

整体叶盘叶片自动化抛光颤振抑制技术

李小彪, 谷雪花, 徐 欣

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

[摘要] 基于研制的自动化抛光系统, 针对整体叶盘叶片抛光加工的颤振问题, 分析了颤振后叶片表面的几何形貌。结合整体叶盘叶片自动化抛光系统, 阐述了抛光颤振机理。基于颤振机理确定了编程技术优化、抛光参数优化、提高系统刚性等 3 种抛光颤振抑制技术, 获得了优化后的刀轴方向、抛光轨迹、抛光参数及工艺填充方法。经试验验证, 颤振现象, 叶片波纹度、平均误差、表面粗糙度等减小, 表面质量得到较大提升, 颤振痕迹明显消除。

关键词: 整体叶盘; 叶片; 抛光; 颤振

Flutter Suppression Technology on Automated Polishing of Blisk Blades

LI Xiaobiao, GU Xuehua, XU Xin

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

[ABSTRACT] Based on automated polishing machine of blisk, the geometric surface of fluttered blade was analysed. Combined with the automated polishing system of blisk blade, the flutter mechanism was described. Based on the flutter mechanism, the optimized programming technology, polishing parameters and improving system rigidity were determined to solve the flutter problem. The optimized tool axis direction, polishing track, polishing parameters and filling method were obtained. After experimental verification, the flutter is solved. And the waviness average error tends to decrease, surface quality is improved greatly. The chatter marks are eliminated obviously.

Keywords: Blisk; Blade; Polishing; Flutter

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.08.056

整体叶盘是将叶片和轮盘设计为整体的新型结构件, 由于减轻了零件重量、降低了气体性能损失, 因而对于提升航空发动机性能具有重要作用, 是提升航空发动机性能的新型结构件^[1-3]。为提高整体叶盘叶片的型面质量, 保证整体叶盘在高温、高压、高转速等工况下的性能, 精加工后必须对叶片型面进行抛光^[4-6]。然而, 整体叶盘叶片属于典型的悬臂梁结构, 叶身薄, 抛光时极易发生颤振现象, 造成抛光工具磨损严重、叶片型面出现鱼鳞状波纹^[7-8]。这种波纹的方向与抛光轨迹的方向大致垂直, 波纹长度短浅不一, 间距较大, 目视即可观察到, 部分区域的波纹度甚至比抛光前还要大。

目前针对整体叶盘叶片抛光颤振的相关文献鲜见。本文基于整体叶盘叶片抛光的颤振问题, 以整体叶盘自动化抛光机为平台, 剖析颤振机理, 阐述颤振抑制技术, 经过验证, 抑制技术解决颤振引起的叶片表面质量缺陷, 实现整体叶盘叶片的高质量自动化抛光。

1 自动化抛光系统及颤振机理

自动化抛光过程中, 磨头与工件之间发生的颤振现

象属于典型的自激振动^[9]。如图 1 所示, 抛光加工时, 抛光力与磨头、工件间的相对位移会存在动态交互作用, 这成为了颤振现象发生的根源。首先, 磨头抛光整体叶盘叶片时, 抛光力会造成磨头、工件发生弹性变形; 随后, 磨头的磨齿离开整体叶盘叶片表面, 抛光力释放, 磨头和叶片间发生微小的振动, 叶片表面出现细微的波纹; 最后, 在工艺参数理想、抛光系统不受干扰的条件下, 相邻两次抛光所形成的波纹相位一致, 叶片表面余量被均匀地切除, 如图 2 (a) 所示, 颤振现象不会发生。事实上, 自动化抛光系统的振动频率与磨齿的加工频率不完全一致, 抛光力反馈系统存在延时性, 造成抛光产生的振动波纹相位并不一致, 如图 2 (b)、(c) 中所示。

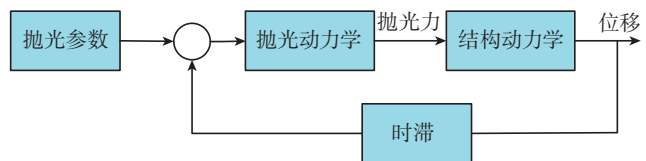


图1 抛光颤振闭环系统

Fig.1 Closed-loop system of polishing flutter

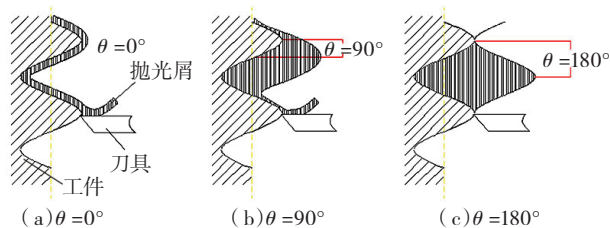


图2 磨头、工件之间相对位置的变化

Fig.2 Change between the grinding and workpiece

叶片表面的振动波纹增加了后续瞬间的抛光余量,抛光力随之增大,抛光力的变化又会引起振纹的增大,最终导致颤振现象的发生。剧烈再生颤振会造成叶片表面粗糙度差、抛光精度降低、磨头磨损加剧,对保证整体叶盘叶片的型面质量极为不利^[10-11]。

