

激光扫描与传统测量方法在隧道收敛的对比验证^{*}胡国金¹ 夏才初² 倪世昊¹ 吴 廷³ 李航天³

(1. 绍兴文理学院土木工程学院, 312099, 绍兴; 2. 宁波大学岩石力学研究所, 315211, 宁波;

3. 上海市建筑科学研究院有限公司, 200032, 上海)

摘 要 [目的]传统单点测量方法在地铁隧道监测中虽具有高精度优势,但因其耗费大量人力、物力与财力,无法实现经济效益的最大化,已难以满足现代化地铁隧道的监测需求。因此,研究一种既能满足快速测量需求又能保证测量精度的新方法显得尤为重要。[方法]以上海市轨道交通收敛监测项目为例,提出了一种对比验证的思路。通过利用人工全站仪单点测量的高精度优势,反向验证自动化三维激光扫描仪的测量精度。这一方面可以确定特定型号的激光扫描仪在特定工况条件下的具体精度,另一方面也进一步验证了三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的可行性。同时,三维激光扫描仪所获取的点云数据经过处理后,可生成隧道平铺展开图,用于分析隧道渗漏水等病害。通过双向对比验证,较好地平衡了三维激光扫描技术与传统测量技术各自的不足。虽然三维激光扫描技术能连续获取隧道点云信息,但在单点测量精度上仍不及传统测量技术。两者的结合使用能进一步提高数据的可靠性。[结果及结论]基于上海市轨道交通8号线、15号线的实验验证试验结果表明:在分辨率1/8、质量3X模式下,FARO S70 激光扫描仪精度的平均偏差为4.24%,可靠性最低为93.63%,满足地铁变形监测的要求。

关键词 地铁; 三维激光扫描; 传统测量; 收敛; 变形监测
中图分类号 U231; TP3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.019

Comparative Validation of Laser Scanning and Traditional Measurement Methods for Tunnel Convergence

HU Guojin¹, XIA Caichu², NI Shihao¹, WU Ting³, LI Hangtian³

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University of Arts and Sciences, 312099, Shaoxing, China; 2. Institute of Rock Mechanics, Ningbo University, 315211, Ningbo, China; 3. Shanghai Building Research Institute Co., Ltd., 200032, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Although traditional single-point measurement methods offer high accuracy in metro tunnel mo-

onitoring, their high labor, material, and financial costs limit economic benefit maximization, difficult to meet the monitoring needs of modern metro tunnels. Therefore, it is crucial to develop a new method that satisfies the need for rapid measurement while ensuring accuracy. [Method] Using the convergence monitoring project of Shanghai rail transit as a case study, a comparative verification method is proposed. The high-accuracy advantage of manual total station single-point measurements is used to reversely validate the measurement accuracy of automated 3D laser scanners. On one hand, the specific accuracy of a particular laser scanner model under specific conditions can be determined; on the other hand, the feasibility of 3D laser scanning technology for metro tunnel deformation monitoring is further verified. Meanwhile, the point cloud data obtained by the 3D laser scanner, after processing, can generate tunnel unfolded maps, useful for analyzing tunnel issues such as water leakage. This bidirectional comparative validation could effectively balance the limitations of 3D laser scanning technology and traditional measurement methods. Though the 3D laser scanning technology provides continuous tunnel point cloud information, its single-point measurement accuracy is still inferior to traditional methods. Combining both methods can further improve the reliability of the data. [Result & Conclusion] Validation tests based on data from Shanghai Rail Transit Line 8 and Line 15 demonstrate that under the condition of a resolution of 1/8 and a quality mode of 3X, the FARO S70 laser scanner presents the average deviation of 4.24% in accuracy, with a minimum reliability of 93.63%, meeting the requirements for metro deformation monitoring.

