

五轴数控机床加工误差动态修正方法研究

于栋梁

(淄博市技师学院, 山东 淄博 255025)

摘要:为修正五轴数控机床加工误差,提高五轴数控机床加工质量,提出一种新的五轴数控机床加工误差动态修正方法。构建五轴数控机床加工误差计算模型,获取五轴数控机床加工的刀心方位、刀轴方位轮廓误差;锁定误差方位后,通过五轴数控机床误差的动态实时补偿方法,实现五轴数控机床加工误差动态修正。研究表明:所提方法可实现全方位、高效率的五轴数控机床加工误差修正,应用价值较高。

关键词:五轴数控机床;加工误差;刀心方位

中图分类号:TG659 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)01-0056-05

Research on Dynamic Correction Method of Machining Error in Five-axis CNC Machine Tools

YU Dongliang

(Zibo Technician College, Zibo 255025, China)

Abstract: To correct the machining error of five-axis CNC machine tool and improve the machining quality of five-axis CNC machine tool, a new dynamic correction method for machining error of five-axis CNC machine tool is proposed. The machining error calculation model of five-axis CNC machine tool is established to obtain the cutter center orientation and cutter axis orientation contour error of five-axis CNC machine tool. After the error orientation being locked, the dynamic real-time compensation method of five-axis CNC machine tool error is used to realize the dynamic correction of machining error of five-axis CNC machine tool. The results show that the proposed method can achieve all-round and high-efficiency machining error correction of five-axis CNC machine tool with high application value.

Keywords: five-axis CNC machine tool; machining error; cutter core orientation

0 引言

五轴数控机床是制造业的重要加工设备,它集成了多种先进技术,是一国综合工业能力的良好体现,提高五轴数控机床的加工精度已成为国内外学者的当务之急。五轴数控机床的加工能力是普通三轴机床无法比拟的,它能够加工螺旋桨叶片、汽轮机叶轮、螺旋锥齿轮等复杂曲面零件,是国防工业生产重要装备的核心组成部分,其制造精度和质量决定了装备的性能,对一个国家来说,具有战略意义。

五轴数控机床属于当下实施高精度、复杂工件加工的核心装备,它的内部核心零件为移动轴与旋转轴,仅需一次装夹便能加工形状各异的自由曲面工件,不但加工时间短,还能加工获取质量较好的工件^[1]。在很多因素的协同作用中,五轴数控机床在加工工件时存在一定机床误差。由于五轴数控机床里存在多余的两个旋转轴,内部结构具有多样化,致使它的加工误差元素也存在多样化。在航空航天、精密机械和高精医疗设备等应用领域,五轴联动数控机床属于必需机床,如果机床精度较低致使其加工误差较大,则工件的加工质量得不到保证。怎样高效率检测机床加工误差并实施修正属于目前机床加工质量优化

的核心步骤^[2-3]。就工件加工质量与经济性的角度而言,对五轴数控机床加工误差动态修正存在一定的积极意义,本文提出一种新的五轴数控机床加工误差动态修正方法,对五轴数控机床加工误差实施动态修正。

1 加工误差动态修正

1.1 五轴数控机床加工误差计算模型

1) 运动学正解模型

将五轴数控机床五种进给轴的运动方位依次设成 a、b、c、d、e,计算五轴数控机床加工的工件坐标系中刀心方位坐标与刀轴方向矢量,如图 1 所示。

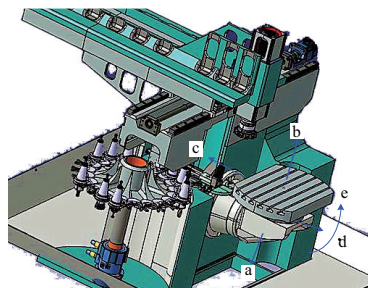


图 1 五轴数控机床加工运动方位

作者简介:于栋梁(1981—)男,山东淄博人,副教授,本科,主要从事数控加工教学。

坐标变换矩阵 H 为

$$H = \text{Trans}(p_a, p_b, p_c) \cdot \text{Rot}(d, -e) \times \text{Rot}(b, -d) \times \text{Trans}(-a, -b, c) = \begin{bmatrix} \cos e & \cos d \sin e^2 \sin d & p_a - a \cos e - \cos b \sin e + c \sin d \\ -\sin e & \cos d \sin e \sin d \cos e & p_a + a \sin e - \cos b \sin e + c \sin d \\ 0 & -\sin d \cos d & p_c + b \sin d \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 (p_a, p_b, p_c) 表示五轴数控机床加工刀具的切削点坐标。那么五轴数控机床加工刀心方位矩阵为

