

• 机械工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201900337



本刊网刊

一种基于公差的机床导轨几何误差预测方法

陶浩浩, 范晋伟*, 邬昌军

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘 要:在机床的初始设计阶段, 只有机床关键零部件的公差已知。由于机床导轨几何误差对机床精度设计起到关键的指导作用, 只有利用设计经验才能获得几何误差。因此, 在新机床设计初期, 如何准确预测机床几何误差十分必要。基于机床导轨的各项公差, 提出一种预测几何误差的方法。首先, 采用截断的傅里叶级数对导轨表面形貌误差进行拟合, 建立了机床导轨公差与表面形貌误差之间的映射关系, 以及表面形貌误差与几何误差之间的映射关系, 因为表面形貌误差在公差和几何误差之间起到桥梁作用, 因此建立了基于导轨公差的几何误差预测模型。接着, 对该预测模型进行仿真分析, 结果表明, 预测的几何误差中定位误差、 y 向直线度误差、 z 向直线度误差、滚摆误差、颠摆误差和偏摆误差分别为 $17.12\ \mu\text{m}$ 、 $56.57\ \mu\text{m}$ 、 $70.71\ \mu\text{m}$ 、 $28.28\ \mu\text{rad}$ 、 $141.42\ \mu\text{rad}$ 、 $113.14\ \mu\text{rad}$ 。最后, 利用双频激光干涉仪对导轨几何误差进行测量, 同时利用傅里叶曲线拟合方法对测量结果进行拟合, 拟合结果表明测量的几何误差分别为 $16.96\ \mu\text{m}$ 、 $59.43\ \mu\text{m}$ 、 $68.63\ \mu\text{m}$ 、 $28.65\ \mu\text{rad}$ 、 $135.40\ \mu\text{rad}$ 、 $111.58\ \mu\text{rad}$ 。对仿真结果和测量结果进行差值比较, 发现残差值最大不超过几何误差值的 10%, 因此, 在机床的设计阶段该方法可以有效地预测几何误差并代替几何误差的实际测量, 为机床设计者提供重要的理论依据。该方法的核心思想可以直接应用到其他类型导轨几何误差的预测。

关键词:机床导轨; 截断的傅里叶级数; 几何误差; 公差; 表面形貌误差

中图分类号:TH161

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2020)04-0235-08

Approach to Predict Geometric Errors for Machine Tools' Guideways Based on Tolerance

TAO Haohao, FAN Jinwei*, WU Changjun

(College of Mechanical Eng. & Applied Electronics Technol., Beijing Univ. of Technol., Beijing 100124, China)

Abstract: In the initial design stage of machine tools, only the information of tolerance of machine tools' key components is known. Since geometric errors of machine tools can play the role of guidance for the accuracy design of machine tools, geometric errors were obtained only by making use of design experiences. Hence, it is important to predict the geometric errors accurately in the design process of new machine tools. A new approach to predict geometric error based on tolerance of machine tools' guideways was proposed. Firstly, the mapping relationship between tolerance and profile errors of machine tools' guideways was established by utilizing the truncated Fourier series function to fit curve of guideways surface profile. Meanwhile, the mapping relationship between profile errors and geometric errors of guideways was established. Since profile errors are regarded as a bridge between tolerance and geometric errors of machine tools' guideways, geometric errors prediction model based on tolerance of guideways was proposed. Then, simulation verification was carried out. Simulation results showed that the range of the predicted kinematic error (positioning error, y direction and z direction straightness error, roll error, pitch error, and yaw error) is $17.12\ \mu\text{m}$, $56.57\ \mu\text{m}$, $70.71\ \mu\text{m}$, $28.28\ \mu\text{rad}$, $141.42\ \mu\text{rad}$, and $113.14\ \mu\text{rad}$, respectively. Finally, a measuring experiment was carried out by using a dual-frequency laser interferometer. The measured and identified results could be fitted precisely by Fourier curve fitting method. The fitting results showed that the range of the measured kinematic errors was $16.96\ \mu\text{m}$, $59.43\ \mu\text{m}$, $68.63\ \mu\text{m}$, $28.65\ \mu\text{rad}$, $135.40\ \mu\text{rad}$, and $111.58\ \mu\text{rad}$, respectively. By means of

收稿日期:2019-04-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51775010; 51705011); 国家科技重大专项(2019ZX04006001)

作者简介:陶浩浩(1994—), 男, 博士生。研究方向:精密加工与自动化装备及测试技术。E-mail: taohao_hao@163.com

* 通信联系人 E-mail: jwfan@bjut.edu.cn

网络出版时间:2020-06-18 11:16:09

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200617.1036.003.html>

contrasting the measured results and predicted results, residual errors were no more than 10% of the measured results. Therefore, in the design stage of machine tools, this method is effective enough for predicting geometric errors and can be used to replace the measurement of geometric errors, and lays a foundation for designers. And its basic idea can be applied to other type of guideways.

