

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220913002

文章编号: 1672-9331(2023)03-0102-16

引用格式: 于洪亮, 李东彪, 高玮, 等. 基于地质雷达与激光扫描的隧道检测现状分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(3): 102-117.

Citation: YU Hongliang, LI Dongbiao, GAO Wei, et al. Analysis of tunnel detection based on geological radar and laser scanning[J]. J. Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(3): 102-117.

基于地质雷达与激光扫描的隧道检测现状分析

于洪亮¹, 李东彪¹, 高玮², 王森², 汪义伟², 葛双双²

(1. 中交南京交通工程管理有限公司, 江苏 南京 211800; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 随着经济的快速发展, 中国隧道建设也取得了显著进步, 运营隧道的数量和规模都有了明显的增长, 因此, 运营期隧道的日常检测也逐渐成为大家所关注的问题。当前隧道病害检测方法主要分为无损检测和破损检测。破损检测影响隧道的使用寿命, 所以目前的主要检测方法为无损检测。本文通过隧道无损检测相关文献的整理和分析, 主要介绍应用比较广泛的地质雷达和比较有应用前景的三维激光扫描技术。首先, 对地质雷达的发展和在国内外隧道工程中的应用情况进行介绍, 分析地质雷达在实际工程应用中存在的问题, 并提出相应建议; 其次, 介绍三维激光扫描技术的基本原理和常用设备, 并对其在国内外一些隧道检测中的应用情况进行分析; 最后, 对两种检测技术在隧道检测过程中存在的问题进行总结, 并提出合理建议。研究发现, 采用单一技术进行隧道变形与衬砌表面情况检测, 或只分析隧道衬砌厚度及衬砌背后的不密实情况, 无法定量分析隧道在运营期的健康状况, 无法实现对隧道经济、合理的养护。因此, 多种隧道检测仪器联合使用将成为一种新的趋势, 而地质雷达和三维激光扫描技术的联合使用可以内外兼顾, 是隧道检测技术发展的一个方向。

关键词: 地质雷达; 三维激光扫描; 病害检测; 无损检测; 隧道检测

中图分类号: TU91

文献标志码: A

0 引言

截至2020年底, 我国投入使用的铁路隧道总长19 630 km, 全国公路隧道21 316处, 总长21 999.3万m^[1-2], 城市轨道交通隧道运营里程7 969.7 km^[3], 还有超过10 000 km的水工隧道以及大量的综合管廊^[4]。可见, 我国目前运营隧道规模庞大。因此, 确保隧道的运营安全至关重要, 快速检测运营隧道的病害已成为工程界关注的焦点。

目前的检测方法主要可分为以下几类: 目测法、超声波法、红外线检测法、微波湿度检测法、地质雷达法、激光扫描法等, 这些方法主要以无损检测为主。自《铁路隧道衬砌质量无损检测规程》

(TB 10223—2004)颁布后, 无损检测已成为现阶段检查运营隧道隐伏病害的一种有效手段。与以损坏隧道衬砌结构为代价的钻芯检测方式相比, 无损检测技术以无损、快速、连续和高效等优势逐步代替钻芯检测技术, 成为一种成熟的隧道质量检测技术, 并得到广泛采用^[5]。常用的隧道病害检测方法^[4, 6-13]见表1。

由表1可知, 常用的隧道无损检测方法所运用的手段主要包括波(电磁波、超声波、次声波)、能量辐射及视觉成像等。其中, 用波检测结构内部病害的效果较好, 而能量辐射和视觉成像能更直观地检测出结构表面的病害; 地质雷达具有连续、无损、高效和高精度等优点, 在隧道病害检测中应用广泛; 机器视觉在隧道表面病害和隧道整体变形检测中优势独特, 近几年从事机器视觉研究的

收稿日期: 2022-09-13; 修回日期: 2022-12-12; 接受日期: 2022-12-12

基金项目: 中交养护集团重大科技研发项目(27100020Y248)

通信作者: 高玮(1971—)(ORCID: 0000-0001-6468-805X), 男, 教授, 主要从事岩石力学理论、岩土工程稳定性分析及智能大数据技术的工程应用等方面的研究。E-mail: wgaowh@163.com

学者越来越多;三维激光扫描技术具有高效、安全、精度高、检测信息丰富的优点,是隧道病害检

测发展的一个重要方向。因此,本文重点对地质雷达及三维激光扫描技术的研究进展进行综述。

表1 常用的隧道病害检测方法

Table 1 Common tunnel disease detection methods

方法	使用设备	原理	操作方法	检测对象	优点	缺点
目测法	人眼		人工巡视	隧道外观	灵活	只能检测出明显病害,对于初期病害难以察觉,依赖检测人员的专业素质
超声波法	脉冲发生器	单侧平面法	依据裂缝分布情况,沿裂缝延伸方向布置测点	隧道初砌裂缝深度、内部缺陷	穿透能力强,检测成本低	检测裂隙深度需要知道裂隙位置,只能单点测量
红外线检测法	红外探测仪、数据处理工具	红外辐射场变化	布置测点及红外检测仪器	隧道渗漏水	设备携带方便,对水的存在比较敏感	无法定量判断水量
微波湿度检测法	湿度传感器测试探头、数据采集与分析装置	水和混凝土相对介电常数差一个量级,在微波作用下可以明显区分	布置测点及温度传感器	隧道渗漏水	定向辐射装置的制造较容易,传输性能良好	绕射能力差
地质雷达法	地质雷达	当电波通过有电性差异的物体或地层时,产生反射信号	用天线发射装置向目标体发送电波	初砌厚度、初砌与围岩及土的接触情况、隧道周边环境	检测效率高,抗干扰能力强,成本较低,且不会影响隧道工程的构造	雷达参数的选取对检测结果影响大
激光扫描法	激光扫描仪	发射激光,同时接收自然物表面反射的信号	借助一组可引导激光并以均匀角速度扫描的反射棱镜,用高速、精确的激光测距仪测距	隧道变形、表面病害	逐点测量而非单点测量	受软件处理能力的限制

1 地质雷达

地质雷达是利用高频电磁波在不同介电常数下发生反射的原理来探测目标物界面并进行定位的一种地球物理探测方法,在一百多年的发展进程中其检测精度越来越高,已成为隧道无损检测的主要方法之一^[14]。

1.1 地质雷达的基本原理

探地雷达系统^[15]主要由发射天线系统、接收天线系统、微机系统及控制单元系统4个部分组成,其系统机构如图1所示。地质雷达是检测隧道病害的重要工具。在隧道建设过程中或者建成以后,可利用地质雷达仪器对隧道衬砌结构进行无损检测,并通过定性、定量指标综合评价隧道工程

质量,发现工程病害,及时采取补救措施以消除安全隐患,为隧道施工和正常运行提供安全保障。

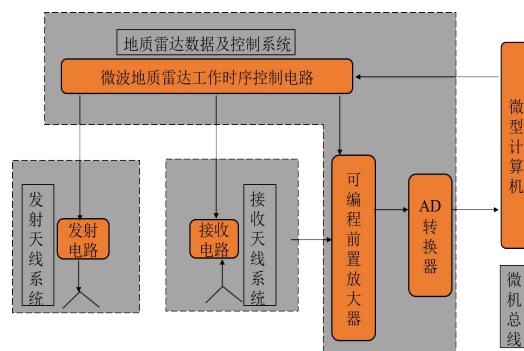


图1 探地雷达系统机构图

Fig. 1 Mechanism diagram of ground penetrating radar system

地质雷达主要是通过观测介质中电磁波的变化来实现探测目的的,其工作原理可表述为:发射

天线将高频率(106~109 Hz或者更高)电磁波以宽频带、短脉冲的形式定向送入介质内部,经存在电性差异的介质界面或目标体反射后返回地面接收天线。当高频率电磁波在介质中传播时,其传播路径、电磁能量、工作频率和雷达波形都会随着介质的电特性及几何形态的变化而变化,因此可通过对反射波的采集、分析与处理及电磁波的双

程走时来确定介质的分界面、介质内部异常体的位置与结构。存在电性差异是探地雷达技术应用的前提条件,隧道衬砌的层状结构特征及各层之间的介电常数和电导率存在明显差异,能很好地形成电磁波发射界面,这就是探地雷达技术能应用于隧道衬砌结构质量检测的重要原因^[16],其基本检测原理如图2所示。

