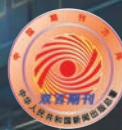


航空制造技术

2023年 第6期

Vol.66 No.6



封面文章
基于深度学习的自冲铆接
偏铆缺陷检测算法研究

专稿
机翼蒙皮无损检测生产线
中扫描路径优化方法

论坛
智能生产线

www.amte.net.cn

ISSN 1671-833X



ISSN 1671-833X CN 11-4387/V



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



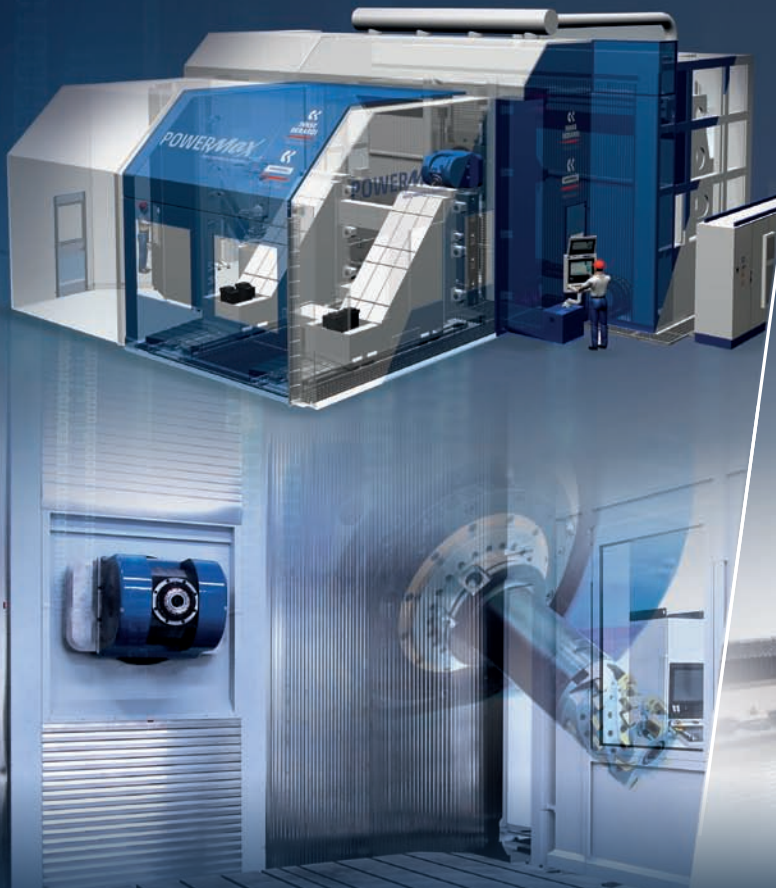
2023年4月10日-15日
北京中国国际展览中心
(新馆)
W1馆, A203展位

广告索引号23-1014

即刻体验机床未来

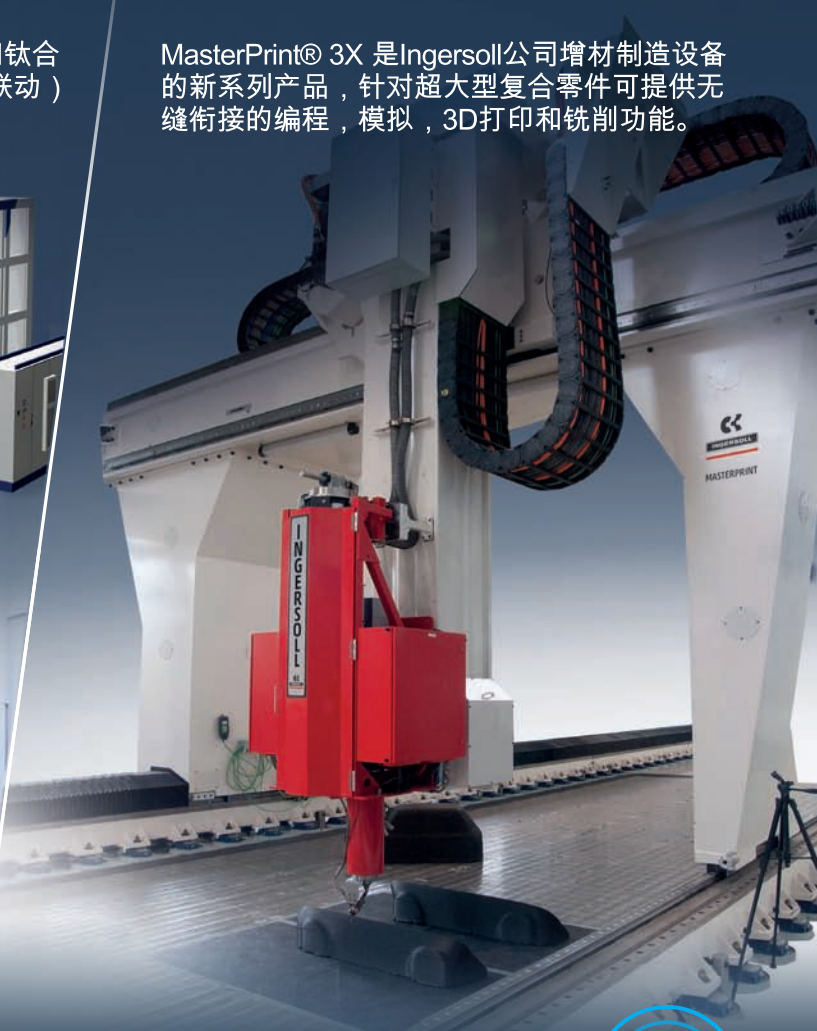
POWERMax INNSE-BERARDI & INGERSOLL

PowerMax大型加工空间，5轴联动，适于加工铝合金和钛合金的翻板卧式加工中心。（如果选择旋转台，则为6轴联动）



MASTERPRINT®

MasterPrint® 3X 是Ingersoll公司增材制造设备的新系列产品，针对超大型复合零件可提供无缝衔接的编程，模拟，3D打印和铣削功能。



面向未来工厂的数字化增强型大规格减材制造技术，
自动化复合材料技术和增材制造技术

广告索引号23-1086



敬请光临



中国国际机床展
2023年4月10日-15日
W3展厅 - A022展位
中国北京

Innse-Berardi Shanghai
Tel. +86 21/50315034
innse-berardi@camozzi.com.cn
cn.machinetools.camozzi.com

Ingersoll Machine Tools Inc.
Tel. +1 815 987 6000
info@ingersoll.com
www.ingersoll.com

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

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)

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/李 明
Text Editor Seven Hao/May Zhang/Linda Cheng/Winne Li
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。



NEODO
S90° LINE

精准90°方肩铣

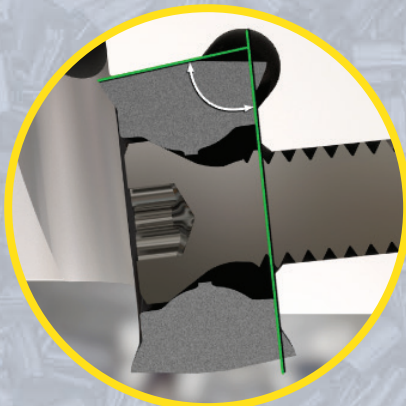
新铣刀系列用于方肩铣及面铣加工。
特别设计的铣刀实现精准90°方肩
铣。带8个切削刃的刀片与燕尾型夹持
方式相结合,使得能实施更高的切削
参数,确保更高生产率。



独特的**精准90°**方肩铣刀,
刀片带**8个**切削刃



高生产率
高成本效益



燕尾型刀片定位槽将刀片
牢靠地锁紧于刀体



广告索引号23-1023

NEOLOGIQ
MACHINING INTELLIGENTLY

Member IMC Group
iscar
www.iscar.com.cn



**客座主编 崔俊佳**

湖南大学机械与运载工程学院教授、博士生导师。长期从事运载装备轻量化设计与制造等方面的研究。担任中国机械工程学会塑性工程分会高速成形技术委员会副主任、塑性理论委员会委员、绿色制造技术委员会委员。

**客座主编 王长瑞**

南京航空航天大学机电学院研究员，博士生导师。长期从事航空航天智能装备设计与制造、基于数字孪生的发动机与电子装备智能装配、芯片架构设计及智能制造等研究工作。

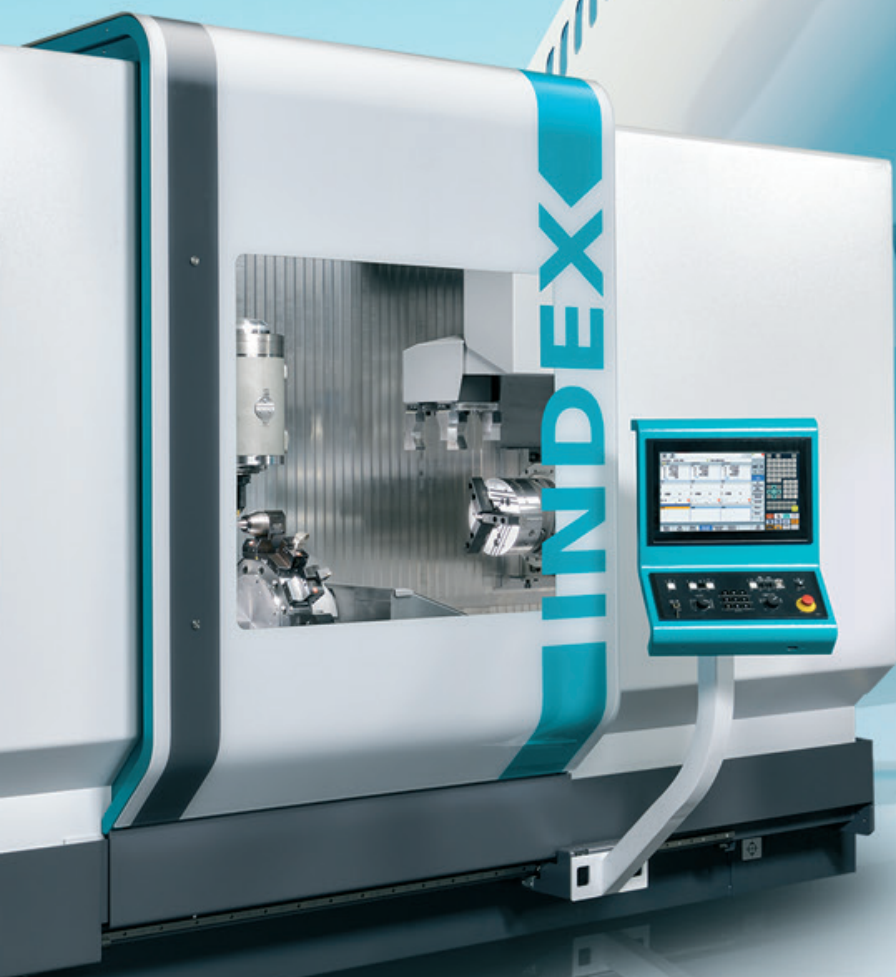
从数万个零部件的设计、试验、制造、组装、测试、运输，到成品的飞行、维修，航空航天制造业产品结构、工艺流程复杂，是智能制造技术最有潜力的应用领域。航空航天工业是先进制造技术发展的重要领域，而智能制造生产线对推进航空航天工业转型升级和创新发展，提升我国高端装备制造业未来发展具有重大引领示范作用。

经过多年发展，我国航空航天工业在信息化、自动化和网络化发展上已经取得了长足进步，但在广域协同、数字化企业、生产制造执行与集成以及自动化装配等方面依然存在差距。建立一套有效信息集成、实时监控的航空航天智能制造体系，增强决策部门在生产过程中的迅速反应能力，为决策者提供实时、准确、详细的现场资料，对及时解决现场问题，尤为重要。在智能化产线中，缺陷检测占据着重要的一环，直接影响产线效率和产品质量。传统算法难以满足日益复杂的检测需求和多变的检测条件。因此在传统缺陷检测技术基础上，引入人工智能为传统检测手段重新赋能，使其在面临的新挑战中破局而出。现代生产线通过丰富的传感器可以采集到许多精确详尽的生产信息，如工件图像、重量、尺寸等，这为实现智能制造提供了良好的基础。以视觉检测技术为例，在图像数据量足够的条件下，可以凭借工件图像判断工件是否存在表面缺陷，还可以精确计算工件的特征尺寸。但是，随着制造业的不断发展，产品种类越来越多，非标件、定制件占比不断变大，数据量的获取变得逐渐困难。尤其在航空航天制造业中，零部件种类繁多，定制化需求大，这就需要智能制造技术有较高的柔性化，降低算法的训练难度。目前视觉检测技术在数据量足够的情况下，检测精度已经可以超过人眼，在精度已经满足要求时，提高检测算法的泛用性或是下一个技术关键。

本专题围绕航空航天领域涉及的零部件生产过程中的结构设计、装配和检测等主题进行征稿，最终收录 10 篇代表性论文。其中包含自冲铆接偏铆缺陷检测、高鲁棒性视觉定位算法研究、工业机器人数字孪生建模方法以及无损检测生产线中扫描路径优化方法等，对读者了解相关领域的研究进展和发展趋势具有重要参考价值。希望本专题的出版能够进一步推动我国航空航天领域智能制造的发展，为航空装备智能化生产提供新思路。



车削
铣削
自动化
完整的解决方案

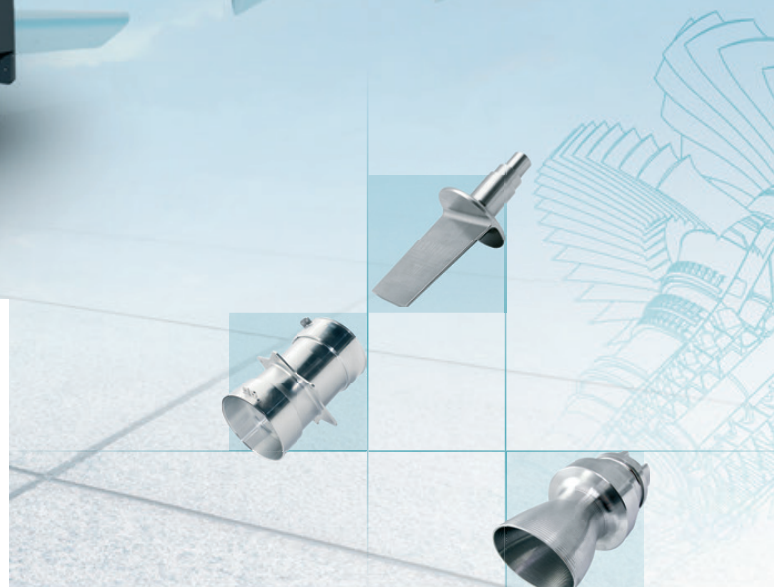


TAKE YOUR LEAD

创新的航空航天解决方案

发现 INDEX 多样化的航空航天解决方案! 多达 4 把刀同时加工, 动力强劲的电铣削轴可以实现 5 轴加工, 大型刀库, 可供机床和自动化系统选择的多种配置选项, 基于以上 4 点, INDEX 可以提供一切满足您要求的解决方案。INDEX 助您一路领先!

广告索引号23-1029



因代克斯贸易(上海)有限公司
Tel.: +86 (021) 54176612
Email: sales@indextraub-china.com
www.index-traub.cn



CIMT 2023

第十八届中国国际机床展览会
展位: W1-B205
时间: 2023 4/10-4/15
地点: 北京中国国际展览中心(新馆)

INDEX
better.parts.faster.

专稿 Feature

14 机翼蒙皮无损检测生产线中扫描路径优化方法

田威 李国良 郑炜 张晋 王长瑞 白权 王望 李鹏程
Scanning Path Optimization Method in Wing Skin Nondestructive Testing Production Line

TIAN Wei LI Guoliang ZHENG Wei ZHANG Jin WANG Changrui BAI Quan
WANG Wang LI Pengcheng

封面文章 Cover Story

22 基于深度学习的自冲铆接偏铆缺陷检测算法研究

崔俊佳 张军 苜茹茹 蒋浩 廖宇轩 李光耀
Research on Detection Algorithm of Partial Riveting Defects in Self-Piercing Riveting Based on Deep Learning

CUI Junjia ZHANG Jun XIAO Ruru JIANG Hao LIAO Yuxuan LI Guangyao

论坛 Forum

智能生产线 Intelligent Production Line

34 基于数字孪生的飞机总装生产线管控模式探索与实践

唐健钧 金筑云 石芹芹 许艾明 况林 石渊龙 张昊龙
Study and Realization of Production Line Control Mode Based on Digital Twins for Aircraft Final Assembly

TANG Jianjun JIN Zhuyun SHI Qinqin XU Aiming KUANG Lin SHI Yuanlong ZHANG Haolong

42 基于数字图像相关的切削加工剪切区应变率监测调控研究

赵爽 张东 聂广超 杨政彦 张小明
Monitoring and Control of Strain Rate of Primary Shear Zone in Cutting Process Based on Digital Image Correlation

ZHAO Shuang ZHANG Dong NIE Guangchao YANG Zhengyan ZHANG Xiaoming

50 面向工业机器人的数字孪生建模精度补偿方法

康瑞浩 胡俊山 田威 张嘉伟 马创业
A Digital Twin Modelling Accuracy Compensation Method for Industrial Robots

KANG Ruihao HU Junshan TIAN Wei ZHANG Jiawei MA Chuangye

60 涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线

姬学庄 高剑 孙晗
Digital Production Line of Turbine Blade Air Film Hole Electric Discharge Machining

JI Xuezhuan GAO Jian SUN Han



CGTECH
VERICUT

选择我们的优势

VERICUT是验证数控程序的优选方案

- 消除手动试切验证 -
- 确保机床不会碰撞 -
- 提高机床加工效率 -

VERICUT FORCE

基于切削受力分析优化数控程序

- 安全的减少加工时间 -
- 延长刀具寿命2倍或以上 -
- 延长机床寿命&提高投资回报率 -
- 提升零件质量&增强企业盈利能力 -

欢迎您莅临CIMT2023 VERICUT展位
展位号:E1-A313



北京新吉泰软件有限公司 CGTech China

地址:北京市朝阳区建国路126号瑞赛大厦805室

电话:010-65669919 邮箱:info.china@cgtech.com

网址:www.vericut.cn

节省时间·节约成本
保护您的机床安全

- 66 基于数字孪生的自动化立体仓库货位分配优化方法
—— 赵巍 连泰湖 张雷 张以成 冉孟 刘欣怡
Optimization Method for Storage Location Assignment in Automated Warehouse Based on Digital Twin
ZHAO Wei LIAN Taihu ZHANG Lei ZHANG Yicheng RAN Meng LIU Xinyi

研究论文 Research

- 74 水陆两栖飞机水动强度技术的现状与发展
—— 吕继航 杨仕福 杨荣 罗琳胤
Review on Strength Technology of Amphibious Aircraft Induced by Hydrodynamics
LÜ Jihang YANG Shifu YANG Rong LUO Linyin
- 85 耐腐蚀镁合金的成分设计方法研究进展
—— 张弛 王俊升 李鑫 田光元 王硕 苏辉
Research Progress on Design of Corrosion Resistant Mg Alloys
ZHANG Chi WANG Junsheng LI Xin TIAN Guangyuan WANG Shuo SU Hui
- 99 基于多Agent的柔性作业车间动态调度方法研究
—— 杨博见 杜丽 郭景仁
Research on Dynamic Scheduling of Flexible Job-Shop Based on Multi-Agent
YANG Bojian DU Li GUO Jingren
- 108 铝锂合金切削加工试验研究进展
—— 闫冬 李国和 王丰 范建勋 王大春
Development of Experimental Study on Cutting of Al-Li Alloy
YAN Dong LI Guohe WANG Feng FAN Jianxun WANG Dachun

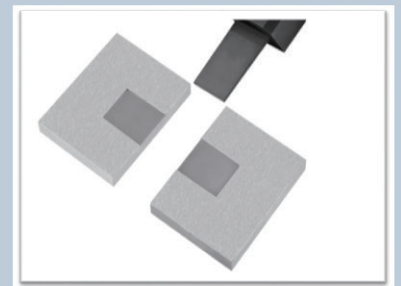
DMNC-EDM

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 北京迪蒙数控技术有限责任公司 010-60775392

广告索引号23-1011

直写4D打印陶瓷前驱体制备复杂结构陶瓷

近日,香港城市大学吕坚院士与哈尔滨工业大学孟松鹤教授合作,创新性地提出了一种通过直写4D打印陶瓷前驱体来制备复杂结构陶瓷的新策略。相关成果以 *Lightweight and geometrically complex ceramics derived from 4D printed shape memory precursor with reconfigurability and programmability for sensing and actuation applications* 为题发表于 *Chemical Engineering Journal*。

研究者合成了一种具有可重构性和形状记忆

效应的陶瓷前驱体复合材料。该工作制备的陶瓷前驱体具有可重赋形和形状记忆效应两大特点。可重赋形特性使得复杂几何形状的陶瓷易于制备,形状记忆效应赋予打印结构多样的临时形态和节约空间等优势(形状恢复率约100%)。4D打印制得的前驱体坯体经过高温裂解烧结后可以得到轻质高强双相陶瓷。研究中对制备的陶瓷进一步进行了表征和测试,对其具有的半导体温阻特性进行了表征并展示了相关应用。

通过化学二次交联

的方式实现陶瓷前驱体的二次赋形。不同于传统陶瓷前驱体只能实现单次赋形,此工作通过“半交联-完全交联”两步固化的方式,完成了陶瓷前驱体的两次单独赋形过程。以重赋形的方式结合4D打印,给予打印结构和形态更多的可能。

该工作设计利用了重赋形特性的传感器,能够以更高的可靠性检测不平整轮廓的表面温度。相关应用表明前驱体和其衍生陶瓷在航空航天领域的潜力。这项工作不仅为复杂结构陶瓷制造提供了一种新的策略,也为进一步发展4D打印、驱动器、传感器和工程应用铺平了道路。

左图为热响应形状记忆行为和从4D打印前驱体到几何复杂陶瓷的展示,由左向右包括初始、重赋形、临时形状、回复和烧结后陶瓷形状。

(本刊记者 大漠)



东南大学设计出具有卓越跳跃性能的软体机器人

近日,东南大学杨洪教授课题组受弹尾虫(Springtail)跳跃方式的启发,基于弹弓弹射原理,设计了一种具有荷包折(Three-leaf panel fold)结构的液晶弹性体基软体机器人。相比于热、光、气、电、磁、溶剂驱动跳跃机器人,该软体机器人具有更为优异的跳跃能力,其最大跳跃高度和跳跃距离分别达到了自身长度的87倍和65倍(相当于一个成人,一跃达到50层楼的高度),而且能够在不同环境条件下实现连续跳跃。

当近红外光照射该液晶弹性体基荷包折条带的内折叠部分时,内折叠部分会展开,但是会被外折叠部分阻挡,形成储能结构;当条带外折叠部分无法阻止

内折叠的展开时,条带存储的应变能瞬间得到释放,从而实现跳跃运动。研究者通过有限元模拟分析了这种荷包折条带的跳跃过程,与试验结果一致。在近红外光照射下,荷包折条带首先展开,形成弹指结构并存储能量,接着由于重心发生变化,条带发生翻转,最后突然释放储存的能量并产生跳跃运动。研究者进一步通过改变光强、荷包折条带的尺寸以及折痕角度,实现了对软体机器人的跳跃性能和跳跃方向的调控。研究者还演示了该液晶弹性体基软体机器人在复杂环境中(如台阶、粗糙表面)的连续跳跃。此项研究为智能材料和驱动器的发展提供了新的思路。

(本刊记者 大漠)

直接观察 BCC 固溶体合金的间隙原子占位取得新进展

引入间隙元素(如氧、碳、氮),是大幅提升体心立方(BCC)金属强度的有效方法,显著的固溶强化效果与间隙原子在晶格中的位置在有关。通常认为碳原子位于BCC晶格的八面体间隙位置,引起不对称的晶格畸变,有效提升材料强度。然而,在透射电镜中直接观察BCC晶格中的间隙原子很难,且易受样品表层杂质(如氧化层)的干扰。如何可靠地对间隙固溶原子及其所处晶格位置的直接观察是金属材料研究领域的一大难题。

近日,西安交大材料创新设计中心(CAID)刘畅研究员和马恩教授团队与清华大学于荣教授团队合作,选择含大量间隙氧原子(原子分数12%)的BCC(TiZrNb)₈₆O₁₂C₁N₁中熵合金,应用清华自主研发的自适应传播因子叠层成像技术,直接观察到

了间隙固溶体中熵合金中的氧原子。

该技术是一种衍射成像方法,采集电子束扫描样品时每个位置的衍射图,通过数值重构获得正带轴晶体对电子波函数的相位调制。技术具有深亚埃分辨、深度分辨、取向校正等优势,使其能有效地适用于应变和缺陷较多的晶体。研究发现,氧原子在晶格中的位置与其含量直接相关,高浓度时,氧原子主要位于BCC晶格的四面体位置,而非传统认为的八面体位置。

该发现揭示了间隙固溶BCC合金的结构特性,将有助于新一代高强度金属材料的研究与开发。此工作以 *Direct observation of oxygen atoms taking tetrahedral interstitial sites in medium-entropy body-centered-cubic solutions* 为题发表在 *Advanced Materials* 上。

(本刊记者 大漠)

浙理工制备出超耐用仿兔毛纳米纤维膜

近日,浙江理工大学傅雅琴教授团队、青年教师司银松等报道了一种具有超耐用性的仿兔毛髓腔状二氧化硅/聚酰亚胺(SiO₂/PI)复合纳米纤维膜。该研究通过简单的静电纺丝和浸渍过程制备出具有超耐用性的仿兔毛髓腔结构的SiO₂/PI复合纳米纤维。复合纳米纤维中嵌入的空心SiO₂微球和形成的竹节状空心结构赋予该膜出色的隔热性能,而纤维表面涂覆的PI薄层在没有大幅降低其热

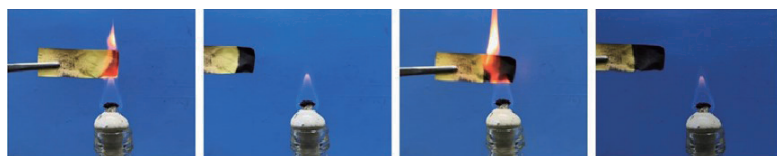
稳定性的同时使其具备很高的强度。获得的SiO₂/PI复合膜具有高的抗拉强度(19.7 MPa)、高柔韧性、低导热、抗多次摩擦、骤热/冷交替稳定性、低的燃烧发热/烟量和较高的极限氧指数。这些出色的特性主要归因于复合膜中形成的3D网络结构以及对单根SiO₂纳米纤维的浸渍增强效应。这种复合膜不仅克服了纯SiO₂膜的低拉伸强度和耐用性较差的缺点,而且还具有质轻、防火性能,在隔热、防火/冷

冲击、可穿戴防护织物等领域具有广泛应用前景。

该研究结果表明,采用同轴电纺丝技术和一种简单的浸渍方法可以制备出仿兔毛状SiO₂/PI复合纳米纤维膜。这为开发实用的耐久隔热材料提供了一种简单的策略,为制备多层叠压无机-杂化复合膜奠定了基础。

下图为仿兔毛髓腔状二氧化硅/聚酰亚胺(SiO₂/PI)复合纳米纤维膜的阻燃和自熄灭性能。

(本刊记者 大漠)





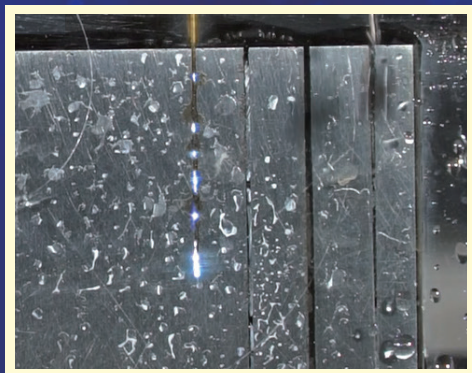
DIC[®]-305

电火花钻孔液

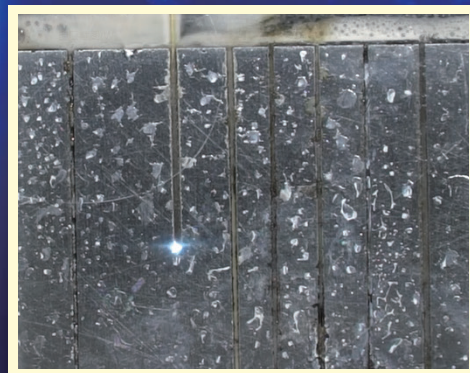
EDM drilling fluid

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[®]-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23-1004

地址: 北京市东直门外东辛店 网址: www.dic.cn/www.bjdxr.com E-mail: 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

哈尔滨工程大学制备出室温高塑性镁合金

镁合金作为最轻的金属结构材料,在航空航天、武器装备、汽车、3C 电子等领域具有巨大的应用潜力。

低的室温塑性一直是限制镁合金广泛应用的主要阻碍之一。HCP 结构提供了有限数量的可激活的滑移系统,并且只有两个独立的基面滑移系统易于激活,远不能满足 Von Mises/Taylor 准则。获得超细晶(约 1 μm 及以下)是提高镁及其合金室温塑性的重要手段,然而获得超细晶往往需要特殊的设备和工艺,限制了其广泛推广应用。

近期,哈尔滨工程大学张景怀课题组综合利用晶界偏聚和高比例非基面滑移激活开发出室温高塑性镁合金。相关论文以 *Developing a Mg alloy with*

ultrahigh room temperature ductility via grain boundary segregation and activation of non-basal slips 为题发表于 *International Journal of Plasticity*。

团队通过 Er (原子分数 0.3%) 元素微合金化、挤压变形和退火等工艺制备了平均晶粒尺寸约 8 μm 的 Mg-Er 合金,获得了室温下接近 50% 断裂延伸率的高塑性。相比超细晶而言,该动态再结晶晶粒尺寸可以容易地通过工业常规热挤压工艺(挤压温度 300~400 °C)获得,因此该超高塑性镁合金具有高效大规模应用潜力。

团队利用原位 EBSD+SEM 滑移迹线分析定性/定量研究了变形模式激活规律,表明 Mg-Er 合金在中等细化晶粒(8 μm)下能够激活相当

多非基面滑移,明显高于对比合金,且非基面滑移的激活也一定程度上抑制了孪生。

基于 TEM 位错柏氏矢量分析原理($g \cdot b = 0$ 缺陷不可见原则),利用双束条件下 WBDF 在拉伸后的退火 Mg-Er 合金中观察到大量的非基面滑移,这验证了滑移痕迹分析的结果。晶界裂纹是变形过程中难以避免的,晶界处的几何必须位错密度随变量的增加而增加。

团队利用 STEM-HAADF/EDS 量化分析不同状态退火的 Mg-Er 合金的晶界偏聚水平,300 °C 下退火合金的晶界偏聚水平明显更高,这利于晶界处的非基面位错激活和抑制晶界开裂,进而获得更高的室温塑性。

(本刊记者 大漠)

山东大学制备出流线型强化相构型 Al-Si-Mg 合金

山东大学刘相法教授团队利用自主研制的 Al-TCB-25Si 晶种合金,通过其中的 C 掺杂型 TiB₂ (C-TiB₂) 细化 α-Al 晶粒,并通过 SiC 进一步强化基体,制备了强化相呈网状构型的新型 Al-Si-Mg 合金。借助热挤压工艺将网状构型改变成流线型,系统地研究了不同构型 Al-Si-Mg 合金的组织力学性能,并讨论了组织构型对力学性能的影响机理。

在成分一致的情况下,与网状构型合金相比,流线型构型合金的极限抗拉强度降低了 11.0%,屈服强度降低了 15.6%,其延伸率提高了 79.5%。

增强相的构型对合金的性能也有显著影响,这与其承载力的方式密切相

关。流线型构型合金中的位错同样首先在强化相周围产生,但随着拉伸过程的进行,微裂纹趋于沿拉伸方向扩展,裂纹之间难以连接,合金得以持续变形,拥有更好的塑性。

综上,共晶 Si 和增强颗粒的流线型分布有利于提高 Al-Si-Mg 合金的塑性,其延伸率几乎是网状构型合金的两倍。这为高强高韧材料的设计提供了数据支撑和理论支持。

相关论文以 *Revealing the correlation of microstructure configuration and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy reinforced by C-doped TiB₂ and SiC* 为题发表在 *Materials & Design* 上。

(本刊记者 大漠)

长安大学与浙大团队发现纳米相变增韧膜层应力传递的物理机制

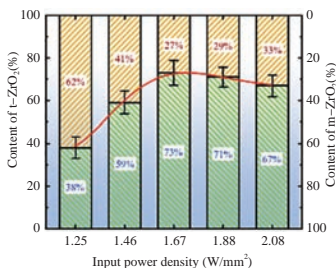
陶瓷复合膜层因具有较高的模量和出色的耐腐蚀性而被用于轻合金的表面防护领域,然而,过高的模量表现出的高脆性长期影响其在结构材料表面防护的应用。

长安大学轻合金表面强化研究所陈永楠教授团队和浙江大学刘海飞教授团队通过裂纹区的相变过程表征和分子动力学模拟,研究了陶瓷复合膜层中四方氧化锆(t-ZrO₂) 纳米晶相变增韧的具体机制以及 t-ZrO₂/MgO 界面

关系对应力传递的影响。相关论文以 *Enhancing the toughness of nano-composite coating for light alloys by the plastic phase transformation of zirconia* 为题发表在 *International Journal of Plasticity* 上。

基于该应力传递机制,增韧膜层的韧性相较于传统 PEO 膜层提高了约 1.15 倍,这将有助于推进陶瓷膜层在轻合金表面结构件的应用,延长陶瓷膜层的服役寿命,拓宽其应用环境。目前的研究结果清楚地显示了应力转移引起了 t-ZrO₂ 塑性相变,为增韧纳米陶瓷膜层的设计提供了一种新的策略。

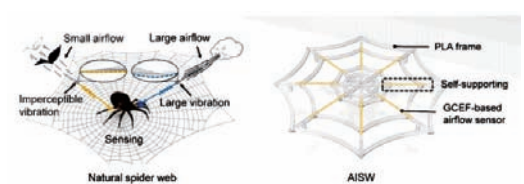
左图为相变控制的输入功率密度。(本刊记者 大漠)



宁波材料所高性能压阻式气流传感器研究取得进展

基于机械变形原理的柔性压阻式气流传感器系统具有小型化、制造简便、信号采集方便、灵敏度高、典型优点,被广泛应用于航空航天、天气监测、小型无人机等领域。已经有大量工作通过微小尺度上的材料设计实现对微小气流的检测,但是这一类材料因无法实现大范围的气流检测而受到应用上的限制,以简单有效的方式实现超低检测限和宽检测范围方面仍然存在挑战。

自然界蜘蛛通过感受蜘蛛网径向线振动来感知周围环境信息,宁波材料所陈涛团队受到这一现象的启发,研发了一种具有径向结构气流传感器系统。这种传感器(GCEF)主要由石墨烯、碳球和 Ecoflex 材料构建,通过检测竞争性横向和纵向应变



而产生的电信号做对应的响应。因此,该气流传感器具有超低气流检测限(0.0087 m·s⁻¹)、超宽感应范围(23 m·s⁻¹)和快速响应时间(约 0.1 s),并且 1150 次循环稳定。作为概念验证,开发了一种具有 8 个独立传感器的人工智能蜘蛛网(AISW)阵列系统,以精确区分所施加气流的强度、方向和位置,并进行主动警告和非接触式控制。

这种高性能压阻式气流传感器自支撑配置对不同流速的气流的响应具有不同的电流变化趋势,因此可以实现高性能气流检

测。并且开发了基于该气流传感器与实时信号处理功能集成的 AISW 系统,可以识别所施加气流的位置和强度,以进行实时监测和危险警告。这种自支撑气流传感器的设计在软电子和智能仿生系统领域显示出巨大的潜力。

该工作以 *Dynamic competitive strains enabled self-supporting Janus nanostructured films for high-performance airflow perception* 为题发表在 *Materials Horizons* 上。

上图为 GCEF 的结构设计和气流检测性能。

(本刊记者 大漠)

欧洲工业清洗、去毛刺技术联盟

领先的清洗、去脂、去毛刺技术&设备

德国ATL、BVL、HEMO、MAFAC、PILLER 品牌

- 水基精细清洗，中大型，定制水基清洗（清洁度200微米）
- 全真空有机溶剂去脂清洗，复合清洗（清洁度200微米）
- 高压去毛刺与清洗（压力500~3000bar）
- 热能去毛刺（Max热爆腔体尺寸460*600mm）



清洗黑科技



联系我们：CIMT2023/W2-A012展位

电话：021-6299 2324

广告索引号23-1049

引文格式: 田威, 李国良, 郑炜, 等. 机翼蒙皮无损检测生产线中扫描路径优化方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 14-21.

TIAN Wei, LI Guoliang, ZHENG Wei, et al. Scanning path optimization method in wing skin nondestructive testing production line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 14-21.

机翼蒙皮无损检测生产线中扫描路径优化方法*

田威¹, 李国良¹, 郑炜², 张晋², 王长瑞¹, 白权¹, 王望², 李鹏程¹

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

[摘要] 复合材料机翼蒙皮尺寸大、形状复杂、易回弹, 无法采用机床等传统方式进行无损检测, 机器人柔性化、智能化的特点, 为无损检测生产线提供了全新的思路。针对此类问题, 提出了大型机翼蒙皮连续曲面无损检测生产线及路径优化方法。利用双机器人搭载超声扫描设备, 采用两次检测策略, 第一次扫描对复合材料曲面进行重建, 提高第二次透射式无损检测的精度。根据机翼的形貌, 提出了一种平行于桁条行切的总体扫描策略, 根据曲率利用最小二乘法将点集分组, 之后应用混合遗传 LM 算法进行路径优化, 即采用改进型遗传算法进行启发式全局优化, 之后采用 LM 算法进行确定性局部优化, 高效得到其最优扫描路径。在 RoboDK 中进行仿真, 利用机器人搭载超声检测末端对蒙皮进行扫描。最后采用机器人搭载线激光扫描仪对优化路径进行精度验证。仿真及试验结果表明, 相较于传统的检测方法, 该方法满足无损检测约束条件, 平均检测效率提高 9.2%。

关键词: 复合材料; 无损检测; 遗传算法; LM 算法; 路径优化

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.014



田威

教授, 工学博士, 研究方向为机械电子工程、航空宇航制造工程。

航空制造技术涉及多个领域, 飞机部件的安全性和可靠性一直被广泛关注和研究^[1]。在飞机零部件生产制造过程中, 复合材料内部会产生缺陷, 为保证飞行安全, 需要对复合材料机翼蒙皮进行无损检测^[2-3]。随着复合材料制造技术的不断发展, 对无损检测的完整性和可追溯性的要求不断提高。无损检测通常由技术人员进行手动操作, 在工件轮廓表面上适当移动探头进行检测, 这个方法会导致大型蒙皮的检查过程非常缓慢, 且容易检测冗余。传统的人工检测方式已不能满足现代化精细、高效的检测要求, 亟须开发可靠的自动化检测生产线。机器人具有柔性化、智能化的特点, 广泛应用于航空航天领域, 其为复合材料无损检测生产线提

供了全新的思路, 能够有效提升无损检测环节的效率。

机翼蒙皮具有外形复杂、尺寸大、易回弹等特点, 无损检测对位姿精度要求高, 现阶段大型机翼蒙皮的无损检测存在着很多挑战, 蒙皮检测的路径一直是工业界的难题。为满足无损检测的精度要求, 首先采用线扫描仪对蒙皮进行初始表面扫描, 对蒙皮进行曲面重建。随后对扫描路径进行规划, 扫描路径决定了扫描的质量、效率以及安全性。超声探头相对于扫描点的高度以及倾斜角度会影响扫描质量与安全性; 扫描路径的总长度以及位姿调整时间决定了扫描的效率。

Mineo 等^[4-6]提出了一种新的复合材料航空组件机器人超声扫描

* 基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20210299); 国防科工局国防基础科研计划(JCKY2019210B004)。

系统,将路径规划与超声相控阵扫描系统同步,该方法没有考虑复合材料的回弹特性,造成测量时偏差较大。Riise 等^[7]采用了超声回波扫描调整机器人扫描路径的方法,来提高无损检测的质量,没有对扫描路径进行优化。艾小祥^[8]采用传统的遗传算法对机翼连续曲面扫描路径进行优化,但效率较低。上述方法都没有考虑到整体的优化,无法将效率及精度最大化。

基于上述问题,本文提出了一种机翼蒙皮无损检测生产线中扫描路径优化方法,采用双机器人搭载无损检测设备对复合材料进行检测;对大型蒙皮进行总体扫描路径规划,同时对整体路径以及单道路径进行优化。首先,采用平行于桁条的行切法对总体扫描路径进行优化;其次,采用混合遗传 LM 算法对单道路径进行优化;最后,在 RoboDK 中进行仿真来验证该方法的有效性和实用性,通过机器人搭载线激光扫描仪验证该方法的精度。

1 大型机翼蒙皮无损检测方法

1.1 复合材料无损检测生产线原理

对于复合材料的无损检测,本文提出了一种新型的复合材料无损检测生产线系统,该系统采用双工业机器人搭载超声 C 扫描末端对复合材料机翼蒙皮进行透射超声处理。超声 C 扫描简称 C 扫描,即特定深度扫描模式 (Constant depth mode),采用 2D 的方式显示,波幅高度通过不同的颜色显示出来,厚度信息通过平面图层的宽度显示。在双工业机器人末端分别搭载超声 C 扫描信号输出端与信号接收端。两端垂直于蒙皮表面,喷出耦合剂使得超声波能够传导入复合材料内部,其检测过程如图 1 所示。

当复合材料中有缺陷时,缺陷会反射出部分超声波,接收端的信号将会衰减。为了将组件界面处折射的影响和各向异性降至最低,在整个检

查过程中,超声波探头必须与表面保持垂直。由于复合材料具有回弹特性,使得实际位置与理论位置出现了偏差,需要对检测点进行校正,来提高无损检测的质量。因此采用两次扫描的方法。第 1 次采用激光测距,采集出理论位置与实际位置的偏差,对检测点校准,来提高无损检测的精度。第 2 次进行透射式超声 C 扫描对复合材料进行无损检测,其原理如图 2 所示。

如图 2 (a) 和 (b) 所示,线激光

扫描仪采用的是直射式激光三角测距法,由激光发射器的激光垂直射入被测物体表面, AB 表示激光器中心与电荷耦合元件的距离, BF 表示透镜的焦距, O 表示蒙皮上被扫描的其中一个点, EF 表示光斑在光敏单元上偏移的距离,记为 x ,则探头与蒙皮表面的距离可以表示为 AO ,由光路图中的几何关系可知 $\triangle ABO \sim \triangle BFE$,则有边长关系:

$$\frac{AB}{EF} = \frac{AO}{BF} \quad (1)$$

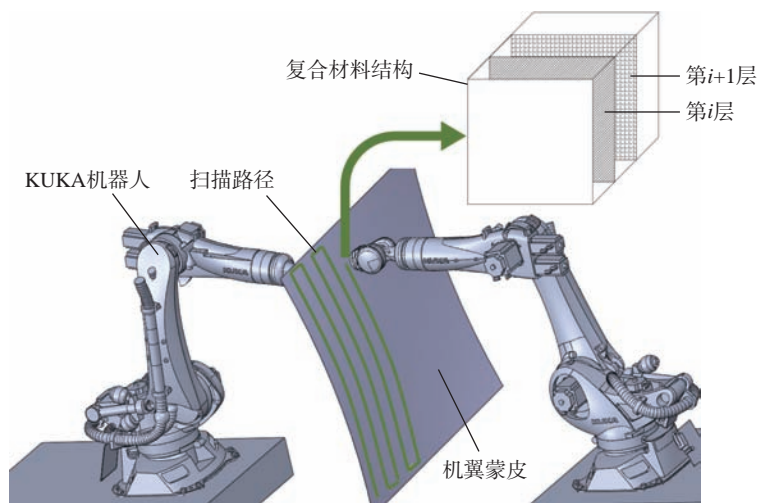


图 1 透射式超声检测生产线示意图

Fig.1 Schematic diagram of transmission ultrasonic testing production line

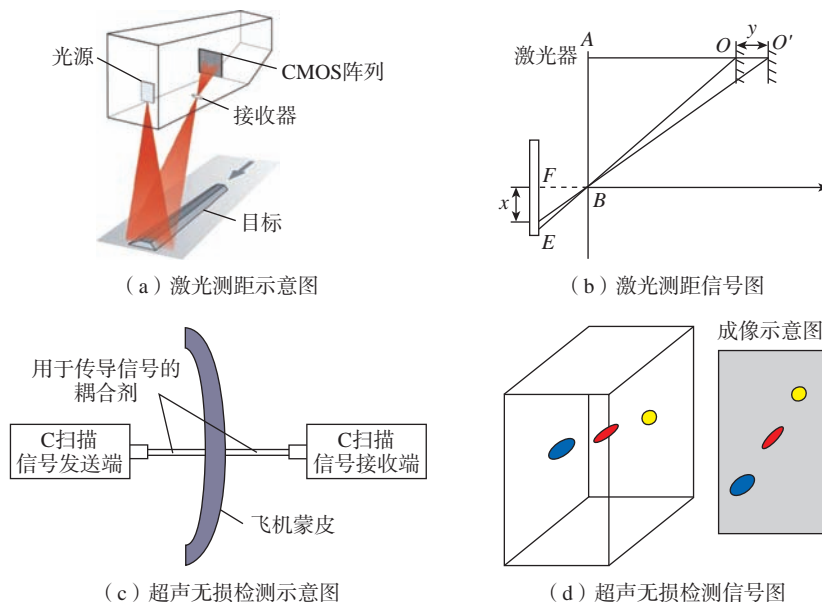


图 2 扫描原理图

Fig.2 Scanning schematic diagram

易知 $AO=BF \cdot AB/EF$, 即可得到被测物体距离。

如图 2 (c) 和 (d) 所示, 超声 C 扫描采用一收一发两个超声探头, 采用透射法检测较大尺寸航空构件, 避免反射法可能形成多次回波信号, 且检测存在盲区等问题, 并且可以直接显示内部缺陷的图像, 根据图像可以识别缺陷的面积长度等, 减小了缺陷识别的难度, 避免了人工进行相应缺陷的分析和判断。

机翼蒙皮为大型复杂曲面, 超声扫描对象的特征范围大、空间分散、扫描点数目多, 因此需要对总体扫描路径进行规划, 使得总距离最短、扫描时间最少, 满足检测精度要求与安全性, 有效提升生产线效率及安全要求。

1.2 超声扫描路径的总体策略

复合材料机翼蒙皮的外形总体接近于不规则梯形, 由蒙皮和桁条构成, 其形状如图 3 所示。

行切法跟环切法是数控机床加工中的常见形式。同理, 在生产线上, 无损检测扫描方式主要是行切法。观察蒙皮的形状, 如果扫描路径反复经过桁条, 则会增加扫描距离, 并且调姿复杂, 容易发生碰撞, 因此, 本文采用一种平行于桁条的行切方法来实现对总检测面的扫描覆盖。由于蒙皮尺寸过大, 超声扫描仪的扫描宽度较小, 需要反复几十次的检测过程, 如图 4 所示。总体路径策略采用“提取扫描面 → 生成扫描路径 → 离散扫描路径点 → 生成扫描法线 → 计算与输出路径 → 优化路径”的方式生成扫描参数, 其具体步骤为:

(1) 扫描面的提取。将大型蒙皮曲面模型导入到 CATIA 中, 按检测面积将其分为几个部分, 每部分满足双机器人无损检测的范围。

(2) 生成扫描路径。曲面扫描采用平行于桁条的行切法, 因此扫描路径通过等距离的平行平面截取曲面获得。平面的距离与阵列式超声

扫描仪的扫描宽度有关, 程序将截取面与曲面求交线获得扫描路径。

(3) 离散路径。将扫描路径等距离离散为扫描点, 选择距离是扫描水柱横截面的直径。

(4) 生成法线。超声扫描仪输出端过扫描点垂直于蒙皮曲面, 根据超声扫描仪的工艺需求, 在法向上一定距离处生成相应的法向点。

(5) 路径计算与输出。通过计算得出机器人扫描所需的位姿参数, 将每组参数依次输出。

(6) 初始扫描路径生成。为提高扫描效率, 将需要扫描的曲面简化为一组平面, 从而缩短扫描路径, 减少点位的个数。为满足时间最优的目的, 首先采用最小二乘法拟合平面, 取第一组扫描面 P_0 作为示例进行分析, 此组样点总数为 N 。如图 5 所示曲面简化为平面。

采用最小二乘法拟合平面, 其原理为: 以系数 a, b, c 表示空间平面, 所求系数 a, b, c 应使偏离扫描点的平方和 E 为最小, 设所求平面方程为

$$z = ax + by + c \quad (2)$$

$$E = \sum_{i=1}^N [z_i - (ax_i + by_i + c)]^2 \quad (3)$$

当 $\frac{\partial E}{\partial a} = 0, \frac{\partial E}{\partial b} = 0, \frac{\partial E}{\partial c} = 0$ 时, E 取得最小值, 此时可得系数 a, b, c 。

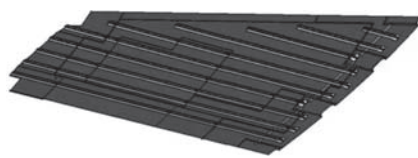


图 3 机翼壁板蒙皮示意图
Fig.3 Schematic diagram of wing panel skin

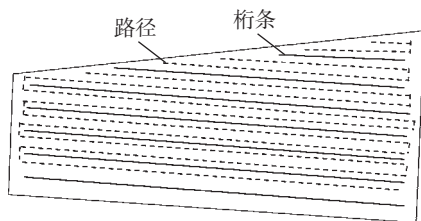


图 4 平行于桁条的行切检测路径
Fig.4 Line cutting detection path parallel to stringer

以最小二乘法为基础, 对初始点集进行分组, 依据曲率的不同会对蒙皮进行自适应分组。曲率较大时, 拟合的平面路径较短; 曲率较小时, 拟合的平面路径较长。为满足无损检测要求, 其约束条件为:

$$\begin{cases} \theta \leq \gamma \\ L_1 \leq H \leq L_2 \\ 1 \leq i \leq N \end{cases}$$

式中, θ 为与平面垂线与法线的偏转角; γ 为最大偏转角; H 为超声扫描耦合剂的高度; L_1 为最小检测高度; L_2 为最大检测高度。此时问题转化为单目标多元函数在约束条件下最优解的数学问题, 其流程如图 6 所示。

解决此类问题的传统方法是基于梯度信息的搜索法, 如拉格朗日法、最小梯度法、内点法、可行方向法等^[9]。这些方法对初值点及梯度信息要求高, 并且只能解决部分问题。而遗传算法在单目标多元函数问题



图 5 曲面简化为平面示意图
Fig.5 Simplifying the surface into a plane diagram

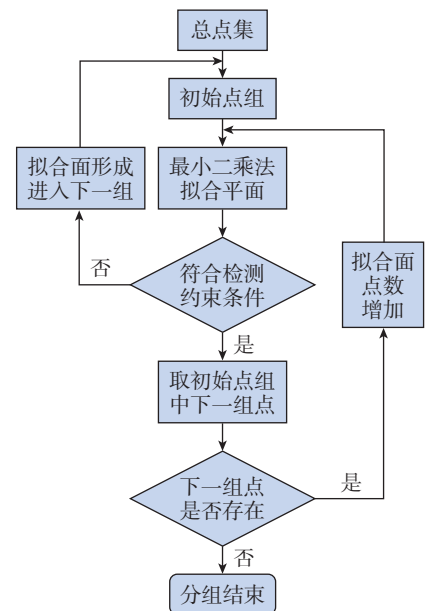


图 6 自适应分组流程图
Fig.6 Adaptive grouping flow chart

时表现优越,在此基础上采用改进遗传算法以及 LM 算法相结合的方式来寻求优化路径。此时优化的平面虽然在满足约束的条件下缩短了扫描路径,但并不能达到最优,因此本文使用一种混合遗传 LM 算法的路径优化策略来解决总体扫描路径最优解问题。

2 基于混合遗传 LM 算法的扫描路径优化

为求得服从于总体最优平面 P ,将单条扫描路径分解为若干个平面,扫描一个平面所需要的时间为 t_1 ,调整姿态所需要的时间为 t'_1 ,则扫描此平面所需要的总时间为 $T_1=t_1+t'_1$,此条路径所需要的总时间为 $T_{sum}=T_1+T_2+T_3+\dots+T_N$,令 $x=[a \ b \ c]$,则目标函数为

$$\min f(x)=T_{sum} \quad (4)$$

2.1 基于改进遗传算法的路径优化

自然界生物在周而复始的繁衍中,基因发生重组、变异等,使其不断具有新的性状,以适应复杂多变的环境,从而实现进化^[10]。遗传算法精简了这种复杂的遗传过程而抽象出一套数学模型,用较为简单的编码方式来表现复杂的现象,能够进行启发式搜索,大概率能找到全局最优解,与生俱来地支持并行计算,不依赖梯度信息,因此对于求解非线性多约束问题非常有效^[11]。

在大型机翼蒙皮连续曲面路径规划模型中,模型精度要求高,因此有效数字的位数长,若采用传统的二进制编码,其二进制串的长度过长,使得遗传、杂交、变异等操作,以及解码和编码的过程占用计算机较多算力,并且缺乏明确的物理意义。本文采用一种改进的实数编码遗传方法,无须转化数制和数据类型,便于理解,能够节省遗传操作时间,并且实数、示数范围大,精度高,能够有效优化该模型^[12]。其运算过程为:

步骤 1,设置种群的规模 N ,变异概率 P_m ,交叉概率 P_c ,迭代次数或

终止条件。与传统的遗传算法相同,对种群进行初始化。

步骤 2,计算种群中每代个体的适应度,利用适应度函数评价每个个体的好坏。

步骤 3,种群进化包括选择、交叉、变异等步骤。具体为(1)选择,采用合适的算法从父代中选择出部分个体组成中间代 $X_c(t)$; (2)交叉,按照概率 P_c 对中间代 $X_c(t)$ 中的部分个体执行交叉运算,得到中间代 $X_c(t)$; (3)变异,按照概率 P_m 对中间代 $X_c(t)$ 中的部分个体执行变异运算,得到中间代 $X_m(t)$ 。

步骤 4,判断是否满足设定的终止条件,若符合终止条件,执行步骤五,否则回到步骤 2。

步骤 5,进化完成后,将适应度最高的个体输出,该个体即为最优解,其具体流程如图 7 所示。

最小二乘法的作用是得到各组平面方程参数的初始值,优化的目标是求得各组平面方程参数的最优值,使总扫描路径长度值最小,求解的详细过程为:

(1)设计染色体。本文采用的是改进型实数编码的遗传算法,由实数组成染色体的基因。实数的个数决定染色体的长度,例如:(5.849, -3.189, 7.393, 1.136)表示的是长度为 4 的染色体。实数编码避免了二进制编码所引起的精度以及效率问题,对单目标多约束问题进行自然描述。为了加快算法的效率,因此只在 a, b, c 附近寻优,如 a 的取值范围为 $[0.7a, 1.3a]$ 。

(2)初始化。种群规模大小 $N=100$,染色体变异概率 $P_m=0.06$,染色体交叉概率 $P_c=1$,最大迭代次数 $t_{max}=200$,调用遗传算法工具箱中的函数 `crtpc()` 创建随机种群。

(3)计算适应度。本文采用的是可行性法则,需要计算每个个体违反约束的程度,并把结果保存在种群类的 CV 矩阵中。 CV 矩阵的每一行

对应一个个体,每一列对应一个约束条件, CV 矩阵中元素小于或等于 0,表示对应个体满足对应的约束条件,否则是违反对应的约束条件,大于 0 的值越大,表示违反约束的程度越高。

可根据无损扫描仪的扫描高度、扫描角度等构造 CV 矩阵,越满足约束条件,则适应度越高。根据扫描高度建立 CV 矩阵:

$$CV_1=\max(h_i)-L_{max} \quad (5)$$

$$CV_2=L_{max}-\min(h_i) \quad (6)$$

根据扫描角度建立 CV 矩阵:

$$CV_3=\max(\theta_i)-\gamma \quad (7)$$

(4)选择、交叉及变异。选择算法采用锦标赛法与精英个体保存法相结合,在保证算法收敛性的同时,又能保障全局最优解。锦标赛法是从种群中等概率随机选择个体构成组,选择个体适应度最高的进入子代,重复该操作,直到子代种群数量等于父代。而精英个体保存策略是指选出父代中最优良的个体,不进行后续交叉和变异操作,重插入到经过选择、交叉、变异的子代种群,替换适应度最低的个体。

交叉为遗传算法的主要动力,起着全局搜索的作用,对于实数型遗传算法,采用以下公式来构建交

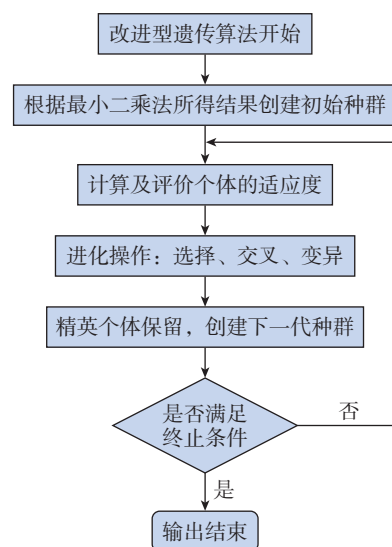


图 7 实数型改进遗传算法流程图

Fig.7 Flow chart of real-number improved genetic algorithm

叉算子:

$$X'_1 = \lambda_1 X_1 + (1 - \lambda_2) X_2 \quad (8)$$

$$X'_2 = \lambda_1 X_2 + (1 - \lambda_2) X_1 \quad (9)$$

变异为辅助动力,能够提高种群的多样性,降低算法陷入局部最优解的可能性,完成局部搜索,两者相互配合,完成待求解问题的优化过程。

在本步骤中,交叉算子对两个个体的基因结构进行分离重组,剧烈改变个体结构。在进化到达末期之后,改进型遗传算法已经锁定了最优解的所在范围,然而该算法对于局部搜索可能比较困难,这时可以利用局部优化的方法对该区域内的“山峰”进行局部搜索^[5],由近似最优解转变成最优解。

2.2 基于LM算法的路径优化

局部优化算法主要有梯度下降法、牛顿法、高斯牛顿法、LM算法等^[13]。梯度下降法采用负梯度下降,收敛速度较慢;牛顿法保留一阶和二阶项,能够进行二次收敛,收敛速度较快,但是需要计算黑塞矩阵,计算较为复杂;采用高斯牛顿法,用雅克比矩阵近似代替黑塞矩阵,能够提高计算效率,但黑塞矩阵不满秩则无法迭代。LM (Levenberg-Marquardt) 算法则能解决以上问题,作为一种阻尼最小二乘解法,兼具高斯牛顿法的局部收敛特性以及梯度下降法的全局特性,算法为

$$x_{k+1} = x_k - (J_k^T J_k + \mu I)^{-1} g_k \quad (10)$$

式中, J_k 是雅克比矩阵,采用 $J_k^T J_k$ 来代替黑塞矩阵降低计算难度; I 是单位矩阵; μ 是阻尼因子; g_k 是负梯度方向。当 μ 较小时和高斯牛顿法类似, μ 较大时与梯度下降法相似。本文采用 LM 算法拟合平面,将 μ 取较大值,快速求得最优解。

2.3 混合遗传 LM 算法

结合上文中的改进型遗传算法以及 LM 算法,本文采用混合 LM 算法对路径进行优化。首先采用改进型遗传算法对路径进行全局寻优,避免了陷入局部最优解;第 2 步采用高

效率的局部优化算法 LM 进行局部寻优,将改进型遗传算法的结果作为 LM 算法的初始值,结合两种算法的优点,进而得到全局最优解^[13-15]。

3 优化结果分析与试验验证

为了验证混合遗传 LM 算法的性能,在 Python 中进行优化仿真,并在 RoboDK 中进行仿真分析,最后采用 KR210 搭载线激光扫描仪进行试验验证。

3.1 优化结果分析

大型机翼蒙皮扫描生产线检测路径规划总体流程如图 8 所示。

本文采用的阵列式超声扫描仪,扫描宽度为 60 mm,扫描高度在

60~80 mm 之间,扫描点的法线与耦合剂之间的夹角在 5° 以内检测效果最佳。生产线的检测要求范围长 5000 mm、宽 3000 mm、高 2000 mm。综合考虑计算量 and 无损扫描仪参数,将平行平面之间的距离设为 20 mm,每组取 3 个平面与蒙皮相交,即扫描宽度为 60 mm,初始扫描高度设置为 70 mm。

为满足复杂曲面的检测要求,选用 CATIA 软件并结合 VB 进行二次开发,对检测点进行批量处理。选取其中一条检测路径,得到 549 个样点,通过自适应分组程序对路径进行分组,将曲面分解为一组平面,其分解路径如图 9 所示。将扫描路径分解为 5 个平面,之后采用混合遗传 LM 算法对平面参数进行优化,选取其中一个平面,其遗传迭代种群如图 10 所示。

选取图 4 中的 5 条路径,进行混合遗传 LM 算法优化,得到优化路径,路径长度对比如表 1 所示。

3.2 仿真试验

为验证该算法的优化效率以及实用性,首先在 RoboDK 中进行仿真试验。该软件是为机器人应用离线编程打造的虚拟仿真软件,支持库卡、发那科、安川、ABB 和川崎等机器人品牌的离线仿真,能够便捷地导

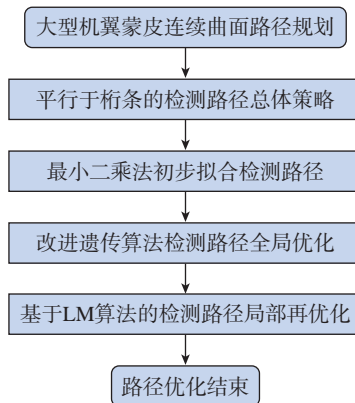


图 8 大型机翼蒙皮路径规划总体流程图
Fig.8 General flow chart of large wing skin path planning

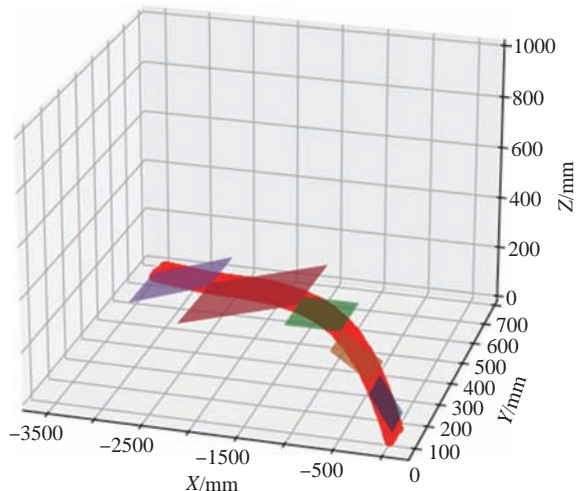


图 9 平面扫描路径图
Fig.9 Schematic diagram of plane scanning path

入工作站三维数模,还具有创建和编辑仿真程序、碰撞检测和生成离线程序等功能。采用 KUKA KR210 搭载超声扫描仪。为满足超声扫描要求,需提高扫描仪末端的平稳性与连续

性,设置末端的移动速度为 0.1 m/s,加速度 $a=0.5 \text{ m/s}^2$,其扫描时间主要由末端移动时间、达到扫描速度时间以及调姿时间构成,仿真过程如图 11 所示。

图 11 (b) 表示优化后的仿真路径,相较于优化前的仿真路径图 11 (a),该路径点位信息简约,且路径长度较短,所需要的检测时间较少。仿真结果得到每组检测路径所需要的总时间如表 2 所示。

由仿真结果可知,超声检测末端未与机翼蒙皮发生碰撞,路径满足检测的高度与角度约束条件,能够有效完成蒙皮路径的优化,采用本文混合 LM 算法相较于传统的 PTP 方法平均扫描时间减少了 9.2%,提高了检测效率,提升了生产线吞吐量。

3.3 路径精度试验验证

线激光扫描仪具有精度高、成本低特性,为了便于将机器人的 TCP 点位信息与传感器信息快速、精确结合,得到蒙皮工件表面的实际位置,采用线激光扫描仪验证混合遗传 LM 算法优化路径的准确性,搭建如图 12 所示的试验平台。

在 KUKA KR210 末端执行器上安装线激光扫描仪,其型号为米铎 scanCONTROL2900-25。根据扫描仪的型号以及夹具的尺寸,将线激光扫描仪的中心设为机器人 TCP。所选线激光扫描仪根据三角测量法扫描距离,检测宽度为 23.2~29.3 mm,

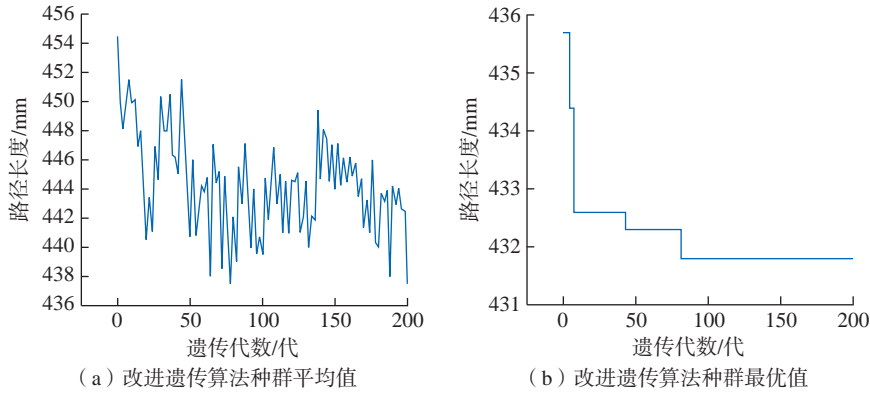


图 10 改进遗传算法种群值
Fig.10 Improved genetic algorithm population value

表 1 超声扫描路径长度
Table 1 Ultrasonic scanning path length

组别	PTP	最小二乘法	混合遗传 LM 算法
1	3563.66	3401.89	3387.59
2	3844.73	3653.11	3633.27
3	4092.84	3880.32	3851.36
4	4153.71	3951.41	3925.26
5	4247.59	4033.39	4005.48

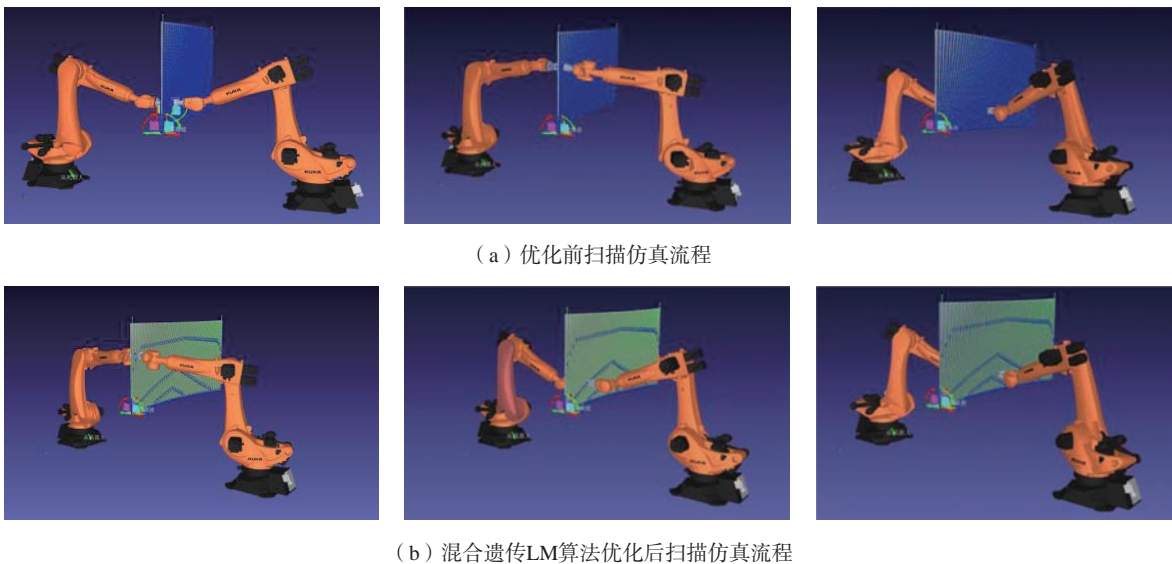


图 11 双机器人无损检测仿真过程流程图

Fig.11 Flow chart of simulation process of double robot nondestructive testing

表 2 不同模型超声扫描总时间对比

Table 2 Total ultrasonic scanning time of different models

组别	PTP	最小二乘法	混合遗传 LM 算法
1	43.48	39.61	39.48
2	46.03	42.13	41.93
3	48.53	44.40	44.11
4	49.45	45.11	44.85
5	50.44	45.93	45.65

精度为 2 μm, 传输速度为 300 Hz。

选取复合材料异形件进行试验, 首先采用线激光扫描仪按照原数模生成的路径进行测距, 得到理论位置与实际位置的偏差, 之后对修正的路径采用混合 LM 算法进行优化, 在试验平台上进行精度验证, 其试验过程



图 12 试验平台

Fig.12 Experimental platform

如图 13 所示。

将异形复合材料零件置于扫描台上, 用底部吸盘固定, 选取零件中间部分进行试验, 选取其中 15 条路径, 其扫描结果如图 14 所示。最大偏差为 9.83 mm, 其偏差主要来源于: (1) 为提高扫描效率、优化扫描路径造成的误差, 其最大偏移量为 9.5 mm; (2) 机器人自身的误差, 机器人采用基于空间相似度的误差补偿方法, 误差在 0.3 mm 以内。综上所述, 该路径最大偏差满足阵列式超声 C 扫描仪要求。

4 结论

对于大型复合材料机翼蒙皮无损检测生产线, 采用两次检测的策略, 第一次扫描对复合材料曲面进行重建, 提高第二次透射式无损检测的精度。相对于传统的直线式蒙皮扫

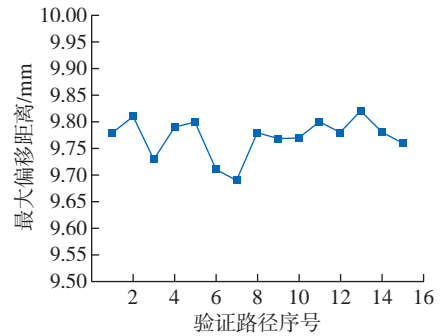


图 14 混合遗传 LM 算法偏移距离

Fig.14 Offset distance of hybrid genetic LM algorithm

描路径规划方法, 采用本文所述的混合遗传 LM 算法, 完成整个扫描过程的时间减少, 且曲率变化越大时效果越明显, 改进内容如下。

(1) 按照扫描约束条件对点集进行分类, 采用最小二乘法对扫描路径进行平面拟合, 得到平面参数初值: 曲率较大路径, 所含扫描点少; 曲率较小路径, 所含扫描点多, 对总体扫描路径进行自适应划分。

(2) 采用混合遗传 LM 算法以效率为目标对其进行优化, 首先采用实数型改进遗传算法对路径进行启发式全局优化, 之后用 LM 算法对其进行确定性局部优化, 找到最优路径, 在满足检测约束条件下, 扫描效率相较于传统方法提高了 9.2%。

参考文献

[1] 沈桂鹏, 王从庆, 王琪. 双框架飞机蒙皮检测机器人切换运动控制方法[J]. 航空学报, 2015, 36(6): 2064-2073.
 SHEN Guipeng, WANG Congqing, WANG Qi. Switching motion control of an aircraft skin detection robot with double frames[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 2064-2073.
 [2] 邹智慧. 金属材料超声无损检测技术应用研究[J]. 中国金属通报, 2018(8): 114-115.
 ZOU Zhihui. Research on application of ultrasonic nondestructive testing technology for metal materials[J]. China Metal Bulletin, 2018(8): 114-115.
 [3] 冯华山, 秦现生, 王润孝. 航空航天

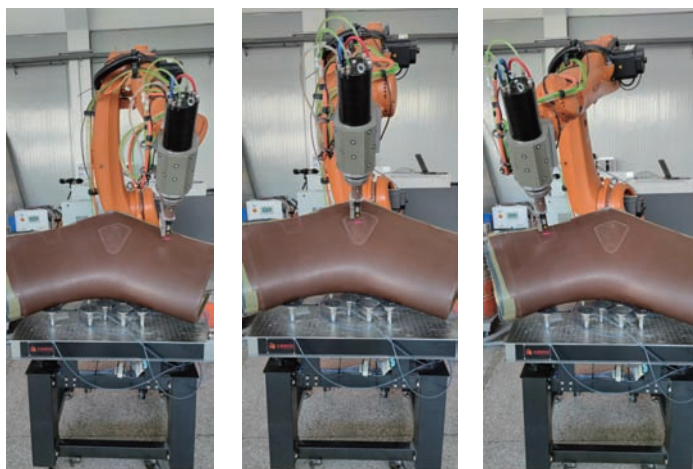


图 13 混合遗传 LM 算法优化试验流程

Fig.13 Flow chart of experimental process of double robot nondestructive testing

制造领域工业机器人发展趋势[J]. 航空制造技术, 2013, 56(19): 32-37.

