

# 整体叶盘叶片加工补偿策略及实验研究

李响<sup>1</sup>, 巩亚东<sup>1\*</sup>, 赵吉宾<sup>2</sup>, 丁明祥<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院 沈阳 110819;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016)

**摘要:** **目的** 降低航天发动机整体叶盘的加工误差, 实现产品高精度化。**方法** 建立整体叶盘叶片加工变形量全局分布有限元模型, 考虑补偿加工时刀具修正量与变形误差的耦合效应, 采用多次迭代法计算叶片变形补偿量; 提出反向重构几何模型补偿策略, 利用补偿量对叶片几何轮廓进行重构, 重新生成包含叶片变形误差信息的刀轨程序。通过某型号航空发动机整体叶盘叶片铣削加工实验和型面精度测量实验, 对变形分布预测模型及所提出的反向重构模型补偿策略进行验证。**结果** 预测结果与实验结果有很好的吻合度, 平均误差为 7.96%; 新的补偿策略数据嵌入方式高效, 可显著降低加工过程中产生的变形误差, 将成品精度控制在设计的许用公差范围以内。**结论** 所提方法可以明显提高整体叶盘叶片铣削加工质量, 可为后续磨削加工提供更高型面精度的叶片零件。

**关键词:** 有限元; 变形误差; 补偿策略; 整体叶盘叶片

**中图分类号:** TP391; TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)03-0039-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.03.004

## Compensation Strategy and Experimental Study on Integral Disk and Blade Processing

LI Xiang<sup>1</sup>, GONG Yadong<sup>1\*</sup>, ZHAO Jibin<sup>2</sup>, DING Mingxiang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**ABSTRACT:** The work aims to reduce the processing errors of the integral blade disk of the aerospace engine and achieve high precision of the product. A finite element model for the global distribution of processing deformation of the integral disk and blade was established. Considering the coupling effect of tool correction and deformation error during compensation processing, the blade deformation compensation was calculated by a multiple iteration method. A reverse reconstruction geometric model compensation strategy was proposed, which used the compensation amount to reconstruct the blade geometric contour and regenerate the tool path program containing blade deformation error information. The deformation distribution prediction model and the proposed reverse reconstruction model compensation strategy were validated through milling experiments and surface accuracy measurement experiments on the integral blade of a certain aerospace engine. The results showed a good agreement

收稿日期: 2023-10-15; 修订日期: 2024-01-10

Received: 2023-10-15; Revised: 2024-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (U1908230)

Fund: National Natural Science Foundation of China (U1908230)

引文格式: 李响, 巩亚东, 赵吉宾, 等. 整体叶盘叶片加工补偿策略及实验研究[J]. 表面技术, 2024, 53(3): 39-46.

LI Xiang, GONG Yadong, ZHAO Jibin, et al. Compensation Strategy and Experimental Study on Integral Disk and Blade Processing[J]. Surface Technology, 2024, 53(3): 39-46.

\*通信作者 (Corresponding author)

between the predicted results and the experimental results, with an average error of 7.96%. The new compensation strategy data embedding method was efficient and could significantly reduce deformation errors generated during the processing, controlling the precision of the finished product within the allowable tolerance range of the design. The method proposed can significantly improve the milling quality of integral disk and blade, providing higher surface accuracy for subsequent grinding of blade parts.

**KEY WORDS:** finite element; deformation error; compensation strategy; integral disk and blade

近年来,随着航空工业的发展,许多国家的航空企业开始对航空发动机性能提出了更高的要求,其中为适应更高推重比、涵道比的整体叶盘已成为当前的研究热点<sup>[1-2]</sup>。作为整体叶盘叶片磨抛加工的上一步工艺,五轴数控侧铣加工是目前航空发动机叶片主流的制造方法<sup>[3]</sup>。由于薄壁类零件在加工过程中的材料去除率较高,且刚度会不断降低,在切削力的作用下易产生非均匀分布的变形量<sup>[3]</sup>,这种力导致弹性变形,引起的“让刀现象”将使零件形状和几何误差超过预期公差,使其加工质量难以控制<sup>[4-5]</sup>,后续的磨削任务量成倍增大。

近年来,在减小薄壁件加工变形及控制成品型面误差方面,已有学者开展了相关研究。万敏<sup>[6]</sup>根据弹性变形假设及悬臂梁理论,针对刀具加工变形提出了一种高效计算方法。赵欣等<sup>[7]</sup>分析了铣削加工位置与变形量的时变关系,通过线性回归拟合叶片弹性变形预测模型,得到了各叶片截面上的补偿量坐标。黄泽华等<sup>[8]</sup>考虑铣削力与变形量之间的耦合关系,将变形引起的切削条件变化反馈到铣削力模型中,建立了复杂薄壁件弹性变形量迭代计算模型。王玉涛等<sup>[9]</sup>通过矢量插补优化算法减小了叶片进气边的过切现象。吴竹溪等<sup>[10]</sup>建立了以最小加工变形为目标的刀具几何参数优化模型,基于遗传算法求解技术实现了薄壁件加工变形的控制。Deng 等<sup>[11]</sup>利用强迫振动方式模拟了铣削力对夹具-工件系统的动态影响特性,研究发现,在加工过程中动态改变夹紧力可以有效减小加工变形误差。Huang 等<sup>[12]</sup>搭建了包含触发式测头的自动测量系统,实现了对薄壁件加工变形误差的实时测量,并形成了自适应薄壁件侧铣加工策略。Liu 等<sup>[13]</sup>通过建立的薄壁件加工状态动态特性模型,评估了刚度与实时切削力的关系,并基于此模型实现了薄壁件和刀具变形的计算,最终利用 CNC 平台实现了弹性变形加工误差补偿。

