

基于刀具轨迹的扭曲薄壁件加工仿真与实验

王明海 孙 越 孙国强

(沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳, 110136)

摘要:为了解决叶片类扭曲薄壁件铣削加工的传统仿真方法中不按实际走刀轨迹进行载荷加载而导致模拟变形量与实际变形量之间误差较大且变形区域不准确等问题,提出了一种基于数控程序生成的刀具轨迹对叶片类扭曲曲面薄壁件铣削加工进行有限元模拟的方法。以某型发动机装机叶片的全尺寸三维结构模型为例,结合数控刀具轨迹进行了侧铣、翻面铣、螺旋铣 3 种加工方式下的铣削过程仿真模拟。获得了该类零件在 3 种铣削方式下的应力分布和变形情况,确定了发生弯扭弹性变形的区域和变形量。最后,结合相关铣削实验,验证了该仿真分析方法的正确性及有效性。

关键词:扭曲曲面薄壁件; 走刀轨迹; 铣削方式; 弯扭弹性变形; 有限元仿真

中图分类号:TH161

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2013)03-0373-07

Simulation and Experiment for Twisted Thin-Walled Part Milling Based on Machining Path

Wang Minghai, Sun Yue, Sun Guoqiang

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, 110136, China)

Abstract: In the traditional simulation method for twisted thin-walled part of blades, the cutting load does not follow the actual tool path, which leads to a large error between simulation and actual deformation, and the deformation area is not accurate. To solve these problems, the simulation method for twisted thin-walled part of blades based on the tool path generated by NC program is proposed. In the case of a full-scale structural 3-D model of certain engine installed leaves, the milling process simulations under three different milling modes including flank milling, turnover milling and helical milling are accomplished. The stress distribution and deformation condition in three different milling modes, and the region and the amount of bending and twisting elastic deformation of the part are determined. Finally, combined with the milling experiment, the correctness and effectiveness of the simulation method are verified.

Key words: twisted surface thin-walled part; cutting path; milling modes; bending and twisting elastic deformation; finite element simulation

扭曲曲面薄壁件在工程中的应用十分广泛,如混流式风机、水轮机及涡轮压气机的叶片等^[1]。精密数控加工是目前此类零件比较先进的加工方法之一^[2-3]。由于零件本身壁薄、弯扭及刚性差等特

点,零件的加工过程伴随较大的弹性变形,刀具按照预定轨迹进行加工时,产生“让刀”及“过切”等现象^[4-5],进而产生加工误差,从而无法保证零件的尺寸精度及形状、质量要求。为了保证零件的加工质

基金项目:中航产学研创新基金(CXY2010SH29)项目资助。

收稿日期:2012-09-19;**修订日期:**2012-10-31

通信作者:王明海,男,副教授,1971 年出生,E-mail: wmh@sau.edu.cn。

量,须对加工过程中产生的变形进行控制,因此,对叶片类扭曲曲面薄壁件加工变形规律的研究变得尤为重要。

目前,针对叶片类扭曲薄壁件加工变形规律的研究主要采用理论分析和数值仿真分析方法。由于扭曲叶片类零件结构的复杂性,学者们普遍采用了简化分析对象模型的途径,以期降低分析的难度或者提高分析的效率,这就导致了理论分析和仿真所得加工变形量与实际加工变形之间误差较大且对变形区域的预测不准确。如简化被分析对象的几何模型时,有学者采用力学相关理论将零件简化为规则几何模型,分析其加工过程中弯扭弹性变形的规律^[6-7];为了简化仿真分析中载荷的加载方式,有学者通过建立刀具切削力模型,按静力等效原则将载荷分配于结点上^[8-9],而不按实际走刀轨迹加载;也有研究对叶片精加工轨迹进行规划,采用有限元柔性变形迭代方法计算叶片加工变形量,但没有考虑材料去除过程中零件刚度的变化^[10]。