$$\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ 1 \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_a - a \cos e - b \cos d \sin e + c \sin d \sin e \\ Q_b + a \cos e - b \cos d \sin e + c \sin d \sin e \\ Q_c + b \sin d + c \cos d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 Q_a, Q_b, Q_c 表示五轴数控机床加工刀心方位坐标。

刀轴正向方向矢量为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ 0 \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin d \sin e \\ \sin d \sin e \\ \cos d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 U_a, U_b, U_c 表示五轴数控机床加工刀轴方向矢量。若五个轴的偏差依次是 t_a, t_b, t_c, t_d, t_e 时,刀心方位偏差为

$$\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_a}{\partial a} & \frac{\partial Q_a}{\partial b} & \frac{\partial Q_a}{\partial c} \frac{\partial Q_a}{\partial d} & \frac{\partial Q_a}{\partial e} \\ \frac{\partial Q_b}{\partial a} & \frac{\partial Q_b}{\partial b} & \frac{\partial Q_b}{\partial c} \frac{\partial Q_b}{\partial d} & \frac{\partial Q_b}{\partial e} \\ 0 & \frac{\partial Q_c}{\partial b} & \frac{\partial Q_c}{\partial c} \frac{\partial Q_c}{\partial d} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_a \\ t_b \\ t_c \\ t_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 ∂ 描述求偏导。刀轴方向偏差为

$$\begin{bmatrix} t U_a \\ t U_b \\ t U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_a}{\partial d} & \frac{\partial U_a}{\partial e} \\ \frac{\partial U_b}{\partial d} & \frac{\partial U_b}{\partial e} \\ \frac{\partial U_c}{\partial d} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_d \\ t_e \end{bmatrix} \quad (5)$$

2) 运动学逆解模型

已知工件坐标系中的刀心方位坐标 $[Q_a \ Q_b \ Q_c]^H$ 与刀轴方向矢量 $[U_a \ U_b \ U_c]^H$, 计算五个进给轴的运动方位。则:

$$\begin{cases} d = \arccos U_c & d \in (-\vartheta/2, \vartheta/2) \\ e = \arctan 2(U_a/U_b) & e \in (-\vartheta, \vartheta) \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos e & \sin e & 0 \\ -\cos d \sin e & -\cos d \cos e & \sin d \\ \sin d \sin e & \sin d \cos e & \cos d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_a - P_a \\ Q_b - P_b \\ Q_c - P_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: ϑ 描述取值范围; P_a, P_b, P_c 均表示二维映射参数。

3) 刀心方位轮廓误差运算模型

五轴机床的刀心方位轮廓误差属于真实刀心方位至理论轮廓曲线的距离最小值^[4-5]。假定目前采样周期理想插补点是 Q_m , Q_a 前方第 j 个插补点设成 Q_{m-j} , 目前采样周期真实刀心方位设成 U_0 , 跟随误差与理论中的刀心方

位轮廓误差依次设成 g, δ_h 。则刀心方位轮廓误差运算方法是: 分别运算和对比目前真实刀心方位 U_0 和插补点 $Q_m, Q_{m-1}, Q_{m-2}, Q_{m-3}, Q_{m-4}$ 间的间距, 如果在点 Q_{m-j} 上获取最低值, 那么将 $Q_b, Q_{m-j} = \delta_h$ 可看成刀心方位轮廓误差。则轮廓误差运算点(轮廓误差补偿点)是 Q_{m-j} 。

