

DOI: 10.3901/JME.2019.17.145

精密机床加工误差灵敏度分析与公差设计

刘奕颖 郭俊康 李宝童 洪 军 刘志刚

(西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049)

摘要: 加工精度是衡量精密机床加工性能的重要指标, 当前针对提高加工精度的研究主要围绕误差补偿展开, 缺少根据加工件的精度要求而进行机床运动轴公差设计的研究。从公差设计的角度出发, 通过机床空间运动误差建模、蒙特卡洛法模拟, 实现最小二乘法评价零件加工精度; 利用正交试验方法, 得到某项精度要求与机床运动轴误差的公差带的多组对应数据, 通过多元线性回归, 进行灵敏度分析; 同时基于自适应遗传算法, 给出了运动轴误差的公差设计方法, 保证所设计的公差带在装配工艺上的可行性。通过对某精密卧式坐标镗床 29 项误差公差带设计, 验证了该方法的可行性。

关键词: 机床; 运动轴误差; 灵敏度分析; 公差设计

中图分类号: TG156

Sensitivity Analysis and Tolerance Design for Precision Machine Tool

LIU Yiying GUO Junkang LI Baotong HONG Jun LIU Zhigang

(Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: The least squares method is used to evaluate the part machining precision from the perspective of tolerance design, by using the machine tool space motion error modeling, the Monte Carlo method and the Matlab software, and the precision requirements and the machine movement axis are obtained by the orthogonal test method. Multiple sets of corresponding data of the error tolerance band, through multiple linear regression, sensitivity analysis. At the same time based on adaptive genetic algorithm, a tolerance design method for motion axis error is given to ensure the feasibility of the designed tolerance zone in the assembly process. The feasibility of the method is verified through the design of 29 error tolerance bands for a precision horizontal coordinate boring machine.

Key words: machine tools; motion axis error; sensitivity analysis; tolerance design

0 前言

加工精度是评价机床性能的重要指标, 加工精度的提升与保障是机床设计与制造技术研究的重点。影响加工精度的主要因素有机床几何误差、机床热变形、机床控制系统误差等, 其中机床装配完成后的几何误差对加工精度的影响最直接, 是加工精度保障的首要环节。精密机床的几何精度要求十分苛刻, 因此在设计阶段, 需要通过合理分配运动轴公差来保证加工精度。目前, 运动轴公差设计严重依赖经验, 缺乏量化的加工精度到公差优化设计技术方法, 导致加工精度难保证及零件公差分配不合理、加工成本过高问题。

当前对机床加工精度的研究主要集中在机床零

件形状误差和变形误差在机床多体系统中的偏差传递规律上^[1-6]。文献[7]使用螺旋理论对机床体积误差在整机坐标系下建模再将误差映射到工件坐标系下, 在加工路径上用运动学模型对误差进行补偿。文献[8]利用基于机床运动链中各轴之间拓扑关系的迭代算法进行误差补偿。这些研究工作虽然面向整机加工精度, 但大多是围绕误差建模与误差补偿的研究^[9-10], 而由床身导轨—线轨—滑块—工作台装配误差传递链引入的几何误差无法通过误差补偿消除^[11-12], 在装配过程中就需要保证装配质量, 保障加工精度。因此, 需要根据加工件的精度要求而进行机床运动轴误差的公差带大小设计研究, 在设计阶段解决机床几何误差对机床加工精度的影响。

公差设计不仅影响加工精度, 同时也决定了装配成本。目前, 公差设计逐渐转向公差优化设计, 即在达到精度要求的前提下使成本最低, 为实现这一目标, 研究出的方法有基于全局优化和误差敏感

* 国家科技重大专项资助项目(2017ZX04012001)。20181205 收到初稿, 20190505 收到修改稿

性分析的静态精度设计方法^[13]、面向功能的公差设计^[14]、并行工序公差优化设计方法^[15-16]等。

本文首先在机床空间运动误差模型的基础上,在运动轴误差公差带内随机生成误差,用蒙特卡洛法模拟刀具运动轨迹上的点,用最小二乘得到加工精度指标的评价方法。再通过正交试验的方法获得某项精度要求与机床运动轴误差的公差带的多组对应数据,然后利用数据回归方法得到该精度要求与运动轴误差公差带之间的映射关系。当有多个精度指标时,利用自适应遗传算法分配机床运动轴各项误差的公差带,使所有指标达到精度要求的同时输出成本最低。

