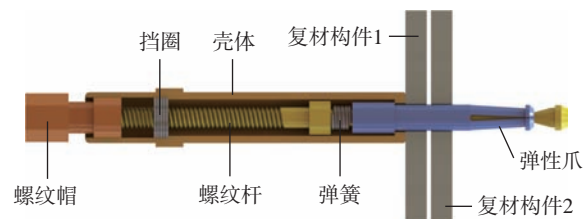


图1 临时紧固件结构图

Fig.1 Structure diagram of temporary fastener

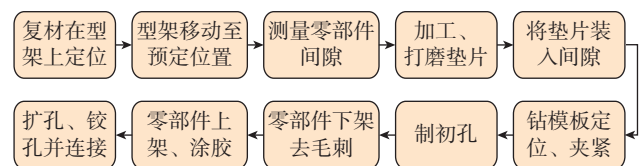


图2 复材构件装配流程

Fig.2 Flow chart of assembly of composite materials

临时紧固件的具体安装操作及步骤如图3所示,安装临时紧固件时根据安装孔大小选择相应规格的临时紧固件并插入孔中,壳体带橡胶套的端面与复材构件1接触(步骤2);拧紧气枪前端的内六角套筒与临时紧固件壳体上的六棱柱相配合,使得临时紧固件壳体在安装时保持静止,同时拧紧气枪内部的内六角套筒与螺纹帽相配合,带动螺纹帽顺时针旋转,螺纹杆在壳体内形的导向作用下,向上移动(步骤3),继续旋转螺纹帽,夹紧脚由锥面撑开直到与挡头接触(步骤4)。随后在挡头的带动下,弹性爪继续收缩,直至夹紧面与复材构件2接触(步骤5)。随着拧紧气枪的输出扭矩不断增大,临时紧固件的夹紧力也在不断增加,直至最大,气枪停止工作,临时紧固件的安装过程结束(步骤6)。

拆卸临时紧固件时,将拧紧气枪前端的内六角套筒与临时紧固件壳体上的六棱柱相配合,气枪内部的内六角套筒带动螺纹帽逆时针旋转,螺纹杆在壳体内形的导向作用下向下移动,夹紧脚不断远离复材构件2直到弹性爪上圆柱底面与壳体内表面接触;继续逆时针转动螺纹帽,螺纹杆向下移动,弹性爪在自身弹力作用下恢复为原始锥形;再将临时紧固件从孔中取出即可。

基于对夹紧力一致性的期望,工程上常用离散系数 $V_s$ 来表征临时紧固件的安装质量。离散系数又被称为变异系数,即

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$V_s = \frac{S}{\bar{X}} \quad (2)$$

式中, $S$ 为夹紧力测试数据的标准差; $n$ 为样本数量; $X_i$ 为第 $i$ 个样本值; $\bar{X}$ 为夹紧力测试数据的平均值。

### 3 测试与验证装置设计

#### 3.1 需求分析

现阶段,航空临时紧固现场缺乏面向复材构件的临

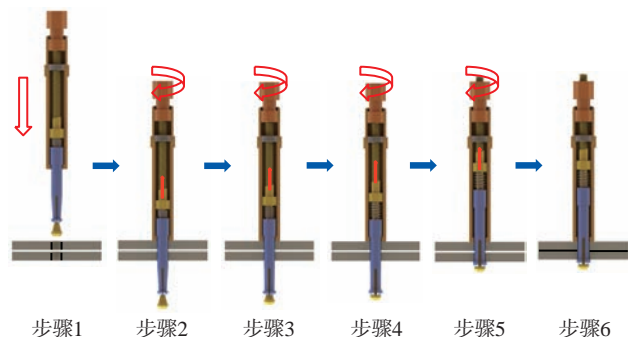


图3 临时紧固件安装步骤

Fig.3 Installation steps of temporary fastener

时紧固件安装工艺。在多次试安装中,均出现了夹紧力过小而间隙无法闭合,以及夹紧力过大导致复材孔周损伤的情况。因此,需要探究临时紧固件安装工艺与最终的夹紧力之间的关系,以为航空复材装配现场的临时紧固工艺的制定提供方法和依据。已知航空装配现场的临时紧固孔径为3.175~6.35 mm,现场常用的阿特拉斯-VISS.VPA7527D1系列拧紧气枪的最大输入气压为0.9 MPa,最大输出扭矩为5 N·m。而本研究所用的临时紧固件,其最大所能施加的夹紧力为6 kN。因此,本装置的设计需求为:能够在0~0.9 MPa范围内精确提供气压;扭矩检测范围大于5 N·m;压力检测范围大于6 kN。同时,装置应能适配不同类型的临时紧固件以及气动安装工具。

#### 3.2 测试与验证装置总体结构

本研究设计思路如图4所示,气压控制模块精确输出气压至拧紧气枪中,拧紧气枪带动扭矩传感器转动,扭矩传感器带动临时紧固件转动,临时紧固件夹紧复材构件,所产生的夹紧力由压力传感器测得,然后气压控制模块、扭矩传感器、压力传感器等,将其所设或所测参数传输到工作站中,得到临时紧固件气压-扭矩-夹紧力之间的关系。

临时紧固件测试台整体外形呈方形(图5),拧紧气枪、传感器、临时紧固件等均布置在前侧,控制系统的硬件布置在后侧并用外壳包住,以便对控制硬件进行保护。其中,为便于操作者调节拧紧气枪的输入气压及气压通断时间,在外壳上嵌入一块触摸屏,可显示当前设

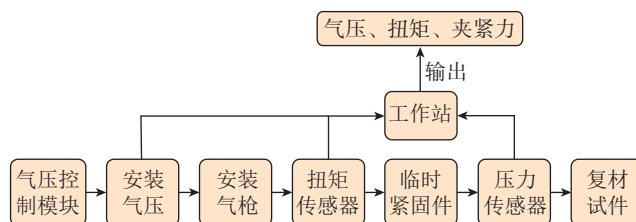


图4 测试台设计方案

Fig.4 Design of test bench

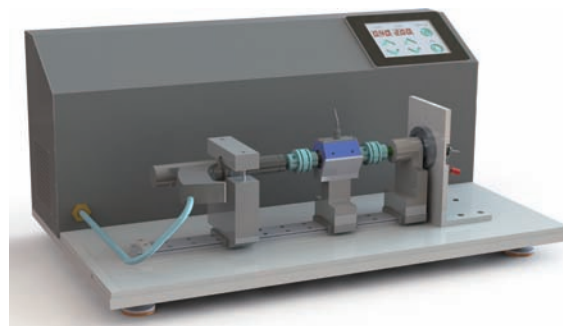


图5 临时紧固件测试台总体设计图

Fig.5 Design drawing of temporary fastener test bench

定气压值大小和气压通断时间并对其进行修改。

临时紧固件测试台长度为 800 mm,宽度为 490 mm,高度为 336 mm,底板下安装有 4 个减震机脚,底板上加工有安装孔,扭矩-夹紧力采集系统安装在底板前半部分,底板后侧安装有电/气控制元件箱,其宽度为 190 mm,右侧嵌有一块触摸屏,方便操作者左手推动拧紧气枪进行临时紧固件的安装,右手在触摸屏上进行操作。电/气控制元件箱由 2 mm 厚的镀锌板弯折而成,侧板由螺丝连接到底板与箱体上,便于维修与检查。电/气控制元件箱内安装有控制系统硬件,能输出指定的气压,气压通过气管从电/气控制元件箱左下角传出,连接到拧紧气枪上。测试台的夹紧力测量范围为 0~10 kN,扭矩测量范围为 0~10 N·m,气压可调节范围为 0~0.9 MPa,临时紧固件可测试规格范围为 3.175~6.35 mm。

### 3.3 扭矩-夹紧力采集系统

扭矩-夹紧力采集系统由拧紧气枪、输出轴、扭矩传感器、联轴器、压力传感器、复材板托架、导轨、滑台,以及保证拧紧气枪、扭矩传感器、压力传感器等共轴心的安装基座等组成(图 6)。

拧紧气枪被上下两个“V”形块夹紧并定位,其安装有一根输出轴以传递扭矩。扭矩传感器通过双膜片式联轴器与输出轴和临时紧固件相连。压力传感器左侧受压面与临时紧固件基座接触,右侧受压面在安装时与复材板接触。当安装气压输出且操作者向右推动拧紧气枪时,联轴器将扭矩从拧紧气枪中传递到扭矩传感器中,扭矩传感器再传递到临时紧固件上,最终转化为复材构件所受夹紧力。压力传感器测出该夹紧力。为了能够让各部件在轴向上自由移动以便气枪和临时紧固件的更换,整个扭矩-夹紧力采集系统放置在导轨-滑台上。

### 3.4 气压控制系统

气压控制系统的主要作用是按照操作者所设置的气压大小及通断时间输出指定压力的高压气体。该控制系统的硬件主要分为两部分:面向操作者以供其输入气压大小及气压通断时间的硬件装置,其核心为一块

14.2 cm × 10.67 cm 的触摸屏;控制输出气压的大小及时间的硬件装置,其核心为电压控制模块以及电气比例阀。

如图 7 所示,在电/气控制元件箱内,自左向右分别是电路板、电源转换器、电压控制模块、过滤阀、电气比例阀。电源转换器可将 220 V 交流电源转换为 24 V 直流电源,可给触摸屏、电压控制模块、电气比例阀供电。触摸屏通过 RS232 接口发出指令到电压控制模块上,电压控制模块提供相应的电压到电气比例阀中。过滤阀的作用是对气体进行干燥、过滤,以保证电气比例阀的控制精度和使用寿命,外界的气管接入到过滤阀的左端,过滤阀的右端与电气比例阀的左端相连,电气比例阀的右端为气压出口,通过气管与拧紧气枪相连。电气比例阀根据电信号精准控制其输出气压大小。

## 4 测量系统分析

测量系统分析是分析测量系统所带来的变异相对于工序过程总变异的大小,以确保工序过程的主要变异源于工序过程本身,而非测量系统<sup>[12]</sup>。常见的评估指标有精度和重复性等,下文将对此分别进行分析。

安装气枪通过输出轴与双膜片式联轴器将扭矩输出到扭矩传感器内,由于输出轴与安装气枪是内六角配合,不存在扭矩损耗,双膜片式联轴器修正可能存在的细微同轴度误差,其传递效率为 99%,扭矩传感器经过校正后的测量误差为 1%,其将扭矩输出到临时紧固件上的效率同样为 99%,因此扭矩的测量精度为 2.97%,满足需求。临时紧固件的夹紧力直接作用于压力传感器两端,压力传感器经过校正后的测量误差为 1%,则夹紧力的测量精度为 1%,满足需求。

重复性指的是同一个操作者使用同一套测量设备,对同一个测量部件的同一特性在较短的时间间隔内进行多次测量,所得结果的一致性<sup>[13]</sup>。对于本测试台,当安装气压、安装气枪、联轴器、临时紧固件、复材板均不变时,让同一研究人员在室温 20 °C 的条件下分别进行 3 组临时紧固件安装试验,每组 20 次,得到的扭矩、夹

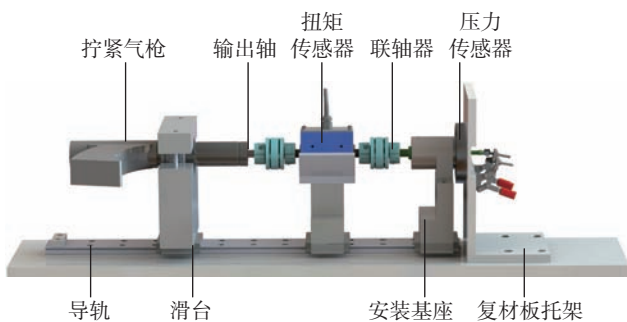


图 6 扭矩-夹紧力采集系统设计图

Fig.6 Design drawing of torque-clamping force acquisition system

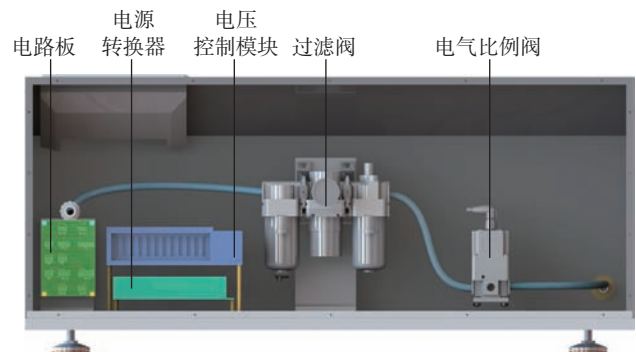


图 7 控制系统硬件图

Fig.7 Hardware diagram of control system

紧力见表 1,分别画出 6 组数据的分布直方图(图 8)。

皮尔逊相关系数常用于计算  $X$  和  $Y$  两组数据的相似度,其公式为

$$P = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中,  $\bar{X}$  为  $X$  数据的平均值,  $\bar{Y}$  为  $Y$  数据的平均值。分别计算出扭矩和夹紧力数据分布直方图之间的皮尔逊相关系数:

$$\begin{aligned} P_{T12} &= 0.865, P_{T13} = 0.944, P_{T23} = 0.881, P_{F12} = 0.975, \\ P_{F13} &= 0.917, P_{F23} = 0.964 \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $P_{Tij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) 为第  $i$  组和第  $j$  组扭矩数据分布直方图之间的皮尔逊相关系数;  $P_{Fij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) 为第  $i$  组和第  $j$  组夹紧力数据分布直方图之间的皮尔逊相关系数。计算结果表明其值均大于 0.8,说明 3 组扭矩值及 3 组夹紧力值的分布均具有较强的相似性,证明了本试验台测试系统具有良好的重复性,可用于临时紧固件安装工艺参数的测量。

## 5 不确定度评定

系统的不确定度评定的是测量结果的可信度。本研究利用高精度扳手输出扭矩,在室温 20 °C 的条件下对试验所用的临时紧固件重复测量 10 次,其名义值通过取平均值的方式获得,数据如表 2 所示。

对扭矩的测量不确定度影响显著的因素有扭矩的测量重复性引起的不确定度  $u_{T1}$  和扭矩传感器系统不确定度  $u_{T2}$ 。对夹紧力的测量不确定度影响显著的因素有夹紧力的测量重复性引起的不确定度  $u_{F1}$  和力传感器系统不确定度  $u_{F2}$ 。从文献 [14] 中可知,不确定度  $u_{T1}$ 、 $u_{F1}$  应采用 A 类评定方法,不确定度  $u_{T2}$ 、 $u_{F2}$  应采用 B 类评定方法。

利用 Bessel 公式计算有

$$u_{T1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_T)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - x_T)^2}{10-1}} = 0.0072 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5)$$

表 1 测试数据记录表

Table 1 Test data record form

序号	第 1 组		第 2 组		第 3 组	
	扭矩 / (N · m)	夹紧力 / N	扭矩 / (N · m)	夹紧力 / N	扭矩 / (N · m)	夹紧力 / N
1	0.9512	1760.0	1.0312	1843.3	0.9708	1781.3
2	0.9528	1767.3	0.9754	1845.0	0.9936	1854.7
3	0.9504	1775.0	1.0232	1897.3	1.1016	1935.3
4	1.0360	1864.0	1.0692	1914.0	0.8804	1724.3
5	1.0172	1837.3	0.9252	1809.3	1.0224	1809.0
6	0.8948	1718.0	0.9731	1856.7	0.9288	1805.3
7	1.0100	1834.7	1.0424	1759.3	0.8924	1832.7
8	0.9848	1788.3	1.0316	1856.0	0.9768	1787.0
9	1.0312	1841.0	0.9782	1783.3	0.9592	1859.3
10	1.0916	1947.3	0.9160	1850.0	0.9776	1842.6
11	0.9428	1832.0	1.0536	1842.0	0.9932	1829.7
12	1.0084	1896.7	0.9812	1838.7	0.9596	1828.0
13	0.9776	1887.7	0.9136	1846.7	0.9696	1794.7
14	1.0012	1842.7	0.9792	1774.0	1.0304	1855.3
15	0.9188	1766.7	0.9308	1808.7	0.9732	1810.7
16	0.9736	1829.3	1.0956	1937.3	0.9816	1849.3
17	0.9464	1840.0	0.9840	1806.0	0.9348	1743.3
18	1.0280	1837.3	0.9848	1821.3	1.0780	1809.7
19	0.9804	1841.3	0.9242	1774.7	1.0016	1826.0
20	1.0772	1902.0	0.8696	1717.3	1.0356	1883.3

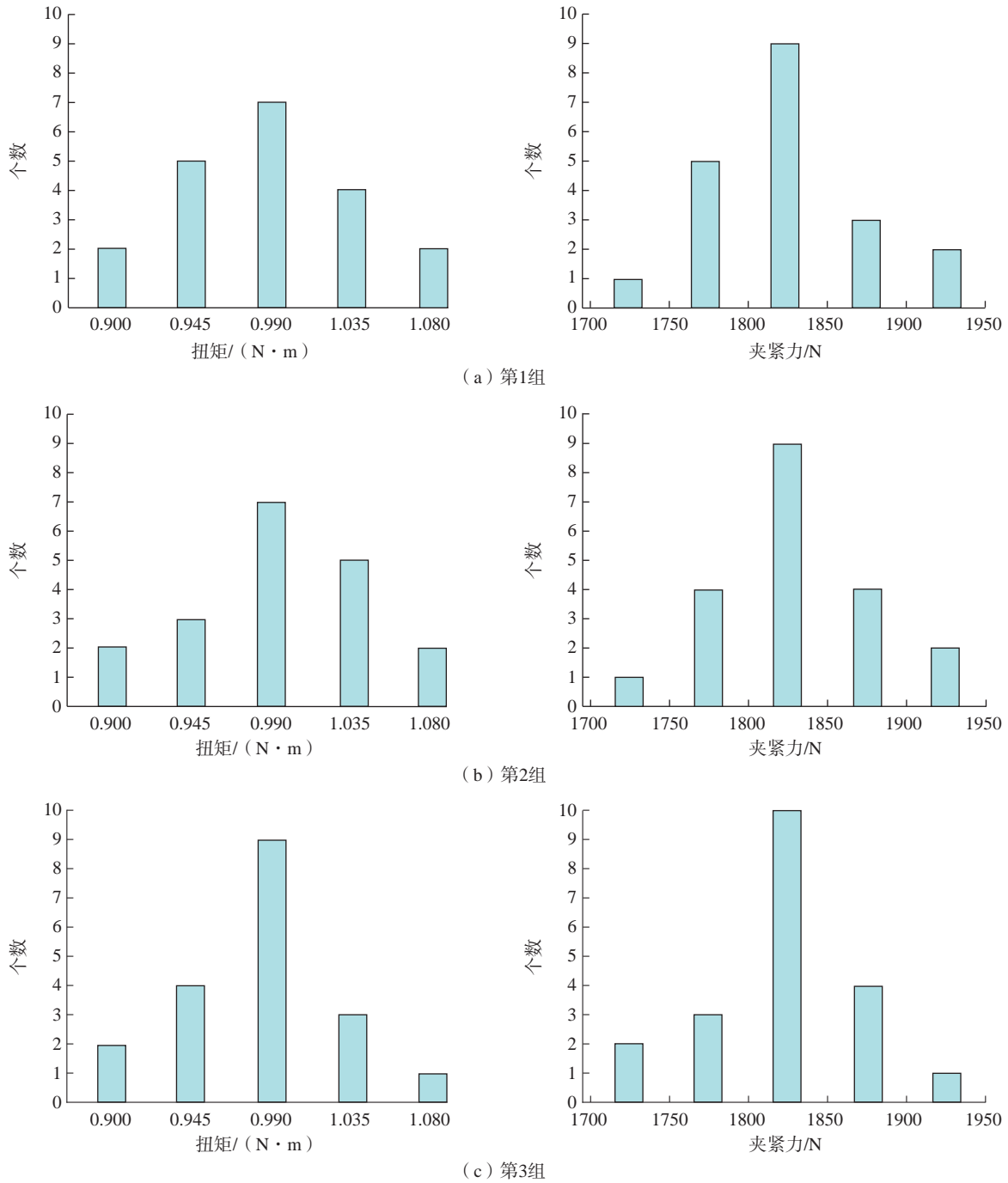


图8 概率分布直方图  
Fig.8 Histogram of probability distribution

$$u_{F1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x'_i - x'_T)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x'_i - x'_T)^2}{10-1}} = 9.8 \text{ N} \quad (6)$$

式中,  $x_i$  为扭矩测量值;  $x_T$  为扭矩平均值;  $x'_i$  为夹紧力测量值;  $x'_T$  为夹紧力平均值。

传感器系统测量精度为 1%, 视其为平均分布, 则不确定度计算为

$$u_{T2} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = 0.0577 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7)$$

$$u_{F2} = \frac{\Delta'_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = 57.7 \text{ N} \quad (8)$$

式中,  $\Delta_{\text{仪}}$  为扭矩传感器测量误差;  $\Delta'_{\text{仪}}$  为压力传感器测量误差。

由于不确定  $u_{T1}$  与  $u_{T2}$ ,  $u_{F1}$  与  $u_{F2}$  之间相互独立, 故

表2 测量数据  
Table 2 Test data

序号	扭矩/(N·m)	夹紧力/N
1	1.0096	1832.3
2	1.0072	1838.7
3	0.9932	1822.0
4	0.9964	1835.7
5	1.0104	1857.3
6	1.0070	1842.3
7	1.0058	1839.0
8	0.9905	1828.7
9	1.0086	1847.7
10	1.0052	1840.0

合成标准不确定度为

$$u_T = \sqrt{u_{T1}^2 + u_{T2}^2} = 0.0591 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (9)$$

$$u_F = \sqrt{u_{F1}^2 + u_{F2}^2} = 58.5 \text{ N} \quad (10)$$

## 6 结论

(1) 为了探究气动安装工具输出效果的波动性,本研究设计并搭建了一种临时紧固件安装工艺测试与验证装置,其可方便地实现输入气压的调节、扭矩及夹紧力的输出、气动安装工具及临时紧固件的更换。

(2) 对装置进行了测量系统分析,测得皮尔逊相关系数均值为 0.924,验证了该系统的重复性。利用 Bessel 公式计算了其扭矩测量不确定度为 0.0591 N·m,夹紧力测量不确定度为 58.5 N。结果证明了所设计装置可用于临时紧固件安装工艺参数的测量。

## 参考文献

[1] 范玉青. 大型飞机总装配中的若干问题[J]. 航空制造技术, 2012, 55(1/2): 78–80.

