

文章编号:1005-0523(2018)04-0030-09

公路隧道结构快速检测车综述

杨俊¹,刘笑娣^{2,3},刘新根^{2,3},张平¹,彭飞⁴

(1.贵州高速公路集团有限公司,贵州 贵阳 550004;2.上海同岩土木工程科技股份有限公司,上海 200092;

3.上海地下基础设施安全检测与养护装备工程技术研究中心,上海 200092;4.上海同济检测技术有限公司,上海 200092)

摘要:公路隧道在运营过程中不可避免地会出现病害。传统的检测方法主要以人工检测为主,不仅检测效率低,检测结果也存在主观性,同时,检测过程中难以保证检测人员的安全。随着我国公路事业的快速发展,传统的检测方法已经不能满足公路运营养护的需要,快速无损检测应运而生。目前国内外已开发多款公路隧道检测车,对隧道病害进行高效准确地检测,并通过配套软件自动进行数据处理。公路隧道检测具有自动化程度高、检测速度快、检测精度高、结果客观真实、信息全覆盖等诸多优点。本文对公路隧道检测技术进行总结,探讨我国公路隧道病害检测车的发展。

关键词:公路隧道;隧道病害;检测技术;公路隧道检测车

中图分类号:U457

文献标志码:A

近些年来,我国公路事业发展极为迅速,高速公路基本覆盖了全国 20 万以上人口的所有城镇。在公路建设中,为了改善线性、降低坡度、缩短公路里程以及减少对植被的破坏,多采用隧道方案,我国成为世界上通车里程最长、隧道数量最多、发展最快的国家。但是我国隧道工程起步相对较晚,隧道是人工地下结构,处于天然介质的环境中,由于施工质量以及隧道存在环境的影响,在运营过程中不可避免地会出现病害并造成危害^[1]。故高效准确地检测隧道病害成为公路运营养护单位的首要问题,针对病害进行养护以保证公路隧道的正常运行。

传统的检测技术通过肉眼观察、敲击或利用检测仪器对隧道病害进行人工检测,人工检测对检测人员的要求较高,在检测过程中存在主观误差,且检测效率低下,检测人员的安全也难以保证^[2-3]。随着公路隧道病害检测业务的迫切需要,国内外已开发多种智能检测系统、公路检测车,可以安全、高效、高精度、全范围地对隧道渗漏水、衬砌开裂、衬砌结构破损、衬砌腐蚀、有害气体、路面等多种病害进行检测,为公路隧道运营养护提供强有力的技术支持。

1 公路隧道病害类型

运营中的公路隧道由于受地质、施工等各种因素的影响,会出现不同程度的病害,主要有衬砌裂缝、渗漏水、衬砌腐蚀、路面病害、冻害、有害气体、洞口山体滑坡、洞门裂缝等病害。

1.1 隧道衬砌裂缝

衬砌结构裂缝是隧道常见病害之一,隧道衬砌承受地层压力,防止围岩变形塌落,由于形变压力、松动压力作用、地层沿隧道纵向分布及力学形态的不均匀作用、湿度和收敛应力作用、围岩膨胀性和冻胀性压力作用、腐蚀性介质作用、施工中人为因素、运营车辆的循环荷载作用等,导致衬砌变形、移动或产生裂缝,影响隧道正常使用^[4]。衬砌结构病害会降低衬砌结构对围岩的承载能力,使隧道净空变小,侵入建筑限界,影响车辆安全通过;拱部衬砌掉块,影响行车及人身安全;裂缝漏水^[5]。

收稿日期:2018-02-10

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2016]2318);上海人才发展资金资助项目(2017055);上海市 2018 年技术标准专项项目(18DZ2202300)

作者简介:杨俊(1972—),男,高级工程师,研究方向为公路隧道检测养护。

通讯作者:刘笑娣(1990—),女,助理工程师,硕士,研究方向为公路隧道快速检测装备研发。

1.2 隧道渗漏水

公路隧道通常处于岩土层中,山体附近有地下水径流,因而地下水会经常渗透到隧道内,渗漏水造成的危害尤为普遍,工程界广泛流传着“十隧九漏”之说,渗漏水是隧道工程的一大顽疾^[6-7]。

主要危害:渗漏水促使混凝土衬砌风化、剥蚀,造成衬砌结构破坏;影响设备正常工作,缩短使用年限;引发路基下沉、基地裂损、翻浆冒泥等病害,寒冷地区还会产生冻害^[8-9]。

