

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.007

基于主轴转矩的薄壁零件加工变形预测与控制研究

宁俊, 张臣

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于考虑工件变形的薄壁零件铣削加工变形模型, 分析加工变形影响参数; 依据正交切削试验加工数据, 采用遗传算法改进的BP神经网络建立基于主轴切削转矩相对变化值的薄壁零件加工变形预测模型; 通过加工过程数据与加工变形量的实时映射, 基于镜像补偿原理重构零件三维模型, 实现薄壁零件加工变形补偿。对预测及补偿后的三维零件进行对比实验, 结果表明: 在零件刚度最低处, 相对于未补偿的涡旋盘零件, 补偿后的零件平均变形量减小42.9%, 最大变形量减小36.2%, 且加工变形量均匀度较高。

关键词: 薄壁零件; 加工变形; 主轴转矩; 神经网络; 镜像误差补偿

中图分类号: TG506 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2026)03-0031-07

Research on Deformation Prediction and Control of Thin Wall Parts Processing Based on Spindle Torque

NING Jun, ZHANG Chen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the milling deformation model of thin-walled parts considering workpiece deformation, this paper analyzes the influencing parameters of machining deformation, adopts genetic algorithm-improved BP neural network to establish a deformation prediction model for thin-walled parts machining based on the relative variation value of spindle cutting torque, according to orthogonal cutting experimental machining data, and by real-time mapping of machining process data and machining deformation, compensates for thin-walled parts machining deformation and reconstructing 3D model of parts based on the principle of mirror compensation. Through comparative experiments on the predicted and compensated 3D parts, the results showed that at the lowest stiffness of the parts, compared to the uncompensated vortex plate parts, the average deformation of the compensated parts decreased by 42.9%, the maximum deformation decreased by 36.2%, and the uniformity of the machining deformation was relatively high.

Keywords: thin-walled parts; processing deformation; spindle torque; neural networks; mirror error compensation

0 引言

薄壁零件的加工具有结构复杂、材料去除量大以及加工成型后刚性低的特点。在铣削加工过程中, 这些特点使得薄壁零件容易产生切削变形, 从而影响加工精度, 这不仅降低了产品的质量, 还导致需要额外的后期人工处理, 从而增加了加工时间和成本。

LIU等^[1]为解决薄壁深腔零部件在铣削过程中的侧壁变形问题, 考虑了工件-刀具系统的挠度和工件的回弹变形, 提出了一种基于有限元方法的铣削误差预测方法。WU等^[2]针对钛合金薄壁零件铣削过程中由于热机械载荷引起的工件挠度

问题, 考虑切削热源和刀具侧面磨损, 通过解析模型计算切削载荷, 使用有限元模型模拟薄壁零件的变形, 并通过实验验证了预测结果。倪丽君和张婷^[3-4]对框架类零件的装夹布局和夹紧力用遗传算法进行多目标优化, 通过有限元对优化后的模型分析表明该方法能减小加工变形量并提高变形的均匀度。LIU等^[5]针对由切削力引起的薄壁零件和刀具低刚度变形问题, 提出了一种基于动态特性的实时变形误差补偿动态特性模型, 该模型包含零件特征刚度、几何信息与实时切削力信息之间的关系。基于此模型预测零件加工变形并通过功能块实现弹性变形的加工误差补偿。马鹏举等^[6]基于对超薄壁结构加工过程中工件变形的

第一作者简介: 宁俊(1999—), 男, 广东湛江人, 硕士研究生, 研究方向为智能制造、数字孪生, 1025582846@qq.com。

通信作者简介: 张臣(1976—), 男, 新疆维吾尔自治区昌吉人, 教授, 博士生导师, 航空宇航制造工程党支部书记, 研究方向为数字化设计与智能制造, meeczhang@nuaa.edu.cn。

