

引文格式: 张云, 陈志同, 朱正清. 航空发动机叶片阵列抛光轨迹调整技术研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 58-64.

ZHANG Yun, CHEN Zhitong, ZHU Zhengqing. Research on array polishing path adjustment for aero-engine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(17): 58-64.

航空发动机叶片阵列抛光轨迹调整技术研究*

张云¹, 陈志同², 朱正清²

(1. 北方工业大学, 北京 100144;
2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

[摘要] 航空发动机叶片的高效率自动化抛光是替代人工打磨、保证精加工型面质量的重要手段。本研究在前期研制的阵列加工机床上, 针对多主轴阵列抛光时由批量叶片制造误差引起的抛光轨迹自动化调整需求, 开展待抛光叶片变形分析及进排气边关键区域的抛光工艺试验, 由此建立以抛光去除量差异最小为目标函数, 表面粗糙度为约束条件的阵列抛光轨迹调整算法, 并利用数控系统坐标转换功能实现 G 代码的自动调整。在保证阵列抛光精度及表面粗糙度的前提下, 达到高效率多主轴同步抛光的目的。采用 4 件典型叶片进行阵列抛光验证, 抛光后线轮廓度 ≤ 0.032 mm, 表面粗糙度 $R_a < 0.4$ μm , 平均单件叶片抛光工时达到 2.75 min。

关键词: 航空发动机叶片; 阵列机床; 同步抛光; 轨迹调整; 抛光工艺

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.17.058



张云

讲师, 研究方向为复杂曲面 CAD/CAM 技术、先进制造装备与数字化制造。

叶片是航空发动机中数量最多、且直接参与能量转换的核心动力部件^[1], 其加工质量及生产效率尤为重要。目前, 国内航发制造企业仍大规

模采用人工打磨方式进行叶片抛光, 但随着叶片设计、材料、工艺体系的快速发展, 对于已经完成型面精加工的批量叶片, 高效率、自动化数控抛光成为替代人工打磨、保证抛光质量的有效手段之一^[2]。

数控抛光的工艺灵活性和装备适应性较强^[3], 主要实现形式为以砂带、砂布轮、橡胶轮等为工具的工业机器人和数控机床抛光^[4]。近年来, 为了全面替代人工打磨, 在保证抛光质量的前提下, 众多学者开展了大量抛光提效研究。其中, 华中科技大学徐小虎^[5]通过力-位双控及工艺参数优化, 使得机器人砂带磨抛效率相较于人工打磨可提高 50% 以上。重庆大学 Xiao^[6]和 Li^[7]等研制出多工位集成自适应砂带磨抛系统, 具备上料、检测、力控调整等自动化功能。西北工业大学淮文博^[8]和 Chen^[9]等

根据弹性工具抛光原理建立了抛光效率的数学模型, 并结合正交试验结果的灰色关联度优化抛光参数组合。北京航空航天大学陈志同等^[10]为提高抛光效率研制了可同步加工多个叶片的多主轴阵列加工系统。德国亚琛工业大学与 STAMA 公司的研究表明, 当采用双主轴阵列机床时, 平均单件加工成本和工时可降低到单主轴机床上加工同样两件工件的 70% 以下^[11-12]。然而, 由于叶片制造面临薄壁结构、复杂曲面、难加工材料等难点, 型面精加工后叶片普遍存在线轮廓度、位置度、相对扭转等误差^[13]。为此, 本团队依据误差分布情况开展批量叶片数字化分组研究, 以降低阵列抛光时各叶片间的型面差异^[14]。但同组叶片实际型面与理论模型间仍存在差异, 由理论模型生成的抛光轨迹极易出现过抛、漏抛

* 基金项目: 航空科学基金(20200016112001)。

等问题。因此,本文以叶片变形分析及进排气边抛光工艺试验为基础,开展阵列抛光轨迹自动化调整研究,在保证抛光精度及表面质量的前提下,达到高效率、自动化多主轴阵列抛光的目的。

1 多主轴同步定轨迹抛光

1.1 多主轴同步抛光

如图1所示,多主轴(2×2)同步加工机床具有3个移动轴X、Y、Z和2个转动轴B、C,主轴摆头B转动角度为±45°,回转工作台C为360°连续转动,多支(2×2)轮式抛光工具通过标准刀柄连接至B上,工件通过快换工装安装于C上,通过工具与叶片间的轨迹控制,即定轨迹轮式抛光方式,实现高效率的同步抛光。