Key words: machine tools’ guideways; truncated fourier series function; geometric error; tolerance; profile error

多轴机床主要由床身、导轨、旋转轴、主轴、工作台等组成,其中导轨主要由两部分组成,即滚珠丝杠副和导轨副。众所周知,机床导轨几何误差对机床精度设计和整个机床系统精度起着至关重要的作用,而导轨表面形貌和滚珠丝杠累积导程误差直接影响机床导轨的几何误差。在机床的初始设计阶段,对机床精度设计起到关键指导作用的是机床几何误差,由于几何误差是机床装配运行后产生的,因此,几何误差未知,只有机床关键零部件的公差已知。目前,机床设计者只有利用设计经验才能获得几何误差,采用经验法获得的几何误差随机性强、精度差。因此,在新机床设计过程中,提出一种基于公差的几何误差预测方法是一个非常具有理论意义和实用价值的研究课题。

近年来,国内外学者对机床导轨几何误差建模方法进行了较广泛而深入的研究。Hwang等^[1]利用三探针测量系统对超精密机床导轨副的平行度和直线度误差进行测量。为了更加深入对气体静压导轨的认识,Ekinci等^[2]通过考虑产生运动误差的内部机理建立了运动误差与导轨几何误差的关系模型。Zha等^[3]提出了一种开放式龙门静压导轨垂直方向直线度误差的建模和补偿方法,利用激光干涉仪对光束上不同点直线度误差进行测量,基于导轨轮廓误差平均效应,建立了静态分析模型,同时采用最小二乘法计算了导轨垂直方向直线度误差。孙明楠等^[4]提出了一种将模态实验数据与有限元分析模型相集成的导轨结合部动力学参数的优化识别方法。孙明楠等^[5]提出了一种基于模态柔度理论的机床结合部动态刚度优化方法,并以精密卧式加工中心为例,将该方法应用于立柱-主轴系统分布的直线导轨、滚珠丝杠结合部动态刚度的优化设计。Ekinci等^[6]考虑导轨的几何误差提出了一种机床误差建模方法,基于该方法分析了关节运动直线度与角度误差之间的关系,并应用三角函数拟合导轨的曲面曲线。He等^[7]提出了一种基于分层思想的直线运动工作台运动误差估计方法,并建立了导轨形貌误差和滑块运动误差的映射关系。Hwang等^[8]提出了一种空气静压工作台几何误差预估方法,该方法通过综合考虑表面形貌测量、运动误差估算和几何误差模型,计算了工作台2维定位误差和平面度。Majda^[9]采用有限元法建立了直线导轨几何误差模型,分析了直线导轨几何误差对连接机构运动误差的影响。Qi等^[10]提出了一种线性运动误差

预测方法,并以静压导轨为例,研究了3维形貌误差对直线度和误差平均效应的影响。Tang等^[11]对精密线性工作台直线度和角度误差及导轨表面形貌之间的关系进行了系统的研究,通过分析导轨加工过程的特点,根据测量结果,选择三角函数和2次函数相结合的方法进行导轨表面形貌表征,但是这种方法不适合大型导轨。

通过分析可以看出,上述研究大多集中于机床的几何误差建模和补偿,以及小型导轨表面形貌误差与几何误差之间的关系建模。目前,针对基于导轨公差的几何误差预测方面的文献还很少,在定量分析机床导轨公差与几何误差的关系时,缺乏完整的理论分析方法。因此,在新机床设计阶段,基于导轨公差的几何误差预测方法的研究具有重要的实际应用意义。为了有效地预测机床导轨几何误差,提出一种基于公差的机床导轨几何误差预测方法。首先,采用截断的傅里叶级数对导轨表面形貌误差进行拟合,建立了机床导轨公差与表面形貌误差模型;随后,建立了表面形貌误差与几何误差模型,将表面形貌误差作为公差和几何误差之间桥梁,建立了基于导轨公差的几何误差预测模型,从而在机床初始设计阶段实现导轨几何误差的预测。

1 导轨几何误差分析

在实际加工过程中,影响机床整体加工精度的各类误差主要包括几何误差、热误差、伺服误差、切削力引入误差和刀具磨损误差等,如图1所示,几何误差对加工精度的影响占主要部分。针对由滚珠丝杠驱动的线性滑动型导轨进行具体分析,导轨结构如图2所示,由导轨、滚珠丝杠、滑块、耦合器和电机等组成。

