

零件加工误差与机床几何误差映射关系建模

栗世豪, 张俊, 唐宇阳, 尹佳, 赵万华

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对机床几何误差与零件误差映射关系建模方法并未考虑刀具在加工过程中各个点位的位置偏差与姿态偏差的问题,以三轴机床为研究对象,首先利用多体系统运动学理论,建立机床刀尖点误差与刀轴矢量误差模型。然后利用单基站激光跟踪仪多次测量的方法,结合误差分离算法,辨识得到了机床的21项几何误差项,并对18项与位置有关的误差项进行拟合,构建了完整的典型三轴机床工作空间误差场。最后以凸台宽度、平面度、孔轴线位置度等典型特征,结合加工轨迹,建立起机床几何误差与尺寸误差、形状误差和位置误差的映射关系,并进行了相应的实验验证。实验结果表明:凸台宽度误差与机床刀尖点在该处的几何误差有关,11个点位的凸台宽度误差测量值与计算值相差在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内;“之”字型铣削平面度误差分析要先进行刀具轨迹离散化,然后将刀具圆周离散化,计算刀具圆周含有误差的点,通过点位筛选原则,选择真正属于加工表面的点,对这些点利用最小二乘法计算平面度,平面度误差计算值与测量值相差 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以内;孔轴线位置度误差分析要考虑钻孔过程中不同位置处刀尖点误差与刀轴姿态误差,以二者为基础构建孔轴线方程,通过代入检测平面的高度以获取相应高度处圆心偏差,孔轴线位置度误差计算值与测量值相差 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内。

关键词: 几何误差;加工误差;多体系统

中图分类号: TH161 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202110006 **文章编号:** 0253-987X(2021)10-0050-10



OSID 码

Modeling of Mapping Relationship Between Machining Error and Geometric Error of Machine Tool

LI Shihao, ZHANG Jun, TANG Yuyang, YIN Jia, ZHAO Wanhua

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: At present, the modeling method of geometric error and the accuracy of parts does not consider tool's position deviation and gesture deviation in machining. In order to establish a mapping relationship between geometric error and part error that conforms with machining process and realize the prediction of the part machining error a three-axis machine tool is used as the research object. Firstly, the model of tool position error and tool axis vector error of machine tool are established by using the theory of multi-body system dynamics. Then, the geometric error data of machine tool are identified by using laser tracker and 21 errors of machine tool are obtained, and 18 errors related to position are fitted to build an error space of machine tool. Finally, the typical part features such as part width, flatness, and hole axis position error are selected combined with the moving path of the cutter in machining, and the model between the machine tool geometric error and the part features is established. The accuracy of the model is verified by experiments. The experimental results show that part width error is related to the

geometric error of the tool tip, and the differences between measured value and calculated value of part width at 11 points are within $5\text{ }\mu\text{m}$; the zigzag milling flatness error analysis needs to discretize the tool path firstly, then discretize the tool circle and calculate the point error of the tool circle, finally select the points that belong to the machining face and calculate the flatness error by using the least square method with those points, and the difference between the measured value and calculated value of flatness error is within $2\text{ }\mu\text{m}$; the position error of hole axis analysis needs to consider the tool tip error and the tool axis error at different positions during the drilling process, then establish the hole equation with those two, and finally obtain the error of the center of circle in corresponding plane by substituting the height value of the measurement plane into the equation. The difference between measured value and calculated value of the position error of hole axis is within $5\text{ }\mu\text{m}$.

Keywords: geometric error; machining error; multi-body system

零件的加工精度受多重因素影响,例如机床零部件在制造过程中产生的几何误差、温度变化产生的机床热变形误差、各运动轴传动过程中产生的跟随误差、零件残余应力释放导致的变形误差等。在众多因素中,机床几何误差是一种重要的误差源,在其影响下,刀具会偏离理想的运动轨迹,在工件上产生各种误差项。

为了提高零件精度,国内外众多学者从机床几何误差入手,进行了大量研究。文献[1]根据多体系统运动学理论,利用齐次坐标变换方法,实现了多轴机床几何误差建模,并根据建模结果进行刀位点补偿;文献[2-3]分别利用螺旋理论和指数积理论,建立起多轴机床几何模型关系,这两种方法不必建立大量的中间矩阵,减小了机床几何误差建模的复杂度。文献[4]对镗铣床进行几何误差建模,并考虑了刀具位置误差以及姿态误差对加工曲面的影响,较为全面地介绍了机床几何误差与零件误差的建模方法。文献[5]建立了轮廓面法向矢量误差预测模型,并利用 S 试件进行了验证。文献[6]考虑了刀具悬长的影响进行机床几何误差建模,实现了线性加工轨迹以及圆形加工轨迹的误差补偿。

目前,针对机床几何误差的研究大多停留在建模^[7-11]、补偿^[12-17]这一步,并未探讨机床几何误差与零件精度的关系。少数学者在探究机床几何误差与零件精度关系时,也未考虑加工路径以及刀轴矢量偏差对零件误差面的影响^[18]。此外,在几何误差数据的获取上,虽然有基于激光干涉仪开发的“九线法”^[19]和“十二线法”^[20],但激光干涉仪光路调整十分耗时,而激光跟踪仪中角度编码器也存在误差^[21],如何便捷地获取 21 项误差数据也亟待解决。

针对以上问题,本文以实现机床几何误差与零

件误差建模为目的,首先建立三轴机床几何误差模型,推导刀尖点位置误差与刀轴矢量误差公式。然后利用激光跟踪仪单站分次测量并开发出分离算法获取机床 21 项误差数据。最后针对尺寸误差、形状误差和位置误差,分别选取凸台宽度、平面度和孔轴线位置度为研究对象,建立起机床几何误差与零件误差之间的映射关系,通过切削实验验证了映射关系的准确性。

