

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.04.04

一种整体叶盘加工预变形控制方法

高金磊¹, 尤嘉¹, 单纯利¹, 查永康²

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043;

2. 中国航发成都发动机有限公司, 四川 成都 610503)

摘要: 为解决钛合金整体叶盘薄壁弯扭跨音速叶片叶型制造过程中存在的加工变形大、铣削稳定性差等问题, 本文提出了一种整体叶盘加工预变形控制方法。采用叶型三维检测技术获取叶型位置度和扭转角, 利用叶型铣削变形误差反向补偿方法控制叶片弯曲及扭转变形。在整体叶盘上进行了实验验证, 结果表明该方法可有效提高叶型加工精度和成品合格率, 具有技术借鉴价值。

关键词: 整体叶盘; 叶型; 变形误差; 补偿

中图分类号: TB9; TP242

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)04-0015-04

A Method for the Predeformation Control in the Processing of the Aero-Engine Blisk

GAO Jinlei¹, YOU Jia¹, SHAN Chunli¹, ZHA Yongkang²

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Group Corporation, Shenyang 110043, China;

2. AECC Chengdu Aero-Engine Group Corporation, Chengdu 610503, China)

Abstract: In order to solve the problems of large machining deformation and poor milling stability in the manufacturing process of thin-walled curved torsional transonic blade profile of titanium alloy blisk, a predeformation control method for machining integral blisk is proposed in this paper. The position and twist angle of blade profile are obtained by 3D profile detection technology, and the bending and torsion deformation of blade are controlled by reverse compensation of profile milling deformation error. The results show that the method can effectively improve the machining accuracy and the qualified rate of finished products.

Key words: blisk; blade profile; deformation error; the compensation

0 引言

航空涡轮发动机要求压气机部件具有最佳的性能和最轻的重量, 整体叶盘是轴流压气机的重要转动部件, 不断向大流量、高负荷方向发展。为提升气动效率并增大压缩比, 整体叶盘采用具有优良气动性能的跨音速叶型, 并采用带有前掠、后弯特征的复杂空间曲面构型, 叶身型面薄长、复合弯扭程度大^[1-3]。为保证应用性能, 加工过程中对叶型参数公差要求越来越严格, 传统叶型检测的准确性难以满足整体叶盘、叶片型面的检测需求。目前, 国外某些发动机厂商大量采用 Leitz PMM-C 四轴联动坐标测量机进行整体叶盘叶片型面检测^[4]; 也有一些公司采用 Renishaw REVO 旋转扫描测头的五轴坐标测量机进行整体叶盘叶片的型面检测^[5-7], METROPTIC, WENZEL, GOM 公司的光学测量设备也在整体叶盘叶片型面检测中得到应用^[8-9]。

整体叶盘叶型铣削需要全方位考虑高精度尺寸及

形位公差要求、薄壁弯扭叶型特点和合金工件材料加工的特殊性等要素, 从而保证叶片几何精度与物理性能。由于整体叶盘叶型呈现长薄壁、大弯扭、窄间距、高曲率变化等特点, 常常导致叶型铣削加工中叶型中上部出现较大的扭转和弯曲变形, 叶型轮廓度、位置度和扭转角等参数易超出设计要求。为保证整体叶盘叶片型面加工精度, 提高成品合格率, 必须采取措施控制整体叶盘叶片部位弯曲及扭转变形。本文以某航空发动机整体叶盘作为研究对象, 利用三维自由型面检测技术, 研究其加工过程中的预变形控制方法, 并进行实验验证。

1 基于叶型检测数据的反向补偿方法

1.1 叶型变形特点分析

该型高压钛合金整体叶盘、叶片叶型的前后缘厚度以及截面最大厚度偏薄, 属于悬臂结构, 在铣削过程中受切削力、材料特性、应力释放等因素影响, 易

出现较大的弯曲和扭转变形，并且叶型实体变形存在连续性，表现为如下特点：从叶根到叶尖方向，叶片扭转变形逐渐增大，进气边向叶背侧扭转，排气边向叶盆侧扭转；从叶根到叶尖方向，叶片弯曲变形逐渐增大，叶盆侧向叶背侧弯曲，如图1所示。检测结果显示该叶型中上部截面的位置度及扭转角合格率低，叶尖尺寸和叶尖跳动易出现较大超差。

