

# 面向飞机大型成型模具的机器人精整技术研究\*

雷沛<sup>1,2</sup>, 曾德标<sup>1,2</sup>, 江开林<sup>1</sup>, 胥军<sup>1,2</sup>, 张勇兵<sup>1</sup>, 孟华林<sup>1,2</sup>, 谭红<sup>1,2</sup>, 潘登<sup>1,2</sup>

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092;

2. 四川省航空智能制造装备工程技术研究中心, 成都 610092)

**[摘要]** 针对飞机大型成型模具表面精整过程中存在的精整效率低、质量一致性差、缺乏精整质量检测手段、作业环境恶劣等问题, 构建集成工业机器人、多功能末端执行器、数字声发射检测装置、精整工艺规划与仿真软件以及集成控制软件的机器人辅助表面精整系统, 研究精整力自适应控制、智能精整工艺规划、表面粗糙度在线检测等关键技术, 实现大尺寸、高效率、闭环质量控制的大型成型模具表面自动精整, 提高飞机大型成型模具表面精整的效率和质量。

**关键词:** 工业机器人; 多功能末端执行器; 离线编程; 声发射; 在线检测

## Research on Robot Assisted Polishing Technologies for Large Aircraft Shaping Mold

LEI Pei<sup>1,2</sup>, ZENG Debiao<sup>1,2</sup>, JIANG Kailin<sup>1</sup>, XU Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongbing<sup>1</sup>, MENG Hualin<sup>1,2</sup>,  
TAN Hong<sup>1,2</sup>, PAN Deng<sup>1,2</sup>

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

2. Sichuan Aeronautical Intelligent Manufacturing Equipment Engineering Technology Research Center,  
Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** For polishing large aircraft shaping mold in manual way, there are some problems that can not be settled including low efficiency, poor quality, lack of measuring instrument, bad working condition. To solve these problems, a robot assisted polishing system is proposed which consists of industrial robot, multiple function end effectors, acoustic emission equipment, process planning and simulation software and integrated controlling software. The key technologies including adaptive controlling of polishing force, intelligent process planning and online measurement of roughness are proposed in this paper to realize automatic polishing for large shaping mold with high efficiency and closed loop control of quality.

**Keywords:** Industrial robot; Multiple function end effectors; Offline programming; Acoustic emission; Online measurement

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.05.074

飞机大型成型模具是制造大尺寸壁板、飞机蒙皮等航空大型整体构件的重要工艺装备, 模具的表面质量和制造周期对飞机大型构件的成型质量和生产周期都有着重要的影响, 进一步会影响飞机的制造质量和周期。大型成型模具在数控加工后残留许多刀痕, 而且表面粗糙度也不满足质量要求, 因此需要增加表面精整工序来提高其表面质量。目前国内的航空制造企业多数采用人工作业的方式来完成大型成型模

具的表面精整, 主要存在精整效率低、质量一致性差、作业环境恶劣损害工人身体健康、制造成本高等问题, 已经成为制约大型成型模具加工质量和效率的瓶颈环节。

机器人辅助精整技术是解决传统人工作业方式中所存在问题的有效途径<sup>[1]</sup>, 能够利用机器人的高自由度、高灵活性来取代人工实现高强度的重复性工作<sup>[2]</sup>, 同时通过控制精整力<sup>[3]</sup>等工艺参数能够对精整质量进行有效控制<sup>[4-5]</sup>, 实现对叶片等具有高精度要求产品的打磨精整<sup>[6-7]</sup>。根据精整精度和效率要求的不同, 还可

\* 基金项目: 四川省军民融合产业发展专项资金项目(zyf-2017-76)。

以设计不同类型的末端执行器来满足相应的需求<sup>[8]</sup>,常用的包括砂带、砂布等。计时鸣等<sup>[9]</sup>研究了气囊型抛光末端执行器,能够实现对复杂自由曲面的超高精度精整,但其有效精整面积较小导致效率较低。孔袁莉<sup>[10]</sup>和谢祥<sup>[11]</sup>研究机器人打磨控制系统设计与开发,童话<sup>[12]</sup>和谢小辉等<sup>[13]</sup>开展了机器人打磨系统的离线编程技术研究。当前研究的机器人辅助精整系统大多面对的是小型工件,而对大型工件的表面精整研究则相对较少,相关研究应用在大型对象时普遍存在效率较低的问题。此外,当前评估模具表面精整质量时,只能在精整完成并清理表面后才能由人工操作粗糙度仪进行表面质量测量,如不满足要求还需重复精整,势必对精整效率产生影响。

