

旋转角度优化下的五轴数控机床后置处理算法

蔡安江, 刘晨阳, 王沛彭

(西安建筑科技大学机电工程学院, 西安 710055)

摘要: 针对五轴数控机床(CNC)在运行过程中旋转轴角度偏移较大会影响刀具路径控制的问题, 提出了旋转角度优化下的五轴数控机床后置处理算法。该算法首先对机床基本结构展开具体分析, 使用 Hausdoff 距离获取机床实际加工曲面与差值曲面之间的匹配误差, 并通过误差补偿方法对获取的误差实施补偿处理, 依据处理结果完成机床旋转轴角度优化; 然后, 基于优化结果建立机床坐标系统, 通过坐标的变换结果开发机床后置处理器并集成至相关软件中, 实现机床的后置处理。实验结果表明, 使用本文算法进行机床后置处理时效果较好。

关键词: Hausdoff 距离; AC 双转台五轴数控机床; 后置处理; 旋转角度优化

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)09-2493-06

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20220472

Post-processing algorithm of five-axis CNC machine tool under rotation angle optimization

CAI An-jiang, LIU Chen-yang, WANG Pei-peng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: During the operation of 5-axis CNC machine tools, the angle deviation of the rotation axis greatly affects the tool path control. Therefore, a post-processing algorithm of five-axis CNC machine tool with optimized rotation angle was proposed. Firstly, the basic structure of the machine tool was analyzed, the Hausdoff distance was used to obtain the matching error between the actual machined surface and the difference surface, and the error compensation method was used to compensate the obtained error, and the rotation axis angle of the machine tool was completed according to the processing result. Based on the optimization results, the machine tool coordinate system was established, and the machine tool post-processor was developed through the coordinate transformation results and integrated into the relevant software to realize the post-processing of the machine tool. The experimental results show that the proposed method achieves better processing results when used for post processing of machine tools.

Key words: Hausdoff distance; AC double turntable five-axis computer numerical control (CNC) machine; post-processing; rotation angle optimization

收稿日期: 2022-04-24.

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2019JZ-50).

作者简介: 蔡安江(1963-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 精密加工与智能制造技术. E-mail: caianjiang7895@163.com

0 引言

五轴数控机床(Computer numerical control, CNC)^[1]加工技术依据自身高精度、高自动化程度以及柔性化特点,被广泛应用于工程机械、航空航天、汽车制造等高端重要零部件加工中。五轴数控机床技术水平也成为衡量国家制造业水平的重要标准。数控机床自动编程技术能够直接影响零件的加工精度和加工效率,零件加工程度复杂,机床自动编程时需要依据计算机辅助制造(Computer aided manufacturing, CAM)软件实现。由于 CAM 软件能够完成零件的造型设计以及加工参数的设置,但不能直接应用于机床加工,所以必须使用后置处理生成数控机床控制系统^[2]的识别 NC 程序。

文献[3]提出了基于 UG 软件的 SKY-5L14075 五轴联动数控机床后置处理算法,该算法基于五轴联动数控机床加工要求,对机床需求后置文件展开详细分析,通过 UG 软件生成机床后置需求处理文件,实现数控机床的后置处理。文献[4]提出了五轴工具磨床通用后置处理算法,该算法首先分析了机床零件加工质量以及加工效率,根据分析结果确定机床结构,建立五轴数控机床的运动模型;然后,使用机床运动函数将机床位姿转换成机床轴运动量;最后,依据机床各项轴运动量实现机床的后置处理。文献[5]提出了五轴 3D 打印的通用后置处理算法,该算法通过机床结构参数确定机床轴和工件在机床中的位置,使用指数积理论建立机床运动学模型;依据三角函数的周期性对机床旋转角度实施具体描述,制定基于旋转角度最短路径的最佳组合方式;最后,依据旋转角度计算机床平动轴位移量,结合摆头类型实现数控机床的后置处理。

上述方法由于未能在机床后置处理前使用 Hausdorff 距离获取机床实际加工曲面与差值曲面之间的匹配误差,导致在进行机床后置处理时处理效果较差。因此,本文提出了基于旋转角度优化下的五轴数控机床后置处理算法。该算法首先分析了机床基本结构,使用 Hausdorff 距离获取机床实际加工曲面与差值曲面之间的匹配误差,并对获取的误差实施补偿处理,进而完成机床旋转轴角度优化;然后,基于优化结果建立机床坐标系统,通过坐标的变换结果开发机床后置处理器并集成至相关软件中,以实现机床的后置处理。