1 机床加工精度评价方法

1.1 机床空间运动误差模型

多轴数控机床可以加工出各种有不规则曲线或曲面的零件,机床通过多个运动轴的联动来实现复杂的刀具轨迹运动,刀尖点的加工轨迹误差是各运动误差项积累和传递的结果。但机床自身结构的复杂性以及各个运动轴的运动误差使机床的误差规律难以掌握,因此首先需要对机床进行误差分析,建立模型描述单轴的运动误差及轴与轴之间的空间误差,根据运动轴传递链合成位置误差,描述机床的加工轨迹误差。

本文研究的某精密卧式坐标镗床如图 1 所示,该坐标镗床主要由床身、立柱、滑鞍、主轴箱、工作台等五大基础部件组成,在同一空间直角坐标系内表示 X, Y, Z 三个平动轴和与 Y 轴平行的工作台的 B 转动轴的位姿误差如图 2 所示,描述了该精密机床的空间运动误差状态。坐标系 X 轴与机床实际 X' 轴重合,坐标系的 $X-Y$ 平面由机床实际 $X'-Y'$ 确定,其传递链如图 3 所示。在该坐标系下,定义该卧式加工中心各项误差如表 2 所示,该卧式加工中心共有 29 项误差。基于这些误差项,可以对机床的几何精度状态进行综合评价,预测机床的加工轨迹误差。

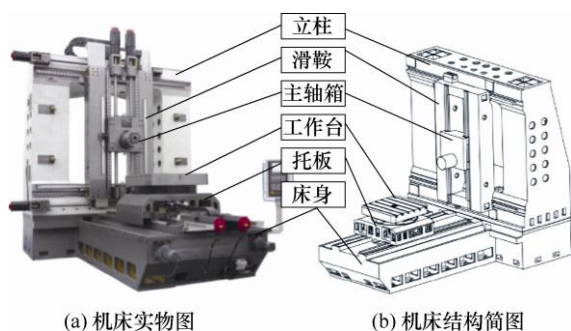


图 1 某精密卧式坐标镗床

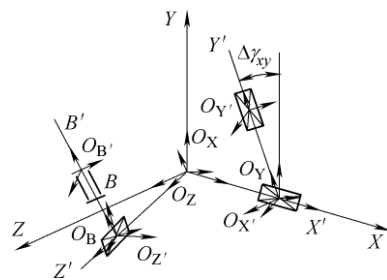


图 2 运动轴位姿误差

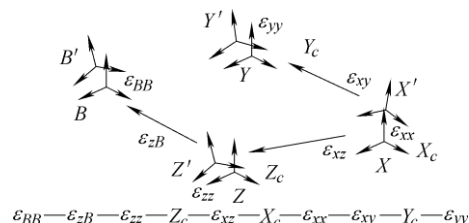


图 3 运动传递链

在加工空间中(图 4),在工件坐标系下,任一指令点的实际位置与理想位置误差的三个方向分量用 29 项误差可以表示为式(1)^[17]。

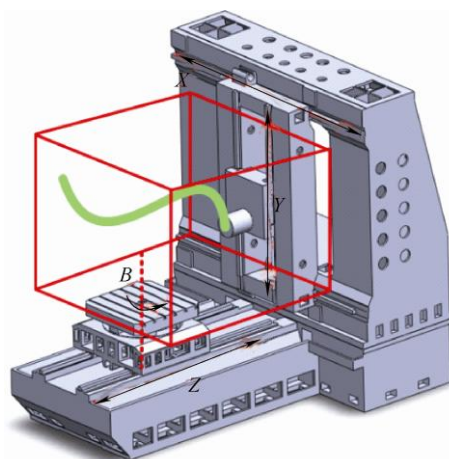


图 4 加工空间

刀尖点实际位置误差是 X 、 Y 、 Z 、 B 轴运动误差共同导致的结果,即任意因素改变,刀尖点位置误差会跟着发生变化。蒙特卡洛法是一种真实模拟实际物理过程有效方法,29 项误差在其公差带内随机生成,每个刀尖点的理想位置坐标加上位置误差,从而获得刀尖点在整个加工路径上多个点的位置坐标数据。

$$\begin{aligned} \Delta_x &= \Delta x_x + \Delta x_y - \Delta x_z - \Delta x_B + \\ &(\Delta \gamma_{yB} + \Delta \gamma_B) \cdot Y_c + (\Delta \beta_z + \Delta \beta_B) \cdot Z_c \\ \Delta_y &= \Delta y_x + \Delta y_y - \Delta y_z - \Delta y_B - \\ &(\Delta \gamma_B + \Delta \gamma_{yB} + \Delta \gamma_x + \Delta \gamma_{xy}) \cdot X_c - (\Delta \alpha_z + \Delta \alpha_{yB}) \cdot Z_c \\ \Delta_z &= \Delta z_x + \Delta z_y - \Delta z_z - \Delta z_B + \\ &(\Delta \beta_B + \Delta \beta_z + \Delta \beta_{xz}) \cdot X_c - (\Delta \alpha_B + \Delta \alpha_{yB}) \cdot Y_c \end{aligned} \quad (1)$$

