

机器人自适应砂带磨削镍基高温合金精铸叶片试验研究*

赵 贇¹, 黄 云², 常涛岐¹, 张新冬¹, 段 练², 刘明星¹, 邹 莱², 肖贵坚²

(1. 中国航发动力控制股份有限公司, 西安 710072;

2. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

[摘要] 镍基高温合金精铸叶片由于其铸造余量大、定位无基准等,在加工时难以保证其加工精度。采用机器人砂带磨削方式并结合自适应加工技术,对镍基高温合金航空发动机精铸叶片进行磨削。通过对精铸叶片采用三坐标6点迭代的方式,确定航发叶片相对于夹具的位置;然后进行轨迹规划并提取点位信息,建立四阶齐次矩阵反求出机器人运动轨迹,保证磨削位姿和磨削参数;最后根据叶片型面余量信息,采用自适应加工方法,对航发精铸叶片进行定量的材料去除,保证其加工精度。

关键词: 镍基高温合金; 砂带磨削; 自适应; 6点迭代; 加工精度

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.15.048



赵 贇

研究员级高级工程师,研究方向为航空发动机制造工艺。参与国家及省部级项目2项,获得国家及省部级奖励6项,发表论文10余篇。

镍基高温合金作为一种高强度、耐高温的高性能材料,被广泛运用于航空航天行业,尤其是被作为燃气涡轮发动机高温区域构件,如涡轮盘、

叶片、燃烧室等^[1-3]。而用精锻和滚扎加工工艺制造的叶片,镍基高温合金航发精铸叶片铸造后表面余量大、表面粗糙度大,因此需要进一步加工^[4-5]。由于其铸造特性,航空发动机叶片的叶身以及榫头都无加工基准,同时,其铸造后表面余量分布不均,表面存有“高点”(局部表面余量过高),因此在加工时难以保证加工精度。目前对于镍基高温合金常采用传统的手工方式,该方法对工人技术要求高、消耗时间长、报废率高,同时还具有加工环境差、劳动强度大等特点。相对于数控机床等加工,工业机器人则显得更加灵活,已经广泛应用于多工业场合,特别是航空航天行业和汽车^[6]。

砂带磨削作为一种弹性磨削,不易使工件变形,有“冷态”磨削之称^[7],在磨削低热导率的镍基高温合

金时,工件表面不易出现烧伤,同时还有磨削、研磨和抛光多重作用,可获得较高的表面加工质量。砂带磨削加工往往能得到表面粗糙度值小,残余应力状态好,表面无微观裂纹或金相组织变化的良好加工效果^[8]。

本文采用机器人砂带磨削对镍基高温合金进行磨削加工,并结合自适应加工方法,保证最终的加工精度。先采用三坐标测量仪通过6点迭代的方法,确定航空发动机精铸叶片相对于夹具的位置,保证在四阶齐次矩阵坐标转换后,每个坐标系的理论位置与实际位置重合;然后对航发精铸叶片进行轨迹规划并离散化,建立四阶齐次矩阵对机器人运动方式求逆解,完成机器人的运动控制;最后根据精铸叶片型面余量信息,采用自适应加工方法,对航发精铸叶片进行定量的材料去除,保证其加工精

*基金项目: 国家自然科学基金(51605056); 国家科技重大专项(2014ZX04001031)。

度。

三坐标测量仪 6 点迭代法

镍基高温合金航发叶片由于其铸造后加工余量大、定位无基准,在使用夹具装夹后,叶片实际相对于夹具位置与理论位置有很大偏差,因此,需要借助三坐标测量仪,通过 6 点迭代法确定装夹后叶片的实际位置与理论模型之间的差距。

