

数控机床线轨装配精度建模及控制方法

刘志峰¹, 陈继民², 李 迎², 赵永胜², 闫 兴², 孙富权²

(1. 吉林大学 机械与航空航天工程学院, 长春 130022; 2. 北京工业大学 机械与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 针对直线导轨装配过程中, 由预紧载荷作用引起的装配变形机理不明确导致的导轨装配直线度难以预测的问题, 首先在建立直线导轨装配变形模型的基础上, 讨论了理想和实际情况下的导轨装配变形; 其次, 考虑了导轨安装面的制造误差对导轨装配精度的影响, 提出了综合装配变形和制造误差的导轨装配直线度误差预测模型, 并提出了基于装配变形反修制造误差的导轨装配精度控制方法; 最后, 搭建实验台并通过实验验证理论模型及精度控制方法的准确性, 结果表明: 导轨装配直线度误差减小了 64.5%。

关键词: 机械制造及其自动化; 装配变形; 制造误差; 数控机床; 直线导轨

中图分类号: TG95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)05-1536-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240542

Modeling of CNC machine tool line rail assembly accuracy and its control method

LIU Zhi-feng¹, CHEN Ji-min², LI Ying², ZHAO Yong-sheng², YAN Xing², SUN Fu-quan²

(1. College of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. School of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the linear guide assembly process, due to the preload load caused by the assembly deformation mechanism is not clear resulting in the guide assembly straightness is difficult to predict the problem. In this paper, based on the establishment of linear guide assembly deformation model, the ideal and actual conditions of the guide assembly deformation is discussed. Secondly, considering the influence of manufacturing error of the guide rail mounting surface on the guide rail assembly accuracy, it puts forward the integrated assembly deformation and manufacturing error of the guide rail assembly straightness error prediction model, and puts forward the control method of the guide rail assembly accuracy based on the assembly deformation and the inverse repair manufacturing error. Finally, the experimental bench is built and the accuracy of the theoretical model and accuracy control method is verified through experiments, and the results show that the straightness error of the guideway assembly is reduced by 64.5%.

Key words: mechanical manufacture and automation; assembly deformation; manufacturing error; cnc machine tools; linear guideways

收稿日期: 2024-05-16.

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U23B20104).

作者简介: 刘志峰(1973-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 高端数控机床与智能制造. E-mail: lzf@bjut.edu.cn

通信作者: 李迎(1988-), 男, 副研究员, 博士. 研究方向: 高端数控机床高性能装配技术. E-mail: li_ying@bjut.edu.cn

0 引言

随着时代发展,各行业对高精度、高质量零部件的需求日益增加^[1],这就对数控机床的加工精度提出了更高的要求。数控机床直线轴的装配精度对其加工精度的影响至关重要,其中,直线导轨作为构成数控机床直线轴的关键零部件起到支撑和导向作用,其装配精度会直接影响工作台的运动精度,进而决定数控机床的定位精度和产品加工精度。

近些年来,国内外学者对装配变形和误差传递影响下的数控机床装配精度进行了许多研究。Ajani等^[2]建立了非刚性零件装配误差传播的数学模型,预测了非刚性零件装配过程中由制造误差和装配变形误差引起的尺寸和几何变化;Mu等^[3]构建了考虑零件制造误差和变形的装配精度预测模型,并通过实例验证了精度预测模型的有效性;Yang等^[4]分析了多公差耦合下常见几何要素和结合面的误差传递,建立了传动系统装配精度预测模型,阐述了形状误差对装配精度的影响;蔡尚文等^[5]建立了基于小位移旋量理论的装配误差传递模型,描述了各零件加工误差及装配误差在装配过程中的累积情况;Liu等^[6]综合考虑了加工误差和变形误差,建立了基于 Jacobian-torsor 模型的偏差计算模型,阐述了零件变形对装配误差计算的影响;Lu等^[7]提出了一种基于装配性能的预变形方法,对加工中心的空间误差进行补偿,提高加工中心装配精度和装配性能。上述学者的研究都是采用面接触的接触面建模方法和矩阵变换的误差传递方法,无法准确反映细长导轨在装配过程中由于局部受载而产生的变形。Song等^[8]针对花岗岩导轨,模拟了导轨在不同拧紧力矩下的变形情况,提出了计算导轨变形的办法;Liu等^[9]考虑了导轨安装误差对进给系统刚度的影响,建立了进给系统的14自由度动力学模型;Sun等^[10]研究了机床导轨装配受力变形问题,建立了超静定梁理论模型来研究装配变形;Zheng等^[11]为了提高铆接结构变形预测的计算效率,建立了铆接过程的等效力学模型,阐述了轴向压力对装配变形的影响;Sun等^[12]针对加工中心弹性变形对工作空间体积的影响,基于机床装配和协同计算机辅助工程分析,提出了一种提高装配性能的预变形方法。上述学者研究了导轨装配变形的计算方法以及导轨装配误差对系统刚度的影响,但只对理想装配条件下的装配变形进行了计