$$R^2 = (x - A)^2 + (y - B)^2$$

*注：名义规格 $l=320$ 。

的随机性,采用蒙特卡洛法模拟得到产生各项加工误差的运动轴误差轨迹,输入运动轴的 29 项误差,由传递函数得到对应加工特征的精度评价。如在运动轴公差对加工精度预测分析中,可依据表 3 公差值,用蒙特卡洛法模拟刀具点的实际位置,并进行精度评价。以图 5 标准试件直径为 218 mm 的外圆

表 3 运动轴 29 项误差的公差带(mm)

几何意义		表达式	公差带
X 平动轴	O_X 相对于 O_X	定位误差	Δx_x 0.05
		Y 方向直线度	Δy_x 0.05
		Z 方向直线度	Δz_x 0.05
		滚摆误差	$\Delta \alpha_x$ 1.6×10^{-5}
		颠摆误差	$\Delta \beta_x$ 1.6×10^{-5}
		偏摆误差	$\Delta \gamma_x$ 1.6×10^{-5}
Y 平动轴	O_Y 相对于 O_Y	X 方向直线度	Δx_y 0.05
		定位误差	Δy_y 0.05
		Z 方向直线度	Δz_y 0.05
		颠摆误差	$\Delta \alpha_y$ 1.6×10^{-5}
		滚摆误差	$\Delta \beta_y$ 1.6×10^{-5}
		偏摆误差	$\Delta \gamma_y$ 1.6×10^{-5}
Z 平动轴	O_Z 相对于 O_Z	X 方向直线度	Δx_z 0.05
		Y 方向直线度	Δy_z 0.05
		定位误差	Δz_z 0.05
		颠摆误差	$\Delta \alpha_z$ 1.6×10^{-5}
		偏摆误差	$\Delta \beta_z$ 1.6×10^{-5}
		滚摆误差	$\Delta \gamma_z$ 1.6×10^{-5}
单元间垂直度误差	O_Y 相对于 O_X	X、Y 轴垂直度	$\Delta \gamma_{xy}$ 1.6×10^{-5}
	O_Z 相对于 O_X	X、Z 轴垂直度	$\Delta \beta_{xz}$ 1.6×10^{-5}
	O_Z 相对于 O_Y	Y、Z 轴垂直度	$\Delta \alpha_{yz}$ 1.6×10^{-5}
B 转动轴	O_B 相对于 O_B	X 方向跳动	Δx_B 0.05
		B 轴向窜动	Δy_B 0.05
		Z 方向跳动	Δz_B 0.05
		绕 X 轴转角	$\Delta \alpha_B$ 1.6×10^{-5}
		绕自身转角	$\Delta \beta_B$ 1.6×10^{-5}
		绕 Z 轴转角	$\Delta \gamma_B$ 1.6×10^{-5}
单元间姿态	O_B 相对于 O_Y	Y、B 轴平行度沿 X 轴的分量	$\Delta \alpha_{yb}$ 1.6×10^{-5}
		Y、B 轴平行度沿 Z 轴的分量	$\Delta \gamma_{yb}$ 1.6×10^{-5}

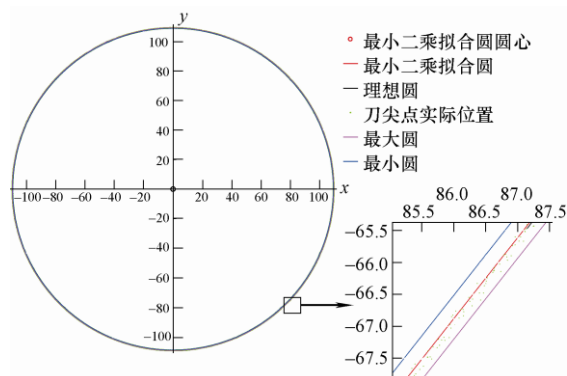


图 6 由蒙特卡洛模拟得到的点用最小二乘法拟合评价圆度

为例,假设理想加工轨迹是 XY 平面内以 O 为圆心,直径为 218 mm 的圆,如图 6 所示。最小二乘法拟合出的圆心稍偏移原点,由最大圆与最小圆的半径差来评价圆度,得到加工特征圆度为 0.36 mm。