1 三维坐标迭代法原理

由于实际位置和理论位置有很大偏差,所以可通过坐标变换确定实际位置与理论位置的差距,其模型如下:

$$q_i = T + kR p_i \quad (1)$$

式中, q_i 为实际对应点集, T 为平移参数, k 为尺寸参数, R 为旋转矩阵, p_i 为理论对应点集。

由于理论坐标位置可通过模型获得,为获得实际坐标位置,需根据点集,确定最优参数 \hat{T} 、 \hat{k} 、 \hat{R} ,因此,可以建立目标方程如下:

$$e^2 = \sum_{i=1}^N \|q_i - (T + kR p_i)\|^2 = \min \quad (2)$$

式中, e 为误差, N 为点数。

通过目标方程,求出最优参数 \hat{T} 、 \hat{k} 、 \hat{R} 后就可通过坐标变换,确定实际加工位置。

2 三坐标测量仪测试

迭代法建立零件坐标系主要应用于工件的原点不在工件本身或无法找到相应的基准元素(如面、孔、线等)来确定轴向或原点,多为曲面类零件。

三坐标测量仪 6 点迭代法如图 1 所示。把叶片模型导入三坐标测量软件中,并在叶片模型上选取 6 个点,并且以 3 点确定平面拟合特性的质心,以建立当前工作平面法线轴的方位;以 2 点确定直线拟合特性,从而将工作平面的定义轴旋转到特征上;以 1 点用于将零件原点平移到制定位置,从而建立理论坐标系。再通过手动在叶片实物测量相应 6 点位

置,同时使手动测量位置与理论模型选定的位置偏差尽量小。再通过迭代找出实际坐标系。

机器人砂带磨削路径规划

由于镍基高温合金航发叶片的叶身为复杂曲面零件,其型面较为复杂。因此,为保证航发叶片的磨削精度与表面质量,需要对机器人的运动轨迹进行规划,使加工后的叶片满足加工要求。

1 模型轨迹提取及其离散化

对于叶片等这类需要全曲面加工的零件,常采用 U 、 V 等参数线对其进行轨迹规划^[9]。本文借助 NURBS 曲线并结合 U 、 V 等参数线概念,在航发叶片模型上求出其最大主方向,公式为:

$$\frac{\partial u}{\partial v} \Big|_{\max} = \frac{k_{\max} F - M}{L - k_{\max} E} = \frac{k_{\max} G - N}{M - k_{\max} F} \quad (3)$$

式中, E 、 F 、 G 、 L 、 M 、 N 分别为 NURBS 曲线的第 1、第 2 类基本量。

以三维坐标测量后校正的坐标系为依据,对镍基高温合金航发叶片模型进行路径规划。对于砂带磨削叶片,为保证进排气边的加工精度,提高叶片表面疲劳强度,镍基高温合金精铸叶片加工磨削方式采用纵向磨削^[10]。因此在提取轨迹线时,以纵向磨削的机器人运动形式为前提,

获得其轨迹线。

对镍基高温合金精铸叶片模型提取其主矢量方向轨迹线,即机器人运动轨迹线。而获得的轨迹线不能直接运用于机器人的运动控制,因此,需对提取的轨迹线进行离散化后,获得每个离散点的点位信息,即点的位置信息、法线信息以及切线信息。航空发动机叶片模型轨迹线及其离散化如图 2 所示。

2 机器人运动轨迹编程

通用机器人多数都属于 6R 型机器人,其前 3 个关节主要确定末端的位置信息,后 3 个关节主要确定末端的姿态信息。本试验使用的机器人是史陶比尔 RX160,由于其满足 Pieper 准则^[11],因此可求解封闭解。

本试验采用机器人加持工件方式进行加工,则用 D-H 法建立整个机器人砂带磨削系统的坐标系,运用 4 阶齐次矩阵可建立整个系统的坐标变换式如下:

$${}^8_0T = \begin{pmatrix} u_x & v_x & n_x & P_x \\ u_y & v_y & n_y & P_y \\ u_z & v_z & n_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \quad (4)$$

