

航空发动机叶片精密自适应砂带磨削技术及试验研究*

蓝仁浩¹, 黄云², 陈贵林¹, 肖贵坚², 刘智武¹, 邹莱², 刘秀梅¹, 杨俊峰³

(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;

3. 重庆三磨海达磨床有限公司, 重庆 400021)

[摘要] 叶片的型面精度和表面完整性直接制约着航空发动机的工作性能及使用寿命。由于叶片具有薄壁易变形、材料难加工及砂带磨削柔性接触等特征而难以实现精密磨削, 由此提出了一种基于检测—加工一体化的自适应砂带磨削加工方法。首先根据叶片结构特点, 设计了边缘磨削工位磨头和圆角磨削工位磨头, 分别用于磨削叶片型面及进排气边缘、阻尼台及根部转角等部位; 其次基于模型重构的几何误差进行了自适应软件的研制; 最后通过双工位集成的七轴联动数控砂带磨削中心进行了叶片磨削试验。试验结果表明, 磨削后的叶片表面粗糙度 $R_a \leq 0.4 \mu\text{m}$, 加工误差保持在 $\pm 0.05\text{mm}$ 范围内, 叶片型面磨削加工周期仅为 3.5h, 满足叶片加工要求。因此, 自适应砂带磨削技术是实现叶片精密磨削加工的有效技术手段。

关键词: 航空发动机; 叶片; 砂带磨削; 自适应; 双工位集成; 七轴联动

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.15.016



蓝仁浩

研究员级高级工程师, 研究方向为航空发动机制造工艺, 享受陕西省“三秦人才津贴”, 荣获“2014年度中航工业发动机国际转包生产突出贡献个人”, 承担了国家及省部级项目 2 项, 获得省部级奖励 4 项, 发表论文 10 余篇。

航空发动机是飞机的核心, 叶片则是航空发动机最关键的零件之一。航空发动机中叶片种类和规格众多, 工作环境恶劣, 其加工精度决定着航空发动机的工作性能, 否则易导致航空发动机出现紊流、失速等现象, 严重时危及人身财产安全^[1]。目前航发叶片经过高精度铣削加工以后易出现残留高度相差较大、表面一致性差等缺陷, 所以必须采用磨削加工技术来提高其表面完整性^[2]。同时随着航空发动机推重比的不断提高, 叶片已从一元流技术向二元流、三元流技术发展, 具有叶片型面更复杂、厚度更薄、加工精度要求更高等特点。因此, 研究航发叶片的精密磨削技术、开发相应的磨削装备对于提

高航空发动机的质量意义重大^[3]。

美国 EXCELLO 公司、德国 METABO 公司等采用六轴五联动数控砂带磨床实现了叶片型面的精密加工, 同时美国 GE、加拿大 AV&R 等公司采用工业机器人夹持叶片或抛磨工具的方法实现了叶片型面的修复, 进一步提高了叶片的利用率^[4]。Axinte 等^[5]分别对砂带磨削和柔性柱状磨具磨削所形成的 Ti-6-4 耐高温钛合金表面完整性进行了研究, 对比分析了钛合金磨削表面纹理、亚表层组织和残余应力等表面完整性特性, 并获得了磨削以后的三维表面形貌。Ulutan 等^[6]对钛合金和高温镍基合金的加工表面完整性进行了综述分析, 提出需要进一步对

*基金项目: 国家自然科学基金(51705047); 国家科技重大专项项目(2014ZX04001031)。

面向试验结果一致性的基于物理模型的表面完整性预测模型进行研究,而该模型对于解释加工工艺参数对表面完整性的影响规律具有重要的影响。Jawahir 等^[7]对采用试验和理论的方法对材料去除过程的表面完整性进行了综述分析,提出表面完整性研究的最大挑战在于采用新型和先进的试验工具和技术来综合评估表面完整性,同时面向复杂零部件功能性表面参数优化的预测模型研究也是未来的主要方向。

段继豪等^[8]对柔性抛光工艺的磨削力和抛光编程及轨迹路径规划进行了研究,磨削后叶片精度 $\pm 0.06\text{mm}$,表面粗糙度小于 $0.4\ \mu\text{m}$;Zhao 等^[9]依据单因素试验结果优化磨削加工工艺参数、利用二次回归技术建立粗糙度预测模型,最后经试验验证采用优化后的工艺参数可以降低表面粗糙度值 25%;张雷等^[10]对航发叶片双曲面砂带磨削工艺、恒力磨削方法等进行了研究,提出了叶片双曲面砂带磨削力的精确控制方法;Xiao 等^[11]对航发叶片边缘当量自适应砂带磨削方法进行了研究,对砂带磨削以后的表面粗糙度进行了分析,结果表明叶片在砂带磨削以后表面粗糙度 $\leq 0.25\ \mu\text{m}$,且表面呈现压应力状态;蔺小军等^[12]提出了接触轮与叶片型面有效贴合的概念,设计了五轴联动柔性数控砂带抛光机,采用等参数线法进行轨迹规划并进行叶片型面的砂带磨削试验,磨削后叶片粗糙度可达 $0.25\sim 0.39\ \mu\text{m}$;Wang 等^[13]对等截面法提出了一种基于曲率的优化算法,使得叶片型面曲率较大处,加工点致密,曲率较小处,加工点稀疏,并通过试验验证了该算法的优越性;Song 等^[14]对机器人复杂曲面砂带磨削的材料精确控制方法进行了研究,建立了面向工作环境的自适应模型,最后通过试验验证了该方法的有效性。

