

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.018

基于反馈插补算法的薄壁塑料零件数控加工变形误差控制

桑晶

(南京机电职业技术学院, 江苏 南京 211306)

摘要:为了控制数控加工过程中零件表面产生的变形误差,提出基于反馈插补算法的薄壁塑料零件数控加工变形误差控制方法。对薄壁塑料零件数控加工过程展开建模分析,发现切削深度是影响加工变形误差的主要因素。将切削深度作为长短期记忆网络的输入,预测薄壁塑料零件的数控加工变形误差;采用反馈插补算法确定零件表面变形的关键区域,并根据计算得到的变形量修正切削深度,实现误差补偿。实验与分析结果表明:在不同切削位置处,可准确地预测薄壁塑料零件的数控加工变形误差,且控制后得到的零件表面变形明显改善。

关键词:反馈插补算法;建模分析;薄壁塑料零件;长短期记忆网络;变形误差控制

中图分类号:TH164 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0081-04

Deformation Error Control of Thin-walled Plastic Parts in CNC Machining Based on Feedback Interpolation Algorithm

SANG Jing

(Nanjing Institute of Mechatronic Technology, Nanjing 211306, China)

Abstract:To control the deformation errors generated on the surface of the parts during the CNC machining process, a deformation error control method for thin-walled plastic parts CNC machining based on feedback interpolation algorithm is proposed. The CNC machining process of thin-walled plastic parts are modeled and analyzed, finding that cutting depth is the main factor affecting machining deformation error. The cutting depth is used as input for the long short-term memory network to predict the deformation error of thin-walled plastic parts during CNC machining. The feedback interpolation algorithm is applied to determine the key areas of surface deformation of the part, and the cutting depth is corrected based on the calculated deformation amount to achieve error compensation. The experimental and analytical results indicate that the CNC machining deformation error of thin-walled plastic parts can be accurately predicted at different cutting positions, and the surface deformation of the parts obtained after control is significantly improved.

Keywords:feedback interpolation algorithm; modeling analysis; thin-walled plastic parts; long short-term memory network; deformation error control

0 引言

优化数控加工过程中的装夹方式、刀具路径和切削深度等可以有效降低变形误差^[1],在加工过程中控制热效应也能够减小变形误差,包括优化切削参数、采用冷却液等。深入研究薄壁塑料零件数控加工变形误差控制方法可以促进相关行业的良好发展,提高零件的生产效率和加工质量。

文献[2]设定机床切削受力极限值范围,优化刀具路径,但是由于材料变异性的存在,加工过程切削力变化情况模拟过程可能无法完全覆盖所有的材料变化情况,从而影响模拟结果的准确性。

文献[3]在 Abaqus 有限元模拟软件中分析零件的变形情况,但是精度较低,无法准确地获取零件表面的变形程度。文献[4]将零件分为 4 个典型特征,通过灵敏度分析方法获取不同特征类型下零件产生的变形误差,但该方法在计算变形误差时没有考虑环境因素与设备因素,计算得到的变形值与实际不符。文献[5]建立了零件的铣削模型,根据预测结果实现误差控制,该方法控制后零件表面的变形程度没有得到有效改善,表明误差控制精度低。

为了解决上述方法中存在的问题,本文提出基于反馈插补算法的薄壁塑料零件数控加工变形误差控制方法。

基金项目:南京机电-南钢教师企业实践流动站项目(Ldz2023001)

作者简介:桑晶(1980—),女,山东邹城人,讲师,学士,研究方向为机械制造及自动化,ctionin@163.com。

1 加工过程建模及加工变形误差

1.1 输入输出过程描述

数控加工是根据提前设定的加工程序从加工前模型上移除相关材料,最后获得薄壁塑料零件的过程。可用输入输出过程描述上述的材料移除过程^[6-7]。基于反馈插补算法的薄壁塑料零件数控加工变形误差控制方法将进给速度 v_f 、参考模型 D_{ref} 、主轴转速 v_c 和切削深度 s_p 作为输入,将完成加工后的薄壁塑料零件作为输出 D_{real} 。用数学函数 $g(\cdot)$ 描述薄壁塑料零件数控加工的过程:

$$D_{real} = g(v_f, D_{ref}, v_c, s_p) \quad (1)$$

在加工程序编制过程中,可将参考模型作为依据生成刀具轨迹。通过统计与分析可获得薄壁塑料零件的具体几何模型 $D_{measure}$,在不考虑测量误差的前提下,薄壁塑料零件的实际模型即为上述几何模型 $D_{real} = D_{measure}$ 。