$${}^1_0T {}^2_1T {}^3_2T {}^4_3T {}^5_4T {}^6_5T {}^7_6T {}^8_7T$$

式中, 8_0T 表示磨头磨削点相对于机器人底部中心点的位姿信息; ${}^1_0T \sim {}^7_6T$

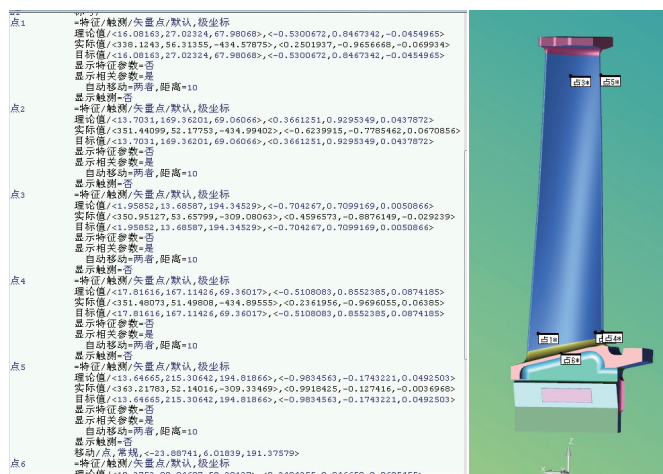


图1 三坐标6点迭代检测结果

Fig.1 Result of CMM 6-point iteration

表示机器人后一关节相对于前一关节的位姿信息； 7_6T 表示夹具前端相对于机器人末端的位姿信息； 8_7T 表示叶片上提取的点相对于夹具前端的位姿信息；

$$\begin{pmatrix} u_x & v_x & n_x \\ u_y & v_y & n_y \\ u_z & v_z & n_z \end{pmatrix}$$

表示磨头的位姿信息； $(P_x \ P_y \ P_z)^T$ 表示磨头磨削点相对于机器人底部中心点的位置信息。

由于 8_7T 与 7_6T 可根据所设计的砂带磨削系统直接确定。而对于 8_7T 由根据上面所提取的轨迹线的点位信息可以得到叶片上的点相对于夹具的位置信息：

$$P'' = (P''_x \ P''_y \ P''_z)^T \quad (5)$$

以及法线矢量和切线矢量：

$$n' = (n'_x \ n'_y \ n'_z)^T \quad (6)$$

$$u' = (u'_x \ u'_y \ u'_z)^T \quad (7)$$

根据右手定则及公式(6)、(7)可求出 v' ，即：

$$v' = \frac{n' \times u'}{|n' \times u'|} \quad (8)$$

所以，根据公式(5)、(6)、(7)、(8)可得：

$${}^8_7T = \begin{pmatrix} u' & v' & n' & P' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

再根据公式(4)、(9)可得机器人6关节的四阶齐次矩阵：

$${}^6_0T = {}^8_7T ({}^8_7T)^{-1} ({}^7_6T)^{-1} \quad (10)$$

再运用Pieper求机器人逆解的方法^[7]，先求解机器人前3个关节的转角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的表达式后，把四阶齐次矩阵转化为三阶旋转矩阵，再根据计算的三阶旋转矩阵中的表达式特征算出 $\theta_6, \theta_5, \theta_4$ 的表达式。由于机器人所求逆解一般存在多解情况，因此需根据实际情况选择合理的解释，再把算出的关节角转化为史陶比尔RX160机器人能识别的VAL3机器人语言。