FENG Huashan, QIN Xiansheng, WANG Runxiao. Developing trend of industrial robot in aerospace manufacturing industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(19): 32-37.

[4] MINEO C, PIERCE S G, WRIGHT B, et al. Robotic path planning for non-destructive testing of complex shaped surfaces[J]. AIP Conference Proceedings, 2015, 1650: 1977-1987.

[5] MINEO C, MACLEOD C, MOROZOV M, et al. Flexible integration of robotics, ultrasonics and metrology for the inspection of aerospace components[J]. AIP Conference Proceedings, 2017, 1806: 020026.

[6] MINEO C, PIERCE S G, NICHOLSON P I, et al. Robotic path planning for non-destructive testing—A custom MATLAB toolbox approach[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 1-12.

[7] RIISE J, MINEO C, PIERCE S G, et al. Adapting robot paths for automated NDT of

complex structures using ultrasonic alignment[J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2102: 040006.

[8] 艾小祥. 飞机机翼装配中的扫描路径规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

AI Xiaoxiang. Research on path planning of scanning in aircraft wing assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[9] 柯艺芬. 非线性方程组迭代解法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.

HE Yifen. Nonlinear equations iterative method[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021.

[10] 丛明煜, 王丽萍. 智能化遗传算法[J]. 高技术通讯, 2003, 13(4): 43-48.

CONG Mingyu, WANG Liping. An intelligentizing genetic algorithm[J]. High Technology Letters, 2003, 13(4):43-48.

[11] 韩瑞锋. 遗传算法原理与应用实例[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010.

HAN Ruifeng. Principle and application examples of genetic algorithm[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2010.

[12] QING-DAO-ER-JI R, WANG Y P. A new hybrid genetic algorithm for job shop scheduling problem[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(10): 2291-2299.

[13] 万超. 一种混合遗传LM算法求解非线性最小二乘问题[J]. 长江信息通信, 2021, 34(12): 52-54.

WAN Chao. A hybrid genetic LM algorithm for solving nonlinear least squares problem[J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34(12): 52-54.

[14] 吴思源. 曲面工件超声自动检测中若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

WU Siyuan. Study on key techniques of ultrasonic automated inspection for curved surface parts[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

[15] MITRA S, MITRA A. A genetic algorithms based technique for computing the nonlinear least squares estimates of the parameters of sum of exponentials model[J]. Expert Systems With Applications, 2012, 39(7): 6370-6379.

Scanning Path Optimization Method in Wing Skin Nondestructive Testing Production Line

TIAN Wei¹, LI Guoliang¹, ZHENG Wei², ZHANG Jin², WANG Changrui¹, BAI Quan¹,
WANG Wang², LI Pengcheng¹

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

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] The composite wing skin has the characteristics of large size, complex shape and easy rebound. It can't be used for nondestructive testing by traditional methods such as machine tools. But the robot has the characteristics of flexibility and intelligence, which provides a new idea for nondestructive testing. A scanning path optimization method of large wing skin continuous surface is proposed to solve this kind of problems. Dual robots equipped with ultrasonic scanning equipment, adopting the strategy of two-time inspection: the composite surface is reconstructed by the first scanning, so the accuracy of the second transmission nondestructive inspection is improved. According to the shape of the wing, a general scanning strategy parallel to the stringer is proposed. The points are grouped by the least squares method according to the curvature, the path is optimized by the hybrid genetic LM algorithm. The algorithm means the improved genetic algorithm is used for heuristic global optimization and the LM algorithm is used for deterministic local optimization, so that the optimal scanning path can be obtained efficiently. Then, the simulation is carried out in RoboDK, and the robot is equipped with ultrasonic detection end to scan the skin. Finally, the precision of the optimized path is verified by the laser scanner on the robot. Simulation and experiment results show that, compared with traditional detection methods, the average detection efficiency of this method is improved by 9.2%. It meets the constraints of ultrasonic detection.

Keywords: Composite material; Nondestructive testing; Genetic algorithm; LM algorithm; Path optimization

(责编 大漠)

引文格式: 崔俊佳, 张军, 芮茹茹, 等. 基于深度学习的自冲铆接偏铆缺陷检测算法研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 22-30.

CUI Junjia, ZHANG Jun, XIAO Ruru, et al. Research on detection algorithm of partial riveting defects in self-piercing riveting based on deep learning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 22-30.

基于深度学习的自冲铆接偏铆缺陷检测 算法研究*

崔俊佳¹, 张 军¹, 芮茹茹², 蒋 浩¹, 廖宇轩¹, 李光耀²

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082;

2. 北京理工大学深圳汽车研究院(电动车辆国家工程实验室深圳研究院), 深圳 518118)

[摘要] 自冲铆接技术适合铝钢等异种材料连接, 接头性能可靠, 在航空工业中有着广泛的应用场景, 但目前针对自冲铆接缺陷无损检测的相关研究较少。提出了基于深度学习的自冲铆接偏铆缺陷检测算法, 首先通过剪切力学性能试验得出偏铆自冲铆接件相较于正常铆接件力学性能下降了 5.6%; 然后通过自冲铆接偏铆件外部形貌特征将偏铆程度由外部特征定义在 0~10 的区间; 最后探究了单步检测同双步检测间的检测效果差异, 提出了 YOLOv5s (You Only Look Once v5s) 加 ResNet18 的检测方案, 并通过 Grad-CAM (Gradient-Weighted Class Activation Mapping) 对不同检测方案的效果差异进行了可视化的解释。测试表明, 提出的 YOLOv5s 加 ResNet18 的检测方案在所采集的数据测试集中可以达到 100% 正确率, 高于仅用 YOLOv5s 取得的 95.18% 正确率, 远高于仅用 ResNet18 取得的 84.1% 正确率。

关键词: 自冲铆接; YOLO; 深度学习; 无损检测; 视觉检测

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.022



崔俊佳

教授, 博士生导师, 主要研究方向为异种材料高效连接技术。

为响应国家可持续发展战略, 轻量化已经成为节能减排的重要方式, 特别在航空工业中, 对航空飞行器每一克的自重都锱铢必较, 对轻量化的需求十分迫切。针对轻量化需求, 多种材料机身成为主流, 由此诞生多种异种材料连接工艺。其中自冲铆接在连接异种材料时稳固可靠、方便快捷而备受关注。飞机蒙皮和骨架上, 都会大面积运用铆接完成材料的连接。因此, 针对自冲铆接工艺产生的缺陷以及接头性能评估的研究就显得尤为重要。

国内外学者针对自冲铆接工艺进行了较为全面的研究, Han 等^[1]

以预应变等级为变量, 对 SPR (Self-piercing riveting) 试件进行剪切拉伸试验和疲劳试验, 得出预应变等级同抗拉强度和疲劳寿命呈正相关。Rao 等^[2]研究了两种不同搭接方式下碳纤维复材-AA6111 铝合金铆接件的疲劳性能, 试验结果表明铆接件的钉头高度对接头的最大剪切载荷及失效时应力循环次数有着显著的影响。黎雄等^[3]采用 LS-DYNA 软件建立玻璃纤维增强热塑性复合材料 (GFRT) 的自冲铆接有限元模型, 对 SPR 过程进行数值模拟和试验验证, 与金属 SPR 接头钉腿被下工件完全包裹而形成自锁结构不同,

* 基金项目: 国家自然科学基金 (52175315, 51975202); 深圳市科技计划项目 (KQTD20200820113110016)。

GFRTTP 工件 SPR 接头的形成机理是钉腿穿透下工件而向外翻卷,与钉头一起形成机械锁。蒋浩等^[4]采用电磁铆接的方式探究了碳纤维-铝合金电磁铆接接头的力学性能,当以微观组织等性能作为评价指标时,最优放电能量为 5.0 kJ;当以接头剪切力作为评价指标时,最优放电能量为 5.3 kJ。

针对自冲铆接质量检测方法的研究也随着自冲铆接工艺的发展而逐渐深入。Han 等^[5]使用 NDT (Non-Destructive-Testing) 技术测试了一系列 SPR 接头,研究得出对于一些有两层或三层的铝接头,NDT 技术可以检测到坏的接头,但是对于涉及非常薄的铝板和钢板的接头,该方法的检测精度还有待提高。Johnson 等^[6]引入机器视觉的方式,对铆钉装载是否到位、是否存在重复铆接进行监控,并且提供了一些可确定铆接面板厚度的方法,继而避免一些可能会在强度和美观方面损害机械自锁结构的故障发生。Haque 等^[7]研究了不同厚度的碳钢板和不同硬度等级的钢铆钉铆接时产生的力-位移特性曲线,将力-位移曲线分为四个不同的阶段,并提出力-位移曲线可用于监测相同工艺参数铆接接头质量的可行性。

人工智能技术的逐步成熟和在制造业中的成功应用,是制造业实现智能化的关键技术保障,目前越

来越多基于人工智能的方法被运用到无损检测的领域。Zhao 等^[8]采用 ANN (Artificial Neural Network) 对自冲铆接内部自锁结构进行预测,并对铆钉、铆模进行最优化匹配。Karathanasopoulos 等^[9]也提出类似的神经网络对广泛可能的自穿铆接场景下的成功接头的形成进行精确分类。蒋玲^[10]构建了两种基于卷积神经网络的子图像裂纹识别网络,并编写遍历搜索算法,将已构建的基于子图像的裂纹识别网络的应用范围拓展到自冲压铆接全尺寸图像的裂纹待检测区域,完成自冲铆接裂纹的自动识别。

虽然针对自冲铆接工艺的研究比较充分,但针对其工艺产生的缺陷及其缺陷检测方面的研究却鲜见。本文针对自冲铆接偏铆缺陷提出了一种基于 YOLOv5s 加 ResNet18 的检测算法。算法兼顾效率和正确率,并具有极高的鲁棒性和迁移能力。

1 试验及方法

1.1 自冲铆接设备与视觉检测平台

自冲铆接的设备和铆接过程如图 1 所示。铆接步骤主要可以分为 4 个阶段:

(1) 夹紧阶段,压边圈对上板施加压力,为固定铆钉、上下板材和凹模之间提供下压力;

(2) 穿刺阶段,铆钉受力持续下降,刺穿上板,该环节铆钉不会发生

较大的形变,否则会影响自锁结构的形成;

(3) 扩张阶段,铆钉受力下降并受下板和铆模的阻碍,扩张变形,形成自锁结构;

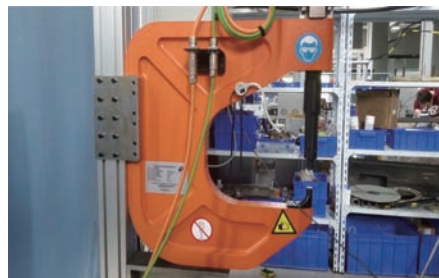
(4) 卸载阶段,铆接完成,压边圈和冲头上升,铆接接头卸力回弹。

本次试验所有图像均由一款 4800 W 像素的 CCD (Charge Coupled Device) 工业相机采集得到。为避免偏铆标定时出现由图像采集造成的误差,所有图像均在设备调试合适后,固定设备同一批次采集。采集设备如图 2 所示,最上方为图像采集设备和广角镜头,中部为环状补光灯,下方为铆接工件。本次试验共采集了 33 个自冲铆接件 825 张图像数据。

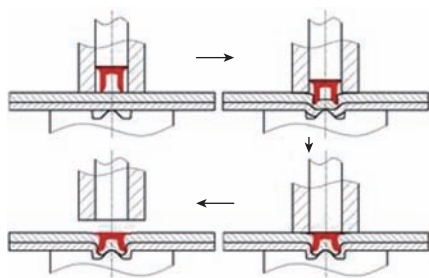
1.2 偏铆缺陷的影响与量化

采用厚度 2 mm 的 5052 铝合金板(下板)与 3 mm 的 5083 铝合金板(上板)具体尺寸如图 3 (a) 所示,制作了 3 组正常件与 3 组偏铆件,接头形貌如图 3 (b) 所示。采用美国斯特朗公司生产的 Instron 5985 万能试验机对样件进行 2 mm/min 的准静态剪切试验(图 3 (c))得到表 1 的试验结果。偏铆件相较于正常件最大剪切力下降了 423.64 N,考虑到自冲铆接作为车身或机身连接方式时总是成批使用,所以积累的力学性能下降会造成连接可靠性下降。

由于偏铆程度过大时轮廓不能用标准圆拟合,所以需要一种适用性



(a) 自冲铆接机



(b) 自冲铆接过程

图 1 自冲铆接设备及流程图

Fig.1 Self-piercing riveting equipment and flow chart

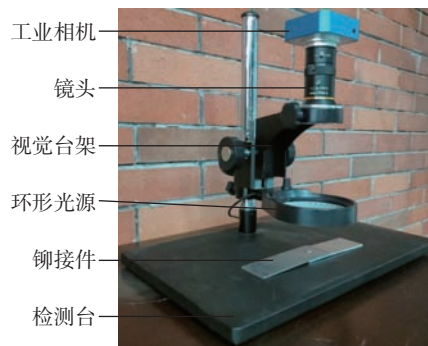


图 2 视觉检测平台

Fig.2 Platform of vision detection

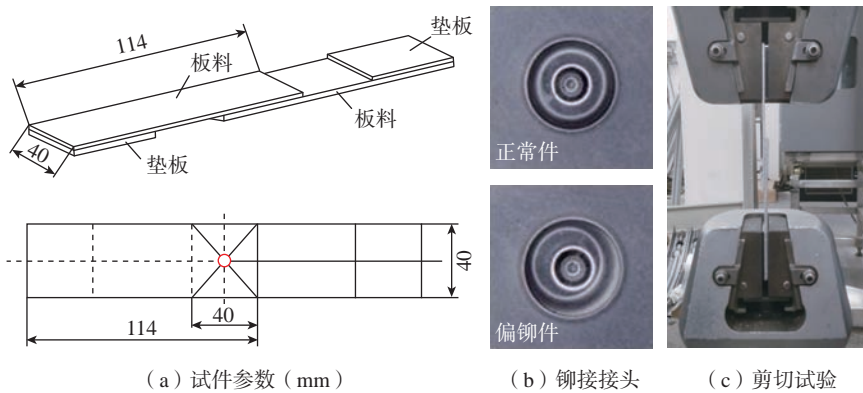


图3 准静态剪切试验
Fig.3 Quasi-static shear experiment

表1 最大剪切力
Table 1 Maximum shear force

样件	最大剪切力/N			平均最大剪切力/N
正常件	7705.42	7452.84	7714.81	7624.35
偏铆件	7124.43	7344.75	7132.94	7200.71

更广泛的量化偏铆方法。如图4所示,首先标出最大圆的最小外接矩形,通过该矩形找到最大圆圆心。然后以该圆心为中心,以最远距离、最近距离为半径画圆。所作两圆应该满足以下条件:轮廓与最近距离圆有且只有一个相切点,且轮廓上其余点均在最近距离圆外;与最远距离圆有且只有一个相切点,且轮廓上其余点均在最远距离圆内。最远距离圆直径减去最近距离圆直径的差值,即可量化铆接接头的偏铆程度。为了消除图像获取、标记软件对图像放大或缩小的影响,将直径差值除以最大外接圆的最小外接矩形平均边长,获得一个无量纲的数。为了更加方便地表述偏铆程度,在满足自冲铆接偏铆程度从完全无偏铆到极端偏铆的情况下,将该数扩大30倍,使该数处于0到10的区间,偏铆程度 P 为

$$P = \frac{D_1 - D_2}{(W + H) / 2} \times 30 \quad (1)$$

式中, D_1 是最大距离圆直径; D_2 是最小距离圆直径; W 是铆接接头外接矩形的宽; H 是该矩形的高。将偏铆程度按 $[0, 3)$ 、 $[3, 6)$ 、 $[6, 10)$ 分

别划分为正常件、良品和次品。

1.3 单步检测方法研究

1.3.1 基于YOLOv5s的偏铆检测

YOLO是“You Only Look Once”的缩写,是单阶段端对端的目标检测算法,经过训练的目标检测网络可以根据图像输入直接输出目标边界框和类别,兼具高效率和高精度,被广泛应用于工业质量检测及缺陷检测中^[11]。YOLOv5是该系列在开源网站维护较为活跃的网络结构,其中YOLOv5s网络参数量最小,算力要求小,检测效率高。因此本文在偏铆缺陷检测上选用YOLOv5s网络,并在后续两步检测中,将YOLOv5s网络进行剪裁使其充当一个单纯的目标检测网络,不再兼顾分类任务。

YOLOv5s在对采集到的图像分训练集和验证集进行100轮训练后的结果如图5所示。此处YOLOv5s采用CIoU Loss和BCE Loss来计算损失,后续网络采用CrossEntropy Loss计算损失,可看出在3个损失中,无论是在训练集还是在测试集中,边界盒损失和客观性损失经过一段急剧下降后,以相对平滑的曲线下

降并最终呈现收敛的状态。但是在验证集中的分类损失却以一种极其夸张的反复跳跃逐步完成下降,并且最终也不收敛,处于反复的振荡状态。经过100轮训练后,YOLOv5s虽然得到了一个接近于1的精度和召回率(Recall),但是召回率和正确率始终处于一种振荡状态。召回率在50轮次左右甚至有接近30%的回撤。

边界盒损失和客观性损失平滑下降并最终收敛于极小的值,由此可知YOLOv5s在找出铆接接头并框选出铆接接头区域的任务上表现优秀。但是在铆接接头分类任务上表现却不理想,最终实测可得95.18%的正确率。

1.3.2 基于ResNet18的偏铆检测

ResNet网络^[12]创造性地提出残差结构,解决了在深度学习中当网络堆叠到一定深度会出现的梯度消失或梯度爆炸以及退化问题。在ResNet中按网络结构的深度又分为若干分支,本文采用网络结构最为简单的ResNet18作为分类网络。

本次试验用采用ResNet18网络结构对样本数据进行100轮训练。经过100轮训练后,在训练集中的训练损失达到了0.00013862,在验证集中的准确率达到91.46%,并且在10~50轮的时候准确率有较大幅度的波动(图6)。

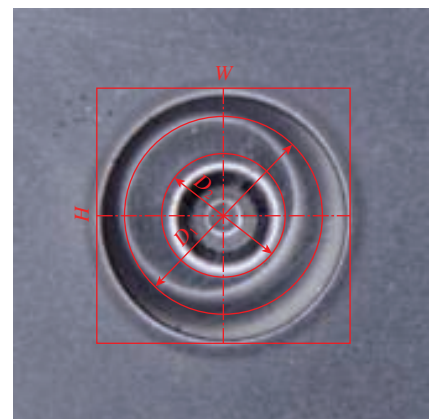


图4 偏铆程度量化示意图
Fig.4 Quantification diagram of degree of partial riveting

1.4 双步检测方法研究

由于只采用一种深度学习网络难以达到预期的目标,萌生出将自冲铆接接头检测任务分为铆接接头检出和分类两个任务,并由不同的方法分别完成,如图7所示。使用YOLOv5和霍夫2-1圆检测完成铆接接头检出任务,使用ResNet18、VGG16和GooLeNet完成铆接接头分类。

1.4.1 铆接接头检出

YOLOv5 铆接接头检出方法采用基于YOLOv5网络修改完成,去掉原网络的分类损失,不再进行铆接接头分类,保留其中的客观性损失和边界盒损失,检测图像中是否存在铆接接头和铆接接头的具体位置。去掉YOLOv5网络head部分中用以检测小目标的 80×80 检测部分和用以检测中等目标的 40×40 检测部分,仅保留用以检测大目标的 20×20 检测部分。

经过训练后特制YOLOv5网络优秀地完成了铆接接头检测的任务(总共825张铆接工件图像),检出825张铆接接头图像,无漏检无错检。检出的铆接接头图像完整、准确,铆接接头基本以最大外圆的最小外接矩形裁剪完成。部分铆接接头图像如图8所示。

霍夫2-1圆检测基本完成铆接接头检测任务(总共825张铆接工件图像),但是出现了1漏检和1错检,检出823张铆接接头图像。在被检出的铆接接头图像中同时存在着部分铆接接头并不是完整且准确检出的情况,如图9所示。

由两种方法对铆接接头检出结果可知,定制的YOLOv5网络在铆接接头检出任务上的表现更好,检出的铆接接头完整且准确。霍夫2-1圆检测在该任务上不仅没法做到全部检出,检出的铆接接头存在残缺的问题,而且检出的铆接接头区域不够准确。但是两种方法中,霍夫2-1圆检测的检测方法拥有更加朴素且可

解释的过程,所需要的计算量相较于YOLOv5网络更少。在严格控制图像采集环境和采集方法的工业化生产线上,霍夫2-1圆检测具有超过

YOLOv5深度学习网络的潜力。

1.4.2 铆接接头分类

在上一步将铆接接头检出的基础上,需要对铆接接头进行分类,以区

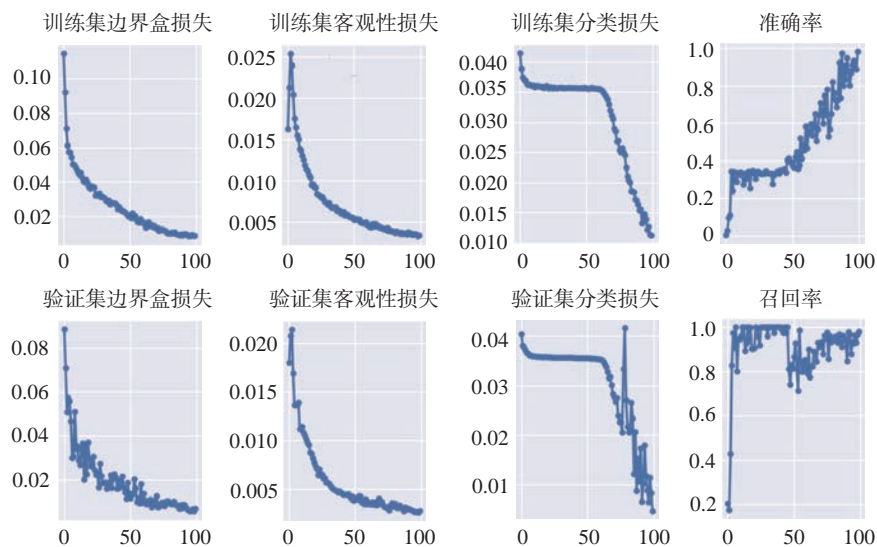


图5 YOLOv5s 训练结果
Fig.5 YOLOv5s training results

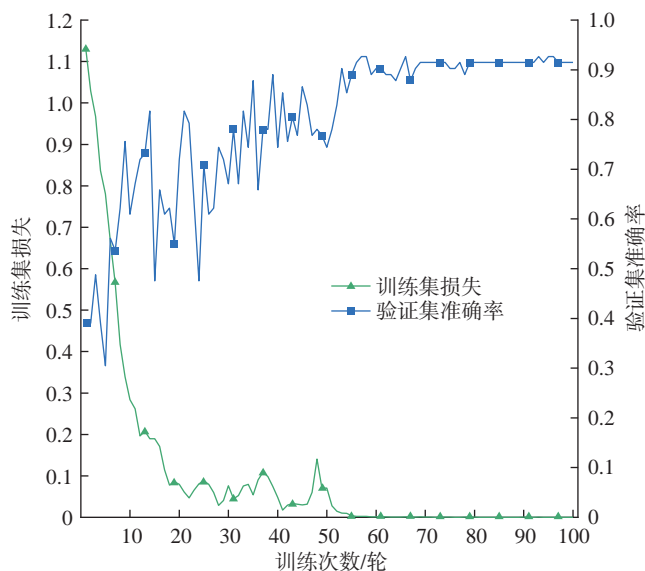


图6 ResNet18 训练结果
Fig.6 ResNet18 training results



图7 检测流程图
Fig.7 Detection process chart

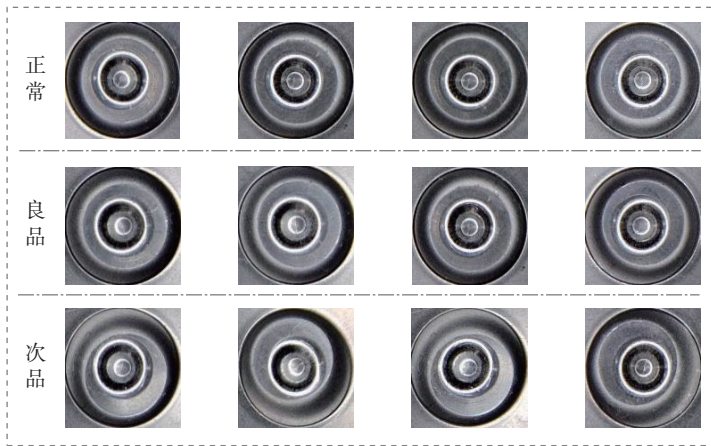


图8 铆接接头类别
Fig.8 Types of riveted joints

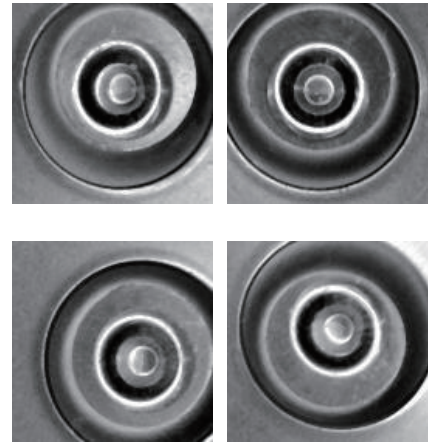


图9 霍夫检测中不完整的铆接接头
Fig.9 Incomplete riveted joint in Hough

分合格品、次品和残品。常见的CNN (Convolutional neural networks) 分类网络的过程大致可以分为两步,先通过若干层卷积层提取图像深层特征,然后展开为全连接层,通过激活函数分别计算图像所属各个类别的可能性。不同的CNN分类网络主要区别在于采用的特征提取卷积层结构不同,所以本次试验采用3种常见的CNN分类网络 ResNet18、VGG16和GoogLeNet。

VGG网络^[13]在定位任务和分类任务中有着优秀的表现。VGG16分别用霍夫2-1圆检测和YOLOv5所检测出的铆接接头图像进行训练,试验结果如图10所示。其中呈下降趋势的是训练集分类损失,呈上升趋势的是验证集正确率,分类损失越低、正确率越高说明网络对该分类任务的完成情况越好。VGG16在YOLOv5所采集的铆接接头数据集上表现相对较好,相较于在霍夫算法所采集的数据集上的表现,训练集的分类损失更快下降,验证集的正确率更快上升。但VGG16网络在训练过程中波动较大,分类损失和正确率都无法收敛。

GoogLeNet是一种包含Inception的深度卷积神经网络体系结构^[12],能较好地完成分类和检测任务。GoogLeNet分别用霍夫2-1圆检测

和YOLOv5所检测出的铆接接头图像进行训练,试验结果如图11所示。GoogLeNet在YOLOv5所采集的铆接接头数据集上表现相对较好,相较于在霍夫算法所采集的数据集上的表现,其训练集分类损失几乎全程都更小。但是在两种数据上的验证集正确率都处于巨大的波动中,在YOLOv5采集的数据集上甚至在训练后期出现了接近30%的反弹。无论是分类损失还是正确率都处于一直振荡状态无法收敛,所以GoogLeNet网络不能很好地完成该分类任务。

ResNet18网络试验结果如图12所示。ResNet18在该分类任务上表现极好,无论是在YOLOv5或是霍夫算法采集的数据集上,训练集分类损失都能收敛到0,验证集正确率都能收敛到1,ResNet18网络展现出了极好的分类效果。令人意外的是该网络在第10轮训练时就在YOLOv5采集的数据集上达到了测试集分类误差为0,验证集正确率为1的最好状态,拥有极快的收敛速度。并且在整个训练过程中网络表现都很稳定,没有出现前两种网络的大幅振荡,仅在YOLOv5数据集上训练初期和霍夫数据集上接近收敛时验证集正确率出现了5%左右的振荡,训练集分类损失仅在急速下降末期和收敛前期出现了小幅振荡。虽然

ResNet18网络在霍夫算法采集的数据集和在YOLOv5采集的数据集上均有优秀的表现,但是可以很明显地看出YOLOv5采集的数据集在促进ResNet18网络快速收敛方面更有优势,无论是训练集分类损失还是验证集正确率ResNet18网络在YOLOv5采集的数据集上的表现都更加优秀。

由以上结果可知,在铆接接头分类任务中ResNet18表现最好。ResNet18相较于VGG16和GoogLeNet不仅最终结果达到了测试集分类损失0.000104128,测试集正确率100%,并且ResNet18的训练过程更平顺,收敛速度更快。YOLOv5所采集的铆接接头数据集在3种深度学习网络训练过程中都对霍夫2-1圆检测的数据集有着不同程度的领先,这也从侧面说明YOLOv5采集的铆接接头在质量上更加完整和准确。

2 结果与讨论

Grad-CAM^[14]使用任何目标概念的梯度流到最后的卷积层,产生一个粗定位地图,突出图像中的重要区域,以预测该概念。Grad-CAM先获取CNN网络正向传播的特征层,一般为最后一个卷积层的输出,因为越深层的卷积层抽象程度越高,语义信息越丰富,然后获得未经激活函数处理的网络预测值 y ,从中分离出所需

的分类类别 y^c 。然后针对该分类反向传播,获取其针对目标特征层每个通道的权重,再通过激活函数 ReLU 就可以获得该图像在分类下的 Grad-CAM。

$$L_{\text{Grad-CAM}}^c = \text{ReLU}\left(\sum_k \alpha_k^c A^k\right) \quad (2)$$

式中, A 代表某个特征层,在本次试验中所用的是最后的一个卷积层; k 代表特征层 A 中的第 k 个通道; c 代表类别 c ; A^k 代表特征层 A 中通道 k

的数据; α_k^c 代表针对 A^k 的权重。

$$\alpha_k^c = \frac{1}{Z} \sum_i \sum_j \frac{\partial y^c}{\partial A_{ij}^k} \quad (3)$$

式中, y^c 代表网络针对类别 c 预测的未经激活函数处理的分数; A_{ij}^k 代表特征层 A 在通道 k 中,坐标为 (i, j) 位置处的数据; Z 等于特征层的宽度和高度的乘积。

在单步检测和双步检测中均采用 ResNet18,在单步检测中 ResNet18

只能达到 84.1% 正确率,但在双步检测中正确率却可以达到 100%,如图 13 所示。本试验保存了在训练过程中每一次训练后网络的权重数据,然后通过 Grad-CAM 对每个权重数据下 ResNet18 网络对于图像的侧重进行可视化显示,最终结果如图 14 和 15 所示。可以看到在单步检测中, ResNet18 虽然能够找到铆接接头所在位置,但是其关注的都是铆接接头

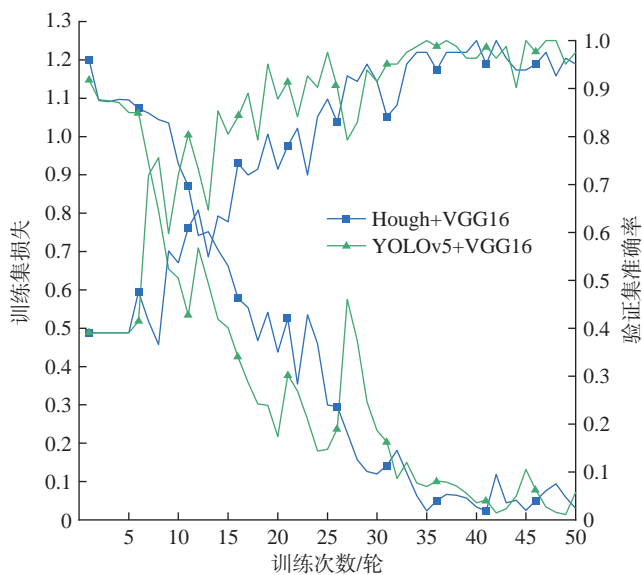


图 10 VGG16 训练结果

Fig.10 VGG16 training results

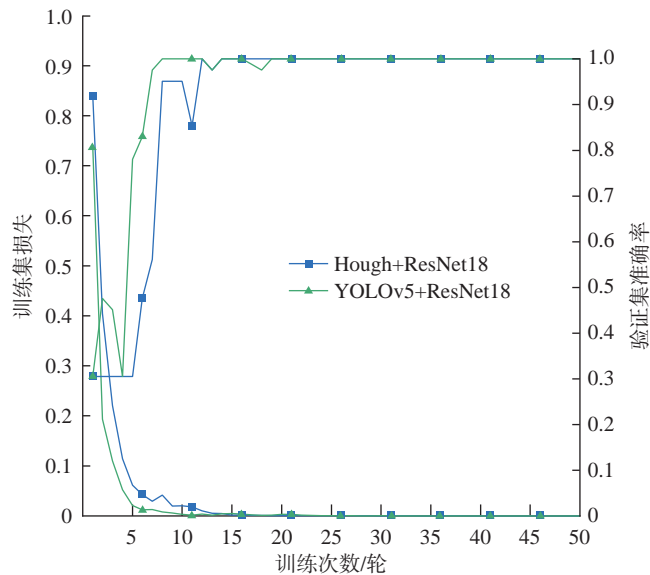


图 12 ResNet18 训练结果

Fig.12 ResNet18 training results

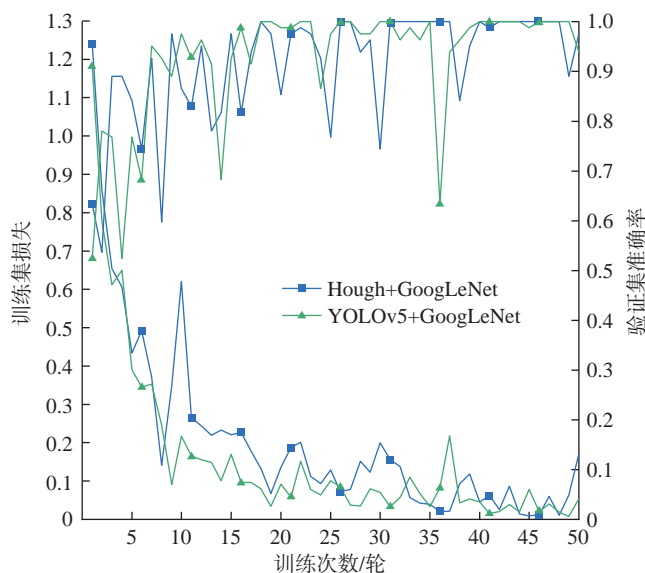


图 11 GoogLeNet 训练结果

Fig.11 GoogLeNet training results

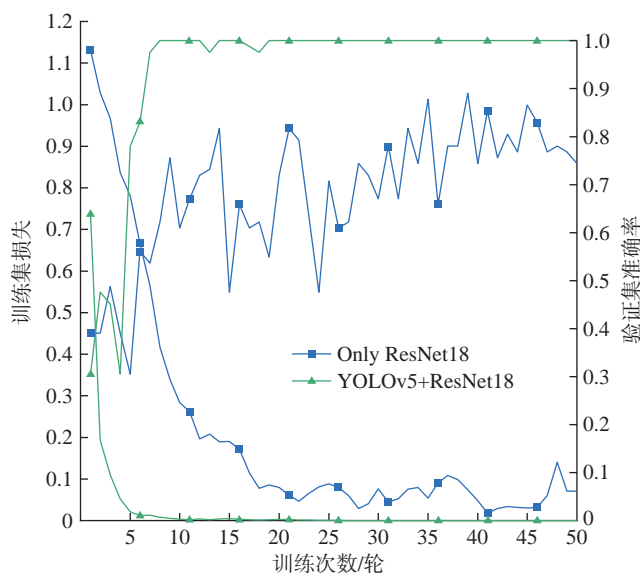


图 13 ResNet18 单-双步训练结果

Fig.13 ResNet18 single-double step training results

的局部信息,并且还会关注板料所摆放的夹角等无效信息。在单步检测中,由于画面含有许多无效信息,这些无效信息明显干扰了 ResNet18 网络对于铆接接头种类的判断。在图

16 中,由于双步检测将图像除铆接接头外的区域全部裁剪丢掉,只保留接头位置图像。通过 ResNet18 网络学习,ResNet18 网络迅速找到铆接接头核心区域,它似乎明白了该分类

任务的实质就是找到铆接接头内圆和外圆的关系。从最后一轮权重的 3 种分类的 Grad-CAM 图像可以看出,ResNet18 在寻找图像重要区域的时候,并不是机械地将图像中心区域设置为重要,而是将图像核心区域随着铆接接头内圆位置而改变。

本试验研究了 VGG16 和 ResNet18 在双步检测中面对同样的训练数据集出现巨大差异的原因,如图 16 所示。VGG16 不仅训练过程振荡,最终结果也只达到 97.5% 的正确率。VGG16 经过 50 轮训练的 Grad-CAM 图形如图 17 所示,可以发现 VGG16 对合格件所采取预测策略令人非常迷惑,不对图像某个通道侧重,而是采取了均等权重的处理方式,在其看来图像角点的信息和铆接接头所产生的信息是等价值的,但是很明显图像边角的图像信息不提供任何一点铆接接头是否偏铆的判断数据。并且在次品和残品类别中,VGG16 所侧重的只是铆接接头核心区域的某一局部信息,并且该网络更关注图像上一小部分区域的信息。训练过程中 Grad-CAM 图像侧重区域的大幅度变动也解释了为什么 VGG16 在训练过程中反复振荡的问题,VGG16 所迭代的策略比较激进,继而会出现下一轮权重大面积推翻上一轮预测的情况。

3 结论

(1) 试验论证了偏铆缺陷对自冲铆接工件最大剪切力有负面影响,偏铆件最大剪切力为 7200.71 N,相较于正常件的 7624.35 N,下降了 5.6%。

(2) 为了实现偏铆缺陷的正确检出,提出了剪枝后的 YOLOv5s 加 ResNet18 的检测方案。单独使用 ResNet18 时,验证集中的分类正确率达到 91.46%;单独使用 YOLOv5s,验证集中的分类正确率达到 95.18%。而当将 YOLOv5s 裁剪掉分类功能和适配不同大小目标的分支后,得到一

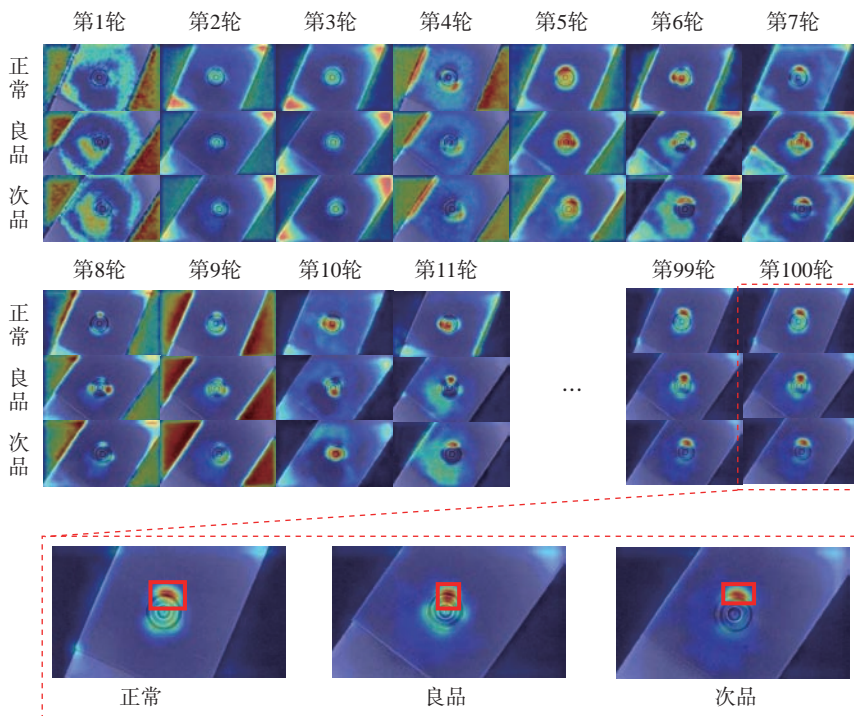


图 14 ResNet18 单步训练 Grad-CAM 图像

Fig.14 ResNet18 single step training Grad-CAM image

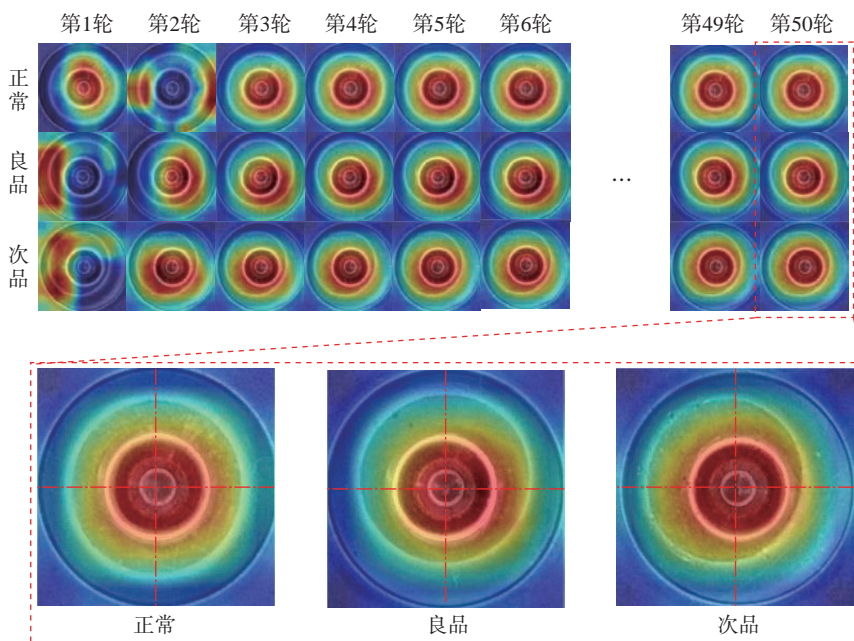


图 15 ResNet18 双步训练 Grad-CAM 图像

Fig.15 ResNet18 double step training Grad-CAM image

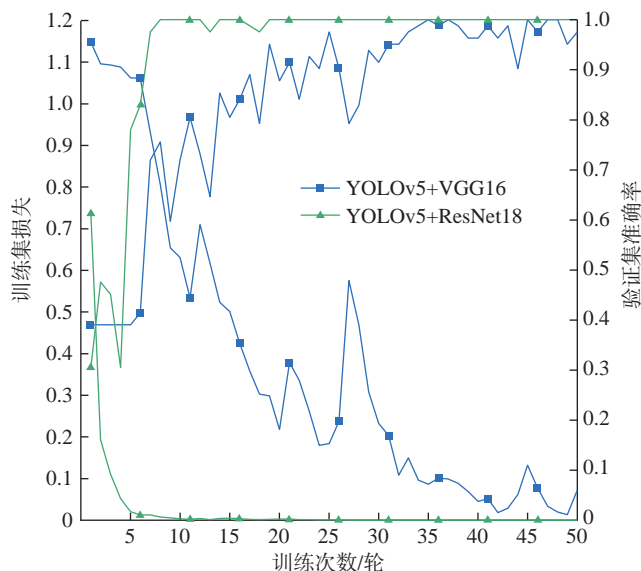


图 16 ResNet18 和 VGG16 双步训练结果

Fig.16 ResNet18 and VGG16 double step training results

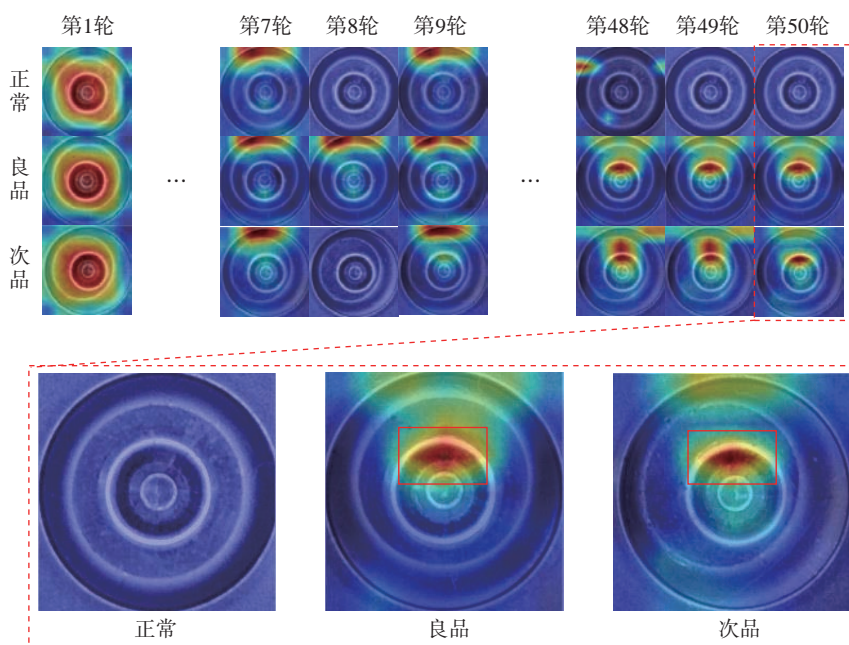


图 17 VGG16 双步训练 Grad-CAM 图像

Fig.17 VGG16 double step training Grad-CAM image

个专用的自冲铆接接头检测算法,再用 ResNet18 对裁剪出的铆接接头进行分类,最后实现验证集中分类正确率达到 100%。

(3) 通过 Grad-CAM 解释最终结果, ResNet18 在双步检测中比单步检测中有更少无关信息干扰,并且经过 YOLOv5s 裁剪的铆接接头图像能提供更多的铆接接头信息,使得双

步检测中 ResNet18 能快速且正确地捕捉核心区域,并做出正确的分类预测。ResNet18 拥有残差模块,能有效避免梯度消失; VGG16 中没有该结构,在提取图像信息时,深层网络受浅层网络的影响权重快速消失,并不能提取到图像深层信息,所以完成分类任务时效果不如 ResNet18 优秀。

参考文献

[1] HAN L, YOUNG K W, CHRYSANTHOU A, et al. The effect of pre-straining on the mechanical behaviour of self-piercing riveted aluminium alloy sheets[J]. *Materials & Design*, 2006, 27(10): 1108–1113.

[2] RAO H M, KANG J, HUFF G, et al. Impact of specimen configuration on fatigue properties of self-piercing riveted aluminum to carbon fiber reinforced polymer composite[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 113: 11–22.

[3] 黎雄, 饶政华, 王凤江, 等. 连接条件对 GFRTP 自冲铆接性能影响的数值研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(10): 2447–2453.

LI Xiong, RAO Zhenghua, WANG Fengjiang, et al. Numerical study of effects of joining conditions on performances of self-piercing riveted GFRTP[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(10): 2447–2453.

[4] 蒋浩, 廖宇轩, 李光耀, 等. 碳纤维-铝合金电磁铆接工艺及性能研究[J]. *精密成形工程*, 2021, 13(4): 37–44.

JIANG Hao, LIAO Yuxuan, LI Guangyao, et al. Study on process and mechanical properties of CFRP/Al electromagnetic riveted structures[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2021, 13(4): 37–44.

[5] HAN L, HEWITT R, SHERGOLD M, et al. An evaluation of NDT for self-pierce riveting[C]. *SAE World Congress*, 2007.

[6] JOHNSON P, CULLEN J D, SHARPLES L, et al. Online visual measurement of self-pierce riveting systems to help determine the quality of the mechanical interlock[J]. *Measurement*, 2009, 42(5): 661–667.

[7] HAQUE R, BEYNON J H, DURANDET Y. Characterisation of force-displacement curve in self-pierce riveting[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(6): 476–488.

[8] ZHAO H, HAN L, LIU Y, et al. Quality prediction and rivet/die selection for SPR joints with artificial neural network and genetic algorithm[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66: 574–594.

[9] KARATHANASOPOULOS N, PANDYA K S, MOHR D. Self-piercing riveting process: Prediction of joint characteristics

through finite element and neural network modeling[J]. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2021, 3: 100040.

[10] 蒋玲. 自冲压铆接裂纹检测及截面质量优化设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.

JIANG Ling. Crack detection and optimization design of section quality for self-piercing riveting[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

[11] 李光耀, 刘泉, 赖铭, 等. 基于自

适应视觉检测的磁脉冲压接管件接头深度智能检测算法研究[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(7): 54–63.

LI Guangyao, LIU Xiao, LAI Ming, et al. Research on intelligent crimping depth detection algorithm for magnetic pulse crimping pipe based on adaptive vision[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(7): 54–63.

[12] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C].

IEEE Computer Society, 2016.

[13] KAREN S, ANDREW Z. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. *Computer Science*, 2015(6): 1556–1573.

[14] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2020, 128(2): 336–359.

Research on Detection Algorithm of Partial Riveting Defects in Self-Piercing Riveting Based on Deep Learning

CUI Junjia¹, ZHANG Jun¹, XIAO Ruru², JIANG Hao¹, LIAO Yuxuan¹, LI Guangyao²

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shenzhen Automotive Research Institute (Shenzhen Research Institute of National Engineering Laboratory for Electric Vehicles), Beijing Institute of Technology, Shenzhen 518118, China)

[ABSTRACT] Self-piercing riveting technology is suitable for joining dissimilar materials such as aluminum and steel, and the joint performance is reliable, so it has a wide application scenario in the aviation industry. However, there are few relevant researches on nondestructive detection of self-piercing riveting defect at present. This paper proposes a deep learning-based partial riveting defect detection algorithm for self-piercing riveting. Firstly, the mechanical properties of partial riveting self-piercing riveting parts decreased by 5.6% compared with normal riveting parts through shear mechanical properties test. Then, the degree of partial riveting was defined in the range of 0–10 by the external features of self-piercing partial riveting parts. Finally, the detection algorithm was studied, and the detection effect difference between single-step detection and two-step detection was explored. The detection scheme of YOLOv5s (You Only Look Once v5s) and ResNet18 was proposed. In addition, the Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) was used to visually explain the differences in the effects of different detection schemes. The test results showed that the proposed detection scheme of YOLOv5s plus ResNet18 could achieve 100% accuracy in the collected data test set, which was higher than the 95.18% accuracy achieved by only using YOLOv5s, and much higher than the 84.1% accuracy achieved by only using ResNet18.

Keywords: Self-piercing riveting; YOLO; Deep learning; Nondestructive testing; Vision detection

(责编 大漠)

2023年9月 浙江乌镇

2023（第六届） 中国航空科学技术大会

主办单位

中国航空学会



智能生产线

Intelligent Production Line

通过综合集成和建设,形成具有虚实融合、分析决策和柔性智能特征的生产线,提升生产过程的柔性化、智能化水平和快速响应及制造能力,满足多品种和变/小批量生产模式带来的定制需求。



引文格式: 唐健钧, 金筑云, 石芹芹, 等. 基于数字孪生的飞机总装生产线管控模式探索与实践[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 34-41, 65.
TANG Jianjun, JIN Zhuyun, SHI Qinqin, et al. Study and realization of production line control mode based on digital twins for aircraft final assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 34-41, 65.

基于数字孪生的飞机总装生产线管控模式 探索与实践*

唐健钧, 金筑云, 石芹芹, 许艾明, 况林, 石渊龙, 张昊龙

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 为持续提升飞机总装生产线运营绩效, 促进业务模式变革, 提出了一种基于数字孪生的飞机总装生产线管控新模式。首先, 分析了飞机总装生产线从物理空间到信息空间的演变过程及生产线运行管控需求。其次, 阐述了飞机总装生产线数字孪生组成, 结合数字孪生五维模型, 构建了总装生产线数字孪生模型。最后, 基于 3DMAX 建立了虚拟模型, 利用系统开发技术构建总装数字孪生系统, 通过采集现场生产过程数据实现物理实体与虚拟空间的映射, 初步探索了数字孪生技术在飞机总装生产线的应用。结果表明, 基于数字孪生的飞机总装生产线管控模式对提高生产效率和质量具有重要作用。

关键词: 飞机总装生产线; 管控模式; 数字孪生技术; 数字孪生系统; 虚实映射

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.034



唐健钧
高级工程师, 博士。

飞机作为典型航空复杂装备, 具有结构复杂、功能繁多、自动化程度高、系统层级多、紧密耦合等特点。飞机总装涉及多学科多专业, 是实现物

理集成和信息集成的过程, 也是物理集成和功能验证的重要阶段。飞机总装生产线主要包括线缆敷设、导管安装、大部件安装、测试、全机测量及交付等工作, 具有装配精度高、零部件数量多、工况复杂、手工作业等特点, 受设计状态频繁变更、供应链不稳定及生产现场故障的影响, 生产线工况非常复杂, 各架飞机实际生产状态变化大, 生产线物理层与信息层的数据交互难度大, 生产线状态及生产管控透明度难以提升。随着业务系统的建立、数字化设备及智能化生产管控技术的引入, 生产线活动、生产线管理及生产线运营管控从基本靠人工经验向信息化管控转变, 但随着产量及质量要求的提高, 计划调度、资源协同颗粒度更加精细, 生产管控复杂度进一步增加。如何快速实现

物理世界(实际生产线)与虚拟世界(虚拟生产线)的融合与交互, 提高虚实数据的交互性, 提升生产线的透明度及生产绩效, 迫切需要开展相关信息技术在总装生产线的研究与应用。

信息物理系统^[1](Cyber-physical system, CPS)通过建立物理空间与信息空间的双向连接通道, 实现数据感知、传输、计算和控制, 是解决物理世界与虚拟世界交互共融的一种技术路径。其中, 作为CPS的关键使能技术, 数字孪生技术受到了广泛的关注。数字孪生技术以数字化方式创建物理实体, 通过镜像物理实体构建虚拟模型, 模拟物理实体的现实行为, 通过建立物理实体及虚拟模型的双向映射, 实现物理实体空间与虚拟空间的交互共融与智能化操作, 进而实现“以实促虚, 以虚控实”。数字孪生技术成为智能制造领域、复杂系统智能运行和维护领域的新兴研究热点, 刘

* 基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2019205A004)。

大同等^[2]对已有的数字孪生技术研究进行归纳总结,为复杂系统诊断、预测及健康管理等提供参考。吴雁等^[3]基于数字孪生技术在制造业中的应用,探讨了数字孪生在制造领域中的数据优化、质量分析等关键技术。随着数字孪生技术的不断发展,国内外先进航空企业及研究学者都进行了深入研究,数字孪生技术在智能制造中的潜力也得到了越来越多的关注。

美国密歇根大学 Griesves 教授最早提出的数字孪生三维模型包括物理实体、虚拟模型及其连接。近年来,洛马公司持续不断地开展数字孪生虚拟建模技术研究,并将该技术应用于 F-35 机型研制生产全过程。波音、洛马、欧洲空客防务与航天公司等先进军工企业积极布局智能工厂、推进数字孪生,增强现实等新技术^[4]。达索、西门子等积极寻找数字孪生解决方案,洛马、空客、达索等公司都在企业战略层面上强调并推进数字孪生技术的发展。空客公司将数字孪生技术作为构建“未来工厂”的重要内容,并于 2016 年在法国工厂构建总装生产孪生模型。达索公司基于数字孪生技术建立了 3DE 平台,利用用户反馈信息迭代优化产品设计模型,目前多个型号的装配线都使用到了数字孪生技术。

国内在数字孪生车间、数字化、智能化生产线开展了诸多研究,陶飞等^[5-9]探索了数字孪生车间(Digital twin workshop, DTW)概念、系统组成、运行机制、特点及关键技术,为数字孪生车间的落地应用提供了理论支撑,并且提出了数字孪生五维模型的概念,重点探讨了数字孪生五维模型在制造车间、智慧城市等领域的应用思路及方案。陈振等^[10]提出了飞机数字孪生装配车间架构,并对关键技术进行了相关研究,为数字孪生技术在航空工业的应用提供参考。柳林燕等^[11]建立了车间生产过程数据孪生系统体系架构。孟松鹤等^[12]重点探讨了数字孪生技术在航空航天

领域的应用案例。江海凡等^[13]提出从数字化、智能化、智慧化 3 个阶段逐步构建数字孪生车间并阐述了各阶段的运行机制及使能技术,为数字孪生在智能制造的推广应用提供参考。金星等^[14]构建数字孪生车间系统并在飞机结构件车间进行应用,实现更全面实时的生产过程信息管理,提升车间管控能力。赵阳等^[15]基于数字孪生五维模型理论构建了飞机总装脉动生产线数字孪生应用架构,研究了飞机总装脉动生产线反应式计划调度、物流精准配送等服务应用,为复杂产品装配的智能制造应用提供参考。郑守国等^[16]建立车间三维数字模型及虚拟车间,初步探索了数字孪生技术在某型飞机总装生产线中的应用,验证了基于数字孪生的生产线可有效提高作业效率。

针对飞机总装生产线现有管控模式存在数据共享及交互性差、可视化程度低、呈现形式不直观等问题,本文结合国内外研究现状,提出了基于数字孪生的飞机总装生产线管控模式,具体分析了飞机总装生产线从物理到“物理-信息”的演变过程及运行管控需求,阐述了飞机总装生产线数字孪生的组成,结合数字孪生五维模型,构建了飞机总装生产线数字孪生模型,开发了数字孪生系统并进行应用验证。

1 飞机总装生产线运行管控需求分析

1.1 飞机总装生产线数字化发展过程

飞机总装生产线活动主要包括作业执行(工艺设计和生产执行)、生产线管理(工艺管理、生产管理、质量管理)及生产线运营(生产线数据监控)3 大类,其数字化演变共经历了 4 个阶段,如图 1 所示。

(1) 物理空间的纸质管理。引入信息技术之前,主要通过人工进行管理,作业执行、生产线管理、信息传递主要依靠纸质记录,信息容易丢失,查询、统计、分析困难,准确性和使用效率低,属于低级的信息化。

(2) 信息空间的电子管理。随着信息技术的引入及发展, MES 系统、PDM 系统及 CAPP 系统等相继构建,初步实现了数字化的工艺设计与管理、作业执行、生产管理、质量管理等。工艺人员、生产人员、管理人员等可通过信息系统进行信息查询及处理,极大地提升了工作效率。基本实现生产、技术等关键业务域信息化全覆盖,初步实现了无纸化。但此阶段仍然依靠人工经验进行调整决策,存在主观性强、问题发现不及时等问题。

(3) 物理信息空间的协同决策。随着无纸化工作的推进,以及大数

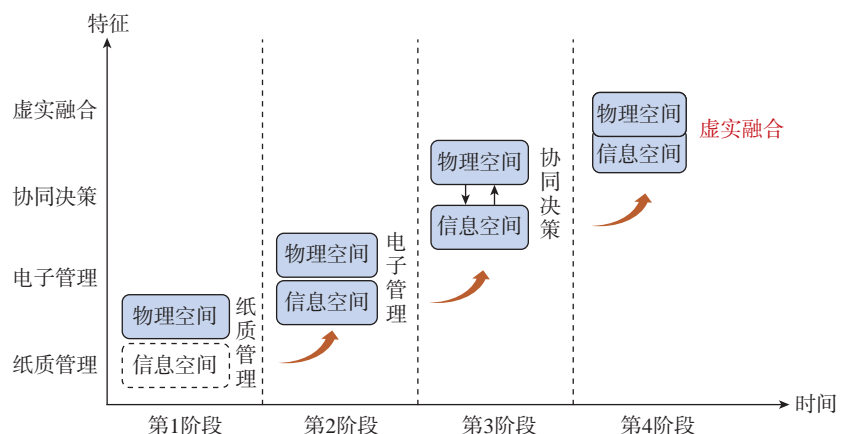


图 1 飞机总装生产线从物理到“物理-信息”融合的演变过程

Fig.1 Evolution process of aircraft assembly production line from physics to “physics-information” integration

据、云计算、人工智能等新技术的引入,飞机总装生产线上大量的业务数据借助计算机强大的处理能力及智能算法,实现了作业执行与产线管控决策逐步从人工经验向基于数据的决策转变,物理空间与信息空间初步融合,大幅提高了生产效率。但此阶段主要通过人为操作实现,缺乏连续、实时的交互能力。

(4)物理空间与信息空间深度融合。随着物联网、数字孪生等先进技术的提出及不断发展,总装生产线利用物联网技术进行数据采集、存储和分析,生产线中的各元素将实现全面感知、相互关联,物理空间与信息空间的实时交互能力不断增强,两个空间实现深度融合。基于物联网、数字孪生技术等初步实现虚拟世界对物理世界的呈现,为飞机总装智能制造提供支撑。此阶段在虚拟对物理呈现的基础上,进一步实现虚拟对物理的控制。

1.2 飞机总装生产线运行管控需求

随着传感器技术、大数据、人工智能技术的发展,生产线的数字化程度越来越高,飞机总装生产线实现从固定式向脉动式转变。脉动生产线是一种按节拍移动的飞机数字化装配线,具有数字化、集成化、自动化、智能化等特点,管控需求主要包括以下3个方面。

(1)在生产线运行前端,按照质量体系要求及工艺管理输入开展工艺设计,形成的工艺知识及模型纳入工艺管理系统中进行管理。同时,将审核问题的整改情况反馈至质量管理体系;生产运行时,生产管理向执行端提供生产作业计划,按照工艺要求、质量体系要求及质量实物要求开展生产作业,需实现生产线各要素的采集与存储,以保证每架飞机生产过程可被追踪,由于系统装配和系统测试具有较大差异,作业形式与手段多样,生产线移动资源(如人、设备、机器等)较多,数据采集存在困难;同时,采集到的数据多源异构且系统之间交互复杂,难以直观地展示生产线当前状态,增加了生产线的管控难度。

(2)受设计更改、故障、资源等扰动因素的影响,生产线状态时刻处于复杂变化之中,现场工况极为复杂;同时,随着飞机产量快速提升及质量要求不断提高,生产线上的在制品增多,涉及的资源也大幅提升,扰动因素呈指数级增长,计划调度与资源协同更加复杂,难以通过工艺管理、生产管理、质量管理等单一维度的数据对复杂生产线的管控,需要进行纵向集成与横向集成,实现多平台数据的共享。

(3)脉动生产线按节拍移动,需

要实时监控生产线上各机位飞机制造的状态,快速响应现场异常事件,存在表现形式不直观,可视化程度低的问题,需在虚拟空间中建立一条与物理世界一致的虚拟生产线,通过对实际生产线数据的采集、运算、评估及预测等,优化生产指令,动态、准确地实现物理生产线与虚拟生产线的双向映射,实现生产线的透明可视,提升脉动生产线的管控能力。

基于脉动生产线管控需求,提出基于数字孪生的飞机总装生产线管控模式,主要特征归结为“物理-信息”融合、虚拟对物理的呈现、虚拟对物理的控制,如图2所示。该模式实现“物理-信息”的深度融合,变革生产线业务管理模式,持续提升生产线的运营效能,实现生产线的信息化、数字化、智能化,从“数字”走向“数智”。

要实现该管控模式在总装生产线上的应用,首先需建立飞机总装生产线数字孪生模型,实现总装生产线高保真还原;其次构建相关系统采集、存储、集成、分析数据,实现虚拟对物理的呈现及虚拟对物理的控制。

2 飞机总装生产线数字孪生模型建立

2.1 飞机总装生产线数字孪生组成

飞机总装生产线由多个机位、产品及与飞机生产相关的基础设施组

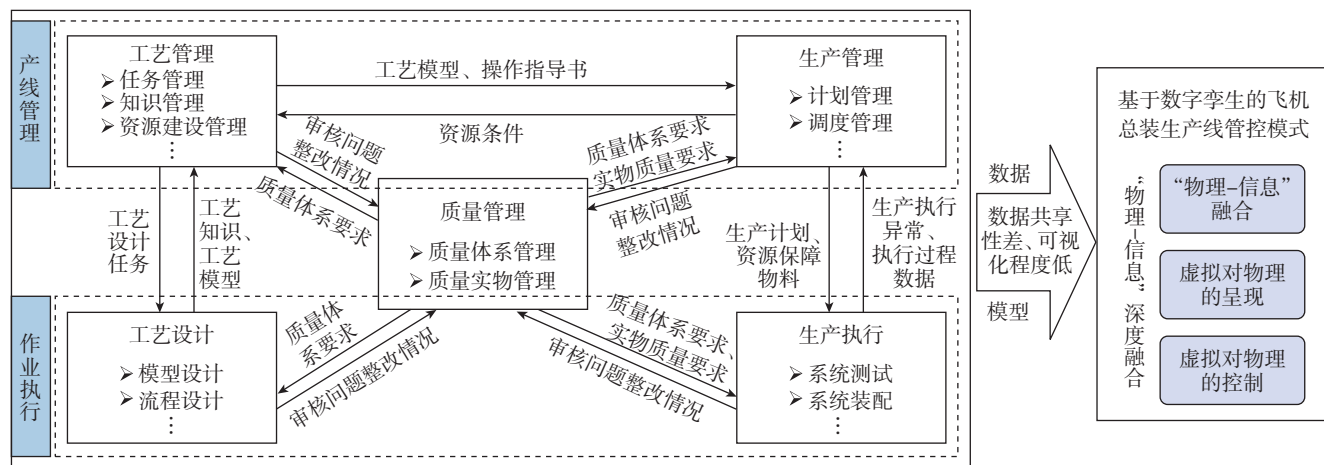


图2 飞机总装生产线运行管控需求

Fig.2 Requirements for operation control of aircraft assembly production line

成,是总装车间中核心关键的组成部分。为支撑脉动生产线的智能化管控,本文借鉴数字孪生车间的定义,提出飞机总装生产线数字孪生,由多个机位级数字孪生构成,机位级数字孪生由一个产品和多个设备数字孪生构成,对飞机、设备、机位等实体进行建模,结合生产作业执行、产线管理、运营管控等业务逻辑,以孪生数据驱动模型,实现在物理空间与虚拟空间的映射,提高生产线的运行效率,如图3所示。

(1)产品级数字孪生主要表征飞机的设计状态与制造状态,由于飞机结构复杂、零部件及功能繁多、多系统交联耦合,飞机的组成如线缆、导管、部件等的理论状态与制造状态存在较大的差异,需对两种状态进行管控、对比、分析。依托飞机设计模型,构建工艺模型,可实现工艺模型指导现场生产。同时,生产制造过程中飞机的制造状态映射到工艺模型,积累的数据存在于物理对象的全生命周期,可实现基于模型对物理对象的优化。

(2)设备级数字孪生主要表征设备的运行状态,由于飞机总装生产线大部分设备结构复杂、运行周期长、工

作环境恶劣,设备运行时产生大量噪音、振动,并处于高温环境,人员无法实时地对设备进行查看,难以获取当前设备运行的状态及异常问题。基于历史数据及实时采集数据,建立状态监控模型及设备故障预测模型,结合设备三维模型,构建设备数字孪生模型,实现设备级数字孪生。依托设备级数字孪生实现虚实交互,表征设备的运行状态及健康状态,提高设备运行状态的透明度、可靠性和可用性。

(3)机位级数字孪生主要表征当前机位产品、工装、工具、设备等资源的状态,由于各机位的工艺流程、工况复杂度、人员技能等存在较大差异,难以及时直观地获取当前机位的状态并做出有效决策。基于机位上的“人、机、料、法、环”相关要素,利用仪器设备测量、视频图像及厂家模型,构建生产线人员、工装、物料等三维几何模型,实时采集物理空间中生产过程数据,并与信息空间中的三维模型进行融合,实现机位级数字孪生,支撑机位内部自治。

(4)产线级数字孪生主要表征生产线运行状态,由于飞机总装生产线工艺流程复杂、工序多、制造周期长、供应链不稳定、工况复杂,各架次的状

态不一,难以快速感知生产线状态,影响管理决策。生产线主要由 n 个机位组成,各机位间针对不同的工况交互连接并进行资源协同,以支撑生产线上的作业计划制定、派工、执行、反馈及控制。产线级数字孪生表征生产线运行的理论值、过程值及预测值。

2.2 飞机总装生产线孪生五维模型构建

2019年,陶飞等^[7]详细阐述了数字孪生五维模型及十大领域应用,即

$$M_{DT}=(PE, VE, Ss, DD, CN) \quad (1)$$

式中, M_{DT} 表示数字孪生五维模型;PE表示物理实体;VE表示虚拟模型;Ss表示服务;DD表示孪生数据;CN表示交互连接。结合数字孪生五维模型,构建飞机总装生产线数字孪生五维模型,包括物理生产线、虚拟生产线、应用平台、孪生数据及交互连接,具有“虚实映射、数据驱动”的特点,如图4所示。

(1)物理生产线。主要指飞机总装生产线,包括机身、成品、零部件、飞机整机及制造过程中涉及的各种实体对象集合。其中,各类实体对象包括工装、工具、设备、设施及人员等,是总装生产过程中不可或缺的资源。