在数控加工过程中,薄壁塑料零件产生的热误差和弹塑性变形误差是由零件与铣削刀具之间相对运动生成的力热耦合作用造成的。导致零件数控加工结果与设计模型存在偏差的主要因素包括环境因素、几何制造误差、测量误差以及装夹定位误差等,可用综合误差 R_{com} 描述上述产生的偏离差值:

$$R_{com} = D_{real} - D_{ref} \quad (2)$$

在工况不存在差异且工步相同的条件下,在不同薄壁塑料零件进行数控加工过程中进给速度 v_f 和主轴转速 v_c 之间的差异较小,因此可将以上两个参数作为零件数控加工过程中的常量输入,将式(1)转变为

$$D_{real} = g(D_{ref}, s_p) \quad (3)$$

分析式(3)可知,切削深度 s_p 与参考模型 D_{ref} 直接影响薄壁塑料零件数控加工的结果。

1.2 加工变形误差预测

将切削深度 s_p 作为样本 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_t, \dots, X_i\}$,采用长短期记忆网络展开薄壁塑料零件数控加工变形误差预测。

设 X_t 、 C_t 、 S_t 分别表示记忆单元当前在网络中的输入、对应的状态以及输出^[8-9], C_{t-1} 、 S_{t-1} 表示记忆单元前一步对应的状态和实际输出, σ 是 Sigmoid 函数,其取值区间为 $[0, 1]$,如图 1 所示。

根据当前输入的切削深度样本 X_t 以及记忆单元上一步输出 S_{t-1} 遗忘门可对上一步记忆单元状态 C_{t-1} 的遗忘百分比进行控制,用 W_f 描述遗忘

门对应的权值,获得输出 g_t ,设 b_f 表示遗忘门的阈值。基于反馈插补算法的薄壁塑料零件数控加工变形误差控制方法引入 $\tanh$ 函数对新信息 $\bar{C}_t$ 的计算:

$$\bar{C}_t = \tanh[W_c(S_{t-1}, X_t) + b_c] \quad (4)$$

式中: b_c 、 W_c 分别描述的是记忆单元对应的阈值和权值。结合输出 g_t 、 $\bar{C}_t$ 、 i_t 确定记忆单元在 LSTM 网络中的状态 C_t :

$$C_t = g_t \otimes C_{t-1} + i_t \otimes \bar{C}_t \quad (5)$$

根据记忆单元的状态 C_t 获得 LSTM 网络的输出,即薄壁塑料零件数控加工变形误差 O_t 。

$$\begin{cases} O_t = \sigma[W_o(S_{t-1}, X_t) + b_o] \\ S_t = O_t \otimes \tanh(C_t) R_{com} \end{cases} \quad (6)$$

式中: b_o 、 W_o 分别表示输出门对应的阈值与权值。

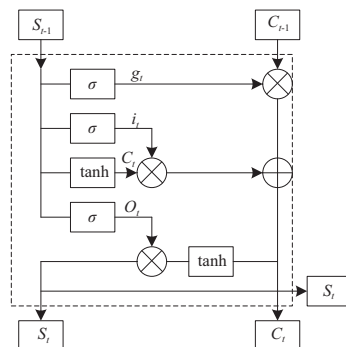


图 1 记忆单元

2 基于反馈插补算法的误差控制

所提方法采用反馈插补算法实现薄壁塑料零件数控加工变形误差控制,根据 1.2 节确定变形量 O 。在具体补偿过程中,沿变形的反方向控制刀具偏移 O 距离,反馈插补算法的补偿原理如图 2 所示。

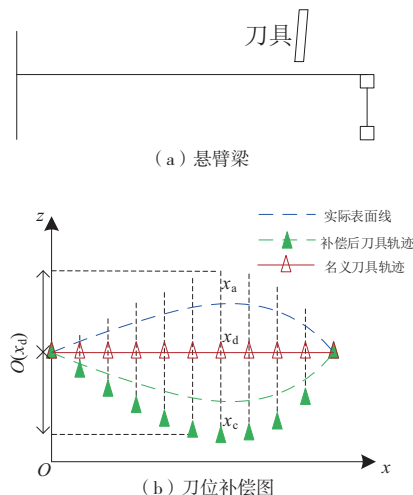


图 2 刀具轨迹修正

图2中,由于薄壁塑料零件受力变形,使理想刀位 x_d 在数控加工时变为加工点位置 x_a ,为了控制变形误差,刀具此时需要反向偏置 $O(x_d)$,使其处于 x_c 处。