算,并未考虑实际装配过程中其他因素对装配变形的影响,同时也未考虑制造误差对导轨装配精度的影响。

本文主要研究了直线导轨实际装配时,综合考虑装配变形和制造误差的导轨装配精度建模及控制方法。首先,建立了直线导轨装配变形模型,在此基础上讨论理想和实际情况下的直线导轨装配变形;其次,考虑了导轨安装面的制造误差对直线导轨装配精度的影响,建立了综合装配变形和制造误差的直线导轨装配直线度误差预测模型,并提出了基于装配变形反修制造误差的直线导轨装配精度控制方法;最后,搭建实验台并通过实验验证了模型和方法的准确性。

1 直线导轨装配变形建模

1.1 直线导轨装配变形建模理论

为了研究直线导轨装配过程中预紧载荷作用引起的导轨装配变形机理,本文以图1中所示的床身导轨装配结构为研究对象进行理论建模。

如图1所示,导轨通过螺栓装配在床身上,床身内部布置有 m 个筋板。导轨自身为细长结构,并且其长度远大于横截面积,因此,导轨的刚度远小于床身的刚度。当床身和导轨经过装配发生变形后,刚度较小的导轨在螺栓预紧力的作用下会贴合在床身的导轨安装基面上,导轨的形状会按照床身的形变而产生相应的变化。因此,以床身为研究对象,在垂直方向上,床身的受力状态可以等效为图2(a)所示的超静定梁模型。导轨长度为 L ,通过 n 个间距为 d 的螺栓安装在床身上,每

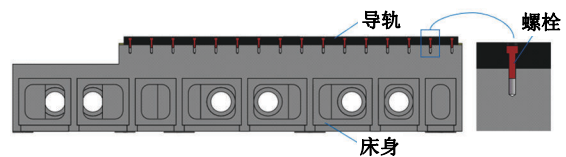


图1 直线导轨装配示意图

Fig. 1 Schematic diagram of linear guideway assembly

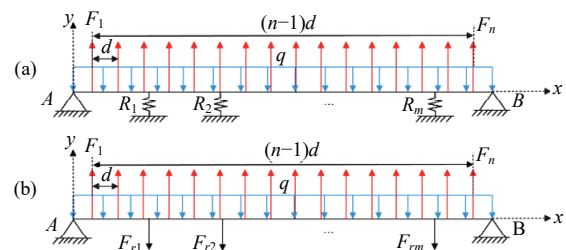


图2 床身受力分析模型

Fig. 2 Model of bed force analysis

个螺栓拧紧后产生的螺栓预紧力将导轨挤压并紧固在床身上同时将床身上的螺纹孔向上挤压,将床身导轨安装部分两端的筋板等效为固定端,中间的筋板等效为弹性支撑,床身等效为承受 n 个向上的集中力 $F_1 \sim F_n$ 和向下的均布载荷 q 的超静定梁。均布载荷 q 通过式(1)获得。

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{L} \quad (1)$$

式中: q 为均布载荷, L 为直线导轨的长度; n 为螺栓的总数。

解除床身中间的筋板 $R_1 \sim R_m$ 处的弹性约束,使用支反力 $F_{r1} \sim F_{rm}$ 代替,将图 2(a)所示的超静定梁等效为图 2(b)所示的简支梁。根据简支梁受力变形理论,将第 j 个筋板处由第 i 个集中力 F_i 引起的变形分别用 $(\delta_{R_1})_{F_i}, (\delta_{R_2})_{F_i} \dots (\delta_{R_m})_{F_i}$ 表示,并通过式(2)计算。

$$(\delta_{R_i})_{F_i} = \begin{cases} \frac{F_i x(L-a)}{6EI} \times \\ (L^2 - x^2 - (L-a)^2) (0 \leq x \leq a) \\ \frac{F_i(L-a)}{6EI} \left[\frac{L(x-a)^3}{(L-a)} + \right. \\ \left. (L^2 - (L-a)^2)x - x^3 \right] (a \leq x \leq L) \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 为第 i 个集中力到 A 端的距离; x 为第 j 个筋板到 A 端的距离; E 为弹性模量, I 为惯性矩。

