

基于三维激光扫描地铁运营隧道渗漏水监测及预警

吴贤国¹, 刘鹏程¹, 王雷¹, 陈虹宇², 张立茂²

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074;

2. 南洋理工大学 土木工程与环境学院, 新加坡 639798)

摘要: 结合我国运营隧道渗漏水病害的实际情况、数据调查的可操作性等,同时借鉴我国铁路隧道中渗漏水病害等级划分的经验,将运营地铁隧道渗漏水病害划分为润湿、渗润、滴水、漏水、射水五个等级。选取武汉地铁王家湾站区进行移动三维激光扫描仪器的在线监测,采用运营地铁隧道的机载可移动式渗漏水感知器设备沿隧道长度方向移动来带动三维扫描仪移动,以扫描隧道的不同区域,提高了检测效率;机载移动式安全检测设备结构简单、检测精度高、扫描范围全面,可简单、准确和快速地对运营地铁隧道渗漏水病害进行检测,并基于物联网实现病害的诊断。建立物联网三维激光扫描监测渗漏水诊断系统对运营地铁渗漏水进行病害检测,将检查得到的病害症状输入诊断系统,系统便能根据输入的运营地铁渗漏水病害情况进行推断,并输出相应的渗漏水病害养护、维修和治理措施。对武汉地铁中南路、王家湾路与香港路高风险点进行物联网三维激光扫描系统布局并重点监测,结果与实际情况相符。

关键词: 地铁运营; 渗漏水; 三维激光扫描; 监测; 诊断预警

中图分类号: U231+.94; U457+.2 文献标识码: A 文章编号: 2095-0985(2020)01-0001-07

DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2020.01.001

Monitoring and Warning of Seepage in Subway Operation Tunnel Based on 3D Laser Scanning

WU Xian-guo¹, LIU Peng-cheng¹, WANG Lei¹, CHEN Hong-yu², ZHANG Li-mao²

(1. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: Combined with the actual situation of tunnel leakage in China and the operability of data survey, drawing lessons from the experience of classification of leakage in railway tunnels, the leakage in metro tunnels is divided into five grades: wetting, seepage, dripping, leakage and water injection. This paper selects Wangjiawan station area of Wuhan Metro to carry out on-line monitoring of mobile 3D laser scanning instrument, and uses the airborne mobile leakage sensor equipment operating the metro tunnel to move along the length direction of the tunnel to drive the 3D scanner to scan different areas of the tunnel, which improves the detection efficiency. The airborne mobile safety detection equipment has the advantages of simple structure, high detection accuracy and comprehensive scanning range, which can detect the leakage disease of metro tunnels simply, accurately and quickly, and realize the diagnosis of the disease based on the internet of things. By establishing the three-dimensional laser scanning monitoring and leakage diagnosis system to detect the water leakage of subway in operation, and inputting the disease symptoms detected into the diagnostic system, the system can deduce and output the maintenance, repair and treatment measures for corresponding leakage water disease. The layout and key monitoring of the 3D laser scanning system at the high risk

收稿日期: 2018-12-11 修回日期: 2019-01-22

作者简介: 吴贤国(1964-),女,湖北武汉人,博士,教授,研究方向为工程管理与工程安全(E-mail: wxg0220@126.com)

通讯作者: 王雷(1998-),男,湖北荆州人,硕士研究生,研究方向为土木工程施工与管理(E-mail: 1063609358@qq.com)

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800208); 国家自然科学基金(51378235; 71571078; 51778262; 51308240); 武汉市建委科技项目(201414; 201619; 201334)

points of Wuhan metro Zhongnan road, Wangjiawan and Hongkong road are carried out, and the results are consistent with the actual situation.