(2)虚拟生产线。主要指飞机

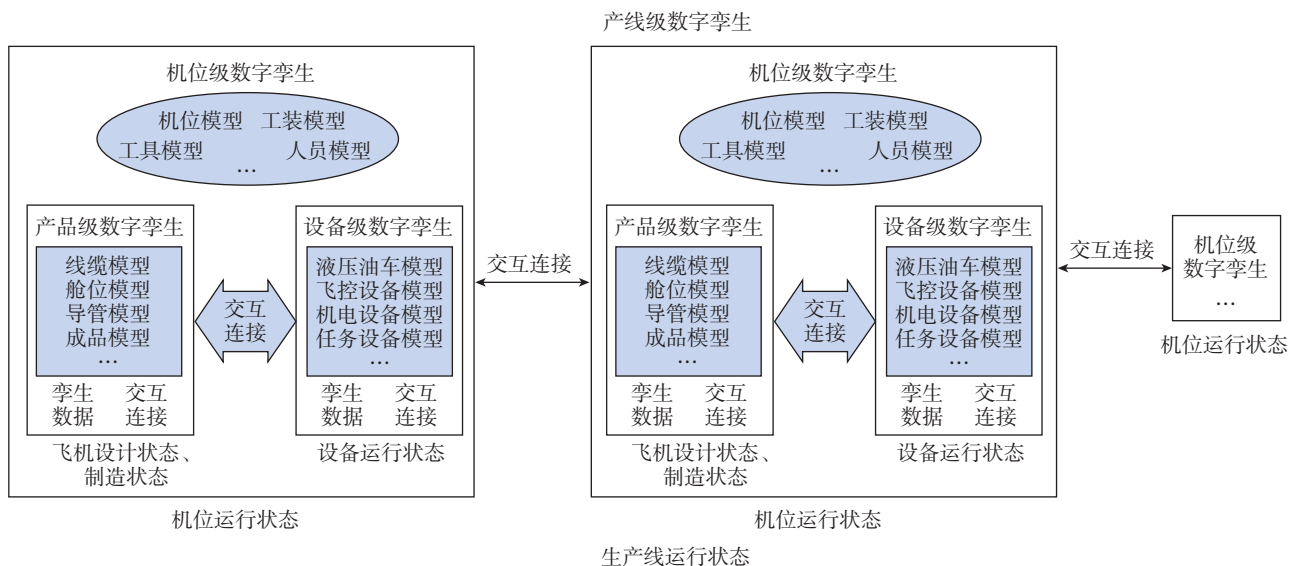


图3 飞机总装生产线数字孪生组成
Fig.3 Digital twin composition of aircraft final assembly line

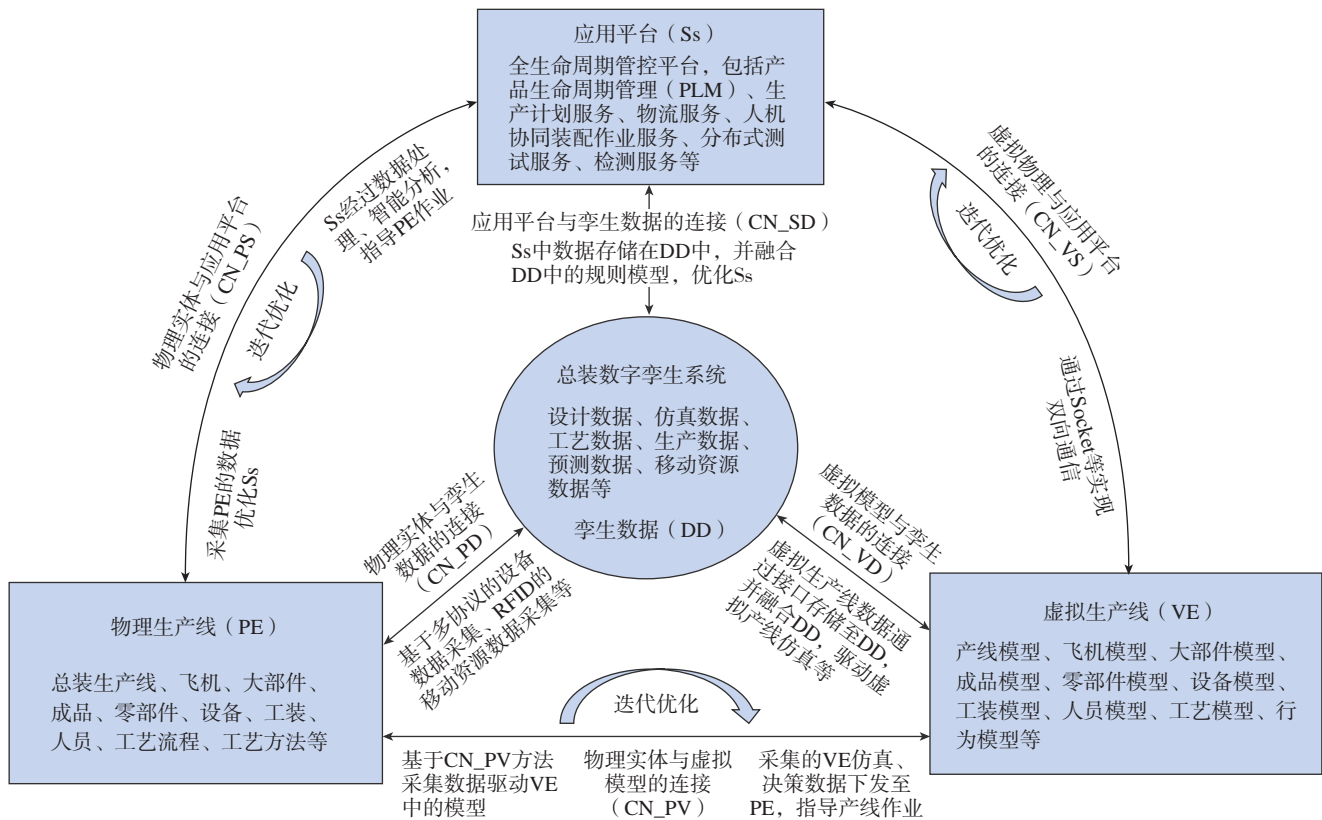


图4 飞机总装生产线数字孪生五维模型

Fig.4 Five-dimension digital twin model of aircraft final assembly line

总装生产线包含的各类模型,包括产线要素模型、产品模型、设备模型、人员模型等。产线要素模型描述生产线的位置及包括的机位、工装、工具、设备等,通过构建生产线要素模型为生产线漫游提供基础;产品模型描述飞机的几何形状、飞机的大部件、零件等,通过构建产品模型,直观地表达飞机各个部件模型之间位置、干涉等关系;设备模型描述实体设备几何及设备参数,建立设备几何模型、物理模型、规则模型、定位模型,实现快速找寻运动的物理实体,同时可快速监测设备异常并通过控制指令实现设备的控制;人员模型描述生产线人员几何模型、定位模型,可快速获知机位上人员情况。

(3)应用平台。飞机制造全生命周期数字孪生应用管控平台封装了数字孪生应用过程所需的各类数据、算法、模型、仿真结果,是支撑物理生产线与虚拟生产线交互的服务。

其主要包括面向装机位的装配引导;人机协同装配作业服务,面向测试机位分布式测试中心集成服务,面向脉动节拍物流精准配送服务,面向复杂工况下产能评估、动态排程仿真、故障预测等智能决策服务;建模仿真、模型组合等模型管理服务;测试设备、物流设备、装配设备等多设备数据采集的传输、协议、接口的服务;人员、物料、设备等移动资源相关数据的采集、存储、清洗、关联、挖掘、融合等服务。

(4)总装孪生数据。主要负责为物理生产线、虚拟生产线及应用平台提供数据支撑,包括设计数据、装配仿真数据、制造过程数据、交互迭代与动态演化的孪生数据。如物理生产线上机位、飞机、工装、设备等物理生产线的的数据,以及生产过程中的运行数据,通过 RFID、数据采集卡、嵌入式系统、便携式终端进行数据采集;虚拟生产线中机位、飞机、工装、

设备等几何、物理、行为模型;应用平台中的工艺设计、仿真、故障预测及模型、工艺管理、生产管理等数据。

(5)交互连接。主要支持物理生产线、虚拟生产线、应用平台及总装孪生数据多要素/跨阶段/全业务流程数据的互联互通。6种连接包括 CN_PV 连接(基于 CN_PV 方法采集数据驱动 VE 中的模型,采集的 VE 仿真、决策数据下发至 PE,指导产线作业); CN_PD 连接(基于多协议的设备数据采集、RFID 的移动资源数据采集); CN_VD 连接(虚拟生产线数据通过接口存储至 DD,并融合 DD,驱动虚拟产线仿真等); CN_VS 连接(通过 Socket 等实现双向通信)、CN_PS 连接(采集 PE 的数据优化 Ss, Ss 经过数据处理、智能分析,指导 PE 作业); CN_SD (Ss 中数据存储在 DD 中,并融合 DD 中的规则模型,优化 Ss)连接。

根据飞机总装生产线数字孪生

组成及飞机总装生产线数字孪生五维模型的分析,构建飞机总装数字孪生系统,其利用 3DMAX 构建高保真的虚拟生产线,实现物理生产线实体在虚拟空间的一一对应;构建生产管理指标体系,表征生产线运行的关键状态;运用先进信息技术手段采集生产线数据,实现移动资源数据采集;利用多源集成技术,实现关键指标多类别多维度多层次的数据汇聚;建立数据分析模型及智能算法,并与数据进行融合,实现虚实交互反馈及三维场景联动;以数据驱动模型,实现脉动生产线运行状态透明可视,辅助支持管理者决策。

3 系统设计与应用效果

3.1 系统架构设计与功能设计

飞机总装数字孪生系统架构包括设备层、数据层、接口层、服务层及应用层 5 层结构及组件层,如图 5 所示。设备层主要包括装配设备、物流设备、专用设备、辅助设备,分别为垂尾自动化对接装置、AGV 小车、测试中心设备、数据采集终端设备等,

主要采集安装过程数据、空间位置数据、测试测量数据及其他交互数据。数据层主要包括基础信息数据库,设备数据采集实时数据库、设备数据采集历史数据库、知识库、标准规范等,依托数据中台将数据进行整合,建立数据服务,为应用层提供数据支撑。接口层包括 API 接口、仿真工具接口、第三方系统接口等。服务层是以服务的形式封装了系统功能,如智能算法服务、统计分析服务、监控预警服务等。应用层是面向用户的接口,提供指标对比、生产管控、趋势预测等功能。组件层是支撑整个系统正常运行的基础保障,包括身份认证、可视化组件、菜单配置、日志管理等。

飞机总装数字孪生系统主要包含了三维模型建模、三维场景管理、二维指标管控、场景交互、系统配置、接口管控 6 大主要功能模块,其组成如图 6 所示。

(1) 三维模型建模。利用 CATIA 软件、3DMAX 软件对物理实体进行建模,实现虚拟模型与实体模型的一一对应,主要包括产品模型、物料

模型、人员模型、工装模型、工具模型、设备模型等。

(2) 三维场景管理。物理实体在生产过程中产生了实时数据,实时数据作用于虚拟模型,对车间实体几何、物理、行为、规则进行虚拟映射,实现物理空间向虚拟空间的映射,总装生产线与虚拟生产线呈现同步可视化。

(3) 二维指标管控。从生产、技术、质量业务域等维度建立总装生产管控指标体系,对指标进行分层分级管理,通过数据可视化手段对指标进行呈现。同时,基于历史数据,建立数据分析模型,实现对指标的预测预警。

(4) 场景交互。通过建立交互规则,基于 ThreeJS 技术,实现三维模型在线展示,并通过规则实现场景漫游、场景定位、场景切换、悬停触发、产线/机位凸显等。

(5) 系统配置。提供基础的系统配置功能,实现三维模型的管理、装配驱动接口管理、机位指标配置管理、生产线指标配置等,为系统顺利运行提供支撑。

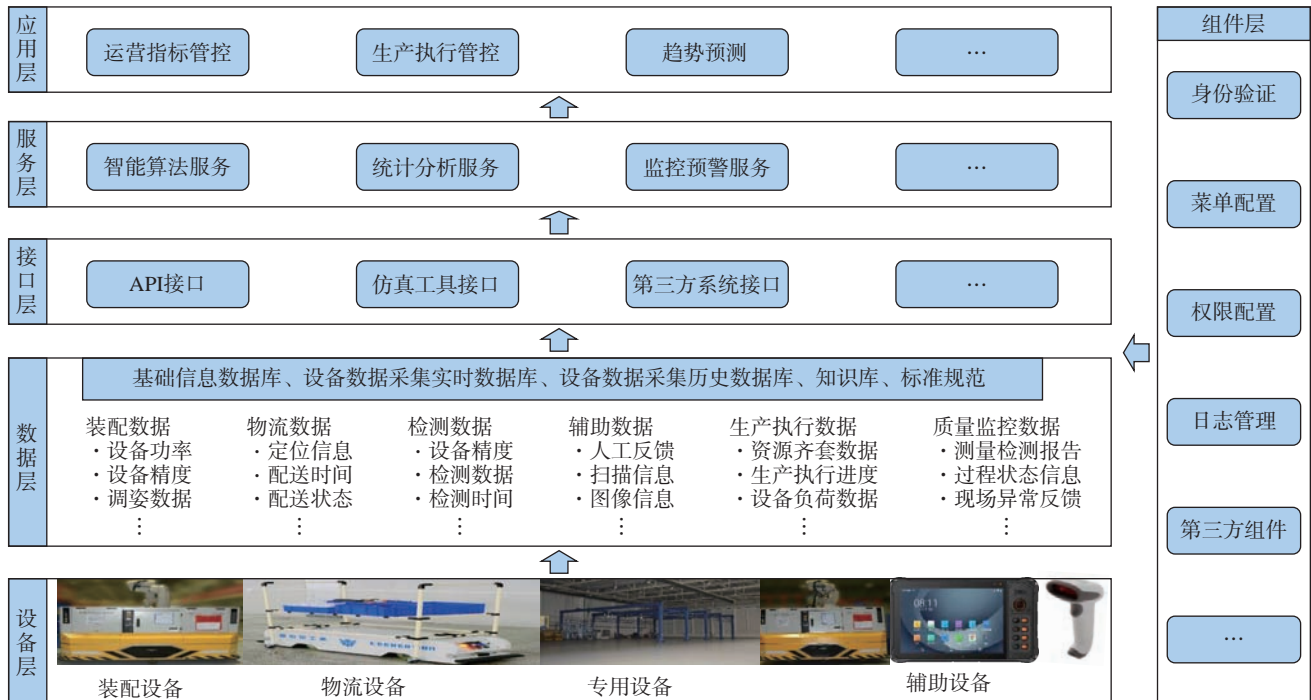


图 5 飞机总装数字孪生系统架构

Fig.5 Architecture of aircraft final assembly digital twin system

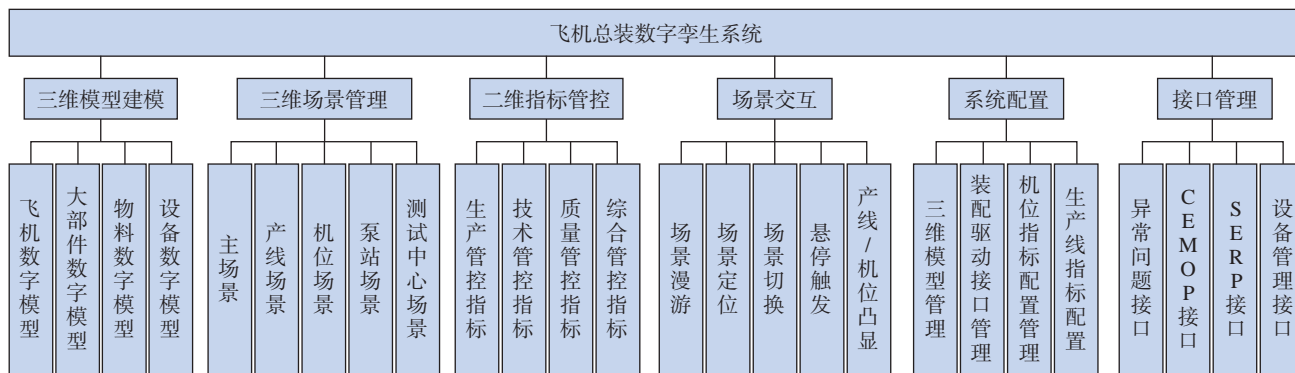


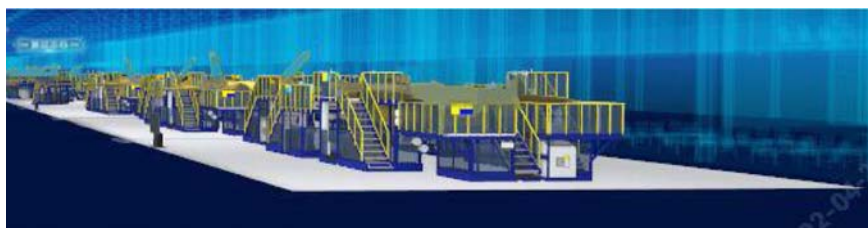
图6 飞机总装数字孪生系统功能模块图

Fig.6 Modules of aircraft final assembly digital twin system

(6)接口管理。提供该系统与外部系统的数据交换接口,并对接口进行管理。

3.2 应用效果

如图7和8所示,飞机总装数字孪生系统主要围绕产线级数字孪生、机位级(单元级)数字孪生、设备级数字孪生及二维指标等实现产线运营管控。通过对厂房、产品、设备、工装等生产线全要素的虚拟建模,基于工业以太网采集设备数据,基于业务系统采集制造数据,实现数据驱动模型;同时,通过建立生产管控指标体系,实现总装生产、技术、质量、运营等业务域管理指标可视化呈现,直观反映生产线真实的运行状态;最后,通过车间漫游,实现多视觉、多场景的自主、自动漫游,实现在虚拟车间沉浸式巡视。



(a)产线级数字孪生



(b)机位级数字孪生

4 结论

本文初步探索了数字孪生技术在飞机总装生产线的应用。从飞机总装生产线物理到“物理-信息”融合的演变过程出发,阐述了飞机总装生产线运行管控需求,定义了飞机总装生产线数字孪生的组成,构建了飞机总装生产线数字孪生五维模型。基于3DMAX建立虚拟模型,应用RFID、数据采集卡、便携式终端等实现生产线数据采集,利用数据驱动模型迭代优化,并构建飞机总装数字孪生系统,实现了物理空间与虚拟空间的实时交互与深度融合,对总装生产



(c)设备级数字孪生

图7 飞机总装数字孪生系统

Fig.7 Digital twin system of aircraft assembly



图8 二维指标展示

Fig.8 Two-dimensional indicator display

线的效率与质量提升具有重要作用,为飞机总装生产线管控提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418–20427.
- [2] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1–10.
- LIU Datong, GUO Kai, WANG Benkuan, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 1–10.
- [3] 吴雁, 王晓军, 何勇, 等. 数字孪生在制造业中的关键技术及应用研究综述[J]. 现代制造工程, 2021(9): 137–145.
- WU Yan, WANG Xiaojun, HE Yong, et al. Review on the technology and application of digital twin in manufacturing industry[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(9): 137–145.
- [4] 孙红俊, 张文杰, 张利艳. 美欧先进军工企业航天制造智能化发展分析[J]. 卫星应用, 2019(6): 6–9.
- SUN Hongjun, ZHANG Wenjie, ZHANG Liyan. Analysis on the development of aerospace manufacturing intelligence of advanced military enterprises in the United States and Europe[J]. Satellite Application, 2019(6): 6–9.
- [5] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1–9.
- TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1–9.
- [6] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1–18.
- TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1–18.
- [7] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603–1611.
- TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603–1611.
- [8] 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.
- [9] 陶飞, 戚庆林, 张萌. 数字孪生及车间实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- TAO Fei, QI Qinglin, ZHANG Meng. Digital twin and its application in shop-floor[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [10] 陈振, 丁晓, 唐健钧, 等. 基于数字孪生的飞机装配车间生产管控模式探索[J]. 航空制造技术, 2018, 61(12): 46–50, 58.
- CHEN Zhen, DING Xiao, TANG Jianjun, et al. Digital twin-based production management and control mode for aircraft assembly shop-floor[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(12): 46–50, 58.
- [11] 柳林燕, 杜宏祥, 汪惠芬, 等. 车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1536–1545.
- LIU Linyan, DU Hongxiang, WANG Huiwen, et al. Construction and application of digital twin system for production process in workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1536–1545.
- [12] 孟松鹤, 叶雨玫, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 023615.
- MENG Songhe, YE Yumei, YANG Qiang, et al. Digital twin and its aerospace applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 023615.
- [13] 江海凡, 丁国富, 张剑. 数字孪生车间演化机理及运行机制[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 824–832, 841.
- JIANG Haifan, DING Guofu, ZHANG Jian. Evolution and operation mechanism of digital twin shopfloors[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 824–832, 841.
- [14] 金星, 方柏鑫, 周丽娟. 面向航空制造的数字孪生车间构建[J]. 自动化应用, 2021(8): 77–79.
- JIN Xing, FANG Baixin, ZHOU Lijuan. Construction of digital twin workshops for aviation manufacturing[J]. Automation Application, 2021(8): 77–79.

(下转第 65 页)

引文格式: 赵爽, 张东, 聂广超, 等. 基于数字图像相关的切削加工剪切区应变率监测调控研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 42-49.
ZHAO Shuang, ZHANG Dong, NIE Guangchao, et al. Monitoring and control of strain rate of primary shear zone in cutting process based on digital image correlation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 42-49.

基于数字图像相关的切削加工剪切区应变率监测调控研究*

赵爽, 张东, 聂广超, 杨政彦, 张小明

(华中科技大学, 武汉 430074)

[摘要] 切削加工是航空制造领域主要加工方式之一, 切削过程应变与应变率对切屑生成和加工表面质量有较大的影响, 监测和调控切削过程应变与应变率是研究切削机理和实现加工过程控制的直接方法之一。本文开发了一套切削过程剪切区应变率监测调控软硬件系统, 搭建了正交切削原位成像平台, 获取切削过程剪切区显微照片, 编写了多线程加速的全局数字图像相关算法, 实现对正交切削过程的同步图像分析和剪切区应变率计算; 建立了一套由计算机控制数控车床主轴的调速系统, 根据测量应变率与目标应变率的大小关系实时调节主轴倍率。开展了两组正交切削试验, 试验结果表明, 所搭建的试验系统可以实现对剪切区的应变率监测与调控, 调控后剪切区应变率与目标值偏差小于 10%, 与理论预测值相比误差小于 23%。

关键词: 数字图像相关; 正交切削; 原位成像; 剪切区; 应变率; 反馈控制

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.042



赵爽
博士研究生, 研究方向为切削成像、数字化制造。

切削加工是航空制造领域的主要加工方式之一, 航空发动机关键零件(如叶轮、叶盘)的切削加工质量影响着发动机的安全性与稳定性。切削应变/应变率不仅影响切屑种类的生成^[1-2], 而且决定已加工表面残余应力分布^[3]、裂纹的产生与扩展。因此, 实现加工过程应变/应变率的监控, 对改善切屑形成和提升航空制造表面完整性具有重要意义。

通常采用应变片或引伸计测量应变, 但是这种方法只能获取两点之间的应变大小而非全场信息。近年来, 得益于数字图像相关(Digital image correlation, DIC)技术的发展, 基于高速相机的原位测量系统可以实现全场应变非接触测量^[4-5]。

DIC 算法最早在 20 世纪 80 年代被提出, 经过国内外学者的完善, 如今已经较为成熟^[6-8], 被广泛应用于材料学^[9]、机械科学^[10-11]、土木工程^[12-13]、航空航天^[14]等领域。为了研究剪切区域应变与应变率, List^[15] 采用高速摄像系统观察低碳钢切屑并分析应变和应变率分布。Thimm^[16] 使用双帧相机研究了 AISI 1045 钢在不同切削速度、未变形切屑厚度和前角下的切屑形成和剪切应变率。Harzallah^[17] 使用双谱成像仪在正交切削中同时获得运动场和温度场, 发现由于锯齿切屑形成的循环性质, 高应变率区域在空间中是固定的, 其值仅随时间略有变化。Davis 等^[18] 研究了加工过程中切屑

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(92160207); 国家自然科学基金青年科学基金(52005200); 国家自然科学基金基础科学中心项目(52188102)。

流动方向主变形区内的应变过程。Zhang^[19]通过原位成像准确描述了加工过程中的剪切区应变-应力场演变行为,通过改变前角、切削速度和工件初始温度,获得了不同水平的应变/应变率。Bergs^[20]利用高速DIC技术研究了主变形区的应变和应变率场。

DIC技术已广泛应用于切削加工过程,实现加工过程应变-应力场的表征。但是由于DIC算法计算过程耗时、对图片质量要求高等特点,目前很难实现对切削过程的应变/应变率实时监控。本文开发了一套切削过程原位成像系统,通过双帧相机获得切削剪切区数字图像,结合多线程全局数字图像相关算法,实时获取应变增量,并根据应变率大小反馈调节机床主轴转速,实现正交切削过程的应变率的在线监测和调控。

1 试验平台搭建

1.1 正交切削原位成像系统

如图1所示,在数控车床上搭建了一套正交切削原位感知系统,主要包括刀具、工件、光源和相机。工件通过一套高刚度的套筒夹具夹持安装在车床主轴上,槽刀刀片从工件的圆周处沿径向进给。

切削过程中,采用相机获取加工过程图片。为了保证拍摄效果,试验过程中未使用冷却液或润滑油。由

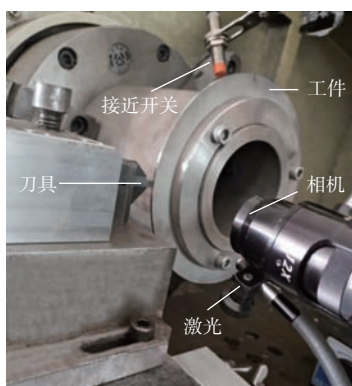


图1 正交切削原位成像系统

Fig.1 In-situ imaging system for orthogonal cutting

于干式切削与常规冷却切削的状态接近^[21],因而可以采用干式切削替代研究实际加工过程。另外也可以采用钢化玻璃限制切屑侧向流动以及切削液污染^[22],从而实现对常规切削的在线观测。未变形切屑厚度为0.2 mm,初始主轴转速为60 r/min,在加工过程可通过改变主轴倍率(50%~120%)调节实际转速;工件材料为AISI 1045,硬度测量值为HRA(51±1.5),厚度为3 mm,直径为230 mm;刀具由硬质合金制成,前角为15°,后角为7°。

相机型号为博科奥公司 pco.pixelfly USB,该双帧相机以1 μs的帧间距进行两次曝光,从而获取加工过程中切屑形成过程的照片。相机配备了Navitar 12X光学镜头,放大倍数为6倍。光源为EverGreen 30 mJ激光光源,可独立产生两束光,两束光的间隔是图片的实际帧间距,试验中该间隔被固定为10 μs。

1.2 机床主轴自动调速系统

更改机床数控系统PLC梯形图使得机床可通过外部信号调节主轴倍率,控制信号由电脑通过控制板卡发出,控制板卡选用研华pci-1245型号四轴脉冲型步进/伺服电机运动控制卡,使用数字量输出作为机床倍率的信号输入。由于板卡的输出为低电平,需要通过一个继电器(YF-38),将板卡的输出信号转化为

一个高电压(24 V),来作为机床的主轴倍率控制信号。

运动控制卡输出端子卡为ADAM-3952,控制4个轴的运动。在加工过程中,上位机根据剪切带应变率测量结果,通过控制板卡将主轴转速调节信号发送到机床PLC,从而改变机床的实际转速,达到设定应变率。

1.3 相机与光源同步触发系统

如图1所示,工件夹具附近安装了接近开关,主轴每转一周接近开关触发一次,从而保证在工件同一位置进行拍摄。由于工作过程涉及相机、光源、主轴控制信号和接近开关之间的协同配合,本文选用高精度延时触发器实现同步控制,控制时序如图2所示。

图2中, t_{exp1} 和 t_{exp2} 分别是相机两次曝光的时间; t_{if} 为相机帧间距,但是实际帧间距为光源发出两束光的时间间隔 $t_{rif}=t_{exp1}+t_{if}$ 。激光的闪烁时长极短,通常为十几纳秒,因而可以避免产生运动模糊。从相机接收到外部触发信号,到相机开始抓取一张图片,共有5.4 μs的时延,而激光光源从接收到信号到发出光束,有135 μs的蕴光时间。

1.4 剪切区应变率监控

为了协调系统各部分之间的工作,编写了应变率监控算法,软件主要包含4个模块,分别是DIC模块、相机交互模块、控制板卡交互模块和

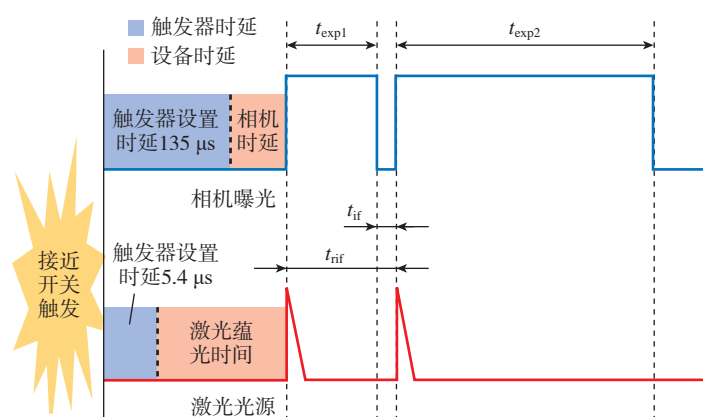


图2 相机与光源脉冲信号

Fig.2 Pulse signal of camera and light source

人机交互界面部分。

DIC 模块主要完成数字图像相关计算,包括参数设定、运行过程中的位移场与应变场实时计算、结果保存和显示;相机交互模块主要负责与相机的各种交互,包括相机参数设定、图片采集、格式转换与保存、相机触发与 DIC 计算的同步控制;控制板卡交互模块主要负责与控制板卡的各种交互,包括控制板卡的初始化、向控制板卡发送控制指令驱使电机转动;人机交互界面部分主要负责与用户之间的交互,包括剪切区图片、应变率结果的显示。

剪切区应变率监控的完整工作流程可分为预定义阶段与工作循环阶段。预定义阶段主要为设备初始化、参数定义等;工作阶段是一个循环,不停重复着等待接近开关触发、获取双帧图片、分析图片、给出控制信息、调控加工参数步骤,如图 3 所示。两阶段详细介绍如下。

(1) 预定义阶段。软件启动后首先连接相机,并将相机的触发模式设置为外部触发,获取方式为双帧模式,设定帧间距为 $1 \mu\text{s}$,相机第 1 帧曝光时间为 $10 \mu\text{s}$ 。此后手动进行一次软触发,获取两帧图片,这两帧图片中的刀具位置是后续选取第一剪切变形区为感兴趣区域 (Region of interest, ROI) 的重要参考。随后设定 ROI,并进行网格生成,继而在刀尖点前选择一条平行于前刀面的线段。切削区域应变率是不均匀的场量,沿着垂直剪切带方向是先增加后减小的,沿着剪切带方向是基本均匀的^[23],本文测量的应变率是沿着垂直剪切带方向的应变率的最大值,近似用上述所选线段上的最大应变率表示。完成预定义阶段后的软件界面如图 4 所示。

(2) 循环工作阶段。在点击“工作”按钮后,软件进入监测状态,实时显示当前的应变率计算结果;在设置好调控目标后点击“调控”按钮,

软件进入监控状态,开始监测应变并反馈控制信号。具体过程为:主线程调用获取图片的函数并阻塞等待,当接近开关触发并向相机发送触发信号,相机在激光配合下获得两帧图片,主线程继续进行图像处理,并完成数字图像相关计算与应变率计算。应变率调控方法采用了简单的单输入单输出模糊控制算法:当应变率高于预设值时,将机床主轴倍率降一档(10%),反之则升一档,如果处于可接受区间则不发出控制信号,即

$$\Delta R = \begin{cases} -10\% & E > E_s(1+e) \\ +10\% & E < E_s(1-e) \\ 0 & E \in [E_s(1-e), E_s(1+e)] \end{cases} \quad (1)$$

式中, E_s 为设定应变率; E 为当前应变率; e 为允许的误差百分比。在主轴倍率没有达到上下限时(主轴倍率最低 50%,最高 120%),新的主轴倍率 R_{new} 等于原主轴倍率 R_{old} 加上反馈 ΔR ,即

$$R_{\text{new}} = \begin{cases} R_{\text{old}} & R_{\text{old}} = 120\% \text{ and } \Delta R = +10\% \\ R_{\text{old}} & R_{\text{old}} = 50\% \text{ and } \Delta R = -10\% \\ R_{\text{old}} + \Delta R & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

图 5 展示了软件工作过程界面,其中,左下角的窗口展示了实时获得的两帧图片的剪切区位移场计算结果,右侧的窗口实时绘制从开始执行

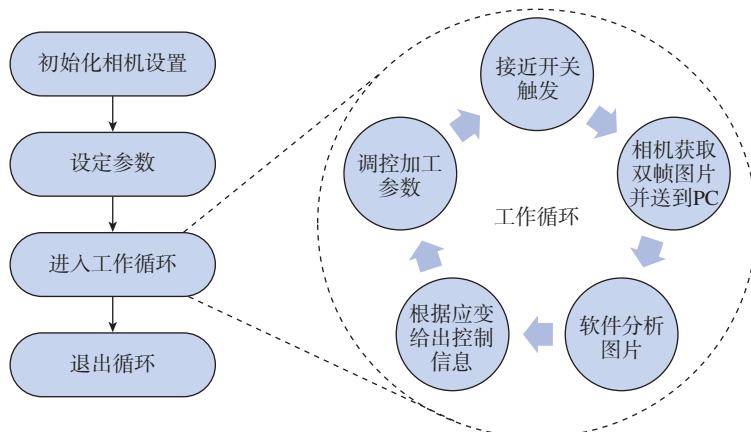


图 3 剪切区应变率监控软件工作流程

Fig.3 Workflow of strain rate monitoring software in shear zone

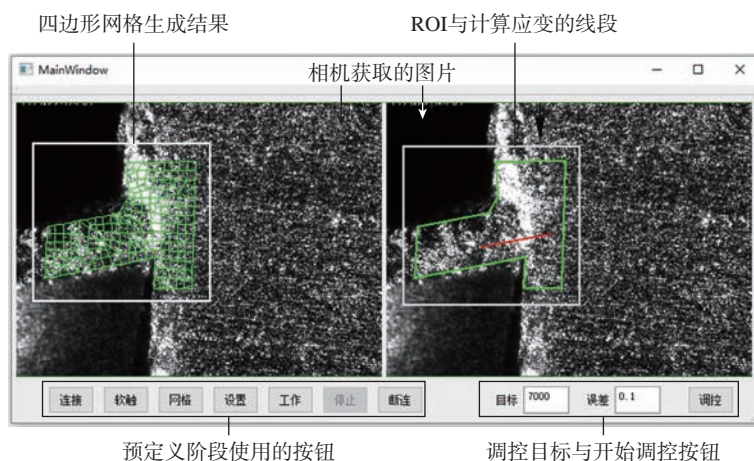


图 4 完成预定义阶段后的人机交互界面

Fig.4 Human-computer interaction interface after completing pre-definition stage

调控以来剪切区的等效应变率。软件的计算部分使用了5个线程并行处理,一次工作循环需要的时间为1~2s。

2 剪切区应变率实时计算

剪切区应变率监控软件的计算模块是系统的核心单元,双帧相机在获取一组照片后,需要通过DIC计算获得全场位移与应变信息。

2.1 全局数字图像相关分析方法

首先,基于区域分解方法^[24]实现了用户定义的ROI四边形网格生成。其次,图片的相关性度量方法为图片灰度值差的平方求和,即

$$F = \sum_{x \in Q} [f(x) - g(x_{\text{warp}})]^2 \quad (3)$$

式中, F 为用欧式距离表示的图片相关度; $f(x)$ 与 $g(x)$ 分别为参考图片、变形图片上坐标 x 处的像素灰度值; 通常对 f 和 g 作归一化处理。 Q 为四边形区域; x 为一个落在 Q 区域内的像素的二维向量坐标; x_{warp} 则是该像素在平移和变形后处于变形图片上对应的坐标位置。

$$x_{\text{warp}} = x + \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, u 、 v 是像素点沿水平、竖直方向的位移。采用四边形网格划分ROI后,四边形 Q 内任一像素点的位移均可以由四边形 Q 的结点位移向量 p^Q 通过形函数插值获得。在全局DIC方法中,一次性考虑所有四边形网格节点位移,得到:

$$F = \sum_{Q \in S} \sum_{x \in Q} \left(f(x) - g \left\{ x + \begin{bmatrix} u(x, p^Q) \\ v(x, p^Q) \end{bmatrix} \right\} \right)^2 \quad (5)$$

式中, S 为整个被计算区域,由多个四边形单元构成; Q 为单个四边形单元,在计算之前通过等参变换,将其映射为正方形单元^[25]。构造全局节点位移向量 $p = [u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, u_n, v_n]^T$, 表示整个网格中所有节点的位移大小,则有 $p^Q = Gp = [u_{q1}, v_{q1}, u_{q2}, v_{q2}, u_{q3}, v_{q3}, u_{q4}, v_{q4}]^T$; G 为由0和1组成的节

点组装矩阵; 向量 p 的解即为所求目标。令 F 导数等于0进行求解,即

$$\nabla F = 0 \quad (6)$$

采用牛顿-拉弗森迭代方法求解式(6),先假定 p 的初始值为 p_0 , 则有

$$\nabla \nabla F \cdot \Delta p + \nabla F = 0 \quad (7)$$

其中

$$\nabla F = \left(\frac{\partial F}{\partial p_i} \right)_{i=1,2,\dots,2n} = 2 \sum_{Q \in S} G^T \left[\sum_{x \in Q} (f - g) \frac{\partial g}{\partial p_i^Q} \right] \quad (8)$$

$$\nabla \nabla F = \left(\frac{\partial^2 F}{\partial p_i \partial p_j} \right)_{\substack{i=1,2,\dots,2n \\ j=1,2,\dots,2n}} \approx 2 \sum_{Q \in S} G^T \sum_{x \in Q} \frac{\partial g \partial g}{\partial p_i^Q \partial p_j^Q} G \quad (9)$$

式中, p_i 为向量 p 的第 i 个分量。求得 p 的变化量 Δp , 更新 p 的值 $p = p_0 + \Delta p$, 重复这个过程直到收敛,整个过程的实现如图6所示。

2.2 数字图像相关并行处理与应变增量计算

从式(8)和(9)可以看出,在一

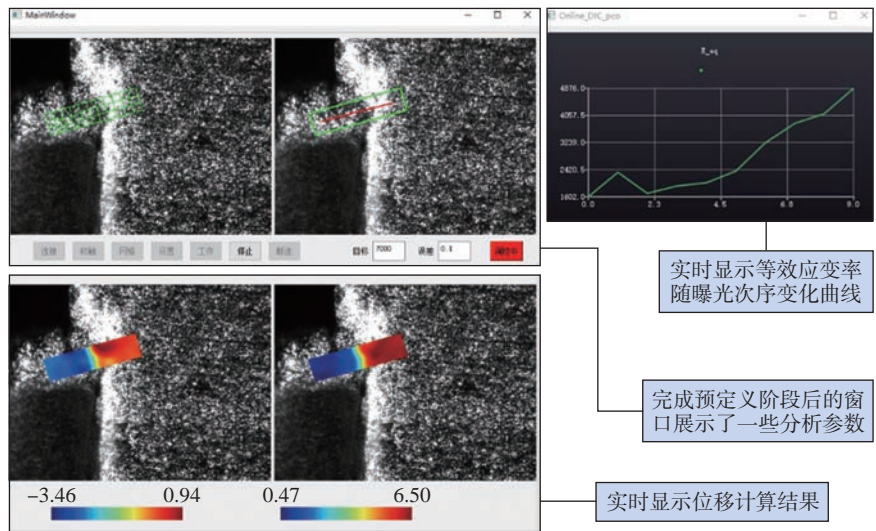


图5 剪切区应变率监控软件工作界面

Fig.5 Working interface of strain rate monitoring software in shear zone

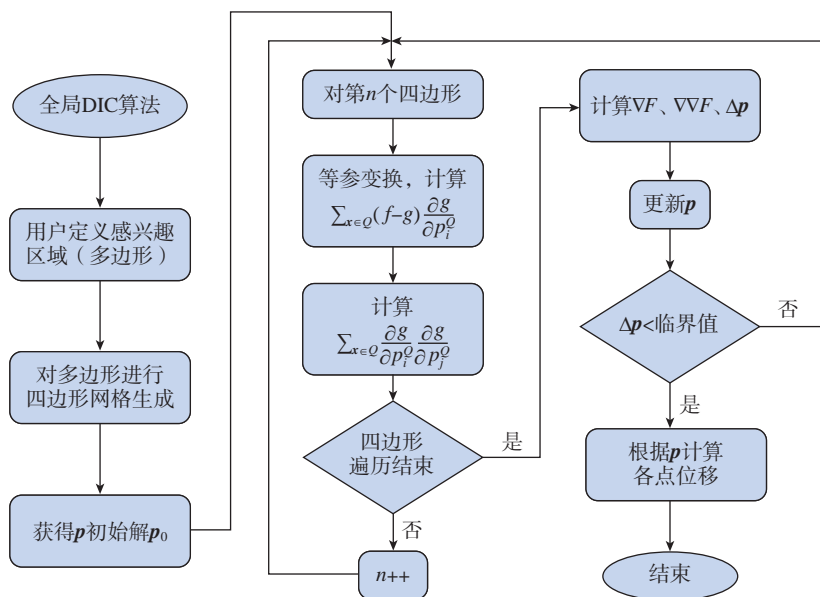


图6 全局DIC方法程序框图

Fig.6 Program block diagram of global DIC method

次迭代中,需要计算所有在 S 范围内的四边形,耗时较长。本文采用并行计算提高计算效率。将由多个四边形组成的 S 拆分成若干个小的区域,分别处理每个小区域内的四边形,再将所有结果求和,如图 7 所示。

迭代收敛后,得到了所有网格节点的位移,再经过形函数插值即可得到 ROI 的全场位移。由于将计算中最耗时的求和过程分解成多线程并行计算,因此算法的分析效率有所改善,在采用 5 线程计算时,当分析区

域大小为 6~8 万像素点时,获得全场位移所花费的时间为 1~2 s;使用开源 DIC 软件包 Ncorr 进行相同大小区域的分析时,所花费时间为 5~6 s^[26]。

此外,为测试本算法计算位移的准确性,设计了一对已知全场位移分布的待分析图片,如图 8 所示,分别使用本算法与 Ncorr 软件包分析了图 8 (a) 和 (c) 图片中间 400×400 像素大小的全场位移,并将结果与准确位移场图 8 (b) 进行对比,误差 $Er = (D_c - D_s) / D_s$,其中 D_c 是本算法

或 Ncorr 软件包计算值, D_s 是准确位移场图 8 (b) 的值。图 9 给出了误差 Er 分布状况。

可以看出,本算法分析误差不超过 3%, Ncorr 的分析误差不超过 2.3%,结果表明,本算法具有良好的准确度。获得全场位移数据后,欲求某点应变,可采用最小二乘法将该点周围的位移数据拟合为一个平面,基于平面的斜率求解应变,即

$$Aw = b \tag{10}$$

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{pmatrix}; w = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}; b = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{pmatrix} \tag{11}$$

式中, A 为(用坐标数据构造的)系数矩阵; w 为待求解向量; b 为(用位移数据构造的)列向量。其中, (x_i, y_i) 表示图片上的一个像素位置; z_i

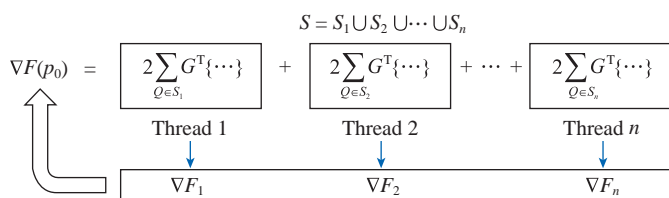


图 7 数字图像相关并行处理示意图

Fig.7 Schematic diagram of parallel processing of DIC

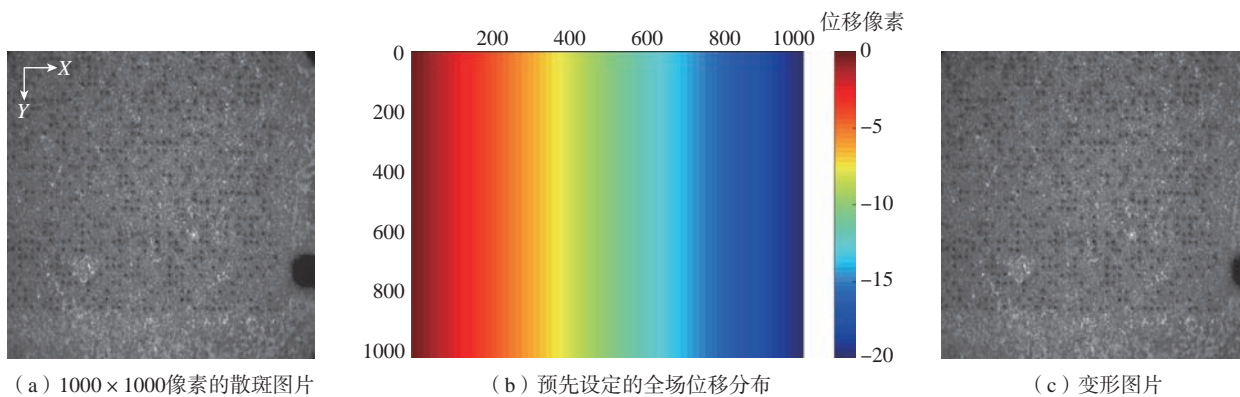


图 8 用于测试算法的参考图片与变形图片

Fig.8 Reference and deformation images for testing algorithm

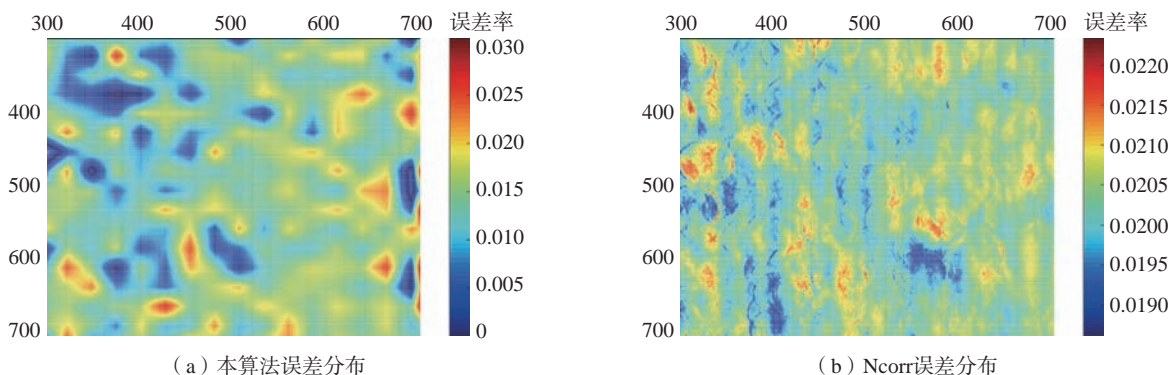


图 9 误差分布

Fig.9 Error distribution

表示该位置在 x 或 y 方向的位移 u_i 或 v_i ; n 表示用于拟合这个平面的点的个数, 当点的个数超过 3 时, w 存在最小二乘解, 其两个分量 a 、 b 分别是平面沿着 x 、 y 方向的斜率。将 u_i 和 v_i 分别作为 z_i 代入, 计算出 a_u 、 b_u 与 a_v 、 b_v , 则应变增量的分量为

$$\begin{cases} E_{xx} = a_u \\ E_{yy} = b_v \\ E_{xy} = (a_v + b_u) / 2 \end{cases} \quad (12)$$

最后基于平面应变假设获得等效应变增量为

$$E_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}(E_{xx}^2 + E_{yy}^2) + \frac{4}{3}E_{xy}^2} \quad (13)$$

3 试验结果

开展了两组剪切区应变率监测与调控试验, 切削参数、应变率目标值和可接受应变率误差设定如表 1 所示, 图 10 展示了调控试验中获得

的部分图片和相应的分析结果。

试验过程实时测算的应变率和主轴倍率(切削速度)如图 11 所示, 纵坐标表示应变率大小, 横坐标表示相机曝光次序。可以看出, 当实际的应变率低于设定值, 软件发送信号控制机床提高主轴倍率; 当实际应变率高于设定值时, 软件发送信号控制机床降低主轴倍率。主轴倍率的变化会使得应变率逐步接近设定目标值, 最终实测应变率在目标区间以内, 与目标值误差小于 10%, 符合预设要求。

此外, 采用 Lalwani 等^[23]提出的 Oxley 理论, 应变率预测公式表征

了应变率随速度的变化关系, 剪切区应变率解析计算公式为

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\gamma}}{\sqrt{3}} = \frac{C_0 V_s}{\sqrt{3}l} \quad (14)$$

式中, $\dot{\gamma}$ 为应变率; V_s 为切削速度; C_0 为应变率常量, 对于 AISI 1045 材料可取 $C_0=5^{[23]}$; 剪切区长度 l 可表示为 $l=d/\sin\phi$ 。其中 d 为未变形切屑厚度; ϕ 为剪切角; 前刀面与刀具摩擦系数取值 0.6, 根据剪切角计算公式 $\phi=45^\circ - (\beta-\gamma_0)$, 剪切角 $\phi=30^\circ$ (β 为摩擦角; γ_0 为刀具前角)。

理论预测值与试验测量值对比如图 11 所示, 随着主轴转速倍率的变化, 两者基本吻合。在小应变率下,

表 1 试验参数设计

Table 1 Experimental parameter design

试验组号	设定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	初始主轴倍率 $r/\%$	应变率目标值/ s^{-1}	可接受应变率误差/ $\%$
1	60	50	6200	10
2	60	120	2600	10

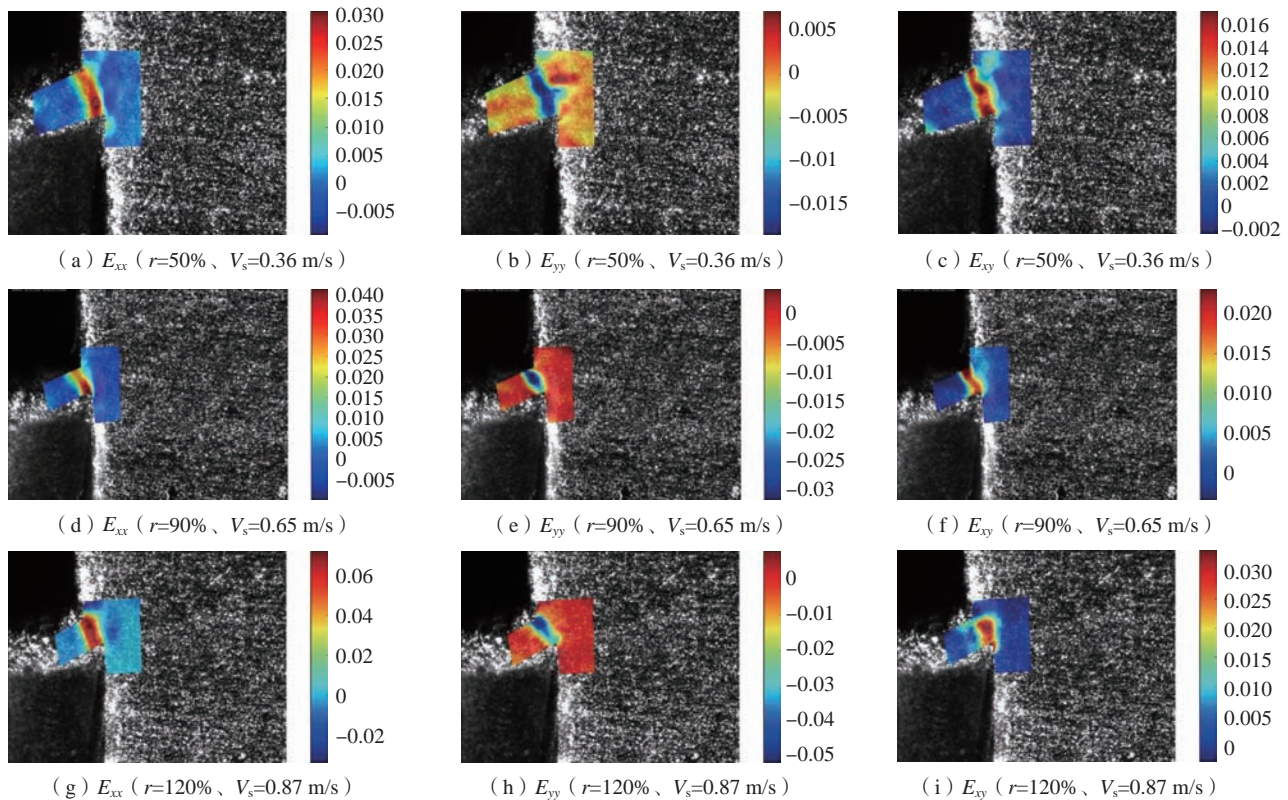


图 10 不同主轴倍率下的剪切区应变增量

Fig.10 Cutting shear zone strain increment under various principal axis rates

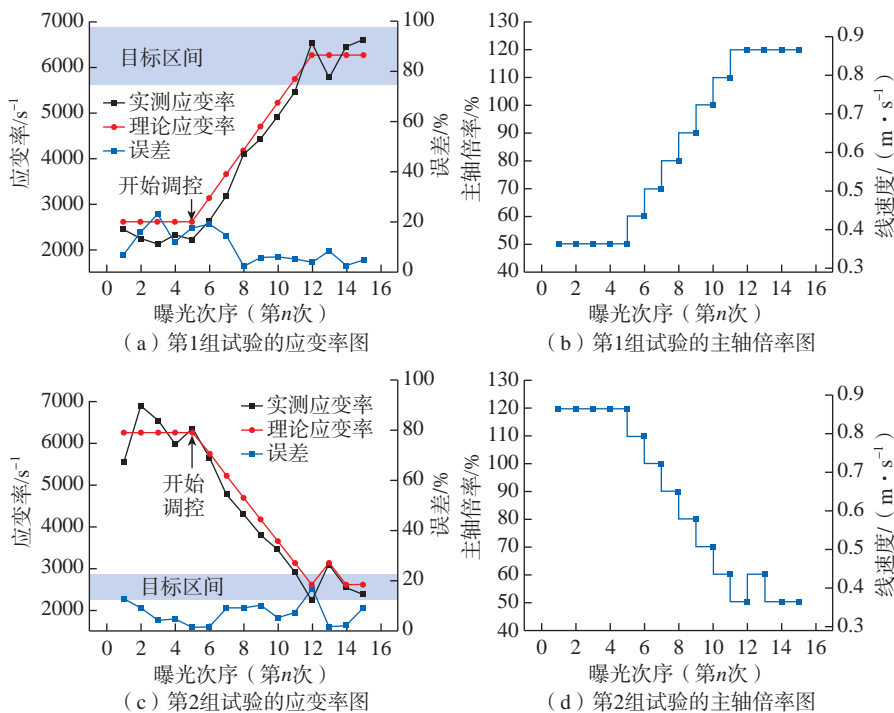


图 11 实测、理论应变率图与主轴倍率图

Fig.11 Measured, theoretical strain rate diagram and spindle magnification diagram

误差达到 23%。在较大的应变率下, 误差通常小于 16%, 表明了所构建的剪切区应变率监测和调控精度。

4 结论

(1) 实现了由多线程加速的全局 DIC 算法, 在 5 线程并行处理待分析区域 (6~8 万像素点) 时, 计算过程需要的时间为 1~2 s, 计算位移误差小于 3%。

(2) 所提出的系统可以在正交切削过程中实时、准确地监测剪切区应变率大小, 并与所设定的目标值对比, 给出控制信号改变切削速度完成对应变率的调节, 两组试验结果表明试验测量值与目标值偏差小于 10%, 而与 Oxley 理论预测模型相比, 误差小于 23%。

本文的工作为航空发动机零件加工表面完整性调控提供了一条新的技术途径, 后续将进一步提高该系统的稳定性和适用性, 并应用于复杂曲面典型加工工况下的加工表面完整性的在线调控。

参考文献

- [1] XU B B, ZHANG J, LIU H G, et al. Serrated chip formation induced periodic distribution of morphological and physical characteristics in machined surface during high-speed machining of Ti6Al4V[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2021, 143(10): 1–22.
- [2] HOA P T, LONG B T, TOAN N D, et al. The effect of strain rate on chip formation and cutting process during high-speed cutting of A6061 aluminum alloy[C]//Advanced Materials. Cham: Springer, 2020: 123–130.
- [3] TIWARI A K, et al. Investigation of strain rate on residual stress distribution[J]. Materials & Design (1980–2015), 2015, 65: 1041–1047.
- [4] GUANGCHAO Nie, ZHENGYAN Yang, DONG Zhang, et al. Dynamics of chip formation during the cutting process using imaging techniques: A review[J]. International Journal of Mechanical System Dynamics, 2022(1): 27–49.
- [5] 李慧. 基于数字图像相关 (DIC) 方法测量帧间大变形的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [6] SUN Y, PANG J H, WONG C K, et al. Finite element formulation for a digital image correlation method[J]. Applied Optics, 2005, 44(34): 7357–7363.
- [7] BESNARD G, HILD F, ROUX S. “Finite-element” displacement fields analysis from digital images: Application to portevin-le châtelier bands[J]. Experimental Mechanics, 2006, 46(6): 789–803.
- [8] PAN B, et al. A fast digital image correlation method for deformation measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(7): 841–847.
- [9] 李陈卓, 潘兵. 基于数字单反相机的数字图像相关方法块体材料热膨胀系数高通量测试技术 [C]//北京力学学会第 26 届学术年会论文集. 北京, 2020: 1708.
- LI Chenzhuo, PAN Bing. Digital image correlation method based on digital SLR camera[C]// Proceedings of the 26th Annual Academic Conference of Beijing Mechanics Society. Beijing, 2020: 1708.
- [10] YANG Z Y, ZHANG X M, NIE G C, et al. A comprehensive experiment-based approach to generate stress field and slip lines in cutting process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2021, 143(7): 117–122.
- [11] ZHANG D, MEURER M, ZHANG X M, et al. Understanding kinematics of the orthogonal cutting using digital image correlation—Measurement and analysis[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2022, 144(3): 031008.
- [12] 闫清峰, 张纪刚, 张敏, 等. 基于 DIC 的工程水泥基复合材料弯曲损伤分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2022, 52(3): 482–488.
- YAN Qingfeng, ZHANG Jigang, ZHANG Min, et al. Flexural damage analysis of engineering cementitious composites based on DIC[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(3): 482–488.
- [13] 王鹏鹏, 郭晓霞, 桑勇, 等. 基于数字图像相关技术的砂土全场变形测量及其 DEM 数值模拟 [J]. 工程力学, 2020, 37(1): 239–247.
- WANG Pengpeng, GUO Xiaoxia, SANG Yong, et al. Full-field deformation measurement of sand using the digital image correlation technique and numerical simulation using the discrete element method[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(1): 239–247.
- [14] 俞立平, 潘兵. 单相机高温三维数字图像相关方法 [J]. 航空学报, 2022, 43(6):

292–303.

YU Liping, PAN Bing. Single-camera high-temperature three-dimensional digital image correlation method[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(6): 292–303.

[15] LIST G. Strain, strain rate and velocity fields determination at very high cutting speed[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(5): 693–699.

[16] THIMM B. Determination of chip speed and shear strain rate in primary shear zone using digital image correlation (DIC) in linear-orthogonal cutting experiments[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 289: 116957.

[17] HARZALLAH M. A coupled in situ measurement of temperature and kinematic fields in Ti–6Al–4V serrated chip formation at micro-scale[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 130–131: 20–35.

[18] DAVIS B, DABROW D, IFJU P, et al. Study of the shear strain and shear strain rate progression during titanium machining[J]. *Journal*

of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(5): 180–193.

[19] ZHANG D. Characterization of material strain and thermal softening effects in the cutting process[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 160: 103672.

[20] BERGS T. Digital image correlation analysis and modelling of the strain rate in metal cutting[J]. *CIRP Annals*, 2021, 70(1): 45–48.

[21] AUGSPURGER T, et al. Development of a virtual sensor for the comparison of heat partitions in milling under cryogenic cooling lubrication and high-pressure cutting fluid supply[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 35: 118–131.

[22] DENKENA B, et al. A novel approach to determine the velocity dependency of the friction behavior during machining by means of digital particle image velocimetry (DPIV)[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 32: 81–90.

[23] LALWANI D I. Extension of Oxley's predictive machining theory for Johnson and

Cook flow stress model[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(12–13): 5305–5312.

[24] 刘阳. 二维四边形网格生成技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

LIU Yang. The study on two dimensional quadrilateral finite element mesh generation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

[25] YANG J, BHATTACHARYA K. Augmented Lagrangian digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2019, 59(2): 187–205.

[26] BLABER J, ADAIR B, ANTONIOU A. Ncorr: Open-source 2D digital image correlation Matlab software[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(6): 1105–1122.

通讯作者: 张小明, 教授, 博士生导师, 研究领域为高性能切削技术, 数字化智能化制造, 工业软件。

Monitoring and Control of Strain Rate of Primary Shear Zone in Cutting Process Based on Digital Image Correlation

ZHAO Shuang, ZHANG Dong, NIE Guangchao, YANG Zhengyan, ZHANG Xiaoming
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] Metal Cutting is one of the main processing methods in the field of aviation manufacturing, and strain and strain rate have a great impact on the chip formation and surface quality. The monitor and control of the strain and strain rate can contribute to the study of the cutting mechanism and conditioning of the machining process. In this paper, we developed an experimental setup for monitoring and controlling of strain rate in the primary shear zone. An in-situ imaging platform of orthogonal cutting is built, which can acquire the images of shear zone in the orthogonal cutting process. A global DIC algorithm accelerated by multithreading is developed to improve the efficiency of image analysis. The image analysis and strain rate calculation can be conducted as well by the DIC software. An online adjustment of spindle controlled by computer is established, which can adjust the spindle magnification in real time according to the relationship between the measured strain rate and the target strain rate. Two experiments for the control of the strain rate in the primary shear zone during orthogonal cutting are carried out. The experimental results show that this system can monitor and control the strain rate in the shear zone with an error less than 10% compared with target value, and less than 23% compared with theoretical predicted value.

Keywords: Digital image correlation; Orthogonal cutting; In-situ imaging; Shear zone; Strain rate; Feedback control

(责编 七七)

引文格式: 康瑞浩, 胡俊山, 田威, 等. 面向工业机器人的数字孪生建模精度补偿方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 50-59.

KANG Ruihao, HU Junshan, TIAN Wei, et al. A digital twin modelling accuracy compensation method for industrial robots[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 50-59.