4) 刀轴方位轮廓误差运算模型

五轴机床的刀位数据里, 各个刀心方位均对应一种刀轴方位^[6]。因为刀轴方位矢量均属于单位矢量, 如果将矢量起点设成原点, 那么矢量中点会处于一种半径是 1 的球面中位移, 它的轨迹属于刀轴方位轨迹^[7-8]。

本文将五轴机床的刀轴方位轮廓误差设成轮廓误差补偿点上的刀轴方位矢量和真实刀轴方位矢量间的夹角^[9-10]。假定目前采样周期轮廓误差补偿点 Q_{m-j} 上参考刀轴方位矢量值是 U_0 , 那么刀轴方位轮廓误差为

$$\delta_v = \langle U_s, U_0 \rangle \quad (8)$$

式中: U_s 表示数据实际属性矢量值。如果 δ_v 属于弧度, 它的值为 U_s 和 U_0 两种矢量终点间球面圆弧的长度, 可看成相应的弦长。那么

$$\delta_v = |U_s - U_0| \quad (9)$$

确定数控机床坐标轴:

移动轴、旋转轴是数控机床的基本零件, 它们带动刀具或工件按设定的轨迹运动。为了保证控制的有序性, 需要标定数控机床的各个坐标轴。参考右手直角笛卡儿坐标系, 设定坐标系坐标轴与数控机床导轨平行, 一般先设定 z 轴, 然后再设定 x 轴和 y 轴。

轴向校准方法: 确定 z 轴方向, 一般原则是轴向, 即产生切削力的轴向。具体划分如下: 数控机床有主轴, 其轴线方向是 z 轴; 数控机床没有主轴, 其与工作台面的垂直方向是 z 轴。定位 z 轴正方向: 刀具远离工件的方向。

轴线校准方法: 确定 x 轴线方向, 一般情况下, x 轴线平行于工件安装平面。确认 x 轴正方向。数控机床有主轴, 刀具离主轴轴线的距离为 x 轴正方向; 数控机床无主轴, 刀具离主轴的距离为 x 轴正方向。

y 轴的校准方法: 已校准 z 轴和 x 轴的数控机床的 y 轴可以根据右手直角笛卡儿坐标系直接校准。

A 轴和 B 轴的操纵校准: 在标定数控机床轴、轴向和轴线之后, 将与 x 轴、 y 轴和 z 轴平行的旋转轴分别称为 A 轴和 B 轴, 根据右手螺旋定则, 确定各轴的正向 A 轴和 B 轴。

1.2 五轴数控机床误差的动态实时补偿方法

机床加工工件时, 工件加工精度受工件与刀心的相对方位影响^[11-12]。针对工件加工的随机时间段, 当使用 1.1 小节获取五轴数控机床加工工件时存在的误差后, 便能够使用五轴数控机床误差的动态实时补偿方法对其实施动态补偿^[13]。

五轴数控机床的动态实时补偿的难处是, 它存在两种旋转轴^[14-15]。机床加工时, 它的旋转轴和移动轴运动存在同步性, 旋转轴的工作转动对工件在移动轴方位的真实运动状况存在较大干扰, 则在平移运动与转动运动间具有耦合。为此, 传统的轴补偿未能符合机床真实补偿的需求, 需要全面分析移动轴与旋转轴的运动作用关联性, 提前实施解耦操作, 再实施分布补偿, 才能够有效提高误差

修正的精度。将 1.1 小节获取的 $Q_{m-j} \cdot \delta_v$ 坐标看成 $(j_e \ i_e \ w_e)$, 动态实时补偿就是将 $(j_e \ i_e \ w_e)$ 修正为 $(j_e \ i_e \ w_e)$ 。冷却液在特定情况下是纯净的, 如果外部颗粒混在冷却液中就会降低刀刃的使用寿命, 对零件的加工质量也造成一定影响。当与冷却液接触时, 从工件切下的金属颗粒会变硬; 当它落在砂轮和加工工件之间时, 硬颗粒会在工件上留下划痕。