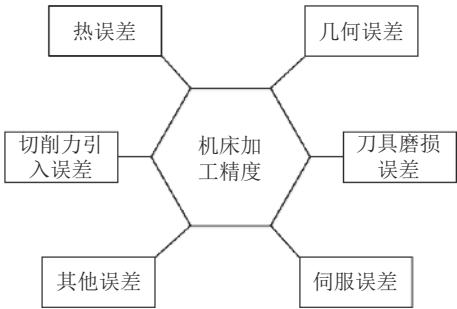


图 1 机床主要误差源

Fig. 1 Main error resources of machine tools

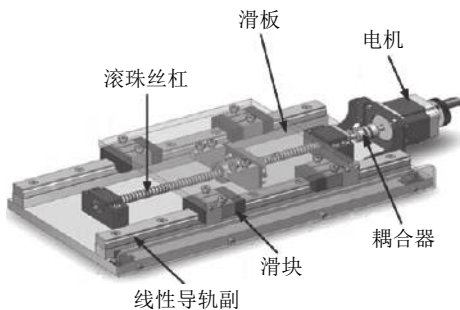


图 2 线性导轨

Fig. 2 Linear guideway

根据标准BS ISO 230-1—2012^[12], 基于刚体运动理论, 机床的每个移动零部件在笛卡尔坐标系中都有6个自由度。以机床X轴导轨为例, 当机床沿着X轴移动时会产生6个几何误差, 包括定位误差、y向直线度误差、z向直线度误差、滚摆误差、颠摆误差和偏摆误差, 见图3和表1。其中, $\delta_i(x)$ ($i = x, y, z$) 为X轴移动时引起的*i*方向上的位移误差, $\varepsilon_i(x)$ ($i = x, y, z$) 为X轴移动时引起的绕*i*方向的角度误差。丝杠螺距累计导程误差影响导轨定位误差 $\delta_x(x)$, 垂直平面上的导轨表面形貌误差影响y向直线度误差 $\delta_y(x)$, 水平平面上的导轨表面形貌误差影响z向直线度误差 $\delta_z(x)$, 两个导轨副之间的平行度误差影响滚摆误差 $\varepsilon_x(x)$, 导轨在垂直平面上的直线度误差和滑板宽度共同影响颠摆误差 $\varepsilon_y(x)$, 导轨在水平平面上的直线度误差和滑板宽度共同影响偏摆误差 $\varepsilon_z(x)$ ^[13]。

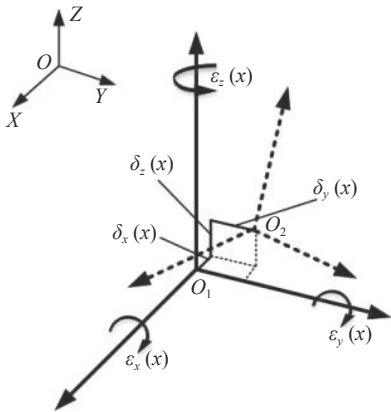


图 3 X轴导轨几何误差

Fig. 3 Geometric errors of X-axis guideway

表 1 X轴导轨几何误差类型

Tab. 1 Geometric error types of X-axis

名称	符号
定位误差	$\delta_x(x)$
y向直线度误差	$\delta_y(x)$
z向直线度误差	$\delta_z(x)$
滚摆误差	$\varepsilon_x(x)$
颠摆误差	$\varepsilon_y(x)$
偏摆误差	$\varepsilon_z(x)$

2 导轨几何误差预测模型

在机床设计阶段, 只有机床关键部件的公差已知。公差是在零件的设计和制造过程中实际参数值的允许变化范围。公差值是判断机械零件是否合格的参考标准, 包括形位公差和尺寸公差。由于机床关键零部件的几何误差在设计阶段未知, 只能利用设计经验获得几何误差, 因此, 在机床初始设计阶段, 基于公差预测导轨几何误差具有重要的意义。

2.1 公差和表面形貌误差之间的映射关系

导轨表面一般呈现随机趋势, 由于不同的加工工艺导致导轨具有不同的表面形貌误差表征形式, 这些导轨的表面形貌误差均满足狄利克雷边界条件^[6,10-11]。因此, 可以用傅里叶级数表征导轨表面形貌误差, 并且形貌误差的变化在允许的公差范围之内, 如式(1)所示:

$$T(x) = \frac{k_1}{2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{2\pi nx}{\lambda}\right) \quad (1)$$

随着傅立叶级数项的增加, 各谐波分量的振幅逐渐减小, 因此, 表面形貌误差对导轨几何误差的影响也随之减小。与小型导轨不同, 大型导轨表面的微小变化对几何误差影响很小。此外, 1阶傅立叶级数具有最大的波长, 并且对导轨的几何误差有显著影响。因此, 为了简单有效地计算几何误差, 选择1阶傅里叶级数(即截断的傅里叶级数)表征导轨表面形貌, 如式(2)所示:

$$T(x) = \frac{k_1}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $T(x)$ 为在Z-X平面上的导轨表面形貌曲线; k_1 为在Z-X平面上的直线度公差, 同时表示曲线 $T(x)$ 的幅值; λ 为曲线 $T(x)$ 的波长, 如图4所示。

