

整体叶盘数控抛光工艺及工艺装备技术研究

Research on the CNC Polishing Process and Process Equipment Technology of Blisk

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室

史耀耀 张军锋 李小彪 段继豪



史耀耀

西北工业大学机电学院教授、博士生导师。主要从事机电控制及自动化、专用数控工艺装备、高速高效数控加工、加工表面光整技术等方面的研究工作。主持和参加各类科研项目 20 余项,发表学术论文 30 余篇,获国家发明专利 3 项,获国家、省部级奖励 5 项,入选“2006 年度中国高等学校十大科技进展”。

整体叶盘是新一代航空发动机实现结构创新与技术跨越的核心部件,它的应用是提高发动机性能、简化结构、降低重量、减少故障率、提高耐久性与可靠性的重要举措^[1]。近

近年来,国内相关行业突破了整体叶盘制造过程中的高效开槽工艺、无干涉刀位计算和精密加工变形控制等关键技术,实现了整体叶盘高效精密加工。

年来,国内相关行业突破了整体叶盘制造过程中的高效开槽工艺、无干涉刀位计算和精密加工变形控制等关键技术,实现了整体叶盘高效精密加工。

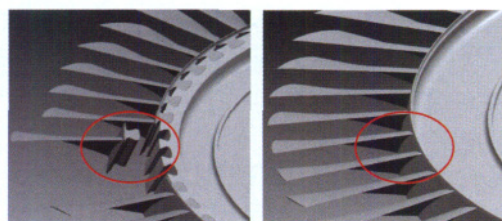
然而,整体叶盘叶片型面为自由曲面,若用球头铣刀进行行切加工,必然形成波峰波谷,且由于刀具在行切平面内运动,运动轨迹曲线曲率不同和定位等原因,也会导致行间的残留高度相差较大^[2]。这对发动机性能和寿命有直接影响,甚至会降低其性能和寿命^[3]。所以整体叶盘在铣削加工后叶片表面必须进行光整加工,以降低表面粗糙度,平滑转接过程,提高表面质量、增强其疲劳强度和延长使用寿命。

整体叶盘抛光工艺特性分析

1 结构特性

与传统装配结构相比,整体叶盘将叶片和轮盘设计成一个整体,省去了榫头、榫槽和锁紧装置,如图 1,避免了榫头气流损失、减少了结构重量和零件数量;在气动布局上采用了宽弦、弯掠叶片和窄流道,从而提高了气动效率^[4]。然而,这也同时造成了整体叶盘结构复杂和加工抛光困难^[5]等问题,主要表现在以下几点:

(1) 盘体的外形和叶片外廓为锥面,余量分布不均匀,通道深而窄,开敞性小,磨具可达性差,与叶片发生干涉可能性大。另外,磨具与叶片



(a)传统装配结构 (b)整体叶盘结构

图1 传统装配结构与整体叶盘结构

表面为线-面接触,使磨具的运动轨迹难以计算;

(2) 叶盘叶片薄、弯扭大、叶展长、刚性差,受力变形大,让刀现象严重,易产生“过抛”或“欠抛”现象;

(3) 由于复杂型面的计算误差、加工磨具误差、夹具误差、机床精度及受切削力影响而产生的变形等原因,叶片型面必然存在加工误差,这也会导致“过抛”或“欠抛”现象;

(4) 整体叶盘叶片进排气边非常薄,最小处约为0.2mm,且有一定的形状轮廓要求,受到外力作用时,极易磨损或崩刃;

(5) 由于用球头铣刀加工的叶片型面存在不均匀的波峰波谷,易产生磨具振动,使抛光表面的光洁度难以满足要求。

2 材料特性

整体叶盘一般采用钛合金、高温合金等难加工材料,该类材料因具有密度小、强度高、耐热性好等特点而被广泛应用,但也有如下缺点^[6]。

(1) 可加工性差。抛光时消耗于塑性变形的能量大,所需抛光力比抛光普通材料大得多。加工硬化现象严重,磨削时工件上的加工硬化一般随横向进给量的增大而增大;