FAN Yuqing. Problem on final assembly of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 78–80.

[2] SMITH S O, MCCLURE T. New blind, doweling, temporary fastener design and testing[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale: SAE International, 2009.

[3] 曲巍崑,唐伟,毕运波,等. 避免强迫装配和提升效率的预连接工艺规划[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(8): 1561–1569.

QU Weiwei, TANG Wei, BI Yunbo, et al. Pre-joining processes plan to avoid forced assemblies and improve efficiency[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(8): 1561–1569.

[4] 王赛,胡国良,江美丹,等. 螺栓预紧力测量装置的设计与应用[J]. 机械设计与制造, 2015(9): 233–235, 239.

WANG Sai, HU Guoliang, JIANG Meidan, et al. Design and

application of measuring device of bolt pre-tightening force[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(9): 233–235, 239.

[5] 邵国强,朱林波,洪军,等. 重卡螺栓连接扭矩-预紧力关系影响因素分析[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10): 14–21.

SHAO Guoqiang, ZHU Linbo, HONG Jun, et al. The factors influencing torque-preload relationship of bolted joints in heavy truck[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10): 14–21.

[6] OMIYA Y, FUJII M. Correlation on scatter between torque coefficient and bolt preload in pipe flange connection[C]//Proceedings of ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, Vancouver: 2016.

[7] 董达善,陈佳亮,刘海洋,等. 高强度螺栓扭矩系数研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 182–186.

DONG Dashan, CHEN Jialiang, LIU Haiyang, et al. Research on torque coefficient of high-strength bolt[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(16): 182–186.

[8] 王晓斌,黄焱凯,严星,等. 拧螺栓和拧螺母对螺纹轴向预紧力的影响研究[J]. 制造技术与机床, 2019(6): 189–193.

WANG Xiaobin, HUANG Chikai, YAN Xing, et al. Study on the influence of screwing bolts and nuts on thread axial preload[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(6): 189–193.

[9] 赵兵,张守阳,王辉,等. 九级盘装配连接螺栓预紧力评估与分析[J]. 中国机械工程, 2020, 31(13): 1570–1576.

ZHAO Bing, ZHANG Shouyang, WANG Hui, et al. Evaluation and analysis on bolt pre-tightening forces of nine-stage disc assembly[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(13): 1570–1576.

[10] 李小强,孟庆阔,杜一凡,等. 拧紧策略对航空发动机单螺栓连接预紧力的影响[J]. 机械工程学报, 2020, 56(13): 231–241.

LI Xiaoqiang, MENG Qingkuo, DU Yifan, et al. Influence of tightening strategy on pre-tightening force of aero-engine single-bolt connection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 231–241.

[11] ZAITSEVA N, LUPULEAC S, PETUKHOVA M, et al. High performance computing for aircraft assembly optimization[C]//2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1–6.

[12] 叶卫民,赵德勇,刘沃野,等. 测量系统分析方法评述及应用[J]. 统计与决策, 2013(2): 83–86.

YE Weimin, ZHAO Deyong, LIU Woye, et al. Review and application of analysis method of measurement system[J]. China Civil Engineering Journal, 2013(2): 83–86.

[13] 窦智. 测量系统分析在制造业中的实际应用[J]. 电源技术, 2009, 33(11): 1022–1025.

DOU Zhi. Application of measurement system analysis in manufacturing[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009, 33(11): 1022–1025.

[14] 刘新宇. 大尺寸结构件检测方法研究及不确定度分析[J]. 航空制造技术, 2015, 58(7): 76–79.

LIU Xinyu. Research on measurement of large volume structure and uncertainty analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(7): 76–79.

通讯作者: 王华,教授,博士,研究方向为数字化装配工艺、制造过程监测与控制、制造工艺仿真。

(责编 七七)

引文格式: 邓海洲, 王大涛, 王良, 等. 非实例化标准件消耗式装配工艺设计技术研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 100-106.

DENG Haizhou, WANG Datao, WANG Liang, et al. Research on consumable assembly process design technology of non-instantiated standard parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 100-106.

## 非实例化标准件消耗式装配工艺设计技术研究\*

邓海洲<sup>1</sup>, 王大涛<sup>1</sup>, 王良<sup>1</sup>, 贾晓亮<sup>1</sup>, 刘明星<sup>2</sup>, 宋洪鹏<sup>1</sup>

(1. 中航沈飞民用飞机有限责任公司, 沈阳 110000;

2. 航空工业信息技术中心, 北京 100028)

[摘要] 针对飞机产品数据中大量非实例化标准件尚未实现消耗式工艺设计的难题, 提出了依据装配需求对非实例化标准件进行二级拆分及消耗式分配的思路。结合业务架构流程梳理, 采用 CATIA CAA 二次开发开展非实例化标准件 R 模型的工位级拆分, 并系统研究了装配工艺设计过程中非实例化标准件的消耗式分配和管理技术, 在某项目产品上开展了系统测试及应用验证, 完成了 AO 创建, 实现了所有参装件的消耗式装配工艺设计, 保证了制造数据与工程数据的一致性和准确性, 取得了较好的应用效果。

关键词: 非实例化; 标准件; R 模型; 工位; 消耗式工艺设计

### Research on Consumable Assembly Process Design Technology of Non-Instantiated Standard Parts

DENG Haizhou<sup>1</sup>, WANG Datao<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, JIA Xiaoliang<sup>1</sup>, LIU Mingxing<sup>2</sup>, SONG Hongpeng<sup>1</sup>

(1. AVIC SAC Commercial Aircraft Company Ltd., Shenyang 110000, China;

2. AVIC Digital Center, Beijing 100028, China)

[ABSTRACT] Aiming at the problem that a large number of non-instantiated standard parts in aircraft product have not yet achieved consumable process design, the idea of two-level splitting and consumable allocation of non-instantiated standard parts according to assembly requirements is proposed. Combined with the business structure process, the secondary development of CATIA CAA was used to carry out the position-level split of the non-instantiated standard parts R model, and their consumable allocation and management technology of non-instantiated standard parts in the assembly process design process were systematically studied. System testing and application verification have been carried out on the some products, AO creation has been completed, the consumable assembly process design of all participating parts has been realized, the consistency and accuracy of manufacturing data and engineering data have been ensured, and good application results have been achieved.

**Keywords:** Non-instantiation; Standard parts; R model; Station; Consumable process design

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.100

消耗式工艺设计通常是指在 MBD 装配数据源基础上, 在飞机工艺设计过程中对零件、标准件等主要数据元素的分配属性及状态进行标识和记录, 确保数据分配准确、完整、可追溯, 从而有效地避免数据错误、漏

分配的一种装配工艺设计方法。航空标准件是现代飞机的基本组成部分, 通常占飞机零件数量的 60%~90%。在飞机的设计过程中, 大量使用标准件, 这给飞机的设计、制造和装配带来很大的便利<sup>[1]</sup>, 但对于飞机装配而

\* 基金项目: 民机专项技术研究项目(MJ-2018-G-55)。

言,如何将大量的零组件、标准件正确且完整地装配至飞机上,一直是工艺规划及设计过程研究的关键技术之一。为实现飞机装配数据的完整性和准确性,消耗式工艺技术逐渐在工艺规划及设计过程中应用发展<sup>[2]</sup>。

DELMIA 软件是达索公司的一款可针对飞机装配中的工艺设计及按其设计要求进行装配仿真验证的软件<sup>[3]</sup>,国内外航空制造企业普遍采用该软件进行飞机装配工艺设计工作。大型飞机标准件数量都在数十万甚至上百万件以上,采用实体建模将会产生极大量的数据,因此目前飞机模型中标准件设计大都采用点、线等元素进行简化表达,无法使用 DELMIA 中的标准功能进行标准件的工艺规划<sup>[4]</sup>。本文将这种简化表达、无实体模型的标准件统称为“非实例化标准件”。在科研飞机试制阶段,设计变更频繁、技术状态控制难度大,传统二维工艺设计依靠人工在工艺计划表中标记、划分数量如此庞杂的标准件装机情况,很难保证没有错漏装的问题<sup>[5]</sup>。近年来,国内部分飞机型号在三维可视化消耗式装配工艺设计研究应用方面取得了技术突破,但对于非实例化标准件的工艺设计目前尚未找到高效实用的技术方法,使得设计、装配及生产管理数据中标准件信息一致性问题没有从根本上解决,是飞机所有参装件 100% 实现消耗式工艺设计“最后一公里”工程中的一大难题。

本文在基于模块的飞机构型管理体系下,采用 Windchill 系统平台,针对 CATIA 设计软件下非实例化标准件消耗式分配工艺设计难题,从业务流程、标准件二级拆分及消耗式分配、变更管理等方面进行了系统研究,形成了完整的解决方案,并基于某项目组件开展了功能测试和比较系统的工程应用实践,验证了方案可行性。

## 1 非实例化标准件消耗式装配工艺设计的总体思路和业务架构流程

### 1.1 总体思路

非实例化标准件一般在 CATIA 组件 (\*.CATProduct) 文件所对应的 CATIA 零件 (\*.CATPart) 文件中表达,该 CATIA 零件文件在不同项目中有不同的名称,如在 C919、MA700、AG600 等机型中该文件简称为 R 模型,为论述方便,本文中统一称为 R 模型文件。在该 R 模型文件中一般包含大量的表达非实例化标准件的点、线模型。由于飞机结构的复杂性,同一 R 模型通常会包含多个标准件牌号规格,且数量较大、分布较广,装配工艺设计时,需将 R 模型下的非实例化标准件分配至站位-工位-工序-工步,以满足消耗式工艺设计及相关管理的需求。由于非实例化标准件是 R 模型对象下一级的构成元素,系统无法像实例化的零件那样对其进行分

配。对于历史项目,设计部门在划分构型项,确定设计模块(简称 DM)时,并未充分考虑装配工艺设计需求,划分不够细致,导致大量 DM 下的零件、标准件在工艺设计时需要跨工位进行多次分割和再分配。

为解决上述问题,有以下两种方案可供工艺系统选择。

方案 1: 提请设计部门按装配工艺设计需求对 DM 重新划分,一般也需要对 DM 下 R 模型进行拆分,确保 DM 不需要跨工位分配;

方案 2: 制造部门按装配需求对 DM 进行二次划分,同时也需要对 R 模型进行重新分割,形成新的工艺组件模块,即制造模块(MDM),确保 MDM 不需跨工位分配。

飞机在整个研制阶段,甚至批产后都是一个动态的持续改进过程。围绕精益生产这一核心目标,制造工艺系统根据传统制造经验,利用生产价值流程分析等方法对产品装配工序进行多轮迭代优化分析<sup>[6]</sup>,产品装配流程本身也会因工艺质量改进或满足生产线速率变化开展持续的迭代优化,因而方案 1 会引发持续性的、数据庞大的设计构型更改工作,与更为刚性的产品优化更改发生资源冲突,同时由于国内普遍存在设计与工艺分离的制度障碍,导致方案 1 实施难度很大;相对于方案 1 是从数据源头进行更改来说,方案 2 需要工艺进行设计构型的二次构建,也称为制造构型,虽然也需要做大量数据重构工作,但由于其主要由制造工艺系统实施,不存在大的技术和管理障碍,实施过程相对可控,可操作性更强。

因此,本文选择方案 2,即由制造部门按装配工艺设计需求对 DM 进行拆分,针对其内部采用 R 模型定义的非实例化标准件进行二次分割,此方法过程管理相对灵活,兼顾了相关资源的可承受性。

### 1.2 消耗式工艺设计的总体业务架构

国内飞机制造企业的装配工艺设计工作流程通常分为顶层装配工艺规划和详细装配工艺规划两个层级。顶层工艺规划主要用于划分装配工位,实现并支撑工位级工艺资源的配套,如零件、标准件、工装工具、设备、人员等;详细装配工艺规划通常是在具体的装配工位内进行装配工序设计及工步设计。

本文在继承现有工艺设计习惯和生产管理模式的基础上,将非实例化标准件的消耗式工艺设计流程嵌入到现有成熟的三维工艺设计流程中,分为 1 级(工位级)和 2 级(工步级)两个层级。

第 1 级工艺设计依托 CATIA 软件和 Windchill 系统平台,完成顶层 MBOM 规划及参装件工位级消耗式分配;

第 2 级工艺设计依托 DELMIA 和 Windchill 系统平台,完成底层 MBOM 规划及参装件工步级消耗式分配,并考虑了必要的人机工程分析的工艺仿真与验证需

求,制定总体业务架构如图 1 所示,其中橘色部分为非实例化标准的 2 级分配环节。

在 MBOM 顶层装配工艺规划的制造模块拆分环节,利用 CATIA CAA 开发的标准件拆分工具集,对需跨工位的非实例化标准件按装配需求进行拆分,将拆分后的标准件重新挂载到 MBOM 结构中对应工位上,从而实现所有参装件(零件、标准件)完整的顶层 MBOM 结构,随后将所有参装件分配至相应装配工位。

在 MBOM 详细装配工艺规划阶段的 AO 详细设计环节,针对 1 级分配后的非实例化标准件,通过 Windchill 与 DELMIA 集成,将标准件再次按装配需求拆分并分配至工步,形成结构化的三维工艺指令<sup>[7]</sup>。

## 2 非实例化标准件消耗式分配技术方法

### 2.1 实例化标准件的 1、2 级消耗式分配流程

非实例化标准件 R 模型的 1 级和 2 级消耗式分配的详细流程如图 2 所示。

从 Windchill 系统中将某一工位相关的模块(含零组件、R 模型)下载并导入 CATIA,利用 CATIA CAA 二次开发的标准件拆分工具集将 R 模型按照装配需求拆分为多个子 R 模型,如 R1、R2,并构建装配关系,随后回传拆分后的子模型至 Windchill,并关联至相应工位下,到此完成了 1 级拆分与分配。在完成 AO 规划后,将 1 级消耗式分配的结果及零部件信息一起传递给 DELMIA,基于 DELMIA 的 EIP 模块将工位中子 R 模

型各个点分配至对应 AO 的工步中,并将最终分配结果回转至 Windchill,由此完成 2 级消耗式分配。

通过上述工作流程,可将消耗式工艺设计的范围由零组件扩展至非实例化标准件,实现所有参装件 100% 消耗式工艺规划和管理,从而可保证 MBOM 数据完整性和准确性,最终保障下游采购、物料配套、生产管控、质量追溯、成本归集等环节数据的协调统一。

### 2.2 非实例化标准件的 1 级消耗式分配 - 工位级

用 CAA 对 CATIA 进行二次开发是 CATIA 二次开发方式中最重要的一种,能实现从简单到复杂的一系列扩展功能,且操作界面友好,与 CATIA 本身无缝集成,是国内高校和软件公司普遍采用的方式<sup>[8]</sup>。受限于 DELMIA 多次分配功能局限性以及 R 模型的特殊性,本文通过 CATIA CAA 二次开发标准件分配工具集并集成至 CATIA 中(图 3),用于完成标准件拆分和工位级分配。

从 Windchill 中下载 MDM 数据包至本地,在 CATIA 中使用标准件分配工具集中“导入 MDM 文件”功能后打开相关数模,其初始数据结构示例见图 4。使用“标准件分配”功能将初始 R 模型根据业务要求拆分成多个子 R 模型,如 R1、R2 等,然后将其分配至不同的制造模块下(图 5)并保存于本地。随后在 Windchill 端从本地上传分配结果,由于从 Windchill 向 CATIA 导入 MDM 数据时 XML 格式文件中已包含产品结构信息,在接收分配好的数据时能够准确将其挂载在相应的 BOM 下(图 6)。

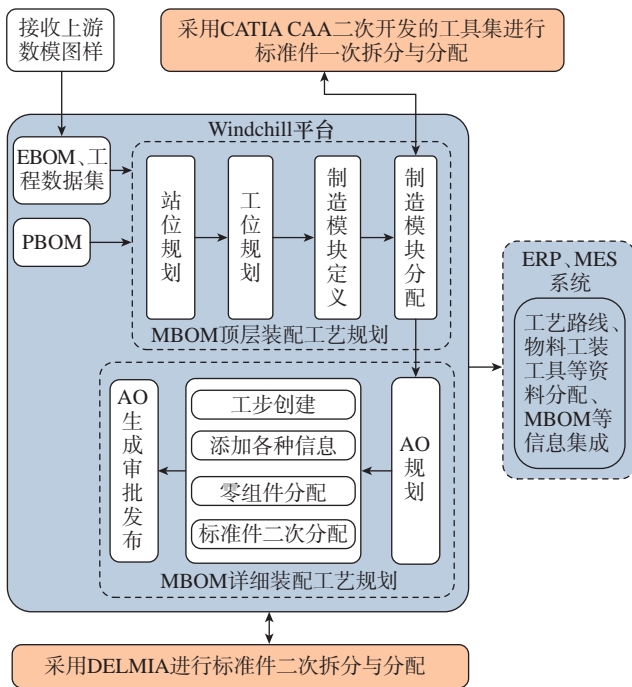


图 1 消耗式工艺设计业务架构

Fig.1 Consumable process design business architecture

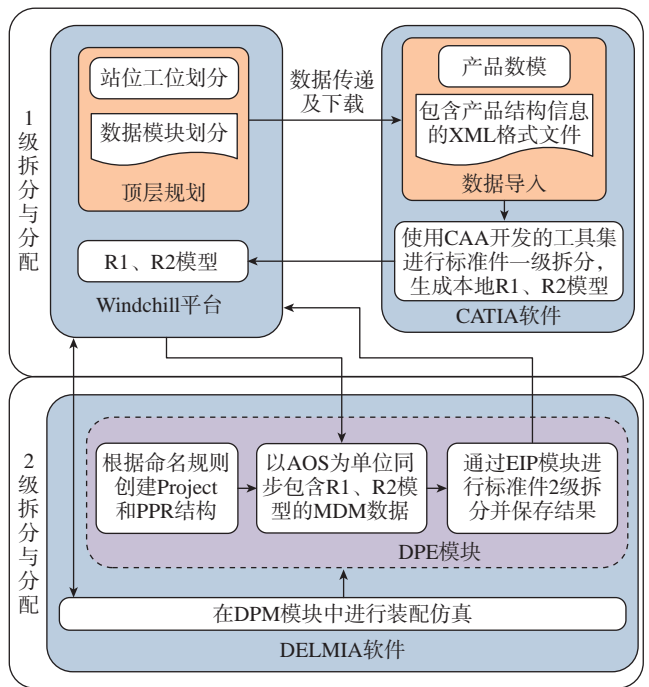


图 2 分配流程图

Fig.2 Distribution flow chart

### 2.3 非实例化标准件的 2 级消耗式分配 - 工步级

工艺人员在编写 AO 时,需要在相应工步下体现出所使用标准件牌号和数量,因此需要将拆分后 R1、R2 等子模型中的标准件再次拆分并分配到具体的工步下。首先从 Windchill 系统中导入包含子 R 模型的 MBOM 结构至 DELMIA (含 XML 格式接口文件),按装配需求基于 EIP 模块将工位下的标准件消耗式分配到各工序的具体工步中,随后将标准件二次分配信息以 XML 格式列表回传给 Windchill 系统,由此完成了工步级的二次分配。具体流程如图 7 所示。