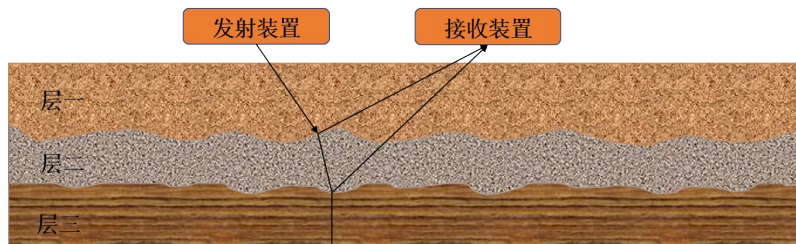


图2 地质雷达技术对隧道衬砌厚度与空洞的检测原理

Fig. 2 Detection principle of tunnel lining thickness and cavity by geological radar technology

1.2 地质雷达在隧道病害检测中的应用

目前我国相应的检测手段仍然不完善,隧道工程质量仍存在诸多问题。地质雷达作为一种技术,成熟且具有诸多优势,能及时发现隧道工程中的病害,因此,在隧道病害检测中得到了广泛应用^[17]。

目前,地质雷达在实际工程中常用于检测衬砌厚度、空洞、配筋间距、衬砌质量等。衬砌厚度和空洞检测是地质雷达检测较常见的项目,例如:康富中等^[18-19]采用地质雷达对处于高寒地区永久性冻土铁路上的风火山隧道和昆仑山隧道的衬砌厚度、衬砌背后空洞及衬砌背后回填物的密实度进行了检测,检测结果与隧道病害的实际情况基本相符;徐赞^[20]通过对山西阳泉西环高速公路檀树岩隧道和邢汾高速公路黄岩子隧道进行检测,结合工程地质情况分析初砌厚度与初砌背后的脱空情况,对不密实的隧道围岩提出了注浆方案;贾雷^[21]通过对六河高速公路上的隧道进行衬砌(初砌、二次衬砌)厚度及初砌背后的空洞进行检测,确定隧道健康等级,并给出了相应的整治措施;蔡维龙^[22]使用地质雷达对摩天岭隧道的初砌厚度及其背后的空洞进行了检测;吕荔炫^[23]对福州市金鸡山隧道的衬砌厚度及其背后的空洞进行了检测;张鹏等^[24]使用地质雷达对运营中的老旧铁路隧道的衬砌厚度和其背后岩体的密实度进行了检测,并根据检测结果提出了“先拱后墙”的隧道施工方法。

在衬砌配筋的检测方面,李柱^[25]对使用新奥

法施工的乌龙岭隧道进行了病害检测,通过地质雷达对隧道的二次衬砌厚度和配筋间距进行检测,并根据检测结果制定了该隧道的病害治理方案;陈涛^[26]在奉溪高速公路隧道病害检测中通过地质雷达对衬砌和配筋进行了检测;姚成华^[27]对隧道衬砌中存在的缺陷规律进行了归纳总结,并对配筋混凝土中的钢筋进行了检测;苏卿^[28]对重庆某公路隧道衬砌混凝土在复合侵蚀性介质下的病害进行了检测和评估。

在岩体内部情况检测方面,钟悦鹏^[29]对采用长管棚注浆法实施预支护及复合衬砌的广东省某公路隧道进行了初砌结构检测,并使用地质雷达进行了初砌内部情况的检测;董茂干等^[30]使用地质雷达对南京地铁3号线上滨江路站一五塘村站之间的地下溶洞进行了勘测;陶陆^[31]通过建立网络模型用地质雷达对隧道不同深度、不同宽度、不同内部填充物的山岭断层的特征进行了分类研究。

在隧道漏水检测方面,刘振东^[32]在济南绕城高速公路济南隧道的前期勘探中,使用地质雷达对隧道漏水区域进行了成因判断;冯国磊^[33]对山西省某铁路隧道的底板隆起进行了成因调查,根据地质情况以及雷达图像得出结论:底板下方脱空导致地下水渗入,进而使膏溶性角砾岩产生膨胀,最终导致底板隆起;许献磊等^[34]通过对地铁隧道管片脱空和渗水进行研究,使用地质雷达对厦门地铁2号线上湖滨中路站至育秀东路站之间的隧道进行了检测;邓普^[35]通过车载型空气耦合地

质雷达对襄渝线铁路隧道的渗漏水情况进行检测,解决了地面耦合天线中的反射天线和接收天线的耦合波与衬砌表面反射波难以分离的问题;刘涛^[36]使用地质雷达对西南地区某公路的隧道进行了病害检测。

国外学者在地质雷达的应用方面也有很多研究,例如:ISMAIL等^[37]使用地质雷达对运营期大坝隧道的裂缝和渗漏水情况进行了检测,并分析了检测结果;ALANI等^[38]使用地质雷达对英国肯特郡的梅德韦隧道进行了检测,并探测了浸入式接缝处隧道屋顶的结构细节;PREGO等^[39]在隧道前期施工阶段进行地质雷达探测以检测衬砌的状态,并为结构的稳定性和支撑提供依据;KILIC等^[40]使用地质雷达对大坝和水力发电站的隧道工程进行了灌浆不完整、空隙等病害的识别;

AROSIO等^[41]使用地质雷达对隧道内部侵蚀状况进行探查,为隧道的修复工作提供了重要依据。

地质雷达在部分运营隧道病害检测中的应用情况见表 2。地质雷达检测项目的占比如图 3 所示。从图 3 可以看出,虽然地质雷达在检测衬砌配筋间距、衬砌背后岩体的密实情况、渗漏水情况、路面情况等方面都有所应用,但应用最多的还是对衬砌厚度、衬砌背后岩体的密实情况的检测,其次是对衬砌背后脱空的检测。

综上所述,在隧道衬砌厚度及衬砌背后岩体密实情况的检测中,地质雷达因其良好的检测效果,已成为大多数隧道检测从业人员的首选方法。另外,检测设备以国外产品居多,国内检测设备较少;检测设备以手持型为主,移动检测设备和车辆检测设备较少。

表 2 地质雷达在部分运营隧道病害检测中的应用情况

Table 2 Application of geological radar in disease detection of some operating tunnels

检测对象	使用时间	隧道种类	检测设备	频率/MHz	检测项目
风火山隧道	2008	铁路	RIS-K2 型地质雷达	600	衬砌厚度、衬砌背后空洞、衬砌背后回填物的密实度
昆仑山隧道	2001	铁路	RIS-K2 型地质雷达	600	衬砌厚度、衬砌背后空洞、衬砌背后回填物的密实度
山西阳泉西环高速公路檀树岩隧道	2013	公路	LTD-2100 型地质雷达	900	初砌厚度
邢汾高速公路黄岩子隧道	2013	公路	LTD-2100 型地质雷达	900	衬砌脱空或背后不密实
济南隧道	2002	公路	LTD-2100 型地质雷达	500/900	隧道渗漏水
六河高速公路隧道	2013	公路	SIR-3000 型探地雷达	160	初砌、二次衬砌厚度
摩天岭隧道	1987	公路	MALA-Proex 型地质雷达	800	初衬厚度、背后空洞和密实情况
襄渝线铁路隧道	1968	铁路	铁路车载探地雷达	300	衬砌厚度及其内部缺陷情况、衬砌背后空洞及其回填状况、隧道渗漏水
福州市金鸡山隧道	2015	公路	RAMAC/GPRCU II 型地质雷达	800	衬砌厚度与背后空洞
成渝线上某单线铁路隧道	1984	铁路	SIR-20 型探地雷达	400	衬砌厚度及背后岩体的密实度
高尔寺隧道	2011	公路	RAMAC/GPR 型地质雷达	(500,800)	衬砌厚度、背后空洞、钢拱架、配筋间距、止水带
厦门地铁 2 号线上湖滨中路站至育秀东路站之间的隧道	2015	地铁	GR-IV 型便携式探地雷达	(400,900)	隧道渗漏水、衬砌脱空及背后不密实
南京地铁 3 号线上滨江路站至五塘村站之间的地下溶洞	2013	地铁	SIR-20 型地质雷达	100	地下溶洞的位置、规模、深度

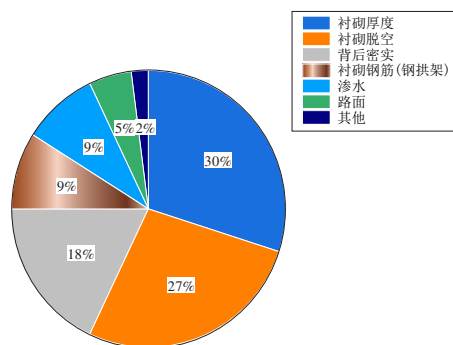


图3 地质雷达检测项目的占比

Fig. 3 Proportion of geological radar detection project

1.3 存在的问题及建议

地质雷达是使用电磁波检测隧道病害的一种地球物理勘探方法,具有连续、快速、无损、易携带及连续透视等优点^[42],但在实际运用中也存在着一些问题:

1) 地质雷达检测隧道病害是利用电磁波在介质中的传播规律,即电磁波在不同介质的分界面上发生反射或者折射,并利用接收到的反射波来分析隧道健康状况的。为保证接收到更多有用信息,一般采用宽频带方式接收反射的电磁波,但这样做势必会接收到其他干扰信息^[20],这对后期数据处理会造成不利影响。

2) 运用地质雷达检测隧道结构,大部分是采用地面耦合天线来进行检测的^[43],即地质雷达天线需要与检测隧道表面接触。但该检测方式存在效率低、影响隧道交通、隧道内线缆与其他附属设施对地质雷达检测影响较大等问题。

3) 虽然基于空气耦合原理的地质雷达检测设备^[42-44]具有检测快速、一次性检测等优点,但该设备的购置成本较高,相对于地面耦合技术,空气耦合技术也还不够成熟^[44],还有待进一步研究、实践。

4) 目前,学者们虽然对雷达信号的处理做了很多研究工作,但由于雷达接收信号及隧道本身的复杂性,在大部分情况下也只能对雷达信号进行定性分析,并结合人工经验来判断隧道病害的种类。

5) 在用地质雷达检测隧道初砌厚度时,介电常数的选取对隧道厚度检测结果至关重要。随着介电常数的增大,初砌厚度逐渐减小^[45],两者大致呈负相关关系。当介电常数的选取不合理时,检测结果将严重影响对初砌厚度的判断。

6) 隧道衬砌缺陷大部分为衬砌脱空、不密实

及厚度不足等。其中,脱空主要发生在隧道拱部,隧道衬砌厚度不足主要发生在拱腰、拱顶^[45]。然而,目前大部分使用地面耦合天线地质雷达检测隧道的工程情形需要天线接触拱顶,这使得实施难度增大。

虽然地质雷达在检测隧道方面存在着一些问题,但是它能够无损且快速检测隧道的内部情况,因此其仍然是今后主流的无损检测手段之一。以下给出关于地质雷达发展的一些建议:

1) 随着21世纪计算机科学的蓬勃发展,人工智能成为科学研究的热点之一。人工智能在数据处理、图像识别、分类归纳等方面成果累累,地质雷达信息处理可以借助人工智能方面的成果来提高其处理效率与精度。

2) 虽然地面耦合天线地质雷达在隧道检测方面占据主导地位,但是空气耦合天线依然是未来发展的方向。随着铁路、公路及地铁隧道运营时间的加长,需要进行检测的隧道数量、频率都会增加,而地面耦合天线无论是检测效率及方便程度都不能满足隧道检测发展的需要。空气耦合天线技术虽然不够成熟,但是其符合实际工程的需要。

3) 处理地质雷达隧道检测数据需要建立一个平台,这有助于提高对病害的识别能力。目前,虽然有许多学者从事地质雷达隧道病害的识别研究工作,但是由于隧道施工方法及隧道所处地质环境的多样性,相似雷达图形有可能对应不同种类的病害。因此,建立一个全面的数据处理平台,不仅能对已有资料进行归纳总结,而且可以让一线人员参考已有成果,减轻从业人员主观判断的负担。

2 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是20世纪末发展起来的新兴技术,在测绘领域被称为是继卫星导航技术之后的一次技术革命^[46],又被称为实景复制技术,是机器视觉领域的一个具体应用,也是集激光技术、计算机技术、传感技术、测绘技术等多种技术于一体的新兴技术。

2.1 基本原理

三维激光扫描技术是通过点云来重建被测物的三维模型的,而点云由含有空间位置信息的点组合而成。空间位置信息是根据激光测距原理,

由仪器内部的角度记录装置所记录的被测物的坐标信息。根据测距原理的不同,三维激光扫描可分为三角法、脉冲法、相位移法和脉冲-相位移法^[47]。其测量平台可分为地面型、车载型、手持型及机载型^[46],其中,在隧道检测方面最常用的是地面型,包括静定式和移动式两种。在隧道建设期,由于施工条件复杂,大多采用静定式三维激光扫描仪来复原隧道的开挖情况;而在隧道运营期,由于静定式扫描仪的测量效率较低,无法满足测量要求,故多使用移动式激光扫描仪^[12,48-57]。

2.2 检测方法

2.2.1 静定式三维激光扫描

静定式三维激光扫描仪通过水平面和竖直面扫描实现隧道360°全方位扫描^[58],而隧道大部分都是线状结构,要完成整个隧道的测量需要进行多个站点的布测。测点间距会影响扫描精度,当测点间距过大时,在测点边缘的激光入射角将过大,点云密度将过低,这既不利于后期隧道建模,也不利于各测点的点云配准;当测点间距过小时,虽然能保证点云的密度和扫描的精度,但是增加了测量时间和数据体量。因此,合理设计各测点的间距对后期数据处理及隧道病害识别至关重要。测点间距与隧道的最大直径及激光入射角有关,刘绍堂等^[59]建议将测点间距设置为隧道最大直径。由于当入射角大于65°时,激光扫描误差急剧增大,所以谢雄耀等^[60]建议根据隧道的具体情况将测点间距设置为隧道直径的1~2倍。

测量结束后需要对每一个站点进行点云配准,配准的目的是将每一个站点的局部坐标转化成整体坐标。在对隧道进行建模时,常用的点云配准方法有两种^[53]:一是基于3点及以上的标靶点云配准;二是基于重叠扫描区域的同名点,用迭代最近点(iterative closest point, ICP)配准法进行点云配准。通过3个及以上标靶进行点云配准的原理是将使用全站仪测量得到的标靶中心坐标赋值给由三维激光扫描拟合得到的标靶中心坐标。其中,常见的标靶设置是在两个测点的相邻位置设置标靶,并称之为局部拼接。对于长隧道,若隧道每站都设置标靶,不仅工作量大,而且此过程会造成累积误差过大,对点云拼接的精度影响较大。为此,托雷^[61]提出一种全局拼接方案,即根据隧道的可视情况将若干个测点归到一个测区,在每个测区两端设置标靶,测区内的每个测点公用这些

标靶来进行测区内点的云拼接,然后再进行测区与测区之间的拼接。ICP配准法通过在两个相邻测点中选取同名点(重叠部分),并以最小二乘法迭代找出变化矩阵(旋转、平移矩阵)。采用ICP配准法时,如果初值选用不当,会造成收敛速度过慢或者算法不收敛。为解决算法初值的选取问题,一般采用指定同名点的方法来加快迭代收敛速度。

2.2.2 移动式三维激光扫描

移动式三维激光扫描技术是近些年发展起来的一种新的综合测量技术。它是一种集多种技术为一体的综合检测系统,在隧道结构检测领域具有很好的应用前景,尤其是在竣工后的隧道空间结构检测领域。

在用移动式三维激光扫描仪扫描时,激光在移动的小车上在竖直平面上进行旋转,在水平面上保持不动,随着小车的前移,其点云轨迹呈螺旋状,其实质上是一种线性扫描^[58]。移动式三维激光扫描仪原则上不需要进行点云配准,但是测量过程中误差的累积会造成长隧道点云建模的轴线偏离实际隧道轴线。因此,在隧道检测过程中,常常设置标靶对累积误差进行修正^[46]。

在使用移动式三维激光扫描仪测量时,布置标靶的主要目的为:

- 1) 解决隧道内部定位系统信号差造成扫描仪位置不准确,进而影响后期数据处理的问题^[62]。
- 2) 对于狭长线状结构的隧道,可以对整个隧道测量的累积误差进行修正^[46]。

2.3 数据处理

在采集完点云数据之后,需要对数据进行进一步的预处理,才能对点云数据进行建模,即对数据进行优化处理,形成三维可视化模型。具体流程如图4所示。

三维激光扫描数据处理是指通过对原始点云数据的处理,以更加真实地还原隧道的实际情况。隧道点云数据处理包括数据预处理与三维建模,其中,数据预处理包括点云配准、去噪和特征提取^[50]。点云数据预处理的原因是扫描仪在扫描隧道主体结构时,会有失真点的存在。失真点是指明显远离隧道主体结构的点。对于明显失真的点,一般采用手动删除的方式^[53],对于小的噪点只能通过算法来剔除^[59]。

用点云监测隧道变形需要获得隧道横断面的

空间坐标信息,因此需要绘制一条曲线来表示隧道变形的走势,以便对隧道点云进行细小切割^[62]。通过拟合的横断面与设计断面或者前一次测量结果的对比来判断隧道的变形情况。目前,在使用三维激光扫描技术来判断隧道变形方面,隧道变形走势线是一个热点研究问题^[63]。