1.3 衬砌腐蚀

混凝土衬砌是一种非均质多孔材料,建在富含腐蚀性介质地区的隧道,隧道渗漏水对衬砌混凝土和砌石、灰缝产生物理性或化学性的侵蚀作用,造成衬砌腐蚀,背后形成空洞^[10]。衬砌腐蚀的危害主要有降低混凝土强度、降低衬砌承载能力、导致扣件腐蚀,缩短使用寿命,危及行车安全。

1.4 路面病害

我国公路路面结构多为沥青路面,具有表面平整、坚实、无接缝、行车舒适、耐磨、噪声低、施工期短、养护维修简便、能够吸水,且适宜于分期修建等优点。但公路路面常因隧道基底病害和渗漏水等引起路面的开裂、起拱、仰拱破碎、路面下沉、翻浆冒泥、边沟开裂等现象,且容易导致线路几何形态变化,严重危及行车安全^[11]。

1.5 隧道冻害

寒冷地区和严寒地区的隧道内水流和围岩积水冻结,引起隧道拱部挂冰、边墙结冰、洞内网线设备挂冰、围岩冻胀、衬砌胀裂、隧底冰锥、排水沟冰塞等病害。隧道冻害会导致衬砌冻胀开裂,疏松剥落,造成隧道衬砌结构的失稳破坏,降低衬砌结构安全可靠,严重影响运输安全和正常运行^[12]。

1.6 隧道有害气体

隧道运营过程中交通车辆、电器设备等释放出多种有害气体,隧道是一个闭塞空间,一般只有进出口与大气相通,有害气体不能很快消散,当积累的浓度超过一定值时会危害养护人员和机车车辆乘客人员的身体健康,腐蚀隧道内结构物、扣件设备,降低隧道内能见度,妨碍行车安全。

2 检测技术

隧道病害检测技术分为传统的人工检测和自动化检测技术。

2.1 人工检测方法

传统的检测方法主要以人工肉眼及人工仪器检测为主,这种检测方法对检测人员的技能要求较高,并在检测过程中存在一定的主观性,难以保证检测结果的准确性。同时,人工检测效率较低,无法满足维护要求,另外人工检测过程中也无法保证检测人员的安全。

2.1.1 肉眼检测

肉眼检测包括敲击法和人工观察两种。敲击法是人工激发振动,通过分辨敲击声来判断检测对象的结构状态。检测人员需要具备专业的经验做判断。人工观察即检测者沿着隧道结构表面行走,通过肉眼观察结构表面的裂缝位置、形状和程度,通过塞尺或者裂缝宽度对比卡测量裂缝宽度。对于小结构较为合适,但对于长大隧道,检测人员在短时间内不仅无法完成检测工作,也难以保证自身安全^[13]。

2.1.2 钻芯法

在隧道衬砌结构中钻取芯样,对芯样加工处理后进行抗压强度试验来确定隧道衬砌的实际抗压强度,一般用于隧道衬砌强度和裂缝的检测,并可对无损检测的结果验证^[14]。但由于钻芯时工作强度大、测试成本高、钢筋密集区取样困难;钻芯后需要对破损部位进行修补等原因,在实际应用过程中常遇到多种困难。

2.1.3 人工仪器检测

人工检测除了利用肉眼,还会利用一些测量仪器,如裂缝测宽仪、裂缝检测仪等。需要人工近距离聚焦、读取数据和记录数据,效率低、劳动量大,人工读取数据还会引起误差。

此外利用手持式病害记录仪进行巡检也是人工检测的方法之一,记录仪保存隧道内表面展开图,利用记录仪上的图像采集技术获得隧道病害图像,便于后期数据处理和参考^[15]。

2.2 自动检测技术

自动检测技术具有高效、客观、无损检测的优势,广泛应用于公路隧道检测。

2.2.1 脉冲响应法和冲击回波法

利用小锤在物体表面施加瞬时冲击荷载,产生应力波在物体上下表面来回反射,引起物体产生局部瞬时共振,通过传感器测得冲击点附近的响应信号来判断被测试物体的缺陷状况^[16]。

脉冲响应法和冲击回波法在隧道检测中存在一些问题,在检测隧道衬砌背后空洞时,仅对有、无空洞进行定性分析,对空洞大小及影响范围研究较少,缺乏有效的定量评价,故在隧道检测中应用较少。

2.2.2 基于摄像测量的自动检测技术

数字图像信息快速发展,因其高效、便捷、可保存等诸多优点广泛应用于公路隧道检测中,数字图像采集数据安全、全面,不会出现人为遗漏,对隧道病害的检测更加科学,数据采集完成后在采集的图像上进行分析研究。

