

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.03.05

重型丝杠副行程测量仪的研制

焦圣松^{1*}, 焦洁, 高敏¹, 郑凌²

(1. 北京机床研究所有限公司, 北京 101500;

2. 山西航天清华装备有限责任公司, 山西 长治 046100)

摘要: 为解决关键行业中直径100~300 mm的重型丝杠副的行程误差测量难题, 基于中小型丝杠检测仪器的研发经验, 创新仪器整体构型, 对关键部件和测控系统进行优化, 探索加工装配工艺, 研制出重型丝杠副测量仪器, 实现了重型丝杠导程误差和重型丝杠副行程误差的动态测量。经检测, 在4 m行程内, 仪器光轴分别在距丝杠中心线50 mm和150 mm附近时, 最大示值误差分别为0.5 μm 和1.3 μm ; 对于被测丝杠副样件, 各项指标的最大值与最小值之差不超过P1级丝杠副相应允差的1/3。检测结果表明: 该重型丝杠副行程测量仪的测量精度能满足P1级要求。该仪器的成功研制, 为促进重型丝杠副、丝杠检测领域的发展起到重要作用。

关键词: 测量仪器; 滚珠丝杠副; 行程误差; 动态测量; 制造技术

中图分类号: TB96; TH69; TH89

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 03-0058-12

Development of heavy-duty screw pair stroke measuring machine

JIAO Shengsong^{1*}, JIAO Jie¹, GAO Min¹, ZHENG Ling²

(1. Beijing Machine Tool Research Institute Co., Ltd., Beijing 101500, China;

2. Changzhi Qinghua Machinery Factory, Changzhi 046100, China)

Abstract: To solve the measurement problem of stroke error for heavy-duty screw pairs with diameters of 100 ~ 300 mm in key industries, building upon the experience of small and medium-sized screw measurement instruments, this study has optimized the overall configuration, critical components, and measurement-control systems while exploring manufacturing and assembly processes. A specialized measurement machine for heavy-duty screw pairs was successfully developed, enabling dynamic measurement of both lead error in heavy-duty screws and travel error in screw pair assemblies. Experimental results demonstrate that within a 4 m travel range, the instrument's optical axis exhibits maximum indication errors of 0.5 μm and 1.3 μm when positioned at 50 mm and 150 mm from the screw centerline, respectively. For the tested screw pair samples, the maximum deviations between the extreme values of all measured parameters do not exceed one-third of the tolerance specified for P1-grade screw pairs. These findings confirm that the measurement accuracy of this heavy-duty screw pair stroke measuring machine meets P1-grade requirements. The successful development of this instrument plays an important role in promoting the development of heavy-duty screw pairs and screw detection fields.

Key words: measurement machine; ball screw pairs; travel error; dynamic measurement; manufacturing technology

收稿日期: 2024-11-12; 修回日期: 2025-04-21

基金项目: 通用技术集团机床工程研究院科技创新专项项目(KTCXZX-1-2023-003)

引用格式: 焦圣松, 焦洁, 高敏, 等. 重型丝杠副行程测量仪的研制[J]. 计测技术, 2025, 45(3): 58-69.

Citation: JIAO S S, JIAO J, GAO M, et al. Development of heavy-duty screw pair stroke measuring machine [J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(3): 58-69.



0 引言

滚珠丝杠副应用于各行各业,行程误差是衡量丝杠副精度的重要指标。在GB/T 17587(3-2017)《滚珠丝杠副 第3部分:验收条件和验收检验》^[1]中规定了公称直径6~200 mm、公称导程1~40 mm的滚珠丝杠副的定义及验收方法;在JB/T 12600-2016《大型滚珠丝杠副》^[2]中对适用范围进行扩大,公称直径63~250 mm,与其相对应的系列行程测量仪已经在市场上得到应用。

行业中常将直径100 mm及以上、长度3 000 mm及以上的丝杠副称为重型丝杠副。在航空航天、重型装备等领域,重型丝杠副得到广泛应用。重型滚珠丝杠副的显著特点是丝杠的直径

大、重量及惯量大,其不仅加工难度大,检测也很困难。国际上已经开展了重型丝杠副行程测量相关技术的研究和应用,但针对直径达到300 mm、最大重量超过2 t的重型丝杠副的行程测量仪仍较为少见;而国内,仍未进行重型丝杠副行程测量仪的研制。针对此情况,本文研制了重型丝杠副行程测量仪,旨在填补国内重型丝杠副检测领域的空白。

1 仪器主要技术指标与总体方案

1.1 主要技术指标

结合现有技术积累和用户的需求,制定了重型丝杠副行程测量仪的主要技术指标,如表1所示。

表1 主要技术指标
Tab.1 Main technical parameters

测量范围/mm					测量精度		测量项目	
导程(螺距)	丝杠外径	螺母外径	法兰盘外径	丝杠长度	滚珠丝杠副	梯形丝杠	滚珠丝杠副	梯形丝杠
2~50	90~305	145~250	200~270	200~4 000	GB/T 17587.3-2017规定的P3级	JB/T 2886-2008规定的6级	有效行程内实际平均行程偏差 e_{sa} 、 e_{oa} ,行程变动量 V_{ua} 、 V_{300a} 、 $V_{2\pi a}$	螺旋线轴向误差 $\Delta L_{2\pi}$ 、 ΔL_{25} 、 ΔL_{100} 、 ΔL_{300} 、 ΔL_{Lu} ,螺距误差及螺距累积误差 ΔP 、 ΔP_{60} 、 ΔP_{300} 、 ΔP_{Lu}

1.2 总体方案

1.2.1 整体布局

本仪器以最大限度减小阿贝误差^[3]为设计原则,整体布局如图1所示。主机采用整体花岗石床身、双向气浮导轨;被测丝杠由双顶尖夹持、柔

性固定支承辅助定位;测量系统以精密圆光栅为转角基准,以双频激光干涉仪为长度基准;长度测量元件为测量棱镜,测量棱镜的布局为径向可调,以减小阿贝距离,垂直方向在被测丝杠中心平面上。为避免电机振动对测量的影响,减速箱