Key words metro; 3D laser scanning; traditional measurement; convergence; deformation monitoring

地铁投入运营后,受周边施工建设和时间推移的双重影响,地铁隧道会面临多种病害,包括但不限于收敛变形、渗漏水、转角与错台等问题。本文基于上海轨道交通某线路耀华路至成山路下行区

^{*} 浙江省交通运输厅科研计划项目(2019019)

间变形监测的实际项目,将所得数据与采用传统全站仪人工测量的收敛结果进行了对比分析。此外,还针对地铁隧道进行了专项研究^[1-6],深入分析了地铁渗漏水病害,并验证了三维激光移动扫描新技术的精度和可靠性,确认其能够满足地铁变形监测的要求^[7-10]。

1 移动扫描系统

1.1 系统组成

本文所述的三维系统属于“假三维”系统,即未集成定姿模块,而是采用“数形结合”策略获取系统姿态信息。该系统通过二维扫描断面与一维里程信息的匹配,重建隧道的“假三维”点云。具体而言,扫描系统由以下关键组件构成:扫描仪、定位系统、轨道小车及控制模块。

其中,扫描仪选用 FARO S70 型号,与特制的移动小车相结合,在隧道轨道上执行三维扫描任务。轨道小车为公司自主研发成果,具备自动推扫功能,最高行驶速度可达 6 km/h。控制模块则主要通过电脑端,利用指定的 Wi-Fi 连接,实现对扫描仪和里程仪的远程操控。

测试区间选定为上海地铁 8 号线耀华路至成山路下行方向,采用移动螺旋式扫描方式,以恒定速度 1.25 m/s 沿轨道道床推扫前行,获取原始数据。后期,通过专业的后处理软件对这些数据进行处理,生成相应的收敛图、平铺图等关键信息。图 1 为现场作业的实际场景。



图 1 隧道现场作业照片

Fig. 1 Photo of tunnel site operation

1.2 外业数据采集流程

图 2 为外业数据采集流程图。

外业数据采集流程大致可分为 3 个步骤:作业前的准备工作、现场原始数据采集、作业后的原始数据导出。

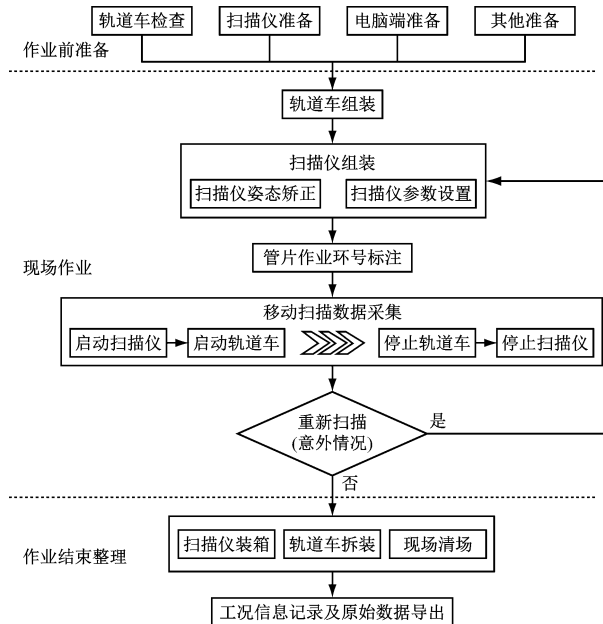


图 2 外业数据采集流程图

Fig. 2 Flow chart of field data acquisition

2 移动扫描数据处理

三维激光移动扫描系统的采集与处理软件,通过对原始数据进行环缝纠正、收敛计算、平铺图分析以及全断面、净空、转角与错台等计算,可获取相应的分析数据与图形。在生成环缝图像的过程中,软件凭借其内置优势,会自动执行降噪与滤波处理,从而最大程度地确保图像的清晰稳定,并提升收敛精度的准确性。

