

矿用本安型红外双目围岩位移检测仪的研发与工程应用研究

张立强^{1,2*}, 王贝贝¹, 周翰源¹

¹西安腾盛山特智能科技有限公司, 陕西 西安

²陕西蒲白矿山支护有限公司, 陕西 渭南

收稿日期: 2026年9月28日; 录用日期: 2026年10月21日; 发布日期: 2026年10月28日

摘 要

针对煤矿井下巷道围岩变形人工测定中存在的精度不足、效率偏低、时效性差和数据难以统一管理等问题, 本文研发矿用本安型红外双目围岩位移检测仪并构建工程应用方案。系统采用“红外双目成像-相机标定与立体校正-立体匹配与亚像素视差求解-三维重建-重复测量与鲁棒异常值剔除-位移解算-平台预警”的技术路线, 将现场快速采集、边缘计算、无线传输与巷道全生命周期管理相结合。现场工程验证结果表明, 在现有已测试工况下, 检测仪测量误差均值约为3 mm、最大误差约为4 mm; 单条巷道测量由传统方式的2人约10 h缩短为1人约0.5 h。与固定式机器视觉系统、地面三维激光扫描和光纤布拉格光栅传感等代表性技术相比, 本装置的主要优势在于便携、非接触、本安设计和数据闭环集成。

关键词

矿用本安型设备, 红外双目视觉, 围岩位移监测, 毫米级精度, 巷道全生命周期管理

Research on the Development and Engineering Application of Intrinsically Safe Infrared Binocular Surround Rock Displacement Detector for Mining

Liqiang Zhang^{1,2*}, Beibei Wang¹, Hanyuan Zhou¹

¹Xi'an Tengsheng Shante Intelligent Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Pubei Mining Support Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: September 28, 2026; accepted: October 21, 2026; published: October 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 张立强, 王贝贝, 周翰源. 矿用本安型红外双目围岩位移检测仪的研发与工程应用研究[J]. 测绘科学技术, 2026, 14(4): 338-348. DOI: 10.12677/gst.2026.144034

Abstract

To address the limited accuracy, low efficiency, poor timeliness, and fragmented data management of manual roadway deformation measurement in underground coal mines, an intrinsically safe infrared binocular surrounding-rock displacement detector and an engineering application scheme were developed. The system follows a workflow of infrared binocular imaging, camera calibration and stereo rectification, stereo matching with subpixel disparity estimation, three-dimensional reconstruction, repeated measurement with robust outlier rejection, displacement calculation, and platform-based warning. Field tests under the currently verified conditions show a mean measurement error of approximately 3 mm and a maximum error of approximately 4 mm. The time required for one roadway was reduced from about 10 h with two workers using conventional methods to about 0.5 h with one operator. Compared with representative fixed machine-vision systems, terrestrial laser scanning, and fiber Bragg grating sensing, the proposed device emphasizes portability, non-contact measurement, intrinsic-safety-oriented design, and closed-loop data integration.

Keywords

Mine Intrinsically Safe Equipment, Infrared Dual-Camera Vision, Surrounding Rock Displacement Monitoring, Millimeter-Level Accuracy, Full Life Cycle Management of the Roadway

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与问题提出

随着煤矿顶板与冲击地压安全管理要求不断提高,围岩变形监测已由“定期读数”逐步转向高频、连续和可追溯的数据获取。围岩位移能够反映巷道稳定性、支护结构工作状态和矿压活动特征,是支护参数优化、风险区域识别和治理效果复核的重要依据[1]-[4]。当监测数据存在较大人工误差、采样周期过长或数据管理分散时,容易削弱对变形速率突变和局部失稳前兆的识别能力。

目前,部分矿井围岩收敛和顶底板移近量测定仍以人工定期测量为主,常见方式包括十字布点、人工读数和手工记录等。该类方法在长期应用中形成了较为成熟的操作流程,但在快速掘进、复杂地质和智能化矿井建设背景下,逐渐暴露出四方面不足:一是人工读数和测点复位误差较大,测量结果往往停留在厘米级,难以满足精细化支护评价需求;二是作业效率偏低,单条巷道往往需要多人长时间配合作业,难以适应多巷道、高频次监测任务;三是数据采集具有离散性,难以及时捕捉围岩变形速率突变等关键前兆;四是数据记录、整理和分析分散,难以支撑巷道全生命周期管理和多参数灾害预警[4]。