针对传统人工作业方式在大型成型模具表面精整时的缺陷,以及当前相关研究中存在的不足,研发面向大型成型模具的机器人来辅助表面精整系统,开展精整系统多功能末端执行器设计、精整过程离线编程、数字化在线检测等关键技术研究,实现大型成型模具表面高精度、高效率的精整加工和在线检测,提高大型飞机零件的成型精度和表面质量。

## 1 机器人辅助表面精整系统总体架构

### 1.1 机器人辅助精整系统物理布局

机器人辅助表面精整系统常用的物理布局(图1),包括:

(1)固定导轨式,具有结构简洁、成本较低等优势,移动站位后利用导轨上的光栅反馈可直接求解出机器人的位姿而不需重新标定基准坐标系,但该结构形式的有效精整工作空间较小。

(2)AGV 运转式,具有可重构、移动空间大等优势,但成本较高且精整轨迹规划复杂,移动站位后还需重新标定基准坐标系。

(3)龙门倒挂式,结构简洁、成本较低、有效工作空间大,移动站位后同样不需要重新标定基准坐标系。

因此,综合考虑工作空间、成本、工作效率等因素,选择龙门倒挂式结构来实现对大型成型模具的机器人辅助精整系统。

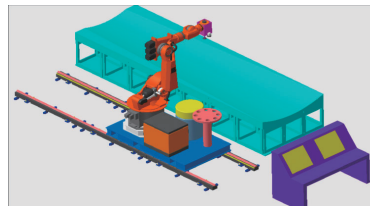
### 1.2 机器人辅助精整系统基本组成

机器人辅助精整系统主要包括机械系统、控制系统和软件系统3大子系统,见图2。

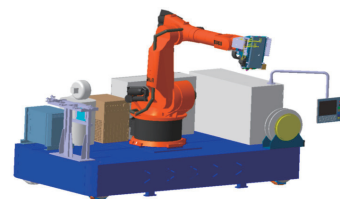
### 1.3 机器人辅助精整系统工作流程

机器人辅助精整系统工作流程见图3。首先在离线编程系统中输入模具数模,根据精整参数试验形成的专家知识库进行离线编程,规划精整轨迹和相关工艺参数,经运动仿真检查无碰撞干涉且在机器人可达空间范

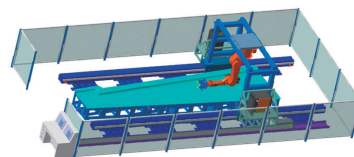
围内后,后置处理生成机器人精整程序;模具上架后利用相机进行基准坐标系找正,导入离线编程生成的精整程序后进行自动精整加工;在精整加工过程中,一方面对介质寿命进行检测,通过精整参数试验形成的专家知识库来判断介质是否达到使用寿命,并自动更换打磨介质,另一方面对模具表面粗糙度进行在线检测,判断精度是否满足要求,如不满足则持续进行精整,如满足则精整过程结束。