分析,提出了减小工件变形的分区循环逐层切削策略,以改善工件刚性,更好地保证加工精度,并通过试验验证了分区循环逐层切削加工策略的有效性。

现阶段国内外学者对薄壁零件加工变形预测及控制方法展开了大量研究,但这些研究主要基于铣削力模型以及有限元仿真,对实际加工情况的复杂性和多变性没有充分考虑,且未能充分利用切削过程中的加工数据。

1 考虑工件变形的五轴侧铣薄壁零件铣削模型建模

对五轴侧铣铣削力建模首先需要建立刀具铣削微元模型和相应的坐标系。由于刀具-工件的接触关系在加工中的时变性与五轴加工模型的复杂性,首先对坐标系进行如下的定义。

以刀尖点作为原点建立刀具坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 。先将刀具的切削刃沿轴向切深部分分解为若干微元,如图 1 所示,每个微元体中心作为该微元坐标系 $O-tra$ 的原点。

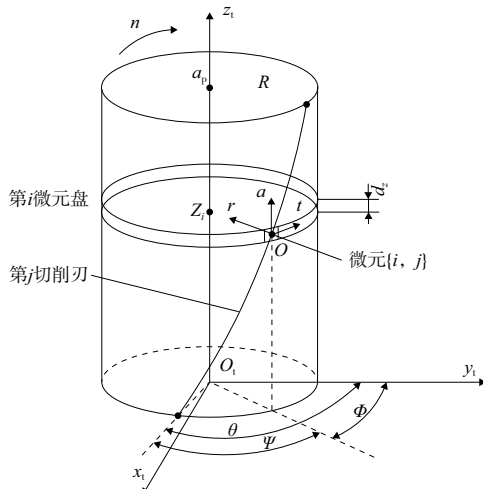


图 1 切削刃微元模型及坐标系

为便于铣削力模型的解析建模和仿真计算,将轴向切深为 a_p 的切削刃部分划分为 M 个微元盘。每个微元盘的厚度 $d_z = a_p/M$ 。取第 j 切削刃上的第 i 个微元盘为研究对象,其对应的切削点 P 记作微元 $\{i, j\}$ 。

如图 1 所示, ψ_1 为微元 $\{i, j\}$ 相较于第 j 齿底部端点的滞后角。

$$\psi(z_i) = \frac{2z_i \cdot \tan\beta}{D} \quad (1)$$

式中: z_i 为微元 $\{i, j\}$ 对应的轴向高度; D 为刀具

直径; β 为刀具螺旋角。

设在刀具坐标系下, φ 为径向切削角, 由于刀具螺旋角 β 的存在, 同一切削刃上的切削微元对应的径向切削角随着切削微元的轴向高度而变化, 微元 $\{i, j\}$ 其径向切削角可表示如下

$$\phi_j(z_i) = \theta + (j-1)\varphi_p - \psi(z_i) \quad (2)$$

$$\theta = \frac{2\pi n}{60} t \quad \varphi_p = \frac{2\pi}{N} \quad (3)$$

式中: N 为铣刀的切削刃数; φ_p 为齿间角; θ 为第 j 齿底部端点的瞬时径向切削角。在刀具坐标系下, 微元 $\{i, j\}$ 对应的切削点 P 的坐标可以表示为

$$\begin{pmatrix} X_p^t \\ Y_p^t \\ Z_p^t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{D}{2} \cdot \sin\phi_j(z_i) \\ \frac{D}{2} \cdot \cos\phi_j(z_i) \\ z_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