本课题提出了一种基于检测 -

加工一体化的自适应砂带磨削加工方法,通过设计边缘磨削工位和圆角磨削工位,以及基于模型重构几何误差的自适应软件的研制等,完成了航发叶片的精密加工,彻底替代了手工修磨工艺,显著提高了航发叶片的加工精度、表面完整性及其一致性。

航发叶片全型面砂带磨削原理

1 叶片结构特点

本课题所使用的叶片为航发 TC4 钛合金风扇叶片,其结构如图 1 所示。该叶片由叶身和基体组成,叶身包括叶盆、叶背、进排气边缘和阻尼台等。叶片型面属于典型的空间复杂曲面,在磨削过程中极易造成干涉、过磨等现象,且叶身壁厚较小,在磨削过程中磨削力、磨削热极易造成叶片变形^[15-17]。

2 叶片全型面磨削原理

根据叶片结构特点和加工精度要求,在六轴联动的基础上通过增加主法线 N 轴实现磨削力的精确控制,其磨削原理如图 2 所示。叶片通过

专用夹具装夹在绕 X 轴回转 (A 轴) 的工作台上,通过 A 轴和 B 轴的回转,可使砂带磨削中心点的受力方向与磨头的支撑轴方向、磨削中心主法线方向一致,即主法线 N 轴与磨削中心点的受力方向一致,通过 N 轴运动来控制磨削深度。

基于以上原理,设计了一种带反馈的压力可调节的浮动砂带磨削装置(图 3),其工作原理为:该浮动装置在支撑板上部装有气缸,气缸的活塞杆通过导柱与微调滑动板连接,接触轮位于微调滑动板底部。砂带通过接触轮、惰轮、驱动轮而张紧。在导柱上活套有弹簧,该弹簧常处于压缩状态,其对活塞杆产生向上的压力能消除磨头自重的影响,使得在砂带磨削加工过程中接触轮的磨削压力保持稳定。

对于叶片根部转角、阻尼台等易干涉部位,采用六轴联动数控圆角磨削工位进行磨削,其结构如图 4 所示。

圆角磨削工位工作原理为:研

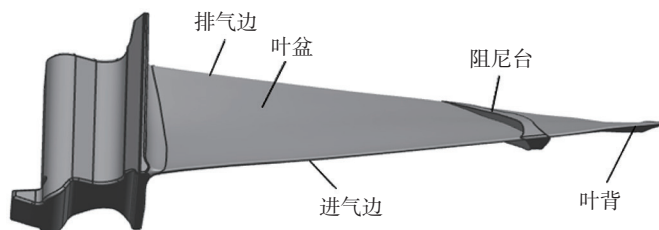


图1 航空发动机叶片
Fig.1 Aero-engine blade

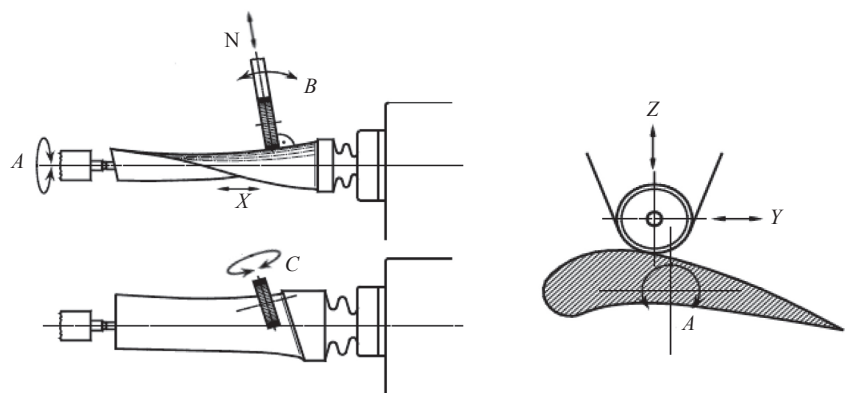
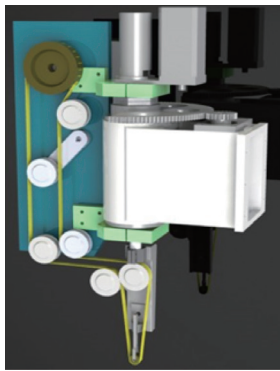
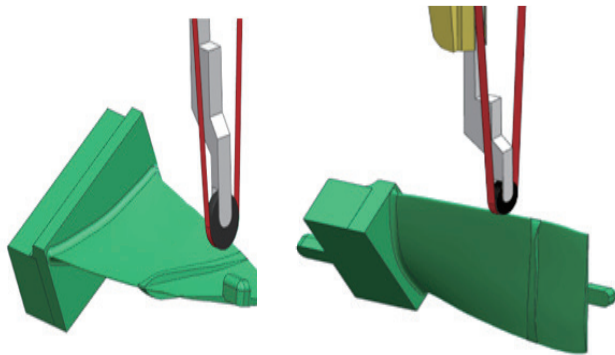