将第 j 个筋板处由均布载荷 q 引起的变形分别用 $(\delta_{R_1})_q, (\delta_{R_2})_q \dots (\delta_{R_m})_q$ 表示,并通过式(3)计算。

$$(\delta_{R_i})_q = -\frac{qx}{24EI} (L^3 - 2Lx^2 + x^3) \quad (3)$$

式中: x 为第 j 个筋板到 A 端的距离; E 为弹性模量; I 为惯性矩。

将第 j 个筋板处由第 k 个未知反力 F_{rk} 引起的变形分别用 $(\delta_{R_1})_{F_{rk}}, (\delta_{R_2})_{F_{rk}} \dots (\delta_{R_m})_{F_{rk}}$ 表示,并通过式(4)计算。

$$(\delta_{R_i})_{F_{rk}} = \begin{cases} \frac{F_{rk} x(L-b)}{6EI} \times \\ (L^2 - x^2 - (L-b)^2) (0 \leq x \leq b) \\ \frac{F_{rk}(L-b)}{6EI} \left[\frac{L(x-b)^3}{(L-b)} + \right. \\ \left. (L^2 - (L-b)^2)x - x^3 \right] (b \leq x \leq L) \end{cases} \quad (4)$$

式中: b 为第 k 个未知反力到 A 端的距离; x 为第 j 个筋板到 A 端的距离; E 为弹性模量; I 为惯性矩。

分别用 $\delta_{R_1}, \delta_{R_2} \dots \delta_{R_m}$ 表示筋板 $R_1 \sim R_m$ 处的综合弯曲变形,如式(5)所示,根据叠加法原理,每个筋板处的弯曲变形是梁受到的集中力、均布载荷和未知反力单独作用后叠加的结果。

$$\begin{cases} \delta_{R_1} = \sum_{i=1}^n (\delta_{R_1})_{F_i} + (\delta_{R_1})_q + \sum_{k=1}^m (\delta_{R_1})_{F_{rk}} \\ \delta_{R_2} = \sum_{i=1}^n (\delta_{R_2})_{F_i} + (\delta_{R_2})_q + \sum_{k=1}^m (\delta_{R_2})_{F_{rk}} \\ \dots \\ \delta_{R_m} = \sum_{i=1}^n (\delta_{R_m})_{F_i} + (\delta_{R_m})_q + \sum_{k=1}^m (\delta_{R_m})_{F_{rk}} \end{cases} \quad (5)$$

筋板的变形还与其刚度有关,用 δ_{R_j} 表示第 j 个筋板处的变形:

$$\delta_{R_j} = \frac{F_{rk}}{K}, (1 \leq j \leq m, k = j) \quad (6)$$

式中: K 为筋板的刚度。

根据式(1)~(6),可以求解出未知反力 $F_{r1} \sim F_{rm}$,再次利用叠加法可以计算出床身上任意处的变形 δ_x ,如式(7)所示, δ_x 是 n 个集中力 $F_1 \sim F_n$ 、均布载荷 q 和未知反力 $F_{r1} \sim F_{rm}$ 综合作用的结果。

$$\delta_x = \sum_{i=1}^n (\delta_x)_{F_i} + (\delta_x)_q + \sum_{k=1}^m (\delta_x)_{F_{rk}} \quad (7)$$

1.2 直线导轨装配变形建模分类讨论

(1)理想情况下,导轨通过 n 个螺栓紧固在床身上,每个螺栓的预紧力被设计成完全相同的。此时,导轨装配变形模型中的 n 个螺栓预紧力的大小是相同的,即 $F_1 = F_2 = \dots = F_n$ 。

使用 Matlab 模拟计算床身在导轨长度上的装配变形,计算结果如图 3 所示。通过数值仿真结果可以发现,在不考虑制造误差且螺栓预紧力相同的理想情况下,导轨的装配变形很小,直线度只有 $1 \mu\text{m}$ 。