(a) 导轨式



(b) AGV式



(c) 龙门式

图1 机器人辅助表面精整系统的常用布局

Fig.1 Common layouts of robot assisted polishing system

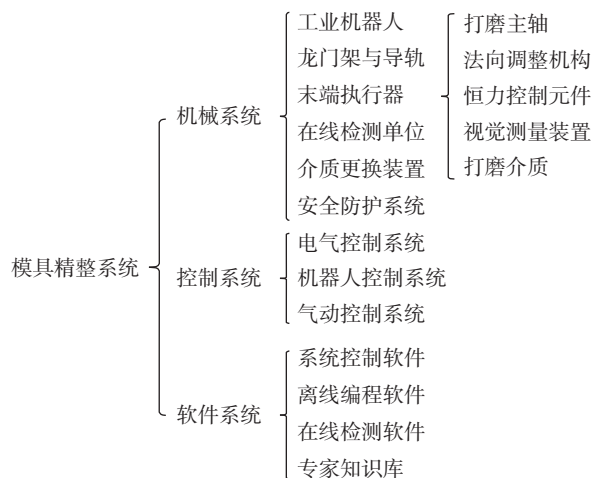


图2 机器人辅助表面精整系统基本组成

Fig.2 Basic components of robot assisted polishing system

## 2 集成多功能柔性精整末端执行器设计

精整末端执行器是机器人辅助精整系统的基础和关键部分,其结构形式直接影响精整的效率和质。为了提高精整效率,设计了一种包含3个精整头的集成多功能柔性精整末端执行器,如图4所示。由于精整力是影响精整质量的最关键因素<sup>[14]</sup>,在精整过程中需要对精整力进行实时的控制从而保证精整质量一致性。当前主要有两种方式来实现机器人精整力的控制,

一是主动控制式,通过在机器人末端增加力传感器并将受力信息反馈到机器人本体控制器中进行力位耦合控制;二是被动控制式,通过在机器人末端增加恒力补偿元件,根据专家知识库设置好精整力,在精整过程中恒力补偿元件可进行自动伸缩来实时调节精整力。本文采用第2种方式来实现精整力的控制,对机器人的响应速度要求较低,且更容易实施,具体的选型是奥地利ACF110-04型,力控范围可达100N,柔性调节行程可达35mm,足以满足精整力和位置精度的要求。此外,