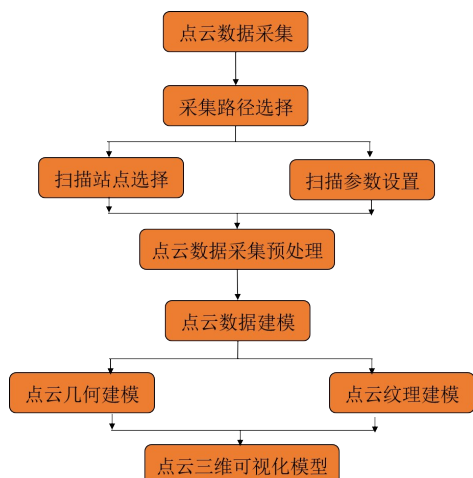


图4 点云数据的采集与处理流程

Fig. 4 Process of point cloud data acquisition and processing

2.4 常用设备及发展现状

随着三维激光扫描技术的发展,许多国家开发了与之相关的设备。其中,瑞士生产的 GRP 5000 移动激光扫描系统是一种集成了多种传感技术的隧道检测设备,其由三维激光扫描仪、全球定位系统(global positioning system, GPS)、惯性测量单元、里程编码器和控制存储单元等组成。该系统的测量速度超过了 3.5 km/h,是一种隧道横向变形的快速检测方法^[49]。

2014 年,日本计测检查株式会社推出了 MIMM-R 型综合检测车,检测速度达 50 km/h,检测车主要由线阵相机、三维激光扫描仪和空气耦合型雷达组成,其裂缝识别精度为 0.2 mm^[64]。

2017 年,德国 Spacotec 公司推出了 TS4 型隧道检测装置,检测速度为 4.5 km/h,该装置由激光雷达、热成像和线阵相机组成,具有对裂缝、破损、渗漏水、几何形态等项目进行检测的能力,其几何检测精度为 0.3 mm^[65]。

我国同济大学袁勇等^[66]研制出了一种基于数字照相技术的隧道检测车,其利用多个摄像机采集不同方向的隧道内表面图像。该检测车每推进一段相同的距离,摄机组就采集 1 次图片信息。这种检测车可以检查渗漏水、裂缝、掉块及剥落等病害,但不能采集点云数据。华道理等^[67]设计的

隧道检测车的内部检测设备包括直线照明灯、GPS 系统、彩色线阵相机、测速仪和计算机。其中,计算机分为总控计算机和数据处理计算机,直线照明灯、测速仪和 GPS 系统分别与总控计算机相连,总控计算机与数据处理计算机相连,数据处理计算机与彩色线阵相机相连。该检测车可对隧道进行实时检测,最小识别裂缝宽度为 0.2 mm。由上海同岩土工程科技股份有限公司联合同济大学自主研发的同岩 TDV-H2000 隧道病害检测车采集系统主要包括激光扫描系统、图像采集系统以及环境监测系统,能够以 60~80 km/h 的行驶速度,通过车载面阵相机,采用红外补光成像技术采集隧道表面病害数据^[68]。相比于可见光成像技术,该检测车在检测过程中对周边车辆的通行无影响。其后处理软件可以自动识别、采集图像上的裂缝病害,并通过人工干预来校核裂缝信息的准确性,裂缝宽度识别精度达到了 0.2 mm。

2.5 三维激光扫描技术在隧道检测中的应用

通过三维激光扫描仪对施工阶段及运营阶段的隧道进行扫描并储存数据,有助于后期的隧道检测,特别是根据用影像匹配算法处理后的数据可准确识别变形、渗漏水、管片错台和裂缝等问题^[6]。

目前,我国学者已在这些方面开展了大量的应用研究。在隧道变形检测方面,吴昌睿等^[49]采用移动激光扫描技术对盾构隧道的结构变形进行了快速检测,与传统检测技术相比,该技术具有快速、准确、方便等优势,检测结果的误差在 2 mm 以内;张丽等^[57]采用移动三维激光扫描技术对隧道结构进行监测,利用图像自动识别技术对隧道病害进行识别,并采用浏览器/服务器(browser/server, B/S)的架构模式,这使得运营管理者可以通过浏览器对监测数据进行管理;许度等^[69]以中国锦屏地下实验室二期工程中的深埋隧洞群为依托,基于三维激光扫描技术的变形检测技术及岩体结构面非接触原位一体化测试技术,对隧洞进行了变形检测;高洪等^[70]采用移动式三维激光扫描仪对地铁隧道内的数据进行采集,完成了隧道限界检测、逐环直径收敛、横断面分析、病害检测、附属设施调查等,结果表明移动三维激光扫描技术在隧道变形检测方面较为实用;张蕴明等^[71]在对北京某地铁的全线隧道进行检测时,采用三维激光扫描技术进行了隧道的收敛变形监测,结果

表明,与传统的测量技术相比,三维激光扫描技术能够满足地铁隧道收敛变形的测量要求;马自军等^[72]利用由高精度三维激光扫描技术创建的隧道施工三维模型,使隧道施工各环节的场景可视化再现,准确计算了隧道超挖、欠挖土方的数量及隧道初支、二次衬砌混凝土用量,并对围岩变形进行了全面分析;李善驰^[73]利用三维激光扫描技术较高的测量精度和数据采集效率,对某地铁线路进行了长期地铁变形监测;杜黎明等^[74]基于移动激光扫描的点云数据对地铁隧道变形进行分析,得到了各断面的整体变形情况及椭圆度较大的断面在各个方向上的变形情况;孙泽会等^[75]以深圳市轨道交通2号线地铁隧道自动化监测项目为依托,将三维激光扫描技术应用于地铁隧道收敛变形的监测中;赵宁宁等^[76]将三维激光扫描技术应用于地铁区间隧道结构的变形监测中,并提出了一种新的隧道结构监测方法。通过试验分析,三维激光检测方法在满足各项检测精度的同时,能轻松实现对盾构环片的错台和收敛检测。宋云记等^[53]采用三维激光扫描技术对青岛地铁进行了渗水和错台检测;虞伟家^[77]在苏州的轨道交通检测中,利用三维激光点云密度高的优势,将数据进行整合,对隧道环片的环间错台进行了分析;李倩文等^[78]在越江隧道大修工程中,利用三维激光扫描技术对隧道管片错台进行了检测;保振永^[79]在昆明地铁2号线中利用基于三维激光扫描技术建立的可视化系统对隧道病害进行了监测,监测内容不仅包括管片错台,还包括断面、轨距、椭圆度、渗水、裂缝、掉块等,监测成果准确度较高。

在隧道渗漏水检测方面,吴昌睿等^[80]采用三维激光扫描技术对隧道进行了快速、准确的检测,获得了渗漏水的数据、面积等数据,渗漏水检测精度达92%;陆培庆等^[81]在某城市地铁1号线的监测中利用三维激光扫描技术进行渗漏水监测,结果显示:移动三维激光扫描技术提高了采集、处理数据的速度,监测成果精度也完全能够满足地铁隧道的监测需求;袁福银等^[82]采用三维激光扫描仪对武汉地铁隧道的渗漏水情况进行监测,并提出地铁隧道渗漏水病害等级划分和预警标准,形成了渗漏水诊断系统;吴贤国等^[83]利用三维激光扫描技术建立基于物联网的三维激光扫描监测渗漏水诊断系统,并对运营地铁渗漏水进行病害监测,给出渗漏水病害的养护、维修和治理措施,监

测结果与实际情况相符。

国外学者在三维激光扫描方面也进行了一些研究,如FARAHANI等^[84]使用三维激光扫描技术对隧道进行三维扫描建模,并对隧道进行变形监测;YOON等^[85]使用三维激光扫描技术对隧道衬砌进行检测,并提出了用激光扫描仪检测隧道衬砌表面物理状况的方法,扩大了激光扫描技术的应用范围;FARAHANI等^[86]引入三维激光扫描系统,利用三维激光的非接触式、直接和自动化等特性获取隧道形状、尺寸和遮挡物的几何形状,从而实现了隧道几何形状的检测;PARK等^[87]利用激光扫描技术对地铁隧道衬砌在临时支护施工和开挖过程中产生的裂缝进行了检测与监测。

从以上分析可以看出,三维激光扫描技术不仅可以检测很多项目,而且在检测过程中无须接触被测物体,自动化程度高、测量速度快、测量精度高、信息丰富,检测过程中所获得的点云数据不仅可用于检测项目还有助于后期的隧道运营和管理。因此,有必要对三维激光扫描技术进行深入研究,推进其在隧道病害检测和监测中的发展。

