

# 龙门铣床长行程进给轴定位误差鲁棒建模方法研究

李殿新

煤科院节能技术有限公司;煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室;

国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室

**摘要:** 以某龙门铣床的长行程进给轴为对象,研究了定位误差的鲁棒建模方法。在4个不同的环境温度下测量了进给轴的定位误差并建立了误差模型,发现4个误差模型的系数相差很大。为了建立一个能在各种环境温度下使用的定位误差模型,首先根据4组试验结果拟合出室温环境温度为20℃时的定位误差,然后将该误差作为基准,考虑环境温度变化对定位误差的影响,从而建立了定位误差模型。使用建立的误差模型拟合4个环境温度下测量到的定位误差,164个试验值的拟合残差都在 $[-3.208 \mu\text{m}, 3.127 \mu\text{m}]$ 的范围内,说明建立的误差模型具有很高的鲁棒性。

**关键词:** 定位误差;误差建模;进给轴;鲁棒性;环境温度

**中图分类号:** TG659;TG61;TH161.3

**文献标志码:** A

## Research on Robust Modeling Method for Positioning Error of Long Stroke Feed Shaft of Gantry Milling Machine Tool

Li Dianxin

**Abstract:** Taking a long stroke feed shaft of a gantry milling machine tool as the research target, robust modeling method for positioning error was researched. Positioning errors of the feed shaft were measured under 4 different environmental temperatures, and corresponding error models were established. However, coefficients of the error models differ greatly. In order to establish a positioning error model which can be used for all working conditions, positioning errors of the feed shaft at environmental temperature of 20℃ were fitted. Taking the fitted errors as the reference and considering the influence of environmental temperature on positioning errors, the final positioning error was established. Using the final positioning error model to fit the positioning errors measured under 4 different environmental temperatures, residual errors of the 164 positioning errors were within the scope of  $[-3.208 \mu\text{m}, 3.127 \mu\text{m}]$ . High robustness of the error model can be proved.

**Keywords:** positioning error; error modeling; feed shaft; robustness; environmental temperature

## 1 引言

随着航空航天等行业的迅速发展,机械制造业对大型零件的加工需求日益增多。龙门铣床具有加

工空间大、承载重量大、刚度大的优点,因此在大型零件的加工领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。由于龙门铣床进给轴的行程长,因此存在比较大的几何误差<sup>[2]</sup>,会严重影响机床的加工精度。在诸多几何误差元素中,定位误差是影响机床加工精度的关键几何误差<sup>[3,4]</sup>,对于长行程进给轴而言,定位误差对加

基金项目:煤科院科技发展基金技术创新项目(2017CX01)  
收稿日期:2018年2月

电板靶测试技术,直接测试精度可达 $1 \mu\text{m}$ ;采用自适应的工件表面接触测头,避免现有测试仪器手动操作引起的误差;通过程序控制形成连续的测试轨迹,可快速准确地测得零件的形状公差。

## 参考文献

- [1] 曾肃伟,李国峰,王翔,等. 基于光电自准直仪的直线运动误差测量与分析[J]. 机械研究与应用,2006,19(4): 48-49.
- [2] 张刚强,陈建元,罗松保,等. 基于光电自准直仪的静压长导轨设计及测量[J]. 航空精密制造技术,2012,49

(2):6-8.

- [3] 郭敬滨,李斌. 大跨距、小步距法测量导轨系统的导轨直线度研究[J]. 机械科学与技术,2013,32(11):1600-1603.
- [4] 陈岚. 电子水平仪测量机床导轨直线度的方法[J]. 化学工程与装备,2010(9):147-148.
- [5] 王孝坤. 利用激光跟踪仪测量超长导轨直线度的方法[J]. 应用光学,2013,34(4):686-689.