本文针对某型发动机装机叶片的全尺寸结构三维模型,按照数控程序生成的走刀轨迹,模拟仿真叶片类扭曲薄壁件在 3 种铣削方式下的加工过程,分析零件在不同铣削方式下的应力分布及变形情况,确定零件弯扭弹性变形区域及变形量,并通过相关铣削加工实验进行分析验证。为进一步研究扭曲曲面薄壁件加工变形规律及控制方法提供了依据。

1 铣削力引起的加工变形

在扭曲曲面薄壁零件的半精加工及精加工过程中,球头铣刀是重要的加工工具。航空扭曲曲面薄壁件通常采用钛合金等低刚度材料,故而在其加工过程中,受到铣削力的作用,会产生一定的弹性变形,随着铣削力的增大,超过材料的弹性极限时,就会引起零件的挤压变形^[11]。如图 1 所示为零件在铣削力作用下的加工变形误差示意图。

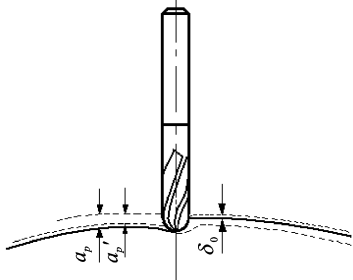


图 1 加工变形误差示意图

在刀具与工件接触点处,受到铣削力的作用,扭曲零件产生局部弹性变形 δ_0 ,导致实际切削深度 a_p' 小于理论切削深度 a_p ,走刀过后铣削载荷卸除,曲面薄壁件的弹性变形恢复,从而形成加工精度误差。铣削过程中,随着工件材料的去除,材料内部的应力得到释放,同时受到铣削力以及由铣削力产生的铣削热的作用,零件的已加工表面层产生新的残余应力。工件内部的应力平衡状态被打破,为了达到新的应力平衡状态,工件发生弯扭变形,严重影响零件的加工型面精度。

2 有限元分析模型

2.1 扭曲曲面薄壁件铣削三维模型

扭曲曲面薄壁件为非对称结构件,零件尺寸厚度不一致,其最小壁厚为 2 mm,如图 2 所示为此零件的三维结构模型。

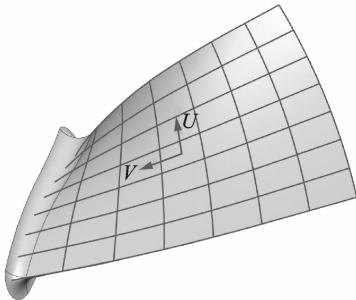


图 2 扭曲曲面薄壁件三维模型

零件材料为 TC4,密度为 $\rho=4\,440\text{ kg/m}^3$,材料性能参数见表 1;刀具选用四刃球头铣刀,球头半径 R_2 ,材料为硬质合金 YG8,刀具材料参数见表 2。

表 1 TC4 性能参数

硬度 HB	抗拉强度/	屈服强度/	弹性模量/	泊松比
	MPa	MPa	GPa	
320	920	860	108	0.33

表 2 刀具 YG8 参数

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
14 400	64×10^3	0.22

实际铣削过程中,薄壁件的加工变形误差是由工件的变形误差和刀具的变形误差共同导致的。但工件的刚度远低于刀具的刚度,工件的变形在其中占较大比重,分析中可以忽略刀具变形引起的加工误差,故将刀具设为刚体模型。

对刀具及工件定义边界条件:为了模拟叶片类扭曲曲面薄壁件的装夹状态,将薄壁件两端截面内

的所有节点定义为点集合,约束其全部自由度;在扭曲曲面薄壁件实际铣削加工过程中,刀具的切削刃同时具备旋转和进给两种运动^[12~14],且在多轴机床中刀具轴线可以随曲面曲率的变化进行自适应调整,但在有限元软件中实现刀具复杂变化的摆刀姿态十分困难,因此,需要约束刀具参考点的两个非轴向旋转自由度,并定义轴向旋转速度;而3个方向的移动自由度的约束则需要根据后续基于曲率分析生成的走刀轨迹数据,定义相应的位移变化幅值曲线。