Key words: metro operation; leakage; 3D laser scanning; monitoring; diagnosis and early warning

我国渗漏水监测技术随着科技进步不断提高,对渗漏水监测技术从传统的量测到现阶段已有的电法探测、弹性波监测、示踪法监测、光线光栅和分布式光纤等。这些方法包括了从物理到化学再到光学的相互结合和应用。在分析并总结运营地铁渗漏水表现规律的基础上,基于物联网三维激光扫描技术特点与运营地铁隧道渗漏水安全管理需要高度契合,在运营地铁内部布置监测运营地铁隧道渗漏水的物联网三维激光扫描系统具有现实意义和可行性^[1]。

三维激光扫描技术拥有多种优势,包括较快的扫描速度、非常高的测量精度等多种优势,对运营隧道进行全方位扫描检测渗漏水,从三维扫描的图像特征,不仅可以检测到漏水,还可以检测不同水量的水流量。其中渗漏水的位置可以毫米级高精度进行确定,渗漏水水量大小也可以数量化^[2]。采用三维激光扫描的物联网感知层的探测,具有实时性、自动化等优点,可以有效弥补当前运营地铁隧道渗漏水监测的不足。通过先进的技术、专业化的手段提高渗漏水监测的效率,对渗漏水病害等级进行诊断结果报警,以便根据渗漏水病害等级采取防治措施,在发生渗漏水灾害时及时地进行抢险救灾,保护人身、财产安全。

卢颖^[3]基于室外试验的基础上,研究得出三维激光扫描技术可以用于无资料旧桥的变形检测,而且如果使用合适的高精度仪器以及在合理距离进行测量时,用三维激光扫描技术进行检测也能达到传统方法的精度,同时此种方法也具有多种优点,包括方便、速度快、交互性良好、能够实现多点同时测量等优势。在国外,已经有一些公司,如德国 SPACETEC 等公司采用了三维激光扫描技术对隧道工程进行检测,对运营隧道进行全方位扫描检测,具有快速、高精度等优点,扫描结果可分析出渗漏水发生位置与面积大小。鲁伟等^[4]采用超声波检测仪对房建的渗漏情况进行检测。黄永杰等^[5]经现场试验,得出的结论是盾构隧道渗漏水自动检测系统可以精确地进行信息采集和处理,为后续安全管理提供可靠的数据支撑。杨一平等^[6]提出一种在全景图像(Convolutional Neural Network, CNN)基础上构建的隧道工程风险自动识别技术,主要利用的科学方法是卷积神经网络,此技术方法对病害识别可靠且全面。

Zou 等^[7]在调查重庆地区隧道渗漏水现状基础上,综合分析了影响隧道渗漏水的因素,确定了隧道渗漏等级标准,建立了隧道渗漏水模型指标体系。

本文研究运营地铁隧道渗漏水病害划分等级,采用运营地铁隧道的机载可移动式渗漏水感知器设备通过沿隧道的长度方向移动来带动三维扫描仪移动,对运营地铁渗漏水进行病害检测,将检查得到的病害症状输入监测及诊断预警系统,系统便能根据输入的运营地铁渗漏水病害情况进行推断,最后根据发出渗漏水病害的诊断结果进行预警,并给出渗漏水病害治理方案的优化。

1 隧道渗漏水病害等级划分

国内外依据不同的标准对运营隧道渗漏水病害等级进行不同的划分。在定义隧道渗水的危害等级时,来自日本的专家学者以丛书的形式详细介绍了不同程度的灾害情况,根据裂缝大小以及渗水级别将其概括为渗出、滴水、流出、喷出四大类;来自美国的专家学者则以文件的形式将灾害等级归纳为轻度、中度、重度三大类。在我国的铁路隧道养护工作中,所依据的对象不同,有两种划分方法,一种是按照渗漏水发生位置以及渗漏水表现形式分为点、缝、面漏与基地水害、集中涌水处;另一种分类方法是基于病害程度来进行等级划分,各个等级分别是漏水、射水、涌水、润湿、渗水、滴水。

