

# 涡轮叶片榫头侧边圆角阵列加工工艺研究\*

王小东<sup>1</sup>, 张云<sup>1</sup>, 陈志同<sup>1</sup>, 刘瑞松<sup>2</sup>, 刘随建<sup>3</sup>, 吴志新<sup>3</sup>

- (1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;  
2. 枣庄北航机床创新研究院有限公司, 枣庄 277000;  
3. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

**[摘要]** 航空发动机涡轮叶片是发动机内核心部件, 而叶片的加工通常以榫头为工艺基准, 故叶片榫头的加工对整个叶片有着至关重要的影响。针对榫头侧边圆角, 现在工厂通用的数控加工工艺是: 先在多轴加工中心进行铣削加工再进行机械光饰。但常规多轴联动铣削效率低, 使用设备复杂, 加工成本高。因此, 提出了基于矩形阵列数控机床(三轴联动)的超硬磨料数控磨抛倒圆工艺系统。其中, 利用超硬磨料数控磨削抛光组合工艺, 解决了倒圆铣削加工效率低且不能保证表面质量的问题, 加工完成后榫头侧边圆角轮廓度可达 20 $\mu\text{m}$ 。而采用多主轴矩形阵列数控机床(三轴联动)后相较原来的多轴加工中心大幅度降低了设备的使用成本, 且单个榫头侧边圆角加工时间缩短在 180s 内, 为采用更多主轴矩形阵列机床加工奠定了基础。

**关键词:** 叶片榫头; 磨削抛光; 圆角加工; 阵列加工; 低成本

## Research on Array Machining of Turbine Blade Tenon Side Fillet

WANG Xiaodong<sup>1</sup>, ZHANG Yun<sup>1</sup>, CHEN Zhitong<sup>1</sup>, LIU Ruisong<sup>2</sup>, LIU Suijian<sup>3</sup>, WU Zhixin<sup>3</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;  
2. Zaozhuang Beihang Machine Tool Innovation Research Institute Co., Ltd, Zaozhuang 277000, China;  
3. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

**[ABSTRACT]** Aero-engine turbine blade is the core part of the engine, and blade processing is usually based on blade tenon as the process datum, so the machining of blade tenon has a crucial impact on the whole blade. For the fillet of blade tenon side, now the common CNC processing technology in factories is: first in the multi-axis machining center for milling and then mechanical finishing. However, conventional multi-axis simultaneous milling has low efficiency, complex equipment and high processing cost. Therefore, based on the rectangular array CNC machine tool (3-axis simultaneous), this paper presents the process system of superhard abrasive grinding, polishing and rounding. Among, the combined process of NC grinding and polishing with superhard abrasive solves the problem of low machining efficiency and poor surface quality of inverted milling, and the accuracy of the rounded corner on the side of the mortise can be up to 20 $\mu\text{m}$ . The use of multi-spindle rectangular array CNC machine tool (3-axis simultaneous) greatly reduces the cost of equipment compared to the original multi-axis machining center, and the machining time of a single tenon side fillet is shortened within 180 seconds, laying a foundation for the use of more spindle machine tool rectangular array machining.

**Keywords:** Aero-engine turbine blade tenon; Grinding and polishing; Fillet machining; Array machining; Low cost

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.07.092

涡轮叶片是航空发动机内的核心零件, 其加工精度对整机性能有着重要影响。大多数发动机的涡轮组件由涡轮盘和叶片分体构成, 其中叶片由叶身和榫头组成, 榫头再与涡轮盘榫槽连接, 构成涡轮组合件<sup>[1]</sup>。传

\* 基金项目: 国高档数控机床与基础制造装备专项(2018ZX04004001)。

统涡轮叶片多采用枞树形结构, 该类结构的优点是允许榫头连接处受热后能自由膨胀, 以减少热应力, 同时榫头的传热性好, 使叶片上的热量容易散走<sup>[2]</sup>。