则微元切削刃长度 ds 可由下式计算

$$ds = dz \sqrt{[(X_p^t)']^2 + [(Y_p^t)']^2 + 1} \quad (5)$$

则按 Altintas 提出的机械 II 型力学模型^[7], 微元 $\{i, j\}$ 所受的三向作用力可以按如下公式表示

$$\begin{cases} dF_t = g(\phi_j(Z_i)) [K_{tc} h(\phi_j(Z_i)) dz + K_{te} ds] \\ dF_r = g(\phi_j(Z_i)) [K_{rc} h(\phi_j(Z_i)) dz + K_{re} ds] \\ dF_a = g(\phi_j(Z_i)) [K_{ac} h(\phi_j(Z_i)) dz + K_{ae} ds] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $h(\phi)$ 为瞬时切屑厚度; K_{qe} ($q=t, r, a$) 为切向、径向和轴向的犁切力系数; K_{qc} ($q=t, r, a$) 为切向、径向和轴向的剪切力系数。由于侧铣加工是间断切削, 只有在侧刃与工件接触时才会出现切削现象, 所以引入判断切削刃微元是否参与切削的窗函数

$$g(\phi_j(z_i)) = \begin{cases} 1 & \varphi_{en,j}(z_i) < \phi_j(z_i) < \varphi_{ex,j}(z_i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\varphi_{ex,j}(z_i)$ 为切削刃微元的切出角; $\varphi_{en,j}(z_i)$ 为切削刃微元的切入角。

在加工低刚性薄壁零件时, 这类零件由于其本身的刚性较低, 往往会在较大的切削载荷作用下产生一定程度的弹性变形, 导致刀具与工件之间的接触关系发生改变, 从而影响加工模型中的实际参数值。对工件变形量进行定义^[8]如图 2 所示, 图 2(a) 为实际加工时的原始刀位, 图 2(b) 为等效刀位, 则工件的弹性变形量可表示为

$$\delta_d = \delta_t - \delta_r \quad (8)$$

式中: δ_d 为弹性变形量; δ_t 为受力变形量; δ_r 为残

余变形量。由于切削过程中,外力未超过材料的弹性极限,零件几乎不发生塑性变形,所以残余变形量 δ_r 的值非常小,可以忽略不计。

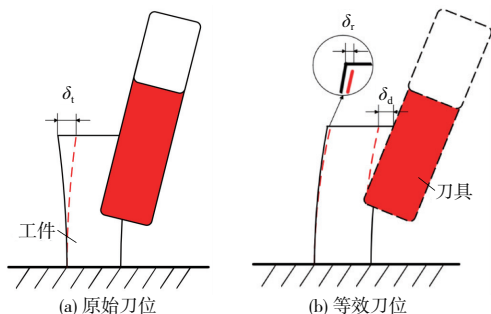


图2 工件变形定义示意图

式(6)中的切削厚度是按照刀具与工件未变形切削厚度 h 进行计算。但实际加工过程中铣削力使工件发生弹性变形。实际切削厚度 h' 由于变形量 δ_d 的生成,使 $h' < h$, 故 h' 表示为

$$h' = h - \delta_d \quad (9)$$

故引入弹性变形量 δ_i 的微元切削力表示为

$$\begin{cases} df'_i = g(\varphi_j(Z_i)) [K_{ic}(h(\varphi_j(Z_i)) - \delta_d) dz + K_{ie} ds] \\ df'_r = g(\varphi_j(Z_i)) [K_{rc}(h(\varphi_j(Z_i)) - \delta_d) dz + K_{re} ds] \\ df'_a = g(\varphi_j(Z_i)) [K_{ac}(h(\varphi_j(Z_i)) - \delta_d) dz + K_{ae} ds] \end{cases} \quad (10)$$

将引入变形量 δ_i 后获得的平均切削力记为 F' , 忽略变形量 δ_d 获得的平均切削力记为 F 。引入工件变形量后的切削过程中切削力与工件弹性变形形成耦合关系。考虑工件变形因素后,实际的瞬时切屑厚度减小,最终体现为平均切削力 F' 的减小。联立式(6)和式(10),可得平均切削力 F 与平均切削力 F' 之差与 δ_d 存在函数关系;又由于 $\delta_i \approx \delta_d$, 理论上能够通过计算两平均切削力之差,求得工件的受力变形量 δ_i 。