1.2 定轨迹轮式抛光

定轨迹轮式抛光采用具有准确尺寸和确定弹性的柔性工具(图2(a)),该工具设计直径为D,环面管半径为ρ。当给定转速ω时,该工具在预压力E下与叶片表面接触后被压缩产生弹性变形,进而提供稳定可控的接触压力,使得工具表面附着的超硬磨料对接触表面起到抛光作用(图2(b))。

2 叶片变形分析及抛光工艺试验

精加工后叶片实际型面普遍存在设计公差内容许的线轮廓度、位置度、相对扭转等误差,而这些误差又显著影响进排气边区域的实际形状,图3(a)给出了第4节验证实例中9件抽样叶片进排气边区域的测量结果。当抽样叶片采用阵列抛光时,各叶片实际形状差异,尤其在进排气区域,将导致抛光预压力E的差异,进而造成阵列抛光后各叶片抛光去除量ε和表面粗糙度R_a存在差异。因此,阵列抛光轨迹应在考虑上述差异的影响下实现自动调整。

针对验证实例中型面精加工后

待抛光叶片进排气边圆弧半径r范围(r=0.1~0.3 mm),设计如图3(b)所示圆弧试件r=0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm,开展抛光工艺试验建立预压力E与抛光去除量ε、表面粗糙度R_a的关系,如式(1)和(2)所示。

$$\varepsilon = f_1(r, E) = a_1 r + b_1 E + c_1 r^2 + d_1 E^2 + g_1 r E + h_1 \quad (1)$$

$$R_a = f_2(r, E) = a_2 r + b_2 E + c_2 r^2 + d_2 E^2 + g_2 r E + h_2 \quad (2)$$

式中,拟合参数 $a_1/a_2=-0.34/-0.37$, $b_1/b_2=0.57/-7.81$, $c_1/c_2=0.98/1.44$, $d_1/d_2=-0.1/23.71$, $g_1/g_2=-1.5/-0.55$, $h_1/h_2=0.012/0.82$ 。图4给出了E与ε、R_a关系图,如r=0.1 mm时,随着E

(E=0.05 mm、0.10 mm、0.15 mm、0.20 mm)的增加,ε增加,而R_a先降低后增加。而实际上,图3(a)所示型面精加工后叶片实际形状存在差异,造成阵列抛光时实际预压力较理论值存在差异。所以,应结合叶片实际形状对阵列抛光轨迹中实际预压力进行调整,保证叶片各不同圆弧半径处抛光去除量的差异最小,同时抛光表面质量满足设计要求。

3 阵列抛光轨迹调整

阵列抛光轨迹调整主要包括3个步骤。

(1) 测量规划。采用接触式扫

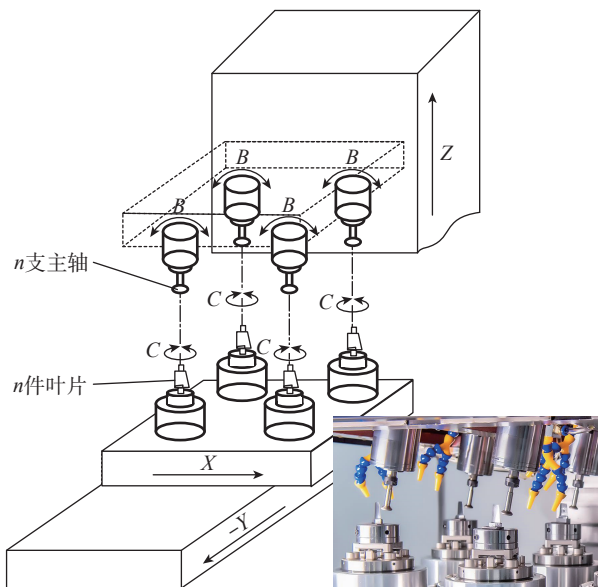
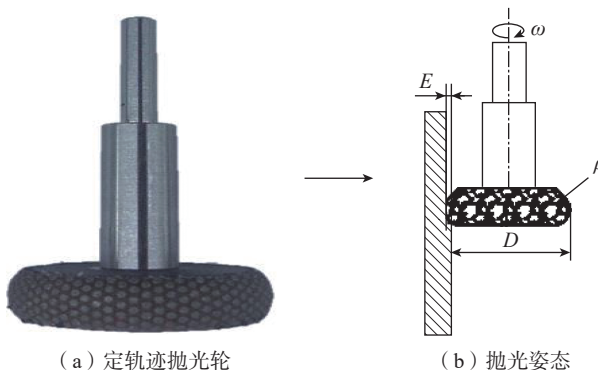