1 机床几何误差建模与误差数据获取

1.1 三轴机床几何误差建模

三轴机床的组合形式多种多样,无论是哪种组合形式,均可根据多体系统运动学理论^[22]进行建模,一般多体系统拓扑简图如图 1 所示。

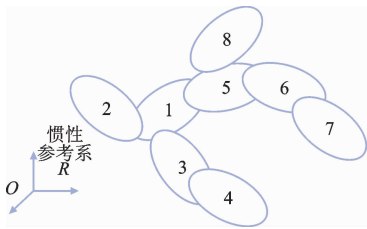


图 1 一般多体系统拓扑简图

Fig. 1 Topological diagram of general multi-body system

设惯性参考系 R 为 A_0 体,然后任选一体为 A_1 体,朝着远离 A_1 的方向,按自然数列为各个体命名编号。设 L 为低序体算子, j 为各运动体, i 为 j 的相邻低序体, k 为各运动体阶次,定义

$$\left. \begin{aligned} L(j) &= i \\ L^k(j) &= L(L^{k-1}(j)) \\ L^0(j) &= j \\ L(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

例如个体5的一阶低序体为1,二阶低序体为0。当体与体之间只移动 x 时,其理想变换矩阵为

$$\mathbf{T}_{ij}(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

移动 x 引入6项误差,如图2所示,同时引入误差变换矩阵 $\Delta\mathbf{T}_{ij}$,基于小位移小角度假设,利用等价无穷小代换,将 $\sin x \approx x, \cos x \approx 1$,此外,将二次以上的高阶项略去,可得

$$\Delta\mathbf{T}_{ij} = \mathbf{T}_{ij}(\Delta\alpha_{ij})\mathbf{T}_{ij}(\Delta\beta_{ij})\mathbf{T}_{ij}(\Delta\gamma_{ij})\mathbf{T}_{ij}(\Delta x_{ij}) \cdot \mathbf{T}_{ij}(\Delta y_{ij})\mathbf{T}_{ij}(\Delta z_{ij}) = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\gamma_{ij} & \Delta\beta_{ij} & \Delta x_{ij} \\ \Delta\gamma_{ij} & 1 & \Delta\alpha_{ij} & \Delta y_{ij} \\ \Delta\beta_{ij} & \Delta\alpha_{ij} & 1 & \Delta z_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

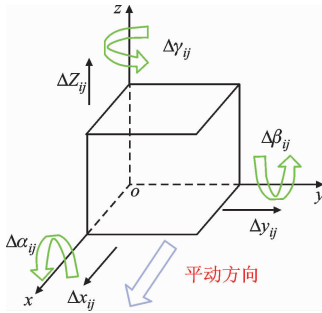


图2 移动 x 时6项误差
Fig. 2 Six errors when moving x

对于一个多体系统,我们关心的往往是拓扑链末端相对于拓扑链首端的位置变化和姿态变化,设空间点在子坐标系 S_j 中的齐次坐标为 $\mathbf{P}_j[p_{xj}, p_{yj}, p_{zj}, 1]^T$,其在任意子坐标系 S_k 中含有误差的齐次坐标形式 $\mathbf{P}_{kr}$ 为

$$\mathbf{P}_{kr} = [p_{xkr} \ p_{ykr} \ p_{zkr} \ 1]^T = \left[\prod_{u=n, L^n(k)=0}^{u=1} \mathbf{T}_{L^u(k)L^{u-1}(k)} \Delta\mathbf{T}_{L^u(k)L^{u-1}(k)} \right]^{-1} \cdot \left[\prod_{t=n, L^n(j)=0}^{t=1} \mathbf{T}_{L^t(j)L^{t-1}(j)} \Delta\mathbf{T}_{L^t(j)L^{t-1}(j)} \right] \mathbf{P}_j \quad (4)$$

在任意子坐标系 S_k 中,理想齐次坐标形式 $\mathbf{P}_k$ 为

$$\mathbf{P}_k = [p_{xk} \ p_{yk} \ p_{zk} \ 1]^T = \left[\prod_{u=n, L^n(k)=0}^{u=1} \mathbf{T}_{L^u(k)L^{u-1}(k)} \right]^{-1} \left[\prod_{t=n, L^n(j)=0}^{t=1} \mathbf{T}_{L^t(j)L^{t-1}(j)} \right] \mathbf{P}_j \quad (5)$$

设空间矢量在子坐标系中 S_j 的齐次投影为 $\mathbf{U}_j[u_{xj}, u_{yj}, u_{zj}, 0]^T$,其在任意子坐标系 S_k 中含有误

差的齐次坐标 $\mathbf{U}_{kr}$ 为

$$\mathbf{U}_{kr} = [u_{xkr} \ u_{ykr} \ u_{zkr} \ 0]^T = \left[\prod_{u=n, L^n(k)=0}^{u=1} \mathbf{T}_{L^u(k)L^{u-1}(k)} \Delta\mathbf{T}_{L^u(k)L^{u-1}(k)} \right]^{-1} \cdot \left[\prod_{t=n, L^n(j)=0}^{t=1} \mathbf{T}_{L^t(j)L^{t-1}(j)} \Delta\mathbf{T}_{L^t(j)L^{t-1}(j)} \right] \mathbf{U}_j \quad (6)$$

在任意子坐标系 S_k 中,理想齐次坐标 $\mathbf{U}_k$ 为

$$\mathbf{U}_k = [u_{xk} \ u_{yk} \ u_{zk} \ 0]^T = \left[\prod_{u=n, L^n(k)=0}^{u=1} \mathbf{T}_{L^u(k)L^{u-1}(k)} \right]^{-1} \left[\prod_{t=n, L^n(j)=0}^{t=1} \mathbf{T}_{L^t(j)L^{t-1}(j)} \right] \mathbf{U}_j \quad (7)$$

将一般多体系统理论应用于三轴机床,可得到图3的几何误差建模流程。

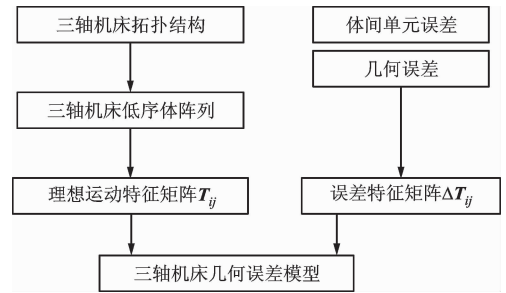


图3 三轴机床几何误差建模流程

Fig. 3 Geometric error modeling process of three-axis machine tool

刀尖点 P 在工件坐标系中的实际位置与理想位置的偏差为

$$\mathbf{E}_P = [\Delta x_P \ \Delta y_P \ \Delta z_P \ 1]^T = \mathbf{P} - \mathbf{P}_r \quad (8)$$