2 抛光颤振抑制技术

在有限元分析与测力分析的基础上,可采用编程技术优化、抛光参数优化、提高系统刚性3种方法来解决整体叶盘叶片抛光颤振问题。

2.1 编程技术优化

整体叶盘叶片抛光编程需重点确认刀轴方向及抛光轨迹^[12]。刀轴方向通常按最佳磨头轴向准则计算,受通道多约束的影响,计算的刀轴方向会产生不连续的变化,造成自动化抛光系统工作台或主轴的转动发生变化,导致抛光力产生突变,引起更大的振动位移,如此循环引起抛光颤振现象的发生。需要在确定刀轴方向初始矢量的基础上进行光滑处理,如图3所示。

整体叶盘抛光时通常有单行切法和双面环切法两种刀具轨迹。单面行切法是抛光完叶片一侧型面之后,再加工另一侧型面;而双面环切法的工艺特征是同步均匀抛光叶片的叶盆、叶背两侧型面。

在如图4所示的试验模拟件上进行试验,经检测,采用单面行切抛光轨迹的零件实测最大变形量达到0.16mm,而采用双面行切抛光轨迹的零件实测最大变形量仅为0.01mm。较小的变形量降低了系统振动频率与磨轮齿切入/切出频率之间不相匹配的可能性,减小了

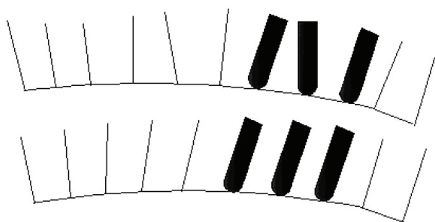


图3 光顺前后刀轴方向的对比

Fig.3 Cutter axis orientations before and after smoothing



图4 整体叶盘叶片试件

Fig.4 Specimen of blisk blade

颤振现象的发生。

2.2 抛光参数优化

抛光参数主要包括磨头磨料粒度、主轴转速、进给量。磨头磨料粒度有120#、150#、200#、240#4种,分别记为 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 ;主轴转速选择10000r/min、12000r/min、15000r/min、18000r/min,分别记为 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 ;进给量以0.01mm、0.03mm、0.05mm、0.08mm为研究对象,分别记为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 4种。共有64种排列组合,如表1所示。

对64种情况进行叶片抛光试验,并对抛光后叶片表面粗糙度、波纹度、平均误差、内应力进行测量。经比

表1 整体叶盘叶片抛光试验组别

| 磨头磨料粒度 | v_1 | v_2 | v_3 | v_4 |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| p_1 | a_1 | a_1 | a_1 | a_1 |
| | a_2 | a_2 | a_2 | a_2 |
| | a_3 | a_3 | a_3 | a_3 |
| | a_4 | a_4 | a_4 | a_4 |
| p_2 | a_1 | a_1 | a_1 | a_1 |
| | a_2 | a_2 | a_2 | a_2 |
| | a_3 | a_3 | a_3 | a_3 |
| | a_4 | a_4 | a_4 | a_4 |
| p_3 | a_1 | a_1 | a_1 | a_1 |
| | a_2 | a_2 | a_2 | a_2 |
| | a_3 | a_3 | a_3 | a_3 |
| | a_4 | a_4 | a_4 | a_4 |
| p_4 | a_1 | a_1 | a_1 | a_1 |
| | a_2 | a_2 | a_2 | a_2 |
| | a_3 | a_3 | a_3 | a_3 |
| | a_4 | a_4 | a_4 | a_4 |

较对比后发现,磨头磨料粒度为 p_3 、主轴转速为 18000r/min、进给量为 0.05mm 时,加工振动幅值和频率小,叶片表面质量达到最佳状态,满足整体叶盘使用工况。因此选择 p_3 、主轴转速为 18000r/min、进给量为 0.05mm 的抛光参数,可有效地避免抛光颤振现象。