在叶片加工中由于通常以榫头为工艺基准, 并且榫槽的几何形状复杂, 精度高, 表面质量要求高, 故对榫头

的加工工艺有严格的要求,以防止在榫头表面造成加工缺陷。针对榫头加工的夹具设计、刀具选用和参数选择也非常关键。现在工厂通用的榫头数控加工工艺是:在卧式加工中心进行粗加工,再用平底铣刀精加工榫头侧面,最后用成型刀加工榫头上下成型面<sup>[3]</sup>。针对单件难加工材料制成的榫头,多采用缓进磨削加工的方式,但砂轮在整圈加工中前后磨损大,磨削出的榫头尺寸变化大<sup>[4]</sup>。对于榫头侧面圆角加工,目前的铣削加工需要较高的设备成本,占用机床工时较长,且需要后续进行机械光饰处理保证表面质量<sup>[5]</sup>;而手工倒圆则存在不均匀现象,易产生应力集中点。在此背景下,本文提出了基于三轴联动矩形阵列数控机床的超硬磨料数控磨抛倒圆工艺系统,为精度、表面质量、效率、成本等各方面的改进探索一条新工艺途径。

## 1 榫头侧边倒圆磨抛工艺系统

针对涡轮叶片榫头侧面圆角加工,基于三轴数控机床的超硬磨料数控磨抛倒圆工艺系统主要由多主轴矩形阵列磨削机床与超硬磨料磨具组成,并配合快换工装进行高精度装夹,重点解决加工精度、加工效率及经济性难题。

### 1.1 夹具设计

针对涡轮叶片榫头的榫槽形状设计的专用夹具如图1所示,利用对称结构夹持,夹持部分为与榫槽贴合的两段圆柱面。夹具底部有法兰方便在机床工作台上安装。

### 1.2 刀具选择

随着数控加工高速电主轴的发展,主轴稳定转速进一步提高,小尺寸超硬磨料磨具的线速度也可满足高温合金等难加工材料的磨削要求,从而利用该工具对涡轮叶片榫头进行高速磨削加工,发挥磨料颗粒多、磨削过程连续、微量去除能力等优势<sup>[6]</sup>。如图2所示<sup>[7]</sup>,为了防止刀具与夹具和叶片榫头产生碰撞干涉,本文选用小尺寸电镀 CBN 圆环面砂轮(环心圆直径  $D=20\text{mm}$ ,圆环半径  $R=1\text{mm}$ ,厚度  $FL=2\text{mm}$ )开展叶片榫头倒圆试验。

### 1.3 阵列加工

德国 CHIRON 公司所研制的多主轴铣削机床采用直线排列方式,北京航空航天大学有学者将线阵机床结构拓展成矩阵机床结构<sup>[8]</sup>,同时利用多个减速器的输入输出轴增加互联齿轮相互消除的方法在小空间中研制出高重复定位精度矩形阵列无间隙转台<sup>[9]</sup>。八主轴矩形阵列磨削机床加工如图3所示,配有8支转速可达  $60000\text{r/min}$  的高速磨削主轴,各直线轴的定位精度可达到  $5\mu\text{m}$ 。

在此工艺系统内,以涡轮叶片榫头侧边圆角为研究

对象,验证数控磨抛倒圆工艺有效性。由于圆环面砂轮柄部直径远小于环面直径,故可以实现叶片榫头的三轴磨削,大大简化机床结构。首先将多套专用夹具布置在矩形阵列磨削机床上并将多个状态相近的涡轮叶片榫头装夹在专用夹具上定位;然后选取合适的圆环面超硬磨料砂轮并在机床上安装;再利用叶片榫头的三维模型



