

# 基于灰色关联法的航发叶片 机器人砂带磨削精度控制技术\*

肖贵坚,张友栋,黄云,吕冲,贺毅

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

**[摘要]** 钛合金航空发动机叶片表面完整性及其结构特征对于航空发动机的气流动力性影响巨大。砂带磨削加工被广泛应用于钛合金叶片的表面抛光,对于提高其表面完整性具有重要的作用,但是对于复杂曲面的加工还存在着一定的难度。工业机器人由于具有灵活性高、通用性强的优点在许多领域得到广泛应用,结合机器人灵活性好的特点以及砂带抛光能大幅度提高表面质量的优点,实现对复杂型面高效、高质量的抛光加工。目前机器人的磨抛加工中还存在加工精度不能很好控制,最终影响工件表面完整性和加工质量的问题。提出基于灰色关联法的机器人砂带磨削精度控制,对此方法进行试验研究,得到表面的粗糙度能够达到  $0.4\mu\text{m}$ ,满足砂带磨削表面粗糙度小于  $0.4\mu\text{m}$  的要求,并且钛合金叶片的精度能够达到  $0.04\text{mm}$  左右。

**关键词:** 航空发动机叶片;砂带磨削;机器人;精度控制;灰色关联法

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.09.063



肖贵坚

博士,副教授,研究方向为表面完整性表征和创成及其控制技术、微纳仿生表面加工方法及其服役性能、砂带磨削机理和工艺及装备设计技术、复杂曲面机器人精密加工和智能控制加工状态监测技术及其智能优化方法。

航空发动机叶片、整体叶盘、机匣等钛合金类核心零部件长期服役在高温、高压、高转速、交变负载等条件下,上述关键零部件的表面特征对发动机服役性能具有至关重要的影响。特别是新一代基于三元流理论设计的新型高精度弯掠压气机叶片,其形状精度与表面微观结构对气动力学等减阻性能具有极大影响。据统计,叶片加工质量将影响航空发动机增压效率  $1\%\sim 5\%$ 。因此实现钛合金类零部件高性能表面加工具有重要的意义。

砂带磨削加工广泛应用于表面加工,砂带磨削兼具磨削和抛光的双重作用,其工艺灵活性高、适应性强,且柔性磨削的特性在型面平滑过渡方面具有独特的拟合效果<sup>[1]</sup>,利用砂带磨削硬脆材料,获得的工件具有优

良的性能<sup>[2]</sup>。由于上述特性,目前砂带磨削技术已经成功应用于航发叶片等复杂曲面零部件的精密磨削中,成为提高工件表面完整性和表面质量的有效加工技术之一<sup>[3]</sup>。张宏之等<sup>[4]</sup>研究自适应砂带磨削的方法,对航发叶片进行了定量去除材料。肖贵坚等<sup>[5]</sup>提出了一种面向型面精度一致性的砂带磨削新方法,首先通过砂带周期性的往复运动结合自锐式磨削原理,实现型面铣削残差层的高效去除;另一方面通过砂带周期性的自动更新,保证各叶片的型面精度在同一截面具有高一致性,阐述并建立了面向型面精度一致性的砂带磨削新方法及其磨削控制方程。蔺小军等<sup>[6]</sup>采用柔性抛光技术和控制抛光轴矢量来实现砂带与叶片型面

\* 基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U1908232);国家科技重大专项(2017-VII-0002-0095);重庆市技术创新与应用示范产业类重点研发项目(cstc2018jzcx-cyzdX0061)。

的有效贴合,砂带磨削技术的发展极大地提高了叶片表面加工的质量。

近年来将机器人运用于砂带抛光领域引起了人们广泛的关注,机器人砂带磨削系统具有加工效率高、通用性强、拓展性强、适用于不同形状工件加工的特点,并且机器人是通用的设备,其开发成本远低于同等水平的数控砂带磨床<sup>[7]</sup>。但是机器人磨削过程当中还是存在着由于机器人的刚性不足和重复定位精度不高导致工件的加工精度存在一定的问题<sup>[8]</sup>。目前主要的方法是利用终端执行器对加工误差进行补偿。Raficjan等<sup>[9]</sup>研究了机器人磨削时材料去除的动态特性,指出通过同步获得瞬时转动频率来实现材料去除过程的实时调整。Sun等<sup>[10]</sup>在机器人砂带磨削的基础上,采用力控技术来保证叶片的磨削精度。齐立哲等<sup>[11]</sup>推导了机器人砂带磨削系统作业精度模型,并据此设计了误差测量及补偿方法,完成了机器人砂带磨削系统作业误差测量工具及校准系统的研制。Mohammad等<sup>[12]</sup>通过集成力传感器,测量抛光力并反馈给控制器进行机器人抛光。此文提出利用灰色关联对机器人的运动过程当中的误差进行补偿,从而达到对航空叶片表面精度的控制。

## 试验及方法

### 1 灰色关联预测模型

灰色关联法是相对于黑色系统和白色系统而言的,其中的黑色系统是指所含有的信息完全未知的系统;白色系统则刚刚相反,表示的是系统内所有信息全部已知;而灰色系统表示的是该系统中既含有已知的信息,也含有未知的信息。现在利用灰色理论对砂带磨削机器人的运动进行控制。