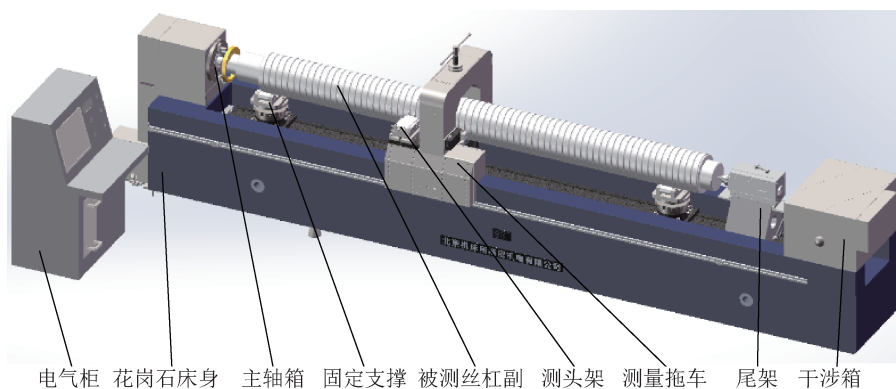


图1 测量仪整体布局

Fig.1 Overall layout of measuring instrument

部件与床身分隔放置,使用同步带及带轮与主轴相连,保证传动平稳。

移动导轨副安装在花岗岩床身上,为了确保导轨安装后床身的直线度,严格控制加工精度和装配误差;同时进行预应力调整,确保导轨副与花岗岩床身均匀接触,减少局部应力集中;在安装过程中,实时监测床身的直线度变化,及时调整安装位置和紧固力;在导轨安装后,进行多次研磨和检测,确保床身的直线度在允许的误差范围内。

1.2.2 运动控制

被安装在头架尾架之间丝杠(副)既是被测元件又是驱动元件,测量时由电机驱动丝杠做旋转运动,依靠螺旋升力的作用,由带动测头或螺母夹具带动拖车做直线运动,实现动态连续测量。

1.2.3 测量原理

丝杠(副)在旋转电机的带动下把转角运动转换为直线运动的定位元件,行程误差为拖车的实际行程与丝杠的角位移折算出来的行程之间的误差。当圆光栅与丝杠一起旋转时,由读数头拾取代表丝杠转角的信号,由双频激光干涉仪拾取拖车的位移信号,经过综合处理电路、数据采集及软件进行脉冲当量转换,计算出每个测量点的原始误差如式(1)所示。

$$y_i = y_{if} - y_{it} \quad (1)$$

式中: y_i 为第 i 点丝杠的原始行程误差, y_{if} 为第 i 点拖车行程, y_{it} 为第 i 点丝杠转角对应的行程。

原始行程误差 y_i 是后续数据处理的基础,在测量时,根据 y_i 的值在计算机屏幕上画出误差曲线,测量结束后,首先对 y_i 值进行存储,然后根据相关标准的定义计算误差。对于滚珠丝杠(副),计算平均行程偏差 e_{sa} 或 e_{oa} 及行程的变动量 V_{ua} 、 V_{300a} 、 $V_{2\pi a}$;对于梯形丝杠,计算螺旋线轴向误差 $\Delta L_{2\pi}$ 、 ΔL_{25} 、 ΔL_{100} 、 ΔL_{300} 、 ΔL_{Lu} 或螺距误差及螺距累积误差 ΔP 、 ΔP_{60} 、 ΔP_{300} 、 ΔP_{Lu} 。

2 关键技术及解决方案

2.1 主机设计与制造技术

2.1.1 床身与导轨的设计与制造

1) 床身的设计与制造

参考 JCS-040 系列行程测量仪^[4-5]的成功案例,

床身采用花岗石材料^[6],上平面与侧平面加工成导轨面,中间开槽镶嵌铸铁副导轨。花岗岩床身的优点为:结构紧密、内应力消失,变形小;线胀系数极小,温位移小;可人工研磨成高精度平滑表面,无滞涩感,可作为气浮平面;其上平面和侧平面与测量拖车上的气浮轴承配合作为仪器的主导轨,非接触、无摩擦、不磨损,经久耐用,精度保持性好。副导轨是承载支承与尾座的关键部件,要求自身的直线度足够好,并且与主导轨平行,采用铸铁材料多块拼接而成,方便切削加工,最终的精度由人工刮研实现。

根据表1的技术指标,被测丝杠的直径为 90 ~ 305 mm,长度为 200 ~ 4 000 mm,可知其重量范围为 10 ~ 2 300 kg,直径、长度、重量的变化量都很大。除了仪器的安装及空间尺寸的调整满足技术要求外,在动态测量过程中,载荷的变化对仪器的影响在设计时需要重点考虑。床身作为所有部件的安装基准,其变形量的分析尤为重要,而床身底部有多个支点,支点的布局对床身的变形量有着很大影响。在无负载状态下,对比常用的三支点结构,结合仿真分析,合理地分配辅助支点的位置。图2中,三支点结构下,床身的最大变形量为 9.3 μm ;图3中,增加辅助支点且支点位于正中时,床身的最大变形量为 2.6 μm 。