由于叶片本身具有弯曲、扭转及厚度非均匀分布等特性,无法将以往以直板类/框体类薄壁件为研究对象得出的结论<sup>[14-16]</sup>直接作为需要五轴数控机床加工的叶片的指导依据,因此文中考虑了叶片加工铣削力与加工变形之间的耦合关系,利用多次迭代法获取叶片铣削过程的全局补偿量。同时,提出反向重构轮廓模型补偿策略,利用 CAM 商用软件 NX 12.0 生成

包含补偿信息的叶片五轴加工刀轨路径文件,与传统方法<sup>[7]</sup>相比,省去了人工对刀路轨迹输入误差补偿信息环节,刀路轨迹更加平滑,且可有效避免撞刀现象的发生。最后通过实验对文中提出的新方法进行了有效性验证。

## 1 叶片变形有限元仿真模型

采用有限元软件 ABAQUS 对叶片加工过程中受力所致的弹性变形分布情况进行仿真计算,具体流程如图 1 所示。在仿真模型中包含如下假设:叶轮叶片在各个方向上弹性相同;刀具切削刃一直有效,且保持刚性,忽略刀具磨损带来的影响;忽略由于换刀和机床振动导致的加工误差;忽略由于切削加工导致的轮毂和叶片根部变形;采用多次循环加载来模拟连续走刀产生的铣削力。

研究以某航空发动机整体叶盘为研究对象,其几何结构如图 2 所示。其中,轮毂直径为 100 mm,叶片上缘最大悬臂长度为 12.5 mm,叶片与轮毂最长接触区域长度为 62.8 mm。所选材料为钛合金 Ti-6Al-4V,材料密度为  $4.43 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 113.8 GPa,泊松比为 0.342,屈服强度为 834 MPa,拉伸强度为 932 MPa,导热系数为  $6.7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ,比热容为  $526.3 \text{ J/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$ ,熔点为  $1450^\circ\text{C}$ <sup>[17-18]</sup>。为了保证仿真的效率,选择静力学显式分析模块,选用单个叶片进行网格划分,选择的单元类型为十节点二次四面体(C3D10),单元尺寸为 0.25 mm,并对叶片与轮毂的接触区域网格节点限制全部自由度。

将走刀过程离散为若干个切削位置,以还原加工过程中刀具与叶片不同加工位置之间的作用关系。文中在叶片全局等距选择 66 个点位(图 2 中蓝色标点位置)施加铣削力,设定整体叶盘叶片上缘根部为坐标原点,与上缘平行方向为  $V$  轴,叶片根部与轮毂相接平行方向为  $U$  轴,其中在  $V$  方向等距取 6 个点位( $v_0, v_{1/5}, \dots, v_{4/5}, v_1$ ),在  $U$  方向等距取 11 个点位( $u_0, u_{1/10}, \dots, u_{9/10}, u_1$ )。以均布载荷的方式施加至刀-工接触区域内的节点上。根据圣维南等效原理,将曲面接触区简化为台阶面,将铣削力 3 个方向的分力均匀分布在该面内的每个节点上,最终实现铣削力的施加。