2.2 扭曲曲面薄壁件铣削方式及走刀轨迹

目前,扭曲曲面薄壁件普遍存在的铣削加工方式主要包括侧面铣削、翻面铣削及螺旋铣削3种。侧面铣削通常用于航空发动机中大型扭曲曲面型面的加工,即将刀具从扭曲曲面的一缘侧面进刀,进行“之”字形走刀,完成曲面的加工;翻面铣削是在三坐标机床中,先加工曲面的一侧型面,再翻面进行重新装夹找正,加工工件另一侧型面;螺旋铣削是在多坐标机床上,将曲面件一端夹持在机床旋转轴上,另一端顶紧固定,刀具与曲面表面点接触,并随曲面的旋转表面形成螺旋轨迹。

由于扭曲曲面零件形状复杂,曲面的局部内凹区域及组合曲面的交线附近区域刀具与零件表面易发生加工干涉,为了保证零件表面的加工精度及质量,应避免加工过程中的干涉现象,即要求球头铣刀的刀具曲率半径小于曲面凹处的最小曲率半径,因此,在生成相应的加工刀具轨迹之前,首先须对此曲面薄壁件的型面进行曲率分析。基于高斯(Gauss)曲率对曲面弯曲程度的良好反映,通常作为检测曲面造型质量和各处连接情况的主要依据:当曲面的高斯曲率变化较大较快时,曲面表面光滑程度越低。

Gauss 曲率是通过 Gauss 映射反映的曲面在一点的弯曲程度。

设曲面 S 的面积元为

$$dA = \langle r_u \wedge r_v, n \rangle dudv = \sqrt{EG - F^2} dudv \quad (1)$$

dA 为曲面 S 上由参数 $u \rightarrow u + du, v \rightarrow v + dv$ 所围的小平行四边形 \square 的面积。

在 Gauss 映射 g 下, $g(\square)$ 的(定向)面积 $d\sigma$ 为

$$\langle (n(u+du, v) - n(u, v)) \wedge (n(u, v+dv) - n(u, v)), n(u, v) \rangle \approx \langle n_u n_v, n \rangle dudv \quad (2)$$

由式(3)

$$n_u \wedge n_v = (ad - bc) r_u \wedge r_v = K r_u \wedge r_v \quad (3)$$

有

$$d\sigma = \langle n_u \wedge n_v, n \rangle dudv = K dA \quad (4)$$

式中 K 为 Gauss 曲率,因此若 D 为 S 上包含点 P 的一个区域, $g(D)$ 为 D 在 Gauss 映射下的像

$$\text{Area}(g(D)) = \int_{g(D)} d\sigma = \int_D K dA \quad (5)$$

分析扭曲曲面薄壁件的 Gauss 曲率,选择合适的切削参数和刀具参数并运用 UG/CAM 中的 Variable Axis Milling 模块,生成扭曲曲面薄壁件的加工路径。图3为螺旋铣削方式的刀具轨迹 CLS 文件,此文件中包含铣削相关参数以及进刀、退刀等相关加工信息。

```

UNITS/MM
MODE/MILL
PPRINT/OPERATION CATEGORY & TYPE: Variable-axis Surface Contouring'
PPRINT/OPERATION NUMBER & NAME: CABU'
LOADTL/0, IN, 0, LENGTH, 0.000000, OSETNO, 0
CUTTER/10.000000, 5.000000, 0.000000, 0.000000, 0.000000, 0.000000, 75.000000
PPRINT/TOOL IDENTIFIER: BALL_MILL_2'
PPRINT/POST TOOL ID: 0'
PPRINT/TOOL DESCRIPTION: High Speed Steel'
PPRINT/TOOL STATION NUMBER: 0'
MULTAX/ON
LINTOL/0.100000
RAPID/
GOTO/25.700538, -13.850375, 147.799998, -0.067616, -0.000431, 0.997711
RAPID/
GOTO/26.384760, -13.846012, 137.703916, -0.067616, -0.000431, 0.997711
FEDRAT/250.000000, MPM
GOTO/25.856493, -13.510539, 135.856102, -0.067616, -0.000431, 0.997711
GOTO/24.735342, -12.884751, 134.387282, -0.067616, -0.000431, 0.997711
GOTO/23.191991, -12.063916, 133.521071, -0.067616, -0.000431, 0.997711
GOTO/21.461401, -11.173001, 133.389342, -0.067616, -0.000431, 0.997711
GOTO/20.513566, -10.692418, 133.526850, -0.066927, -0.000507, 0.997758