图2 叶片七轴联动砂带磨削示意图

Fig.2 Schematic diagram of seven axis linkage abrasive belt grinding



(a) 浮动砂带磨削装置



(b) 叶片型面、进排气边缘砂带磨削

图3 叶片型面、进排气边缘砂带磨削示意图

Fig.3 Schematic diagram of grinding process for blade profile and LTE

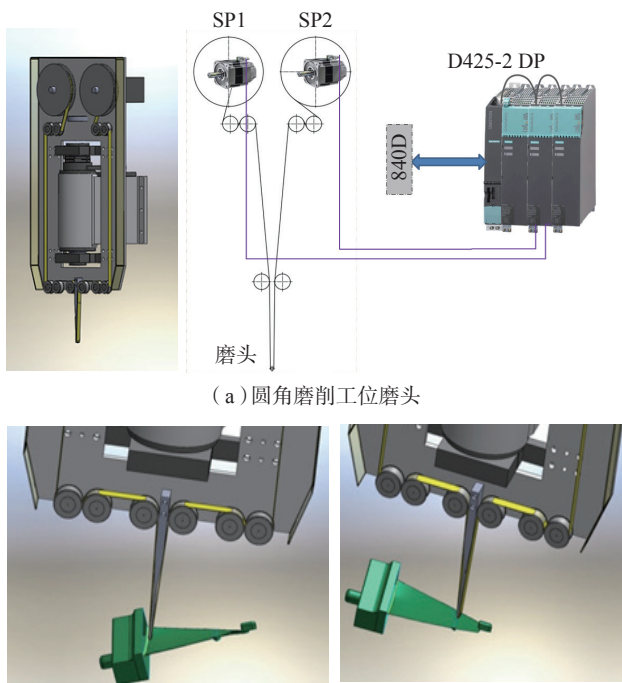
磨带通过接触轮、放卷轮、收卷轮等共同作用而张紧,由伺服电机 SP1 与 SP2 驱动控制产生一定线速度的磨削运动。在磨削加工过程中,收卷轮与放卷轮可以进行角色变换,从而使得研磨带以一定频率不断反复磨削,同时通过六轴联动的控制方式,采用超小直径耐磨损接触轮实现航发精锻叶片根部转角、阻尼台磨削。

叶片自适应砂带磨削技术

1 叶片自适应砂带磨削总体方案

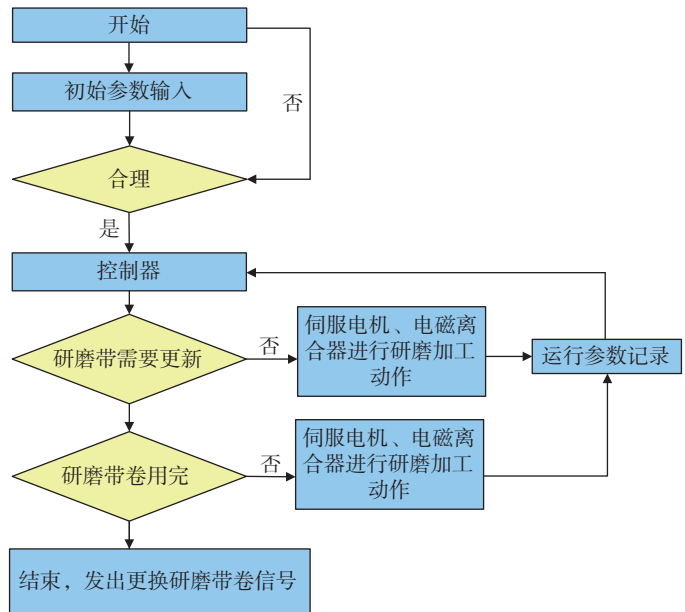
为了适应航发叶片柔性化、自动化高效精密磨削加工的需求,本课题采用专用快速工装机装夹叶片,经三坐标测量机对叶片型面及关键特征进行快速扫描并获取相关数据,在圆角磨削工位校准测量并精磨进排气直边,同时依据检测结果对根部转角、阻尼台进行自适应磨削,然后叶片型面、进排气边缘通过边缘磨削工位进行自适应砂带磨削。

磨削中心总体方案的关键装备,其结构如图 5 所示,分别包括边缘磨



(a) 圆角磨削工位磨头

(b) 根部转角、阻尼台砂带磨削



(c) 圆角磨削工位磨削装置控制原理图

图4 叶根、阻尼台等砂带磨削示意图

Fig.4 Schematic diagram of grinding process for blade root region and damping table

削工位、圆角磨削工位、磨削控制系统、在线检测装置、机械手及其控制系统等另外还有电气、液压、冷却、冲屑、过滤、冷却机、防护等部件。

2 双工位集成“十一轴”砂带磨削专用装备

结合双工位设计原理,航发叶片自适应砂带磨削中心的机床结构如图6所示。为满足叶片的高精度磨削加工要求,同时保证该设备具有足够的刚性,该机床磨头臂采用悬挂结构。采用机床动力学结合先进的有限元分析方法进行了整台机床的动力学建模、动态特性优化分析等设计,同时整台设备各运动轴导轨及滚珠丝杠均装有防尘装置,以确保其精度稳定可靠。

该机床的核心是双工位砂带磨削装置,由磨头座、驱动电机、张紧机构等组成。接触轮作为砂带磨削加工重要元件之一,可根据不同工作要求更换不同直径、宽度的接触轮,以

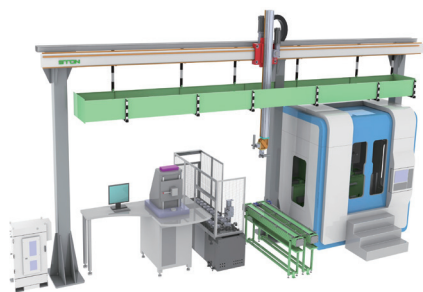


图5 叶片自适应砂带磨削中心设计图
Fig.5 Design map of self-adaptive abrasive belt grinding center for blade

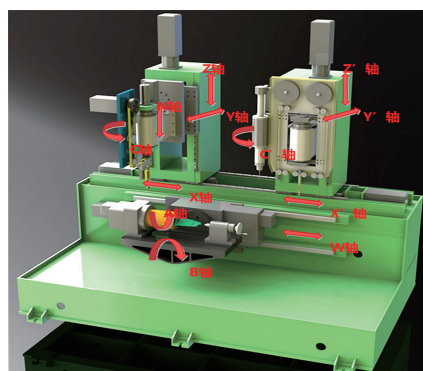


图6 自适应砂带磨削中心数控机床示意图
Fig.6 Schematic diagram of CNC machine for self-adaptive belt grinding center