对于砂带磨削机器人中,机器人的运动精度直接影响着砂带磨削工件的精度、表面完整性和工件的表面质量。对于机器人砂带磨削过程当中,

由于机器人本身的特性,使得机器人磨削当中存在着各种因素对磨削机器人的运动产生干扰,同时在运动的过程当中也存在着一些其他的不确定因素。这些因素如果不能很好地控制,磨削过后的表面精度和表面质量也会受到影响。为了预测这些不确定因素,采用灰色关联法,利用已有信息,对未确定的因素进行预测。

在灰色理论预测模型当中,常见的预测模型有GM(1,1)、GM(1,2)、GM(2,1)、GM(1,N)和GM(0,N),其中GM(1,1)、GM(1,2)、GM(2,1)为低阶,少变量的预测模型,对于六自由度的机器人磨削无法做到准确预测,又因为GM(0,N)模型是一个静态模型的预测,对于机器人磨削这种连续的磨削过程是不太适合的。所以采用GM(1,N)模型去预测磨削过程的不确定因素。

六自由度机器人属于高阶系统,对于高阶的系统建模,灰色理论通过GM(1,N)模型解决。其中GM模型群代表的是一阶的微分方程组的灰色模型。

在该模型当中,令 $x_i(0)$ 代表系统的原始特征序列,其中

$$\begin{aligned} x_1^{(0)} &= (x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), x_1^{(0)}(3), \dots, x_1^{(0)}(n)) \\ x_2^{(0)} &= (x_2^{(0)}(1), x_2^{(0)}(2), x_2^{(0)}(3), \dots, x_2^{(0)}(n)) \\ x_3^{(0)} &= (x_3^{(0)}(1), x_3^{(0)}(2), x_3^{(0)}(3), \dots, x_3^{(0)}(n)) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $x_i(1)$ 表示 $x_i(0)$ 对原始的数据序列进行一次累加生成算子(1-AGO)数据的序列。 $Z_i(1)$ 为 $x_i(1)$ 的紧邻均值生成序列,此时上述关系可以表示为:

$$x_1^{(0)} + az_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k) \quad (2)$$

式(2)中,GM(1,N)表示模型。其中, $a$ 表示的是该系统的发展系数, $b_i$ 为该系统的驱动系数, $b_i x_i^{(1)}(k)$ 表示的是驱动项。

取 $u=[a, b_2, b_3, \dots, b_N]$ 为参数序列。

$$B = \begin{bmatrix} -z_1^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & \dots & x_N^{(1)}(2) \\ -z_1^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & \dots & x_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -z_1^{(1)}(n) & x_2^{(1)}(n) & \dots & x_N^{(1)}(n) \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \dots \\ x_1^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

此时的参数序列 $u=[a, b_2, \dots, b_N]$ 的最小二乘估计满足:

$$u=(B^T B)^{-1} B^T Y \quad (4)$$

此时的GM(1,N)模型为:

$$x_1^{(0)}(k) + az_1^{(1)}(k) = b_2 x_2^{(1)}(k) + b_3 x_3^{(1)}(k) + \dots + b_N x_N^{(1)}(k) \quad (5)$$

灰色关联法的累减还原式为:

$$\hat{x}_1^{(0)}(k+1) = a^{(1)} \hat{x}_1^{(1)}(k+1) = \hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k) \quad (6)$$

通过上述方法可以知道,灰色关联法可以通过系统中各因素之间发展趋势的相似或者相异程度建立内部元素的关联特征,进而通过已知系统中的部分数据信息来预测出系统中其他信息。

灰色关联法中GM(1,N)模型预测的主要步骤为:

- (1) 利用原始数据生成一起累加生成算子(1-AGO);
- (2) 计算数据矩阵 $B$ 和数据向量 $Y$ ;
- (3) 获得参数向量 $u$ ;
- (4) 计算累减还原式。

### 2 利用灰色模型对磨削精度进行控制

本文采用的是六自由度机器人夹持钛合金叶片,通过控制机器人的运动来控制钛合金叶片磨削精度,因此,机器人的运动精度直接影响钛合金叶片的加工质量。传统的机器人运动学控制采用D-H算法。对于机器人运动控制,首先要对机器人的每一个关节建立一个坐标系;然后再根据坐标系的变换建立机器人的运动学模型。

图1为六轴机器人各轴的z轴正方向,确定各个轴的方向之后,可以建立每个轴的直角坐标系,每个坐标系应该满足如下规则:z轴为关节回转轴,x轴为两相邻z轴的公垂线,y轴由右手规则来确定,如图2所示。

根据机器人的运动学原理,采用解析法来实现机器人的正运动学求解。可以求得机器人末端的位姿矩阵为:

$${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,\${}^0\_6T\$表示机器人末端执行器相对于机器人基坐标的相对关系,也就是末端执行器的位姿;\${}^i\_jT\$表示机器人坐标系j相对于坐标系i的变换。其中的子矩阵

$$Q = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$$

$$P = [P_x \ P_y \ P_z]^T \quad (8)$$

式中,Q是末端执行器坐标相对于基座坐标系的姿态信息(末端执行器的坐标系相对于基坐标的旋转矩阵);P是末端执行器坐标相对于基坐标的位置信息(末端执行器相对于基坐标的移动矩阵)。

