

基于遗传算法的加工中心精度优化分配方法^{*}

李珂^{①②}, 黄祖广^{①②}, 程竑力^{①②}, 张大卫^③, 梁爽^{①②}, 任国喜^{①②}, 周雪鹏^{①②}

(①通用技术集团机床工程研究院有限公司, 北京 100102; ②通用技术集团高端数控机床重点实验室, 北京 100102; ③天津大学机械工程学院, 天津 300072)

摘要: 为优化几何精度并提升五轴卧式加工中心的正向设计水平, 提出一种基于遗传算法的精度分配方法。以某公司生产的精密五轴卧式加工中心为研究对象, 首先, 分析其结构和误差元素, 利用多体系统理论和齐次坐标变换原理建立几何误差模型; 其次, 在加工空间中不同的位置对误差模型中的 37 项误差进行灵敏度分析, 取单项误差在各位置的最大灵敏度作为全局灵敏度; 最后, 结合误差模型与灵敏度结果, 通过 Isight 和 Matlab 软件结合, 以总成本最小化和全局灵敏度与误差乘积之和最大化为目标, 采用遗传算法进行精度分配。结果表明, 优化后的加工中心能在保持原有精度的基础上成本降低 5.89%, 为五轴加工中心的工艺设计提供了理论依据。

关键词: 卧式加工中心; 遗传算法; 误差建模; 灵敏度分析; 误差分配

中图分类号: TH112

文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.06.019



全文在线

Optimization allocation method for machining center accuracy based on genetic algorithm

LI Ke^{①②}, HUANG Zuguang^{①②}, CHENG Hongli^{①②}, ZHANG Dawei^③,
LIANG Shuang^{①②}, REN Guoxi^{①②}, ZHOU Xuepeng^{①②}

(①Genertec Machine Tool Engineering Research Institute Co., Ltd., Beijing 100102, CHN; ②General Technology Key Laboratory of High-end CNC Machine Tools, Beijing 100102, CHN; ③School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, CHN)

Abstract: To optimize the geometric accuracy and improve the forward design level of the five-axis horizontal machining center, a precision allocation method based on a genetic algorithm is proposed. A precision five-axis horizontal machining center produced by a company is selected as the research object. Firstly, its structure and error elements are analyzed, and the geometric error model is established by using the theory of multi-body system and the principle of homogeneous coordinate transformation. Secondly, the sensitivity of 37 errors in the error model is analyzed at different positions in the machining space, and the maximum sensitivity of a single error at each position is selected as the global sensitivity. Finally, based on the error model and sensitivity calculation results, Isight and Matlab software are combined to minimize the total cost and maximize the sum of the product of global sensitivity and error, and genetic algorithm is used for precision allocation. The results show that the machining center with precision allocation can reduce costs by 5.89% while maintaining the original precision, providing a theoretical basis for the process design of the five-axis machining center.

Keywords: horizontal machining center; genetic algorithm; error modeling; sensitivity analysis; error distribution

在航空航天领域, 复杂曲面和结构的零件应用日益广泛, 五轴加工中心因其强大的复杂零件加工能力, 被广泛应用^[1], 为中国国防工业与高技术产业提供了战略支撑^[2]。近年来, 随着零件复杂度的

提高与工艺技术的改进, 对机床精度的要求越来越高^[3], 而高精度往往意味着高成本。因此, 如何在更低的成本下满足加工中心的精度要求, 已成为各大主机厂和高校的重要研究目标。

机床结构、功能部件的精度等级以及装配质量等因素对加工中心的精度影响显著。通常,主机厂通过采用优质配件和提高装配质量来提升精度,但这也增加成本和生产时间,因此这些指标并非越高越合理^[4]。加工中心的加工精度主要受几何误差、热误差和装配误差等因素影响,其中几何误差占整体误差的比重可达20%~30%,且精度越高,这一比重越大。因此,减小机床的几何误差对提高整机加工精度至关重要^[5-7]。合理分配误差对降低整机成本意义重大。