避免发生干涉现象。接触轮套件采用快速卡扣式联结,以便于进行快速的更换。

3 基于重构曲面的几何误差计算方法 的自适应控制软件研制

根据任务的主要要求将自适应加工软件的模块做如下规划,主要涉及理论数据读取、检测数据读取、曲面拟合、误差分析、余量获取、加工工艺拟定、轨迹规划等模块,其流程如图7所示。

采用逆向工程技术得到的叶片模型受到工件装夹误差、模型定位精度误差及工人自身检测误差等因

素都会造成模型重构的误差。计算型面误差的方法为确定重构曲面上的某点与设计模型上沿法线方向的对应点之间的距离。利用等截面法截取叶片型面,其截交线可视为NURBS曲线,通过UG二次开发技术可查询曲线上任意一点的坐标。设 P_1 、 P_2 为某条截交线 L 上的两点, n_1 、 n_2 为曲面在 P_1 、 P_2 两点处的法线,如图8所示,由于 n_1 、 n_2 为空间矢量,因此为方便计算,可将其投影到同一平面内进行处理,由于 P_2 处于模型的凹点,因此其误差带有负号。

由于在UG中曲面的法线方向

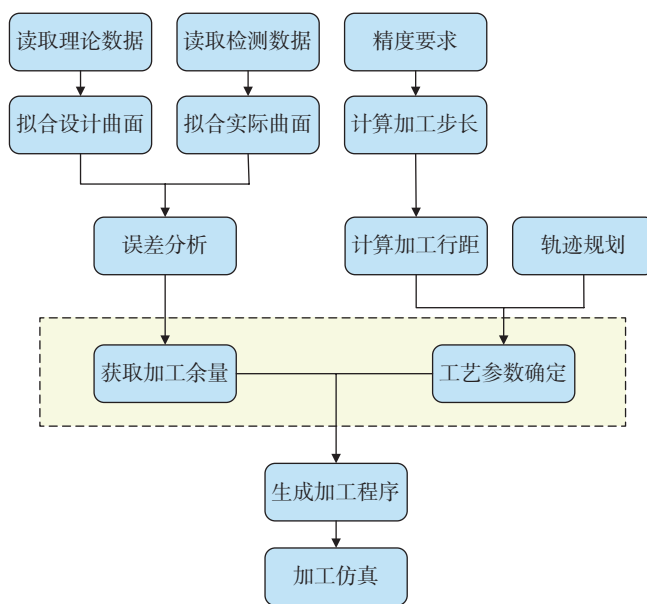


图7 软件研制总体方案流程图

Fig.7 General program flow chart of software development

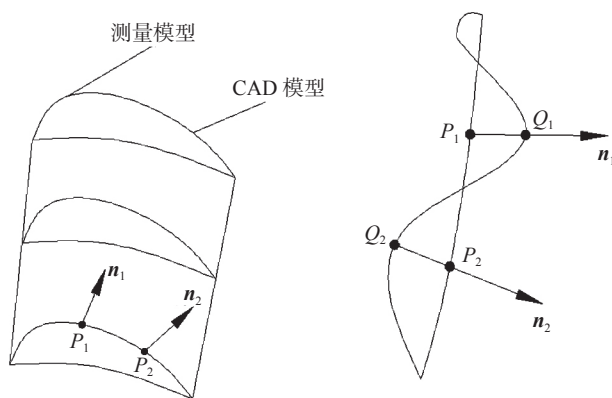


图8 叶片截面线及误差示意图

Fig.8 Cross section line and schematic diagram of error

指向曲面外部,所以规定误差的符号按如下方法进行计算:假定 P 是某条截交线上的一点, Q 是 P 沿基准面法线方向与测量面的交点, P 点的误差和法向量分别是 H 、 N , 建立如下矢量:

$$R = \overrightarrow{PQ} =$$

$$(X_Q - X_P)i + (Y_Q - Y_P)j + (Z_Q - Z_P)k$$

判断 R 和 N 的方向关系:

$$\begin{cases} RN \text{同向} \Rightarrow H = |PQ| \\ RN \text{反向} \Rightarrow H = -|PQ| \\ R = 0 \Rightarrow H = 0 \end{cases}$$

基于叶片型面重构的几何误差,建立如图 9 所示的砂带磨削几何偏差模型,解决了叶片存在的装夹误差、受力变形误差等多种误差状况下的精密磨削加工难题。

参照曲面啮合原理,针对复杂型面叶片弯掠特性,考虑参数化模型、工艺系统动态特性等因素,提出了面向难加工材料、复杂型面结构特征及高表面完整性的磨削路径优化策略,研发了面向叶片砂带磨削的七轴联动数控编程软件,如图 10 所示。

4 加工检测一体化智能集成技术

本方案采用成熟的磨削工艺与机床、在回转式储料仓中抓取叶片送入机床内,机械手、转臂中间延迟定位、分别自动气压夹紧、松开,按程序加工,结束后由机械手、转臂通过 X 、 Z 移动副,传送至检测站检测,自动检测带反馈信号,根据被加工零件检测结果判定是否进行补充加工等,若检测合格则由程序判定被加工零件的放置位置,并由电脑存储,送至各自输料仓。当储料仓零件数量少于 2 件时,发出放料信号,催促放件;当无件可取时,程序自动寻取输料仓中可补充加工件,同时根据被抓取件位置,读取该件信息,调取相应加工程序进行再加工。当储料仓、输料仓均无件可加工时,即发出 1min 急促信号后,转位应急灯闪,以减少噪音及