(2) 易发生黏附磨损和扩散磨损。磨削钛合金等材料时,磨粒与工件间易产生严重的黏附磨损,表面黏附的切屑将磨粒间的气孔堵塞,使其磨削力减小,造成磨具磨损加剧。另外,在高温磨削作用下,工件材料与磨粒元素间相互扩散,导致磨粒表层弱化,可能产生扩散磨损;

(3) 加工温度高。由于导热性差,

磨削时产生的大量磨削热很难向材料内部传导,致使抛光区温度高,甚至在工件表面出现烧伤、裂纹等质量问题。

3 抛光工艺分析

目前,国内外针对复杂自由曲面类零件,涌现

出了磨粒流抛光、机械振动抛光和人工抛光等方法^[7]。虽然上述方法较好地应用于不同领域,也取得了明显的效果,但对于抛光整体叶盘还存在如下不足:

(1) 磨粒流抛光中的压力较大,极易引起整体叶盘叶片变形及厚薄不均^[8],另外由于抛光时沿型腔方向上进出口处压力较大,叶片的进排气边容易损伤,从而改变整体叶盘的气动性能;

(2) 机械振动抛光改善波纹度能力有限,叶片叶根与轮盘外表面的转接圆弧上的铣刀痕迹去除不明显^[9],此外振动抛光也易损伤进排气边;

(3) 人工抛光过程去除量不均匀,叶片的波纹度和截面形状精度难以控制,使叶片一致性差,另外劳动强度大,效率低,制造周期长。

基于上述分析,本文提出多轴数控自适应机械抛光方法,并对其机械结构和控制方式进行设计,以实现整体叶盘表面柔性自动化抛光。

机床总体方案及关键零部件设计

1 机床设计要求

由于整体叶盘构件的复杂性和特殊性,为满足抛光工艺要求,在经济合理的条件下,应尽量简化传动系统,以提高加工效率和传动精度。设计要求如下:

(1) 多轴联动。复杂自由曲面的加工需要五轴以上坐标联动才能实现。随着加工技术和数控编程算法日臻成熟,多轴联动在大量提高材

料去除率的同时,还能有效地避免刀具干涉等现象^[10];

(2) 高精度。整体叶盘对表面几何参数的严格要求决定了数控抛光系统需要的高精度。并且当加工精度达到微米级及其以下时,机床变成了柔性体,为此机床结构刚性、伺服进给系统及控制系统精度等都应严格控制优化;

(3) 自动化程度高。在精加工过程中,高的自动化程度可以大大降低外界对抛光的干扰,同时为降低生产成本,提高加工效率提供保障。

2 机床总体方案

数控抛光机结构形式的确定与加工工件的尺寸密切相关。国内目前航空发动机所使用的整体叶盘,最大直径为1000mm,最大厚度为200mm。较大的工件尺寸对机床的刚度提出了要求,龙门式结构有极好的对称性和极佳的刚性,精度容易保证^[11],故选择龙门式结构。

五轴联动可以使复杂自由曲面加工达到理想的切削状态,为实现整体叶盘的表面抛光奠定了基础。五轴联动机床的两个回转坐标轴采用抛光磨具执行一个回转坐标运动、工作台执行另一个回转坐标运动的形式,结构相对最简单,机构刚性相对较高^[12],承载能力、加工范围和加工空间也能满足整体叶盘的抛光要求。

综上所述,结合整体叶盘的抛光工艺要求、整体叶盘的结构尺寸特点和机床的设计要求,采用龙门式五轴联动的驱动控制形式来保证整体叶盘的抛光精度。

在对整体叶盘进行抛光时,为了保证柔性磨头以最佳刀轴矢量接触整体叶盘且不会发生磨具干涉,柔性磨头执行机构采用了3个移动坐标X、Y、Z和2个旋转坐标A、C共计5个自由度。5个轴的具体设置为:将整体叶盘装夹在分度盘上,分度盘可以带动整体叶盘绕Z轴转动;分度盘装夹在T型槽上,Y轴伺服电机带

动T型槽沿Y轴运动,实现Y轴的直线自由度。整个Z轴安装在X轴方向的导轨上,由X伺服电机实现X轴的直线运动,Z轴伺服电机则带动柔性磨头机构实现Z轴的直线运动;另外柔性磨头执行机构可以绕X轴摆动。以上坐标设置,适应了整体叶盘结构特点,实现了复杂自由曲面整体叶盘表面柔性抛光。

