

doi: 10.7690/bgzdh.2026.06.004

# 一种轻型高精度轨道测量仪

付宇, 王林安, 任淑红, 李英豪

(中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 华阴 714200)

**摘要:** 针对火箭橇轨道平行度检测的技术需求, 提出一种轻便、高精度的轨道平行度测量仪器设计方案。采用碳纤维作为主体材料, 利用光栅位移传感、精密倾角测量和温度修正等技术, 并通过误差进行综合分析。结果表明: 在外场环境下能够获得高精度的测量结果, 相关性能指标满足火箭橇轨道检测的技术要求。

**关键词:** 火箭橇轨道; 测量仪; 光栅

**中图分类号:** TJ7; V556.3 **文献标志码:** A

## A Light High-precision Rail Measuring Instrument

Fu Yu, Wang Lin'an, Ren Shuhong, Li Yinghao

(Test and Measuring Academy, China North Industries Group Corporation Limited, Huayin 714200, China)

**Abstract:** According to the technical requirements of rocket sled track parallelism measurement, a design scheme of portable and high-precision track parallelism measurement instrument is proposed. Carbon fiber is used as the main material, and the technologies of grating displacement sensing, precision tilt angle measurement and temperature correction are used, and the errors are analyzed comprehensively. The results show that the high-precision measurement results can be obtained in the outfield environment, and the relevant performance indicators meet the technical requirements of rocket sled track detection.

**Keywords:** rocket sled track; measuring instrument; grating

### 0 引言

火箭橇轨道是一种大型、高精度的地面动态模拟试验设施, 已被广泛应用于国防装备及民用产品的高速、高加速度运行过程性能考核验证等相关前沿技术试验研究, 其钢轨安装建设采用了精密加工、无缝焊接、张拉锚固、精密直线调整等新工艺, 技术核心是百万分之一的轨道直线性相对精度<sup>[1-3]</sup>。由于该轨道精度要求高, 动态试验前需要对轨道状态进行频繁的检测和调校, 以确保轨道精度满足高速试验安全性需求。目前在火箭橇轨道直线度测量技术中, 激光跟踪仪结合 GPS 精密控制点测量的方法已逐渐成熟。笔者主要针对该轨道工程双轨平行度指标控制和检测的需求, 提出一种轻便、高精度的轨道平行度测量仪器设计方案<sup>[4-5]</sup>。

### 1 需求分析

由于火箭橇运行速度极高, 为了保证轨道工程所需的精度指标, 对钢轨的 5 个工作面均进行了精加工, 直线度和平行度调校技术要求均为亚毫米量级, 高于普通客运高铁轨道毫米量级的精度。同时, 外场环境温度差和风沙大, 工作过程还要满足工程频

繁检测、多段并行调校作业等使用需求, 仪器要求便携、易操作, 其重量、精度和可靠性等是该专用轨道测量仪设计中需要重点控制的指标; 因此, 根据轨道工程技术指标和外场检测环境的需求, 提出的轨道测量仪主要性能指标要求如表 1 所示。

表 1 轨道测量仪主要性能指标要求

项目	性能指标要求
总重量/kg	$\leq 5$
主体材料物理性能的材料密度/(g/cm <sup>3</sup> )	$\leq 2$
主体材料物理性能的热膨胀率/℃	$\leq 2 \times 10^{-6}$
主体材料物理性能的抗拉强度/MPa	$\geq 600$
轨距测量误差/mm	$\leq \pm 0.05$
双轨高差测量误差/mm	$\leq \pm 0.05$

目前, 国内外针对客运铁路轨道的检测仪器设备技术较为成熟, 主要有轨检车、轨道尺、弦线法等。由于 350 km 高铁轨道直线度和平行度指标仅为毫米量级, 使得采用的仪器设备测量误差有限, 如《标准轨距铁路轨距尺国家计量检定规程》(JJG 219-2015)中规定 0 级铁路轨距尺的轨距最大示值允许误差为 $\pm 0.25$  mm, 高程最大示值允许误差为 $\pm 0.3$  mm, 均与火箭橇轨道测量仪器的技术指标要求有较大差距, 无法满足其检测精度的需求<sup>[6-9]</sup>。

