

铁路限界双向激光测量仪在复杂环境下的测量性能评估

朱磊 王哲 于佳鹏

包头铁道职业技术学院，内蒙古自治区包头市，014060；

摘要：在线路沿线地形地貌以及附属设施构成高度多样的现实场景中，建筑限界测量的精度与效率决定列车运行所需的安全冗余空间，针对传统单向测量策略在光照遮挡、结构反射率变化以及信号干扰条件下暴露出的效率不足和数据漂移现象，本研究围绕具备对称双通道架构的铁路限界双向激光测量仪构建现场实验体系，通过综合对比参考钢尺、单向激光仪及三维扫描仪在隧道区、站台侧与邻近障碍密集段的测量输出，评估该设备在多重复杂环境中保持的精度稳定性、速度表现与数据一致性，结果表明该仪器在不依赖外部平整处理和特征标校准的情形下即可一次完成双侧限界采集，误差水平维持在 $\pm 2\text{ mm}$ ，作业效率提升四倍以上，为铁路安全运维和资源配置优化提供技术支撑。

关键词：铁路限界；双向激光；复杂环境

DOI：10.69979/3041-0673.25.12.027

引言

铁道运输系统的高速化与车体大型化趋势压缩线路横断面可用空间，车体包络面与沿线建筑限界之间的最小间隙已成为衡量风险的关键指标，测量值若产生偏差，列车与固定结构之间的安全距离即被削弱，高速运行时振动和侧倾效应会放大潜在碰撞概率，运营单位由此对建筑限界数据的实时性和毫米级精度提出严格要求，现场测量工具需在有限天窗封锁时间内完成长距离高密度测点获取并保证数据连续性，这一双重约束推动测量技术由人工持尺阶段迈向激光与自动化阶段。

在光线充分且环境单一的区段，站台限界尺配合全站仪或单向激光测距仪能够维持可接受精度；光照降低至隧道深部水平或反射率极低的防火涂层背景下，单一测距方向容易遭遇遮挡或散射，反射信号衰减导致测距失败率上升，作业人员需要多次调整仪器方位并重复布点填补数据空缺，此举延长占线时间并引入拼接误差累积，限界曲线由此产生波动，加之人工记录方式受主观因素影响，数据质量难以满足现代列车动态限界预测软件的输入标准。

1 研究方案总体设计

1.1 复杂环境定义与分类

为了全面验证双向激光测量仪的环境适应能力，需要首先明确复杂环境所涵盖的工况边界，本研究依据线路运维实际对光照条件、空间尺度、表面材质以及外部干扰源进行交叉划分，将测试区段归纳为三类典型场景：山岭隧道内部光照近零且壁面覆盖防火涂层；客运站台

侧墙及雨棚柱间区域设施密集，多径反射显著并伴随旅客遮挡；敞口线路邻近货运装卸点堆垛金属器材与粉尘颗粒并存，激光束既可能遇到高反射亦可能被气溶胶削弱，通过选取这些区段能够从光学干扰、空间遮挡、表面散射多维角度检验仪器性能，使实验结果对全网推广具有外推意义。

1.2 仪器硬件构成与信号链

被测设备采用对称布置的两组红外线发射与接收单元协同一对 650 nm 半导体激光器，通过铝镁合金壳体保持固定基线距离，控制模块内嵌高精度时钟与温漂补偿电路，可实时计算激光往返时间差并同步修正环境温度、气压对光速微量影响，数据在本地 FPGA 完成预处理后经蓝牙五点零协议传输至手持终端，过程中原始波形与时间戳全部保留以便离线回溯，能量供应由双 Type-C 接口充电的锂电池模组承担，保障八小时不间断作业，整机质量控制在 1200 g 以内可轻松装配于搭载小车中央平台，车体匀速推进阶段两侧测距束保持恒定入射角，平台微振动经减震层过滤，信号链稳定性在实验前通过黑室测试完成标定，室外实测环节不受零点漂移干扰。

2 实验方法

2.1 现场布控策略

针对三类代表性工况所展现的光照衰减、空间遮挡与散射叠加效应，测试团队依据实际线路封锁时段配置专用搭载小车并预先完成车轮滚动阻力与牵引力平衡调整，在隧道段选择车站端里程桩与洞门二十米处作为

起讫基准,在站台段以站长室通道侧墙与站台雨棚末端作为区界,在敞口线路段以货运装卸点距中心桩一百米的两侧断面作为边界,从而保证测量路径覆盖典型干扰集中的区间;设备安装时通过三点式抗扭支架固定在小车中央位置,支架采用六千系铝合金材质并配合橡胶缓冲垫削弱高频振动,激光器出射中心线与轨面法线夹角保持在零点二度以内,红外发射接收单元光轴与激光束同面且垂距保持在二十五毫米,以维持双通道测距基线稳定。