2.6 存在的问题及建议

三维激光扫描技术相对于传统的全站仪方法有着很大的优势,是近几年隧道变形检测领域的热点研究方向,但是将三维激光扫描仪用于隧道病害检测还存在着一些问题,主要有:

1) 三维激光扫描仪虽然克服了传统水准仪、全站仪在隧道变形测量中只能单点测量的不足,但其在仪器造价方面要远远高于传统仪器的造价,故其推广过程还存在一些实际困难。

2) 目前,利用三维激光扫描仪检测隧道病害主要集中于隧道整体变形方面,对隧道表面裂纹的检测较少。通过分析现有的用三维激光建模提取初砌裂纹的研究成果可知,用三维激光扫描仪提取隧道初砌表面的病害是可行的^[88-92]。

3) 虽然三维激光扫描仪在分析隧道变形和表面病害方面比较热门,但是其后期的数据处理还需要更深入的理论研究。

4) 数据处理时间长。点云数量大,而计算机的计算能力有限,这导致目前大多数相关的复杂模型处理数据的时间过长。

5) 灵活性差。虽然三维激光扫描仪能对隧道的大部分区域进行扫描分析,但对一些较复杂的结构无法进行细致扫描。

虽然三维激光扫描技术在隧道检测方面存在着一些问题,但是它能够无损且快速检测隧道内的情况,因此,可以相信它仍然是今后主流的检测方法之一。以下给出三维激光扫描技术发展的一些建议:

1) 低成本化。随着信息技术的不断发展,引入三维扫描技术来降低仪器造价,从而实现检测的低成本化。

2) 快速化。引入高速计算机,并适当简化计算模型,提高点云数据的处理速度,实现检测快速化。

3) 高灵活性。随着设备的发展,用设计灵活小巧的三维激光扫描仪进行现场检测,以提高检测复杂情况的灵活性。

3 结论与展望

通过上述对地质雷达与三维激光扫描仪在隧道病害检测方面应用研究的综述,总结如下:

1) 地质雷达通过电磁波检测隧道的内部情况,能及时发现隧道工程中的病害,并在实际隧道病害检测中得到了广泛使用。

2) 目前,地质雷达在实际工程中常用于检测衬砌厚度、空洞、配筋间距、衬砌质量、裂缝、渗漏水等。其在实际检测中存在不少问题,如后期图像处理困难、检测效率低、技术不成熟、定量判断困难、特殊情况实施难度大等。

3) 三维激光扫描技术在隧道表面及隧道整体变形情况的检测方面表现较为突出,特别是经过影像匹配算法处理后可准确识别变形、渗漏水以及管片错台和裂缝等问题。虽然其目前应用发展较好,但也存在不少问题,如成本高、不便于进行表观的细致检测、后期数据处理困难、灵活性差等。

实际上,隧道病害是在隧道与周边围岩共同作用下形成的,单一地检测隧道变形与衬砌表面情况或只分析隧道衬砌厚度及衬砌背后的不密实情况,将无法定量分析隧道在运营期的健康状况,无法实现对隧道经济、合理的养护。因此,在隧道检测中多种仪器联合使用将成为一种新的趋势,而地质雷达和三维激光扫描仪的联合使用可以兼顾内外,是隧道检测发展的一个方向。

虽然将地质雷达和三维激光扫描仪联合使用

来检测隧道病害可以内外兼顾,实现隧道病害的定性、定量分析,为隧道养护提供合理的建议,但是也可能会遇到以下问题:

1) 地质雷达和三维激光扫描仪是基于不同检测内容研发的,如何充分利用二者的性能而不造成某一设备功能的浪费是需要进行研究的问题,即如何实现二者功能的匹配以达到更优的检测效果。

2) 无论是地质雷达还是激光扫描仪都存在数据处理困难的问题,二者联合使用是否会给数据处理带来新的问题,而且如何联合使用二者的数据也是一个值得研究的问题。

3) 虽然在隧道检测方面二者的研究成果很多,但是其智能化识别隧道病害的能力还有待提高,如何更加智能地识别隧道病害也是二者联合使用时有待解决的难题之一。

[参考文献]

- [1] 交通运输部. 2019年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2020(6): 86-91.
Ministry of Transport. Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2019 [J]. Finance & Accounting for Communications, 2020(6): 86-91.
- [2] 交通运输部. 2020年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2021(6): 92-96.
Ministry of Transport. Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2020 [J]. Finance & Accounting for Communications, 2021(6): 92-96.
- [3] 隧道建设(中英文)编辑部.《城市轨道交通2020年度统计和分析报告》发布[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(4): 691.
Editorial Department of Tunnel Construction. Statistics and Analysis Report of Urban Rail Transit in 2020 released [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(4): 691.
- [4] 陈湘生, 徐志豪, 包小华, 等. 隧道病害监测检测技术研究现状概述[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(3): 1-12. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-3897.2019.16.048.
CHEN Xiangsheng, XU Zhihao, BAO Xiaohua, et al. Overview of research status of tunnel disease monitoring and detection technology [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(3): 1-12. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-3897.2019.16.048.
- [5] 周中财. 铁路运营隧道隐伏病害无损检测方法研究[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(1): 145-148. DOI:

- 10.3969/j.issn.1001-523X.2019.01.073.
- ZHOU Zhongcai. Study on nondestructive testing method of hidden diseases in railway operation tunnel [J]. Building Technique Development, 2019, 46(1): 145-148. DOI: 10.3969/j.issn.1001-523X.2019.01.073.
- [6] 胡玉祥,张九宴,张洪德,等. 三维激光扫描技术在地铁隧道工程中的综合应用[J]. 城市勘测, 2020(5): 137-141. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8262.2020.05.032.
- HU Yuxiang, ZHANG Jiuyan, ZHANG Hongde, et al. Comprehensive application of 3D laser scanning technology in subway tunnel engineering [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2020(5): 137-141. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8262.2020.05.032.
- [7] 王奇. 浅层地震折射波法在工程应用中的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- WANG Qi. A study of application of shallow seismic refraction methods in engineering [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [8] 安辉. 红外探测技术在隧道超前地质预报中优、缺点探讨[J]. 铁道标准设计, 2014, 57(3): 101-104.
- AN Hui. Study on advantages and disadvantages of infrared detection technology used in geological forecast of tunnel [J]. Railway Standard Design, 2014, 57(3): 101-104.
- [9] 陆晓华. 隧道渗漏及表观损伤检测方法对比分析[J]. 科技信息, 2013(18): 381. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9960.2013.18.333.
- LU Xiaohua. Comparative analysis of tunnel leakage and apparent damage detection methods [J]. Scientific and Technological Information, 2013(18): 381. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9960.2013.18.333.
- [10] 郑俊杰, 梁艳, 资谊. 既有隧道改建工程防渗检测技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(1): 83-86. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7029.2006.01.018.
- ZHENG Junjie, LIANG Yan, ZI Yi. Study on seepage testing of the rebuilding of existing tunnels [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(1): 83-86. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7029.2006.01.018.
- [11] 王鹰, 陈强, 魏有仪, 等. 红外探测技术在圆梁山隧道突水预报中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 855-857. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2003.05.031.
- WANG Ying, CHEN Qiang, WEI Youyi, et al. Application of infrared acquisition technology in prediction of water gushing in Yuanliangshan tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 855-857. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2003.05.031.
- [12] 王石磊, 高岩, 齐法琳, 等. 铁路运营隧道检测技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 41-57. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.05.003.
- WANG Shilei, GAO Yan, QI Falin, et al. Review on inspection technology of railway operation tunnels [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(5): 41-57. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.05.003.
- [13] 杨光, 陈天骄, 李盼, 等. 超声波和雷达法在隧道衬砌裂缝检测中的应用[J]. 湖南交通科技, 2020, 46(1): 91-94. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2020.01.022.
- YANG Guang, CHEN Tianjiao, LI Pan, et al. Application of ultrasonic wave and radar method in crack detection of tunnel lining [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2020, 46(1): 91-94. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2020.01.022.
- [14] 舒志乐. 隧道衬砌内空洞探地雷达探测正反演研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- SHU Zhile. Study on GPR forward simulation and inversion of tunnel lining cavity [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [15] 伍浩. 探地雷达技术进行隧道衬砌质量检测的机理及精度分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013. DOI: 10.7666/d.Y2306269.
- WU hao. Mechanism and precision analysis of GPR technology on the tunnel lining quality detection [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013. DOI: 10.7666/d.Y2306269.
- [16] 田晖, 王苍和, 王宁. 地质雷达检测公路隧道病害的方法[J]. 公路, 2011, 56(11): 218-221.
- TIAN hui, WANG Canghe, WANG Ning. Methods for geological radar detection of highway tunnel diseases [J]. Highway, 2011, 56(11): 218-221.
- [17] 刘伟. 地质雷达在隧道工程质量检测中的应用[J]. 科技创新导报, 2019, 16(24): 21-22. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2019.24.021.
- LIU Wei. The application of geological radar in tunnel engineering quality detection [J]. Science and Technology Innovation Report, 2019, 16(24): 21-22. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2019.24.021.
- [18] 康富中, 江波, 贺少辉, 等. 地质雷达在风火山隧道病害检测中的应用与结果分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 963-970. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2010.06.023.
- KANG Fuzhong, JIANG Bo, HE Shaohui, et al. Detection and analysis of tunnel defects with geological penetrating radar at Fenghuo Mountain [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 963-970. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2010.06.023.
- [19] 康富中, 齐法琳, 贺少辉, 等. 地质雷达在昆仑山隧道病害检测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3641-3646.
- KANG Fuzhong, QI Falin, HE Shaohui, et al. Application of ground penetrating radar to disease detection of kunlun mountain tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 29(S2): 3641-3646.