1 AC 双转五轴数控机床旋转轴旋转角度优化

1.1 AC 双转五轴数控机床基本结构

双转台式五轴数控机床^[6]是机床中的常见类型,AC 双转五轴数控机床基本结构如图 1 所示。

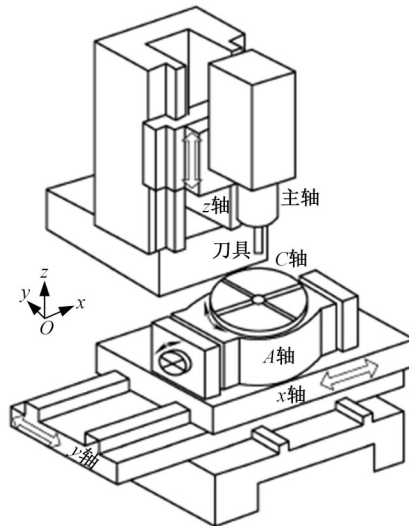


图 1 AC 双转五轴数控机床基本结构

Fig. 1 Basic structure of AC double-turn five-axis CNC machine tool

由图 1 可知,在五轴数控机床中,旋转轴安装在机床溜板上,呈轴线摆动运动;机床主轴安装在 z 向溜板上,随着 z 坐标做直线往复运动;机床刀具和刀座均安装在主轴前端锥孔内,工件则在 C 向转向台上。

1.2 计算旋转轴运动误差

使用 Hausdorff 距离^[7]计算机床实际加工曲面与差值曲面之间的匹配误差,在五轴数控机床后置处理运算前对旋转轴实施误差补偿处理。

Hausdorff 距离能够衡量机床实际加工曲面与差值曲面之间的相似性,通过匹配结果测量机床旋转轴的运动误差。设定机床实际曲面轮廓线为 B_1 , 差值曲面轮廓线为 B_2 , 轮廓特征段设为 c_1, c_2 , 以此计算二者之间的有向 Hausdorff 距离,过程如下所示:

$$\begin{cases} g(c_1, c_2) = \max_{h_i \in c_1} \min_{H_j \in c_2} \|h_i - H_j\| \\ g(c_2, c_1) = \max_{H_j \in c_2} \min_{h_i \in c_1} \|H_j - h_i\| \end{cases} \quad (1)$$

式中: $g(c_1, c_2)$ 、 $g(c_2, c_1)$ 分别为实际曲面与差值曲面轮廓特征段之间的 Hausdorff 距离; $\|\cdot\|$ 为轮廓线之间的欧氏距离; h 、 H 分别为特征段 c_1 、 c_2 的总数量; i 、 j 均为常数。

选取上述计算出的有向Hausdoff距离最大值,获取二者之间的匹配程度,实现机床实际加工曲面^[8]与差值曲面之间的误差计算,结果如下所示:

$$G(c_1, c_2) = \max \{g(c_1, c_2), g(c_2, c_1)\} = \max_{h_i \in c_1} \min_{H_j \in c_2} (|h_i - H_j|) \quad (2)$$

式中: $G(c_1, c_2)$ 为机床实际加工曲面与差值曲面之间的误差。

1.3 五轴数控机床旋转轴误差补偿

计算出旋转轴^[9]运动误差后,对旋转轴实施误差补偿处理。在实施误差补偿时,需要综合考虑旋转轴与移动轴之间的运动关系,制定旋转轴的姿态补偿调整,从而实现旋转轴的运动误差补偿。误差补偿时,将补偿流程划分成姿态补偿和位置补偿两个步骤,过程如下所示。