```

图3 刀轨文件示意图

2.3 扭曲曲面薄壁件铣削过程模拟

使用球头铣刀进行实际切削过程中,切削层厚度从刀尖位置向上逐渐增大。但有限元模拟过程中难以实现,因此,综合考虑有限元分析的可行性和计算精度,从而保证铣削过程的顺利进行,须对工件材料的去除过程进行简化。将工件材料划分为六面体8节点三维实体缩减积分单元 C3D8R,并将网格进行细化。切削过程中,铣刀与扭曲曲面薄壁工件相互作用,某一位置时,对任一刀刃微元 (i, θ, ϕ) ,作用在其上的空间铣削力可以分解为微元径向力 dF_r 、微元切向力 dF_t 和微元轴向力 dF_a ,其表达式为^[15]

$$\begin{cases} dF_t(i, \theta, \phi) = K_t(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_t} R \sin(\phi) d\phi \\ dF_r(i, \theta, \phi) = K_r(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_r} R \sin(\phi) d\phi \\ dF_a(i, \theta, \phi) = K_a(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_a} R \sin(\phi) d\phi \end{cases} \quad 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} dF_t(i, \theta, \phi) = K_t(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_t} R \csc^2(\phi) d\phi \\ dF_r(i, \theta, \phi) = K_r(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_r} R \csc^2(\phi) d\phi \\ dF_a(i, \theta, \phi) = K_a(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_a} R \csc^2(\phi) d\phi \end{cases} \quad \frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \pi \quad (7)$$

式中: i 为切削刃序号; θ 为刀具转角; ϕ 为切削刃微元位置角; $t(i, \theta, \phi)$ 为瞬时切削厚度; K_t, K_r 和 K_a 为切向、径向和轴向铣削力系数; m_t, m_r, m_a 为

瞬时切削厚度尺寸影响指数。将切削力分量转换至 xoy 坐标系,给定刀具转角 θ ,切削刃微元各向切削力分别进行累加得到刀具各向铣削力

$$\begin{cases} F_x(\theta) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{\phi_1}^{\phi_2} dF_x(i, \theta, \phi) \\ F_y(\theta) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{\phi_1}^{\phi_2} dF_y(i, \theta, \phi) \\ F_z(\theta) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{\phi_1}^{\phi_2} dF_z(i, \theta, \phi) \end{cases} \quad (8)$$

钛合金的铣削加工过程是高应变率下的塑性变形^[16],为了准确描述材料铣削过程中弹塑性变形特性,分析中使用 Johnson-Cook 剪切失效模型进行其变形的动态仿真数值模拟。铣削加工过程中材料的失效及去除过程采用 Johnson-Cook 破坏准则进行描述。模拟铣削过程如图 4 所示。