收稿日期: 2024-12-06; 修回日期: 2025-01-05

第一作者: 付宇(1982—), 女, 内蒙古人。

## 2 方案设计

### 2.1 设计思路与原则

由于轨道测量仪属于几何量测量仪器，且精度要求高，并用于外场复杂环境，其结构设计应注意：

1) 阿贝误差。是测量仪器轴线和被测量轴线不在同一直线上造成的测量误差，为长度测量仪器设计尽可能避免的一种误差来源。应尽可能将轨距测量头轴线和光栅传感器测杆轴线设计为统一轴线，避免结构上可能产生的阿贝测量误差，有利于提高轨距的测量精度<sup>[10-11]</sup>。

2) 余弦误差。是测量轴线和测量面不平行引起的测量误差，为仪器设计和加工精度控制中需要减小的一种误差来源。将轨面支撑件和倾斜传感器 3 个安装基准面平面度保持平行或同面，则尽可能减小结构上的定位误差，同时也有利于加工工艺的控制<sup>[12-14]</sup>。

3) 结构测量误差。可活动的受力测量结构件，由于机械间隙的存在，可能存在的扭矩力会造成活动件形位测量误差，也是在结构设计中需尽可能避免的。将轨距测量头的双向受力线和测量轴线保持统一，避免各作用力不同轴对活动结构件可能产生的扭矩形变而引起的结构测量误差。

4) 应考虑环境变化可能带来的测量误差的影响，如尽可能减小材料的热膨胀引起的长度形变误差等。

5) 设计时，应充分考虑加工精度工艺控制的可行性，以保证综合性能的可实现性。

### 2.2 总体结构方案

遵循上述设计原则，轨道平行度测量仪的总体结构设计主要包含仪器主体、轨距活动测头组件、固定测头、两端轨面承台、光栅位移传感器、倾斜传感器、材料温度传感器和数显箱等，如图 1 所示。

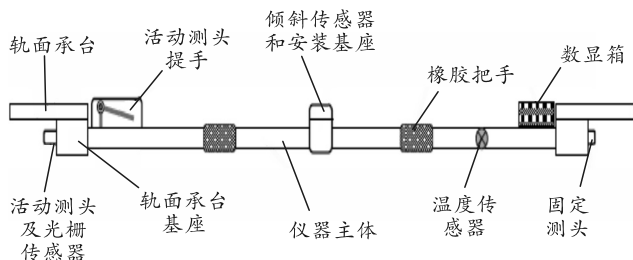


图 1 火箭橇轨道平行度测量仪结构

活动测头、固定测头与位移传感器结合，共同

完成 2 钢轨内侧面之间距离(轨距)的测量；倾斜传感器和轨面承台结合，用于完成 2 钢轨上平面高差的测量；材料温度传感器用于因环境温度变化造成的仪器热膨胀量的计算，对光栅传感器轨距测量结果进行修正，提高外场环境条件下轨道轨距参数的测量精度；提手用于将活动测杆向主体内压缩，使其容易放进轨道内侧面；电控箱用于各类传感器信号的采集、处理、显示和仪器传感器零位校准、参数设置等。

该方案中，仪器主体采用高强度管型材料，将用于轨距测量的活动测头组件、固定测头基座等布局于管型材料的内腔，依靠其刚性和精加工的内基面来保持仪器在装配和使用中轨距测量线的同轴性。将 2 个轨面承台和倾斜传感器的安装基面布局为同一平面，通过精加工，使倾斜传感器安装基准和轨道上平面保持平行。同时，将电源也置于主体管材的内腔，有利于仪器的小型化。