但是在实际磨削加工过程当中,

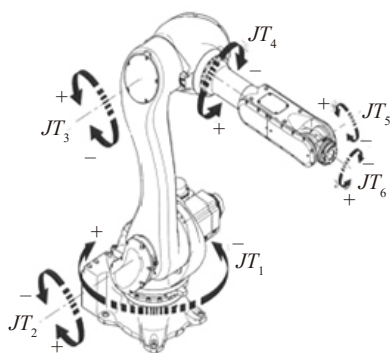


图1 机器人各轴的正方向  
Fig.1 Positive direction of robot's axis

机器人由于安装过程中存在着安装误差,机器人机械结构中电机传动过程也会存在着丢步的现象,在运动过程当中由于机械结构比较复杂,在运动中也会因为重力等因素的影响,存在工件的加工精度难以保证的问题。为了保证工件的加工精度,需要精确地控制机器人的运动,以达到工件的精度要求,所以对于传统的机器人运动控制需要进行优化。利用灰色关联法对机器人在实际运动过程中的误差进行补偿,机器人的实际运动位置和理论运动位置之间的关系可以表示为:

$${}^0_6T^m = {}^0_6T^s + \Delta T \quad (9)$$

式中,\${}^0\_6T^m\$表示的是机器人执行器的末端的理论运动位置;\${}^0\_6T^s\$表示的是机器人执行器末端的实际运动位置;\$\Delta T\$表示由于上述因素在机器人运动过程当中产生的误差补偿。

建立灰色补偿值的控制器,如图3所示。

根据上述的灰色预测模型理论和机器人的运动学可以对磨削机器人运动过程当中不确定因素和干

扰因素进行误差补偿。根据上述的GM(1, N)灰色理论误差补偿为:

$$\Delta T(x, k) = V_1x_1 + V_2x_2 + \dots + V_nx_n \quad (10)$$

首先对\$\Delta T(x, k)\$进行离散,得到其离散序列为:

$$\Delta T_i^{(0)}(k) = \begin{bmatrix} T_1^{(0)}(1) & T_1^{(0)}(2) & \dots & T_1^{(0)}(N) \\ T_2^{(0)}(1) & T_2^{(0)}(2) & \dots & T_2^{(0)}(N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_n^{(0)}(1) & T_n^{(0)}(2) & \dots & T_n^{(0)}(N) \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据灰色理论,对离散序列进行一次累加生成(1-AGO)运算:

$$\Delta T_i^{(1)}(k) = \begin{bmatrix} T_1^{(1)}(1) & T_1^{(1)}(2) & \dots & T_1^{(1)}(N) \\ T_2^{(1)}(1) & T_2^{(1)}(2) & \dots & T_2^{(1)}(N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_n^{(1)}(1) & T_n^{(1)}(2) & \dots & T_n^{(1)}(N) \end{bmatrix} \quad (12)$$

此时的GM(1, N)微分方程为:

$$\Delta T^{(1)}(k) = V_1x_1^{(1)} + V_2x_2^{(1)} + \dots + V_nx_n^{(1)} \quad (13)$$

根据式(4)得到:

$$V = (B^T B)^{-1} B^T \Delta T^{(1)} \quad (14)$$

根据灰色理论,对离散的序列进行一次累减还原式运算:

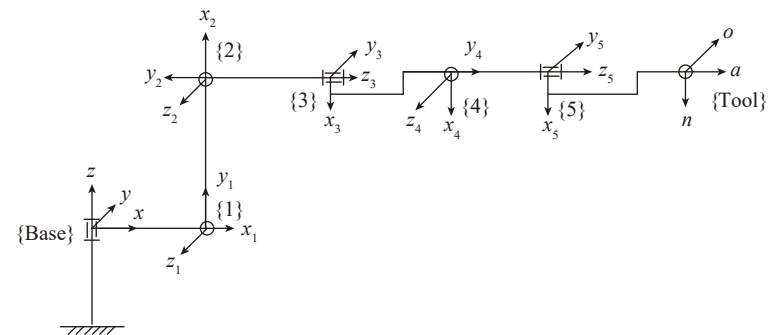


图2 D-H法建立机器人坐标系  
Fig.2 Robot coordinate system created by D-H method

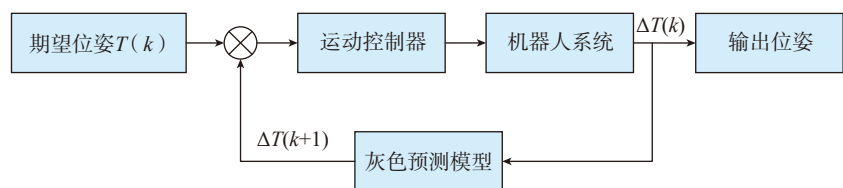


图3 机器人灰色关联控制系统  
Fig.3 Robot grey correlation control system

$$\widehat{\Delta T}_i^{(0)}(k) = \alpha^{(1)} \widehat{\Delta T}_i^{(1)}(k) = \widehat{\Delta T}_i^{(1)}(k) - \widehat{\Delta T}_i^{(1)}(k-1) \quad (15)$$

根据上述的方法对误差进行补偿可以知道基于灰色理论的砂带磨削精度运动方程为：

$${}^0T^m = {}^0T^s + \widehat{\Delta T}_i^{(0)}(k+1) \quad (16)$$

根据上述的方法可以知道整体的流程,如图4所示。

### 3 试验设备和方法

虽然影响零部件加工后表面完整性的主要因素是砂带的磨削速度、接触压力、进给速度等工艺参数,但是不能排除采用机器人磨削中,机器人的运动位姿对于工件磨削后的表

面完整性的影响。因此,本文主要探究的是机器人运动位姿对于磨削精度的影响,也并未对机器人运动过程当中速度和加速度进行过多讨论。为此设计了如下试验,分别从磨削过后叶片的表面完整性侧面验证了上述方法,从磨削过后叶片的轮廓精度正面验证了上述方法。