表 1 运营地铁隧道渗漏水等级划分

渗漏水等级	渗漏水状态	三维激光扫描监测渗漏水参数取值范围/渗漏水情况描述
L1	润湿	少量润湿(表面)
L2	渗润	平均渗水量 $\leq 0.05 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,任意 100 m^2 表面的渗水量 $\leq 0.15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
L3	滴水	少量漏水,无漏泥砂以及线流;任意 100 m^2 表面的湿渍点数 ≤ 7 点,单个漏水点的漏水量值 $\leq 2.5 \text{ L}/\text{d}$,单个湿渍的表面面积 $\leq 0.3 \text{ m}^2$
L4	漏水	有漏水点,无漏泥砂;平均漏水量 $\leq 2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,任意 100 m^2 表面的漏水量值 $\leq 4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
L5	射水	存在漏泥砂以及线流;任意 100 m^2 表面的漏水量值 $\leq 4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

结合我国运营隧道渗漏水病害的实际情况、数据调查的可操作性等,同时借鉴我国铁路隧道

中渗漏水病害等级划分的经验,根据渗漏水病害严重程度将运营地铁隧道渗漏水病害划分为五个等级,渗漏水状态分别是润湿、渗润、滴水、漏水、射水。五个等级中渗漏水病害等级不断加深,其中渗漏病害对应的状态见表1。

2 基于三维激光扫描技术的物联网方案设计

将渗漏水监测指标通过三维激光扫描仪为感知层中的传感器,对物联网系统进行构建,其技术构架的实施过程如图1所示。感知层由三维激光扫描仪、智能温度传感器、GNSS(Global Navigation Satellite System)接收机及其配套设备组成。数据传输层通过DSC(Distributed Source Coding)无线数据系统软硬件进行传输数据,建立与终端手机、电脑的连接,本传输系统采用的是CMNET(China Mobile Network),其中硬件使用的是DSC无线数据系统中的通讯模块。应用层是结合武汉王家湾隧道工程实际监测情况,运营隧道渗漏水监测系统主要包含运营隧道信息中心、渗漏水监测中心、渗漏水风险管理中心和应急处理措施中心。

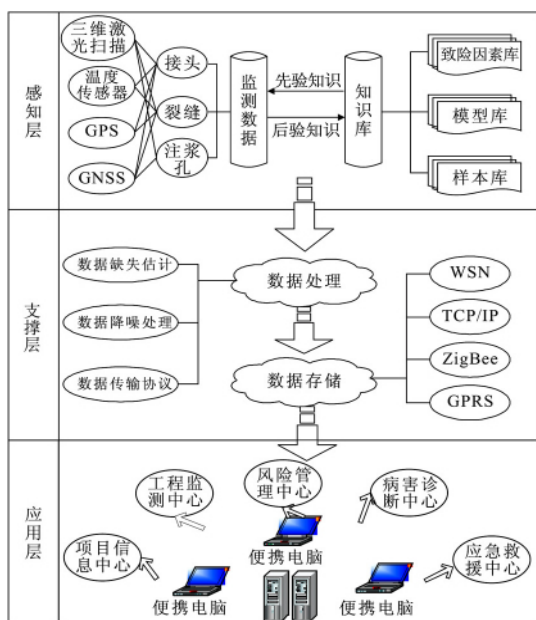


图1 运营隧道渗漏水物联网监测系统技术架构

3 三维激光扫描技术的应用

3.1 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术由于其测量的精确性和场景的高清晰性,也被叫做“高清线测量”方法,通过三维激光扫描可以快速精确获取实物表面点信息,然后对数据进行处理可以呈现出实物的模拟

景象。

在三维激光扫描仪中,徕卡三维激光扫描系统是扫描精度与速度最快的产品,本研究采用徕卡ScanStation C10三维激光扫描仪对试验监测对象扫描。此三维激光扫描系统的软硬件设施完备,含有完整的扫描仪硬件设备以及强大的Cyclone处理软件,由于此系统拥有基于CAD的一个插件,故用户可以方便地在CAD上进行信息处理。徕卡ScanStation C10三维激光扫描仪在获取点云数据的同时可拍照获取运营隧道图像,自动调整以振镜方式或转镜面方式进行三维扫描,工作效率较传统的扫描方式提高了10倍,节省了10%的人工及成本。