图 3 集成到 CATIA 软件中的标准件分配工具集

Fig.3 Standard part allocation toolset integrated into CATIA software



图 4 R 模型 1 级拆分之前的数据结构

Fig.4 Product data structure about R model

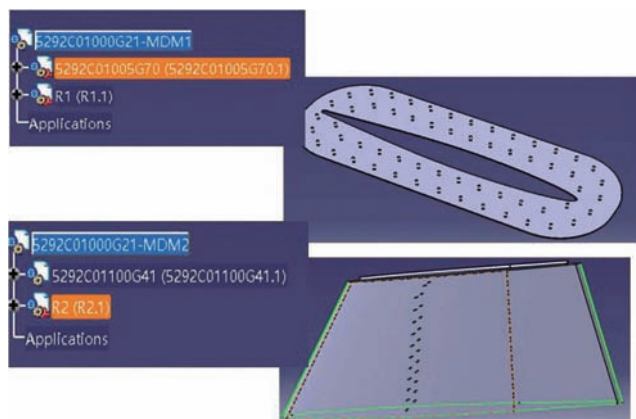


图 5 R 模型拆分成 R1 和 R2 并分配至不同制造模块

Fig.5 R model split into R1 and R2 and allocated to different manufacturing modules

在 DELMIA 的 DPE 模块完成工艺结构树搭建后,通过 DELMIA 中的 DPM 模块与 DPE 模块之间的 M-HUB 接口,在 DPM 中打开需要分配的工位节点,利用 EIP 模块中 OOTB 功能,将工位中 R1、R2 文件中的点、线、圈等分配到对应的工序步中,分配完成以后在结构树的工步节点下选择已经分配完成的标准件,选择对应的点线,在三维空间和结构树上都会高亮显示。在 DPM 中保存后的结果数据自动同步到 DPE 模块中,利用开发接口将结果数据以 XML 的格式回传给 Windchill 系统, Windchill 系统接收工步级标准件分配结果以列表的形式链接到工步节点下,该列表中记录了该工位下的标准件号、标准件数量等信息,并不创建具体的标准件实例。具体过程和结果如图 8 所示。通过上述步骤最终实现工步级标准件的可视化消耗式分配。

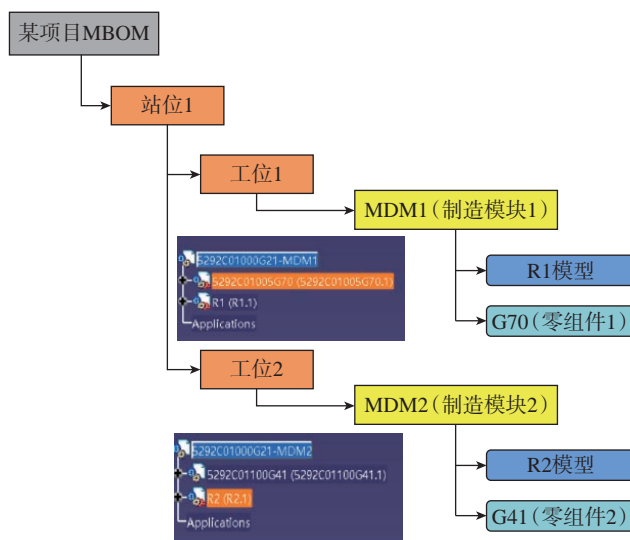


图 6 工位级消耗式工艺设计的 MBOM 结构

Fig.6 MBOM structure of station level consumable process design

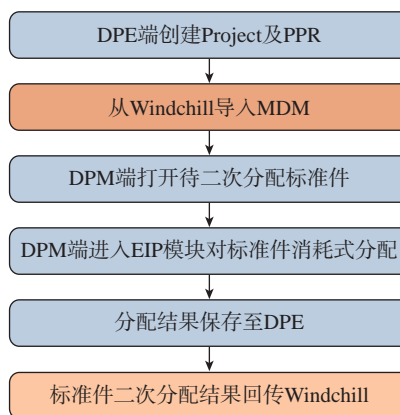


图 7 非实例化标准件的二级消耗式分配流程

Fig.7 Secondary consumable allocation flow of non-instantiated standard parts

2.4 非实例化标准件更改工艺管理

飞机研制过程中的设计更改不仅频次高,而且费时费力<sup>[9]</sup>,因此更改管理是飞机研制生产过程中数据管理的主要工作。依据标准件更改描述文件,判断标准件更改量是否较大,若较大时,对新升版的新R模型重新划分子R模型,重新进行一级分配及后续工作。针对更改量较小的情况,鉴于标准件的数量大,为保证标准件更改的完整准确贯彻且减少重复工作,本文采用CATIA CAA二次开发R模型对比工具集进行R模型自动对比分析,按分析结果只更新新增或更改的标准件子R模型。标准件的更改贯彻流程图如图9所示。

R模型对比工具集采用遍历算法,将新版本的R模型与旧版本已分配好的子R模型进行对比,对比的类型包含代表非实例化标准件的点、线和圈,根据元素特征采取差异化对比规则。其中点的对比根据点的空间坐标,线的对比根据线的两个端点进行,而圈的对比则根据圆的中心点和半径。

在执行R模型对比功能时,具体工作过程如图10所示。

采用R模型对比功能,可实现相关更改范围的精准化识别和精准化更改,最大化减少工艺人员修改工艺文件的工作量,同时也可减少相关管理成本。

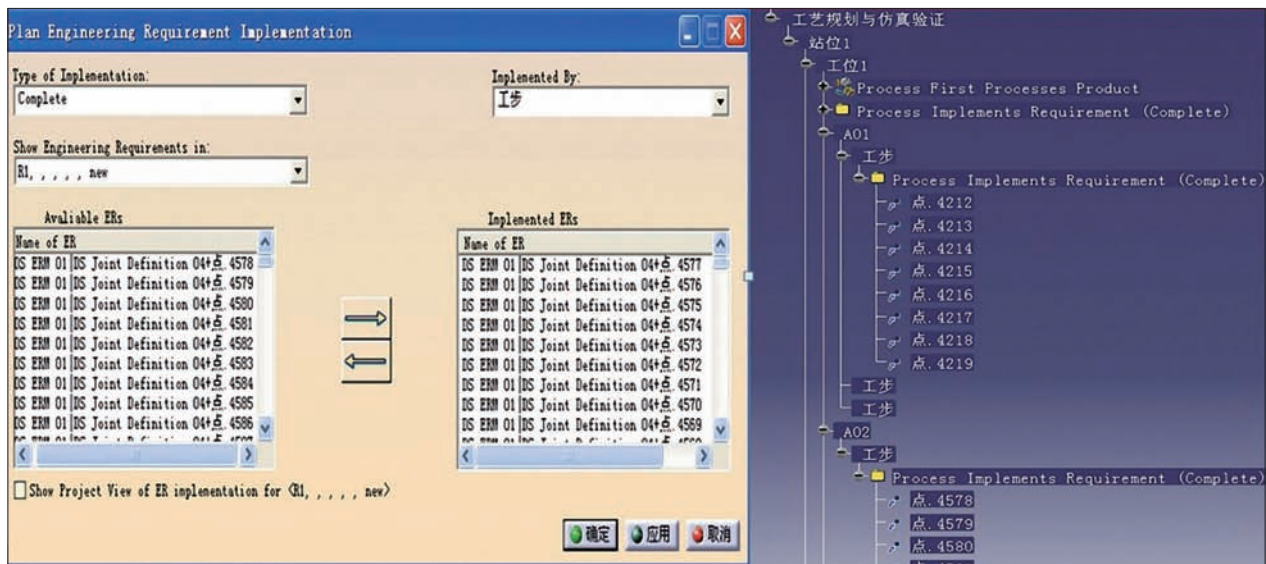


图8 工位中R1、R2的点(非实例化标准件)分配到工步

Fig.8 Assign R1, R2 points (non-instantiated standard parts) to work steps

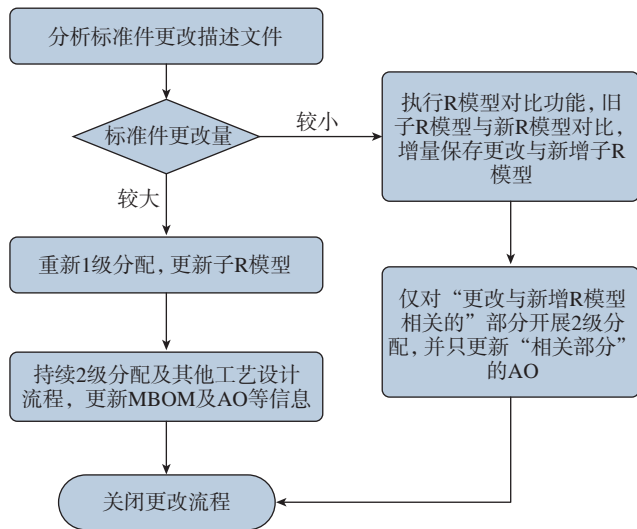


图9 标准件更改贯彻流程图

Fig.9 Flow chart of standard parts changes

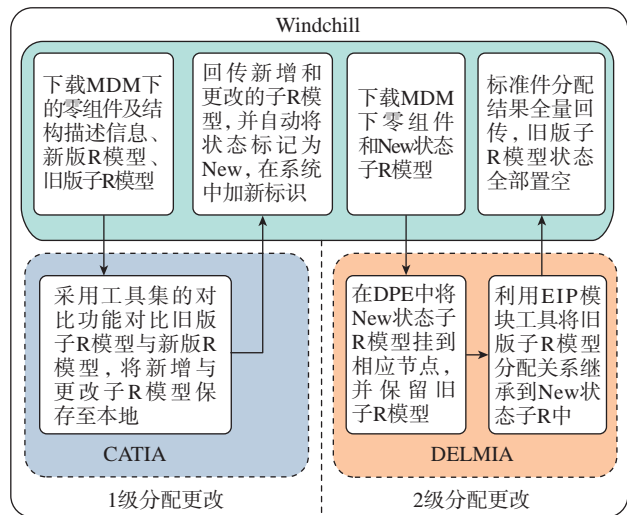


图10 标准件对比过程

Fig.10 Standard parts comparison process

### 3 非实例化标准件消耗式装配工艺设计的应用

本文在非实例化标准件消耗式装配工艺设计技术研究的基础上,基于某项目产品对所开发系统进行了功能测试及相关应用验证,图 11~15 分别是验证过程中的工作场景。图 11 是某产品下缘组件的数模及结构树,从左侧产品结构树可知,该组件的所有连接定义均挂在 R\_5456C0110G21 下,从右侧数模可知该 R 模型下标准件分布在该组件内各零件的所有连接部位(亮显的点线集)。图 12 是采用集成至 CATIA 软件的标准件分配工具集进行标准件一次分配的场景,其右侧数模中亮显的点线集是在 R 模型基础上拆后得到的子 R 模型中的元素。图 13 是在 DELMIA 软件环境下使用 EIP 模块进行标准件工步级分配的场景,从左侧结构树中可看到挂在某 AO 下具体工步中的标准件。图 14 是 AO 中具体工步的内容及标准件列表,图 15 是经过审签发布的 AO 示例。

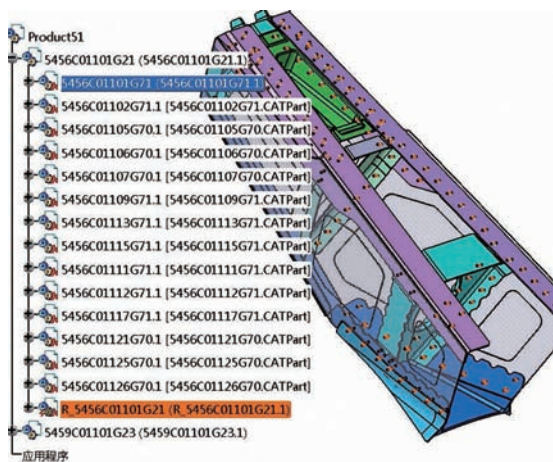


图 11 产品数模及结构树

Fig.11 Model and structure tree of product

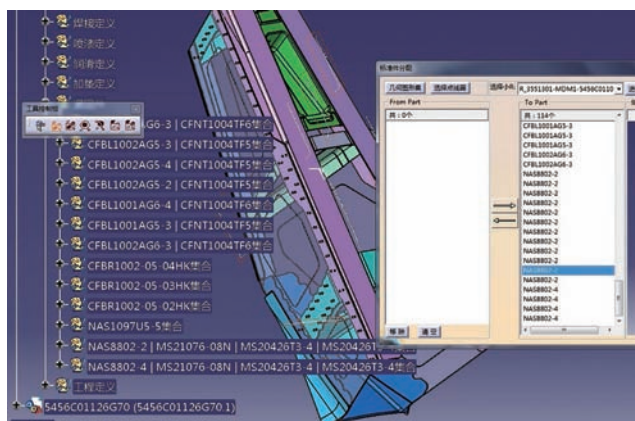


图 12 标准件一次分配

Fig.12 First allocation of standard parts

通过基于某项目产品的消耗工艺设计实践和应用验证,将装配工艺设计消耗管理范围从零件扩展至标准件,构建出完整准确的 MBOM,实现了该产品下所有参装件(零件和标准件)的消耗式工艺设计,生成了对应的 AO,并用于指导生产。从实际效果来看,由于对所有参装件使用了消耗工艺设计方法,确认所有的参装件(零件和非实例化标准件)被消耗式分配到具体的工步中,工艺设计工作的准确率得到了提高,且所有的设计过程均可追溯,AO 和 MBOM 的准确率得到了保证。

目前,公司已经开始在某项目后机身前段、吊挂、垂尾等工作推广使用本文的研究成果,并着手论证向其他项目推广应用的技术途径。

### 4 结论

本文针对飞机设计中大量非实例化标准件无法进行消耗式工艺设计的难题,完成了基于 Windchill 和 CATIA 及 DELMIA 集成的业务架构流程研究、非实例化标准件

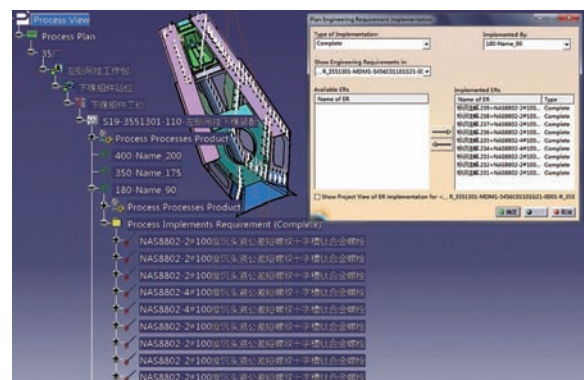


图 13 利用 DELMIA EIP 模块将标准件二次分配至具体工步

Fig.13 Standard parts allocated to specific work steps using DELMIA EIP module

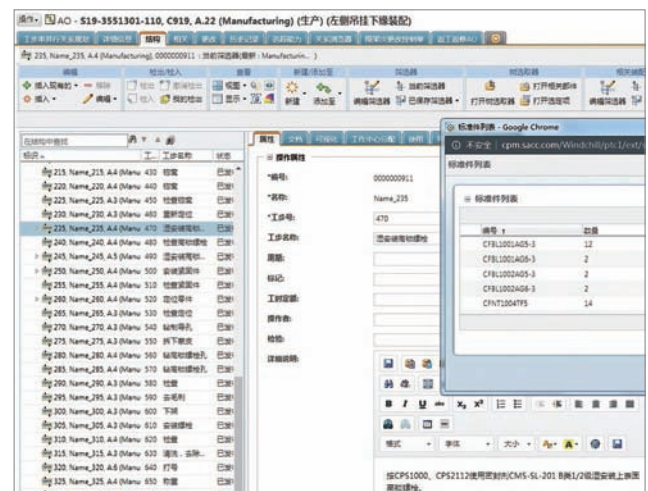


图 14 标准件二次分配至 AO 的具体工步中

Fig.14 Standard parts allocated to AO specific work step

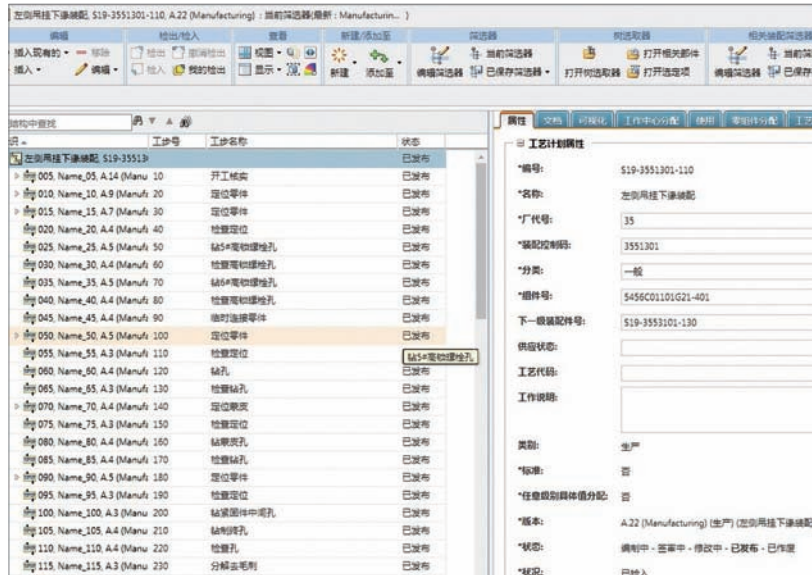


图 15 采用消耗式装配工艺设计生成 AO

Fig.15 AO generated by consumable assembly process design

2 级拆分与消耗式分配方法研究和相关更改管理研究与实践,解决了飞机所有参装件 100% 实现消耗式工艺设计“最后一公里”工程中的难题,相关成果已开始在产品上推广应用。随着更大范围及更深入的应用推进,相关业务流和技术方法还将进一步完善和改进。随着设计制造一体化的深入,在后续新研项目上将大力推进产品装配工位划分与产品设计模块划分工作的高度并行与深度融合,最大程度实现设计模块定义与制造模块划分需求的统一,从根本上减少工艺部门工艺设计及更改管理的压力,进而为产品快速研制和智能化制造提供更优质的技术基础。

参考文献

[1] 杜宝江,王翔,朱晨旗,等. 基于飞机标准件装配设计技术的研究[J]. 现代制造工程, 2016(3): 88-91.  
 DU Baojiang, WANG Xiang, ZHU Chenqi, et al. Study of rapid assembly technology based on aircraft standard parts[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(3): 88-91.  
 [2] 贾大伟. 飞机 MBOM 及装配工艺设计过程中消耗式管理关键技术研究[J]. 智能制造, 2020(5): 40-42.  
 JIA Dawei. Research on key technology of consumption management in aircraft MBOM and assembly process design[J]. Intelligent Manufacturing, 2020(5): 40-42.  
 [3] 冷毅勋,代正会,赵轶,等. DELMIA 数字化装配工艺设计与过程仿真流程[J]. 中国制造业信息化, 2012, 41(2): 40-42.  
 LENG Yixun, DAI Zhenghui, ZHAO Yi, et al. DELMIA digital assembly process design and process simulation flow[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2012, 41(2): 40-42.  
 [4] 巩玉强. 基于 MBD 的飞机三维数字化装配工艺设计与应用[J]. 制造业自动化, 2014, 36(22): 103-107.