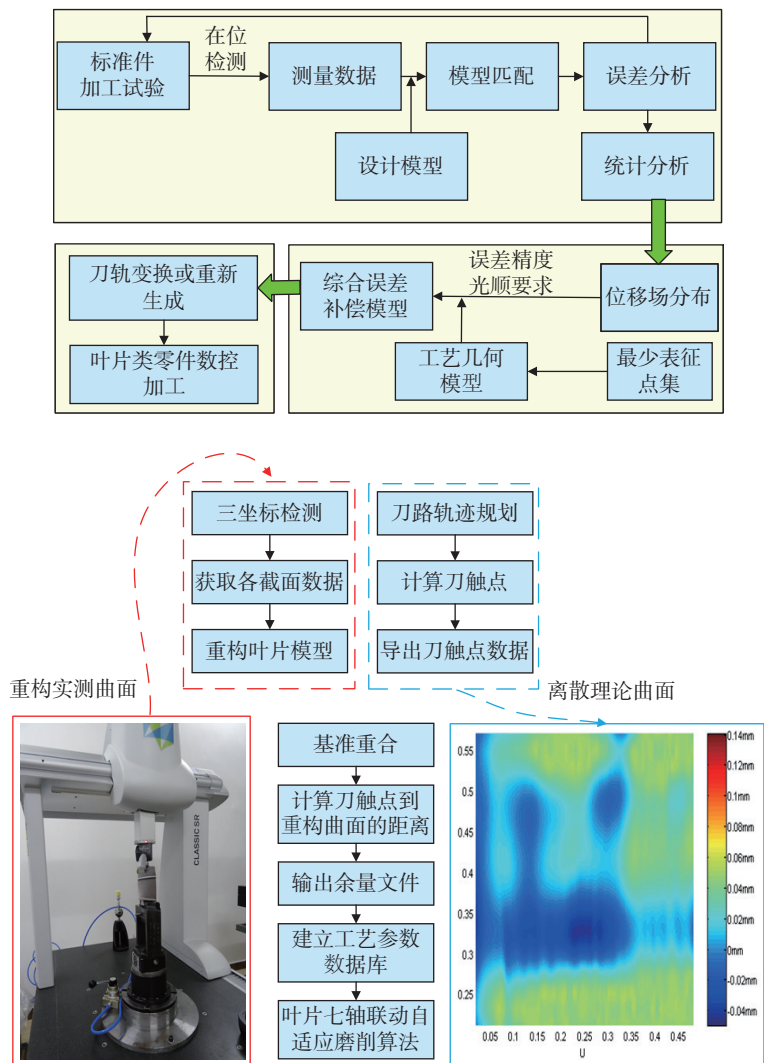


图9 砂带磨削几何偏差模型

Fig.9 Geometric deviation model of abrasive belt grinding

节能。

航发叶片磨削自动化生产硬件主要由 5 部分组成:三坐标测量机、上料仓、下料输送道、磨削机床和桁架机械手,各部分之间主要通过桁架机械手连接起来。三坐标测量机主要完成叶片磨削前加工余量的确定和磨削加工后是否合格的检测。上料仓主要储存毛坯、返修品。下料道分为两部分:合格品料道和废品料道,主要作用是卸载已合格工件和废品。磨削中心的作用主要是完成叶片加工。桁架机械手主要是将料仓的工件送去检测和加工,以及完成合

格品和废品的卸载。航发叶片砂带磨削加工与检测流程图如图 11 所示。

自适应砂带磨削技术试验研究

1 试验装备

本次试验是在重庆三磨海达磨床有限公司联合重庆大学、西航等共同研发的七轴联动数控砂带磨床(图 12)上进行的,试验主要仪器还包括海克斯康三坐标测量机、TR200 高精度粗糙度仪、Ogp 边缘投影仪等。

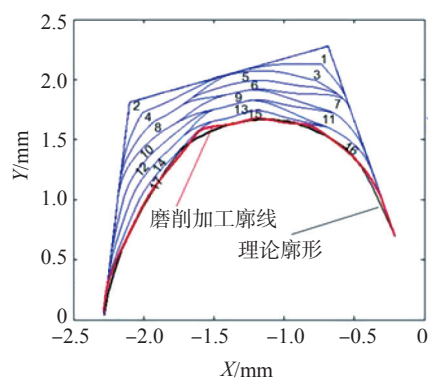
该设备主要技术指标:磨削线速度 10~40m/s;直线轴进给速度: X 、 Y 、 Z 为 0~10000mm/min;回转轴

进给速度: A 、 C 为 $0\sim 20\text{r/min}$, B 为 $0\sim 10\text{r/min}$; 控制/联动轴数为 7; 工作通道为 2。

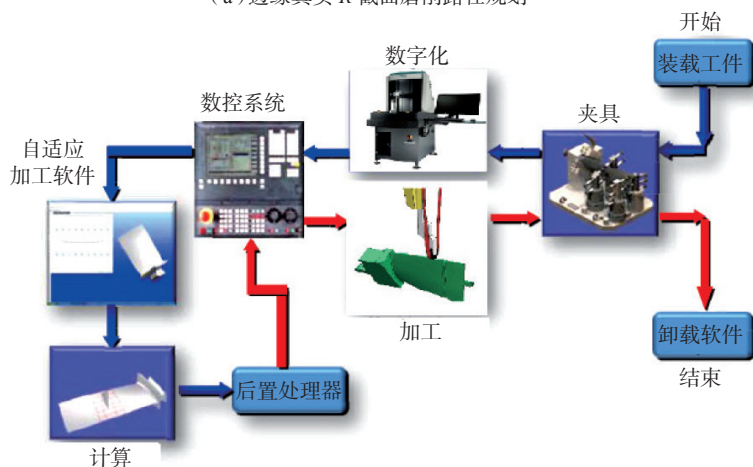
机床主要行程参数: X 轴行程 $\leq 800\text{mm}$; Y 轴行程 $\leq 1000\text{mm}$;