本研究选取武汉地铁王家湾站区进行移动三维激光扫描仪的在线监测。在布置传感器数量应满足监测项目的前提下控制成本,实现低能耗、高精度、大范围及实时性扫描。

3.2 三维激光仪器扫描步骤

本研究根据运营地铁隧道实际情况,在检测渗漏水时采用三维彩色三点数据以便辨别出渗漏水位置与其他位置(拼接缝、电缆铺设等位置)。

(1) 原始点云数据采集

扫描仪获取实物的尺寸、位置信息,形成点云数据。选择在光线较好的情况下,将标靶球安置于设计好的点位,且距离扫描仪不超过15 m。安置仪器并设置好仪器的配置文件、分辨率、质量及扫描范围等。本次扫描设置的分辨率为44 MPts,质量为1/4,扫描范围是横向360°和纵向300°。每次扫描完毕后将标靶球上盖打开,露出标靶球内的反光标靶,将全站仪安置在能通视标靶球的控制点上测量反光标靶,记录标靶的点位信息。

(2) 线划图件

利用点云数据在CAD中采用Cloudworx插件获取运营隧道的平面图、立面图和剖面图等图件,以读取隧道尺寸、形状、内部设施布置位置。

1) 点云拼接与坐标系归一化。点云拼接是通过一定的约束条件将多站点扫描数据配准到统一坐标系中的过程,拼接完成之后将得到一个项目的完整点云。具体步骤包括新建一个Registration,在Registration中添加相邻的站点数据,添加约束条件,拼接点云等,这一系列操作可以通过Registration菜单下的工具实现。

2) 点云去噪与点云合并。点云去噪通过Fence工具和Limit Box工具实现。点云合并通过Unify Clouds工具或Merge工具实现。

3) 点云切割与平立剖面图绘制。利用 Cyclone 9.1 软件的 Cutplane 切片工具分别从水平和垂直方向对点云数据进行切片处理,切片厚度根据具体情况调整,以能够直观清晰地看到构件的轮廓线为准。

(3) 建立模型

用软件系统对收集的各个点云数据信息进行模型构建处理,形成 mesh 格网模型,模型建立成功后就可以在映射的基础上将所收集到的所有施工信息建立成数字化的工程渗漏水模型。

1) 靶球坐标赋予。在软件中,新建一个项目文件,将扫描的点云数据导入该项目文件下,利用软件的选择工具选择标靶球作为球体,这样,一个球体就被创建。在创建对象中,还可以创建其它如平面、中心点等多种几何图形。创建两个球体之后,选择三维清晰视图,将看到两个带颜色的球体。

2) 点云处理及着色。对获取的点云数据进行优化处理,并选取要去除的噪声点,利用软件的删除功能快速删除选中的噪声点云数据。在扫描前,选择色彩信息,可以在侧边项目栏中应用图片,如果没有保存,系统会提示保存现在灰度数据。保存后,系统将色彩信息自动与点云信息进行匹配,使每一个点都有一个 RGB 信息,完成后导出数据。

3) 多站数据拟合。将多站数据导入与单站数据一样。在扫描时选择用标靶球做为多站的接合目标球,选择勾选“首次加载扫描”“更新对象拟合”“应用图片”“检测自然参考”“布置扫描”“创建项目点云”项后,自动处理。处理完成后,选择菜单栏中“3D”,点图标后,会出现全部扫描数据,检查完成后再将数据导出,得到工程渗漏水模型。

(4) 点云数据在互联网中发布

通过 Cyclone 软件中的发布模板与 Tru-View 软件,将点云数据放在同一空间坐标体系中可以通过电脑界面对云数据实现发布、拼接、建模、纹理贴图。

3.3 移动三维激光扫描仪在隧道中的应用

针对现有运营地铁隧道渗漏水监测技术的缺陷,本研究采用一种适用于运营地铁隧道渗漏水的机载移动式安全检测设备,利用三维激光扫描技术,实现对运营隧道渗漏水病害检测识别,具有快速、准确对运营地铁渗漏水病害等级诊断及渗漏水病害治理的功能。