经过常用材料的性能比较如表 2 所示。

表 2 常用材料性能比较

材料	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	热膨胀系数/℃	抗拉强度/MPa
普通钢	7.85	12×10 <sup>-6</sup>	600
钢钢	8.10	1.6×10 <sup>-6</sup>	550
钛合金	4.45	8.6×10 <sup>-6</sup>	686~1 176
碳纤维	1.80	1.5×10 <sup>-6</sup>	1 200~7 000

由于碳纤维材料密度仅为钢材的 1/4，热膨胀系数仅为钢材的 1/8，强度可以达到钢材的 2~10 倍，具有强度高、密度低、热膨胀率小等优点，综合性能好于钢钢、钛合金和普通钢等材料；因此，仪器主体选用外径 35 mm、壁厚 3 mm 的碳纤维管材，能够保证仪器的结构强度和测量精度，也有利于减小仪器的整体重量<sup>[15-16]</sup>。其他机械结构件根据其功能，分别选择硬铝、钛合金、高强度合金钢等材料，以平衡重量和结构强度两方面的设计需求。

在加工及装配工艺控制过程中，仪器主体管材两端内腔需按照活动和固定测头基座的长度进行内表面精加工，以保证两端测头基座安装后的同轴性。轨面承台基座、倾斜传感器基座在主体管材上需要配合安装，固定后对 3 个基座的上安装基面统一进行精加工，保证 3 面的平行度和共面性。

### 2.3 主要结构组件设计

1) 活动测头组件。设计遵循 2.1 节原则 1)和 3)，其结构设计如图 2 所示。

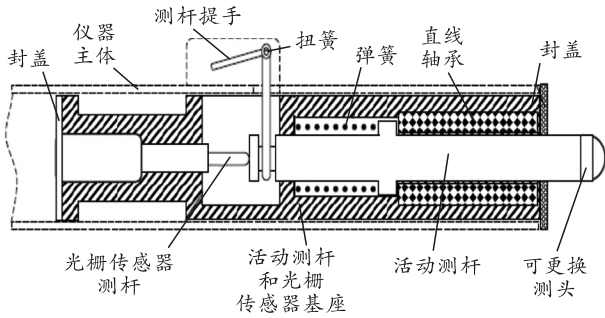


图 2 活动测头组件结构

活动测杆和光栅传感器安装在一个基座内，活动测杆随轨道轨距的变化，在直线轴承内运动。活动测杆中部有环形凸台，通过弹簧的作用其端头可以紧贴在轨道内侧面，传感器测杆则在自身弹性作用下随活动测杆运动，通过光栅传感器测量出轨道轨距相对于基准值的变化量。可更换测头通过螺纹安装在测杆端头，端面有球形和平面 2 种结构，有利于不同外形钢轨测量点的定位，使用磨损后易于更换。右侧的封盖用于将直线轴承、活动测杆、弹簧等固定在基座内，内侧采用密封件防止沙尘进入。

该设计方案是把活动测杆、测量传感器和弹簧的作用力均统一在一个直线上，很好地避免了阿贝原则和受力形位变化带来的测量误差。同时，通过基座将活动测头组件主体安装在仪器主体管材一端的内腔，不仅能保证组件的安装精度，而且对减小仪器的外形尺寸和质量也会有很好的贡献。

该组件基座材料采用殷钢，以减小温度变化对测量精度的影响；活动测杆和测头选用合金钢材料，以保证测量件的强度和硬度。直线轴承、弹簧、密封件等则选用标准件。

2) 固定测头组件。结构设计如图 3 所示。

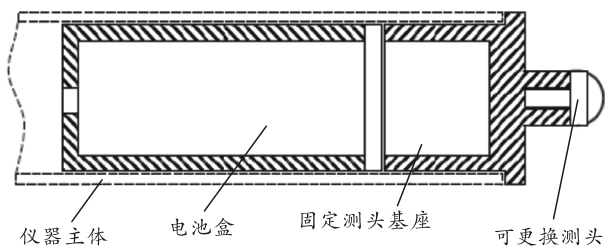


图 3 固定测头组件结构

由于没有运动件，基座安装在主体另一端管腔内，材料选用钛合金，强度高，不易变形，通过加工精度的控制能很好地进行定位，与活动测头组件的轴线同轴，保证测量精度。电源盒则安装在其内侧，减小对主体外部布局的影响。