3 关键零部件设计

(1) 直线导轨。导轨作为数控机床的重要部件之一,它在很大程度上决定了数控机床的刚度、精度和稳定性。滚柱式直线导轨副的刚性更高、承载能力更强、摩擦系数及磨损量更小、额定寿命更高,有利于实现机床运动的高精度、高速化及高寿命。滚柱式直线滚动导轨具有如下特点:定位精度高、可实现无间隙轻快地高速运动、可长期维持设备的高精度、所有方向都具有高的刚性和大的容许负荷,为了保证机床运动部件运动的准确性和稳定性,决定采用滚柱式直线滚动导轨。

(2) 滚珠丝杠副。滚珠丝杠副将旋转运动变为直线运动,使其作为数控机床直线驱动执行单元,在机床行业得到广泛应用。为确保该数控抛光机床的高速化、高精度和顺畅性,选用传动效率高、定位精度高、传动可逆性、使用寿命长和同步性能好的内循环垫片预紧螺母式滚珠丝杠。

(3) 柔性磨头。柔性磨头是实现整体叶盘表面抛光的关键机构,其结构如图2所示。

柔性磨头由4个气缸(1个轴向气缸和3个径向气缸)和4个传感器(1个轴向传感器和3个径向传感器)构成了压力控制系统,以实现抛光磨具与工件间压力数据的采集、传送及调节。电主轴7是为抛光磨具提供高转速的动力装置,以实现整体叶盘精密抛光。其中3个气缸通过气缸座安装于电主轴套5上,用来调节径向的压力,轴向气缸安装于抛光机构的顶部,用来调节轴向的压力。轴向传感器置于电主轴的轴套的顶部,可以检测到电主轴轴向所

受的力,3个径向传感器分别置于3个径向气缸的对面,可以检测电主轴径向所受的3个力。

数控抛光机总体控制方案设计

由于整体叶盘叶片比较薄,能够承受的抛光力较小,在进行抛光处理时,磨具与整体叶盘间的接触压力将直接影响抛光的精度及效果,因此合理设计抛光力的控制方案十分重要。

结合对抛光力的控制要求,整体叶盘数控抛光机控制系统主要由工业控制计算机、数控系统、伺服控制系统、I/O接口模块和输入输出设备等组成,如图3所示。伺服控制系统主要实现5个坐标轴的运动,该机床的3个移动轴、1个转动轴和1个摆动轴的运动是由伺服电机的驱动实现的,电机又由相应的伺服驱动器驱动。