Z 轴行程 $\leq 300\text{mm}$; Z' 轴行程 $\leq 300\text{mm}$; A 轴摆角 $0^\circ\sim 360^\circ$; B 轴摆角: $-45^\circ\sim 45^\circ$; C 轴摆角: $-35^\circ\sim 35^\circ$ 。

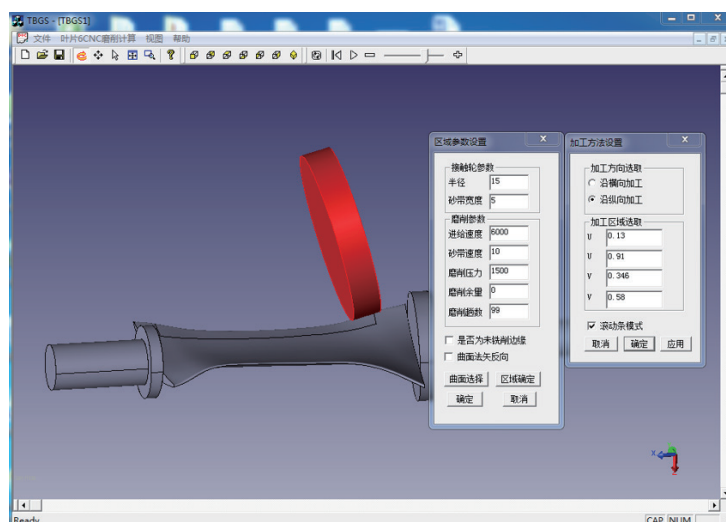
2 试验方案



(a) 边缘真实 R 截面磨削路径规划



(b) 七轴联动数控砂带磨削流程图



(c) 自适应软件界面

图10 自适应软件研制原理图

Fig.10 Principle map of self-adaptive software development

为避免砂带磨削加工过程中发生干涉现象,将叶片型面、进排气边缘进行区域划分,各磨削加工区域如图 13 所示。

根据钛合金材料砂带磨削特性,并经过多次试磨,确定砂带在磨削叶片型面时线速度为 12m/s ,在磨削进排气边缘时为 15m/s 。由于叶片各磨削区域铣削纹路及加工余量不同,因此确定工件进给速度如表 1 所示。

分别采用 P180 红色尼龙砂带、P240 蓝色尼龙砂带进行粗、精磨加工,精磨以后,对叶片型面进行三坐标检测,以检测其加工精度误差。

3 试验结果

图 14 为叶片型面磨削前后对比图,可以看出,叶片表面粗糙度得到了很大改善,测出其 R_a 值在 $0.4\mu\text{m}$ 以下,满足加工要求。采用三坐标测量机对三件叶片同一截面区域进行数据检测并与理论数据进行对比(图 15),检测结果表明叶片型面加工误差在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内,满足加工精度要求,同时整个磨削加工周期仅有 3.5h ,相较于手工磨削(约 45h)有了很大的降低。

图 16 为叶片进排气边缘磨削前后对比图,图 17 为通过 Ogp 边缘投影仪进行的叶片截面轮廓曲线形状检测,以检测叶片截面轮廓曲线形状是否符合要求及进排气边缘与叶身是否圆滑过渡,由图可知,叶片型面与进排气边缘圆滑过渡,符合工艺要求。

同理,对 3 件叶片进排气边缘同一截面区域进行数据检测并与理论数据进行对比(图 18),可以看出,3 件叶片检测结果较为相近,加工误差在 $\pm 0.05\text{mm}$ 范围内,达到了加工精度要求。