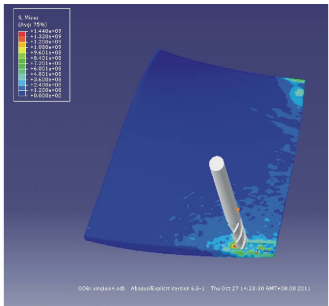


图 4 模拟仿真铣削过程

3 仿真结果分析

工件安装夹紧后进行铣削加工,随着材料的去除,其内部的残余应力重新分布,由于零件两端受装夹约束的作用,加工后零件不能自由变形,因此必须卸去装夹约束,令工件处于自由状态,并经过一段时间的应力平衡,达到加工后的最终状态。故为了得到扭曲曲面薄壁件加工后的自由变形情况,须对模拟铣削加工后的零件进行约束转换,即释放原有的约束条件,选取零件上非加工区域的 3 个点,只限制零件的刚体运动。图 5~7 所示分别为叶片类扭曲曲面薄壁件采用侧铣、翻面铣以及螺旋铣 3 种铣削方式进行模拟加工并进行转换约束后的应力分布及整体变形情况。

工件在切削力的作用下发生加工变形,但在不同的铣削方式下,变形情况有较大差异。图 5 采用侧铣的铣削方式,零件边缘区域向下弯曲变形,中间区域凸起,且零件两端扭转变形,程度不同。图 6 采用翻面铣的加工方式,靠近零件加工端区域沿轴线扭转变形,非加工端区域向上翘曲变形。图 7 采用螺旋铣的加工方式,加工端区域两侧向上翘曲

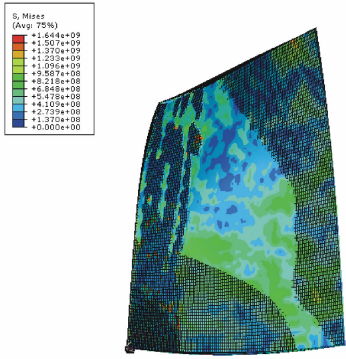


图 5 侧面铣方式下零件应力分布及变形

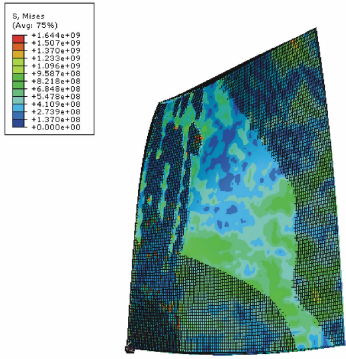


图 6 翻面铣方式下零件应力分布及变形

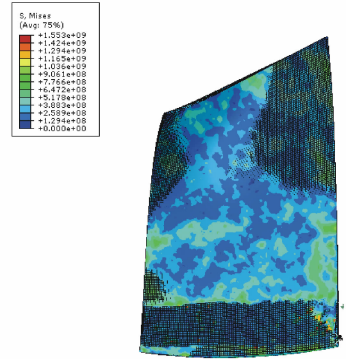


图 7 螺旋铣方式下零件应力分布及变形

变形,非加工端两侧向下弯曲程度不同,中间区域凸起变形,零件整体扭转变形。

采用 3 种铣削方式加工的零件,受到铣削力的作用,零件表面产生加工残余应力,且逐渐由加工端向非加工端扩展,最终集中分布于零件的边缘位置;并在刀具的切入端和切出端产生较大的残余应力。

为了得到扭曲曲面薄壁件模拟 3 种铣削方式加工后的变形量,分别沿 U, V 方向将此扭曲曲面薄壁件等参数划分为若干份,沿 U 向选取 17 个节

点,沿 V 向选取 12 个节点。计算分析各节点变形量。取 $U_1=5\text{ mm}$, $U_9=40\text{ mm}$, $U_{17}=80\text{ mm}$ 线上的 V 向节点,测量所得的变形数据,据此数据绘制变形图如图 8~10 所示。