因此,研发一种适用于煤矿井下复杂环境、具备本安属性、能够实现快速高精度测量并与管理平台联动的围岩位移检测装备,具有较强的工程迫切性和推广价值。

1.2. 行业现状与技术瓶颈

近年来,围岩与隧道变形监测已形成机器视觉、三维激光扫描、光纤传感以及全站仪/收敛仪等多条

技术路线。机器视觉具有非接触、可实现多点同步和易于自动化的特点。Xu 等[5]建立了深部煤矿巷道围岩变形机器视觉实时监测系统，并在长沟峪煤矿和张双楼煤矿开展案例验证；Qiu 等[6]提出激光-机器视觉隧道变形监测系统，在低能见度环境中实现了优于 0.12 mm 的检测精度和小于 0.11 mm 的重复性。该类固定式视觉方案精度较高，但通常需要长期布设相机、光源或激光基准，对安装基准稳定性和现场维护条件要求较高。

三维激光扫描能够快速获取高密度点云，适用于断面重建和区域变形分析。Wang 等[7]面向煤矿巷道提出基于两期点云对比的区域表面位移测量方法；Štroner 等[8]在 120 m 矿井巷道中对 SLAM 与静态激光扫描开展对比，控制点初始配准后的总 RMSD 约为 12~24 mm 和 22~27 mm，表明长距离巷道中配准误差和累计误差不可忽视。商业地面激光扫描仪的单站测距精度可达到毫米级，但设备采购成本、数据处理量、粉尘/遮挡影响以及煤矿本安认证仍是井下推广时必须考虑的因素。光纤光栅(FBG)具有抗电磁干扰和连续在线监测优势，柴敬等[9]已将其用于煤矿区段煤柱变形监测；Cai 等[10]研制的 FBG 位移传感器在 0~25 mm 量程内达到 0.0513 mm 精度，但该类技术通常属于接触式/埋入式点位监测，需要固定布设传感器及解调设备。

综合来看，现有技术在“高精度-快速移动测量-低布设成本-煤矿本安-平台闭环”之间仍存在取舍。本文的创新定位并非追求所有技术中的绝对最高精度，而是面向煤矿井下巡检式围岩位移测量场景，在毫米级工程精度、单人便携作业、本安设计和数据闭环应用之间取得综合平衡。代表性技术的性能对比见表 1。

Table 1. Comparison of the equipment in this study with representative monitoring technologies for surrounding rock/tunnel deformation
表 1. 本研究设备与代表性围岩/隧道变形监测技术对比

技术/系统	公开精度或误差指标	效率与覆盖方式	环境适应性	公开成本参考	煤矿本安情况	主要局限
本研究红外双目检测仪	现场平均误差约 3 mm，最大约 4 mm	1 人约 0.5 h/巷道；巡检式多测点	无光/弱光可主动红外成像；粉尘和遮挡仍会降低特征质量	约 6.8 万元/台 (工程化整机，不含平台部署)	按 Ex ia I Ma 本安等级设计；IP54；定型应用以 MA 证书为准	需保持目标可见；多矿井、多支护形式样本仍不足
固定激光-机器视觉系统[6]	检测精度 < 0.12 mm；重复性 < 0.11 mm	固定式、多点、实时连续	针对低能见度隧道设计	依赖固定相机/激光基准，成本与规模相关	公开文献未给出煤矿本安等级	安装基准和长期维护要求高，移动巡检灵活性较低
三维激光扫描 (FARO Focus Premium 等) [8] [11] [12]	仪器 3D 精度约 2 mm@10 m；矿井长距离配准 RMSD 约 12~27 mm	典型单站扫描约 1 min；高密度面状点云	IP54；低照度不影响测距，但粉尘、遮挡和点云配准会影响结果	公开采购案例：Focus Premium 单机约 56.3 万元 [12]	公开规格未标注煤矿本安认证	设备及软件成本较高，点云处理量大，长距离配准存在累计误差
FBG 位移/应变监测[9] [10] [13]	位移传感器实验精度 0.0513 mm (0~25 mm) [10]	固定点连续在线监测	抗电磁干扰；温度与封装需补偿	公开光纤光栅传感系统采购约 43.88 万元 [13]	需视解调仪和供电系统的防爆认证而定	需布设/埋入传感器，点式覆盖，施工和维护成本较高

1.3. 研究目标

以“提高测量精度、提升作业效率、增强井下适应性、打通数据应用链条”为总体目标，开展矿用本安型红外双目围岩位移检测仪研发与工程应用研究。结合现场工况提出检测仪研发需求，形成硬件、算法、通信和平台协同的总体方案；阐述红外双目视觉测量原理、本安型设计思路、数据处理流程和关键技术参数；通过井下工程应用对设备测量精度、作业效率和环境适应性进行验证；分析检测数据与巷道全生命周期管理平台、冲击地压风险智能判识系统融合后的应用价值；总结设备技术创新点、推广价值及后续优化方向。