事实上, 冷却液很快就会变硬, 因为在加工过程中切割下来的金属颗粒和沙子颗粒会随冷却液一起落在箱内, 然后通过泵将冷却液从液箱重新输送到加工现场。这样, 当冷却液数量有限时, 砂粒必然会落到被加工零件上。冷却液函数过程为:

$$\Delta \gamma_{Q_{m-j}} = \gamma_{Q_{m-j}}^j - \gamma_{Q_{m-j}}^e = \arctan w_e - \arctan w_e \quad (10)$$

$$\Delta \gamma_{\delta_v} = \gamma_{\delta_v}^j - \gamma_{\delta_v}^e = \arctan j_i / i_j - \arctan j_e / i_e \quad (11)$$

式中: $\Delta \gamma_{Q_{m-j}}$ 描述刀心方位轮廓误差的动态补偿值; 刀轴方位轮廓误差的动态补偿值设成 $\Delta \gamma_{\delta_v}$ 。

2 实验分析

以某集团的五轴数控机床为例, 将本文方法使用在该集团的五轴数控机床加工误差修正工作中。

测试本文方法在修正五轴数控机床加工误差前, 对其加工的刀心方位轮廓误差与刀轴方位轮廓误差的计算误差。结果见表 1。

表 1 计算误差测试结果 单位: μm		
工件类型	刀心方位轮廓误差	刀轴方位轮廓误差
叶盘	0.009	0.006
叶轮	0.012	0.007
叶片	0.008	0.008
船用螺旋桨	0.011	0.007
重型发电机转子	0.012	0.008
汽轮机转子	0.008	0.007
大型柴油机曲轴	0.011	0.008

由表 1 可知, 本文方法对五轴数控机床加工多种工件的刀心方位轮廓与刀轴方位轮廓误差的计算误差最大值分别为 $0.012 \mu\text{m}$ 、 $0.008 \mu\text{m}$, 误差极低, 说明本文方法的计算精度较高。

五轴数控机床加工叶盘、叶轮、叶片、船用螺旋桨、重型发电机转子、汽轮机转子、大型柴油机曲轴时, 本文方法对五轴数控机床加工误差的修正效果见表 2。

分析表 2 可知, 采用本文方法修正后, 五轴数控机床加工误差的降低幅度较大。以叶盘为例, 修正前刀心方位轮廓误差为 $3.234 \mu\text{m}$, 刀轴方位轮廓误差为 $6.564 \mu\text{m}$ 。经过动态修正后, 刀心方位轮廓误差为 $0.004 \mu\text{m}$, 刀轴方位轮廓误差为 $0.003 \mu\text{m}$, 修正后的误差明显降低。整体来看, 经过本文方法修正后的误差最大值仅有 $0.070 \mu\text{m}$ 。由此可证明, 本文方法能够有效修正五轴数控机床加工误差。

表 2 本文方法误差修正效果 单位: μm				
工件类型	刀心方位		刀轴方位	
	轮廓误差	修正后误差值	轮廓误差	修正后误差值
叶盘	3.234	0.004	6.564	0.003
叶轮	3.254	0.004	6.555	0.004
叶片	3.445	0.004	6.685	0.003
船用螺旋桨	4.324	0.004	6.986	0.003
重型发电机转子	4.675	0.005	7.467	0.004
汽轮机转子	4.357	0.004	7.684	0.003
大型柴油机曲轴	4.578	0.007	7.578	0.004

测试本文方法对五轴数控机床加工误差的漏补率与修正耗时的结果见表 3。

表 3 漏补率与修正耗时测试结果				
工件类型	刀心方位		刀轴方位	
	轮廓误差漏补率/%	轮廓误差修正耗时/ms	轮廓误差漏补率/%	轮廓误差修正耗时/ms
叶盘	1.43	103	1.21	112
叶轮	1.41	104	1.19	111
叶片	1.42	102	1.20	109
船用螺旋桨	1.41	103	1.19	108
重型发电机转子	1.42	102	1.20	111
汽轮机转子	1.41	103	1.19	111
大型柴油机曲轴	1.42	103	1.20	109