在机床的切削过程中,根据动量矩守恒定律,伺服电机输出的转矩需要与传动系统的转动惯量、内部摩擦力和切削力产生的力矩相平衡^[9],其关系为

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + T_f + T_q \quad (11)$$

式中: J 为传动系统转动惯量; ω 为主轴电机角速度; T 为主轴电机转矩; T_f 为摩擦力矩; T_q 为切削力矩。

切削力矩 T_q 与平均切削力 F 存在如下关系

$$T_q = rF \quad (12)$$

式中 r 是刀具半径,当主轴转速保持不变时

$$T = T_f + rF \quad (13)$$

由上式可知,理论上主轴转矩与平均切削力之间存在直接关联,它们之间应有一种线性关系。将引入变形量 δ_i 后获得的平均主轴转矩记为 T' , 不考虑工件变形平均主轴转矩记为 T , 二者的差值即为二者切削力矩的差值

$$\Delta T_q = T' - T = r(F' - F) \quad (14)$$

由于平均主轴转矩受加工工艺参数影响,且 ΔT_q 的相较于 T_q 变化较小,对 ΔT_q 与 T_q 之间求相对变化值 η , 以提高数值的稳定性并消除量纲影响,同时消除 ΔT_q 与工艺参数之间的相关性。

$$\eta = \frac{\Delta T_q}{T_q} \quad (15)$$

通过平均主轴切削转矩相对变化值 η 以及加工工艺参数,能够建立与工件的挠度变形量 δ_i 的模型。

2 基于遗传算法优化的 BP 神经网络加工变形预测模型构建

2.1 侧铣非薄壁零件平均主轴切削转矩测量实验

为建立平均主轴切削转矩相对变化值 η 以及加工工艺参数与工件的受力变形量 δ_i 的预测模型。使用数控机床进行如表1所示四因素五水平的正交切削试验,以获取不同加工工艺参数下的侧铣非薄壁零件时的平均主轴转矩 T 与摩擦转矩 T_f 。

表1 侧铣非薄壁零件水平因素表

水平	因素			
	主轴转速/ (r/min)	径向切深/ mm	轴向切深/ mm	进给速度/ (mm/min)
1	4 000	0.1	2.0	300
2	6 000	0.2	2.5	600
3	8 000	0.3	3.0	900
4	10 000	0.4	3.5	1 200
5	12 000	0.5	4.0	1 500

以主轴转速 6 000 r/min, 径向切深 0.3 mm, 轴向切深 4 mm, 进给速度 1 200 mm/min 的实验加工工艺参数为例,其主轴转矩如图3所示。在刀具切削到工件之前,主轴转矩用于克服机床传动损耗和主轴与刀具的空气阻力等;当刀具开始切除工件时,主轴转矩增大并在一定范围内浮动,此时获得的主轴转矩为该转速下的摩擦转矩 T_f 和切削转矩 T_q 叠加的结果。

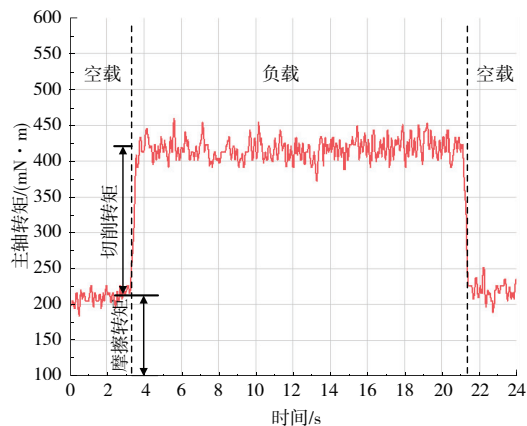


图3 非薄壁零件主轴转矩

使用该实验数据处理方法获得正交试验方案的所有加工工艺参数情况的平均切削转矩 T_q , 正交试验方案和实验数据处理结果如表2所示。

表2 侧铣非薄壁零件正交试验方案及实验数据

实验 编号	主轴 转速/ (r/min)	径向 切深/ mm	轴向 切深/ mm	进给 速度/ (mm/min)	平均切削 转矩/ (mN·m)
1	6 000	0.2	3.5	900	52.54
2	8 000	0.4	3.0	300	28.47
3	10 000	0.1	2.5	1 200	2.56
4	12 000	0.3	2.0	600	1.50
5	4 000	0.5	4.0	1 500	264.00
6	8 000	0.3	2.5	1 500	61.61
7	10 000	0.5	2.0	900	40.38
8	12 000	0.2	4.0	300	21.74
9	4 000	0.4	3.5	1 200	159.71