采用反馈插补算法实现薄壁塑料零件数控加工变形误差控制的具体过程如下。

1) 在名义刀具轨迹上随机选取 m 个点 $A_i (i=1, 2, \dots, m)$, 其中, m 可根据薄壁塑料零件的加工精度确定,两者之间呈正比,将数控加工变形程度作为依据确定控制点的密度^[10-11]。

2) 通过1.2节确定各点 A_i 处对应的变形量 O_i 。

3) 结合柔性力学模型与镜像补偿法确定补偿量 u_i ^[12-13]:

$$u_i = \frac{u'_i O_i}{O'_i} \quad (7)$$

式中: u'_i 、 O'_i 分别表示第 i 个工位的仿真优化补偿量与仿真变形量。

4) 根据补偿量 u_i 对控制点的位置展开修正:

$$A'_i = A_i + u_i \quad (8)$$

式中 A'_i 表示修正后的控制点位置。

5) 插值计算全部 A'_i , 获得修正后的刀具轨迹,实现薄壁塑料零件数控加工变形误差控制。

在实际薄壁塑料零件数控加工变形误差控制过程中,如果补偿全部位置,花费的时间较长,降低了控制效率。实际数控加工过程中,由于变形表面通常为曲线(图3),但当误差处于公差带 Y_d 范围内时,薄壁塑料零件就符合尺寸要求,因此可将公差要求作为变形误差控制的依据。薄壁塑料零件表面的轮廓线在数控加工过程中属于一个渐变的过程,选取若干关键点,在表面上将其作为依据修正刀具轨迹^[14],确定变形超差的边界点 W_0 、 W_1 ,在此基础上对超差部分(W_0-W_1)刀位的切削深度展开补偿,实现薄壁塑料零件数控加工变形误差控制。

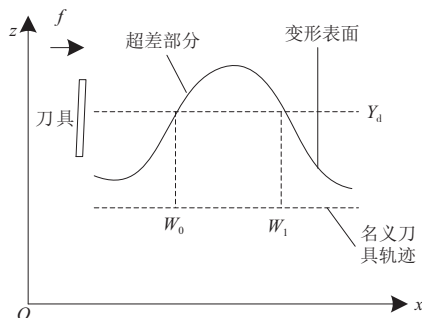


图3 公差带与误差

a) 用 Y_d 表示薄壁塑料零件加工表面的变形公差带宽,拟合处理1.2节计算得到的变形值获得变形分布图,以此确定变形关键点,连接变形关键点获得薄壁塑料零件变形的关键区域。

b) 利用式(8)得到关键区域变形量的补偿量,对该区域的切削深度展开修正^[15-16],实现薄壁塑料零件数控加工变形误差控制。

3 实验与分析

为了验证基于反馈插补算法的薄壁塑料零件数控加工变形误差控制方法的整体有效性,需要对其展开测试。本次测试所用的薄壁塑料零件相关参数如表1所示。

表1 薄壁塑料零件参数

参数	数值
弹性模量/GPa	70
长度/mm	49.52
网格数量	20×14
高度/mm	38.2
厚度/mm	3.0

数控加工相关参数如表2所示。

表2 加工参数

参数	数值
每齿进给量/mm	0.01
切削刃数	2
轴向切削深度/mm	38
铣刀螺旋角/(°)	30
径向切削深度/mm	1
铣刀直径/mm	20
切削速度/(m/min)	15.2
齿数	3

采用基于反馈插补算法的薄壁塑料零件数控加工变形误差控制方法、文献[3]方法和文献[4]方法对不同切削位置的变形误差展开预测,结果如图4所示,图中实线为实际误差,黑点为预测误差。

数控加工变形误差预测是变形误差控制的前提。由图4可知,在不同切削位置处,所提方法均可准确地预测薄壁塑料零件的数控加工变形误差,文献[3]方法和文献[4]方法的变形误差预测