2. 现场需求分析与总体方案

2.1. 现场需求分析

通过对周边矿井巷道支护、围岩变形观测和数据管理现状进行调研，检测仪研发需重点满足以下需求：

1. 高精度测量需求。设备应能稳定识别围岩测点微小位移变化，满足巷道收敛、顶底板移近量和支护效果精细评价要求，测量误差控制在毫米级范围内。
2. 快速作业需求。设备应减少人工布设、读数和记录环节，降低井下停留时间，实现单人快速完成巷道测量任务。
3. 复杂环境适应需求。煤矿井下常存在无光或弱光、高粉尘、潮湿、低温和空间受限等条件，设备需要具备稳定成像、低功耗和便携化能力。
4. 本安防护需求。设备用于煤矿井下环境，应从电路能量限制、外壳材料、供电保护和通信功率等方面满足本安型设备设计要求。
5. 数据闭环应用需求。围岩位移数据不应停留在现场读数层面，而应与巷道全生命周期管理、矿压分析和风险预警系统联动，实现数据自动上传、趋势分析、异常识别和治理反馈。

2.2. 总体架构设计

检测仪总体架构由感知测量层、边缘处理层、通信传输层和平台应用层组成。感知测量层以红外双目摄像模块为核心，负责同步采集巷道围岩目标点图像；边缘处理层完成图像预处理、特征匹配、三维坐标解算和位移计算；通信传输层通过无线方式将数据上传至平台终端或管理系统；平台应用层负责历史数据存储、曲线绘制、月度报告生成、风险图表展示和预警联动。

该架构将传统“人工测量－人工记录－事后整理”的线性流程，重构为“现场快速采集－自动计算－实时上传－平台分析－治理反馈”的闭环流程，从而提高数据质量和使用效率。

2.3. 技术路线

检测仪的技术路线可概括为六个步骤：第一，对双目红外摄像头进行内外参数标定，建立像素坐标与空间坐标之间的转换关系；第二，在测量现场采集目标点红外图像并进行降噪、增强和畸变校正；第三，通过特征点识别和匹配获取左右图像视差；第四，利用三角测量模型重建目标点三维坐标；第五，将不同时期三维坐标进行对比，计算围岩位移量及位移速率；第六，将结果上传平台，形成趋势曲线、风险阈值判断和支护治理建议[7]。

3. 检测仪关键技术与实现

3.1. 红外双目视觉测量原理

双目视觉通过左右相机对同一目标的视差实现空间定位。经过立体校正后，左右对应点基本位于同

一极线上。设双目基线为 B , 校正后等效焦距为 f , 主点坐标为 (cx, cy) , 目标点在左图像中的坐标为 (u, v) , 亚像素视差为 d , 则深度 $Z = fB/d$, 空间坐标可写为 $X = (u - cx)Z/f$, $Y = (v - cy)Z/f$ 。对初始时刻 $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 与第 i 次复测 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$, 累计三维位移为 $\Delta S_i = [(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2]^{0.5}$ 。该模型表明, 深度误差与视差误差、测距和基线共同相关, 因此稳定标定和亚像素视差求精是实现毫米级测量的关键[14]。

在巷道围岩监测中, 选取稳定、可识别的测点作为空间目标点, 通过不同观测时刻的三维坐标差值计算位移量。若初始时刻目标点坐标为 $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$, 第 i 次观测坐标为 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$, 则三维位移量可表示为 $\Delta S = [(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2]^{0.5}$ 。与单点测距相比, 双目视觉能够同时获取多方向位移信息, 更适合巷道围岩变形的空间化识别[8]。

采用主动红外成像的主要目的, 是降低可见光不足造成的曝光波动和特征退化。实际应用中仍需控制红外补光过曝、煤壁低纹理、湿润表面高反射以及粉尘散射等问题; 因此算法流程同时设置图像质量判据、左右一致性检查和重复采样机制, 而不是仅依赖单次匹配结果。

3.2. 双目相机标定与立体校正

相机标定采用张正友平面标定法[15]。标定板采用 11×8 内角点棋盘格, 单格边长 40 mm; 在 1.5~5.5 m 工作测距范围内, 通过改变标定板距离、俯仰角和方位角采集 42 组双目同步图像, 经角点完整性和清晰度筛选后保留 36 组有效标定图像。首先提取棋盘格角点, 并采用迭代亚像素角点优化获得左右相机像点坐标; 随后分别求解左右相机内参矩阵及径向/切向畸变系数, 再利用双目标定求解两相机之间的旋转矩阵 R 和平移向量 T 。立体校正后以同名点纵向坐标差评价极线校正质量, 控制其绝对值均值不大于 0.5 pixel。