3) 轨面承台组件。结构设计如图 4 所示，主要包含安装基座、承台、可更换承台测量件等。

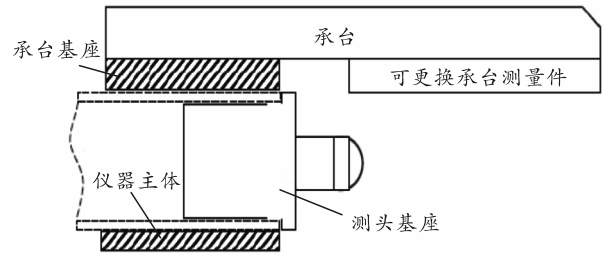


图 4 轨面承台组件结构

承台通过基座安装在仪器主体的 2 个端头，下平面安装有可更换的承台测量件，能够放置在 2 个钢轨的上平面，通过倾斜传感器可以测量计算出两端的高度差。基座材料采用硬铝，承台材料采用钛合金，以减小仪器重力可能产生的形变，轨面测量件则选用耐磨的合金钢材料。

## 2.4 电气及软件功能设计

1) 电器组成与原理。该轨道平行度测量仪的电器组成如图 5 所示。

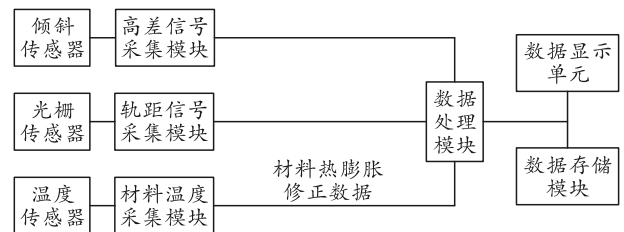


图 5 电器原理

通过对倾斜传感器内惯性器件姿态的变化进行水平倾角信号的采集与处理，利用倾角量和轨距值，能够计算出 2 钢轨上平面的高度差，用于评价轨道在竖直面的平行度。通过光栅位移传感器产生莫尔条纹的变化进行位移信号的采集与处理，得到轨距的变化量，再通过温度传感器测量仪器主体材料温度的变化，利用主材热膨胀率的计算模型，对轨距数据进行修正，得到准确的轨距测量结果，评价轨道在水平面的平行度。双轨高差、轨距、材料温度处理结果可以实时显示。

倾斜传感器零位和光栅传感器的相对参考值需要在使用前通过标准卡规进行预置和校准。同时，通过提高数据采集率，并计算多次测量结果平均值的方法，能够有效提升测量结果的精度。

2) 传感器的选型要求。

光栅传感器：测量范围不小于 12 mm，细分分辨率优于 1 μm，测量精度优于 ±5 μm；直径不大于 25 mm，重量不大于 200 g<sup>[17-20]</sup>。