由表 3 可知, 本文方法对多种五轴数控机床加工工件的刀心方位轮廓与刀轴方位轮廓误差的漏补率低于 1.5%, 修补耗时低于 115 ms, 漏补率较低, 修正耗时较短, 可实现全方位、高效率的五轴数控机床加工修正。

使用本文方法测试某集团的五轴数控机床后, 叶盘、叶轮、叶片、船用螺旋桨、重型发电机转子、汽轮机转子、大型柴油机曲轴工件的淘汰率结果见图 2。

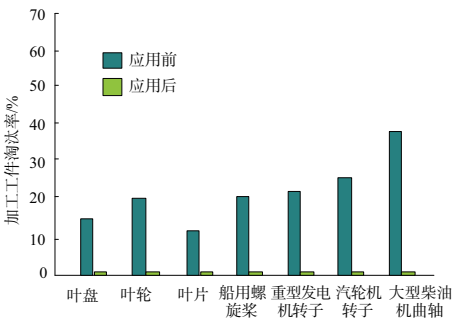


图 2 本文方法应用效果测试

图 2 中, 未应用本文方法时, 叶盘、叶轮、叶片、船用螺旋桨、重型发电机转子、汽轮机转子、大型柴油机曲轴工件的淘汰率分别为 15%、19%、12%、20%、22%、24%、38%, 经

过误差修正后,它们的工件淘汰率都下降到不足 1%,淘汰率极低,说明本文方法应用效果显著。

为进一步验证本文方法的修正精度以及修正鲁棒性,令采用本文方法的五轴数控机床在室温、低于室温以及长期工作状态时选取激光干涉仪精准测量修正前后 x 轴的定位误差,统计结果如图 3-图 5 所示。

设置室温为 $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,统计室温下未开冷却液时五轴数控机床工作台正向与反向行程时位置误差结果如图 3 所示。

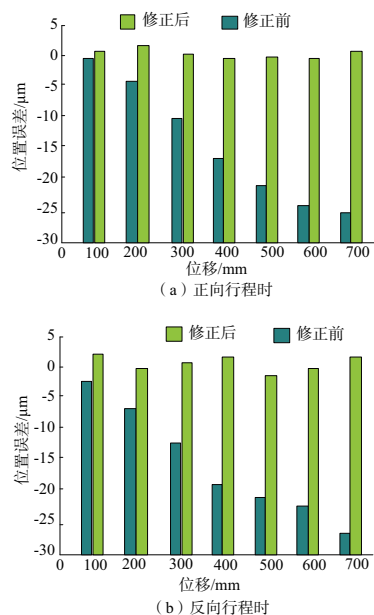


图 3 室温下位置误差修正情况

设置五轴数控机床工作温度为低于室温 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,即工作温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,统计未开冷却液时五轴数控机床工作台正向与反向行程时位置误差结果如图 4 所示。

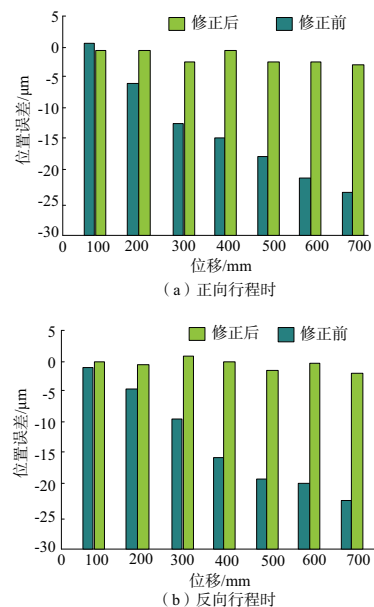


图 4 工作温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时位置误差修正情况

设置五轴数控机床工作温度为室温时,五轴数控机床持续工作 100 min 时, x 轴丝杆螺母温度上升 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时未开冷