面向工业机器人的数字孪生建模精度补偿方法*

康瑞浩¹, 胡俊山¹, 田威¹, 张嘉伟¹, 马创业²

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 中国空空导弹研究院, 洛阳 471000)

[摘要] 针对现有工业机器人智能装备建模感知监测精度缺失, 依靠理论参数建模精度低等问题, 本文以工业机器人铣削系统为研究对象, 构建了高精度光栅尺实时测量机器人关节转角的数字孪生监测系统, 避免了齿轮间隙、编码器丢码等关节转角误差对数字孪生建模准确度的影响; 根据 MD-H 运动学建模方法建立了数字孪生驱动模型, 采用 L-M 算法对工业机器人建模参数进行辨识修正, 减少了机器人数字孪生模型中几何误差的影响; 开发了数字孪生交互系统平台, 用以监测、控制物理空间的工业机器人铣削系统的作业运动。利用辨识后的机器人关节参数构建的数字孪生模型, 使得工业机器人铣削系统运动点位的建模精度从 ± 1.6905 mm 提高到了 ± 0.3304 mm, 提高了 4.12 倍, 表明本文针对工业机器人数字孪生建模方法的正确性和建模参数辨识方法对建模精度补偿的可行性。

关键词: 参数辨识; 辅助传感器; 数字孪生; 工业机器人; 建模精度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.050



康瑞浩

博士研究生, 研究领域为数字孪生建模、飞机智能装备与工艺。

随着机器人技术的快速发展, 以工业机器人为载体的智能装备在航空航天智能生产线中的应用愈加广

泛, 如飞机翼面钻铆、型面铣削、部件装配等场合^[1]。同时, 对机器人作业过程的动态监测需求也变得更加迫切。数字孪生技术 (DT) 能够对装备、产线乃至全工厂进行实时、有效的监测, 而数字孪生能否准确地映射物理空间状态取决于数字孪生建模的准确度。现有机器人数字孪生建模方法大多依赖理论参数来构建模型, 在传感器数据驱动下, 往往导致数字孪生模型的运动轨迹与物理空间的实际轨迹不一致, 影响到后续的预测与控制效果。因此, 如何建立高精度、高保真的数字孪生模型面临着巨大挑战。

2003 年 Grieves 教授于密歇根大学的产品生命周期管理 (PLM) 课程上首次提出数字孪生概念^[2], 描述为物理系统的数字化信息结构, 数字

孪生模型是将数字信息嵌入到物理系统中而形成的独立实体。北航陶飞教授团队^[3-6]是国内较早深入开展数字孪生理论与技术研究的团队, 提出了数字孪生“五维模型”并建立了数字孪生模型评价指标体系。不同的研究者也从各个方面不断丰富数字孪生的概念^[7-8]。Li 等^[9]构建面向全生命周期动态演化的数字孪生驱动信息架构。Xia 等^[10]从制造结构层面建立数字孪生驱动的智能工厂, 进而在此基础上实现智能感知^[11]、预测^[12]、过程优化^[13]和控制策略^[14]等功能。但这些研究都集中在工厂、车间、产线等宏观生产数据的孪生可视化, 针对实际物理装备的数字孪生建模技术研究报道较少。

在物理装备孪生建模方面, Kuts 等^[15]基于 AR/VR 技术构建了工业机器人虚拟模型和虚拟操控界面, 可

* 基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2019YFB1310101, 2019YFB1707403)。

以通过 AR/VR 头盔实现对虚拟机械臂的运动控制。王春晓等^[16]利用 M-Works 对三轴数控铣床构建了综合机械、电气等多学科领域的数字孪生模型。Guo 等^[17]采用 Focas 数据采集方法,研发了智能制造车间数控机床数据采集与监控系统。这些研究虽然从装备的运动机理和运行状态等进行了数字孪生建模研究,但忽略了数字孪生建模的精度问题。

在面向工业机器人数字孪生建模中,通常采用理论参数来描述机器人内部结构的关联,但由于制造、装配、零部件磨损、重力及负载、温度等因素都会导致机器人本体与理论模型之间存在偏差^[18],严重影响机器人数字孪生建模精度。其中,机器人各连杆的参数误差以及造成的累积误差属于几何误差^[19];齿轮间隙、关节柔性变形等难以量化和衡量的误差属于非几何误差;还存在一些动态误差,会随着机器人使用时间和使用强度的增大而发生变化。

无论是几何误差、非几何误差还是动态误差,它们的存在都是无法避免的,在建模过程中需要对各误差造成的精度损失进行补偿。对于几何参数误差,通常可以采用基于运动学模型参数标定法^[20-22],通过修正机器人关节参数,来准确反映工业机器人在物理空间的位置, Dennis^[23]、Judd^[24]、Renders^[25]等提出了基于几何误差识别最大似然法的机器人标定方法,用来纠正连杆和关节参数误差。此外,许多学者建立了非运动学参数标定方法^[26],如 Zeng 等^[27-28]建立了基于误差相似度的精度补偿方法,王东署等^[29]采用前馈神经网络建立了机器人实际位姿和相应的关节角误差之间的关系,以确定位姿处补偿转角误差值,从而提高机器人的绝对定位精度。

为了减少传动误差等非几何误差,任永杰等^[30]利用激光跟踪仪进行末端位姿的在线测量与修正,实现

了机器人末端作业全闭环控制。在航空大部件加工中,Moeller 等^[31]利用激光跟踪仪对工业机器人系统进行实时位姿控制,该方法能够给数字孪生模型提供高精度映射,但需要增加激光跟踪仪等外部辅助设备,不仅提高了作业复杂度,同时只能对机器人末端数据采集,难以获得机器人各个活动关节的精确位置。国外学者将光栅尺安装在机器人各关节轴上,在机器人工作过程中读取光栅尺传感数据获得关节转角^[32-35],计算末端位姿与误差修正量,并在控制器中进行反馈控制^[36]。该方法可有效减小关节转角误差,提高机器人的建模精度。

本文从工业机器人数字孪生建模机理出发,对数字孪生建模精度进行了理论定义。通过在机器人上安装光栅传感器,建立数字孪生测量系统,并对测量系统进行标定,从而减少了数字孪生建模中关节传动引起的非几何误差。采用 L-M 算法^[37]对工业机器人建模参数进行辨识修正,补偿了数字孪生建模中的几何误差。试验结果表明了数字孪生建模方法的正确性和建模参数辨识对建模精度补偿的可行性。

1 数字孪生建模

1.1 数字孪生模型初始化

数字孪生模型可以定义为由传感器数据驱动的、具有物理实体运动约束的可视化表征。而模型初始化是在不考虑建模准确度的情况下获得与物理实体结构和功能近似的数字孪生模型。首先,利用 OpenGL (开放式图形库)建立数字孪生可视化环境,并对模型显示的材质、场景、光照条件进行全局设置;其次,鉴于工业机器人的运动是各主要运动部件相互协调运动的结果,对工业机器人机械结构进行拆分,确定工业机器人运动所需的各关键运动部件,将其三维模型导入数字孪生可视化环境

下;最后,由于 OpenGL 读取的各个模型位置和姿态是不固定的、任意的,所以需要参考实际机器人各部件模型的位置和装配方式,在可视化环境中进行调整并建立部件模型之间的从属关系。部件模型之间的关系可划分为相对运动与刚体固连关系,机器人各部件模型的从属关系如图 1 所示。

在定义机器人各部件从属关系的基础上,采用 MD-H 模型^[38]表达工业机器人各运动部件之间的关联关系,对各关键运动部件三维模型进行运动约束。为了避免 D-H 建模中两相邻连杆平行时到达奇异位置难以求解的情况,引入关节平行度参数 β_i : 当关节平时,定义 $\beta_i \neq 0, d_i = 0$; 关节不平时,定义 $\beta_i = 0$ 。此时,通过 MD-H 建立的机器人的第 i 节连杆相对 $i-1$ 节连杆的齐次变换矩阵

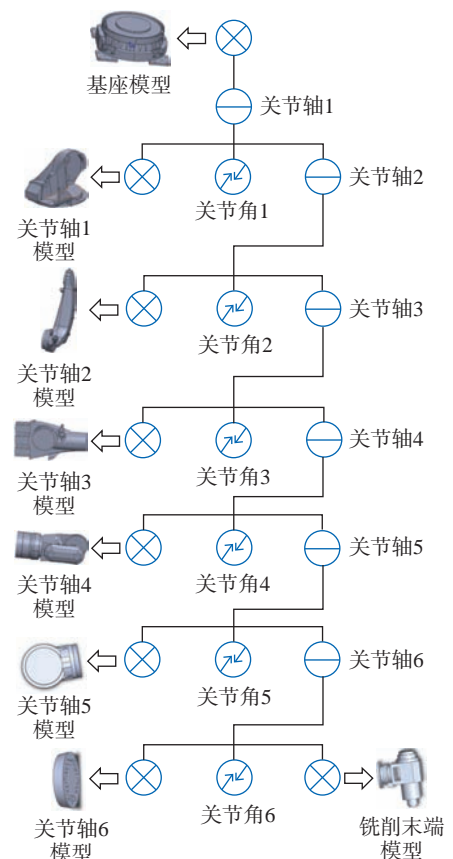


图 1 铣削工业机器人部件从属关系图
Fig.1 Subordination diagram of milling industrial robot moving parts

可以表示为

$${}^{i-1}A_i = \text{Rot}(z, \theta_i) \cdot \text{Trans}(0, 0, d_i) \cdot \text{Trans}(a_i, 0, 0) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_i) \cdot \text{Rot}(y, \beta_i) \quad (1)$$

式中, x 、 y 和 z 分别为连杆坐标系的坐标轴; a_i 为连杆长度; α_i 为连杆扭转角; d_i 为连杆偏距; θ_i 为关节转角; β_i 为关节平行度。

针对工业机器人转动关节数量的不同, 可以推导相对应的齐次变换矩阵。若转动关节数为 n , 根据式(1)和理论设计参数, 可得出其末端位姿在基坐标系下的齐次变换矩阵^[39], 并定义为

$$F(\theta_s, \mathbf{X}) = {}^0T_n = {}^0A_1 A_2 \cdots {}^{n-1}A_n \quad (2)$$

式中, $F(\theta_s, \mathbf{X})$ 为数字孪生驱动模型, 用以后续建模参数标定; θ_s 为关节驱动角度; \mathbf{X} 为建模结构参数组成的向量; T 为旋转矩阵; n 为关节数。

最后, 利用传感器读取物理实体各关键部件的相对运动量, 从而在可视化环境中驱动三维模型运动, 保证与物理空间实际机器人具有完全一致的运动行为。

此时完成了数字孪生模型的初始化工作, 但由于物理空间的工业机器人并不是理论参数构建的完全复刻体, 存在着诸多误差, 因此还需要对机器人数字孪生建模精度进行分析。

1.2 数字孪生建模精度

为了更好地表达数字孪生模型和物理实体之间的映射关系, 将数字孪生模型与实际物理装备的运动映射误差定义为建模误差, 孪生模型对物理空间映射的精准度评价指标定义为建模精度。在建模中应尽量按照工业机器人实际尺寸进行绘制, 以保证孪生模型与物理装备运动的一致性。

图2描述了数字孪生的位置建模精度, O_c 为物理空间中工业机器人末端测点到达的位置点; G 点为孪生模型计算所到达的位置点; O_c 点与 G 点之间误差值为该测点的建模误差 AP , 表达为

$$AP = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (3)$$

式中, x_j 、 y_j 、 z_j 为末端测点到达位置的空间笛卡尔坐标, x_i 、 y_i 、 z_i 为孪生模型中计算位置点的空间笛卡尔坐标。

在笛卡尔空间中各个方向的建模误差定义为 AP_x 、 AP_y 、 AP_z , 即

$$\begin{aligned} AP_x &= x_j - x_i; \\ AP_y &= y_j - y_i; \\ AP_z &= z_j - z_i \end{aligned} \quad (4)$$

单一的测点难以表征整个数字孪生模型的建模精度, 需在物理空间中取 N 个测点, 分别计算出各单一测点的建模误差 AP_N , 并求出 N 个测点的建模误差平均值 \overline{AP} , 即

$$\overline{AP} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N AP_j \quad (5)$$

由于随机性误差符合正态分布规律, 因此在平均值 \overline{AP} 的基础上增加3倍的标准偏差量 S_{AP} , 能得到一个包络所有测点位置的球体直径的最小值, 即数字孪生模型的建模精度 AP_p :

$$AP_p = \overline{AP} + 3S_{AP} \quad (6)$$

此时则标准偏差 S_{AP} 值为

$$S_{AP} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (AP_j - \overline{AP})^2}{N-1}} \quad (7)$$

2 数字孪生实时测量系统

2.1 构建数字孪生测量系统

通常在任何辅助测量设备的

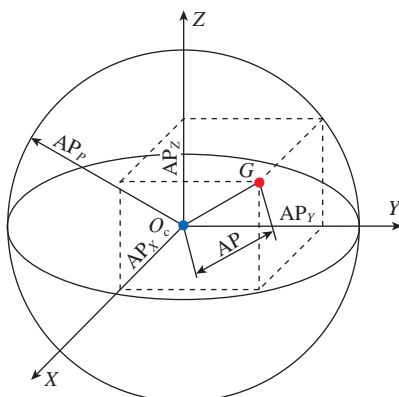


图2 数字孪生位置建模精度定义图
Fig.2 Position of digital twin modelling accuracy definition diagram

情况下, 数字孪生模型可以通过伺服电机自带的编码器进行传动比换算, 间接获得关节的转角值, 从而驱动数字孪生模型运动。但由于伺服电机、减速器内部传动的齿轮存在间隙, 同时机器人各连杆自重、负载和运动过程中自身的惯性力作用会导致关节处产生柔性变形, 使得编码器间接得到的关节转角值与实际关节转角值之间存在角度偏差。因此, 在工业机器人各个关节处安装高精度光栅尺传感器作为数字孪生实时测量反馈系统, 即通过光栅尺直接测量各关节转角, 将获取的光栅数据导入数字孪生模型, 进而获得机器人末端的位置和轨迹信息, 并通过实时映射来驱动机器人数字孪生模型。工业机器人转动关节部位驱动结构图如图3所示。

虽然圆光栅对于测量转角类数据更为合适, 但是安装圆光栅需要拆卸机器人的转动轴, 再次安装时难以保证光栅和转动轴的同轴度, 从而影响传感器的信号采集精度, 并且还会破坏机器人自身的传动精度。因此, 本文采用将直线光栅粘贴到转动轴外环表面, 通过“以直代曲”的方式对机器人关节转角数据进行测量采集, 并根据工业机器人各个关节常用转角范围确定光栅尺长度。工业机器人共有6个旋转关节, 从基座到末

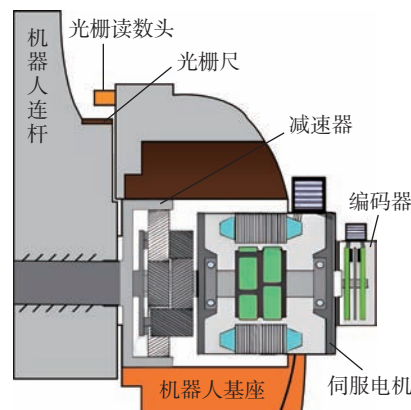


图3 工业机器人转动关节部位驱动结构图
Fig.3 Diagram of drive structure of rotating joint part of an industrial robot

端将各关节定为 A1~A6, 机器人各个关节安装情况如图 4 所示。

2.2 测量系统传感器标定

“以直代曲”的方式需要根据工业机器人各个关节的转角范围将直线位移测量转换成角度测量, 为保证关节角映射的准确性, 要对光栅尺的读数系统进行重新标定。在光栅尺进行标定时, 必须先确定机器人各关节在 Home 位置、负极限位置、正极限位置的光栅读数, 避免在标定过程中出现超限位等安全问题, 并将 Home 位置定为光栅尺新零位。具体的标定过程如下(以 A1 轴光栅尺标定为例)。

(1) 使用示教器控制 A1 轴关节以 3% 的均匀速度分别从不同转角返回 Home 点, 重复 10 次, 并依次记录相应的光栅尺读数, 求出读数的平均值, 定为 A1 轴的光栅尺新零位。

(2) 控制 A1 轴关节从正极限位置向负极限位置方向以 3% 的速度匀速转动, 以每 2° 为一个间隔记录光栅尺的读数。到达负极限位置后, 以同样的速度和间隔向正极限位置匀速转动 A1 轴, 并记录光栅尺读数。同时在 A1 关节处安装靶标, 使用激光跟踪仪测量靶球当前位置。

(3) 通过空间测量分析软件

Spatial analyzer (SA) 对所采集到的靶标点拟合得到圆 A1' 和 A1'', 依次连接各靶标点位与相应 A1'、A1'' 圆心, 可得到相邻靶球位置对应的圆心角, 即为 A1 轴两次转动所对应的实际转角。

(4) 将所得到的实际关节转角增量与光栅尺读数进行拟合, 可得到关节转角与光栅尺读数之间的对应关系。

(5) A2~A6 轴光栅尺标定按步骤(1)~(4) 分别进行, 即可完成机器人各关节轴光栅传感器标定。

3 基于参数辨识的建模方法

3.1 建模误差模型

机器人结构参数误差是导致数字孪生建模过程中物理空间末端实际位姿与孪生模型期望位姿之间误差的来源, 数字孪生建模过程中, 采用机器人理论参数进行建模可以获得孪生模型的末端理论位姿 O_T , 但由于机器人加工装配中各连杆参数存在误差, 使得机器人末端运动过程并未到达理论位置, 而当前到达的实际位姿记为 O_r , 在机器人基座安装等不确定因素影响下, 机器人在物理空间的实际基坐标系 O_B 很难确定, 但可以利用测量设备对机器人基坐

标系进行拟合, 并将测量所得的基坐标系定为 $O_{B'}$, 后续工作将围绕测量坐标系 $O_{B'}$ 来完成机器人结构参数标定。各坐标系构建如图 5 所示。

O_B 相对于 $O_{B'}$ 存在微动误差 ${}^B T_B$, 矩阵 ${}^B T_B$ 表示为

$${}^B T_B = \begin{bmatrix} 1 & -\delta_{z_B} & \delta_{y_B} & d_{x_B} \\ \delta_{z_B} & 1 & -\delta_{x_B} & d_{y_B} \\ -\delta_{y_B} & \delta_{x_B} & 1 & d_{z_B} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, O_B 相对于 $O_{B'}$ 分别在 x 、 y 和 z 轴方向上产生的微小移动量为 d_{x_B} 、 d_{y_B} 和 d_{z_B} ; O_B 相对于 $O_{B'}$ 假设中心点的微小转动量为 δ_{x_B} 、 δ_{y_B} 和 δ_{z_B} 。

O_T 相对 O_B 产生微分运动, 表示为

$${}^B T_T = {}^B T_T + dT \quad (9)$$

式中, ${}^B T_T$ 和 ${}^B T_T$ 分别为 O_T 和 O_T 相对于 O_B 的齐次变换矩阵; dT 为微动齐次变换矩阵。

末端位姿的微小变化是由 O_T 相对于 O_B 产生的微分变换矩阵, 表示为

$$dT = \Delta \cdot {}^B T_T \quad (10)$$

由式(9)和(10)可知, O_T 相对于 $O_{B'}$ 的齐次变换矩阵 ${}^B T_T$ 为

$${}^B T_T = {}^B T_B \cdot {}^B T_T = {}^B T_B \cdot (I_4 + \Delta) \cdot {}^B T_T \quad (11)$$

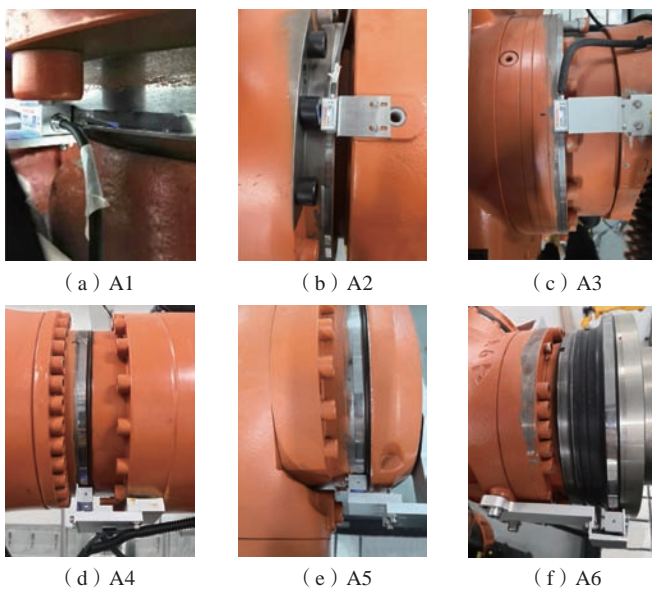


图 4 工业机器人各关节光栅尺安装图

Fig.4 Installation diagram for each joint of an industrial robot

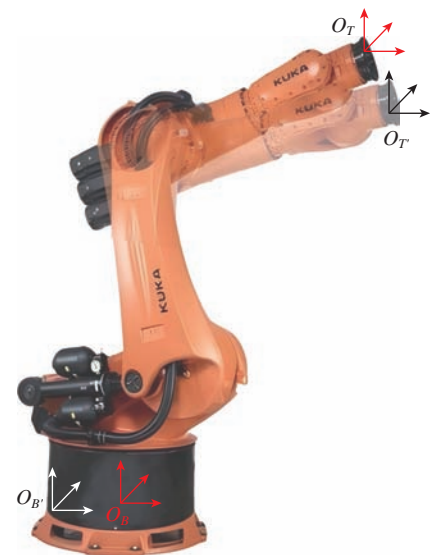


图 5 参数标定坐标系

Fig.5 Parametric calibration of the coordinate system

式中, I_4 为 4×4 的单位矩阵。对式 (11) 进行变换, 并忽略其中高阶微小量, 则

$${}^B T_T ({}^B T_T)^{-1} - I_4 \approx {}^B T_B - I_4 + \Delta \quad (12)$$

式中, ${}^B T_T ({}^B T_T)^{-1} - I_4$ 为系统的线性标定误差矩阵; ${}^B T_B - I_4$ 为 O_B 相对于 $O_{B'}$ 的微分变换。

式 (12) 表示机器人末端的位姿精度, 是由测量基坐标系与实际基坐标系存在的构造误差和机器人运动学参数误差两者引起的。

其中, ${}^B T_B - I_4$ 可简化为矩阵形式, 即

$${}^B T_B - I_4 = \begin{bmatrix} d_B \\ \delta_B \end{bmatrix} = I_6 \cdot [d_{x_B} \ d_{y_B} \ d_{z_B} \ \delta_{x_B} \ \delta_{y_B} \ \delta_{z_B}]^T \quad (13)$$

式中, d_B 和 δ_B 分别为 O_B 相对于 $O_{B'}$ 的微分平移和旋转矢量; I_6 为 6×6 的单位矩阵; $\Delta \delta$ 为 O_B 相对于 $O_{B'}$ 的微小变动量所构成的矩阵。

用两个相邻连杆的 5 个运动学参数误差来表示连杆 i 的微分变换 δ_{A_i} 和位姿误差 d_{A_i} , 多关节机器人的关节数 n 代表着机器人的自由度, 由于机器人运动学具有 5 个关节参数, 故此机器人末端到基坐标系的位姿误差可以用 $5n$ 个运动学参数误差表示。

设机器人相邻两连杆之间的理论齐次变换矩阵为 A_i^N 时, 由于机器人结构几何参数误差 ($\Delta \theta_i$, Δd_i , $\Delta \alpha_i$, $\Delta \alpha_i$ 和 $\Delta \beta_i$) 的存在, 两相邻连杆之间的实际齐次变换矩阵 A_i^R 会与理论齐次变换矩阵 A_i^N 存在一个误差 d_{A_i} 。机器人末端实际位姿 O_T 相对于 O_B 的齐次变换可表示为

$${}^B T_T = {}^B T_T + dT = \prod_{i=1}^n A_i^R = \prod_{i=1}^n (A_i^N + dA_i) \quad (14)$$

将上式展开, 忽略高阶无穷小, dT 可简化为

$$dT = \sum_{i=1}^n {}^B T_{T_{i-1}} \delta A_i ({}^B T_{T_{i-1}})^{-1} {}^B T_{T_i} \quad (15)$$

式中, ${}^B T_{T_{i-1}}$ 和 ${}^B T_{T_i}$ 分别为连杆 $i-1$ 和

n 的理论位姿相对于 O_B 的齐次变换矩阵。

由式 (10) 和 (15) 可知, 机器人末端实际位姿相对于 O_B 的微分变换矩阵 A' 为

$$A' = \sum_{i=1}^n {}^B T_{T_{i-1}} \delta A_i ({}^B T_{T_{i-1}})^{-1} \quad (16)$$

机器人各连杆坐标系相对于上一连杆坐标系的微分变换 A' 可以由微分矢量 d_Δ 和 δ_Δ 表示为

$$\begin{bmatrix} d_\Delta \\ \delta_\Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{d\theta} & J_{dd} & J_{da} & J_{d\alpha} & J_{d\beta} \\ J_{\delta\theta} & 0 & 0 & J_{\delta\alpha} & J_{\delta\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta d \\ \Delta\alpha \\ \Delta\alpha \\ \Delta\beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, $J_{d\theta}$, J_{da} , $J_{d\beta}$, $J_{\delta\theta}$, $J_{\delta\alpha}$ 和 $J_{\delta\beta}$ 均为雅克比矩阵, 是由已知的机器人理论几何参数构建的, 令向量 ΔP 为

$$\Delta P = \begin{bmatrix} d \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_B + d_\Delta \\ \delta_B + \delta_\Delta \end{bmatrix} \quad (18)$$

将式 (10) 代入式 (18) 可以计算出系统线性标定误差向量 ΔP 、线性标定微分平移矢量 d 和旋转误差矢量 δ ; 式 (11) 可以计算出相对于 $O_{B'}$ 的微小平移矢量 d_B 和旋转矢量 δ_B , 令矩阵 J 为

$$J = \begin{bmatrix} J_{d\theta} & J_{dd} & J_{da} & J_{d\alpha} & J_{d\beta} \\ J_{\delta\theta} & 0 & 0 & J_{\delta\alpha} & J_{\delta\beta} \\ I_3 & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, I_3 为 3×3 的单位矩阵。令参数辨识误差向量 $\Delta X'$ 为

$$\Delta X' = [\Delta\theta \ \Delta d \ \Delta\alpha \ \Delta\alpha \ \Delta\beta \ \Delta\delta]^T \quad (20)$$

则由式 (16) 到 (18) 可得

$$\Delta P = J \cdot \Delta X' \quad (21)$$

在机器人参数标定中需要采集大量的点位坐标, 用以提高标定的精度, 假设存在 m 个采样点, 上式可写为

$$\Delta P_m = J_m \cdot \Delta X_m \quad (22)$$

式中, ΔP_m 为采样点的位置误差列向量; J_m 为雅克比矩阵。

3.2 建模误差参数辨识

机器人建模参数误差辨识最优化过程是将非线性模型中高阶微分量忽略以按照线性分析, 参数辨识误差 $\Delta X'$ 越来越小时, 输入到孪生模型中获得的末端位置将越接近机器人实际位置, 在辨识参数时, 将非线性模型线性化的最常用方法是最小二乘法。最小二乘法取近似的中间值会造成计算误差, 收敛过程中会使得目标函数离极小值越来越远, 最后拟合的效果难以接受, 而 L-M 最小二乘法利用阻尼系数 μ 限制迭代运算可以避免出现奇异性, 提高了最小二乘法拟合效果。采用 L-M 最小二乘法的参数辨识基本原理如图 6 所示。

步骤 1: 初始化数字孪生模型, 首次计算建模参数向量 X_k , 并作为机器人理论结构参数;

步骤 2: 将一定数量点位作为参数辨识采样点, 通过激光跟踪仪测量机器人到达采样点的实际位置 P ;

步骤 3: 通过辅助传感器采集该采样点对应的关节转角向量 θ_s ;

步骤 4: 代入建模参数向量 X_k 下数字孪生模型, 计算当前辨识的雅克比矩阵 $J(X_k)$, 获得末端位置 P ;

步骤 5: 求解 P' 与 P 之间存在误差 $\Delta P(X_k)$;

步骤 6: 求解出建模参数误差修正量 ΔX_k , 即

$$\Delta X_k = -[J^T(X_k)J(X_k) + \mu_k I]^{-1} J^T(X_k)\Delta P(X_k) \quad (23)$$

步骤 7: 更新第 $k+1$ 次迭代时的建模参数向量 X_{k+1} 和迭代次数 k 为

$$X_{k+1} = X_k + \Delta X_k \quad k = k + 1 \quad (24)$$

步骤 8: 更新第 $k+1$ 次迭代时的阻尼系数 μ_{k+1} 为

$$\mu_{k+1} = \begin{cases} 0.001\delta & \|\Delta P(X_{k+1})\| \geq \|\Delta P(X_k)\| \\ 0.001/\delta & \|\Delta P(X_{k+1})\| < \|\Delta P(X_k)\| \\ 2.5 < \delta < 10 \end{cases} \quad (25)$$

式中, $\|\Delta P(X_{k+1})\|$ 和 $\|\Delta P(X_k)\|$ 分

别为第 $k+1$ 和 k 次迭代的位置误差的二范数; δ 为迭代参数。

步骤 9: 当 $\|\Delta P(X_{k+1})\| - \|\Delta P(X_k)\| > \varepsilon$ 时,更新第 $k+1$ 次建模参数向量;

步骤 10: 迭代运行步骤 4 到步骤 9 直至 $\|\Delta P(X_{k+1})\| - \|\Delta P(X_k)\| \leq \varepsilon$ 时,两次迭代的位置误差范数之差趋近于 $\varepsilon=0.0001$,证明已经收敛,即得出最优参数误差。

此时,用 L-M 算法辨识出的机器人结构参数误差 ΔX 修正机器人结构参数,并代入数字孪生驱动模型中,从而提高数字孪生建模精度。

4 试验验证

4.1 试验平台

为了验证本文提出的数字孪生建模方法的有效性,以及建模参数辨识对建模精度补偿的可行性,本文以工业机器人铣削系统作为试验对象,该系统为搭载铣削末端的 KR500 M2830MT 型工业机器人,利用 FARO vantage E 型激光跟踪仪作为机器人末端位姿测量设备,搭建试验平台如图 7 所示。在末端 TCP 测量过程中,将安装有激光跟踪仪靶球的特制刀柄固联在机器人末端铣削主轴上,并将靶球测量位置看作机器人末端 TCP 的位置,对比激光跟踪仪测量数据与数字孪生模型计算数据,完成建模精度试验验证。

4.2 数字孪生交互平台

数字孪生模型并不能独立存在,计算机软件为数字孪生模型的可视化表征提供了载体。综合数字孪生平台的通用性考虑,本文采用 Qt 编程软件进行数字孪生系统交互平台 GUI 开发,能够准确地描述工业机器人铣削系统中组件间的复杂相互作用,也可以连接控制器与物理空间建立永久、实时的交互模式。其主要界面如图 8 所示,包含末端位姿显示区、系统功能区、加工控制区、NC 程序操作区。

(1) 末端位姿显示区。该区域显

示由数字孪生模型计算得出的机器人铣削系统末端 TCP 的位姿,以及执行任务中所要到达的目标点位信息。

(2) 系统功能区。该区域主要承担整体系统的初始化、项目工程的管理、加工任务执行进程的应急处置等功能。

(3) 加工控制区。该区域是整个交互平台的核心区域,包含了铣削、主轴、电机、基准、法向、加工辅助、刀库、工艺、坐标系、孪生虚拟模型显现

窗口等模块,在孪生模块子窗口内,用户可以实时观察到孪生模型对机器人铣削装备任务执行过程的实时映射,而且可以通过平移、旋转、缩放等操作切换不同的视角和细节,能够全面观察机器人的加工运行状态。

(4) NC 程序操作区。该区域主要负责 NC 加工程序的编辑和运行。在加工过程中,查阅编辑框可跟随加工进程自动定位到正在执行的程序,方便用户掌握加工的进度。

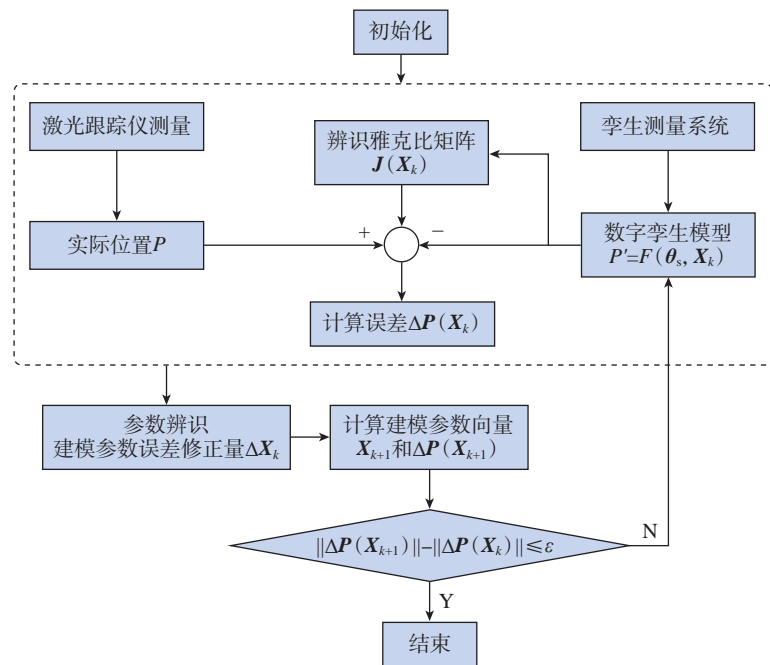


图 6 参数辨识基本原理

Fig.6 Basic principles of parameter identification

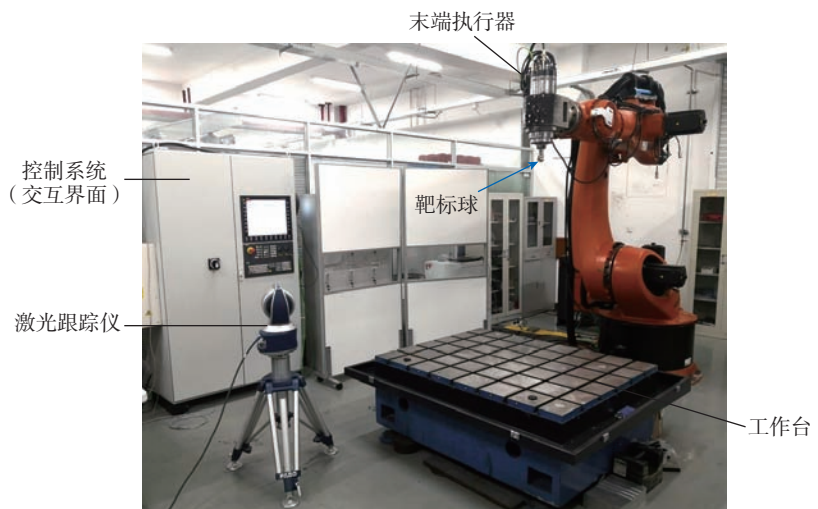


图 7 试验平台

Fig.7 Test platform



图8 数字孪生系统交互平台界面
Fig.8 Digital twins interactive platform interface

4.3 试验验证

为了验证本文提出的数字孪生模型参数修正方法的有效性、正确性,对试验平台 KR500 机器人的 A1~A6 轴增加光栅尺,根据上文提到的标定方法对各个关节进行标定,确定光栅尺零点,标定结果如表 1 所示,后续将测量数据用来驱动数字孪生可视化模型运动。

在 KR500 工业机器人的运动可达范围内随机生成 100 个采样点和 150 个目标点的位置坐标,将 100 个采样点使用 L-M 算法进行参数辨识,另外用 150 个目标点进行建模误差和建模精度的试验验证。试验过程可分为以下 6 步。

(1)利用激光跟踪仪建立 World 坐标系、Base 坐标系和末端 TCP 坐标系,然后在 SA 软件中建立 Base 坐标系作为测量基准。

(2)将 100 个采样点写入 NC 程序控制机器人运动,使用激光跟踪仪完成建模参数辨识前采样点位置采集,并将各光栅尺读数代入理论建模参数构建的数字孪生模型中以计算末端位置。

(3)将激光跟踪仪测量值与理论参数构建的数字孪生模型计算值对

表 1 光栅尺标定结果

Table 1 Calibration results for optical scale

关节轴	光栅尺有效量程/(°)	关节转角范围/(°)	零位读数
A1	-90~+90	-85~+85	126547
A2	-100~+20	-95~+15	70234
A3	+20~+145	+15~+140	35462
A4	-170~+170	-165~+165	108154
A5	-110~+110	-105~+105	75413
A6	-170~+180	-165~+175	57461

比,计算理论参数建模精度。并利用 L-M 算法对采样点进行参数辨识,机器人建模参数修正结果如表 2 所示。

(4)将辨识后的参数输入数字孪生交互平台,以修正数字孪生模型建模参数。

(5)将 150 个目标点写入 NC 程序控制机器人运动,使用激光跟踪仪测量实际到达位置,以及将各光栅尺读数代入修正的数字孪生模型中计算末端位置。

(6)将激光跟踪仪测量值与修正参数构建的数字孪生模型计算值对比,计算修正参数建模精度。

4.4 试验结果

将激光跟踪仪采集到的点位坐标数据分别与数字孪生模型中理论

建模参数和修正建模参数所计算的点位坐标进行对比分析,根据式(3)、(4)和(7)计算综合建模误差、各方向建模误差和建模精度,如表 3 所示。

图 9~12 分别为根据理论建模参数、修正建模参数建立的数字孪生模型反映的点位信息和激光跟踪仪采集到的点位信息的差值。对比发现,采用机器人理论建模参数构建的数字孪生模型与修正建模参数构建的数字孪生模型的差别较大,两者差值最大可达到 1.49 mm;最大综合建模误差从修正前的 1.4920 mm 减少到了 0.2962 mm;最小建模误差从 0.2590 mm 减少到了 0.0078 mm;平均建模误差从 0.8672 mm 减少到了 0.1452 mm,映射精度提高了 4.97

表 2 机器人建模参数修正结果

Table 2 Robot modelling parameter correction results

连杆臂序号	$\Delta a/\text{mm}$	$\Delta \alpha/(\text{°})$	$\Delta d/\text{mm}$	$\Delta \theta/(\text{°})$	$\Delta \beta/(\text{°})$
1	-0.9	+0.0001	-1.02	-0.02	0
2	+0.233	+0.03	+0.135	-0.000293	-2.6×10^{-5}
3	+0.503	-0.002	-0.0057	0.000337	0
4	+0.8	-0.0021	+0.1002	+0.28	0
5	+0.2	+0.05	+0.0003	+0.0202	0
6	-0.105	+0.01	+0.05	-0.601	0

表 3 修正前后的建模精度

Table 3 Modelling accuracy before and after calibration

建模评价指标	X 向建模误差/mm		Y 向建模误差/mm		Z 向建模误差/mm		建模精度/mm
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	
理论参数建模	0.3765	0.1272	0.1440	0.1479	-0.7297	0.3078	± 1.6905
修正参数建模	0.0743	0.0766	-0.0482	0.0853	0.0279	0.0566	± 0.3304

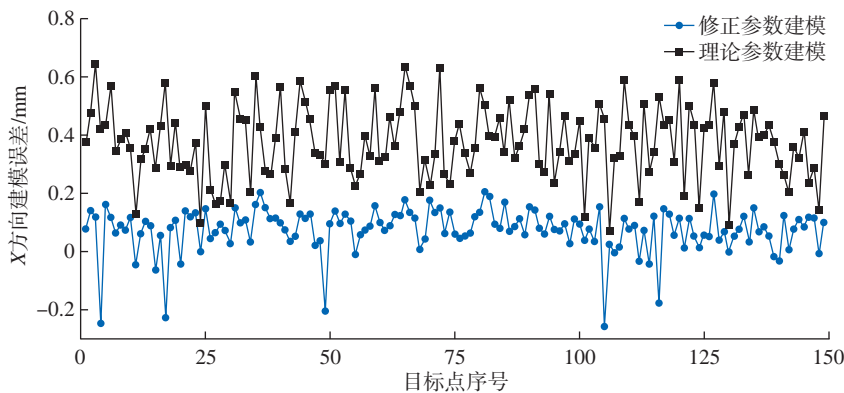


图 9 X 方向上建模误差对比

Fig.9 Comparison of coordinate deviations in X-direction

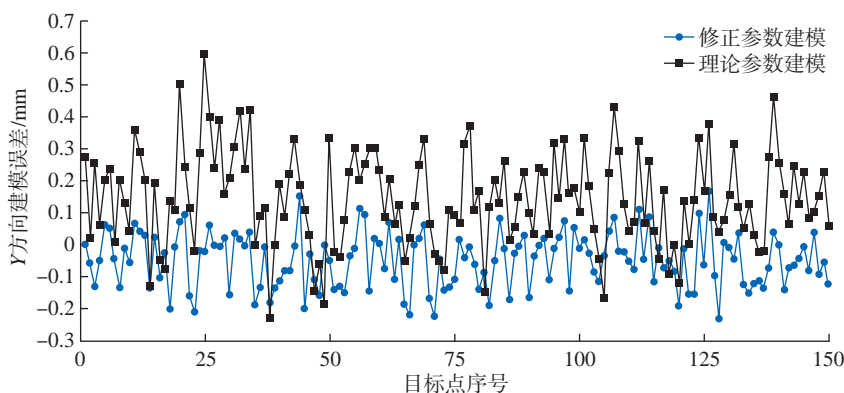


图 10 Y 方向上建模误差对比

Fig.10 Comparison of coordinate deviations in Y-direction

倍;建模精度从 $\pm 1.6905 \text{ mm}$ 提高到 $\pm 0.3304 \text{ mm}$,提高了 4.12 倍,从而更能够准确映射出机器人运动过程中的状态。虽然建立的数字孪生模型与物理模型依旧存在建模误差,但已经在数字孪生模型要求范围内。

5 结论

(1) 实现了数字孪生测量系统构建。搭建高精度光栅尺测量系统实时采集铣削机器人在铣削加工时机器人各关节的转角,避免了齿轮间隙、编码器丢码等因素造成的所获关节转角数据不准确的问题,从而提高了数字孪生的建模精度。

(2) 提出了数字孪生建模参数辨识方法。本文采用 MD-H 模型建立连杆坐标系,确定工业机器人铣削系统各连杆之间相互运动关系,基于 L-M 算法实现多源误差影响下的数字孪生建模参数修正,减小了数字孪生模型与物理空间实体之间差距,提高了数字孪生模型对装备映射的准确性。

(3) 开发了数字孪生交互系统平台。基于 Qt 编程软件开发了与工业机器人铣削系统相匹配的数字孪生人机交互平台,包含了控制、数据采集、可视化等多个模块。

通过激光跟踪仪进行数字孪生建模试验验证,试验结果表明,数字孪生模型建模参数修正后较修正前对工业机器人末端点位的建模精度从 $\pm 1.6905 \text{ mm}$ 提高到 $\pm 0.3304 \text{ mm}$,提高了 4.12 倍,验证了数字孪生模型建立的正确性和建模参数修正的必要性。

参考文献

- [1] 田威,焦嘉琛,李波,等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述 [J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 341-352.
TIAN Wei, JIAO Jiachen, LI Bo, et al. High precision robot operation equipment and technology in aerospace manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 341-352.

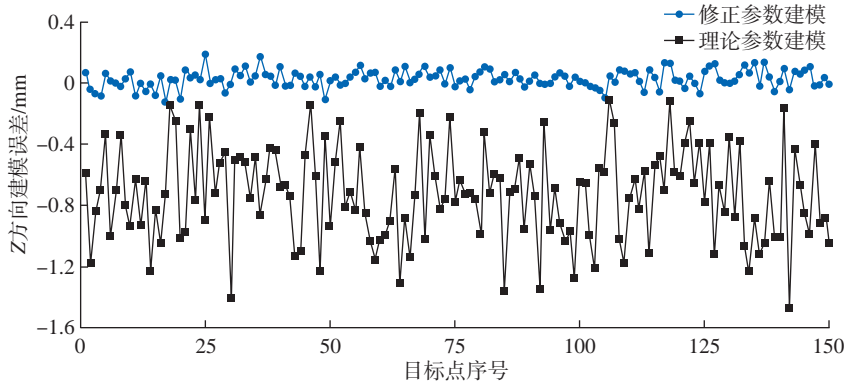


图 11 Z 方向上建模误差对比

Fig.11 Comparison of coordinate deviations in Z-direction

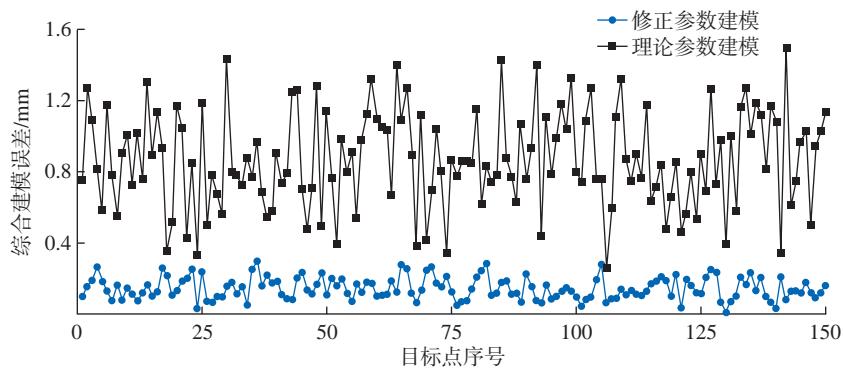


图 12 综合建模误差对比

Fig.12 Comparison of combined coordinate deviations

[2] GRIEVES M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. (2021-11-12) [2022-03-10]. <http://www.researchgate.net/publication/275211047>.

[3] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2405-2418.

TAO Fei, MA Xin, HU Tianliang, et al. Research on digital twin standard system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(10): 2405-2418.

[4] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.

TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.

[5] 张辰源, 陶飞. 数字孪生模型评价指标体系[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(8): 2171-2186.

ZHANG Chenyuan, TAO Fei. Evaluation index system for digital twin model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(8): 2171-2186.

[6] 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.

[7] HE B, BAI K J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: A review[J]. Advances in Manufacturing, 2021, 9(1): 1-21.

[8] LIU M N. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 346-361.

[9] LI L H, QU T, LIU Y, et al. Sustainability assessment of intelligent manufacturing supported by digital twin[J]. IEEE Access, 2020, 8: 174988-175008.

[10] XIA L Y, LU J F, ZHANG H, et al. A DTMEs-based digital twin system construction method for smart factory[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 119(5/6): 4159-4178.

[11] TONG X, LIU Q, PI S W, et al. Real-time machining data application and service based on IMT digital twin[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, 31(5): 1113-1132.

[12] LUO W C. A hybrid predictive

maintenance approach for CNC machine tool driven by digital twin[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 65: 101974.

[13] ZHU Z X. Digital twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 59: 453-466.

[14] BALDERAS D, ORTIZ A, MÉNDEZ E, et al. Empowering digital twin for industry 4.0 using metaheuristic optimization algorithms: Case study PCB drilling optimization[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(5-6): 1295-1306.

[15] KUTS V, OTTO T, TÄHEMÄÄ T, et al. Digital twin based synchronised control and simulation of the industrial robotic cell using virtual reality[J]. Journal of Machine Engineering, 2019, 19(1): 128-144.

[16] 王春晓, 骆伟超, 刘日良, 等. 基于 Modelica 的数控机床多领域建模与虚拟调试[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(10): 102-105, 110.

WANG Chunxiao, LUO Weichao, LIU Riliang, et al. Multi-domain modeling and virtual debugging of CNC machine tool based on modelica[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(10): 102-105, 110.

[17] GUO Y, SUN Y, WU K. Research and development of monitoring system and data acquisition of CNC machine tool in intelligent manufacturing[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(2): 172988.

[18] ROTH Z, MOORING B, RAVANI B. An overview of robot calibration[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(5): 377-385.

[19] LIM H K, KIM D H, KIM S R, et al. A practical approach to enhance positioning accuracy for industrial robots[C]//2009 ICCAS-SICE. Fukuoka, Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 2268-2273.

[20] VEITSCHEGGER W K, WU C H. Robot calibration and compensation[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1988, 4(6): 643-656.

[21] ZAK G, BENHABIB B, FENTON R G, et al. Application of the weighted least squares parameter estimation method to the robot calibration[J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(3): 890-893.

[22] PARK I W, LEE B J, CHO S H, et al. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(6):

1059–1067.

[23] DENNIS J E Jr, SCHNABEL R B. Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations[M]. Prentice-Hall: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1996.

[24] JUDD R P, KNASINSKI A B. A technique to calibrate industrial robots with experimental verification[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(1): 20–30.

[25] RENDERS J M, ROSSIGNOL E, BECQUET M, et al. Kinematic calibration and geometrical parameter identification for robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(6): 721–732.

[26] ZHONG X L. Inverse robot calibration using artificial neural networks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1996, 9(1): 83–93.

[27] ZENG Y F, TIAN W, LI D W, et al. An error-similarity-based robot positional accuracy improvement method for a robotic drilling and riveting system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9–12): 2745–2755.

[28] ZENG Y F. Positional error similarity analysis for error compensation of industrial robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 42: 113–120.

[29] 王东署, 付志强. 机器人逆标定方法研究[J]. 计算机应用, 2007, 27(1): 71–73, 76.

WANG Dongshu, FU Zhiqiang. Study on robot inverse calibration[J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(1): 71–73, 76.

[30] 任永杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 195–200.

REN Yongjie, ZHU Jigui, YANG Xueyou, et al. Method of robot calibration based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 195–200.

[31] MOELLER C, SCHMIDT H C, KOCH P, et al. Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2017, 10(2): 100–108.

[32] SAUND B, DEVLIEG R. High accuracy articulated robots with CNC control systems[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2013, 6(2): 780–784.

[33] DEVLIEG R, SZALLAY T. Applied accurate robotic drilling for aircraft fuselage[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2010, 3(1): 180–186.

[34] DEVLIEG R. High-accuracy robotic drilling/milling of 737 inboard flaps[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2): 1373–1379.

[35] MEHLENHOFF T, BLOEDORN C. Solution for automated drilling in composite

structures with a standard articulating robot system[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2010.

[36] RATHJEN S, RICHARDSON C. High path accuracy, high process force articulated robot[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2013.

[37] 何晓煦. 基于空间相关性的工业机器人运动学标定[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

HE Xiaoxu. Industrial robot kinematic calibration based on spatial correlation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[38] VEITSCHEGGER W, WU C H. Robot accuracy analysis based on kinematics[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1986, 2(3): 171–179.

[39] 何晓煦, 田威, 曾远帆, 等. 面向飞机装配的机器人定位误差和残差补偿[J]. 航空学报, 2017, 38(4): 420538.

HE Xiaoxu, TIAN Wei, ZENG Yuanfan, et al. Robot positioning error and residual error compensation for aircraft assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(4): 420538.

通讯作者: 胡俊山, 副教授, 博士, 研究领域为飞行器先进装备与连接技术, 复合材料结构修复工艺与服役性能评估, 智能装配工艺与装备。

A Digital Twin Modelling Accuracy Compensation Method for Industrial Robots

KANG Ruihao¹, HU Junshan¹, TIAN Wei¹, ZHANG Jiawei¹, MA Chuangye²

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

2. AVIC China Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, China)

[ABSTRACT] Aiming at the problems of the lack of perceptual monitoring accuracy of the existing industrial robot intelligent equipment modeling and the low accuracy of modelling based on theoretical parameters, this paper takes the industrial robot milling system as the research object and constructs a digital twin measurement system that measures the robot joint turning angle data in real time with a high-precision scale to avoid the influence of joint turning angle errors such as gear gap and encoder code loss on the accuracy of digital twin modelling. The digital twin drive model was developed based on the MD–H kinematic modelling method, and the L–M algorithm was used to identify and correct the industrial robot modelling parameters to reduce the influence of geometric errors in the digital twin modelling of the robot. The use of the identified robot joint parameters for modelling has improved the accuracy of the twin model for modelling the motion points of the industrial robot from ± 1.6905 mm to ± 0.3304 mm, increased by 4.12 times, which demonstrates the correctness of the digital twin modelling method and the feasibility of the identification of the modelling parameters.

Keywords: Parameter recognition; Auxiliary sensors; Digital twins; Industrial robots; Modelling accuracy

(责编 七七)

引文格式: 姬学庄, 高剑, 孙晗. 涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 60-65.

Ji Xue Zhuang, GAO Jian, SUN Han. Digital production line of turbine blade air film hole electric discharge machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 60-65.

涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线

姬学庄¹, 高剑², 孙晗²

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 北京汉飞航空科技有限公司, 北京 101307)

[摘要] 针对航空发动机涡轮叶片气膜孔加工的合格率低, 难以大批量生产等难题, 突破自适应加工系统、智能化网络控制系统、设备网络数据接口、快速换型工装等技术, 基于精益“U型”布局, 建成用于涡轮叶片气膜孔加工的具有自动化、数字化、集成化、智能化等特征的电加工数字化生产线, 实现“24 h 无人化生产”和多型号共线批量生产。经过两年的运行, 一次交检合格率和设备综合效率等各项经济指标均达到设计目标, 显著提高了生产效率和合格率, 降低了叶片加工成本, 解决了航空发动机涡轮叶片大批量生产的瓶颈。总结出电加工数字化生产线组成及架构、关键技术和建设步骤, 对航空发动机制造业数字化生产线建设具有重要借鉴价值。

关键词: 航空发动机; 涡轮叶片气膜孔; 电加工数字化生产线; 自适应加工系统; 智能化网络控制系统

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.060



姬学庄

高级工程师, 硕士, 研究方向为智能生产线建设、数字化车间规划。

新一代信息技术正加速与制造业深度融合, 以信息化和数字化方式驱动制造业产品、装备、工艺、管理、服务的智能制造已经成为现代制造业的重要发展方向^[1]。当前, 我国航空发动

机的智能制造推进尚处于试点示范阶段, 亟须全面推进数字化车间/生产线建设来大幅提升生产效率、缩短生产周期、降低成本, 以满足航空发动机快速研发和高效低成本制造的要求。在此背景下, 开展涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线的探索研究与建设, 解决涡轮叶片气膜孔批量加工的“卡脖子”难题, 实现涡轮叶片高效低成本制造, 对于稳步推进航空发动机制造数字化转型, 加速工业制造能力提升具有重要发展意义。

1 建设必要性分析

全球航空发动机产业链面临深度调整, 未来新型航空发动机产品的高技术、复杂化对传统制造模式提出了新挑战, 同时, 高效低成本制造已成为未来航空发动机产品制造的发展趋势。具有复杂型腔结构的涡轮叶片是新型航空发动机的核心部件

之一, 涡轮叶片拥有数量多、孔径小、轴线方向不同的异形气膜孔(图1), 气膜孔加工质量直接影响叶片的合格率、冷却效率和工作寿命, 加工难度极高、合格率低、难以批量制造是制约航空发动机批量生产的瓶颈^[2-5]。传统的涡轮叶片气膜孔加工模式仍是以集群式布局为主体的粗放式制造模式, 自动化程度低导致生产效率和产品质量低下, 信息化程度低导致协调时间长、生产资源难以优化配置, 严重制约了涡轮叶片的批量化生产能力, 亟须通过电加工数字化生产线建设提升涡轮叶片的批量生产能力, 解决制约航空发动机领域多年来的“卡脖子”难题。

涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线建设既需要突破气膜孔加工的关键工艺技术, 又需要突破数字化生产线建设涉及的设备网络数据接口改造、快速换型、生产线集成控制

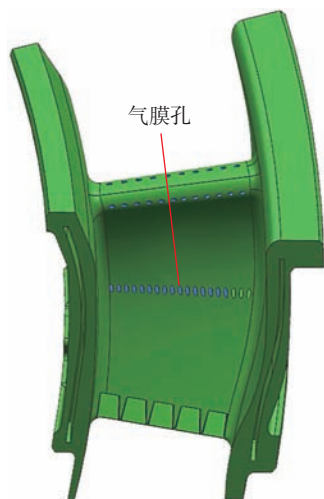


图1 航空发动机涡轮叶片气膜孔示意图
Fig.1 Schematic diagram of air film holes in aero-engine turbine blades

系统等关键技术。通过研究近年来国内外文献,电火花打孔是目前国内外广泛应用的工艺成熟度高、低成本高效率的气膜孔加工工艺方法,但电火花加工气膜孔容易出现重熔层厚度超标、微裂纹以及背壁损伤等问题,这些缺陷严重影响叶片的疲劳寿命^[6-8]。同时,关于涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线建设方面的文献较少,但陈贵林等^[9]提出了叶片数字化生产线“集成化、数字化、自动化、智能化”的“四化”建线原则。张森棠等^[10]提出了数字化生产线建设的两条主线,一是以工艺为主线的工艺技术链,二是以运行为主线的加工技术链。张明德等^[11]提出了数字化生产线实现的设备信息采集与监控、数据建模以及智能调度算法等关键技术,为涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线建设提供借鉴。

综上所述,涡轮叶片气膜孔加工的批量生产难题已成为制约航空发动机产业发展的瓶颈之一,迫切需要开展涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线的技术与建设,实现多型号涡轮叶片共线批量生产,大幅提升涡轮叶片气膜孔的加工效率和合格率,满足航空发动机涡轮叶片高质量、低成本的制造要求。

2 建设思路

2.1 建设目标

数字化生产线主要是解决制造数据的精确表达和数字量传递,实现加工模型的数字化、生产信息集成化、生产过程自动化及智能化等,使得生产过程呈现出“动态感知、实时分析、自主决策、精准执行”的智能化特征^[12],本文研究的数字化生产线建设目标是遵循自动化、数字化、集成化、智能化等特征,建设具备“24 h 无人化生产”能力的气膜孔电加工数字化生产线,实现航空发动机涡轮叶片气膜孔加工的多型号共线批量生产以及高效低成本制造。

2.2 生产线特征及解决方案

(1)生产过程自动化。指在生产线自动化物料转运、加工以及自动化控制,主要包括零件型号自动识别、设备自动加工、自动物料转运以及数据的自动采集与传输。生产线采用 RFID 芯片自动识别技术自动识别零件型号,并自动调用指令和数控程序;设备具备自动找正、加工、检测及快速换型工装,实现无人参与的自动物料转运,并应用智能化网络控制系统自动实现各环节物流信息、制造数据、质量数据信息传递和交换。

(2)加工模型数字化。指将以数字化产品的三维模型作为单一数据源,进行气膜孔电加工的工艺设计、加工、检测工装设计制造。生产线采用三维数字化在线检测技术,构建基于实测数据的涡轮叶片三维数字孪生模型,实现加工全过程的数字模型信息传递。

(3)生产信息集成化。指生产线的信息物理系统集成及信息系统间的集成,生产线采用 RFID 芯片及 PLC 集成技术实现智能化网络控制系统与零件、设备的信息物理系统集成,采用统一网络接口实现智能化网络控制系统与工艺 CAPP 系统的集成,从而实

现毛坯测量、生产加工、检测、工装、物料等生产信息的集成化管理。

(4)生产过程智能化。指运用先进传感器和装置,实现“动态感知、实时分析、自主决策、精准执行”的智能化特征,生产线采用基于数字孪生技术的气膜孔自适应加工系统实现加工过程的智能化及差错预防,提升涡轮叶片气膜孔电加工的合格率。

2.3 组成及架构

与传统生产线相比,数字化生产线主要体现制造数据的自动采集、加工模型信息以及集成化管理,气膜孔电加工数字化生产线组成及架构如图2所示,由资源层、控制层及用户层3部分组成,资源层主要包括设备、工装、机器人等生产线硬件以及数据采集装置,硬件应该开放数据接口并具有统一网络通信协议,支持异构设备数据采集与控制;控制层是生产线的中央控制单元,由交互系统、工艺参数库、统一调度系统、数据分析系统等共同形成智能网络控制系统,完成生产线加工任务分配、运行控制、设备状态监控、零件状态监控等功能,统筹生产线无人化运行管控;用户层是与 ERP 集成并通过人机交互界面导入生产线加工订单及排产计划,并实现设备状态及生产状态的查询,支持管理层的决策。

3 关键技术难点及解决方案

实施智能生产线需要解决生产线规划、工艺优化、生产线智能管控、装备智能化和生产线的智能维护保障等关键技术^[13]。本文研究的涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线重点需要解决自适应加工系统、异构设备数据采集与控制、智能化网络控制系统以及“24 h 无人化生产”等关键技术难点。

3.1 自适应加工系统

数字化生产线采用工艺成熟度较高的电火花打孔工艺方案,但需要对电火花打孔工艺易出现的重熔

层厚、微裂纹、灼伤零件后壁等问题开展工艺攻关。针对重熔层厚、微裂纹问题,研发具有自适应算法的自适应加工系统,该系统在每件涡轮叶片气膜孔加工前,对每个涡轮叶片的零件形面进行特征探测,建立基于零件实测数据的数字孪生模型,与自适应加工系统中的理论数学3D模型进行多次拟合迭代计算,以达到最小拟合形面误差并生成新的加工程序,对涡轮叶片的每个孔位独立进行五坐标位置补偿,确保即使每个零件存在形面误差,打孔位置与型面的相对尺寸仍然正确,该自适应系统有效解决了气膜孔加工的重熔层厚、微裂纹等问题;针对零件后壁灼伤问题,在设备上开发穿透智能化检测功能,在气膜孔加工过程中对电流、电压、水压、进给速率、深度位置5项参数进行实时检测,再通过工业软件对采集数据进行处理、判断和预警,以保证在 $\leq 0.5\text{ mm}$ 的型腔内不灼伤零件后壁,并保证气膜孔的出口孔径符合技术要求,通过以上攻关,使气膜孔加工合格率达到95%以上,显著节约了成本。

3.2 异构设备数据采集与控制

异构设备的数据采集与控制是生产线建设的难题之一,由于设备数控系统的厂家不同,会造成系统集成困难、数据传输壁垒以及接口开放不统一的问题。因此,本方案采购的设备、物料传输机器人及物料库等均为同一厂家,避免了异构设备集成的难题。

3.3 智能化网络控制系统

数字化生产线的平稳运行需要统一的智能化网络控制系统,简称中央控制单元。本方案通过定制化开发智能化网络控制系统,并配合数控设备及各类传感器、数据采集装置来完成生产线运行控制、节拍控制、订单输入、设备状态监控、零件状态监控等功能。

3.4 “24 h 无人化生产”能力

数字化生产线的“24 h 无人化生产”需要解决多型号零件共线的快速换型、设备自动更换电极、物料库存以及生产线无人干涉运行等问题。针对快速换型问题,采用带有RFID芯片及重复定位精度达到 $0.005\sim 0.008\text{ mm}$ 的零点定位工装(图

3)进行多型号零件快速换型及零件识别,实现多型号共线生产;针对自动更换电极问题,在设备上设计自动更换装置实现自动更换电极丝,不仅降低了人力的消耗,而且提高了加工效率;采用两个能够存放24 h生产物料的上、下料库解决物料库存问题;针对生产线无人干涉运行问题,综合集成应用RFID芯片、零点定位工装、物料库、机器人自动转运、智能化网络控制系统等装置和信息化系统,使数字化生产线具备多型号共线的“24 h 无人化生产”能力。

4 生产线建设步骤

生产线设计步骤一般包括确定产品对象及目标、工艺方案及设备选型、设备数量计算、物料运输系统设计、生产线布局设计与仿真、生产线控制系统设计及生产线集成运行7个步骤。

(1) 确定产品对象及目标。

数字化生产线设计目标至少应包括产能、综合效率、合格率等指标,依据涡轮叶片气膜孔电加工的生产特点以及型号加工需求,确定涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线的设计目标:生产能力为2000件/年,生产线综合效率(OEE) $\geq 85\%$,一次交检合格率 $\geq 95\%$,并具备10种型号产品共线的“24 h 无人化生产”能力。

(2) 工艺方案及设备选型。

依据数字化生产线的智能化特征要求,生产线采用以自动化、数字

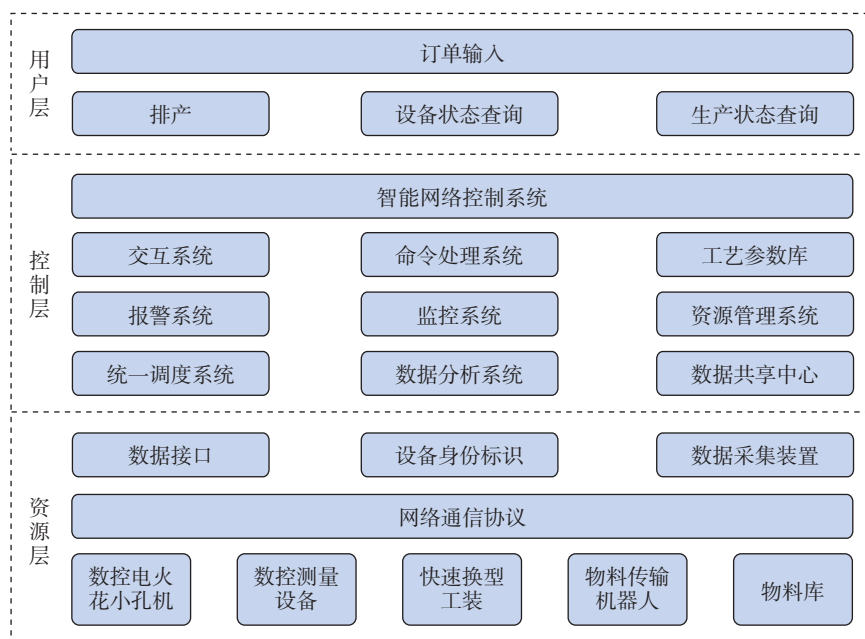


图2 数字化生产线组成及架构

Fig.2 Digital production line composition and structure

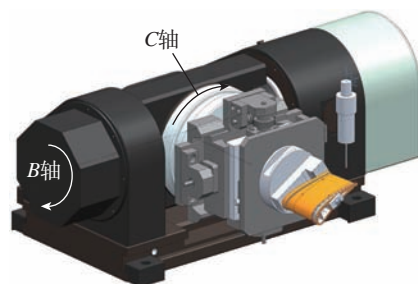


图3 零点定位工装应用示意图

Fig.3 Application diagram of zero positioning tooling

化装备为支撑的工艺方案,通过工艺攻关解决了电火花打孔工艺引起的重熔层厚、微裂纹、零件后壁灼伤等问题,使一次交检合格率 $\geq 95\%$,并选择产量大、包含所有型号工艺特征的典型产品进行工艺方案设计、工序时间测算及设备选型(表1),数字化生产线加工的工序内容为5~25工序,设备为多维数控测量设备和多轴数控电火花小孔机两类设备。

(3) 设备数量计算。

在生产线设计中,一般全年有效工作时间250天,每天双班有效工作时间按14h计算设备数量,以保证生产线综合效率(OEE) $\geq 85\%$ 。依据表1来计算生产线所需的设备数量,计算公式如下。

多维数控测量机所需台数:(年产能 \times 工序时间)/单台设备的年有效工作时间,即 $(2000 \times 3.3\text{h}) / (250 \times 14\text{h}) = 1.9$ 台,因此生产线选用两台多维数控测量设备。

多轴数控电火花小孔机所需台数:(年产能 \times 工序时间)/单台设备的年有效工作时,即 $(2000 \times 7.4\text{h}) / (250 \times 14\text{h}) = 4.2$ 台,为保证生产线综合效率,生产线选用4台多轴数控电火花小孔机,产能略微不足可以通过加班弥补。

(4) 物料运输系统设计。

生产线物料运输系统由上下料机器人和加工零件库组成。生产线总长度约8m,上下料机器人选用便于长距离移动的桁架机器人(图4),机械部分包括桁架地轨、旋转轴基座

单元、直线轴线臂、机械夹具及无触点检测模块等,控制部分包括下位控制机单元及上位显示控制机单元。加工零件库分为零件毛坯库和零件成品库,由多组库架单元、运动旋转轴单元及无触点检测模块等组成,为满足“24h无人化生产”能力,每个零件库设计存放10个零件。

(5) 生产线布局设计与仿真。

数字化生产线设备包括多维数控测量设备两台、多轴数控电火花小孔机4台、物料运输系统一套、线边零件库两套以及一套安全护栏。按照物流距离最短、占地面积最小的精益原则,生产线采用精益“U型”布局,并运用设备及装置三维模型进行了运行过程干涉仿真以及多型号产品的节拍仿真,最终确定数字化生产线布局图,如图5所示。

(6) 生产线控制系统设计。

生产线控制系统是由一套生产线控制系统软件和一台中央数据处理服务器组成的智能化网络控制系统,具有多设备互联互通、数据流转、加工自动完成、工序自动流转、工序节拍控制、自动物料传递等功能,实现设备与设备、设备与控制系统、物料与设备及控制系统等系统间的集成与信息交互,由智能化网络控制系统统一管理分发作业指令,并对各设备执行状态、执行结果的数据进行收集,将必要数据传递至下一道工序,完成生产线的数流流转以及节拍控制。

(7) 生产线集成运行。

数字化生产线建设周期为10个月,设备采购到厂后,按照仿真过的生产线布局进行设备调整,并开展设备与设备集成、设备与信息系统集成以及生产线试运行与验收。生产线已经过两年的批产运行,完全满足生产线规划的设计目标。

5 结论与展望

涡轮叶片气膜孔电加工数字化生产线经过两年的运行和优化,经过5000余件零件的生产验证,已实现10种以上型号产品共线的“24h无人化生产”,各项技术指标显著提升。

(1) 生产线已实现10种以上型号共线生产,年产量达到2000件以上,一次交检合格率达到99%,生产线综合效率(OEE)达到88%,各项指标达到数字化生产线的设计目标。

(2) 生产线实现“24h无人化生产”能力。通过智能化网络控制系统管理整个生产线,自动完成生产派工、加工节拍分配,自动调用夹具、刀具、程序,自动开展测量、自适应加工和异常报警、SPC分析监控、检测报告等功能。

(3) 基于自主知识产权的航空



图4 上下料机器人示意图

Fig.4 Diagram of loading and unloading robot

表1 典型工艺方案及工序时间
Table 1 Typical process plan and process time

设备名称	工序方案	工序时间
多维数控测量设备	5 工序: 测量调整	3.3 h/件
多轴数控电火花小孔机	10 工序: 制孔, 0.55 mm 通孔	2 h/71 孔
多轴数控电火花小孔机	15 工序: 制孔, 0.6 mm 通孔	1.5 h/22 孔
多轴数控电火花小孔机	20 工序: 制孔, 0.6 mm 干涉孔	0.4 h/4 孔
多轴数控电火花小孔机	25 工序: 制孔, 0.3 mm 通孔	3.5 h/120 孔

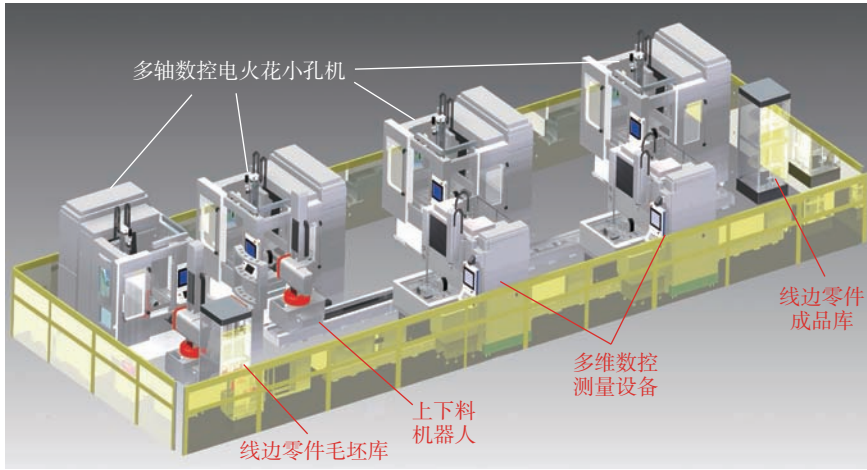


图5 数字化生产线布局图
Fig.5 Digital production line layout diagram

发动机涡轮叶片电加工数字化生产线建设打破了发达国家对航空发动机涡轮叶片加工技术和先进装备的垄断地位,解决了发动机涡轮叶片加工领域多年来的“卡脖子”难题,积累了专业化的建线经验,为电加工数字化生产线在航空领域的推广应用奠定了基础。

数字化转型是企业高质量发展的必选题,数字化、智能化技术的应用必将催生制造业生产组织模式和商业模式变革。未来,将规划和建设涡轮叶片数字化车间,应用数字孪生技术实现虚拟车间的资源数字孪生模型与物理实体车间的产品和生产设备集成,打通虚拟车间与物理实体车间的数据传递渠道,实现制造过程中 ERP、MES 等信息系统与设备和产品之间的信息交互,对整个制造过程进行全面建模分析与优化。同时,构建基于涡轮叶片实测数据的全生命周期三维模型及数据包,支持开展航空发动机基于实测三维模型的装配仿真和维修仿真,显著提升航空发动机的装配效率和产品质量。

参考文献

[1] 单继东,王昭阳,陈贺利,等.航空发动机智能制造生产线构建技术研究[J].航空制造技术,2016,59(16):52-56.

SHAN Jidong, WANG Zhaoyang, CHEN Heli, et al. Building technology of intelligent manufacturing production line for aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 52-56.

[2] BUNKER R S. A review of shaped hole turbine film-cooling technology[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(4): 441-453.

[3] 董一巍,吴宗璞,李效基,等.叶片气膜孔加工与测量技术的现状及发展趋势[J].航空制造技术,2018,61(13):16-25.

DONG Yiwei, WU Zongpu, LI Xiaoji, et al. Current situation and development trend of processing and measurement technology for turbine blade film cooling hole[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(13): 16-25.

[4] 倪萌,朱惠人,裘云,等.航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J].燃气轮机技术,2005,18(4):25-33,38.

NI Meng, ZHU Hui ren, QIU Yun, et al. Review of aero-turbine blade cooling technologies[J]. Gas Turbine Technology, 2005, 18(4): 25-33, 38.

[5] 佟浩,李勇,李宝泉.气膜冷却孔电加工工艺与装备技术研究[J].航空制造技术,2021,64(18):34-45.

TONG Hao, LI Yong, LI Baoquan. Research on technologies and equipment of electro machining film cooling holes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(18): 34-45.

[6] 宋金榜,易海云.航空发动机涡轮叶片气膜孔加工工艺[J].工具技术,2020,54(12):82-86.

SONG Jinbang, YI Haiyun. Technology for gas film hole of aircraft engine turbine blade[J]. Tool Engineering, 2020, 54(12): 82-86.

[7] LI C J, HAO L T, ZHAO L. et al. Thinning process of recast layer in hole drilling and trimming by EDM[J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 575-579.

[8] 王军旗,赵万生.基于支持向量机的高速电火花小孔加工穿透检测技术[J].电加工与模具,2017(4):56-59,67.

WANG Junqi, ZHAO Wansheng. Breakthrough detection technology of high speed EDM drilling based on support vector machine[J]. Electromachining & Mould, 2017(4): 56-59, 67.

[9] 陈贵林,赵春蓉.航空发动机精锻叶片数字化生产线[J].航空制造技术,2015,58(22):78-83.

CHEN Guilin, ZHAO Chunrong. Digital production line of precision forging aeroengine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(22): 78-83.

[10] 张森棠,付龙,贺芳,等.面向航空发动机的数字化生产线探索与实践[J].航空制造技术,2015,58(22):73-77.

ZHANG Sentang, FU Long, HE Fang, et al. Exploration and practice for aeroengine digital production line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(22): 73-77.

[11] 张明德,杨文科,谢乐,等.航发叶片数字化生产线管控执行系统研究与实现[J].现代制造工程,2020(7):11-18.

ZHANG Mingde, YANG Wenke, XIE Le, et al. Research and implementation of control and execution system for aero engine blade digital production line[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(7): 11-18.

[12] 王焱.未来工厂:数字量贯通的集成运行[J].航空制造技术,2015,58(8):40-45.

WANG Yan. Future factory: Integrated working with digital stream[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(8): 40-45.

[13] 侯志霞,邹方,王湘念,等.关于建设航空智能生产线的思考[J].航空制造技术,2015,58(8):50-52.

HOU Zhixia, ZOU Fang, WANG Xiangnian, et al. Suggestions on aeronautic intelligent production line construction[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(8): 50-52.

Digital Production Line of Turbine Blade Air Film Hole Electric Discharge Machining

JI Xuezhuan¹, GAO Jian², SUN Han²

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. Beijing Hanfei Aviation Technology Co., Ltd., Beijing 101307, China)

[ABSTRACT] Focus on the low pass rate and bottleneck of mass production in air film hole machining of aero-engine turbine blade, breakthrough in adaptive machining system, intelligent network control system, equipment network data interface, quick-change tooling and other technologies, based on the lean “U-shaped” layout, an electric discharge machining digital production line for turbine blade air film hole machining was built, which has characteristics of automation, digitalization, integration and intelligence. This line can realize “24 h unmanned production” and multi-model collinear mass production. After 2 years of operation, various economic indicators such as the one-time inspection pass rate and the comprehensive efficiency of equipment have reached the leading level in China, which has significantly improved the productivity and pass rate, reduced the cost of blade machining, and the bottleneck of mass production of aero-engine turbine blade was solved. The composition and architecture, key technologies and design process of the digital production line for electric discharge machining are demonstrated, which has important reference value for the construction of the digital production line of the aero-engine manufacturing industry.

Keywords: Aero-engine; Film hole of turbine blade; Digital production line of electric discharge machining; Adaptive machining system; Intelligent network control system

(责编 七七)

(上接第 41 页)

[15] 赵阳, 伏晓露, 廖庆妙, 等. 基于数字孪生的智能脉动管控 [J]. 航空制造技术, 2020, 63(1/2): 14–20.

ZHAO Yang, FU Xiaolu, LIAO Qingmiao, et al. Intelligent production management and

control for aircraft assembly pulsation line based on digital twin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(1/2): 14–20.

[16] 郑守国, 张勇德, 谢文添, 等. 基于数字孪生的飞机总装生产线建模 [J]. 浙江

大学学报 (工学版), 2021, 55(5): 843–854.

ZHENG Shouguo, ZHANG Yongde, XIE Wentian, et al. Aircraft final assembly line modeling based on digital twin[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(5): 843–854.

Study and Realization of Production Line Control Mode Based on Digital Twins for Aircraft Final Assembly

TANG Jianjun, JIN Zhuyun, SHI Qinqin, XU Aiming, KUANG Lin,
SHI Yuanlong, ZHANG Haolong

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

[ABSTRACT] In order to continuously improve the operational performance of the aircraft final assembly production line and promote the reform of the business model, this paper proposed a new management and control mode of aircraft final assembly production line based on digital twin. Firstly, the evolution process of aircraft final assembly production line from physical space to information space is analyzed, as well as the operation control requirements of production line. Secondly, the digital twin composition of aircraft final assembly production line is expounded, at the same time, the digital twin model of assembly production line is constructed based on five-dimension digital twin model. Finally, the virtual model is established based on 3DMAX technology, and a digital twin system for final assembly is built by system development technology. The mapping between physical entity and virtual space is realized by collecting the process data of production line, and the digital twin technology in aircraft final assembly production line is preliminarily applied. The results show that the control mode of aircraft final assembly production line based on digital twin plays an important role in improving production efficiency and quality.

Keywords: Aircraft final assembly line; Control mode; Digital twin technology; Digital twin system; Virtual-real mapping

(责编 七七)

引文格式: 赵巍, 连泰湖, 张雷, 等. 基于数字孪生的自动化立体仓库货位分配优化方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 66-73.

ZHAO Wei, LIAN Taihu, ZHANG Lei, et al. Optimization method for storage location assignment in automated warehouse based on digital twin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 66-73.