刀具矢量 $\mathbf{U}$ 在工件坐标系中实际姿态与理想姿态的偏差为

$$\mathbf{E}_U = [\Delta x_U \ \Delta y_U \ \Delta z_U \ 0]^T = \mathbf{U} - \mathbf{U}_r \quad (9)$$

式中: $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{U}$ 分别是理想刀尖点位置和刀轴矢量,可按照式(5)和式(7)计算, $\mathbf{P}_r$ 和 $\mathbf{U}_r$ 为实际刀尖点位置和刀轴矢量,可按照式(4)和式(6)计算。

以图4的三轴机床为例,按照图3的流程进行刀尖点误差建模。图5为三轴机床拓扑图,表1为三轴机床的低序体阵列表。拓扑结构中个体的数量可根据研究的问题进行选择,本文选取了7个个体进行研究。

将表1中的数值代入式(8)和式(9),可以得到

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_P &= [\mathbf{T}_{71} \Delta\mathbf{T}_{71}]^{-1} \cdot [\mathbf{T}_{12} \Delta\mathbf{T}_{12} \mathbf{T}_{23} \Delta\mathbf{T}_{23} \mathbf{T}_{34} \Delta\mathbf{T}_{34} \mathbf{T}_{45} \Delta\mathbf{T}_{45} \mathbf{T}_{56}] \mathbf{P}_t - [\mathbf{T}_{71}]^{-1} [\mathbf{T}_{12} \mathbf{T}_{23} \mathbf{T}_{34} \mathbf{T}_{45} \mathbf{T}_{56}] \mathbf{P}_t \\ \mathbf{E}_U &= [\mathbf{T}_{71} \Delta\mathbf{T}_{71}]^{-1} \cdot [\mathbf{T}_{12} \Delta\mathbf{T}_{12} \mathbf{T}_{23} \Delta\mathbf{T}_{23} \mathbf{T}_{34} \Delta\mathbf{T}_{34} \mathbf{T}_{45} \Delta\mathbf{T}_{45} \mathbf{T}_{56}] \mathbf{U}_t - \end{aligned} \quad (10)$$

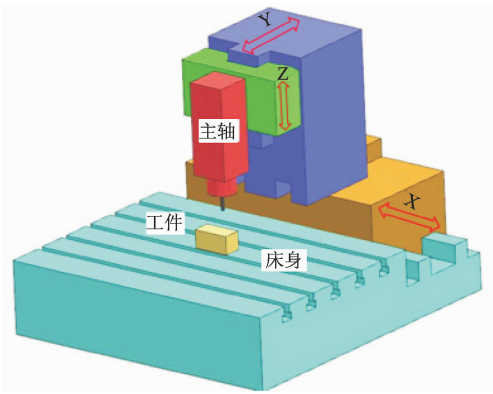


图 4 三轴机床模型图

Fig. 4 Model of three-axis machine tool

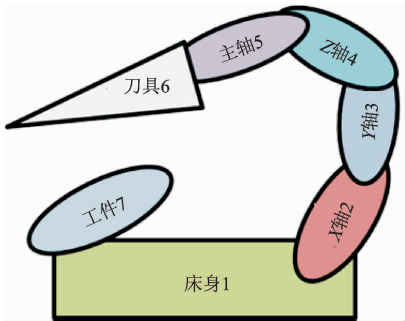


图 5 三轴机床拓扑图

Fig. 5 Topological diagram of three-axis machine tool

$$[T_{71}]^{-1}[T_{12}T_{23}T_{34}T_{45}T_{56}]U_t \tag{11}$$

设 T_t^w 为误差变换矩阵,则 T_t^w 可表示为

$$T_t^w = [T_{71} \Delta T_{71}]^{-1}[T_{12} \Delta T_{12} T_{23} \Delta T_{23} T_{34} \Delta T_{34} T_{45} \Delta T_{45} T_{56}] \tag{12}$$

式(10)和(11)中, P_t 为初始点位 $[0,0,0,1]^T$, U_t 为初始刀轴矢量 $[0,0,1,0]^T$ 。

表 1 三轴机床低序体阵列表

Table 1 Low-order body array of three-axis machine tool

j	$L^0(j)$	$L^1(j)$	$L^2(j)$	$L^3(j)$	$L^4(j)$	$L^5(j)$
1	1	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0
3	3	2	1	0	0	0
4	4	3	2	1	0	0
5	5	4	3	2	1	0
6	6	5	4	3	2	1
7	7	1	0	0	0	0

工件 7 与床身 1、主轴 5 和 Z 轴 4 之间装配很好,且不进行相对运动,因此可以认为它们之间的变换矩阵为单位阵 I ;有相对运动的 X 轴 2 与床身 1、

Y 轴 3 与 X 轴 2、Z 轴 4 和 Y 轴 3 之间需要明确误差项及正方向,三轴机床有 21 项误差,分别为 X 轴 6 项 $\delta_{xx}, \delta_{yx}, \delta_{zx}, \epsilon_{xx}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{zx}$;Y 轴 6 项 $\delta_{yy}, \delta_{xy}, \delta_{zy}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zy}$;Z 轴 6 项 $\delta_{zz}, \delta_{xz}, \delta_{yz}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zz}$;X、Y、Z 轴之间的垂直度误差 3 项 S_{xy}, S_{yz}, S_{zx} 。图 6 以 X 轴为例介绍了该轴的 6 项误差,线性误差 δ 系列的正方向与机床坐标系一致,由右手定则确定,角度误差 ϵ 系列以及垂直度误差的正方向如图 7 所示。