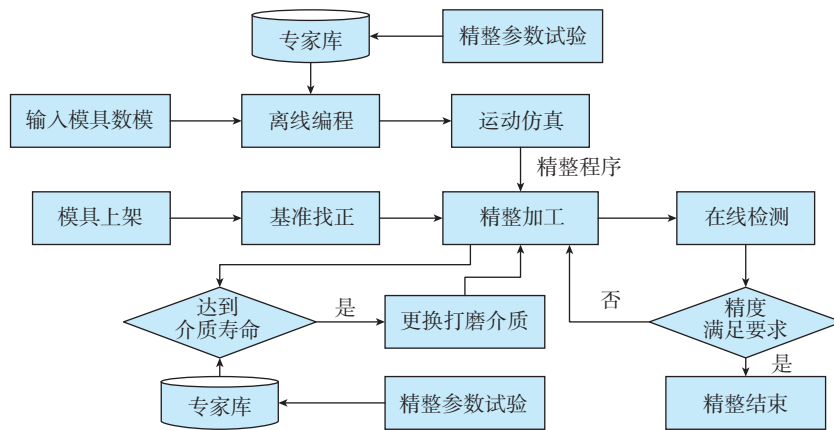


图3 机器人辅助精整系统工作流程

Fig.3 Workflow of robot assisted polishing system

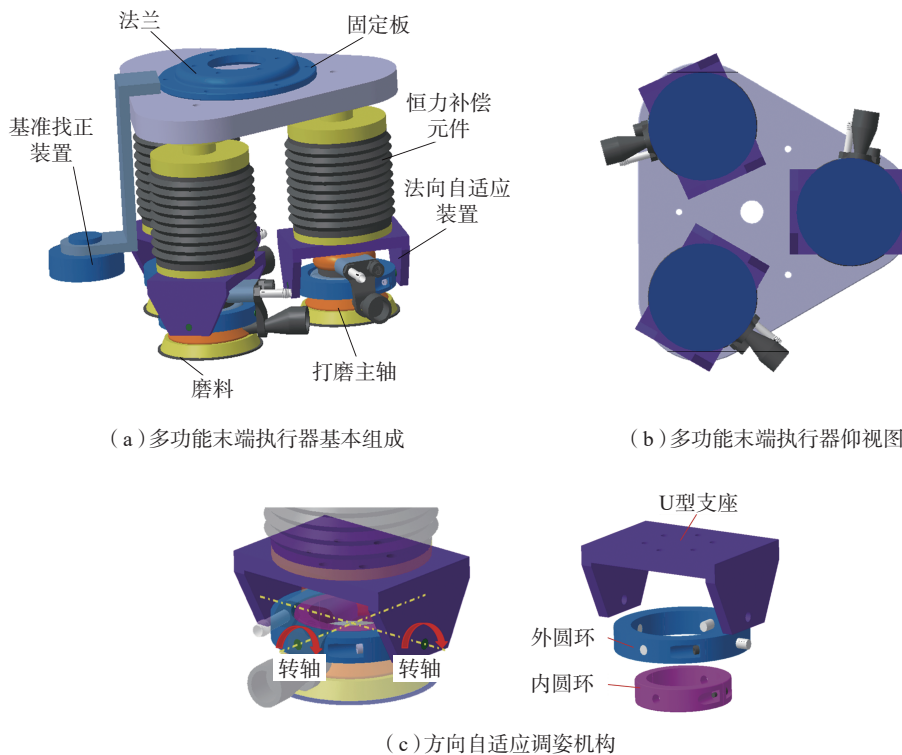


图4 集成多功能柔性末端执行器

Fig.4 Integrated multiple function end effectors

设计了法向自适应调整装置,如图4(c)所示,通过增加两个自由度的转轴和U型支座,能够在精整头接触模具表面时根据外形的不同自适应地调整精整头的法向,从而保证精整过程中精整头能够一直以垂直于模具表面的姿态运行。

### 3 基于 DELMIA 的精整过程离线编程技术

机器人辅助精整程序常用人工示教方式进行编制,这种方法在一定程度上提高了生产效率,但由于大型成型模具具有品种多、批量小的特点,针对每一种模具,依靠手工示教的精整路径程序编制都十分繁琐,并需要不断地示教、测试和修改,耗时较长且精度得不到保证<sup>[15]</sup>。本文采用离线编程的方式,可以较好地解决以上编程问

题,能够快速准确地生成精整程序。在 DELMIA 平台下采用 CAA 结合 Automation 进行开发,技术架构如图5所示,主要包括工艺参数规划模块、精整路径规划模块和精整任务仿真模块。

精整工艺参数规划流程如图6(a)所示,首先,选择精整工艺方式并输入模具相关参数包括材料、尺寸、精度要求等,然后从专家知识库中自动查询工艺参数库并输出最优的精整工艺参数包括进给速度、磨抛轨迹、磨抛压强、工具转速、磨抛间距和磨抛次数等。精整路径规划流程如图6(b)所示,首先选取模具上待精整的表面,然后设置精整路径间距,能够自动计算出精整轨迹和末端执行器的运动路径,最后生成初步的精整 NC 程序。精整过程仿真流程如图6(c)所示,首先导入精