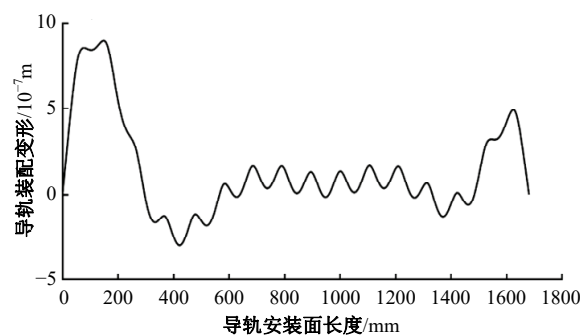


图 3 螺栓预紧力均匀时导轨装配变形

Fig. 3 Assembly deformation when bolt preload is uniform

(2)在导轨实际装配时,用直接控制螺栓预紧力的方式将导轨紧固于床身上是无法实现的。扭矩控制法是通过在螺栓施加固定扭矩来控制螺栓预紧力,该方法所用设备简单、操作简易,因此是装配过程中最常用的紧固方法。在使用扭矩控制法时,紧固力矩和螺栓预紧力间的关系^[13]如下所示:

$$F = \frac{2T}{\frac{d_2 \mu_s}{\cos \alpha} + \frac{P}{\pi} + d_w \mu_w} \quad (8)$$

式中: F 为螺栓预紧力; T 为紧固力矩; d_2 为螺栓中径; μ_s 为螺纹摩擦因数; α 为牙型角的一半; P 为螺距; d_w 为摩擦面等效摩擦直径; μ_w 为支撑面摩擦系数。

由式(8)可知,在螺栓结构确定的情况下,影响扭矩与预紧力关系的主要是螺纹面和支撑面上的摩擦因数。在实际螺栓拧紧时,摩擦因数容易受到众多因素影响,因此,使用扭矩控制法拧紧螺栓时,即使控制拧紧扭矩相同,也无法保证拧紧不同螺栓得到的螺栓预紧力的大小是完全相同的。此时,装配变形误差模型中的 n 个螺栓预紧力的大小实际上是不相同的,即 $F_1 \neq F_2 \neq \dots \neq F_n$ 。

为了研究通过扭矩控制法得到的螺栓预紧力的分散程度,采用M12×1.75普通螺纹的螺栓和螺母进行了如下螺栓拧紧实验。首先,设计并制造了图4所示的两块使用螺栓连接的被连接件,并通过图4所示的装置进行螺栓拧紧实验。

取10根螺栓和螺母编号后进行10组拧紧实验,实验时将螺栓依次穿过压力传感器、被连接件、垫圈并通过螺母连接,将压力传感器连接到动静态应变仪上,并通过计算机软件来记录螺栓拧紧时预紧力的变化。使用电子扭矩扳手拧紧螺栓时,依次对螺栓施加相同的拧紧力矩 $T_0 = 80 \text{ N}\cdot\text{m}$,并将扭矩偏差控制在 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之内。最后,对记录下的实验结果进行分析,得到的预紧力分布如图5所示。

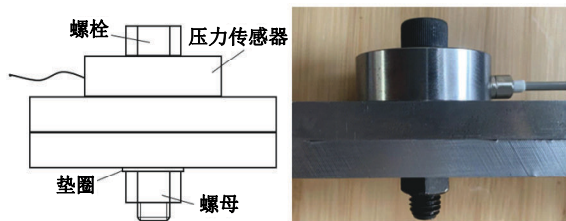


图4 连接结构示意图及实物图
Fig. 4 Connection structure schematic and physical drawing

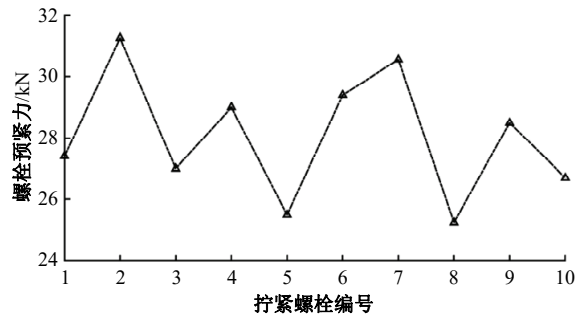


图5 固定紧固扭矩下螺栓预紧力分布
Fig. 5 Distribution of bolt preload at fixed tightening torque

由图5可知,通过扭矩控制法使用相同的拧紧力矩拧紧螺栓时,螺栓预紧力的分散程度可达20%,预紧力分散程度比较大。因此,在直线导轨的实际装配阶段,尽管拧紧每个螺栓的力矩是相同的,但螺栓预紧力的大小会存在20%的偏差。此时,使用Matlab模拟导轨的装配变形时,将集中力设置为正态随机数,结果如图6所示。由结果可以发现,实际导轨装配时,考虑到螺栓预紧力分散,导轨的装配变形会明显增大,直线度达到了 $7 \mu\text{m}$,比螺栓预紧力均匀时的导轨装配变形增大了 $6 \mu\text{m}$ 左右。由此可见,螺栓预紧力的分散程度越大,导轨的装配变形就越大。但由于床身的导轨安装面还存在制造误差,因此,导轨的装配精度不是由装配变形单独决定,而是由装配变形和制造误差共同决定。