GONG Yuqiang. Aircraft 3D digitized assembly process design and application based on MBD[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(22): 103-107.

[5] 郭洪杰. 工艺模型驱动的物料动态精准配送技术[J]. 航空制造技术, 2020, 63(1/2): 39-45.

GUO Hongjie. Dynamic precision material distribution technology driven by process model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(1/2): 39-45.

[6] 杨国荣,来云峰,解安生,等. 新舟飞机智能化精益生产线构建技术研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(12): 24-30.

YANG Guorong, LAI Yunfeng, XIE Ansheng, et al. Research on construction technology of intelligent lean production line of MA aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(12): 24-30.

[7] 李婉丽,解安生,尚琰,等. 基于模块的飞机消耗式三维工艺设计技术研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(4): 84-90.

LI Wanli, XIE Ansheng, SHANG Yan, et al. Research on three dimensional process design technology of aircraft consumption based on module[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(4): 84-90.

[8] 郭喜锋,高红,詹有河,等. 一种基于 MBD 的部件装配工艺设计辅助系统[J]. 航空制造技术, 2016, 59(6): 72-75, 79.

GUO Xifeng, GAO Hong, ZHAN Youhe, et al. A component assembly process design support system based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(6): 72-75, 79.

[9] 乔玉良. 飞机设计更改贯彻执行及系统实施研究[J]. 装备制造技术, 2014(11): 186-188.

QIAO Yuliang. Aircraft design change implementation and system implementation study[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(11): 186-188.

通讯作者: 邓海洲,高级工程师,主要研究方向为产品数据管理、装配工艺、数字化制造等。

(责编 七七)

引文格式: 沙智华, 李伟奇, 马付建, 等. 角盒类零件加工特征识别方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 107-113.

SHA Zhihua, LI Weiqi, MA Fujian, et al. Machining feature recognition method of corner box parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 107-113.

## 角盒类零件加工特征识别方法\*

沙智华<sup>1,2</sup>, 李伟奇<sup>1</sup>, 马付建<sup>1</sup>, 王国庆<sup>1</sup>, 王紫光<sup>1</sup>, 张生芳<sup>1,2</sup>

(1. 大连交通大学, 大连 116028;

2. 辽宁省轨道交通装备智能化技术重点实验室, 大连 116028)

**[摘要]** 为提高角盒类零件数控加工工艺规划速度, 研究加工特征自动识别过程, 提出基于识别方向单特征顺序图匹配的特征识别方法。结合角盒类零件加工工艺流程, 将加工特征分为正面加工特征、反面加工特征、正反双面加工特征、侧面加工特征 4 种类型。介绍了加工特征识别过程, 包括孔特征和过渡特征识别与抑制、单特征属性邻接图生成与分解、加工特征类型判别等关键步骤。建立了角盒类零件加工特征识别原型系统, 并通过角盒类典型零件验证所提方法的有效性与正确性。

**关键词:** 角盒类零件; 加工特征; 属性邻接图; 特征识别; 图匹配

### Machining Feature Recognition Method of Corner Box Parts

SHA Zhihua<sup>1,2</sup>, LI Weiqi<sup>1</sup>, MA Fujian<sup>1</sup>, WANG Guoqing<sup>1</sup>, WANG Ziguang<sup>1</sup>, ZHANG Shengfang<sup>1,2</sup>

(1. Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. Key Laboratory for Intelligent Technology in Railway Equipment of Liaoning Province, Dalian 116028, China)

**[ABSTRACT]** To improve the speed of NC machining process planning for corner box parts, the automatic recognition process of machining feature was researched, and a feature recognition method based on single feature sequence graph matching in recognition direction was proposed. According to the processing process of corner box parts, the machining feature was divided into four types of front machining feature, back machining feature, front and back machining feature, and side machining feature. The recognition process of machining feature was introduced, which included the key steps such as the recognition and suppression of hole and transition feature, the generation and decomposition of attributed adjacency graph, and the discrimination of machining feature types. The prototype system of the machining feature recognition of corner box parts was established. A corner box typical part was used to verify the validity and correctness of the proposed method.

**Keywords:** Corner box parts; Machining feature; Attribute adjacency graph; Feature recognition; Graph matching

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.107

随着我国航空工业的迅猛发展, 新型飞机朝着长航时、高搭载能力、高机动性的需求发展<sup>[1]</sup>。为减轻重量、提高结构刚度, 机身结构中开始大量应用具有复杂薄壁特征的角盒类零件。由于角盒类零件改型多, 工艺决策时需手动提取几何形状信息, 导致数控编程效率低下、

零件质量不稳定, 这些问题严重制约了航空航天领域的发展。加工特征作为加工几何信息和加工工艺的载体, 能有效实现角盒类零件的结构化表达, 将加工特征与加工工艺进行关联, 能够缩短数控加工工艺准备周期, 提升加工工艺准备的规范化, 从而提高角盒类零件数控编

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52075066); 辽宁省重点研发计划资助项目(2019JH2/10100033); 大连市科技创新基金(2021JJ12GX009)。

程效率和质量<sup>[2]</sup>。

目前为止,典型的加工特征识别方法包括基于规则的方法<sup>[3]</sup>、基于图的方法<sup>[4]</sup>、基于痕迹的方法<sup>[5]</sup>、凸包分解法<sup>[6]</sup>、单元体分解法<sup>[7]</sup>以及基于数据驱动的加工特征识别方法<sup>[8]</sup>。基于图的方法是研究应用最多的方法之一, Joshi 等<sup>[9]</sup>在面边图的基础上,将边的凹凸性表示为弧的属性,首次提出了基于属性邻接图(Attributed adjacency graph, AAG)的特征识别方法。Marefat 等<sup>[10]</sup>首次采用添加虚链的方法来提高图匹配识别方法在识别相交特征方面的能力。谢飞等<sup>[11]</sup>以零件模型中的几何信息与拓扑信息为基础构建加权属性邻接图,结合子图同构算法与相关判定规则实现常见加工特征的识别。罗晨等<sup>[12]</sup>在几何特征匹配时考虑其几何形状和拓扑关系,通过寻找节点对应约束的最大相似连通子图综合确定几何特征相似度,建立了一种夹具设计案例特征表示的新型检索机制。黄丰云等<sup>[13]</sup>针对传统图匹配方法中子图同构算法时间复杂度高和特征表达二义性等问题,提出了基于扩展属性邻接图和图同构的特征识别方法。基于图的方法能够高效识别零件中的独立特征和部分相交特征,但在处理复杂零件相交特征时仍显不足。主要体现在痕迹的生成和补全算法依赖预先定义的特征相交模式,而复杂零件相交特征的模式又十分庞杂,无法事先完全定义。此外该方法直接获取零件 AAG,在 AAG 中处理过渡特征的抑制问题,导致分解 AAG 获得最小属性邻接图(Minimum attributed adjacency graph, MAAG)过程复杂,特征识别的速度较慢。

角盒类零件中存在多个特征相交形成的复合特征,直接采用基于图的特征识别方法识别过程复杂,为提高角盒类零件特征识别效率降低算法复杂度,本文在上述研究的基础上,提出了一种基于识别方向单特征顺序图匹配的特征识别方法:结合角盒类零件的加工工艺特点对加工特征进行分类;识别并抑制零件模型中的孔特征与过渡特征;沿着主辅识别方向生成单特征 AAG,分解 AAG 获得 MAAG,将 MAAG 与用户预先定义特征 AAG 进行子图匹配;结合规则确定加工特征的类型,获得特征识别结果。

## 1 加工特征的分类方法

### 1.1 基本概念定义

角盒类零件是具有 3 个相互垂直的薄壁结构(底板、侧壁和筋板),且通过底板、侧壁外表面与其他零件和结构进行连接的小型零件。加工工艺为正面加工与反面加工,部分孔特征需要侧面加工。角盒类零件如图 1 所示。为更好地识别加工特征,对角盒类零件的相关基本概念做如下定义。

(1)底板、侧壁、筋板:遍历零件模型拓扑面形成与  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴垂直的 3 个面集  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ,计算每个面集拓扑面面积和  $S_x$ 、 $S_y$ 、 $S_z$ ,面积和从大到小依次是底板、侧壁、筋板。筋板主要起加固零件的作用,除孔特征以外没有其他特征。

(2)主识别方向:与角盒底板垂直且由零件内腔指向底板,用于识别零件中大部分特征。

(3)辅助识别方向:与角盒侧壁垂直且由零件内腔指向侧壁,用于识别主识别方向下识别不到的特征。

(4)待识别面:与识别方向垂直的平面,构成单特征 AAG 的中心。

(5)邻接面:与待识别面相邻的面,构成单特征 AAG 的边缘。

(6)凹边、凸边:零件实体中任意边的两个邻接面,在零件体外夹角小于  $180^\circ$  时,任意边为凹边;当零件体外夹角大于  $180^\circ$  时,任意边为凸边。

### 1.2 加工特征的分类

通过分析角盒类零件特点可知,角盒类零件中的基本特征为孔、盲台阶、台阶特征。基本特征的定义如图 2 所示。

(1)孔特征:零件模型中的封闭贯通区域如图 2(a)所示,角盒类零件中孔特征均为通孔。

(2)盲台阶特征:在待识别面与邻接面中存在 3 个相互垂直的平面,且任意两平面公共边为凹边,由这 3 个平面构成盲台阶特征如图 2(b)所示。

(3)台阶特征:仅有一条由待识别面与邻接面形成的凹边,组成凹边的待识别面与邻接面构成台阶特征。根据待识别面与邻接面的夹角分为锐角台阶、直角台阶、

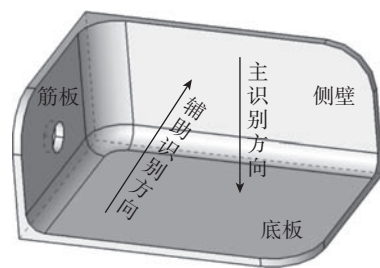


图 1 角盒类零件  
Fig.1 Corner box parts

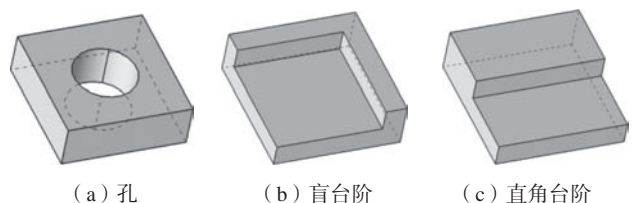


图 2 基本特征示意图  
Fig.2 Schematic diagram of basic feature

钝角台阶,如图 2 (c)所示为直角台阶。

由于角盒类零件中特征的位置不同,对应的加工工艺也不同。故结合特征位置将孔特征分为底板孔(Hb)、侧壁孔(Hr)、筋板孔(Hs);将台阶特征分为底板底面台阶(a)、侧壁顶面台阶(b)、侧壁侧面台阶(c)、底板侧面台阶(d)。基本特征分类如图 3 所示。

结合角盒类零件的加工工艺流程将角盒类零件的加工特征分为正面加工特征、反面加工特征、正反双面加工特征和侧面加工特征 4 种类型,如图 4 所示。

## 2 加工特征识别过程

### 2.1 孔特征的识别与抑制

通常孔特征的识别需要扩展 AAG 中公共边的属性,增加内环边与外环边<sup>[2]</sup>,这无疑复杂化了孔特征的识别过程。在 CATIA 创建的角盒类零件模型中,孔特征均由孔工具条实现,同时 CATIA 还提供了可以直接检索到孔特征的函数。因此在本文提出的识别方法中,孔特征直接从零件模型特征树中识别,识别过程如下。

步骤 1: 遍历零件模型的特征树,获取孔特征存放在链表中。

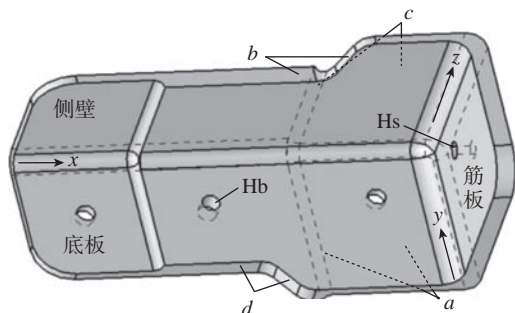


图 3 基本特征分类

Fig.3 Classification of basic feature

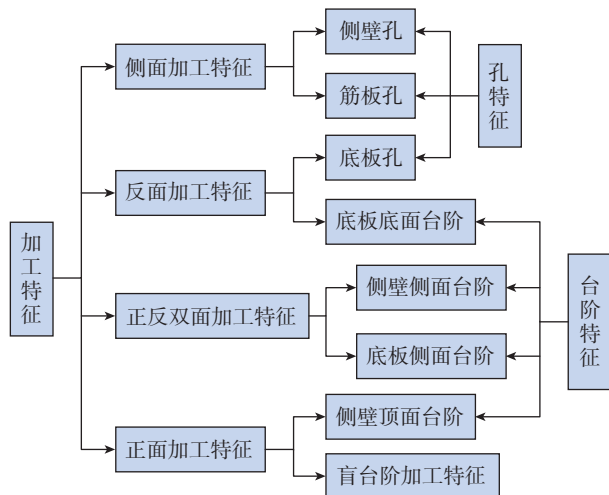


Fig.4 Classification of machining feature

步骤 2: 遍历孔特征,获取并存储孔特征的轴向、直径、深度、中心坐标等信息。基于以上信息判断孔特征的类型。

步骤 3: 获取孔特征在特征树中的父级,移除孔特征,更新零件模型。

步骤 4: 将孔特征移除后模型组成面标识符映射到原始模型中。

图 5 是图 1 所示角盒零件孔特征抑制后模型。移除孔特征后减少了待识别面的邻接面个数,避免了孔特征与待识别面公共边凹凸性不明问题,提高了特征识别的准确性。

### 2.2 过渡特征的识别与抑制

零件中存在为减少集中应力、增加零件局部强度的过渡特征<sup>[14]</sup>,使原有的拓扑关系变得更加复杂,增加了特征识别过程的难度和计算量。角盒类零件中的过渡特征为圆角特征,圆角特征是通过 CATIA 建模软件中的圆角工具条创建的,与孔特征识别相同,圆角特征也可以从直接零件模型特征树中获取。圆角特征识别过程如下。

步骤 1: 遍历零件模型特征树,获取圆角特征存放在链表中。

步骤 2: 遍历圆角特征,获取并存储特征半径、法向量、组成面、邻接面等信息。

步骤 3: 获取圆角特征在特征树中的父级,移除圆角特征,更新零件模型。

步骤 4: 将圆角特征移除后模型组成面标识符映射到原始模型中。

步骤 1 是圆角特征的识别;步骤 3 是圆角特征的抑制;步骤 2 和 4 是圆角特征的复原。图 6 是图 1 中的角盒零件过渡特征抑制后模型。

在零件模型中,添加一个圆角特征会增加圆角面信息,改变圆角邻接面信息,而其他面的信息不会发生改变,同理移除一个圆角特征会减少圆角面信息,改变圆角邻接面信息。基于此,每移除一个圆角特征,观察零件模型组成面标识符的变化情况,采用移除前后圆角邻接面位置不变、法向量不变、面积变化很小的原则,将圆

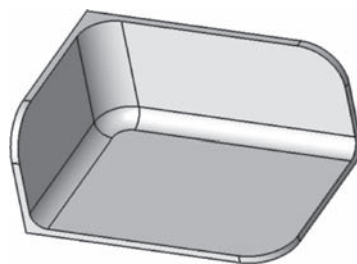


图 5 孔特征抑制后模型

Fig.5 Model after hole feature was suppressed

角移除前后的邻接面关联起来。由此将孔特征、过渡特征抑制后模型组成面标识符与原始模型组成面标识符关联起来,实现了圆角特征位置的复原。

### 2.3 单特征 AAG 的生成与分解

#### 2.3.1 B-rep 数据的获取

在计算机中零件的三维模型信息是以边界表示法 (Boundary representation, B-rep) 数据的形式存储的,包括几何数据与拓扑数据<sup>[15]</sup>。几何数据指模型中,点、线、面等几何元素的形状、位置、大小信息;拓扑数据是指模型中点、线、边、环、面、壳、体等拓扑元素的邻接关系。B-rep 数据的获取是 AAG 生成的基础, B-rep 数据可以通过 CATIA 二次开发接口封装的函数实现。图 7 是 CATIA 模型所有拓扑对象间的拓扑层级关系。B-rep 数据获取思路为:首先获取零件模型的拓扑体 (CATBody),接着沿着体、壳、面、环、边、点的顺序获取对应拓扑体,最后从每一层的拓扑体中获取该层的 B-rep 数据。

#### 2.3.2 边的凹凸性判定

角盒类零件中,边的类型为直线,本文主要讨论直边的凹凸性判定方法。白茜<sup>[16]</sup>以面  $f_1$  作为基面,根据右手螺旋法则确定边  $e$  的方向  $n_e$ ,通过  $n = n_e \times n_2$  得到  $n$  的方向,获得  $n$  与  $n_1$  的夹角  $\theta$  判断边  $e$  的凹凸性。如果夹角  $|\theta| < \pi/2$ ,边  $e$  为凹边;如果夹角  $|\theta| > \pi/2$ ,则边  $e$  为凸边。图 8 是直边凹凸性判断示意图。

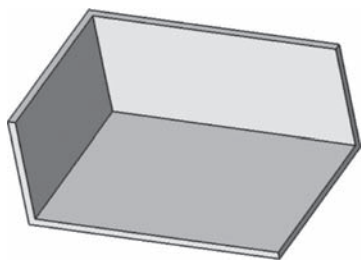


图 6 过渡特征抑制后模型

Fig.6 Model after transition feature was suppressed

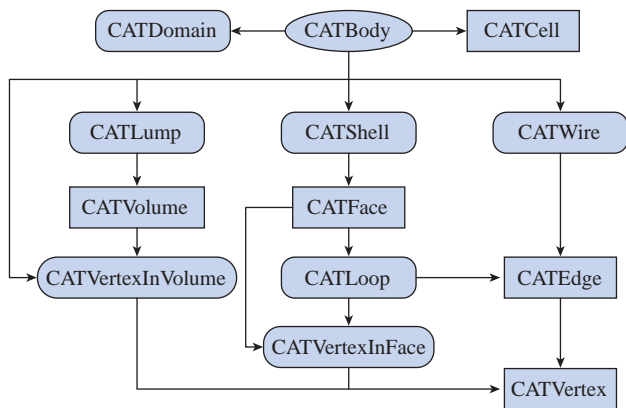


图 7 CATIA 模型拓扑对象层级关系

Fig.7 Topology object hierarchy of CATIA model

#### 2.3.3 单特征 AAG 生成与分解过程

AAG 是以零件模型中的面为节点,面与面之间连接的公共边为弧,将公共边的凹凸性添加为弧的属性,用来比较结构化对象之间相似性的工具<sup>[17]</sup>。与传统 AAG 邻接矩阵相比维数更小且每个邻接矩阵中只能提取出一个特征。单特征 AAG 的生成与分解步骤如下。

步骤 1: 访问零件模型 B-rep 数据,通过图 7 中展示接口获取拓扑面信息。

步骤 2: 在识别方向下检索零件模型拓扑面构成待识别面集,顺序选取待识别面。

步骤 3: 以待识别面为基础,检索零件模型中待识别面的邻接面,计算待识别面与邻接面、邻接面与邻接面公共边的凹凸性生成单特征 AAG。

步骤 4: 去除单特征 AAG 中与待识别面凸连接的面节点得到单特征 MAAG。

图 9 是盲台阶特征 AAG 的生成与分解示意图,其中,0 表示边的属性为凹边;1 表示边的属性为凸边。图 9 (a) 是盲台阶特征零件模型,图 9 (b) 是单特征 AAG,图 9 (c) 是单特征 MAAG。

#### 2.3.4 单特征 AAG 存储形式

如图 10 所示, AAG 通常采用邻接矩阵存储,本文对传统邻接矩阵进行扩展,扩展邻接矩阵  $A[n, n]$  定义如下:用 0 来表示矩阵中对角线上的元素。对于非对角线上的元素  $a_{ij}$  ( $i, j=1, 2, \dots, n, i \neq j$ ),当面  $i$  与面  $j$  不相交时用 -1 来表示;当面  $i$  与面  $j$  相交时用一个两位数表示边界属性,在个位用 0 和 1 分别表示凹边和凸边,在十位用 1、2、3 分别表示面的夹角为锐角、直角、钝角。