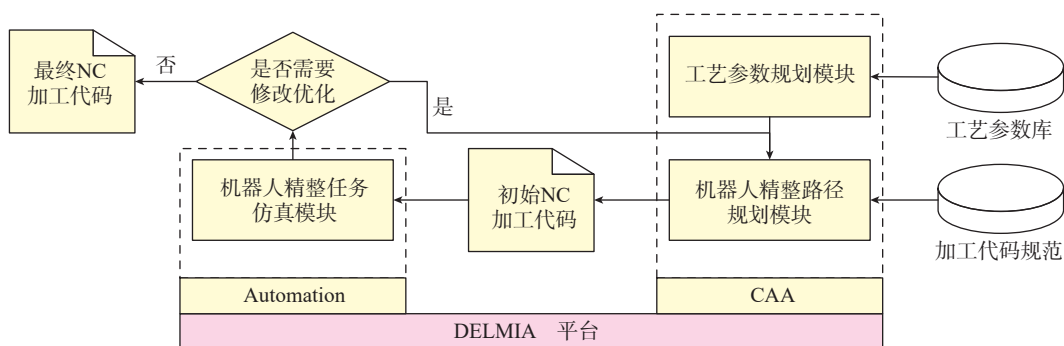


图5 离线编程技术架构

Fig.5 Technical framework of offline programming system

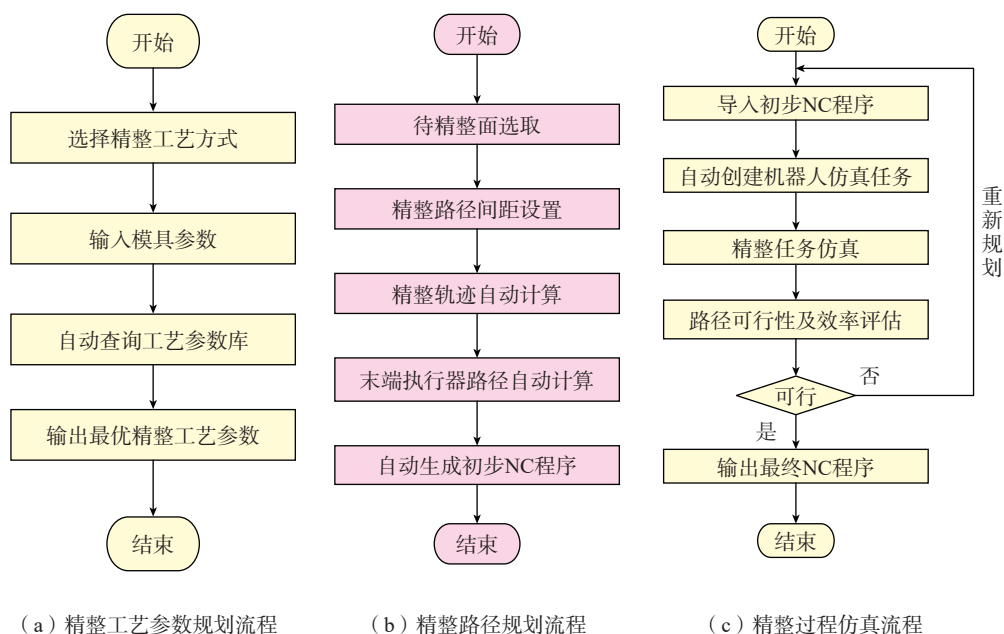


图6 离线编程系统核心功能模块的流程

Fig.6 Main function blocks workflow of offline programming system

整路径规划输出的初步 NC 程序,然后自动创建机器人仿真任务并进行仿真,在仿真过程中评估精整路径的可行性和效率,如有干涉或效率太低则重新规划,如无问题则生成最终的精整 NC 程序。

在 DELMIA 平台下开发的精整过程离线编程系统界面,如图 7 所示。

#### 4 基于数字声发射的粗糙度在线检测技术

声发射(Acoustic Emission, AE)是在切削或磨削过程中由于材料变形和断裂导致应变能快速释放而产生的瞬态高频弹性应力波<sup>[16]</sup>,声发射信号的有效值和其快速傅里叶变换峰值与工件表面粗糙度有很好的对应关系,信号及特征信息能反映粗糙度的大小<sup>[17]</sup>,并随它们的变化而变化,具有灵敏有效、环保安全、实时在线、精度高等的优点<sup>[18]</sup>。声发射测量系统的基本组成(图 8)包括:

- (1)信号检测部分:一个或多个分布在检测对象表面的声发射传感器。
- (2)信号前置处理部分:系统配置的信号前置处理器。
- (3)数据采集与存储部分:数据采集软件和存储数据库。
- (4)数据分析与展示部分:数据分析软件和展示

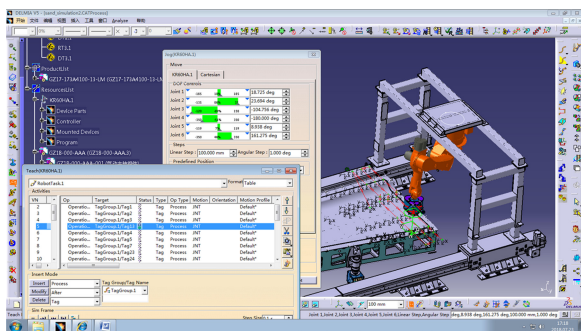


图7 精整过程离线编程界面

Fig.7 Interface of offline programming system

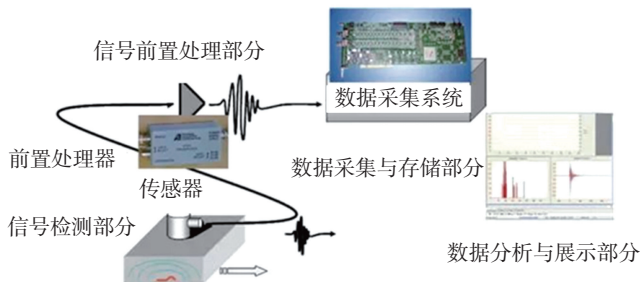


图8 数字声发射检测系统基本组成

Fig.8 Basic components of digital acoustic emission measuring system

界面。

声发射传感器安装在模具表面非打磨区域,由于研究对象是 Q235 钢、铝合金和 Invar 合金等金属材料,信号衰减较小,基本不影响信号采集。传感器的数量和分布位置根据模具尺寸的大小来确定。