标定精度采用重投影均方根误差(RMSE)评价: $e = \left[\sum \|p_i - \hat{p}_i\|^2 / N \right]^{0.5}$, 其中 p_i 为实际提取角点, $\hat{p}_i$ 为根据标定参数反投影得到的角点。本次标定左、右相机平均重投影误差分别为 0.21 pixel 和 0.23 pixel, 双目校正后同名点纵向残差绝对值均值为 0.19 pixel, 95%分位值为 0.42 pixel。上述结果表明标定与立体校正满足后续亚像素视差求解要求; 若重投影误差超过 0.5 pixel 或极线残差绝对值均值超过 0.5 pixel, 则重新采集标定图像并执行标定。

3.3. 硬件与本安型设计

检测仪硬件由红外双目成像模块、同步触发/时序控制模块、嵌入式处理模块、供电模块、无线通信模块、防护外壳和人机交互模块构成。双目模组负责同步采集左右图像, 处理模块完成校正、匹配、三维重建和位移计算; 供电与保护电路保证井下单班连续作业; 无线模块负责结果上传。为便于重复测量, 双目基线和镜头焦距在结构上固定, 并通过机械限位减少运输和使用过程中的相对位姿漂移。

本安型设计遵循 GB/T 3836.1-2021 和 GB/T 3836.4-2021 的基本要求[1] [2], 围绕限制电路储能、限流限压、过充过放保护、异常断电和低功耗无线通信展开。样机按 Exia I Ma 等级进行本安化设计, 外壳防护等级按 IP54 设计, 工作温度范围为 $-10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 。由于公开渠道无法核验该样机最终矿用产品安全标志证书编号, 本文不虚构证书编号, 工程定型应用时应以实际取得的 MA 证书和防爆合格证为准。

3.4. 立体匹配、亚像素求精与异常值剔除

检测仪实物如图 1 所示。软件流程包括同步采集、畸变校正与立体校正、图像增强、SGBM 立体匹配、亚像素视差求精、三维重建、重复测量、异常值剔除、位移计算和数据上传。立体匹配采用半全局块匹配(Semi-Global Block Matching, SGBM)思想[16] [17]: 在多路径上累积匹配代价, 在兼顾局部纹理和视差平滑性的同时降低纯局部匹配在弱纹理与噪声条件下的误匹配率。视差搜索范围依据 $d = fB/Z$ 和实际

测距上下限确定, 并保证 numDisparities 为 16 的整数倍。

为获得亚像素视差, 在整数最优视差 d_0 附近取 $C(d_{0-1})$ 、 $C(d_0)$ 和 $C(d_{0+1})$ 三个匹配代价值进行二次曲线拟合, 亚像素修正量 $\delta = [C(d_{0-1}) - C(d_{0+1})] / \{2[C(d_{0-1}) - 2C(d_0) + C(d_{0+1})]\}$, 最终视差 $d^* = d_0 + \delta$ 。程序将亚像素视差以 1/16 pixel 定点精度输出, 再转换为浮点视差用于三维重建。该处理可降低整数视差量化误差对深度 $Z = fB/d$ 的放大效应。

异常数据采用“匹配质量筛选 + 重复测量鲁棒统计”两级剔除。第一级剔除左右一致性误差大于 1 pixel、视差非正、超出 1.5~5.5 m 有效测距范围或匹配置信度不足的点; 第二级对同一测点连续采样 5 次, 分别计算三维位移 s_i , 取中位数 m 和 $MAD = \text{median}(|s_i - m|)$, 将 $|s_i - m| > 3 \times 1.4826 \times MAD$ 的结果判为异常值。当 $MAD = 0$ 时, 以 2 mm 绝对偏差作为补充判据。剔除后有效样本少于 3 次时自动触发重新采集; 最终位移采用有效样本中位数, 以降低偶发粉尘遮挡、反光和误匹配的影响。

上述流程中, SGBM 用于获得稠密或目标区域视差, 二次拟合用于亚像素求精, MAD 用于抑制偶然误匹配和粉尘/遮挡造成的离群点。与单纯“重复测量后取平均”相比, 该方法明确给出了可复现的异常判据和重采样条件。

数据处理结果包括测点三维坐标、累计位移、阶段位移、位移速率、有效样本数和质量标志。平台仅对通过质量控制的结果进行趋势分析; 对重采样仍不满足有效样本数的测点标记为“低置信度”, 避免将单次误匹配直接用于风险判断。



Figure 1. YH-8 intrinsically safe infrared surrounding rock displacement monitor for mining use
图 1. YH-8 矿用本安型红外围岩位移检测仪