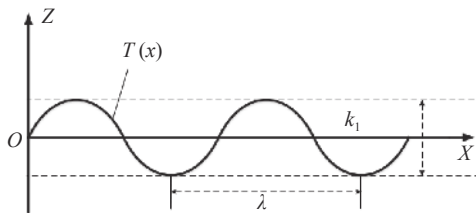


图 4 导轨表面曲线

Fig. 4 Curve of guideways surface

同理可得, 在Y-X平面上的导轨表面形貌曲线可表达为:

$$T_1(x) = \frac{k_2}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (3)$$

式中, $T_1(x)$ 为在Y-X平面上的导轨表面形貌曲线, k_2 为在Y-X平面上的直线度公差。

根据上述分析, 通过导轨表面曲线($T(x)$ 、 $T_1(x)$)

可以预测直线度误差、颤摆误差和偏摆误差。然而,定位误差主要受滚珠丝杠制造精度的影响,所以定位误差可以由滚珠丝杠的累积导程误差表示,累积导程误差由累积实际导程误差和累积代表导程误差组成^[14]。如图5所示,结合单调函数和截断的傅里叶级数表示累积导程误差的变化规律,如式(4)所示。

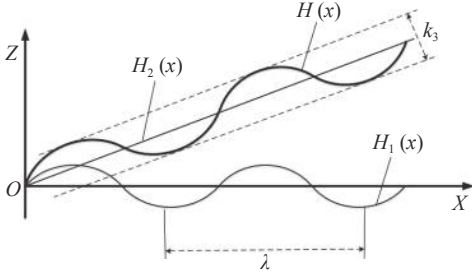


图 5 累积导程误差

Fig. 5 Cumulative-lead error

$$H(x) = H_1(x) + H_2(x) = \frac{k_3}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) + ax \quad (4)$$

式中, $H_1(x)$ 为丝杠的累积实际导程误差, $H_2(x)$ 为累积代表导程误差; $H(x)$ 为累积导程误差, k_3 为丝杠的定位公差, λ 为曲线 $H_1(x)$ 的波长, a 为累积代表导程误差的比例系数。

滚摆误差主要受两个导轨副之间的平行度误差和滑板长度共同影响,取其中一个导轨作为参考,另一个导轨的变化可以用截断的傅里叶级数表征,如图6和式(5)所示。

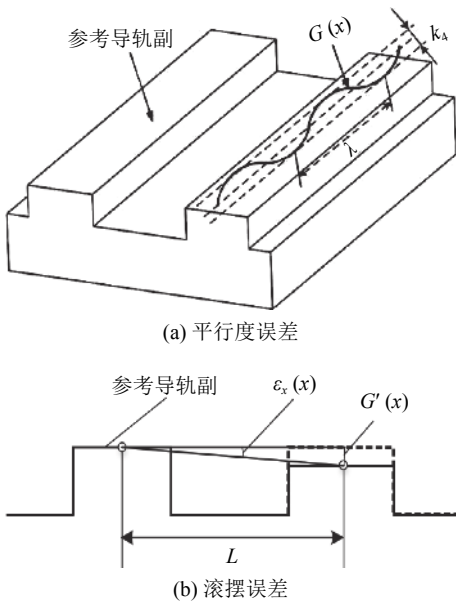


图 6 两导轨副之间的平行度误差示意图

Fig. 6 Schematic diagram of parallelism error of the two guideways

$$G(x) = \frac{k_4}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (5)$$

式中, $G(x)$ 为两个导轨之间的平行度误差, k_4 为平行

度公差。图6(b)中, $G'(x)$ 为曲线 $G(x)$ 在滑板中点处函数值。

2.2 表面形貌误差与几何误差之间的映射关系

假设滑板沿着导轨表面形貌曲线 $(T(x))$ 移动,如图7所示, D 为滑板的宽度, M 为滑板中间点, ε 为角度误差, δ 为位移误差。

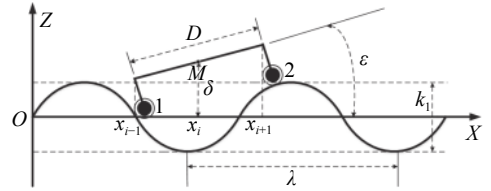


图 7 滑板沿着导轨移动示意图

Fig. 7 Schematic diagram for a slider moving along guideways

建立表面形貌误差与几何误差之间的映射关系之前需要做如下假设:

- 1) 表面形貌误差只存在于导轨上;
- 2) 只考虑准静态情况;
- 3) 忽略点1和2的尺寸;
- 4) 忽略由滑板的质量和载荷造成的导轨偏移误差;