近年来,相关研究已取得了诸多进展,刘春时等^[8]提出了一种空间误差建模流程,并在某五轴加工中心得到验证;田文杰^[9]基于旋量理论和多体动力学,提出了一种数控机床几何精度设计与补偿方法,并应用于典型卧式加工中心;ZHU S W等^[10]利用多体系统理论,建立了五轴加工中心的综合几何误差模型,并验证了该理论在误差建模中的优越性;CHEN G D等^[11]对五轴超精密数控机床的37个空间误差源进行了灵敏度分析,并应用于机床制造过程;项四通^[12]基于螺旋理论,建立了五轴机床空间误差模型,有效缩短了建模时间;郭世杰等^[13]提出了一种基于GA-QPSO的几何误差参数化建模方法,显著提升了精度;章子玲等^[14]提出一种基于向量投影影响面的数控机床几何精度分配方法,利用概率的不确定性实现了数控机床加工性能的量化分析;王艳红等^[15]提出了一种基于最小二乘法的五轴机床非线性误差建模及补偿方法,通过Matlab仿真验证了其有效性;耿瑞汉等^[16]提出了一种综合考虑机床几何误差和自重影响的空间误差建模方法,并通过试验验证了其正确性。

然而目前对五轴加工中心的研究较少,对其灵敏度的计算往往局限于空间中的某一坐标,成本公差模型还不够合理。因此,本文提出了一种基于遗传算法的精密五轴卧式加工中心精度分配方法,建立误差模型对各个误差项进行全局灵敏度分析,得到各项误差在加工空间内对加工中心误差的影响程度,并在确定误差项溯源的前提下,确定精度的约束条件,建立误差分配模型,得到精度分配方案,为五轴加工中心工艺设计提供理论依据。

1 加工中心误差建模

1.1 加工中心误差分析

五轴精密卧式加工中心结构如图1所示,加工

中心采用经典的倒T型床身,转台、摆头结构, X 、 Y 、 Z 轴行程分别为1 700、1 650和1 900 mm, B 轴转台绕 Y 轴旋转运动,运动范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$, A 轴摆头绕 X 轴进行运动,运动范围为 $-70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。

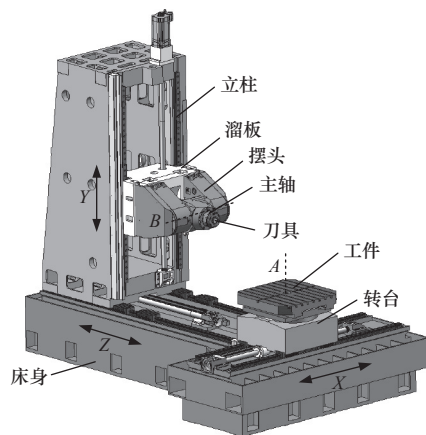


图1 精密五轴卧式加工中心结构

Fig. 1 Precision five-axis horizontal machining center structure

根据多体系统理论,得出图2所示的精密五轴卧式加工中心的拓扑结构,加工中心分成2条结构链,一条为床身→转台→工件,另一条为床身→立柱→溜板→摆头→主轴→刀具。在每个拓扑结构上建立局部坐标系,将刀尖点和工件加工点分别在刀具和工件的局部坐标系中的位置,通过坐标变换转换到床身坐标系中,相减即可得出加工中心的误差。

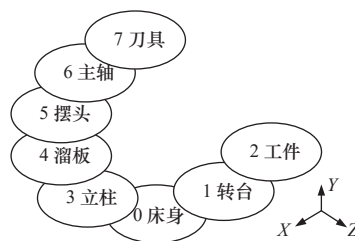


图2 精密五轴卧式加工中心拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of precision five-axis horizontal machining center

理想状态下刀尖点和工件加工点在床身坐标系中的位置是相同的,由于装配过程中存在误差,导致坐标转换的过程中理想位置发生变化。坐标变换中的误差项 ΔT_j (共37项误差)见表1,每个轴在运动过程中有 X 、 Y 、 Z 三向直线度误差,俯仰、偏摆和倾斜3个角度误差,同时会产生3个直线轴的垂直度误差 S_{xy} 、 S_{yz} 、 S_{xz} ,其中 S_{ay} 、 S_{az} 为 X 轴和 A 轴的平行度误差在 Y 、 Z 方向的分量, S_{bx} 、 S_{bz} 为 Y 轴和 B 轴的平行度误差在 X 、 Z 方向的分量。