图1 专用夹具  
Fig.1 Special fixture

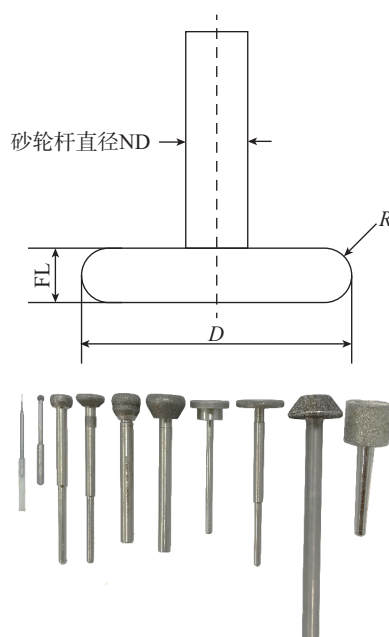


图2 电镀CBN圆环面砂轮  
Fig.2 Electroplated CBN toroidal grinding wheel

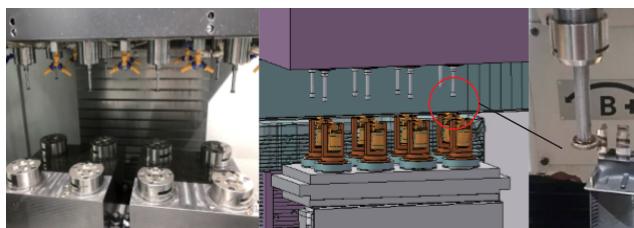


图3 八主轴矩形阵列(三联动)磨削机床  
Fig.3 Eight-spindle rectangular array grinding machine tool  
(3-axis simultaneous NC machining)

在软件中编制数控加工程序并在软件中进行后置处理,生成相应的 NC 代码输入到机床中;最后进行阵列磨削加工。若后续需要进一步提高倒圆表面质量,可更换超硬磨料弹性抛光工具在同一矩形阵列磨削机床上进行阵列抛光。工艺流程图如图 4 所示。

## 2 榫头侧边倒圆试验

在磨削工艺系统可靠稳定的情况下,对某型号涡轮叶片榫头侧边进行倒圆,证明榫头侧边圆角磨抛工艺系统的可行性。

### 2.1 试验方案

本试验所针对的涡轮叶片榫头侧边圆角如图 5 所示,圆角设计尺寸为  $R=0.6\text{mm}$ 。

采用本文所述的涡轮叶片榫头侧边倒圆角磨抛工艺系统,在矩形阵列磨削机床上进行加工。利用专用夹具对榫头进行装夹定位,选用加工刀具为超硬磨料砂轮。

根据软件编制榫头侧面顶棱边的数控加工走刀轨迹,将榫头侧面棱边分为 3 个加工区域,即两条侧棱边一条顶棱边,如图 6 所示。以与侧棱边相似形状的刀轨拟合出倒圆加工轨迹。其中砂轮优选为  $D20R1$  的 200# 电镀 CBN 圆环面砂轮,主轴转速优选为 20000r/min,砂轮线速度 20.9m/s,进给速度 600mm/min。切削运动方式优选为往复运动,切削步距数优选为 10~15,非切削移动的方式优选为线性垂直于部件进退刀<sup>[10]</sup>。类似的,以与顶棱边相似形状的刀轨拟合出倒圆加工轨迹,刀轨如图 7 所示。