图1 4主轴阵列抛光机床

Fig.1 Four-spindle array polishing machine tool



(a) 定轨迹抛光轮

(b) 抛光姿态

图2 定轨迹轮式抛光

Fig.2 Wheel polishing with determined-path

描测头对叶片进行测量,但由于对象为批量叶片,应尽可能减少测量时间。由第2节分析可得各叶片进排气边处差异显著,因此测量点应分布于进排气边处,为实际预压量调整提供测量数据。

(2) 最优配准。将各测点处实际预压量和曲率半径共同代入式(1)和(2),可得到执行当前抛光轨迹后各测点处表面粗糙度和抛光去除量。而在轨迹调整时,以抛光后表面粗糙度为约束,以实际预压量引起的抛光去除量差异最小为配准目标函数,通过求解旋转和平移量实现最优配准。

(3) 轨迹调整。由数控系统坐标转换功能对阵列抛光轨迹所在加工坐标系进行旋转与平移,实现实际预压量的在机调整,从而提高阵列抛

光加工的效率 and 自动化程度。

3.1 阵列抛光叶片的测量规划

采用同一加工轨迹进行阵列抛光的叶片数量记为 n , 在理论加工坐标系 MCS 下由定义截面蒙皮方式构建的叶片型面记为 $S(u, v)$ 。采用三坐标测量机(配置接触式扫描测头 PH10M SP25M)检测如图5所示测量曲线(红色线条,是进排气边与盆背转接点的等 u 线, $u=0, 0.45, 0.50, 0.95$), 由测量曲线与定义截面求交可获得 m 个测量点, 则 n 件叶片的测量点集为 $P=\{p_{ij}|i=1, \dots, n; j=1, \dots, m\}$ 。

3.2 面向阵列抛光的最优配准

通过最小二乘拟合算法求解 $S(u, v)$ 与 P 之间的平移与旋转变换矩阵 RT , 考虑到计算复杂度和截面定义方式, 如图5中 RT 的参量

简化为绕着 Z 坐标轴的旋转分量 $\Delta\gamma$ 和沿着 X, Y 坐标轴的平移分量 $\Delta x, \Delta y$ 。 p_{ij} 至 $S(u, v)$ 的最短距离点为 $q_{ij}=S(u_{ij}, v_{ij})$, 相应点集记为 $Q=\{q_{ij}|i=1, \dots, n; j=1, \dots, m\}$ 。

则在目标函数 $\min F(RT)$ 下以 $\dot{Q}=Q \cdot RT$ 逐步逼近 P , 其中 $\dot{q}_{ij}=q_{ij} \cdot RT$, 当相邻迭代目标函数差值小于指定阈值时, 迭代终止。

在 MCS 下, 由 $S(u, v)$ 生成的阵列抛光加工轨迹为 $GPath$, 由工艺要求确定各点理论预压量函数为 $E_0(u, v)$, 则在 q_{ij} 处实际预压量为 $\dot{E}(u_{ij}, v_{ij})=E_0(u_{ij}, v_{ij})+\overline{QP} \cdot \bar{n}(u_{ij}, v_{ij})$ 。其中, $\bar{n}(u_{ij}, v_{ij})$ 为 $S(u, v)$ 在 \dot{q}_{ij} 处的外法矢方向。给定在 \dot{q}_{ij} 处的曲面曲率半径为 $r(u_{ij}, v_{ij})$, 则依据式(1)和(2)计算抛光去除量 ε_{ij} 和抛