第一作者:赵海峰,博士研究生,副教授,南京信息职业技术学院机电学院,210046 南京市

First Author: Zhao Hai Feng, Doctoral Candidate, Associate Professor, School of Mechatronics, Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210046, China

工精度的影响更为突出<sup>[5]</sup>。

国内外学者对数控机床进给轴定位误差的建模方法进行了大量研究,但目前的研究对象一般是小型数控机床<sup>[6,7]</sup>,而且仅在某一个环境温度下测量进给轴的定位误差<sup>[8]</sup>。由于龙门铣床的体积大,一般难以放置在恒温车间中,环境温度变化会对长行程进给轴的定位误差造成显著影响,导致单一环境温度下建立的误差模型无法准确预测其它环境温度下的定位误差。

为了解决该问题,本文以某龙门铣床的进给轴为对象,在4个环境温度下测量了该进给轴的定位误差,然后提出了长行程进给轴定位误差的鲁棒建模方法,建立的误差模型可以准确预测不同环境温度下的定位误差。

## 2 单一环境温度下定位误差测量及建模

### 2.1 试验系统及建模方法

本文以某龙门铣床的 $x$ 轴为对象,研究长行程进给轴定位误差的鲁棒建模方法。该龙门铣床 $x$ 轴的行程约4m,使用激光干涉仪测量 $x$ 轴的定位误差,每隔100mm测量一次数据,共测量得到41个定位误差值。首次测量时,车间里的环境温度约为23.4℃,试验系统如图1所示。

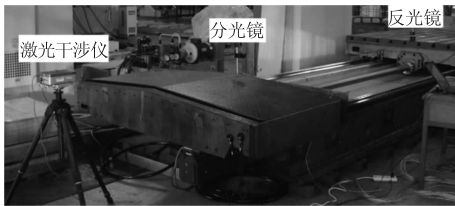


图1 试验系统

进给轴的定位误差 $\delta_g(x)$ 一般拟合为进给轴位置坐标的函数,拟合方法如式(1)所示

$$\delta_g(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (1)$$

式中, $x$ 为进给轴的位置坐标; $a_i$ 为位置坐标的拟合系数。

根据测量到的试验结果,将定位误差采用三阶多项式<sup>[9]</sup>拟合

$$\delta_g(x) = -0.539 + 1.637 \times 10^{-2} x - 5.294 \times 10^{-7} x^2 - 1.124 \times 10^{-10} x^3 \quad (2)$$

### 2.2 其它环境温度下的误差模型

该车间全年的环境温度变化范围大约是8~32℃,为了全面了解不同环境温度下 $x$ 轴的定位误差,采用第2.1节的方法,在环境温度约为11.3、16.3、29.9℃时测量 $x$ 轴的定位误差。根据试验结

果,得到拟合公式分别如式(3)~式(5)所示。

$$\delta_{11.3^\circ}(x) = 7.013 \times 10^{-2} + 9.790 \times 10^{-3} x - 1.266 \times 10^{-7} x^2 + 1.259 \times 10^{-11} x^3 \quad (3)$$

$$\delta_{16.3^\circ}(x) = -0.465 + 1.440 \times 10^{-2} x - 1.314 \times 10^{-6} x^2 + 1.070 \times 10^{-10} x^3 \quad (4)$$

$$\delta_{29.9^\circ}(x) = -0.527 + 1.920 \times 10^{-2} x - 3.330 \times 10^{-7} x^2 - 2.304 \times 10^{-10} x^3 \quad (5)$$

对比式(2)~式(5)可知拟合系数相差很大,这也证明了在某一环境温度下建立的误差模型,随环境温度变化鲁棒性会变差。如何建立鲁棒性较高的误差模型,一直是误差建模领域研究的难点。

### 2.3 定位误差鲁棒建模方法

ISO标准<sup>[10]</sup>推荐机床的定位误差应在20℃的室温下测量。由于龙门铣床没有放置在恒温车间中,难以恰好在20℃时测量定位误差,而且即便可以在20℃时测量,单次测量的随机误差可能较大。因此,本文定位误差的建模思路是:首先根据4组试验结果,拟合出20℃室温时的定位误差;然后将20℃室温时的定位误差作为基准,考虑环境温度变化对定位误差的影响。因此,本文建立的定位误差模型为

$$\delta_g(x, \Delta T_{en}) = \delta_{20^\circ}(x) + \delta_{\Delta T_{en}}(x) \quad (6)$$

式中, $\delta_g(x, \Delta T_{en})$ 为进给轴的定位误差; $\delta_{20^\circ}(x)$ 为环境温度为20℃时的定位误差; $\delta_{\Delta T_{en}}(x)$ 为环境温度变化对定位误差的影响。