表 1 精密五轴卧式加工中心装配误差

Tab. 1 Assembly error of precision five-axis horizontal machining center

	直线度误差			角度误差			垂直和平行度误差
	X	Y	Z	绕 X	绕 Y	绕 Z	
沿 X 轴	δ_{xx}	δ_{yx}	δ_{zx}	ε_{xx}	ε_{yx}	ε_{zx}	S_{xy} 、 S_{yz} 、 S_{xz} 、 S_{ay} 、 S_{az} 、 S_{bx} 、 S_{bz}
沿 Y 轴	δ_{xy}	δ_{yy}	δ_{zy}	ε_{xy}	ε_{yy}	ε_{zy}	
沿 Z 轴	δ_{xz}	δ_{yz}	δ_{zz}	ε_{xz}	ε_{yz}	ε_{zz}	
沿 A 轴	δ_{xa}	δ_{ya}	δ_{za}	ε_{xa}	ε_{ya}	ε_{za}	
沿 B 轴	δ_{xb}	δ_{yb}	δ_{zb}	ε_{xb}	ε_{yb}	ε_{zb}	

1.2 加工中心误差建模

为便于精密五轴卧式加工中心的建模,选取床身坐标系作为基准坐标系,建立在溜板处于零点位置时 X 轴导轨基面的中心点上;转台坐标系建立在其 X 轴上4个滑块的中心点上;工件坐标系建立在转台上端面的中心点;立柱坐标系的零点为立柱处

于零点位置时, Y 轴4个滑块中心点在 Y 轴导轨基面的投影;溜板坐标系在 Y 轴4个滑块平面的中心点;摆头坐标系的零点为 Y 轴4个滑块平面的中心点在溜板平面内的投影;主轴坐标系建立在 B 轴中心位置;刀具坐标系建立在主轴头中心点。各局部坐标系的变换矩阵如式(1)~式(7)所示。

$$T_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_{01} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} & \delta_{xx} \\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \delta_{yx} \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -S_{bz} & 0 & 0 \\ S_{bz} & 1 & -S_{bx} & 0 \\ 0 & S_{bx} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta A) & 0 & \sin(\beta A) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta A) & 0 & \cos(\beta A) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zb} & \varepsilon_{yb} & \delta_{xb} \\ \varepsilon_{zb} & 1 & -\varepsilon_{xb} & \delta_{yb} \\ -\varepsilon_{yb} & \varepsilon_{xb} & 1 & \delta_{zb} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_{03} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{03} \\ 0 & 1 & 0 & y_{03} \\ 0 & 0 & 1 & z_{03} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & S_{xz} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_{xz} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zz} & \varepsilon_{yz} & \delta_{xz} \\ \varepsilon_{zz} & 1 & -\varepsilon_{xz} & \delta_{yz} \\ -\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{xz} & 1 & \delta_{zz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_{34} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_{34} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -S_{yz} & 0 & 0 \\ S_{yz} & 1 & -S_{xy} & 0 \\ 0 & S_{xy} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{yy} & \delta_{xy} \\ \varepsilon_{zy} & 1 & -\varepsilon_{xy} & \delta_{yy} \\ -\varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} & 1 & \delta_{zy} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -S_{az} & S_{ay} & 0 \\ S_{az} & 1 & 0 & 0 \\ S_{ay} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta A) & -\sin(\beta A) & 0 \\ 0 & \sin(\beta A) & \cos(\beta A) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{za} & \varepsilon_{ya} & \delta_{xa} \\ \varepsilon_{za} & 1 & -\varepsilon_{xa} & \delta_{ya} \\ -\varepsilon_{ya} & \varepsilon_{xa} & 1 & \delta_{za} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_{56} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_{67} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: y_{01} 、 y_{12} 、 x_{03} 、 y_{03} 、 z_{03} 、 y_{34} 、 z_{45} 、 z_{56} 、 z_{67} 为局部坐标系之间的距离; x 、 y 、 z 为三轴运动的距离; βA 、 βB 分别为摆头、转台运动的角度。

误差方程如公式(8)~式(10)所示。

$$P_{w_actual} = T_{01} \times T_{12} \times P_w \quad (8)$$

$$P_{t_actual} = T_{03} \times T_{34} \times T_{45} \times T_{56} \times T_{67} \times P_t \quad (9)$$

$$\Delta T = P_{t_actual} - P_{w_actual} = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad 1]^T \quad (10)$$