基于数字孪生的自动化立体仓库货位分配优化方法*

赵巍¹, 连泰湖¹, 张雷², 张以成¹, 冉孟¹, 刘欣怡¹

(1. 天津职业技术师范大学, 天津 300222;

2. 天津商业大学, 天津 300134)

[摘要] 自动化立体仓库是智能生产线中的重要单元,可以实现实时库存信息的准确查询,其使用效率直接关系到智能生产线的生产效率。针对智能生产线中的自动化立体仓库货位随意分配,以及分配智能化水平低导致航空航天产品生产效率低下的问题,提出一种基于数字孪生的自动化立体仓库货位分配(Storage location assignment, SLA)优化方法。首先,采用数据驱动的数字孪生体多维度融合建模方法构建自动化立体仓库数字孪生多维模型;其次,对自动化立体仓库数字孪生系统通信机制及信息交互原理进行研究与分析,以出库效率(结合工艺)、货品相关度、货架稳定性为目标建立货位分配数学模型,提出一种改进的启发式蚁群(Improved ant colony optimization, IACO)算法对模型进行优化,将得到的货位信息集成到自动化立体仓库数字孪生系统并映射到物理实体;最后,通过试验证明该方法能够满足立体仓库基于工艺的物料出入库智能选择货位需求。该方法在智能生产线上的应用对航空航天产品实现智能制造、提质增效具有重要意义。

关键词: 航空航天; 数字孪生; 智能生产线; 自动化立体仓库; 货位分配; 蚁群优化算法

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.066



赵巍
教授, 博士, 研究领域为数字孪生。

随着航空航天相关空间建设计划的不断推进,中国于2019年已成为卫星发射第二大国^[1]。应未来高质量、大批量卫星发射的计划要求,卫星装备的生产模式正在朝着智能制造的方向发展。智能生产线在航空航天制造企业中的应用逐渐扩大,自动化立体仓库作为智能生产线的重要组成部分,通过其本身的灵活性和布局占领位置的特殊性,为整条产线的自动化需求提供了窗口,具有总控的作用。自动化立体仓库在智能生产线上的应用对航空航天产品实现智能制造、提质增效具有重要意义。

目前,国内外对自动化立体仓库各个方面的研究越来越多,其中货位分配(Storage location assignment, SLA)系统化设计研究相对较少。陈月婷等^[2]提出基于改进粒子群算法来解决货架的稳定性和出入库效率问题。马永杰等^[3]用遗传算法求出动态货位分配和拣选路径优化的 Pareto 最优解,优化了模型中具有约束条件堆垛机容量和行驶速度以及在多任务作业周期中的出库问题。俞霖霖等^[4]提出了一种求解自动化立体仓库货位分配与优化的混合禁忌搜索算法(Hybrid tabu search, HTS)对货位分

* 基金项目: 天津市研究生科研创新项目(2021YJSS227)。

配进行优化,从而提高立体仓库的运作效率。潘森等^[5]提出比常见货位分配数学模型更接近实际应用的新的数学模型,采用遗传算法优化自动化立体仓库的入库货位分配方案。曾强等^[6]引入货物系概念并按照货物系分配货位的方式确定同种货物的分散程度,基于分段交叉和单点变异实现遗传进化算法,设计了一种非支配排序遗传算法分段整数编码方法,解决了有货位载重约束的自动化立体仓库货位的分配问题。王厅长等^[7]利用遗传算法,采用两级库位编码的方式对双深式立库的货位分配进行研究。杨玮等^[8]对双载具和三载具两种设备配置下的货位分配问题进行分析,并采用改进遗传算法进行了仿真求解。Bertolini等^[9]提出了一种基于模拟退火过程的元启发式算法,旨在优化金属自动化仓库检索阶段的性能。蔡安江等^[10]以产品出入库效率、货架重心和产品聚集度为目标建立了货位分配数学模型,提出了一种改进混合蛙跳算法解决双向式自动化立体仓库货位分配问题。

现有的自动化立体仓库货位分配研究,大都是结合具体要实现的目标运用各类算法进行货位分配优化并进行仿真预测。近年来随着制造业数字化转型,智能生产线运用更加广泛,自动化立体仓库货位分配随着产线工艺排产要求而发生相应改变。本文提出一种基于数字孪生的自动化立体仓库货位分配优化方法,以数字化的方式建立了与物理实体高保真映射的数字孪生模型,通过实时交互、货物数据统计、仿真及智能优化,映射和优化自动化立体仓库货位分配,系统地考虑环境影响和综合效率,实现货物货位分配过程中分配存储率高、资源利用率高、综合效益最大化,能提高航空航天设备生产模式的智能化程度,提高产品生产效率。

1 智能生产线数字孪生系统架构

航空航天制造智能生产线以自动化立体仓库为核心,为了适应智能生产线的高效率要求,构建结合自动化立体仓库的智能生产线数字孪生系统,其主要由数据采集层、模型层、货位分配优化层、网络层、物理层和孪生层组成,如图1所示。

智能制造系统可适应规划仿真软件(Visual engineering and education, VE²)兼具以下多种功能:(1)可以实现对上下位机传输信息的虚拟化处理与仿真,经由上位机程序与软件及数控系统的接口的设计与安装,保障物理实体与虚拟模型之间良好的

通信与交互;(2)虚拟模型都按照实物真实比例和尺寸建立,具有的3D半物理建模、半物理示教程序和可适应规划模块保证其数字孪生功能的可实施性,保证半物理模型与实体的统一;(3)模拟驱动器具有数据采集和传输功能,具有信号连通性模块,在IO输入输出端口的辅助下,利用RFID技术将加工工艺货品信息传输到管理系统,再传输到仿真模型下的对应存储位置,然后实时将获得的立体仓库模型的输出信息及时传输给立体仓库的控制系统。

自动化立体仓库的结构比较复杂,其中包括堆垛机传输带、输送链条、升降滚轮、X轴移动机构、C轴旋转机构、Y轴货叉伸缩机构、Z轴

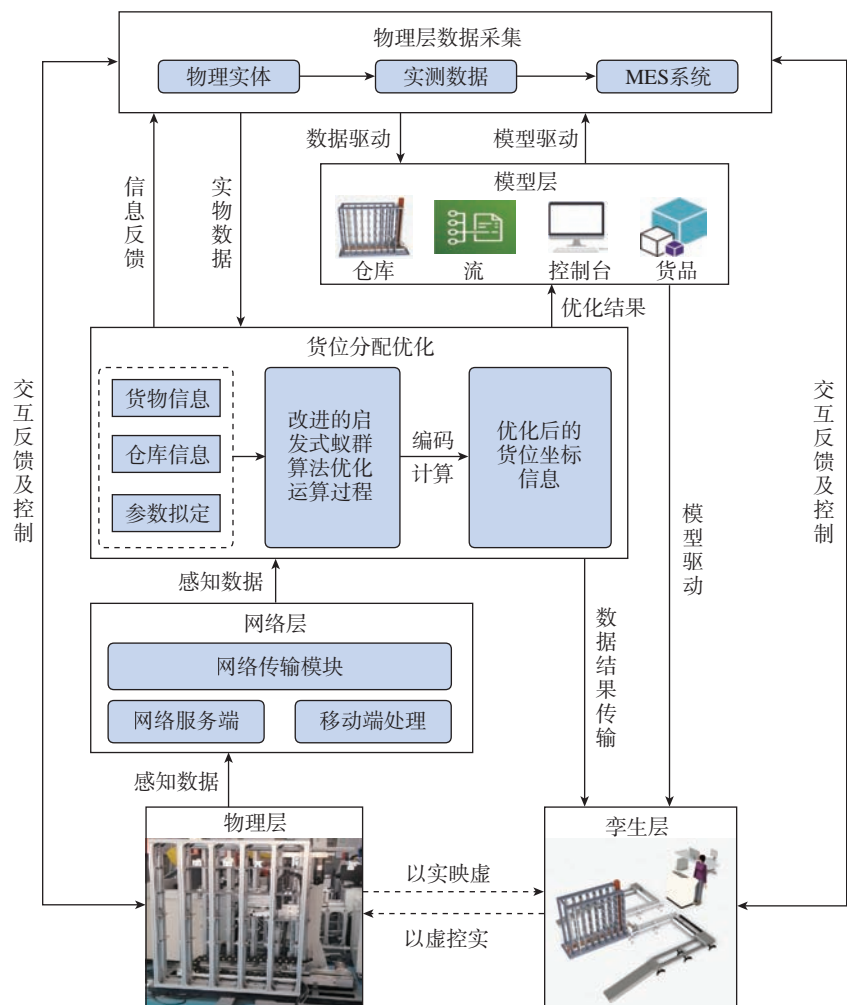


图1 数字孪生控制体系架构图

Fig.1 Digital twin control architecture diagram

升降机构以及货架,数控系统主要控制堆垛机运动。结合具体的目标控制需求,从已有的系统中调用宏功能可以更便捷、更快速地进行高效率控制,读取相关数字量信息采用 TCP/IP 协议,这种以太网驱动程序传输数据的方法实现较为简单,完全可以满足系统控制通信要求从而达到预期效果。控制过程流程如下。

(1) 建立数据层与物理层之间的连接。物理实体具有适配数控系统且有协议适配接口,通过上位机与计算机端连接。

(2) 状态信息采集。在物理系统中分布各类传感器,用以实现物理实体的数据分析,经由一系列的运作分析,将物理端数据采集并传输到数字孪生模拟端,在传感器功能数据采集、TCP/IP 协议通信辅助下,数字孪生原型也能实现多维物理实体信息集成,通过模型的保真化模拟运行,实现对物理实体控制的准确性和高效性。

(3) 堆垛机行驶速度调试。堆垛机半物理仿真模型与物理实体大小尺寸及其结构完全一样,设定虚拟模型初始化状态,使其跟物理实体初始状态完全一致,通过货位分配优化后输出的优化结果传输到模型层,为确保入库位置精准度,在半物理仿真场景下进行货位坐标编译,通过后台程序对其接收到的货位信息进行处理,再通过计算得到 X 轴移动机构、C 轴旋转机构、Y 轴货叉伸缩机构的具体移动距离的数值,确保模型控制的精准性,然后通过以太网连接, TCP/IP 协议通信辅助下,通过上位机程序将模型层的数据传输到物理层的数控系统中,在数据传输保证实时性的理想状态下便可以保证虚拟仿真模型跟物理实体的实时同步。

2 货位分配优化模型

2.1 模型基本假设

智能生产线布局模式下的立体

仓库两排货架之间设有一条巷道,巷道内有一台堆垛起重机穿梭在货架之间的巷道中,完成转载运送毛坯物料以及成品的工作,管理上采用计算机及 RFID 技术。自动化立体仓库布局结构俯视图如图 2 所示。

针对制造设备工艺流程智能加工产线自动化立体仓库货位分配遇到的相关问题和应遵循的原则,以工艺配置和管理系统下的产品工艺路线为基础,为了便于模型的建立和问题的研究,做出如下假设。

(1) 定义 (x, y, z, T_m, M_m) 为某一待入库货物的信息,为了便于研究,仅考虑一组货架,假设两排货架有 a 排、 b 层、 c 列,且 $a=2, b \leq 100, c \leq 100$,定义左排货架左下角货位的左下角点为坐标原点,则货架的第 x 列、 y 排、 z 层的货位坐标表示为 (x, y, z) ,其中 $x \leq 100, 1 \leq y \leq 2, z \leq 100$,且均为整数。 T_m 为某种物料对应的加工次序; M_m 为对应物料的质量; m 为货品编号。

(2) 假设每个货位的大小都相同且只能储存一件货品,并且货位长宽高都相等,设为 L 。

(3) 假设堆垛起重机速度恒定,设其空行程、叉/放货、运货速度分别为 V_k, V_c, V_y ,且 $V_c < V_y < V_k$ 。

2.2 加工作业优化目标的定义

按工件加工工艺流程将堆垛机的调度问题归纳为:堆垛机由起点出发,拖取存在于 m 个不同货格的

物料,堆垛机运动到一个货格,取出货位托盘及其托盘上的物料,再将托盘及其物料送到待加工物料存储的货格,然后再返回出发点,等到物料加工到规定工艺节点,堆垛机再去往下一个待加工物料货位点,且每个货格在存取过程中仅去一次,依次拣取完 n 个货物,再依次把加工完成的工件送回到储存位置,最后回到站台起点。

(1) 以工艺排产次序为优化目标建立目标函数 Q 。

根据货区分配原则,智能制造过程中,排产计算和调度问题是影响货区分配的一个重要指标,最先加工的物料应该放在离出口最近的地方,待加工的毛坯物料应该按照具体情况尽量分配到出入库时间小的货位,有利于提升生产效率,减轻堆垛机工作压力。设某货位区编号为 i ,其中某种物料的加工次序数为 F_i ,时间评估系数按照计算公式 $I_i = s/F_i$ (s 为货位中毛坯总数量)得出,其中 s 在具体工艺流程下为常数,且 $s \geq 1$,时间评估系数越大,则应离出入口越近。要满足该原则,则分配优化目标就是使堆垛机运行时间最小,该策略的优化目标函数可描述为

$$Q_{\min}(x, y, z) = \sum_{x=1}^c \sum_{y=1}^a \sum_{z=1}^b \left[\frac{2L + (z-1)L + xL}{V_y} + \frac{2L + (z-1)L + xL}{V_k} \right]$$

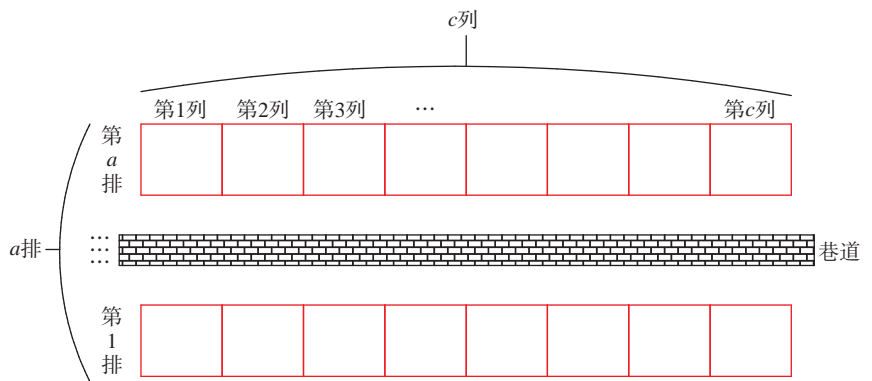


图 2 自动化立体仓库布局结构俯视图
Fig.2 Top view of automatic stereo warehouse layout structure

$$+2\frac{L}{V_c}\left] \times I_i \quad (1)$$

式中, $\frac{2L+(z-1)L+xL}{V_y}$ 为堆垛机运货运行时间; $\frac{2L+(z-1)L+xL}{V_k}$ 为堆垛机空行程运行时间; $2\frac{L}{V_c}$ 为堆垛机叉/放货品运行时间。

(2) 以相关货品聚集度为优化目标建立目标函数 D 。

根据货品相关性原则,同一种或同一种类型货品应按照具体情况尽量分配到相邻或相近的货位,能够减少堆垛机的行驶距离,其相关货品信息由载具定义标签决定,在货位分配过程中,RFID读写器发出标签芯片中的编码数据信息,然后通过无线网络将编码数据信息接入PC应用程序中进行数据解析、封装和传输,信息管理系统通过集成信息对货位进行初步规划。

若信息读取后货位要求存储某类产品时,定义此类货品分配存储区中心坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,要使该类待入库货品距离此货位最近,同类物料或者成品入库时必须为相邻货架,故两者之间的距离要尽量小。故该策略的优化目标函数可描述为

$$D_{\min}(x, y, z) = \sum_{x=1}^c \sum_{y=1}^a \sum_{z=1}^b \sqrt{[(x-x_i)L]^2 + [(y-y_i)L]^2 + [(z-z_i)L]^2} \quad (2)$$

(3) 以货架稳定性为优化目标建立目标函数 S 。

根据上轻下重原则,尽量将较重的货品放在货架的下面,降低货架重心以确保仓库货架的稳定性,即堆垛机在垂直方向上克服货物重力所做的功最小,其优化目标函数为

$$S_{\min}(z) = \sum_{z=1}^b 2M_m g(z-1)L \quad (3)$$

式中, g 为重力加速度。

显然,3个目标函数各个参数互相影响,是典型的非多项式(NP)难

题,为方便后期处理,将其转换为单目标函数,并根据实际自动化立体仓库确定相关系数。总的优化目标函数为

$$F_{\min}(x, y, z) = \mu_1 Q_{\min}(x, y, z) + \mu_2 D_{\min}(x, y, z) + \mu_3 S_{\min}(z) \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq \mu_1 \leq 1 \\ 0 \leq \mu_2 \leq 1 \\ 0 \leq \mu_3 \leq 1 \\ \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1 \end{cases}$$

2.3 启发式蚁群优化算法

除了数字化模拟引擎,数字孪生系统还包括一个联合优化模型。面向双目标的数字优化算法具有两个特点:(1)在短时间内快速识别最优或近似最优解,以适应生产系统和随机交付需求的高频率动态调整要求;(2)耦合优化问题的多个目标的协调,考虑到货位分配能力的稳定性,提出改进的启发式蚁群算法来提高货位分配运营效率。

20世纪90年代初期,受蚁群集体寻径行为的启发,意大利学者Dorigo等^[11]提出了一种基于种群进化的启发式随机搜索算法——蚁群系统(Ant system, AS),并用于解决旅行商问题(Traveling salesman problem, TSP),AS的初步试验取得了较好的结果,但无法与当时最好的TSP求解算法竞争。经过演变后的蚁群算法(Ant colony optimization, ACO)获得了更好的计算性能^[12-13],可以解决更多的组合优化问题^[14]。从人工智能(Artificial intelligence, AI)角度来说,ACO是群智能算法的一个成功开端^[15]。

蚁群算法是一种模拟蚁群智能行为的仿生优化算法,没有视觉的蚁群运动时会在通过的道路上释放出一种特殊的信息素^[16]。堆垛机进行货位选择类似于蚁群觅食过程,碰到要选择的岔口时,就会根据信息素随机挑选一条路径,每只蚁群在所走过的路径上均会释放出等量的信息素,蚁群每次经过该路径均会释放信息

素使得该路径上的信息素浓度增加;同时每条路径上的信息素随时间推移会逐渐挥发。因此,在初始点跟目标点之间,用目标函数代替初始信息素,按照约束条件进行迭代选择后,符合分配策略的路径信息素浓度较高,则下次迭代选择的概率更高,每次完整迭代一次后再采用新的信息素遗留信息,经过数次迭代后,则会根据约束条件得出最优分配货位。结合货位分配蚁群算法是指用来描述这一过程所组成的群体所表现出的极其复杂的行为特征的方法。传统蚁群算法的基本规则为

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t)\eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} \tau_{ij}^\alpha(t)\eta_{ij}^\beta(t)} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\tau_{ij}^\alpha(t)$ 为 i 节点和 j 节点在 t 时刻残留的信息素,初始信息素用待寻优的目标函数代替,其中 α 是启发蚁群选择节点的信息素启发因子; $\eta_{ij}^\beta(t)$ 为 i 节点和 j 节点在 t 时刻的期望启发函数,通常定义为 i 节点和 j 节点间距离 d_{ij} 的倒数,即 $\eta_{ij}^\beta(t) = 1/d_{ij}$,其中指数 β 为期望启发因子,表示信息素指导蚁群选择货位时的向导性,可以反映出蚁群在搜索最优货位的过程中的先验性和确定性因素的作用强度; allowed_k 为蚁群下一步允许选择的节点; $P_{ij}^k(t)$ 表示蚂蚁 k 从 i 货位转移到 j 货位的概率。

蚁群算法具有很强的正反馈能力,在算法后期能够加快算法的进化速度,促使算法迅速收敛,但在算法初期信息素匮乏,进化速度较慢。算法初期迭代循环一次更新下一代信息素过程若能增强信息素增量,则能避免前期信息素匮乏而导致进化速度慢的问题,因此,设计出以正弦函数为基础的信息素定量因子来解决这个问题。信息素更新公式修改为

$$\omega_i(t+1) = (1-\rho)\omega_i(t) + Q \times \varphi(t) \quad (6)$$

式中, $\omega_i(t+1)$ 为下一时刻信息素总量; Q 为常数, 表示蚁群迭代循环一次释放的信息素总量; $\varphi(t)$ 是信息素定量因子。

$$\varphi(t) = 2 \cos \left[\frac{\pi}{3} \times (1 - e^{(1-t)}) \right] \quad (7)$$

式中, t 为当前蚁群迭代次数, 内函数 $1 - e^{(1-t)}$ 在 $[1, +\infty)$ 上的值为 $[0, 1)$, 则 $\varphi(t)$ 在定义域内单调递减且值域为 $[1, 2]$, 利用余弦复合函数的特点, 在蚁群算法初期, $\varphi(t)$ 的值趋近于 2, 则初始信息素在算法初期就增长了一倍, 即在算法初期增加了信息素总量, 弥补了蚁群算法前期信息素匮乏而导致进化速度慢的问题; 由于信息素定量因子 $\varphi(t)$ 是关于迭代次数的函数, 随着迭代次数的增加, 函数值逐渐减小, 最后趋近于 1, 即在算法中后期信息素迭代一次释放的信息素总量趋于正常量, 这就可以在算法后期确保算法的优势不随信息素定量因子而发生变化。这种信息素更新方式可以使算法初期迭代信息素增量更大, 随着迭代次数的增加, 信息素增量趋于稳定值, 这就弥补了算法初期信息素匮乏的缺点, 加快前期搜索速度, 后期又保持了算法的准确性。

2.4 IACO 算法求解步骤

针对建立的自动化立体仓库模型, 采用启发式蚁群算法 (IACO 算法) 进行优化, 流程如图 3 所示, 算法的求解步骤如下。

(1) 获取自动化立体仓库当前的货位信息 (空货位、已存货位和货品信息等)。

(2) 初始化种群参数设置, 即初始化蚁群位置, 在可行范围内生成蚁群总数为 Ant 、最大迭代次数 I_{max} 、当前迭代次数 I 、初始信息素 T_0 、全局转移选择因子 P_0 和信息素挥发系数 P 等。

(3) 重新规划子群。若生成第一代子群, 则根据状态转移概率让蚁群确定搜索方式, 即全局转移概率 $Prob$ 小于 P_0 时进行局部搜索, $Prob$ 大于 P_0 时进行全局搜索, 再判断新位置函数值 F_{temp2} 是否小于 F_{temp1} , 是则更新搜索范围。

(4) 信息素更新。在信息素更新中引入信息素定量因子, 对蚁群留下的信息素进行更新。然后进行下一步迭代, 迭代次数 $I=I+1$ 。

(5) 更新目标值。根据已经迭代后的结果信息判断状态信息, 用最新一次迭代后生成的结果信息替换对应存储中的信息。将全局最优解存入目标矩阵中。

(6) 判定终止条件。判断 $I > I_{max}$, 是则算法结束, 输出全局最优解, 否则返回步骤 (3) 重新规划子群, 继续迭代。

(7) 输出优化结果。画出蚁群最终位置分布图和最优函数值变化图像, 输出最优的位置坐标。

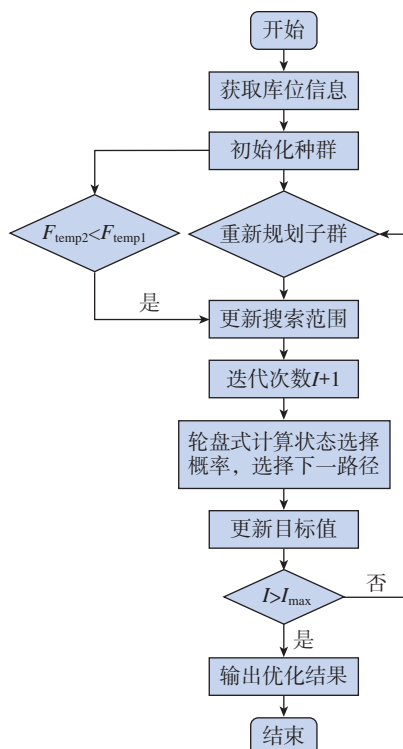


图 3 启发式蚁群算法流程图
Fig.3 Flow chart of improved ant colony optimization algorithm

3 实例验证

3.1 算法实例仿真验证

由于货位分配的侧重点不同会导致分配结果的不同, 因此, 通过层次分析法 (AHP) 的计算并综合考虑立体仓库的实际情况^[10], 取 $\mu_1=0.432$, $\mu_2=0.292$, $\mu_3=0.276$ 。以某高校减速箱加工小产线的自动化立体仓库货位分配任务为例。采用 Python 语言进行仿真验证, 立体仓库的各项参数如表 1 所示。

现有 14 件加工的物料, 已知各个物料的质量以及加工次序, 如表 2 所示。

针对此次货位分配任务, 采用 ACO 算法和 IACO 算法分别进行优化。研究参数的初始设置对蚁群算法性能的影响, 并且分析了如何就参数的初始设置可以进一步改善其性能。算法的参数如表 3 所示。

根据建立的自动化立体仓库货位分配模型并结合 ACO 及 IACO 算法对该货位分配任务进行优化求解, 其目标函数随迭代次数的变化如图 4 所示。

目标函数优化是求解其最小值问题, 从图 4 可以看出, 随着迭代次数的不断增加, 目标函数值在不断逼近函数的最小值, 说明其解是逐步趋近最优解的。相比 ACO 算法, IACO 算法明显收敛速度更快, 在 31 代达到最优, 此时函数值为 1.5484,

表 1 自动化立体仓库基本参数

Table 1 Basic parameters of automatic stereo warehouse

仓库各项参数	值
堆垛机空行程速度/(m·min ⁻¹)	10
堆垛机叉和取货速度/(m·min ⁻¹)	5
堆垛机运货速度/(m·min ⁻¹)	8
货位长、宽、高/m	0.25
货架层数	5
货架列数	5
货架排数	2

ACO 算法在 52 代左右达到最优, 函数值为 1.6215。可见 IACO 相比

ACO 算法效率明显提高, 并且经过多次试验, IACO 比 ACO 算法稳定性更高, 证明了 IACO 算法的有效性和优越性。

ACO 算法和 IACO 算法优化后

的货位坐标分别如表 4 和 5 所示。根据试验设定要求和具体情况可知, 按照货位分配优化原则, IACO 优化结果更符合规则设定, 证明了 IACO 算法的可行性。

表 2 货物实例信息

Table 2 Goods instance information

物料编号 m	物料质量 M_m/g	加工次序
1	221.7	3
2	347.7	1
3	271.1	2
4	128.9	4
5	32.4	5
6	22.5	7
7	15.6	6
8	128.9	11
9	32.4	12
10	271.1	9
11	22.5	14
12	347.7	8
13	15.6	13
14	221.7	10

表 3 算法参数

Table 3 Algorithm parameters

ACO 和 IACO	值
蚂蚁数 Ant	50
启发因子 α	1.5
期望启发因子 β	4
信息素挥发因子 ρ	0.4
信息素强度 Q	400
迭代次数 I	100

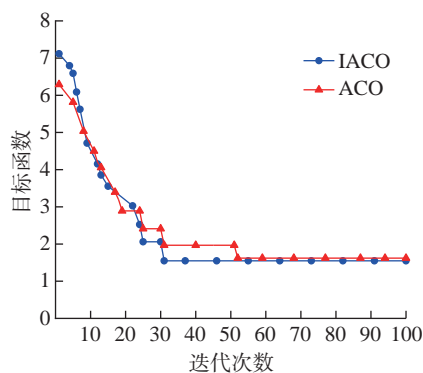


图 4 目标函数随迭代次数的变化

Fig.4 Variations of objective function with number of iterations

表 4 ACO 算法优化后的货位分配信息

Table 4 Location allocation information optimized by ACO algorithm

物料编号 m	物料质量 M_m/g	加工次序	货位坐标
1	221.7	3	(1, 1)
2	347.7	1	(2, 1)
3	271.1	2	(3, 1)
4	128.9	4	(5, 1)
5	32.4	5	(3, 2)
6	22.5	7	(3, 3)
7	15.6	6	(4, 3)
8	128.9	11	(4, 2)
9	32.4	12	(5, 4)
10	271.1	9	(3, 3)
11	22.5	14	(2, 4)
12	347.7	8	(2, 3)
13	15.6	13	(5, 3)
14	221.7	10	(1, 4)

表 5 IACO 算法优化后的货位分配信息

Table 5 Location allocation information optimized by IACO algorithm

物料编号 m	物料质量 M_m/g	加工次序	货位坐标
1	221.7	3	(4, 1)
2	347.7	1	(1, 1)
3	271.1	2	(3, 1)
4	128.9	4	(5, 1)
5	32.4	5	(2, 1)
6	22.5	7	(1, 3)
7	15.6	6	(2, 3)
8	128.9	11	(5, 2)
9	32.4	12	(2, 2)
10	271.1	9	(3, 2)
11	22.5	14	(1, 4)
12	347.7	8	(1, 2)
13	15.6	13	(3, 3)
14	221.7	10	(4, 2)

3.2 数字孪生系统验证

基于可适应性规划仿真平台构建数字孪生系统原型(图5)。原型包括7个模块,即基本数字地面系统、3D半物理建模、半物理示教程序、二维图纸规划、开源化软件助手、信号连通性和可适应规划。基于提出的关键技术,性能模块分析采用Python编程架构开发,并与联合优化模型集成。一旦演示程序接收到货物信息,将调动对应模块快速执行优化,然后将优化结果传输到半物理仿真模块进行编码并计算出各个运动轴的具体移动距离。3D半物理建模模块可以给模型建立真实的物理属性来描述实际的物流和库存过程。仿真运行过程中将来自物理系统的原始数据反馈到多视图同步模块,用于与其他系统协调。

利用产线网络布局、计算机信息技术搭建试验布局,运用数字孪生技术构建虚实同步的仿真平台,使得设备与其数字孪生仿真模型实现实时通信与动作同步。建立立体仓库数字孪生仿真模型的Python脚本与自动化立体仓库数控系统之间的虚实同步通信通道,实现自动化立体仓库物理模型实时数据与数字孪生仿真模型数据的实时同步,进而实现自动化立体仓库数字化模型、立体仓库实物系统之间的动作同步,相比普通产线,集成数据化管理与控制的智能化生产线能有效依托数据化应用能力,提高产品加工

效率。由图6可知,普通智能生产线每加工一件成品需要3.5h,则生产5件成品需要17.5h,结合数字孪生的智能生产线生产成品所用时间逐件减少,生产5件成品需要16.2h,较普通智能生产线提高7.4%。证明了该方法能够满足立体仓库基于工艺的物料出入库智能选择货位需求,在智能生产线上的应用对提高航空航天设备生产模式的智能化程度具有重要意义。

4 结论

本文针对智能生产线中的自动化立体仓库货位分配智能化低的问题,研究了一种快速稳定的改进启发式蚁群算法。采用数字孪生体多维度融合建模方法构建自动化立体仓库数字孪生多维模型,搭建智能生产线数字孪生系统架构,建立了以工艺排产次序、货品相关性、货架稳定性为目标的数学模型,得出了改进的启发式蚁群算法的收敛迭代次数和优化后的货位坐标,结果表明,改进的启发式蚁群算法适合求解智能生产线自动化立体仓库货位分配目标优化问题。将优化后的货位分配信息集成到数字孪生系统中加以验证,得出智能生产线较普通智能生产线的生产效率提高7.4%。由此可见,该方法能够满足自动化立体仓库货位智能分配需求,对航空航天产品实现智能制造、提质增效具有重要意义。

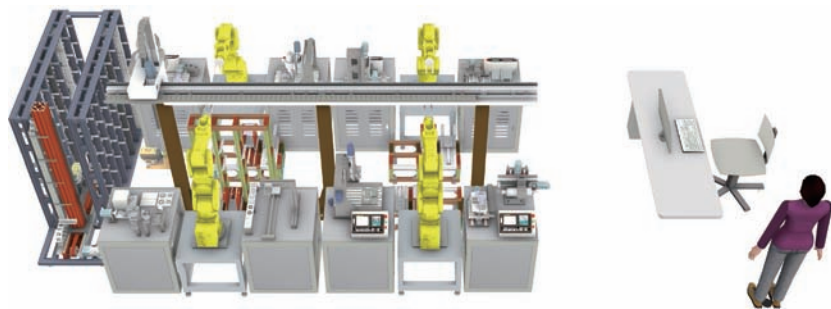


图5 基于可适应性规划仿真平台的数字孪生系统原型

Fig.5 Digital twin system prototype based on adaptive planning and simulation platform

参考文献

[1] 姜钊,于辉,解晓莉,等.卫星整星智能制造关键技术及应用[J].航天制造技术,2020(6):63-67.
JIANG Zhao, YU Hui, XIE Xiaoli, et al. Key technology and application of satellite intelligent manufacturing[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2020(6): 63-67.
[2] 陈月婷,何芳.基于改进粒子群算法的立体仓库货位分配优化[J].计算机工程与应用,2008,44(11):229-231,236.
CHEN Yueting, HE Fang. Location assignment optimization of AS/RS based on improved particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(11): 229-231, 236.
[3] 马永杰,蒋兆远,杨志民.基于遗传算法的自动化仓库的动态货位分配[J].西南交通大学学报,2008,43(3):415-421.
MA Yongjie, JIANG Zhaoyuan, YANG Zhimin. Dynamic location assignment of AS/RS based on genetic algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(3): 415-421.
[4] 俞雷霖,叶卫东,陆志强,等.基于混合禁忌搜索算法的自动化立体仓库的货位分配与优化研究[J].制造业自动化,2008,30(12):33-36.
YU Leilin, YE Weidong, LU Zhiqiang, et al. Ku division and optimization research of AS/RS system based on a hybrid tabu search algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2008, 30(12): 33-36.
[5] 潘森,鲁春强.自动化立体仓库货位分配数学模型研究及应用[J].物流技术,2013,32(23):293-294,298.
PAN Sen, LU Chunqiang. Study and application of mathematic model of AS/RS cargo slot allocation[J]. Logistics Technology, 2013, 32(23): 293-294, 298.
[6] 曾强,张泽斌,杨龙飞.有货位载重

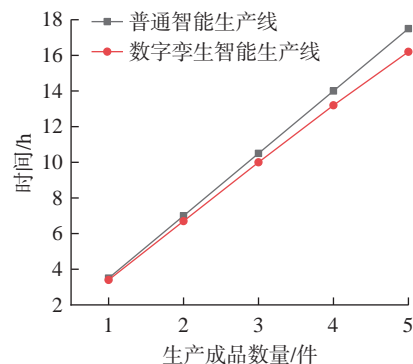


图6 两种生产线生产成品数量与所用时间对比

Fig.6 Comparison of number of finished products between two production lines

约束的自动化立体仓库货位分配多目标优化方法[J]. 机械设计与制造, 2014(12): 65-69.

ZENG Qiang, ZHANG Zebin, YANG Longfei. Multi-objective optimization method for AS/RS storage location assignment problem with storage load limit[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(12): 65-69.

[7] 王厅长, 邱建东, 商庆健, 等. 遗传算法在双深式自动化立体仓库货位分配中的应用[J]. 滨州学院学报, 2015, 31(2): 63-68.

WANG Tingchang, QIU Jiandong, SHANG Qingjian, et al. Application of genetic algorithm in double deep shelf automated storage and retrieval system goods location distribution[J]. Journal of Binzhou University, 2015, 31(2): 63-68.

[8] 杨玮, 王婷, 王洁慈, 等. 多载具式自动化立体仓库货位分配建模与仿真[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(13): 117-124.

YANG Wei, WANG Ting, WANG Jieci, et al. Modeling and simulation of storage assignment of multi-shuttle-based automated storage and retrieval system[J]. Science Technology and Engineering,

2018, 18(13): 117-124.

[9] BERTOLINI M, ESPOSITO G, MEZZOGORI D, et al. Optimizing retrieving performance of an automated warehouse for unconventional stock keeping units[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 39: 1681-1690.

[10] 蔡安江, 叶康, 郭师虹, 等. 双向式自动化立体仓库货位分配优化[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(12): 4048-4056.

CAI Anjiang, YE Kang, GUO Shihong, et al. Two-way automatic three-dimensional warehouse cargo space allocation optimization[J]. Computer Integrated Manufacturing system, 2022, 28(12): 4048-4056.

[11] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 1996, 26(1): 29-41.

[12] RANDALL M. A parallel implementation of ant colony optimization[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing,

2002, 62(9): 1421-1432.

[13] ESCARIO J B. Ant colony extended: Experiments on the travelling salesman problem[J]. Expert Systems With Applications, 2015, 42(1): 390-410.

[14] DUAN H B, WANG D B, ZHU J Q, et al. Development on ant colony algorithm theory and its application[J]. Control and Decision, 2004, 19(12): 1321-1326.

[15] BONABEAU E, DORIGO M, THERAULAZ G. Inspiration for optimization from social insect behaviour[J]. Nature, 2000, 406(6791): 39-42.

[16] TRINDADE M A M, SOUSA P S A, MOREIRA M R A. Ramping up a heuristic procedure for storage location assignment problem with precedence constraints[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2022, 34(3): 646-669.

通讯作者: 连泰湖, 硕士, 研究领域为智能制造和虚拟仿真。

Optimization Method for Storage Location Assignment in Automated Warehouse Based on Digital Twin

ZHAO Wei¹, LIAN Taihu¹, ZHANG Lei², ZHANG Yicheng¹, RAN Meng¹, LIU Xinyi¹

(1. Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

2. Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

[ABSTRACT] The automated three-dimensional warehouse is an important unit in the intelligent production line, which can realize the accurate query of real-time inventory information, and its usage efficiency is directly related to the production efficiency of the intelligent production line. To address the problem of arbitrary and unintelligent allocation of storage location in the intelligent production line, a digital twin-based storage location assignment (SLA) optimization method is proposed. Firstly, a multi-dimensional modeling method of data-driven digital twin fusion is used to build a multi-dimensional model of the digital twin of the automated warehouse. Secondly, the communication mechanism and information interaction principle of the digital twin system of the automated warehouse are studied and analyzed. Then, an improved ant colony optimization (IACO) is proposed to optimize the model, and the obtained level information is integrated into the digital twin system of the automated warehouse and mapped to physical entities. Finally, it is proved through experiments that the method can meet the requirements of intelligent selection of cargo level for process-based material entry and exit in stereo warehouses, which is important for improving the intelligence of aerospace equipment production mode and increasing the productivity of intelligent production lines.

Keywords: Aerospace; Digital twin; Intelligent production line; Automated warehouse; Space allocation; Ant colony optimization algorithms

(责编 七七)

引文格式: 吕继航, 杨仕福, 杨荣, 等. 水陆两栖飞机水动强度技术的现状与发展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 74-84.

LÜ Jihang, YANG Shifu, YANG Rong, et al. Review on strength technology of amphibious aircraft induced by hydrodynamics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 74-84.

水陆两栖飞机水动强度技术的现状与发展*

吕继航, 杨仕福, 杨 荣, 罗琳胤

(中航通飞华南飞机工业有限公司, 珠海 519040)

[摘要] 与陆基飞机和直升机相比, 水陆两栖飞机有其独特优势, 应用前景广泛。设计时为了确保水陆两栖飞机在水上环境的正常使用, 必须按照飞机在水面运动过程中的水动载荷进行充分的结构强度设计, 确保飞机在水动载荷作用下的结构完整性。本文主要围绕水陆两栖飞机的研制需要, 阐述了国内外在飞机水动载荷设计与验证方面的研究现状与技术进展, 并介绍了在国家大型水陆两栖飞机研制过程中开展的楔形体模型仿真、波浪模型仿真、水面效应仿真、全机模型仿真以及缩比模型试验等方面的研究工作, 探讨了后续水陆两栖飞机在水动弹性设计方面的发展趋势。

关键词: 水陆两栖飞机; 水动载荷; 结构强度; 水动弹性; 飞行试验

Review on Strength Technology of Amphibious Aircraft Induced by Hydrodynamics

LÜ Jihang, YANG Shifu, YANG Rong, LUO Linyin

(AVIC General Huanan Aircraft Industry Co., Ltd., Zhuhai 519040, China)

[ABSTRACT] Compared with land aircraft and helicopter, amphibious aircraft has its unique advantages and wide application prospects. During the design, in order to ensure the normal use of amphibious aircraft under the water environment, it is necessary to carry out sufficient structural strength design according to the hydrodynamic load induced by the water movement so as to ensure the integrity of the structure. This paper mainly focuses on the development demand of amphibious aircraft, the research status and technical progress on the design and validation of aircraft hydrodynamic load at home and abroad. The researches of wedge model simulation, wave model simulation, water surface effect simulation, whole aircraft model simulation and scaled model test in the development of Chinese large amphibious aircraft are introduced, and the development trend of hydroelastic design for amphibious aircraft is also discussed.

Keywords: Amphibious aircraft; Hydrodynamic load; Structural strength; Hydroelastic; Flight test

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.074

水陆两栖飞机兼具水上飞机和陆上飞机的特点, 具有机动性好、环境适应性强、对机场的选择范围大、快速抵达等独特优势。显著的特点和优势决定了水陆两栖飞机是水上飞机、陆上飞机及直升机不可取代的特种飞机, 世界各国十分注重该类飞机的研制。

由于使用模式的特殊性, 水陆两栖飞机不仅要承受陆上飞机固有的空气动力载荷、地面载荷, 还要承受飞机在水面起飞、降落和航行时的水动载荷, 其载荷情况多样、载荷分布复杂。为了确保水陆两栖飞机在水面环境的正常使用, 必须有效分析水陆两栖飞机水上起降时

* 基金项目: 国家民机专项科研项目(MJ-2017-F-05)。

的冲击载荷,根据这些载荷进行详细的结构设计,并通过符合性试验对设计的合理性进行验证,确保结构在水动载荷作用下的完整性。

国外许多国家对于水陆两栖飞机已经进行了多年的研究,并在水动载荷及强度设计等方面积累了丰富的理论成果和工程经验,大量的模型及飞机试验数据也使他们对现行飞机的设计与验证具备了类比外推的基础;国内水陆两栖飞机的研发相对缓慢,并且很长时期内处于停滞状态,需要在理论基础、仿真分析及试验验证等方面加强力量,开展系统、深入的水动载荷及结构强度设计研究,以期形成完整的技术储备和技术积累,从而满足型号装备的研制需要。

本文主要围绕目前水陆两栖飞机的研制需要,阐述国内外在飞机水动载荷设计与验证方面的研究现状和技术进展,以及在国家大型水陆两栖飞机研制过程中开展的相关水动力计算分析与试验研究工作,并探讨后续水陆两栖飞机在水动弹性问题方面的发展趋势,为水陆两栖飞机的水动强度设计提供指导。

1 水动强度的技术特征

水动强度主要是针对水面飞行器而言的,包括水上飞机、水陆两栖飞机等。陆上飞行器主要按照其在空气来流中的气动受载和力学行为进行结构强度设计,可以将其统称为飞行器的气动强度特性。但对于水陆两栖飞机而言,由于要在处于各种运动状态的水流中起飞、降落和滑行,就必须考虑机体结构在水流中的受载特征,这就产生了飞行器的水动强度问题。

相对于气动强度,由于飞行器水面环境运动状态的不确定性、多变性以及特殊的总体布局和结构形式^[1],由此衍生的水动强度力学特征更为复杂。首先,水陆两栖飞机预期使用的水域环境包括风浪、涌浪等,这些波浪往往还带有不同的波高、波长和频率分量,这些外界因素的变化都会给结构强度带来不同程度的影响;其次,水陆两栖飞机通常采用船体式设计,其特殊的机身外形会产生特殊的水/气动力,在复杂风流浪况下机身底部的水压和水面效应对飞机载荷和动力学特性都有直接影响。

在水面飞行器水动强度中,主要包括预期水面使用环境的水动载荷预计^[2]和水动受载作用下的结构强度设计^[3]两大部分。其中,水动载荷预计是水动强度设计的一个关键部分,是研发水陆两栖飞机的重要技术基础,直接关系到飞机结构轻质、长寿命和高可靠性的实现。在水动受载作用下,飞机结构的强度设计需要考虑静态载荷和结构动力效应的影响,这一点与陆上飞机的设计内容基本相似。

2 水动载荷预计技术

水动载荷是水陆两栖飞机特有的主要受载情况,是飞机在水面起飞、降落、滑行过程中水对机体产生的外载荷,严格意义上讲它是一种瞬态冲击载荷。飞机的着水冲击是一个随机的过程,其概率分布主要取决于飞机与水面运动的相对位移和相对速度,冲击载荷的量值与分布特征则取决于水域环境及水流与飞机发生砰击局部区域的几何形状等。

实际情况下,水陆两栖飞机在水面运动时的水域环境相当复杂,飞机着水时的水动载荷很难精确计算。以往主要依据工程上的经验公式对不同外形、不同吨位的水陆两栖飞机水动载荷进行计算。但利用经验公式时,由于对飞机和水面环境输入参数的定义过于简单和宽泛,使其计算结果一般偏于保守,而水动载荷作为水陆两栖飞机结构设计的重要依据,保守的载荷结果会导致设计出来的飞机有严重的超重问题。另外,在某些情况下,由于考虑的载荷影响因素有限,利用经验公式得到的计算结果也可能会偏于危险,影响飞机结构的安全性。这些都在一定程度上制约了水陆两栖飞机的发展。

为了深入研究水陆两栖飞机的水动载荷,在实践中为工程设计提供指导,主要采用理论分析、数值仿真分析以及试验测试等方法,对飞机着水过程中的局部和整体特征进行详细研究。

2.1 解析和半解析研究

经典的飞机着水载荷理论研究主要集中在二维结构的入水问题方面,普遍采用解析和半解析方法。Kármán^[4]最早针对飞机着水所受冲击载荷的问题,将飞机降落过程简化为二维楔形体的入水过程,利用动量守恒定理研究了水上飞机着水时船体撞击水面所受到的冲击载荷。Kármán的楔形体入水冲击模型如图1所示,其中, W 为楔形体单位长度的质量; β 为楔形体斜边与静水面夹角; x 、 y 分别是结构浸没半宽度、深度;考虑水波及水面张力影响,楔形体实际浸没宽度为 $2L$ 。从经典的牛顿力学理论出发,提出了线性水平面和结构交混

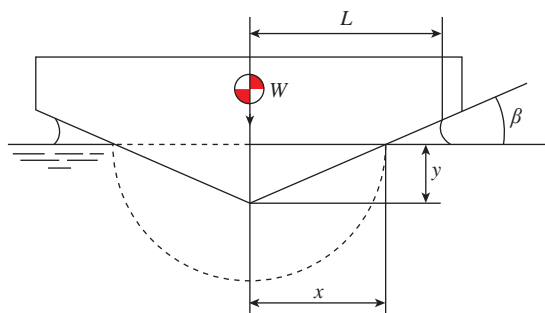


图1 Kármán的入水模型示意图^[4]

Fig.1 Kármán's schematic of water entry model^[4]

边界条件下平底结构和近近平底结构入水冲击问题的渐近线理论,但 Kármán 对水体附加质量的估算不够准确,也没有考虑水域运动对结构的动态冲击作用,因而在计算入水载荷时会有一定误差。

Wagner^[5]对 Kármán 的计算方法进行修正,引入势流理论将楔形结构扩展为平板结构,且加入水波影响因子,通过对速度势和 Bernoulli 方程的求解获得作用于平板上的水冲击压力,同时, Wagner 提出了小倾角模型的近近平板理论,认为在不考虑空气垫的情况下,任何剖面形状的小倾角模型表面的冲击压力分布都可用近近平板理论进行计算。Kármán 和 Wagner 所做的工作为飞行器着水冲击载荷的研究奠定了基础。

20 世纪 40~50 年代,随着水上飞机的不断发展,国外开展了大量针对飞机着水问题的研究。这些研究进一步发现,流体的压缩效应对结构物的入水过程有直接影响^[6],如对于平板而言,假设水为理想可压缩势流,则平板入水冲击时的最大载荷发生在出现空泡前的时刻,且相对不可压缩流体而言,计入压缩效应后的水冲击载荷有一定程度的减小。同时,对于入水角度较小的平底结构,研究认为结构底部的高压力是在物体与水面之间的空气中产生的,称之为空气垫效应,其在平底结构的入水过程中也起着非常重要的作用,考虑物体与水面之间空气垫的影响,分析结果与试验结果更为接近。对于水上飞机,上述研究有助于在理论上建立气、液、固多相耦合运动的数学模型,为获取较为精确的数值结果奠定了理论基础。

解析和半解析法从物体入水冲击的基本理论出发,对水上飞机的着水过程进行了整体的力学简化,然后通过有限的数学变化和物理推导描述结构与水体的力学特性,进而实现流体域和结构域的快速求解,其物体相对运动的物理意义直观、明了,便于获得一些设计和试验方面可以应用的结果。

但是,解析和半解析法的理论假设过于理想化,具体表现为针对的工程问题通常比较单一,对工程问题的物理本质进行了高度简化,使其实际的应用范围受限,一般只能用于几何简单、形状规则的结构形式,无法准确描述各种复杂工程结构的非定常入水运动。对于需要考虑各种非线性耦合因素影响的物体复杂瞬态入水问题,数值仿真方法就显得非常重要。

2.2 数值仿真研究

随着计算机技术和数值仿真实论的快速发展,入水冲击问题不再局限于水动载荷的理论研究,转而开始对入水过程中发生的飞溅、射流、气垫等各种现象进行更加深入的分析。基于此,采用流固耦合、有限元、光滑粒子水动力学等理论的数值仿真方法逐渐成为飞机着水

冲击载荷问题的主要研究手段。

国外的 Belytschko 等^[7]采用有限差分法求解流场运动,利用有限元素法计算结构的动力响应,从而研究了圆柱薄壳结构在矩形水池静水面中的二维入水冲击问题。Anghileri 等^[8]应用 MSC.Dytran 软件分析了刚性球体的垂直入水冲击过程,并对不同的边界条件和流固耦合算法进行了讨论,通过一般耦合方法(General coupling)和任意拉格朗日-欧拉耦合方法(ALE)的比较认为,ALE 方法的计算精度能够满足要求,计算效率高,对于任意几何外形、冲击速度、入水角度的刚性体或弹性体的入水冲击分析有一定的应用潜力。Oger 等^[9]利用基于光滑粒子动力学的无网格理论模拟入水冲击过程中的流体可压缩性,利用 Runge-Kutta 和光滑粒子流(SPH)方法求解物体的运动速度和位移,以及作用在结构上的水动压力,克服了结构变形时的网格扭曲和界面滑移跟踪问题。

同时,国内学者也开展了大量的关于物体入水冲击问题的数值仿真研究。钱勤等^[10]提出了一种任意的拉格朗日-欧拉边界元有限混合法,求解了楔形体、半圆柱体等二维刚体的入水问题,结果表明利用该方法进行入水问题的数值分析具有一定的优越性。贺谦等^[11]采用动网格技术对飞机及整个计算区域进行建模,利用 VOF 方法描述气-液交界面的运动信息,求解不同降落速度和着水迎角下飞机着水时机身压力随时间的变化规律,结果表明,不同着水条件下机身压力的变化规律基本一致,在着水初始阶段均达到峰值,随后迅速下降并趋于稳定。张韬等^[12]基于 MSC.Dytran 平台,采用显式积分法求解离散的拉格朗日方程,用有限体积法求解欧拉方程,通过一般耦合方式进行流固耦合模拟,求解飞机水上迫降的冲击载荷,结果表明,飞机着水时底部压力在初期即达到峰值并开始衰减,压力达到峰值后会出现小幅波动,相同条件下弹性体模型的压力峰值略小于刚性体模型。

对于水陆两栖飞机而言,为了有效定量评估水动载荷的作用效果,需要对其着水过程进行精确的仿真建模,利用高精度数值模拟技术对该过程进行最大程度的精细刻画,为水陆两栖飞机的结构强度设计提供支持。在国家大型水陆两栖飞机研制过程中,根据需要也开展了大量的水面数值仿真研究工作,包括楔形体模型入水仿真、波浪模型仿真、水面效应仿真、三维全机模型着水仿真等^[13-17]。

2.2.1 楔形体模型仿真

首先,采用经典的 Kármán 楔形体模型进行三维有限元仿真建模,利用 ALE 方法进行流固耦合分析求解,研究建模参数对仿真结果的影响规律,并结合楔形体模型入水

试验结果验证飞机水动载荷数值仿真理论的有效性。

利用数值仿真得到的楔形体模型入水典型状态如图 2 所示。可见模型入水过程中,在气、液、固 3 者界面会产生相互干涉作用,自由液面会产生运动变形,符合物体入水的实际情况。典型状态的法向加速度求解结果如图 3 所示,仿真过程中楔形体的加速度响应历程与试验结果趋势一致,幅值相当,吻合度较好。

2.2.2 波浪模型仿真

水陆两栖飞机着水时将遭遇不同等级的水面波浪,波浪的高度、速度及传播方向等都会对飞机着水载荷产生影响。波浪条件下飞机着水动态响应分析的关键就在于如何数字化模拟水面的波浪状态。

实践中,在分析水面波浪力学形态的基础上,可以对波浪进行合理简化,构建波浪数字水域,为仿真分析提供依据。按波形的前进方向划分,波浪主要分为行进波和驻波。其中,相对于水面有水平运动的波浪称为行进波;如果波浪外形只是在原地上下作沉浮运动,而没有水平运动,则称为驻波。工程上普遍认为,理想化的波浪是一个向前运动的行进波,一般可以简化为规则的正弦波形式,如图 4 所示,其中, ζ 为波幅; ζ_a 为波浪的名义幅值; k 为波数; L_w 为波长。

虽然简化的正弦式波浪在真实水面上不一定能遇到,但不规则波浪也可以认为是由大量正弦波(或余弦波)叠加而成的。



图 2 三维楔形体模型入水状态
Fig.2 Landing state of 3D wedge model

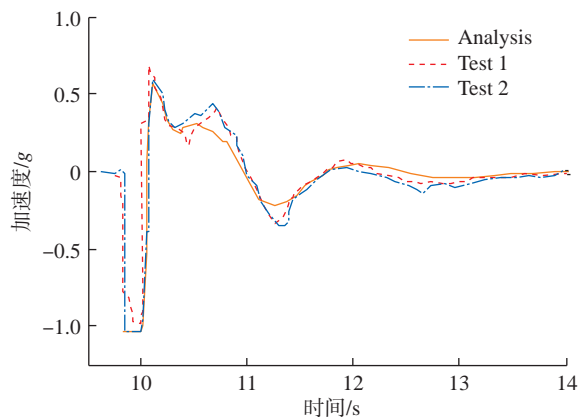


图 3 典型状态的加速度响应历程
Fig.3 Acceleration response of typical states

基于正弦式波浪的特点,可以采用往复式摇波板模拟数字水域的造波运动。当摇波板做往复式简谐摇摆运动时,即可诱导水流产生规则的行进波,如图 5 所示。其中, h 为水域水深; l 为摇波板处于水面下的垂直深度; E 为摇波板水面上的摇幅; A 为波浪幅值; L_w 为波长。

根据图 5,假设波浪传播方向为正, x 轴与水域底部平面重合, y 轴与摇波板处在垂直位置时重合,且方向向上,则不同水深处摇波板的摇幅 e 可以表示为

$$\begin{cases} e(y) = 0 & , 0 \leq y \leq h-l \\ e(y) = \frac{E}{l}(y-h+l) & , h-l < y \leq h \end{cases} \quad (1)$$

摇幅 e 和波幅 A 之间的关系定义为

$$\begin{aligned} A &= K \cdot e \\ K &= \frac{2 \sinh(k_0 h)}{k_0 l} \cdot \frac{k_0 l \sinh(k_0 h) - \cosh(k_0 h) + \cosh(k_0 h - k_0 l)}{k_0 h + \sinh(k_0 h) \cosh(k_0 h)} \end{aligned} \quad (2)$$

式中,系数 K 描述了波浪幅值与摇波板摇幅之间的传递关系。

一般给定有限水深,然后在摇波板运动的诱导下,水域即可产生预期的波浪状态,用于波浪条件下的飞机着水动态响应分析。

2.2.3 水面效应仿真

水上飞机,特别是翼展较大的大型水陆两栖飞机近

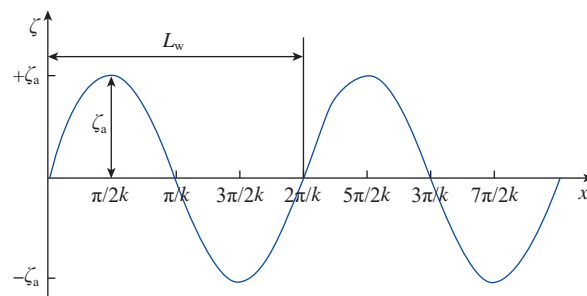


图 4 正弦波形式的波浪
Fig.4 A wave in the form wave of a sine wave

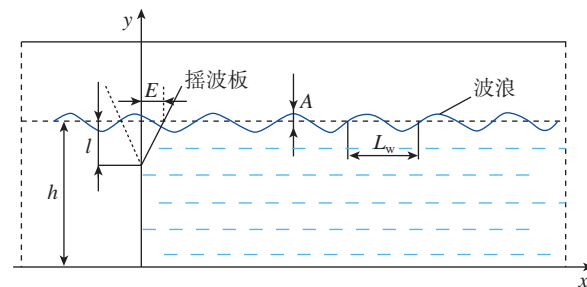


图 5 摇波板造波示意图
Fig.5 Schematic diagram of wave making by shaking plate

水面飞行时,水面气动力效应显著,对飞机的升力、俯仰力矩等有一定影响。通过模型风洞试验获得的飞机在有/无水面效应状态的气动力系数如图6所示。

可见,在水面效应影响下,飞机的升力系数有所增大,俯仰力矩系数相对变化更大,这对飞机的着水动态响应特性将产生直接影响,在仿真建模时应予以模拟。目前,考虑飞机水面效应时的气动力可以通过等效模拟的方式实现。

设飞机着水情况下,初始俯仰角为 θ_0 ;任一时刻飞机的俯仰角增量为 $\Delta\theta$,则飞机实际的俯仰角表示为

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta \quad (3)$$

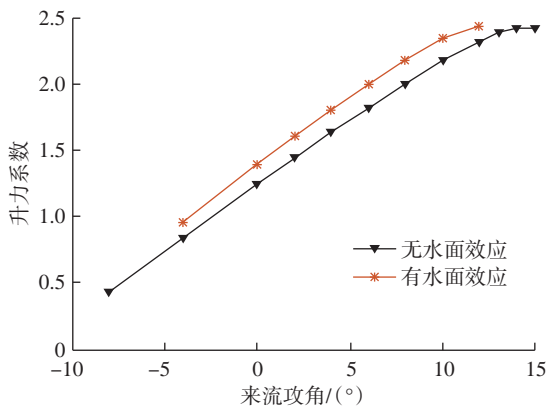
假设飞机来流方向与水平面的夹角为 γ ,则飞机飞行攻角为

$$\alpha = \gamma + \theta \quad (4)$$

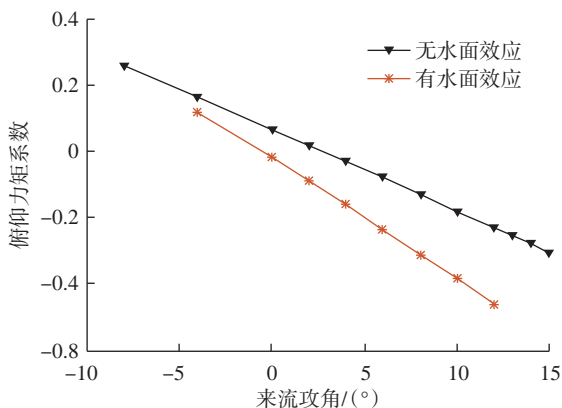
确定飞机在着水过程中各时刻点的攻角后,根据气动力随攻角的变化关系,便可以快速计算出每一时刻飞机的升力、俯仰力矩等,用于水面效应气动力仿真。

2.2.4 三维全机模型仿真

三维全机模型数值仿真分析时,根据水陆两栖飞机



(a) 升力



(b) 俯仰力矩

图6 水面效应对升力和俯仰力矩的影响

Fig.6 Influence of water surface effect on lift and pitching moment

的总体气动布局建立的结构有限元模型如图7所示。建模时主要考虑机身、机翼、尾翼的气动外形进行网格划分,并根据需要对机身底部着水区域进行了适当的网格加密,飞机各部件之间采用“刚体捆绑约束”的方式进行连接,以保证各部分刚性位移一致,同时分别定义了机身、机翼、尾翼、发动机、浮筒等各部分的质量、质心及转动惯量,使得仿真模型的总质量、质心及转动惯量与真实飞机保持一致。

流体模型包括水体和空气两部分,如图8所示。由于飞机着水后产生的水压力在向下传播过程中将遭遇边界层的反射作用,故应保证水体有足够的深度,防止其影响飞机着水后水压力的反射效应。另外,为确保水体流入空气域内与结构模型进一步耦合,又引入了空气单元。水体四周定义为无反射边界条件,并在水与空气交界的地方进行了局部加密。

同时,根据气动载荷在飞机着水响应过程中的作用原理,利用仿真平台的重启动技术,通过外部接口程序实时获取飞机在着水过程中的飞行攻角和飞行速度,从而实现仿真过程中的气动特性数值模拟。



图7 飞机结构有限元模型

Fig.7 Finite element model of aircraft structure

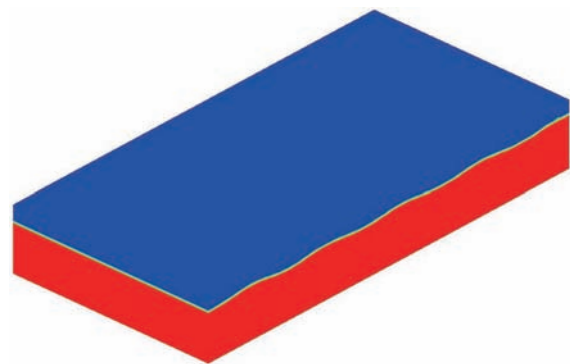


图8 飞机着水的流体模型

Fig.8 Fluid model of aircraft landing

然后,在结构、流体、气动建模的基础上,针对静水面建立大型水陆两栖飞机结构和水体耦合的数值模型,采用 ALE 耦合算法求解飞机着水时重心过载、机身底部压力等的变化过程,并研究着水载荷特性的影响因素。静水面着水时的典型状态仿真结果如图 9 所示。

结果显示,飞机静水面着水过程中,受水体反作用力影响,飞机的飞行攻角不断变化,导致机体各处的过载随之变化。此外,着水载荷的影响因素分析结果还表明以下 4 点。

(1) 着水攻角不同,机体的载荷响应也就不同。从兼顾过载和着水压力的角度考虑,飞机的设计着水攻角最佳值为 $5^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 。

(2) 下沉速度对飞机过载和机身底部压力有直接影响。飞机下沉速度越大,重心过载、水压力响应的峰值也就越大。

(3) 着水时的飞行速度对水动载荷的影响更为显著。随着飞行速度的增大,飞机的重心过载、船底受水压力随之增加。因此,在确保不失速的情况下,应尽可能降低飞机着水时的飞行速度。

(4) 气动力对着水载荷有减缓作用,未考虑气动力影响时的水动载荷偏于保守,不利于飞机结构的轻量化设计。

进一步,针对水陆两栖飞机在规则波水面上的着水动态响应问题,根据摇波板造波过程中摇幅与波高、周期之间的关系,利用数字水域造波系统及 ALE 流固耦合算法,进行波浪水面的模型着水数值仿真,得到的典型结果如图 10 所示。

从仿真结果来看,大型水陆两栖飞机在波浪水面上运动时,不同的着水方式对飞机的载荷响应有一定影响。飞机选择靠近波峰的接水点着水时,其重心过载与着水压力最小,靠近静水面的接水点着水次之。着水过程中,飞机均在遭遇第 2 个波浪时载荷响应最大,这主要是由于第 1 个波浪对飞机的动能削弱有限。此外,对于重心过载和着水压力而言,数值仿真与经验公式的计算结果量值相当,但仿真结果对于水动载荷分布的描述更为详细。

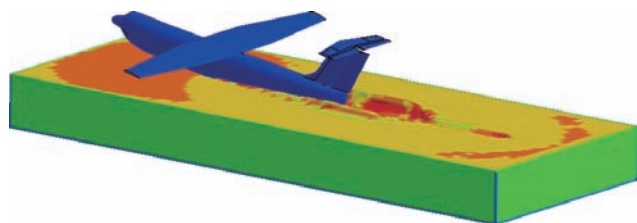


图 9 静水面着水仿真典型结果($T=0.83\text{ s}$)

Fig.9 Typical result of landing simulation on calm water surface ($T=0.83\text{ s}$)

尽管上述已开展的数值仿真工作基本揭示了水陆两栖飞机着水冲击载荷产生的机理,甚至对着水过程中发生的飞溅、气垫等进行了深入的分析,并通过复现飞机着水的动态历程详细描述了全机整体和局部的响应特性,但基于流固耦合理论的数值仿真方法需要对受影响的流体域进行离散化,包括有限体积法(FVM)、任意拉格朗日方法(ALE)、光滑粒子流方法(SPH)等,其数学模型规模庞大,计算周期通常较长,并且对于机体结构在水流和空气流高速运动过程中产生的气垫效应、空化效应^[18]、尾吸效应^[19]、流通效应^[20]等现象的模拟还需依赖类似试验数据的有效支持,这就难以在理论上形成完整、封闭的物理体系,因而还有一定的内在局限性,使其在工程实践中应用受限。

随着计算机硬件技术和计算力学理论不断发展,数值仿真在水陆两栖飞机领域将会得到更大的应用发展空间。尤其是在有限水深复杂流动环境水面效应下的气液混合特性^[21]、波浪水流瞬态冲击带来的结构动态响应特性^[22]、弹性体飞机气液固多相耦合状态的飞机运动特性^[23]等方面,有望利用先进的数值仿真技术,发展分区耦合、完全耦合等更加精细化的高精度数值仿真算法^[24],将水面环境条件从规则波向不规则波和波浪混合状态拓展,进一步研究水陆两栖飞机水面运动过程中的气液固混合动力学特性,以及气动力、水动力和结构变形对水陆两栖飞机水动载荷和结构特性的影响机理及普遍规律。

2.3 试验研究

水上飞机着水冲击的理论方法已经发展了几十年

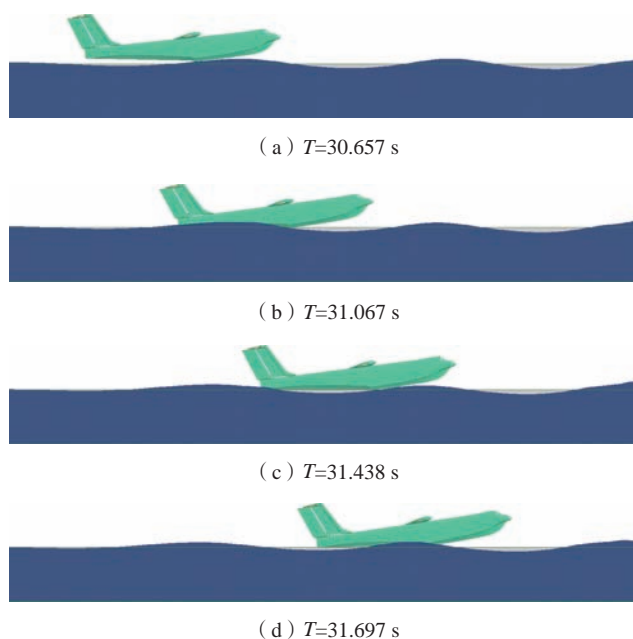


图 10 波浪水面着水数值仿真典型结果

Fig.10 Typical results of landing simulation on waves

并取得了巨大的进步,但仍未能在工程设计中获得成熟的直接应用,通常还要开展一定的试验研究,以期得到更为有效的设计依据。

1919年 Bottomley^[25] 利用水上飞机的 V 形浮舟模型进行了垂直自由落水试验,并根据实测的加速度曲线分析了飞机着水时受到的最大冲击载荷。Chuang^[26] 开展了刚性楔形体模型自由落体的入水冲击试验,对楔形面不同位置处的压力进行了测量,给出了不同倾斜角下水压力峰值的回归公式,并根据试验结果推导了底部撞击压力的近似计算公式。Zhao 等^[27] 对底部斜升角为 30° 的 V 形楔形剖面以及典型的船艏外飘剖面进行了自由落体入水冲击试验,用于验证完全非线性水动力冲击理论的数值计算方法,结果发现垂直冲击力、压力分布的计算值与试验值在入水的初始阶段具有较好的一致性,但受三维效应的影响,在入水深度较大时两者有一定偏差。

鉴于倾斜角 10°~20° 楔形体入水冲击问题的重要性,国际船舶与海洋工程结构大会 (ISSC) 载荷委员会针对楔形体最大冲击压力与自由落体速度之间的关系,对理论分析结果与模型试验结果做了详细的对比研究,获得了在理论计算和工程应用方面的指导性实用数据^[28]。

波音公司早在 B707 飞机研制过程中,就开展了缩比模型的水上迫降试验^[29],后续各种类似机型均采用以此积累的试验数据外推来评估飞机的水上迫降载荷,用于分析飞机着水载荷能否满足水上迫降符合性验证的要求。

大型水陆两栖飞机研制时,基于 Froude 数水动力相似准则设计并制造了水池试验缩比模型,如图 11 所示,并开展了水池重力投放试验和高速拖曳试验,分别研究了飞机在静水面、规则波光面的水动载荷特性^[30-32],典型结果见图 12。试验发现,单船身模型的初始姿态角对飞机着水冲击载荷的影响较小,但艏部着水时的偏心冲击会延迟载荷峰值的出现,且姿态角的变化



图 11 缩比模型着水试验
Fig.11 Pool test of scaled model

滞后于水冲击载荷的变化;全机模型匀速着水时,随着水面波长的增大,试验模型的垂向加速度有多个响应峰值,在匀加速着水试验中,低速滑行时模型的垂向加速度响应幅值较小,而在高速滑行时模型响应幅值急剧增大。

另外,由于水面气动力效应的影响,水陆两栖飞机的水面运动实际上是一个气、液、固三相耦合的作用过程。为了进一步研究飞机着水过程中水、气交混状态飞机的气动特性,研制团队还开发了一种用于模拟水面环境波浪状态、风洞安装的活动的波浪地板装置,如图 13 所示,然后通过模型风洞试验测试了飞机在波浪水面着水时的全机气动力分布特性,为数值仿真分析和水载荷设计提供了更充分的依据。

总的来说,在水陆两栖飞机设计过程中,从试验角度出发,可以为工程设计提供更充分的技术支持。而且,对于一些在理论计算或仿真分析方面难以充分考虑的复杂物理现象,如飞机入水过程中的水/气交混、空化/超空化、自由液面的射流喷溅、压力场的时空梯度效应等,只能通过水面试验的手段予以研究。

当然,由于飞机着水过程的影响因素众多,并且试验过程中对于初始条件及水域环境的模拟存在各种客观影响^[31,33],导致试验结果存在一定的分散性与强非线性;同时,受试验室水池几何尺度、规则/不规则波浪造波能力、有效测试距离、模型缩比尺度效应、气动力雷诺数 Re 与水动力 Froude 数相似准则无法协调等方面的影

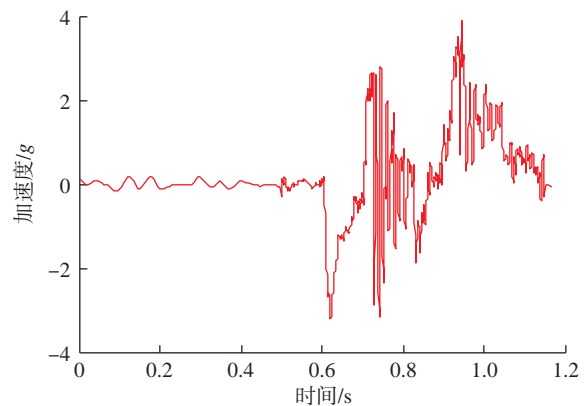


图 12 模型垂向加速度测试的典型结果
Fig.12 Typical test result of vertical acceleration of the scaled model

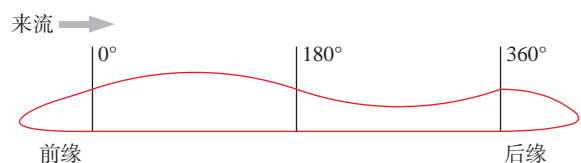


图 13 波浪地板示意图
Fig.13 Schematic diagram of wave floor

响或限制,现有的模型水池试验也并非能够真实地反映飞机的水动力特性,尚需要不断改进模型水面试验技术,并通过大量的参数化试验形成全面的数据积累,然后利用数理统计学方法归纳总结飞机着水冲击载荷的内在规律,从而建立完备的飞机水动载荷试验技术体系。

3 发展趋势——水动弹性设计

水动弹性是近年来针对水上飞行器引出的一个新概念,也是未来水上飞行器结构强度技术发展的重要方向。水动弹性与飞行器的气动弹性相对应,主要研究惯性力、水动力和弹性力之间的相互作用,如图 14 所示。

过去在飞机研制过程中,主要采用传统的设计手段研究水陆两栖飞机的水动强度特性,即先通过各种理论方法、工程试验等获得飞机的水动载荷特性,然后再按照水动载荷开展飞机的结构强度设计。这种设计理念经过多年的发展,取得了一定成功,但主要局限于刚体理论,忽略了结构弹性对载荷响应的影响,可能会造成一定的设计偏差^[34-35]。

对于水陆两栖飞机而言,由于特殊的使用模式,其在水面起降和滑行过程中,经常受到水面气流、波浪等的连续扰动,容易引起机体结构振动,影响系统设备的工效性和结构的疲劳寿命等。借鉴现代船舶设计理论,可以采用考虑结构弹性与水动耦合效应的水动弹性直接设计方法^[36-39],针对水陆两栖飞机具体的使用环境,考虑水体与结构之间的耦合作用^[40-41],开展飞机水动力学仿真建模及结构动力学响应特性技术研究,以期建立把水体和结构的运动与变形作为一个完整系统进行分析的设计方法,从而为防止机体结构共振破坏、振动疲劳、结构的动态特性评价以及结构优化设计等提供依据。

早在 20 世纪 70 年代,在船舶设计领域就形成了二维水弹性力学理论,在此基础上进一步将结构动力学理论与三维船舶运动势流理论结合,又形成了广义三维线性水弹性力学理论,成为船舶与海洋工程流固耦合动力学研究领域中的一项奠基性工作。把海洋波浪环境中水面或水下航行器的耐波性分析、结构外载荷分析、结构强度与疲劳分析以及结构振动分析融合在了一个统

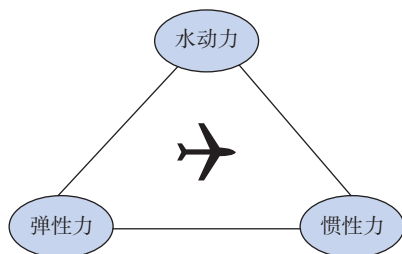


图 14 水动弹性的力三角形

Fig.14 Force triangle of hydroelasticity

一的流固耦合理论基础上,并先后发展了包括计及航速和非均匀定常流场影响的三维线性水弹性频域/时域分析理论、高海况环境大幅运动浮体三维非线性水弹性理论与数值方法以及基于水弹性理论的结构安全性评估技术等。典型的船舶水弹性分析结果如图 15 所示。然而,受结构形式、航速范围、Froude 数等因素影响,现有的船舶水弹性力学理论无法直接应用于水陆两栖飞机。这主要是因为水面航行器的水动力特性与 Froude 数相关,其表达式^[42]为

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{L'g}} \quad (5)$$

式中, V 为运动速度; L' 为特征长度; g 为重力加速度。根据牛顿普遍相似定律可以导出, Froude 数描述的是流体动能与流体势能之间的比例关系,其与物体的运动速度成正比,与特征长度的平方根成反比。

水面航行器在水面航行过程中承受的水压力主要包括水静压力和水动压力。一般地,普通船舶的最大航速不超过 90 km/h,其 Froude 数小于或远小于 1,相对水动力效应而言,水静压力占主导地位,主要靠船体淹没体积产生的浮力承载船舶整体重量。而水陆两栖飞机的水面航速最高达到 160 km/h 左右,且水陆两栖飞机的特征尺寸远小于大型船舶,因此 Froude 数大于或远大于 1,此时起主导作用的作用力就变成了水动压力,主要靠船体高速运动产生的水动升力承载飞机全部重量,这就是飞行器水动弹性与船舶水弹性问题的内在区别。

当水陆两栖飞机在高航速、高 Froude 数状态运动时,船体附近处于低压区的液体可能发生空化或超空化现象形成空泡,这些空泡的生成、发展和溃灭对于非定常水动力有直接影响^[43-44]。因此,水陆两栖飞机的非定常水动力特性远比船舶复杂,已超出现有的船舶非定常水动力数值理论的设计范畴,需要发展一种适

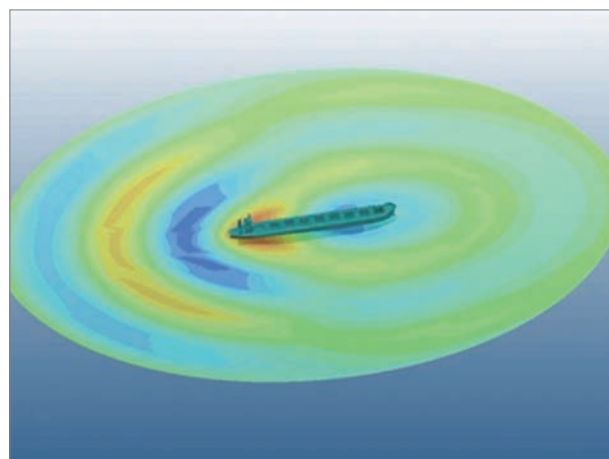


图 15 船舶水弹性分析的典型结果

Fig.15 Typical result of ship hydroelastic analysis

用于水陆两栖飞机的高速水动弹性力学理论与方法,进行大型水陆两栖飞机在不同的波浪状态、遭遇频率、频散关系等条件下的结构外载荷、结构强度与疲劳及结构振动分析。结合现有的理论方法,可以采取工程方法或数值仿真方法等逐步发展水陆两栖飞机的水动弹性设计理论。

借鉴船舶水弹性设计的研究成果及经验,假设细长结构某一截面附近的流体运动只受上游流动的影响,而上游流动不受结构弹性的影响,则高速细长体理论依然适用。基于此,可以考虑超高速的极端情况^[45],将高速细长体的刚性体理论推广到柔性体理论^[46],并进一步改进传统的三维移动 Green 函数方法^[47],以期发展一套适用于高航速、高 Froude 数的势流弹性体力学理论,建立适用于高航速、高 Froude 数的水动弹性工程设计方法,为水陆两栖飞机波浪激励载荷和结构动力响应等的工程分析提供支持。

以现代计算力学理论为基础,根据水陆两栖飞机水上运动的典型状态,计入流体的黏性影响,采用基于计算流体动力学的数字化波浪水域模拟各种自然环境条件^[48],利用有限元素法进行弹性体结构动力学离散化建模^[49],按照单向耦合、显式耦合或隐式耦合甚至完全耦合等流固耦合(FSI)思想求解水体与飞机结构之间的多物理场耦合问题^[50],对水陆两栖飞机各部位在弹性效应影响下的载荷、位移、加速度等瞬态特性的整体或局部特征进行详细分析。

有条件的情况下,可以结合基本理论和数值分析结果,以模型与飞机水动力相似准则为主要约束条件,利用水面拖航、自航等试验手段^[51-52]在不同的水域环境开展水陆两栖飞机弹性缩比模型水面动态响应试验验证工作,深入研究飞机在结构、水动耦合效应作用下的水动弹性特性,验证或尽可能地改进飞机水动弹性的工程设计方法。其中,飞机弹性缩比模型的设计与制造是试验能否取得成功的关键。

与飞机以往采用的颤振风洞试验缩比模型不同,水面动态响应试验采用的缩比模型需要按照 Froude 数相似准则对飞机的几何外形、质量分布以及刚度分布进行等效设计^[52-53],保证模型与飞机之间满足几何相似、流体力学相似、结构力学相似关系,典型的水陆两栖飞机水面动态响应弹性缩比模型如图 16 所示。

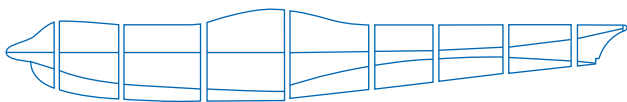


图 16 典型的水面动态响应弹性缩比模型

Fig.16 Elastic scaled model of dynamic response on water surface

模型设计时,还要按照预期的水面冲击载荷进行模型的结构强度相似设计^[54],防止模型在试验过程中因强度不足而破坏。模型的选材必须考虑材料强度、刚度、质量的匹配性,常规材料很难满足设计要求,必须采用轻质、高强度、弹性模量大的合成材料。同时,在保证不影响水动载荷正常传递、不产生附加刚度的基础上,还要对缩比模型各分段的连接处进行必要的防水密封处理。

4 结论

目前,航空业界越来越关注水陆两栖飞机的发展。随着设计要求的不断提高,水陆两栖飞机结构强度设计过程中也遇到了很多新的挑战,其中以水陆两栖飞机的水动强度设计问题尤为突出。在国家大型水陆两栖飞机设计过程中,采用传统的设计方法也可以解决大部分问题,但由于水动设计和试验理论不系统、不完整,缺乏相应的技术积累和技术储备,未来还需要深入开展充分的飞机水动载荷和强度符合性设计研究,完善飞机水动载荷预计的理论方法及其试验验证工程技术,以期形成较为完整的水陆两栖飞机水动强度设计与验证体系。

水动弹性设计是水陆两栖飞机水动强度未来发展的重点方向,可以把水体和结构的运动与变形作为一个完整系统进行处理,为飞机在不同水域条件下的结构载荷和强度设计提供重要的技术支持。受结构形式、航速范围等影响,现有的船舶水弹性力学无法直接应用于水陆两栖飞机,因此需要在水动弹性理论基础、仿真分析、试验验证等方面加快研究,如借鉴移动脉动源 Green 函数法、2.5D 细长体理论、船舶三维非线性水弹性理论等,探索高航速、高 Froude 数状态的广义非定常水动力及水动弹性设计的基本理论和工程方法,并采用弹性缩比模型试验、全尺寸飞机飞行试验等验证水动弹性理论方法的有效性,研究并改善理论结果与实测结果的相关性,以期满足型号研制的迫切需要。

参考文献

- [1] 黄领才, 雍明培. 水陆两栖飞机的关键技术和产业应用前景[J]. 航空学报, 2019, 40(1): 522708.
HUANG Lingcai, YONG Mingpei. Key technologies and industrial application prospects of amphibian aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(1): 522708.
- [2] 童明波, 陈吉昌, 李乐, 等. 飞行器水载荷结构完整性数值模拟现状与展望——Part I: 水上迫降和水上漂浮[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 524530.
TONG Mingbo, CHEN Jichang, LI Le, et al. State of the art and perspectives of numerical simulation of aircraft structural integrity from hydrodynamics—Part I: Ditching and floating[J]. Acta Aeronautica et

Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 524530.