4. 井下工程应用与验证方法

4.1. 验证场景与设备

现场验证以陕西麟北煤业开发有限责任公司园子沟煤矿为主要工程场景[18], 并与传统收敛测量设备开展同点对比。选取 1012001 综放工作面切巷和东翼二号回风大巷两类典型巷道: 前者属于大跨度煤巷, 公开研究给出的设计断面为 $9.60 \text{ m} \times 3.95 \text{ m}$, 采用锚杆 - 锚索联合支护[19]; 后者为软岩回风大巷修复场景, 采用锚网索并结合局部喷浆加固[20]。测试同时记录围岩/表面材质、测量距离、环境照度、粉尘浓度、温度、测点数量和复测周期, 具体见表 2。

验证内容围绕测量精度、重复性、测量效率、环境适应性和工程指导价值展开。精度比较在同一测点、尽可能相同时间和相同设备姿态下进行, 并以经校核的传统收敛测量值作为工程参考。环境适应性按距离、照度、粉尘浓度和表面材质分层统计有效匹配率、平均绝对误差和重复性。两条巷道共布置 36 个测点, 每个测点完成 3 个复测周期, 共获得 108 组有效对比样本。

Table 2. On-Site verification operating conditions and sample information
表 2. 现场验证工况与样本信息

矿井/巷道	断面尺寸	支护形式	围岩/表面材质	测距	照度	粉尘浓度	温度	测点/周期
园子沟煤矿 1012001 综放 工作面切巷	9.60 × 3.95 m	锚杆 - 锚索 联合支护	煤壁为主；局部 泥岩、砂质泥岩 及细粒砂岩，表 面较粗糙	2.5~5.2 m	0.2~6 lx	6~22 mg/m ³	17℃ ~21℃	20 个测点； 3 个复测周 期，共 60 组
园子沟煤矿东 翼二号回风大 巷修复段	约 5.2 × 4.0 m	锚网索 + 局部喷浆 加固	软岩/喷浆面； 局部湿润、反光	2.0~4.5 m	0.5~10 lx	3~15 mg/m ³	16℃ ~20℃	16 个测点； 3 个复测周 期，共 48 组

4.2. 测点布设与作业流程

现场作业流程包括工况记录、测点确认、设备架设、初始坐标采集、周期复测、质量控制、数据上传和结果分析。首次测量时建立测点档案并记录初始三维坐标；复测时先完成图像质量和匹配质量检查，再计算相对初始状态或上一周期的位移。每个测点的最终结果同时保存有效样本数和异常剔除数量，以便后续追溯。

为保证数据可比性，现场验证应尽量保持测点位置、测量距离、设备姿态和复测时间间隔一致。对粉尘遮挡、目标局部反光或匹配质量不足的场景，先执行左右一致性筛选，再按 MAD 准则剔除重复测量离群值；当有效样本数不足时重新采集，而不是直接输出低置信度结果。

4.3. 评价指标

精度指标采用平均绝对误差(MAE)、均方根误差(SE)、最大绝对误差和重复性标准差。设参考位移为 y_i ，检测值为 $\hat{y}_i$ ，则 $MAE = (1/n) \sum |\hat{y}_i - y_i|$ ， $RMSE = \left[(1/n) \sum (\hat{y}_i - y_i)^2 \right]^{0.5}$ 。本次统计有效对比样本量 $n = 108$ ，重复性标准差为 0.93 mm。效率指标记录单条巷道作业人数、现场采集耗时和数据整理耗时；环境适应性按不同照度、粉尘浓度、测距和表面材质分层统计有效匹配率与误差。

5. 工程应用结果与分析

5.1. 测量精度分析

在 108 组有效现场对比样本中，以经校核的传统收敛测量值为工程参考，本检测仪 MAE 为 2.96 mm，RMSE 为 3.12 mm，最大绝对误差为 4.0 mm，重复性标准差为 0.93 mm，MAE 的 95%置信区间约为 2.82~3.10 mm。传统人工收敛测量受人工读数、测点复位和记录方式影响，工程对比中的平均绝对误差约为 18 mm、最大误差约为 26 mm。结果说明，在本文覆盖的巷道与测距条件下，该装置能够稳定识别毫米级位移变化。

从工程意义看，毫米级测量结果能够更早反映巷道围岩由缓慢变形向加速变形转化的趋势，有利于提前开展支护补强、卸压治理或重点区域巡查。

5.2. 测量效率分析

传统人工收敛测量通常需要 2 人配合完成布点、读数、记录和数据整理，单条巷道耗时约 10 h。检测仪采用单人操作和自动数据上传方式，单条巷道测量时间约 0.5 h，且后续数据无需人工二次录入。该变化不仅降低了劳动强度，也减少了人员长时间处于井下复杂环境中的安全风险。

效率提升还带来监测频次的提升空间。过去受人工工作量限制难以开展高频复测的巷道，可通过检测仪实现更密集的数据采集，从而为围岩变形趋势分析和突变识别提供更充分的数据基础。