1.3.1 旋转轴补偿

通过机床旋转轴的旋转运动,将机床工件的刀尖方向矢量调整至最佳位置,并计算出刀尖调整后的姿态矢量,结果如下所示:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_\alpha = \varphi_\alpha^i - \varphi_\alpha^r = \arctan l_i - \arctan l_r \\ \Delta\varphi_\beta = \varphi_\beta^i - \varphi_\beta^r = \arctan \frac{i_i}{j_i} - \arctan \frac{i_r}{j_r} \\ V_i = (\Delta\varphi_\alpha, \Delta\varphi_\beta) \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_i 为获取的工件刀尖姿态矢量; $\Delta\varphi_\alpha$ 为机床旋转轴A的补偿值; $\Delta\varphi_\beta$ 为旋转轴C的补偿值; φ_α^i 、 φ_α^r 分别为机床旋转轴A刀尖的原始和理想位置; φ_β^i 、 φ_β^r 分别为机床旋转轴C刀尖的原始和理想位置; (i_i, j_i, l_i) 为原始刀尖姿态矢量; (i_r, j_r, l_r) 为理想刀尖姿态矢量; \arctan 为反正切函数。

1.3.2 移动轴补偿

将旋转轴姿态调整后的刀尖矢量位置移动至理想位置,设定 $\Delta^* = V_i - V_c$, V_c 为理想工件刀尖姿态矢量,且 $\varphi_\alpha^i = \varphi_\alpha^c$, $\varphi_\beta^i = \varphi_\beta^c$,以此获取移动轴的位置补偿向量,结果如下所示:

$$\begin{cases} \Delta_x^* = x_i - x_c = \sin \varphi_\alpha^i \cos \varphi_\beta^i \cos \varphi_\beta^i \times \\ \quad [(x_i - x_c) - (y_i - y_c) + (z_i - z_c)] \\ \Delta_y^* = y_i - y_c = \sin \varphi_\alpha^i \cos \varphi_\beta^i \times \\ \quad [(x_i - x_c) + (y_i - y_c)] \\ \Delta_z^* = z_i - z_c = -\sin \varphi_\alpha^i \cos \varphi_\beta^i \times \\ \quad [(x_i - x_c) + (y_i - y_c) + (z_i - z_c)] \end{cases} \quad (4)$$

式中: \sin 为正弦函数; \cos 为余弦函数^[10]; $(\Delta_x^*, \Delta_y^*,$

$\Delta_z^*)$ 为移动轴的位置补偿向量; (x_i, y_i, z_i) 、 (x_c, y_c, z_c) 分别为移动轴原始、理想坐标系数。

最后,依据旋转轴的误差补偿结果,实现双转台五轴数控机床的旋转角度优化。

2 五轴数控机床后置处理算法

2.1 建立五轴数控机床坐标系

数控机床在运动学求解时,需要依据机床刀具路径^[11]上对应的刀轴方向矢量计算机床坐标系下的运动轴运动分量。

设定工件坐标系下 q 点坐标位置为 (x_q, y_q, z_q) ,方向为 (i, j, l) ,以此计算机床的各个轴的运动分量,结果如下所示:

$$\begin{cases} x = f_x(x_q, y_q, z_q, i, j, l) \\ y = f_y(x_q, y_q, z_q, i, j, l) \\ z = f_z(x_q, y_q, z_q, i, j, l) \\ A = f_A(x_q, y_q, z_q, i, j, l) \\ C = f_C(x_q, y_q, z_q, i, j, l) \end{cases} \quad (5)$$

式中: x 、 y 、 z 、 A 、 C 分别为机床各个轴的运动分量; f 为运动向量。

基于数控机床的编程复杂程度,将工件坐标系作为机床运动分析的基础坐标,建立五轴数控机床^[12]的坐标系。其中,工件坐标系为 (o_g, x_g, y_g, z_g) ;刀具坐标系为 (o_d, x_d, y_d, z_d) ;参考坐标系为 (o_c, x_c, y_c, z_c) 。

在数控机床工件坐标中,坐标任意点的坐标矢量为 S ;位置向量为 (x, y, z) ;方向向量为 (i, j, l) 。设定不同下角标,从而区分不同坐标系的机床运行状态。设定刀具坐标系中,坐标原点为 o_d ,其对应的向量为 $S_d = \{(x_d, y_d, z_d), (i_d, j_d, l_d)\}$;参考坐标原点为 o_c ,其对应的向量为 $S_c = \{(x_c, y_c, z_c), (i_c, j_c, l_c)\}$ 。由此建立五轴数控机床坐标系 ρ 如下所示:

$$\rho = \begin{cases} (o_g, x_g, y_g, z_g) \\ (o_d, x_d, y_d, z_d) \\ (o_c, x_c, y_c, z_c) \end{cases} \quad (6)$$