### 2.2 试验结果

根据以上试验方案开展涡轮叶片榫头侧边磨削倒圆试验,试验结果如图 8 所示。

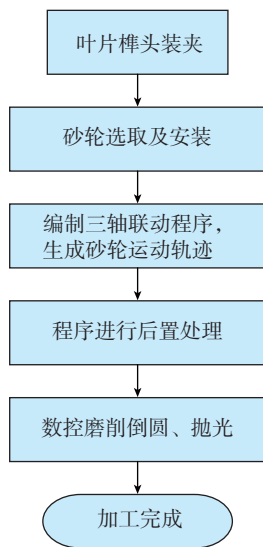


图4 工艺流程图  
Fig.4 Process flow chart

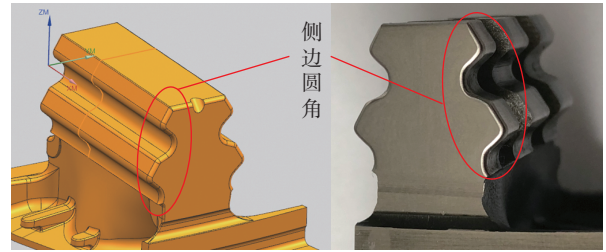


图5 榫头侧边圆角  
Fig.5 Fillet of tenon side

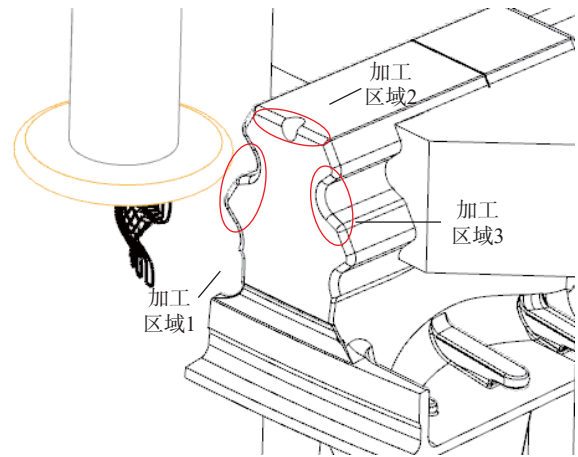
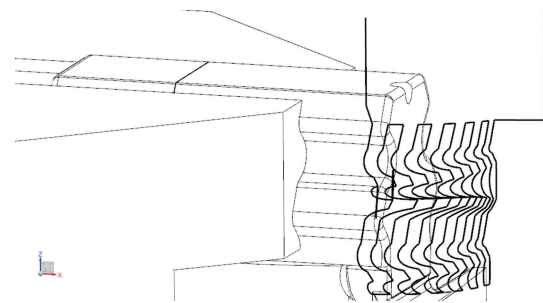
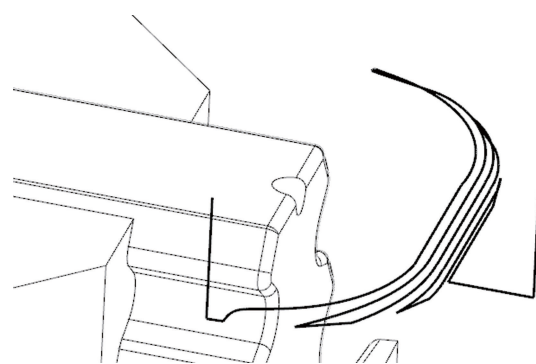


图6 加工区域示意图  
Fig.6 Machining region



(a) 侧棱边加工刀轨



(b) 顶棱边加工刀轨

图7 榫头棱边加工刀轨示意图  
Fig.7 Tenon edge machining tool path diagram

在三坐标测量机上对加工后侧边圆角抽取3个部位  $a$ 、 $b$ 、 $c$  进行采点测量,如图9所示。计算测点到理论模型上测量轨迹的最小距离后计算加工误差,如图10所示,可以看出采用本文所提出的磨抛工艺系统加工误差小于  $20\mu\text{m}$ ,且整体波动幅度较小,没有超差,证明误差分布较为均匀,加工后轮廓度可达到  $20\mu\text{m}$  以内;同时使用 Taylor-Hobson 轮廓仪画线取样测得加工表面粗糙度  $R_a$  在  $0.8\mu\text{m}$  以内;多个榫头同时加工,所用加工工时可控制在 180s 以内。

### 3 结论

本文提出了针对涡轮叶片榫头侧边倒圆的磨抛工艺系统,详述了榫头侧边倒圆的试验方案,随后在多主轴阵列磨削机床上进行了多个涡轮叶片榫头侧边倒圆的批量验证,并成倍提高了效率。