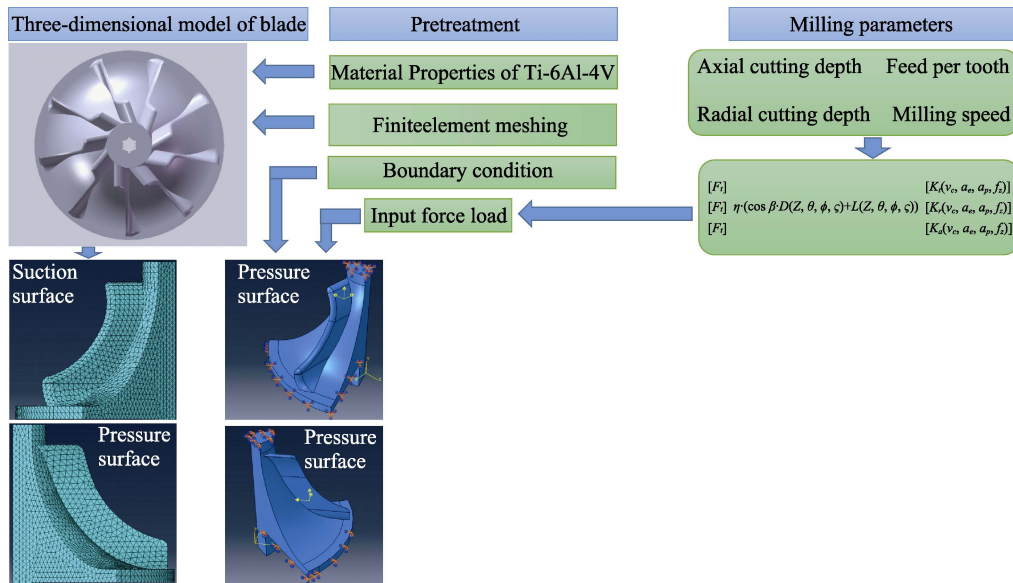


图 1 叶片变形有限元仿真流程

Fig.1 Flow chart of finite element simulation for blade deformation

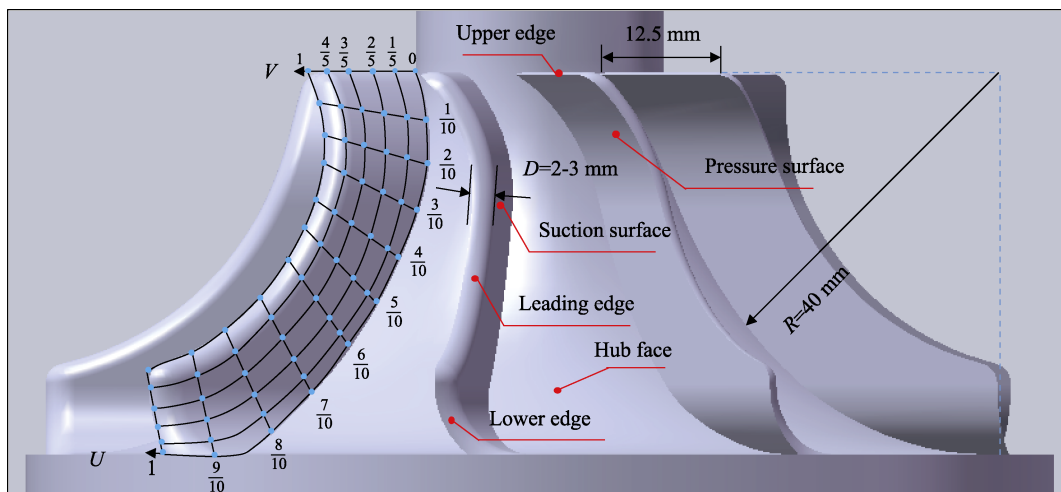


图 2 某航空发动机整体叶盘几何结构

Fig.2 Geometric structure of integral blade disk of a certain aerospace engine

## 2 多次迭代补偿量求解

为了保证叶片在铣削加工后的成形精度,考虑了补偿加工中刀具修正量与变形误差的耦合效应,采用迭代补偿方案多次修正刀具的运动轨迹,直至累积补偿量与迭代后产生的变形量之差降至允许公差范围内,达到控制变形误差的目的。迭代补偿方案原理及迭代流程分别如图 3、图 4 所示。具体操作方法如下。

1) 设定初始名义切深为  $^0a_e$ , 初始叶盘叶片加工位置为叶片压力面前缘顶端, 即图 2 中  $(u_0, v_1)$  处, 提取该位置的有限元仿真变形结果, 记为  $^0\delta^{u_0, v_1}$ 。

2) 在第 1 次补偿时, 将补偿量表示为式 (1)。此时名义切深用式 (2) 表示。名义切深的增大将引起切削力的增大, 从而引起变形误差的增大。故根据

补偿后的名义切深, 并代入式 (3) [19], 计算新的切削力载荷。

$$^1\gamma^{u_0, v_1} = ^0\delta^{u_0, v_1} \quad (1)$$

$$^1a_e^{u_0, v_1} = ^0a_e + ^1\gamma^{u_0, v_1} = ^0a_e + ^0\delta^{u_0, v_1} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} F_t \\ F_r \\ F_a \end{bmatrix} = \eta \cdot [\cos \beta \cdot D(Z, \theta, \varphi, \varsigma) + L(Z, \theta, \varphi, \varsigma)] \begin{bmatrix} K_t(v_e, a_e, a_p, f_z) \\ K_r(v_e, a_e, a_p, f_z) \\ K_a(v_e, a_e, a_p, f_z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为轴向切深修正系数;  $\beta$  为刀具螺旋角; 瞬时切屑截面积  $D$  和刀刃-工件瞬时接触长度  $L$  均为与刀齿数  $Z$ 、切入角  $\theta$ 、切削作用角  $\varphi$ 、刀具滞后角  $\varsigma$  相关的函数; 动态铣削力系数  $K_i (i=t, r, a)$  是与铣削