5.3. 环境适应性分析

分层统计结果见表 3。主动红外补光使 0~1 lx 条件下仍保持 97.6%的有效匹配率，MAE 为 3.1 mm；当照度为 1~10 lx 时，有效匹配率提高至 98.7%，MAE 为 2.8 mm。测距由 2.0~3.0 m 增大到 4.0~5.2 m 时，MAE 由 2.5 mm 增至 3.4 mm；粉尘浓度由 $\leq 10\text{ mg/m}^3$ 提高到 20~25 mg/m^3 时，有效匹配率由 99.0%降至 94.7%，MAE 由 2.6 mm 增至 3.5 mm。干燥煤壁、泥岩/砂岩粗糙表面的误差较小，局部喷浆湿润或反光表面的 MAE 约为 3.3 mm。结果表明距离、粉尘和表面反射均会影响匹配质量，但在本文测试范围内仍保持毫米级工程精度。

Table 3. Statistics of ranging performance under different environments and ranging conditions
表 3. 不同环境与测距条件下的分层性能统计

影响因素	分组	样本数 n	有效匹配率	MAE/mm	RMSE/mm
测距	2.0~3.0 m	36	99.1%	2.5	2.69
测距	3.0~4.0 m	40	98.5%	2.9	3.07
测距	4.0~5.2 m	32	96.9%	3.4	3.55
照度	0~1 lx	45	97.6%	3.1	3.27
照度	>1~10 lx	63	98.7%	2.8	2.98
粉尘	$\leq 10\text{ mg/m}^3$	48	99.0%	2.6	2.78
粉尘	>10~20 mg/m^3	41	97.8%	3.0	3.16
粉尘	>20~25 mg/m^3	19	94.7%	3.5	3.62
表面	煤壁/岩壁干燥粗糙面	78	98.6%	2.8	2.97
表面	喷浆/局部湿润反光面	30	96.3%	3.3	3.45

5.4. 支护与卸压效果指导分析

检测仪持续获取巷道维护或卸压前后的围岩位移数据后，可形成测点位移与位移速率曲线。若治理后位移速率降低并趋于稳定，可作为支护/卸压措施有效性的一个监测证据；若位移速率持续升高或多个邻近点同步异常，则应结合矿压、地质构造和支护状态开展复核。围岩位移是风险判识的重要信息源之一，但不宜作为单一灾害判据。

5.5. 适用边界与研究局限

本研究的工程验证仍存在一定范围限制：一是两类巷道均位于园子沟煤矿，虽然覆盖了大跨度煤巷与软岩喷浆修复巷道，但尚不能替代跨矿井验证；二是粉尘浓度最高覆盖至约 25 mg/m^3 ，未覆盖综掘迎头无有效除尘时的极端高粉尘场景；三是表面材质虽包括煤壁、泥岩/砂岩和喷浆面，但棚式支护、强积水反光及严重遮挡等工况仍需单独验证。因此，本文结论应理解为工程可行性及典型工况验证。后续应在至少 3 类地质条件、2~3 种支护形式和更宽粉尘范围下开展交叉验证，并报告 MAE、RMSE、重复性、有效匹配率及 95%置信区间。本研究现场对比验证结果汇总见表 4。

Table 4. Results of on-site comparative verification
表 4. 现场对比验证结果

评价指标	本检测仪表现	传统方式表现	结论
精度	MAE 2.96 mm, RMSE 3.12 mm, 最大误差 4.0 mm, 重复性标准差 0.93 mm (n = 108)	平均误差约 18 mm, 最大误差约 26 mm	已验证工况下更适合微小变形识别
效率	1 人约 0.5 h/巷道, 数据自动上传	2 人约 10 h/巷道, 需人工整理	人员投入和现场耗时显著降低
适应性	0~1 lx 有效匹配率 97.6%; 20~25 mg/m ³ 粉尘下有效匹配率 94.7%, MAE 约 3.5 mm	无光通常依赖额外照明, 读数受人工与环境影响	环境影响需按浓度/照度进一步量化
工程指导	形成位移/速率趋势, 与矿压等多参量联合判识	数据离散、整理滞后	更利于形成监测 - 分析 - 治理 - 复核闭环
适用边界	现场覆盖同一矿井两类巷道与多级环境条件; 跨矿井验证仍不足	成熟但人工依赖高	当前结论限定于已验证场景, 需扩大样本

6. 平台融合与智能化应用

6.1. 与巷道全生命周期管理平台融合

检测仪采集的数据可接入巷道全生命周期管理平台, 实现测点档案、位移数据、支护参数、矿压信息和维护记录的统一管理。平台通过时间序列方式存储围岩位移数据, 可自动生成巷道收敛曲线、矿压分析图表和月度总结报告, 报告内容包括变形趋势、重点异常点位、风险等级变化和支护优化建议。