2.1 参数设置

对于耀华路站至成山路站下行区间,其内径设计值为 5.5 m。各相关参数设置如图 3 所示。

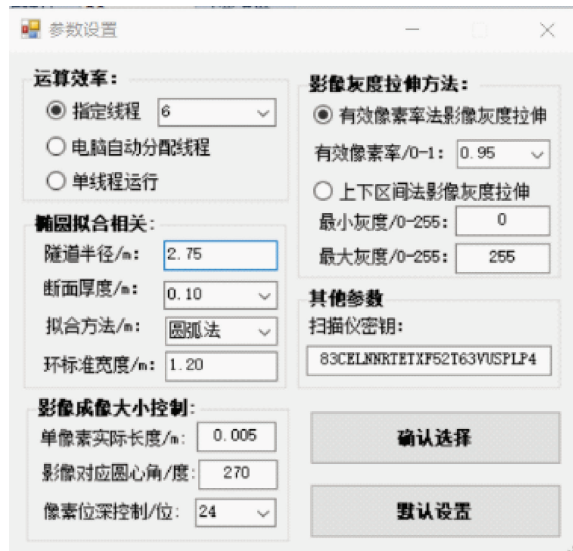


图 3 参数设置截图

Fig. 3 Screenshot of parameter setting

参数配置页面主要包含五大类设置:运算效率设置、椭圆拟合相关参数、影像成像大小控制参数、影像灰度拉伸方法选择及其他参数配置。

在运算效率方面,提供了3种方法供选择:指定线程数、电脑自动分配线程以及单线程运行。

关于椭圆拟合,存在3种主要拟合方法:圆弧法、旋转平移法以及多项式法。当管片对应的圆心角较大时,圆弧法可能会遇到无法全局收敛的问题,此时旋转平移法能够作为有效的补充。然而,圆弧模型在描述管片形状方面通常优于旋转平移模型。因此,对于圆心角较大的环片,如连接块与拼接块,圆弧法拟合效果最佳;而对于圆心角较小的管片,如封顶块,旋转平移法则更为适用。

2.2 耀华路站至成山路站下行方向第271—第300环收敛表

通过软件,计算得到2021年度耀华路站至成山路站下行方向第271—第300环收敛数据,如表1所示。这些数据采用圆弧法进行管片拟合,而耀华路站至成山路站区间的内径设计值为5.5 m。

表1 2021年度耀华路站至成山路站下行方向第271—第300环收敛表

Tab.1 2021 annual convergence from No. 271 to No. 300 rings in Yaohua Road Station to Chengshan Road Station downward direction

Station downward direction				单位:mm	
环号	隧道收敛值	环号	隧道收敛值	环号	隧道收敛值
271	5.547 5	281	5.534 6	291	5.536 8
272	5.548 9	282	5.539 4	292	5.538 5
273	5.551 3	283	5.539 7	293	5.542 0
274	5.550 2	284	5.544 5	294	5.541 5
275	5.545 8	285	5.544 1	295	5.538 0
276	5.545 1	286	5.542 8	296	5.539 2
277	5.542 2	287	5.541 8	297	5.542 4
278	5.538 6	288	5.542 6	298	5.537 8
279	5.537 9	289	5.539 6	299	5.542 5
280	5.534 4	290	5.539 3	300	5.539 6

表1中列出的收敛数据是软件计算所得的部分结果,这些数据为下文与传统测量方式的对比提供了依据。通过将这些计算所得的收敛值与传统人工全站仪所测的收敛值进行对比,可以分析三维激光扫描技术的精度。一般而言,三维激光扫描技术能够测量每环的收敛值,而传统人工全站仪则通常每隔3环或5环测量一次。通过比较今年与去年收

敛值的差值变化,可以判断该区段隧道的收敛变形情况。与人工全站仪数据的比对,可以进一步确保数据的可靠性,从而在更大程度上验证三维激光扫描技术的准确性。

2.3 平铺图分析

图4为上海地铁8号线耀华路站至成山路站下行方向第271—第300环的平铺图。

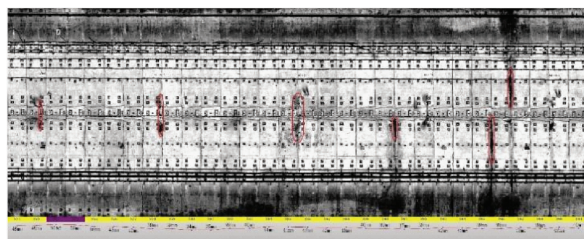


图4 上海地铁8号线耀华路站至成山路站下行第271—第300环平铺图截图

Fig.4 Screenshot of the tiled map from No. 271 to No. 300 rings in Yaohua Road Station to Chengshan Road Station downward direction of Shanghai Metro Line 8