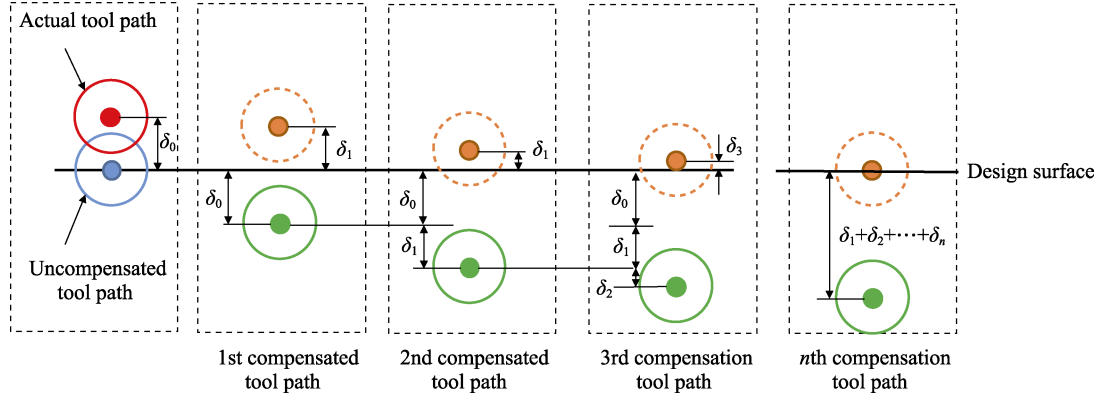


图3 误差迭代镜像补偿原理

Fig.3 Error iteration mirror compensation principle

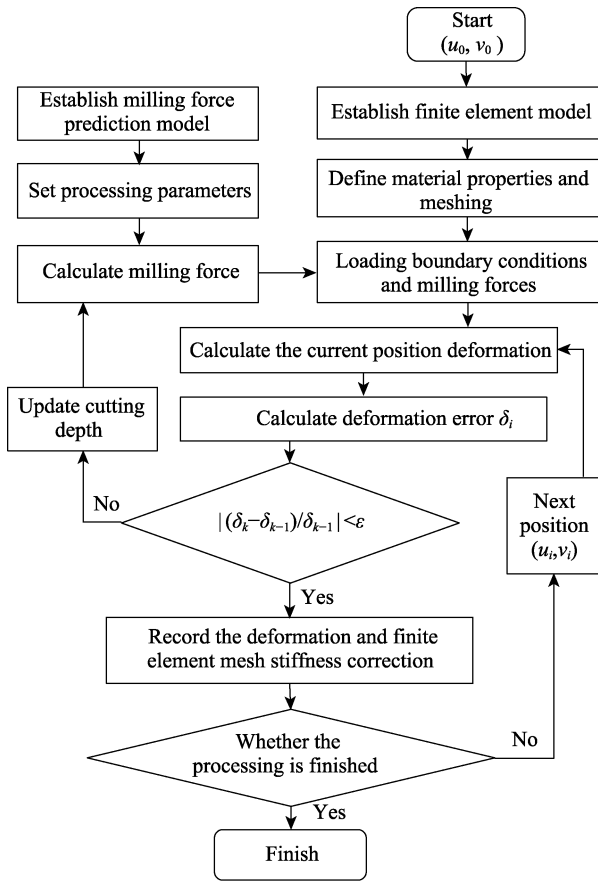


图4 误差迭代补偿流程

Fig.4 Flow chart of error iteration compensation

速度  $v_c$ 、径向切深  $a_e$ 、轴向切深  $a_p$  及每齿进给量  $f_z$  相关的变量。依据  $L_{16}(4^4)$  正交试验结果, 利用多元线性回归进行标定。将计算结果输入有限元模型中求解, 此时加工变形量为  $^1\delta^{u_0, v_1}$ , 则将第 1 次迭代所形成的新变形误差表示为式 (4)。

$$^1\Delta^{u_0, v_1} = ^1\delta^{u_0, v_1} - ^1\gamma^{u_0, v_1} = ^1\delta^{u_0, v_1} - ^0\delta^{u_0, v_1} \quad (4)$$

3) 在第 2 次补偿时, 补偿量为第 1 次补偿量与第 1 次补偿后的新加工误差之和, 用式 (5) 表示。此时, 名义径向切深用式 (6) 表示。同理, 计算此时的加工变形量, 记为  $^2\delta^{u_0, v_1}$ , 则第 2 次迭代所形成

的新变形误差用式 (7) 表示。

$$^2\gamma^{u_0, v_1} = ^1\gamma^{u_0, v_1} + ^1\Delta^{u_0, v_1} = ^0\delta^{u_0, v_1} + (^1\delta^{u_0, v_1} - ^0\delta^{u_0, v_1}) = ^1\delta^{u_0, v_1} \quad (5)$$

$$^2a_e^{u_0, v_1} = ^0a_e + ^2\gamma^{u_0, v_1} = ^0a_e + ^1\delta^{u_0, v_1} \quad (6)$$

$$^2\Delta^{u_0, v_1} = ^2\delta^{u_0, v_1} - ^2\gamma^{u_0, v_1} = ^2\delta^{u_0, v_1} - ^1\delta^{u_0, v_1} \quad (7)$$

4) 重复上述步骤, 当第  $n$  次迭代补偿时, 补偿量为第  $n-1$  次的补偿量与第  $n-1$  次补偿后的新加工误差之和, 见式 (8)。计算此时的加工变形量  $^n\delta^{u_0, v_1}$ , 则第  $n$  次迭代所形成的新变形误差用式 (9) 表示。循环迭代, 直至变形误差降至设计要求允许的公差范围内, 见式 (10)。

$$^n\gamma^{u_0, v_1} = ^{n-1}\gamma^{u_0, v_1} + ^{n-1}\Delta^{u_0, v_1} = ^{n-2}\delta^{u_0, v_1} + (^{n-1}\delta^{u_0, v_1} - ^{n-2}\delta^{u_0, v_1}) = ^{n-1}\delta^{u_0, v_1} \quad (8)$$

$$^n\Delta^{u_0, v_1} = ^n\delta^{u_0, v_1} - ^n\gamma^{u_0, v_1} = ^n\delta^{u_0, v_1} - ^{n-1}\delta^{u_0, v_1} \quad (9)$$

$$^m\Delta^{u_0, v_1} = ^m\delta^{u_0, v_1} - ^{m-1}\delta^{u_0, v_1} < \sigma \quad (10)$$

式中:  $m$  为终止迭代次数;  $\sigma$  为根据允许公差设定的极小数。

仿真对照试验精铣参数设置如表 1 所示, 叶片厚度为 1.5 mm。以弹性变形最敏感的加工区域  $(u_0, v_1), (u_{1/10}, v_1), \dots, (u_1, v_1)$  的均布离散刀触点为变形迭代补偿对象。加工方式采用螺旋铣削, 优先加工压力面, 通过去除已加工区域材料的方式对叶片有限元模型刚度进行修正后, 再进行吸力面的加工。按照迭代补偿法, 计算每次补偿后叶片的弹性变形数据, 直至变形量误差达到公差范围内时, 终止补偿程序。叶片压力面与吸力面的变形误差迭代补偿效果如图 5 所示。