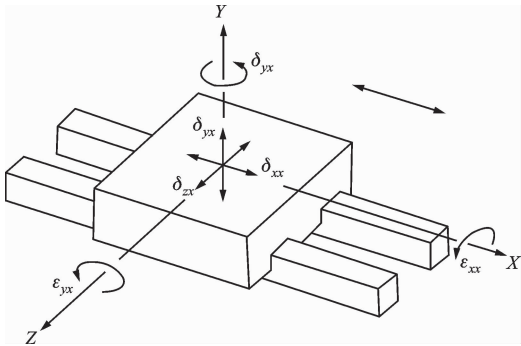


图 6 X 轴 6 项误差示意图

Fig. 6 Six errors of X-axis

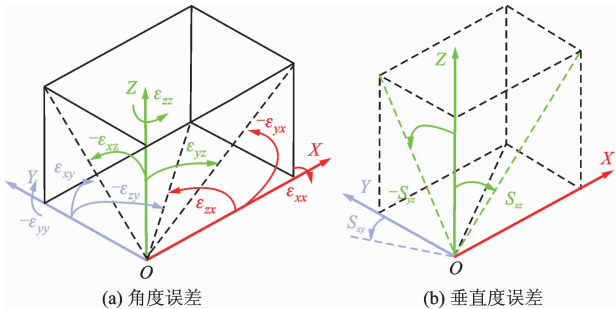


图 7 角度误差和垂直度误差方向

Fig. 7 Direction of angel error and perpendicularity error

将误差项代入变换矩阵,便可得到 3 个轴变换矩阵 $T_{12} \Delta T_{12}$ 、 $T_{23} \Delta T_{23}$ 、 $T_{34} \Delta T_{34}$,此外主轴 5 与刀具 6 之间也会引入矩阵 T_{56} ,该矩阵涉及刀具悬长引起的误差,具体值如下

$$T_{12} \Delta T_{12} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zx} & \epsilon_{yx} & \delta_{xx} + x \\ \epsilon_{zx} & 1 & -\epsilon_{xx} & \delta_{yx} \\ -\epsilon_{yx} & \epsilon_{xx} & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$T_{23} \Delta T_{23} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zy} & \epsilon_{yy} & \delta_{xy} - yS_{xy} \\ \epsilon_{zy} & 1 & -\epsilon_{xy} & \delta_{yy} + y \\ -\epsilon_{yy} & \epsilon_{xy} & 1 & \delta_{zy} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$T_{34} \Delta T_{34} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zx} & \epsilon_{yz} & \delta_{zx} + zS_{zx} \\ \epsilon_{zx} & 1 & -\epsilon_{xz} & \delta_{yz} - zS_{yz} \\ -\epsilon_{yz} & \epsilon_{xz} & 1 & \delta_{zz} + z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$T_{56} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_x \\ 0 & 1 & 0 & l_y \\ 0 & 0 & 1 & l_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

将式(13)~(16)代入式(10)(11),再将二次以上的高阶项略去,只保留一次项,可以得到刀尖点位置偏差 E_P 与刀轴姿态偏差方程 E_U 。

刀尖点误差 E_P 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_p &= \delta_{xx} + \delta_{xy} + \delta_{xz} + z\epsilon_{yx} + z\epsilon_{yy} + zS_{xz} - yS_{xy} - \\ &\quad y\epsilon_{zx} - l_y(\epsilon_{zx} + \epsilon_{zy} + \epsilon_{zz}) + l_z(\epsilon_{yx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{yz}) \\ \Delta y_p &= \delta_{yx} + \delta_{yy} + \delta_{yz} - zS_{yz} - z\epsilon_{xx} - z\epsilon_{xy} + l_x(\epsilon_{zx} + \\ &\quad \epsilon_{zy} + \epsilon_{zz}) - l_z(\epsilon_{xx} + \epsilon_{xy} + \epsilon_{xz}) \\ \Delta z_p &= \delta_{zx} + \delta_{zy} + \delta_{zz} + y\epsilon_{xx} - l_x(\epsilon_{yx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{yz}) + \\ &\quad l_y(\epsilon_{xx} + \epsilon_{xy} + \epsilon_{xz}) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

刀轴矢量偏差 E_U 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_U &= \epsilon_{yx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{yz} \\ \Delta y_U &= -\epsilon_{xx} - \epsilon_{xy} - \epsilon_{xz} \\ \Delta z_U &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

1.2 几何误差数据获取

1.2.1 直线轴几何误差辨识算法 本文采用激光跟踪仪单站多次测量的方法进行辨识,测量流程如图8和图9所示。

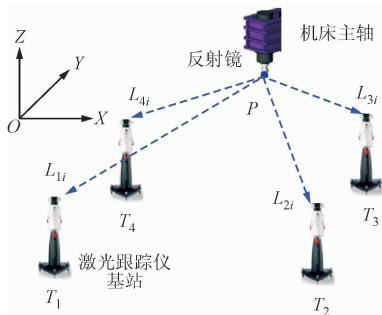


图8 单基站多次测量过程

Fig. 8 Multiple measurement process of single base

将基站置于不同位置,对于激光跟踪仪读取的数据只取基站到各测量轨迹点的距离值 L_{ij} ,当不受直线轴几何误差影响时,设基站的位置为 $T_j(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$,测量点为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 。根据两点距离公式,基站与反射镜之间的距离 L_{ji} 可表示为

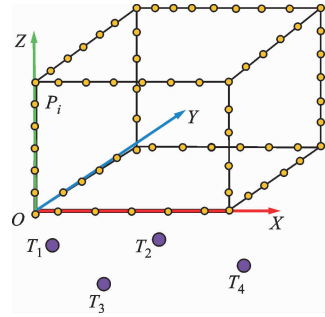


图9 机床运动轨迹示意图

Fig. 9 Schematic diagram of machine tool moving route

$$L_{ji} = \sqrt{(x_{ij} - x_i)^2 + (y_{ij} - y_i)^2 + (z_{ij} - z_i)^2} \quad (19)$$

根据最小二乘法可计算式(19)中基站的理想位置,该过程在 MATLAB 中用 lsqnonlin 函数求解。在实际测量过程中,由于机床直线轴几何误差的影响, P_i 即各测量点的实际坐标与理想坐标存在空间误差 $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$,不同的基站位置 T_j 的坐标与实际坐标存在位置偏差 $(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, \Delta z_{ij})$,可将式(19)修正为

$$R_{ji} = ((x_{ij} + \Delta x_{ij} - x_i + \Delta x_i)^2 + (y_{ij} + \Delta y_{ij} - y_i - \Delta y_i)^2 + (z_{ij} + \Delta z_{ij} - z_i - \Delta z_i)^2)^{1/2} - L_{ji} = 0 \quad (20)$$

式中: $\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, \Delta z_{ij}$ 为基站位置偏差,是3个未知量; $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ 为直线轴移动引入的误差,由式(17)代入,是机床21项误差的线性组合。