倾斜传感器：测量范围不小于 ±0.5°，分辨率优于 0.3"，测量精度优于 ±3"，零位温漂小于 2"，重

量不大于 300 g。

温度传感器：选用 Pt100 铂电阻，测量范围不小于 -30~+80 ℃，分辨率优于 0.1 ℃，测量精度优于 ±1 ℃。

3) 数据处理软件流程。

数据处理软件重点完成位移传感器初始值预置、倾斜传感器零位校准、位移信号采集及修正、高差数据处理及均值计算等功能。数据处理流程如图 6 所示。

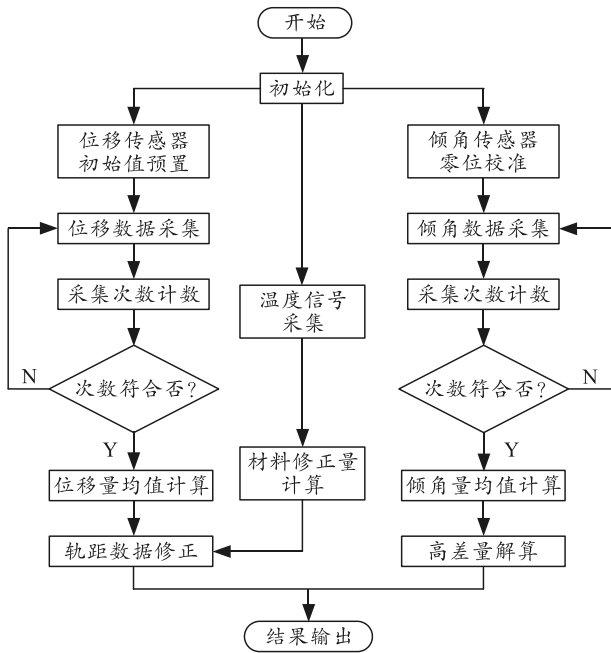


图 6 数据处理软件流程

3 综合性能分析

1) 仪器整体重量计算。

采用碳纤维主材，外径 35 mm、壁厚 3 mm、长度 1 410 mm，按照其密度 1.8 g/cm<sup>3</sup> 进行解算，估算轨道测量仪整体重量为 4.57 kg，如表 3 所示。

表 3 轨道测量仪重量估算 kg

部件	重量
碳纤维主体	0.77
位移传感器	0.20
倾角传感器	0.30
电池	0.30
其他机械结构件	2.50
其他电器	0.50
总重量	4.57

2) 轨距测量误差分析。

轨距的测量误差主要来源有：光栅传感器测量误差，其误差分量为 0.003 mm；材料温度补偿引起的误差，其误差分量为 0.004 mm (温度测量误差 1 ℃，碳纤维热膨胀系数 1.6×10<sup>-6</sup>/℃)；仪器与测量

线不平行引入的误差，其误差分量为 0.001 4 mm (测量头对正误差 2 mm，轨距基值 1 435 mm)；机械零件配合误差，其误差分量为 0.005 mm。采用“方和根”公式计算轨距测量结果的合成误差，最终误差为 ±0.007 2 mm。

3) 双轨高差测量误差分析。

主要测量误差来源有：倾斜传感器测量误差，其误差分量大小为 0.023 mm (传感器误差 3"，测量基线长度 1 530 mm)；传感器零位漂移引起的误差，其误差分量大小为 0.015 mm (传感器零位漂移 2"，测量基线长度 1 530 mm)；仪器与测量线不平行引入的误差，其误差分量大小为 0.01 mm。同样采用“方和根”公式计算双轨高差测量结果的合成误差，最终误差为 ±0.030 mm。

依据该设计方案，估算的仪器整体重量小于 5 kg，轨距和双轨高差的测量误差均小于 ±0.05 mm，设计方案和传感器选型指标满足高精度轨道平行度参数的检测需求。

4 结束语

针对某高精度轨道平行度的检测需求，充分考虑到碳纤维材料良好的机械性能、强度高、密度低和热膨胀率小等多个优点，将其作为仪器主体材料，对测量结构进行了合理设计和布局，设计中充分考虑了长度测量中的阿贝原则，在结构上有效地降低了余弦误差和受力形变影响等问题。同时，在设计中考虑了加工工艺的优化，并对测量传感器选型指标进行了较好的控制。经过综合性能分析，设计的测量仪器结构强度高、整体重量轻，各参数测量误差均优于 ±0.03 mm，满足高精度轨道现场检测的技术需求。