经过环缝纠正后,系统软件生成了该平铺图。通过分析图4,可以识别出隧道渗漏水病害的具体位置,大致位于第272环、第278环、第285环、第286环、第290环、第295环及第296环处,这些位置可能存在渗漏水或漏砂等病害。

3 移动扫描与传统测量数据对比分析

3.1 FARO S70 激光扫描仪与徕卡 TCR702 差值的精度分析

设隧道环片的收敛理论值为 x ,FARO S70 扫描仪的测量值为 x_1 ,徕卡 TCR702 全站仪的测量值为 x_2 。由于 FARO S70 扫描仪的精度为1 mm,徕卡 TCR702 全站仪的精度为2 mm,则有测量误差 $|x_1 - x| \leq 1 \text{ mm}$, $|x_2 - x| \leq 2 \text{ mm}$ 。根据数学不等式关系,可推导出 FARO S70 与徕卡 TCR702 测量值之间的最大差异为3 mm,即 $|x_1 - x_2| \leq 3 \text{ mm}$ 。

3.2 第271—第300环区段数据变化量分析

对于耀华路站至成山路站下行方向第271—第300环的变化量分析,主要从以下3个方面进行:往返差变化量、本次变化量以及与人工测量值的差异变化量。其中,往返差变化量的分析旨在验证数据的准确性,进而深入分析这30环的收敛变形情况。

图5为耀华路站至成山路站下行方向第271—第300环变化量曲线图。在曲线图中,本次变化量代表今年与去年收敛值的差值;往返差变化量则是

在相同区间、使用相同设备、小车及推扫人员,在几乎相同的时间点进行的2次推扫所得结果的差值,该值在一定程度上反映了扫描仪的精度水平;与人工测量值的差异变化量则表示在几乎相同的时间段内,三维移动激光扫描仪的推扫值与人工全站仪测量的收敛值之间的差值。

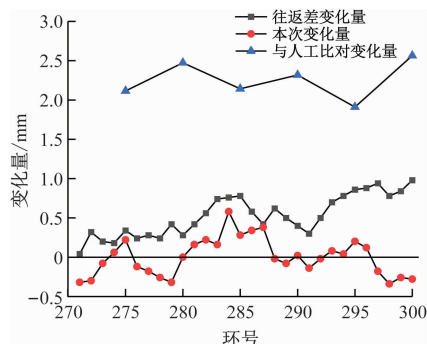


图5 耀华路站至成山路站下行方向第271—第300环变化量曲线图

Fig. 5 Variation curve diagram from No. 271 to No. 300 rings in Yaohua Road Station to Chengshan Road Station downward direction

由图5可知:往返差值保持在1 mm以内,满足要求,因此认为该数据有效;从本次变化量中可见,耀华路站至成山路站下行第271—第300环区间段

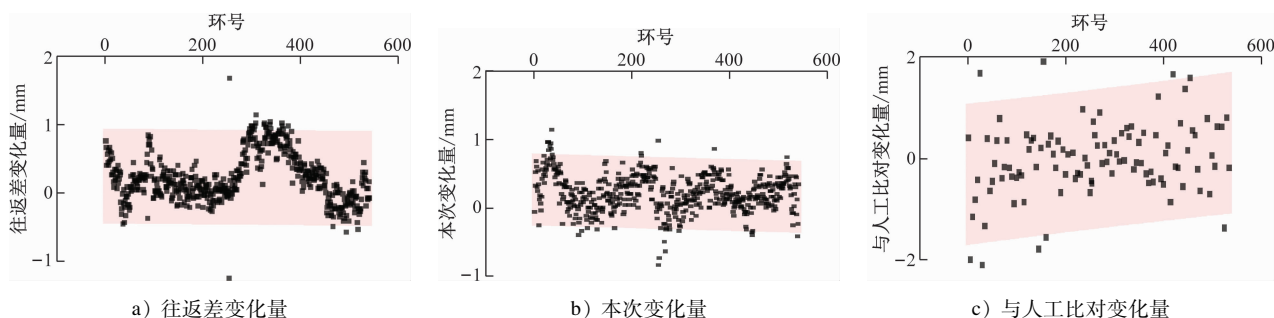


图6 耀华路站至成山路站下行第1—第543环变化量散点图

Fig. 6 Variation scatter plot from No. 1 to No. 543 rings in Yaohua Road Station to Chengshan Road Station downward direction