对叶片根部、阻尼台等采用研磨带磨削装置进行磨削加工,参考手工打磨的线速度,确定研磨带线速度为 20m/min ,图 19 为叶片根部磨削前后对比图。

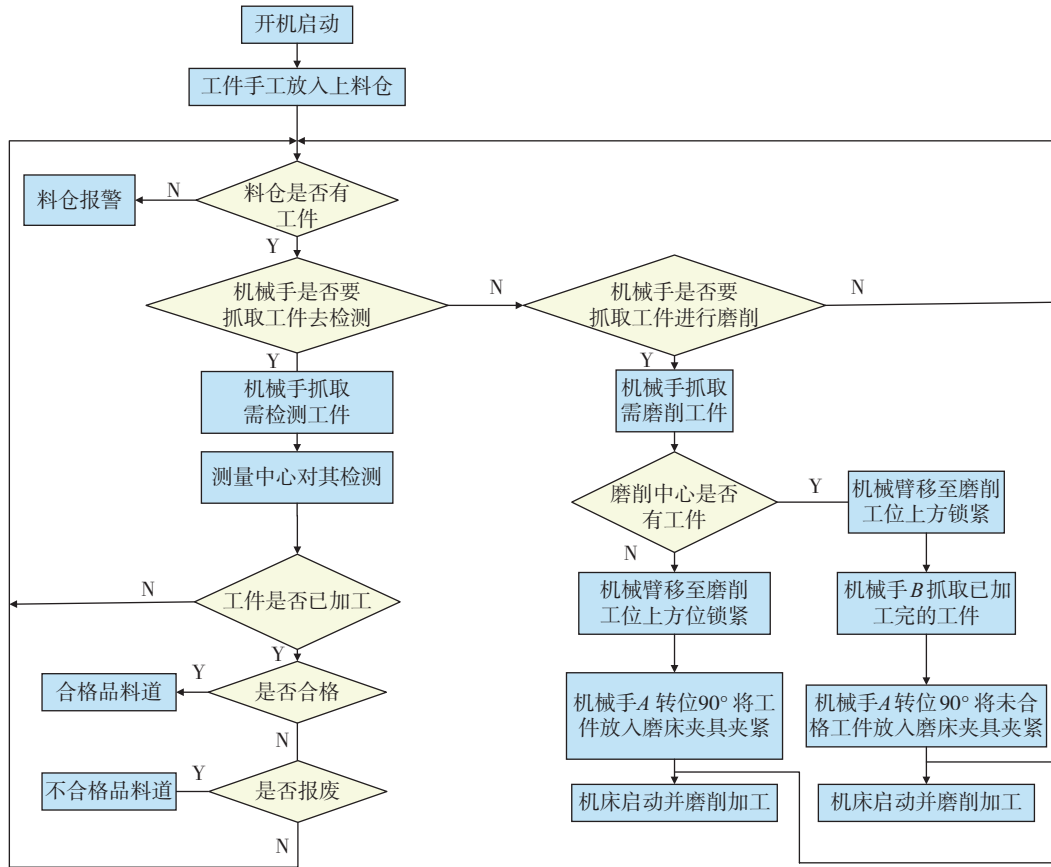


图11 航发叶片砂带磨削加工、检测流程图

Fig.11 Flow chart of abrasive belt grinding and detection of blade



图12 叶片七轴联动数控砂带磨床

Fig.12 Seven axis CNC abrasive belt grinding machine

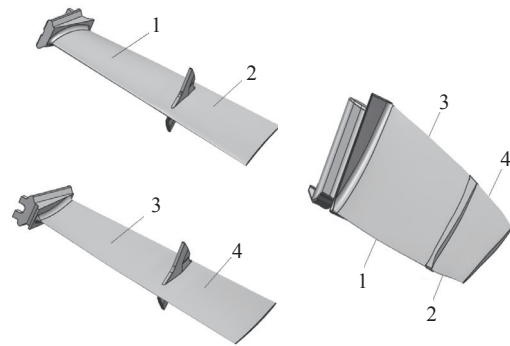


图13 叶片各磨削区域示意图

Fig.13 Sketch map of grinding areas of the blade

对叶片根部进行多点位粗糙度测量(图 20),由图可知,磨削后叶片表面 R_a 值约 $0.2 \mu\text{m}$ 左右,相较磨削加工之前有了很大降低,满足加工工艺要求。