#### 5 试验验证

为了验证本文所提出的机器人精整系统在质量和效率方面的优势,以某型机垂尾复材壁板成型模具为验证对象,待精整型面的长度为 5.30m,宽度最宽处为 2.23m,最窄处为 1.35m,需要精整面积约为 9.6m<sup>2</sup>,表面粗糙度  $R_a$  要求为 0.8 $\mu\text{m}$ 。传统人工打磨需要两个工人打磨约 7 个工作日(单班工作,每班 8h),使用本文所提出的机器人精整系统共耗时 32h,相较于人工单人作业,其效率提高了 3.5 倍。

为了验证精整质量及其一致性,在完成精整工作后,在模具型面选择了 9 处区域,使用粗糙度对比块来测量其表面粗糙度,如图 9 所示。测量结果如表 1 所示,

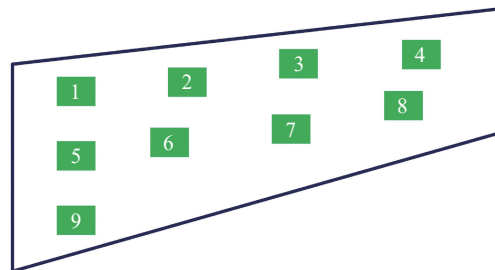


图9 某型机垂尾复材壁板成型模具待精整面示意图

Fig.9 Sampled areas of mold for some vertical tail composite skin to be polished

表1 人工精整和机器人精整质量对比

Table 1 Comparison of polishing qualities between human and robot

区域编号	人工精整表面粗糙度	机器人精整表面粗糙度
1	1.6	0.8
2	0.8	0.8
3	1.6	0.8
4	1.6	0.8
5	0.8	0.8
6	1.6	0.8
7	1.6	0.8
8	1.6	0.8
9	0.8	0.8

机器人精整系统精度可达到  $0.8\mu\text{m}$  的要求,且质量一致性好;而人工作业方式仅有部分区域能达到精度要求,且质量一致性差。

为了验证数字声发射系统检测粗糙度的可行性,采用北京声华兴业科技有限公司的 SAEU3H 集中式声发射检测仪,采样频率达 10M 点/s,选用 SR150M 声发射传感器,采集频率范围为 60~400kHz。研究试验表明,随着精整次数的增加,表面粗糙度和声发射信号的幅值按照相同的趋势逐渐减小,如图 10 所示。经过 9 次精整后,模具表面粗糙度  $R_a$  从  $6.3\mu\text{m}$  降低到  $0.8\mu\text{m}$ ,声发射信号幅值从 4.0V 降低到 0.7V。

## 6 结论

为了提高飞机大型成型模具的精整质量和效率,本文提出了机器人辅助的表面精整系统,设计了集成多功能的柔性精整末端执行器来实现精整力的恒定控制和法向精整,在 DELMIA 平台下开发了精整过程离线编程系统来实现精整程序的自动编制和仿真,研究利用数字声发射检测系统来实现精整过程中对粗糙度的在线检测,从而提高了大型成型模具的精整质量和效率。