本试验采用图5所示的机器人自适应砂带磨削试验平台。主要针对叶片等复杂曲面零件加工,具有效率高、磨削速度稳定、磨削精度高、磨削成本低等特点。机器人自适应砂带磨削试验平台是基于FANUC机器人本体、FANUC机器人附加轴以及三磨海达磨床有限公司设计制造的可以浮动砂带磨头装置组成。机器人砂带磨削原理为:砂带磨头固定在试验平台上,有电机驱动砂带磨头进行磨削加工,通过控制电机的转速而控制砂带的线速度;由机器人本体夹持叶片,控制机器人的运动,使得钛合金叶片和砂带进行磨削试验。通过控制机器人的运动而控制钛合金磨削试验。根据上述机器人运动的试验方法,对钛合金叶片进行磨削。

FANUC 机器人主要技术参数:

机器人重复定位精度为  $\pm 0.03\text{mm}$ ; FANUC 机器人附加轴主要技术参数中最大转速为  $4000\text{r/min}$ ; 浮动磨头装置主要的参数调速范围为  $0\sim 50\text{m/s}$ , 本试验所用材料为 TC4, 钛合金 TC4 材料的组成为  $\text{Ti-6Al-4V}$ , 属于  $\alpha + \beta$  型钛合金, 具有良好的综合力学机械性能, 比强度大, 其材料属性如表 1 所示。

通过前文所述步骤, 选取合适的砂带型号进行磨削试验。由于砂带磨削时温度较低和加工环境的影响, 试验采用干磨方式。同时, 为了保证磨削表面质量, 磨削方式选逆磨。砂带使用尼龙砂带进行磨削抛光试验, 其试验参数如表 2 所示。

## 结果与讨论

### 1 磨削后叶片形貌分析

通过超景深显微系统对两种方法磨削过后的叶片进行扫描观察, 图6所示为磨削前后钛合金叶片上测量点的二维扫描图片对比。其中图6(a)是铣削过后的叶片表面二维形貌图, 也是叶片加工之前的形貌, 叶片表面存在着明显的铣削痕迹, 表面的纹理没有规律, 而且表面相对比较粗糙。图6(b)为传统的机器人

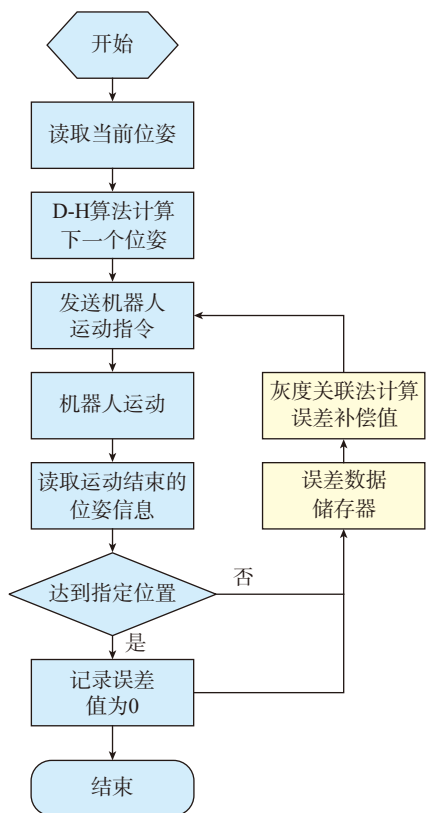


图4 基于灰色关联法的机器人磨削控制流程图

Fig.4 Flow chart of robot grinding control based on grey correlation method

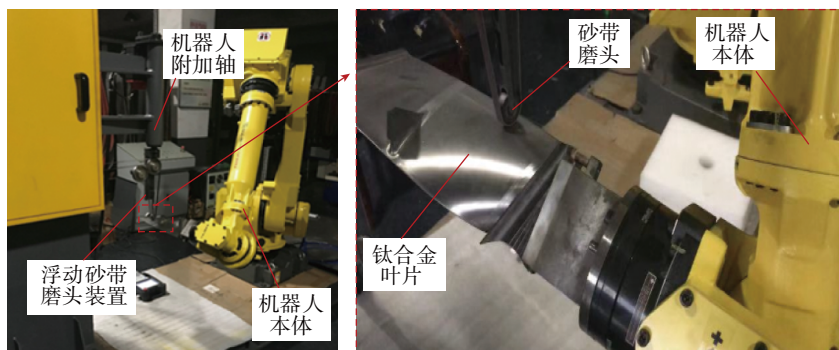


图5 机器人自适应砂带磨削试验平台

Fig.5 Experimental platform for adaptive robot grinding

表1 TC4钛合金性能

Table 1 TC4 titanium alloy properties

弹性模量 $E/\text{GPa}$	热导率 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	延伸率 $\delta/\%$	收缩率 $\psi/\%$	泊松比 $N$	屈服强度 $\sigma/\text{GPa}$	线胀系数 $\alpha / (10^{-6}\text{K}^{-1})$
110	7.955	$\geq 10$	$\geq 25$	0.34	887	9.7