式中: P_{w_actual} 、 P_{t_actual} 为转化后的待加工点和刀尖点坐标,将待加工点和刀尖点在局部坐标系下的位置通过坐标变换矩阵同时转换到床身坐标系,并相减得到误差; P_w 为待加工点的局部坐标位置, P_t 为

刀尖点位置； ΔT 为误差矩阵； Δx 、 Δy 、 Δz 为加工中心在 X 、 Y 、 Z 三个方向上的误差。

2 加工中心全局灵敏度分析

2.1 加工中心灵敏度

单项误差相互耦合形成加工中心的空问误差，不同单项误差对空问误差的影响程度不同，灵敏度系数能够定量反映误差元素对误差模型的作用。由式（1）～式（8）可知，转换矩阵中存在 x 、 y 、 z 、 βA 、 βB 这 5 个描述加工中心位置的变量，这些变量随机床各轴运动而变化。因此，在不同的加工位置下，机床误差大小及其对整体精度的影响也不同。仅用单一坐标位置衡量机床精度是不合理的。本文采用单项误差在加工空间不同位置对整体精度影响的最大值作为机床的灵敏度，因为这些最大灵敏度值对装配工作具有实际指导意义。

$$S_{ij} = \left| \frac{\partial \Delta T_j}{\partial u_i} \right| \quad (11)$$

$$S_j = \sqrt{\sum_{i=1}^3 S_{ij}^2} \quad (12)$$

$$S_j^* = \max S_j \quad (13)$$

式中： ΔT_j 为 37 项误差， j 为误差项数量， $j=1,2,\dots,37$ ； u_i 为 X 、 Y 、 Z 三个方向位置变量； S_{ij} 为单项误差在某一方向和位置的灵敏度，通过单项误差在某一方向的分量求偏导数，可以得到该误差在特定位置的灵敏度； S_j 为单项误差在某一位置的灵敏度，为不同方向灵敏度的平方和； S_j^* 为单项误差在机床不同位置的灵敏度最大值，为单项误差对整体机床的灵敏度； i 为方向数量， $i=1,2,3$ 。

2.2 加工中心误差溯源

在确定全局灵敏度公式后，计算具体灵敏度数值需要为误差分配具体值。机床几何精度主要受零部件制造精度和装配误差的影响，这些几何误差相互关联。因此，合理选择误差的最大值对确保几何精度优化分配结果的准确性至关重要。几何误差与相关零部件误差的对应关系如下^[17]。

（1）丝杠螺纹磨损累积误差：线位移误差 δ_{xx} 、 δ_{yy} 、 δ_{zz} 。

（2）垂直面内直线度误差：垂直面线位移误差 δ_{yx} 、 δ_{zy} 、 δ_{yz} 。

（3）水平面内的直线度误差：水平面内的线位移误差 δ_{zx} 、 δ_{xy} 、 δ_{xz} 。

（4）导轨的平行度误差：倾斜误差 ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} 。

（5）定子转子误差： A 、 B 轴 6 项直线度误差与两项自身转角误差。

以上误差取值基于加工中心装配过程中的内控标准，其余误差可通过表 2 中的对应关系计算得出，误差源与精度参数的关系见表 2。

2.3 加工中心灵敏度建模

将 2.2 节中的所有参数代入式（12）～式（14），计算各误差项的灵敏度，并对其进行归一化处理，最终得到加工空间不同位置的误差项灵敏度。

由图 3 可知， X 轴方向误差分量的关键误差项： ε_{yx} 、 ε_{zx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zy} 、 ε_{yz} 、 ε_{zz} 、 S_{xz} 、 S_{yz} 、 δ_{ya} 、 δ_{xb} 、 δ_{yb} 、 δ_{zb} 、 ε_{xa} 、 ε_{ya} 。 Y 轴方向上误差分量的关键误差项： ε_{xx} 、 ε_{zx} 、 δ_{xb} 、 δ_{zb} 、 ε_{za} 、 S_{bz} 。 Z 轴方向误差分量的关键误差项： ε_{xx} 、 ε_{yx} 、 ε_{xy} 、 ε_{xz} 、 S_{xy} 、 δ_{xb} 、 δ_{yb} 、 δ_{zb} 、 ε_{za} 。