运营地铁隧道渗漏水病害检测设备具有以下特点:(1) 三维激光扫描仪在移动机载上运行工作,减少仪器使用的磨损、劳动力的需求量;(2) 沿隧道方向布局三维激光扫描仪推动的自动化设备,通过电力的供给提供推动三维激光扫描仪前进;(3) 三维激光扫描检测设备包括调节机构,调节机构用于控制驱动电机的开与关及机载移动设备的移动速度;(4) 数据处理组件包括数据处理器;(5) 三维激光扫描仪与徕卡数据处理软件相连,数据处理器用于将接收到的采样数据进行筛选处理,以发现临界区域及危险点^[8]。

该运营地铁隧道的机载可移动式渗漏水感知器设备,在武汉地铁三号线王家湾运营地铁隧道的应用见图 2。其三维扫描仪设置在移动机构上,移动机构通过沿隧道的长度方向移动来带动三维扫描仪移动,以使三维扫描仪随着移动以扫描隧道的不同区域,提高了检测效率;机载移动式安全检测设备结构简单、检测精度高、扫描范围全面,简单、准确和快速对运营地铁隧道渗漏水病害进行检测,并可以物联网相连实现病害的诊断,有利于推广应用^[9]。图 3 为三号线王家湾地铁隧道中三维激光扫描全貌图。



图 2 三号线王家湾地铁隧道中三维激光扫描应用

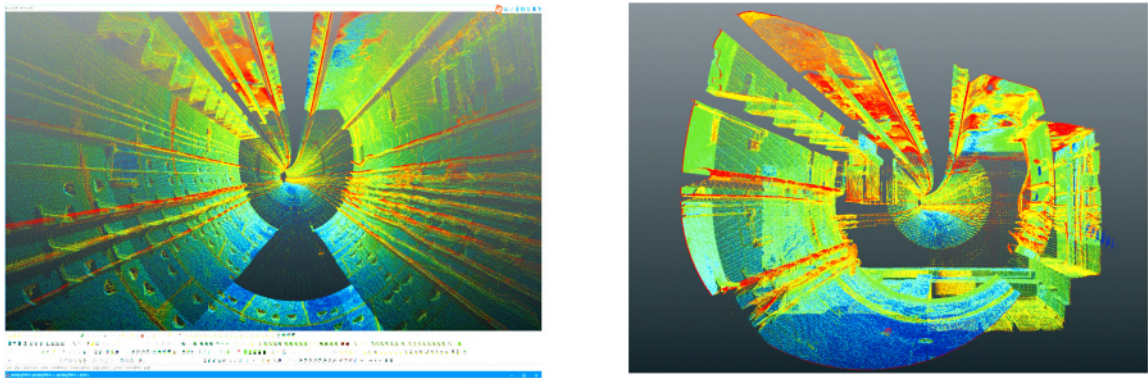


图 3 三号线王家湾地铁隧道中三维激光扫描全貌

在三维激光扫描仪呈现的图形中可以从截面呈现图中发现 ,隧道顶部局部小区域发现红色点云 ,点云图中识别出 1 个/20 m² 渗漏水点 ,其中识别出的点有一个最大面积属于滴水现象规定 ,通过分析该区域有少量漏水点。