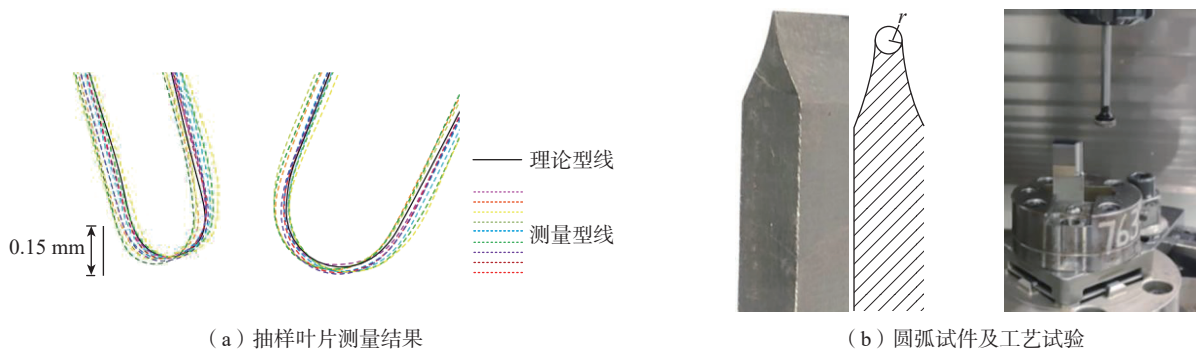


图3 叶片变形分析及抛光工艺试验

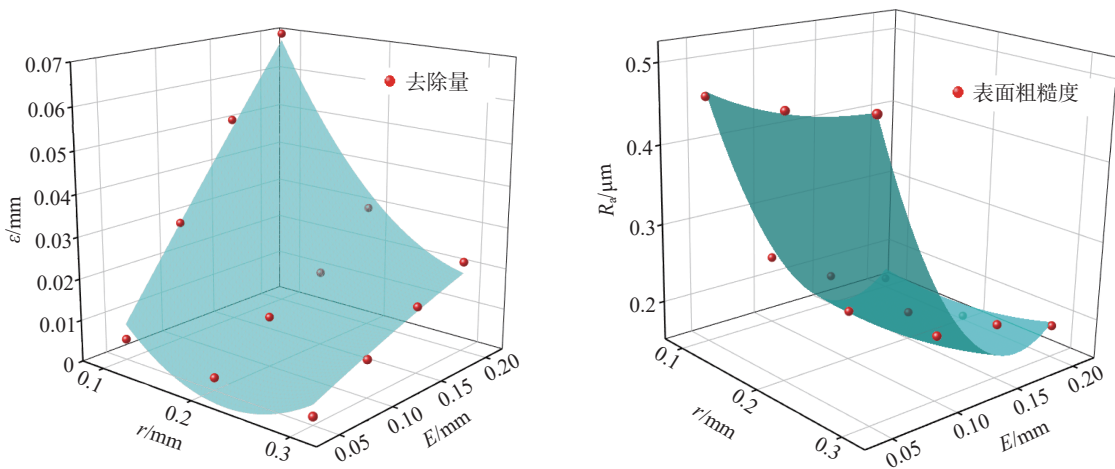


图4 对 $r=0.1\text{ mm}, 0.2\text{ mm}, 0.3\text{ mm}$ 试件抛光建立 E 与 ε, R_a 关系曲线

光后表面粗糙度 $R_{a,ij}$ 为

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{RT}) = f_1[r(u_{ij}, v_{ij}), \dot{E}(u_{ij}, v_{ij})] \quad (3)$$

$$R_{a,ij}(\mathbf{RT}) = f_2[r(u_{ij}, v_{ij}), \dot{E}(u_{ij}, v_{ij})] \quad (4)$$

给定目标函数 $\min F(\mathbf{RT})$ 为阵列抛光时各叶片测量点处抛光去除量差异最小,则可写作

$$\min F(\mathbf{RT}) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |\varepsilon_{ij}(\mathbf{RT}) - \bar{\varepsilon}_j| \quad (5)$$

式中, $\bar{\varepsilon}_j$ 为 q_{ij} ($i=1, \dots, n$) 处的去除量均值。当要求叶片抛光表面粗糙度达到 $R_a 0.4 \mu\text{m}$ 以下时,给定约束条件为

$$\text{s.t. } R_{a,ij}(\mathbf{RT}) \leq 0.4 \quad (6)$$

由式(5)和(6)求解 \mathbf{RT} 为典型的非线性约束优化问题,可用非线性优化算法进行求解 $(\Delta x, \Delta y, \Delta \gamma)$, 本文不再详述^[15]。