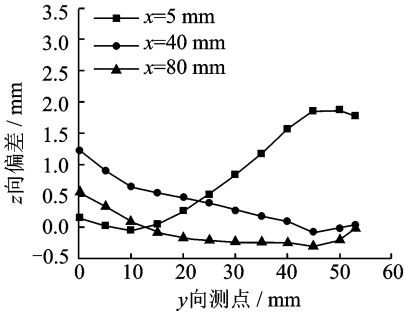


图 8 侧面铣方式下零件变形值曲线

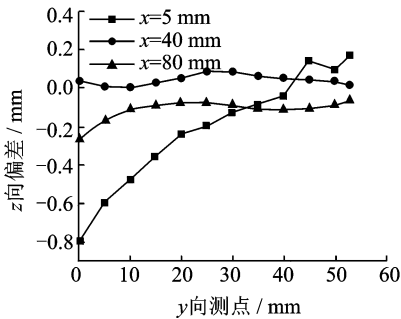


图 9 翻面铣方式下零件变形值曲线

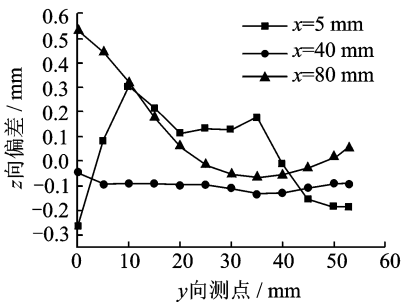


图 10 螺旋铣方式下零件变形值曲线

采用 3 种铣削方式模拟加工后的零件,两侧变形程度较中间部位剧烈。这是因为对于每个位置随着切削的进行,材料被去除后,工件刚度急剧减小;零件壁厚不均匀,两侧为工件刚度最为薄弱的区域,因此变形增大,而中间区域刚性相对较为稳定,故而变形程度相对较小;零件两侧变形程度不同,是由于零件本身结构的不对称性,导致零件两侧变形程度差别较大。

采用 3 种铣削方式加工扭曲曲面薄壁件,工件材料的去除顺序不同,导致内部初始残余应力的释放顺序及与加工产生新应力的耦合顺序、耦合效果不同,致使工件变形不同:采用侧面铣削方式,刀具

从工件一缘侧面进刀开始铣削,边缘区域的材料首先被去除,且该区域壁厚薄,因此受应力作用敏感,产生较大的弯曲变形。采用翻面铣削方式,工件一个侧面的材料首先被去除,其内部初始残余应力部分释放,此时扭曲曲面薄壁件向去除材料的一侧弯曲变形,翻面后加工曲面的另一侧型面,变形程度减小。采用螺旋铣削方式加工扭曲曲面薄壁件时,刀具沿工件的截面形状按螺旋线轨迹进行走刀,工件的两侧型面在刀具的一个走刀周期内同时完成加工,工件材料近似对称去除,如此,零件内部的残余应力保持在一个相对较为平衡的状态,因此加工后的工件弯曲、扭转变形程度最小。

4 扭曲曲面薄壁件铣削实验

分析采用 3 种铣削方式仿真加工所得的扭曲曲面薄壁件变形结果,螺旋铣削方式下工件弯扭变形程度最小,且相对于侧面铣削及翻面铣削方式,螺旋铣削方式不需要进行反复装夹找正,避免了因装夹误差造成的实验加工结果不准确。故本文采用与螺旋铣削方式相同的加工条件进行扭曲曲面薄壁件的铣削加工实验来验证仿真方法的正确性及有效性。并由螺旋铣削推及到侧面铣削和翻面铣削的情况。

工件材料为 TC4,扭曲曲面薄壁零件长 80 mm,宽 53 mm,最小壁厚 2 mm。实验机床为数控机床 VMC850B,为了实现螺旋铣削加工,将机床进行改进,将 X 轴替换为 A 轴,实现刀轴绕工件的旋转运动。为了进一步避免发生加工干涉,刀具选用 $\varnothing 6$ 硬质合金四刃锥度球头铣刀。球头半径 R2,螺旋角 30° ,锥度 3° 。切削用量 $a_p=0.4\text{ mm}$, $a_e=1\text{ mm}$, $f_z=0.03\text{ mm/z}$, $n=2\ 000\text{ r/min}$,走刀方式采用沿截面螺旋线铣削法,由工件一端开始铣削,螺旋走刀进给,铣削加工过程如图 11 所示。