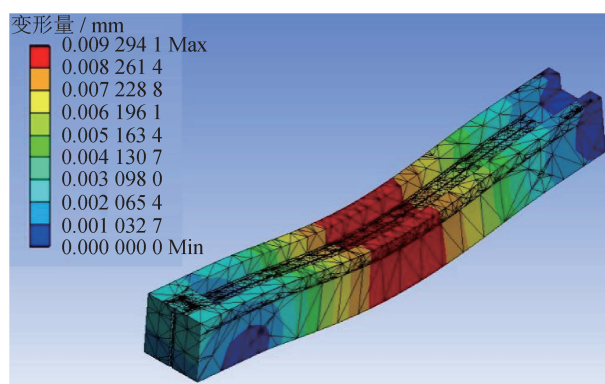


图2 三支点有限元分析

Fig.2 Finite element analysis of three support points

床身底部支点分布如图4所示,底部支点采用3个主支点、2个辅助支点的结构,结合实际生产中的检测数据,对床身进行多次重复检测和精密研磨,以保证床身精度要求。

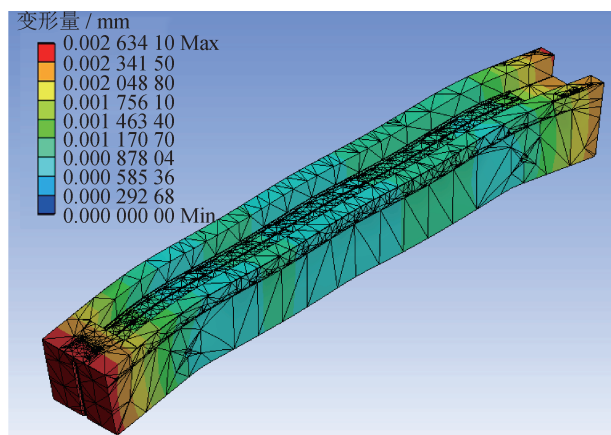


图3 三主支点及辅助支点有限元分析

Fig.3 Finite element analysis of three main support points and auxiliary support points

注: L 为床身全长。

图4 床身底部支点分布图

Fig.4 Distribution diagram of support points at the bottom of the bed

2) 副导轨的设计与制造

设计副导轨的截面形状和尺寸, 提高其强度与刚度, 并且要考虑加工的工艺性, 配备必要的工装、研具、检具。

副导轨的长度 4.7 m, 且精度要求很高。考虑到加工的工艺性, 采用铸铁材料对其进行加工, 副导轨的截面形状设计成“一V一平”, 每块长度不到 1 m, 多块拼接而成。并设计必要的工装与研具、检具。

在床身的凹槽内铺设铸铁副导轨, 用于安放支承和尾架, 尾架与副导轨之间是滑动运动。副导轨的结构及尺寸设计完成后进行仿真验算, 分析受力情况, 如因尾架锁紧而产生向上的拉力、尾架夹持丝杠后因弹簧预压缩产生的拉力, 估算其最大受力值。锁紧力在不同位置时(如图5、图6所示), 分析副导轨中导轨面的变形量分别为 0.2、0.1 μm , 对于丝杠测量影响很小, 在实际应用中可以忽略。

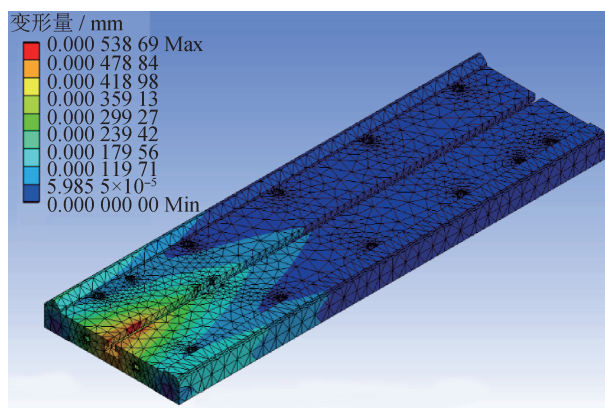


图5 距端面 50 mm 处

Fig.5 50 mm away from the end face

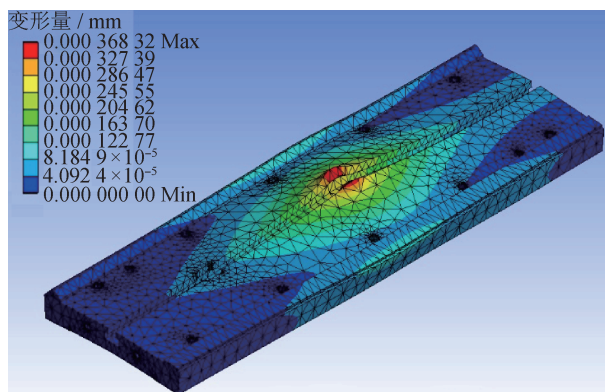


图6 距端面 500 mm 处

Fig.6 500 mm away from the end face

床身与导轨是仪器的关键基础件, 由于其精度要求极高, 最终的精度是在温度湿度控制良好、具备防震地基的车间完成的。进入恒温车间前的切削加工只能算“粗加工”; 在恒温车间里, 对花岗石床身进行研磨、对铸铁导轨进行刮研, 在这种精细的操作过程中, 除了使用专用的检具、研具, 还要使用高精度的电子水平仪、光电自准直仪、双频激光干涉仪、杠杆千分表等, 技术难度较大。

2.1.2 头架与尾架的设计与制造

头架顶尖与尾架顶尖是安装被检丝杠的基准和支撑, 其精度、刚度都有很高的要求。

图7为头架部件结构图, 头架部件不仅能对被测丝杠进行定位和支撑, 还承载了作为角度基准的测量元件。该部件应用了精密角接触球轴承, 结构紧凑、回转精度高。在部件设计时, 考虑最大可能的挠度对测量精度带来的影响, 设计了主

轴的结构尺寸、莫氏6#锥孔,并对主轴轴向刚度、径向刚度进行了校核。图8展示了在主轴和轴承接触面上添加转动副和移动副时的变形分析,确保设计的合理性和精度。

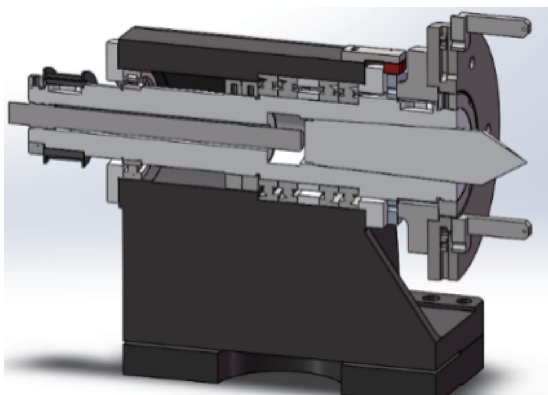


图7 头架部件

Fig.7 Headframe components

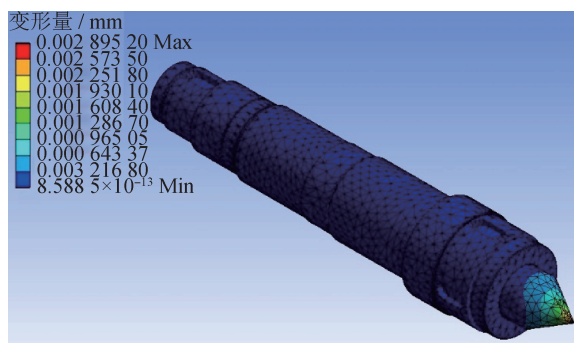


图8 主轴受力分析

Fig.8 Main shaft force analysis

图9为尾架部件结构,主要功能是尾架采用V型顶尖套加弹簧的结构,接触面大,承载大、刚性强。通过弹簧可以调节轴向推力、平衡转矩波动对顶尖的影响。尾架的设计考虑了尾架的重量、移动的便利性以及磨损等问题。图10展示了尾架受轴向力时的变形量分析,确保尾架的刚度和稳定性。