磨削过后叶片表面二维形貌图,图6(c)是基于灰色关联法的机器人磨削过后的叶片表面二维形貌图。在图6(a)中可以观测到明显的较大宽度的沟壑,表面结构分布相对杂乱,这是因为磨削过程当中由于机器人运动精度的影响,存在着有部分区域被重复磨削的现象,使得表面表现出过磨削情况,有部分区域沟壑比较大。图6(c)无明显沟壑,表面相对平整,无明显的起伏现象,磨削过后的表面结构分布相对均匀。在图6(b)中,有部分区域存在着明显的未磨削区域,使得表面存在着欠磨削,在工件的表面没有形成磨削痕迹,这是由于机器人的运动精度不够,导致部分区域未加工。

采用 Rtec Instrument 多功能摩擦磨损试验机中的白光干涉仪模块对图6中叶片表面进行形貌检测,该检测为光学非接触式表面检测技术,

对表面没有损伤。图7所示为两种机器人磨削过后工件表面的三维相貌对比图。其中,图7(a)为磨削之前的叶片三维形貌图,可见表明形貌比较粗糙,纹理一致性相对较差,存在着明显的起伏。图7(b)为基于传统机器人运动算法下磨削过后的叶片表面的三维形貌图。图7(c)为基于灰色关联的机器人运动算法下磨削过后的叶片表面的三维形貌图。通过三维形貌图可以清楚地观测到基于传统机器人磨削方法下的

叶片表面存在较大的沟壑;而通过灰色关联法优化的机器人磨削方法下的叶片表面的一致性比较好,磨削

表2 磨削参数  
Table 2 Grinding parameters

磨削参数	数值
砂带转速	$1000\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$
磨削压力	5~10N
接触轮直径	30mm
接触轮宽度	10mm