2 灵敏度分析与公差设计

灵敏度分析的目的是获得公差对加工精度的贡献度大小,为公差设计结果的改进提供依据^[18]。因此,可以将运动轴误差的公差带误差作为自变量,将加工精度作为因变量,利用蒙特卡罗方法和数据回归方法,找到其映射关系。在此关系基础上,实现根据标准件检验精度要求,设计运动轴 29 项误差的公差带的目标。

根据式(1)可以得到各项加工误差与机床运动轴误差的公差带的多组对应数据,从而为后面的正交试验提供数据。

设有 n 次蒙特卡洛模拟,即有 n 组运动轴公差导致的 n 组标准件误差。利用数据回归方法便可以得到标准件公差与运动轴公差之间的映射关系。根据给定的加工试件几何精度检验标准,即可完成运动轴公差的设计。

以图 5 标准试件直径为 218 mm 的外圆为例,其圆度与运动轴公差映射关系为

$$\begin{aligned}
 R(\Delta x_x, \dots, \Delta \gamma_{yb}) = & b_0 + b_1 \Delta x_x + b_2 \Delta x_y + b_3 \Delta x_z + b_4 \Delta y_x + \\
 & b_5 \Delta y_y + b_6 \Delta y_z + b_7 \Delta z_x + b_8 \Delta z_y + b_9 \Delta z_z + \\
 & b_{10} \Delta \alpha_x + b_{11} \Delta \beta_x + b_{12} \Delta \gamma_x + b_{13} \Delta \alpha_y + \\
 & b_{14} \Delta \beta_y + b_{15} \Delta \gamma_y + b_{16} \Delta \alpha_z + b_{17} \Delta \beta_z + \\
 & b_{18} \Delta \gamma_z + b_{19} \Delta \gamma_{xy} + b_{20} \Delta \beta_{xz} + b_{21} \Delta \alpha_{yz} + \\
 & b_{22} \Delta x_B + b_{23} \Delta y_B + b_{24} \Delta z_B + b_{25} \Delta \alpha_B + \\
 & b_{26} \Delta \beta_B + b_{27} \Delta \gamma_B + b_{28} \Delta \alpha_{yb} + b_{29} \Delta \gamma_{yb} \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中, $b_0 \sim b_{29}$ 为试验影响因素系数,可由多元线性回归分析拟合获得。

2.1 正交试验设计

试验点设置的准确性关系到分析结果的正确性、有效性。为了选取合适的样本点来建立圆度与运动轴误差公差带映射模型,采用正交试验法来设计试验影响因素的组合方式,通过这种方法用相对少的试验循环方式找到圆度与运动轴误差公差带的映射关系。

2.1.1 正交表公式

对于单一水平正交表,有 $L_n(m^k)$, 其中,因子数 k 为正交表的列数, m 为因子的水平数, n 为正

交表的行数, 即试验次数, 由 $n=k(m-1)+1$ 得到。

2.1.2 正交试验方案

本文采用单一水平正交试验方法来进行圆度与运动轴误差公差带映射关系的试验, 因子数为运动轴误差项的数目, $k=29$; 因子水平数为 5, 试验次数 $n=29 \times (5-1)+1=117$ 。试验方案如表 4。

表 4 正交试验方案(mm)

运动轴误差项	下限	间隔	上限
Δx_x	0.05	0.01	0.09
Δx_y	0.05	0.01	0.09
Δx_z	0.05	0.01	0.09
Δy_x	0.05	0.01	0.09
Δy_y	0.05	0.01	0.09
Δy_z	0.05	0.01	0.09
Δz_x	0.05	0.01	0.09
Δz_y	0.05	0.01	0.09
Δz_z	0.05	0.01	0.09
$\Delta \alpha_x$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \beta_x$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \gamma_x$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \alpha_y$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \beta_y$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \gamma_y$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \alpha_z$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \beta_z$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \gamma_z$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \gamma_{xy}$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \beta_{xz}$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \alpha_{yz}$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
Δx_B	0.05	0.01	0.09
Δy_B	0.05	0.01	0.09
Δz_B	0.05	0.01	0.09
$\Delta \alpha_B$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \beta_B$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \gamma_B$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \alpha_{yb}$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}
$\Delta \gamma_{yb}$	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-6}	2.88×10^{-5}