图11为尾架气浮卸载结构,即在尾座与副导轨的接触面上设计了气浮通道,减少磨损,提高移动的便利性和精度保持性。气浮通道的设计确保了尾架在移动过程中的平稳性和精度,减少了因摩擦引起的误差。在尾座导轨的1个平面、2个V面上分别加工2个直径为0.75 mm的孔,这6个孔分别与对应的气道连接,在2个孔之间开平衡气槽,在移动尾架时起到卸载作用。

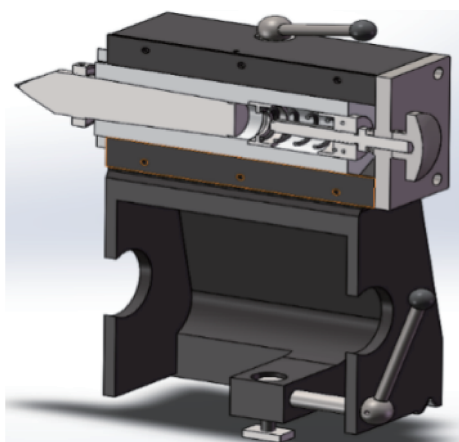


图9 尾架部件

Fig.9 Tail frame components

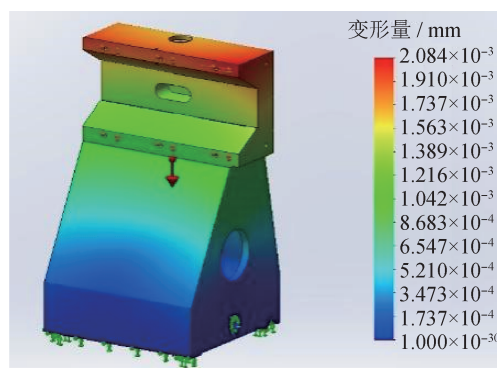


图10 尾座受力分析

Fig.10 Force analysis of tailstock

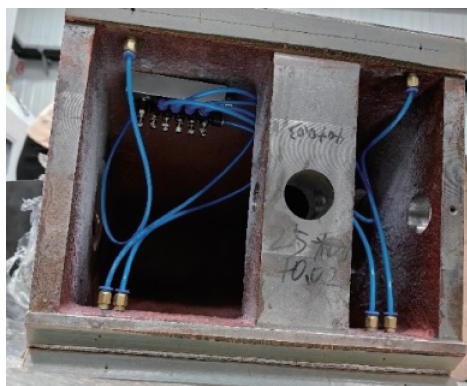


图11 尾架气浮卸载结构

Fig.11 Tail frame air floating unloading structure

2.1.3 柔性固定支承的研制与调整

在测量丝杠导程误差时,除双顶尖夹持丝杠外,还要根据丝杠长度配置不同数量的固定支承作为辅助定位。被测对象中的重型丝杠直径大、重量沉,支承尤为重要。与常规的装调方法不同,在测量重型丝杠前,要借助吊车等工具把丝杠安

装在支承上,粗调水平后,丝杠不动、旋转主轴,调整丝杠轴外圆与主轴的同心后,用双顶尖把丝杠顶紧。重型丝杠相较常规丝杠刚性更强,丝杠外径跳动、锥度或两端顶尖孔不同心的情况在测量时都会对主轴和尾座带来很大的额外负载,严重时可能会造成精密仪器损坏。针对该问题,设计了柔性支承结构,如图12所示。除保证升降行程满足直径调整范围及滚轮中心与头架尾架中心线同心外,根据承载范围和弹簧的刚度,选择了正反交替排列的一组碟形弹簧,并在原始装配时,留置一定的预压缩量。采用这种柔性支承降低了找正丝杠的要求,缩短了安装时间,提高了检测效率,对仪器的头架尾架同轴精度起到了良好的保护作用。升降行程70 mm,弹性缓冲区间约10 mm。配备了3组滚筒座,在有限的升降空间内进行装配和调整,滚筒座1适用范围为丝杠直径95~160 mm,如图13所示;滚筒座2适用范围为丝杠直径160~230 mm,如图14所示;滚筒座3适用范围为丝杠直径230~305 mm,如图15所示。

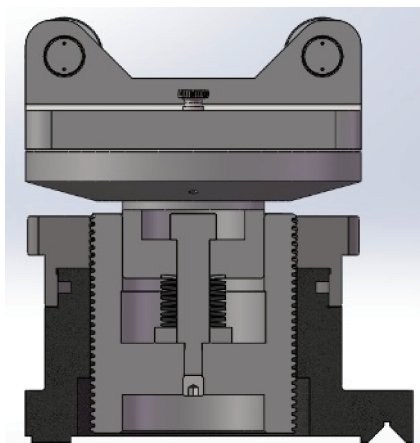


图12 固定支承部件

Fig.12 Fixed support components

为了定量分析柔性固定支承的应用效果,选择不同直径的重型丝杠,分别在有无柔性支承的情况下进行安装和测量。使用柔性支承后,对于直径为100 mm的丝杠,找正精度从原来的0.005 mm降低到0.02 mm,同轴精度从0.002 mm降低到0.01 mm;安装时间从原来的30 min缩短到15 min,找正时间从原来的20 min缩短到5 min。这表明:柔性固定支承显著提高了安装和找正的效率。