5) 为了避免Bryan误差,选择在滑板中点(M 点)处的直线度误差。

基于上述假设,表面形貌误差与几何误差之间的映射关系可以表达为:

$$\delta_z(x) = \frac{T(x_{i-1}) + T(x_{i+1})}{2} \quad (6)$$

$$\varepsilon_y(x) = \frac{T(x_{i+1}) - T(x_{i-1})}{D} \quad (7)$$

$$\delta_y(x) = \frac{T_1(x_{i-1}) + T_1(x_{i+1})}{2} \quad (8)$$

$$\varepsilon_z(x) = \frac{T_1(x_{i+1}) - T_1(x_{i-1})}{D} \quad (9)$$

$$\delta_x(x) = H(x) \quad (10)$$

$$\varepsilon_x(x) = \frac{G'(x)}{L} = \frac{G(x_{i-1}) + G(x_{i+1})}{2L} \quad (11)$$

式中, L 表示滑板的长度。

2.3 公差和几何误差之间的映射关系

将式(2)代入式(6)和(7)可得在 x_i 点处的 Z 向直线度误差 $\delta_z(x)$ 和颤摆误差 $\varepsilon_y(x)$ 为:

$$\delta_z(x) = \frac{k_1 \left(\sin\left(\frac{2\pi x_{i+1}}{\lambda}\right) + \sin\left(\frac{2\pi x_{i-1}}{\lambda}\right) \right)}{4} \quad (12)$$

$$\varepsilon_y(x) = \frac{k_1 \left(\sin\left(\frac{2\pi x_{i+1}}{\lambda}\right) - \sin\left(\frac{2\pi x_{i-1}}{\lambda}\right) \right)}{2D} \quad (13)$$

同理可得, 在 x_i 点处的 Y 向直线度误差 $\delta_y(x)$ 和偏摆误差 $\varepsilon_z(x)$ 为:

$$\delta_y(x) = \frac{k_2 \left(\sin\left(\frac{2\pi x_{i+1}}{\lambda}\right) + \sin\left(\frac{2\pi x_{i-1}}{\lambda}\right) \right)}{4} \tag{14}$$

$$\varepsilon_z(x) = \frac{k_2 \left(\sin\left(\frac{2\pi x_{i+1}}{\lambda}\right) - \sin\left(\frac{2\pi x_{i-1}}{\lambda}\right) \right)}{4L} \tag{15}$$

定位误差主要受滚珠丝杠制造精度的影响, 因此, 在 x_i 点处的定位误差 $\delta_x(x)$ 可以直接由累积导程误差表达, 如式 (16) 所示:

$$\delta_x(x) = \frac{k_3}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) + ax \tag{16}$$

将式 (5) 代入式 (11) 可得在 x_i 点处的滚摆误差 $\varepsilon_x(x)$ 为:

$$\varepsilon_x(x) = \frac{k_4 \left(\sin\left(\frac{2\pi x_{i+1}}{\lambda}\right) + \sin\left(\frac{2\pi x_{i-1}}{\lambda}\right) \right)}{4L} \tag{17}$$

基于所提出的方法, 可以在机床初始设计阶段精确预测机床导轨的几何误差, 对机床设计者具有一定的实用价值和指导作用。

3 实验验证

为了验证所提出的机床导轨几何误差预测模型的准确性、可行性和有效性, 对龙门式五轴铣床 (型号 XKAS2525) 的线性轴进行了测量实验, 如图 8 所示。以 X 轴为例 (同理可得 Y 轴和 Z 轴的几何误差), X 轴工作行程为 5 000 mm, 滑板长度为 2 500 mm, 滑板宽度为 1 000 mm。

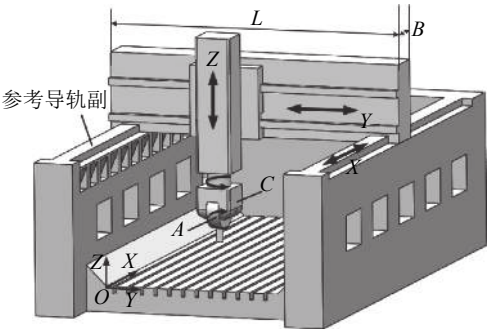


图 8 机床3维模型

Fig. 8 3D model of the milling machine tools

3.1 几何误差的测量和预测

双频激光干涉仪具有精度高、分辨率高、响应快等特点^[15], 在高精度位移测量中得到了广泛的应用。利用双频激光干涉仪并结合九线辨识法, 可得到导轨的6项几何误差, 双频激光干涉仪的型号为英国雷尼绍公司生产的XL-80, 主要包括激光头、角度测量

光学镜组、线性测量光学镜组、水平方向直线度测量光学镜组和垂直方向直线度测量光学镜组, XL-80 的关键参数如表2所示。

表 2 XL-80激光干涉仪性能参数

Tab. 2 Performance indicators of laser head XL-80

参数	取值
系统精度/(10 ⁻⁶)	±0.5
激光精度/(10 ⁻⁶)	0.05
分辨率/μm	0.001
最大测量速度/(m·s ⁻¹)	4
最大采样频率/kHz	50
测量范围/m	0~80
预热时间/min	<6