1.2 叶型变形反向补偿方法

为保证叶型符合尺寸公差和形位精度要求，本文提出了叶片变形反向补偿方法，其基本思路是：通过分析已有叶型检测数据，统计分析叶型加工后各截面位置度、扭转角与设计值的最大偏差，预先获取叶片铣削加工引起的弯曲及扭转变形量；基于叶片变形特点，采用线性插值方法选取修正量和修正方向，分截面反向修正叶片原始设计模型，重构供编程使用的反向预变形叶片工艺模型^[10]，再进行编程加工，从而实现叶片弯曲及扭转变形误差的反向补偿，如图2所示。

1.3 叶型预变形控制

为构建叶片反向预变形工艺模型，应准确分析叶



图1 叶型弯扭变形

片原始弯曲变形及扭转变形量，并综合考虑叶片截面高度、公差设计要求以及再变形等影响因素，进行修正量的补偿设计^[5]。截面位置度偏差反映了叶片弯曲变形情况，因此根据截面位置度偏差确定位移修正量及修正方向，如图3所示；截面扭转角偏差反映了叶片扭转变形情况，因此根据截面扭转角偏差确定角度修正量及修正方向，如图4所示。利用坐标测量技术和统计分析方法获取位移修正量和角度修正量数据，得到各叶片沿叶展方向所有检测截面的扭转角偏差及位置度偏差。