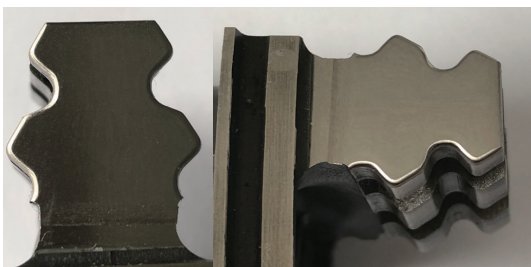


图8 榫头侧边倒圆结果

Fig.8 Result of tenon side rounding

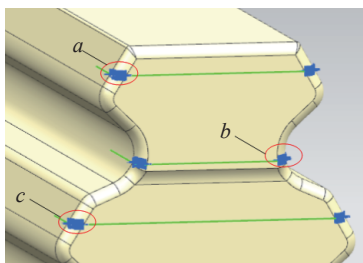


图9 测点位置示意图

Fig.9 Measuring point position

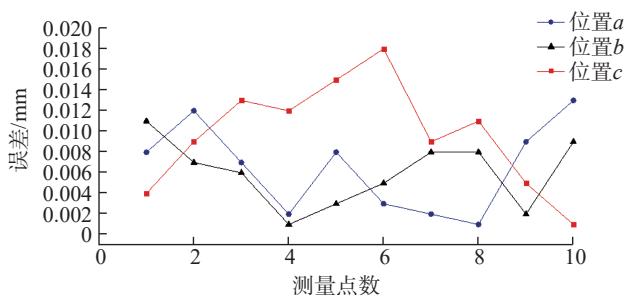


图10 测量误差图

Fig.10 Measurement error chart

(1) 搭建了针对涡轮叶片榫头侧边倒圆的磨抛工艺系统,实现了重要型号叶片榫头倒圆的三轴联动高效率高精度阵列加工,测量结果表明阵列加工叶片榫头形状精度一致性极好,在  $0.02\text{mm}$  以内,表面粗糙度  $R_a$  在  $0.8\mu\text{m}$  以内。

(2) 采用磨抛工艺系统,可以将单个榫头倒圆时间控制在 180s 以内,配合阵列加工,大幅度缩短了机床加工工时,提高了加工效率。

(3) 若要进一步去除榫头侧边圆角的加工刀纹,建议后续可进行振动光饰处理。

### 参考文献

[1] 吴立强,尹泽勇,蔡显新.航空发动机涡轮叶片的多学科设计优化[J].航空动力学报,2005,20(5):795-801.

WU Liqiang, YIN Zeyong, CAI Xianxin. MDO technology applied to the aeroengine turbine blade design[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 795-801.

[2] 崔智勇,谢芳,郝小红.工作叶片榫槽工艺方案分析[J].机械工程师,2015(1):222-223.

CUI Zhiyong, XIE Fang, HAO Xiaohong. Analysis on working blade mortising process scheme[J]. Mechanical Engineer, 2015(1): 222-223.

[3] 万敏,安铃芝,胡登洲,等.航空发动机第5级静子叶片榫头加工工艺优化[J].过程工程学报,2017,17(2):299-305.

WAN Min, AN Lingzhi, HU Dengzhou, et al. The machining technology optimization of tenon on level five aeroengine stator blade[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(2): 299-305.

[4] 郭文有,陆培庆,孙明仁.叶片圆弧榫头加工方法及分析[J].航空制造技术,1991,34(6):9-11.

GUO Wenyong, LU Peiqing, SUN Mingren. Machining method of blade circular root rabbet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1991, 34(6): 9-11.

[5] 李美荣,金秀杰,李大力,等.一种叶片榫头倒圆机械加工方法:CN104475835A[P].2015-04-01.

LI Meirong, JIN Xiujie, LI Dali, et al. A mechanical processing method for blade mortise and rounding: CN104475835A[P]. 2015-04-01.

[6] 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.

[7] 孟凡军.整体叶盘叶片型面数控精密磨削加工技术研究[D].北京:北京航空航天大学,2015.

MENG Fanjun. Study on the precision grinding technology for the CNC machining of blade surface of blisk[D]. Beijing: Beihang University, 2015.

(下转第101页)

## 5 结论

本文以“彩虹”零件为研究对象,通过对其结构特征进行分解,探索了型材拉弯成形工艺在板材零件成形上的应用,得到了以下结论:

(1) 截面为变夹角时,拉弯坯料(即 V 形槽)时应以最小截面夹角为准;

(2) 对拉弯坯料(即 V 形槽)进行回弹修正时,应当加大  $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ ,便于侧边贴模。V 形槽两侧边尺寸尽量保持一致,避免应力集中;