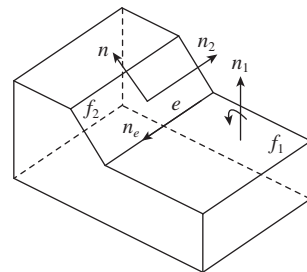


图 8 直边凹凸性判断示意图

Fig.8 Schematic diagram of straight edge concevity and convexity judgment

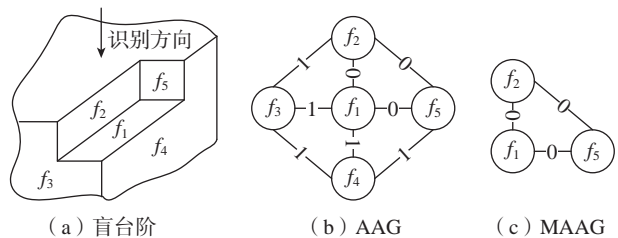


图 9 AAG 生成与分解示意图

Fig.9 Schematic diagram of AAG generation and decomposition

以图 9 所示盲台阶特征为例,其 AAG 邻接矩阵如图 10 (a)所示。

角盒类零件中常见的加工特征及其 AAG 如表 1 所示。

### 2.3.5 单特征 AAG 分解与搜索算法

生成 AAG 的基础是识别方向下的待识别面与其邻接面,邻接矩阵中首行表示待识别面,其余行按照顺序表示待识别面的邻接面。待识别面一定是特征的组成面,将其存储在 MAAG 邻接矩阵第 1 行,特征的其余组成面为待识别面邻接面,只需存储邻接矩阵首行中能被 10 整除的列数,构建新的矩阵完成 AAG 的分解。MAAG 邻接矩阵如图 10 (b)所示。

传统的图匹配方法从 AAG 中分解 MAAG 过程,无法确定特征组成面的顺序,导致同一特征的邻接矩阵不同无法直接用于图匹配,刘雪梅等<sup>[18]</sup>定义了矩阵的相似与相同,通过判断 MAAG 邻接矩阵是否与库中矩阵相似,再通过行列变换将 MAAG 邻接矩阵转换成与库中矩阵相同的形式,完成匹配。因本文 AAG 的生成方式不同,导致特征组成面的顺序是确定的,即第 1 个组成面是待识别面,其他组成面是有顺序的待识别面的邻接面,所以可直接比较 MAAG 邻接矩阵元素是否与库中矩阵元素相同,完成匹配。

## 2.4 加工特征识别与类型判别

盲台阶、台阶特征识别分别沿着主识别方向、辅助

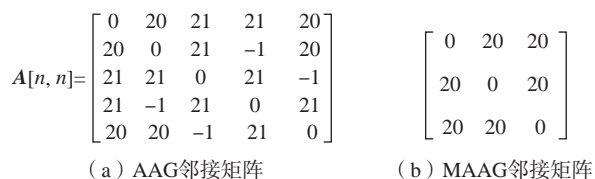


图 10 邻接矩阵示意图

Fig.10 Schematic diagram of adjacency matrix

表 1 用户预定义特征 AAG

Table 1 AAG of user predefined feature

特征名称	零件模型	AAG	邻接矩阵
直角台阶			$\begin{bmatrix} 0 & 20 \\ 20 & 0 \end{bmatrix}$
钝角台阶			$\begin{bmatrix} 0 & 30 \\ 30 & 0 \end{bmatrix}$
盲台阶			$\begin{bmatrix} 0 & 20 & 20 \\ 20 & 0 & 20 \\ 20 & 20 & 0 \end{bmatrix}$

识别方向进行,在识别出一个特征后按照一定的规则判断特征类型。特征类型的判别规则如下。

(1) 底板底面台阶: 在主识别方向下识别的台阶特征,且待识别面的法向量方向与主识别方向相同。

(2) 侧壁顶面台阶: 在主识别方向下识别的台阶特征,且待识别面的法向量方向与主识别方向相反。

(3) 侧壁侧面台阶: 在辅助识别方向下识别的台阶特征,且待识别面的法向量方向与主识别方向相同。

(4) 底板侧面台阶: 在辅助识别方向下识别的台阶特征,且待识别面的法向量方向与主识别方向相反。

图 11 是盲台阶、台阶特征识别与类型判别流程图。具体过程如下。

步骤 1: 确定主识别方向与辅助识别方向。步骤 2: 基于某个识别方向,遍历零件模型拓扑面生成待识别面集。步骤 3: 遍历待识别面集,以某一待识别面为中心,其邻接面为边缘生成单特征 AAG,分解单特征 AAG 得到 MAAG。步骤 4: 将 MAAG 与用户预定义特征 AAG

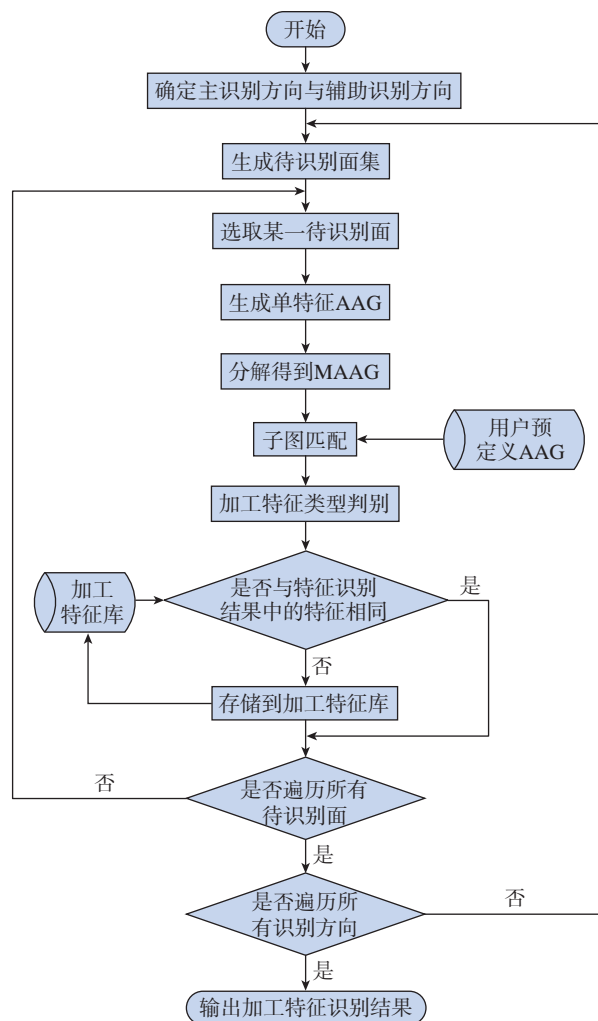


图 11 特征识别与类型判别流程图

Fig.11 Flow chart of feature recognition and type discrimination

进行子图匹配,根据规则判断特征类型,提取特征组成面标识符(Tag)。步骤5:将识别出特征组成面标识符与加工特征库中特征组成面标识符进行对比,如果标识符相同则转到步骤7。步骤6:存储识别出加工特征类型及其组成面标识符到加工特征库中。步骤7:判断是否在该识别方向下遍历了所有待识别面,如果否则返回步骤3。步骤8:判断是否已经遍历了所有识别方向,如果否则返回步骤2。步骤9:输出加工特征库中的特征识别结果。

### 3 实例验证与分析

基于本文提出的角盒类零件加工特征识别方法,采用CATIA V5平台提供的CAA(Component application architecture)二次开发工具,通过C++语言对CATIA二次开发实现。建立了角盒类零件加工特征识别原型系统,工作界面如图12所示。图12中右侧对话框主要功能包括索引角盒类零件模型、导入角盒类零件模型、识别角盒类零件加工特征、点选加工特征后零件模型中对应位置高亮显示。

为了验证本文提出加工特征识别方法的正确性,选取图3所示的角盒类典型零件作为识别对象。图3中z轴负向表示主识别方向;y轴正向为辅助识别方向。因为特征识别模块仅展示识别结果,所以结合第2节介绍的识别过程分析图3所示角盒类典型零件加工特征识别过程。

识别零件模型中的孔特征,零件模型包含3个底板孔、1个筋板孔。存储孔特征相关信息,移除孔特征,将移除孔特征后模型面的标识符映射到原始模型中。

识别零件模型中的过渡特征,存储过渡特征信息,将过渡特征邻接面标识符映射到原始模型中。过渡特征抑制后模型如图13所示。

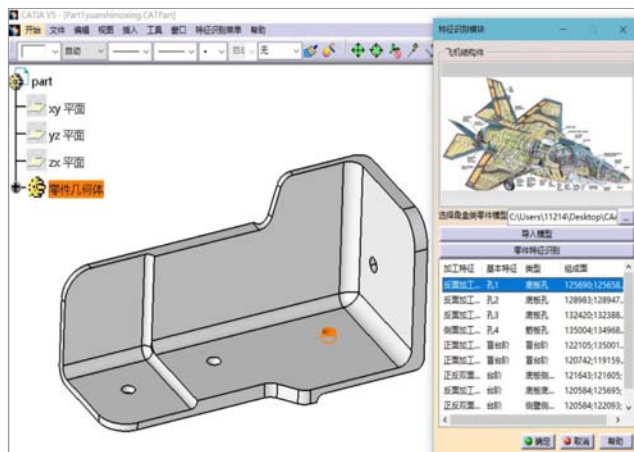


图12 特征识别模块工作界面  
Fig.12 Feature recognition module working interface

沿着主识别方向检索零件的待识别面构成待识别面集  $\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6\}$ 。沿辅助识别方向构成待识别面集  $\{f_{12}, f_{13}, f_{14}, f_{15}, f_{16}, f_{17}\}$ 。

以待识别面  $f_5$  为例,单特征 AAG 与 MAAG 如图14所示。以  $f_5$  为中心,  $f_5$  邻接面为边缘生成单特征 AAG (图14(a)),移除 AAG 中与  $f_5$  凸连接的面节点得到 MAAG (图14(b)),将图14(b)与用户预定义特征 AAG 进行子图匹配识别出由面  $f_5, f_{18}$  组成的台阶特征。因为识别方向为主识别方向,  $f_5$  的法向量与识别方向相反,面  $f_5$  与面  $f_{18}$  的夹角为钝角,所以台阶特征的类型为侧壁顶面钝角台阶,由图4可知侧壁顶面台阶属于正面加工特征。

图13中的12个待识别面经过特征子图匹配后得到6个基本特征,结合特征类型判别规则后得到图12右侧对话框中的特征识别结果。

上述分析与实例验证结果表明,本文提出的特征识别方法生成的 AAG 维数更小,分解成 MAAG 速度更快,子图匹配过程更简单,算法的逻辑复杂度更低,识别结果准确率更高。

### 4 结论

本文结合角盒类工艺特点,提出了一种基于识别方向单特征顺序图匹配的特征识别方法。并通过角盒类典型零件验证其可行性,该方法具有以下特点。

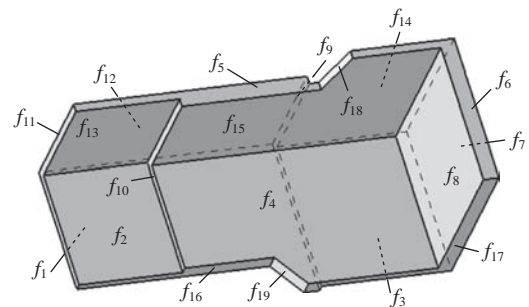


图13 典型零件过渡特征抑制后模型  
Fig.13 Typical part model after transition feature was suppressed

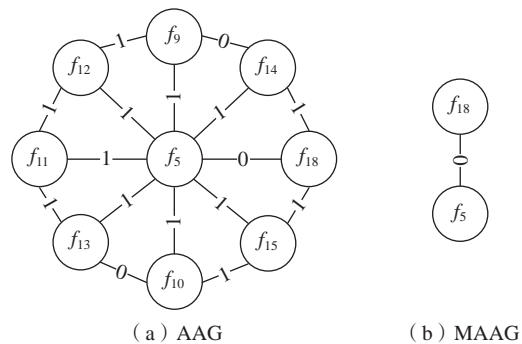


图14 单特征 AAG 与 MAAG 示意图  
Fig.14 Schematic diagram of single feature AAG and MAAG

(1) 将角盒类零件相交特征分解为几个独立特征分别进行识别,化繁为简,降低了整个零件分析和处理的难度。

(2) 放弃直接获取零件的整体 AAG 而是从主辅两个识别方向检索待识别面,以待识别面为中心,邻接面为边缘生成单特征 AAG,大大降低了 AAG 分解过程的逻辑复杂度。

(3) 孔特征与过渡特征直接遍历零件模型特征树获得,采用面标识符映射的方式将抑制后模型中新形成的面映射到原始模型中,实现了孔特征与过渡特征的识别、抑制与复原。

### 参考文献

- [1] 杨吉飞,杜文军.复杂航空结构件新型高效数控加工工艺方法研究[C]//2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(下册).北京,2017:393-399.
- YANG Jifei, DU Wenjun, New efficient NC machining technology for complex aviation structural parts methods research[C]//2017(3rd) China Aviation Science and Technology Conference Proceedings (Volume Two). Beijing, 2017: 393-399.
- [2] 王鹏程.复杂结构件加工特征用户自定义及识别方法[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- WANG Pengcheng. Machining feature definition by users and recognition methods for complex structural parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [3] ABOUEL NASR E S, KAMRANI A K. A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system[J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 51(3): 389-415.
- [4] 施建飞,李迎光,刘旭,等.基于属性边点图的飞机结构件筋特征识别方法[J].计算机集成制造系统,2014,20(3): 521-529.
- SHI Jianfei, LI Yingguang, LIU Xu, et al. Rib feature recognition method for aircraft structural parts based on vertex attributed adjacency graph[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 521-529.
- [5] 李梅竹,陈荣.基于痕迹对STEP文件进行特征识别的研究[J].陕西科技大学学报(自然科学版),2011,29(4): 57-62.
- LI Meizhu, CHEN Rong. A study of feature recognition based on hint from STEP files[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 29(4): 57-62.
- [6] 张贺,邵晓东,仇原鹰,等.基于体分解的轴类零件工序模型自动生成方法[J].计算机集成制造系统,2021,23(6): 1-22.
- ZHANG He, SHAO Xiaodong, CHOU Yuanying, et al. Automatic generation method of process model of shaft parts based on volume decomposition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 23(6): 1-22.
- [7] HOUSHMAND M, IMANI D M. A volume decomposition model to determine machining features for prismatic parts[J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(9): 1703-1710.
- [8] 陆凯,李迎光,刘旭,等.数据驱动的飞机结构件加工特征识别方法[J].航空制造技术,2021,64(8): 32-40, 57.
- LU Kai, LI Yingguang, LIU Xu, et al. A data-driven method for machining feature recognition for aircraft structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 32-40, 57.
- [9] JOSHI S, CHANG T C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model[J]. Computer-Aided Design, 1988, 20(2): 58-66.
- [10] MAREFAT M, KASHYAP R L. Geometric reasoning for recognition of three-dimensional object features[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(10): 949-965.
- [11] 谢飞,郭宇,张红蕾,等.基于图和子图同构算法的制造特征识别方法[J].南京航空航天大学学报,2018,50(3): 390-396.
- XIE Fei, GUO Yu, ZHANG Honglei, et al. Manufacturing feature recognition based on graph and subgraph isomorphism algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(3): 390-396.
- [12] 罗晨,王欣,苏春,等.基于案例推理的夹具设计案例表示与检索[J].机械工程学报,2015,51(7): 136-143.
- LUO Chen, WANG Xin, SU Chun, et al. Case representation and retrieval under a case-based reasoning system for fixture design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 136-143.
- [13] 黄丰云,刘小磊,徐劲力,等.三维工艺设计中的制造特征识别方法[J].机械设计与制造,2021(6): 228-231, 235.
- HUANG Fengyun, LIU Xiaolei, XU Jinli, et al. A method of manufacturing feature recognition in 3D process design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(6): 228-231, 235.
- [14] 崔秀芬,高曙明,周广平.一种高效的过渡特征识别与抑制算法[J].计算机集成制造系统,2004,10(1): 77-82.
- CUI Xiufen, GAO Shuming, ZHOU Guangping. An efficient algorithm for recognizing and suppressing blend features[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(1): 77-82.
- [15] 徐同明,陈卓宁,李建勋.面向三维机加工工艺规划系统的CATIA模型B-Rep信息提取与应用[J].计算机系统应用,2014,23(6): 211-214.
- XU Tongming, CHEN Zhuoning, LI Jianxun. Extraction and application of CATIA model B-Rep information oriented to three-dimensional machining process planning system[J]. Computer Systems & Applications, 2014, 23(6): 211-214.
- [16] 白茜.基于MBD的特征识别方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- BAI Qian. Based on the characteristics of the MBD recognition method research[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [17] LUO C, WANG X, SU C, et al. A fixture design retrieving method based on constrained maximum common subgraph[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(2): 692-704.
- [18] 刘雪梅,贾勇琪,陈祖瑞,等.缸体类零件加工特征识别方法[J].计算机集成制造系统,2016,22(5): 1197-1204.
- LIU Xuemei, JIA Yongqi, CHEN Zurui, et al. Recognition of machining feature for engine cylinder blocks[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(5): 1197-1204.

通讯作者: 马付建,副教授,硕士生导师,博士,研究方向为数字化制造与智能制造、难加工材料高性能加工技术。

(责编 七七)

引文格式: 刘钧天, 陈萍, 闫超, 等. 不同自动铺丝工艺参数对 T800 级碳纤维 / 环氧复合材料孔隙率的影响研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 114–118, 124  
LIU Juntian, CHEN Ping, YAN Chao, et al. Research on influence of different automatic fiber placement parameters on porosity of T800 carbon fiber/epoxy composite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 114–118, 124.

# 不同自动铺丝工艺参数对 T800 级碳纤维/环氧复合材料孔隙率的影响研究\*

刘钧天, 陈萍, 闫超, 肖鹏

(中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

[摘要] 采用 T800 级碳纤维 / 环氧树脂单向带铺丝预浸料, 使用自动铺丝工艺制备不同厚度的试验层板, 探究固化压力、层板厚度及尺寸、自动铺丝压紧力等各项参数对孔隙率及孔隙分布的影响, 采用超声 C 扫描表征复合材料层板孔隙率区间。研究表明, 当固化压力降至某临界点后, 孔隙率呈现先快速增加又逐渐减慢增加的趋势; 厚铺层的层板的孔隙率高于较薄铺层的层板, 靠近中间及底部铺层位置的孔隙较多; 尺寸较大的层板, 高孔隙率的区域相对集中分布在靠近层板中间的位置, 且孔隙率区间较大; 固化压力较小时, 采用小压紧力铺丝的层板会形成更高的孔隙率; 对于大型复杂的复材结构件来说, 不同的铺丝工艺参数对孔隙率的影响也具有上述趋势。

关键词: 复合材料; 孔隙率; 固化压力; 自动铺丝; 超声检测

## Research on Influence of Different Automatic Fiber Placement Parameters on Porosity of T800 Carbon Fiber/Epoxy Composite

LIU Juntian, CHEN Ping, YAN Chao, XIAO Peng

(COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

[ABSTRACT] Using T800 grade carbon fiber/epoxy resin unidirectional tape automatic laying prepreg, test laminates with different thickness were manufactured by automatic fiber placement process. The effects of curing pressure, laminate thickness and size, automatic fiber placement pressure and other parameters on porosity and porosity distribution were investigated. Composites porosity intervals were characterized using ultrasonic C-scan. The results show that when the curing pressure drops to a certain critical point, the porosity increases rapidly first and then slows down gradually; Thicker laminates have higher porosity than thinner laminates, and there are more pores near the middle and bottom of the ply; For laminates with a larger size, the areas with high porosity are relatively concentrated near the middle of the laminates, and the porosity interval is large; When the curing pressure is low, the laminates laid with a small laying pressures will form a higher porosity; For large and complex composites structures, the influence of different automatic fiber placement parameters on porosity also has the above trend.