测量前应保证数控机床实验环境和工作条件的稳定性。首先, 要确保周围环境中没有振动源; 其次, 为了消除环境温度对测量结果的影响, 数控机床需要在测量前预热半小时。测量过程中, 为了减小热误差对测量结果的影响, 将周围环境温度控制在 (20±2) °C 的范围内, 此外为了提高测量结果的稳定性, 先后进行5次测量, 最终的误差值取5次测量结果的平均值。

以 X 轴导轨偏摆误差的测量为例, 激光干涉仪的测量原理如图9所示, 角度干涉器安装在工作台上, 角度反射器安装在主轴上, 图10为实际测量现场。在 X 轴导轨的工作行程上等距选择37个测量点, 滑板在每一个测量位置停留6 s进行采样, 其他几何误差也采用同样的方法进行测量。

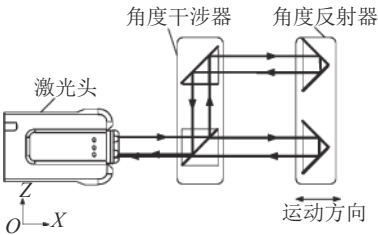


图 9 激光干涉仪测量原理示意图

Fig. 9 Principle diagram of laser interferometer measurement

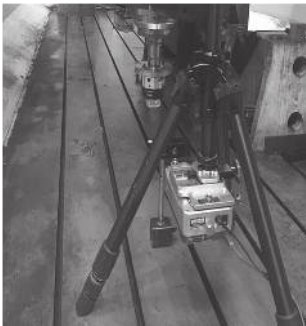


图 10 激光干涉仪测量现场

Fig. 10 Scenes of measurement with laser interferometer

测量和辨识的离散点数据在MATLAB中采用基于非线性最小二乘法的傅里叶曲线拟合方法进行仿真, 仿真结果如图11~16中圆形标记的曲线所示。 R^2 为衡量曲线拟合度的指数, 为了证明该数据拟合方法的有效性, 计算了每条拟合曲线的 R^2 值如表3所示, 结果表明该数据拟合方法具有很高拟合精度, 因此拟合的曲线可以真实地代替测量值。为了预测几何误差, 根据机床标准BS ISO 8636-2—2007^[16]确定 $k_i(i=1,2,3,4)$, 取 $D/\lambda=0.25$ ^[4], 主要参数如表4所示。基于式(11)~(16)和表4可预测X轴导轨的几何误差, 预测结果如图11~16中黑色三角形标记的曲线所示。

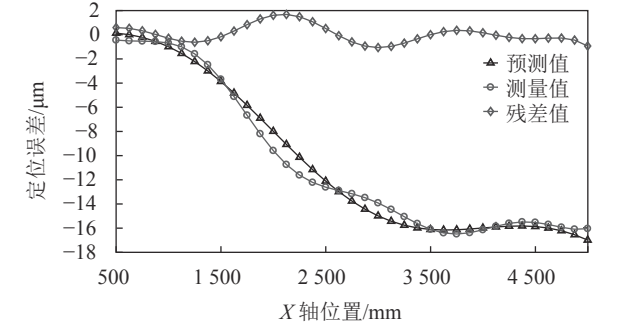


图 11 定位误差预测结果和测量结果对比

Fig. 11 Comparison of position error predicted results and measured results

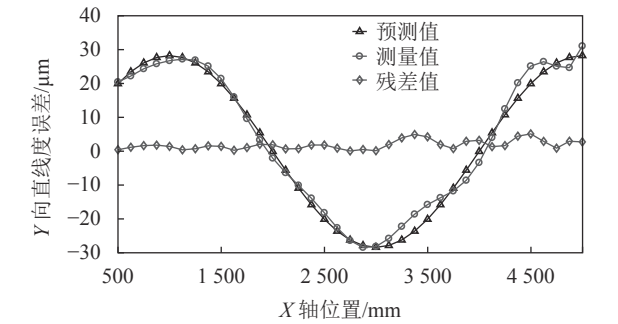


图 12 水平方向直线度误差预测结果和测量结果对比

Fig. 12 Comparison of horizontal straightness error predicted results and measured results

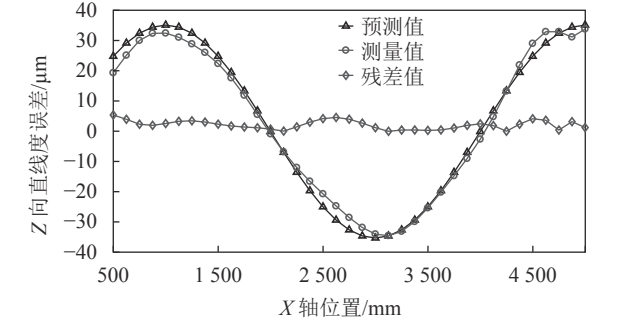


图 13 垂直方向直线度误差预测结果和测量结果对比

Fig. 13 Comparison of vertical straightness error predicted results and measured results