(3) 板材进行拉弯时,其基准边更容易出现起皱现象,拉弯模具在设计时间隙参数应适当放大(一般放大 0.2mm)。

## 参考文献

- [1] 职业技能培训 MES 系列教材编委会. 冷作钣金工技能 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.  
Editorial Board of MES Series Textbooks for Vocational Skills Training. Cold working sheet metalworking skills[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008.
- [2] 余汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.  
YU Hanqing, CHEN Jinde. Metal plastic forming principle[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [3] 刘翔, 李烁. 实用钣金技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.  
LIU Xiang, LI Shuo. Practical sheet metal technical manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [4] 熊艳才. 航空复杂构件精密成形技术基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.  
XIONG Yancai. Foundation of precision forming technology for aeronautical complex components[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [5] 李珑泉. 金属板料成形有限元模拟基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.  
LI Shuanggao. Finite element simulation basis of sheet metal forming[M]. Beijing: Beihang University Press, 2008.
- [6] 李光俊, 袁胜, 许旭东, 等. 面向对象的钣金成形有限元分析系统开发与应用 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(17): 100-103.  
LI Guangjun, YUAN Sheng, XU Xudong, et al. Development and application of object-oriented finite element analysis system for sheet metal forming[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(17): 100-103.
- [7] 郎利辉, 孙志莹, 孔德帅, 等. 复杂薄壁航空整体钣金件的液压成形技术 [J]. 锻压技术, 2014, 39(10): 25-31, 42.  
LANG Lihui, SUN Zhiying, KONG Deshuai, et al. Hydraulic forming technology for complex thin-walled aeronautical integral sheet metal parts[J]. Forging Technology, 2014, 39(10): 25-31, 42.
- [8] 成靖, 李晓军, 曾一畔, 等. 航空复杂钣金构件冲压成形的研究与应用 [J]. 锻压技术, 2018, 43(12): 31-35.

CHENG Jing, LI Xiaojun, ZENG Yipan, et al. Research and application of stamping forming of aeronautical complex sheet metal components[J]. Forging Technology, 2018, 43 (12): 31-35.

[9] 刘天骄, 王永军, 吴建军, 等. 大型客机铝锂合金型材拉弯成形关键技术 [J]. 航空制造技术, 2012, 55(17): 40-44.

LIU Tianjiao, WANG Yongjun, WU Jianjun, et al. Large aircraft Al-Li alloy profiles stretch bending key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(17): 40-44.

[10] 张晓丽, 李晓星, 周贤宾, 等. 复杂截面铝合金型材拉弯成形有限元模拟 [J]. 塑性工程学报, 2004, 11(4): 44-47.

ZHANG Xiaoli, LI Xiaoxing, ZHOU Xianbin, et al. Finite element simulation for stretch-wrap bending of aluminium profile with complex cross section[J]. Journal of Plastic Engineering, 2004, 11(4): 44-47.

[11] 李小强, 曹增强, 王俊彪, 等. 型材拉弯工艺研究进展 [J]. 航空制造技术, 2004, 47(4): 80-82.

LI Xiaoqiang, CAO Zengqiang, WANG Junbiao, et al. Progress in research on stretch bending process of profiles[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47(4): 80-82.

[12] 张磊, 刘闯, 王俊彪. 型材拉弯成形工艺知识库研究与开发 [J]. 航空制造技术, 2011, 54(4): 71-74.

ZHANG Lei, LIU Chuang, WANG Junbiao. Research and development of profile drawing and bending process knowledge base[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(4): 71-74.

通讯作者: 李晓军, 工程师, 研究方向为复杂航空钣金构件精确制造技术, E-mail: lxjupup@163.com。

(责编 阳光)

(上接第95页)

[8] 陈志同, 陈胜林. 一种矩形阵列同步摆动机构及基于该机构的多轴联动加工机床: CN103769997A[P]. 2014-05-07.

CHEN Zhitong, CHEN Shenglin. A rectangular array synchronous oscillating mechanism and a multi axis machine tool based on the mechanism: 201410004979.X[P]. 2014-05-07.

[9] 陈志同, 徐志雄, 张黎明, 等. 一种双减速器相互消隙无回差传动装置: 201710762347.3 [P]. 2017-08-30.

CHEN Zhitong, XU Zhixiong, ZHANG Liming, et al. A kind of double decelerator mutual clearance and no return difference transmission device: 201710762347.3[P]. 2017-08-30.

[10] 李潜彤. 高温合金铣削磨削抛光组合加工表面完整性控制研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2018.

LI Qiantong. Research on surface integrity control of superalloy milling, grinding and polishing combined machining[D]. Beijing: Beihang University, 2018.

通讯作者: 陈志同, 博士, 教授, 研究方向为先进数控加工技术与装备、机床机构学、共轭几何学、制造经济学和加工表面科学, 提出并联合航空发动机企业、机床制造企业共同研究航空发动机叶轮、叶片数控磨削抛光工艺与机床, E-mail: ztchen@buaa.edu.cn。

(责编 阳光)