**Keywords:** Composite materials; Porosity; Curing pressure; Automatic fiber placement; Ultrasonic inspection

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.114

碳纤维复合材料由于其高比强度、高比模量、抗疲劳、抗腐蚀等特性, 广泛应用于民用航空领域<sup>[1-2]</sup>。而随

着复合材料结构的大型化及复杂化, 手工铺叠及自动铺带工艺已不能满足机身等复杂零件的制造, 由自动铺丝

\* 基金项目: 工信部民机专项基金项目(F-SFKT-0145)。

工艺制造的零件占比在逐步增加<sup>[3-4]</sup>。

但复合材料的制造过程中容易形成孔隙等微观缺陷,直接影响到复合材料的使用性能。石林<sup>[4]</sup>的试验数据表明,孔隙率在0~5%范围内,每增加1%,层间剪切强度下降约7%,弯曲强度下降约10%。因此民用航空领域对复合材料结构件孔隙率的要求很高,体积百分比不能超过2%。测定复合材料孔隙率的方法主要有阿基米德密度法、树脂酸蚀法、显微照相法、无损检测法等,其中超声检测是检测复合材料缺陷最常用的方法之一,该方法便捷且准确<sup>[5-11]</sup>。目前波音、空客等公司也均采用超声C扫描进行复合材料结构件的孔隙率测定<sup>[12-14]</sup>。

影响孔隙缺陷形成的工艺参数较多,在工程上,探究各项参数对复合材料孔隙率的影响意义重大,但目前该方面的研究较少。本文主要采用自动铺丝工艺制备试验层板,探究固化压力、层板厚度及尺寸、自动铺丝压紧力等各项参数对孔隙率及孔隙分布的影响,并采用超声C扫描判断复合材料层板孔隙率区间,为自动铺丝工艺制造复合材料结构零件提供参考。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 层板制备

本试验原材料采用T800级碳纤维/环氧树脂预浸料,单根丝束宽度为6.35 mm,同时铺放16丝束;由机器人式铺丝机进行自动铺放后,使用热压罐成型工艺制备复合材料层板。固化制度如下:

(1) 抽真空至少-80 kPa;

(2) 热压罐加压至选定的不同固化压力,当压力达到140 kPa时,真空袋与大气联通;

(3) 热压罐达到全压时升温,在 $(180 \pm 6)$  °C下固化至少120 min,升温速率0.5~3 °C/min;

(4) 降温速率不超过3 °C/min,至60 °C以下卸压。

本试验制造了3种常用铺层的层板,其编号及对应

铺层信息如表1所示。

### 1.2 表征方式

通过在检测设备上对该材料体系的孔隙率对比试块进行标定,制得不同孔隙率对应超声衰减系数的评判关系曲线,曲线可用以确定2%以下的孔隙率,因实际零件制造中孔隙率超过2%已无法满足工程需要,故对超出2%孔隙率的研究并不存在实际指导意义。

准备与所制造层压板铺层相同的标块作为优区,优区是层压板依据GB/T 3365—2008《碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法》,通过金相法统计面孔隙率确定为0孔隙率的层压板,使用超声C扫描(探头频率5 MHz)评估层板的孔隙率区间值,扫描方式为喷水穿透法。并使用手动接触式A扫描(探头频率5 MHz)对区间值进行复测校核,扫描方式为脉冲反射法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 固化压力对铺丝层板孔隙率的影响

控制铺放层板尺寸相同(300 mm × 500 mm)、铺丝端头压紧力500 N、制造方式等各项参数不变的情况下,仅改变固化压力,不同铺层层板测定的孔隙率最大与最小值,即层板的孔隙率区间范围,如图1所示。可以看出,虽然层板的铺层、厚度不同,但随着固化压力的改变,孔隙率的变化趋势是接近一致的。固化压力从600 kPa降至400 kPa,层板的孔隙率始终为0,这是由于较大的压力使铺层与铺层间得到了充分压实。当固化压

表1 层板铺层信息

Table 1 Laminate information

编号	铺层定义	名义厚度/mm
B01	[45/-45/0/90/-45/45] <sub>s</sub>	2.244
B02	[45/-45/0/90] <sub>2s</sub>	2.992
B03	[45/-45/0/90] <sub>3s</sub>	4.488

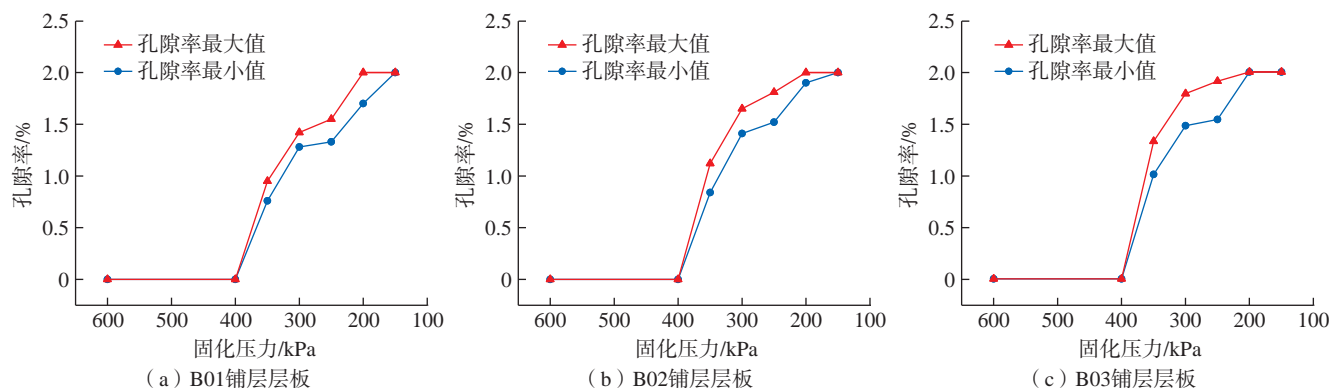


图1 不同固化压力下铺层层板孔隙率

Fig.1 Porosity of laminate under different curing pressures

力下降至 350 kPa 时,层板孔隙率迅速增长至 1% 左右;而固化压力由 350 kPa 减少至 200 kPa 的过程中,孔隙率的增长趋势逐渐放缓;直至固化压力减小到 200 kPa,层板孔隙率最大值已超过 2%。由此可见,固化压力与孔隙率之间也并不只是简单的线性关系,而是当固化压力下降到某一阶段时,孔隙率呈现先快速增加又逐渐减慢增加的变化。

孔隙的产生可能是由于材料自动铺放过程中,空气包埋在预浸料层间,或环氧树脂吸入了一定水分,在固化过程中产生挥发分蒸汽压。固化压力减小到一定值时,压力已不足以使包埋或固化反应产生的气体充分排出,从而形成了明显的孔隙。但无论是包埋的空气或固化反应产生的气体均是有限的,这也很好地解释了当压力进一步减小时,孔隙率增加的趋势逐步放缓的现象。而且仅改变固化压力这一参数,层板上产生孔隙率相对比较均匀,并未出现孔隙率最大值与最小值相差很大的情况,差异最大的组为 B02 铺层在 250 kPa 的压力下固化,孔隙率最大值与最小值相差 0.37%。

### 2.2 铺丝层板厚度对孔隙率的影响

图 2 为使用相同固化压力下,不同厚度的层板的孔隙率及其区间范围。通过比较可以明显地看出,当固化压力减小至相同值时,铺丝层数较多的层板孔隙率明显高于层数较少的层板。采用 400 kPa 的固化压力时,所有铺层的层板的孔隙率均为 0。当固化压力减小至 350 kPa 后, B03 铺层层板的最大孔隙率值比 B01 铺层层板最大孔隙率值高出近 0.4%。可见当固化压力降低时,孔隙率对厚铺层层板的敏感度也是高于薄铺层层板的。这可能

是由于相比内部的孔隙,接近层板表面的气体更容易被排出。同时铺层数越多,铺放时包埋在层内和层间的空气相对较多,而层板的尺寸相同,表面用以排出内部孔隙的面积是一定的,这就造成了较厚层板的孔隙率相对较大。同时,固化温度升高,树脂的黏度降低,固化压力以压强的形式作用在层板上;而远离层板表面的区域压强相对较小,导致层板内部的气体难以及时排出,使得层板远离层板表面的位置产生了孔隙率较高的情况。

为进一步探究孔隙在层板厚度方向上的分布情况,选取 250 kPa 固化压力下,3 种厚度层板剖切,做金相显微镜观察,如图 3 所示。

可以看出,沿层板厚度方向孔隙的分布情况并不是均匀的,靠近层板上表面(贴袋面)的铺层孔隙较少,几乎看不到明显的孔隙;而靠近中间及底部(贴模面)铺层的位置孔隙明显增多。可见固化过程中,铺层内部存

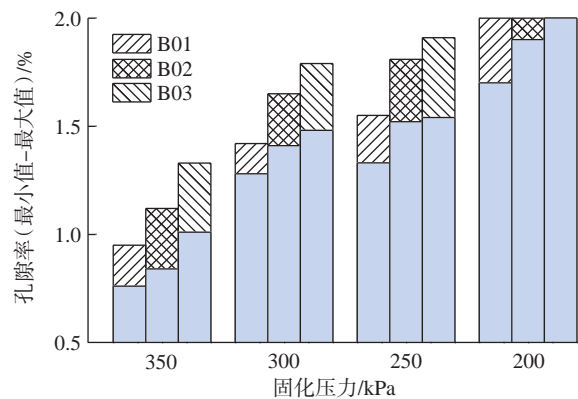


图 2 不同厚度层板孔隙率区间值

Fig.2 Interval values of porosity of different thickness laminates

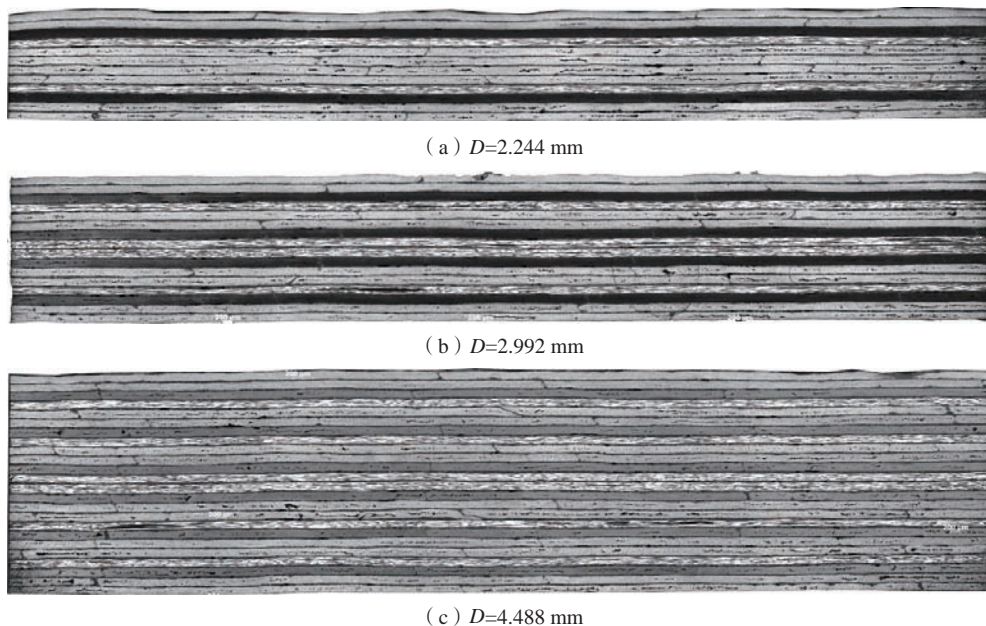


图 3 不同厚度层板金相显微镜图像

Fig.3 Metallographic images of laminates of different thickness

在明显的压力梯度,原因可能为:相比于较薄铺层,较厚铺层的树脂不易流出,能保持更高的树脂压力。从金相显微图像上也可看出,靠近顶部铺层的压实程度明显高于靠近模具表面的铺层。

### 2.3 铺丝层板尺寸对孔隙分布的影响

控制铺丝端头压紧力 500 N、固化压力 300 N、制造方式等各项参数不变的情况下,分别铺放 200 mm×300 mm、300 mm×500 mm、400 mm×600 mm 这 3 种尺寸的层板,图 4 为孔隙率区间比较。可以看出,铺放的层板尺寸不同,孔隙率区间的中值基本接近,但铺放层板尺寸越大,孔隙率的区间范围越大,200 mm×300 mm 层板孔隙率最大值与最小值相差仅 0.2% 左右;但是 400 mm×600 mm 层板孔隙率最大与最小值相差近 0.5%,即层板孔隙分布的均匀性差。这可能是由于固化时层板中间区域包埋或固化反应产生的气体部分会受压从层板周围排出,而相较于小尺寸的层板,大尺寸的层板中间区域的气体难以被压出。同样,层板固化前的预抽过程中,大尺寸层板中间区域的气体相较于小尺寸层板也更难以被抽出。这样就形成了大尺寸层板孔隙率区间大,同时孔隙率最大值也较大的原因。

图 5 为各尺寸层板的超声 C 扫描图,可以明显看出,相较于小尺寸层板颜色深浅均匀交错,孔隙均匀分布,大尺寸层板中间区域的颜色更深,显示出类似于“回”字形的图像分布,高孔隙率的区域相对集中分布在靠近层板中间位置,孔隙分布的均匀性差,这也与上述测定的数据保持了良好的一致性。

### 2.4 铺丝压紧力对层板孔隙率的影响

图 6 为控制铺放层板尺寸(300 mm×500 mm)、采用相同厚度的铺层(均为 B01 铺层)、采用相同制造方式,通过改变自动铺丝时压辊的压紧力,层板在不同固化压力下的孔隙率区间比较。可见铺丝时的压紧力,即

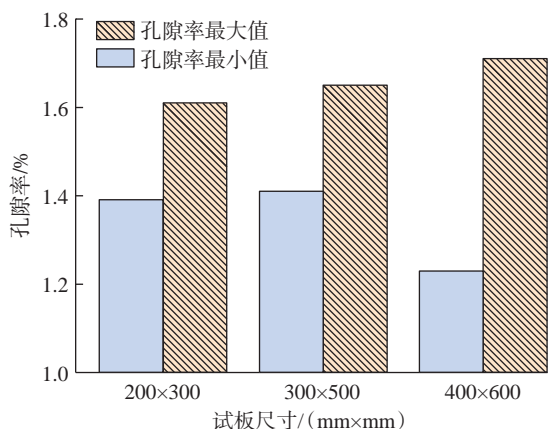


图 4 不同尺寸层板孔隙率区间比较

Fig.4 Comparison of porosity interval between laminates of different sizes

铺贴时对铺层的预压情况,对层板孔隙率的影响十分显著。首先,在固化压力从 600 kPa 降至 400 kPa,层板的孔隙率始终保持在 0,可见即使采用了很小的压紧力,只要固化时施加的压力足够大,仍可以将层间的气体有效地排出。与 500 N 压紧力的对照组相比,使用 300 N 压紧力铺放出的层板,固化压力降至 350 kPa 和 300 kPa 时,孔隙率并没有表现出明显的差异;但当固化压力降低至 250 kPa 时,300 N 压紧力铺放出的层板的孔隙率要明显高于 500 N 压紧力铺放出的层板,可见铺丝压紧力和固化压力对于孔隙的产生并不是单独的变量。自动铺丝压紧力较小时,层间和层内容易包埋进较多的空气,形成孔隙的原始核,但使用相对较大的固化压力固化时,可以将这部分气体有效排出,使得多出的残余气体并不足以形成相对应的多出的孔隙;但当固化压力相对小时,固化压力不足以使铺贴时引入的多余空气排出,层板的孔隙率会更高。当铺丝压紧力降至 100 N 时,层板使用不同的固化压力固化时孔隙率都明显高于另外两组;固化压力降至 300 kPa 时,层板的最大孔隙率已超过了 2% 的接收限,而固化压力再降至 250 kPa 时,整块层板的孔隙率都已超过了 2%,可见过小的铺丝压紧力不能使料层之间充分压实,层间缝隙中夹杂进了大量的气体等,在固化过程中固化压力不够高时气体排出困难,导致了较多孔隙的产生。

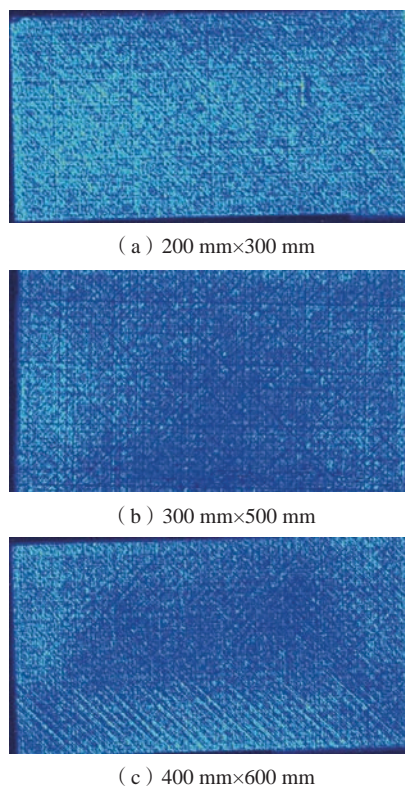


图 5 不同尺寸层板超声 C 扫描图像

Fig.5 Ultrasonic C-scan images of different size laminates

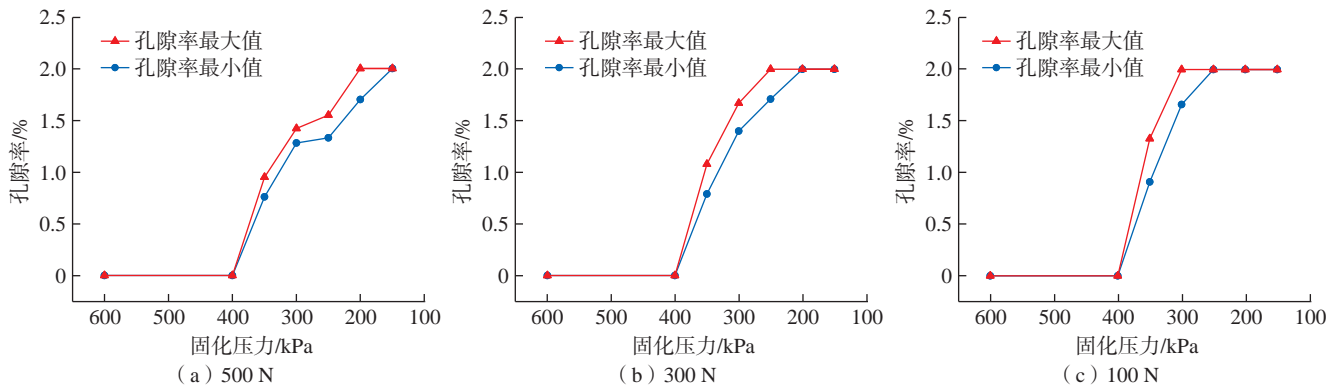


图6 不同铺丝压紧力 B01 铺层层板不同固化压力下孔隙率  
Fig.6 Porosity of B01 laminates under different curing pressures

可见铺丝压紧力对层板孔隙率存在一定影响,对于大型复杂的复材结构件来说,固化时零件不同位置会存在一定的压力梯度,构型复杂的区域可能存在欠压等问题,仅靠提升固化压力可能并不能使孔隙完全消除。在使用自动铺丝工艺制造零件的过程中,要注意铺丝参数对零件孔隙的影响,不宜采用过小的铺丝压紧力进行铺放。

### 3 结论

(1) 固化压力对铺丝层板孔隙率的产生有着决定性的影响,固化压力降至某临界点前,层板的孔隙率始终为0。继续降低固化压力,孔隙率呈现先快速增加又逐渐减慢增加的变化。

(2) 固化压力减小至相同值时,铺放层数较多的层板孔隙率高于层数较少的层板,相比内部的孔隙,接近层板上表面的孔隙气体更容易被排出,靠近中间及底部铺层位置的孔隙较多。

(3) 铺放尺寸较小的层板孔隙分布相对均匀。而尺寸较大的层板,高孔隙率的区域相对集中分布在靠近层板中间的位置,孔隙分布的均匀性相比较差。

(4) 铺丝压紧力对层板孔隙率存在影响,固化压力相对小时,不足以将使用较小压紧力铺丝时引入的多余空气排出,层板的孔隙率更高,固化压力越小时这一现象越为明显。

(5) 对于大型复杂的复材结构件来说,不同的铺丝工艺参数对孔隙率的影响也具有上述趋势,在使用自动铺丝工艺制造零件的过程中,要注意不同铺丝参数对零件孔隙的影响。

### 参考文献

[1] 汤旭,李征,孙程阳. 先进复合材料在航空航天领域的应用[J]. 中国高新技术企业, 2016(13): 39-42.  
TANG Xu, LI Zheng, SUN Chengyang. Application of advanced

composite materials in aerospace field[J]. China High-Tech Enterprises, 2016(13): 39-42.