## 参考文献

- [1] 王文忠,赵继,张雷,等.一种自主研磨作业机器人系统的开发[J].大连海事大学学报,2013,39(4):63-66.
- [2] WANG Wenzhong, ZHAO Ji, ZHANG Lei, et al. Development of a robot system for autonomous grinding[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2013, 39(4): 63-66.
- [3] CHEN Y, DONG F. Robot machining: recent development and future research issues[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9-12): 1489-1497.
- [4] 吕斌,卢琦,袁艳丽.一种基于恒力打磨的机器人自动加工方法[J].机械设计与制造,2017,46(3):65-69.
- [5] LÜ Bin, LU Qi, YUAN Yanli. A robot automatic processing method based on constant force grinding[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(3): 65-69.
- [6] 杨林,赵吉宾,李论,等.有机玻璃研磨抛光机器人力控制研究[J].机械设计与制造,2015(4):105-107.
- [7] YANG Lin, ZHAO Jibin, LI Lun, et al. A study of grinding and polishing robot force control for plexiglass[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(4): 105-107.
- [8] 李振国,田凤杰,陈洪玉,等.复杂曲面机器人自动化磨抛加工试验[J].制造技术与机床,2016(8):151-155.
- [9] LI Zhenguo, TIAN Fengjie, CHEN Hongyu, et al. Experiment of robot automatic polishing for curved surfaces[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(8): 151-155.
- [10] 段继豪,史耀耀,张军锋,等.航空发动机叶片柔性抛光技术[J].航空学报,2012,33(3):573-578.
- [11] DUAN Jihao, SHI Yaoyao, ZHANG Junfeng, et al. Flexible

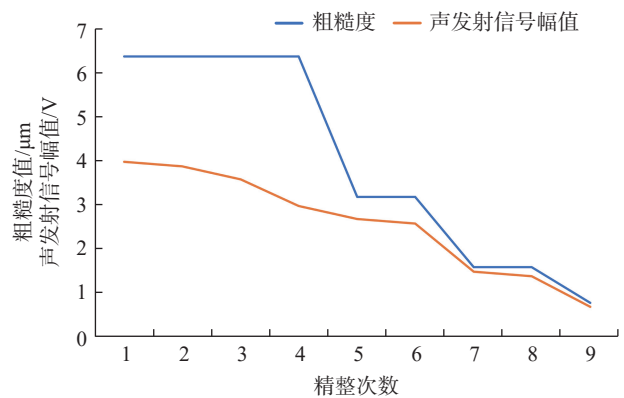


图10 表面粗糙度与声发射信号幅值的映射关系

Fig.10 Mapping relationship between acoustic emission signals and surface roughness

polishing technology for blade of aviation engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 573-578.

[7] 黄婷,许辉,樊成,等.叶片复杂曲面的机器人抛磨工艺规划[J].光学精密工程,2018,14(1):43-47.

HUANG Ting, XU Hui, FAN Cheng, et al. Robotic grinding process planning for complex blade surfaces[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 14(1): 43-47.

[8] 王伟,贡超,张令.机器人砂带磨削的曲面路径优化算法[J].机械工程学报,2011,47(7):8-15.

WANG Wei, YUN Chao, ZHANG Ling. Optimization algorithm for robotic belt surface grinding process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7): 8-15.

[9] 计时鸣,金明生,张宪,等.应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J].机械工程学报,2007,43(8):2-6.

JI Shiming, JIN Mingsheng, ZHANG Xian, et al. Novel gasbag polishing technique for free-form mold[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 2-6.

[10] 孔袁莉,付宏文,苏达,等.打磨抛光机器人控制系统设计与开发[J].组合机床与自动化加工技术,2019(5):119-121.

KONG Yuanli, FU Hongwen, SU Da, et al. The design and development of grinding and polishing robot control system[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(5): 119-121.

[11] 谢祥,朱亚红,张维.基于广数工业机器人的自动打磨控制系统设计[J].智能机器人,2017(2):46-48.

XIE Xiang, ZHU Yahong, ZHANG Wei. Design an automated polishing controller system based on GSK robot[J]. Intelligent Robot, 2017(2): 46-48.

[12] 童话,王强,卞绍顺,等.基于离线编程的铸件打磨机器人系统[J].机械工程师,2017(1):180-182.

TONG Hua, WANG Qiang, BIAN Shaoshun, et al. Robot polishing system for mold based on offline programming system[J]. Mechanical Engineer, 2017(1): 180-182.

[13] 谢小辉,孙立宁,程源.基于离线编程的机器人柔顺打磨方法及实验[J].南京理工大学学报,2016,40(5):619-625.

(下转第102页)

WANG Huiyang, AN Yunqi, LI Chengyu, et al. Research progress of Nickel-based superalloy materials[J]. Materials Review, 2011, 25(2): 482-486.

[2] 储继影. 高温合金加工刀具选择与工艺参数优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

CHU Jiying. Research on tool selection and process parameter optimization of superalloy machining[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[3] BERMINGHAM M J, KIRSCH J, SUN S, et al. New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(6): 500-511.