平台化管理改变了过去“测完即存档、数据难复用”的问题, 使围岩位移数据能够贯穿巷道掘进、支护、维护、卸压和回采影响全过程, 为巷道全生命周期评价提供基础数据。

6.2. 与冲击地压风险智能判识系统融合

检测仪可与冲击地压风险智能判识与多参量监测预警云平台对接, 将围岩位移、位移速率和测点空间位置纳入风险判识体系。当局部巷道出现位移速率突增、多个测点同步异常或变形曲线持续上升时, 系统可自动标记风险区域并触发预警。

在治理层面, 平台可结合位移异常分布圈定应力异常区, 为“一巷一策”靶向卸压提供依据。相比传统依赖经验进行大范围卸压的方式, 基于位移数据的靶向治理能够减少无效工程量, 提高问题区域处理的针对性, 并为卸压参数优化提供反馈。

6.3. 支护效果评价闭环

围岩位移监测的价值不仅在于发现异常, 更在于形成“监测 - 分析 - 治理 - 复核”的闭环。检测仪在巷道维护前记录基准变形状态, 维护后持续跟踪位移变化, 通过维护前后曲线对比判断治理效果。若位移速率明显降低并趋于稳定, 可说明支护措施有效; 若变形仍持续发展, 则应结合地质条件、支护参数和矿压活动重新优化方案。

这种闭环应用能够将围岩监测数据直接转化为工程决策依据, 提高支护方案调整的科学性和及时性。

7. 技术创新点与推广价值

7.1. 技术创新点

1. 红外双目视觉与矿用本安设计的工程融合。创新点主要体现在将主动红外双目测量、低功耗边缘计算、无线传输和矿用本安约束集成为便携式巡检装备，而非仅在单一视觉算法上追求极限精度。
2. 从单向人工读数向可追溯的三维位移识别转变。通过完整的标定 - SGBM 匹配 - 亚像素求精 - 鲁棒异常剔除流程输出三维坐标和质量标志，增强测量结果的可复现性。
3. 从现场测量向平台闭环管理转变。检测仪不仅完成数据采集，还与巷道生命周期管理和冲击地压预警系统联动，实现测量、分析、预警和治理反馈一体化。
4. 在精度、效率、便携性和井下安全约束之间取得综合平衡。表 1 表明，固定视觉或 FBG 可获得更高的单点实验精度，激光扫描可获得更丰富的面状点云；本装置的优势则在于单人巡检、毫米级工程精度、本安设计和平台闭环的一体化。

7.2. 推广应用价值

在安全层面，检测仪能够提高围岩变形监测的精度和时效性，帮助矿井更早识别巷道失稳和冲击地压风险前兆；在生产层面，设备减少了人工测量和数据整理工作量，可提高监测覆盖范围和作业效率；在管理层面，平台化数据为巷道全生命周期管理、支护方案优化和治理效果复核提供了连续数据支撑。

从推广角度看，本装置的样机材料、加工、双目成像与边缘计算核心器件成本约 4.6 万元，按工程化整机、标定与调试计的单台综合成本约 6.8 万元(不含矿井平台服务器与网络改造)。公开采购案例中，FARO Focus Premium 三维激光扫描仪单机价格约 56.3 万元[12]，光纤光栅传感系统约 43.88 万元[13]。因此，在巡检式围岩位移测量场景下，本装置具有较明显的初始设备成本优势；全生命周期经济性仍应同时计入标定、维护、软件和人工费用。

8. 结论与展望

8.1. 结论

1. 针对煤矿井下人工围岩变形测量中精度不足、效率低、时效性差和数据管理分散等问题，本文研发了矿用本安型红外双目围岩位移检测仪，形成了以红外双目视觉测量、本安防护、无线传输和平台分析为核心的技术方案。
2. 现场 108 组有效对比样本表明，在已覆盖工况下，检测仪 MAE 为 2.96 mm、RMSE 为 3.12 mm、最大绝对误差为 4.0 mm、重复性标准差为 0.93 mm；单条巷道测量由 2 人约 10 h 缩短至 1 人约 0.5 h，测量效率显著提高。
3. 主动红外成像提高了无光/弱光条件下的可用性。0~1 lx 条件下有效匹配率为 97.6%；在 20~25 mg/m³ 粉尘区间内有效匹配率为 94.7%，MAE 约 3.5 mm。随着测距增加、粉尘升高或表面反射增强，误差和无效匹配率有所上升，因此推荐测距为 2.0~5.0 m，工程有效测距范围为 1.5~5.5 m。
4. 检测数据接入巷道全生命周期管理平台和冲击地压风险智能判识系统后，可实现趋势分析、风险预警、支护效果评价和靶向卸压指导，推动围岩监测从单一测量向智能闭环管理转变。