对 R_{ji} 进行麦克劳林展开,变为线性方程组

$$\begin{aligned} &\frac{\partial R_{ji}(0)}{\partial \Delta x_{ij}} \Delta x_{ij} + \frac{\partial R_{ji}(0)}{\partial \Delta y_{ij}} \Delta y_{ij} + \frac{\partial R_{ji}(0)}{\partial \Delta z_{ij}} \Delta z_{ij} + \\ &\frac{\partial R_{ji}(0)}{\partial \Delta x_i} \Delta x_i + \frac{\partial R_{ji}(0)}{\partial \Delta y_i} \Delta y_i + \frac{\partial R_{ji}(0)}{\partial \Delta z_i} \Delta z_i = \\ &-R_{ji}(0) - O_{ji} \end{aligned} \quad (21)$$

对于第 j 次测量的 N 个点来说,每个点 x_i, y_i, z_i 都可以列出方程式(21),都含有3个基站的位置误差和21项几何误差。设缩减未知数后设方程系数阵为 A ,未知数矩阵为 E , $[-R_{ji}(0) - O_{ji}]$ 为 B ,并设定相应的边界条件,即所有误差项原点处误差值为0,则有

$$AE = B; CE = 0 \quad (22)$$

综合以上考虑,式(22)变为

$$ME = D; M = [A \ C]^T; D = [B \ 0]^T \quad (23)$$

式(23)可以利用矩阵的广义逆求解

$$E = [M^T \ M]^{-1} M^T D \quad (24)$$

1.2.2 几何误差测量结果 按照1.2.1节的算法,

采用 FARO 激光跟踪仪(型号为 ION),测量并分离机床 X、Y、Z 3 个直线轴的 21 项几何误差,测量行程分别为 500、450 和 400 mm,采样点数为 11。直线轴的运动路径如图 10 所示,激光跟踪仪分别在 6 个基站位置测量机床运动路径中各测量点与基站之间的相对距离。实验现场如图 11 所示,在测量各点距离之前需要测量反射镜相对主轴末端的位置 L [l_x, l_y, l_z],轨迹原点在机床坐标系的坐标为 $(-500.1, 450.1, 400.1)$ mm。

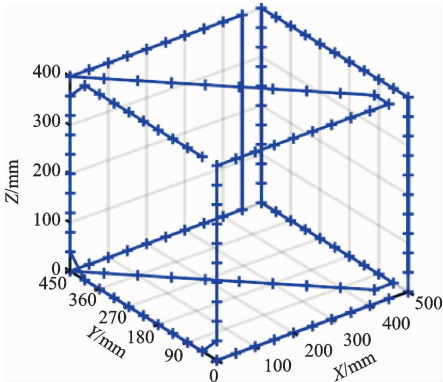


图 10 机床测量轨迹

Fig. 10 Measurement route of machine tool

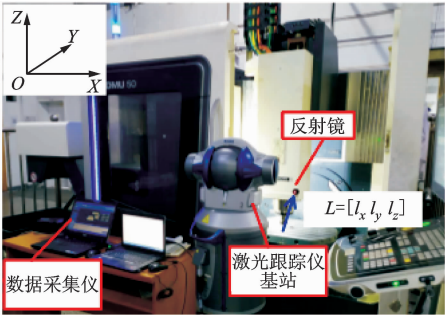


图 11 激光跟踪仪测量现场

Fig. 11 Measurement of laser tracker

对 18 项位置误差进行多项式拟合,其中 δ_{xx} 、 δ_{yy} 、 δ_{zz} 用一次多项式 $y=ax+b$ 拟合,其余均用三次多项式 $y=ax^3+bx^2+cx+d$ 拟合,拟合系数如表 2 所示。3 个垂直度误差 S_{xy} 为 2.43×10^5 rad, S_{yz} 为 1.89×10^4 rad, S_{xz} 为 2.06×10^5 rad。

2 零件加工误差预测模型及验证

2.1 尺寸误差

以图 12 所示的凸台宽度尺寸 d 为对象,假设凸台右端面为 $x=x_1$,左端面为 $x=x_2$,将左右端面沿 y 方向离散为 n 个位置,根据式(17)成对计算 y_0 到 y_n 等 n 个位置的误差 Δx ,然后相减即可得到不同

表 2 18 项误差拟合系数表

Table 2 Fitting coefficient of 18 errors

移动轴	误差项	拟合系数值			
		三次项	二次项	一次项	常数项
X	δ_{xx}	0	0	0.059 8	10.550 0
	δ_{yx}	6.3×10^{-7}	4.6×10^{-4}	0.068 2	1.411 2
	δ_{zx}	4.0×10^{-7}	3.1×10^{-4}	0.051 1	1.273 4
	ϵ_{xx}	1.0×10^{-6}	7.6×10^{-4}	0.181 5	2.311 9
	ϵ_{yx}	4.3×10^{-6}	3.0×10^{-3}	0.482 8	0.199 3
	ϵ_{zx}	8.4×10^{-6}	6.1×10^{-4}	0.114 0	3.272 0
Y	δ_{xy}	3.8×10^{-8}	1.5×10^{-4}	0.074 6	5.213 3
	δ_{yy}	0	0	0.082 3	4.372 7
	δ_{zy}	8.6×10^{-7}	4.8×10^{-4}	0.052 5	0.363 6
	ϵ_{xy}	2.1×10^{-7}	1.4×10^{-4}	0.019 8	0.386 7
	ϵ_{yy}	4.4×10^{-7}	2.4×10^{-4}	0.110 4	1.076 9
	ϵ_{zy}	4.7×10^{-7}	3.3×10^{-4}	0.049 8	0.509 8
Z	δ_{xz}	3.6×10^{-6}	2.0×10^{-3}	0.199 8	5.133 6
	δ_{yz}	1.3×10^{-6}	7.0×10^{-4}	0.063 3	1.631 5
	δ_{zz}	0	0	0.055 3	9.627 3
	ϵ_{xz}	2.6×10^{-6}	1.4×10^{-3}	0.114 0	3.272 0
	ϵ_{yz}	9.9×10^{-6}	5.7×10^{-3}	1.031 4	8.105 6
	ϵ_{zz}	2.2×10^{-6}	8.9×10^{-4}	0.014 8	3.790 9

y 值处的凸台宽度 d 尺寸误差如下

$$\left. \begin{aligned} d &= x_2 - x_1 \\ d_r &= x_2 + \Delta x_2 - x_1 - \Delta x_1 \\ \Delta d &= d_r - d = \Delta x_1 - \Delta x_2 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中: d_r 为实际值; Δd 为某一 y 处的尺寸误差。