表 1 仿真精加工参数设置

Tab.1 Simulation precision processing parameter settings

No.	Compensation or not	Spindle speed/(r·min <sup>-1</sup> )	$f_z$ /mm	$a_p$ /mm	$a_e$
1	No	2 400	0.15	0.2	0.1 mm
2	Yes	2 400	0.15	0.2	0.1 mm+ $\delta$

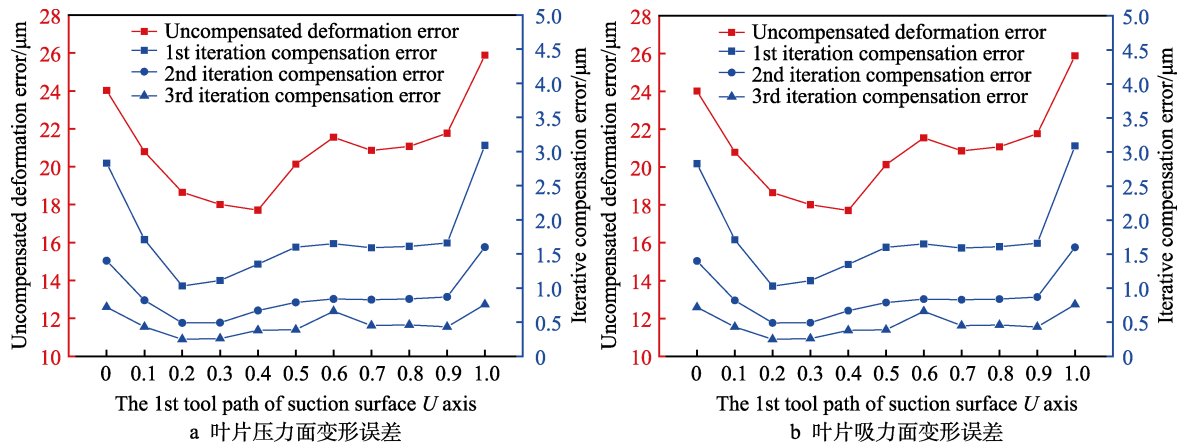


图 5 迭代补偿效果对照

Fig.5 Comparison of iteration compensation effects: a) deformation error of blade pressure surface; b) deformation error of blade suction surface

从图 5 可以看出, 由于螺旋铣削加工过程对叶片刚度的削弱, 因此后加工的吸力面在变形误差上略大于先加工的压力面。无论在叶片的哪一侧, 在采用迭代补偿策略后变形误差都显著降低, 且随着迭代次数的增加, 叶片变形误差呈逐渐减小的趋势, 经过第 1 次迭代后, 压力面最大让刀误差从 25.69  $\mu\text{m}$  降至 3.03  $\mu\text{m}$ , 平均变形误差减小了 91.82%, 吸力面最大让刀误差从 25.88  $\mu\text{m}$  降至 3.09  $\mu\text{m}$ , 平均变形误差减小了 95.22%。经过第 2 次迭代后, 压力面最大让刀误差降至 1.57  $\mu\text{m}$ , 平均变形误差减小了 49.4%, 吸力面最大让刀误差降至 3.09  $\mu\text{m}$ , 平均变形误差减小了 50%。经过第 3 次迭代后, 压力面与吸力面的最大让刀误差分别降至 0.69  $\mu\text{m}$  和 0.76  $\mu\text{m}$ , 使得变形误差小于 1  $\mu\text{m}$  的预期公差, 表明迭代补偿可以有效抑制叶片铣削过程中的变形误差。

### 3 反向重构模型补偿策略

传统补偿方法一般直接将工件表面的被加工方

向移动变形误差作为路径修正量, 从而实现补偿。对于整体叶盘叶片这类自由曲面, 因为其自身叶片的扭曲大、重叠度高且流道区域狭小, 因此其刀路轨迹更加复杂, 通常由商用 CAM 软件根据叶片三维模型的外表面轮廓特征分区、分阶段生成。修正这类复杂的刀路轨迹和偏转矢量需要大批量换算修正处理, 且无法避免新生成的刀路轨迹存在 NC 代码错误或加工过程中的干涉、撞刀问题。为了合理高效地将计算补偿量嵌入数控加工程序, 文中提出反向重构几何模型补偿法, 核心是将传统的以原始刀具路径为修正对象的补偿策略改为以目标几何模型为修正对象的补偿方法, 原理示意图如图 6 所示。首先由叶片加工的各位置变形补偿量生成误差修正数值信息, 再基于刀具运动的包络理论, 将各截面上修正后离散的补偿刀触点位置坐标通过样条插值曲线拟合成新的叶片截面轮廓, 最终扫描重构出包含加工变形补偿信息的新叶片曲面几何模型。基于新叶片几何模型, 再次使用 CAM 商用软件, 重新生成规划合理的加工刀路。