却液工作台正向与反向行程时位置误差结果如图 5 所示。

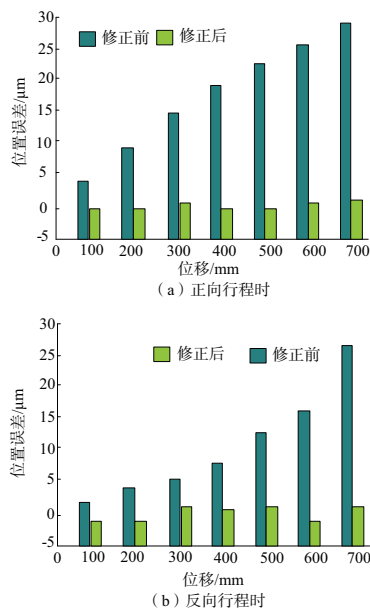


图 5 未开冷却液位置误差修正情况

设置五轴数控机床工作温度为室温时,五轴数控机床持续工作 100 min 时, x 轴丝杆螺母温度上升 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开启冷却液工作台正向与反向行程时位置误差结果如图 6 所示。

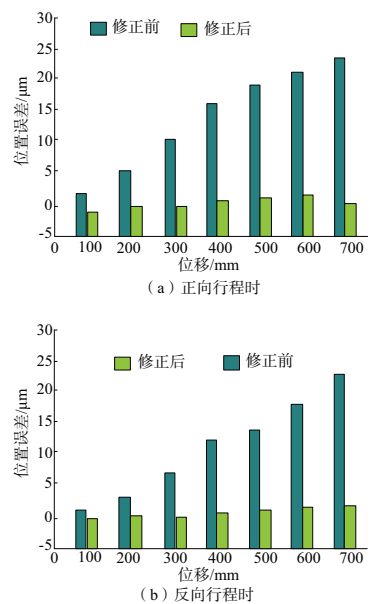


图 6 开启冷却液位置误差修正情况

通过图 3-图 6 实验结果可以看出,工作温度为 $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及工作温度为 $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, x 轴丝杆螺母温度上升 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时采用以及未采用冷却液五轴数控机床不同工作状态下,经过本文方法对机床加工误差动态修正后,五轴数控机床位置误差均具有明显修正。工作温度为 $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, x 轴丝杆螺母温度上升 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时采用冷却液的五轴数控机床位置误差略低于未采用冷却液的五轴数控机床位置误差,但仍存在较大位置误差,采用本文方法动态修正五轴数控机床加工误差后,误差改善情况明显。这有效说明本文方法具有较高的修正性能,可有效提升五轴数控机床的修正精度。采用本文方法

可在不同的复杂环境下,仍保持较高的修正精度,对于五轴数控机床正向以及反向行程位置定位均可保持较高的修正性能,可有效提升五轴数控机床的定位精度。

3 结语

五轴数控机床被大量用于复杂曲面零件加工。加工时,因为受到机床精度、伺服系统动态特征匹配性较差等问题的干扰,存在一定程度的加工误差。为高精度修正五轴数控机床加工误差,本文提出了五轴数控机床加工误差动态修正方法,该方法对五轴数控机床加工误差的漏补率极低,低于 1.5%,且误差修正耗时极短,修补耗时低于 115 ms。本文方法应用后,五轴数控机床加工叶盘、叶轮、叶片、船用螺旋桨、重型发电机转子、汽轮机转子、大型柴油机曲轴工件的淘汰率极低,均不到 1%,符合五轴数控机床加工误差修正需求。

参考文献:

- [1] 刘巍,严洪悦,李肖,等. 机床动态检测中的高速图像运动去模糊还原[J]. 仪器仪表学报,2018,39(5):224-232.
- [2] 姜魏梁,招瑞丰. 基于扰动观测器的机床加工误差迭代学习控制[J]. 中国工程机械学报,2019,17(5):427-431.
- [3] 李海,李迎光,程英豪,等. 基于机床几何误差模型的数控加工工位误差预测[J]. 工具技术,2019,53(6):74-79.
- [4] 陆兴华,张忠海. 融合机床加工特性的主轴回转误差预

测[J]. 机床与液压,2019,47(20):33-37.