自适应加工与结果

1 自适应砂带磨削

由于镍基高温合金精铸叶片表面余量分布不均，并且存有“高点”，因此，为保证磨削后的表面尺寸精度，需根据余量的分布情况，自动生

成所需磨削轨迹以及磨削次数，并转化为机器人能识别的VAL3语言，实现自适应磨削。

要实现自适应磨削，首先需要获取精铸叶片的表面余量分布。本文采用三坐标测量仪对精铸叶片表面进行检测，以叶身间距相等的9个截

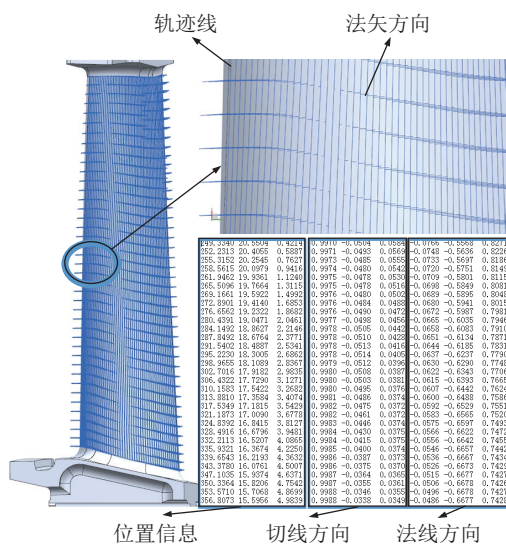


图2 航发叶片轨迹线以及离散化的点位信息

Fig.2 Aero-engine blade trajectory and discretization point information

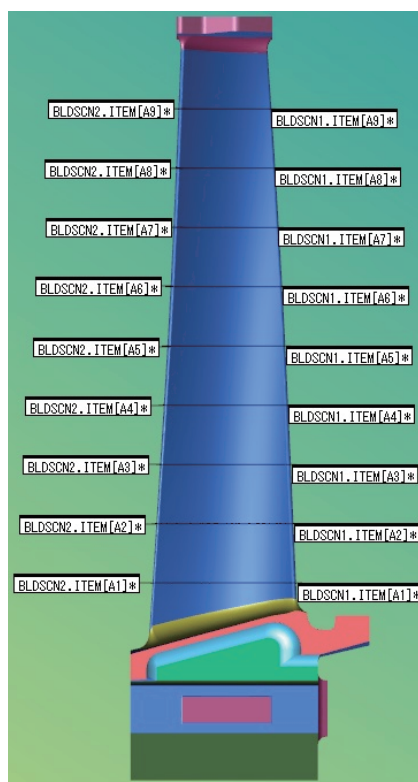


图3 三坐标测量仪检测截面位置

Fig.3 Section position of CMM detection

面为检测对象,分别检测出其9个截面表面的余量值。所需要测量的9个截面如图3所示。

根据9个截面测出的余量,以线性插值的方式确定过渡面中的余量分布;再根据砂带磨削加工过程的工艺参数对镍基高温合金的材料去除的影响,并通过编程自动地转化为机器人的运动轨迹,即对 T 的控制,完成走刀位置以及走刀次数的控制;同时,对过渡面采用压力控制,完成对变余量材料去除,实现精准去除。其思路如图4所示。

2 试验装置与参数

砂带磨削装置如图5所示,机器人手臂末端通过螺栓固定气动装置,并以该装置来夹持夹具。同时,砂带磨头上布置有外部轴,外部轴通过实现丝杆的转动来控制对叶片表面的磨削压力,并且丝杆顶部的电磁阀气缸用来实现磨头的抬刀与下刀,以此实现局部磨削,去除精铸表面的“高点”。

为保证磨削表面的磨削质量,本次试验磨削方式为逆磨,同时考虑加工环境的影响以及砂带本身磨削温度较低的特点,因此试验采用干磨方式。砂带使用VSM公司生产的XK870X涂层式陶瓷氧化铝砂带,该砂带具有较好的材料去除特性,并且磨削温度低,使用寿命长。其余试验参数如表1所示。

3 砂带磨削试验结果

3.1 精铸叶片表面轮廓精度

机器人自适应砂带磨削镍基高温合金精铸叶片经过磨削试验后,其表面如图6所示。对其采用三坐标测量仪进行表面测量,并取其中3个截面测量,其测量结果如图7所示。对于精铸而成的叶片,其进排气边的尺寸虽然已达到精度要求,但仍需对其倒圆,才能满足设计要求。并且,根据检测结果,铸造出的叶片,其叶盆和叶背具有较大的余量,最大余量有0.296mm,因此需要对其进行去量