3.3 阵列抛光轨迹的在机调整

由3.2节所得 $(\Delta x, \Delta y, \Delta \gamma)$ 对 GPath 进行调整。如图6所示,由于在数控系统中加工轨迹执行先旋转再平移的绝对变换,因此由 MCS 形成新的加工坐标系 MCS' 时,式(7)给出了先旋转 $\Delta \gamma$ 后的平移量 $\Delta x', \Delta y'$ 计算方法。

$$\begin{cases} \Delta x' = \Delta x \cdot \cos \Delta \gamma + \Delta y \cdot \sin \Delta \gamma \\ \Delta y' = \Delta y \cdot \cos \Delta \gamma - \Delta x \cdot \sin \Delta \gamma \end{cases} \quad (7)$$

则调整后的阵列抛光轨迹 GPáth 采用 Simense 840D 数控系统坐标转换功能对 GPath 进行自动调整,代码释义如表1所示。

4 阵列抛光加工验证

所验证实例为某型号航空发动机压气机叶片,材料为高温合金,如图7所示,尺寸规格约为 $22 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$,依据型面几何属性确定柔性轮式工具尺寸为 $D=29.6 \text{ mm}$ 、 $\rho=1.5 \text{ mm}$ 。

对待阵列抛光验证的4件叶片进行三坐标测量,测量曲线与定义截面求交可获得如图8所示的测量点集 P 。

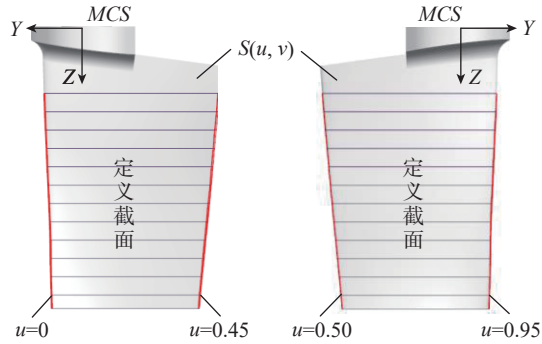


图5 叶片扫描测量线示意图
Fig.5 Sketch of blade measurement

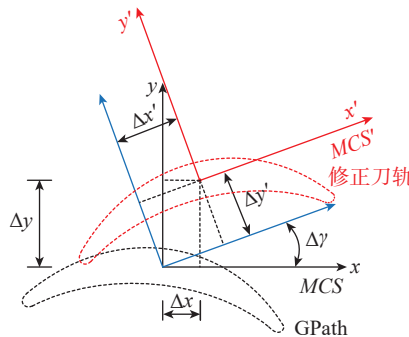


图6 阵列抛光轨迹调整-坐标变换
Fig.6 Array polishing path adjustment-coordinate transformation

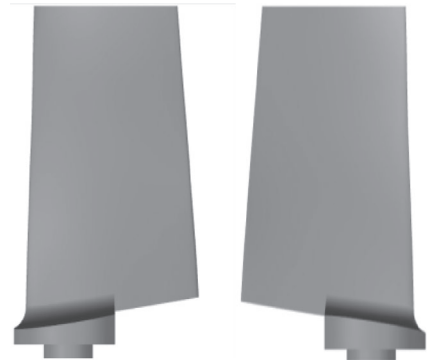


图7 阵列抛光加工验证叶片模型
Fig.7 Array polishing blade model

表1 GPáth 的 G 代码与注释
Table 1 G-code and its denote of GPáth

程序代码	注释
N10 G17 G54	设置轨迹工作平面 X/Y, 工件零点
N20 AROT RPL= $\Delta \gamma$	围绕垂直于平面 G17 的 Z 轴旋转 $\Delta \gamma$
N30 TRANS X $\Delta x'$ 0 $\Delta y'$	沿着 X 与 Y 轴绝对偏移 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$
N40...	在新坐标系 MCS' 下执行 GPath
⋮	⋮
N100 M30	阵列抛光程序结束