[3] 宋长福. 民机机身结构入水冲击问题数值仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

SONG Changfu. Numerical study on water impact of transport fuselage structure[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.

[4] KÁRMÁN T. The impact on seaplane floats during landing[R]. Washington DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1929.

[5] WAGNER V H. Phenomena associated with landing and sliding on liquid surfaces[R]. Washington DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1929.

[6] EROSHIN V A, ROMANENKOV N I, SEREBRYAKOV I V, et al. Hydrodynamic forces produced when blunt bodies strike the surface of a compressible fluid[J]. Fluid Dynamics, 1980, 15(6): 829–835.

[7] BELYTSCHKO T, MULLEN R. Two-dimensional fluid-structure impact computations with regularization[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1981, 27(2): 139–154.

[8] ANGHILERI M, SPIZZICA A. Experimental validation of finite element models for water impacts [C]//16th International VLSI Multilevel Interconnection Conference. Santa Clara, 1995.

[9] OGER G, DORING M, ALESSANDRINI B, et al. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries[J]. Journal of Computational Physics, 2006, 213(2): 803–822.

[10] 钱勤, 黄玉盈, 王石刚, 等. 任意的拉格朗日欧拉边界元—有限元混合法分析物体撞水响应[J]. 固体力学学报, 1994, 15(1): 12–18.

QIAN Qin, HUANG Yuying, WANG Shigang, et al. Fluid-structure impact analysis with a mixed method of arbitrary Lagrangian–Eulerian BE and FE[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1994, 15(1): 12–18.

[11] 贺谦, 陈效鹏, 李磊, 等. 飞机水面降落的机身载荷研究[J]. 强度与环境, 2009, 36(4): 28–33.

HE Qian, CHEN Xiaopeng, LI Lei, et al. Research on the load of aircraft landed on water[J]. Structure & Environment Engineering, 2009, 36(4): 28–33.

[12] 张韬, 李书, 江翔, 等. 民用飞机水上迫降分析模型和数值仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 392–394.

ZHANG Tao, LI Shu, JIANG Xiang, et al. Analysis model and numeral simulation for civil plane ditching[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(3): 392–394.

[13] 罗琳胤, 杨仕福, 吕继航. 水陆两栖飞机着水响应模型与数值分析[J]. 机械设计, 2013, 30(8): 86–89.

LUO Linyin, YANG Shifu, LÜ Jihang. Analysis and numeral simulation of water landing response model for amphibian[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(8): 86–89.

[14] 曾毅, 杨仕福, 罗琳胤. 水陆两栖飞机波浪着水响应研究[J]. 机械设计, 2015, 32(9): 96–100.

ZENG Yi, YANG Shifu, LUO Linyin. The structural response of amphibian landing onto wave[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(9): 96–100.

[15] 杨仕福, 曾毅, 陈吉昌. 考虑气动力作用的水上飞机着水响应特性[J]. 机械设计, 2019, 36(7): 63–67.

YANG Shifu, ZENG Yi, CHEN Jichang. Study on the aircraft's

water-landing response with the aerodynamic force taken into account[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(7): 63–67.

[16] HU Q, WANG M Z, WU B, et al. The application of overset grid in the analysis of impact loads of amphibious aircraft during landing on the water[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 751(1): 012032.

[17] SUN F, WANG M Z, ZHANG J X, et al. Numerical simulation method for wave surface landing of seaplane[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 751(1): 012061.

[18] SETH A, LIEM R P. Amphibious aircraft developments: Computational studies of hydrofoil design for improvements in water-takeoffs[J]. Aerospace, 2020, 8(1): 10.

[19] HUGHES K, VIGNJEVIC R, CAMPBELL J, et al. From aerospace to offshore: Bridging the numerical simulation gaps—Simulation advancements for fluid structure interaction problems[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 61: 48–63.

[20] BUSCH C, LANGE N A. Ditching of aircrafts: simulations and experimental investigation[C]. Ecole Centrale Marseille: Airbus/TUHH presentation, Florida, 2007: 1–29.

[21] BISAGNI C, PIGAZZINI M S. Modelling strategies for numerical simulation of aircraft ditching[J]. International Journal of Crashworthiness, 2018, 23(4): 377–394.

[22] ZHAO Y K, QU Q L, LIU P Q. Numerical study on the extreme impact load of wavy-water ditching[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 816(1): 012003.

[23] SIEMANN M H, KOHLGRÜBER D, VOGGENREITER H. Numerical simulation of flexible aircraft structures under ditching loads[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2017, 8(3): 505–521.

[24] SIEMANN M H, LANGRAND B. Coupled fluid-structure computational methods for aircraft ditching simulations: Comparison of ALE–FE and SPH–FE approaches[J]. Computers & Structures, 2017, 188: 95–108.

[25] BOTTOMLEY G H. The impact of a model seaplane floats on water[R]. Reports and Memoranda Washington DC: NACA, 1919.

[26] CHUANG S. Investigation of impact of rigid and elastic bodies with water[R]. Washington: NASA, 1970.

[27] ZHAO R, FALTINSEN O, AARSNES J. Water entry of arbitrary two-dimensional sections with and without flow separation[C]. Washington: National Academy Press, 1996

[28] 戴仰山, 沈进威, 宋竞正. 船舶波浪载荷[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

DAI Yangshan, SHEN Jinwei, SONG Jingzheng. Ship wave loads[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

[29] THOMPSON W. Model ditching investigation of the Boeing 707 jet transport[R]. Warrendale: SAE Technical Paper Series, 1955.

[30] 黄淼, 廉滋鼎, 左仔滨, 等. 水陆两栖飞机模型水池波浪试验研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(1): 74–78.

HUANG Miao, LIAN Ziding, ZUO Zaibin, et al. Study of scaled model tank tests in waves of an amphibian[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(1): 74–78.

[31] 褚林塘, 孙丰, 廉滋鼎, 等. 水陆两栖飞机船体着水载荷

数值与试验分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(15): 211–215.

CHU Lintang, SUN Feng, LIAN Ziding, et al. Numerical simulation and tests for water load of amphibious aircraft hulls[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(15): 211–215.

[32] 孙丰, 吴彬, 廉滋鼎, 等. 着水姿态对大型水陆两栖飞机着水性能的影响[J]. 船舶力学, 2019, 23(4): 397–404.

SUN Feng, WU Bin, LIAN Ziding, et al. Influence of pitch angle on water-entry performance of large-scale amphibian aircraft hull[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(4): 397–404.

[33] IAFRATI A, GRIZZI S. Cavitation and ventilation modalities during ditching[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(5): 052101.

[34] 吕继航, 曾毅, 杨荣. 大型水陆两栖飞机的动力学响应特性[J]. 航空制造技术, 2020, 63(20): 64–69.

LÜ Jihang, ZENG Yi, YANG Rong. Dynamic response characteristics of large amphibious aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(20): 64–69.

[35] CLIMENT H, AREVALO F, VIANA J T, et al. Ditching loads numerical and experimental alternatives[C]. International Forum on Aerolasticity and Structural Dynamics. Georgia, 2019.

[36] KIM Y, AHN I G, PARK S G. Extraction of the mode shapes of a segmented ship model with a hydroelastic response[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2015, 7(6): 979–994.

[37] MARÓN A, KAPSENBERG G. Design of a ship model for hydro-elastic experiments in waves[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2014, 6(4): 1130–1147.

[38] 陈占阳, 桂洪斌, 任慧龙. 舰船非线性设计值的水弹性直接计算方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(1): 37–42.

CHEN Zhanyang, GUI Hongbin, REN Huilong. Direct calculation method for nonlinear design loads of warship based on hydroelasticity theory[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(1): 37–42.

[39] 吴有生, 邹明松, 丁军, 等. 波浪及海洋水声环境中的船舶水弹性力学理论与应用[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(9): 6–19.

WU Yousheng, ZOU Mingsong, DING Jun, et al. Three-dimensional hydroelasticity theory of ships in waves and ocean-acoustic environment with applications[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2018, 48(9): 6–19.

[40] VAN BRUMMELEN E H. Added mass effects of compressible and incompressible flows in fluid-structure interaction[J]. Journal of Applied Mechanics, 2009, 76(2): 1.

[41] DE LA TORRE O, ESCALER X, EGUSQUIZA E, et al. Numerical and experimental study of a nearby solid boundary and partial submergence effects on hydrofoil added mass[J]. Computers & Fluids, 2014, 91: 1–9.

[42] FALTINSEN O M. Hydrodynamics of high-speed marine vehicles[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

[43] 季斌, 程怀玉, 黄彪, 等. 空化水动力学非定常特性研究进展及展望[J]. 力学进展, 2019, 49(0): 428–479.

JI Bin, CHENG Huaiyu, HUANG Biao, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation[J].

Advances in Mechanics, 2019, 49(0): 428–479.

[44] WU Q, HUANG B, WANG G Y, et al. Experimental and numerical investigation of hydroelastic response of a flexible hydrofoil in cavitating flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 74: 19–33.

[45] WU M K, MOAN T. Linear and nonlinear hydroelastic analysis of high-speed vessels[J]. Journal of Ship Research, 1996, 40(2): 149–163.

[46] MA S, DUAN W Y, SONG J Z. An efficient numerical method for solving ‘2.5D’ ship seakeeping problem[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(8–9): 937–960.

[47] TIAN C, WU Y S. The second-order hydroelastic analysis of a SWATH ship moving in large-amplitude waves[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 18(6): 631–639.

[48] TAKAMI T, IJIMA K. Numerical investigation into combined global and local hydroelastic response in a large container ship based on two-way coupled CFD and FEA[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020, 25(2): 346–362.

[49] CABOS C, IHLENBURG F. Vibrational analysis of ships with coupled finite and boundary elements[J]. Journal of Computational Acoustics, 2003, 11(1): 91–114.

[50] SUN T Z, WEI Y J, WANG C, et al. Three-dimensional numerical simulation of cryogenic cavitation flows of liquid nitrogen around hydrofoil[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014, 18(12): 1434–1443.

[51] 汪雪良, 顾学康, 祁恩荣, 等. 船舶波浪载荷预报方法和模型试验研究综述[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(6): 20–28.

WANG Xueliang, GU Xuekang, QI Enrong, et al. A state-of-the-art review on study of prediction methods and model test of wave-induced loads of vessels[J]. Ship Science and Technology, 2008, 30(6): 20–28.

[52] 焦甲龙, 赵玉麟, 张皓, 等. 船舶波浪载荷与砰击载荷的大尺度模型水弹性试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(20): 229–236.

JIAO Jialong, ZHAO Yulin, ZHANG Hao, et al. Study on wave loads and slamming loads of a ship by large-scale model hydroelastic experiment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(20): 229–236.

[53] CHEN Z Y, GUI H B, DONG P S, et al. Numerical and experimental analysis of hydroelastic responses of a high-speed trimaran in oblique irregular waves[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2019, 11(1): 409–421.

[54] 徐文岷, 李凯. 民用飞机弹性结构水上迫降试验载荷研究[J]. 航空学报, 2014, 35(4): 1012–1018.

XU Wenmin, LI Kai. Research on civil aircraft elastic structure ditching test load[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(4): 1012–1018.

通讯作者: 吕继航, 正高级工程师, 硕士, 研究方向为气动弹性力学和结构动力学。

(责编 七七)

引文格式: 张弛, 王俊升, 李鑫, 等. 耐腐蚀镁合金的成分设计方法研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 85-98, 118.

ZHANG Chi, WANG Junsheng, LI Xin, et al. Research progress on design of corrosion resistant Mg alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 85-98, 118.

耐腐蚀镁合金的成分设计方法研究进展

张弛¹, 王俊升^{1,2}, 李鑫¹, 田光元¹, 王硕¹, 苏辉¹

(1. 北京理工大学材料学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学前沿交叉科学研究院, 北京 100081)

[摘要] 镁合金因其密度低, 轻量化效果明显, 矿产资源丰富, 在航空航天等领域得到了广泛的应用, 成为“21世纪新型绿色材料”。但镁的电化学活性强, 耐腐蚀性能差, 一直限制着镁合金的大规模应用。目前, 探索镁合金的腐蚀机理, 设计新型耐蚀镁合金的成分已经引起人们的广泛关注。本文以耐腐蚀镁合金的成分设计方法研究进展为题进行了讨论, 主要阐述了镁的腐蚀反应机理和异常析氢现象等镁合金腐蚀机制, 以及电偶腐蚀、点蚀、丝状腐蚀、应力腐蚀等腐蚀类型, 并总结了不同合金元素对镁合金耐腐蚀性能的影响。重点概述了第一性原理模型、分子动力学以及 X 射线计算机断层扫描技术(X-CT)在镁合金腐蚀方面的应用, 期望能够为耐腐蚀镁合金的成分设计提供帮助。

关键词: 镁合金; 腐蚀; 合金元素; 第一性原理; 分子动力学; X-CT

Research Progress on Design of Corrosion Resistant Mg Alloys

ZHANG Chi¹, WANG Junsheng^{1,2}, LI Xin¹, TIAN Guangyuan¹, WANG Shuo¹, SU Hui¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

[ABSTRACT] Mg alloys have been widely used in aerospace and other fields because of its low density, light-weighting effects and abundant mineral resources. It has become a “new green material of the 21st century”. However, Mg has strong electrochemical activity and is prone to corrosion, which has been limiting the wide application of magnesium alloys. At present, exploring the corrosion mechanism of Mg alloys and designing the composition of corrosion-resistant Mg alloys have attracted world-wide attention. This review discusses the research progress on the design of corrosion resistant of Mg alloys. It mainly describes the corrosion mechanism of Mg alloy and anomalous hydrogen reaction phenomenon, as well as the corrosion types such as galvanic corrosion, pitting corrosion, exfoliation corrosion and stress corrosion. And the effects of different alloying elements on the corrosion resistance of Mg alloy are summarized. Focuses on the application of first-principles, molecular dynamics, and X-CT technology in Mg alloy corrosion, which is expected to provide principles for the chemistry design of corrosion-resistant Mg alloys.

Keywords: Mg alloys; Corrosion; Alloying elements; First principles; Molecular dynamics; X-CT

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.085

镁合金是工程应用中最轻的结构材料, 由于其具有低密度、高比强度、高阻尼能力和易回收等优异的物理和化学性能, 已经在航空航天、汽车、电子工业等领域得到了广泛应用, 被认为是“21世纪绿色工程材料”^[1-4]。

据统计, 飞机上使用的镁合金每减重 1 kg, 可节省 1150 美元的燃油消耗^[5]。目前, 美国的 B-52H 轰炸机, 在起落架机轮、操纵系统等结构上使用镁合金材料超过 900 kg^[6]; 波音 727 飞机中包含大约 1200 个镁合金零件^[3]。但是,

镁的标准电化学势较低 (-2.37 V),在航空航天等领域的极端工作环境下具有较差的耐蚀性能,极大地限制其大规模应用^[7]。

镁合金耐腐蚀性差主要是因为合金内分布不均的第二相或杂质颗粒 (Fe, Ni, Cu 和 Co 等) 容易引发电偶腐蚀,以及合金表面的保护膜稳定性差^[8]。目前,学者们提出了许多提高镁合金耐腐蚀性能的技术和方法,如表面改性技术,塑性加工变形技术等^[7,9]。近年来,元素合金化逐渐成为提高镁合金耐腐蚀性能的有效方法^[10],其主要通过调节合金内第二相的数量、种类和晶粒尺寸大小,以及控制杂质元素的含量来降低微电偶腐蚀发生的可能性,从而提高镁合金的耐腐蚀性能。本文主要从电化学方面回顾合金元素对镁合金腐蚀行为的影响,并总结近年来关于镁合金腐蚀动力学方面的第一性原理模型,期望为新型耐蚀镁合金成分设计提供指导。

1 镁合金的腐蚀机制

通常,镁及其合金的耐腐蚀性较差,主要有两个方面的原因^[7-8,10-19]。

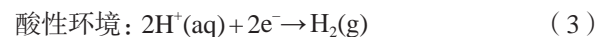
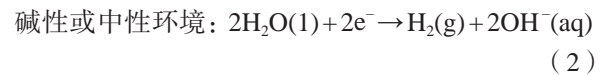
(1) 镁表面形成的薄膜保护性较差。在干燥环境中,镁的表面会形成一种薄的氧化物膜 (MgO)^[12]。在潮湿水环境中,镁表面膜由内部致密的 MgO 纳米晶和顶部疏松多孔的 Mg(OH)₂ 层组成^[13]。在酸性条件下,镁表面形成的保护膜易溶于水^[14]。在强碱环境下, Mg(OH)₂ 微溶于水,可以起到一定的保护作用。但当溶液中出现离子时,如 Cl⁻、SO₄²⁻ 以及 NH₄⁺ 等会对镁合金的腐蚀性能产生较大的影响^[15]。离子浓度越高,腐蚀速率越快,尤其是离子半径小的活性阴离子,如 Cl⁻,它能够优先地、有选择地吸附在表面膜上,将表面的 Mg(OH)₂ 保护性膜层转变为易溶的 MgCl₂,破坏膜层结构,促进镁腐蚀的发生^[16]。不仅如此,当表面膜被破坏后,Cl⁻ 还能继续与镁基体的表面原子作用形成化学键,降低表面镁原子的稳定性,使表面镁原子快速溶解^[17]。近年来,Cao 等^[18] 发现碱性环境下 NH₄⁺ 能够穿过疏松多孔的 Mg(OH)₂ 层,并与内层的 MgO 发生反应,破坏膜结构,导致高速腐蚀的发生。在标准人造海水中,Cao 等^[19] 发现 SO₄²⁻ 可以在镁表面膜吸附,并取代部分 Cl⁻。由于 SO₄²⁻ 对镁的腐蚀作用要比 Cl⁻ 弱,纯镁在人造海水中的腐蚀速率比在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中降低约一半,此现象为部分阴离子和阳离子在人造海水中对镁腐蚀抑制作用提供了可靠依据。

根据 Pilling-Bedworth 原理,即在氧化过程中,镁合金表面形成的膜体积 V_{MO} 比生成这些膜所消耗的金属体积 V_M 大 (V_{MO}/V_M>1) 时,表面膜具有保护作用。镁

合金表面形成的表面膜 PB 比为 0.81,小于 1,不能完全覆盖表面^[15-16]。即使某些元素 (如 Ti、Al 和 Cr) 可以形成 PB>1 的氧化物,但其氧化物在水中的溶解度很高,保护膜容易被破坏,造成了镁合金与腐蚀介质接触,导致其耐蚀性能较差^[13]。

(2) 镁的电化学活性强^[8],在镁基体与第二相或杂质之间存在电位差,混合后容易发生微电偶腐蚀,在镁表面会发生阳极溶解并形成 Mg²⁺,对应的阴极发生还原反应形成氢气。镁合金的腐蚀主要分为镁的阳极溶解反应和阴极析氢反应,这两个动力学过程决定了镁合金腐蚀速率的快慢。

镁合金的腐蚀是一个动力学问题,在水环境中的腐蚀机理十分复杂,到目前为止,普遍认为镁及镁合金溶液腐蚀机制是一种物理与化学过程,如图 1 所示。式 (1) 为镁的阳极溶解,产生的电子在阴极反应 (式 (2) 或 (3)) 中被消耗,从而生成氢气,其反应式为^[20-22]



在腐蚀反应过程中,镁合金的阳极反应和阴极反应动力学可由 Butler-Volmer 方程表示^[23]

$$i_{\text{Anode}} = i_0 \cdot \left\{ \exp \left[\frac{\alpha n F}{RT} (U - U_e) \right] - \exp \left[-\frac{\beta n F}{RT} (U - U_e) \right] \right\} \quad (4)$$

$$i_{\text{Cathode}} = i_0 \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{\beta n F}{RT} (U - U_e) \right] - \exp \left[\frac{\alpha n F}{RT} (U - U_e) \right] \right\} \quad (5)$$

式中, i_{Anode} 和 i_{Cathode} 分别为镁阳极反应和阴极反应的电流密度; i_0 为平衡交换电流密度; n 、 F 、 R 和 T 分别为电极反应得失的电子数、法拉第常数、理想气体常数和温度; α 和 β 为阳极反应和阴极反应的传递系数; U 和 U_e 为外加电极电位和平衡电极电位。

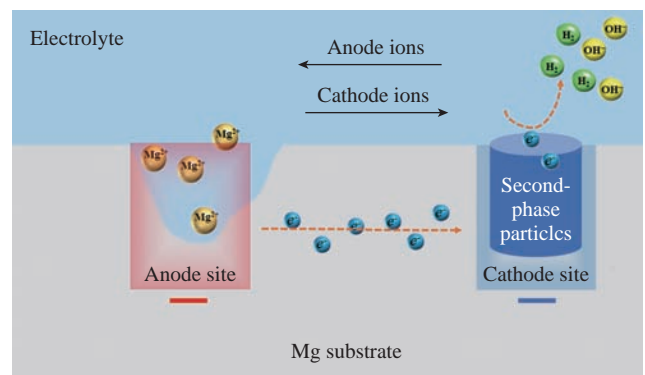


图 1 镁基体的腐蚀反应机理

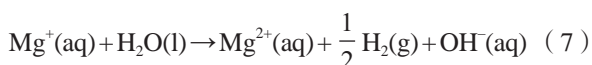
Fig.1 Illustration of the corrosion reaction mechanism on Mg substrate

从方程式中可以发现镁阳极反应电流密度呈指数升高,阴极析氢反应电流密度呈指数下降。然而,试验上观察到镁阳极溶解速率升高的同时阴极反应速率也会增加,这种现象被称为镁合金阳极极化的异常析氢现象^[24]。即在镁阳极溶解反应过程产生的一部分电子不通过恒电位仪达到对电极(阴极),直接在镁的阳极部位用于析氢反应,不遵循法拉第定律,无法通过电化学方法计算阳极极化镁的溶解量。目前对镁阳极极化异常析氢现象的解释主要有3种理论。

(1) 单价镁(Mg^+)理论^[25-26]。该理论认为单价镁离子 Mg^+ 是镁阳极溶解反应的一个中间产物,即金属镁首先被氧化成一价镁离子:



由于单价镁离子不稳定,寿命极短,很快就会被水进一步氧化成二价镁离子,即



根据这两个反应可以看出,随着镁溶解速率的增加,产生更多的单价镁离子 Mg^+ ,与水反应增加了析氢速率,从而解释了镁阳极溶解过程中的异常阳极析氢现象。但是单价镁离子 Mg^+ 是一个假设模型,如果在溶液中存在,它将具有小于微秒级的寿命及较强的活性^[24]。目前,在试验方面还没有直接证据能够证明单价镁的存在。

(2) 表面腐蚀产物与杂质聚集理论^[27-30]。试验中观察到镁在NaCl等溶液中容易发生腐蚀,在其表面会有腐蚀产物的形成与生长以及杂质元素的富集,它们对析氢反应具有催化作用。但是在酸性条件下,表面薄膜几乎不存在,仍然能够观察到异常析氢的现象^[28]。同时,杂质在表面的聚集效率较低,试验上通过对高纯度的镁腐蚀发现,随着阳极极化的进行,析氢反应速率仍然很高^[29-30],出现异常析氢现象。这说明表面腐蚀产物与杂质元素富集对镁阳极极化过程中的异常析氢现象贡献有限。

(3) 催化活性增强理论^[24,31]。根据式(4),描述阴极反应动力学的Butler-Volmer方程可知,当外加电位远大于平衡电位时,镁的腐蚀主要受交换电流密度的影响,试验表明,随着阳极电流或者电位的增加,表面腐蚀产物和富集的杂质元素对腐蚀的作用相对较小^[27-30],即镁阳极极化过程中增加的交换电流密度作为析氢速率加快的原因。

交换电流密度反映一个特定的界面体系的动力学性质(包括氧化还原半反应种类以及电极表面特征)。通常,在平衡的纯活化控制的界面体系中,假定其交换电流密度为常数。然而,镁表面的阳极溶解反应是一个

非平衡过程,催化活性增强理论表明,在镁阳极极化过程中,表面镁原子快速溶解,阴极反应的活性持续增加,引起阴极反应动力学公式中的交换电流密度持续增大,最终产生异常析氢现象。这种异常析氢现象是在阳极溶解的区域发生的,单位时间内增加的腐蚀面积越多,交换电流密度增加越大,析氢速率加快^[24]。这表明镁的阳极表面对析氢具有催化作用。然而,目前还缺乏对镁异常析氢现象更全面的认识,需要更多的试验证据来验证。

综上,镁的溶解机理是一个复杂的过程,其中不同的参数(如阳极溶解区域、腐蚀产物形成和表面杂质元素聚集)都可能影响腐蚀过程。近年来,一些试验和模拟上的相关研究表明^[32-34],异常析氢反应受阳极溶解区域的影响,但仍需深入研究镁阳极极化过程中所有影响因素对异常析氢的影响,更进一步解释镁腐蚀的作用机理。

2 镁合金的腐蚀类型

2.1 电化学腐蚀

目前常见的镁合金中,存在多种腐蚀的类型,如电偶腐蚀,点蚀,丝状腐蚀等,其腐蚀机理一般会涉及一些电化学的腐蚀过程,因此本文把与电化学有关的镁合金腐蚀行为归为一类并分别阐述。

(1) 当合金元素超出镁基体的最大固溶度时,通常会与镁形成不同种类的第二相($Mg_{17}Al_{12}$, $MgZn_2$, Mg_3As_2 , Mg_2Ge , Mg_2Si , $Mg_{12}Ce$, $Mg_{24}Y_5$ 等)^[11,24]。但镁的电化学活性强,镁基体与合金元素形成的第二相之间存在电位差,常作为阳极相和阴极相产生腐蚀电流并造成镁合金腐蚀,此腐蚀现象称为微电偶腐蚀^[35-38]。图2展示了镁合金体系中常见金属间化合物与镁基体间的电极电位差^[8,36-38]。可以发现,除 Mg_2Ca 等少数第二相以外,大多数第二相的腐蚀电位都比纯镁高。因此,通常条件下镁合金中的镁基体会发生阳极溶解,而第二相则会作为局部阴极促进腐蚀,每种第二相引起的阴极反应动力能力随其组成、结构和分布状态的不同而变化。值得注意的是,近年来发现Mg-RE合金中的部分第二相能够充当微阳极相(如 $Mg_{12}La$),会在初始腐蚀阶段优先溶解^[10]。Azzeddine等^[10]提出镁合金中可能发生腐蚀的3个过程:阳极相的溶解、Mg基体的溶解和随着溶解的加剧出现的点蚀^[33]。

从腐蚀的角度来看,镁的电化学活性较强,合金元素无论固溶于镁中或形成第二相,均会导致镁合金表面的阴极和阳极的局域化,电化学分布不均匀,导致严重的电偶腐蚀。另外,影响电偶腐蚀的因素还有很多,如第二相的种类、含量、晶体取向、晶粒尺寸以及工作环境(pH值、

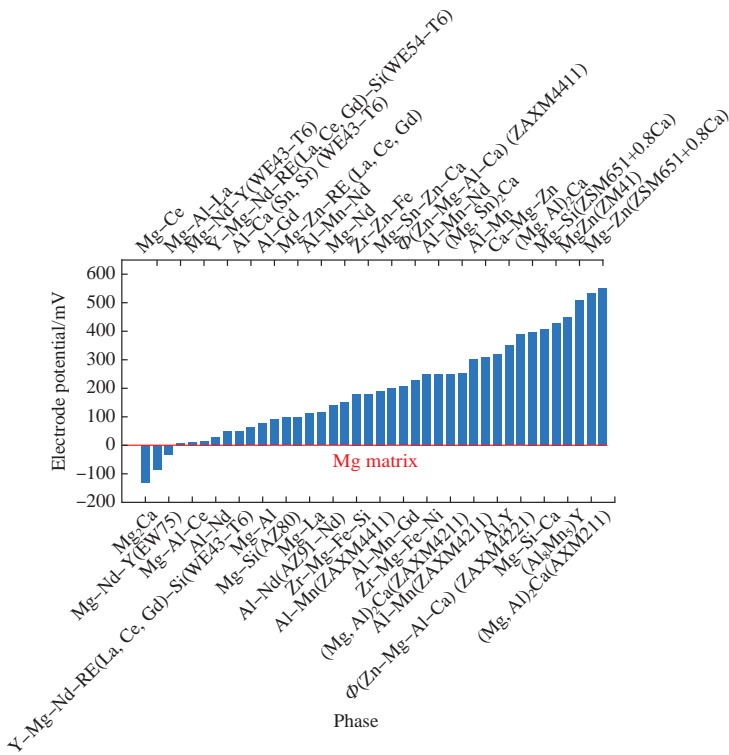


图2 镁合金中不同金属间化合物与镁基体间的电极电位差 [8,36-38]
 Fig.2 Volta-potential difference of different intermetallics with matrix for magnesium alloys [8,36-38]

温度等条件)等。因此,设计新型耐腐蚀镁合金逐渐成为—种挑战。可以通过合理设计镁合金中添加合金元素的含量和种类,调控镁基体和第二相之间的电位差,以此获得耐腐蚀性能强的镁合金。如 Zhao 等 [39] 通过密度泛函理论 (DFT) 计算镁合金中不同含量 Sc 元素和 Y 元素的功函数,来反映纯镁和掺杂元素后镁合金间的电势差,从而设计制备了一种高耐蚀的 Mg-Sc-Y 三元包晶合金,同时也为理论指导试验设计提供了一个新思路。

(2) 镁的点蚀是一个表面膜被破坏和电化学腐蚀的过程,它是镁合金中—种常见的局部腐蚀形式,因为孔径小、腐蚀速率快和容易被表面产物覆盖等原因,在检测中很难被发现 [35,40],产生的主要原因是 [35,40-41]: 镁合金表面形成的保护膜疏松多孔,表面存在—些非金属夹杂物以及位错等缺陷,镁合金的表面膜在氯盐等环境下容易被破坏;裸露的镁基体与第二相或钝化膜之间形成大阴极-小阳极型原电池,且阴极与阳极的面积比相对较大,镁基体很快被腐蚀成小孔。因此,点蚀的发生主要与保护膜的稳定性,外部环境和第二相有关。如在 Mg-0.41Dy 和 Mg-1.43La 的合金中 [10],镁合金表面分别被 Dy₂O₃ 和 La₂O₃ 的氧化膜所覆盖,前者的形成焓低、结构较稳定,后者的氧化膜更容易被破坏,导致腐蚀的发生。而添加 Li 元素则能够在镁合金表面形成稳定的碳酸盐保护膜,可以有效预防点蚀的出现 [42]。Li 等 [43] 则

在 Mg-0.9Zn-1.6Y 合金的基体中观察到高密度的腐蚀点 [42],发现腐蚀优先出现在镁基体和第二相界面处。

(3) 丝状腐蚀 [35,41,44-46] 是由穿过晶界表面运动的活性腐蚀电池引起的,头部是阳极,尾部是阴极,在保护膜下的金属表面上移动且具有明显的蠕虫状外观。镁的丝状腐蚀可以看作是一个电化学腐蚀的过程,并伴随着保护膜的破坏。其主要在—些薄弱部位出现,如晶界、缺陷和其他应力集中的部位,并沿着与镁基体相邻的第二相开始。Williams 等 [45] 通过原位观察纯镁在盐水中的腐蚀行为,并提出了一种丝状腐蚀模型,认为随着腐蚀丝的延伸,腐蚀丝前端镁基体会发生阳极溶解反应,而被腐蚀的区域为阴极。此时头部的镁基体逐渐转变为腐蚀产物 Mg(OH)₂ 并沉积在表面,失去阳极活性转化为阴极,与薄膜下未发生腐蚀的镁基体组成新的微电偶,使丝状腐蚀不断扩展 [44]。目前学者们通过试验在许多镁合金中观察到的丝状腐蚀的现象,如 Mg-Al-Gd、Mg-Mn-Ca 等 [41]。Bahmani 等 [8,47] 发现在 Mg-Mn-Ca 合金中, Mg₂Ca 可以作为阳极相替代镁基体的溶解,延缓丝状腐蚀的发生;当 Mg₂Ca 相完全溶解后,镁基体无法得到保护,腐蚀会逐渐在镁合金表面扩展。

2.2 应力腐蚀

镁合金应力腐蚀 [9,16,48] 是一个电化学腐蚀和机械破坏的过程。是指外加应力作用下,镁合金因局部塑性变形而导致表面膜发生破裂,裸露出镁合金表面与溶液接触发生快速溶解,形成局部腐蚀并引发应力集中,促进了裂纹的萌生和扩展。材料应力腐蚀的基本条件 [16]: (1) 是材料在冶炼或构件装备过程中存在残余应力; (2) 需要有对应力腐蚀敏感的介质,即构成应力腐蚀需要材料和介质相互结合,如镁合金在含有 Cl⁻ 等活性阴离子介质和内应力共同作用下,容易发生应力腐蚀开裂,以及含 Al 的镁合金具有强烈的应力腐蚀敏感性。Luo 等 [49] 发现 Mg-6Gd-2Y-0.2Zr 合金很容易在由小晶粒组成的区域腐蚀。本文提出小晶粒的晶界多,在外加拉应力下会造成更多的区域产生拉伸应力,引发应力腐蚀。

目前,学者们对镁合金应力腐蚀机制进行了大量研究,认为除了外界环境因素外,应力腐蚀开裂主要由晶界上析出的应力敏感的第二相(如 Mg₁₇Al₁₂)以及裂纹尖端易出现的微电偶腐蚀增大镁合金应力腐蚀的敏感性 [16]。

其中裂纹尖端处出现的微电偶腐蚀机制主要分为阳极溶解机制和氢致脆化机制 [9]。前者是外加应力作用下,表面被破坏,裸露的镁基体发生阳极溶解,促使裂纹沿第二相基体扩展,直至断裂失效;后者则是认为镁合金在阴极析氢并在材料的缺陷处富集,导致裂纹发生脆化,在外加应力条件下容易发生开裂。

综上所述,镁合金腐蚀的类型都有一个共同的特

点,在镁合金的保护膜被破坏后,腐蚀的发生主要是由镁基体相与第二相之间存在的电位差引起的不同局部电流密度造成的,所以控制镁合金中合金元素的含量以及掌握它对镁合金第二相的形成和分布等因素的影响是至关重要的。

3 元素对镁合金腐蚀行为的影响

元素对镁合金的耐腐蚀性能有很大的影响,镁合金中存在不同种类的元素,对镁合金耐腐蚀作用的差异化较大。因此,合理的添加元素对提高镁合金的耐腐蚀性能至关重要。镁合金中元素对耐腐蚀性能的影响主要与其在镁中的溶解度有关。不同溶解度的元素,在镁合金中会形成不同种类的第二相(金属间化合物、颗粒、杂质等),它们对镁合金的腐蚀速率具有不同的影响。目前,学者们探索了不同种类元素在镁中的最大溶解度及其对镁合金耐腐蚀性能的作用。根据元素在镁合金中溶解度,分别介绍其对镁合金腐蚀行为的影响。

(1) 完全不溶于镁的元素。如 Fe 元素,不能固溶于镁,它会以金属铁的形式分布于镁的晶界上,并作为阴极与镁基体形成微电偶,降低镁的耐腐蚀性能。目前,试验上发现可以通过添加 Mn 元素来降低 Fe 元素在镁中的腐蚀作用。主要是因为 Mn 能够包裹镁中的 Fe 元素,实现“清除杂质”的功能。这个能力主要与 Fe/Mn 在材料中的比例有关^[50],须在 0.032 的范围内^[51],而较大的 Fe/Mn 比会急剧增加合金的腐蚀速率^[52]。

(2) 在镁中形成固溶体的元素。当添加的合金元素低于它们在镁中的最大溶解度时,可以与镁形成固溶体,影响镁的耐腐蚀性能,如 Cd、Sn、Y、Ca、Gd、Ga、In 等元素^[53-59]。当元素固溶于镁时,Liu 等^[54]发现 Pb 和 Sn 能显著降低镁的阴极反应速率,提高镁的耐腐蚀性能。Zhao 等^[39]通过 DFT 分别计算固溶 Sc 或 Y 元素的镁合金功函数,发现两者间的功函数差值较小,可以有效减缓镁合金中的电偶腐蚀作用,并在此基础上设计出新型的耐腐蚀 Mg-Sc-Y 合金。另外,As 元素还能够固溶镁表面富集的纯铁相中,能够有效抑制富铁相的阴极析氢反应速率,减缓镁合金的腐蚀^[56-59]。

(3) 与镁形成金属间化合物的元素。当添加的元素超过在镁中的最大溶解度时,合金元素会与镁形成金属间化合物。然而,镁合金中形成的金属间化合物(第二相)与镁基体相存在电位差,会形成腐蚀电流,导致镁合金腐蚀产生。

除了少数第二相外(Mg₂Ca 相),大多数合金元素形成的第二相电极电位比纯镁高^[8,24],容易作为阴极相加速镁合金腐蚀。如 Y、Sn、Ce、Cu、Al、Ni、Co、Zn、Nd 等元素可以在镁合金中与镁形成不同种类的第二

相: Mg₂₄Y₅、Mg₂Sn、Mg₁₂Ce、Mg₂Cu、Mg₁₇Al₁₂、Mg₂Ni、MgCo₂、MgZn₂、Mg₁₂Nd 等^[24]。这些元素形成的第二相主要作为阴极相与镁基体组成微电偶,加速镁合金的腐蚀。它们之间的区别是不同种类相的自腐蚀电位和腐蚀电流存在差异^[24],会导致镁合金出现不同程度的腐蚀现象。如 Mg₁₇Al₁₂、Mg₂₄Y₅、Mg₁₂Ce 等第二相作为比较常见阴极相,它们在不同程度上促进了镁合金的阴极析氢反应^[11,60-61]。然而,Cu、Ni、Co 则能够在镁合金中形成较强局部阴极相 Mg₂Cu、Mg₂Ni 和 MgCo₂,严重影响镁合金的耐腐蚀性能,学者们通常把它们作为有害相^[11]。

同时也存在一些元素,它们与镁形成的第二相可以通过降低阴极反应速率,有效改善镁合金的耐腐蚀性能,如 Mg₂Ge、Mg₃As₂ 等^[24,54,56,57,62]。在模拟计算方面,Luo 等^[62]通过 DFT 发现 Mg₂Ge 相可以有效毒化纯镁中氢的吸附位点,抑制阴极析氢反应的进行。试验方面,Liu 等^[54]报道了质量分数 0.3% 的 Ge 元素添加到镁合金中形成的 Mg₂Ge 相可以有效抑制合金中的阴极反应动力学,极大地提高了镁合金的耐腐蚀能力。同时,学者们发现 Mg₃As₂ 也具有抑制镁合金阴极反应的潜力^[56,57]。

除此之外,Zn、As、Ca、Sm 等元素会优先与除镁之外的其他元素形成第二相^[11,57,63-65],以此控制镁合金耐腐蚀性能。如 Ca 元素可以与镁合金中的 Al 元素优先形成 Al₂Ca 相,作为阳极优先溶解保护镁基体,延缓腐蚀^[63]; As 元素在 AZ91 合金中能够与镁形成 Mg₃As₂ 相,抑制阴极反应,也能导致 Mg₁₇Al₁₂ 相含量下降且不连续,从而影响镁的耐腐蚀能力^[57]。

(4) 除了以上与溶解度有关的元素类型外,还存在一些元素,它们能调控表面膜稳定性。镁合金表面膜疏松,不利于腐蚀的防护。而元素添加到镁合金中形成稳定的保护膜也逐渐成为提高合金耐腐蚀能力的一种手段。不同合金元素在镁合金表面形成的保护膜特性有着巨大的差异,如 Li、Dy、La、Zr 等元素^[10,42]。Li 元素在含量较少时,其主要固溶在镁的基体相中;当 Li 含量(质量分数)大于 11% 时,会形成体心立方结构的镁基体相,且合金表面形成一层碳酸盐的保护膜^[42],该表面膜依靠某些临界合金溶解产生表面富集的锂,然后再通过化学反应形成主要由难溶的碳酸锂组成的表面膜,阻碍镁合金的阳极溶解。前文中提到的 Dy 和 La 元素,由于 Dy₂O₃ 和 La₂O₃ 的氧化膜稳定性不同,耐腐蚀能力也有区别^[10]。因此,镁合金表面的保护膜也是至关重要的,其腐蚀行为很大程度上取决于保护膜的特性。加强合金元素对保护膜调控方面的研究是一种提高耐腐蚀能力的有效途径。

综上所述,合金元素在镁合金中主要形成不同种类的第二相,对镁合金耐腐蚀性能的影响具有重要的作用。

目前对耐蚀镁合金开发的研究严重不足,虽然大量的研究报道了不同组分镁合金的腐蚀机理,但探索设计新合金的工作仍然局限于以前的合金体系,亟待新型镁合金的系统研究。

4 计算机模拟在镁合金腐蚀中的应用

镁合金中的合金元素种类繁多,学者们主要通过添加不同种类的合金元素来调控第二相的种类、数量、组织形态等,从而降低电偶腐蚀的影响,提高镁合金耐腐蚀性能。但相关镁合金腐蚀方面的研究大多数集中在试验测试方面。而试验成本高,周期长且试验过程中会受到周围复杂环境的影响,测量结果存在误差,在一定程度上限制了耐腐蚀镁合金的发展。计算模拟的方法能够从原子层面上分析解释镁合金腐蚀与材料成分、结构之间存在的关系,为试验上提供理论指导,从而节省大量时间和生产成本。

4.1 第一性原理在耐腐蚀镁合金中的应用

DFT 方法已成为用于表征镁合金腐蚀机理的一种有效工具,如表 1 所示^[66],该方法能够很好地反映材料的原子结构和物理化学性质^[66],近年来得到了快速发展。在 DFT 计算方面,学者们计算了固溶后镁合金表面的功函数、空位形成能、氢吸附能和表面能等参数的变化来快速筛选可以提高镁合金耐腐蚀性能力的合金元素^[67],同时也建立了纯镁腐蚀的阴极析氢反应和阳极溶解反应模型,从获得的热力学和动力学数据来预测镁合金的腐蚀行为^[53,62,68]。

在阴极析氢方面,关于溶质原子对纯镁析氢反应速率的影响,学者们做了大量的研究。在 2005 年,Nørskov^[69]和 Greeley^[70]等基于第一性原理建立了析氢反应交换电流密度和氢原子吸附能的简单动力学模型。Taylor 等^[71]在此基础上开发了纯镁的电偶腐蚀模型,该模型与纯镁的试验极化曲线非常吻合。Zhang 等^[56]研究了合金元素在合金中对氢原子吸附能的影响,发现 As 和 Ge 等元素能够抑制阴极相的析氢反应速率。Ma

等^[68]利用第一性原理分析了酸性条件下纯镁腐蚀的 3 个重要析氢反应(Volmer 反应、Tafel 反应和 Heyrovsky 反应),发现镁腐蚀的析氢速率主要由氢原子吸附能决定。而在碱性环境下,罗哲^[72]提出镁的腐蚀主要由镁表面水的分解能垒、氢原子吸附能和羟基吸附能决定。

在阳极溶解方面,学者们主要偏向于研究合金元素对镁的功函数和表面原子键结合能的影响^[73-76],能够反映出表面材料的电子转移和溶解能力。Luo 等^[17,72]计算了局部电极电势和表面功函数筛选能够抑制镁基体阳极溶解的溶质原子,并建立了混合电位理论模型,分析了镁合金的电偶腐蚀行为。Ma 等^[53]利用第一性原理建立了镁基体阳极溶解反映过程中的电极电位和电流密度的关系,能够在一定程度上通过理论计算的方法实现宏观腐蚀行为的预测。除此之外,镁腐蚀行为非常复杂,其他因素也会影响腐蚀行为,如表面 Cl⁻ 的吸附^[17,76-77]、李晶界^[78-79]、晶向^[49,79-80]等。本文主要针对镁合金腐蚀行为的第一性原理计算模型进行归纳总结。

4.1.1 第一性原理的热力学计算

合金元素是影响镁合金腐蚀行为的最重要因素之一。合金元素的加入可以显著改变镁表面的物理和化学性能,主要改变镁表面原子结构和电子分布状态,从而对镁表面的热力学稳定性产生不同的影响^[81-85]。例如,合金元素的添加能够改变周围镁原子逃离表面所需的能量,在一定程度上能够反映镁表面的阳极溶解过程^[85]。而表面电子的重新分布,不仅能够影响镁表面的电偶极矩,引起镁电极电位的变化^[17,86],也可以影响表面 H 原子的吸附能,改变阴极析氢反应的速率^[81]。本节通过讨论表面能、替换能、功函数、空位形成能和 H 的吸附能,解释固溶元素对镁表面热力学稳定性的影响,以此来揭示合金元素对镁阳极溶解和阴极析氢反应的影响。

表面能和替换能常被用来评估固溶原子在固体表面的热力学稳定性,能够反映出合金元素固溶到表面的难易程度^[81,84]。较低的表面能或替换能表明原子更偏向于在表面固溶而不是偏聚^[81]。金属的表面能主要受表面电子密度影响^[87-88]。Skriver 等^[87]发现过渡态金属表面能随原子核外电子总数呈抛物线变化。学者们还提出表面能和功函数均与固体表面电子密度分布有关^[87-91],发现表面能与功函数在不同晶向下成反比,较高功函数的表面具有很强的束缚电子能力和低的表面活性,可能是引起合金表面能低的原因。

功函数被认为与腐蚀电位呈正相关,通过计算功函数可以达到预测腐蚀电位的目的^[72]。功函数是指电子从固体表面转移到真空处所需的最小能量,能够判定电

表 1 典型的 DFT 计算模拟方法^[66]

Table 1 Typical outputs of DFT calculation and its application^[66]

性质特征	应用
电子密度	功函数、化学键强度、表面电荷分布
势能	反应活化能、激活能
能带结构	原子轨道电子分析
平衡态晶体结构	晶体稳定结构、缺陷的预测
稳定吸附位点的测定	化学反应过程中原子稳定、亚稳态和过渡态位点预测

子从表面逸出的难易程度。Zhao 等^[39]通过 DFT 分别计算固溶 Sc 或 Y 元素的镁合金功函数,发现两者间的功函数差值较小,可以有效减缓镁合金中的电偶腐蚀作用,并在此基础上设计出新型的耐腐蚀 Mg-Sc-Y 合金。另外,功函数较低的镁表面,束缚表面的电子能力较弱,通常电子转移能力较强,且固溶元素周围的电子密度较大,这会影响一些表面反应发生改变,如 H/OH 的吸附、水的分解等^[81,85],影响镁表面的析氢反应。

功函数的变化不仅与表面电子转移的方向和数量有关,也主要受表面电子的重新分布控制^[86]。因此,合金元素的电负性在一定程度上能够影响功函数的变化^[85]。例如,当合金原子的电负性高于镁时,周围相邻的镁原子将电子转移给合金原子。这会引发合金原子带负电,使镁表面产生一个负的电偶极矩,从而提高功函数^[17,86]。需要注意的是,电负性较高的 As 和 Ge 元素,功函数变化不大甚至降低,主要是因为其具有较小的原子半径,在金属表面会向内部收缩,与金属表面产生一定的距离^[85]。这种现象对合金元素产生一个空间阻碍效应^[92],降低金属表面束缚电子的能力,导致功函数提升不明显。因此,可得功函数变化受合金元素的电负性和原子半径影响。

镁表面的阳极溶解过程主要包括电子的转移和原子脱离表面这两个过程^[72]。通过计算合金元素周围镁原子的空位形成能在一定程度上能够反映原子逃离表面所需要的能量,也可以作为判定镁表面阳极溶解过程的指标^[17,85]。其中空位形成能所需要的能量越大,表面镁原子越不容易逃离表面。镁表面固溶后的原子通过改变表面原子的结构排列和电子密度分布状态^[85],来改变固溶原子周围近邻的镁原子脱离表面所需的能量。如图 3 所示,为固溶 Al 元素后的镁表面原子坐标,可以

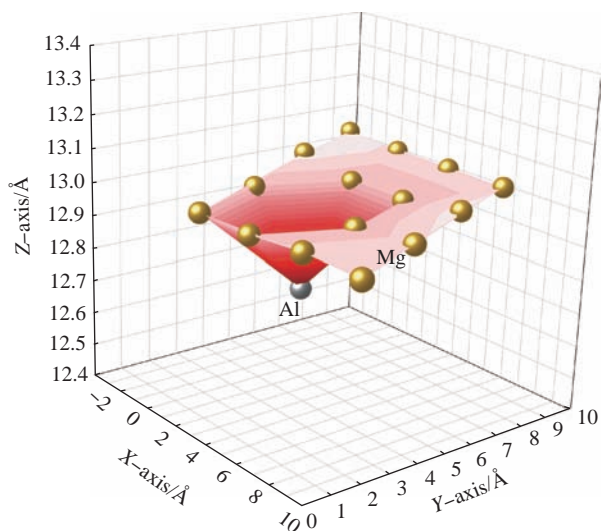
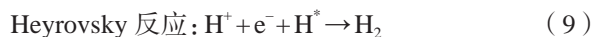


图 3 固溶铝元素的镁表面原子坐标^[85]

Fig.3 Atomic coordinates on Al-doped Mg surface^[85]

发现表面 Al 原子具有向晶体内部收缩的趋势。通过计算不同固溶原子与表面镁原子的垂直距离,发现这种空间距离的变化趋势与固溶原子的半径大小的分布趋势保持一致^[85]。原子半径越小,固溶原子越趋向于向晶体内部扩展。而这种表面原子结构的重新排列,会造成表面应力分布的改变,从而影响表面不同位点的镁原子(第一近邻和第二近邻)空位形成能发生改变。Ghosh^[93]也提出空位形成能受应变体积分量的影响。除此之外,作者团队通过计算差分电荷密度和晶体轨道哈密顿布居(Crystal orbital Hamilton population, COHP)^[94],发现固溶后的镁表面电子密度重新分布能够引起 Mg-X 键能的变化,造成表面镁原子逃离表面的能量发生变化^[17]。Ke 等^[66]提出计算原子间键的结合能是判断金属材料溶解速率快慢的关键。研究者通常把结合能设定为常数^[53],或者通过 DFT 计算不同原子间的键能来反映原子间相互结合能力^[17,72]。Luo 等^[17]通过 DFT 计算得到了元素在纯镁表面掺杂后原子键结合能力的强弱,发现 Zr 和 Mg 之间有很强的结合能力,为了使表面的镁原子逃离表面,则需要更高的能量,提高了镁的耐腐蚀能力。

镁合金的腐蚀过程包括阳极溶解和阴极析氢反应,前者涉及电子转移和表面原子的溶解,后者主要为 H 原子的吸附和脱附过程。阴极析氢反应在镁合金腐蚀中同样起着至关重要的作用,它具有 3 种基础反应,即 Volmer 反应、Heyrovsky 反应和 Tafel 反应,相关反应式如下^[68,72]。



式中, H^* 是表面吸附的氢原子。从式中可以看出,阴极析氢反应主要分为两步进行^[68]。第 1 种为酸性水溶液中的 H^+ 得到镁表面转移的电子,变成 H 原子吸附在电极表面,与 Volmer 反应有关;另一种为氢气的形成。两个吸附态的 H 原子相互靠近生成氢分子,或者溶液中的 H^+ 得到电子并与吸附态 H 原子结合形成氢分子,然后氢分子脱附形成氢气,即 Heyrovsky 或 Tafel 反应。因此,阴极析氢反应主要由 Heyrovsky 反应和 Tafel 反应控制^[68]。

无论是 Heyrovsky 反应或 Tafel 反应,氢原子在表面的吸附是析氢反应中必然存在的状态^[72]。近年来,大多数 DFT 计算模型通常计算材料表面氢的吸附自由能作为金属腐蚀速率的参考标准^[56,69,70]。当氢原子吸附能过大时,在表面吸附困难,需要克服较高的能量势垒,导致阴极反应速率下降;当 H 原子吸附能为负值, H 原子容易吸附在电极表面,但会导致 H 原子脱附困难。根据 Nørskov^[69] 和 Greeley^[70] 等的火山图可以发现,阴极析氢反应的交换电流密度与氢原子的吸附自由

能密切相关。当 H 原子吸附自由能接近于零时,交换电流密度最大,阴极析氢反应速率最快。因此,可以通过合金元素控制镁合金表面氢原子吸附能的大小,增加或减缓阴极位点的析氢反应速率,从而达到控制镁合金腐蚀速率的目的^[72]。在纯镁的(0001)表面, H 原子在 HCP 或 FCC 位点吸附能相对较低。通过固溶不同的合金元素,发现 H 原子容易吸附在 Y 元素周围的第一近邻的 FCC 位点,而对于 Al 元素, H 原子更容易在其第二近邻的 FCC 位点吸附^[85]。这些合金元素主要是通过控制局部区域的电子分布来控制氢原子的吸附位点,其中氢原子更容易在电子束缚能力较弱的区域吸附。Zhang 等^[56]通过计算氢原子吸附能筛选出了 68 种合金元素,发现 As 和 Ge 等元素对镁合金中的富铁相具有良好的抑制阴极反应的效果。

在碱性环境中,析氢反应的速率主要是受水解的能垒、羟基的吸附能和氢原子吸附能绝对值的影响。Williams 等^[82]通过 DFT 计算了水分子、H 和 OH 在纯镁上的稳定吸附位点。Limmer 等^[83]更进一步分析了掺杂元素对镁腐蚀的影响,并计算了 H 和 OH 的吸附能、水分解的反应能、表面能和功函数,发现 Al、As、Cd、Ga、Ge、In、Si、Sn、Sb 和 Zn 可以降低阴极的析氢反应速率。Yuwono 等^[81]提出了 Ge 和 Sb 掺杂在镁表面上可以降低阴极反应中的某些步骤来提高耐腐蚀性。但以上研究仅为合金元素在镁表面的掺杂,关于合金元素对第二相的影响仍不明确。

近年来,学者们建立了 Mg-Ge 合金中 Mg₂Ge 相的电偶腐蚀模型^[36,62,72],计算了水分子、H 和 OH 在 Mg₂Ge 相的最稳定的吸附位点,对比吸附能量发现 OH 在 Mg₂Ge 相表面的吸附能为负值,而 H 的吸附能为正值,使吸附位点被 OH 占据,而 H 原子吸附的空余位点较少,抑制了析氢反应。Sumer 等^[55]也对 Mg₁₇Al₁₂ 相进行了类似的研究,取得了良好的成果。目前,在计算第二相相对镁合金腐蚀能力影响方面的工作研究不多,此模型的建立能够快速筛选出镁合金中析氢反应速率较慢的合金相,为新型镁合金的设计提供了一种新思路。然而,关于析氢反应中涉及的物理化学过程仍需进一步的分析,如第二相表面吸附水分子的亚稳态、稳定吸附位点以及水解吸附产物,表面电荷的转移等问题。

因此,在镁合金腐蚀领域,第一性原理计算在筛选合金元素方面具有很强的优势,可以通过计算表面能、功函数、空位形成能和氢吸附能等热力学参数来判定合金元素对镁腐蚀的影响,从而节省试验成本,为设计新型耐腐蚀镁合金提供帮助。

4.1.2 第一性原理的动力学计算

由于腐蚀行为非常复杂,许多因素会影响腐蚀行

为^[17,53,56,78-85],大部分学者通过计算功函数或表面能等定性分析来反映合金的耐腐蚀能力^[17,56,85]。Ma 等^[53]考虑了晶体取向、空位缺陷和离子吸附的影响,建立了金属阳极溶解行为的动力学模型。该模型通过第一性原理计算功函数和表面能密度,成功确定了电极电势与交换电流密度之间的关系。此方法的提出可以在一定程度上通过第一性原理计算来预测宏观腐蚀行为,方程式为^[53]

$$I_0 = nF \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{-\Delta G_0}{RT}\right) \times \exp\left(\frac{\alpha n \phi + \alpha n \Delta \phi}{kT}\right) \times \exp\left(\frac{E_{\text{surf}} + \sum_i c_i^{\text{vac}} E_i^{\text{vac}} + \sum_j c_j^{\text{ad}} E_j^{\text{ad}}}{\rho kT}\right) \quad (11)$$

式中, n 为电极反应过程中转移的电荷数; α 为传递系数; ρ 是表面能密度; F 、 K 、 T 、 h 、 R 分别为法拉第常数、波尔兹曼常数、绝对温度、普朗克常数和气体常数; ΔG_0 是反应活化能; ϕ 是功函数; E_{surf} 、 E^{vac} 、 E^{ad} 分别为表面能、空位形成能、吸附能。

从式(11)可以看出,纯镁的阳极溶解主要影响因素是反应活化能、功函数以及表面能等因素。其中反应活化能与材料的本身特性有关,代表着镁原子化学键断裂脱离表面进入溶液或真空中所需能量的大小,反应活化能越大,反应越难进行;而表面能量密度则代表着阳极溶解反应化学能垒的大小,其值越小交换电流密度越低;另外,功函数的提高能够加强材料的电极电位,表面电子束缚能力增强,平衡绝对电位越高,交换电流密度越大;功函数大小应与镁基体相差不大,才能降低腐蚀电位差。

在阴极析氢方面, Ma 等^[68]通过第一性原理建立了氢的吸附自由能和溶液中 pH 的变化与交换电流密度关系的模型。针对 3 种不同的反应机制,同时考虑了氢吸附能和溶液 pH 值的共同作用,通过此动力学模型筛选发现, Al、Zn、Cu 和 Ga 等元素添加到镁基体后,可以降低表面吸附氢原子的自由能,加速镁基体的阴极析氢反应速率。

综上所述,第一性原理计算在解释镁合金微观腐蚀机理方面具有重要的意义。近年来,已经发展出许多镁合金腐蚀方面的计算模型,主要分为阳极溶解模型和析氢反应模型。这些模型可以有效地分析合金元素对镁合金耐腐蚀性能的影响,对筛选耐蚀合金元素和设计新型耐腐蚀镁合金提供帮助。但是目前的理论主要集中在研究合金元素对镁基体表面腐蚀的动力学影响方面,但是合金化会改变镁表面的电子转移、电子密度分布和应变状态,因此可能会造成局部范围内 H 和 OH 吸附能的阶梯型变化,这些细节的变化方面仍是不明确的。另外,在第二相、表面保护膜等方面的研究较少,仍需要进一步的拓展研究;并且以上模型局限于理论模型的研究,在理论指导试验方面还有待加强。

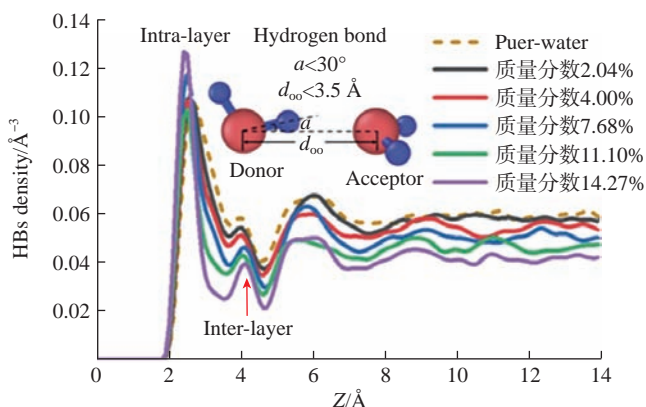
4.2 分子动力学模拟在镁合金腐蚀中的应用

在潮湿环境中,镁合金表面上的水滴可作为加速腐蚀的介质。如果镁合金表面具有疏水性,则合金表面将保持“清洁”,腐蚀可能会在一定程度上延缓。从理论上讲, MgO 本身是一种亲水性材料,添加合金元素能够在一定程度上调控镁合金表面的氧化膜成分^[10,42],从而达到疏水性的目的,腐蚀可能会减缓。目前,能用于观察固体界面上水分子微观结构和动力学的分析和成像技术,如同步辐射、红外光谱、中子散射等^[95-98],需要在超高真空条件下进行,操作难度大成本较高。另一方面,分子动力学模拟是研究分子微观结构的有力工具,已广泛用于研究水在各种条件下的润湿行为^[99-102]。可以成功地预测原子水平上的详细信息,即原子分子位置、水分子的 OH 取向以及氢键结构的分布等。

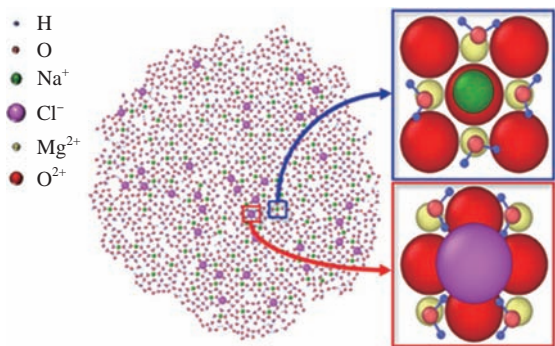
在以往的研究中发现固体表面的润湿性受到许多外部环境因素的影响,包括温度^[101,103]、涂层^[104-105]和盐浓度^[100]等。如图 4 (a)和(b)所示,NaCl 溶液浓度能够调节 MgO 表面第一水化层内水分子 OH 键的转向和氢键密度的分布^[100]。这会导致第一水化层和第二水化层之间的氢键密度发生变化,造成层间内的相互作用力减弱或增强,改变 MgO 表面的润湿性。近年来,研究者

发现晶格常数^[106-107]、表面电荷^[108-109]和表面粗糙度^[110]的本征特性可以从根本上影响表面润湿性。这种本征特性可以通过调节表面第一水化层水分子的结构来控制水在固体表面的润湿行为。Zhu 等^[107]研究了不带电荷的 FCC 晶体结构的表面润湿行为随晶格常数的变化。研究发现,在亲水性表面,水分子与固体表面之间的相互作用力将促使表面第一水化层的形成有序结构,强烈影响其在亲水表面上的润湿性能。然而,在疏水表面,水与固体表面的相互作用力较小,第一水化层中的水分子呈现无序结构,固体表面的润湿性变化不明显。在离子模型中, MgO 表面存在静电荷,水分子与表面之间的静电力会导致表面呈现亲水性。然而,当 Mg 与 O 原子之间的长度低于电偶极子的临界长度时,静电力可以忽略不计, MgO 表面呈现疏水性(图 4 (c))^[99]。