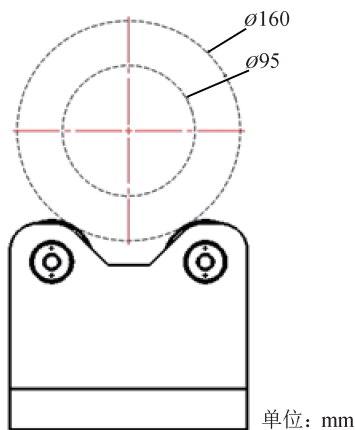


图13 滚筒座1

Fig.13 Roller seat 1

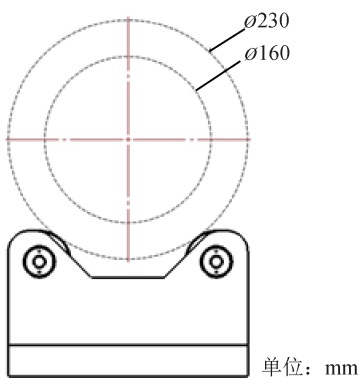


图14 滚筒座2

Fig.14 Roller seat 2

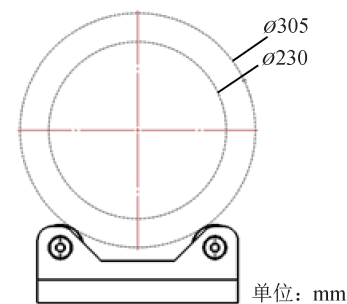


图15 滚筒座3

Fig.15 Roller seat 3

2.1.4 测量拖车的结构与调整

测量拖车作为测量元件的载体和运动部件,其结构及运动精度至关重要。结合使用需要,把测量拖车设计成中心对称的龙门结构,测头架、测量棱镜、螺母夹具、气浮轴承等分布于其上,如图16所示。这种结构除便于安装与调整丝杠副外,测量棱镜的中心与被测丝杠副的中心在同一个水平面内,测量棱镜的径向位置可调整到接近

被测丝杠的中心, 这些设计旨在减小阿贝距离, 即减小阿贝误差、瞄准误差、读数误差、导向误差。另外, 多组气浮轴承的布局也便于控制拖车的角位移, 从而减小阿贝综合误差。

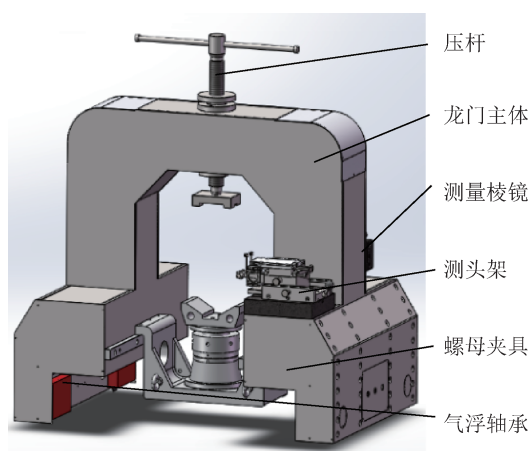


图16 测量拖车

Fig.16 Measuring trailer

根据丝杠副的装夹需要, 对龙门结构的测量拖车主体进行仿真分析(如图17所示), 其最大变形量约为0.01 mm, 且变形量最大位置处于非关键部位。实际应用中依据使用要求, 装夹丝杠副时使用固定支撑、螺母夹具及千分表相互配合使丝杠与测量仪保持同心, 能够减少大部分变形量带来的影响。

在测量重型丝杠副的综合行程误差时, 由于预紧转矩^[7-8]及其波动量较大, 对拖车的承载及刚性都提出了严峻的挑战, 必须解决气浮轴承承载、刚性及气浮系统的稳定性问题。测量拖车上共布置8个气浮轴承(上平面4个、侧面4个), 两侧对称分布。在一定压力下, 将每个气浮轴承的气膜厚度调整一致, 使拖车在水平面与垂直平面上达到受力平衡, 确保运动的平稳性。

一般情况下, 气浮导轨的工作气压越高, 气浮轴承承载能力和气膜间隙越大, 但过高的供气压力对提高气浮刚性效果并不明显, 且会引起自振。为保证气浮轴承有足够的刚度又保持稳定, 需要采用合适的工作气压和气膜厚度。参考JCS-040系列的丝杠测量仪, 选择合适的工作压力, 考虑到花岗石导轨面加工的直线度误差, 气膜厚度调整为10 μm 左右为较合适。按照工艺成熟的小孔

节流的长方形结构进行设计, 确定了气浮轴承的尺寸和节流比, 精研承载平面和自位球面。设计的气浮轴承尺寸规格为150 mm $\times$ 100 mm $\times$ 30 mm, 6个节流孔直径均为0.15 mm, 工作气压为0.4 MPa, 该气浮轴承的气浮刚性数据如表2所示。

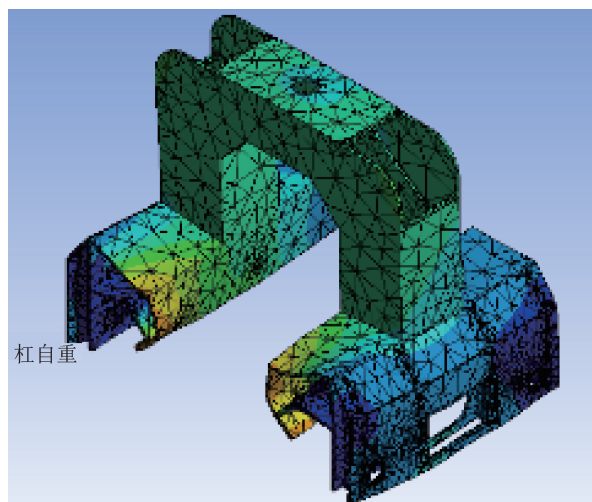


图17 龙门主体受力分析

Fig.17 Force analysis of gantry body

表2 气浮轴承刚性实验数据

Tab.2 Experimental data on rigidity of air bearing

承载 / kg	气膜 / μm
100	14
200	12
250	11
300	9
350	8
400	6
450	5

通过分析载荷、丝杠挠度及预紧转矩的变动量对拖车的影响, 计算拖车的承载能力与刚性, 试验研究了单个气浮块工作气压、气膜厚度与负载的关系, 最终完成测量拖车部件的设计。