表 2 误差源与精度参数的关系

Tab. 2 Relationship between error sources and precision parameters

垂直度误差与精度参数的关系		角度误差与精度参数的关系			
误差项	关系式	误差项	关系式	误差项	关系式
S_{xy}	$S_{xy} = \arctan(\delta_{yx}/l_y) - \arctan(\delta_{zx}/l_x)$	ε_{yx}	$\varepsilon_{yx} = \delta_{yx}/l_x$	ε_{zx}	$\varepsilon_{zx} = \delta_{zx}/l_x$
S_{yz}	$S_{yz} = \arctan(\delta_{yz}/l_z) - \arctan(\delta_{zy}/l_y)$	ε_{xy}	$\varepsilon_{xy} = \delta_{xy}/l_y$	ε_{zy}	$\varepsilon_{zy} = \delta_{zy}/l_y$
S_{xz}	$S_{xz} = \arctan(\delta_{zx}/l_x) - \arctan(\delta_{xz}/l_z)$	ε_{xz}	$\varepsilon_{xz} = \delta_{xz}/l_z$	ε_{yz}	$\varepsilon_{yz} = \delta_{yz}/l_z$
S_{ay}	$S_{ay} = \arctan(\delta_{ya}/l_a) - \arctan(\delta_{yx}/l_x)$	ε_{ya}	$\varepsilon_{ya} = \delta_{ya}/l_a$	ε_{za}	$\varepsilon_{za} = \delta_{za}/l_a$
S_{az}	$S_{az} = \arctan(\delta_{za}/l_a) - \arctan(\delta_{zx}/l_x)$	ε_{xb}	$\varepsilon_{xb} = \delta_{xb}/l_b$	ε_{zb}	$\varepsilon_{zb} = \delta_{zb}/l_b$
S_{bx}	$S_{bx} = \arctan(\delta_{xb}/l_b) - \arctan(\delta_{xy}/l_y)$				
S_{bz}	$S_{bz} = \arctan(\delta_{zb}/l_b) - \arctan(\delta_{zy}/l_y)$				

注： l_x 、 l_y 、 l_z 为分别为 X 、 Y 、 Z 三向导轨的行程， l_a 、 l_b 分别为摆头、转台回转轴半径。

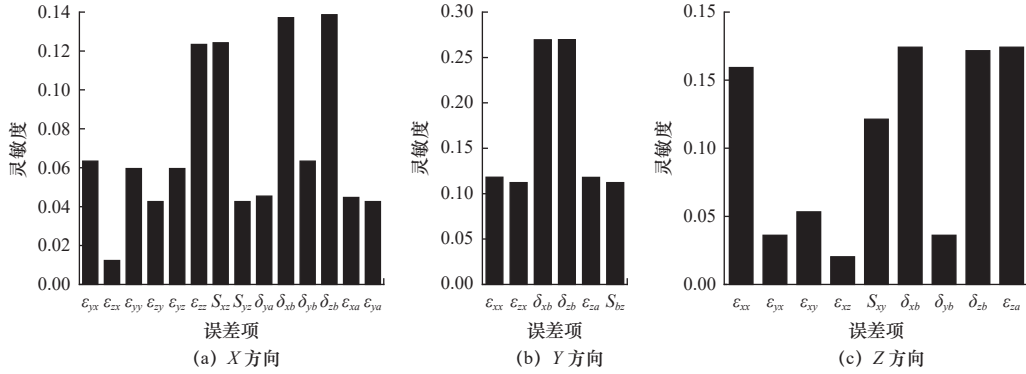


图3 机床运动过程中各项误差的灵敏度

Fig. 3 Sensitivity of various errors during machine tool motion

3 加工中心精度分配

3.1 精度分配多目标优化模型

在实际生产中,为满足机床高精度要求,工艺指标常被设定得过于严格,这不仅增加了生产成本,还提高了装配难度。反之,如果工艺指标设定过于宽松,则可能无法满足精度要求。目前,主流的误差分配方法是成本-公差模型,该方法依赖于基于过往经验和生产实践总结的经验公式^[18]来估算整体成本。然而,随着工业母机的快速发展,成本结构发生变化,这些经验公式已存在误差。为了解决这一问题,本文引入一个目标函数,以最大化全局灵敏度与误差乘积之和为目标,使误差项分布更加均匀,避免某些误差源被过度优化,而其他误差源被忽视,从而导致整体精度不平衡。