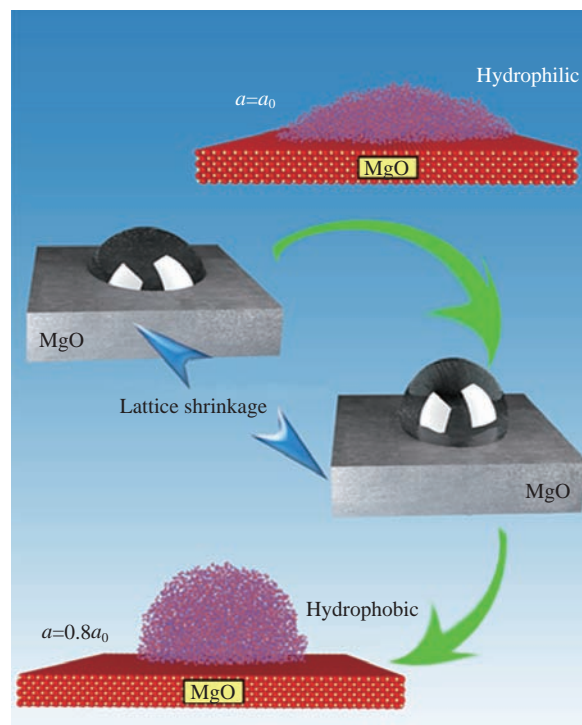
因此,可以通过合金化来调控镁合金表面氧化膜的成分,对合金施加应力应变,或者进行表面微观结构设计等手段,使镁表面由亲水性逐渐转变为疏水性,以此在一定程度上延缓腐蚀。需要注意的是,经典的分子动力学模拟是基于牛顿力学,能够研究腐蚀介质在基体表面的物理动力学过程,但缺乏对表面电化学特性预测的能力。



(a) NaCl 溶液浓度对氢键密度的影响^[100]



(b) NaCl 对第一水化层水分子结构排列的影响^[100]



(c) 晶格参数对 MgO 表面润湿性的影响^[99]

注: Z 为水滴在 MgO 基板上的高度; d_{oo} 指两个不同水分子的 O-O 键间的距离小于 3.5 Å; a 为两个水分子间 O-O 键与单独一个 OH 键的角度小于 30°

图 4 MgO 表面润湿性随 NaCl 溶液浓度和晶格常数的变化机理

Fig.4 Mechanism of MgO surface wettability with NaCl solution concentration and lattice constant

5 X-CT 技术在镁合金腐蚀方面的应用

在试验方面,研究人员认为表征镁合金的腐蚀形貌是研究腐蚀机理的一个重要途径^[24,111]。目前常用的研究镁合金腐蚀过程的技术手段主要包括扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜、电子背散射衍射等^[111-114]。这些技术主要基于在二维方向上观察镁合金的腐蚀过程。然而,镁合金微观结构与腐蚀之间的相互作用可能会存在更为复杂的腐蚀形貌^[42]。腐蚀坑可能会在镁基体的深处形成,二维表征技术存在一定局限性。因此,利用3D成像技术系统地研究镁合金的腐蚀过程具有重要意义。

X射线计算机断层扫描技术(X-CT)是一种无损表征技术,用于在微米尺度上对镁腐蚀过程进行三维观察^[115],已用于表征镁合金腐蚀过程^[116-118]。如图5所示^[119],对镁合金的腐蚀进行准原位实时观测,主要原理是通过探测器收集不同角度位置(通常是180°或360°范围内)的二维投影图^[120],然后利用数学重构算法对投影图进行重构获得层状切片。

目前,部分研究者已经使用CT成像技术研究了金属相关的腐蚀现象^[116-122]。如Burnett等^[121]通过这种方法研究了浸入NaCl溶液中奥氏体不锈钢点蚀的生长和扩散过程。Almuaili等^[122]使用X射线CT技术观察304不锈钢在应力和电化学极化协同作用下腐蚀坑的形成过程以及腐蚀坑的生长扩散机制。Ročňáková等^[116]研究了纯镁中孪晶密度与腐蚀速率之间的关系。Wang等^[118]研究了流体流动过程对MgZnCa合金腐蚀类型和腐蚀速率的影响。Davenport等^[117]利用X-CT扫描技术三维重构了Mg-Nd-Y(WE43)合金腐蚀的演变过程,发现镁合金腐蚀最初以凹坑的形式出现并形成均匀的腐蚀面,以及Y分布的均匀化可以降低腐蚀速率,有效减缓了腐蚀的进行,在理解腐蚀的作用机理方面起

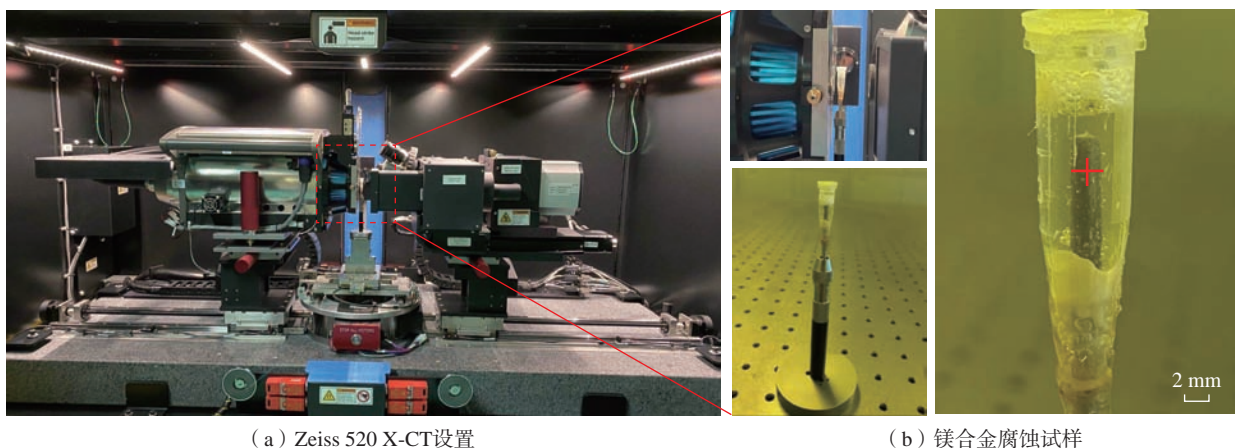
到了重大作用。

然而,在三维观察多成分镁合金的腐蚀过程中,讨论腐蚀形貌和第二相之间的关系的研究工作较少。在近期的工作中,如图6所示^[119],利用X-CT技术在三维方向上观察AZ91合金和Mg-Gd-Dy-Zr合金腐蚀形貌随时间的变化。通过阈值分割技术提取出不同合金的第二相和腐蚀坑,量化分析第二相和腐蚀坑的当量直径、平均间距、数密度随时间的变化,以此探究第二相与镁合金腐蚀之间的关系。综上所述,三维重构技术为深入探索和理解镁合金腐蚀的微观组织形貌提供了一种有效途径,并且在未来的腐蚀形貌图像采集技术中,X-CT成像技术将成为一种不可或缺的工具。

6 结论

镁合金作为最轻的金属结构材料,已经在许多领域得到广泛应用,但较差的耐腐蚀性能一直是阻碍其发展的“卡脖子”问题。本文综述了镁合金的腐蚀机制和腐蚀类型,并总结了不同合金元素对镁合金腐蚀的影响,分别介绍了第一性原理、分子动力学以及X-CT技术在镁腐蚀方面的应用。

目前,耐腐蚀镁合金的相关研究仍旧不足,亟须系统性地探索新型耐腐蚀镁合金。第一性原理计算是近年来研究镁合金腐蚀机理的一种有效工具,对解释镁合金微观腐蚀机理具有重要的意义。研究者在最近工作中提出的阳极溶解和阴极析氢反应模型,可以有效地从镁合金腐蚀热力学和动力学方面分析合金元素对镁合金耐腐蚀性能的影响,为高通量筛选潜在的镁合金耐腐蚀元素奠定了基础,大量地节省试验成本。然而,第一性原理和第二相对镁合金腐蚀的影响仍需进一步的探索,期望能够对镁合金的腐蚀有更深层次的认识并推进新型耐腐蚀镁合金的发展。另外,分子动力学可以有

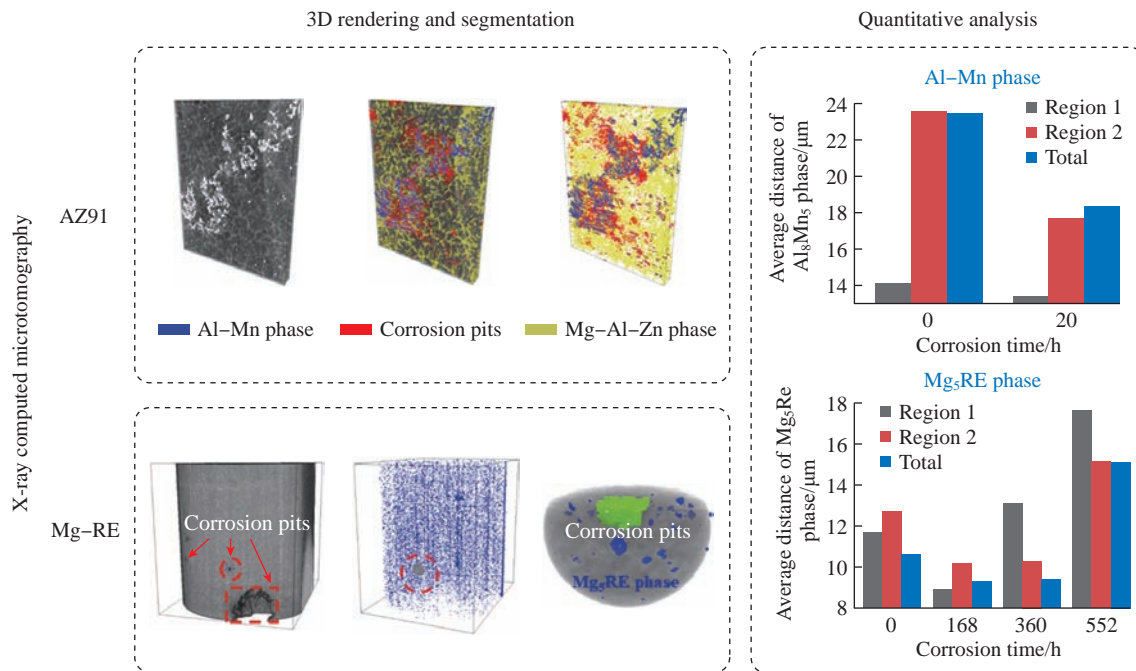


(a) Zeiss 520 X-CT设置

(b) 镁合金腐蚀试样

图5 镁合金准原位腐蚀试验的Zeiss 520 X-CT内部结构示意图^[119]

Fig.5 Internal features of Zeiss 520 X-CT equipment for in-situ corrosion experiments on Mg alloys^[119]

图6 X-CT技术在镁合金腐蚀过程中的应用^[119]Fig.6 Application of X-CT in the corrosion process of Mg alloys^[119]

效描述镁合金表面水分子的OH取向以及氢键分布等结构信息,解释其在微观尺度下的润湿行为。可通过合金化来调控镁合金表面氧化膜的成分,施加应力应变,或者设计表面的微观结构等手段,使镁合金表面由亲水性逐渐转变为疏水性,以此在一定程度上延缓腐蚀。

在试验方面,目前的表征技术主要基于二维方向上观察镁合金的腐蚀过程。然而,镁合金微观结构与腐蚀之间的相互作用可能会存在更为复杂的腐蚀形貌。X-CT技术是一种无损表征技术,可以在微米尺度上对镁腐蚀过程进行三维表征,能够很好地量化分析腐蚀坑和第二相之间的关系,为深入探索和理解镁合金腐蚀过程中微观组织形貌的变化提供帮助。

参考文献

- [1] ELEN L, CICEK B, KOC E, et al. Effects of alloying element and cooling rate on properties of AM60 Mg alloy[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(9): 096511.
- [2] WANG X J, XU D K, WU R Z, et al. What is going on in magnesium alloys? [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(2): 245–247.
- [3] CHALISGAONKAR R. Insight in applications, manufacturing and corrosion behaviour of magnesium and its alloys—A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26: 1060–1071.
- [4] NADANASABAPATHI S, RANGASAMY V, KARTHIK, CHANDRAKUMAR S, et al. Improving corrosion resistance of magnesium alloy for aerospace applications[J]. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*,

2019, 9(3): 769–774.

- [5] ZENKERT D, KAUFMANN M. The cost of weight and how that affects the design[C]. Sweden: Swerea SICOMP, 2010.
- [6] GUPTA M, GUPTA N. The promise of magnesium based materials in aerospace sector[J]. *International Journal of Aeronautical Science & Aerospace Research*, 2017, 4(1): 141–149.
- [7] SONG J F, SHE J, CHEN D L, et al. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(1): 1–41.
- [8] BAHMANI A, ARTHANARI S, SHIN K S. Formulation of corrosion rate of magnesium alloys using microstructural parameters[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(1): 134–149.
- [9] 强明闪, 江静华, 宋丹, 等. 镁合金应力腐蚀开裂研究进展[J]. *腐蚀与防护*, 2015, 36(7): 677–683.
- QIANG Mingshan, JIANG Jinghua, SONG Dan, et al. Progress in research on stress corrosion cracking of Mg alloys[J]. *Corrosion & Protection*, 2015, 36(7): 677–683.
- [10] AZZEDDINE H, HANNA A, DAKHOUCHE A, et al. Impact of rare-earth elements on the corrosion performance of binary magnesium alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 829: 154569.
- [11] GUSIEVA K, DAVIES C H J, SCULLY J R, et al. Corrosion of magnesium alloys: The role of alloying[J]. *International Materials Reviews*, 2015, 60(3): 169–194.
- [12] NORDLIEN J H, ONO S, MASUKO N, et al. Morphology and structure of oxide films formed on magnesium by exposure to air and water[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1995, 142(10): 3320–3322.
- [13] TAHERI M, PHILLIPS R C, KISH J R, et al. Analysis of the surface film formed on Mg by exposure to water using a FIB cross-section and STEM-EDS[J]. *Corrosion Science*, 2012, 59: 222–228.

- [14] MENG Y X, GAO H, HU J Q, et al. Effect of pH value on the corrosion and corrosion fatigue behavior of AM60 magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Research*, 2019, 34(6): 1054–1063.
- [15] 邱六, 朱胜, 王晓明, 等. 镁合金腐蚀与防护的研究现状[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(16): 31–36.
- QIU Liu, ZHU Sheng, WANG Xiaoming, et al. Research status of corrosion and protection of magnesium alloys[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(16): 31–36.
- [16] 黎文献. 镁及镁合金 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- LI Wenxian. *Magnesium and magnesium alloy*[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [17] LUO Z, ZHU H, YING T, et al. First principles calculations on the influence of solute elements and chlorine adsorption on the anodic corrosion behavior of Mg (0001) surface[J]. *Surface Science*, 2018, 672–673: 68–74.
- [18] CAO F Y, ZHAO C, SONG G L, et al. The corrosion of pure Mg accelerated by haze pollutant ammonium sulphate[J]. *Corrosion Science*, 2019, 150: 161–174.
- [19] CAO F Y, ZHAO C, YOU J, et al. The inhibitive effect of artificial seawater on magnesium corrosion[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(8): 1900363.
- [20] SHAW B. *Corrosion resistance of magnesium alloys*[M]. Novelty: ASM International, 2003.
- [21] SONG G L, ATRENS A. Corrosion mechanisms of magnesium alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 1999, 1(1): 11–33.
- [22] SHENG W C, MYINT M, CHEN J G, et al. Correlating the hydrogen evolution reaction activity in alkaline electrolytes with the hydrogen binding energy on monometallic surfaces[J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(5): 1509.
- [23] BARD A J, FAULKNER L R. *Electrochemical methods: Fundamentals and applications*[M]. Manhattan: Wiley, 1980.
- [24] ESMAILY M, SVENSSON J E, FAJARDO S, et al. Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion[J]. *Progress in Materials Science*, 2017, 89: 92–193.
- [25] ATRENS A, SONG G L, LIU M, et al. Review of recent developments in the field of magnesium corrosion[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(4): 400–453.
- [26] SONG G, ATRENS A. Recent insights into the mechanism of magnesium corrosion and research suggestions[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2007, 9(3): 177–183.
- [27] WILLIAMS G, BIRBILIS N, MCMURRAY H N. The source of hydrogen evolved from a magnesium anode[J]. *Electrochemistry Communications*, 2013, 36: 1–5.
- [28] SONG G, ATRENS A, JOHN D S, et al. The anodic dissolution of magnesium in chloride and sulphate solutions[J]. *Corrosion Science*, 1997, 39(10–11): 1981–2004.
- [29] CAIN T, MADDEN S B, BIRBILIS N, et al. Evidence of the enrichment of transition metal elements on corroding magnesium surfaces using rutherford backscattering spectrometry[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2015, 162(6): C228–C237.
- [30] FAJARDO S, GLOVER C F, WILLIAMS G, et al. The source of anodic hydrogen evolution on ultra high purity magnesium[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 212: 510–521.
- [31] FRANKEL G S, SAMANIEGO A, BIRBILIS N. Evolution of hydrogen at dissolving magnesium surfaces[J]. *Corrosion Science*, 2013, 70: 104–111.
- [32] CURIONI M, TORRESCANO-ALVAREZ J M, YANG Y F, et al. Application of side-view imaging and real-time hydrogen measurement to the investigation of magnesium corrosion[J]. *Corrosion*, 2017, 73(5): 463–470.
- [33] CURIONI M, SALAMONE L, SCENINI F, et al. A mathematical description accounting for the superfluous hydrogen evolution and the inductive behaviour observed during electrochemical measurements on magnesium[J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 274: 343–352.
- [34] YUWONO J A, TAYLOR C D, FRANKEL G S, et al. Understanding the enhanced rates of hydrogen evolution on dissolving magnesium[J]. *Electrochemistry Communications*, 2019, 104: 106482.
- [35] 张新, 张奎. 镁合金腐蚀行为及机理研究进展 [J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2015, 27(1): 78–84.
- ZHANG Xin, ZHANG Kui. Research progress on corrosion behavior and mechanism of magnesium alloys[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2015, 27(1): 78–84.
- [36] 曾小勤, 谢天, 应韬, 等. 数据驱动的镁合金结构与性能设计 [J]. *中国材料进展*, 2020, 39(1): 1–11, 30.
- ZENG Xiaoqin, XIE Tian, YING Tao, et al. Data-driven designing of microstructures and properties of magnesium alloys[J]. *Materials China*, 2020, 39(1): 1–11, 30.
- [37] COY A E, VIEJO F, SKELDON P, et al. Susceptibility of rare-earth-magnesium alloys to micro-galvanic corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(12): 3896–3906.
- [38] BAEK S M, KANG J S, SHIN H J, et al. Role of alloyed Y in improving the corrosion resistance of extruded Mg–Al–Ca–based alloy[J]. *Corrosion Science*, 2017, 118: 227–232.
- [39] ZHAO P Y, XIE T, XU X M, et al. Designing high corrosion resistant peritectic magnesium alloys via Sc and Y addition[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, 51(5): 2509–2522.
- [40] 樊志民, 于锦, 宋影伟, 等. 镁合金点蚀的研究进展 [J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2018, 38(4): 317–325.
- FAN Zhimin, YU Jin, SONG Yingwei, et al. Research progress of pitting corrosion of magnesium alloys[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2018, 38(4): 317–325.
- [41] WANG L S, JIANG J H, YUAN T, et al. Recent progress on corrosion behavior and mechanism of Mg–RE based alloys with long period stacking ordered structure[J]. *Metals and Materials International*, 2020, 26(5): 551–563.
- [42] XU W, BIRBILIS N, SHA G, et al. A high-specific-strength and corrosion-resistant magnesium alloy[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(12): 1229–1235.
- [43] LI C Q, XU D K, ZENG Z R, et al. Effect of volume fraction of LPSO phases on corrosion and mechanical properties of Mg–Zn–Y alloys[J]. *Materials & Design*, 2017, 121: 430–441.
- [44] 王宏新, 于锦, 宋影伟. 镁合金丝状腐蚀研究进展 [J]. *表面技术*, 2016, 45(12): 36–42.
- WANG Hongxin, YU Jin, SONG Yingwei. Research progress of filiform corrosion on magnesium alloy[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(12): 36–42.
- [45] WILLIAMS G, GRACE R. Chloride-induced filiform

corrosion of organic-coated magnesium[J]. *Electrochimica Acta*, 2011, 56(4): 1894–1903.

[46] 宋光铃. 镁合金腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

SONG Guangling. Corrosion and protection of magnesium alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

[47] BAHMANI A, ARTHANARI S, SHIN K S. Improved corrosion resistant and strength of a magnesium alloy using multi-directional forging (MDF)[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(1–4): 785–797.

[48] 王保杰, 栾吉瑜, 王士栋, 等. 镁合金应力腐蚀开裂行为研究进展[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2019, 39(2): 89–95.

WANG Baojie, LUAN Jiyu, WANG Shidong, et al. Research progress on stress corrosion cracking behavior of magnesium alloys[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2019, 39(2): 89–95.

[49] LUO Y F, DENG Y L, GUAN L Q, et al. Effect of grain size and crystal orientation on the corrosion behavior of as-extruded Mg–6Gd–2Y–0.2Zr alloy[J]. *Corrosion Science*, 2020, 164: 108338.

[50] GANDEL D S, EASTON M A, GIBSON M A, et al. CALPHAD simulation of the Mg–(Mn, Zr)–Fe system and experimental comparison with as-cast alloy microstructures as relevant to impurity driven corrosion of Mg–alloys[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, 143(3): 1082–1091.

[51] MAKAR G L, KRUGER J. Corrosion of magnesium[J]. *International Materials Reviews*, 1993, 38(3): 138–153.

[52] WAN D Q, WANG J C, WANG G F, et al. Effect of Mn on damping capacities, mechanical properties, and corrosion behaviour of high damping Mg–3 wt.%Ni based alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 494(1–2): 139–142.

[53] MA H, CHEN X Q, LI R H, et al. First-principles modeling of anisotropic anodic dissolution of metals and alloys in corrosive environments[J]. *Acta Materialia*, 2017, 130: 137–146.

[54] LIU R L, SCULLY J R, WILLIAMS G, et al. Reducing the corrosion rate of magnesium via microalloying additions of group 14 and 15 elements[J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 260: 184–195.

[55] SUMER A, CHAUDHURI S. A first principles investigation of corrosion chemistry of common elemental impurities in Mg–Al alloys[J]. *Corrosion*, 2017, 73(5): 596–604.

[56] ZHANG M F, HECTOR L G Jr, GUO Y, et al. First-principles search for alloying elements that increase corrosion resistance of Mg with second-phase particles of transition metal impurities[J]. *Computational Materials Science*, 2019, 165: 154–166.

[57] ZHANG Z, WU G H, ATRENS A, et al. Influence of trace As content on the microstructure and corrosion behavior of the AZ91 alloy in different metallurgical conditions[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(1): 301–317.

[58] WILLIAMS G, DAFYDD H A L, MCMURRAY H N, et al. The influence of arsenic alloying on the localised corrosion behaviour of magnesium[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 219: 401–411.

[59] BIRBILIS N, WILLIAMS G, GUSIEVA K, et al. Poisoning the corrosion of magnesium[J]. *Electrochemistry Communications*, 2013, 34: 295–298.

[60] BIRBILIS N, EASTON M A, SUDHOLZ A D, et al. On the corrosion of binary magnesium-rare earth alloys[J]. *Corrosion Science*,

2009, 51(3): 683–689.

[61] UBEDA C, GARCES G, ADEVA P, et al. The role of the beta-Mg₁₇Al₁₂ phase on the anomalous hydrogen evolution and anodic dissolution of AZ magnesium alloys[J]. *Corrosion Science*, 2020, 165: 108384.

[62] LUO Z, XU J L, WANG Y W, et al. Theoretical analysis of the galvanic corrosion behavior of Mg–Ge binary alloy[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166(13): C421–C427.

[63] YANG J, PENG J, NYBERG E A, et al. Effect of Ca addition on the corrosion behavior of Mg–Al–Mn alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 369: 92–100.

[64] HU Z, LIU R L, KAIRY S K, et al. Effect of Sm additions on the microstructure and corrosion behavior of magnesium alloy AZ91[J]. *Corrosion Science*, 2019, 149: 144–152.

[65] KOLTYGIN A V, BAZHENOV V E, KHASENOVA R S, et al. Effects of small additions of Zn on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of WE43B Mg alloys[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2019, 26(7): 858–868.

[66] KE H B, TAYLOR C D. Density functional theory: An essential partner in the integrated computational materials engineering approach to corrosion[J]. *Corrosion*, 2019, 75(7): 708–726.

[67] PRIYA P, YAN X L, CHAUDHURI S. Study of intermetallics for corrosion and creep resistant microstructure in Mg–RE and Mg–Al–RE alloys through a data-centric high-throughput DFT framework[J]. *Computational Materials Science*, 2020, 175: 109541.

[68] MA H, WU L P, LIU C, et al. First-principles modeling of the hydrogen evolution reaction and its application in electrochemical corrosion of Mg[J]. *Acta Materialia*, 2020, 183: 377–389.

[69] NOERSKOV J K, BLIGAARD T, LOGADOTTIR A, et al. Trends in the exchange current for hydrogen evolution[J]. *ChemInform*, 2005, 36(24): J23–J26.

[70] GREELEY J, JARAMILLO T F, BONDE J, et al. Computational high-throughput screening of electrocatalytic materials for hydrogen evolution [J]. *Nature Materials*, 2006, 5 (11): 909–913.

[71] TAYLOR C D. A first-principles surface reaction kinetic model for hydrogen evolution under cathodic and anodic conditions on magnesium[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2016, 163(9): C602–C608.

[72] 罗哲. 镁铝合金耐腐蚀性能的理论研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.

LUO Zhe. Theoretical investigation on the corrosion resistance of Mg–Ge alloy[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.

[73] WANG C, WANG J F, MA D, et al. First-principles studies on structure stability, segregation, and work function of Mg doped with metal elements[J]. *International Journal of Quantum Chemistry*, 2021, 121(11): e26626.

[74] WANG J, WANG S Q. Correlation between galvanic corrosion and electronic work function of Al alloy surfaces[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2014, 30(3): 551–558.

[75] WANG Z W, GUO X J, WU M Y, et al. First-principles study of hydrogen dissociation and diffusion on transition metal-doped Mg(0001) surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 305: 40–45.

[76] DUAN Y H. Adsorption of fluorine and chlorine on Mg (0001) surface: A density functional theory investigation[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(6): 1844–1852.

- [77] ZHOU P, ZHOU C, GONG H R. Chlorine adsorption on Mg, Ca, and MgCa surfaces[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2013, 33(7): 3826–3831.
- [78] MA H, LIU M, CHEN W L, et al. First-principles study on the effects of twin boundaries on anodic dissolution of Mg[J]. *Physical Review Materials*, 2019, 3(5): 053806.
- [79] PENG J H, ZHANG Z, LONG C, et al. Effect of crystal orientation and $\{101\bar{2}\}$ twins on the corrosion behaviour of AZ31 magnesium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 827: 154096.
- [80] 罗哲, 朱虹, 应韬, 等. Mg₂Ge 合金表面性质的第一性原理计算[J]. *铸造技术*, 2018, 39(6): 1359–1363.
- LUO Zhe, ZHU Hong, YING Tao, et al. First principles calculations of the surface properties of Mg₂Ge alloy[J]. *Foundry Technology*, 2018, 39(6): 1359–1363.
- [81] YUWONO J A, BIRBILIS N, WILLIAMS K S, et al. Electrochemical stability of magnesium surfaces in an aqueous environment[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120(47): 26922–26933.
- [82] WILLIAMS K S, LABUKAS J P, RODRIGUEZ-SANTIAGO V, et al. First principles modeling of water dissociation on Mg(0001) and development of a Mg surface pourbaix diagram[J]. *Corrosion*, 2015, 71(2): 209–223.
- [83] LIMMER K R, WILLIAMS K S, LABUKAS J P, et al. First principles modeling of cathodic reaction thermodynamics in dilute magnesium alloys[J]. *Corrosion*, 2017, 73(5): 506–517.
- [84] YUWONO J A, BIRBILIS N, LIU R L, et al. Aqueous electrochemical activity of the Mg surface: The role of group 14 and 15 microalloying elements[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(13): C918–C929.
- [85] ZHANG C, WANG J S, LI X, et al. Rapid screening alloying elements for improved corrosion resistance on the Mg(0001) surface using first principles calculations[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2021, 23(47): 26887–26901.
- [86] LEUNG T C, KAO C L, SU W S, et al. Relationship between surface dipole, work function and charge transfer: Some exceptions to an established rule[J]. *Physical Review B*, 2003, 68(19): 195408.
- [87] SKRIVER H L, ROSEGAARD N M. Surface energy and work function of elemental metals[J]. *Physical Review B, Condensed Matter*, 1992, 46(11): 7157–7168.
- [88] LANG N D, KOHN W. Theory of metal surfaces: Charge density and surface energy[J]. *Physical Review B*, 1970, 1(12): 4555–4568.
- [89] ZUO E C, DOU X L, CHEN Y Y, et al. Electronic work function, surface energy and electronic properties of binary Mg–Y and Mg–Al alloys: A DFT study[J]. *Surface Science*, 2021, 712: 121880.
- [90] JI D P, ZHU Q X, WANG S Q. Detailed first-principles studies on surface energy and work function of hexagonal metals[J]. *Surface Science*, 2016, 651: 137–146.
- [91] FRIEDEL J. The physics of clean metal surfaces[J]. *Annales de Physique*, 1976, 1: 257–307.
- [92] CHEN H P, MA N N, LI J Q, et al. Effect of atomic iron on hydriding reaction of magnesium: Atomic-substitution and atomic-adsorption cases from a density functional theory study[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 504: 144489.
- [93] GHOSH S, SURYANARAYANA P. Electronic structure study regarding the influence of macroscopic deformations on the vacancy formation energy in aluminum[J]. *Mechanics Research Communications*, 2019, 99: 58–63.
- [94] DRONSKOWSKI R, BLOECHL P E. Crystal orbital Hamilton populations (COHP): Energy-resolved visualization of chemical bonding in solids based on density-functional calculations[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1993, 97(33): 8617–8624.
- [95] STRIOLO A. From interfacial water to macroscopic observables: A review[J]. *Adsorption Science & Technology*, 2011, 29(3): 211–258.
- [96] COLE D R, HERWIG K W, MAMONTOV E, et al. Neutron scattering and diffraction studies of fluids and fluid-solid interactions[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 63(1): 313–362.
- [97] CARRASCO J, HODGSON A, MICHAELIDES A. A molecular perspective of water at metal interfaces[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(8): 667–674.
- [98] FENTER P A. X-ray reflectivity as a probe of mineral-fluid interfaces: A user guide[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 49(1): 149–221.
- [99] ZHANG C, LI X, WANG S, et al. Does expanding or contracting MgO lattice really help with corrosion resistance of Mg surface: Insights from molecular dynamics simulations[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(2): 1099–1107.
- [100] LI X, ZHANG C, WANG J S, et al. Atomic-level insights into nano-salt droplets wetting on the MgO surface using molecular dynamics simulations[J]. *Corrosion Science*, 2020, 167: 108549.
- [101] ZHANG C, LI X, WANG J S. Predicting the effects of temperature on the water wettability of the Mg/MgO surface through atomistic simulations[J]. *The Journal of Physical Chemistry C. Nanomaterials and Interfaces*, 2019, 123(31): 18914–18923.
- [102] 李鑫, 张弛, 王俊升, 等. 镁合金腐蚀行为与防护技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(19): 59–70.
- LI Xin, ZHANG Chi, WANG Junsheng, et al. Research progress on corrosion behavior and protection technology of magnesium alloys[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(19): 59–70.
- [103] QIU H, GUO W. Phase diagram of nanoscale water on solid surfaces with various wettabilities[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2019, 10(20): 6316–6323.
- [104] ZANG D M, ZHU R W, ZHANG W, et al. Corrosion-resistant superhydrophobic coatings on Mg alloy surfaces inspired by lotus seedpod[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(8): 1605446.
- [105] RAFIEE J, MI X, GULLAPALLI H, et al. Wetting transparency of graphene[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(3): 217–222.
- [106] XU Z, GAO Y, WANG C L, et al. Nanoscale hydrophilicity on metal surfaces at room temperature: Coupling lattice constants and crystal faces[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119(35): 20409–20415.
- [107] ZHU C Q, LI H, HUANG Y F, et al. Microscopic insight into surface wetting: Relations between interfacial water structure and the underlying lattice constant[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(12): 126101.
- [108] WANG C L, LU H J, WANG Z G, et al. Stable liquid water droplet on a water monolayer formed at room temperature on ionic model substrates[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(13): 137801.

(下转第 118 页)

引文格式: 杨博见, 杜丽, 郭景仁. 基于多Agent的柔性作业车间动态调度方法研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 99-107.

YANG Bojian, DU Li, GUO Jingren. Research on dynamic scheduling of flexible job-shop based on multi-agent[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 99-107.

基于多 Agent 的柔性作业车间动态调度方法研究*

杨博见^{1,2}, 杜 丽¹, 郭景仁¹

(1. 电子科技大学, 成都 611731;

2. 中国航空发动机集团有限公司四川燃气涡轮研究院高空模拟技术重点实验室, 绵阳 621703)

[摘要] 为提高调度策略对工件到达密度变化的适应能力, 对柔性作业车间内的动态调度方法进行了研究。首先根据调研结果以及 Agent 建模方法构建了基于多 Agent 系统的柔性制造动态调度系统; 然后结合柔性制造背景下的复杂结构件加工特点对调度过程中任务分解、机床选择、任务分配 3 个步骤的运行机制进行了改进, 形成了基于工序块的任务分解机制、基于加工精度的机床选择机制以及基于调度规则的动态时间窗调度方法; 最后通过试验验证了该动态调度方法在工件到达密度变化场景下的可行性, 对当前实际的柔性作业车间生产活动具有一定的指导意义。

关键词: 多Agent系统; 柔性作业车间; 动态调度; 动态时间窗; 规则调度方法

Research on Dynamic Scheduling of Flexible Job-Shop Based on Multi-Agent

YANG Bojian^{1,2}, DU Li¹, GUO Jingren¹

(1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Science and Technology on Altitude Simulation Laboratory, Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Mianyang 621703, China)

[ABSTRACT] In order to improve the adaptability of scheduling strategy to the change of the arrival density of the workpiece, the dynamic scheduling method in flexible job-shop was studied. Firstly, the dynamic scheduling system of flexible manufacturing based on multi-agent system is constructed according to the investigation results and agent modeling method. And combining with the complex structure processing characteristics of flexible manufacture, the operation mechanism of scheduling task decomposition, machine tool selection and task allocation is improved, and forming the task decomposition mechanism based on the process, machine tool selection mechanism based on the machining accuracy and dynamic time windows scheduling method based on scheduling rules. Finally, the feasibility of the proposed dynamic scheduling method in the scenario of work-piece density change is verified by experiments, which has a certain guiding significance for the current actual flexible job-shop production activities.

Keywords: Multi-agent systems; Flexible job-shop; Dynamic scheduling; Dynamic time window; Rule-based scheduling method

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.099

调度是整个制造系统的核心环节^[1], 其目的是满足一系列约束前提下对资源进行合理分配使作业过程中某些指标达到最优。随着制造企业生产力逐渐提升, 传

统集中控制的静态调度方式在动态多变的生产场景下显得格格不入。一方面, 小批量、多品种、个性化生产模式逐渐兴起, 工艺路径愈加灵活^[2], 柔性作业车间逐步

* 基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX04002001)。

取代以往的流水车间,针对柔性生产的调度研究愈发迫切^[3];另一方面,制造过程本质上是动态的,诸如订单数量波动、设备故障、原料紧缺等计划外的扰动是不可避免的^[4],如何设计调度策略使外部扰动对系统的影响降到最低成为生产调度研究中的另一个热点问题^[5]。

在生产组织方式从静态集中的层次结构向动态分布式网络结构转变的趋势下,制造系统呈现出动态、复杂、自治等新特点^[6]。多 Agent 系统 (Multi-agent system, MAS) 作为一种新兴智能计算技术,其自治性、拓展性、移动性的特点与当前分布式、动态化的生产环境高度契合^[7],被认为是实现智能制造系统最有前景的方法之一,受到国内外学者的广泛关注^[8]。目前框架设计与建模和协商机制是 MAS 的两个主要研究方向。Wang 等^[9]采用基于物理的映射方式将车间内实体划分为机床、运输、产品、物料库 4 类 Agent,搭建了一种结合工业互联网与云端监控的多层次智能工厂框架。梁慰乐^[10]搭建了一种混合架构的多车间动态调度系统,基于功能的映射方式划分了管理、资源、工艺、算法和监控 5 类 Agent 对象,实现了生产任务与扰动事件的跨区域处理。魏鑫^[11]针对多目标作业车间调度问题提出了一种基于简化 CNP (Contract net protocol) 的区间协同拍卖协同策略,有效解决了传统 CNP 下调度中通信量大、Agent 间劣质竞标以及调度结果全局性较差等问题。Zhang 等^[12]建立了基于蚁群优化的 Agent 协商机制,将蚁群算法中信息素的特征融入智能体决策模型中,通过信息素积累和蒸发产生的差异信息素图来解决常规调度与重调度问题。曹乐^[13]应用内嵌 Q-Learning 的 CNP 作为上下层协商机制,搭建了基于多 Agent 的信息物理融合生产系统,实现硬件间的异构集成与生产任务的合理分配。

本文结合柔性作业车间特点对 MAS 进行了改进,从实际柔性生产中的物理实体和逻辑功能映射出 5 类 Agent 并形成一种混合式组织结构,在此基础上根据典型柔性生产中的任务分解、机床选择、任务分配 3 个步骤对多 Agent 协商机制进行改进,最后设计试验对该调度方案的有效性进行了验证。

1 多 Agent 柔性作业车间动态调度系统组织架构

图 1 所示的柔性生产线一般包含加工中心、立体刀库、有轨制导小车 (Rail guided vehicle, RGV) 或机械手、立体物料库、上下料站、控制系统等设备。完整的柔性制造生产调度应包含的流程与功能总体可概括为工单输入与处理、工单任务分解、柔性生产调度规划、异常调度、数据管理。

对应以上设备分布与流程特征,基于多 Agent 理

论,从制造环境中映射出 5 种 Agent,可划分为基于物理的任务池 Agent (Task pool agent, TPA)、任务 Agent (Task agent, TA)、机器 Agent (Machine agent, MA),分别与车间中的立体物料库、加工工件、加工中心对应;以及基于功能的调度 Agent (Scheduling agent, SA) 和监控 Agent (Real-time monitoring agent, RMA),其内部分别封装了规则调度方法和异常调度策略。TPA 主要完成工单输入与处理、工单任务分解;TA、MA、SA 3 者通过协商完成柔性生产调度规划;RMA 负责完成异常调度;数据管理则由 5 个 Agent 共同完成。

本文设计的混合式组织结构的柔性制造动态调度系统基本架构如图 2 所示。常规调度时,系统内除监控 Agent 以外的所有 Agent 共同构成集中式的组织结构,其中 TPA 处于管理层,接收与释放上层系统的计划任务;TA 与 SA 处于处理层,对释放的任务进行排程;MA 处于执行层,负责执行上层产生的调度计划。当出现扰动事件使系统进入异常调度状态时,RMA 将与除 TPA 以外的所有 Agent 共同构成分布式的组织结构,各 Agent 之间通过信息互通,只需对其自身做出局部调整即可完成对扰动事件的处理。该结构具有易拓展、高鲁棒性和低成本的优点。

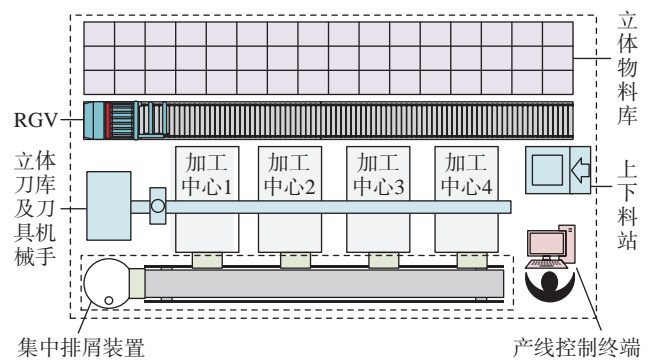


图 1 柔性生产线设备组成及分布示意图
Fig.1 Flexible production line equipment composition and distribution diagram

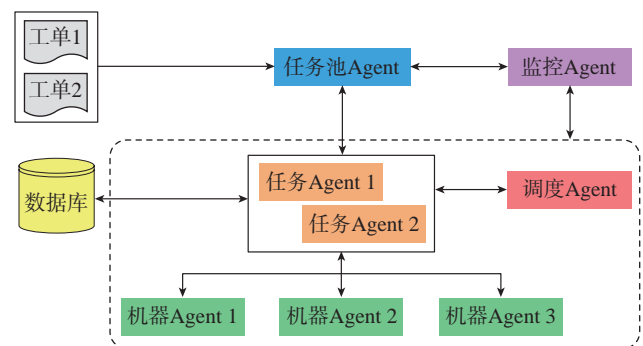


图 2 多 Agent 柔性作业车间动态调度系统组织结构
Fig.2 Organization structure of dynamic scheduling system of multi-agent flexible job-shop

2 柔性作业车间动态调度策略

合同网协议 (Contract net protocol, CNP) 在复杂环境下具有较好的灵活性和实用性, 整体逻辑较为简单, 能够对大规模任务进行分解执行。在基于传统 CNP 的多 Agent 调度方法中, 通常采用具备任务性质和具备处理能力的两类 Agent 进行招投标交互, 完成加工任务在加工设备之间的分配, 最终得到调度计划。一个完整调度流程的协商过程如图 3 所示, 整个过程中 TA 与 m 个 MA 之间至少经过 $4m$ 次通信才能完成任务分配, 当多个 TA 对自身任务进行释放时, 系统内的信息流将会急剧增长; 除此之外 Agent 的贪婪性驱使其只根据自身当前的状态做出决策, 造成实际招投标过程缺乏一定全局能力, 并且协商过程中缺乏应急处理机制, 出现异常时可能会导致调度系统出现锁死甚至故障。由此可知, 该协商流程存在通信量大、单步优化以及动态性能较差等缺陷。

本文从调度过程中任务分解、机床选择、任务分配 3 个步骤的运行机制入手, 改进得到基于工序块的任务分解机制、基于加工精度的机床选择机制以及基于调度规则的动态时间窗调度方法, 保证动态任务的合理分配, 提升系统的动态性能以及对特定加工环境的适应力。

2.1 基于工序块的任务分解机制

近几年, 以工序集中原则为基础的复合加工技术

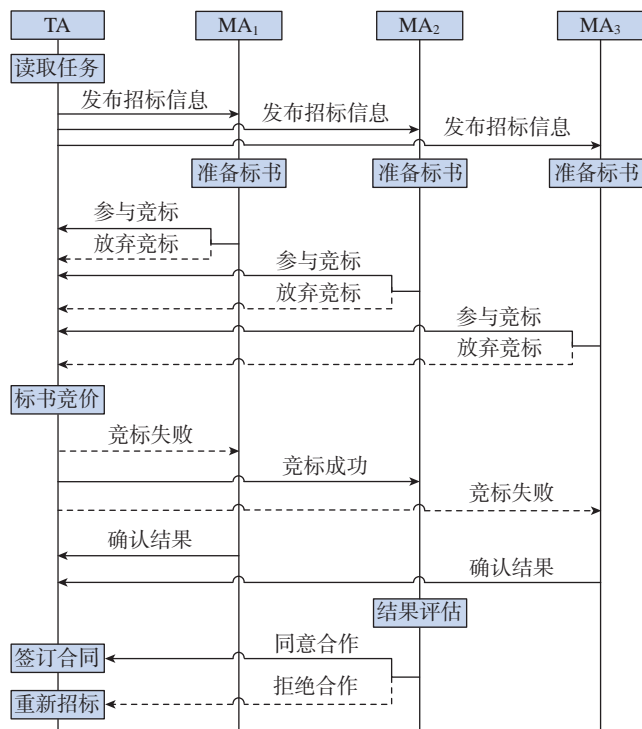


图 3 基于传统 CNP 的调度协商流程

Fig.3 Scheduling and negotiation process based on traditional CNP

快速发展, 车铣复合中心、五轴加工中心等复合加工机床应运而生。传统的柔性作业车间调度问题 (Flexible job-shop scheduling problem, FJSP) 求解方法往往以工序离散的原则处理工艺路径中的工序, 即系统在调度的过程中按照工件的工序顺序逐项释放、逐项加工。因此, 在得到的调度结果中, 同一工件的加工过程总是离散化的, 其相邻的两道工序通常不在同一台机床上进行。这与当前复杂工件的实际加工方式是不符的, 各工序加工准备时间的存在也会导致大量加工工件在多台设备间转移的用时不可忽视, 如果调度计算得到的调度解与实际调度情况的偏差较大, 调度解将会失去参考性。

本文基于工序集中处理原则提出一种基于工序块的任务分解机制。在分解工单时, 将同一工件工艺路线中工艺类型相近、工序顺序相邻的工序组合成为 1 个工序块一次性释放, 利用加工过程中必要的翻转装夹、在机检测等步骤自然地隔离不同的工序块, 单个工序块内的所有工序将在同一台满足所有工序加工条件的机床上进行加工。以表 1 所示的工艺路线为例 (其中翻转装夹、在机检测等准备步骤视作工序, 但不会作为任务 Agent 释放), 按工序块进行分解, 工件会由原先的 8 道加工工序合并为 3 个工序块参与调度计算。

采用基于工序块的任务分解机制主要有以下优点。

(1) 任务分解方式与实际加工方式对应, 考虑了工序的加工准备时间, 提高了调度解的参考性与可执行性。以上述工艺路线为例, 加工前的准备时间将由单工序的分解机制下的 7 段减小为 2 段, 且并入加工时间期望。

(2) 该机制与原先单工序处理机制的适应性相同, 基于工序块的任务分解机制在本质上没有改变原先任务分解机制的主要流程, 仅在任务总量上有所变化, 原

表 1 示例工艺路线

Table 1 Example process routes

工序号	工序块号	工序内容	需求精度	加工时间期望/min
1	1	粗铣 A 面外形	IT11	19
2		精铣 A 面外形	IT8	32
3	2	翻转装夹	0	5
4		粗铣 B 面外形	IT11	28
5		精铣 B 面外形	IT8	43
6		精铣凹槽	IT7	17
7	3	精铣台阶面	IT8	14
8		在机检测	0	2
9		钻底孔	IT9	13
10		倒角	IT10	7

有的调度求解方法仍旧可用。(3)减轻了 MAS 系统内的通信负担,以 m 台设备加工上述工件为例,单工序的分解机制下,系统至少需经过 $8 \times (2m+2)$ 次通信才能完成所有工序任务的释放,但在基于工序块的分解机制下,系统只需经过 $3 \times (2m+2)$ 次通信。(4)可以更好地适应未来工序顺序柔性这一趋势。基于工序块的任务分解机制下工序顺序仅需在工序块内部进行调整即可,并不会影响到调度计算,整体调度流程的柔性将得到提高。

2.2 基于加工精度的机床选择机制

加工质量是制造过程中重点关注的问题,在调度过程中应当采取适当的措施来保障复杂结构件的加工精度,提高首件加工合格率。目前复杂结构件的制造过程一般根据加工任务中工件的尺寸、加工类型提前选择合适的生产线,因此机床精度就成为唯一的机床选择决策指标。一般会对生产线进行周期性检测和评估其整体加工精度,并更新生产系统内对应信息以便于进行机床选择。

在传统的 FJSP 案例中,一般采用的是单工艺型或半全能型机床,但现阶段的柔性生产线已采用全能型的加工中心,以往基于加工能力的机床选择机制已不再适用。因此,根据当前柔性作业车间的设备情况,本文提出一种基于加工精度的机床选择机制。新机制下 TA 与 MA 之间协商的流程如图 4 所示,当 TA 将加工任务需求以招标请求的方式发送至 MA 时,MA 将任务对应的工序块内需求的最高精度与自身精度进行比较,根据比较结果选择是否参与竞标。本文机床精度与 TA 内

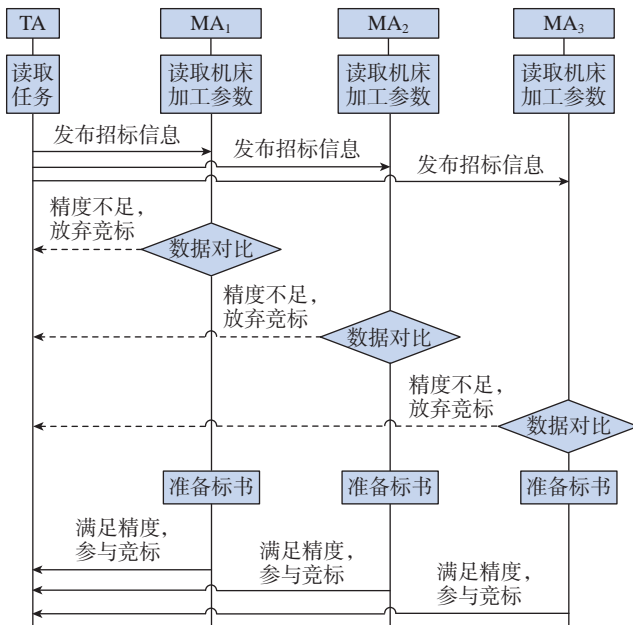


图 4 基于加工精度的机床选择机制下 TA 与 MA 的协商流程
Fig.4 Negotiation process between TA and MA under machine tool selection mechanism based on machining accuracy

携带的加工任务规定的工件尺寸精度均采用 IT 公差等级进行描述。

基于加工精度的机床选择机制在调度过程中能够保障工件的加工质量,并且 MA 会定期访问生产系统的机床精度数据库获取机床最近时段的精度,将获取到的数据存储在自身知识库,从而使调度系统能够对动态的环境做出良好的反应。

2.3 基于调度规则的动态时间窗调度方法

上层系统下达的工单任务经过分解和机床选择之后,还需按一定的方法对任务进行分配才能产生最终的调度解,任务分配的方法将直接决定调度解的优劣。传统 CNP 协商过程中的单步优化会导致劣质调度解的出现,为解决此问题,国内外学者在 CNP 的基础之上引入了时间窗的概念,同时在 MAS 中设置全局管理型的 Agent,形成了一种基于周期调度的预反应式调度策略。但随之引入了时间窗长度的选取问题,选取过长会导致任务堆积,过短会退化为单步优化,尤其在时间窗长度固定时,其无法适应工件到达密度多变的小批量生产场景。

根据以上情况,本文提出一种动态时间窗的策略。其具体执行逻辑如图 5 所示,其中 Z 为表征产线状态的决策变量; $\min(e_{B_m})$ 为开启时间窗的时刻下产线内所有机床的最早完工时刻; T_{now} 为开启时间窗的时刻; L 为单个时间窗内参与调度的工序块数量上限,以避免待调度的工序块过多导致调度系统瞬时计算负担过大。 Z

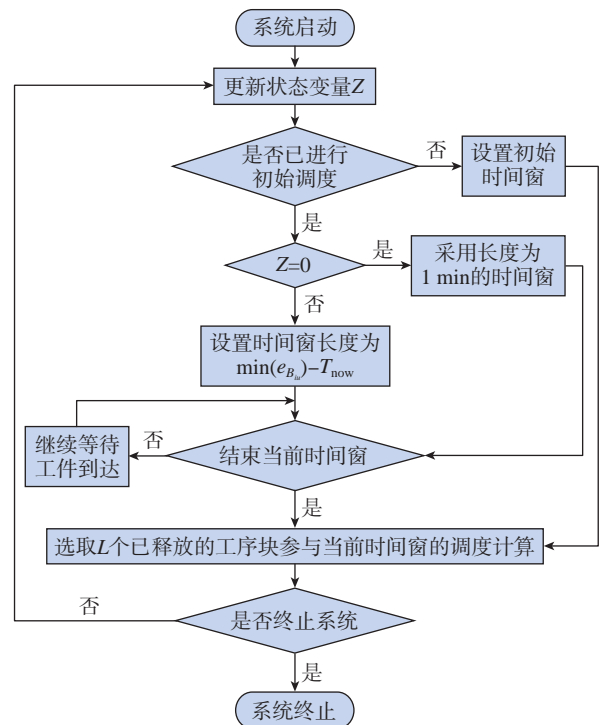


图 5 动态时间窗策略的具体执行逻辑
Fig.5 Specific execution logic of dynamic time window strategy

与 L 的计算方法分别如式 (1) 和 (2) 所示。

$$Z = \begin{cases} 1, & \text{产线中机床均被占用(包含损坏)} \\ 0, & \text{产线中机床未被全部占用} \end{cases} \quad (1)$$

$$L = 2 \times (m - m_B) \quad (2)$$

式中, m 为产线内机床的总数; m_B 为更新变量 Z 时产线内损坏机床的总数。

在整个动态时间窗运行的过程中, 单个时间窗内等待调度的工序块数量会逐渐大于 L , 此时应采取一定的措施来选择符合条件的工序块参与调度计算, 否则会使所有工件的等待时间及完工时间难以得到保证。调度规则具有较低时间复杂度, 动态性能较好的特点, 是解决实际生产中动态调度问题的一个有效方法。本文采用基于到达时刻的最先到达最先加工规则 (First come first service, FCFS) 对工序块进行选取, 以保证工件的等待时间以及完工时间。FCFS 的具体执行逻辑如图 6 所示。

2.4 柔性作业车间异常调度策略

任何制造过程都避免不了异常事件的发生, 本文针对设备故障与急件插单两类扰动设计了异常调度策略, 其异常处理流程如图 7 所示。

由于急件插单扰动下插单工件需要尽早完工, TPA 将会以新的方式释放加工任务, 在其知识库中设置一个用于表征插单状态的决策变量 D , 其具体描述见式 (3)。单个时间窗内参与调度的工序块数量上限 L 也将变更为式 (4) 的计算方式。

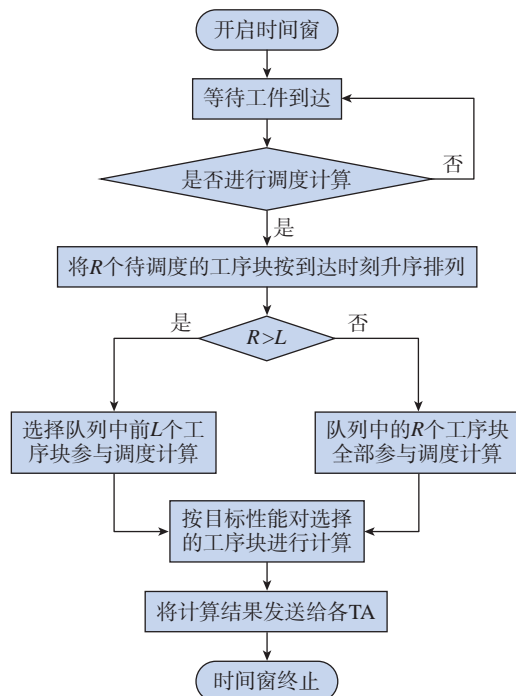


图 6 FCFS 的具体执行逻辑

Fig.6 Specific execution logic of FCFS

$$D = \begin{cases} 1, & \text{当前系统内有插单工件参与调度} \\ 0, & \text{当前系统内无插单工件参与调度} \end{cases} \quad (3)$$

$$L = (2 - D) \times (m - m_B) \quad (4)$$

3 仿真试验与结果分析

本文在 JDK 4.5.0 (Java development kit) 环境下借助 Eclipse 4.14.0 开发工具与 JADE 4.5.0 (Java agent development framework) 搭建调度平台, 调度平台的功能主界面如图 8 所示, 该平台主要包含用户管理、任务管理、调度控制、生产监控、帮助 5 个模块。将主要借助调度控制和生产监控模块进行基于固定时间窗调度策略 (Scheduling strategy based on fixed time window, SSBFTW) 与基于动态时间窗调度策略 (Scheduling strategy based on dynamic time window, SSBDTW) 的对比试验, 以及 SSBDTW 处理扰动事件的有效性试验, 仿真结果将由甘特图展示, 甘特图显示界面如图 9 所示。

3.1 试验环境设置

试验中模拟柔性生产线由 4 台全能型加工中心组成, 加工能力如表 2 所示, 其基础数据来源于文献 [11], 可处理包括人工翻转装夹、在机检测在内的 10 种工艺

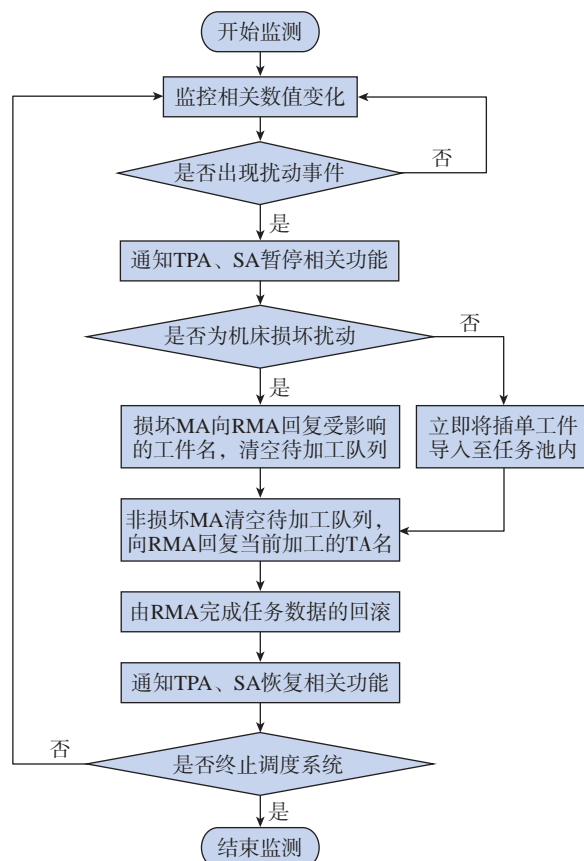


图 7 设备故障与急件插单扰动下的异常处理流程

Fig.7 Exception handling process under disturbance of equipment malfunction and urgent order

类型。人工翻转装夹、在机检测的加工系数固定为 1.0, 其余工艺类型的加工系数由区间 [0.7, 1.3] 内取随机数并精确到小数点后一位得到。

工单任务将以下述规则从如表 3 所示的 5 种工艺路线各不相同的示例工件中产生: 在区间 [1, 4] 取每种工件的个数 β_i ($1 \leq i \leq 5$), 使每个工单均包含上述 5 种示例工件, 工单内总工件数 $\alpha = \sum_{i=1}^5 \beta_i$, 且工件的到达顺序随机。各示例工件的工艺路线原始数据主要来源于文献 [14]~[16]。



图 8 调度平台功能主界面

Fig.8 Main interface of scheduling platform

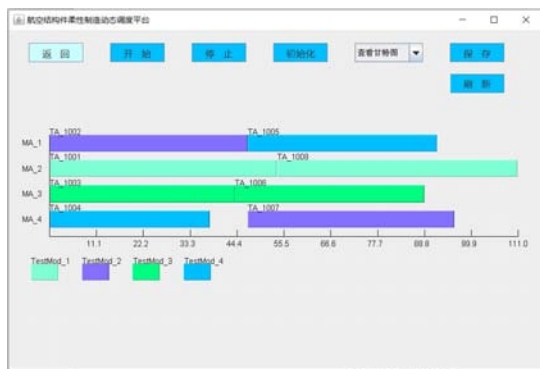


图 9 调度平台甘特图显示界面

Fig.9 Gantt chart interface of scheduling platform

实际生产过程中, 由于各工件的状态不完全相同, 不同工序块的加工前准备时间可能不相同, 当这些实际的准备时间与试验设定的准备时间产生偏差并累积, 试验结果便会与实际结果产生差异。但由于在实际生产中, 工件的加工前准备时间一般仅为数十秒, 而加工总时长可达数百分钟, 加工前准备时间的偏差对试验结果造成的影响较小, 在此忽略不计。

3.2 动态时间窗与固定时间窗调度方法对比试验

本试验以最大完工时间及设备利用率作为性能评价指标对比 SSBFTW 与 SSBDTW 随工件到达密度的变化情况 (SSBFTW 方法中取示例工件所有工序的平均加工时间为时间窗长度)。为尽可能保证得到的变化趋势具有普遍性, 根据工单规则构建如表 4 所示的 3 个批量分别为 10、15、20 的示例工单进行 3 组试验, 每组试验工件到达密度由大到小设置为 [0, 5]、[5, 10]、[10, 15]、[15, 20]、[20, 25] (相邻两工件的到达时间差在对应区间内随机取得, 首个工件默认初始时刻到达), 考虑平台启动时间、Agent 通信延误等偶然因素对试验的影响, 以每个工单每个档位进行 5 次试验取平均值作为对应档位的结果。

SSBFTW 与 SSBDTW 对比试验结果由图 10 所示, 分析可知: (1) 调度结果的最大完工时间与工件到达密度呈负相关, 在工件到达密度较大时两种方法最大完工时间较接近, 但 SSBDTW 调度结果的最大完工时间随工件到达密度的变化将显著优于 SSBFTW; (2) 调度结果的设备利用率随工件到达密度减小而减小, 但 SSBDTW 调度结果的设备利用率均优于 SSBFTW; (3) 总体上, SSBDTW 受工件到达密度变化的影响相比 SSBFTW 小。由此可见, SSBDTW 在工件到达密度变化的小批量、多品种生产场景下具有更好的调度性能和适应性。

3.3 异常调度策略有效性验证试验

本文选取工单 2 设置两组试验分别验证 SSBDTW 在设备故障、急件插单扰动下的有效性。处理设备故障

表 2 机床加工能力信息^[11]

Table 2 Machine tool processing capacity information^[11]

设备号	加工精度	加工系数									
		工艺类型 0	工艺类型 1	工艺类型 2	工艺类型 3	工艺类型 4	工艺类型 5	工艺类型 6	工艺类型 7	工艺类型 8	工艺类型 9
MA ₁	IT7	1.0	0.9	0.7	1.0	1.0	1.2	0.7	1.1	1.3	1.0
MA ₂	IT6	1.0	1.0	1.0	1.3	0.8	1.1	0.9	1.3	0.7	1.0
MA ₃	IT5	1.0	1.0	0.7	1.0	0.7	1.1	0.7	0.9	0.7	1.0
MA ₄	IT6	1.0	0.7	0.9	0.9	1.3	0.8	1.2	1.0	1.3	1.0

表 3 示例工件工艺路线^[14-16]
Table 3 Process routes for sample artifacts^[14-16]

示例工件		工序 1	工序 2	工序 3	工序 4	工序 5	工序 6	工序 7	工序 8	工序 9	工序 10	工序 11	工序 12
工件名	工艺信息												
TestMod_1	工艺类型	1	2	6	3	0	1	2	7	2	5	—	—
	需求精度	IT10	IT8	IT9	IT7	0	IT10	IT8	IT7	IT7	IT10	—	—
	时间期望/min	20	24	22	15	5	18	24	16	18	7	—	—
TestMod_2	工艺类型	1	2	0	1	2	0	2	0	3	9	8	5
	需求精度	IT11	IT8	0	IT11	IT8	0	IT8	0	IT8	0	IT7	IT10
	时间期望/min	25	32	5	28	43	5	14	5	24	2	13	10
TestMod_3	工艺类型	1	6	0	1	2	0	m	2	9	7	5	—
	需求精度	IT11	IT9	0	IT11	IT8	0	IT9	IT8	0	IT8	IT10	—
	时间期望/min	30	28	5	25	31	5	35	29	2	21	14	—
TestMod_4	工艺类型	1	3	4	0	3	9	4	5	—	—	—	—
	需求精度	IT10	IT8	IT7	0	IT8	0	IT7	IT10	—	—	—	—
	时间期望/min	18	22	27	5	16	2	27	10	—	—	—	—
TestMod_5	工艺类型	1	4	2	0	2	4	9	3	5	—	—	—
	需求精度	IT12	IT7	IT8	0	IT8	IT7	0	IT8	IT10	—	—	—
	时间期望/min	29	33	16	5	24	20	2	25	6	—	—	—

表 4 各示例工单内的工件信息
Table 4 Artifact information in each sample worksheet

工单序号	工件代号	对应的示例工件
1	{TestJob_1, TestJob_2, TestJob_3, TestJob_4, TestJob_5, TestJob_6, TestJob_7, TestJob_8, TestJob_9, TestJob_10}	{TestMod_3, TestMod_1, TestMod_1, TestMod_5, TestMod_2, TestMod_2, TestMod_4, TestMod_5, TestMod_1, TestMod_5}
2	{TestJob_1, TestJob_2, TestJob_3, TestJob_4, TestJob_5, TestJob_6, TestJob_7, TestJob_8, TestJob_9, TestJob_10, TestJob_11, TestJob_12, TestJob_13, TestJob_14, TestJob_15}	{TestMod_5, TestMod_2, TestMod_1, TestMod_3, TestMod_1, TestMod_3, TestMod_1, TestMod_5, TestMod_2, TestMod_5, TestMod_2, TestMod_4, TestMod_2, TestMod_5, TestMod_4}
3	{TestJob_1, TestJob_2, TestJob_3, TestJob_4, TestJob_5, TestJob_6, TestJob_7, TestJob_8, TestJob_9, TestJob_10, TestJob_11, TestJob_12, TestJob_13, TestJob_14, TestJob_15, TestJob_16, TestJob_17, TestJob_18, TestJob_19, TestJob_20}	{TestMod_1, TestMod_4, TestMod_4, TestMod_5, TestMod_3, TestMod_5, TestMod_1, TestMod_3, TestMod_2, TestMod_3, TestMod_1, TestMod_1, TestMod_2, TestMod_5, TestMod_2, TestMod_3, TestMod_5, TestMod_2, TestMod_4, TestMod_4}

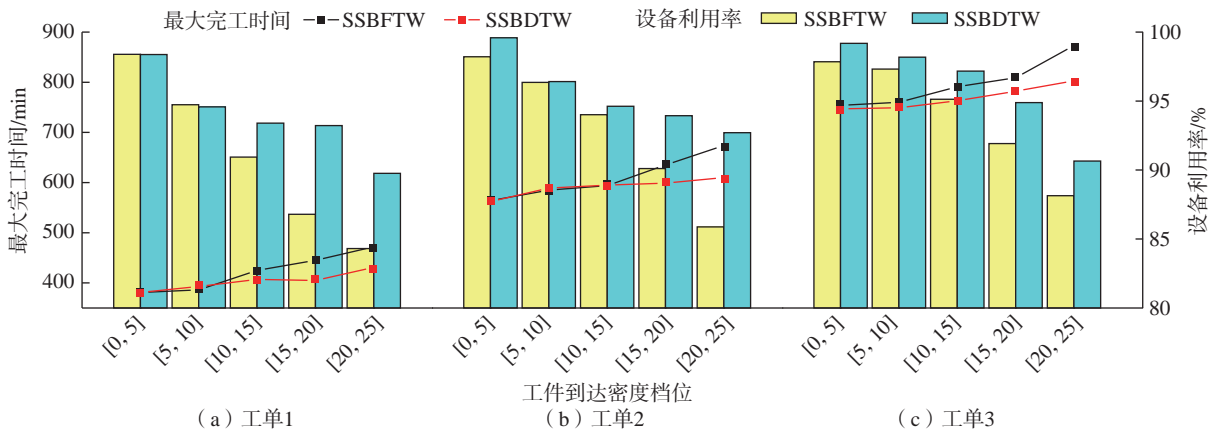


图 10 SSBFTW 和 SSBDTW 对比试验结果
Fig.10 Comparison of SSBFTW and SSBDTW experimental results

的试验中,随机取得故障发生时刻为第 93 min,故障机床为 MA₄,故障维护时间为 137 min, MA₄ 维护后的精度将由 IT6 下降至 IT8; 处理急件插单的试验中,随机取得插单时刻为第 85 min,插单工件为示例工件 3。设备故障、急件插单及无扰动状态下调度结果性能对比如图 11 所示,3 种状态下以档位 [0,5] 为例的调度结果甘特图如图 12 所示。

由上述试验可知:(1)设备故障扰动的调度结果相比无扰动的,最大完工时间由 562 min 增加到 575 min,性能下降约 2.31%,减少的 4 个工序块为直接受机器损坏影响的工件 TestJob₁₁ 的剩余未加工工序块,即设备发生故障后系统停止加工受损坏影响的工件,对剩余任务重新规划且与损坏前衔接较好, MA₄ 在结束维修

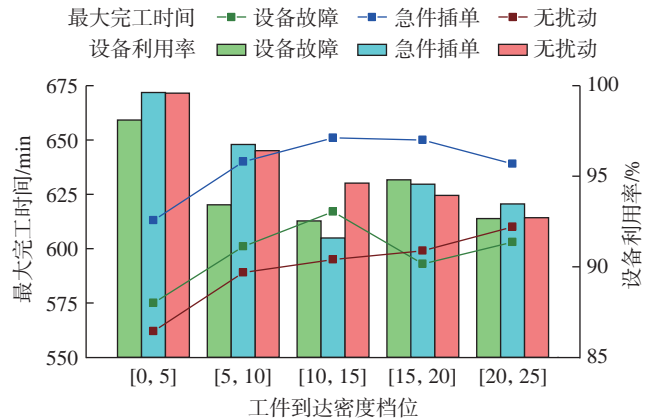


图 11 设备故障、急件插单与无扰动状态下的调度结果性能对比
Fig.11 Performance comparison of dispatching results under equipment failure, urgent order and undisturbed state

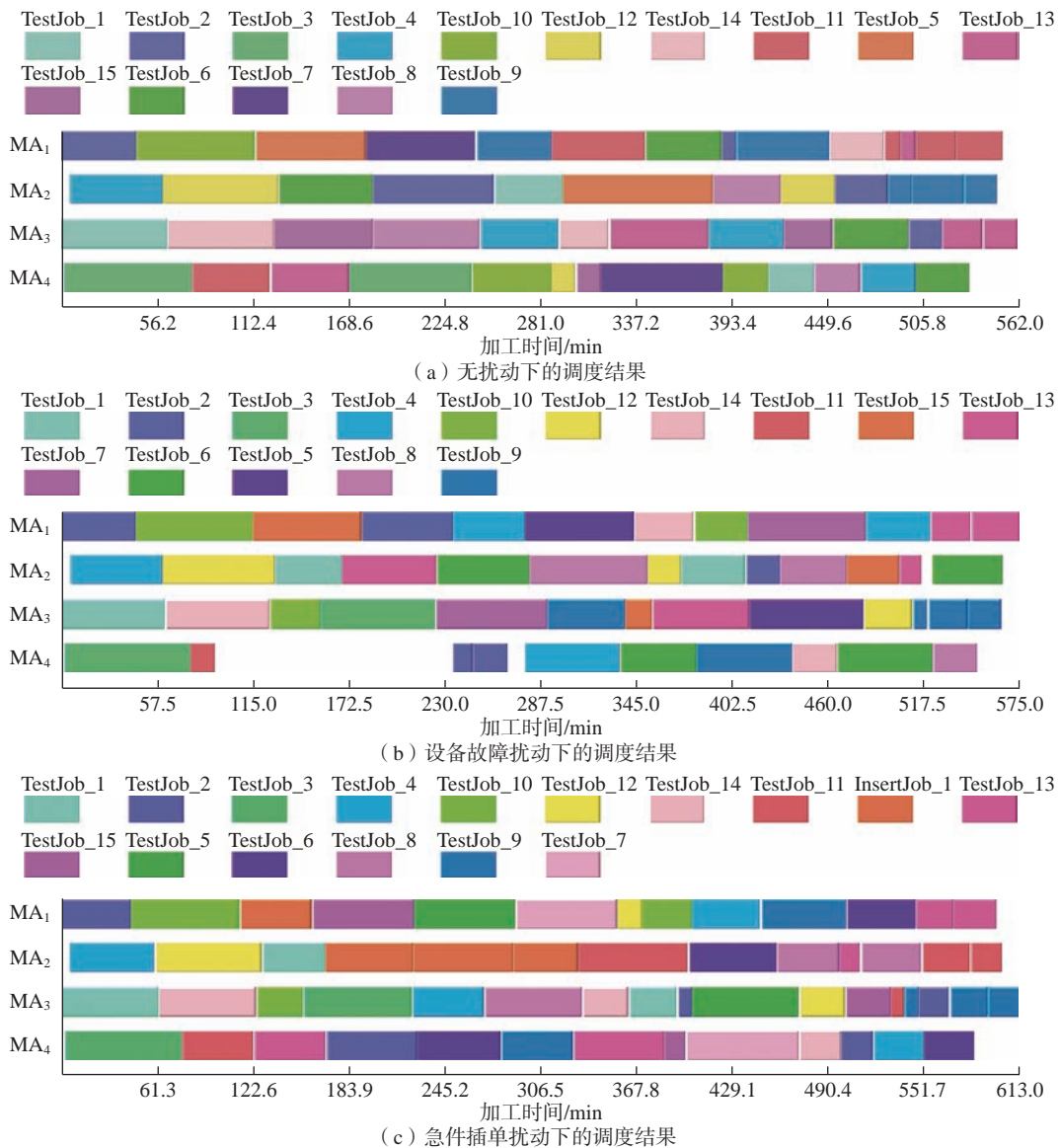


图 12 工单 2 [0,5] 档位调度结果甘特图

Fig.12 Gantt chart of scheduling results of work order two [0, 5] stalls

恢复使用后处理的工序块的精度需求也均未高于 IT8；(2) 急件插单扰动下的调度结果相比无扰动的,最大完工时间由 562 min 增加到 613 min,性能下降约 9.10%,增加的 4 个工序块为插单工件 InsertJob_1 的所有工序块,插单工件到达后系统便将其安排在最早可以开始加工的机床上进行加工,且插单工件的后续工序块均被连续释放,保证插单工件的优先完成。证明了本文调度策略处理异常扰动的有效性。

4 结论

本文通过分析生产调度问题的现状,发现其在当前柔性生产场景下应用效果并不理想,未充分利用加工环境中的动态数据,导致系统的实时性、灵活性较差。因此结合实际柔性作业车间生产流程,基于多 Agent 构建了柔性制造动态调度系统,并根据柔性作业加工特点以及调度过程中不同阶段的运行机制对传统 CNP 进行了改进,形成了以基于调度规则的动态时间窗调度方法为核心的动态调度策略。最后借助具备可视化交互界面的动态调度平台设计试验验证了本文动态调度策略的可行性,对当前实际柔性作业车间的生产活动具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] ZHANG J, DING G F, ZOU Y S, et al. Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(4): 1809–1830.
- [2] 桂林,张春江,李新宇.具有工序顺序柔性的车间调度问题研究综述[J].工业工程,2020,23(2):116–123.
- GUI Lin, ZHANG Chunjiang, LI Xinyu. A review of research on shop scheduling problem with flexible process sequence[J]. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(2): 116–123.
- [3] CHAUDHRY I A, KHAN A A. A research survey: Review of flexible job shop scheduling techniques[J]. International Transactions in Operational Research, 2016, 23(3): 551–591.
- [4] MOHAN J, LANKA K, RAO A N. A review of dynamic job shop scheduling techniques[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 30: 34–39.
- [5] 闫纪红,李柏林.智能制造研究热点及趋势分析[J].科学通报,2020,65(8):684–694.
- YAN Jihong, LI Baibin. Research hotspots and tendency of intelligent manufacturing[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(8): 684–694.
- [6] 范华丽,熊禾根,蒋国璋,等.动态车间作业调度问题中调度规则算法研究综述[J].计算机应用研究,2016,33(3):648–653.
- FAN Huali, XIONG Hegen, JIANG Guozhang, et al. Survey of dispatching rules for dynamic job-shop scheduling problem[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(3): 648–653.
- [7] 管晨丞,唐敦兵,魏鑫,等.基于区间协同拍卖策略的改进多 Agent 车间调度模型研究[J].航空制造技术,2019,62(7):34–42.
- GUAN Chencheng, TANG Dunbing, WEI Xin, et al. Research on modified multi-agent model for job-shop scheduling based on interval-synergy-auction scheduling strategy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(7): 34–42.
- [8] 江海凡,丁国富.基于 Agent 的制造系统建模与仿真研究[J].航空制造技术,2018,61(1/2):54–61.
- JIANG Haifan, DING Guofu. Survey of agent-based manufacturing system modeling and simulation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(1/2): 54–61.
- [9] WANG S Y, WAN J F, ZHANG D Q, et al. Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination[J]. Computer Networks, 2016, 101: 158–168.
- [10] 梁慰乐.基于多 Agent 的柔性生产动态调度系统研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- LIANG Weile. Research on multi-agent based flexible production dynamic scheduling system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [11] 魏鑫.面向多目标优化的改进型多 Agent 车间调度技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- WEI Xin. Research on multi-objective optimization for job-shop scheduling based on modified multi-agent system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [12] ZHANG S C, WONG T N. Flexible job-shop scheduling/rescheduling in dynamic environment: A hybrid MAS/ACO approach[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(11): 3173–3196.
- [13] 曹乐. CPPS 的多智能体架构与动态调度机制研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- CAO Le. Research on multi-agent architecture and dynamic scheduling mechanism of CPPS[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] 李超,路朝留,唐鸿雁,等.卧式五轴加工中心钛合金件加工工艺的设计[J].中国高科技,2018(2):44–46.
- LI Chao, LU Chaoliu, TANG Hongyan, et al. Design of machining technology for titanium alloy parts in horizontal five-axis machining center[J]. China High-Tech, 2018(2): 44–46.
- [15] 肖潇.航空结构件车间调度系统的研究与实现[D].成都:电子科技大学,2020.
- XIAO Xiao. Research and implementation of aviation structural parts production workshop scheduling system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [16] 吴继浩.面向航天产品的多目标动态生产调度方法研究及应用[D].绵阳:西南科技大学,2019.
- WU Jihao. Research and application of multi-objective dynamic production scheduling method for aerospace products[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.