[2] 沈军,谢怀勤. 航空用复合材料的研究与应用进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(5): 48-54.

SHEN Jun, XIE Huaiqin. Recent progress in study and application of composite materials for aeronautical engineering[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006(5): 48-54.

[3] 闫超,陈萍. 自动铺丝技术及其在飞机复合材料构件制造中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(11): 101-105.

YAN Chao, CHEN Ping. Automated fiber placement and its application in aircraft composite parts[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(11): 101-105.

[4] 石林. 自动铺丝束在航空工业中的应用现状[J]. 航空制造工程, 1997(9): 11-13.

SHI Lin. Automated tow placement in the aircraft industry[J]. Aviation Engineering & Maintenance, 1997(9): 11-13.

[5] DE ALMEIDA S F M, NETO Z D S N. Effect of void content on the strength of composite laminates[J]. Composite Structures, 1994, 28(2): 139-148.

[6] LIU L, ZHANG B M, WANG D F, et al. Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates[J]. Composite Structures, 2006, 73(3): 303-309.

[7] MARTIN B G. Ultrasonic attenuation due to voids in fibre-reinforced plastics[J]. NDT International, 1976, 9(5): 242-246.

[8] 何梅洪,杨涛,张斌,等. 复合材料超声检测复合缺陷多层成像实验分析[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(5): 80-84.

HE Meihong, YANG Tao, ZHANG Bin, et al. Experiment analysis of multi imaging by ultrasonic testing of complex defects in composite material[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(5): 80-84.

[9] BEN B S, BEN B A, RATNAM C, et al. Ultrasonic based method for damage identification in composite materials[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2012, 8(4): 297-309.

[10] 张阿樱,张东兴,朱洪艳,等. 碳纤维/环氧树脂层压板孔隙率及力学性能的试验表征[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(1): 24-28.

ZHANG Aying, ZHANG Dongxing, ZHU Hongyan, et al. Experimental characterization of porosity and mechanical properties of carbon/epoxy composite laminates[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2011(1): 24-28.

(下转第 124 页)

引文格式: 王海洋, 董全林, 赵然, 等. 一种 60 kV 焊接用太空电子枪的设计研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 119–124.

WANG Haiyang, DONG Quanlin, ZHAO Ran, et al. Design and research of a space electron gun for 60 kV welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 119–124.

## 一种 60 kV 焊接用太空电子枪的设计研究\*

王海洋<sup>1</sup>, 董全林<sup>1</sup>, 赵然<sup>2</sup>, 张永泰<sup>3</sup>, 王思展<sup>3</sup>, 刘业楠<sup>3</sup>

(1. 北京航空航天大学, 北京 100083;

2. 迪瑞医疗科技股份有限公司, 长春 130012;

3. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

[摘要] 采取间接式阴极加热方式并选取 LaB<sub>6</sub> 作为阴极材料, 设计了一种焊接用太空电子枪。利用 Vaughan 综合迭代法得出了电子枪的初值, 根据这些初值设计了电子枪的 3 极结构, 并对磁透镜进行了设计。通过仿真不断地对电子枪的 3 个电极和透镜的参数进行适当地调整, 以使仿真结果满足实际设计目标要求, 同时在透镜的调试过程中进行了规律性分析。试验表明, 该设计满足总发射束流 60 mA 和交叉斑直径 0.3 mm, 以及在工作距离 300 mm 处束斑 0.4 mm 的目标参数, 此设计方法和整套设计流程可以为电子枪的设计提供一定的参考。

关键词: 焊接用太空电子枪; LaB<sub>6</sub> 阴极; Vaughan 综合迭代法; 磁透镜; Source 仿真

### Design and Research of a Space Electron Gun for 60 kV Welding

WANG Haiyang<sup>1</sup>, DONG Quanlin<sup>1</sup>, ZHAO Ran<sup>2</sup>, ZHANG Yongtai<sup>3</sup>, WANG Sizhan<sup>3</sup>, LIU Yanan<sup>3</sup>

(1. Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Dirui Industrial Co., Ltd., Changchun 130012, China;

3. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

[ABSTRACT] A space electron gun for welding was designed, in which LaB<sub>6</sub> is chosen as cathode material and the cathode is heated by indirect cathode. The initial values of the electron gun are obtained by using the comprehensive iterative method of Vaughan. According to these initial values, the three-pole structure of the electron gun is designed, and then the double magnetic lens is designed. The results show that the parameters of the three electrodes and the lens of the electron gun are adjusted to make the simulation results meet the requirements of the actual design. At the same time, the regularity of the lens debugging process is analyzed. The simulation results show that the design meets the target parameters of 60 mA total emission beam, 0.3 mm cross spot diameter and 0.4 mm beam spot at 300 mm working distance. This design method and the whole design process can provide some reference for the design of electron gun.

**Keywords:** Space electron gun for welding; LaB<sub>6</sub> cathode; Vaughan's comprehensive iteration method; Magnetic lens; Source simulation

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.119

近年来,以电子光学系统为核心的仪器设备已广泛应用于生物、材料等多个学科<sup>[1-2]</sup>,并在航空航天、生物医学、半导体加工制造等众多行业领域中发挥着举足轻

重的作用<sup>[3-5]</sup>。焊接用太空电子枪属于发展迅速且应用广泛的电子光学系统,其研究与发展促进了多个领域的进步。

\* 基金项目: 北京卫星环境工程研究所创新基金(CAST-BISEE2019-040)。

电子束焊接具有能量密度高,焊接速度快,工件变形小,电子束易于控制等特点,极其适合完成太空中的焊接工作<sup>[6]</sup>。与欧美等一些国家相比,我国太空焊接技术的研究起步较晚<sup>[7-8]</sup>。电子枪焊接技术的研究对我国的航空航天事业发展具有十分重要的意义。本文设计了一种 60 kV 焊接用太空电子枪并进行了仿真,得到了满意的结果。

### 1 电子枪设计参数

电子枪设计参数如表 1 所示。

### 2 电子轰击间热式阴极

电子枪的性能直接影响着电子束焊接质量,要想提高电子枪的功率,有提高加速电压和增大阴极发射电流两种方法,然而,过度提高加速电压会产生 X 射线,对人体造成一定的伤害,需要采取一定的防护措施,这给电子枪的设计带来很大的不便。

因此,可通过增加阴极发射电流的方式去提高电子枪的功率,这需要选用电子发射能力较强的阴极材料。该方案不需要采取特殊的措施,安全性高,同时可以很好地满足设计要求。

#### 2.1 阴极加热方式

阴极的加热方式通常有直热式和间热式。间热式加热方式是由灯丝通交流电以后加热发射出电子,电子再去轰击阴极致使其温度升高而发射出电子。间热式阴极具有束斑较为固定,使用寿命长,发射电流密度高等优点。因此本文设计的太空电子枪采用间热式阴极。

#### 2.2 阴极及灯丝材料的选择

理想的阴极材料需要有功函数较低,工作寿命长,发射性能稳定,熔点高等特点。在热发射类型中,最常用的两种电子枪阴极材料是钨(W)和六硼化镧(LaB<sub>6</sub>)。LaB<sub>6</sub>是一种新型的阴极材料,具有金属良好的导电性且逸出功低,工作在 1400~1680 °C 内时,可以

获得 0~100 A/cm<sup>2</sup> 的直流发射电流,远胜于氧化物及纯金属阴极。从理论上讲,场发射性能要优于其他发射类型,但由于目前的技术不够成熟等原因,场发射还不能得到广泛的应用。

Source 是一套分析和设计电子源的程序,软件采用二阶有限元法,可对静电场和磁场进行计算以及对电子束进行分析<sup>[9]</sup>。为了更好地研究 W 和 LaB<sub>6</sub> 的发射性能,利用 Munro 软件程序中 Source 模块计算两者在一定条件下(设定阴极尺寸、栅极电压等)的阴极温度与束流大小关系,利用 Matlab 做出曲线,如图 1 所示。

对比观察图 1,两者关系曲线的形状大致相同,但要获得 60 mA 的束流,W 阴极的温度要达到 2900 K,而 LaB<sub>6</sub> 阴极只需要 1900 K,显然与传统的钨阴极相比,LaB<sub>6</sub> 阴极发射性能更好。这是因为 LaB<sub>6</sub> 的逸出功比 W 小很多,只需要较低的温度便可获得较大束流。LaB<sub>6</sub> 高温下性能稳定,重复使用性能好,并且 LaB<sub>6</sub> 阴极的使用寿命远大于 W 阴极。因此,本研究选用 LaB<sub>6</sub> 作为阴极材料,以 W 作为灯丝发射电子轰击 LaB<sub>6</sub> 阴极。这样 LaB<sub>6</sub> 阴极在较低的温度下就可以发射出大量的电子,并且性能稳定,可以满足大功率电子枪的设计需求<sup>[10]</sup>。

### 3 电子枪与透镜的初值计算

#### 3.1 电子枪的初值计算

对于电子枪的设计,本研究通过加速电压  $U$ 、发射束流  $I$ 、注腰半径  $r_w$ 、阴极发射电流密度  $j_c$  这 4 个参数来计算电子枪初值。需要计算出的初值参数主要有阴极截面半径  $r_c$ 、阴极半锥角  $\theta$ 、阴极曲率半径  $R_c$ 、阳极曲率半径  $R_a$ 、阳极孔半径  $r_a$ 、阳极头位置  $Z_a$  等。

首先计算得到修正电压,即

$$U_r = U(1 + 10^{-6}U) \tag{1}$$

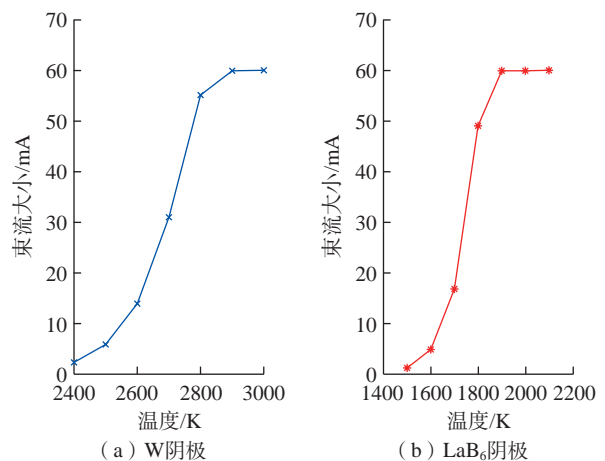


图 1 W 和 LaB<sub>6</sub> 温度与束流关系曲线  
Fig.1 Temperature and beam relation curves of W and LaB<sub>6</sub>

表 1 电子枪设计参数  
Table 1 Design parameters of electron gun

参数	数值
功率/kW	3.6
加速电压/kV	60
束流/mA	60
电子枪交叉斑直径/mm	0.3
工作平面束斑直径/mm	0.4
工作距离/mm	300

然后可以计算出导流系数  $P$  (单位为  $\mu P$ ) 和  $r_c$ , 即

$$P = 10^6 I / U_r^{3/2} \quad (2)$$

$$r_c = (I / (\pi j_c))^{1/2} \quad (3)$$

根据式(4)得到  $\theta$  初始值为

$$\theta = 30P^{1/2} \quad (4)$$

这一值可能和最终的结果有一定的差距, 但不会影响最终得到的结果, 因为综合迭代法能自动校正。得到  $\theta$  值以后, 根据式(5)可以得到朗缪尔参数  $(-\delta)$ , 即

$$(-\delta) = \sqrt{\frac{14.67(1 - \cos\theta)}{P}} \quad (5)$$

再由式(6)和(7)得到中间变量  $\gamma$  和  $\tan\phi_1$ , 即

$$\gamma = (-\delta) - 0.275(-\delta)^2 + 0.06(-\delta)^3 - 0.006(-\delta)^4 \quad (6)$$

$$\tan\phi_1 = \sin\theta \{ 1 - 1.25(1 + 0.6\gamma + 0.225\gamma^2 + 0.0573\gamma^3 + 0.0108\gamma^4 + 0.0021\gamma^5) / [3(-\delta)] \} \quad (7)$$

然后, 由式(8)和(9)得到阳极头处电子束半径  $r_b$  和  $\tan\phi_2$ :

$$r_b = r_c e^{-\gamma} \quad (8)$$

$$\tan\phi_2 = 0.17409 \sqrt{P \ln\left(\frac{r_b}{r_w}\right)} \quad (9)$$

$\tan\phi_1$  与  $\tan\phi_2$  均表示  $Z_a$  处电子轨迹的斜率, 理论上应当相等,  $\tan\phi_1$  是考虑空间电荷效应后由阳极孔效应得出的结果;  $\tan\phi_2$  则是在等电位区域利用“通用电子注发散”曲线得出的结果。

当  $\phi_1$  和  $\phi_2$  不相等时, 利用式(10)来修正  $\theta$  值, 重新计算公式直到满足式(11)时结束, 这时的  $\theta$  值就确定为最后的半锥角值。

$$\theta_{\text{new}} = \theta \sqrt{\tan\phi_1 / \tan\phi_2} \quad (10)$$

$$|\tan\phi_1 / \tan\phi_2 - 1| < 0.005 \quad (11)$$

得到最后修正的  $\theta$  值后, 电子枪的其他基础参数可以由式(12)~(15)依次计算得出:

$$R_c = \frac{r_c}{\sin\theta} \quad (12)$$

$$R_a = R_c e^{-\gamma} \quad (13)$$

$$r_a = 1.2r_b \quad (14)$$

$$Z_a = R_c - \sqrt{R_c^2 - r_a^2} \quad (15)$$

综合迭代法的流程如图2所示。

最后, 通过程序的迭代获得了电子枪的初值, 如表2所示。

### 3.2 透镜的初值计算

首先考虑使用单磁透镜进行聚焦, 为了保证设计的电子枪可以产生足够的束流, 可以通过 Source 程序来查看一下束流发射情况。

由图3可以看出, 为了满足工作距离 300 mm, 透镜离电子枪 3 极发射结构太远, 导致束流发散, 束流通过率较低, 能量损失较大。因此需要增加一级聚焦透镜, 使用二级聚焦透镜。

电子枪的交叉斑为 0.3 mm, 为了使电子枪能在工作平面处束斑直径达到 0.4 mm, 加入双磁透镜对电子束进行聚焦。结构示意图如图4所示, 其中  $S_c$  为交叉斑直径;  $S_w$  为工作平面束斑直径。此部分主要是针对聚焦线圈的设计与计算。

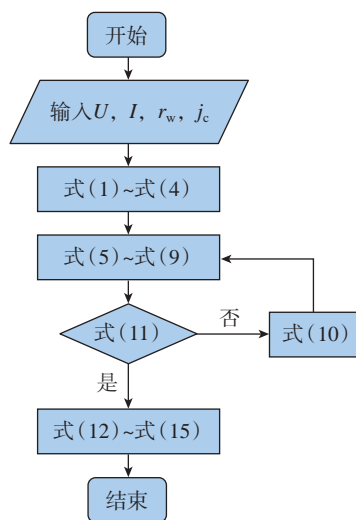


图2 综合迭代法流程  
Fig.2 Comprehensive iterative procedure

表2 迭代后的电子枪初值参数

Table 2 Initial parameter of electron gun after iteration

阴极曲率半径 $R_c/\text{mm}$	阳极曲率半径 $R_a/\text{mm}$	阳极孔半径 $r_a/\text{mm}$	阴极截面半径 $r_c/\text{mm}$	阳极头位置 $Z_a/\text{mm}$	导流系数 $P/\mu P$	迭代阴极半锥角 $\theta/(\circ)$
22.38	10.34	0.28	0.50	12.04	0.00374	1.28



图3 电子轨迹图  
Fig.3 Electron trajectories

如图4所示,CL1的物距和像距分别为 $a$ 和 $b$ ,CL2的物距和像距分别为 $c$ 和 $d$ 。根据实际机械结构, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 之和为定值,为保证工作距离为300 mm,则像距 $d$ 为325 mm,同时已知电子枪交叉斑直径为0.3 mm,工作平面束斑直径 $S_w$ 为0.4 mm。根据已知条件确定待求参数,并计算CL1的设计参数,CL2的相关参数在仿真时确定。

根据光学几何关系,以上参数需满足以下关系:

$$\begin{cases} a+b+c=160 \\ S_c \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{d}{c} = S_w \end{cases} \quad (16)$$

综合考虑机械结构等因素,选取 $a=75$  mm,  $b=20$  mm,  $c=65$  mm作为初值,则CL1焦距 $f_1$ 为

$$f_1 = \frac{ab}{a+b} \quad (17)$$

计算可得: $f_1=15.79$  mm。

焦距近似公式计算可得:

$$\frac{f_1}{D} = 0.46 \sqrt{0.63 + \left(\frac{S}{D}\right)^2} \quad (18)$$

式中, $S/D$ 取值为1,则极靴孔直径 $D=26.9$  mm,极靴间隙 $S=26.9$  mm。

已知 $V_r=63.6$  kV,则:

$$\frac{V_r}{(NI)^2} = 0.0048 + 0.00065 \frac{S}{D} \quad (19)$$

计算得 $NI=3416$  A·T。

## 4 仿真与调试

### 4.1 电子枪的仿真调试

根据电子枪的初值以及计算结果画出电子枪的结构,然后利用Source模块对电子枪进行仿真。根据仿真结果去修改理论值得到的结构,以使仿真结果满足发射束流和束斑直径的要求,经不断调试最终确定的电子枪具体结构如图5所示。通过仿真得到电子束轨迹如图6所示。

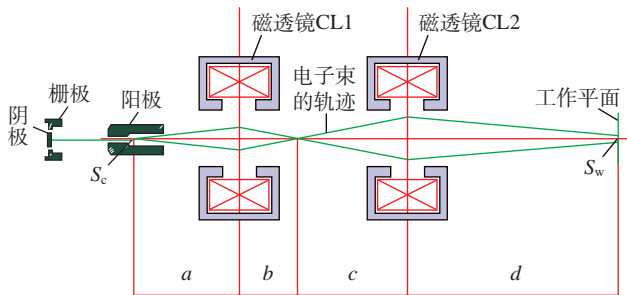


图4 电子枪光学系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of electron gun optical system

图6中红色线为电子束的轨迹,黑色轮廓线为电子枪的电极,绿色线为等势线。可以看出,LaB<sub>6</sub>阴极直径相对较小,因为发射面积太大会影响束流的聚焦。电子束从阴极尖端发射出来以后,聚束极对电子束实现聚焦,限制电子束的形状。阳极对电子实现加速,最终汇聚为一定形状和速度的电子束射出电子枪。

通过仿真得到的电子枪的各项参数如表3所示。可以看出,通过仿真得到电子枪总发射束流为60 mA,交叉斑直径为0.3 mm,与本文的设计目标参数一致,因此满足电子枪的设计要求。

### 4.2 透镜的仿真调试

在不断仿真调试的过程中,采用单一变量法进行了对CL1和CL2的激励,以及其位置4个参数变化的规律性分析,如图7和8所示。

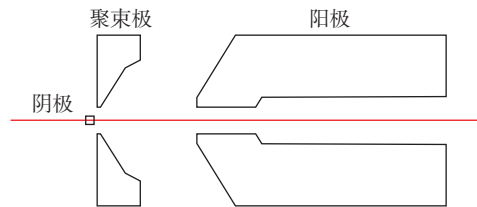


图5 电子枪结构图

Fig.5 Electron gun structure drawing

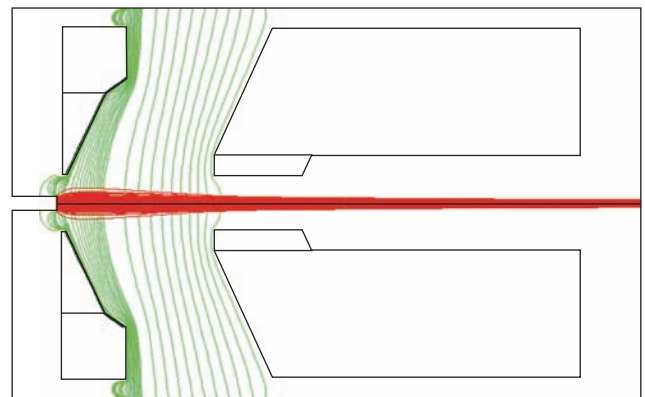


图6 电子枪轨迹仿真图

Fig.6 Electron gun trajectory simulation

表3 电子枪仿真参数

Table 3 Electron gun simulation parameters

参数	数值
总发射束流/A	0.06
束斑直径/mm	0.3
最大亮度/(A·cm <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )	5.7×10 <sup>4</sup>
阴极发射面到电子枪的出口位置/mm	53