2.3 提高系统刚性

通过工艺填充方法,可以提高叶片抛光时的刚性系统、增加颤振阻尼,从而实现对振动幅值的控制^[13],如图 5 所示。整体叶盘叶片间填充了改性石蜡,增加了整体叶盘抛光系统的整体刚性,有效地降低了抛光加工时的振动幅值,降低颤振发生的可能性。同时叶盘周围用过滤布围绕,防止蜡屑堵塞冷却系统。

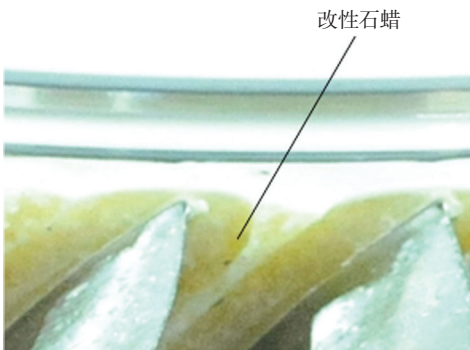


图5 整体叶盘叶片工艺填充
Fig.5 Filling process of blisk blades

3 试验验证

基于以上分析,选用自动化抛光机构为执行元件,以某型号航空发动机整体叶盘为对象,经编程技术优化、抛光参数优化、提高系统刚性进行试验,抛光对比结果如图 6、图 7 所示。叶片表面质量测试结果如表 2 所示,试验数据表明,采用颤振抑制技术后叶片波纹度、表面粗糙度、内应力等指标均有了明显降低。

4 结束语

航空发动机整体叶盘叶片自动化抛光过程中,颤振

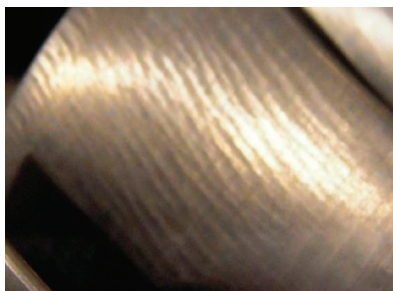


图6 抛光颤振的叶片
Fig.6 Blade of polishing flutter

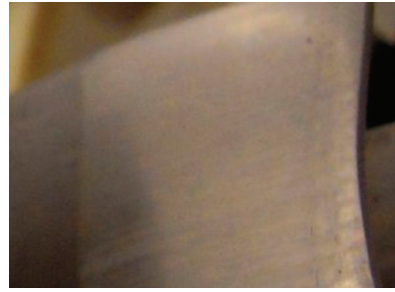


图7 采用颤振抑制技术抛光的叶片
Fig.7 Blade after using flutter suppression technology

表2 整体叶盘叶片抛光试验组别

| 控制策略 | 波纹度 / mm | 表面粗糙度 / μm | 平均误差 / mm | 振动幅值和频率 |
|-------|----------|-----------------------|-----------|---------|
| 颤振抑制前 | 0.06 | 1.6 | 0.12 | 大 |
| 颤振抑制后 | 0.01 | 0.32 | 0.07 | 小 |

现象严重影响叶片表面最终质量,为满足航空发动机整体叶盘的使用要求,解决叶片抛光颤振现象,通过剖析颤振机理,采取合适的抑制技术表现出了很强的优越性。

(1) 确定了编程技术优化、抛光参数优化、提高系统刚性等 3 种抛光颤振抑制技术。

(2) 经试验验证,颤振抑制技术解决了颤振现象,叶片表面质量得到了较大的提高。

参考文献

- [1] 王增强. 航空发动机整体叶盘加工技术[J]. 航空制造技术, 2013(9):40-43.
WANG Zengqiang. Machining technology of aeroengine blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(9):40-43.
- [2] 余学冉, 陆山. 整体叶盘结构强度减振一体化设计方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28(10):2235-2239
YU Xueran, LU Shan. Integrative design method of blisk considering structure strength and resonant vibration avoidance[J]. Journal of Aerospace Power, 2013,28(10):2235-2239.
- [3] 赵鹏兵, 史耀耀, 宁立群. 整体叶盘高效强力复合铣 A 轴高精度控制技术研究[J]. 航空学报, 2013,34(7):1706-1714.
ZHAO Pengbing, SHI Yaoyao, NING Liqun. Technology research on high-precision control of A-axis in efficient and powerful milling machine for blisk manufacturing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(7):1706-1714.
- [4] 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.
- [5] LI D Q, ZHANG L, YANG H R, et al. Research on the double-sided grinding and polishing machine tool system[C]//2010 IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway, USA: 2010: 1968-1971.

(下转第63页)