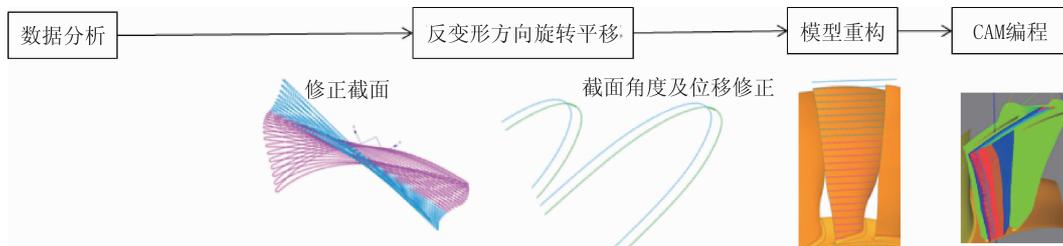


图2 叶型变形反向补偿方案

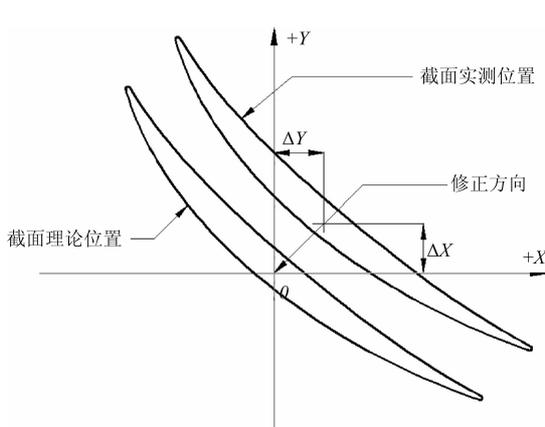


图3 叶型截面位置偏差及修正方向

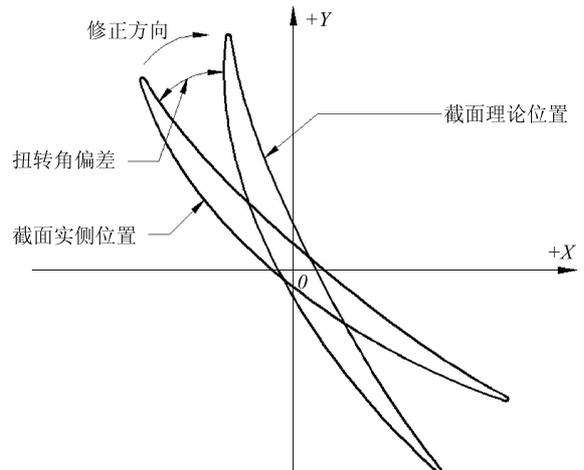


图4 叶型截面扭转角偏差及修正方向

1) 弯曲变形修正

针对叶片弯曲变形偏差，需要确定弯曲变形起始

修正截面 S_v 、弯曲变形终止修正截面 S_k 以及相关截面的位移修正量。沿叶根到叶尖方向进行分析，起始修

可以看出：修正前后的弦宽值几乎无变化；扭转角修正量较大，最大超过 0.15° ；积叠轴位置度修正量较大，最大超过 0.1 mm ，修正后的位置度偏差明显减小；轮廓度参数修正前后差异较小，不大于 0.008 mm 。整体叶盘工艺模型反变形控制后，叶型位置、扭转等参数指标明显变优。

该整体叶盘全部27片叶型参数数据包括1278项

叶型检测数据，126项位置度SFT数据，18项位置度BOW数据，以及1134项其余技术条件项的检测数据。具体超差情况对比如表1所示，经反向补偿后叶型轮廓度无较大变化，位置度SFT最大值缩小至 0.31 mm ，合格率由88.9%提高到100%；扭转角由88.1%提高到96.0%。

表1 整体叶盘反向补偿前后叶型参数超差情况对比

技术条件项	反向补偿前		反向补偿后	
	最大偏差情况	指标合格率	最大偏差情况	指标合格率
前缘轮廓度(+0.03 mm, -0.03 mm)	-0.038 mm	97.6% (3处超差)	-0.031 mm	99.1% (2处超差)
后缘轮廓度(+0.05 mm, -0.05 mm)	-0.052 mm	99.2% (1处超差)	-0.050 mm	99.2% (1处超差)
位置度SFT	0.494 mm	88.9% (14处超差)	0.310 mm	100% (0处超差)
扭转角($\pm 15^\circ$)	0.395°	88.1% (15处超差)	0.312°	96.0% (5处超差)

3 结束语

航空发动机整体叶盘叶型制造过程中易出现加工变形大、铣削稳定性差等问题。针对整体叶盘叶片的结构特点，以减小叶片变形、提高叶片型面加工精度和合格率为出发点，提出了基于整体叶盘原始检测数据的整体叶盘叶片工艺模型反向补偿方法。利用某型民用发动机整体叶盘开展实验，证明了此补偿方法的可行性与有效性，为航空发动机整体叶盘叶型高质量制造提供了有力保障。该方法对于单叶片同样具有适用性，但针对具体叶型的预变形控制量需要经过若干迭代试验进行精确验证。

参考文献

- [1] 王玲. 整体叶盘数控加工技术研究[J]. 新技术新工艺, 2012(11): 71-73
- [2] 石鑫. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术[J]. 科技展望, 2016(4): 55.
- [3] 阎兵, 曹著明. 整体叶盘数控铣削优化技术探讨[J]. 制造技术与机床, 2020(4): 50-55.
- [4] 蔺小军. 航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术[J]. 计算机集成制造技术, 2012(1): 125-131.
- [5] 叶忠宇, 高晓斐, 李婷婷, 等. 航空发动机整体叶盘叶片预

变形控制研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(15): 96-102.

- [6] 宋宇. 整体叶盘测量路径规划与仿真研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.
- [7] 胡成海, 王帼媛, 黄明涛, 等. 基于五轴测量技术的整体叶环快速检测方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2018, 54(1): 2-5, 15.
- [8] 张海涛, 刘书桂, 李杏华, 等. 整体叶盘加工原位测量系统的研制(英文)[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2018, 9(2): 115-120.
- [9] 张现东, 卜昆, 董一巍. 航空发动机叶片三坐标测量优化采样方法[J]. 航空动力学报, 2019, 34(1): 168-176.
- [10] 蔚敬斌. 基于UG的发动机压气机叶轮叶型曲面重构研究[J]. 机械工程与自动化, 2016(3): 173-174, 176.

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-07-28

基金项目: 国家工信部民机项目(MJ-2016-J-92)

作者简介



高金磊(1987-), 男, 辽宁本溪人, 工程师, 2010年毕业于大连理工大学, 获工学学士学位, 主要从事航空发动机零部件几何量检测技术研究。