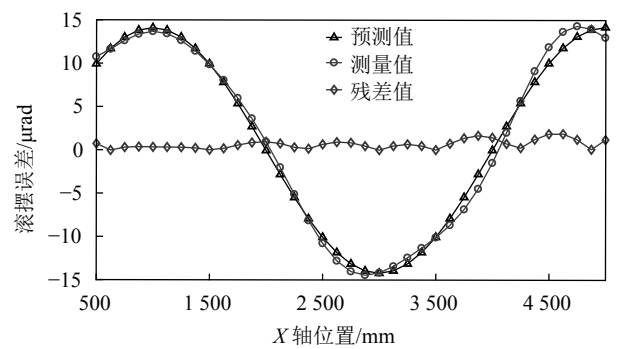


图 14 滚摆误差预测结果和测量结果对比

Fig. 14 Comparison of roll error predicted results and measured results

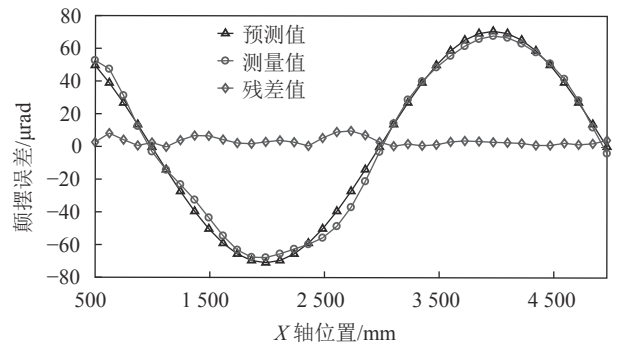


图 15 颠摆误差预测结果和测量结果对比

Fig. 15 Comparison of yaw error predicted results and measured results

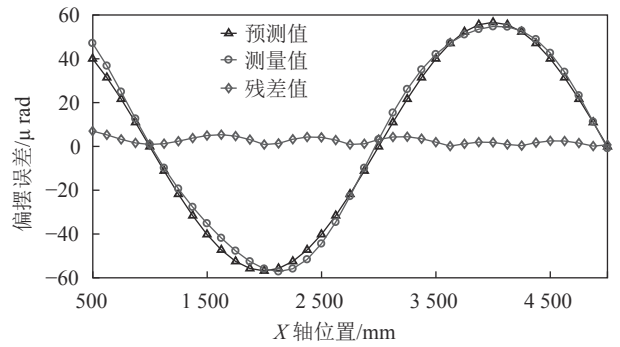


图 16 偏摆误差预测结果和测量结果对比

Fig. 16 Comparison of pitch error predicted results and measured results

表 3 拟合曲线的 R^2 值

Tab. 3 R^2 values of the fitting curves	
几何误差项	R^2
$\delta_x(x)$	0.924 1
$\delta_y(x)$	0.960 2
$\delta_z(x)$	0.924 5
$\varepsilon_x(x)$	0.920 2
$\varepsilon_y(x)$	0.982 4
$\varepsilon_z(x)$	0.961 3

表 4 主要参数
Tab. 4 Main parameters

主要参数	数值
K_1/mm	0.05
K_2/mm	0.04
K_3/mm	0.003
K_4/mm	0.05
a	-0.000 004
λ/mm	4 000
D/mm	1 000
L/mm	2 500

3.2 结果对比

为了进一步验证所提出的机床导轨几何误差预测模型的可行性和有效性,对预测结果和测量结果进行了对比,对比结果如图11~16所示。从图11可以看出, X 轴导轨定位误差最大预测结果为17.12 μm , X 轴导轨定位误差的最大测量结果为16.96 μm 。测量结果和预测结果之间的差值(D 值)为0.16 μm 。同理可得,几何误差项的最大测量值、最大预测值和 D 值如表5所示。此外,几何误差最大和平均残差值如表6所示,与几何误差的测量结果相比,绝大多数残差相当小,最大残差值不超过测量结果的10%。对比结果表明,本文方法的核心思想可用于机床初始设计阶段基于公差的机床导轨几何误差预测。

表 5 预测和测量的几何误差

Tab. 5 Range of predicted and measured values of geometric errors

几何误差	$\delta_x(x)/\mu\text{m}$	$\delta_y(x)/\mu\text{m}$	$\delta_z(x)/\mu\text{m}$	$\varepsilon_x(x)/\mu\text{rad}$	$\varepsilon_y(x)/\mu\text{rad}$	$\varepsilon_z(x)/\mu\text{rad}$
预测最大值	17.12	56.57	70.71	28.28	141.42	113.14
测量最大值	16.96	59.43	68.63	28.65	135.40	111.58
D 值	0.16	2.86	2.08	0.37	6.02	1.56