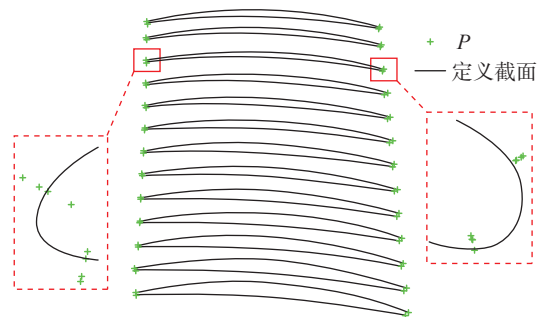


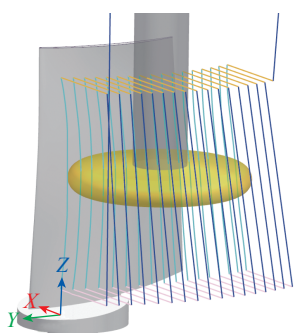
图8 4件待阵列抛光叶片的测量结果
Fig.8 Measurement result of 4 blades before array polishing

将 P 代入式(5)和(6),利用外罚函数法求解得到 $\Delta x = -0.024 \text{ mm}$, $\Delta y = +0.0103 \text{ mm}$, $\Delta \gamma = -0.262^\circ$ 。则对4件待抛光叶片进行坐标变换,重新计算 P 至 $S(u, v)$ 的偏差值,结果如表2所示。

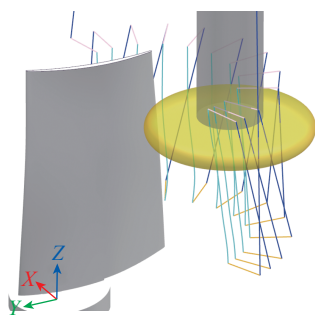
用式(7)换算后 $\Delta x' = -0.0241 \text{ mm}$, $\Delta y' = 0.0102 \text{ mm}$,图9举例给出了在 MCS' 下叶背、进气边加工程序。阵列抛光过程如图10所示,包括粗抛光、半精抛光和精抛光过程,所用抛光轮的磨料及主要抛光工艺参数

表2 4件叶片坐标变换后的偏差分析
Table 2 Deviation analysis of 4 blades after coordinate transformation

叶片序号	最大正偏差 / mm	最大负偏差 / mm
1#	0.0395	-0.015
2#	0.0479	-0.0111
3#	0.0347	-0.0158
4#	0.0376	-0.0184



(a) 叶背精抛光刀轨



(b) 进气边精抛光刀轨

图9 叶背、进气边精抛光加工程序
Fig.9 Finishing polishing machining program for pressure side and leading edge

如表3所示。

目前,在航空发动机制造企业中该叶片采用人工打磨方式,单件打磨时间约为10 min。而采用表3中抛光轮和工艺参数进行单件抛光时,粗抛、半精抛、精抛工时分别约为4.5 min、3 min和3.5 min,则单件抛光工时约为11 min,此时单件抛光效率较人工打磨略有降低。而采用4主轴阵列抛光后,由于同步抛光4件叶片,平均单件抛光工时约为11/4 min=2.75 min,阵列抛光效率比人工打磨提高了约2.6倍。因此,采用阵列抛光后效率提升明显。

采用三坐标测量机对抛光后4件叶片进行精度检测,盆/背的最大/最小误差(CV/CC_MAX/MIN)、进/排气边的最大/最小误差(LE/TE_MAX/MIN)如表4所示。则1#~4#叶片经过阵列抛光后,由最大误差与最小误差的差值确定的线轮廓度分别为0.031 mm、0.032 mm、0.0265 mm和0.0306 mm。



图10 4件叶片阵列抛光加工工况
Fig.10 Array polishing for 4 blades

采用车间型精密粗糙度轮廓仪(Form TalySurf Intra)对抛光后4件叶片的中间截面进行表面粗糙度检测,表面粗糙度 $R_a < 0.4 \mu\text{m}$,满足设计要求。

5 结论

本文针对阵列抛光加工轨迹的自动调整需求开展技术研究,并利用典型型号叶片进行了阵列抛光验证,取得的主要结论如下。

(1)结合叶片关键区域抛光预压量与抛光去除量、表面粗糙度的工艺试验分析结果,对阵列加工轨迹的配准变换进行了有效求解,并利用数控系统坐标转换功能完成G代码的自动调整,实现阵列抛光过程轨迹调整的自动化。