- [5] 江晖,曾飞,黄舟. 一种基于误差控制的曲线逼近数控加工策略研究[J]. 机床与液压,2019,47(10):31-34.
- [6] 胡东方,郭建伟. 弧面凸轮的非等径廓面加工误差控制[J]. 系统仿真学报,2019,31(4):727-732.
- [7] 王延忠,初晓孟,苏国营,等. 机床误差对面齿轮齿面形貌的影响规律[J]. 北京工业大学学报,2018,44(7):1017-1023.
- [8] 赫焕丽,王量. 基于最小二乘法的五轴机床静态误差建模[J]. 中国工程机械学报,2019,17(3):268-271,277.
- [9] 武剑,顾成劫,杜正春,等. 立式加工中心关键部件误差辨识分析[J]. 机械设计与研究,2018,34(4):81-84.
- [10] 刘焕牢,李小力,苏妙静,等. 数控机床误差补偿研究新方向——几何误差动态特性[J]. 工具技术,2019,53(11):8-11.
- [11] 谢飞,王玲,谭峰,等. 基于新陈代谢原理的机床热误差伪滞后建模[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(7):154-159,170.
- [12] 刘冰,陈诚,王勇,等. 某型复合加工机床床身动态特性分析与结构优化[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(3):72-77.
- [13] 俞建超,林有希. 高速加工中无氧铜的动态力学性能[J]. 上海交通大学学报,2018,52(5):587-592.
- [14] 张巍,郑敏利,姜彬,等. 车削大螺距外螺纹加工误差分布特性[J]. 哈尔滨理工大学学报,2019,24(2):45-52.
- [15] 黄华,王庆文,郭润兰,等. 基于状态空间模型的机床加工精度分析[J]. 工程设计学报,2019,26(3):321-329.

收稿日期:2020-11-18

(上接第 29 页)

的时候采用的是干式金刚石砂轮机切割,加工过程中的温度较高,对基体会有一定的影响,而压缩强度的性能主要由基体决定。从这里可以看出,若要保证 CFRP 的压缩性能,加工时减少基体的损伤尤为重要。

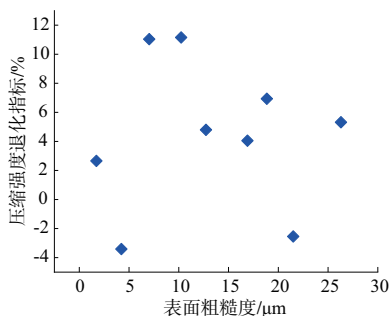


图9 表面粗糙度对压缩强度的影响

3 结语

1) 表面粗糙度 Sa 随着进给速度在 200~1 800 mm/min 范围内逐渐增大时,先小幅下降后持续增大。 Sa 较大时 CFRP 铣削表面有较多“凹坑”与“峰”。

2) CFRP 加工表面粗糙度 Sa 对拉伸强度和压缩强度的影响不显著,但是当 $Sa > 15 \mu\text{m}$ 时,拉伸强度退化量增加。

3) CFRP 基体的性能对压缩强度影响更大,加工温度过高会损伤树脂基体,影响材料的压缩强度。

参考文献:

- [1] 李春奇,殷俊,傅玉灿,等. 航空叠层材料制孔技术研究现状与发展趋势分析[J]. 机械制造与自动化,2015,44(3):24-26,35.
- [2] CHE D M, SAXENA I, HAN P D, et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(3): 034001.
- [3] 宁莉,杨绍昌,冷悦,等. 先进复合材料在飞机上的应用及其制造技术发展概述[J]. 复合材料科学与工程,2020(5):123-128.
- [4] HODGKINSON J M. Flexure [M]//Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites. Amsterdam: Elsevier, 2000: 124-142.
- [5] GHIDDI P, EL MANSORI M, PIERRON F. Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(7/8):989-999.
- [6] HADDAD M, ZITOUNE R, BOUGHERARA H, et al. Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 57:136-143.
- [7] 李皓. 基于能量法 CFRP 切削机理与加工表面质量表征方法研究[D]. 天津:天津大学,2016.

收稿日期:2020-12-10