## 3 定位误差鲁棒建模方法

### 3.1 环境温度为20℃时的定位误差拟合方法

根据第2节测量到的4组试验数据,拟合出20℃时的定位误差。将 $x$ 轴的行程(4000mm)等分为10段、共11个点,即相邻两个点的间隔是400mm。0点处的定位误差是0,以400mm位置为例,拟合方法是:根据4组试验数据,建立400mm坐标处定位误差与环境温度 $T$ 之间的数学模型 $\delta_{400\text{mm}}(T)$ 。拟合公式如式(7)所示,拟合曲线如图2所示。

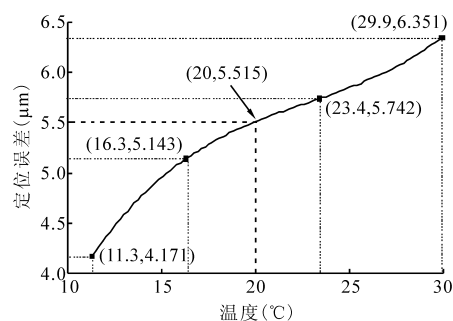


图2 400 mm 坐标处几何误差与环境温度拟合结果

$$\delta_{400\text{mm}}(T) = -1.967 + 0.882T - 3.591 \times 10^{-2}T^2 + 5.258 \times 10^{-4}T^3 \quad (7)$$

根据式(7)和图2,求得当环境温度为20℃时,400 mm坐标处的定位误差是5.515 μm。采用相同的方法建立800、1200、1600、2000、2400、2800、3200、3600、4000 mm处定位误差与环境温度之间的数学模型,拟合公式分别如式(8)~式(16)所示。

$$\delta_{800\text{mm}}(T) = -5.215 + 1.861T - 7.875 \times 10^{-2}T^2 + 1.300 \times 10^{-3}T^3 \quad (8)$$

$$\delta_{1200\text{mm}}(T) = -10.920 + 3.193T - 0.132T^2 + 2.100 \times 10^{-3}T^3 \quad (9)$$

$$\delta_{1600\text{mm}}(T) = -10.399 + 3.663T - 0.151T^2 + 2.380 \times 10^{-3}T^3 \quad (10)$$

$$\delta_{2000\text{mm}}(T) = 7.236 + 1.036T + 6.350 \times 10^{-3}T^2 - 3.601 \times 10^{-4}T^3 \quad (11)$$

$$\delta_{2400\text{mm}}(T) = 7.949 + 1.769T - 4.637 \times 10^{-2}T^2 + 8.029 \times 10^{-4}T^3 \quad (12)$$

$$\delta_{2800\text{mm}}(T) = 4.000 + 2.860T - 9.782 \times 10^{-2}T^2 + 1.610 \times 10^{-3}T^3 \quad (13)$$

$$\delta_{3200\text{mm}}(T) = 10.632 + 2.705T - 0.102T^2 + 1.890 \times 10^{-3}T^3 \quad (14)$$

$$\delta_{3600\text{mm}}(T) = 17.238 + 2.087T - 6.194 \times 10^{-2}T^2 + 1.090 \times 10^{-3}T^3 \quad (15)$$

$$\delta_{4000\text{mm}}(T) = 23.070 + 1.570T - 2.953 \times 10^{-2}T^2 + 4.707 \times 10^{-4}T^3 \quad (16)$$

根据式(7)~式(16),可以计算出环境温度为20℃时对应位置的定位误差值,如图3所示。采用3阶多项式拟合环境温度为20℃时的定位误差,如式(17)所示。

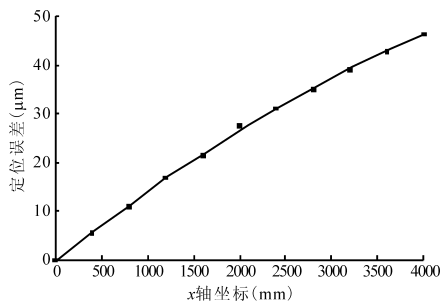


图3 环境温度为20℃时的几何误差

$$\delta_{20^\circ}(x) = -0.259 + 1.524 \times 10^{-2}x - 8.895 \times 10^{-7}x^2 - 3.297 \times 10^{-12}x^3 \quad (17)$$