由图6可知:往返差变化量的整体图像中,93.17%的变形量落在 $-0.5 \sim 0.5$ mm(即1.0 mm范围内),且100%的变形量在 $-1.2 \sim 1.2$ mm以内,据此可确认该区间的推扫数据有效;本次变化量的整体图像显示,所有变形量均在 $-0.5 \sim 0.5$ mm以内,表明该区间1年内的变化量完全符合规定要求;在三维移动激光扫描与人工全站仪测量的收敛值对比中,83.78%的数据偏差在 $-1.0 \sim 1.0$ mm以内,93.69%在 $-2.0 \sim 2.0$ mm以内,除个别1~2个异常点外,所有数据偏差均在 $-3.0 \sim 3.0$

与去年的对比变化量亦在1 mm以内,符合变形要求。若与去年的对比变化量超过2 mm或出现局部峰值,则表明该区域可能存在较大变形,需立即对隧道进行抢修以确保地铁在运营时段的正常运行。常见的抢修措施包括注浆加固和加装钢环,注浆材料通常由速凝水泥、油性聚氨酯和亲水性环氧按一定比例混合而成;与人工测量值的对比曲线图显示,2种测量方法的偏差介于 $2.0 \sim 2.5$ mm之间,波动范围在0.5 mm以内。这既体现了三维激光扫描技术在隧道收敛测量中的稳定性,满足了变形监测的要求,同时也表明三维激光移动扫描测量与人工全站仪测量的误差波动在0.5 mm以内。进行往返差测试旨在验证扫描仪在该区间所采集数据的可靠性,若往返测试结果差值较大,则该区间的数据将被视为无效。

3.3 耀华路站至成山路站下行方向第1—第543环整体数据变化量分析

为了提升验算的精确度,除分析耀华路站至成山路站下行第271—第300环区段外,还进行了下行整体第1—第543环的数据变化量分析,从而进一步增强了数据的可靠性。图6为耀华路站至成山路站下行第1—第543环变化量散点图。

mm以内,低于理论值3.0 mm,满足变形监测要求。试验采用的全站仪为徕卡TCR702型(编号661149),其测角精度为2 s,测距精度为 $2 \text{ mm} + 2 \mu\text{m}$,免棱镜测距能力为100 m;扫描仪选用FARO S70,其测量精度为 $-1.0 \sim 1.0$ mm,测量范围覆盖 $0.6 \sim 70$ m,测量速率高达976 000 点/s。

4 2021年上半年上海8号线、15号线三维激光扫描与人工对比分析

结合某区间小段、该区间整体及整条线路的数

据变化量分析,可有效验证三维激光扫描技术与传统测量方法在精度上的对比,增强了结论的说服力。图7为8号线、15号线移动扫描结果与全站仪成果抽检差值曲线图。

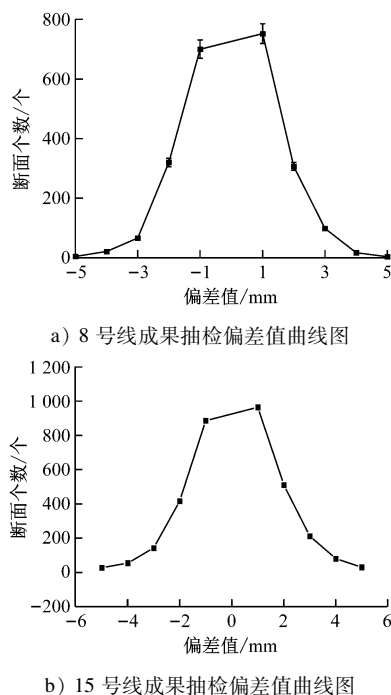


图7 8号线、15号线移动扫描结果与全站仪成果抽检差值曲线图

Fig. 7 Sampling difference curve diagram of mobile scanning results and total station results for Line 8 and Line 15