实验加工后,采用三坐标测量机 Brown & Sharp GLOBAL STATUS 9308 对扭曲曲面薄壁

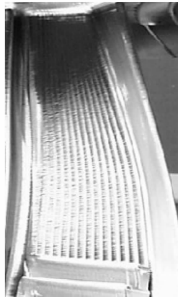


图 11 扭曲曲面薄壁件铣削实验过程

件上选取的特征点进行测量,测量所得数据经专用测量软件进行处理,图 12 为根据零件加工后表面经测得的数据绘制的变形图,图中颜色变化代表变形程度的大小。从图中得出加工零件的变形趋势与仿真结果基本一致,即加工端两侧发生向上的翘曲变形,同时整体发生扭转变形。

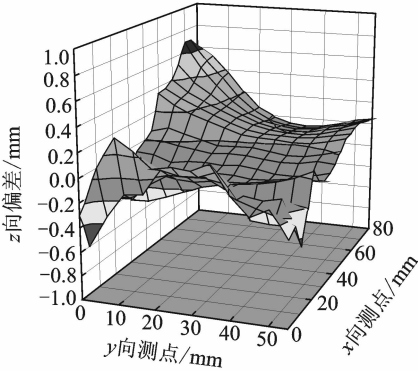


图 12 实验工件表面测量变形值

表 3 为部分特征点的实验与仿真变形值对比。从表 3 可知,模拟仿真变形量普遍小于实验变形量,这是因为实验所用工件材料内部存在一定的初始应力,而仿真过程没有考虑这部分初始应力;此外,仿真过程中将工件单元划分为六面体 8 节点三维实体缩减积分单元 C3D8R,模拟产生的切屑材料较实验多,相应的铣削力在材料内产生的应力较实验小,导致模拟仿真加工产生的变形小于实验值。在选取的测量结点中, U_{17} 与 V_1 相交结点处的扭曲曲面薄壁件仿真加工变形量最大,为 0.543 mm,而实验加工变形量为 0.618 mm,相对误差小于 15%; U_{17} 与 V_{12} 相交结点处工件的仿真与实验结果相对误差值最大,为 19.3%;工件在 U_1 与 U_{17} 两线所在区域即工件的两端区域,其仿真与实验值相对误差较大,主要原因是工件在实验加工过程中受到装夹力的作用产生的变形量,在仿真分析中没有考虑。但数值模拟与实验加工的相对

表 3 仿真与实验加工变形值对比

特征点	变形仿真 值/mm	变形实验 值/mm	相对误 差/%
U_1 与 V_1, V_7, V_{12} 相交 3 节点	-0.260 73	-0.306 90	17.7
	0.129 98	0.145 98	12.3
	-0.254 40	-0.298 28	17.2
U_9 与 V_1, V_7, V_{12} 相交 3 节点	-0.010 93	-0.011 87	8.6
	-0.047 26	-0.054 71	15.8
	-0.053 69	-0.059 20	10.3
U_{17} 与 V_1, V_7, V_{12} 相交 3 节点	0.542 85	0.618 43	13.9
	-0.050 99	-0.060 20	18.1
	0.037 80	0.045 10	19.3

误差均控制在 20%以内,说明数值分析结果可靠,从而证明运用该有限元仿真方法预测扭曲曲面薄壁件加工变形规律正确有效。

5 结 论

(1)仿真分析得出 3 种铣削方式下,扭曲曲面薄壁件应力分布均由加工端向非加工端扩展,集中分布于零件边缘区域,切入、切出端应力较大。

(2)不同铣削方式下,零件变形趋势差异较大:侧铣零件边缘区域弯曲变形,一端扭转变形;翻面铣加工区域扭转变形,非加工区域翘曲变形;螺旋铣加工区域弯曲变形,非加工端扭转变形。