2.2 灵敏度分析

同样以圆度误差为例, 根据正交试验设计方案, 按照上述求解得到的圆度对不同运动轴误差的公差带, 得到试验结果如表 5 所示。利用多元线性回归分析得到圆度与运动轴误差公差带映射关系为

$$R = 0.025\ 622\ 065 + 1.985\ 848 \Delta x_x + 1.962\ 941 \Delta x_y +$$

$$2.031\ 068 \Delta x_z + 1.976\ 438 \Delta y_x + 1.986\ 864 \Delta y_y + \\ 1.947\ 72 \Delta y_z - 0.025\ 19 \Delta z_x + 0.012\ 044 \Delta z_y - \\ 0.032\ 7 \Delta z_z - 106.852 \Delta \alpha_x + 34.064\ 01 \Delta \beta_x + \\ 17.006\ 5 \Delta \gamma_x - 43.714\ 1 \Delta \alpha_y + 70.083\ 6 \Delta \beta_y + \\ 104.490\ 9 \Delta \gamma_y + 160.508\ 8 \Delta \alpha_z - 136.941 \Delta \beta_z - \\ 75.879\ 1 \Delta \gamma_z - 74.487\ 6 \Delta \gamma_{xy} + 32.971\ 64 \Delta \beta_{xz} - \\ 135.010\ 6 \Delta \alpha_{yz} + 2.001\ 377 \Delta x_B + 2.029\ 7 \Delta y_B - \\ 0.017\ 78 \Delta z_B + 111.558\ 2 \Delta \alpha_B - 153.207 \Delta \beta_B - \\ 116.946 \Delta \gamma_B - 70.093\ 1 \Delta \alpha_{yb} - 60.713\ 4 \Delta \gamma_{yb}$$

灵敏度分析结果如图 7 所示。

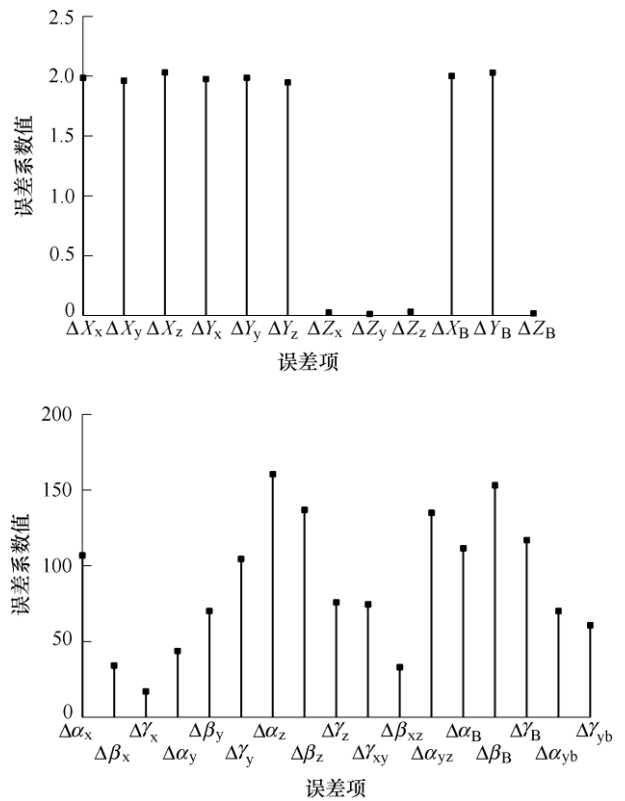


图 7 灵敏度分析结果

通过灵敏度分析可以看出, 该圆度误差与 X、Y 轴公差显著相关, 而受 Z 轴公差影响较小。该加工圆特征位于 X-Y 平面中, 加工过程中 Z 轴不运动, 证明了分析结果的合理性。

类似于该圆特征分析, 通过本方法可以得到各项检验指标与运动轴公差映射关系。通过该解析映射关系, 建立了机床 29 项运动轴公差与标准加工件各项检验指标公差之间的多元耦合映射关系。结合公差-成本函数, 运用自适应遗传算法等方法进行迭代求解, 进而实现给定加工精度目标的机床运动轴公差优化分配。

表 5 正交试验结果(mm)