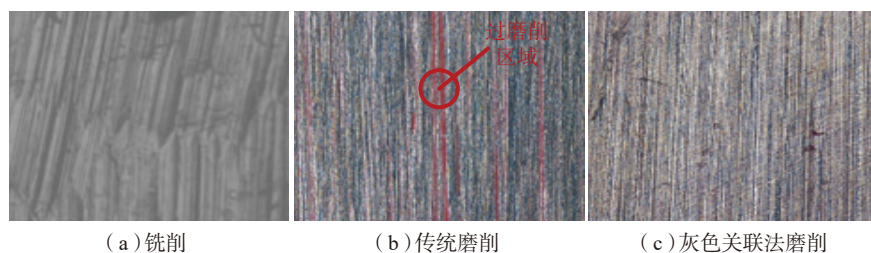


图6 磨削前后的叶片二维形貌

Fig.6 Two-dimensional morphology of the blade before and after grinding

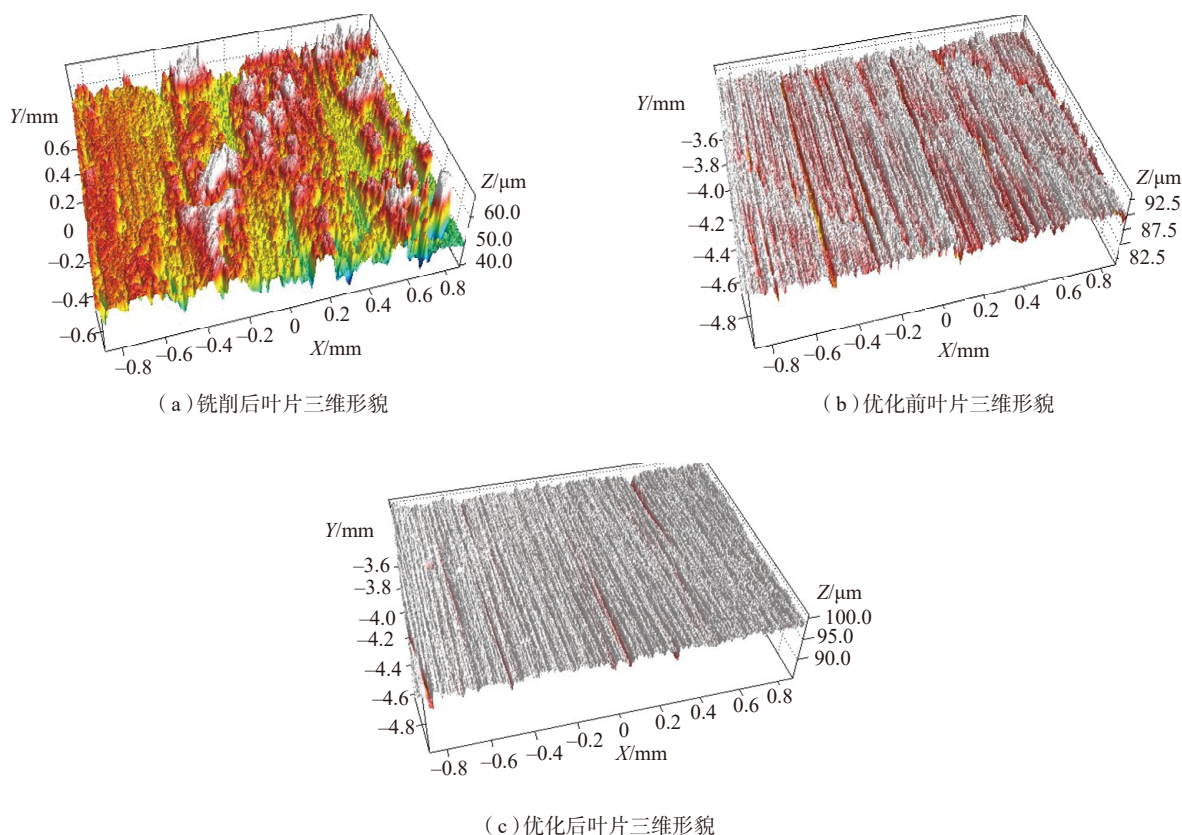


图7 磨削前后的叶片三维形貌

Fig.7 Three-dimensional morphology of blade before and after grinding

过后表面的纹理相对统一,表面磨痕也很光滑,磨削后的表面粗糙度为 $0.4\mu\text{m}$ 。

## 2 磨削后叶片加工余量分析

图8是机器人磨削钛合金叶片的检测位置分布图,要记录叶片表面粗糙度测量点和尺寸精度测量点。其中测点1~12为叶片各部位粗糙度测量点,分别对应钛合金叶片的叶背、叶盘各6个测量点;截面1~6为尺寸精度测量点,分别对应叶片型面6个不同截面,可以观测出该截面位置处叶片进排气边位置处的尺寸精度是否满足叶片的精度要求。

采用海克斯康特制三坐标测量仪对两种方法磨削之后的钛合金叶片表面进行检测。图9所示为采用两种磨削方法加工之后的叶背、叶盘、进气口、排气口加工余量对比。通过对比钛合金叶片4个典型位置的加工余量可以得到:可见,基于灰色关联法的机器人砂带磨削过后的钛合金叶片叶背、叶盘和进排气口的加工余量基本上在 $0.04\text{mm}$ 左右,而

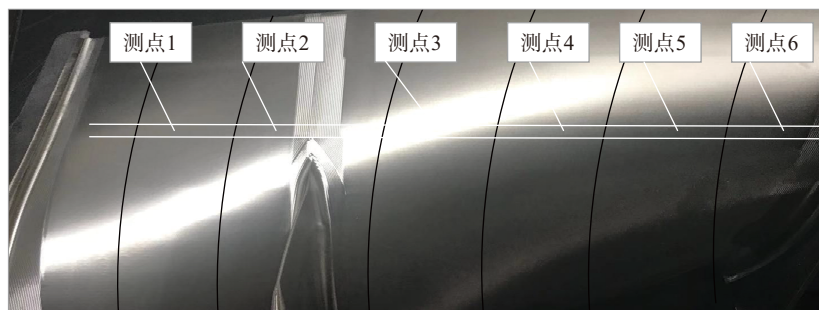
传统的机器人砂带磨削的钛合金叶片叶背、叶盘和进排气口的加工余量在 $0.12\text{mm}$ 左右。可见,基于灰色关联法的机器人砂带磨削的精度高于传统的机器人砂带磨削的精度。

为了进一步验证基于灰色关联法的机器人砂带磨削技术对于叶片磨削精度的影响,对叶片的进排气口轮廓进行检测。图10(a)、(b)分别为基于灰色关联法机器人磨削叶片进气口和排气口的轮廓图,图10(c)、(d)分别为基于传统机器人磨削叶片进气口和排气口的轮廓图。加工误差统一设置的范围为: $-0.12\sim 0.12\text{mm}$ 。观察到运用灰色关联法的机器人磨削过后的实际加工轮廓基本在加工的误差范围内,而传统的机器人砂带磨削过后的轮廓中很大一部分超出了加工误差范围,不能够满足实际的加工要求。

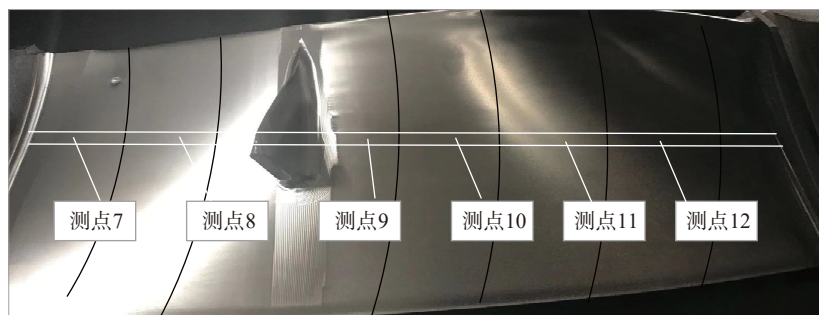
## 结论

通过上述的分析和试验可以得到:  
(1) 基于灰色关联法的机器人

砂带磨削技术可以应用于机器人运动控制,阐述了基于灰色关联法机器人砂带磨削技术,利用灰色关联预测模型对机器人运动误差进行补偿,并且根据灰色关联法理论,随着机器人磨削运动的不断进行,产生的误差数据将不断增加,误差补偿将会更加精确,也能够有效避免机器人砂带磨削



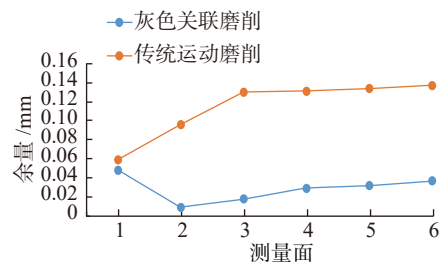
(a) 叶背



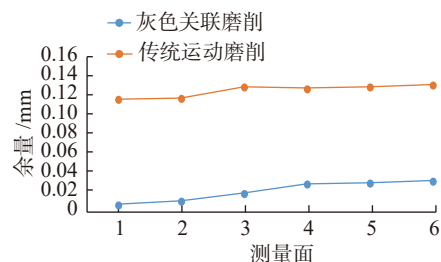
(b) 叶盘

图8 机器人磨削的钛合金叶片检测位置分布图

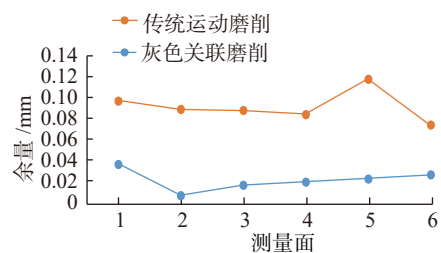
Fig.8 Detection map of titanium grinding blades by robot grinding