成本-公差模型分为两部分^[19]:首先为制造成本,按加工类型分成4个部分,其中外圆特征成本为

$$C_{11}(t) = \begin{cases} 15.1138 \times e^{-42.2874 \times t} + \frac{t}{0.8611 \times t + 0.01508} & t \leq 0.11 \\ 1.151063 & t > 0.11 \end{cases} \quad (14)$$

定位特征成本为

$$C_{12}(t) = \begin{cases} 13.3114 \times e^{-0.0438/t} + 7.6593 \times e^{-25.1731 \times t} & t \leq 0.11 \\ 1.463467 & t > 0.11 \end{cases} \quad (15)$$

内孔特征成本为

$$C_{13}(t) = \begin{cases} 13.4998 \times t \times e^{-0.015048/t} + 13.0973 e^{-25.5481 \times t} & t < 0.11 \\ 2.282035 & t \geq 0.11 \end{cases} \quad (16)$$

平面特征成本为

$$C_{14}(t) = \begin{cases} 15.1138 \times e^{-15.8903 \times t} + \frac{t}{0.3927 \times t + 0.1176} & t \leq 0.11 \\ 1.273338 & t > 0.11 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $C_{11}(t)$ 、 $C_{12}(t)$ 、 $C_{13}(t)$ 、 $C_{14}(t)$ 分别为外圆、定位、内孔、平面特征成本; t 为误差项具体值。

将精密五轴卧式加工中心的37项几何误差近似为机床零部件加工误差的一半,并按其加工特征进行分类^[20]:外圆特征尺寸为 δ_{xx} 、 δ_{yy} 、 δ_{zz} ;内孔特征尺寸为 δ_{xb} 、 δ_{zb} 、 ϵ_{xb} 、 ϵ_{yb} 、 ϵ_{zb} 、 S_{xb} 、 S_{zb} 、 δ_{ya} 、 δ_{za} 、 ϵ_{xa} 、 ϵ_{ya} 、 ϵ_{za} 、 S_{ya} 、 S_{za} ;其余为平面特征尺寸。

成本-公差模型的另一方面为质量损失成本。对于精密五轴卧式加工中心来说,采用望小特性,质量损失成本 C_2 为

$$C_2 = \frac{1}{37} \times K \times \sum_{j=1}^{37} \Delta T_j \quad (18)$$

式中: K 为比例常数。

成本-质量方法是一种将制造成本和质量损失成本结合起来考虑的方法,其目标是最小化总成本。这种方法是实现零件公差优化分配的重要依据^[19]。总成本 C 为

$$C = C_1(t) + C_2(t) \quad (19)$$

式中: $C_1(t)$ 为制造成本。

目标函数方面,常用的成本-公差模型成本与公差之间呈反比例关系,公差范围越大成本越低,而每个误差值对整体加工误差的影响度不同,所以以几何误差对五轴精密卧式加工中心的全局灵敏度为权重,各个误差值与全局灵敏度的乘积的最大值作为设计目标,通过目标函数取最大值来使成本尽可能取最小值,从而在一定程度上修正成本-公差模型,定义的目标函数 $f(t)$ 为

$$f(t) = \sum_{j=1}^{37} S_j^* \times \Delta T_j \quad (20)$$

式中: S_j^* 为全局最大灵敏度。

除此之外,要使得各个误差项满足机床整体直

线度要求,定位精度要小于 $5\ \mu\text{m}$ 。

3.2 精度分配

使用 Matlab 进行误差运算与灵敏度计算,利用 Isight 中的遗传算法 NSGA-II 结合 Matlab 对五轴精密卧式加工中心精度分配。参数设置:初始种群大小设置为 100,随机均匀分布,变量维数按照误差个数设置为 37,按照 0~1 二进制杂交,交叉概率设置为 0.8,运行求解。

成本-公差模型遗传算法结果如图 4 所示,目标函数的遗传算法结果如图 5 所示,目标函数与成本—公差模型由散乱逐渐收敛,在 3 000 次以后逐渐收敛,目标函数值与成本模型变动很小,直到 3 700 代算法结束,得到模型最优解。