运动轴误差项	1	2	3	4	5	6	7	8	...	116	117
Δx_x	0.08	0.05	0.08	0.06	0.07	0.08	0.05	0.07	...	0.08	0.05
Δx_y	0.06	0.05	0.08	0.06	0.09	0.09	0.06	0.06	...	0.05	0.09
Δx_z	0.05	0.06	0.05	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06	...	0.05	0.09
Δy_x	0.05	0.07	0.05	0.05	0.08	0.09	0.05	0.06	...	0.07	0.06
Δy_y	0.07	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.05	...	0.09	0.06
Δy_z	0.08	0.05	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06	0.06	...	0.08	0.08
Δz_x	0.09	0.08	0.08	0.07	0.05	0.06	0.05	0.08	...	0.08	0.09
Δz_y	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06	0.05	0.09	0.08	...	0.06	0.07
Δz_z	0.05	0.05	0.07	0.09	0.09	0.09	0.05	0.09	...	0.08	0.09
$\Delta \alpha_x$	2.24×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.24×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.56×10^{-5}	...	1.6×10^{-5}	2.56×10^{-5}
$\Delta \beta_x$	2.56×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.24×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.88×10^{-5}	...	1.6×10^{-5}	1.92×10^{-5}
$\Delta \gamma_x$	2.24×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.56×10^{-5}	2.24×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.24×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.56×10^{-5}	...	2.24×10^{-5}	2.88×10^{-5}
$\Delta \alpha_y$	2.24×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.24×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.24×10^{-5}	...	2.88×10^{-5}	2.88×10^{-5}
$\Delta \beta_y$	2.56×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.56×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.88×10^{-5}	...	2.88×10^{-5}	1.6×10^{-5}
$\Delta \gamma_y$	2.56×10^{-5}	2.24×10^{-5}	2.56×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.92×10^{-5}	...	2.88×10^{-5}	2.88×10^{-5}
$\Delta \alpha_z$	2.88×10^{-5}	2.56×10^{-5}	2.24×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.6×10^{-5}	...	2.88×10^{-5}	2.24×10^{-5}
$\Delta \beta_z$	1.92×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.88×10^{-5}	...	2.56×10^{-5}	2.88×10^{-5}
$\Delta \gamma_z$	2.24×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.56×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.56×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.88×10^{-5}	...	2.88×10^{-5}	2.24×10^{-5}
$\Delta \gamma_{xy}$	2.56×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.56×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.56×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.56×10^{-5}	...	2.88×10^{-5}	2.56×10^{-5}
$\Delta \beta_{xz}$	2.24×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.56×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.56×10^{-5}	2.56×10^{-5}	...	2.56×10^{-5}	2.88×10^{-5}
$\Delta \alpha_{yz}$	2.24×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.56×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.24×10^{-5}	2.24×10^{-5}	...	2.56×10^{-5}	2.88×10^{-5}
Δx_B	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.06	0.05	0.06	...	0.08	0.06
Δy_B	0.06	0.09	0.08	0.06	0.07	0.09	0.09	0.06	...	0.06	0.09
Δz_B	0.09	0.05	0.09	0.09	0.07	0.05	0.07	0.08	...	0.05	0.05
$\Delta \alpha_B$	2.24×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.88×10^{-5}	...	2.88×10^{-5}	1.92×10^{-5}
$\Delta \beta_B$	2.56×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.24×10^{-5}	2.24×10^{-5}	2.24×10^{-5}	2.88×10^{-5}	...	1.92×10^{-5}	2.56×10^{-5}
$\Delta \gamma_B$	2.88×10^{-5}	2.24×10^{-5}	2.24×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.88×10^{-5}	...	2.88×10^{-5}	2.88×10^{-5}
$\Delta \alpha_{yb}$	2.24×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.56×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.92×10^{-5}	...	1.6×10^{-5}	2.88×10^{-5}
$\Delta \gamma_{yb}$	2.88×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.88×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.92×10^{-5}	2.88×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.6×10^{-5}	...	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}
圆度 R	1.078 74	0.907 52	0.996 93	0.924 62	0.926 87	0.983 51	0.952 01	0.945 74	...	0.942 77	0.971 13

3 精密坐标镗床公差设计算例

以某精密坐标镗床为例,进行机床 29 项误差的公差带设计。

29 项误差公差带的分配实质上是非线性方程组寻根问题,数学上,主要利用迭代法进行求解^[19]。常见的迭代方法是通过将非线性问题转化为线性问题来求解或者求偏导数,如牛顿迭代法、最速下降法。这些方法在某种程度上使问题复杂化,有时无法获得问题的解^[20]。现代启发式搜索算法适用于求解多约束、多极值、非线性寻优问题,属于现代优化计算方法。将通过本文方法得到的表 1 中各项

标准件公差带与 29 项误差公差带的函数关系作为约束条件,考虑 29 项误差取值范围,即装配工艺可行性,以装配的总成本为目标函数,即可完成精密机床运动轴 29 项误差的公差分配问题构建。