续表2

实验 编号	主轴 转速/ (r/min)	径向 切深/ mm	轴向 切深/ mm	进给 速度/ (mm/min)	平均切削 转矩/ (mN·m)
10	6 000	0.1	3.0	600	194.74
11	10 000	0.4	4.0	600	46.24
12	12 000	0.1	3.5	1 500	54.97
13	4 000	0.3	3.0	900	80.87
14	6 000	0.5	2.5	300	47.77
15	8 000	0.2	2.0	1 200	27.15
16	12 000	0.5	3.0	1 200	64.17
17	4 000	0.2	2.5	600	40.42
18	6 000	0.4	2.0	1 500	73.97
19	8 000	0.1	4.0	900	30.46
20	10 000	0.3	3.5	300	44.29
21	4 000	0.1	2.0	300	8.54
22	6 000	0.3	4.0	1 200	112.38
23	8 000	0.5	3.5	600	83.55
24	10 000	0.2	3.0	1 500	26.46
25	12 000	0.4	2.5	900	38.53

2.2 侧铣薄壁零件平均主轴切削转矩测量实验

与上述实验类似,为获取侧铣不同刚度工件以及不同加工工艺参数情况下的薄壁零件平均主轴切削转矩 T_q ,使用数控机床进行如表3所示六因素五水平的正交切削试验,并以此获得不同加工工艺参数下的侧铣不同刚度的薄壁零件平均主轴切削转矩 T'_q ,并测量该实验条件下的工件切削加工变形量。

表3 侧铣薄壁零件水平因素表

水平	因素					
	主轴转速/(r/min)	径向切深/mm	轴向切深/mm	进给速度/(mm/min)	薄壁厚度/mm	薄壁高度/mm
1	4 000	0.1	2.0	300	2.0	32
2	6 000	0.2	2.5	600	2.5	28
3	8 000	0.3	3.0	900	3.0	24
4	10 000	0.4	3.5	1 200	3.5	20
5	12 000	0.5	4.0	1 500	4.0	16