根据图7中的检测数据可知:8号线试验总断面数为2290环,其中90.74%的数据达到2mm精度,97.90%的数据达到3mm精度;15号线试验总断面数为3345环,83.05%的数据达到2mm精度,93.63%的数据达到3mm精度。

5 结语

1) 三维激光扫描方法(自动化测量方法)相较于传统全站仪测量方法展现出极高的效率,但传统测量方法并未因此被淘汰,对于特定重要项目,仍需采用传统测量方法或结合两种方法进行。

2) 平铺图分析能够及时发现隧道渗漏水病害,并精确定位病害发生的区间及具体环号,为地铁白天的安全稳定运营提供有力保障。

3) 通过对耀华路站至成山路站第271—第300环及整个区间543环的图像分析,证明了小区间段的变形监测完全符合地铁结构变形监测要求,验证了三维激光扫描技术在短区间变形监测中的精度

有效性。

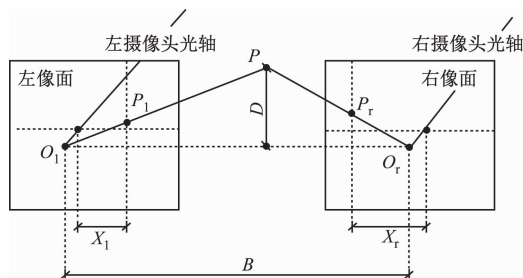
4) 8号线和15号线的测试结果分析表明,FARO S70在长区间的平均精度可靠性为95.77%,最高达到97.90%。基于这一精度可靠性,FARO S70可满足大多数地铁结构变形监测要求,特别是在长区间测量监测中展现出显著优势。

综上所述,采用三维移动激光扫描技术监测运营期及即将开通的地铁结构变形,具有实时化、自动化、高效化的特点,相较于传统测量方法,能显著节省人力、物力、财力,具有极高的应用价值。

参考文献

- [1] 葛山运. 地铁安全监测中基于三维激光扫描技术的隧道形变分析方法[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 68.
GE Shanyun. Analysis method of tunnel deformation based on 3D laser scanning technology in metro safety monitoring[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 68.
- [2] 袁辉. 基于三维激光扫描技术的地铁隧道椭圆度快速检测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 194.
YUAN Hui. Rapid detection method of subway tunnel ellipticity based on 3D laser scanning technology[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 194.
- [3] 董之南, 时培好, 高晗. 基于移动式激光扫描的点云数据处理[J]. 测绘通报, 2021(8): 97.
DONG Zhinan, SHI Peihao, GAO Han. Point cloud data processing based on helical laser scanning system[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(8): 97.
- [4] 张宇, 阳军生, 祝志恒, 等. 基于图像点云的多维度隧道初期支护大变形监测研究和应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(5): 795.
ZHANG Yu, YANG Junsheng, ZHU Zhiheng, et al. Study and application of a multi-dimensional large deformation monitoring method based on image point cloud for primary support of a tunnel[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(5): 795.
- [5] 马俊杰, 刘智龙, 李承铭, 等. 基于三维激光扫描技术的复杂岩壁基础可视化协同设计研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(21): 124.
MA Junjie, LIU Zhilong, LI Chengming, et al. Research on visual collaborative design of complex rock foundation based on 3D laser scanning technology[J]. Building Structure, 2019, 49(21): 124.
- [6] WANG T, TANG Y, YANG H, et al. Convergence deformation monitoring of a shield tunnel based on flexible long-gauge FBG sensors[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 29(19): 2827.
- [7] 方俊杰. 基于地面激光扫描仪的隧道断面提取研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(2): 212.