### 3.2 考虑环境温度变化的定位误差建模

将试验测量到的4条定位误差曲线和拟合出20℃时的定位误差曲线列于图4,其中20℃时的定位误差曲线是采用式(17)计算的结果。将5条曲线均采用直线拟合,拟合结果如图4所示。

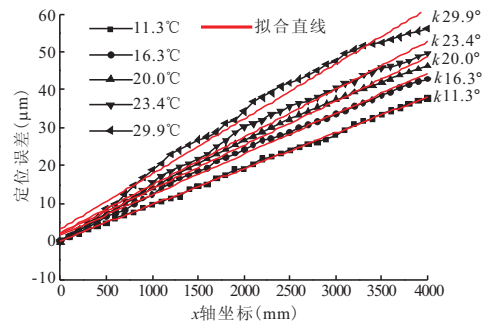


图4 各环境温度下定位误差直线拟合

环境温度为11.3、16.3、20、23.4、29.9℃时的拟合直线如式(18)所示,其中 $\delta_{20^\circ}(x)$ 是式(17)的直线拟合结果。

$$\begin{cases} \delta_{11.3^\circ}(x) = 0.240 + 9.470 \times 10^{-3}x \\ \delta_{16.3^\circ}(x) = 1.600 + 1.070 \times 10^{-2}x \\ \delta_{20^\circ}(x) = 2.095 + 1.163 \times 10^{-2}x \\ \delta_{23.4^\circ}(x) = 2.258 + 1.262 \times 10^{-2}x \\ \delta_{29.9^\circ}(x) = 3.251 + 1.452 \times 10^{-2}x \end{cases} \quad (18)$$

将环境温度 $T$ 的变化 $\Delta T_{\text{en}}$ 定义为

$$\Delta T_{\text{en}} = T - 20 \quad (19)$$

将由于环境温度变化引起的拟合直线斜率变化 $\Delta k_{\text{en}}$ 定义为

$$\Delta k_{\text{en}} = k_i - k_{20^\circ} \quad (i = 11.3, 16.3, 23.4, 29.9) \quad (20)$$

式中, $k_i$ 为式(18)中拟合直线 $\delta_{11.3^\circ}(x)$ 、 $\delta_{16.3^\circ}(x)$ 、 $\delta_{23.4^\circ}(x)$ 、 $\delta_{29.9^\circ}(x)$ 对应的斜率; $k_{20^\circ}$ 为式(18)中拟合直线 $\delta_{20^\circ}(x)$ 对应的斜率。

环境温度变化和斜率变化如表1所示。

表1 环境温度与斜率变化对照表

序号	环境温度(℃)		斜率	
	$T$	$\Delta T_{\text{en}}$	$k_i$	$\Delta k_{\text{en}}$
1	11.3	-8.7	$9.470 \times 10^{-3}$	$-2.16 \times 10^{-3}$
2	16.3	-3.7	$1.070 \times 10^{-2}$	$-9.3 \times 10^{-4}$
3	20	0	$1.163 \times 10^{-2}$	0
4	23.4	3.4	$1.262 \times 10^{-2}$	$9.9 \times 10^{-4}$
5	29.9	9.9	$1.452 \times 10^{-2}$	$2.89 \times 10^{-3}$

将斜率变化和环境温度变化列于图5,发现两者可以采用直线拟合,说明几何误差随环境温度线性变化,拟合方程如式(21)所示

$$\Delta k_{\text{en}} = 1.090 \times 10^{-4} + 2.720 \times 10^{-4} \Delta T_{\text{en}} \quad (21)$$

因此,环境温度变化引起的定位误差变化为

$$\delta_{\Delta T_{\text{en}}}(x) = \Delta k_{\text{en}} x = (1.090 \times 10^{-4} + 2.720 \times 10^{-4} \Delta T_{\text{en}}) x \quad (22)$$