2.2 坐标变换

设定机床平移运动时的齐次坐标为 R ,以此建立机床的齐次坐标变换矩阵,过程如下所示:

$$R(S) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $R(S)$ 为建立的坐标变换矩阵; (x, y, z) 为移动向量坐标。

工件坐标系 q 点矢量 S_q 至 S_c 的平移变换结果 $R(S_q - S_c)$ 如下所示:

$$R(S_q - S_c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_q - x_c \\ 0 & 1 & 0 & y_q - y_c \\ 0 & 0 & 1 & z_q - z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

坐标完成变换后,设定机床旋转轴运动的齐次坐标为 P ,且 A, C 两个旋转轴绕 (x, y) 坐标开展旋转运动,旋转角度分别为 θ_A, θ_C ,以此完成旋转运动的齐次坐标变换,结果如下所示:

$$P(\theta_A) = \begin{bmatrix} \cos \theta_A & 0 & \sin \theta_A & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_A & 0 & \cos \theta_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P(\theta_C) = \begin{bmatrix} \cos \theta_C & -\sin \theta_C & 0 & 0 \\ \sin \theta_C & \cos \theta_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $P(\theta_A), P(\theta_C)$ 为两个旋转轴的齐次坐标变换结果; $\sin \theta_A, \sin \theta_C$ 分别为旋转轴 A, C 的正弦夹角; $\cos \theta_A, \cos \theta_C$ 分别为旋转轴 A, C 的余弦夹角。

机床完成坐标变换后,设定机床移动轴位置为 $S_q = (x_q, y_q, z_q)$,初始旋转角度为 θ_A, θ_C ,依据机床的坐标变换原理^[13],获取机床刀尖在工件坐标中的位置向量和方向向量,如下所示:

$$\begin{cases} (x_d, y_d, x_d) = R(S_q) P_z(-\theta_C) \times \\ \quad P_x(-\theta_A) \cdot R(S_q - S_c) \\ (i_d, j_d, l_d) = R(S_q) P_z(-\theta_C) \times \\ \quad P_x(-\theta_A) \cdot R(S_q - S_c) \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_x, P_z 分别为位置变换权重和方向变换权重。

数控机床完成运动变换后,依据计算结果完成机床旋转轴的转角取值,实现五轴数控机床的后置计算。

最后,通过上述推导出的机床旋转角度以及平移向量计算结果,使用TCL语言对五轴数控机床后置处理器进行开发,处理器开发后集成至

UG软件中,实现五轴数控机床的自动后置处理。

3 实验

为了验证本文五轴数控机床后置处理算法的整体有效性,需要对该算法测试,测试对象如图2所示。



图2 AC双转五轴数控机床

Fig. 2 AC double-turn five-axis CNC machine tool

分别采用旋转角度优化下的五轴数控机床后置处理算法(本文算法)、基于UG的SKY-5L14075五轴联动数控机床后处理算法(文献[3]算法)、五轴工具磨床通用后置处理算法(文献[4]算法)进行测试。采用本文算法、文献[3]算法以及文献[4]算法开展机床后置处理前,使用旋转轴分析仪采集五轴数控机床的运动刀尖误差,选取其中5个刀尖点误差数据计算旋转轴结构误差,结果如表1所示。

表1 机床旋转轴运动刀尖误差检测结果

Table 1 Detection results of the tool nose error of the rotating axis of the machine tool

旋转轴位置/(°)	刀尖y向误差/mm	刀尖z向误差/mm
85	0.33	0.451
45	0.20	0.095
0	-0.01	0.003
-45	-0.31	0.031
-85	-0.40	0.245

分析表1中采集数据可知,旋转轴的旋转角度越大,检测到的五轴数控机床运动刀尖误差越大。基于采集的刀尖误差数据,建立五轴数控机床原始运动刀尖分布图,如图3所示。

采用本文算法、文献[3]算法以及文献[4]算法开展机床后置处理,依据处理过程对机床刀尖运动误差实施误差补偿处理,测试上述3种算法处理后的刀尖运动误差分布,结果如图4所示。由图4可知:3种算法均都在误差补偿后有效降低了刀尖运动误差,但是本文算法所检测出的误差