实验机床为 JDGR400-A13S 五轴高速加工中心;刀具为整体式 3 刃整体螺旋立铣刀,直径 D 为 10 mm;工件材料为 2A70 铝合金,工件形状为

倒“T”型零件,长度 180 mm。正交试验方案和实验数据测量和处理结果如表4所示。

表4 侧铣薄壁零件正交试验方案及实验数据

实验编号	主轴转速/ (r/min)	径向切深/ mm	轴向切深/ mm	进给速度/ (mm/min)	薄壁厚度/ mm	薄壁高度/ mm	平均切削转矩/ (mN·m)	中心点 变形量/ μm
1	6 000	0.2	3.5	900	4.0	32	51.05	16
2	8 000	0.4	3.0	300	4.0	28	36.76	26
3	10 000	0.1	2.5	1 200	4.0	24	8.22	16
4	12 000	0.3	2.0	600	4.0	20	8.98	17
5	4 000	0.5	4.0	1 500	4.0	16	257.82	30
6	8 000	0.3	2.5	1 500	3.5	32	65.85	21
7	10 000	0.5	2.0	900	3.5	24	38.20	7
8	12 000	0.2	4.0	300	3.5	24	30.84	23
9	4 000	0.4	3.5	1 200	3.5	20	163.12	10
10	6 000	0.1	3.0	600	3.5	16	31.91	1
11	10 000	0.4	4.0	600	3.0	32	54.61	26
12	12 000	0.1	3.5	1 500	3.0	28	32.53	5
13	4 000	0.3	3.0	900	3.0	24	88.74	10
14	6 000	0.5	2.5	300	3.0	20	54.36	7
15	8 000	0.2	2.0	1 200	3.0	16	31.85	10
16	12 000	0.5	3.0	1 200	2.5	32	58.43	45
17	4 000	0.2	2.5	600	2.5	28	24.13	20
18	6 000	0.4	2.0	1 500	2.5	24	80.38	34
19	8 000	0.1	4.0	900	2.5	20	31.86	10
20	10 000	0.3	3.5	300	2.5	16	20.45	15
21	4 000	0.1	2.0	300	2.0	32	14.38	15
22	6 000	0.3	4.0	1 200	2.0	28	99.29	40
23	8 000	0.5	3.5	600	2.0	24	107.90	30
24	10 000	0.2	3.0	1 500	2.0	20	51.32	13
25	12 000	0.4	2.5	900	2.0	16	41.18	16

2.3 遗传算法优化 BP 神经网络预测方法

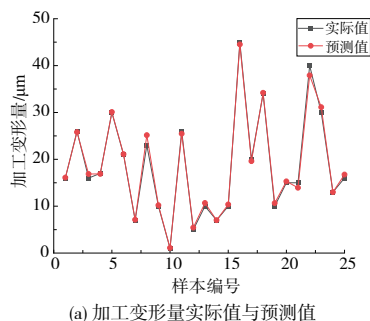
BP 神经网络,又称为反向传播神经网络,是一种多层无反馈网络结构。遗传算法是一种模仿生物进化中的自然选择过程的计算策略。

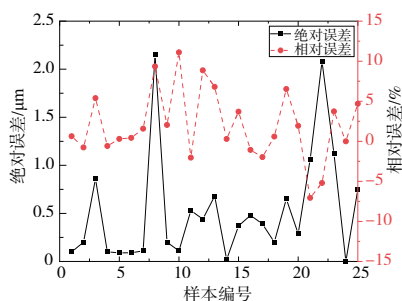
本文通过使用遗传算法优化神经网络的权重和阈值,改进 BP 神经网络的学习效果和效率,并以此建立加工变形预测模型。根据上文的薄壁零件铣削加工变形模型,选取了对加工变形量影响较大的 5 个因素为神经网络的输入,以加工变形量为输出。

设置最大训练次数为 10 000 次,学习率为 0.01,目标误差阈值为 0.000 1。网络的权重和阈值优化采用遗传算法训练得到的最优个体。初始种群规模设定为 100。对于非最优个体,则通过设定的交叉概率和变异概率进行处理,以生成新

的个体。在本网络中, $p_c=0.7$, $p_m=0.01$,最大进化代数数为 1 000。

训练的遗传算法优化 BP 神经网络的结果如图 4 所示,加工变形量实际值与预测值如图 4(a)所示;加工变形量预测值的绝对误差与相对误差如图 4(b)所示。





(b) 加工变形量预测值的绝对误差与相对误差

图4 遗传算法优化BP神经网络结果分析

3 薄壁零件切削加工变形控制方法

考虑到薄壁零件的复杂性和控制方法的适用性,通过镜像补偿原理^[10]补偿薄壁零件加工过程中的变形。镜像补偿原理如图5所示。初始理想走刀轨迹如刀轨B所示,由于加工过程中的工件弹性变形引起的变形误差,刀轨B可等效为相对于工件表面的实际刀轨A。由于上文的薄壁零件加工变形预测方法和加工过程中的实时数据结合获得了刀位点的预测加工变形量,将预测加工变形量补偿到相应的刀位点坐标上,即生成了刀轨C,该刀轨在考虑薄壁零件变形的条件下可等效为相对于工件表面的理想刀轨B,由此实现了刀轨的镜像误差补偿。