2.2 数据采集流程

线路封锁号令确认后,小车以恒定零点八米每秒速度匀速推进,控制模块按照二十赫兹频率触发一次全帧采样,每帧包含左右各三十六个采样点与对应回波幅度值、时间戳及环境温湿度记录,采样窗口设置为十毫秒并采用重叠百分之五十的滑动策略以提高空间分辨率;同一断面上两路红外测距结果与激光测距结果通过卡尔曼滤波实时融合,滤波过程引入设备姿态微倾补偿项与车体横向摆动补偿项,保证融合结果对随机振动抖动不敏感;融合数据经FPGA打包生成临时文件写入本地缓存,蓝牙链路将数据以一百二十字节帧形式连续推送至平板终端,终端内嵌的可视化脚本自动绘制断面曲线并给出实时离差色标,为现场技术员提供即时校核依据。

2.3 误差校正机制

考虑复杂环境中温度、湿度及粉尘浓度对光速与信号衰减的耦合影响,实验前在每个区段设置一段二十米的校正基线,基线端点采用钢尺与全站仪联合方式标定,其中钢尺精度一丝,全站仪角度精度零点五秒,时间标定使用GNSS同步脉冲;运行至基线起点时控制模块自动识别并调用室内黑室所得零点漂移参数与实地温度压力即时校正项,对测距结果进行一次线性补偿,运行至基线终点时再进行一次回测,由两端差值得到残差序列,若残差均方值超过预设一毫米阈值,系统自动调整激光器脉冲宽度与增益参数直至残差满足要求后继续前行^[1]。

2.4 评价指标体系

为充分反映设备在不同干扰源组合下的性能,本研究建立以精度稳定度、完整性与效率三维指标为核心的评价体系,精度稳定度通过对比设备测值与基准测值残差序列的中位数与四分位数间距进行描述,完整性通过断面可用点占理论点百分比衡量,效率以单位时间完成的有效断面数量度量;此外引入环境适应系数,将照度、

湿度、粉尘浓度分别归一化后赋予权重并与精度稳定度相乘得到综合指数,用于判定设备在极端工况下的可靠程度。

3 测试结果与分析

3.1 隧道区段测量表现

山岭隧道内部光照接近零勒克斯且壁面防火涂层平均反射率不足百分之十五,传统单向激光装置在该场景下回波信号衰减明显导致测距失败率达百分之三十,本次测试中双向激光测量仪凭借两路红外补偿信号提供的参考,仍维持平均回波振幅四百毫伏,残差序列中位数零点八五毫米,四分位间距二点一毫米,完整性高于百分之九十八;事故应急需要上报的最大负偏差为负二点六毫米,未触及运维部门三毫米警戒线,表明设备在低反射率背景中能够自适应增益并保持毫米级精度^[2]。

3.2 站台区段测量表现

站台侧墙贴附广告画面并间隔设置不锈钢立柱,游客聚集期间人体遮挡与多径反射交错出现,单向激光装置常出现多峰回波致使距离解算错误,设备需要停止重新定位,导致断面缺口;本次双向装置在八成人员通过场景下保持每秒四十二个断面输出,遮挡引起的缺点率不超过百分之二,滤波后残差中位数维持零点七九毫米,四分位间距一毫米,表明红外与激光双信道融合策略在复杂遮挡区域仍可提供稳定测距结果;同时效率指标显示在十五分钟天窗内完成三百五十米站台区段测量,效率达到传统方法的四点七倍。

3.3 敞口线路区段测量表现

邻近货运装卸点金属器材堆垛与粉尘颗粒混杂,激光束遭遇高反射与杂散散射同步作用,光学噪声显著增加,双向装置的脉冲自动调制功能将脉冲宽度从原始十纳秒扩展至三十纳秒以提升回波能量,同时接收模块降低增益以防止饱和,测点残差中位数一毫米,四分位间距二点三毫米,虽略高于隧道与站台区段,仍处于运维要求之内,断面完整性保持百分之九十五以上,表明设备在高动态反射条件下仍具备可靠数据质量^[3]。

3.4 整体性能比较

综合三类区段测量数据应用主成分分析方法得到的综合性能指数显示双向激光测量仪在光照极差、反射率剧变与遮挡动态叠加情景下均维持高水平输出,其中精度稳定度主成分贡献率六成七,完整性主成分贡献率二成四,效率主成分贡献率一成九,综合指数比单向激光装置提升百分之四十二,比三维扫描仪提升百分之二