综合判定 ,该王家湾监测区域诊断为滴水现象明显 ,在物联网系统的监测下进一步对王家湾区域进行渗漏水病害诊断。

4 基于物联网三维激光扫描技术的渗漏水监测诊断预警

本研究在渗漏水五个等级划分的基础上 ,在物联网三维激光扫描应用层中诊断输出端 ,根据渗漏水等级所造成的病害严重程度不同将物联网

三维激光扫描体系中的渗漏水预警划分为四个等级 ,如表 2 所示 ,其中润湿、渗润情况下地铁运营隧道保持正常的运营与维护即可;当监测到渗漏水呈现滴漏状 ,此时整个运营地铁隧道渗漏水监测物联网三维激光扫描体系中的诊断板块发出橙色信号 ,需要增加对此处的例行检测 ,并准备治理滴漏的方案 ,防止渗漏病害进一步扩大;如果监测出运营隧道有涌流的情况 ,则物联网三维激光扫描预警板块发出黄色预警 ,此时需要维护人员立刻制定运营管理暂停措施 ,并及时到达现场排除病害 ,防止因积水造成运营隧道的电路网出现故障;如监测时发现有射水流 ,此时预警端口发出红色预警 ,各个部门需要相互配合做好运营隧道危险的排除与人员安全疏散 ,同时要及时抢险 ,将喷射处隧道结构进行维修与防水治理。

表 2 运营地铁隧道渗漏水监测诊断预警

渗漏等级	渗漏水状态	安全状态及相关措施	预警级别
L1 级	润湿状态	无安全隐患 ,同时也不会对对行车安全造成影响 ,需常维修保养	运营正常
L2 级	渗润状态	有安全隐患 ,但威胁还不够大 ,暂时无法影响到列车行驶安全 ,需重视维修保养 ,加强安全意识	运营正常
L3 级	滴水状态	此状态较不安全 ,且极有可能威胁到列车行驶安全 ,需可靠的维修养护措施	橙色信号预警
L4 级	漏水状态	此状态较不安全 ,同时威胁到列车行驶安全 ,需在第一时间采取维修养护措施 ,改善安全状态	黄色信号预警
L5 级	射水状态	此状态极不安全 ,且在很大程度上破坏列车行驶的安全性 ,需在第一时间采取维修养护措施 ,防止出现安全事故	红色信号预警

5 物联网三维激光扫描监测渗漏水诊断和知识库系统

5.1 监测渗漏水诊断系统

进入左侧的系统菜单区域 ,选择“专家系统”选项卡 ,点击进入专家系统选项卡下的“渗漏水病害诊断”模块 ,如图 4 所示。在此模块 ,用户按照检查细则对运营地铁渗漏水进行病害检测 ,将检查得到的病害症状输入系统 ,系统便能根据输入的运营地铁渗漏水病害情况进行推断 ,并输出

相应的渗漏水病害养护、维修和治理措施。

渗漏水病害诊断主界面有上下两块区域 ,上方区域供用户输入在实际管养检查中发现的病害类型、病害位置、病害情况描述;下方区域为显示用户输入病害情况后推理得出的病害维修措施。如图 5 所示。

推理时 ,首先点击渗漏水病害诊断面板中的渗漏水病害类别组合框 ,点击后便会弹出常见渗漏水病害类别 ,在其中选择实际检查到的渗漏水病害类别;其次点击病害发生位置组合框 ,在弹出的常见渗漏水病害发生位置中选择实际检查到的



图4 专家系统模块



图5 专家系统渗漏水诊断模块页面

渗漏水病害发生位置;最后点击渗漏水病害情况描述组合框,对渗漏水病害的具体情况进行多项选择。渗漏水病害类别组合框和渗漏水病害发生位置组合框均为单选点击,渗漏水病害情况描述组合框可以进行多点击。

依次点击完三个组合框后,点击如图7所示的诊断按钮,专家系统便根据点选的渗漏水病害情况推理得出具体的渗漏水病害治理措施,并显示在渗漏水病害治理措施面板上,如图6所示。表3为监测区域诊断结果。



图6 点击渗漏水病害诊断得出推理结果

表 3 监测区域诊断结果

监测站点	渗漏水等级	诊断预警级别
中南路	润湿及渗润	正常运营
王家湾	滴水	橙色
香港路	润湿及渗润	正常运营

物联网三维激光扫描监测系统在王家湾监测点上发出橙色诊断信号,监控室内值班人员需要对王家湾地铁运营隧道调配人工巡检,在分析隧道滴水原因的基础上,根据王家湾结构资料、施工工艺等及时做出治理渗漏水备选方案的治理方案。