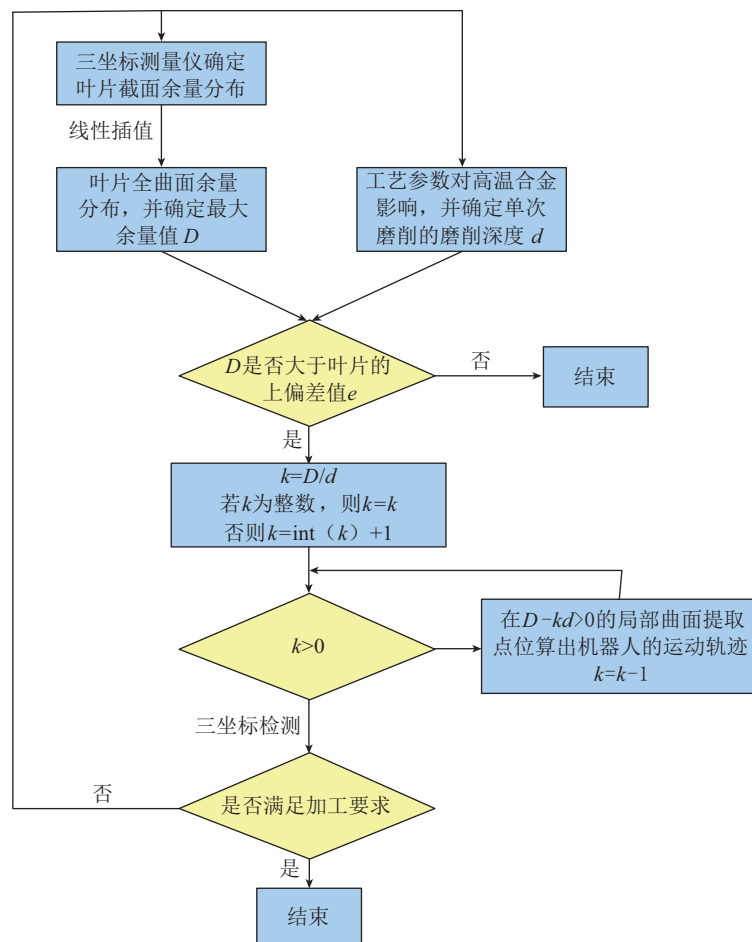


图4 自适应加工方法

Fig.4 Adaptive processing method

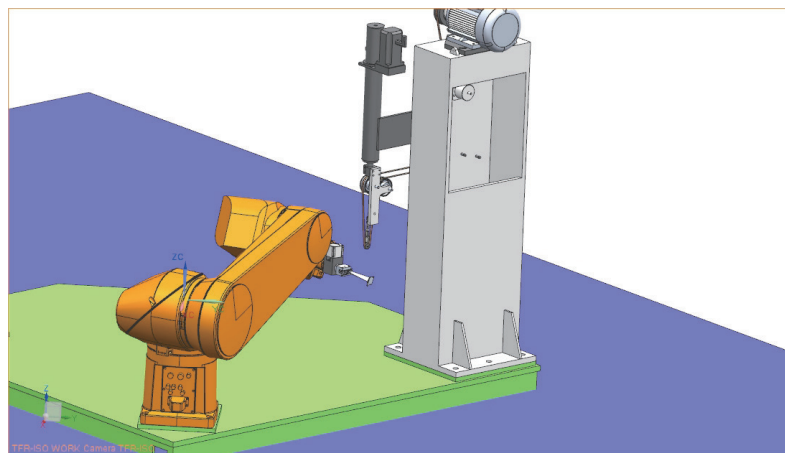


图5 砂带磨削装置

Fig.5 Belt grinding device

表1 磨削试验参数

| 砂带线速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 磨粒粒度 | 磨削压力 / N | 接触轮直径 / mm | 接触轮宽度 / mm |
|---|------|-------------|---------------|---------------|
| 10~24 | 80# | 5~10 | 30 | 10 |

磨削。

当对精铸叶片采用通磨的磨削方式进行加工时,由于叶片的表面余量分布不均,加工后的叶片表面仍存在“高点”,最大余量为 0.12mm,如

图红色部分所示,其表面一致性难以保证。

而采用自适应磨削方式,其加工方式根据其检测后的型面余量值,以层层去除的方式对表面“高点”进行

去除,最终使表面达到了所需的精度要求。而对于进排气边,其通过铸造的尺寸精度已经达到所需的要求,但铸造的表面形状不够圆滑,仍需加工,则采用通磨对进排气边进行加工,使其达到要求。