表1 工件进给速度 mm/min

磨削区域	1	2	3	4
型面磨削时	1400	1000	1600	1000
进排气边缘磨削时	1600	1000	1600	1200

结论

(1) 根据航发叶片结构特点,设计了七轴联动数控边缘砂带磨削工

位和圆角磨削工位,分别用于磨削叶片型面及进排气边缘、阻尼台及根部转角等部位。

(2) 基于模型重构的几何误差计算方法,进行了自适应控制软件的研制,该软件可进行测量误差补偿,

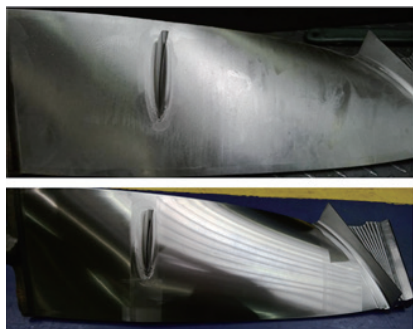


图14 叶片型面对比图

Fig.14 Blade surface contrast of grinding

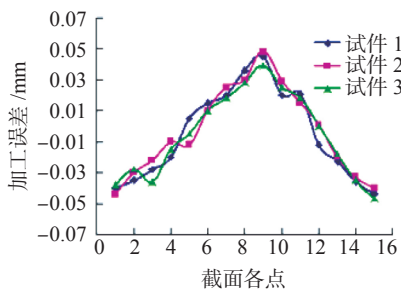


图15 叶片截面检测数据

Fig.15 Blade cross section detection data

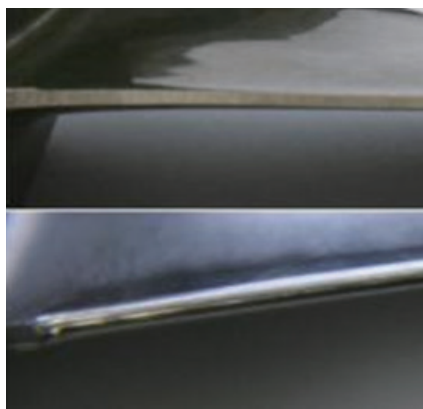


图16 叶片边缘对比图

Fig.16 Blade margins contrast of grinding



图17 叶片截面轮廓曲线形状检测

Fig.17 Shape detection of blades profile curve

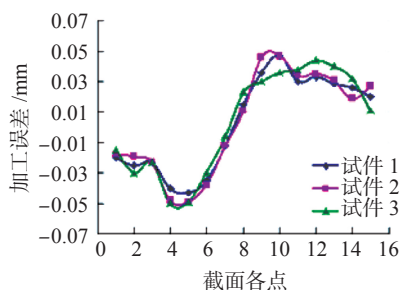


图18 叶片进排气边检测数据

Fig.18 Blade LTE detection data

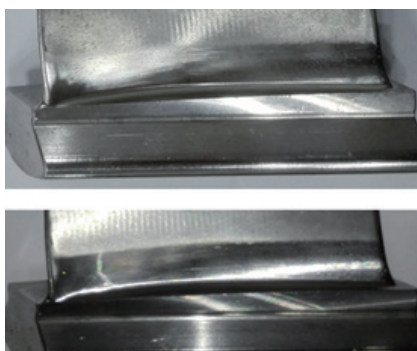


图19 叶片根部磨削对比图

Fig.19 Blade root contrast of grinding

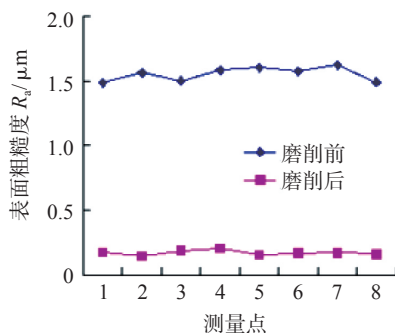


图20 叶根粗糙度值对比图

Fig.20 Root surface roughness contrast diagram

提高模型重构精度。

(3) 项目研制的自适应砂带磨削装备可完成长度为 20~700mm 发动机叶片的精密磨削, 表面粗糙度 $R_a \leq 0.4 \mu\text{m}$; 叶片型面轮廓度: 距排气缘 3mm 范围内 $\leq 0.05\text{mm}$; 叶根过渡平滑, 成功解决了航发叶片精密磨削难题。

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] 陈贵林, 赵春蓉. 航空发动机精锻叶片数字化生产线 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(22): 78-83.

CHEN Guilin, ZHAO Chunrong. Digital production line of precision forging aero-engine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(22): 78-83.

[3] XIAO G J, HUANG Y. Constant-load adaptive belt polishing of the weak-rigidity blisk blade[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9-12): 1473-1484.

[4] VOLKOV D I, KORYAZHKIN A A. Adaptive belt grinding of gas turbine blades[J]. Russian Engineering Research, 2014, 34(1): 37-40.

[5] AXINTE D A, KWONG J, KONG M C. Workpiece surface integrity of Ti-6-4 heat-resistant alloy when employing different polishing methods[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(4): 1843-1852.

[6] ULUTAN D, OZEL T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(3): 250-280.

[7] JAWAHIR I S, BRINKSMEIER E, MSAOUBI R, et al. Surface integrity in material removal processes: Recent advances[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(2): 603-626.

[8] 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.

DUAN Jihao, SHI Yaoyao, ZHANG Junfeng, et al. Flexible polishing technology for blade of aviation engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 573-578.

[9] ZHAO T, SHI Y Y, LIN X J, et al. Surface roughness prediction and parameters

optimization in grinding and polishing process for IBR of aero-engine[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(5): 653-663.

[10] 张雷, 周宛松, 卢磊. 抛光力实时控制策略研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 853-857.

ZHANG Lei, ZHOU Wansong, LU Lei. Research on real-time control strategies of polishing force[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(6): 853-857.

[11] XIAO G J, HUANG Y, WANG J. Path planning method for longitudinal micromarks on blisk root-fillet with belt grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(1-4): 797-810.

[12] 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.

[13] WANG W, YUN C. A path planning method for robotic belt surface grinding[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(4): 520-526.

[14] SONG Y X, LIANG W, YANG Y. A method for grinding removal control of a robot belt grinding system[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(5): 1903-1913.

[15] XIAO G J, HUANG Y. Equivalent self-adaptive belt grinding for the real-R edge of an aero-engine precision-forged blade [J]. The International Journal of Advanced

Manufacturing Technology, 2016, 83(9-12): 1697-1706.

[16] 房建国, 马艳玲, 李迪, 等. 发动机叶片椭圆进排气边智能磨削加工检测一体化技术[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(6): 1-6, 12.

FANG Jianguo, MA Yanling, LI Di, et al. Intelligent method of machining-measuring integration for aero-engine elliptical blade-edges[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 52(6): 1-6, 12.

[17] XIAO G J, HUANG Y, YIN J C. An integrated polishing method for compressor blade surfaces [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 88(5-8): 1723-1733.

通讯作者: 蓝仁浩, E-mail: Lanrenhao@xaec.com。

Self-Adaptive Belt Grinding Technology and Its Experimental Research on Aero-Engine Blade

LAN Renhao¹, HUANG Yun², CEHN Guilin¹, XIAO Guijian², LIU Zhiwu¹, ZOU Lai²,
LIU Xiumei¹, YANG Junfeng³

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

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

3. Chongqing Samhida Grinding Machine Co., Ltd., Chongqing 400021, China)

[ABSTRACT] The profile accuracy and surface integrity of blades directly restrict the performance and service life of the aero-engine. Because of the characteristics of thin-wall deformation and difficult material processing and flexible contact, it is difficult to achieve a precision grinding. Therefore, a self-adaptive abrasive belt grinding method based on the integration of deflection and machining was proposed. Firstly, according to the characteristics of the blade structure, the edge grinding and round angle grinding devices were designed, which were used to grinding the blade surface and LTE(the leading and the trailing edges), the damping table and the root corner. Secondly, self-adaptive software was developed based on geometric error of model reconstruction. Finally, the blade grinding test was carried out through the double position integrated seven axis CNC grinding center. The results show that the surface roughness of the blade is less than 0.4 μ m, the machining error is kept within the range of 0.05mm, and the grinding period is only 3.5h, which satisfies the processing requirements of the blade. Therefore, the self-adaptive abrasive belt grinding technology is an effective method for precision grinding of blades.

Keywords: Aero-engine; Blade; Belt grinding; Self-adaptive; Two grinding position; Linkage with seven-axis

(责编 海山)