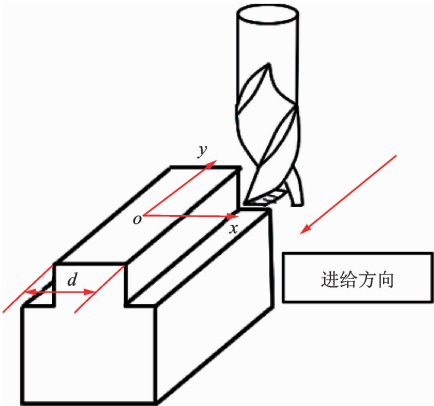


图 12 凸台特征加工示意图

Fig. 12 Schematic diagram of parts machining

2.2 形状误差

形状误差的预测选取了“之”字形平面铣削的平面度来进行预测,首先将加工轨迹离散化。图 13 为

加工轨迹和轨迹离散化示意图。注意离散化的刀具中心轨迹点的 x 值和 y 值距离工件边界处都要大于刀具半径 r , 这样可以保证刀具中心在经过这些点时, 刀具底面始终与工件表面接触, 不会出现刀具悬空的状态。图中蓝色虚线区域表示刀具中心点所在的区域。

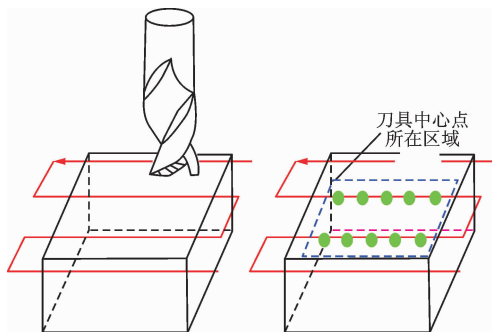


图13 “之”字型加工轨迹与轨迹离散化

Fig. 13 Zigzag milling and discretization of route

将每个位置处的刀具圆周离散为集合 C , 设刀具中心离散化后坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 刀具半径为 r , 则有

$$C = (x_i + r \cos \alpha_k, y_i + r \sin \alpha_k, z_i) \mid \alpha_k = (k-1) \frac{2\pi}{n-1}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (26)$$

当刀具从零误差点移动到工件表面进行切削时, 刀具的位置和姿态发生变化, 刀具圆周离散点集合 C 变为 C' , 将集合 C 中每一个点乘以该处的误差变换矩阵 T_i^w 便可以得到 C' , 如下

$$C' = T_i^w C \quad (27)$$

集合 C' 中的点含有几何误差, 是刀具圆周上的点, 虽然刀具与工件接触形成加工面, 但并非所有 C' 中的点都构成了加工平面, 需要进行筛选。将 C' 中属于工件表面上的点存入集合 D 中, 对于“之”字形轨迹存取原则如图 14 所示。奇数线上存取右上 $1/4$ 圆上的点, 偶数线上存取左下 $1/4$ 圆上的点, 最终构成集合 D 。存取原则确定后, 点的筛选可在刀具圆周离散化过程中同时进行, 如要只选取右上 $1/4$

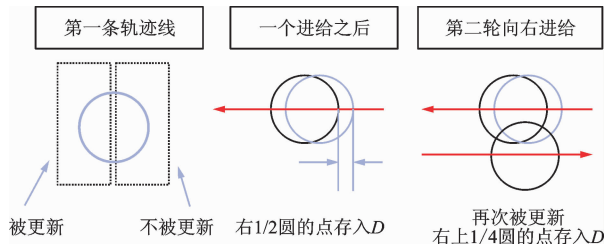


图14 点存取原则

Fig. 14 Principle of pointing selecting

4 圆上的点, 将离散范围变为 $[0, \pi/2]$ 即可。

集合 D 中的点已被保证都隶属于加工表面, 利用最小二乘法对平面度进行预测。以实际被测表面的最小二乘平面作为评定基准面, 以平行于最小二乘平面, 且具有最小距离的两包容平面间的距离作为平面度误差值 E_d 。设基准平面为 $z = ax + by + c$, 则 E_d 可表示为

$$E_d = \max^+ \left\{ \frac{ax_i + by_i + c - z_i}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right\} + \left| \max^- \left\{ \frac{ax_i + by_i + c - z_i}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right\} \right| \quad (28)$$

2.3 位置误差

以孔轴线位置度为例, 如图 15 所示, 把钻头看作圆柱体, 设理想上孔面圆心为 $P_1(x, y, z_1)$, 理想下孔面圆心为 $P_2(x, y, z_2)$, 刀具从零误差点 $O_1(0, 0, 0, 1)$ 移动至钻孔结束点的时候, 在工件表面留下倾斜圆柱孔。实际上孔面圆心为 P_3 , 实际下孔面圆心为 P_4 , 显然 P_3P_4 位于过点 O'_1 且平行于矢量 n' 的直线上, 设该直线上的点为 Q , 已知

$$O'_1 = T_i^w O_1 = \begin{cases} x + \Delta x_P \\ y + \Delta y_P; \\ z + \Delta z_P \end{cases} \quad n' = T_i^w = \begin{cases} \Delta x_U \\ \Delta y_U \\ 1 \end{cases} \quad (29)$$

则 Q 可以表示为

$$Q = O'_1 + \lambda n' = \begin{cases} x + \Delta x_P + \lambda \Delta x_U \\ y + \Delta y_P + \lambda \Delta y_U \\ z + \Delta z_P + \lambda \end{cases} \quad (30)$$