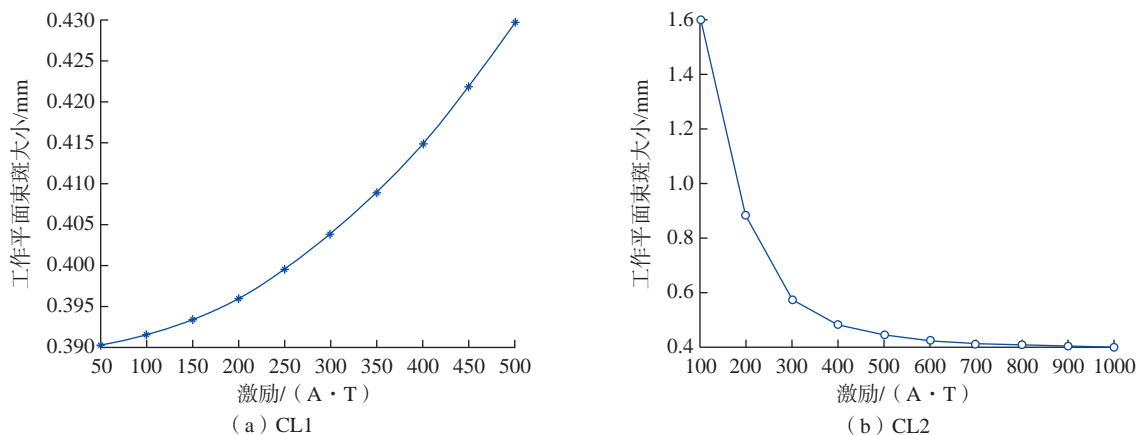


图7 磁透镜激励与束斑关系

Fig.7 Relationship between magnetic lens excitation and beam spot

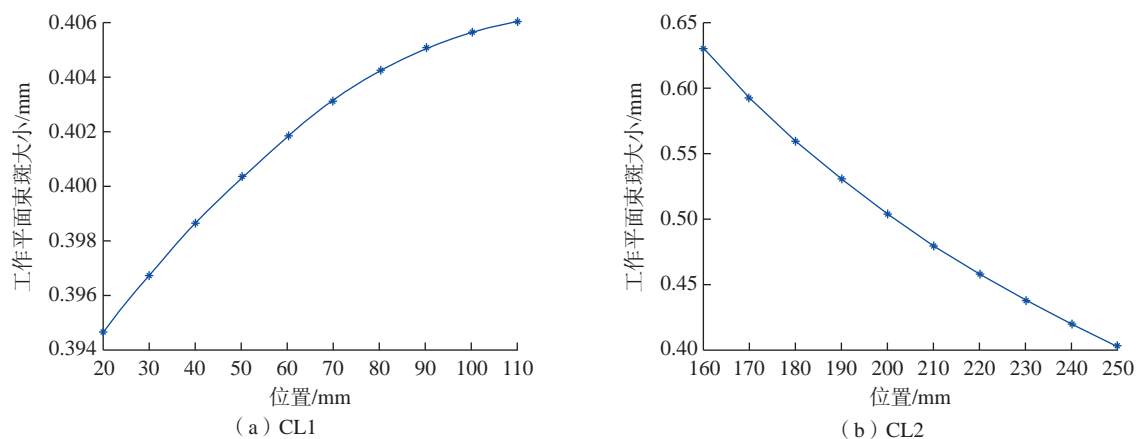


图8 磁透镜位置与束斑关系

Fig.8 Relationship between magnetic lens position and beam spot

从图7可以看出, CL1 激励越大,工作平面束斑就会越大;恰恰相反, CL2 激励越大,工作平面束斑就会越小,而且调节 CL2 激励对工作平面束斑的影响更加明显。从图8可以看出, CL1 位置越远,工作平面束斑就会越大;而 CL2 位置越远,束斑就会越小,显然 CL2 位置的变动比 CL1 对工作平面束斑大小的影响更加明显。工作平面束斑越小,电子枪的工作性能越好,在追求性能的同时一定要结合实际情况,比如为了减小束斑而过度加大 CL2 位置是不可取的,这样会增加电子枪的长度,从而造成结构的不合理。所以在调试过程中要调节多个参数,在满足工作平面束斑大小的情况下各个参数也都要处于合理的范围内。

通过调试得到了透镜的最终参数, CL1 调为弱激励 300 A·T,位置为 75 mm; CL2 激励为 1000 A·T,位置为 250 mm。

最后利用 Aber 程序来计算光路图,如图9所示。

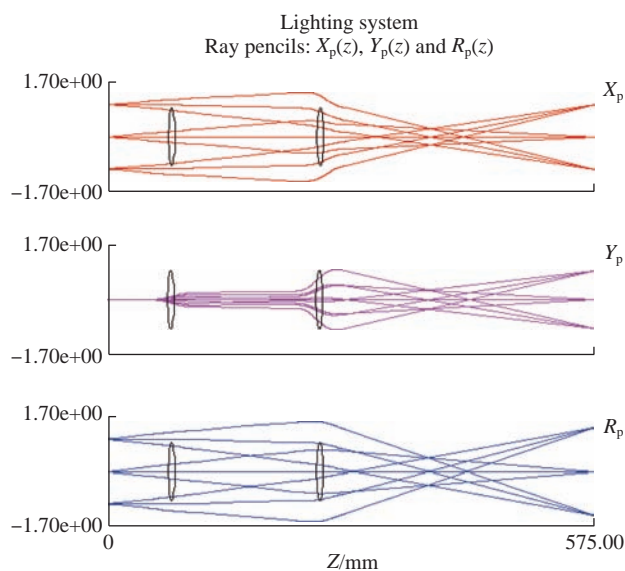


图9 聚焦透镜光路图

Fig.9 Optical path diagram of focusing lens

## 5 结论

本文实现了一种焊接用太空电子枪系统的设计,完成了对电子枪和磁透镜的设计,并通过仿真调试验证了电子枪满足总发射束流 60 mA 和交叉斑直径 0.3 mm,以及在工作距离 300 mm 处束斑 0.4 mm 的设计目标要求。本文的设计方法和过程,可以为太空电子枪的设计和相關研究提供一定的参考与借鉴。

### 参考文献

- [1] RAHE C, KELLY S T, RAD M N, et al. Nanoscale X-ray imaging of ageing in automotive lithium ion battery cells[J]. Journal of Power Sources, 2019, 433: 126631.
- [2] VANESSA W. X-ray tomography for battery research and development[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3(9): 293-295.
- [3] ZHANG L, LIU Y, LI S, et al. Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: A review[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(5): 1700842.
- [4] RAJENDRAN A R, MANOHARAN D A. A survey on future research about electron beam welding for aerospace applications[J]. China Welding, 2018, 27(1): 60-64.
- [5] WONG J Y. 3D printing applications for space missions[J]. Aerospace Medicine and Human Performance, 2016, 87(6): 580-582.
- [6] 倪士勇, 黄以平, 刘春东. 高压电子束焊机中电子束发生系统的设计计算[J]. 机械工程与自动化, 2007(4): 126-128.
- NI Shiyong, HUANG Yiping, LIU Chundong. Design and calculation of electron beam generating system in high voltage electron beam welder[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2007(4): 126-128.
- [7] FRAGOMENI J M, NUNES A C. A study of the effects of welding parameters on electron beam welding in the space environment[J]. Aerosp Sci Technol, 2003, 7(5): 373-384.
- [8] PATON B E, LOBANOV L M, NAIDICH Y V, et al. New electron beam gun for welding in space[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2019, 24(4): 320-326.
- [9] 陶振凯, 狄杰建, 赵玉侠. 基于 60kV/6kW 电子枪的 15kW 电子枪的研制[J]. 焊接技术, 2014(12): 41-43.
- TAO Zhenkai, DI Jiejian, ZHAO Yuxia. Development of 15kW electron gun based on 60kV/6kW electron gun[J]. Welding Technology, 2014(12): 41-43.
- [10] 何成旦, 李鹤岐, 许启晋. 电子枪新型阴极的设计[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(3): 1-5.
- HE Chengdan, LI Heqi, XU Qijin. Design of new cathode of electron gun[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2003, 29(3): 1-5.

通讯作者: 董全林, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子束技术、惯性导航与制导研究等。

(责编 七七)

(上接第 92 页)

- [14] 陆凯, 李迎光, 刘旭, 等. 数据驱动的飞机结构件加工特征识别方法[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 32-40, 57.
- LU Kai, LI Yingguang, LIU Xu, et al. A data-driven method for machining feature recognition for aircraft structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 32-40, 57.
- [15] HAJDU D, INSPERGER T, STEPAN G. The effect of non-symmetric FRF on machining: A case study[C]//Volume 6: 11th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control. Boston: American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [16] 张仕良. 基于深度神经网络的语音识别模型研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- ZHANG Shiliang. Research on deep neural networks based models for speech recognition[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [17] WANG R Q, LI F G, NIU J B, et al. Prediction of pose-dependent modal properties and stability limits in robotic ball-end milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 75: 102307.
- [18] RICHARDSON M H, FORENTI D L. Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials[C]//Proceedings of the 1st international modal analysis conference. Orlando: Union College Schenectady, 1982: 167-186.

通讯作者: 李法贵, 硕士, 研究方向为机器人铣削加工。

孙玉文, 教授, 博士, 研究方向为弱刚性/复杂曲面零件精密加工技术、数字化制造与智能制造、机器人加工技术及系统等。

(责编 晓月)

(上接第 118 页)

- [11] 周正干, 黄凤英, 魏东. 复合材料孔隙率超声检测方法综述[J]. 航空制造技术, 2009, 52(15): 104-106.
- ZHOU Zhenggan, HUANG Fengying, WEI Dong. Ultrasonic testing method for porosity in composite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(15): 104-106.
- [12] 肖鹏, 刘卫平, 刘奎, 等. 碳纤维复合材料孔隙分布及形貌分析研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(2): 62-66.
- XIAO Peng, LIU Weiping, LIU Kui, et al. Study on distribution and morphology characteristic of voids in CFRP composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(2): 62-66.
- [13] 于雅琳, 叶金蕊, 刘奎, 等. 含孔隙复合材料超声衰减分析的细观有限元模型[J]. 复合材料学报, 2014, 31(1): 171-178.
- YU Yalin, YE Jinrui, LIU Kui, et al. A mesoscale ultrasonic attenuation finite element model of void-containing composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(1): 171-178.
- [14] ŠERCER M. Campbell: Manufacturing processes for advanced composites[M]. Elsevier Science, 2003.

通讯作者: 刘钧天, 工程师, 研究方向为复合材料制造工艺。

(责编 七七)

## 创造价值 贡献航空

### 2023年“复合材料”专刊征稿

#### 选题背景

先进复合材料是应用于飞机、火箭、卫星、飞船等航空航天飞行器的理想材料。其应用已经成为评价航空航天器制造水平的重要标准，同时也是提高航空航天器结构先进性的重要物质基础和先导技术。为充分探讨复合材料在航空航天领域的发展及应用，《航空制造技术》继续出版复合材料专刊。诚挚邀请您对团队的研究成果进行论述，展示最新的研究进展，以期促进我国航空航天领域复合材料应用水平的提高。

#### 征稿范围

自动化与低成本制造技术，如数字化制造技术、自动化制造技术、整体化成型技术、非热压罐技术、液体成型、预浸料拉挤成型技术、纺织复合材料和连续纤维增强热塑性复合材料制造技术等；复合工艺理论与制造模拟，如复合材料传热行为、复合体系传质与传压行为、应力与变形等；高性能增强材料与基体，如碳纤维、硼纤维、陶瓷、SiC、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiC、Ti、石墨烯等高性能增强材料，以及树脂基体、金属基体、陶瓷基体等材料。

#### 投稿要求

1. 论文要体现研究前沿、有创新性，综述或研究论文均可。
2. 保证投稿论文的原创性（无抄袭、剽窃和侵权等行为），不存在一稿多投等情况。
3. 投稿论文直接发送至邮箱wyp@amte.net.cn。

#### 截稿日期

本征稿于2023年3月15日截止。

#### 联系方式

责任编辑：王燕萍  
联系电话：010-85700465-292

公司名称	位置	索引号
BLM集团	封二	23-1009
伊斯卡公司	封三	23-1011
蔡司公司	封底	23-1010
斯达拉格公司	1	23-1014
埃马克（中国）机械有限公司	3	22-1022
温泽测量仪器（上海）有限公司	5	23-1015
易格斯（上海）拖链系统有限公司	7	23-1013
北京迪蒙数控技术有限责任公司	9	22-1011
北京东兴润滑剂有限公司	11	22-1004
圣戈班磨料磨具中国	13	23-1012
2023深圳国际复合材料工业技术展览会	126	23-1003



 chinacompositesexpo.com

# 2023深圳国际复合材料工业技术展览会

中国国际复合材料工业技术展览会·华南站

2023年3月23日-25日 深圳会展中心

沪深联动 协同发展  
开启复材行业腾飞新征程



CCEXPO

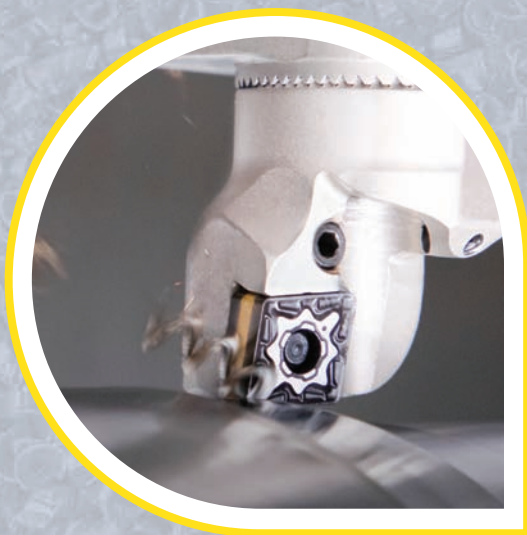
广告索引号23-1003



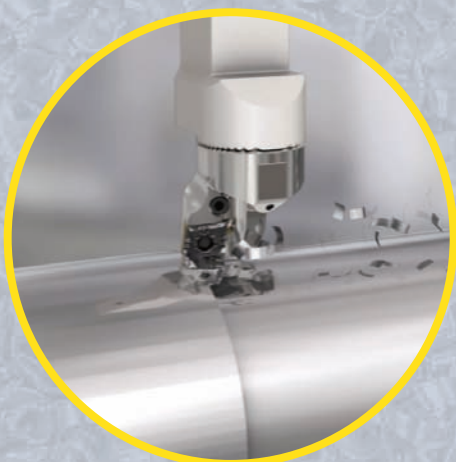
# 可换式 车刀头

**NEOMODU**  
INDEXABLE TURNING HEADS

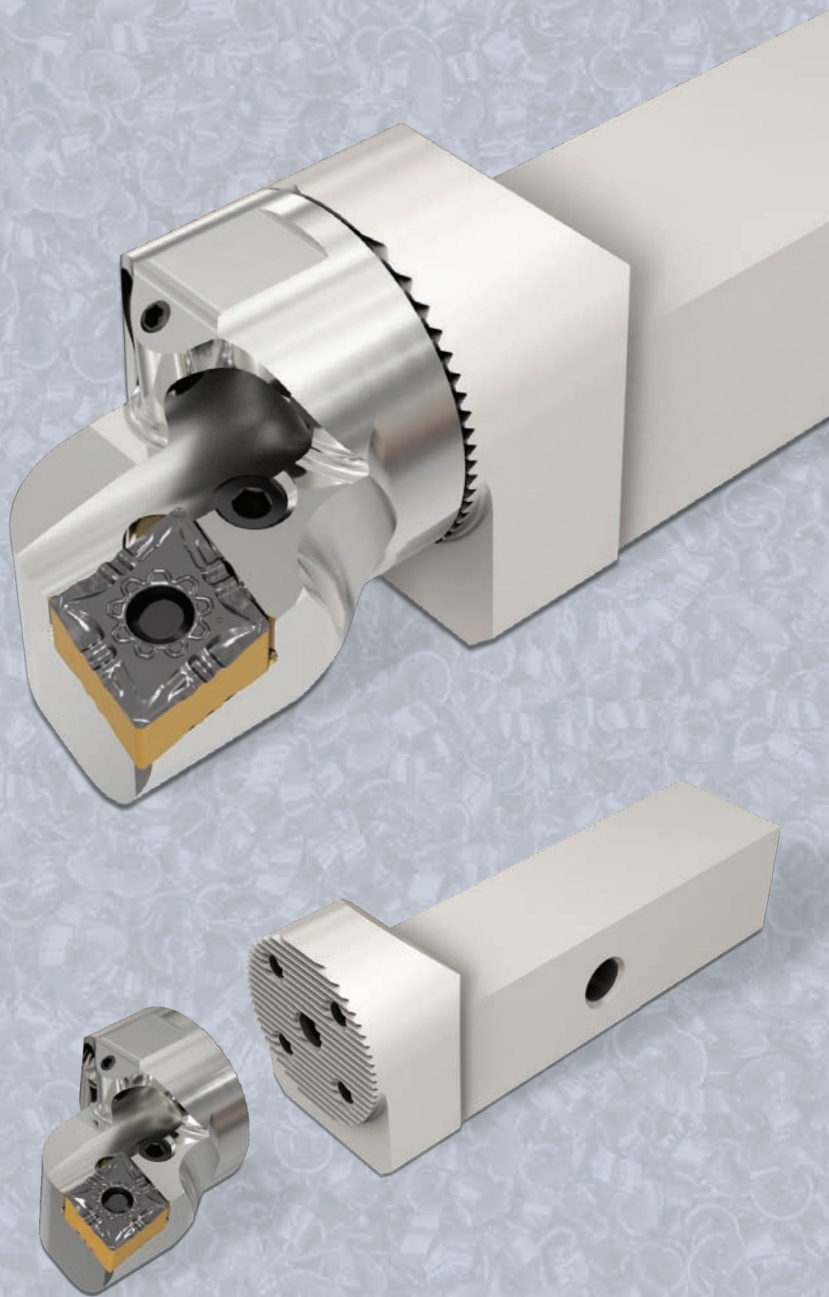
全新的装夹**可换式刀头**的外圆车刀, 通用于车削加工。



车刀杆刀方  
25, 32 & 40 mm



经济的钢质刀杆  
专致的**可换式外圆刀头**



广告索引号23-1011

**NEOLOGIO**  
MACHINING INTELLIGENTLY

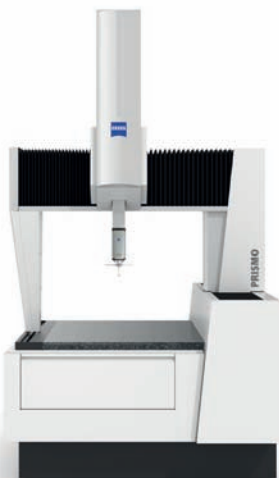
Member IMC Group  
**iscar**  
www.iscar.com.cn





Seeing beyond

# 精度 至关重要



## ZEISS PRISMO 系列

25年来，ZEISS PRISMO 以高速扫描和高精度为人所知。ZEISS 的 PRISMO 和 PRISMO ultra 始终与 ISO 质量标准保持一致。在当今世界，对精度要求之高已不容妥协，保持高精度至关重要。

如今，本系列产品中又新添两名新成员——ZEISS PRISMO verity 和 ZEISS PRISMO fortis。这两款坐标测量机均适用于在测量室内/外实现高精度测量。

全国服务热线：400-686-9906  
全国售后服务E-mail: [imthot.zc@zeiss.com](mailto:imthot.zc@zeiss.com)  
蔡司中国工业质量解决方案官方网站: <http://www.zeiss.com.cn/imt>  
蔡司中国工业质量解决方案网上商城: <http://cn.probes.zeiss.com>