(2)4件典型叶片经过阵列抛光后,线轮廓度分别达到0.031 mm、0.032 mm、0.0265 mm和0.0306 mm以内,表面粗糙度 $R_a < 0.4 \mu\text{m}$,阵列抛光质量得到保证。同时,平均单件叶片抛光工时达到2.75 min,抛光效率提升明显。

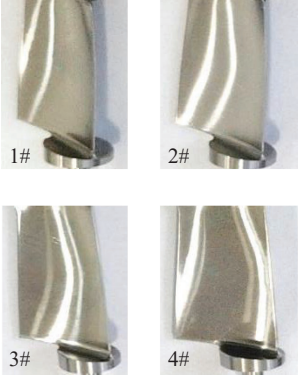
参考文献

- [1] 朱大虎,徐小虎,蒋诚,等.复杂叶片机器人磨抛加工工艺技术研究进展[J].航空学报,2021,42(10):524265.
ZHU Dahu, XU Xiaohu, JIANG Cheng, et al. Research progress in robotic grinding technology for complex blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524265.

表3 阵列抛光所用抛光轮磨料和工艺参数
Table 3 Polishing wheel abrasive and polishing parameters

抛光工序	抛光轮		抛光参数	
	磨料	粒度号/#	主轴转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	进给速度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
粗抛	金刚石	400	6000	600
半精抛		2000	6000	700
精抛		6000	7000	900

表4 4件叶片表面粗糙度和精度分析
Table 4 Surface roughness and accuracy analysis of 4 blades

分析项	1# 叶片	2# 叶片	3# 叶片	4# 叶片	叶片实物
CV_MAX/mm	0.0214	0.0209	0.0092	0.0064	
CV_MIN/mm	0.0097	-0.0028	0.0012	-0.0041	
CC_MAX/mm	0.0202	0.0139	0.0063	0.0042	
CC_MIN/mm	0.0055	-0.0047	-0.0074	-0.0086	
LE_MAX/mm	0.0244	0.0132	0.0147	0.0076	
LE_MIN/mm	-0.001	-0.0111	-0.0118	-0.0184	
TE_MAX/mm	0.0295	0.0179	0.0126	0.0122	
TE_MIN/mm	-0.0015	-0.0099	-0.0061	-0.0114	
$R_a/\mu\text{m}$	0.31	0.35	0.32	0.28	

[2] 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): 2074-2082.

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): 2074-2082.

[3] 黄云, 肖贵坚, 邹莱. 航空发动机叶片机器人精密砂带磨削研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 022508.

HUANG Yun, XIAO Guijian, ZOU Lai. Current situation and development trend of robot precise belt grinding for aero-engine blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(3): 022508.

[4] 王志伟, 蔺小军, 史耀耀, 等. 基于压缩量偏差约束的整体叶盘砂轮数控抛光路径规划[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 623330.

WANG Zhiwei, LIN Xiaojun, SHI Yaoyao, et al. A polishing path planning method for blisk with abrasive cloth wheel based on compression deviation constraint[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 623330.

[5] 徐小虎. 压气机叶片机器人砂带磨抛加工关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

XU Xiaohu. Research on the key technology of robotic abrasive belt grinding of compressor blade[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

[6] XIAO G J, HUANG Y, YIN J C. An integrated polishing method for compressor

blade surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5-8): 1723-1733.

[7] LI Z R, ZOU L, YIN J C, et al. Investigation of parametric control method and model in abrasive belt grinding of nickel-based superalloy blade[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(9-10): 3301-3311.

[8] 淮文博, 史耀耀, 蔺小军. 整体叶盘自适应柔性抛光效率优化[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(6): 1550-1557.

HUAI Wenbo, SHI Yaoyao, LIN Xiaojun. Optimization of adaptive flexible blisk polishing efficiency[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(6): 1550-1557.

[9] CHEN Z, SHI Y Y, LIN X J, et al. A profile-adaptive compliant polishing tool for aero-engine blade finishing process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(9-12): 3825-3838.

[10] 陈志同, 张云, 刘瑞松, 等. 航空发动机叶片矩形阵列磨削加工技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(9): 34-39.