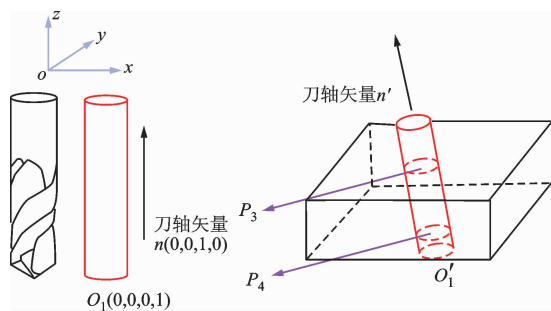


图15 孔轴线位置度建模

Fig. 15 Modeling of position error of hole axis

只要将 P_3P_4 点的 z 值代入式(30), 求出 λ , 便可求出 P_3P_4 点带有误差横纵坐标, 将其与 P_1 和 P_2 作对比, 可得到上下孔面的坐标偏差 Δx_{up} 、 Δy_{up} 、 Δx_{down} 、 Δy_{down} 。但是, 由于误差空间的存在, 刀具在切削的每个位置都会存在位置和姿态的变化, 如图 16 所示。因此, 将刀具参与切削的那段 z 值离散为 n 个点, 对这 n 个位置重复计算后取平均值即可, 但

要注意有些位置处只影响上孔面,不影响下孔面,例如如图 16 中蓝色位置处的刀具只影响上孔面,而不影响下孔面。

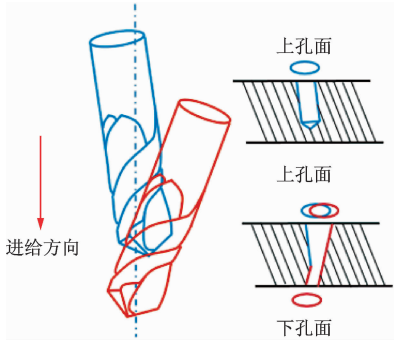


图 16 不同位置的刀具姿态对误差面的影响
Fig. 16 Influence of tool posture in different position

2.4 实验验证

实验件选用 3 个 90 mm×110 mm×150 mm 的铝合金试件, x 方向上为 90 mm,以试件表面中心为加工原点。3 个实验件的加工参数如表 3 所示,加工和测量如图 17 所示。

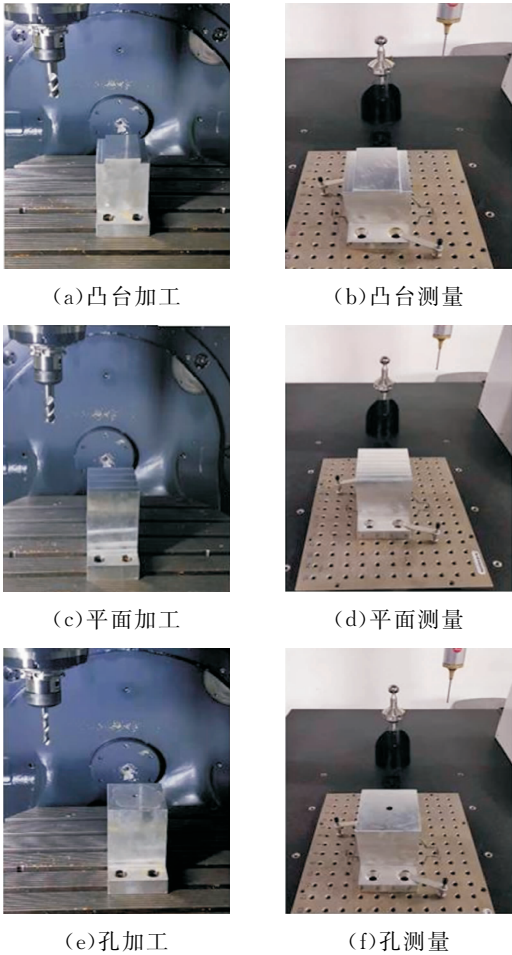


图 17 不同特征实验加工与测量
Fig. 17 Machining and measurement of different feature

凸台两侧均加工,每次切 1 mm,共计 10 mm。其工件坐标系原点在机床坐标系下的位置为 $(-184.698,-276.433,-264.530)$ mm,加工现场与测量现场如图 17a 和 17b 所示。检测时用三坐标仪检测切深 5 mm 处, y 从 50 到 5 mm 处的凸台宽度为 d ,测量间隔为 1 mm,共计 11 个位置。理论计算时,将各处的误差值代入式 (25) 中,检测结果与理论计算结果对比如图 18 所示,由图可知,两者误差均在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 之内,预测模型较为准确。

表 3 不同特征加工参数表

Table 3 Machining parameters of different feature						
位置	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	切深/ mm	切宽/ mm	进给/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	刀具 半径 /mm	刀具 悬长/ mm
凸台	1 000	1	15	800	1	62
平面	1 000	1	14	800	1	62
孔	1 000	2		8	5	65

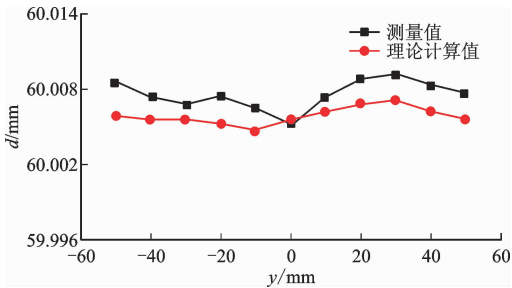


图 18 凸台宽度检测值与理论计算值
Fig. 18 Measuring value and calculating value of part width

平面加工时其工件坐标系原点在机床坐标系的位置为 $(-187.175,-277.316,-264.518)$ mm,加工与测量现场如图 17c 和 17d 所示。检测时,用三坐标仪在加工表面取点,共计 4 个点,然后用最小二乘法计算平面度。理论计算时,刀具中心轨迹离散间隔为 1 mm,刀具圆周离散为 10 个点,选用集合 D 中的点,然后用最小二乘法计算平面度。平面度检测结果为 $0.003\text{ }4\text{ mm}$,计算结果为 $0.001\text{ }5\text{ mm}$,二者差值均在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以内,预测模型较为准确。

孔加工钻孔深度为 30 mm,工件坐标系原点在机床坐标系下的位置为 $(-188.633,-277.051,-366.14)$ mm,加工与测量现场如图 17e 和 17f 所示。检测时,利用三坐标仪对孔深 3 mm 和 28 mm 处的圆心进行检测。理论计算时, z 值离散间隔为 1 mm。检测结果与计算结果对比如表 4 所示,二者差值均在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内,预测模型较为准确。