3.2 表面粗糙度

对磨削后的镍基高温合金精铸航发叶片的 9 个截面测量其粗糙度值。表面粗糙度测量装置采用 Taylor Hobson 公司生产的 FTS Intra 表面粗糙度轮廓仪,沿着垂直磨削方向的 5 个位置分别进行 3 次测量取平均值,测量长度为 4mm,评定长度为 0.8mm。

航发叶片表面测量的粗糙度值如图 8 所示。砂带磨削的表面粗糙度主要还是与砂带磨粒粒度有关,由于本次试验采用的是 80# 的陶瓷氧化铝砂带,无论是通磨还是自适应磨削,对高温合金叶片磨削后,其表面粗糙度值 R_a 为 $0.675 \mu\text{m}$ 。但相对于通磨,自适应磨削的表面粗糙度值更加稳定。

结论

(1) 根据坐标变换定义,以迭代方式确定理论坐标系与测量坐标系之间的变换方程,同时通过三坐标测量仪 6 点迭代,确定镍基高温合金叶片相对于夹具的实际位置,并以此为基准为后续加工提供依据。

(2) 根据测量后的叶片模型数据,提取待加工的轨迹线,并对其离散化,获得其点位信息,同时以该点位信息计算出机器人的各个关节的关节角,完成机器人的运动轨迹控制。

(3) 采用自适应加工方式对叶片进行磨削,在确定磨削参数后,通过与通磨方式相比较,得出自适应磨削的磨削方法能够精准地去除精铸叶片表面“高点”,使表面一致性得以提高,同时对表面粗糙度进行测量,其磨削后的表面粗糙