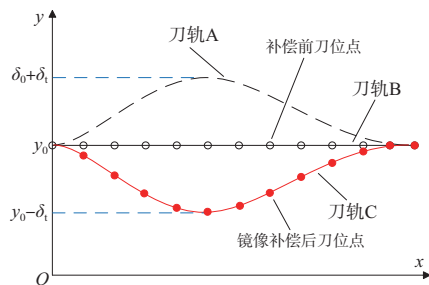


图5 镜像补偿原理示意图

在变形后的工件表面上选取关键节点,并以这些节点重构新的曲面,如图6所示。使用补偿后的镜像补偿重构模型生成新的数控加工程序,进而得到补偿后的刀具轨迹。

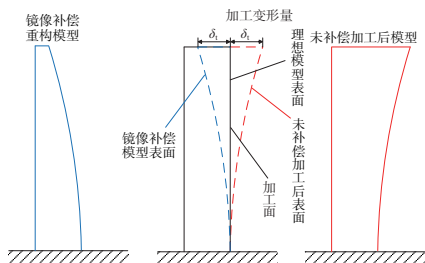


图6 镜像补偿重构模型示意图

4 验证实验

以铣削加工涡旋盘零件为例,验证本文提出的变形预测与控制方法的可行性和有效性。本次加工的涡旋盘零件三维模型如图7所示,涡旋盘零件的上层薄壁部分厚度为3 mm,材料为2A70铝合金。

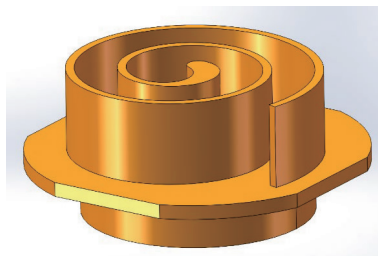


图7 涡旋盘三维模型

铣削基于JDGR400-A13S五轴高速加工中心进行,实验选用的刀具为某航空硬质合金工具公司生产的硬质合金3刃整体螺旋立铣刀,铣刀直径为10 mm。毛坯经过粗加工使涡旋盘的薄壁区域剩余0.3 mm余量,随后进行精加工与加工数据采集。精加工的加工参数如表5所示。

表5 涡旋盘精加工加工参数

主轴转速/ (r/min)	径向切深/ mm	轴向切深/ mm	进给速度/ (mm/min)
8 000	0.3	3	900

在加工过程中,采集的未经补偿的涡旋盘加工过程主轴转矩数据如图8所示。精加工过程的轴向切深为3 mm,图8中每个矩形区域为一个周期,对应一次垂直下刀。每个周期内,主轴转矩随涡旋盘薄壁的刚度变化而变化。

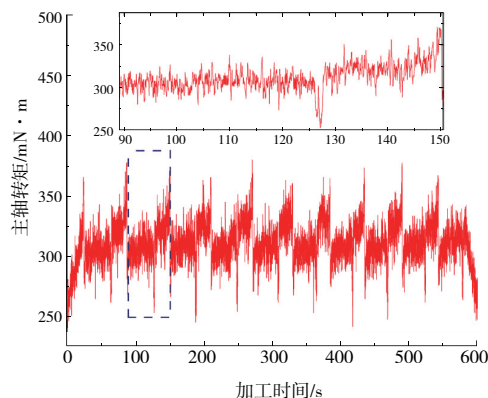


图8 加工未补偿涡旋盘的主轴转矩数据

将主轴转矩数据输入上文提出的基于主轴切

削转矩相对变化值的薄壁零件加工变形预测模型,获得涡旋盘薄壁处的变形量数据。对薄壁相应位置进行镜像误差补偿,使用三维建模软件重构涡旋盘三维模型,并基于补偿后的三维模型生成新的数控加工程序。补偿后的涡旋盘加工结束后,使用三坐标测量仪对两个涡旋盘分别进行检测,并与零件的理论三维模型进行对比。