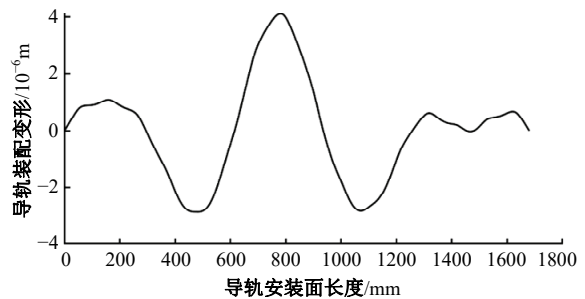


图6 螺栓预紧力分散时导轨装配变形
Fig. 6 Assembly deformation when bolt preload is dispersed

2 综合考虑装配变形和制造误差的导轨装配直线度误差建模

2.1 综合考虑装配变形和制造误差的导轨装配直线度误差建模

在数控机床直线导轨的实际装配过程中,导轨安装面的制造误差对导轨的装配精度有很大影

响。传统方法通常采用傅里叶级数表征导轨安装面的制造误差,为简化计算通常选择一阶傅里叶级数来表征导轨安装面的制造误差^[14],如下所示:

$$f(x) = \frac{A_a}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (9)$$

式中: A_a 为误差幅值; λ 为误差波长。

在实际生产环境中,制造误差受到加工工艺、环境温度以及工作母机自身存在的加工误差等因素的影响,导轨安装面的制造误差并不是周期性的^[15]。因此,采用一阶傅里叶级数表征导轨安装面的制造误差与实际导轨安装面的制造误差存在差异,无法准确表示导轨安装面的制造误差。基于以上分析,为了获得导轨安装面的制造误差精确表达式,首先使用电子水平仪测量导轨安装面的形状误差,并使用两端点连线法对测量数据进行处理,得到导轨安装面的直线度误差,然后采用特征函数拟合得到导轨安装面的制造误差精确表达式。按照上述方法得到的导轨安装面的制造误差拟合曲线如图 7 所示。

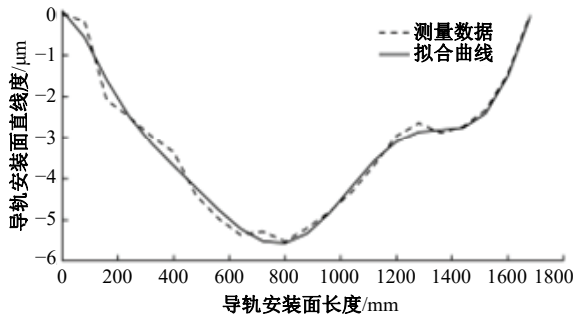


图 7 测量数据与拟合曲线

Fig. 7 Measured data and fitted curves

将导轨安装面的制造误差与导轨装配变形叠加后得到综合制造误差与装配变形的导轨装配直线度,如图 8 所示。由数值仿真可以发现,在综合考虑制造误差与实际装配时预紧力的分散情况时,导轨的装配直线度较大。因此,本文提出一种基于装配变形预测对制造误差进行反修调的装配方法,在提升导轨装配精度的同时提高装配效率。

2.2 基于导轨装配变形预测模型的制造误差反修调方法

本方法的使用关键在于准确预测导轨的装配变形,依据导轨的装配变形对导轨安装面进行反修调,使导轨的装配变形与安装面的制造误差叠加后相抵消,以达到提高导轨装配精度的目的。

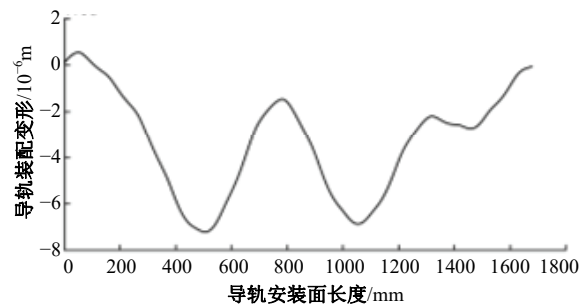


图 8 考虑制造误差和装配变形的导轨装配直线度

Fig. 8 Straightness of guideway assembly considering manufacturing errors and assembly deformation