通讯作者:杜丽,教授,硕士生导师,主要研究方向为智能制造装备及其控制技术。

(责编 晓月)

引文格式: 闫冬, 李国和, 王丰, 等. 铝锂合金切削加工试验研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 108–118.

YAN Dong, LI Guohe, WANG Feng, et al. Development of experimental study on cutting of Al–Li alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 108–118.

铝锂合金切削加工试验研究进展*

闫冬, 李国和, 王丰, 范建勋, 王大春

(天津职业技术师范大学, 天津 300222)

[摘要] 铝锂合金作为一种先进轻量化材料, 具有相对较低的密度、较高的比强度和比刚度以及较好的疲劳性能, 在航空航天领域应用广泛。但在铝锂合金切削加工过程中易于出现黏附磨损, 从而引起加工质量差、使用性能下降等一系列问题。因此, 国内外学者针对铝锂合金切削加工进行了相关研究。对近年来在铝锂合金切削加工试验方面的研究进展进行了总结, 重点分析了切削力、切削温度、加工表面质量、刀具磨损以及参数优化方面的研究成果, 指出了目前存在的问题以及今后的发展方向, 对铝锂合金切削加工技术的发展具有一定的促进作用。

关键词: 铝锂合金; 切削力; 切削温度; 加工表面质量; 刀具磨损; 参数优化

Development of Experimental Study on Cutting of Al–Li Alloy

YAN Dong, LI Guohe, WANG Feng, FAN Jianxun, WANG Dachun

(Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

[ABSTRACT] As an advanced lightweight material, Al–Li alloy has relatively low density, high specific strength and stiffness and good fatigue properties. It is widely used in the field of aerospace. However, adhesion wear is easy to occur in the cutting of Al–Li alloy, which leads to a series of problems, such as poor machining quality and service performance. Therefore, domestic and foreign scholars have carried out relevant research on the machining of Al–Li alloy. This paper summarizes the research on the cutting experiments of Al–Li alloy in recent years, focuses on the research results of cutting force, cutting temperature, machined surface quality, tool wear and parameter optimization. The existing problems and future development direction are pointed out. It can promote the development of Al–Li alloy cutting technology.

Keywords: Al–Li alloy; Cutting force; Cutting temperature; Machined surface quality; Tool wear; Parameter optimization

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.06.108

铝锂合金具有相对较低的密度、较高的比强度和比刚度、较好的疲劳性能和耐久性等诸多优越的性能, 是近年来发展最快的先进轻量化结构材料之一, 在航空航天以及机械制造等领域应用广泛^[1-3]。在航空领域, 铝锂合金被广泛用于制造机身框架、地板梁、翼肋等零部件^[4]。在航天领域, 铝锂合金主要用于制造大型运载器的低温推进剂贮箱以及结构件等^[5], 如图 1 所示。

目前, 铝锂合金常用的加工方式为化学铣削^[6-7], 其原理如图 2 所示。虽然化学铣削加工具备不产生切削应力、优化工件表面物理性能等优点, 但也存在加工尺寸精度低、抗疲劳性低、报废率高、污染环境等问题。因此, 近年来开始采用机械铣削进行替代加工。但铝锂合金质地较软, 切削加工时容易出现黏附磨损, 影响加工效率和质量。本文对近年来铝锂合金切削领域的国内

* 基金项目: 国家自然科学基金(51875409); 天津市教委重点项目(2020ZD08); 天津市“项目+团队”培养专项(XC202051)。

外研究进展进行总结,重点分析切削力、切削温度、加工表面质量和刀具磨损以及参数优化方面的研究成果,指出当前存在的问题以及今后可能的发展方向。

1 切削变形的研究

切削变形直接影响切屑处理以及切削力和切削热的产生,进而影响工件加工表面质量和刀具寿命,因此,切削变形一直是金属切削加工研究的一项重要内容。切削加工的实质是被切削层材料在刀具的推挤作用下发生弹塑性变形,达到断裂极限时与基体材料分离形成切屑。切屑能充分体现切削变形,因而对铝锂合金切削变形的研究是通过切屑分析实现的。

李慧中等^[8]通过 8090 铝锂合金和 LC4 铝合金的干车削试验,对比分析了两者切屑的差异,发现 8090 铝锂合金在低速区和高速区均产生带状切屑;LC4 铝合金在低速区产生 C 形切屑,在中、高速区产生带状切屑。李强强等^[9]采用 TiN 涂层刀具、硬质合金刀具和 TiAlN

涂层刀具对 2198-T8 铝锂合金进行切削试验,发现 TiN 涂层刀具断屑均匀,切屑表面较为光滑,切屑塑性变形最小,多为 C 形屑(图 3(a));在轴向切深和进给量一定的情况下,当 $v_c \leq 21.9$ m/min 时, TiAlN 涂层刀具切削铝锂合金产生片状切屑(图 3(b))与带状切屑(图 3(c));当 $v_c > 21.9$ m/min 时,开始出现螺旋状切屑(图 3(d))。

Niu 等^[10]采用干式切削方式,对 2A97 铝锂合金进行端面铣削,发现在切屑形成过程中,切屑内部发生了严重的塑性变形,而切削速度对摩擦痕迹和片状切屑边缘的形成至关重要。也有学者对与铝锂合金性能较为相近的 7075 铝合金的切削变形进行了研究^[11]。Ye 等^[12]的试验发现,未经时效处理的 7075 铝合金出现锯齿状切屑的临界切削速度为 270 m/min。Jomaa 等^[13]的试验表明,7075-T7651 铝合金出现锯齿状切屑的临界切削速度低于 156 m/min;出现这种差别的主要原因在于材料的硬度以及刀具前角的不同。Das 等^[14]对 7075 铝合金进行车削试验,结果表明,当切削参数较低时,切屑为长紧卷屑,随着每齿进给量与轴向切深的增加,开始出现螺卷屑;在较高的主轴转速下,出现长而连续的带状螺旋屑;在进给 0.1 mm/r 和轴向切深 0.5 mm 时观察到短锯齿屑,而在高速加工下会出现较短的带状屑。殷继花等^[15]的试验发现,当切削速度为 960 m/min 时,锯齿形切屑在切屑厚度较大的一侧出现,并随着切屑厚度的减小而逐渐消失,变为均匀带状切屑。Cagan 等^[16]在干切和 MQL 条件下对 7075-T6 铝合金进行切削试

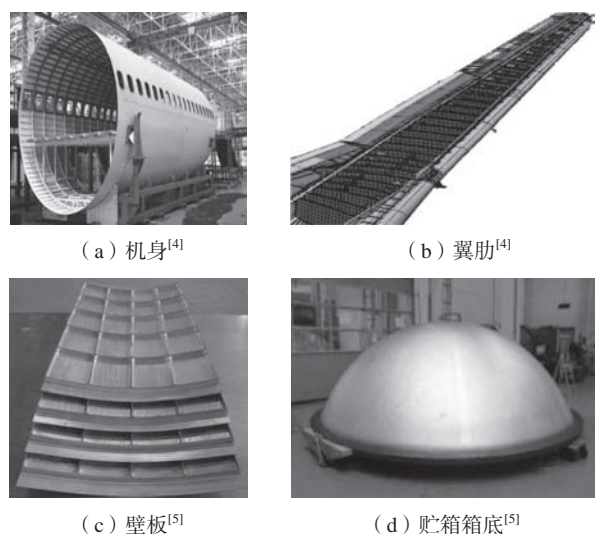


图 1 铝锂合金在航空航天领域的应用
Fig.1 Application of Al-Li alloy in aerospace field

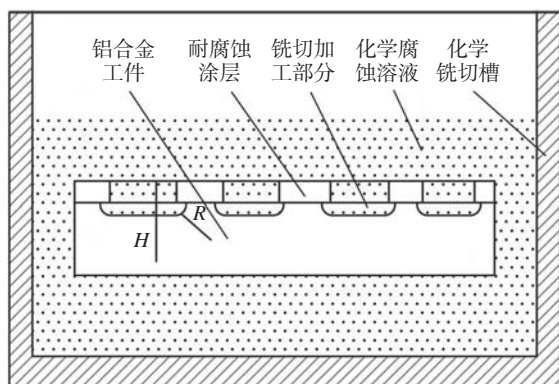


图 2 化学铣削的原理^[6]
Fig.2 Principle of chemical milling^[6]

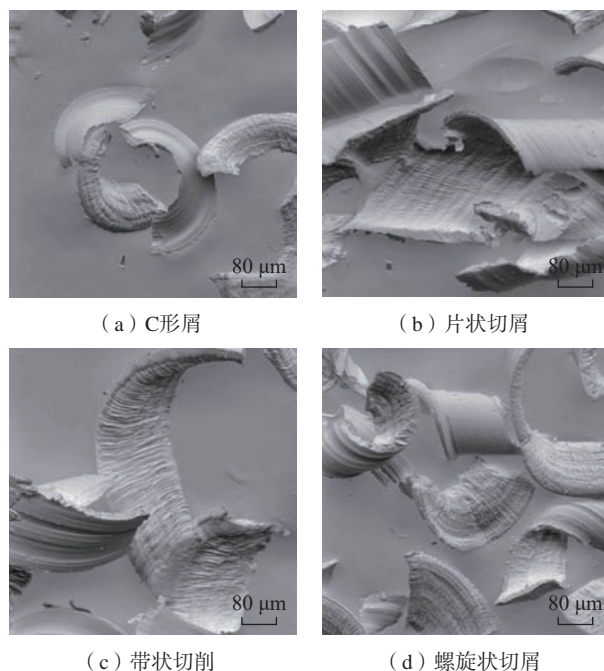


图 3 铝锂合金切屑形态^[9]
Fig.3 Chip morphology of Al-Li alloy^[9]

验,发现在 MQL 环境下加工得到的切屑比干切时更长,说明 MQL 条件下产生的切削热更容易由切屑排出。

在铝锂合金切削加工的过程中,随着切削速度的逐渐提高,切削过程逐渐平稳,切削力的波动较小,切屑宽度无明显变化,但切屑厚度更加均匀,切屑形态更稳定;随着进给速度的逐渐提高,切削力随之增大,切屑的塑性变形更加显著,切屑也更加弯曲;当轴向切深较小时,多出现窄长状切屑,随着轴向切深的增加,切屑宽度明显增加,切屑厚度虽然更加均匀,但切屑卷曲程度更大,塑性变形增大。轴向切深的增加,需要更大的切削力,从而引起更大程度的塑性变形,进而导致螺旋状切屑的出现。

2 切削力的研究

切削力被认为是切削加工的主要现象之一,对切削加工的稳定性、刀具寿命、系统变形及加工质量都有重要影响。

徐海进等^[17]对 Al-Cu-Li 系铝锂合金进行切削力试验,发现每齿进给量与切削力成正比, $n < 15000$ r/min 时,随着切削速度的增大,应变率增加,应变率硬化程度增大,剪切力增大,使得切削力有增大的趋势; $n > 15000$ r/min 时,切削速度相对较高,随着切削速度的提高,材料热软化的作用增强,缓和了切削力的增大趋势,与 7085、2024 和 6061 这 3 种常用铝合金切削力的对比试验表明, Al-Cu-Li 系铝锂合金与这 3 种材料切削力的变化趋势大致相同,数值差别也不大,但更接近于 7085 铝合金的切削力,采用硬质合金刀具切削铝锂合金时,刀具磨损对切削力影响较大,刀具的螺旋角对切削力也有一定影响。Mou 等^[18]进行了 2060 铝锂合金的单因素铣削试验发现,在轴向切深为 3.2 mm,每齿进给量为 0.1 mm/z 时,径向切深与切削力正相关。吕岩^[19]开展了 2060 铝锂合金高速铣削正交试验,对切削力进行了分析,发现当 $n < 14000$ r/min 时,切削合力随主轴转速的增大而增大;主轴转速 14000 r/min $< n < 18000$ r/min 时,切削合力随着切削速度的增大而减小; $n > 18000$ r/min 时,切削合力随切削速度的增大而增大。雷忠潭^[20]采用极差法分析了 2195 铝锂合金正交试验的切削力数据,揭示了加工参数对切削力的影响规律,发现轴向切深与每齿进给量对切削力存在较大影响,切削力随轴向切深和每齿进给量的增加而迅速增大,轴向切深的增大意味着切削宽度的增大,增大了剪切面积,导致切削力增大;每齿进给量的增大使得切削厚度增大,变形抗力增加,从而导致切削力增大; $n < 2800$ r/min 时切削力随着切削速度的增大而增大, $n > 2800$ r/min 时切削合力随着切削速度的增大而减小,这也是应变率硬化和热软化共同作用

的结果。李强强等^[9]的试验研究发现, TiN 涂层刀具具备优越的抗黏附性,采用其切削时产生的切削力远比采用硬质合金刀具和 TiAlN 涂层刀具时低。在具有一定参考性的 7075 铝合金切削力方面,李户航等^[21]发现,随着主轴转速 n 的提高,切削速度增大,各切削分力不断减小。Luo 等^[22]通过 7075-T7651 铝合金切削试验发现,当切削速度在 160~280 m/min 之间时,切削力与切削速度正相关;当切削速度大于 280 m/min 时,切削力与切削速度负相关,同时切削力随进给量和切削深度的增加而增大。Zhang 等^[23]同样发现,当切削速度在 500~1000 m/min 之间时,各切削分力随着切削速度增大不断减小,其主要原因在于切削速度的增大导致摩擦角减小,剪切角增大,变形系数减小以及材料的热软化作用,而切削力与切削深度和进给速度呈正相关。Sethupathy 等^[24]对 7075-T6 铝合金进行的试验发现,当切削速度为 75~115 m/min 时,切削力随切削速度的增加而减小;当切削速度大于 115 m/min 时,切削力随切削速度的增加而增大,这可能是受到刀具磨损的影响。

可以看出,目前所得的切削力随切削参数的变化规律并不一致,出现争议的主要原因在于切削力与工件材料、刀具种类相关,相关学者在进行试验时采用的工件材料与刀具存在差异,不同的材料与刀具在不同的切削参数下所测得的切削力也会存在一定的差异,从而导致得出的结论并不一致。总体来看,对切削力影响最大的因素为轴向切深 a_p ,其次是每齿进给量 f_z ,然后是径向切深 a_e ,最后是主轴转速 n 。在切削分力中,径向力 F_x 最大,切向力 F_y 次之,轴向力 F_z 最小。

3 切削温度的研究

作为切削机理研究中的一个重要组成部分,切削温度对切削力、刀具磨损、加工表面残余应力等方面的影响较大,因此也是研究的重点之一。切削温度的测量主要有电阻法、热电偶法、表面涂层法和红外热像仪测量法等^[25]。

一些学者采用红外热像仪对铝锂合金的切削温度进行了测量。杨吟飞等^[26]在采用红外热成像法进行切削温度测量时,对铝锂合金表面发射率进行了标定,得到已加工表面的发射率 ϵ 为 0.16~0.2,研究发现,在整个加工过程中,最高温度主要集中在刀尖处, $n = 9000$ r/min, $f_z = 0.2$ mm/z, $a_e = 2$ mm, $a_p = 10$ mm 时,最高温度可以达到 158.2 °C。牟海阔^[27]对高速铣削 2A97 铝锂合金的铣削温度进行试验研究,同样发现温度最高点始终存在于刀尖位置,且由于切削热量的不断积累而随之升高,研究表明,随着主轴转速 n 、每齿进给量 f_z 和径向切深 a_e 的不断增大,切削温度呈现逐渐上升的趋势。杨吟飞

等^[26]的试验结果发现,随着切削速度的提高,切削力不断增大,产生的热量增多,从而导致切削温度不断升高;切削温度的增加在 $n=12000$ r/min之后有所减缓,是由于在高速切削加工中切屑带走了更多的热量;每齿进给量的增加,会直接引起切屑厚度的增加,使得变形产生的热量不断增加,最终导致切削温度的升高;径向切深的增大,会导致材料的去除量增加,从而导致切削力增大,产生的热量多,切削温度也随之升高。

也有学者采用热电偶进行测温。杨吟飞等^[26]通过夹丝热电偶法研究铝锂合金的切削温度,结果表明,切削速度、每齿进给量都与铣削温度呈正相关关系,且在主轴转速 $n=18000$ r/min的条件下,切削温度低于 400 °C;在主轴转速 $n=6000$ r/min的条件下,切削温度低于 200 °C。牟海阔^[27]选用T型热电偶测量2060铝锂合金的切削温度,结果发现,相对于干切工况,采用合理的液氮低温冷却可使最高温度下降50%左右,表明选用合理的液氮低温冷却能显著降低切削温度,在采用冷却刀具的情况下,工件表面温度可以达到 50 °C左右,降温程度相对较小;而在对工件进行预冷的情况下,工件表面温度则显著降低,并在 -5 °C上下波动,说明采用工件预冷的方式更能有效降低工件表面温度。Denkena等^[28]的研究表明,相比未倒棱立铣刀,倒棱立铣刀增加了立铣加工过程的稳定性,但同时也产生了更多的热量,使工件上容易形成刚性降低的热软化区域,并认为提高每齿进给量可以降低工件表面的最高温度。

也有学者对材料性能相近的7075铝合金进行了切削温度的研究。李户航等^[21]的试验发现,随着主轴转速 n 、进给量 f_z 、径向切深 a_e 和轴向切深 a_p 的增大,切削温度也随之升高。Luo等^[22]通过对7075-T7651铝合金进行切削试验发现,切削温度随切削速度先增大后减小,随进给量的增加而增大,而切削深度对切削温度影响较小。Zhang等^[23]发现当切削速度从 250 m/min增加到 1000 m/min时,切削温度随着切削速度的增加而增加;当切削速度达到 1000 m/min后,切削温度开始下降,切削温度与切削深度正相关,在低进给速度下,切削温度随着进给速度的增加而升高;当进给速度达到 0.12 mm/z时,切削温度开始趋于平缓。

目前所得到的关于切削温度与每齿进给量之间变化规律的结论并不一致,争议点主要集中在提高每齿进给量是否可以降低工件的最高温度,出现以上争议的主要原因在于切削温度与刀具磨损以及铝锂合金的种类相关,相关学者在试验时所采用的刀具种类、铝锂合金的型号各不相同,而不同刀具在不同切削速度下的磨损程度也不相同,所产生的热量存在差异,导致得出的切削温度相关结论并不一致。

4 表面质量的研究

工件的耐腐蚀性、耐磨性、疲劳强度、使用性能以及使用寿命在某种程度上是由表面质量决定的,同时表面质量也是衡量工件服役性能的一项重要指标。因此国内外研究人员从表面粗糙度 R_a 、表面裂纹、加工硬化以及残余应力等方面对工件的表面质量进行了研究。

4.1 表面粗糙度

表面粗糙度对工件的疲劳强度、服役性能以及配合的平稳性都有较大影响,是评价表面质量的一项重要参数。

李慧中等^[8]对8090铝锂合金和LC4铝合金分别进行车削试验,对比分析结果表明,两者车削表面粗糙度的差异不大, R_a 均为 $0.35\sim 0.46$ μm 。Rong等^[29]对Al-Cu-Li系铝锂合金进行单因素铣削试验发现,切削速度对 R_a 的影响没有明显的规律,在一定范围内波动,随着每齿进给量的增大,切削力不断增加,刀具与工件之间的振动明显加剧,每齿进给量的增加,会引起残留高度的增大与鳞刺现象的发生,导致 R_a 不断增大。徐海进^[30]利用单因素铣削试验进行Al-Cu-Li系铝锂合金和7085铝合金表面粗糙度的对比分析,发现铝锂合金表面粗糙度随切削速度和每齿进给量的变化与7085铝合金相似,表面粗糙度随切削速度的变化规律不明显,与每齿进给量呈正相关关系,总体上,铝锂合金的已加工表面粗糙度往往小于7085铝合金。

张兴振等^[31]对2060-T8铝锂合金的铣削试验表明, R_a 随着轴向切深、每齿进给量和主轴转速的增加而增大,且 R_a 随着径向切深先减小后增大,临界径向切深为 4 mm,其主要原因在于随径向切深增加的切削温度在一定程度上可以抑制积屑瘤的产生,从而改善表面质量。吕岩^[19]采用极差法对2060铝锂合金高速铣削后的试验结果进行分析,发现随着每齿进给量的增加, R_a 逐渐增大;当径向切深增大时, R_a 先增大后减小,当径向切深为 3.2 mm时达到最大值;当主轴转速增大时, R_a 先增大后减小,当主轴转速为 18000 r/min时达到极小值($R_a=0.1959$ μm),随后又出现上升趋势;当轴向切深增加时,表面粗糙度值趋于平稳($R_a=0.2151\sim 0.2677$ μm)。雷忠潭^[20]对2195铝锂合金进行了铣削试验,认为表面粗糙度随径向切深增加而先减小后增大,临界径向切深为 2.4 mm,当 1500 r/min $<n<2800$ r/min时, R_a 呈下降趋势;当 2800 r/min $<n<4000$ r/min时, R_a 出现较大幅度的上升并达到峰值;当 4000 r/min $<n<5200$ r/min时, R_a 又出现缓慢下降的趋势,其主要原因是切削热随着切削速度的增加而增加,引起工件表层软化,有利于提高表面质量,同时主轴转速的增长,加剧了刀

具的磨损,导致表面质量下降,二者共同影响着表面粗糙度的变化情况。Niu 等^[10]对 2A97 铝锂合金进行了高速切削试验,结果表明,轴向切深与表面粗糙度之间存在正相关关系,其主要原因在于轴向切深与切削力的正相关关系导致了表面质量的下降,随着切削速度不断增大, R_a 先减小后增大,临界切削速度为 1000 m/min。Sogorovic 等^[32]通过铝锂合金铣削试验发现,切削速度和进给速度对表面粗糙度的影响较为显著,进给速度越小,切削速度越大,表面粗糙度就越小。

相关学者也研究了不同切削环境下表面粗糙度的变化规律。丁悦等^[33]的试验表明,同一切削参数下平直处表面质量($R_a=0.171\sim 0.556\ \mu\text{m}$)要比拐角处表面质量好得多($R_a=0.497\sim 1.434\ \mu\text{m}$),这是因为加工拐角时,机床主轴所承载荷不稳定,易于发生振动,从而导致拐角处表面质量变差。在选定的切削参数范围内,无论平直处和拐角处, $v_c=628.32\ \text{m/min}$ 、 $f_z=0.08\ \text{mm/z}$ 、 $a_p=1\ \text{mm}$ 、 $a_c=3.5\ \text{mm}$ 时,能够获得最好的表面质量。滚压强化是利用金属的冷塑性,使用滚压工具对工件表面施加压力,进而使得工件表层金属发生弹塑性变形,形成冷作硬化,引入残余压应力,并降低表面粗糙度,达到提高工件的抗疲劳性、耐久性等服役性能的目的。牟海阔^[27]在干切、液氮环境下对铝锂合金进行高速切削试验,研究了切削三要素与上一道滚压工艺对 2060-T8 铝锂合金表面粗糙度的影响,发现当进给方向与滚压方向呈 30° 时,表面粗糙度取得最小值(干切 $R_a=0.438\ \mu\text{m}$,液氮 $R_a=0.612\ \mu\text{m}$),相对于干切工况,在选用液氮低温冷却时,工件的表面粗糙度平均增大了 77%;当滚压角度为 30° 时,液氮低温冷却和干切工况都可以获得最小的表面粗糙度(干切 $R_a=0.552\ \mu\text{m}$,液氮 $R_a=0.562\ \mu\text{m}$)。也有学者对相近材料 7075 铝合金的表面粗糙度进行了研究。Kouam 等^[34]通过对 7075-T6 进行试验,观察到在 1.75 mL/min 的 MQL 流速下能够得到比 3 mL/min 的 MQL 流速以及干燥条件下更好的表面质量。Cagan 等^[16]采用干切和 MQL 对 Al7075-T6 铝合金进行试验,同样发现 MQL 条件下与干切条件下的测试结果相比,工件的表面质量得到了改善,MQL 条件下的表面粗糙度比干切低 15%。

工件的表面粗糙度也会对其耐腐蚀性产生一定程度的影响。Xue 等^[35]基于静电场理论,利用开尔文探针技术发现 2297 铝锂合金的电子逸出功与表面粗糙度正相关,得出了表面粗糙度越大,耐腐蚀性越差的结论。Niu 等^[36]的试验表明,2A97 铝锂合金试样的表面越粗糙,表面活性越强,越容易发生氧化反应,导致耐腐蚀性降低。Liu 等^[37]的试验发现,2297 铝锂合金表面粗糙度较低时,点蚀敏感性较低,点蚀速率较慢,耐腐

蚀性相对较好。Niu 等^[38]根据 2A97 铝锂合金加工表面的电化学阻抗谱测试结果发现,铣削表面的粗糙度越小,耐腐蚀性越好,利用电化学阻抗谱形状建立了等效电路,进而证实了 2A97 铝锂合金铣削加工表面相比机械磨抛处理表面在耐腐蚀性能上的优越性。

从现有的研究来看^[10],对工件表面粗糙度的影响程度最大的是每齿进给量 f_z ,其次是轴向切深 a_p ,然后是径向切深 a_c ,最后是主轴转速 n ,且在进给量和轴向切深较低的情况下所获得的工件表面粗糙度更小。 R_a 在一定范围内随着切削速度的增大而减小,超出此范围后随着切削速度的增大而增大。

4.2 表面残余应力

表面残余应力是由切削过程中塑性变形与切削热的共同作用引起的,对工件的综合性能以及使用寿命影响很大,是表面质量的一项重要参数。

Rong 等^[29]发现 Al-Cu-Li 系铝锂合金经高速铣削后表面呈现拉应力状态,但数值不大。随着切削速度的提高以及每齿进给量的增大,残余应力也逐渐增大,并且当 $n=18000\ \text{r/min}$ 、 $f_z=0.2\ \text{mm/z}$ 、 $a_p=10\ \text{mm}$ 、 $a_c=2\ \text{mm}$ 时表面残余应力达到最大(X 向为 49 MPa, Y 向为 50 MPa)。Niu 等^[10]发现高速铣削后 2A97 铝锂合金表面呈压应力状态,数值不大,表面上两个方向的残余应力的幅值均小于 100 MPa,同一测试方向上残余应力最大差值仅 150 MPa 左右。

Mou 等^[18]在干式、液氮冷却两种环境中加工 2060-T8 铝锂合金,研究了铣削前滚压方向与铣削中进给方向之间的夹角对铣削加工工件表面残余应力的影响,研究发现,在干切工况下,当滚压角度为 45° 的方向时,产生的残余压应力远远超过于其他方向;在工件采用液氮低温冷却时,工件表面的残余压应力较干切工况提升了 150~200 MPa,说明铝锂合金在合理的液氮低温冷却条件下,选用较高的转速、较大的切深以及较高的进给可以使工件表面维持相对较大的残余压应力。Zhang 等^[39]在 Mou 等^[18]试验的基础上通过对比两种加工环境中的切削力与切削温度,发现切削参数一定时,两种加工环境中切削力的差别很小,而切削温度存在明显区别,因此,将不同环境下工件表面残余应力的差异归因于切削温度。

也有学者对 7070 铝合金的切削残余应力进行研究。Wu 等^[40]对 7075 铝合金进行切削试验发现,随着切削速度的增加,残余应力减小,当切削速度从 500 m/min 提高到 1250 m/min 时,切削残余应力降低约 60 MPa,随着表面粗糙度的增加,最大残余拉应力会有一定程度的增加。机械加工引入的表面残余压应力有利于改善零部件的耐腐蚀性能,而残余拉应力则削弱其性

能。Luo 等^[22]的试验发现,切削速度与每齿进给量对表面残余应力的影响较大,随着切削速度和进给量的增加,表面残余应力的的大小和残余应力层深度都增大。Zhang 等^[23]却发现,当切削速度在 250~1250 m/min 之间波动时,表面残余压应力与切削速度负相关,并观察到最大残余压应力层深度为 120 μm ,最大亚表层残余拉应力层深度为 300 μm ,并且最大表面残余拉应力在 15 MPa 左右波动。Niu 等^[36]发现由于存在试样表面残余应力小,同时电解液与试样表面不存在壁面剪应力等因素,导致 2A97 铝锂合金耐腐蚀性能基本不受加工表面残余应力的影响。

Niu 等^[10]采用极差分析研究了切削参数对加工表面残余应力的影响,研究发现,对平行方向的残余应力影响最显著的是切削速度 v_c ,其次为径向切深 a_e ,然后是每齿进给量 f_z ,最后是轴向切深 a_p ;对垂直方向的残余应力影响最显著的是轴向切深 a_p ,其次为切削速度 v_c ,然后是每齿进给量 f_z ,最后是径向切深 a_e 。

4.3 表面层加工硬化

切削过程中的加工硬化会使得工件表层变硬,从而导致刀具磨损加剧,进而引起加工质量差与服役时间减少等问题。

雷忠潭^[20]在进行 2195 铝锂合金铣削试验时,发现 2195 铝锂合金在不同每齿进给量及不同切削速度下的加工硬化程度范围在 107%~123% 之间,如图 4 所示。当切削速度由 20.096 m/min 增加到 35.168 m/min 时,加工表层硬度呈递减趋势,其主要原因是铣削速度较小时,工件的塑性变形随着切削速度的增加而减小,导致加工硬化程度降低。当切削速度增加到 30.168~65.312 m/min 时,工件加工表面硬度呈上升趋势,不同进给量下的表面硬度在切削速度最大时达到极值。其主要原因在于铣削速度的增加,缩短了金属导热的时间,减小了材料

的热软化,使得工件表面的硬化程度增加。每齿进给量的增加会导致工件所受铣削力增加,表层金属的塑性变形加剧,从而导致加工后硬化程度增加。Mou 等^[18]的试验结果同样表明,所有加工表面的硬化程度均在 109%~119% 范围,切削加工引入的表面变形层深度约为 20 μm ,且在该变形层内切削加工对基体材料的硬化作用随与加工表面距离变大而减弱。

在 7050 铝合金的表面加工硬化方面,Fu 等^[41]的试验发现,加工硬化能力在 112%~123% 之间波动,当切削速度 v_c 从 600 m/min 增加到 900 m/min 时,加工硬化能力和表面硬度略有下降,但当切削速度超过 1000 m/min 时,加工硬化能力和表面硬度明显上升;高切削速度 ($v_c=1200$ m/min) 下加工硬化层深度约为 35 μm ;低切削速度 ($v_c=600$ m/min) 下加工硬化层深度约为 25 μm ,因此认为高速切削比低速切削产生更多的加工硬化和更深的硬化层。谭靛等^[42]的试验发现,在试验参数范围内,试样表面硬度在 179~193HV_{0.025} 之间,表面硬度基本不变。Zhang 等^[23]利用单因素法对 7050-T7451 进行切削试验,发现加工硬化层深度与切削速度、切削深度呈负相关,加工硬化程度随切削速度与进给量的增大呈先增大后减小的变化趋势,与切削深度呈负相关。

铣削加工中表层材料发生塑性变形造成加工硬化程度增大对 2A97 铝锂合金耐腐蚀性能存在不可忽视的作用。Niu 等^[38]对比了不同显微硬度 2A97 铝锂合金铣削加工试样,发现加工表面显微硬度的增大有利于改善表面耐腐蚀性能。

4.4 表面微观形貌

徐海进等^[43]通过高速铣削 Al-Cu-Li 系铝锂合金表面微观形貌观察试验,发现已加工表面会出现由周期进给引起的切削波纹(图 5(a)),小的坑洞(图 5(b)),残留切屑(图 5(c))以及振动引起的毛刺(图 5(d))等,

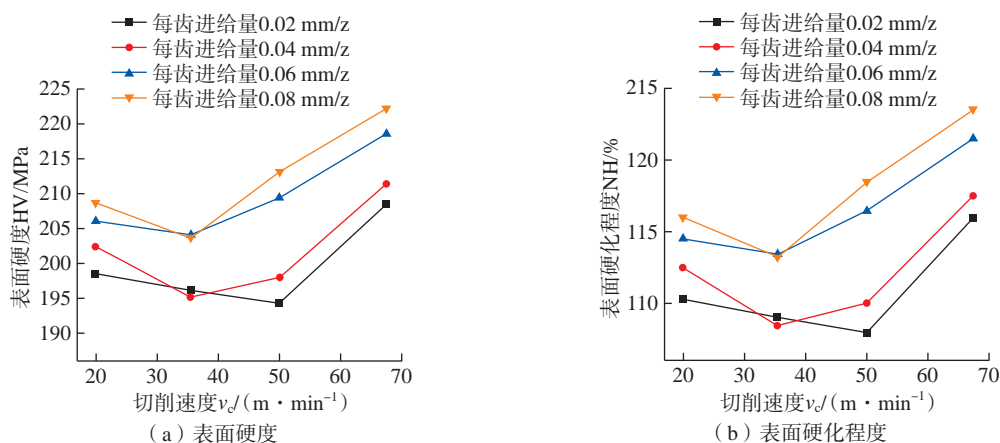


图 4 不同每齿进给量和切削速度下的表面硬度和表面硬化程度^[20]

Fig.4 Surface hardness and surface hardening degree under different feed per tooth and milling speed^[20]

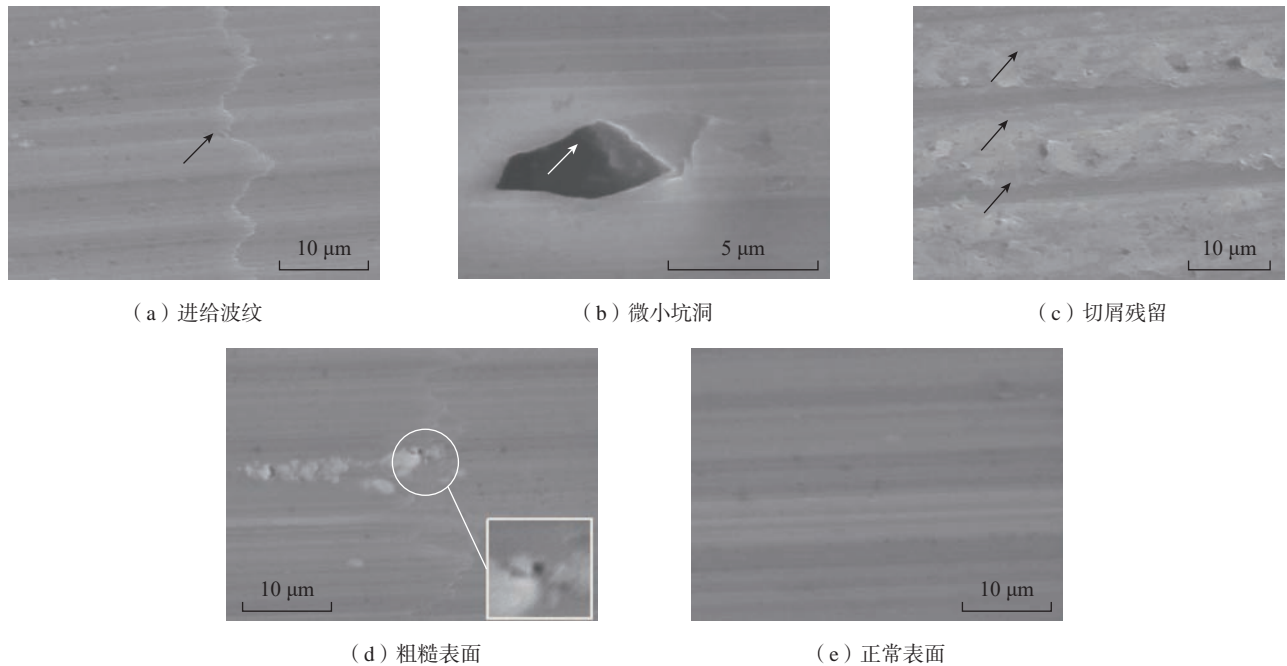


图5 铝锂合金表面形貌图^[43]

Fig.5 Surface morphology of Al-Li alloy^[43]

但已切削表面大部分为正常形貌(图5(e))。丁悦等^[33]对2198铝锂合金进行高速切削试验,发现平直刀路和拐角刀路都极易出现表面缺陷,在刀纹交错处也出现了大量的表面缺陷(图6)。

针对切削加工表面通常出现的微观裂纹问题,徐海

进^[30]通过扫描电镜、电涡流法以及荧光渗透法3种方法检测Al-Cu-Li系铝锂合金的加工表面裂纹,如图7所示,结果未发现表面裂纹的存在,因此认为常规和高速铣削并不会导致铝锂合金表面裂纹的产生。

4.5 已加工表面的金相组织

徐海进^[30]通过高速铣削铝锂合金已加工表面金相组织的观察,发现其表层金相组织与基体相比变化不大。牟海阔^[27]的研究也表明,当铣削转速在2500~5000 r/min范围内变化时,铝锂合金的晶粒大小没有显

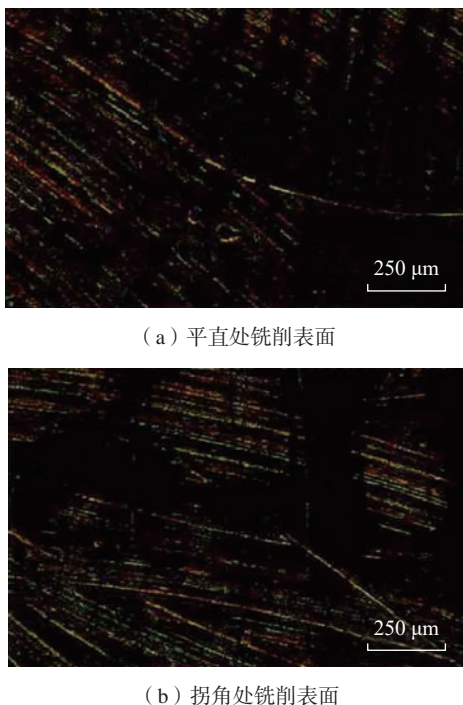


图6 铝锂合金铣削表面形貌^[33]

Fig.6 Surface morphology of milling Al-Li alloy^[33]

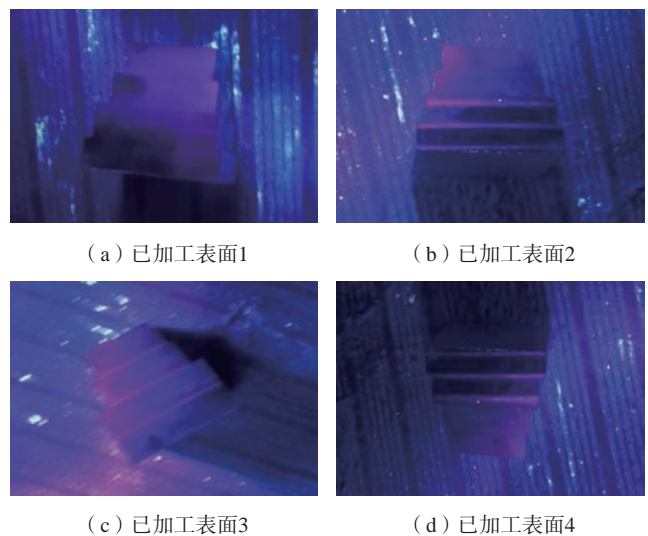


图7 荧光渗透裂纹检测结果^[30]

Fig.7 Results of crack detection by fluorescence penetration test^[30]

著的变化,晶粒沿刀具进给方向没有明显的拉压变形。牛金涛^[44]的试验发现,近切削表面处微观组织(图8(a))与基体微观组织(图8(b))均为大尺寸晶粒,在平行进给方向上晶粒尺寸甚至超过1 mm,而切削加工影响层的深度约为20 μm,远小于晶粒尺寸,这同样表明,铣削加工对2A97铝锂合金加工表面的影响不足以细化原始微观组织中的大尺寸晶粒。

5 刀具磨损

刀具磨损直接影响加工表面完整性,进而影响被加工零件的使用性能。加工铝锂合金时,常会出现黏附磨损从而导致加工表面质量差等问题。

Niu等^[10]选用无涂层硬质合金刀具加工2A97铝锂合金,发现没有出现太大磨损。李强强等^[9]选用硬质合金刀具、TiN涂层刀具和TiAlN涂层刀具分别进行试验,发现TiAlN涂层刀具铣削2198-T8铝锂合金时最容易发生黏结磨损,对比3种刀具的磨损情况(图9),发现TiN涂层刀具的磨损最小,加工效果最好;硬质合金刀具具有轻微黏附发生;TiAlN涂层刀具表面工件材料黏附严重,刀具磨损最大,加工效果最差。这是由于TiAlN涂层中含有铝元素,在切削时会在刀屑界面上形成一层导热性差的氧化铝保护膜,导致切屑无法及时带

走切削热,刀具局部温度更高,更容易发生黏附磨损。

6 参数优化

开展切削加工参数优化是铝锂合金切削加工研究的最终落脚点,是提高机床的利用率、实现高效加工和降低成本的主要手段。

吕岩^[19]基于最小二乘支持向量机建立了表面粗糙度预测模型,利用最优化原理,建立了以材料去除率最大为优化目标的高速铣削铝锂合金切削参数优化模型,对其进行优化求解并通过了试验验证。雷忠潭^[20]以表面粗糙度与材料去除率为优化目标,采用粒子群优化算法对目标函数进行优化,得到的最佳切削参数降低了表面粗糙度,提高了加工效率。Yue等^[45]基于响应曲面法以表面粗糙度与比切削能为优化目标,建立了多目标优化模型,采用多目标粒子群优化算法确定铣削参数的最优组合。从现有研究来看,在切削加工参数优化时多以材料去除率、表面粗糙度等作为优化目标,通过采用粒子群优化算法、最小二乘支持向量机法等进行单目标或多目标参数优化,并且目前针对铝锂合金的切削参数优化研究较少。

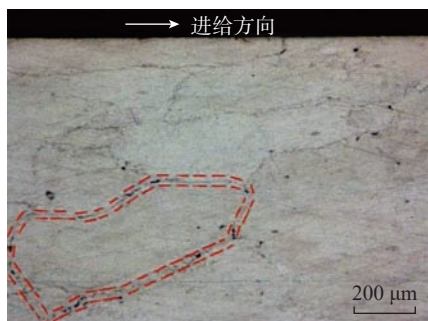
7 不足及发展方向

7.1 研究的不足

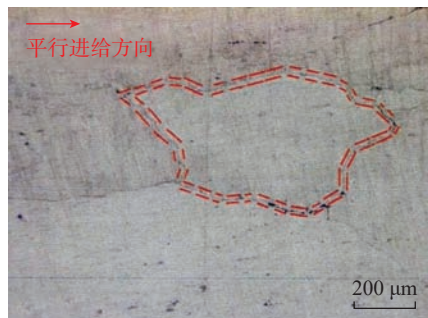
(1)关于铝锂合金切屑形成的文献较少,并且缺少关于铝锂合金与铝合金切屑的对比分析。

(2)在切削力方面,虽然进行了大量研究并取得了一定成果,但试验结论并不一致,其中关于切削力的研究大多是集中在静态切削力方面,对于周期性动态切削力的研究鲜有报道。

(3)在切削温度方面,仅仅提出了切削参数对切削温度的影响,却没有研究其影响程度。尽管使用辐射法对切削温度进行测温时,能够较好的获得切削温度,但



(a) 近切削表面



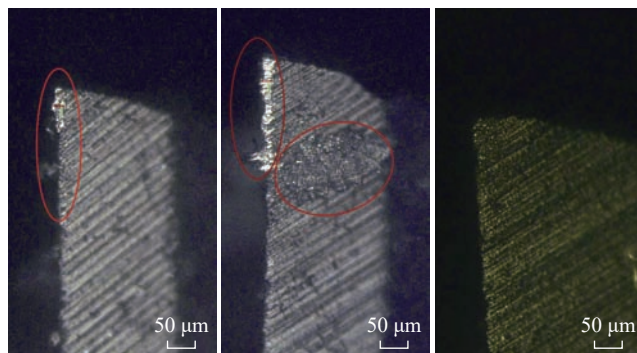
(b) 基体微观组织

图8 近切削表面与基体微观组织

($a_p=1\text{ mm}$, $a_c=20\text{ mm}$, $v_c=1300\text{ m/min}$, $f_z=0.05\text{ mm/z}$)^[44]

Fig.8 Near-cutting surface and matrix microstructure

($a_p=1\text{ mm}$, $a_c=20\text{ mm}$, $v_c=1300\text{ m/min}$, $f_z=0.05\text{ mm/z}$)^[44]



(a) 硬质合金刀具 (b) TiAlN涂层刀具 (c) TiN涂层刀具

图9 3种刀具材料磨损情况对比^[9]

Fig.9 Contrast of tool wear made of carbide^[9]

却只能得到工件及切屑的表面温度,而不能得到整个切削区域的温度分布,更无法获得对刀具磨损具有决定作用的刀具-切屑接触界面温度。

(4)在表面质量方面,现有研究大多数局限于单一指标的变化而缺少全面分析,并且对表面残余应力、表面层加工硬化以及表面层微观组织变化的研究不够深入,而这些恰恰是工件服役性能的重要影响因素。

(5)在刀具磨损方面,由于铝锂合金质地较软,刀具磨损较少,对于该方面的研究也较少,并且有关铝锂合金切削试验的研究大多使用硬质合金刀,在一定程度上制约了铝锂合金的应用。

(6)在参数优化方面,没有考虑加工成本、加工时间和机床的振动等因素,并且多目标函数权重确定方面的研究也不够深入。

7.2 未来的发展方向

针对以上问题,应从以下方面开展进一步的研究。

(1)继续深入铝锂合金切屑形成的研究,开展铝锂合金切屑与铝合金切屑的对比研究,探究铝锂合金对铝合金的替代性。

(2)进一步开展动态切削力研究,揭示动态切削力随切削参数的变化规律,为切削参数的优选奠定基础。

(3)开展基于非接触式测温法的切削温度研究,揭示切削参数对切削温度的影响程度,进一步探索切削温度随切削参数的变化规律,同时结合有限元仿真建立切削温度预测模型,实现切削区域温度分布的较准确预测。

(4)深入开展已加工表面质量的系统研究,尤其是表面残余应力、表面层加工硬化以及表面层微观组织变化的研究,从提高产品服役性能的角度进行工艺优化。

(5)在刀具磨损方面,一方面深入研究不同刀具材料的服役性能,选择合适的刀具;另一方面需要建立刀具寿命经验公式,从而更好地指导切削加工工艺的合理制定。

(6)在参数优化方面,可以采用BP神经网络、遗传算法、深度学习和响应曲面等智能优化技术对工艺参数进行优化,并采用更有效的决策方法对优化解集进行决策。

8 结论

铝锂合金由于其优越的性能而被广泛应用于航空航天领域,是近年来发展速度最快的先进轻量化结构材料之一。但由于其质地较软,在切削过程中容易出现黏附磨损、表面质量差等问题,给铝锂合金零部件的加工制造带来困难。尽管国内外学者开展了铝锂合金切削加工的试验研究,也取得了较好的成果,但也存在

部分结论不一致,缺乏定量分析,预测模型的准确性有待提升以及缺乏与铝合金的对比研究等问题。在今后应重点开展切屑变形、切削力、切削温度和加工表面质量的系统研究,揭示动态切削力、切削温度随切削参数的变化规律,加强表面残余应力、表面层加工硬化以及表面微观组织变化问题的研究,从而提高产品的服役性能。铝合金材料铣削的超高速加工范围为1500~5000 m/min,在进行铝锂合金铣削试验时,可适当开展更高切削速度条件下切削试验的研究。同时,增加铝锂合金与铝合金的对比试验,深入研究铝锂合金对铝合金的替代性。并考虑采用BP神经网络、深度学习、遗传算法和响应曲面等优化技术对工艺参数进行优化,获得更准确、有效的优化结果。

参考文献

- [1] 吴秀亮,刘铭,臧金鑫,等.铝锂合金研究进展和航空航天应用[J].材料导报,2016,30(S2):571-578,585.
WU Xiuliang, LIU Ming, ZANG Jinxin, et al. Research progress and aerospace application of aluminum lithium alloys[J]. Materials Review, 2016, 30(S2): 571-578, 585.
- [2] BALDUCCI E, CESCHINI L, MESSIERI S, et al. Effects of overaging on microstructure and tensile properties of the 2055 Al-Cu-Li-Ag alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 707: 221-231.
- [3] PARK G H, KIM J T, PARK H J, et al. Development of lightweight MgLiAl alloys with high specific strength[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 680: 116-120.
- [4] 高长宝.铝锂合金的特点及在直升机上的应用展望[J].科学技术创新,2020(29):5-7.
GAO Changbao. Characteristics of Al-Li alloy and its application prospect in helicopter[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(29): 5-7.
- [5] 徐进军,康唯,都昌兵.航空航天铝锂合金及其成形技术的研究现状和发展趋势[J].兵器材料科学与工程,2017,40(3):132-137.
XU Jinjun, KANG Wei, DU Changbing. Research status and development trends of Al-Li alloys for aeronautic and astronautic industry[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(3): 132-137.
- [6] 金以元.火箭贮箱壁化学铣切装备的设计[J].导弹与航天运载技术,2009(2):52-56.
JIN Yiyuan. Design of equipment for chemical milling of rocket tank sheets[J]. Missiles and Space Vehicles, 2009(2): 52-56.
- [7] 孟莉莉,朱彦海,曾元松.响应面法优化2A97铝锂合金化学铣工艺的研究[J].表面技术,2017,46(7):255-261.
MENG Lili, ZHU Yanhai, ZENG Yuansong. Optimization of 2A97 Al-Li alloy chemical milling technology in response surface method[J]. Surface Technology, 2017, 46(7): 255-261.
- [8] 李慧中,刘彧.铝锂合金切削加工性的研究[J].机械设计与制造工程,1999,28(6):15-16,3.
LI Huizhong, LIU Yu. Study on the machinability of alloy with aluminum and lithium[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 1999, 28(6): 15-16, 3.

- [9] 李强强, 石文天, 袁美霞, 等. TiN 和 TiAlN 涂层刀具铣削铝锂合金表面质量试验对比研究 [J]. 表面技术, 2020, 49(12): 319–329.
- LI Qiangqiang, SHI Wentian, YUAN Meixia, et al. Research on cutting performance of TiN and TiAlN coated cutting tools for milling Al–Li alloy[J]. Surface Technology, 2020, 49(12): 319–329.
- [10] NIU J T, LIU Z Q, AI X, et al. Characteristics of machined surface integrity in face milling Al–Li alloy 2A97 with carbide inserts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(1–4): 839–848.
- [11] 李飘, 姚卫星. 铝锂合金材料发展及综合性能评述 [J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 12–20.
- LI Piao, YAO Weixing. Review on the development and performance of aluminum–lithium alloys[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(1): 12–20.
- [12] YE G G, CHEN Y, XUE S F, et al. Critical cutting speed for onset of serrated chip flow in high speed machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 86: 18–33.
- [13] JOMAA W, MECHRI O, LÉVESQUE J, et al. Finite element simulation and analysis of serrated chip formation during high-speed machining of AA7075–T651 alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 446–458.
- [14] DAS D, PRASANNA SAHOO B, BANSAL S, et al. Experimental investigation on material removal rate and chip forms during turning T6 tempered Al7075 alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 3250–3256.
- [15] 殷继花, 林有希, 孟鑫鑫, 等. 航空铝合金 7075–T651 高速铣削锯齿形切屑的形成机理研究 [J]. 表面技术, 2019, 48(5): 275–285.
- YIN Jihua, LIN Youxi, MENG Xinxin, et al. Formation mechanism of sawtooth chip in high speed milling of aeronautical aluminum alloy 7075–T651[J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 275–285.
- [16] CAGAN S C, VENKATESH B, BULDUM B B. Investigation of surface roughness and chip morphology of aluminum alloy in dry and minimum quantity lubrication machining[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27: 1122–1126.
- [17] 徐海进, 杨吟飞, 李亮, 等. 铝锂合金高速铣削力的试验研究 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(13): 83–86, 90.
- XU Haijin, YANG Yinfei, LI Liang, et al. Experimental study of cutting forces in high speed milling of aluminum–lithium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(13): 83–86, 90.
- [18] MOU H K, HUANG X D, ZHANG X M, et al. Experimental study of surface integrity of aluminum lithium alloy by face milling[M]// Intelligent Robotics and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 491–502.
- [19] 吕岩. 高速铣削铝锂合金切削力和表面粗糙度试验研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- LÜ Yan. Experimental study on cutting force and surface roughness of high speed milling aluminum–lithium alloy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [20] 雷忠潭. 铝锂合金数控铣削加工工艺参数优化 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
- LEI Zhongtan. Optimization of process parameters for CNC milling process of aluminum–lithium alloy[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2019.
- [21] 李户航, 郑小伟, 陈艳妮, 等. 7075–T651 铝合金薄壁件加工仿真研究 [J]. 现代制造工程, 2018(2): 107–113, 101.
- LI Huhang, ZHENG Xiaowei, CHEN Yanni, et al. The machining simulation of aluminum 7075–T651 thin-walled parts[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(2): 107–113, 101.
- [22] LUO H, WANG Y Q, ZHANG P. Effect of cutting parameters on machinability of 7075–T651 aluminum alloy in different processing methods[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7–8): 2035–2047.
- [23] ZHANG P, YUE X J, WANG P H, et al. Surface integrity and tool wear mechanism of 7050–T7451 aluminum alloy under dry cutting[J]. Vacuum, 2021, 184: 109886.
- [24] SETHUPATHY A, SHANMUGASUNDARAM N. Prediction of cutting force based on machining parameters on Al7075–T6 aluminum alloy by response surface methodology in end milling[J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2021, 52(8): 879–890.
- [25] 刘战强, 黄传真, 万熠, 等. 切削温度测量方法综述 [J]. 工具技术, 2002, 36(3): 3–6.
- LIU Zhanqiang, HUANG Chuanzhen, WAN Yi, et al. Summary of cutting temperature measurement methods[J]. Tool Engineering, 2002, 36(3): 3–6.
- [26] 杨吟飞, 史琦, 戎斌, 等. 高速铣削铝锂合金的铣削温度试验研究 [J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(6): 4–7.
- YANG Yinfei, SHI Qi, RONG Bin, et al. Experimental study of cutting temperature in high speed milling of aluminum–lithium alloy[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2013, 49(6): 4–7.
- [27] 牟海阔. 铝锂合金高速切削表面完整性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- MOU Haikuo. Investigation of surface integrity of aluminum lithium alloy in machining[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [28] DENKENA B, BRÜNING J, NIEDERWESTBERG D, et al. Influence of machining parameters on heat generation during milling of aluminum alloys[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 39–42.
- [29] RONG B, WANG D S, YANG Y F, et al. Study on the cutting forces and surface integrity in high speed milling of aluminum–lithium alloy[J]. Materials Science Forum, 2013, 770: 64–68.
- [30] 徐海进. 铝锂合金高速铣削试验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- XU Haijin. Experimental study on high speed milling of aluminum–lithium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [31] 张兴振, 李小强, 李东升, 等. 新型铝锂合金 2060T8 板材铣削试验研究 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(3): 47–51.
- ZHANG Xingzhen, LI Xiaoqiang, LI Dongsheng, et al. Experimental study on milling of new Al–Li alloy 2060T8 sheet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(3): 47–51.
- [32] SOGOROVIC D, KNEZEVIC A. Testing of the surface roughness parameters of aluminium–lithium parts machined by milling[M]// DAAAM Proceedings. Seattle: DAAAM International Vienna, 2019: 0148–0154.

[33] 丁悦, 王焱, 吴茂庆, 等. 铝锂合金高速铣削表面粗糙度试验研究 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(6): 92–94, 99.

DING Yue, WANG Yan, WU Maoqing, et al. Experimental study on surface roughness during high speed milling aluminum–lithium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(6): 92–94, 99.

[34] KOUAM J, SONGMENE V, BALAZINSKI M, et al. Effects of minimum quantity lubricating (MQL) conditions on machining of 7075–T6 aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5–8): 1325–1334.

[35] XUE M S, PENG S B, WANG F J, et al. Linear relation between surface roughness and work function of light alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 692: 903–907.

[36] NIU J T, LIU Z Q, WANG B, et al. Effect of machining-induced surface integrity on the corrosion behavior of Al–Li alloy 2A97 in sodium chloride solution[J]. Materials and Corrosion, 2019, 70(2): 259–267.

[37] LIU J H, ZHAO K, YU M, et al. Effect of surface abrasion on pitting corrosion of Al–Li alloy[J]. Corrosion Science, 2018, 138: 75–84.

[38] NIU J T, LIU Z Q, WANG G J, et al. Anticorrosion property enhancement of Al–Li alloy 2A97 by lowering machined surface roughness[J]. Materials and Corrosion, 2020, 71(12): 1980–1988.

[39] ZHANG X M, MU H K, HUANG X D, et al. Cryogenic milling of aluminium–lithium alloys: Thermo-mechanical modelling towards fine-tuning of part surface residual stress[J]. Procedia CIRP, 2015, 31: 160–165.

[40] WU Q, LI D P. Analysis and X-ray measurements of cutting residual stresses in 7075 aluminum alloy in high speed machining[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(8): 1499–1506.

[41] FU X L, AN Z H, QIAO Y, et al. Influence of work-hardening on wear resistance of machined surface of aviation aluminum alloy[J]. Key Engineering Materials, 2013, 589–590: 117–121.

[42] 谭靓, 姚倡峰, 张定华. 7055 铝合金高速加工表面完整性对疲劳寿命的影响 [J]. 机械科学与技术, 2015, 34(6): 872–876.

TAN Liang, YAO Changfeng, ZHANG Dinghua. Influence of the surface integrity on the fatigue life for high-speed milling of 7055 aluminum alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(6): 872–876.

[43] 徐海进, 杨吟飞, 张烘州, 等. 铝锂合金高速铣削表面质量的试验研究 [J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(4): 10–13.

XU Haijin, YANG Yinfei, ZHANG Hongzhou, et al. Experimental study of surface quality in high speed milling of aluminum–lithium alloy[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2013, 49(4): 10–13.

[44] 牛金涛. 铝锂合金 2A97 铣削加工表面完整性及耐腐蚀性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.

NIU Jintao. Surface integrity and corrosion behavior of milled Al–Li alloy 2A97[D]. Jinan: Shandong University, 2020.

[45] YUE H T, GUO C G, LI Q, et al. Milling parameters optimization of Al–Li alloy thin-wall workpieces using response surface methodology and particle swarm optimization[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2020, 124(3): 937–952.

(上接第 98 页)

[109] WANG C, ZHOU B, TU Y, et al. Critical dipole length for the wetting transition due to collective water-dipoles interactions[J]. Scientific Reports, 2012, 2: 358.

[110] ZHU C Q, GAO Y R, HUANG Y Y, et al. Controlling states of water droplets on nanostructured surfaces by design[J]. Nanoscale, 2017, 9(46): 18240–18245.

[111] XIA D H, SONG S Z, TAO L, et al. Review-material degradation assessed by digital image processing: Fundamentals, progresses, and challenges[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 53: 146–162.

[112] PARDO A, MERINO S, MERINO M C, et al. Corrosion behaviour of silicon-carbide-particle reinforced AZ92 magnesium alloy[J]. Corrosion Science, 2009, 51(4): 841–849.

[113] ZHANG B, MA X L. A review—Pitting corrosion initiation investigated by TEM[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(7): 1455–1465.

[114] ZHOU X, LUO C, HASHIMOTO T, et al. Study of localized corrosion in AA2024 aluminium alloy using electron tomography[J]. Corrosion Science, 2012, 58: 299–306.

[115] EGUCHI K, BURNETT T L, ENGELBERG D L. X-ray tomographic characterisation of pitting corrosion in lean duplex stainless steel[J]. Corrosion Science, 2020, 165: 108406.

[116] ROČŇÁKOVÁ I, MONTUFAR E B, HORYNOVÁ M, et al. Assessment of localized corrosion under simulated physiological conditions of magnesium samples with heterogeneous microstructure: Value of X-ray computed micro-tomography platform[J]. Corrosion Science, 2016, 104: 187–196.

[117] DAVENPORT A J, PADOVANI C, CONNOLLY B J, et al. Synchrotron X-ray microtomography study of the role of Y in corrosion of magnesium alloy WE43[J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 2007, 10(2): C5.

[118] WANG J, JANG Y, WAN G J, et al. Flow-induced corrosion of absorbable magnesium alloy: In-situ and real-time electrochemical study[J]. Corrosion Science, 2016, 104: 277–289.

[119] ZHANG C, LIU C, LI X, et al. Quantifying the influence of secondary phases on corrosion in multicomponent Mg alloys using X-ray computed microtomography[J]. Corrosion Science, 2022, 195: 110010.

[120] 帅三三, 王江, 任忠鸣. X-ray 成像技术表征金属凝固组织及其演化过程研究进展 [J]. 中国材料进展, 2019, 38(1): 68–76.

SHUAI Sansan, WANG Jiang, REN Zhongming. Application of synchrotron X-ray imaging in solidification of metallic materials[J]. Materials China, 2019, 38(1): 68–76.

[121] BURNETT T L, MCDONALD S A, GHOLINIA A, et al. Correlative tomography [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 4711.

[122] ALMUALILI F A, MCDONALD S A, WITHERS P J, et al. Strain-induced reactivation of corrosion pits in austenitic stainless steel[J]. Corrosion Science, 2017, 125: 12–19.

通讯作者: 李国和, 教授, 博士, 研究方向为高速切削加工。

(责编 七七)

通讯作者: 王俊升, 教授, 博士, 研究方向为集成计算材料工程, 航空轻质铝合金及镁合金的设计、表征和应用基础。

(责编 晓月)

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、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、Al₂O₃、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。
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4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
斯达拉格公司	封二	23-1014
达诺巴特集团	封三	23-1052
海克斯康集团	封底	23-1050
英赛贝拉尔蒂（上海）机床贸易有限公司	1	23-1086
伊斯卡公司	3	23-1023
因代克斯贸易（上海）有限公司	5	23-1029
北京新吉泰软件有限公司	7	23-1072
北京迪蒙数控技术有限责任公司	9	23-1011
北京东兴润滑剂有限公司	11	23-1004
欧洲工业清洗公司	13	23-1049
第十八届中国国际机床展览会	120	23-1085

CIMT 2023

第十八届中国国际机床展览会

THE 18TH CHINA INTERNATIONAL MACHINE TOOL SHOW

🕒 2023年4月10-15日

📍 北京·中国国际展览中心（顺义馆）

📍 北京顺义天竺裕翔路88号

Date: April 10-15, 2023

**Venue: China International Exhibition
Center (Shunyi Hall), Beijing**

**Address: 88 Yuxiang Road, Tianzhu,
Shunyi, Beijing, P.R.China**



CMTBA微信订阅号

主办：中国机床工具工业协会

承办：中国机床工具工业协会 中国国际展览中心集团有限公司

Sponsor: China Machine Tool & Tool Builders' Association (CMTBA)

Organizers: China Machine Tool & Tool Builders' Association (CMTBA)

China International Exhibition Center Group Limited (CIEC)

广告索引号23-1085

FLY TO THE FUTURE

WELCOME ABOARD!

CIMT 2023 | **2023.4.10-4.15**
E2-B001 | **欢迎莅临我们的展台**

& GRAND OPENING | **上海卓越中心**
2023.5.31-6.2 | **开放日活动**



诚邀您莅临我们的展位并向工作人员索要达诺巴特集团上海卓越中心开放日的入场资格，这将会是一场行业内的梦幻之旅，感谢您选择达诺巴特集团航空公司！



请在我们的展会现场扫描相关二维码，签到核验后向工作人员索要**开放日的入场券及礼品**。真诚的希望您妥善保管此“机票”，这是搭乘本次航班极为重要的凭证，谢谢。

航空航天

从模拟仿真到自动装配，成就飞翔的梦想

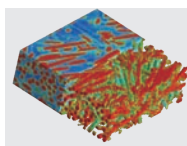
► 航空设计



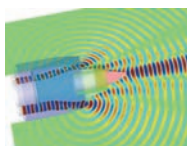
结构和多体动力学仿真



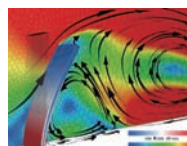
传动系统设计



材料建模



声学仿真

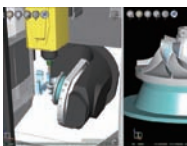


流体和热动力学

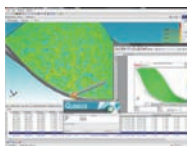
► 加工编程



加工编程



加工仿真

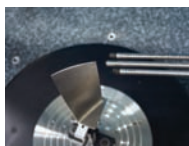


测量编程及仿真



测量辅助加工

► 检测及大尺寸装配



高精度光学测量



大尺寸自动化检测



间隙及面差测量



大尺寸数字化装配

► 维护维修



飞机结构损伤记录与分析



飞机损坏评估



飞机辅材修复MRO



设备精度校准



扫描了解更多海克斯康
航空航天解决方案