在涡旋盘内侧曲率半径最大处的顶端,零件刚度最小,加工变形量最大。将测量点的加工变形数据导出,未补偿涡旋盘与补偿涡旋盘的绝对偏差量如图9所示。

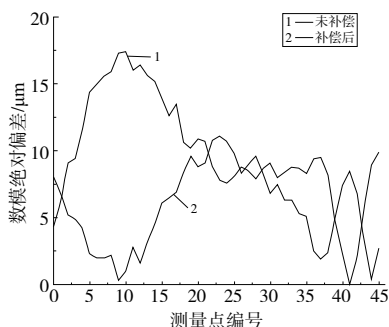


图9 涡旋盘绝对偏差对比图

如图9所示,在涡旋盘刚度最低处,未补偿的涡旋盘平均变形量为 $9.99 \mu\text{m}$,最大变形量为 $17.4 \mu\text{m}$;补偿后的涡旋盘平均变形量为 $5.70 \mu\text{m}$,最大变形量为 $11.1 \mu\text{m}$;补偿后的涡旋盘平均变形量减小42.9%,最大变形量减小36.2%,且补偿后的加工变形量均匀度较高。

5 结语

本文针对薄壁件铣削过程加工变形等问题,提出了以平均主轴切削转矩相对变化值为特征预测加工变形量的方法。经实验验证,该方法能够有效减少铣削过程薄壁件加工变形量。后续应优

化薄壁件加工铣削过程采集的信号种类和质量,提高信号的采样率和分辨率,有助于进一步提升预测结果的准确性。

参考文献:

- [1] LIU S M, SHAO X D, GE X B, et al. Simulation of the deformation caused by the machining cutting force on thin-walled deep cavity parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92 (9/10/11/12): 3503-3517.
- [2] WU G, LI G X, PAN W C, et al. A prediction model for the milling of thin-wall parts considering thermal-mechanical coupling and tool wear [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107 (11/12): 4645-4659.
- [3] 倪丽君. 计算机辅助夹具设计中的装夹优化技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
- [4] 张婷. 航空薄壁件装夹布局优化研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2017.
- [5] 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.
- [6] 马鹏举, 廖志兵, 童赛赛, 等. 改善航空超薄壁零件加工刚性的方法[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49 (6): 13-17.
- [7] ALTINTAS Y, BER A A. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design [J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 54 (5): B84.
- [8] 陈志涛. 基于切削厚度迭代计算的薄壁件加工误差建模[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2020.
- [9] 黄颖旭, 李波, 田锡天. 基于主轴电流的铣削力间接监测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (1): 93-101.
- [10] 杨博. 薄壁零件五轴铣削变形预测与误差补偿技术研究[D]. 太原:中北大学, 2021.

收稿日期:2024-03-04

(上接第19页)

- [17] 陈金龙, 尹承振, 孙翠茹. 用于二维分布残余应力场测量的渐进裂纹柔度法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51 (5): 475-482.
- [18] 雷晓娟, 徐永福, 崔凤奎. 基于裂纹柔度的冷滚轧花键残余应力研究[J]. 制造技术与机床, 2020 (1): 98-102.
- [19] 罗玉梅. 裂纹柔度法测喷丸残余应力的研究[J]. 内燃机与配件, 2018 (20): 53-55.
- [20] 李晨, 楼瑞祥, 王志刚, 等. 残余应力测试方法的研究进展[J]. 材料导报(纳米与新材料专辑), 2014 (2):

153-158.

- [21] 董大林, 王刚, 王栋. 电化学剥层在齿轮钢残余应力测量中的应用[J]. 表面技术, 2018, 47 (10): 315-320.
- [22] 张娟, 巴发海, 李凯. 残余应力测试结果的定性分析与判断[J]. 无损检测, 2020, 42 (12): 1-3.
- [23] 姚晨光, 安志斌, 杨竹芳. Inconel718 合金增材制造残余应力分布与数值模拟分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48 (4): 134-136, 179.

收稿日期:2025-04-11