为了研究导轨实际装配时每个螺栓预紧力的大小,使用压力传感器和动静态应变仪来测量并记录螺栓紧固时的预紧力。测量时,首先将压力传感器连接到数据采集系统,然后用螺栓穿过压力传感器并紧固于床身的螺纹孔上,最后通过软件记录下稳定后的螺栓预紧力数值。将螺栓和床身螺纹孔编号并一一对应后,按照上述流程测量并记录紧固力矩为固定值的情况下每根螺栓的预紧力大小。最后将测得的 n 个螺栓预紧力 $F_1 \sim F_n$ 代入式(1)~(7),由此可计算出导轨实际装配阶段床身上任意处的变形 δ_x 。此时,可以根据预测的导轨装配变形曲线和实际测量的导轨安装面的制造误差曲线确定修调的位置和修调量,对导轨安装面进行修调。

3 实验验证

为验证本文提出的直线导轨装配直线度误差预测模型和装配精度控制方法,搭建了如图 9 所示的实验台进行验证。该实验台床身长 2 200 mm,宽 1 500 mm,高 500 mm,导轨长 1 680 mm,用于紧固导轨的螺栓规格为 M12 × 1.75。

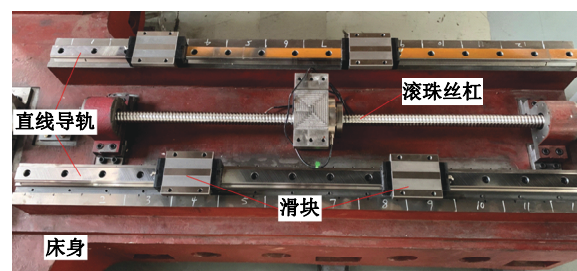
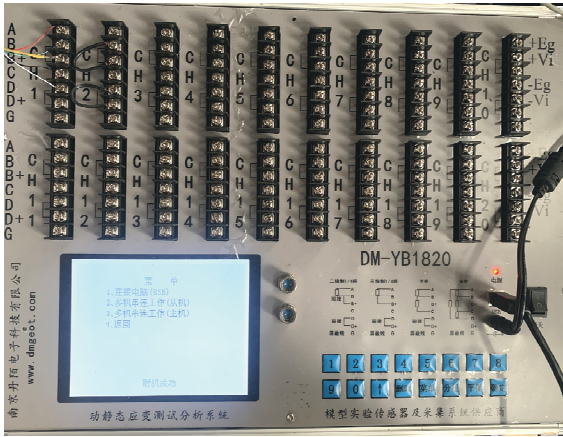


图 9 实验台实物图

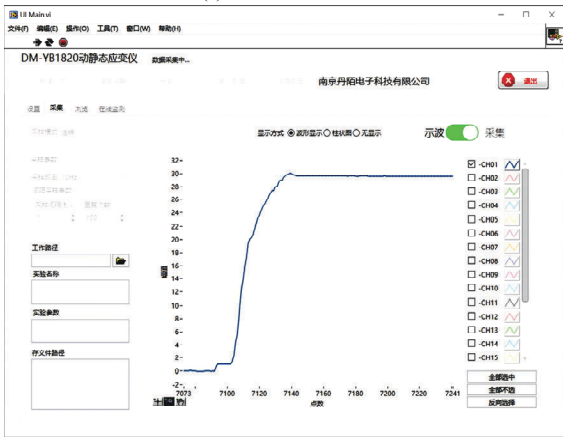
Fig. 9 Experiment table physical picture

3.1 导轨装配变形预测

将压力传感器连接到动静态应变仪上并将应变仪与计算机连接,如图 10 所示。对螺栓和床身



(a) 动静态应变仪



(b) 数据采集软件界面

图 10 螺栓预紧力采集系统

Fig. 10 Bolt preload collection system

导轨安装面上的每个螺栓孔对应编号后,使用压力传感器依次测量每个螺栓在相应螺栓孔位处拧紧后的螺栓预紧力,并通过计算机记录下稳定后的螺栓预紧力数值,测量结果如表 1 所示。将表 1 中的螺栓预紧力测量值代入式(1)~(7)计算出导轨的装配变形曲线,如图 11 所示,由结果可知,该实验台直线导轨实际装配过程中,由装配变形导致的导轨装配直线度误差为 $3.06 \mu\text{m}$,图 11 中所示结果将用于指导后续实验中的导轨安装面的制造误差反修调。

表 1 螺栓预紧力测量结果

Table 1 Bolt preload measurement results

螺栓编号	预紧力/kN	螺栓编号	预紧力/kN
1	29.5	9	27.9
2	26.5	10	29.4
3	28.0	11	28.5
4	25.5	12	26.5
5	26.0	13	26.7
6	27.5	14	28.75
7	25.5	15	26.75
8	25.25	16	27.0