结果偏离实际误差曲线,存在误差预测精度低的问题,无法为后续的误差控制提供可靠依据。

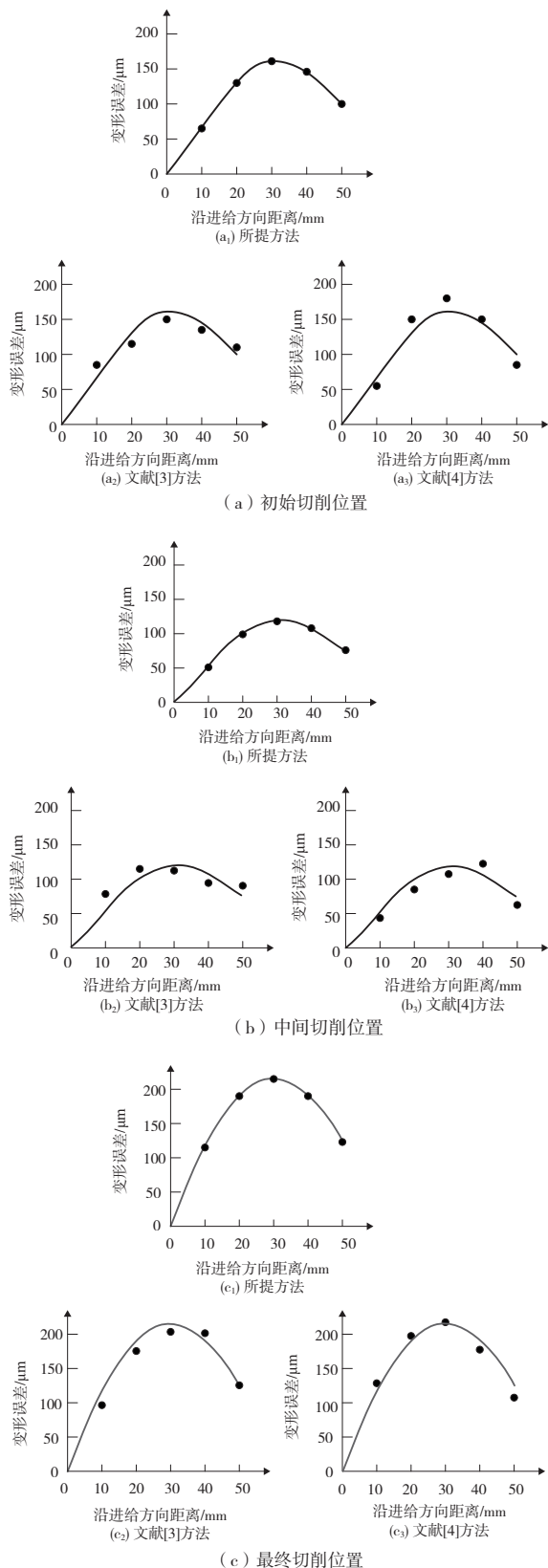


图4 加工变形误差预测结果

完成误差预测后,采用上述方法展开薄壁塑料零件数控加工变形误差控制后,零件表面的变形情况如图5所示。

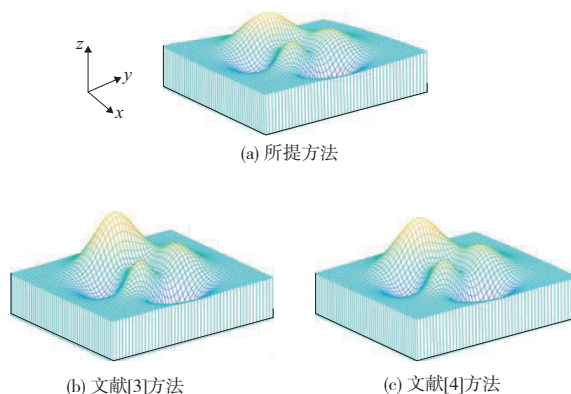


图5 零件加工变形程度

由图5可知,采用文献[3]方法和文献[4]方法展开误差控制后,零件表面仍然存在较大程度的加工变形。与上述两种方法相比,经所提方法控制后,零件表面变形明显改善,表明所提方法具有较高的误差控制精度。所提方法采用反馈补差算法根据薄壁塑料零件数控加工变形值对切削深度展开控制,实现了加工变形误差控制,提高了控制精度。

4 结语

针对目前零件数控加工变形误差控制方法在误差预测与控制方面存在的问题,提出基于反馈插补算法的薄壁塑料零件数控加工变形误差控制方法。根据数控加工特点对变形误差展开预测,通过反馈插补算法实现误差补偿,完成误差控制,可准确地预测零件的数控加工变形误差,并以此为依据展开误差控制,提高了控制精度,为薄壁塑料零件的加工及应用提供了保障。

参考文献:

- [1] 刘冉冉,宁玲玲,郑健.大数量级难加工小孔零件数控加工工艺分析及切削参数优化研究[J].机床与液压,2022,50(23):141-147.
- [2] 胡伟锋,刘楚生,暴志方,等.基于VERICUT切削优化五轴加工铝合金零件的应用分析[J].工具技术,2022,56(12):102-106.
- [3] 江敏,董久虎,何美蝶,等.汽轮机薄壁叶片加工变形预测及误差补偿[J].工具技术,2022,56(8):147-152.