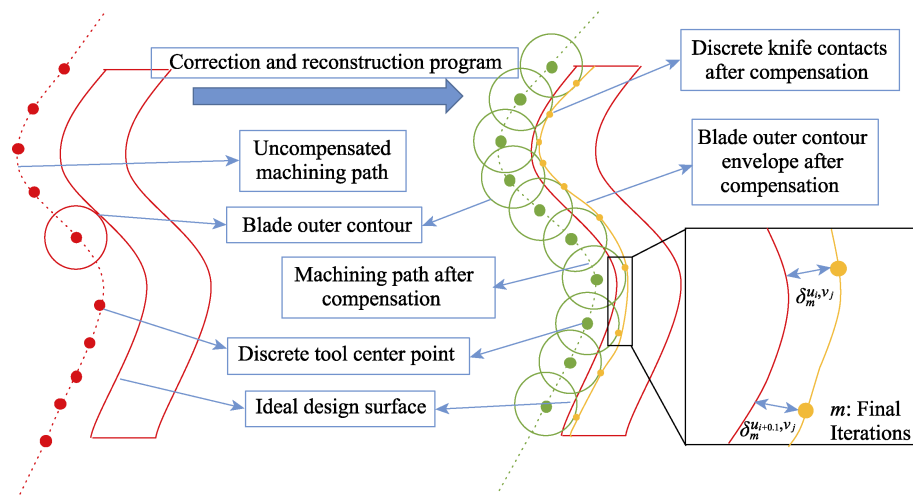


图 6 反向重构几何模型补偿

Fig.6 Compensation for reverse reconstruction geometric models

## 4 实验验证

### 4.1 试验设置

为了验证文中提出的变形抑制策略的有效性,进行了某发动机型号 Ti-6Al-4V 钛合金整体叶盘叶片铣削加工及型面尺寸误差测量试验。加工试验采用 IMF 30v 立式五轴数控中心,刀具选用四刃 R3 球头铣刀,螺旋角为  $35^\circ$ ,材料为镀钨的 YG8 硬质合金,弹性模量为 634 GPa,刀具夹紧刚度为 20 kN/mm。预加工毛坯为直径 150 mm 的近净成形试件,在精铣加工后完成的理想叶片的最大厚度为 1.5 mm,高度为 7.5 mm。由于钛合金属于典型的难加工材料,同时刀具悬臂长度达到 60 mm,因此为了避免颤振的发生,经多次试验调节后,选择主轴转速为 1 700~2 400 r/min 进行加工,并配合使用微量润滑技术,以减少 Ti-6Al-4V 合金在铣削加工过程中产生的不良热效应和切屑黏刀现象。在安装夹具后,利用红宝石探针针对铣削加工基准平面进行校准。具体加工参数见表 1。

加工后的叶片压力面与吸力面通过 HEXAGON TIGO SF 坐标测量仪(CAM)记录叶片型面误差信息,该设备  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴行程范围为 500 mm×500 mm×500 mm,分辨率为 0.1  $\mu\text{m}$ 。对照仿真结果,记录离散的 11 个刀触点  $(u_0, v_1), (u_{1/10}, v_1), \dots, (u_1, v_1)$  上的变形误差,最后进行变形误差对照评估。加工试验及型面精度测量现场如图 7、图 8 所示。

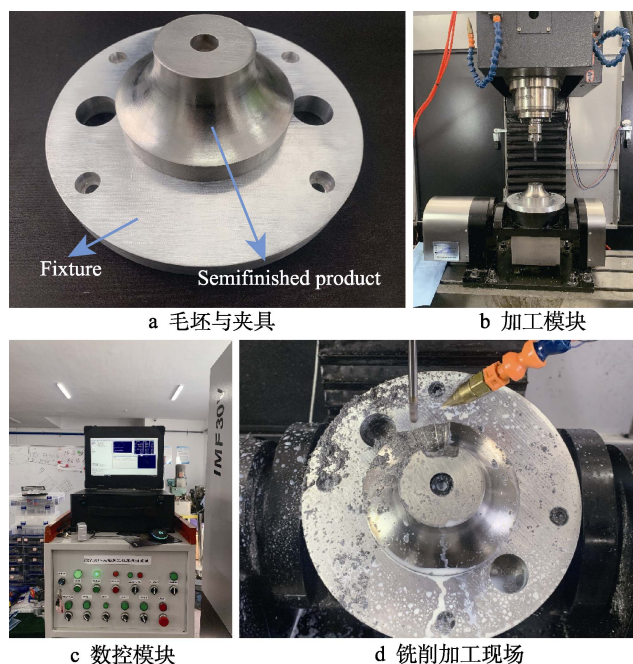


图 7 钛合金整体叶盘叶片加工现场

Fig.7 Titanium alloy integral disk and blade processing site:  
a) blank and fixture; b) processing module; c) CNC module;  
d) milling processing site



图 8 叶片型面及叶片型面尺寸测量试验现场  
Fig.8 Blade profile and blade profile size  
measurement test site

### 4.2 结果分析

叶片压力面、吸力面在加工过程中产生的变形几何偏差及迭代补偿后的残留误差结果如图 9 所示。对比仿真与实验结果可以发现,有限元变形仿真结果与实验结果具有良好的匹配性,能够较好地预测加工过程中叶片刀轨上各位置的变形量变化趋势,平均预测误差为 7.95%。其中最大预测误差为 16.67%,位置出现在压力面迭代补偿后的刀具路径最下缘位置。原因是此位置是叶片的自由端,叶片曲率变化较大,刚度变化显著,在仿真模型计算时离散的刀触点数量较少,未能准确地迭代叶片加工过程中去除材料后的实时刚度。另外,由于测量位置在叶片的最前缘,容易产生不可避免的测量误差。综合来看,有限元仿真结果普遍小于实验测量结果,这是因为仿真中为了提高运算效率,忽略了真实加工中切削热量、夹具载荷、机床振动等造成的误差。