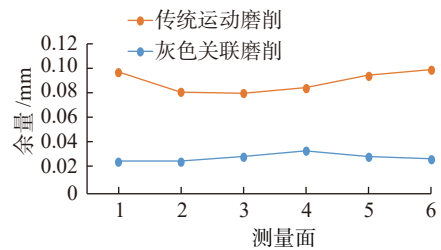
(a) 叶背



(b) 叶盘



(c) 进气口



(d) 排气口

图9 叶片加工后的余量对比图

Fig.9 Comparison diagram of residual after blade processing

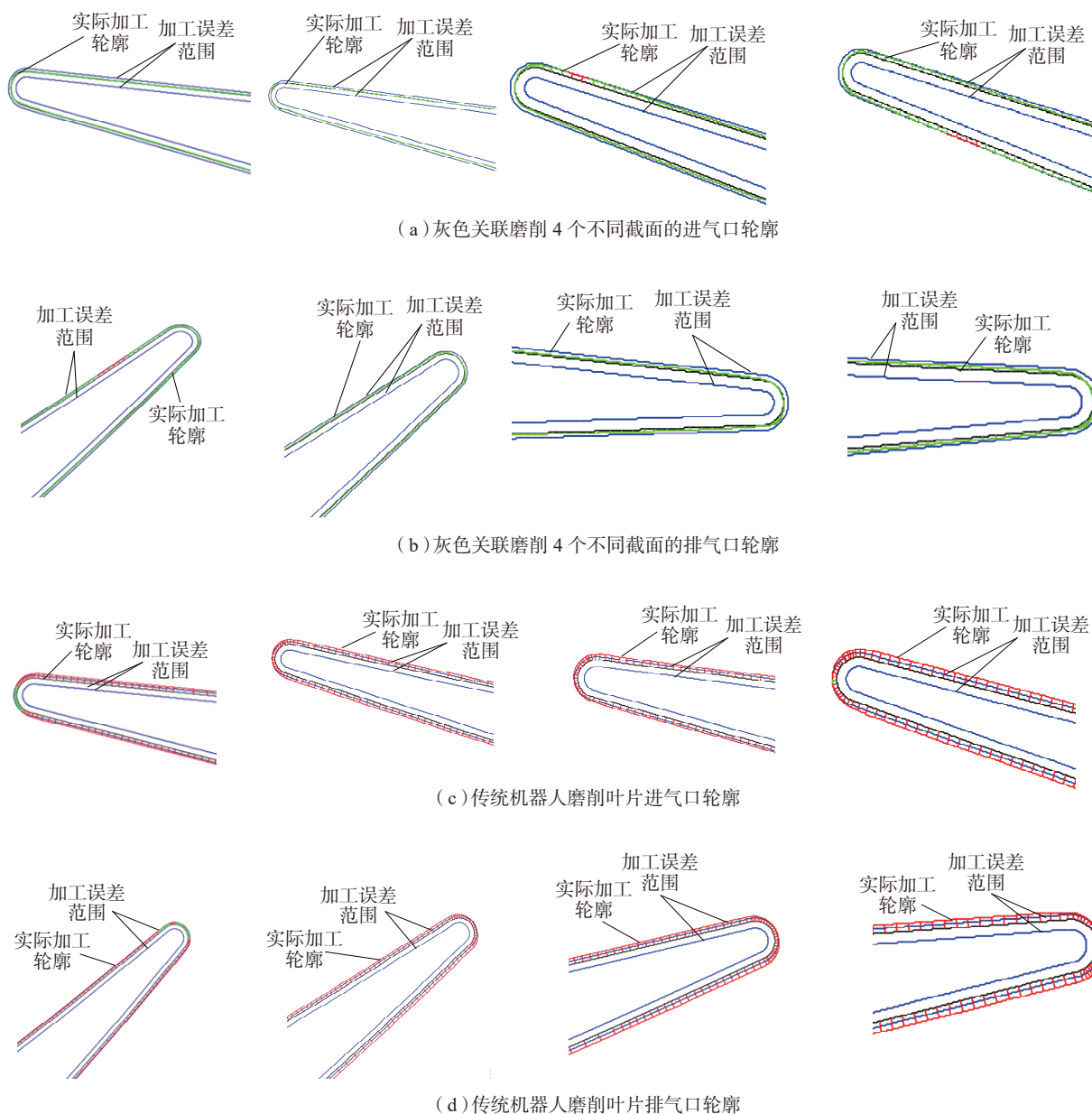


图10 磨削加工后排气口的轮廓图对比

Fig.10 Comparison of intake and exhaust profile after grinding

所带来的加工精度不足的问题。

(2) 采用基于灰色关联法的机器人砂带磨削技术对钛合金叶片进行磨削试验,对磨削过后的叶片进行检测,发现该方法相对于传统的机器人磨削技术而言,能够显著提高叶片的磨削精度,使得叶片的加工余量由原来的 0.12mm 提高至 0.04mm,并且叶片的实际加工轮廓基本上在加工误差范围之内,满足加工要求。

(3) 通过对比观察磨削之后叶

片的二维和三维形貌特征,可以发现采用灰色关联法机器人砂带磨削的叶片表面结构一致性好,能够有效避免机器人运动精度不足所带来的过磨削和欠磨削等问题,并且磨削过后表面粗糙度能够达到  $0.4\mu\text{m}$ 。

### 参考文献

[1] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Experiments on drag reducing surfaces

and their optimization with an adjustable geometry[J]. Fluid Mech, 1997, 338: 59-87.