表 4 五种运营隧道渗漏水治理方法

治理措施	特 点
喷射法	1. 衬砌劣化治理中常见; 2. 有效治理变异隧道; 3. 应注重地基治理, 否则易致使衬砌表面风化; 4. 施工时附着不够
涂层法	1. 常用于渗水范围小、程度轻区域, 隧道衬砌表面较平整; 2. 涂层达到防水效果需一定厚度, 费用较高
防水薄膜法	1. 常在渗水面积大, 净空断面有富余时使用; 2. 主要用于拱部的漏水; 3. 预制构件施工简单、防水效果好; 4. 对防止剥落有一定的效果
防水板法	1. 常在渗水范围较大、渗水程度较小的区域使用; 2. 通常可结合防水薄膜使用; 3. 多用于矿山法施工的山岭隧道, 在喷混凝土和二次砌筑之间形成防水层, 以隔断渗漏水; 4. 作为从薄膜背后进行导水, 多与内衬等对策共同采用
注浆治理法	1. 加固地层以提高隧道承载力并充填衬砌存在的空洞使衬砌受力分布均匀; 2. 阻止衬砌结构继续变形或破坏; 3. 通过修补衬砌混凝土结构裂缝达到加固和止水的目的; 4. 对隧道运营影响较小; 5. 工程量相对较小、所需人力、时间较少

6 结 论

(1) 国内外依据不同的标准对运营隧道渗漏水病害等级进行不同的划分。结合我国运营隧道渗漏水病害的实际情况、数据调查的可操作性等, 同时借鉴我国铁路隧道中渗漏水病害等级划分的经验, 将运营地铁隧道渗漏水病害划分为五个等级, 分别为润湿、渗润、滴水、漏水、射水。

(2) 三维激光扫描技术拥有多种优势, 包括较快的扫描速度、非常高的测量精度等多种优势, 对运营隧道进行全方位扫描检测渗漏水, 从三维扫描的图像特征, 不仅可以检测到漏水, 还可以检测不同水量的水流量。其中渗漏水的位置可以毫米级高精度进行确定, 渗漏水水量大小也可以数量化。采用三维激光扫描的物联网感知层的探测, 具有实时性、自动化等优点可以有效弥补当前运营地铁隧道渗漏水监测不足之处。

(3) 建立物联网三维激光扫描监测渗漏水诊断系统, 用户按照检查细则对运营地铁渗漏水进行病害检测, 将检查得到的病害症状输入系统, 系统便能根据输入的运营地铁渗漏水病害情况进行推断, 并输出相应的渗漏水病害养护、维修和治理

5.2 隧道渗漏水治理方法知识库

对地铁隧道工程的渗漏水状况进行治理是一项复杂工作, 它需要综合考虑多方面的因素, 包括工程施工的复杂程度、维修保养成本以及工程维护的耐久性等各因素, 综合权衡考虑多方面因素才能做好渗漏水治理工作。隧道渗漏水治理方案的设计不降低原有技术标准, 应考虑原结构整体性, 按照防排堵截相结合的原则, 减少对结构的损伤、保护环境、减少施工对隧道运营的影响。

该物联网三维激光扫描监测系统根据案例中的隧道、渗漏水病害预警等级以及专家经验的库存储输出五种渗漏水治理方案, 如表 4 所示。

措施。对武汉地铁中南路、王家湾站与香港路高危险点进行物联网三维激光扫描系统布局并重点监测, 结果与实际情况相符。

参 考 文 献

[1] 梅益伟. 基于无线传感器网络的高边坡监测技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.

[2] Gargees R, Morago B, Pelapur R, et al. Incident-supporting visual cloud computing utilizing software-defined networking [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2017, 27(1): 182-197.