参考文献：

[1] 王林安, 付宇, 朱铁龙. 火箭橇时空位置测试数据处理算法分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 19-22.  
 [2] 杨兴邦. XB 高精度火箭橇试验滑轨[J]. 中国工程科学, 2000, 10(2): 98-104.  
 [3] 何越磊, 黎桂, 李再伟. 基于激光跟踪测量的火箭橇轨道精测技术分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(4): 36-40.  
 [4] 赵洪洋. 火箭橇滑轨空间线形高精度测量和调校技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(12): 180-183.  
 [5] 张子亮. 轨道平顺性检测技术的分析与对比[J]. 现代城市轨道交通, 2016(5): 61-65.  
 [6] 全国铁路专用计量器具计量技术委员会铁路专用长度

- 分技术委员会. 标准轨距铁路轨距尺国家计量检定规程: JJG 219-2015[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2015.
- [7] VAN-DEN-HURK N. 车载轨道测量系统[J]. 国外铁道机车与动车, 2015(3): 39-41, 48.
- [8] 刘海瑞. 无砟轨道测量精度影响因素及控制措施分析[J]. 设备管理及维修, 2021(24): 141-142.
- [9] 郭琦. 大风严寒天气下无砟轨道测量[J]. 居业, 2017(10): 32-33.
- [10] 钟文, 黎志坚. 浅谈几何量测试中的阿贝误差[J]. 计量技术, 2011(3): 41-42.
- [11] 王典泽. 浅析阿贝误差对激光干涉仪测量测长机示值误差时的影响[J]. 中国设备工程, 2016(13): 73-74.
- [12] 高瑞翔. 余弦误差在轮廓仪角度校准中的影响[J]. 上海计量测试, 2015(5): 21-22.
- [13] 朱盼盼. 三坐标测量时的余弦误差分析[J]. 汽车零部件  
\*\*\*\*\*
- (上接第 14 页)
- [2] 吴同晗, 陈春良, 丁革, 等. 战时维修保障人员数量确定方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(5): 33-37.
- [3] 郭齐胜, 李智国, 张迪, 等. 基于任务分析的维修力量数量预测方法[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(1): 5-9.
- [4] 韩朝帅, 王坤, 潘恩超, 等. 基于任务需求的装备维修人员配置优化[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 83-87.
- [5] 罗明洋, 刘通. 部队装备维修人员需求模型研究[J]. 装备指挥学院学报, 2013, 24(2): 44-47.
- [6] 黄韬, 薛元, 赵劲松. 陆军装备保障资源统筹管理[J]. 军事交通运输学院学报, 2019, 21(3): 33-37.
- 件, 2021(7): 104-106.
- [14] 罗志勇, 杨丽峰, 陈允昌. 精密干涉测量中余弦依赖算法的误差研究[J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1629-1633.
- [15] 崔士起, 杜涛, 车光临. 表面硬度法检测建筑钢材强度的研究[C]//第 14 届全国结构工程学术会议论文集. 2005: 326-331.
- [16] 翟甲昌, 李聚轩, 王生. 结构钢强度变异的统计分析[J]. 太原重型机械学院学报, 1992(1): 104-108.
- [17] 盖亚歌, 向世清, 万祖捷, 等. 光纤光栅传感器的应用[J]. 物理, 2004, 33(1): 58-61.
- [18] 姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420-430.
- [19] 彭军, 邓军标. 光纤光栅传感器检测技术[J]. 光通信技术, 2005, 29(6): 57-58.
- [20] 乔文, 李刚. 一种新型光纤光栅传感器解调系统[J]. 光电子·激光, 2007, 18(10): 1188-1190.
- \*\*\*\*\*
- [7] 于洪敏, 黄韬, 吕维振. 论新体制下陆军装备保障资源统筹管理[J]. 装备指挥学院学报, 2016, 27(5): 10-13.
- [8] 杨超, 邢维艳, 徐庆尧, 等. 基于案例推理的导弹装备维修保障资源需求分析[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(1): 149-152.
- [9] 王雄伟, 陈春良, 曹艳华, 等. 基于维修任务的基本维修单元确定方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(2): 25-29.
- [10] 伊洪冰, 张爱民, 宫丽. 基于最小维修单元的战时车辆装备维修力量需求测算[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(2): 29-32.