摄像测量利用拍摄的图像计算三维空间中被测物体几何参数。图像上的每一个像素点通过灰度值来反映出空间物体表面点反射光强度,像素点在图像上的位置与空间物体表面对应几何位置关系有关。摄像测量法使用的图像装置主要为 CCD (charge coupled device) 工业相机,CCD 摄像机具有较高的动态范围、分辨率和灵敏度^[17],利用该相机在隧道检测过程中对隧道衬砌表面进行连续拍摄扫描,得到灰度图像,进而判断病害信息^[18-19]。

2.2.3 基于激光扫描的自动检测技术

激光扫描技术是一项全新的高科技立体扫描技术,具有全自动、高精度优势。利用激光测距原理,快速大量采集扫描目标物体表面点的三维坐标值、反射率、颜色信息,采集数据速度达到每秒几万点到几百万点,后期利用计算机处理数据,高效率地对被测物体进行建模。

激光扫描的自动检测技术是一种伴随激光技术发展而衍生的集光、机、电为一体的精密检测技术。检测方式是通过激光对空间内具有一定分辨率的云点进行连续扫描,将其组成点云图来表示目标物表面几何状态^[20]。

2.2.4 基于激光三角法的裂缝检测技术

基于激光三角法的三维视觉检测技术是激光视觉检测技术中较为常用的非接触测量技术,大多用于路面裂缝测量。检测原理如图 1 所示,由激光器产生线状光条,投射到被测物体表面,被测物体与检测平台存在高度差,打到物体表面的光条发生变形,利用 CCD 摄像机采集变形光条图像,通过对图像中变形光条信息的分析获得被测物体轮廓信息。光条投射到裂缝处发生变形,通过对变形光条图像的分析,获得被测路面轮廓信号,进而提取裂缝三维信息^[21]。

2.2.5 地质雷达检测技术

地质雷达是一种高分辨率的无损检测技术,广泛应用于隧道衬砌检测中。主要包括对衬砌质量检测,衬砌层与围岩之间的耦合情况以及隧道内围岩超挖、回填的情况^[22-23]。

地质雷达检测原理是通过发射器向围岩、衬砌发送脉冲形式的高频宽带电磁波,电磁波在介质传播过程中,遇到存在差异的目标时,电磁波在分界面处发生反射由雷达接收装置接收,对目标反射波进行处理分析得到目标的相关信息。如

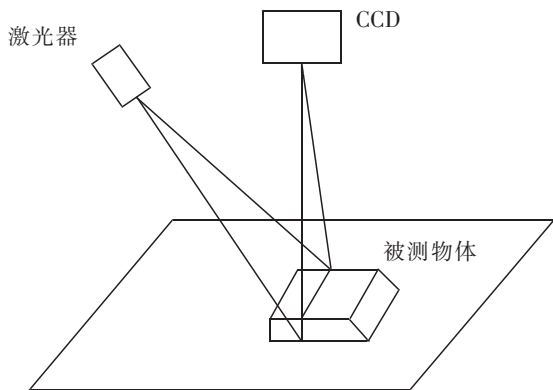


图 1 激光三角法测量原理图

Fig.1 Measurement principle of laser triangulation

果隧道材质特性方面发生变化,隧道可能存在漏水、渗水等病害,如果电磁波的传播周期受到影响,那么隧道的完整性可能产生了破坏,根据这些表象进行进一步的检测分析,有效地掌握隧道病害。

2.2.6 红外线温度场照相技术

红外线高温照相技术工作原理为:当隧道的墙体发射出辐射热的时候,红外线能够对墙体温度的分布情况进行记录。表面的温度一方面反映了热在墙体表面的流动,另一方面又影响了结构激励的终端,墙体表面温度场的中断又会反映出结构中的异常情况。在实际检测过程中,主要利用红外线照相机或扫描仪进行测量,此方法对温度的敏感性较强,故在冬季施工中此方法对隧道检测的效果较为显著。利用红外线高温照相技术主要确定不同温度下衬砌与围岩间水的流动、衬砌缺陷、衬砌背后地质条件的改变及空洞情况^[24]。

另外,2017年陈东生^[25]自主研发了爬壁机器人装置搭载CAS-S800地质雷达对隧道衬砌背后缺陷进行检测。利用光纤传感器和倾角传感器对结构变形,渗漏水传感器对渗漏水等进行实时监测,但利用传感器进行监测对技术要求较高,所需费用较多,布设难度较大。