[2] 孙永红,秦哲,王成勇.砂带磨削硬脆材料实验研究[J].金刚石与磨料磨具工程, 2004(4): 5-9.

SUN Yonghong, QIN Zhe, WANG Chengyong. Belt grinding of hard brittle materials[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2004(4): 5-9.

[3] 蓝仁浩,黄云,陈贵林,等.航空发动机叶片精密自适应砂带磨削技术及试验研究[J].航空制造技术, 2018, 61(15): 16-24.

LAN Renhao, HUANG Yun, CHEN Guilin et al. Self-adaptive belt grinding technology and its experimental research on aero-engine blade[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(15): 16–24.

[4] 张宏之, 黄云, 邹莱, 等. 航发钛合金风扇叶片自适应砂带磨削实验研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2018, 38(5): 67–72.

ZHANG Hongzhi, HUANG Yun, ZOU Lai, et al. Research on adaptive belt grinding aeroengine titanium alloy fan blades[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2018, 38(5): 67–72.

[5] 肖贵坚, 黄云, 伊浩. 面向型面精度一致性的整体叶盘砂带磨削新方法 & 实验研究[J]. *航空学报*, 2016, 37(5): 1666–1676.

XIAO Guijian, HUANG Yun, YI Hao. Experimental research of new belt grinding method for consistency of blisk profile and surface precision[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(5): 1666–1676.

[6] 蔺小军, 杨艳, 吴广, 等. 面向叶片型面的五轴联动柔性数控砂带抛光技术[J]. *航空学报*, 2015, 36(6): 347–355.

LIN Xiaojun, YANG Yan, WU Guang, et al. Flexible polishing technology of five-axis NC abrasive belt for blade surface[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(6): 347–355.

[7] 吴广领, 张秋菊. 六轴联动数控砂带磨削的刀位点计算与规划[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(6): 973–977.

WU Guangling, ZHANG Qiuju. An algorithm for calculating the cutter location of a six-axis CNC belt grinding machine[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(6): 973–977.

[8] XIAO G J, HUANG Y, WANG J. Path planning method for longitudinal micro-marks on blisk root-fillet with belt grinding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(1–4): 797–781.

[9] RAFIEIAN F, GIRARDIN F, LIU Z H, et al. Angular analysis of the cyclic impacting oscillations in a robotic grinding process[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*,

2014, 44(1–2): 160–176.

[10] SUN Y Q, GIBLIN D J, KAZEROUNIAN K. Accurate robotic belt grinding of workpieces with complex geometries using relative calibration techniques[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2009, 25: 204–210.

[11] 齐立哲, 甘中学, 负超, 等. 机器人砂带磨削系统作业精度分析与误差补偿[J]. *机器人*, 2010, 32(6): 787–791, 798.

QI Lizhe, GAN Zhongxue, YUN Chao, et al. Working accuracy analysis and error compensation for robotic belt grinding system[J]. *Robot*, 2010, 32 (6): 787–791, 798.

[12] MOHAMMAD A E K, HONG J, WANG D W. Design of a force-controlled end-effector with low-inertia effect for robotic polishing using macro-mini robot approach[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 49: 54–65.

通讯作者: 肖贵坚, E-mail: xiaoguijian@cqu.edu.cn.

## Robotic Belt Grinding Accuracy Control Technology of Aero-Engine Blade Based on Grey Correlation Method

XIAO Guijian, ZHANG Youdong, HUANG Yun, LÜ Chong, HE Yi

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**[ABSTRACT]** The surface integrity and structural characteristics of titanium alloy blades have a great impact on the aerodynamic performance of aero-engines. Abrasive belt grinding is widely used in the surface polishing of titanium alloy blades, which plays an important role in improving its surface integrity. However, it is still difficult to process the surface of workpieces with complex curved surfaces. Industrial robots are widely used in various fields due to the advantages of high flexibility and general versatility. Therefore, robotic belt grinding technology can take advantage of the flexibility of robots and the advantages of abrasive belt polishing to greatly improve the surface quality. However, in the current grinding and polishing of robots, there is still a problem that the machining accuracy cannot be controlled well, which will eventually affect the surface integrity and machining quality of the workpiece. In order to solve this problem, a robotic belt grinding accuracy control based on gray correlation method was proposed, and experimental research was carried out on this method. It can be obtained that the surface roughness can reach  $0.38\mu\text{m}$  and meet the requirement that the surface roughness of belt grinding is less than  $0.4\mu\text{m}$ , the precision of titanium alloy blade can reach about  $0.04\text{mm}$ .

**Keywords:** Aero-engine blade; Belt grinding; Robot; Accuracy control; Grey correlation

(责编 大漠)