- [20] 徐赞. 地质雷达在隧道施工质量检测中的应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
XU zan. The application research of ground-penetrating radar in tunnel construction quality testing [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013.
- [21] 贾雷. 六河高速公路隧道检测与病害处治技术[D]. 西安: 长安大学, 2013. DOI: 10.7666/d.D416357.
JIA lei. The detection and disease treatment technology in Liuhe highway tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. DOI: 10.7666/d.D416357.
- [22] 蔡维龙. 岩溶地区长大深埋运营隧道病害评估与防治对策研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
CAI Weilong. Research for the disease assessment and prevention and control of the large deep buried and operating tunnel in Karst region [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [23] 吕荔炫. 福州市金鸡山隧道衬砌结构病害检测与分析[J]. 福建建筑, 2016(4): 94-96. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.02.001.
LYU Lixuan. Detection and analysis of lining structure diseases of Jinjishan tunnel in Fuzhou City [J]. Fujian Architecture & Construction, 2016(4): 94-96. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.02.001.
- [24] 张鹏, 鄢本存. 运营老旧铁路隧道病害检测与分析研究[J]. 铁道建筑技术, 2015(12): 74-77, 112. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2015.12.017.
ZHANG Peng, YAN Bencun. Disease detection and analysis of the old railway tunnel in operation period [J]. Railway Construction Technology, 2015(12): 74-77, 112. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2015.12.017.
- [25] 李柱. 隧道衬砌病害检测与处治措施的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012. DOI: 10.7666/d.y2104166.
LI Zhu. Research on detection and treatment measures of tunnel lining diseases [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. DOI: 10.7666/d.y2104166.
- [26] 陈涛. 地质雷达在奉溪高速公路隧道衬砌检测中的应用[J]. 路基工程, 2014(4): 174-177, 182. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2014.04.38.
CHEN Tao. Application of ground penetrating radar in tunnel lining detection of Fengxi expressway [J]. Subgrade Engineering, 2014(4): 174-177, 182. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2014.04.38.
- [27] 姚成华. 隧道衬砌结构无损检测及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004. DOI: 10.7666/d.y673577.
YAO Chenghuan. Non-destructive testing and the application research on concrete construction of tunnels [D]. Changsha: Central South University, 2004. DOI: 10.7666/d.y673577.
- [28] 苏卿. 复合侵蚀性介质作用下隧道衬砌混凝土的病害检测评估[J]. 混凝土, 2018(4): 137-140. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2018.04.034.
SU Qing. Inspection and evaluation of tunnel lining concrete under the section of composite corrosive medium [J]. Concrete, 2018(4): 137-140. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2018.04.034.
- [29] 钟悦鹏. 某公路隧道衬砌结构检测及评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
ZHONG Yuepeng. The detection and evaluation of one tunnel lining structure [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [30] 董茂干, 吴姗姗, 黄宁, 等. 探地雷达在南京地铁隧道工程检测中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(5): 1090-1094. DOI: 10.11720/wtyht.2014.5.38.
DONG Maogan, WU Shanshan, HUANG Ning, et al. The application of ground penetrating radar to subway tunnel engineering testing in Nanjing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(5): 1090-1094. DOI: 10.11720/wtyht.2014.5.38.
- [31] 陶陆. 山岭隧道断层地质雷达探测特征响应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2020.001449.
TAO Lu. Research on the characteristic response of fault ground-penetrating radar in mountain tunnel [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2020.001449.
- [32] 刘振东. 公路隧道隐伏病害快速无损检测与安全评价体系构建[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013. DOI: 10.7666/d.D328066.
LIU Zhendong. Quick and nondestructive testing and safety evaluation system construction to hidden disease of highway tunnel [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. DOI: 10.7666/d.D328066.
- [33] 冯国磊. 地质雷达在客专隧道病害调查中的应用[J]. 交通标准化, 2013(21): 57-59.
FENG Guolei. Application of GPR in tunnel disease survey of passenger special line [J]. Transportation Standardization, 2013(21): 57-59.
- [34] 许献磊, 马正, 李俊鹏, 等. 地铁隧道管片背后脱空及渗水病害检测方法[J]. 铁道建筑, 2019, 59(7): 51-56. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2019.07.12.
XU Xianlei, MA Zheng, LI Junpeng, et al. Damage detection method for cavity and water seepage behind the subway tunnel segments [J]. Railway Engineering, 2019, 59(7): 51-56. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2019.07.12.
- [35] 邓普. 铁路车载探地雷达检测隧道渗漏水的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
DENG Pu. Research on detection of railway tunnel seepage with train-mounted GPR [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [36] 刘涛. 基于GPRMAX的隧道二次衬砌病害检测技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2018.000074.
LIU Tao. Research on detection technology of tunnel secondary lining disease based on GPRMAX [D].

- Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2018.000074.
- [37] ISMAIL M A, ABAS A A, ARIFIN M H, et al. Integrity inspection of main access tunnel using ground penetrating radar [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 271: 012088. DOI: 10.1088/1757-899x/271/1/012088.
- [38] ALANI A M, TOSTI F. GPR applications in structural detailing of a major tunnel using different frequency antenna systems [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 1111-1122. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.100.
- [39] PREGO F J, SOLLA M, NÚÑEZ-NIETO X, et al. Assessing the applicability of ground-penetrating radar to quality control in tunneling construction [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2016, 142 (5): 06015006. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001095.
- [40] KILIC G, EREN L. Neural network based inspection of voids and Karst conduits in hydro-electric power station tunnels using GPR [J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 151: 194-204. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.02.026.
- [41] AROSIO D, MUNDA S, ZANZI L, et al. GPR investigations to assess the state of damage of a concrete water tunnel [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2012, 17(3): 159-169. DOI: 10.2113/jeeeg17.3.159.
- [42] 蔡文博. 地铁隧道车载GPR检测技术的试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
CAI Wenbo. Experimental study on detective technology of subway tunnel by vehicle-mounted GPR [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [43] 刘小龙. 基于车载非接触式雷达的公路隧道检测技术研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2019.000520.
LIU Xiaolong. Research on road tunnel detection technology based on vehicle-borne non-contact radar [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2019.000520.
- [44] 袁玮, 李林, 高红兵. 地质雷达法隧道衬砌质量检测台车设计研究 [J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S1): 179-184. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2019.S1.025.
YUAN Wei, LI Lin, GAO Hongbing. Study on the design of tunnel lining quality inspection trolley based on geological radar method [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S1): 179-184. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2019.S1.025.
- [45] 张丹锋. 隧道衬砌质量缺陷地质雷达探测相关问题研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016. DOI: 10.7666/d.D01090024.
ZHANG Danfeng. The research of tunnel lining quality defects detection in geological radar correlation problems [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. DOI: 10.7666/d.D01090024.
- [46] 夏金周. 移动式三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2019.000173.
XIA Jinzhou. Application research of mobile 3D laser scanning technology in deformation monitoring of subway tunnels [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2019.000173.
- [47] 邓洪亮, 付思远, 高文学, 等. 隧道三维点云施工监测技术与应用 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 199-204. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2014.05.031.
DENG Hongliang, FU Siyuan, GAO Wenxue, et al. 3D point cloud monitoring technology and its application in tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 199-204. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2014.05.031.
- [48] 梅文胜, 吕世望, 于安斌, 等. 一种地铁轨道相对变形检测与定位方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 104-110. DOI: 10.13203/j.whugis20190445.
MEI Wensheng, LYU Shiwang, YU Anbin, et al. A detecting and locating method for subway track relative deformation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(1): 104-110. DOI: 10.13203/j.whugis20190445.
- [49] 吴昌睿, 黄宏伟, 邵华. 地铁隧道横向变形的激光扫描检测方法及应用 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 863-872, 881. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2018.01.001.
WU Changrui, HUANG Hongwei, SHAO Hua. Laser scanning inspection method and application for metro tunnel deformation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(3): 863-872, 881. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2018.01.001.
- [50] 史玉峰, 张俊, 张迎亚. 基于地面三维激光扫描技术的隧道安全监测 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013(S2): 246-249. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2013.S2.006.
SHI Yufeng, ZHANG Jun, ZHANG Yingya. Tunnel safety monitoring based on terrestrial laser scanning technology [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013(S2): 246-249. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2013.S2.006.
- [51] 郑敏, 严凤, 熊勇钢. 基于三维激光扫描的地铁隧道快速监测方法研究 [J]. 人民长江, 2020, 51(4): 142-146. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.023.
ZHENG Min, YAN Feng, XIONG Yonggang. Research on rapid monitoring method of subway tunnel based on 3D laser scanning [J]. Yangtze River, 2020, 51(4): 142-146. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.023.