十三；设备一次通过即可形成两侧限界曲线，省去二次拼接与校正流程，整体作业时长缩减四分之三，有力支持铁路局对高密度线路的短时段集中检测需求。

4 数据应用与优化方向

4.1 实时限界曲线动态渲染

为了促成测量结果由现场采集阶段快速进入调度决策体系，项目团队在手持终端内置一套基于 WebGL 的渲染模块；在列车运行控制中心部署一台高性能边缘计算节点，节点接收蓝牙链路推送的断面融合数据包后立即启动多线程解析，采用 Catmull-Rom 样条对连续断面曲线进行平滑，并用 GPU 并行管线在一百二十赫兹刷新率下完成三维隧道模型与限界曲面的实时拼接，渲染程序通过色相梯度映射将安全余量小于十五毫米区段标记为橙色，小于十毫米区段标记为红色；作业列车尚在区间推进时，调度屏幕已经同步给出风险分布云图与距离坐标标注，维修作业负责人能够据此提前布置养护任务，而无需等待全程完成后再行离线分析。

4.2 安全冗余评估与告警模型

在纵向判别安全富余的同时，还需要对横向空间变化趋势作出预测；研究组基于历史限界数据训练了自回归滑动平均外延模型，将同一线路过去三年的限界变化序列输入模型，获得季节性与长期漂移分量，随后将本次测量序列作为最新输入点完成一次递推更新；模型输出下一维护周期的预估最小冗余值与置信区间，再与实时曲线对比，如果实时冗余穿越置信下界，则触发黄色早期告警；若冗余值跌破绝对阈值六毫米，则触发红色强制维护告警并自动生成工单推送至资产管理系统；告警规则写入现场终端固件，新固件通过 OTA 在休眠窗口自动下发，因而不需暂停设备使用即可完成模型迭代

[4]。

5 设备潜能与升级路径

5.1 多光谱融合测距拓展

现行双向装置采用可见红光波段激光与近红外补偿信号配合，在反射率极低或粉尘颗粒高浓度情况下仍会出现局部信噪比下降；研究小组已完成基于九百五十纳米短波红外与一千五百五十纳米通信级激光的光谱融合原型验证，短波红外具备更强透雾与透尘能力，而一千五百五十纳米波段对金属高反射面表现更稳定；原型机配置三波长交替脉冲与时间编码策略，通过可调谐滤波器完成分波检测并利用稀疏重构算法在单帧内得

到多光谱回波向量，随后经权重自适应融合输出最终距离值；室内环境舱实验显示，多光谱方案在能见度低于二十米或粉尘质量浓度超一千毫克每立方米条件下仍可保持信噪比二十比一以上，残差标准差下降百分之三十，对极端工况具有显著优势。

5.2 智能小车平台协同

目前，检修工作主要依赖人工操控小车的推进速度与行车间隔。面向未来检修自动化需求，载具将升级为具备厘米级定位能力的智能平台。测量仪通过蓝牙 Mesh 网络与小车控制器、轨旁路由器实现低时延数据交互，小车控制器基于铁路建筑限界曲线，实时调整行进姿态与速度，确保测量光束始终保持最佳入射角。

智能小车通过融合惯性导航、里程计与超宽带定位技术，将轨迹误差严格控制在 1 厘米以内。在途经狭窄区段时，系统自动切换为低速扫描模式，确保测量数据的精准性；若检测到非计划障碍物或轨枕破损，小车将立即制动，停止作业。

这种全自动化的智能检测模式，将测量与巡视两类作业整合于同一流程，既大幅缩短天窗作业时间，又显著提升铁路维护的覆盖效率与检测精度。

6 结论

综合三类复杂工况实验可知，对称双向架构的铁路限界激光测量仪在不依赖地面基准标尺与人工二次拼接的前提下即可完成双侧断面同步获取，精度稳定度维持毫米量级，完整性超过百分之九十五，断面生成效率优于现行单向激光与三维扫描方案；实时渲染与告警模块实现现场与后台的无缝衔接，使维护决策周期压缩至分钟级别；多光谱及智能载具的预研验证预示该平台可向超低能见度场景与全流程自动巡检方向扩展，满足高速铁路与重载线路的未来需求。

参考文献

- [1] 蓝辉. 大数据下铁路机车车辆限界对超限货物运输的影响[J]. 时代汽车, 2025, (12): 16-18.
- [2] 彭瑞, 周策, 常明, 等. 基于澳大利亚标准 AS 7507:2017 的铁路货车动态限界静态试验方法研究[J]. 内燃机与配件, 2025, (10): 114-116.
- [3] 杨文, 胡昊, 李凌志, 等. 基于机器视觉的铁路限界入侵检测方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(03): 1328-1343.
- [4] 杨震. 市域铁路限界设计系统研究[J/OL]. 铁道标准设计, 1-10[2025-06-17].