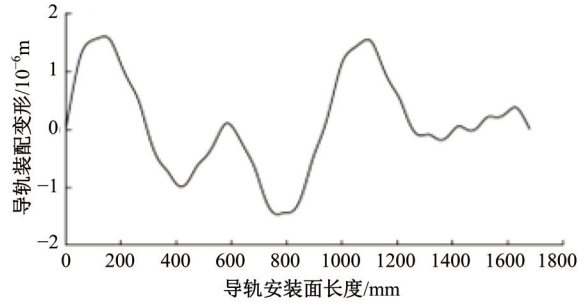


图 11 导轨装配变形预测结果

Fig. 11 Guideway assembly deformation prediction results

3.2 导轨安装面的制造误差测量

使用电子水平仪对导轨安装面的制造误差进行测量,如图 12 所示,将导轨安装面等分为 21 段,每段长为 80 mm。先将检块放置于起始位置,再将电子水平仪置于检块上并调零后开始测量导轨安装面的直线度。测量时,将检块从起始位置逐段推至另一端并记录下电子水平仪每次稳定后的读数。测量结束后,对记录的数据进行处理后得到导轨安装面的制造误差曲线如图 13 所示。由结果可知,该实验台导轨安装面的直线度误差为 $5.58 \mu\text{m}$,且导轨安装面的表面轮廓呈两端高中间低的趋势。

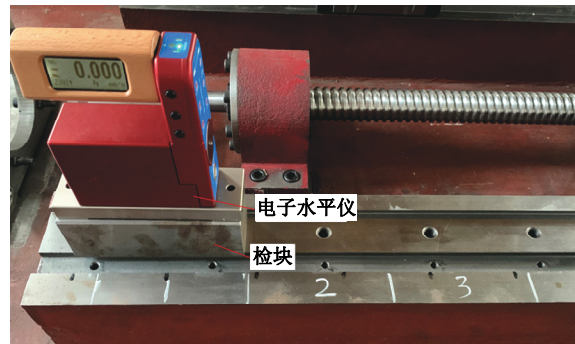


图 12 导轨安装面的制造误差测量

Fig. 12 Manufacturing error measurement of guideway mounting surfaces

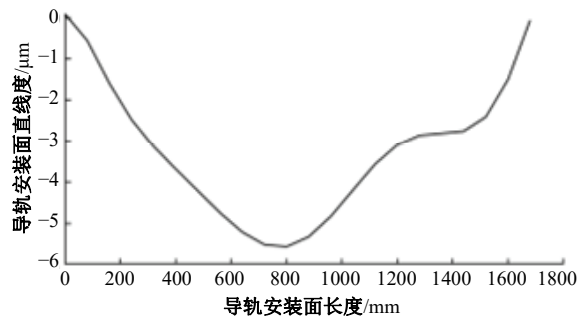


图 13 导轨安装面的直线度误差曲线

Fig. 13 Straightness error curve of guideway mounting surface

3.3 导轨安装面的预修调处理

依据图 11 计算出的导轨装配变形曲线和图 13 测量得到的导轨安装面的制造误差曲线,对导轨安装面进行修调。修调时,首先通过导轨装配变形曲线确定理想的导轨安装面直线度曲线,如图 14 所示,理想的导轨安装面直线度曲线与导轨装配变形曲线完全相反,二者叠加后可以相互抵消。其次,以理想的导轨安装面直线度曲线为目标对导轨安装面进行刮研,使修调后的导轨安装面的制造误差与导轨装配变形叠加后互相抵消。修调完成后,将导轨装配到床身上并测量安装后的导轨直线度,并将测量结果与未经过修调直接装配的导轨直线度测量结果对比,如图 15 所示。当导轨安装面未经过修调直接进行导轨装配时,导轨的直线度误差为 $10.76 \mu\text{m}$ 。先将导轨安装面进行预修调后再装配的导轨直线度误差为 $3.82 \mu\text{m}$,比直接装配的导轨直线度误差减小了 $6.94 \mu\text{m}$ 。