I/O接口模块通过机床面板的输入输出,对液压系统、润滑系统进行控制。工业控制计算机主要实现对

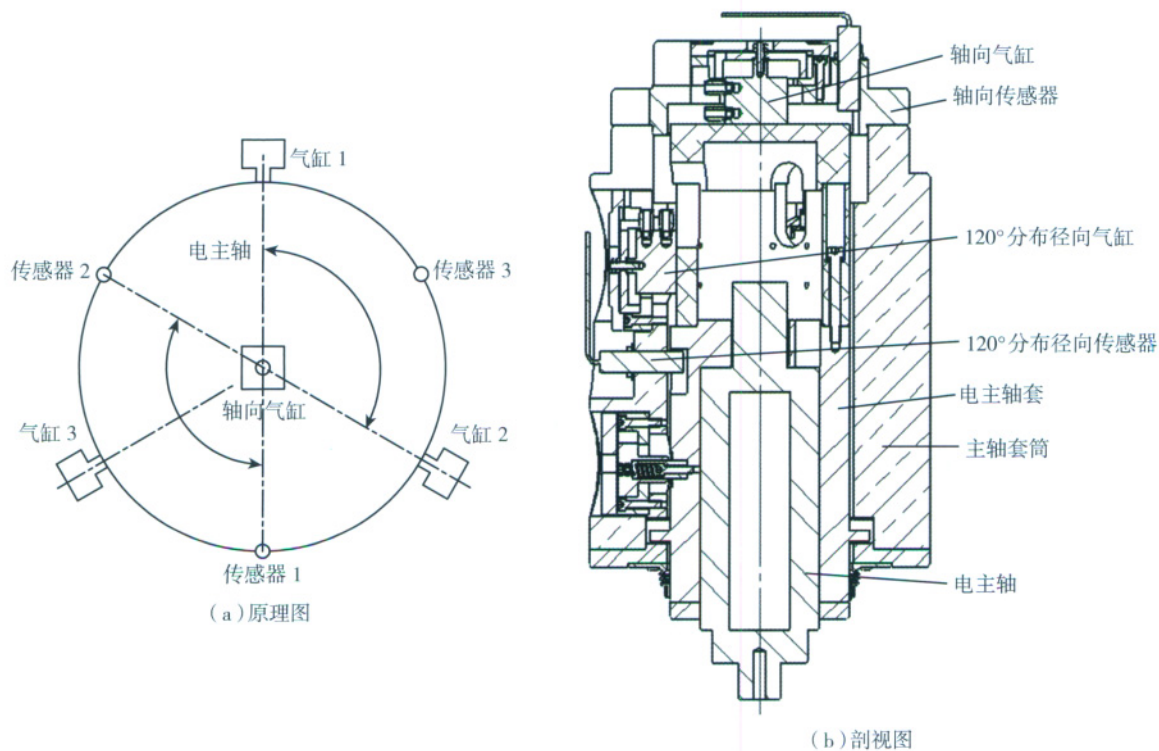


图2 柔性磨头结构示意图

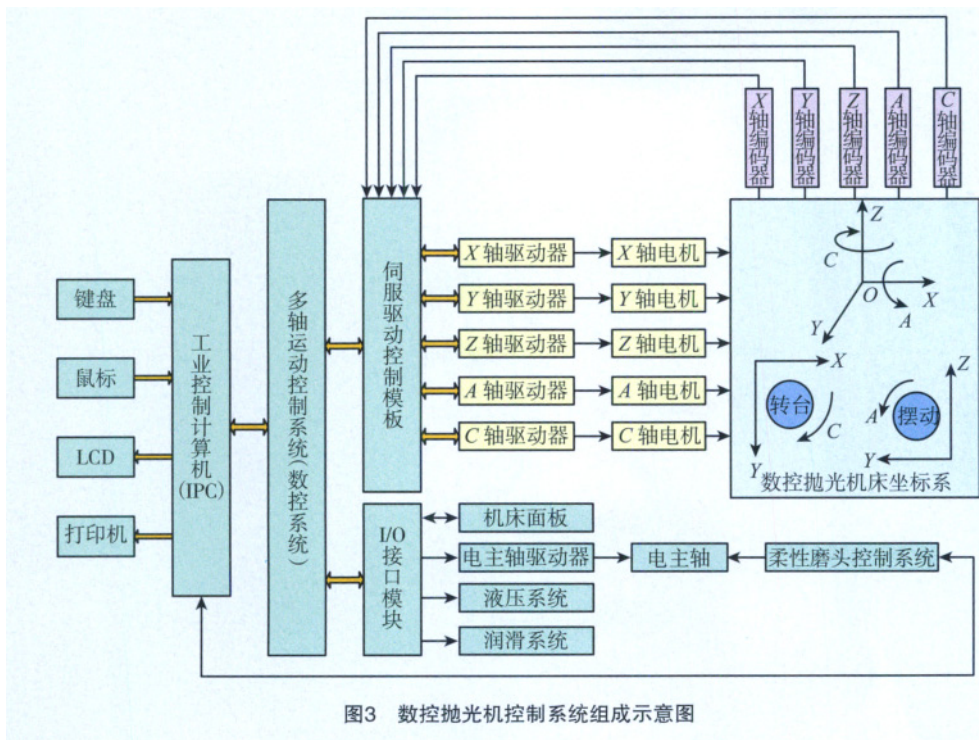


图3 数控抛光机控制系统组成示意图

方法,成功研制出了整体叶盘数控抛光工艺装备。经试验验证,整体叶盘数控抛光机满足复杂自由曲面类零件表面抛光质量要求,特别是解决了叶片类零件进排气边抛光难题,实现了抛光过程的自动化,大大减轻了劳动强度,提高了生产效率。

参考文献

[1] 黄春峰. 航空发动机整体叶盘结构及发展趋势. 现代零部件, 2005, 04: 96-101.
 [2] 邓劲莲, 曹焕亚. 基于Cimatron的复杂曲面数控加工研究. 制造技术与机床, 2006, 11: 74-78.
 [3] 刘艳. 叶片制造技术. 北京: 科学出版社, 2002.