在实际装配中,公差越小装配成本越高。本文通过调研,发现该厂公差成本函数是文献[21]中的负幂成本函数。

$$W = \sum_{i=1}^N 0.015 6t_i^{-1} + 153.298 0 \quad (9)$$

式中, W 为装配总成本,是 29 项误差公差带分配的目标函数; t_i 为第 i 项误差的公差带。

在实际进行公差分配时,需要符合实际的装配工艺水平,即 $b_l \leq t_i \leq b_u$, 同时,分配的结果必须要

满足设定的 13 项加工精度检验指标的要求。这样便完成了公差分配问题的描述。本文采用自适应遗传算法，与传统遗传算法相比，降低了算法早熟而陷入局部最优解的概率。分配结果与出厂检验指标对比如表 6，根据实际测量情况，考虑到末端几何特

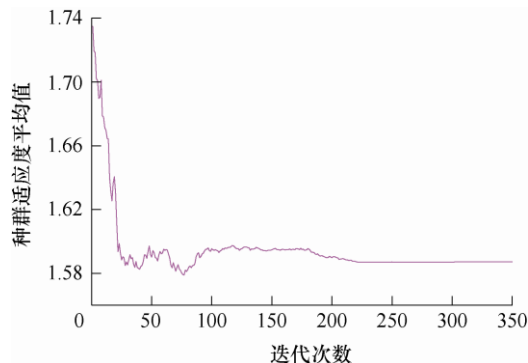


图 8 自适应遗传算法收敛图

表 6 运动轴误差公差分配结果(mm)

运动轴误差项	公差带	出厂检验指标
Δx_x	0.087	—
Δx_y	0.079	—
Δx_z	0.092	—
Δy_x	0.071	—
Δy_y	0.071	—
Δy_z	0.091	—
Δz_x	0.073	—
Δz_y	0.068	—
Δz_z	0.062	—
$\Delta \alpha_x$	2.7×10^{-5}	—
$\Delta \beta_x$	2.6×10^{-5}	2×10^{-5}
$\Delta \gamma_x$	3.1×10^{-5}	—
$\Delta \alpha_y$	2.7×10^{-5}	2×10^{-5}
$\Delta \beta_y$	3.0×10^{-5}	—
$\Delta \gamma_y$	3.2×10^{-5}	—
$\Delta \alpha_z$	2.3×10^{-5}	2×10^{-5}
$\Delta \beta_z$	3.9×10^{-5}	2×10^{-5}
$\Delta \gamma_z$	2.6×10^{-5}	—
$\Delta \gamma_{xy}$	2.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}
$\Delta \beta_{xz}$	3.0×10^{-5}	1.6×10^{-5}
$\Delta \alpha_{yz}$	3.1×10^{-5}	1.6×10^{-5}
Δx_B	0.09	—
Δy_B	0.10	—
Δz_B	0.10	—
$\Delta \alpha_B$	2.9×10^{-5}	—
$\Delta \beta_B$	2.3×10^{-5}	—
$\Delta \gamma_B$	3.0×10^{-5}	—
$\Delta \alpha_{yb}$	3.7×10^{-5}	2×10^{-5}
$\Delta \gamma_{yb}$	3.7×10^{-5}	2×10^{-5}

征以及 B 轴相关的几何误差并不容易直接测量得到，该卧式加工中心的出厂检验指标中需检验的机床装配精度要求为表 6 中的 9 项指标。

从表 6 中数据可以看出，本文采用的自适应遗传算法对运动轴误差项的公差带进行了合理分配，放宽了出厂检验指标中需要检验的 9 项机床装配精度指标，在保障加工精度的同时降低了装配成本。

4 结论

为保障机床精度，装配阶段应对机床的几何精度进行严格控制，本文从装配设计阶段，运动轴误差公差带设计的角度出发来提高加工精度。

(1) 基于机床空间运动误差模型，通过蒙特卡洛模拟得到实际加工轨迹上刀尖点的位置坐标，用最小二乘法实现了对加工精度的评价。

(2) 利用正交试验法与数据回归，得到各项精度要求与机床运动轴误差的公差带的映射关系。

(3) 利用自适应遗传算法，给出了运动轴误差的公差设计方法，保证所设计的公差带在装配工艺上的可行性。

(4) 利用本文方法，对精密卧式坐标镗床的运动轴误差项的公差带进行设计，在保证样件加工精度达到要求并且成本最低的前提下放宽了机床的装配精度要求，验证了本文方法的可行性、有效性。

参 考 文 献

[1] GUO J, LI B, LIU Z, et al. Integration of geometric variation and part deformation into variation propagation of 3-D assemblies[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(19): 1-14.

[2] 赵强强, 洪军, 刘志刚, 等. 任意拓扑结构机床运动轴误差传递链建模方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(21): 130-137.

ZHAO Qiangqiang, HONG Jun, LIU Zhigang, et al. Modeling method on motive axes error transfer chain for machine tool of arbitrary topological structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(21): 130-137.