2.2 高可靠性的拖动控制系统

根据重型丝杠副的转矩及惯量要求, 选用了输出力矩较大的三相异步减速电机, 这种电机具有高扭矩、低噪声、高可靠性等优点, 能够满足重型丝杠副的转矩及惯量要求。图18展示了拖动

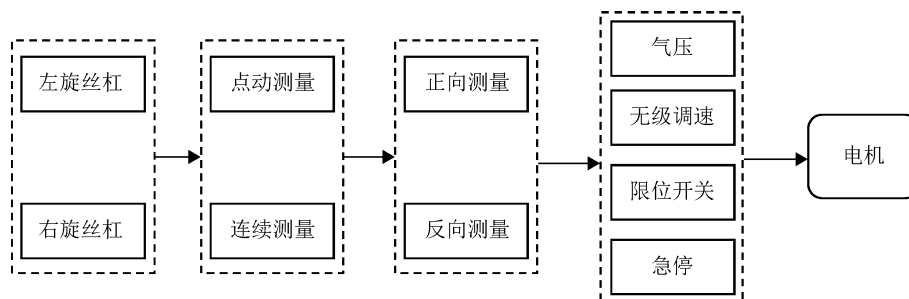


图 18 控制系统流程图

Fig.18 Control system flowchart

控制系统的各个组成部分及其相互关系，该系统包括电机、减速箱、同步带及带轮、刹车制动装置、无级调速装置、过载保护装置等。三相异步减速电机提供动力，驱动丝杠进行旋转运动；减速箱与床身分隔放置，减少振动对测量精度的影响；同步带及带轮确保传动的平稳性和精度；刹车制动装置实现快速停止和精确控制，确保测量过程的平稳性和安全性；无级调速装置实现无级调速，确保测量过程的灵活性和精度；在负载超过设定值时，过载保护装置使电机停止运行，保护测量仪和被测丝杠不受损坏。

在控制策略方面，通过变频器控制电机的转速，实现无级调速。根据测量要求，可以在不同的速度下进行测量，确保测量的精度和效率。采用软启动和软停止技术，确保电机在启动和停止时的平稳性，减少冲击和振动，提高测量的精度和可靠性。

2.3 高精度的测量系统

测量系统选用了德国 ERA 4200C 高精度的圆光栅作为丝杠旋转的角度基准^[11]，刻线 28 000 系，最大误差 $\pm 0.58''$ ，经过 2 细分后，每圈脉冲数为 56 000 个，极大减小了角度基准的量化误差。选用美国 Keysight 5519A 双频激光作为长度基准，其真空波长为 $0.632\,991\,354\,\mu\text{m}$ ，频率稳定度为 1.4×10^{-10} ，在测量时，对气象参数引起的波长变化加以修正；采用实时中断类型的数据采集接口电路及软件，数据采集更精准更快捷，且软件具有数字滤波等多项功能；误差评定符合最新的国家标准、日本标准、国际标准。该测量系统在本公司其它型号滚珠丝杠副行程测量仪^[12]中也得到了充分验证。

3 仪器测量精度

在实践中，这台精密仪器在制造中经历了四季变化，同时从制造厂到用户场地经历了长途运输及二次安装调试，机械精度和测量精度都稳定在允许偏差之内，使用效果良好。

图 19 为该重型丝杠副行程测量仪样机的照片，3.1、3.2、3.3 节分别为我公司、用户、中国计量科学研究院三方人员对该仪器的检验结果。



图 19 重型丝杠副行程测量仪样机

Fig.19 Prototype of heavy-duty screw pair stroke measuring instrument

3.1 机械精度

依据 JJF 1410-2013 《丝杠动态行程测量仪校准规范》^[13]对仪器的几何精度进行测量，具体测量项目及测量结果如表 3 所示。

按照表 2 的检测数据，拖车绕轴线摆动带来的阿贝误差 δ_1 为

$$\delta_1 = P_h \cdot \alpha / 2\pi \quad (2)$$

式中： P_h 为被测丝杠导程， α 为测量拖车绕轴线的摆动角度。

拖车水平扭摆带来的阿贝误差 δ_2 为

$$\delta_2 = L \cdot \tan\beta \quad (3)$$

式中： L 为测量光路距中心较大距离， β 为测量拖

表3 机床几何精度测量结果

Tab.3 Geometric accuracy measurement results of machine tools

测量项目	方向	允许值	实测值
旋转头架顶尖的回转误差		0.005 mm	0.002 mm
头架主轴锥孔中心线对工作台移动方向的平行度	垂直方向	0.003 ~ 0.010 mm / 200 mm	0.007 mm / 200 mm
	水平方向	0.005 mm / 200 mm	0.001 mm / 200 mm
尾架顶尖套筒锥孔中心线对工作台移动方向的平行度	垂直方向	0.003 ~ 0.010 mm / 200 mm	0.005 mm / 200 mm
	水平方向	0.005 mm / 200 mm	0.002 mm / 200 mm
头架主轴锥孔中心线与尾架顶尖套筒锥孔中心线 对工作台导轨距离的相差值	垂直方向	0.005 mm / 1 000 mm	0.001 mm / 1 000 mm
		0.007 mm / 2 000 mm	0.002 mm / 2 000 mm
		0.010 mm / 4 000 mm	0.002 mm / 4 000 mm
	水平方向	0.005 mm / 1 000 mm	0.003 mm / 1 000 mm
		0.007 mm / 2 000 mm	0.003 mm / 2 000 mm
		0.010 mm / 4 000 mm	0.003 mm / 4 000 mm
工作台移动时, 绕移动轴线的摆动		2" / 300 mm	0.6" / 300 mm
		3" / 1 000 mm	1.4" / 1 000 mm
		4" / 2 000 mm	2.2" / 2 000 mm
		5" / 4 000 mm	3.2" / 4 000 mm
工作台在水平面、垂直面内移动的直线度	垂直方向	2" / 300 mm	0.61" / 300 mm
		3" / 1 000 mm	0.97" / 1 000 mm
		4" / 2 000 mm	1.07" / 2 000 mm
		5" / 4 000 mm	1.07" / 4 000 mm
	水平方向	2" / 300 mm	0.82" / 300 mm
		3" / 1 000 mm	1.77" / 1 000 mm
		4" / 2 000 mm	1.93" / 2 000 mm
		5" / 4 000 mm	2.54" / 4 000 mm