对比图 9 中叶片两侧未补偿与迭代补偿方法的变形误差实验结果可知,吸力面误差值略大于压力面误差值。如前文分析,这是由加工过程中材料去除导致叶片刚度降低所致。其中,压力面的最大变形误差由 28.95  $\mu\text{m}$  降至 0.793  $\mu\text{m}$ ;吸力面最大变形误差由 29.3  $\mu\text{m}$  降至 0.865  $\mu\text{m}$ ,均满足公差 1  $\mu\text{m}$  的设计要求。表明文中所使用的反向重构误差补偿法使得叶片在加工过程中变形引起的表面误差得到显著降低,达到了叶片设计精度要求。

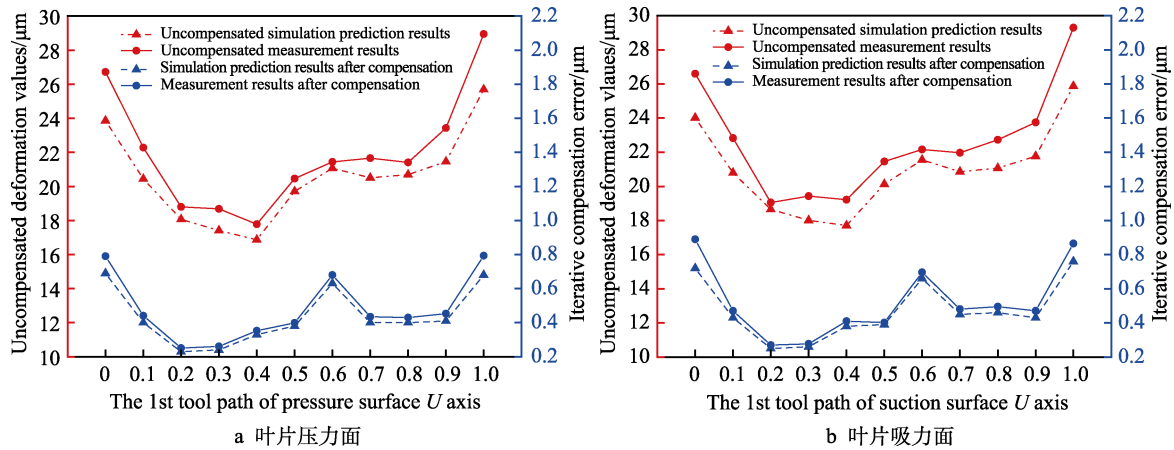


图 9 补偿前后变形误差的仿真与实测对比

Fig.9 Comparison between simulation and actual measurement of deformation errors before and after compensation: a) blade pressure surface; b) blade suction surface

## 5 结论

以钛合金整体叶盘叶片为研究对象, 预测铣削过程中的加工变形, 研究其变形误差的补偿问题, 得出以下结论。

1) 所建立的叶片加工变形有限元预测模型具有较高的预测精度, 平均误差为 7.96%。

2) 反向重构几何模型补偿策略能够对叶片加工过程产生的变形误差进行有效补偿, 最大误差降低率可达到 97.82%。

3) 新的补偿策略能够在不额外添加传感器和硬件的情况下实现变形误差的抑制, 生成的刀轨路径相较于传统方法, 其效率更高、轨迹更平滑, 同时避免了撞刀风险。

4) 文中研究对于预测叶片铣削加工变形量的全局分布规律, 以及高效嵌入误差补偿信息, 提高五轴数控加工中心铣削整体叶盘叶片的加工质量具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] 徐鲲濠, 张超, 高玉魁, 等. 钛合金薄壁叶片喷丸变形的研究[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 69-74.  
XU K H, ZHANG C, GAO Y K, et al. Deformation Influence of Shot Peening on Thin-Wall Titanium Alloy Blade[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 69-74.
- [2] 孙宇博, 雷娟娟. 航空发动机叶片 TC4 钛合金振动疲劳裂纹扩展研究及剩余寿命预测[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 207-213.  
SUN Y B, LEI J J. Research on Fatigue Crack Propagation and Remain Fatigue Life Prediction of Aero-Engine Blade TC4 Titanium alloy[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 207-213.
- [3] HARIK R F, GONG H, BERNARD A. 5-Axis Flank

Milling: A State-of-the-Art Review[J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(3): 796-808.

- [4] EKSIOGLU C, KILIC Z M, ALTINTAS Y. Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012, 134(6): 061006.
- [5] BUDAK E, ALTINTAS Y. Modeling and Avoidance of Static Form Errors in Peripheral Milling of Plates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(3): 459-476.
- [6] 万敏. 薄壁件周铣加工过程中表面静态误差预测关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005: 4-45.  
WAN M. Numerical Prediction of Static Form Errors in the Peripheral Milling of Thin-Walled Workpiece[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005: 4-45.
- [7] 赵欣, 欧剑, 李跃. 薄壁叶片加工变形模型预测与误差补偿[J]. 制造业自动化, 2014, 36(13): 36-40.  
ZHAO X, OU J, LI Y. The Thin Blade Processing Deformation Prediction Model and Error Compensation[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(13): 36-40.
- [8] 黄泽华, 李建勇, 樊文刚, 等. 复杂曲面薄壁叶片点铣加工弹性变形预测[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(5): 67-72.  
HUANG Z H, LI J Y, FAN W G, et al. Deformation Prediction of Thin-Walled Vane with Complex Surface in Ball End Milling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(5): 67-72.
- [9] 王玉涛, 唐清春, 周泽熙, 等. 五轴联动刀轴矢量插补优化算法[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 90-95.  
WANG Y T, TANG Q C, ZHOU Z X, et al. Optimization Algorithm of Tool Axis Vector Interpolation in Five-Axis Linkage[J]. Surface Technology, 2018, 47(7): 90-95.
- [10] 吴竹溪, 秦国华. 基于进化神经网络的薄壁件加工变形预测与抑制方法[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2020, 34(3): 80-87.  
WU Z X, QIN G H. Optimized Neural Network Based