3 国内外检测车研制

目前,国际上隧道检测技术分为接触式和非接触式两种,这两种技术都有各自的优点与不足。接触式隧道检测技术工作量大,检测效率低,只能测量数量有限的点,因此该检测技术不适用于动态检测,它的优点是使用成本低,操作简单,而且在静态测量的环境下精度较高。非接触式隧道检测技术的优点是效率高,检测人员的劳动强度低,检测自动化程度高,缺点是设备价格比较昂贵^[26],数据量大,后处理较为复杂。

3.1 国外检测车

3.1.1 日本

早期日本隧道检测代表系统为Komatsu,系统分为数据采集、数据存储和图像处理3部分,但该系统只能在夜间工作,没有得到广泛应用^[27],对于道路破损自动识别的发展具有重大推动作用。

图2为日本计测检测株式会社推出MIS&MMS隧道检测系统,由车体以及MIS(mobile imaging technology system)与MMS(mobile map system)两个检测系统组成。MIS检测系统由16台CCD相机及18+6台LED照明设备组成,图像光学分辨率为0.2 mm,可同时识别渗漏水 and 0.2 mm以上的裂缝。MMS系统配有激光扫描仪、数码相机、编码器及GPS定位系统。近年来,日本计测检测株式会社又将三维可视化技术应用于隧道检测,综合评价隧道病害,通过采集的图像进行合成,对衬砌背后空洞、内部欠缺无损进行无损检测。裂缝检测精度可达0.2 mm,检测时速5~50 km/h。

3.1.2 德国

图3所示为SPACETEC TS3三维激光红外车载检测系统。TS3采集的图片更清晰,对衬砌部位0.2 mm以上的裂缝均能准确识别,可对病害的发展进行对比,检测系统安装灵活性大,能够安装在任何足够安放扫描仪和操作平台空间,但检测速度相对较慢,适用于隧道定期检测和专项检测^[28]。

检测功能:在一次扫描记录过程中完成对隧道表面的摄像,热成像记录和三维测量工作。利用激光和红外线对隧道的变形、衬砌开裂、渗漏水、露筋、掉块进行非接触无损检测;以5 km/h的检测速度进行全幅(360°)检测;利用带有三维

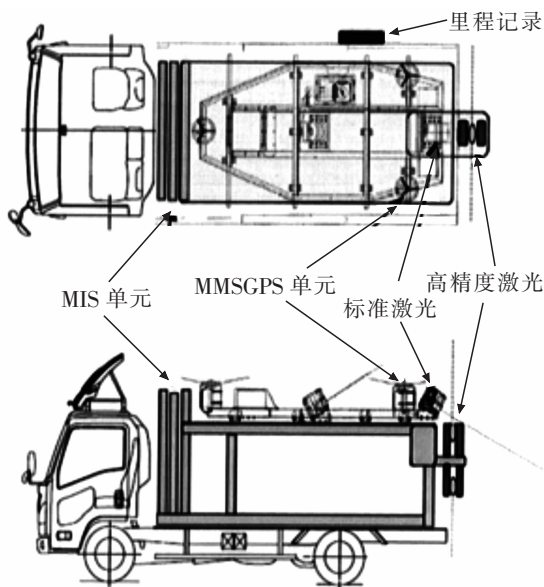


图2 日本 MIS&MMS 系统
Fig.2 Japanese MIS & MMS system

坐标的图片及红外温度图像进行数据处理;检测一次扫描完毕后可得到整个隧道的断面尺寸,用于判断隧道净空尺寸与设计断面尺寸及建筑限界的相关关系,进一步确保隧道内行车安全。

3.1.3 加拿大

图 4 所示为 Roadware 公司研制的 ARAN 多功能检测车。ARAN 检测车配备纵向断面测量系统,通过采集的数据计算出国际平整度指数;定位定向系统为其他车载测量子系统提供精确的横滚角、偏航角、俯仰角速度和位置信息;使用扫描激光传感器测量道路的横断面;利用 CAD 和 GIS 技术变换为地图,还可用来测定地球空间的三维坐标^[29];对道路路况进行录像,两台像素 1 920×1 080 的摄像机可以在同一时间从多角度记录图像,还可以编辑路产清单,将路面病态进行分类;对路面状况进行评价,两台单色数码相机 ARAN 路面摄像系统达到分辨裂缝 2 mm 的要求^[30]。