北京: 科学出版社, 2002.

[4] 任军学, 张定华, 王增强, 等. 整体叶盘数控加工技术研究. 航空学报, 2004, 25(2): 205-208.

[5] 王文理, 王焱, 王君, 等. 航空发动机钛合金焊接式整体叶盘数控铣削工艺及编程技术. 航空制造技术, 2009(25): 100-102.

[6] 邓朝晖, 万林林, 张荣辉, 等. 难加工材料高效精密磨削技术研究进展. 中国机械工程, 2008, 19(24): 3018-3023.

[7] Zhong Z W. Recent advances in polishing of advanced materials. Materials and Manufacturing Processes, 2008(23): 449-456.

[8] 修树东, 倪忠进, 陈茂军. 化学机械抛光的研究进展. 机械研究与应用, 2008, 12: 10-13.

[9] 刘建, 吴伟东. 整体叶盘叶片光饰抛光试验及发展应用探析. 航空制造技术, 2010, 5: 84-86.

[10] Bohez E L J. Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002(42): 505-520.

[11] Teo C S, Tan K K, Lim S Y, etc. Dynamic modeling and adaptive control of a H-type gantry stage. Mechatronics, 2007(17): 361-367.

[12] 张政泼, 覃学东. 五轴联动机床的结构性能分析与设计探讨. 装备制造技术, 2009, 10: 5-8, 11.

(责编 侧卫)

柔性磨头的自适应控制,使柔性磨头的精确运动得到保证,实现了自适应跟踪及保持恒定抛光力的目的。

整体叶盘数控抛光试验

图4为我们利用五轴联动数控抛光机床对某型号航空发动机整体叶盘进行抛光试验的试验现场,图5为数控抛光后的整体叶盘,并就抛光后整体叶盘的表面质量进行了测试,其测试结果如表1所示。由此可以看出,抛光后的整体叶盘表面质量得到明显改善,叶片的形状、位置尺寸保持良好,叶型波纹度和表面粗糙度明显降低,进排气边没有损伤,也没有烧伤和腐蚀现象的产生,抛光效率

也大大提高。

结束语

本文围绕整体叶盘抛光工艺问题,在对整体叶盘的结构特性、材料特性深入研究的基础上,对国内外常见的复杂自由曲面抛光方法进行分析,确定了整体叶盘的自动化抛光方法。在此基础上,采用功能强大的数控系统、先进的机械装置和控制

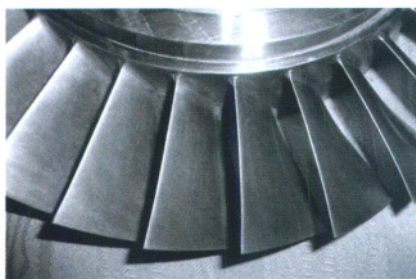


图5 数控抛光后的整体叶盘

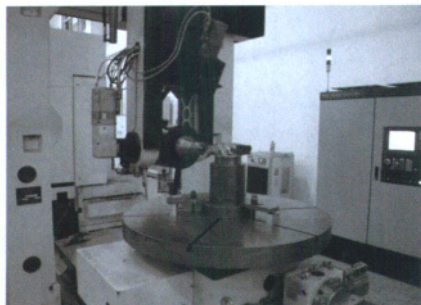


图4 整体叶盘数控抛光试验现场

表1 整体叶盘抛光质量前后对比

| | 波纹度/mm | 平均误差/mm | 表面粗糙度(R _a)/μm | 内应力 |
|-----|--------|---------|---------------------------|-----|
| 抛光前 | 0.04 | ±0.1 | 1.6 | 大 |
| 抛光后 | <0.01 | <0.07 | 0.4 | 小 |