车水平扭摆角度。

合成阿贝误差 δ_3 为

$$\delta_3=\sqrt{\delta_1^2+\delta_2^2} \tag{4}$$

由于测量光轴与被测丝杠的中心轴线在同一个水平面内,拖车在垂直面内的偏摆不会产生阿贝误差。一般地,丝杠直径 $\leq 300\text{ mm}$ 、导程 $\leq 40\text{ mm}$,按 $L=150\text{ mm}$, $P_h=40\text{ mm}$ 计算 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 ,结果见表4。表4表明:最大限度地减小阿贝距离、控制拖车扭摆角的设计方案是合理的。

表4 拖车扭摆带来的阿贝误差

Tab.4 Abbe error caused by trailer torsion

丝杠长度/mm	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$\delta_1/\mu\text{m}$	$\delta_2/\mu\text{m}$	$\delta_3/\mu\text{m}$
300	0.60	0.61	0.02	0.44	0.44
1 000	1.40	0.97	0.04	0.70	0.70
2 000	2.20	1.07	0.06	0.78	0.78
4 000	3.20	1.07	0.10	0.78	0.79

合成阿贝误差 δ_3 与P1级滚珠丝杠副在下列有效行程内的平均行程偏差 e_p 及行程的变动量 V_p 的允许值对比如表5所示, δ_3 占 e_p 或 V_p 的比例小于1/10,其影响可以忽略(这里暂不分析其他误差因素)。

表5 P1级丝杠的允许偏差与 δ_3 对比

Tab.5 Comparison of allowable deviation of P1-grade screw with δ_3

丝杠长度/mm	$\delta_3/\mu\text{m}$	$e_p/\mu\text{m}$	$V_p/\mu\text{m}$
300	0.44	6	6
1 000	0.70	11	9
2 000	0.78	18	13
4 000	0.79	32	21

3.2 行程示值误差

如图20所示,标准激光干涉仪测量线设置在顶尖连线位置,丝杠测量仪的激光测量线设在近

轴端和远轴端。2套系统同时清零，采样间隔为100 mm，拖车在全长4 m的范围内移动，在各点读取并记录丝杠测量仪和标准激光干涉仪示值，将测量仪上显示的拖车位移量与标准激光干涉仪的示值比较，获得拖车轴向移动示值误差，如表6所示。

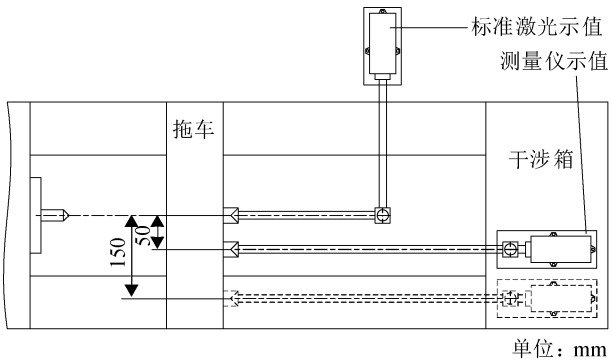


Fig.20 Schematic diagram of travel indication error

表6 行程示值误差

测量仪光束位置	最大示值误差 / μm
到测量仪顶尖连线距离 50 mm 处	0.5
到测量仪顶尖连线距离 150 mm 处	1.3

由于标准激光干涉仪测量线设置在顶尖连线位置，符合阿贝原则，丝杠测量仪的激光测量线偏离轴线，其数值包含测量系统读数误差和拖车扭摆带来的阿贝误差^[14-15]。重型丝杠的直径为100~300 mm，测量时测量仪光轴分别在距丝杠中心线50 mm和150 mm附近。表6表明：在4 m行程内，最大示值误差分别为0.5 μm 和1.3 μm ，该误差可忽略不计。

3.3 综合测量的重复性

被测丝杠副样件型号 GQ100 × 24-P5 / 3028 × 2705(直径100 mm，长度3 028 mm)安装在仪器上，在全长上进行动态测量。第1次安装后，进行2次重复测量；丝杠转位90°，重新安装，再进行2次重复测量。对4次测量结果中相应考核长度的值(2 π 弧度内行程变动量 $V_{2\pi a}$ 、任意300 mm轴向行程内行程变动量 V_{300a} 、有效行程 L_u 内行程变动量 V_{ua} 、有效行程 L_u 内的平均行程偏差 e_{sa} 或 e_{sa})进行比较，

取其最大值与最小值之差，如表7所示。对应该规格的滚珠丝杠副各考核量在不同精度等级下的允许偏差见表8。

表7、表8表明：虽然被检丝杠副各项指标低于P3级精度，但每次测量的最大值与最小值之差不超过P1级丝杠副相应考核值允许偏差的1/3，因此，该重型丝杠副行程测量仪的测量精度优于P1级。

表7 丝杠副 GQ100 × 24-P5 / 3028 × 2705
综合测量结果

Tab.7 Comprehensive measurement results of screw pair GQ100 × 24-P5 / 3028 × 2705

单位: μm					
测量位置	测量序号	$V_{2\pi a}$	V_{300a}	V_{ua}	e_{sa} 或 e_{sa}
初始位置	第1次测量	6.64	12.02	12.81	-31.44
	第2次测量	7.59	11.55	13.13	-36.20
旋转90°位置	第3次测量	7.44	12.50	14.24	-31.87
	第4次测量	7.59	11.23	13.13	-32.89
最大值与最小值之差		0.95	1.27	1.43	4.76
允差(按P1级标准)		1.30	2.00	5.00	7.30

表8 丝杠副 GQ100 × 24-P5 / 3028 × 2705 允许偏差
Tab.8 Allowable deviation of screw pair GQ100 × 24-P5 / 3028 × 2705