表 4 孔位置度计算值与检测值对比

Table 4 Calculating and measuring position errors of hole axis

方式	误差/mm			
	上孔面 x	上孔面 y	下孔面 x	下孔面 y
计算值	0.013	0.014	0.019	0.016
检测值	0.017	0.016	0.024	0.019

3 结 论

(1)提出了三轴机床几何误差建模方法,并根据该方法推导出三轴机床刀尖点误差与刀轴矢量误差的表达式,不同组合形式的三轴机床都可按照该方法建模。

(2)采用单基站激光跟踪仪多次测量的方法便捷分离出三轴机床 21 项误差,并进行了多项式拟合,建立了三轴机床的工作空间误差场。

(3)推导了机床误差与尺寸误差、形状误差和位置误差之间的映射关系,分析了以上二者之间的影响关系,实验验证了映射关系的准确性。

参考文献:

[1] 粟时平. 多轴数控机床精度建模与误差补偿方法研究 [D]. 长沙: 中国人民解放军国防科学技术大学, 2002: 35-62.

[2] YANG J, ALTINTAS Y. Generalized kinematics of five-axis serial machines with non-singular tool path generation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 75: 119-132.

[3] 付国强. 基于指数积理论和坐标系微分运动关系的数控机床几何误差建模与补偿方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 45-78.

[4] 李海. 多轴联动数控加工精度预测与机床参数优化 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 10-27.

[5] 朱绍维. 复杂零件五轴铣削加工精度预测与补偿技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013: 77-88.

[6] NOJEDEH M V, HABIBI M, AREZOO B. Tool path accuracy enhancement through geometrical error compensation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(6): 471-482.

[7] TIAN W, GAO W, ZHANG D, et al. A general approach for error modeling of machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 79(4): 17-23.

[8] ZHU S W, DING G F, QIN S F, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensa-

tion of CNC machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 52(1): 24-29.

[9] FAN J W, GUAN J L, WANG W C, et al. A universal modeling method for enhancement the volumetric accuracy of CNC machine tools [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129 (1/2/3): 624-628.

[10] LIN Y, SHEN Y. Modelling of five-axis machine tool metrology models using the matrix summation approach [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(4): 243-248.

[11] HUANG Y B, FAN K C, LOU Z F, et al. A novel modeling of volumetric errors of three-axis machine tools based on Abbe and Bryan principles [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 151: 1027-1035.

[12] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Error compensation in machine tools: a review: part I Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(9): 1235-1256.

[13] HSU Y Y, WANG S S. A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2): 352-360.

[14] HUANG Nuodi, JIN Yongqiao, BI Qingzhen, et al. Integrated post-processor for 5-axis machine tools with geometric errors compensation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 94: 65-73.

[15] RAHMAN M, HEIKKALA J, LAPPALAINEN K. Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools: part I Theory [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(10): 1535-1546.

[16] LIU Y, WAN M, XIAO Q B, et al. Identification and compensation of geometric errors of rotary axes in five-axis machine tools through constructing equivalent rotary axis (ERA) [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 152: 211-227.

[17] 李欢玲. 基于多体理论的数控机床几何误差补偿技术的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 29-74.

[18] XIA C, WANG S, MA C, et al. Crucial geometric error compensation towards gear grinding accuracy Enhancement based on simplified actual inverse kinematic model [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019: 105319.

- [19] 栗时平, 李圣怡, 王贵林. 基于空间误差模型的加工中心几何误差辨识方法 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(7): 121-125.
- SU Shiping, LI Shengyi, WANG Guilin. Identification method for errors of machining center based on volumetric error model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(7): 121-125.
- [20] 陈思敏. 基于十二线法的数控机床几何误差测量方法与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 27-34.
- [21] 王金栋, 郭俊杰, 费致根, 等. 基于激光跟踪仪的数控机床几何误差辨识方法 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 13-19.
- WANG Jindong, GUO Junjie, FEI Zhigen. Method of geometric error identification for numerical control machine tool based on laser tracker [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 13-19.
- [22] 刘又午. 多体动力学的休斯敦方法及其发展 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(6): 601-607.
- LIU Youwu. Development of Huston's method on multibody dynamics [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(6): 601-607.

[本刊相关文献链接]

吕盾, 刘硕, 赵艳超, 等. 具有串联轴伺服进给系统的跟随误差控制策略. 2021, 55(5): 34-44. doi: 10. 7652/xjtuxb202105005.

郭俊康, 李鑫波, 李颀. 导轨五自由度运动误差的光学与倾角传感器组合测量方法. 2021, 55(2): 64-72. doi: 10. 7652/xjtuxb202102008.

王仕璞, 宋朝省, 朱才朝, 等. 正前角双圆弧谐波传动柔轮滚刀设计与齿形误差分析. 2021, 55(1): 127-135. doi: 10. 7652/xjtuxb202101016.

刘玄, 方宗德, 赵宁, 等. 高重合度斜齿轮多齿对啮合的补偿修形设计与分析. 2020, 54(11): 56-64. doi: 10. 7652/xjtuxb202011007.

贾谦, 王建磊, 崔展, 等. 引入螺旋槽制造误差的机械密封性能分析及优化. 2020, 54(11): 46-55. doi: 10. 7652/xjtuxb202011006.

吕盾, 刘青, 刘沛, 等. 五轴机床加工零件轮廓误差预测方法. 2020, 54(2): 9-15. doi: 10. 7652/xjtuxb202002002.

徐明宇, 李亚倩, 陈渭. 考虑孔加工锥度误差影响的液态金属润滑螺旋槽轴承性能分析. 2020, 54(1): 85-92. doi: 10. 7652/xjtuxb202001011.

何帅, 陈富民, 杨雅棠, 等. 基于点云数据的自由曲面加工误差评定. 2019, 53(10): 135-142. doi: 10. 7652/xjtuxb201910019.

朱星星, 赵亮, 雷默涵, 等. 精密进给系统热误差的协同训练支持向量机回归建模与补偿方法. 2019, 53(10): 40-47. doi: 10. 7652/xjtuxb201910006.

吕盾, 李润泽, 刘辉, 等. 数控机床高速高加速进给下的跟随误差控制策略. 2018, 52(12): 25-31. doi: 10. 7652/xjtuxb201812004.

(编辑 杜秀杰)