表 6 预测与测量几何误差的最大和平均残差值

Tab. 6 Maximum and average residual errors between the predicted and measured values

几何误差	$\delta_x(x)/\mu\text{m}$	$\delta_y(x)/\mu\text{m}$	$\delta_z(x)/\mu\text{m}$	$\varepsilon_x(x)/\mu\text{rad}$	$\varepsilon_y(x)/\mu\text{rad}$	$\varepsilon_z(x)/\mu\text{rad}$
最大残差值	1.30	5.19	5.50	1.87	9.81	7.07
平均残差值	0.48	1.93	2.22	0.70	3.42	2.65

4 结 论

1)根据大型结构件的表面特征,采用1阶傅里叶级数(即截断的傅里叶级数)表征导轨表面形貌,同时结合单调函数和截断的傅里叶级数表示滚珠丝杠累积导程误差的变化规律,分别建立了基于公差

的导轨表面形貌误差模型和滚珠丝杠累积导程误差模型。

2)基于表面形貌误差模型,建立了导轨表面形貌误差和几何误差之间的映射关系,并以机床导轨的表面形貌误差为桥梁,建立了基于公差的导轨几何误差预测模型。

3)对导轨6项几何误差进行测量和仿真,通过对测量和仿真结果的残差值比较,发现最大残差值不超过测量结果的10%,可以确定基于公差的导轨几何误差预测方法是正确的。该方法适用于在机床设计的初期阶段,通过已知的公差值即可预测机床导轨的几何误差,对机床设计者具有一定的实用价值和指导意义,其核心思想可应用于其他类型机床导轨。

参考文献:

[1] Hwang J, Park C H, Gao W, et al. A three-probe system for measuring the parallelism and straightness of a pair of rails for ultra-precision guideways[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(7/8): 1053–1058.

[2] Ekinci T O, Mayer J R R, Cloutier G M. Investigation of accuracy of aerostatic guideways[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(6): 478–487.

[3] Zha J, Xue F, Chen Y. Straightness error modeling and compensation for gantry type open hydrostatic guideways in grinding machine[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 112: 1–6.

[4] Sun Mingnan, Yin Guofu, Hu Teng. Orthogonal optimization method of dynamic stiffness of machine tool joints based on modal flexibility[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(4): 90–96. [孙明楠, 殷国富, 胡腾. 基于模态柔度的机床结合部动态刚度正交优化方法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, 45(4): 90–96.]

[5] Sun Mingnan, Mi Liang, Gan Jing, et al. An optimum identification method of dynamic characteristic parameters of guideway joint on a NC machine tool[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(3): 217–223. [孙明楠, 米良, 干静, 等. 数控机床导轨结合部动态特性参数优化识别方法研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(3): 217–223.]

[6] Ekinci T O, Mayer J R R. Relationships between straightness and angular kinematic errors in machines[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(12/13): 1997–2004.

[7] He G, Sun G, Zhang H, et al. Hierarchical error model to estimate motion error of linear motion bearing table[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(5/6/7/8): 1915–1927.

- [8] Hwang J, Park C, Kim S. Estimation method for errors of an aerostatic planar XY stage based on measured profiles errors[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 46(9/10/11/12): 877–883.
- [9] Majda P. Modeling of geometric errors of linear guideway and their influence on joint kinematic error in machine tools[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(3): 369–378.
- [10] Qi E, Fang Z, Sun T, et al. A method for predicting hydrostatic guide error averaging effects based on three-dimensional profile error[J]. *Tribology International*, 2016, 95: 279–289.
- [11] Tang H, Duan J, Zhao Q. A systematic approach on analyzing the relationship between straightness & angular errors and guideway surface in precise linear stage[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 120: 12–19.
- [12] ISO Standards. Test code for machine tools—part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions: ISO 230–1—2012[S]. ISO. 2012.
- [13] Cheng Q, Zhao H, Liu Z, et al. Robust geometric accuracy allocation of machine tools to minimize manufacturing costs and quality loss[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016, 230(15): 2728–2744.
- [14] Wang Shukun. The positioning accuracy analysis of ball screw feeding system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. [王淑坤. 滚珠丝杠进给系统定位精度分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.]
- [15] Du S, Hu J, Zhu Y, et al. Analysis and compensation of synchronous measurement error for multi-channel laser interferometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(5): 55201.
- [16] ISO Standard. Machine tools—test conditions for bridge-type milling machines—testing of the accuracy—Part 2: Travelling bridge (gantry-type) machines: ISO 8636–2—2007[S]. ISO. 2007.

(编辑 黄小川)

引用格式: Tao Haohao, Fan Jinwei, Wu Changjun. Approach to predict geometric errors for machine tools' guideways based on tolerance[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(4): 235–242. [陶浩浩, 范晋伟, 邬昌军. 一种基于公差 of 机床导轨几何误差预测方法[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(4): 235–242.]