图 3 德国 SPACETEC TS3 检测系统

Fig.3 SPACETEC TS3 detection system of Germany



图 4 加拿大 ARAN 道路检测车

Fig.4 ARAN road inspection vehicle of Canada

3.1.4 英国

英国的 MRMS 多功能检测车主要用于道路路面检测,配备 GPS 全球定位系统和 GIS 地理信息系统进行地理信息采集定位,包括路面横向纵向平整度数据采集、路面纹理图像采集、道路弯曲角度采集以及道路坡度采集。通过摄像机进行模拟信号拍摄道路图像信息,将模拟信号转换为数字信号再进行计算机处理,导致图片的识别准确度不高^[31]。

3.1.5 澳大利亚

道路信息检测系统 Road Crack,澳大利亚公路研究局开发的数字图像系统由 3 个路况相机和 1 个路面摄像机组成。路面摄像机为 570 线的黑白摄像机。该数字图像系统的检测速度可以达到 100 km/h,路面破损由操作员在室内进行分析识别,人工识别的工作量较大,而且路面图像的分辨率较低^[32]。

3.1.6 法国

法国 HGH 红外系统公司研发的 ATLAS 70 多传感器隧道检测系统包含多种传感器和软件系统,用以诊断隧道衬砌情况。系统主要包括激光扫描仪和红外线扫描仪,运用激光扫描仪完成 270°范围内的扫描任务,红外扫描仪可检查 0.02 °C 的温差,ATLAS 70 隧道检测系统可探测隧道衬砌裂缝、渗漏水、衬砌剥落病害。

该系统可探测距离 6 m 且与背景的区别超过 30%时识别裂缝精度为 0.1 mm;图像信号通过信号优化、信号线性和图像处理进行业内处理,需要专业技术人员对裂缝进行识别。

3.1.7 韩国

韩国检测技术研究所研发的隧道裂缝检测车,利用 CCD 可见光成像技术检测隧道裂缝,并可对隧道表面进行录像,对隧道衬砌病害如龟裂、渗漏水、剥落等进行检测。检测车对隧道表面进行实时拍摄,生成静止图像,但检测系统对照明要求较高,数据处理过程较为复杂,无红外线成像。

3.2 国内检测车

3.2.1 上海同岩土木工程科技股份有限公司

上海同岩土木工程科技股份有限公司研发的公路隧道智能检测车 TDV-H2000,如图 5 所示检测车以

底盘车为平台,装载多种高精度测量装置的车载一体化隧道快速检测系统,可连续、动态、完备地采集隧道病害和轮廓断面信息,用于隧道定期检查作业。在后台自动进行数据分析、自动识别测量获得隧道衬砌的裂缝、剥落、渗漏水、露筋等表观病害的几何参数及状况,实时显示衬砌裂缝、渗水图像和激光点云数据,真正实现对公路隧道结构轮廓的快速非接触无损数据采集及数据自动化处理。

TDV-H2000 技术指标:

- 1) 裂缝宽度识别精度可达 0.2 mm;
- 2) 衬砌剥落、渗水等区域病害识别提取面积计算精度可达 1 cm²;
- 3) 检测车行驶速度为 0~80 km/h,无需车辆跟随或道路押车;
- 4) 激光测距分辨率 0.1 mm,隧道轮廓扫描精度 ± 1 cm;
- 5) 采用红外成像技术,照明系统以红外灯光为主,可支持检测车昼夜环境下作业,不受外界光环境影响,同时不影响相邻车道行车安全,采集图片清晰稳定;
- 6) 采集系统和数据处理软件均为中文操作界面,分析结果有病害展布图、病害 CAD 分布图、Word 报告、隧道轮廓断面扫描图、隧道三维点云图等;
- 7) 两车道隧道全幅一次作业采集完成,三、四车道隧道全幅两次作业采集完成,对于三、四车道隧道检测作业时不需调整参数,即可确保采集数据 100%完整,裂缝宽度识别精度可达 0.2 mm;
- 8) 内业处理效率高,每人每天可独自处理 5 km 隧道数据,并出具完整检测报告。

3.2.2 南京理工大学

“JG-1 型激光三维路面状况智能检测系统”是由南京理工大学于 2004 年研发的国内首台道路识别检测车,检测速度可达 70 km/h,对路面各种病害进行实时有效的检测^[33]。2009 年南京理工大学与南京比奇科技有限公司联合研发出“N-2 型激光综合检测系统”,促进了公路隧道自动检测在国内的发展^[34]。