CHEN Zhitong, ZHANG Yun, LIU Ruisong, et al. Rectangular array grinding process of aero-engine blade with complex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(9): 34-39.

[11] STAMA. System 5 Two Place [EB/OL]. [2022-04-09]. <https://stama.de/1/overview-machining-centers/system-5-two-place.html>.

[12] CHIRON. Multi-spindle machining

[EB/OL]. [2022-04-09]. <https://chiron.de/en/products/technology/multi-spindle-machining.html>.

[13] 蔺小军, 崔彤, 杨碧颖, 等. 薄壁叶片叶型多工序加工检验模型建立方法[J]. 航空学报, 2019, 40(11): 423034.

LIN Xiaojun, CUI Tong, YANG Biying, et al. Method for establishing machining and inspection model of multi-stage machining processes of thin-walled blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(11): 423034.

[14] 王小东. 面向阵列抛光的叶片分组技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2020.

WANG Xiaodong. Research on blades grouping method for array polishing[D]. Beijing: Beihang University, 2020.

[15] 韦增欣, 陆莎. 非线性优化算法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

WEI Zengxin, LU Sha. Nonlinear optimization algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2016.

通讯作者: 陈志同, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为先进数控加工技术与装备。

(责编 阳光)

Research on Array Polishing Path Adjustment for Aero-Engine Blade

ZHANG Yun¹, CHEN Zhitong², ZHU Zhengqing²

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] High efficiency automatic polishing of aero-engine blade is an important means to replace manual polishing and ensure the quality of finish machined profile. In this paper, blade measurement analysis and polishing experiment for leading/trailing edge are carried out on the array machining machine tool. Therefore, the array polishing path adjustment algorithm with the objective function of minimum polishing removal difference and the constraint condition of surface roughness is established, and the coordinate transformation function of NC system is used to realize the automatic adjustment of G-code. On the premise of ensuring the polishing accuracy and surface roughness, the purpose of high-efficiency multi-spindle synchronous polishing is achieved. Four typical blades are used for array polishing verification, their linear profile is no more than 0.032 mm and the surface roughness is $R_a < 0.4 \mu\text{m}$. The average polishing time of a single blade is 2.75 min.

Keywords: Aero-engine blade; Array machine tool; Synchronous polishing; Path adjustment; Polishing process

(责编 阳光)

(上接第 48 页)

Study on Stepwise Pulsant Precision Electrochemical Machining Method for Aero-Engine Blade

XU Zhengyang, WANG Jingtao, LIU Jia, ZHU Dong, WEI Haodi

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Electrochemical machining (ECM) has played an important role in the efficient and precise manufacturing of core components such as aero-engine blades or blisks in Europe and the United States. Using the traditional ECM, the cathode tools for machining blade concave and convex surfaces move towards each other, and the profile of the blade and the contour of the leading and trailing edges are processed at the same time. At this time, the accuracy of blade profile is easy to ensure, while the accuracy of leading and trailing edges is low. In this paper, a stepwise pulsant precision ECM method for blade is proposed, which aims to further improve the profile accuracy of blade and the contour accuracy of leading and trailing edges. The method is divided into two different stages. Firstly, the blade surface is machined precisely by pulsant dynamic variable parameter ECM mode, and then the leading and trailing edges are machined by micro pulse ECM mode. The research of the above two stages in machining mechanism and processing experiment are described in detail. Aiming at the problem of passive diversion in the traditional radial flow field, an active diversion axial flow field is proposed. The experimental results indicate that this method shows favorable process effects. The machining error of the concave surface and convex surface is $-0.013-0.025 \text{ mm}$ and $-0.003-0.030 \text{ mm}$, respectively. The machining error of leading edge is $-0.034-0.041 \text{ mm}$, the machining error of trailing edge is $-0.038-0.034 \text{ mm}$, and the surface roughness of the concave profile and the convex profile are respectively $R_a 0.333 \mu\text{m}$ and $R_a 0.287 \mu\text{m}$. The proposed method provides a new solution for the realization of high-precision manufacturing of aero-engine blades, and can be used for machining of other complex-shaped components.

Keywords: Electrochemical machining (ECM); Step by step processing; Pulsant dynamic; Micro energy pulse;

Blade; Blisk; Aero-engine

(责编 阳光)