- Prediction and Control of Machining Deformation for Thin-Walled Workpieces[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2020, 34(3): 80-87.
- [11] DENG H Y, MELKOTE S N. Determination of Minimum Clamping Forces for Dynamically Stable Fixturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(7/8): 847-857.
- [12] HUANG N D, BI Q Z, WANG Y H, et al. 5-Axis Adaptive Flank Milling of Flexible Thin-Walled Parts Based on the On-Machine Measurement[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 84: 1-8.
- [13] LIU C Q, LI Y G, SHEN W M. A Real Time Machining Error Compensation Method Based on Dynamic Features for Cutting Force Induced Elastic Deformation in Flank Milling[J]. Machining Science and Technology, 2018, 22(5): 766-786.
- [14] YI J, WANG X B, JIAO L, et al. Research on Deformation Law and Mechanism for Milling Micro Thin Wall with Mixed Boundaries of Titanium Alloy in Meso-scale[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144: 106329.
- [15] RAKSIRI C, PARNICHKUN M. Geometric and Force Errors Compensation in a 3-Axis CNC Milling Machine[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(12/13): 1283-1291.
- [16] 杨慎亮, 李勋, 王子铭, 等. TC4 侧铣表面完整性对试件疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 372-380.
- YANG S L, LI X, WANG Z M, et al. Influence of Side Milling on Surface Integrity and Fatigue Behavior of TC4 Specimens[J]. Surface Technology, 2019, 48(11): 372-380.
- [17] 赵仲林, 安立宝, 张好强, 等. TC4 铣削切屑形态与表面形貌特征[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 247-256.
- ZHAO Z L, AN L B, ZHANG H Q, et al. Characteristics of Chip Morphology and Surface Topography in Milling TC4[J]. Surface Technology, 2023, 52(5): 247-256.
- [18] LI X, GONG Y D, DING M X, et al. Research on Prediction and Compensation Strategy of Milling Deformation Error of Aitanium Alloy Integral Blisk Blade[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(11): 5099-5117.
- [19] LI X, GONG Y D, ZHAO J B. Surface Profile and Milling Force Prediction for Milling Thin-Walled Workpiece Based on Equivalent 3D Undeformed Chip Thickness Model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(2): 977-991.

(上接第 27 页)

- [12] 康仁科. 大尺寸单晶硅片加工技术简介[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(4): 1-4.
- KANG R K. Brief Introduction of Processing Technology for Large Size Single Crystal Silicon Wafer[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(4): 1-4.
- [13] YIN J F, BAI Q, GOEL S, et al. An Analytical Model to Predict the Depth of Sub-Surface Damage for Grinding of Brittle Materials[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021, 33: 454-464.
- [14] GAO S, LI H G, HUANG H, et al. Grinding and Lapping Induced Surface Integrity of Silicon Wafers and Its Effect on Chemical Mechanical Polishing[J]. Applied Surface Science, 2022, 599: 153982.
- [15] WANG J B, WU K, MAEZAKI T, et al. Development of Binder-Free CMG Abrasive Pellet and Finishing Performance on Mono-Crystal Sapphire[J]. Precision Engineering, 2020, 62: 40-46.
- [16] KANG R K, ZHANG Y, GAO S, et al. High Surface Integrity Fabrication of Silicon Wafers Using a Newly Developed Nonwoven Structured Grind-Polishing Wheel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 77: 229-239.
- [17] LI Z C, PEI Z J, FUNKENBUSCH P D. Machining Processes for Sapphire Wafers: A Literature Review[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(7): 975-989.
- [18] CHEN Z Z, WEN D H, LU J F, et al. Surface Quality Improvement by Using a Novel Driving System Design in Single-Side Planetary Abrasive Lapping[J]. Materials, 2021, 14(7): 1691.
- [19] HOCHENG H, TSAI H Y, TSAI M S. Effects of Kinematic Variables on Nonuniformity in Chemical Mechanical Planarization[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(11): 1651-1669.
- [20] QU X T, LIU Q L, WANG H Y, et al. Optimization of Polishing Path and Material Removal for Uniform Material Removal in Optical Surface Polishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(5): 1699-1722.
- [21] WANG L J, HU Z W, FANG C F, et al. Study on the Double-Sided Grinding of Sapphire Substrates with the Trajectory Method[J]. Precision Engineering, 2018, 51: 308-318.
- [22] FANG C F, LIU C, ZHAO Z X, et al. Study on Geometrical Patterns of Textured Fixed-Abrasive Pads in Sapphire Lapping Based on Trajectory Analysis[J]. Precision Engineering, 2018, 53: 169-178.
- [23] LI Q L, XIU S C, YAO Y L, et al. Study on Surface Material Removal Uniformity in Double Side Grinding Based on Grain Trajectories[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(5): 2865-2873.
- [24] TAO H F, LIU Y H, ZHAO D W, et al. Undeformed Chip Width Non-Uniformity Modeling and Surface Roughness Prediction in Wafer Self-Rotational Grinding Process[J]. Tribology International, 2022, 171: 107547.
- [25] KIM H, JEONG H. Effect of Process Conditions on Uniformity of Velocity and Wear Distance of Pad and Wafer during Chemical Mechanical Planarization[J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33(1): 53-60.