(3)不同铣削方式下,零件变形程度差异较大:侧面铣削方式零件弯曲扭转变形程度最大,螺旋铣削变形程度最小,且应力分布相对均匀。相同铣削方式下,零件两侧变形程度差异较大。

(4)相同条件下的螺旋铣削实验得到的叶片类扭曲曲面薄壁件加工变形趋势与仿真结果基本一致,相对误差控制在 20%以内,验证了仿真分析方法的正确性及有效性。

参考文献:

[1] 刘维伟,张定华,史耀耀,等. 航空发动机薄壁叶片精密数控加工技术研究[J]. 机械科学与技术,2004,23(3):329-331.
Liu Weiwei, Zhang Dinghua, Shi Yaoyao, et al. Study on net-shape NC machining technology of thin-blade of aero-engine [J]. Mechanical Science of Technology, 2004,23(3):329-331.

[2] Chen Hungkuan. Investigation of tool orientation for milling blade of impeller in five-axis machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(1/4): 235-244.

[3] Hu Chuanguo, Zhang Dinghua, Xu Xipeng, et al. Research on the 5-axis machining of blisk[J]. Materials Science Forum, 2006, 532-533: 612-615.

[4] 陈远权,高健. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的叶片加工变形分析研究[J]. 机械设计与制造, 2010(10):101-103.
Chen Yuanquan, Gao Jian. Analysis of deformation on the blade during the machining process based on ANSYS/LS-DYNA [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(10):101-103.

[5] Zhu Rixin, Devor R E, Kapoor S G. A model-based monitoring and fault diagnosis methodology for free-form surface machining process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, 125(3):

- 397-404.
- [6] 白琚,张定华,刘维伟. 叶片螺旋铣弹性变形分析[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(7): 800-802.
Bai Yu, Zhang Dinghua, Liu Weiwei. Elasticity analysis of blade parts in spiral NC programming [J]. Mechanical Science And Technology, 2005, 24(7): 800-802.
- [7] 赵明,刘维伟,李杰光. 叶片精密加工弹性变形误差分析及规律研究[J]. 机械设计与制造, 2009(6): 106-108.
Zhao Ming, Liu Weiwei, Li Jieguang. Study on machining deformations error and rules analyses of thin-walled blades[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(6): 106-108.
- [8] 李昊. 航空发动机叶片铣削过程变形控制研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2011.
Li Hao. Aero-engine blade deformation control of milling process [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [9] 刘自成,舒发龙,张为民. 整体叶盘叶片加工变形控制技术[J]. 航空制造技术, 2011(9): 88-90.
Liu Zicheng, Shu Falong, Zhang Weimin. Study on control of machining deformation of blisk blade [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(9): 88-90.
- [10] 蔡永林,林立,黄泽华. 薄壁叶片加工误差分析与预测[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(1): 104-107.
Cai Yonglin, Lin Li, Huang Zehua. Error analysis and prediction of manufacturing for thin-walled blade [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(1): 104-107.
- [11] 胡创国. 薄壁件精密切削变形控制与误差补偿技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
Hu Chuanguo. Error compensation in precision machining of thin-walled parts [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [12] Mativenga P T, Hon K K B. An experimental study of cutting force in high-speed end milling and implications for dynamic force modeling [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(2): 251-261.
- [13] Iamail L. Sculptured surface machining: a generalized model of ball-end milling force system[J]. International Journal of Maching Tools & Manufacture, 2003, 43(5): 453-462.
- [14] Kim G M, Cho P J, Chu C N. Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map[J]. International Journal of Machining Tools & Manufacture, 2000, 40(2): 277-291.
- [15] 张臣,周儒荣,庄海军,等. 基于 Z-map 模型的球头铣刀铣削力建模与仿真[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 347-352.
Zhang Chen, Zhou Rurong, Zhuang Haijun, et al. Modeling and Simulation of Ball-end Milling Forces Based on Z-map Model [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 347-352.
- [16] Li Rui, Shih A J. Finite element modeling of 3D turning of Titanium [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(3/4): 253-261.