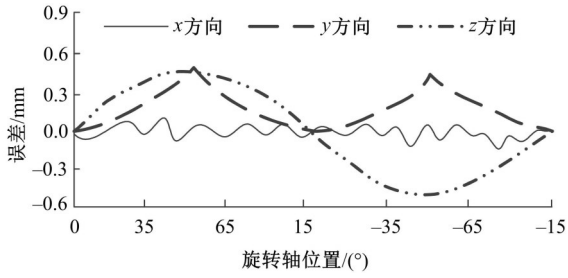
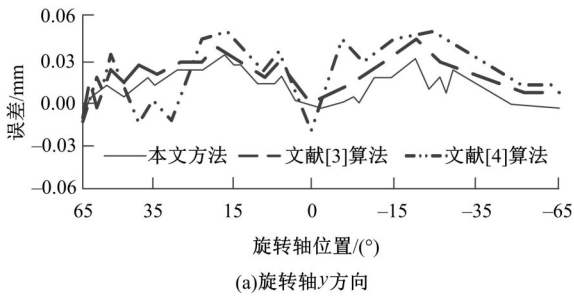
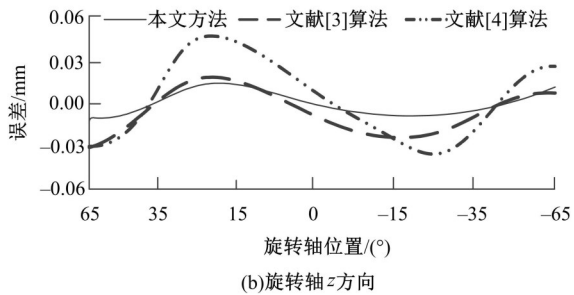


图 3 五轴数控机床原始运动刀尖分布图

Fig. 3 Distribution diagram of original moving tool tip of five-axis CNC machine tool



(a) 旋转轴 y 方向



(b) 旋转轴 z 方向

图 4 不同算法的刀尖误差补偿结果

Fig. 4 Tool nose error compensation results of different methods

缩减结果是 3 种算法中最大的,说明本文算法在对机床进行后置处理时,处理效果较好。

根据建立的误差减小率方程表达式,获取本文算法补偿前、后的刀尖点误差空间分布如下所示:

$$\begin{cases} \xi_q \approx 0.289 + 0.355 = 0.644 \text{ mm} \\ \xi_h \approx 0.419 + 0.341 = 0.76 \text{ mm} \\ W_{\text{error}} = (\xi_q - \xi_h) / \xi_q \times 100\% \end{cases} \quad (12)$$

式中: ξ_q 、 ξ_h 分别为刀尖运动误差补偿前、后的误差限; W_{error} 为误差减小率。

本文算法刀尖运动误差补偿前、后的刀尖点误差空间分布如图 5 所示。由图 5 可知:本文算法在刀尖点位置误差补偿后,测试出的刀尖误差得到了明显控制,补偿后的运动刀尖误差明显减小,说明本文算法在进行机床后置处理时能有效消除旋转轴结构参数对刀尖误差的影响。

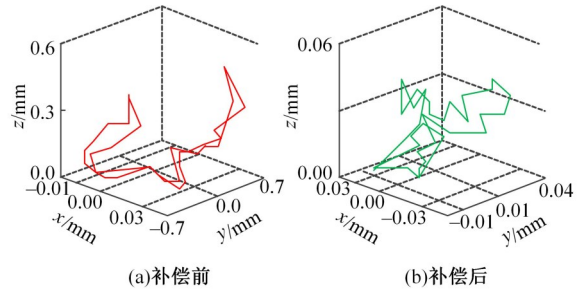


图 5 刀尖运动误差补偿前后的刀尖点误差空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of tool nose point error before and after tool nose motion error compensation

4 结束语

随着五轴数控机床使用范围的扩大,数控机床的后置处理算法变得尤为重要。针对传统数控机床后置处理算法中存在的问题,提出了旋转角度优化下的五轴数控机床后置处理算法。该算法依据 Hausdorff 距离获取机床旋转轴实际加工曲面与差值曲面之间的匹配误差,并通过误差补偿算法对机床误差实施补偿处理;最后,通过误差补偿结果建立了机床坐标系,依据坐标的变换结果实现机床后置处理。

参考文献:

[1] 吴继春,王笑江,周会成,等. 双转台五轴数控机床的非线性误差补偿[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(5): 1185-1190.
Wu Ji-chun, Wang Xiao-jiang, Zhou Hui-cheng, et al. A nonlinear error compensation for five-axis machine tool with dual rotary table[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(5): 1185-1190.