[3] ZHU S, DING Guofu, LEI J, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 52(1): 24-29.

[4] 黄克, 关立文, 杨亮亮, 等. 基于“S”形试件的五轴机床几何误差建模研究[J]. 机械设计与制造, 2015(2): 189-193.

HUANG Ke, GUAN Liwen, YANG Liangliang, et al. Geometric error modeling of five-axis CNC machine tools

- based on “S” shaped test piece[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2015(2): 189-193.
- [5] 高羨明, 洪军, 甄宜超. 机床多体系统空间刚度场约束下的加工误差预测[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(6): 90-96.
GAO Xianming, HONG Jun, ZHEN Yichao. Prediction of machining error for machine tool multi-body system restrained by stiffness field[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(6): 90-96.
- [6] BURAK S, YUSUF A. Modeling and control of contouring errors for five-axis machine tools—part II: Precision contour controller design[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2009, 131(3): 337-346.
- [7] XIANG S, ALTINTAS Y. Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2016, 101: 65-78.
- [8] ZHOU X, JIANG Z, SONG B, et al. A compensation method for the geometric errors of five-axis machine tools based on the topology relation between axes[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(5-8): 1993-2007.
- [9] 杨建国, 姚晓栋. 数控机床误差补偿技术现状与展望[J]. *世界制造技术与装备市场*, 2012, 401(3): 64-71.
YANG Jianguo, YAO Xiaodong. Present situation and prospect of error compensation technology for NC machine tool[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 401(3): 64-71.
- [10] TSUTSUMI M, SAITO A. Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43(8): 771-780.
- [11] 沈金华. 数控机床误差补偿关键技术及其应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
SHEN Jinhua. Key technique and application in error compensation for CNC machine tools[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [12] 蔡尚文, 汪惠芬, 刘庭煜. 基于误差传递模型的机床进给系统装配精度预测与调整方法[J]. *机械制造与自动化*, 2016(6): 6-10.
CAI Shangwen, WANG Huifen, LIU Tingyu. Assembly precision prediction and adjustment method based on error propagation model[J]. *Machine Building & Automation*, 2016(6): 6-10.
- [13] CHEN G, SUN Y, LU L, et al. A new static accuracy design method for ultra-precision machine tool based on global optimisation and error sensitivity analysis[J]. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2016, 12(2): 167-180.
- [14] WEILL R, CLÉMENT A, HOCKEN R, et al. Tolerancing for function[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1988, 37(2): 603-610.
- [15] 黄美发, 高咏生. 基于工序加工能力的并行公差优化设计[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(5): 385-389.
HUANG Meifa, GAO Yongsheng. Optimal concurrent tolerancing based on sequential process capabilities[J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(5): 385-389.
- [16] 刘超, 刘少岗. 基于粒子群算法的并行公差优化设计模型求解[J]. *天津科技大学学报*, 2013(1): 67-70.
LIU Chao, LIU Shaogang. Solution of concurrent tolerancing optimization design model based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2013(1): 67-70.
- [17] GUO J, LI B, LIU Z, et al. A new solution to the measurement process planning for machine tool assembly based on Kalman filter[J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 356-369.
- [18] 孙岩辉, 洪军, 刘志刚, 等. 考虑零部件制造误差的精密主轴几何回转精度计算方法[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(3): 173-182.
SUN Yanhui, HONG Jun, LIU Zhigang, et al. A calculating method for the geometric rotation accuracy of precision spindles considering the manufacturing errors of component parts[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(3): 173-182.
- [19] KRA SHEN S. Principles and practice in second language acquisition [M]. Oxford: Pergamon Press, 1982.
- [20] 张成现, 李建文. 多元非线性函数极值的通用数值解法[J]. *西安工程科技学院学报*, 2005(4): 507-512.
ZHANG Chengxian, LI Jianwen. An universal numerical algorithm of extremum for multivariate nonlinear function[J]. *Journal of Xian University Engineering Science & Technology*, 2005(4): 507-512.
- [21] 刘鹏, 洪军, 刘志刚, 等. 采用自适应遗传算法的机床公差分配研究[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(1): 115-123.
LIU Peng, HONG Jun, LIU Zhigang, et al. Research on the tolerance allocation of machine tools based on adaptive genetic algorithm[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(1): 115-123.

作者简介: 刘奕颖, 女, 1994 年出生。主要研究方向为机床装配精度分析及软件开发。

E-mail: aquamarine@stu.xjtu.edu.cn

郭俊康(通信作者), 男, 1984 年出生, 助理研究员。主要研究方向精密机械装配与数字化装配。

E-mail: me_gjk@mail.xjtu.edu.cn