图6 镍基高温合金磨削后的表面
Fig.6 Surface after grinding nickel-base superalloy

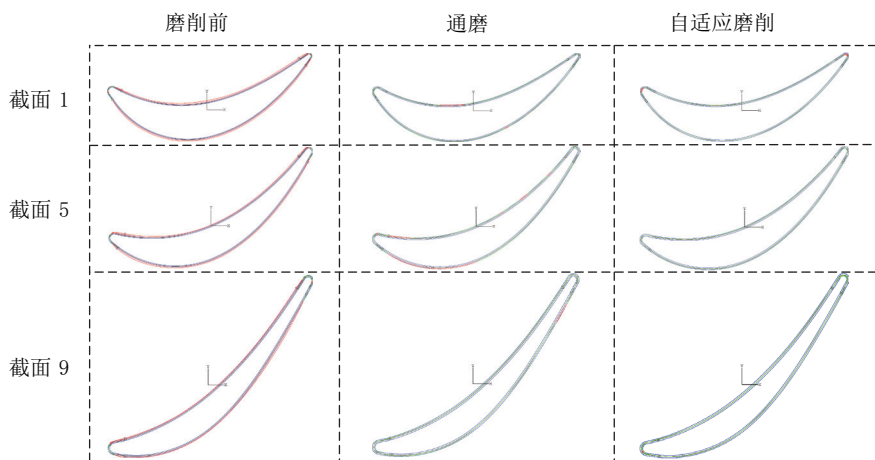


图7 磨削试验检测结果
Fig.7 Result of grinding test

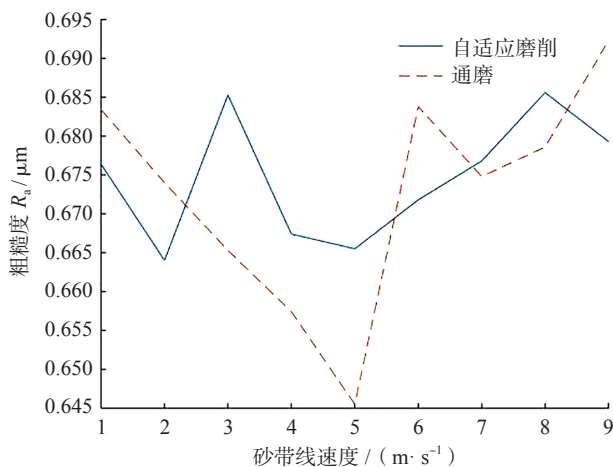


图8 截面粗糙度
Fig.8 Profile roughness

度 R_a 为 $0.675 \mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 黄云, 肖贵坚, 邹莱. 整体叶盘抛光技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2016, 37(7): 2045–2064.
- HUANG Yun, XIAO Guijian, ZOU Lai. Current situation and development trend of polishing technology for blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7): 2045–2064.
- [2] SHARMAN ARC, HUGHES JI, RIDGWAY K. Workpiece surface integrity and tool life issues when turning Inconel 718 (TM) nickel based superalloy [J]. Machining Science and Technology, 2004, 8(3): 399–414.
- [3] 姚倡锋, 沈雪红, 张定华. GH4169 高温合金端面车削表面变质层的形成机理[J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 50–58.
- YAO Changfeng, SHEN Xuehong, ZHANG Dinghua. Formation mechanism of surface deterioration layer on GH4169 superalloy surface turning[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(6): 50–58.
- [4] 庄绪华, 张家军, 褚春祥, 等. 镍基高温合金叶片高效加工研究[J]. 金属加工(冷加工), 2017(14): 8–12.
- ZHUANG Xuhua, ZHANG Jiajun, CHU Chunxiang, et al. Study on efficient processing of nickel-based superalloy blades[J]. Metal Working, 2017(14): 8–12.
- [5] 吴清雨. 高温合金薄壁叶片铣削加工变形基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- WU Qingyu. Basic research on machining deformation of superalloy thin-walled blades[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [6] ADEL Olabi, RICHARD Béarée, OLIVIER Gibaru, et al. Feedrate planning for machining with industrial six-axis robots[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(5): 471–482.
- [7] 黄云, 黄智. 现代砂带磨削技术及工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009.
- HUANG Yun, HUANG Zhi. Modern abrasive belt grinding technology and engineering application[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2009.
- [8] 黄云, 黄智. 砂带磨削的发展及关键技术[J]. 中国机械工程, 2007, 18(18): 2263–2267.
- HUANG Yun, HUANG Zhi. Belt grinding development and key technologies[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(18): 2263–2267.
- [9] 任旭, 黄云, 杨仲升, 等. 机器人砂带磨削船用螺旋桨关键技术[J]. 工艺与检测, 2015(11): 127–131.
- REN Xu, HUANG Yun, YANG Zhongsheng, et al. Key technologies for propeller of robot belt grinding[J]. Process and Inspection, 2015(11): 127–131.
- [10] 任旭. 航发叶片机器人砂带磨削关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- REN Xu. Study on key techniques for robot belt grinding of aero engine blade[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [11] 熊有伦, 丁汉, 刘恩沧. 机器人学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- XIONG Youlun, DING Han, LIU Encang. Robotics[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008.

通讯作者: 赵赞, E-mail: jsb430@163.com。

Research on Adaptive Belt Grinding Nickel-Based Superalloy Blades With Robot

ZHAO Yun¹, HUANG Yun², CHANG Taoqi¹, ZHANG Xindong¹, DUAN Lian², LIU Mingxing¹,
ZOU Lai², XIAO Guijian²

(1. AECC Aero-Engine Control, Ltd., Xi'an 710072, China;

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

[ABSTRACT] Nickel-base superalloy fine-casting blades are difficult to guarantee their machining accuracy during machining due to their large margin and no reference to positioning. In this paper, aero-engine fine-casting blades with nickel-base superalloy are grinded by using robotic belt grinding method combined with adaptive processing technology. Through a 6-point iterative approach, the paper determines the position of the blade relative to the fixture. Then in order to ensure the grinding position and orientation and the grinding parameters, the article plans the trajectory of the model and extracts the position and orientation information of points, and builds fourth order homogeneous matrix to solve the robot trajectory. Finally, based on the information of blade profile, the adaptive processing method was adopted to quantitatively remove the material from the fine-casting blades to ensure its machining accuracy.

Keywords: Nickel-base superalloy; Belt grinding; Adaptive method; 6-point iterative method; Machining accuracy

(责编 大漠)