[2] 吴继春,吴晓峰,季宽权. 基于双转台五轴机床在工件坐标系中误差矢量建立与补偿[J]. 航空精密制造技术, 2021, 57(3): 1-4.
Wu Ji-chun, Wu Xiao-feng, Ji Kuan-quan. Establishment and compensation of error vector in workpiece coordinate system of five-axis machine tool based on table-tilting[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2021, 57(3): 1-4.

[3] 郭山国,张华瑾,张长军,等. 基于UG的SKY-5L14075五轴联动数控机床后处理的开发[J]. 机床与液压, 2020, 48(8): 55-58, 126.
Guo Shan-guo, Zhang Hua-jin, Zhang Chang-jun, et al. Post-processing development of SKY-5L14075 five-axle NC machine tools based on UG[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(8): 55-58, 126.

[4] 张太林,郑君民,陈云,等. 五轴工具磨床通用后置

- 处理研究[J]. 工具技术, 2020, 54(3): 50-54.
- Zhang Tai-lin, Zheng Jun-min, Chen Yun, et al. General post processing of five-axis tool grinding machine[J]. Tool Engineering, 2020, 54(3): 50-54.
- [5] 饶勇建, 付国强, 陶春, 等. 五轴 3D 打印的通用后置处理[J]. 中国机械工程, 2021, 32(1): 74-81.
- Rao Yong-jian, Fu Guo-qiang, Tao Chun, et al. Universal post-processing for five-axis 3D printing[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(1): 74-81.
- [6] 岳玉霞, 王秀山, 李利军. 五轴数控机床的误差实时补偿控制器[J]. 电子测量技术, 2021, 44(13): 145-149.
- Yue Yu-xia, Wang Xiu-shan, Li Li-jun. Real time error compensation controller for five axis CNC machine tools[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(13): 145-149.
- [7] 胡斯然, 周博闻, 张天宇. 基于交通大数据的超限超载车辆时空分析[J]. 公路, 2020, 65(8): 349-359.
- Hu Si-ran, Zhou Bo-wen, Zhang Tian-yu. Spatio-temporal analysis of oversize-overweight (OSOW) vehicle based on transportation big data[J]. Highway, 2020, 65(8): 349-359.
- [8] 张晨亮, 潘俊兵. 异形曲面的逆向设计与五轴加工技术研究[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(2): 87-90.
- Zhang Chen-liang, Pan Jun-bing. Research on reverse design and five axis machining technology of special-shaped surface[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(2): 87-90.
- [9] 郭世杰, 张东升. 五轴机床旋转轴几何误差分析与补偿[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(2): 130-139.
- Guo Shi-jie, Zhang Dong-sheng. Geometric error analysis and compensation of rotary axes of five-axis machine tools[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(2): 130-139.
- [10] 赵荣中. 数控机床机械局部故障智能检测方法仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(5): 146-149, 234.
- Zhao Rong-zhong. Simulation of intelligent detection method for local faults of CNC machine tools[J]. Computer Simulation, 2020, 37(5): 146-149, 234.
- [11] Zhang Shao-kun, Bi Qing-zhen, Wang Yu-han. Tool-path optimization for mirror milling in singular area[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 247-255.
- [12] 吴天凤, 李莉, 杨洪涛. 数控机床 XY 工作台单向运动二维阿贝误差分析与建模[J]. 光学精密工程, 2021, 29(2): 329-337.
- Wu Tian-feng, Li Li, Yang Hong-tao. Two-dimensional abbe error analysis and modeling of CNC machine tool XY table unidirectional movement[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(2): 329-337.
- [13] 郭迎钢, 李宗春, 何华, 等. 三维坐标转换公共点最优权值的单纯形搜索算法[J]. 测绘学报, 2020, 49(8): 1004-1013.
- Guo Ying-gang, Li Zong-chun, He Hua, et al. A simplex search algorithm for the optimal weight of common point of 3D coordinate transformation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(8): 1004-1013.