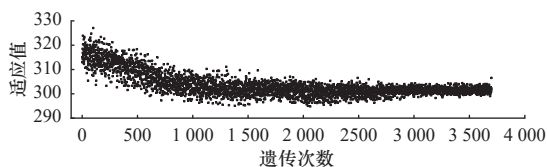


图 4 成本-公差模型遗传算法结果

Fig. 4 Cost tolerance model genetic algorithm results

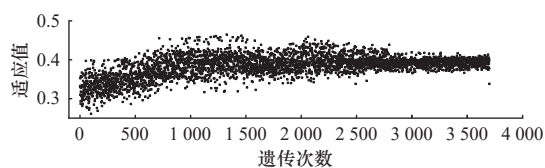


图 5 目标函数遗传算法结果

Fig. 5 Objective function genetic algorithm results

选取曲线上两个优化目标相对均衡的点作为优化结果,具体见表 3。结果表明,经过多目标优化后的机床精度分配,在保持原有精度指标的前提下,装配成本降低至 300.65 元,相较于优化前的 318.38 元,成本降低 5.89%,经过优化后的指标有效降低了装配成本。

4 结语

本文提出了一种精密五轴卧式加工中心几何精度优化分配方法。通过对精密五轴卧式加工中心的结构及误差元素进行深入分析,利用多体系统理论和齐次坐标变换原理建立了加工中心的几何误差模型,进行了灵敏度分析,并选取了单项误差在不同位置灵敏度的最大值作为全局灵敏度,结合误差模型与灵敏度计算结果,采用遗传算法对精密五轴卧式加工中心进行了精度分配,结论如下:

(1) 对未进行精度分配的五轴加工中心进行

分析,发现对于 X 轴方向上的误差分量,其关键误差项为 ε_{yx} 、 ε_{zx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zy} 、 ε_{yz} 、 ε_{zz} 、 S_{xz} 、 S_{yz} 、 δ_{ya} 、 δ_{xb} 、 δ_{yb} 、 δ_{zb} 、 ε_{xa} 、 ε_{ya} ; 对于 Y 轴方向上的误差分量,其关键误差项为 ε_{xx} 、 ε_{zx} 、 δ_{xb} 、 δ_{zb} 、 ε_{za} 、 S_{bz} ; 对于 Z 轴方向上的误差分量,其关键误差项为 ε_{xx} 、 ε_{yx} 、 ε_{xy} 、 ε_{xz} 、 S_{xy} 、 δ_{xb} 、 δ_{yb} 、 δ_{zb} 、 ε_{za} 。

表 3 精度分配结果

Tab. 3 Precision allocation results

变量	优化前	优化后	变量	优化前	优化后
δ_{xx}	0.004	0.003 9	ε_{yy}	0.002	0.003 5
δ_{yy}	0.004	0.005 0	ε_{zz}	0.002	0.002 7
δ_{zz}	0.004	0.007 1	δ_{xa}	0.001	0.001 9
δ_{yx}	0.004	0.006 8	δ_{ya}	0.006	0.010 0
δ_{zy}	0.004	0.005 5	δ_{za}	0.006	0.011 0
δ_{yz}	0.004	0.005 8	δ_{xb}	0.006	0.001 2
δ_{zx}	0.004	0.007 7	δ_{yb}	0.001	0.001 3
δ_{xy}	0.004	0.004 4	δ_{zb}	0.006	0.011 0
δ_{xz}	0.004	0.002 0	ε_{xa}	0.001 7	0.012 0
ε_{xx}	0.002	0.002 8	ε_{yb}	0.001 7	0.002 7

(2) 经基于遗传算法的精度分配,加工中心在保持原有精度的同时,成本降低了 5.89%。这一结果不仅验证了所提方法的有效性,还为五轴加工中心工艺设计提供了理论依据,实现了在不牺牲精度的前提下的成本优化。