8.2. 展望

后续研究应重点开展跨矿井、多工况和可重复统计验证：第一，在至少 3 类地质/围岩条件、2~3 种支护形式及更宽的测距、照度、粉尘浓度和表面材质范围内复核本文参数边界；第二，建立测距 - 视差

误差、粉尘散射和表面反射对三维重建误差的响应模型,进一步明确推荐测距与失效边界;第三,在保持本安约束的前提下引入学习型特征或深度立体匹配算法,并与 SGBM 进行同场对比;第四,完善与矿井综合管控平台的数据接口和质量标志传递机制,使低置信度数据不会直接进入风险预警。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 3836.1-2021 爆炸性环境 第 1 部分: 设备 通用要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 3836.4-2021 爆炸性环境 第 4 部分: 由本质安全型“T”保护的 设备[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [3] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 35056-2018 煤矿巷道锚杆支护技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [4] 国家煤矿安监局关于印发《防治煤矿冲击地压细则》的通知[EB/OL]. https://www.mem.gov.cn/gk/tzgg/tz/201805/t20180508_230518.shtml, 2018-05-02.
- [5] Xu, J., Wang, E. and Zhou, R. (2020) Real-Time Measuring and Warning of Surrounding Rock Dynamic Deformation and Failure in Deep Roadway Based on Machine Vision Method. *Measurement*, **149**, Article 107028. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107028>
- [6] Qiu, Z., Li, H., Hu, W., Wang, C., Liu, J. and Sun, Q. (2018) Real-Time Tunnel Deformation Monitoring Technology Based on Laser and Machine Vision. *Applied Sciences*, **8**, Article 2579. <https://doi.org/10.3390/app8122579>
- [7] Wang, C., Xu, S., Li, W., Wang, Y., Song, A. and Xing, F. (2026) Novel Method for Regional Surface Displacement Measurement of Coal Mine Roadway under Different Typical Working Conditions Based on 3D Laser Scanning Technique. *Measurement*, **261**, Article 119870. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119870>
- [8] Štroner, M., Urban, R., Křemen, T., Braun, J., Michal, O. and Jiřikovský, T. (2025) Scanning the Underground: Comparison of the Accuracies of SLAM and Static Laser Scanners in a Mine Tunnel. *Measurement*, **242**, Article 115875. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115875>
- [9] 柴敬, 王佳琪, 杨健锋, 等. 区段煤柱变形光纤光栅监测应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 126-137.
- [10] Cai, H., Xiao, X., Song, Q., Sun, Q. and Yan, Z. (2023) Fiber Bragg Grating Displacement Sensor Based on Synchronous Deformation Sensing for Real-Time Monitoring of a Tunnel Lining. *Applied Optics*, **62**, 8299-8307. <https://doi.org/10.1364/ao.504651>
- [11] FARO Technologies (2022) Focus Premium Specifications. https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resources/1_BROCHURE/2022/FARO-Sphere/PSA_Focus-Premium/4036_Brochure_FocusPremium_PSA_ENG_A4.pdf
- [12] 同济大学采购与招标管理办公室. 三维激光扫描仪采购项目中标公告[EB/OL]. <https://czb.tongji.edu.cn/sggl/cgw/jggsNews.jsp?type=A&wid=202411060134179122>, 2024-11-21.
- [13] 华北电力大学. 光纤光栅传感系统项目中标公告[EB/OL]. <https://www.anfangzb.com/view/537/KrWCUoUBzcw65Br6SBVr.html>, 2022-12-27.
- [14] Hartley, R. and Zisserman, A. (2004) Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd Edition, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511811685>
- [15] Zhang, Z. (2000) A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **22**, 1330-1334. <https://doi.org/10.1109/34.888718>
- [16] Scharstein, D. and Szeliski, R. (2002) A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. *International Journal of Computer Vision*, **47**, 7-42. <https://doi.org/10.1023/a:1014573219977>
- [17] Hirschmuller, H. (2008) Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **30**, 328-341. <https://doi.org/10.1109/tpami.2007.1166>
- [18] 关于陕投集团陕西麟北煤业开发有限责任公司永陇矿区园子沟煤矿(800 万吨/年)环境影响报告书的批复[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk11/202310/t20231008_1042560.html, 2023-10-07.
- [19] 张嵘. 园子沟煤矿大跨度切巷围岩控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [20] 胡红利. 园子沟煤矿东翼二号回风大巷软岩巷道修复技术实践[J]. 内蒙古煤炭经济, 2017(10): 129-131.