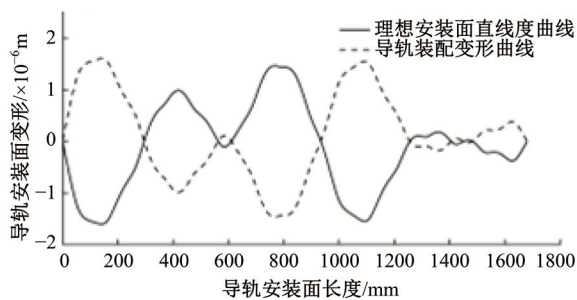


图 14 理想导轨安装面直线度曲线与导轨装配变形曲线
Fig. 14 Ideal guideway mounting surface straightness curve and guideway assembly deformation curve

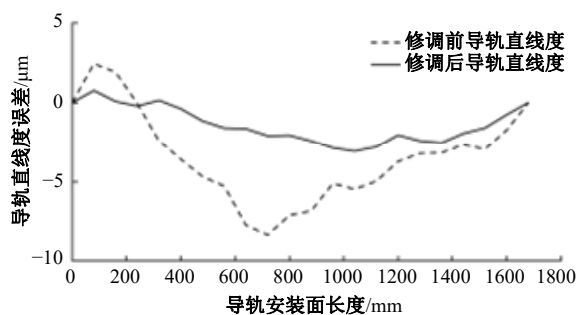


图 15 导轨安装面预修调前后的导轨装配直线度对比
Fig. 15 Comparison of straightness of rail assembly before and after pre-trimming of rail mounting surface

4 结 论

(1)通过构建导轨装配变形模型,研究螺栓预

紧力的分散程度对导轨装配变形的影响,发现导轨装配变形随着螺栓预紧力分散程度的增大而增大。因此,在导轨装配过程中减小螺栓预紧力的分散程度可以有效减小导轨的装配变形,提高装配精度。

(2)针对导轨安装面的制造误差,本文采用实测误差数据并拟合的方法获取制造误差曲线,并将制造误差与装配变形叠加,建立了综合考虑装配变形和制造误差的导轨装配直线度误差模型。并依据导轨装配变形预测模型和实测制造误差提出了基于导轨装配变形预测模型的制造误差反修调方法,使用该装配方法可以使导轨一次装配直线度误差减小 64.5% ,在提高装配效率的同时保证了装配精度。

参考文献:

- [1] 黄贤振,李超,孙超,等. 基于失效模式和动态贝叶斯网络的数控机床可靠性分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2024: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.2024005
Huang Xian-zhen, Li Chao, Sun Chao, et al. Reliability analysis of CNC machine tools based on failure modes and dynamic Bayesian networks[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.2024005
- [2] Ajani I, Lu C. Assembly variation analysis of the non-rigid assembly with a deformation gradient model [J]. Assembly Automation, 2022, 42(1): 40-53.
- [3] Mu X K, Wang Y L, Yuan B, et al. A new assembly precision prediction method of aeroengine high-pressure rotor system considering manufacturing error and deformation of parts[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 61: 112-124.
- [4] Yang X, Ran Y, Wang Z C, et al. Early prediction method for assembly precision of mechanical system and assessment of precision reliability[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112: 203-220.
- [5] 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, 45(6): 6-10.
Cai Shang-wen, Wang Hui-fen, Liu Ting-yu. Assembly precision prediction and adjustment method based on error propagation model[J]. Mach Build Autom, 2016, 45(6): 6-10.
- [6] Liu T, Cao Y L, Wang J, et al. Assembly error calculation with consideration of part deformation[J].

- Procedia Cirp, 2016, 43: 58-63.
- [7] Lu C, Wang S L. An approach to evaluating product assembly precision considering the effect of joint surface deformation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(14): 2604-2617.
- [8] Song L Q, Zhang Q, Zhao X S, et al. The influence of the mounting surface error on the deformation of the guideway[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(9): 4071-4084.
- [9] Liu C, Zhao C Y, Wen B C. Dynamics analysis on the MDOF model of ball screw feed system considering the assembly error of guide rails[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 178: 109290.
- [10] Sun G M, He G Y, Weng L T, et al. Research on assembly deformation of machine tool guideway[C]// IEEE International Conference on Advanced Manufacturing, Chongqing, China, 2018: 231-234.
- [11] Zheng B, Yu H D, Lai X M. Assembly deformation prediction of riveted panels by using equivalent mechanical model of riveting process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 1955-1966.
- [12] Sun Y P, Wang D L, Dong H M, et al. Pre-deformation for assembly performance of machine centers [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 528-536.
- [13] Motosh N. Development of design charts for bolts preloaded up to the plastic range[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1976, 98(3): 849-851.
- [14] 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):1997-2004.
- [15] Tang H, Duan J A, Zhao Q C. 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: 2-9.