- [52] 李海波, 杨兴国, 赵伟, 等. 基于三维激光扫描的隧洞开挖衬砌质量检测技术及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3456-3463. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0597.
- LI Haibo, YANG Xingguo, ZHAO Wei, et al. Measurement technology and its application for tunnel excavation and lining quality based on 3D laser scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3456-3463. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0597.
- [53] 宋云记, 王智. 利用三维激光扫描技术进行地铁隧道施工质量管控及病害检测[J]. 测绘通报, 2020(5): 150-154. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8262.2018.03.026.
- SONG Yunji, WANG Zhi. Construction quality control and disease detection of subway tunnel based on 3D laser scanning technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(5): 150-154. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8262.2018.03.026.
- [54] 师海. 三维激光扫描技术在施工隧道监测中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013. DOI: 10.7666/d.Y2428498.
- SHI Hai. Application research of three-dimensional laser scanning technology in the construction tunnel monitoring[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. DOI: 10.7666/d.Y2428498.
- [55] 袁凤祥. 三维激光扫描技术在隧道工程检测中的应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- YUAN Fengxiang. The application of 3D laser scanning technology in the detecting of tunnel project[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [56] 刘成. 三维激光扫描隧道运维监测技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018. DOI: 10.27275/d.cnki.gsdku.2018.000266.
- LIU Cheng. Research on 3D laser scanning tunnel operation and maintenance monitoring technology[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018. DOI: 10.27275/d.cnki.gsdku.2018.000266.
- [57] 张丽, 丛晓明, 赵生良. 移动三维激光扫描技术在隧道结构监测中应用[J]. 测绘通报, 2020(8): 153-156. DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2019.01.014.
- ZHANG Li, CONG Xiaoming, ZHAO Shengliang. Application of mobile 3D laser scanning technology in tunnel structure monitoring[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(8): 153-156. DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2019.01.014.
- [58] 樊廷立, 唐超, 王柄强. 移动三维激光扫描技术在盾构隧道收敛监测中的应用[J]. 测绘通报, 2020(9): 50-53. DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2019.01.014.
- FAN Tingli, TANG Chao, WANG Bingqiang. Application of mobile 3D laser scanning technology in convergence detection of shield tunnel[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(9): 50-53. DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2019.01.014.
- [59] 刘绍堂, 刘文锴, 周跃寅. 一种隧道整体变形监测方法及其应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(8): 981-986. DOI: 10.13203/j.whugis.20120122.
- LIU Shaotang, LIU Wenkai, ZHOU Yueyin. A monitoring method for overall deformation of tunnel and its application[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(8): 981-986. DOI: 10.13203/j.whugis.20120122.
- [60] 谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(11): 2214-2224. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2008.01.016.
- XIE Xiongyao, LU Xiaozhi, TIAN Haiyang, et al. Measurement method of tunnel full-face deformation based on ground three-dimensional laser scanning technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(11): 2214-2224. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2008.01.016.
- [61] 托雷. 基于三维激光扫描数据的地铁隧道变形监测[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- TUO Lei. Subway tunnel deformation monitoring based on 3D laser scanning data[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [62] 杜荣武, 翁顺, 曾铁梅, 等. 基于移动三维激光扫描的地铁隧道结构监测方法[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(1): 139-145. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0985.2020.01.022.
- DU Rongwu, WENG Shun, ZENG Tiemei, et al. Monitoring method of subway tunnel structure based on mobile 3D laser scanning[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(1): 139-145. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0985.2020.01.022.
- [63] 徐飞, 田茂义, 俞家勇, 等. 基于隧道水平中线的全局断面提取及形变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2296-2307. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0037.
- XU Fei, TIAN Maoyi, YU Jiayong, et al. Global section extraction and deformation analysis based on horizontal centerline of tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2296-2307. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0037.
- [64] FUJINO Y, SIRINGORINGO D M. Recent research and development programs for infrastructures maintenance, renovation and management in Japan[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(1): 3-25. DOI: 10.1080/15732479.2019.1650077.
- [65] TABRIZI K, CELAYA M, MILLER B S, et al. Damage assessment of tunnel lining by mobile laser scanning: Pittsburgh, Pennsylvania, implementation phase of FHWA SHRP 2 R06G project[J].

- Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2642(1): 166-179. DOI: 10.3141/2642-18.
- [66] 袁勇, 柳献, 黄永杰, 等. 用于隧道的检测车: 中国, CN102211590A[P]. 2011-10-12.
YUAN Yong, LIU Xian, HUANG Yongjie, et al. Detecting vehicle for tunnel: China, CN102211590A [P]. 2011-10-12.
- [67] 华道理, 李辉, 桂文刚, 等. 公路隧道检测车: 中国, CN110171344A[P]. 2019-08-27.
HUA Daoli, LI Hui, GUI Wengang, et al. Highway tunnel inspection vehicle: China, CN110171344A [P]. 2019-08-27.
- [68] 林海山, 张彦龙. 公路隧道病害快速检测技术发展和应用现状[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 176-179. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.036.
LIN Haishan, ZHANG Yanlong. Development and application status of rapid detection technology for highway tunnel diseases [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 176-179. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.036.
- [69] 许度, 冯夏庭, 李邵军, 等. 激光扫描隧洞变形与岩体结构面测试技术及应用[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1336-1343. DOI: 10.11779/CJGE201807022.
XU Du, FENG Xiating, LI Shaojun, et al. Laser scanning tunnel deformation and rock mass structural plane testing technology and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1336-1343. DOI: 10.11779/CJGE201807022.
- [70] 高洪, 李凯, 马全明, 等. 移动三维激光测量系统在地铁运营隧道病害监测中的应用研究[J]. 测绘通报, 2019(8): 96-101, 161. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6073.2017.04.012.
GAO Hong, LI Kai, MA Quanming, et al. Research on the application of mobile 3D laser measurement system in the disease monitoring of subway tunnel [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(8): 96-101, 161. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6073.2017.04.012.
- [71] 张蕴明, 马全明, 李丞鹏, 等. 三维激光扫描技术在地铁隧道收敛监测中的应用[J]. 测绘通报, 2012(S1): 438-440. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2017.09.036.
ZHANG Yunming, MA Quanming, LI Chengpeng, et al. Application of three-dimensional laser scanning technology in convergence monitoring of subway tunnel [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(S1): 438-440. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2017.09.036.
- [72] 马自军, 谯生有, 闻道荣. 三维激光扫描仪在隧道工程施工中的应用[J]. 测绘通报, 2020(3): 157-159. DOI: 10.3969/j.issn.1001-358X.2019.04.026.
MA Zijun, QIAO Shengyou, WEN Daorong. Application of 3D laser scanner in tunnel construction discussion [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(3): 157-159. DOI: 10.3969/j.issn.1001-358X.2019.04.026.
- [73] 李善驰. 三维激光扫描技术在地铁变形监测中的应用[J]. 资源信息与工程, 2019, 34(1): 129-130. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5391.2019.01.061.
LI Shanchi. Application of three-dimensional laser scanning technology in subway deformation monitoring [J]. Nonferrous Metals Abstract, 2019, 34(1): 129-130. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5391.2019.01.061.
- [74] 杜黎明, 钟若飞, 孙海丽, 等. 移动激光扫描技术下的隧道横断面提取及变形分析[J]. 测绘通报, 2018(6): 61-67. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2016.04.030.
DU Liming, ZHONG Ruofei, SUN Haili, et al. Tunnel cross section extraction and deformation analysis based on mobile laser scanning technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(6): 61-67. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2016.04.030.
- [75] 孙泽会, 曾奇, 刘德厚, 等. 三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 铁路技术创新, 2019(5): 68-72. DOI: 10.19550/j.issn.1672-061x.2019.05.068.
SUN Zehui, ZENG Qi, LIU Dehou, et al. Application of 3D laser scanning technology in deformation monitoring of subway tunnel [J]. Railway Technical Innovation, 2019(5): 68-72. DOI: 10.19550/j.issn.1672-061x.2019.05.068.
- [76] 赵宁宁, 吴伟, 王勇. 基于三维激光扫描技术的地铁隧道结构变形监测应用研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(6): 176-180. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8262.2019.04.029.
ZHAO Ningning, WU Wei, WANG Yong. Research on application of structural deformation monitoring of metro tunnel based on 3D laser scanning technology [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(6): 176-180. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8262.2019.04.029.
- [77] 虞伟家. 基于移动三维激光扫描的盾构隧道断面提取与应用[J]. 测绘通报, 2019(S2): 200-206.
YU Weijia. Section extraction and application of shield tunnel based on moving 3D laser scanning [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(S2): 200-206.
- [78] 李倩文, 陶利, 苑香刚, 等. 三维激光扫描技术在越江隧道大修工程中的应用[J]. 隧道与轨道交通, 2018(3): 34-37, 56. DOI: 10.13547/j.cnki.dxcgsd.2018.03.009.
LI Qianwen, TAO Li, YUAN Xianggang, et al. Application of 3D laser scanning technology in overhaul project of river-crossing tunnel [J]. Tunnel and Rail Transit, 2018(3): 34-37, 56. DOI: 10.13547/j.cnki.dxcgsd.2018.03.009.
- [79] 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-

187. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2021.03.051.
BAO Zhenyong. Visualization analysis of 3D laser scanning in subway tunnel monitoring[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(3): 183-187. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2021.03.051.
- [80] 吴昌睿, 黄宏伟. 地铁隧道渗漏水的激光扫描检测方法及应用[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 59-66. DOI: 10.13577/j.jnd.2018.0408.
WU Changrui, HUANG Hongwei. Laser scanning detection method and application of subway tunnel leakage [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(4): 59-66. DOI: 10.13577/j.jnd.2018.0408.
- [81] 陆培庆, 唐超. 移动式三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 测绘通报, 2020(5): 155-157, 160. DOI: 10.13535/j.cnki.11-4406/n.2017.10.110.
LU Peiqing, TANG Chao. Application of mobile 3D laser scanning technology in deformation monitoring of subway tunnels [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(5): 155-157, 160. DOI: 10.13535/j.cnki.11-4406/n.2017.10.110.
- [82] 袁福银, 陈虹宇, 李铁军, 等. 基于三维激光扫描地铁运营隧道渗漏水监测预警及管养系统研究[J]. 施工技术, 2019, 48(23): 76-79, 128. DOI: 10.7672/sjgs2019230076.
YUAN Fuyin, CHEN Hongyu, LI Tiejun, et al. Research on monitoring and early warning and management system of leakage water based on 3D laser scanning subway operation tunnel [J]. Construction Technology, 2019, 48(23): 76-79, 128. DOI: 10.7672/sjgs2019230076.
- [83] 吴贤国, 刘鹏程, 王雷, 等. 基于三维激光扫描地铁运营隧道渗漏水监测及预警[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(1): 1-7, 15. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0985.2020.01.001.
WU Xianguo, LIU Pengcheng, WANG Lei, et al. Monitoring and early warning of water leakage in subway operation tunnel based on 3D laser scanning [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(1): 1-7, 15. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0985.2020.01.001.
- [84] FARAHANI B V, BARROS F, SOUSA P J, et al. A coupled 3D laser scanning and digital image correlation system for geometry acquisition and deformation monitoring of a railway tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 102995. DOI: 10.1016/j.tust.2019.102995.
- [85] YOON J, SAGONG M, LEE J. Development of damage detection method on the tunnel lining from the laser scanning data[C]. the Proceedings of 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress. Prague: Underground Space Press, 2007: 1469-1474.
- [86] FARAHANI B V, BARROS F, SOUSA P J, et al. A railway tunnel structural monitoring methodology proposal for predictive maintenance [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(8): e2587. DOI: 10.1002/stc.2587.
- [87] PARK T S, LEE S H. Analyses of existing tunnel liner behaviors caused by excavation of upper layer with using laser scanning technology [J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 2015, 31(10): 29-36. DOI: 10.7843/kgs.2015.31.10.29.
- [88] 李健超, 张翠兵, 柴雪松, 等. 基于图像识别技术的隧道衬砌裂缝检测系统研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(1): 20-24. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.01.05.
LI Jianchao, ZHANG Cuibing, CHAI Xuesong, et al. Research on crack detection system of tunnel lining based on image recognition technology [J]. Railway Engineering, 2018, 58(1): 20-24. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.01.05.
- [89] 凌同华, 刘芳, 何文超, 等. 含水空洞的探地雷达正演模拟与试验研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(3): 40-47. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2022.03.006.
LING Tonghua, LIU Fang, HE Wenchao, et al. Forward simulation and experimental study of GPR for water-bearing cavity [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(3): 40-47. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2022.03.006.
- [90] 段俊. 凯里环城高速北段隧道衬砌检测及缺陷分析[J]. 公路与汽运, 2022(4): 147-149. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.034.
DUAN Jun. Detection and defect analysis of tunnel lining in the northern section of Kaili ring expressway [J]. Highways & Automotive Applications, 2022(4): 147-149. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.034.
- [91] 陈兴, 苏卫迪, 蒋雅君, 等. 岩溶地区隧道衬砌施工缝渗漏水处治技术[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 193-196. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.02.036.
CHEN Xing, SU Weidi, JIANG Yajun, et al. Treatment technology of leaking of tunnel lining construction joints in Karst area [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 193-196. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.02.036.
- [92] 周乐恒, 刘伟铎, 王兴平, 等. 集成激光扫描与无人机航测的古建筑测图技术研究[J]. 国土资源导刊, 2022, 19(4): 70-73, 47.
ZHOU Yueheng, LIU Weixin, WANG Xingping, et al. Mapping technology research of historic-building based on the integration of laser-scanning and UAV-imaging [J]. Land & Resources Herald, 2022, 19(4): 70-73, 47.

Analysis of tunnel detection based on geological radar and laser scanning

YU Hongliang¹, LI Dongbiao¹, GAO Wei², WANG Sen², WANG Yiwei², GE Shuangshuang²

(1.CCCC Nanjing Traffic Engineering Management Co., Ltd., Nanjing 211800, China; 2.School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the rapid development of economy, China's tunnel traffic construction has also made significant progress, and the number and scale of operating tunnels have increased significantly. Therefore, the daily inspection of tunnels in operation has become a concern. The current tunnel disease detection methods are mainly divided into non-destructive testing and damage detection, and damage detection affects the service life of the tunnel, so the current main detection method is non-destructive testing. In this paper, through the collation and analysis of the tunnel nondestructive testing related literature, mainly introduces the geological radar which is widely used and the three-dimensional laser scanning which is more promising. Firstly, the development and application of GPR in tunnel engineering at home and abroad are introduced, the problems existing in practical engineering are analyzed, and corresponding suggestions are put forward. Secondly, the basic principle and common equipment of 3D laser scanning are introduced, and the application of some tunnel detection at home and abroad is analyzed. Finally, a summary of the issues encountered by the two tunnel detection technologies during the detection process is provided, followed by the proposal of practical solutions. It has been observed that the utilization of a single technology for detecting tunnel deformations and lining surface conditions, or limiting the analysis to the thickness of tunnel lining and the non-compactness behind the lining, fails to enable a quantitative evaluation of the tunnel's operational health, and the economical and practical maintenance of the tunnel cannot be accomplished. Therefore, the joint use of multiple tunnel detection instruments will become a new trend, while the combined use of geological radar and three-dimensional laser scanning will consider both inside and outside. It is a development direction of tunnel detection technology.

Key words: geological radar; three-dimensional laser scanning; disease detection; non-destructive testing; tunnel detection

Manuscript received: 2022-09-13; **revised:** 2022-12-12; **accepted:** 2022-12-12

Foundation item: Project (27100020Y248) supported by Major Science and Technology R & D Program of CCCC Maintenance Group

Corresponding author: GAO Wei (1971—) (ORCID: 0000-0001-6468-805X), male, professor, research interest: rock mechanics theory, stability analysis of geotechnical engineering and engineering application of intelligent big data technology. E-mail: wgaowh@163.com

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:刘至真)