[3] 卢 颖. 基于三维激光扫描的桥梁检测技术应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.

[4] 鲁 伟, 梅全亭, 石宏伟, 等. 超声波检测混凝土屋面渗漏裂缝的实验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2004, (1): 43-45.

[5] 黄永杰, 柳 献, 袁 勇, 等. 盾构隧道渗漏水的自动检测技术[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(1): 73-78.

[6] 汤一平, 胡克钢, 袁公萍. 基于全景图像 CNN 的隧道病害自动识别方法[J]. 计算机科学, 2017, (11A): 207-211.

- tive structural modeling: improved method for identification of risk interactions in construction projects [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2017, 143(11): 04017084-1-14.
- [4] Bing L, Akintoye A, Edwards P J, et al. The allocation of risk in PPP/PFI construction projects in the UK [J]. International Journal of Project Management, 2005, 23: 25-35.
- [5] Bing L, Ren Z. Bayesian Technique Framework for Allocating Demand Risk Between the Public and Private Sector in PPP Projects [C]//Proceedings of 6th International Conference on Service Systems and Service Management. IEEE, 2009: 837-841.
- [6] Akintoye A, Fitzgerald E, Hardcastle C. Risk Management for Local Authorities' Private Finance Initiative Projects [M]//RICS Research Foundation. Cobra: 1999: 81-91.
- [7] Badi S, Pryke S. Assessing the impact of risk allocation on sustainable energy innovation (SEI) the case of private finance initiative (PFI) school projects [J]. International Journal of Managing Projects in Business, 2016, 9(2): 259-281.
- [8] 赵丹, 赵延超, 汪伦焰, 等. 城市地下综合管廊 PPP 项目融资风险评价研究 [J]. 城市勘测, 2018, (s1): 171-175.
- [9] 郭琦, 闫海兰, 张扬. 基于 RBF 网络的水电 BOT 项目投资风险评估 [J]. 人民长江, 2017, 48(8): 64-67.
- [10] 张军. LPS 市综合管廊项目 PPP 融资风险管理研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2017.
- [11] 向鹏成, 宋贤萍. PPP 模式下城市基础设施融资风险评价 [J]. 工程管理学报, 2016, 30(1): 60-65.
- [12] 谷昊宸. 长春市地下综合管廊 PPP 项目融资风险管理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [13] 汪婷. 地下综合管廊 PPP 项目风险分担研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [14] 亓霞, 柯永建, 王守清. 基于案例的中国 PPP 项目的主要风险因素分析 [J]. 中国软科学, 2009, (5): 107-113.
- [15] 赵佳. 城市地下综合管廊 PPP 模式融资风险管理研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
- [16] 胡丽, 张卫国, 叶晓甦. 基于 PPP 模式的城市基础设施融资风险识别研究 [J]. 甘肃社会科学, 2011, (1): 234-237.
- [17] 周雅珍, 胡金涛, 蔡云龙, 等. 基于故障树的水厂电源电气设备突发事件风险研究 [J]. 中国给水排水, 2012, 28(13): 70-74.
- [18] 耿锐, 周律. 污水处理可靠性分析中改进故障树分析方法及应用 [J]. 中国给水排水, 2011, 27(6): 16-20.
- [19] 杨太华, 郑庆华. 基于故障树方法的项目安全风险分析 [J]. 系统管理学报, 2009, 18(5): 511-515.

(上接第 7 页)

- [7] Zou Y, He C, Zhou Y, et al. Water Leakage Classification of Expressway Operation Tunnel Based on BP Neural Network [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. Paris, France: Atlantis Press, 2012: 831-834.
- [8] 张立茂, 何云, 吴贤国, 等. 一种适用于运营地铁隧道的可移动式安全检测设备: 中国, CN206741005U [P]. 2017-12-12.
- [9] Dewan A, Caselitz T, Tipaldi G D, et al. Motion-based Detection and Tracking in 3D Lidar Scans [C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016, 4508-4513.