参 考 文 献

- [1] 段向敏,张春,游思凯. 马扎克五轴加工中心后处理研究及验证 [J]. 机械设计与制造, 2024(3): 239-242.
- [2] 陈剑峰,黄祖广,刘志峰,等. 机床行业发展现状及未来趋势浅析与思考 [J]. 制造技术与机床, 2023(6): 68-72.
- [3] 费亚,李颖,陶文坚,等. 基于西门子 Trace Service 数控机床五轴联动精度评估模块二次开发 [J]. 制造技术与机床, 2023(6): 105-111.
- [4] 刘兴兴. 精密卧式加工中心几何精度优化分配方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [5] 盛伯浩,唐华. 数控机床误差的综合动态补偿技术 [J]. 制造技术与机床, 1997(6): 19-21.
- [6] 杨枝. 高档数控机床几何误差建模与参数溯源优化技术及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [7] 李磊,胥云,王松明,等. 立加机床主轴轴线几何精度优化 [J]. 制造技术与机床, 2023(11): 161-165.
- [8] 刘春时,孙伟,李小彭,等. 面向五轴数控机床的空间误差建模流程研究 [J]. 机床与液压, 2009, 37(8): 4-7.
- [9] 田文杰. 精密卧式加工中心几何精度设计及误差补偿方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [10] ZHU S W, DING G F, QIN S F, et al. Integrated geometric error modeling,



- identification and compensation of CNC machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 52(1): 24-29.
- [11] CHEN G D, LIANG Y C, SUN Y Z, et al. Volumetric error modeling and sensitivity analysis for designing a five-axis ultra-precision machine tool[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(9-12): 2525-2534.
- [12] 项四通. 五轴数控机床空间误差测量、建模与补偿技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [13] 郭世杰, 武建新, 乔冠, 等. 数控机床几何误差正弦低次多项式参数化建模与应用研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(10): 136-146.
- [14] 章子玲, 胡雄, 亓寅, 等. 基于向量投影响应面的数控机床几何误差分配方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(2): 384-391.
- [15] 王艳红, 喻伟男, 李冬, 等. 五轴数控机床非线性误差建模及补偿方法[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022(2): 25-28.
- [16] 耿瑞汉, 陶浩浩, 李同杰, 等. 一种多误差因素影响下的空间误差建模方法[J]. *制造技术与机床*, 2024(4): 140-147.
- [17] 张翠. 基于稳健设计的多轴数控机床几何误差反演与优化方法[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [18] 崔玉莲, 吴纬. 稳健设计综述[J]. *质量与可靠性*, 2010(4): 10-13.
- [19] 杨将新, 吴昭同. 基于加工特征的成本—公差模型研究[J]. *工程设计学报*, 1995(3): 22-24.
- [20] CAI L G, ZHANG C, CHENG Q, et al. An optimization method for geometric error of machine tool based on NSGA-II[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 418: 180-186.
- 第一作者: 李珂, 男, 1988 年, 博士, 研究方向为机床精度设计及误差补偿。E-mail: like19@jcs.gt.cn
- 通信作者: 黄祖广, 男, 1974 年, 博士, 教授级高级工程师, 通用技术集团机床工程研究院副院长, 研究方向为高端数控装备性能与可靠性测评、标准等共性关键技术、数字孪生、预测性维护等。E-mail: huangzuguang@jcs.gt.cn
- (编辑 张亚然)
- (收修改稿日期: 2025-03-13)

论文推荐

王小友, 廖映华, 王华. 基于 OPC UA 的挤出生产线监控系统信息模型[J]. *制造技术与机床*, 2023(4): 141-147.



扫码获取全文

基于 OPC UA 的挤出生产线监控系统信息模型

王小友 廖映华 王华

四川轻化工大学机械工程学院

摘要 针对挤出生产车间设备种类繁多, 设备通讯方式多样, 数据语义格式不一, 形成多源异构数据无法统一采集的难题, 以塑料挤出生产线为研究对象, 提出一种基于 OPC UA 的挤出生产线监控系统信息模型。运用 OPC UA 信息建模理论, 结合挤出生产线加工应用场景抽象出整体信息模型, 通过定义类型模型建立可扩展的信息模型并实例化描述, 使用 UaModeler 输出结构明确的可视化信息模型和 XML 模型描述文件。将生成的 XML 文件映射到 OPC UA 服务器地址空间, 利用 OPC UA 客户端工具 UaExpert 连接 OPC UA 服务器对 OPC UA 信息模型进行测试。结果表明在 OPC UA 框架下构建的挤出生产线实例化信息模型的正确性和可行性, 数据信息能以标准化方式采集和统一的接口访问方式进行信息通讯。

关键词 挤出机生产线; 监控系统; OPC UA; 信息模型; 信息通讯