(下转第94页)

务书、项目设计及图样、项目实物制作、项目汇报展示、项目是否申请专利等,多元评价学生学习效果,促进学生学以致用,增强学生的获得感。

3 “机械创新设计”课程改革效果

围绕自身感兴趣的项目主题,学生完成了项目的创意构思到设计与制作的全过程学习,学生的知识、技能与素质在项目的深入中逐步得到螺旋式提升,有效达成了课前设定的三维教学目标。通过发现问题、产生创意、综合利用数字化制造工具进行设计及制造,而后在班级分享成果,使学生体验了创客“创新、实践、分享”的全过程,学习迁移能力也得到提升。创新设计成果通过学校申报国家专利,专利可作为创新能力的有力证明。同时,参加“挑战杯”、“互联网+”等各类比赛,在比赛中历练,提升学生们作为未来机械设计师的职业归属感、荣誉感。

4 结语

以“创新、实践、分享”的创客教育理念对“机

械创新设计”课程进行课程改革,在实践中不断总结教育教学方法,效果显著,其思路和方法可为其他院校该课程的开展及机械创新人才的培养提供一定参考。

参考文献:

- [1] 李峰,秦晓峰,李秀红,等.新工科机械类创新人才培养模式下实践教学体系构建[J].机械设计,2023,40(11):135-140.
- [2] 孙建芳.项目教学法在“机械设计”课程教学的实践[J].装备制造技术,2022(4):186-187,201.
- [3] 周庆礼.面向高等职业教育的创客教育内涵与特征研究[J].江苏高教,2021(5):110-113.
- [4] 孙亮波,刘小翠,桂慧,等.“机械创新设计”课程教学方案分析[J].武汉轻工大学学报,2021,40(6):113-118.
- [5] 连碧华.高职“工学结合、校企共育”人才培养模式研究[J].机械制造与自动化,2022,51(1):87-89,93.
- [6] 钟元.面向制造和装配的产品设计指南[M].北京:机械工业出版社,2011.

收稿日期:2024-04-17

(上接第84页)

- [4] 卢成伟,钱博增,王慧敏,等.工件分特征下的五轴数控机床关键几何误差分析与补偿方法[J].中国机械工程,2022,33(14):1646-1653.
- [5] YANG S, YANG J X, WANG F Y. Finite element simulation and deformation control of high-Speed Milling of Al7050-T7451 thin-walled parts[J]. Recent Patents on Engineering, 2022, 16(6):93.
- [6] 曹洋,宁雪梅,秦剑,等.复杂多特征 SR3 薄壁塑料壳体多向抽芯注塑模具设计[J].塑料工业,2022,50(增刊1):76-81.
- [7] 袁宏培,王胜.农机部件模具数控加工及仿真建模研究—基于UG和VERICUT[J].农机化研究,2023,45(6):203-207.
- [8] SATHYANARAYANA N, NARASIMHAMURTHY A M. Vehicle type detection and classification using enhanced Relief algorithm and long short-term memory network[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series B, 2023, 104(2):485-499.
- [9] PRINCE, HATI A S. Convolutional neural network-long short term memory optimization for accurate prediction of airflow in a ventilation system[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 195:116618.

- [10] 徐建明,李想.基于双B样条的手机点胶轨迹插补算法研究[J].浙江工业大学学报,2022,50(4):355-364.
- [11] 姚学峰,李超.基于改进NURBS曲线插补算法的食品分拣机器人轨迹规划[J].食品与机械,2022,38(3):80-85.
- [12] 吴子腾,张立强,杨青平,等.蒙皮镜像加工误差实时补偿优化方法研究[J].机械科学与技术,2023,42(4):644-650.
- [13] 王伟,袁俊鹏,张小俭,等.综合考虑薄壁叶片弹性弯曲变形和让刀的铣削误差补偿方法研究[J].现代制造工程,2023(8):80-86,140.
- [14] 邓华波,王玮琪,梁务宇,等.一种拟合三维复杂螺旋刀具轨迹NURBS插值逼近方法[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(5):937-944.
- [15] 张建涛,刘志峰,李彦生,等.基于相似理论的重型数控机床—基础系统位移变形研究[J].机械工程学报,2022,58(7):309-316.
- [16] 李国龙,陈孝勇,李喆裕,等.采用天鹰优化卷积神经网络的精密数控机床主轴热误差建模[J].西安交通大学学报,2022,56(8):51-61.

收稿日期:2024-04-25