式(17)是环境温度为20℃时的定位误差,当考虑环境温度变化时,需要在式(17)的基础上加上式(22)。因此,本文建立的定位误差模型为

$$\delta_g(x, \Delta T_{en}) = \delta_{20^\circ}(x) + \delta_{\Delta T_{en}}(x) = -0.259 + 1.524 \times 10^{-2}x - 8.895 \times 10^{-7}x^2 - 3.297 \times 10^{-12}x^3 + (1.090 \times 10^{-4} + 2.720 \times 10^{-4}\Delta T_{en})x \quad (23)$$

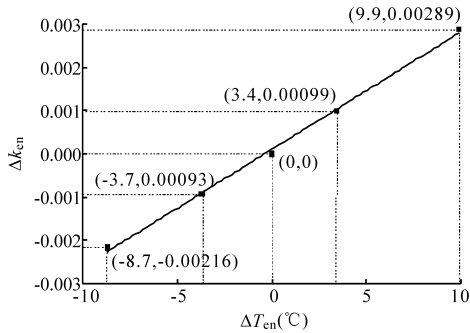


图5 斜率变化与环境温度变化对照

### 3.3 定位误差模型精度验证

将4个环境温度下测量到的定位误差值、采用式(23)计算得到的拟合值、拟合残差列于图6,4组试验结果中164个定位误差的拟合残差都在[-3.208μm, 3.127μm]范围内,拟合精度很高,说明式(23)可以用于预测各种环境室温下的定位误差。

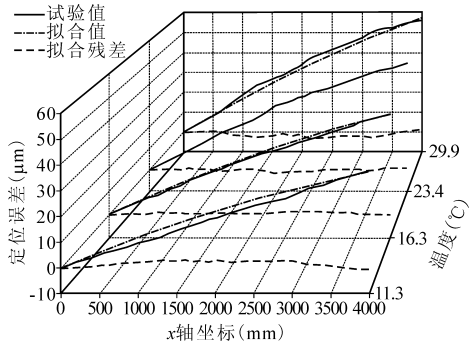


图6 各环境温度下定位误差拟合结果

## 4 引言

(1)在4个环境温度下测量了x轴的定位误差并建立了误差模型,发现4个误差模型的拟合系数相差很大,每个模型都无法预测其它环境温度下测量到的定位误差。

(2)根据4组试验结果,拟合出环境温度为20℃时x轴的定位误差,然后考虑环境温度变化对定位误差的影响,从而建立起定位误差模型。

(3)采用建立的定位误差模型拟合4组试验结果中的164个定位误差值,所有点的拟合残差都在[-3.208μm, 3.127μm]范围内,证明建立的误差模型具有很高的鲁棒性。

### 参考文献

[1] 阴俊霞. 叶片导流式组合造型双NURBS曲线插补数控

加工[J]. 工具技术, 2018, 52(01): 97-101.

[2] Feng W L, Yao X D, Azamat A, et al. Straightness error compensation for large CNC gantry type milling centers based on B-spline curves modeling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 88(1): 165-174.

[3] 程强, 刘广博, 刘志峰, 等. 基于敏感度分析的机床关键性几何误差源识别方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7): 171-179.

[4] 韩飞飞, 赵继, 张雷, 等. 数控机床几何精度综合解析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21): 141-148.

[5] Cheng Q, Zhao H W, Zhang G J, et al. An analytical approach for crucial geometric errors identification of multi-axis machine tool based on global sensitivity analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1-4): 107-121.

[6] Liu Y, Wan M, Xing W J, et al. Identification of position independent geometric errors of rotary axes for five-axis machine tools with structural restrictions[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 53(10): 45-57.

[7] Xia H J, Peng W C, Ouyang X B, et al. Identification of geometric errors of rotary axis on multi-axis machine tool based on kinematic analysis method using double ball bar[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 122(12): 161-175.

[8] Xiang S T, Li H M, Deng M, et al. Geometric error analysis and compensation for multi-axis spiral bevel gears milling machine[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 121(3): 59-74.

[9] Li D X, Feng P F, Zhang J F, et al. An identification method for key geometric errors of machine tool based on matrix differential and experimental test[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(17): 3141-3155.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. ISO 230-3: 2001, IDT. 机床检验通则 第3部分: 热效应的确定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

作者: 李殿新, 助理研究员, 博士, 煤科院节能技术有限公司, 100013 北京市

Author: Li Dianxin, Assistant Researcher Fellow, Doctor, China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China