单位: μm				
精度等级	$V_{2\pi a}$	V_{300a}	V_{ua}	e_{sa} 或 e_{sa}
1级	4	6	15	22
2级	5	8	21	30
3级	6	12	29	41
4级	7	16	41	57
5级	8	23	59	78

4 结论

采用创新的结构设计方案，成功研制了一台重型丝杠副行程测量仪，并确保了测量仪的高精度和稳定性。该测量仪的主要特点为：①床身采用整体花岗石材料，结合双向气浮导轨，显著减少了摩擦，提高了测量的精度和重复性；②头架和尾架设计采用高精度的顶尖和轴承，确保了被

测丝杠的定位精度和支撑刚度；尾架的气浮卸载结构提高了移动的便利性和精度；③柔性固定支承结构降低了找正丝杠的要求，缩短了安装时间，提高了检测效率，保障仪器的头架尾架同轴精度符合要求；④测量拖车采用中心对称的龙门结构，多组气浮轴承的布局减小了阿贝误差，确保了测量的高精度和稳定性；⑤拖动控制系统选用高性能的三相异步减速电机，确保了传动的平稳性和测量的精度；刹车制动装置实现了无级调速和过载保护。该重型丝杠副行程测量仪的测量精度满足P1级丝杠测量要求，填补了国内重型丝杠副检测领域的空白。目前，用户方使用情况良好。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 滚珠丝杠副 第3部分: 验收条件和验收检验: GB/T 17587.3-2017[S]. 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Ball screw pairs - part 3: acceptance conditions and inspection: GB/T 17587.3-2017 [S]. 2017. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 大型滚珠丝杠副: JB/T 12600-2016[S]. 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Large ball screw pair: JB/T 12600-2016 [S]. 2016. (in Chinese)
- [3] 石照耀, 张斌, 费业泰. 阿贝原则再认识[J]. 仪器仪表学报, 2012(5): 1128-1133.
SHI Z Y, ZHANG B, FEI Y T. Re-visit to the Abbe principle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012 (5): 1128-1133. (in Chinese)
- [4] 焦洁. 滚珠丝杠副综合行程误差测量技术[J]. 制造技术与机床, 1997(12): 30-32.
JIAO J. Measurement technology for comprehensive stroke error of ball screw pairs [J]. Manufacturing Technology & Machine Tools, 1997 (12): 30-32. (in Chinese)
- [5] 宋现春, 于复生, 艾兴, 等. 滚珠丝杠激光动态检查仪的微机化改造[J]. 工具技术, 2003(3): 46-47.
SONG X C, YU F S, AI X, et al. Microcomputer based transformation of ball screw laser dynamic inspection instrument [J]. Tool Technology, 2003 (3): 46-47. (in Chinese)
- [6] 焦洁. 14.5 m精密花岗石导轨加工工艺的研究[J]. 制造技术与机床, 2013(6): 107-110.
JIAO J. Technical study of 14.5 m ultra precision granite guide [J]. Manufacturing Technology & Machine Tools, 2013(6): 107-110. (in Chinese)
- [7] 焦洁, 梅景登, 刘若华, 等. 滚珠丝杠副动态预紧转矩的测量技术[J]. 制造技术与机床, 1998(11): 35-36.
JIAO J, MEI J D, LIU R H, et al. Measurement technology for dynamic pre tightening torque of ball screw pair [J]. Manufacturing Technology & Machine Tools, 1998 (11): 35-36. (in Chinese)
- [8] 焦圣松. 微型滚珠丝杠副动态预紧转矩测量仪研制[J]. 世界制造技术与装备市场, 2021(3): 86-90.
JIAO S S. Development of a dynamic pre tightening torque measuring instrument for micro ball screw pairs [J]. World Manufacturing Technology and Equipment Market, 2021(3): 86-90. (in Chinese)
- [9] 肖正义, 焦洁. 高速滚珠丝杠副的研发和测试技术[J]. 制造技术与机床, 2004(4): 95-98.
XIAO Z Y, JIAO J. Development and test of high speed ball screw units [J]. Manufacturing Technology & Machine Tools, 2004(4): 95-98. (in Chinese)
- [10] 宋现春, 张强, 孙溪, 等. 基于FPGA的滚珠丝杠螺旋线误差动态检测系统[J]. 山东建筑大学学报, 2008(1): 27-30.
SONG X C, ZHANG Q, SUN X, et al. Research on dynamic detecting system of ball screw helical line error based on FPGA [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2008(1): 27-30. (in Chinese)
- [11] 杨雪, 陶卫军, 韩军, 等. 模拟工况下滚珠丝杠副精度检测方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(1): 78-80, 85.
YANG X, TAO W J, HAN J, et al. Study on precision detection method of ball screws under the simulated condition [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(1): 78-80, 85. (in Chinese)
- [12] 焦洁, 肖正义. 12 m激光滚珠丝杠(副)动态行程测量仪的研制[J]. 制造技术与机床, 2013(5): 72-77.
JIAO J, XIAO Z Y. Development of laser dynamic travel

- testers for 12 m ball screws[J]. Manufacturing Technology & Machine Tools, 2013(5): 72-77. (in Chinese)
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 丝杠动态行程测量仪校准规范: JJF 1410-2013[S]. 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for screw dynamic travel measuring instrument: JJF 1410-2013[S]. 2013. (in Chinese)
- [14] 缪东晶, 李建双, 李连福, 等. 大长度激光测量中阿贝误差消除方法的研究[J]. 计量学报, 2015, 36(6): 570-574.
- MIAO D J, LI J S, LI L F, et al. Research on abbe error elimination method for large length laser measurement [J]. Acta Metrologica Sinica, 2015, 36(6): 570-574. (in Chinese)
- [15] 王亮亮, 商正君, 杨海马, 等. 基于角锥棱镜的激光干涉位移测量误差分析[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 60-66.
- WANG L L, SHANG Z J, YANG H M, et al. Error analysis of laser interferometric displacement measurement based on cube-corner prism [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(3): 60-66. (in Chinese)
- (本文编辑: 刘宇轩)
-
- 第一/通信作者: 焦圣松(1988—), 男, 工程师, 主要从事滚珠丝杠副测量技术研究及测量仪器研制工作。