(下转第112页)



注: O_l —左光心点; O_r —右光心点; P —空间中的物体点; D — P 点与左右2个摄像头所在平面的距离; P_l — P 点在左摄像平面上的成像点; P_r — P 点在右摄像平面上的成像点; X_l — P_l 点与 O_l 的距离; X_r — P_r 点与 O_r 的距离; B —左右摄像头之间的距离。

图5 双目测距技术原理图

Fig. 5 Diagram of binocular ranging technology principle

3.5.3 实训中学生创新能力提升的实现

通过建立实训中心,不但可以让学生从被动式学习转为主动探索式学习,还可以为其创造独立创新空间。对实训中出现的问题和错误点,学生可以进行分析,自主总结操作要点和技巧等。这极大地提升了学生解决问题的能力,也进一步激发了学生探索实训操作优化措施的积极性,培养学生的创新意识和创新能力。

4 结语

城市轨道交通车辆开放型智慧实训中心的设计及功能的实现,得益于智能传感设备、计算机网络和AI识别技术的发展和运用。实训中心的建成,可以提升实训室智能化管理水平,促进实训设备充分应用,提高学生自主实训在时间上的灵活性。

城市轨道交通车辆开放型智慧实训中心在校之间、校企之间、学校不同专业间的共享及社会

服务等方面均具有先进性和可持续性,其建设思路可为其他机电类专业实训室建设提供参考。

参考文献

- [1] 杨培会, 官小云. 高职院校实验室管理系统设计与实现[J]. 信息与电脑(理论版), 2016, 28(2): 132.
YANG Peihui, GUAN Xiaoyun. Design and implementation of laboratory management system in higher vocational colleges[J]. China Computer & Communication, 2016, 28(2): 132.
- [2] 常中华, 林敬学, 李金领, 等. 高职开放实训室管理系统的设计与实现[J]. 中国教育信息化, 2016, 22(7): 39.
CHANG Zhonghua, LIN Jingxue, LI Jinling, et al. Design and implementation of management system for open training room in higher vocational colleges[J]. The Chinese Journal of ICT in Education, 2016, 22(7): 39.
- [3] 冯涛, 何治斌, 张永成. 语音识别在轮机模拟器中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(3): 33.
FENG Tao, HE Zhibin, ZHANG Yongcheng. Application of speech recognition on marine simulator[J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(3): 33.
- [4] 王吉利. 基于可视化技术的双目测距算法研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
WANG Jili. Research and application of binocular ranging algorithm based on visualization technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.

· 收稿日期:2024-03-25 修回日期:2024-07-14 出版日期:2025-03-10

Received:2024-03-25 Revised:2024-07-14 Published:2025-03-10

· 第一作者:郭凝,副教授,18918176599@163.com

通信作者:阎国强,副教授,13611987126@139.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第107页)

FANG Junjie. Research on extraction of tunnel section based on ground laser scanner[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(2): 212.

- [8] 保振永. 三维激光扫描在地铁隧道监测中的可视化分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(3): 183.

BAO Zhenyong. Visualization analysis of 3D laser scanning in subway tunnel monitoring[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(3): 183.

- [9] 张涵. 工程测量中地面三维激光扫描技术的应用分析[J]. 技术与市场, 2021, 28(4): 103.

ZHANG Han. Application analysis of ground three-dimensional laser scanning technology in engineering survey[J]. Technology and Market, 2021, 28(4): 103.

- [10] 严伟珪, 丁鸿志, 周全. 水下大盾构隧道受力特性分析及变

形控制值讨论:以南京五桥夹江水下盾构隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(5): 863.

YAN Weiyao, DING Hongzhi, ZHOU Quan. Stress characteristic analysis and discussion of deformation control value of underwater shield tunnel: a case study of Jiajiang underwater shield tunnel in Nanjing, China[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(5): 863.

· 收稿日期:2022-12-30 修回日期:2023-02-11 出版日期:2025-03-10

Received:2022-12-30 Revised:2023-02-11 Published:2025-03-10

· 第一作者:胡国金,3483709416@qq.com

通信作者:夏才初,教授,tjxiacch@126.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license