[4] PAWADE R S, JOSHI S. Mechanism of chip formation in high-speed turning of Inconel718[J]. Machining Science and Technology, 2011, 15(1): 132-152.

[5] ZHU Z J, SUN J, LI J F, et al. Investigation on the influence of tool wear upon chip morphology in end milling titanium alloy Ti6Al4V[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9-12): 1477-1485.

[6] BERMINGHAM M J, PALANISAMY S, KENT D, et al. A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in Ti-6Al-4V cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(4): 752-765.

[7] THAKUR D G, RAMAMOORTHY B, VIJAYARAGHAVAN L. Influence of minimum quantity lubrication on the high speed turning of aerospace material superalloy Inconel718[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2013, 13(2/3): 203-214.

[8] HUA J, SHIVPURI R. Prediction of chip morphology and segmentation during the machining of titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 150(1-2): 124-133.

[9] 吴明阳, 于永新, 程耀楠, 等. 高压冷却下锯齿形切屑几何表征试验[J]. 中国机械工程, 2019, 30(1): 42-49.

WU Mingyang, YU Yongxin, CHENG Yaonan, et al. Geometrical characterization of serrated chips under high pressure cooling[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(1): 42-49.

[10] 刘霞. 高压冷却润滑条件下难加工材料车削试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.

LIU Xia. Experimental study on turning of difficult-to-machine materials under high-pressure cooling lubrication conditions[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.

[11] 李亭亭. PCBN 刀具加工镍基高温合金切削过程试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

LI Tingting. Experimental study on cutting process of nickel-base superalloy by PCBN tool[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[12] 刘启抱. 车削镍基高温合金的切屑变形和刀具磨损研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

LIU Qibao. Research on chip deformation and tool wear of turning nickel-based superalloys[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[13] 段春争, 王肇喜, 李红华. 高速切削锯齿形切屑形成过程的有限元模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014(2): 226-262.

DUAN Chunzheng, WANG Zhaoxi, LI Honghua. Finite element simulation of sawtooth chip formation process in high speed cutting[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014(2): 226-262.

[14] 曲贵民, 徐亦红, 李振加. 短螺卷切屑折断的实验研究[J]. 电机与控制学报, 1996(2): 148-152.

QU Guimin, XU Yihong, LI Zhenjia. Experimental study on chip breaking of short screws[J]. Journal of Electric Machines and Control, 1996(2): 148-152.

[15] WU M Y, YU Y X, CHENG Y H, et al. Experimental investigation of chip plastic side flow in machining of GH4169 superalloy under high-pressure cooling[J]. Ferroelectrics, 2018, 530(1): 82-96.

通讯作者: 王维鑫, 硕士, 研究方向为高压冷却条件下切削层特性研究以及断屑模型的建立, E-mail: 15754324565@139.com。

(责编 思齐)

(上接第79页)

XIE Xiaohui, SUN Lining, CHENG Yuan. Off-line program based robotic compliant grinding method and experiment[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2016, 40(5): 619-625.

[14] MARQUEZ J J, PEREZ J M, RIOS J, et al. Process modeling for robotic polishing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159(1): 69-82.

[15] 邓华健, 赵汝海. 基于离线编程的机器人打磨轨迹规划[J]. 机械工程及自动化, 2017, 10(5): 52-54.

DENG Huajian, ZHAO Ruhai. Robot polishing path planning based on Offline programming[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017, 10(5): 52-54.

[16] LIU Q, CHEN X, GINDY N. Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46: 284-292.

[17] 刘贵杰, 巩亚东, 王宛山. 基于摩擦声发射信号的磨削表面粗糙度在线检测方法研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(3): 236-239.

LIU Guijie, GONG Yadong, WANG Wanshan. Online measuring of ground surface roughness based on friction-induced acoustic emission[J]. Tribology, 2003, 23(3): 236-239.

[18] LUKAS P, GIULIANO B. Development of on the machine process monitoring and control strategy in robot assisted polishing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64: 313-316.

通讯作者: 雷沛, 博士, 工程师, 研究方向为航空智能制造装备、智能制造, E-mail: glleipei@yeah.net。

(责编 思齐)