该系统主要包括数据采集和后期图像处理两部分,可对道路的车辙形状和深度进行精确测量,但采集的图像数量较少,检测精度需要进一步提高。

3.2.3 同济大学

同济大学于 2012 年开发出针对山区隧道衬砌病害集成的检测车,包括 CCD 线阵相机、红外摄像机以及探测雷达等设备,可同时对裂缝、渗漏水及空洞进行检测,裂缝识别精度为 0.3 mm,检测速度为 5 km/h,但该检测车多次往复检测才可完成隧道全断面检测工作。

3.2.4 哈尔滨工业大学

哈工大畅道道路检测车是哈尔滨工业大学研制的一款多功能道路检测车。该检测车结合航天导线技术与激光反射测速技术实现了路面平整度的检测研究,并且根据道路车辙在实景中的物理特征进行车辙形状自动测量识别,有效解决平整度长时间连续测量的时间漂移难题。采用高清晰摄像机并使用高强度补光设备,实现全天候数据采集,对路面裂缝、坑槽、断裂、路面积水等病害进行识别管理,系统同时配备采集数据的分析管理系统,对道路病害信息进行统计分析 & 查询^[35]。

3.2.5 武汉武大卓越科技有限公司

图 6 所示为武大卓越科技有限公司的 ZOYON-TFS 隧道快速检测系统以中型卡车作为车载平台,在平台上安装多个精密传感器,通过无损检测方式,一次通行完成全部隧道综合数据采集,该系统以 0~80 km/h 速度对隧道进行动态连续检测。

ZOYON-TFS 系统功能:GPS/INS 组合定位测量,衬砌裂缝检测,衬砌漏水、漏水、脱空检测,衬砌形变检



图 5 上海同岩公路隧道检测车

Fig.5 Highway tunnel inspection vehicle of Shanghai TYGEO

测,隧道通风监测(可加),隧道亮度检测(可加)。

ZOYON-TFS 技术指标:检测速度 0~80 km/h;定位精度小于 1 m;裂缝精度 0.2 mm。

3.2.6 北京雷德华澳检测技术有限公司

雷德华澳检测技术有限公司检测车系从日本引进,检测车以机动车为平台,装备先进的传感器、线性照相机、车载计算机等同步单元设备,如图 7 所示。在车辆正常行驶状态下,能自动完成对隧道裂缝、渗水、剥落等外观病害进行数据采集并检查。

系统功能:针对隧道的外观病害进行检测,包括裂缝、渗水、剥落游离石灰、拥包等病害,后期处理软件用途广泛,可自动进行数据处理。

技术指标:检测速度 0~80 km/h;画面采集宽度 4 m;GPS 定位精度±0.2%、水平精度 1.2 m;最小识别裂缝 0.2 mm。



图 6 武汉武大卓越公路隧道检测车

Fig.6 Highway tunnel inspection vehicle of Wuhan ZOYON



图 7 北京雷德华澳检测车

Fig.7 Inspection vehicle of Beijing LDHA

表 1 列出了国内外主要检测装备概况,对设备、检测项目以及检测精度进行了对比。

表 1 公路隧道检测设备概况

Tab.1 Overview of highway tunnel inspection equipment

设备名称	产地	设备描述	检测项目	检测精度	检测速度/(km/h)
公路隧道检测车	日本检查测量株式会社	16 台 CCD 摄像机、三维可视化技术	隧道表面平整度、龟裂、渗漏水;对衬砌背后空洞、内部欠缺进行无损检测	裂缝宽度 0.2 mm	5~50
SPACETEC TS3 检测系统	德国 SPACETEC 公司	三维激光红外线车载系统 360°无损检测	隧道变形、衬砌开裂、渗漏水、露筋、掉块	裂缝宽度 0.2 mm	5
ARAN 多功能检测车	加拿大 Roadware 公司	配备纵向断面测量系统、定位定向系统、扫描激光传感器、摄像机	主要检测路面病害	裂缝宽度 2 mm	—
TYGEO-TS 系统公路隧道检测车	上海同岩土木工程科技股份有限公司	自主研发的 TYGEO-TS 隧道检测系统,装有 CCD 工业相机和三维激光扫描仪	衬砌裂缝检测、结构破损;墙身施工缝检测;路面检测;检修道毁坏、盖板缺损检测;内装饰检测;洞口山体滑坡、岩石崩塌征兆(可加);洞门墙身裂缝、结构检测(可加);环境检测(可加)	图像分辨率 0.1 mm 裂缝宽度 0.2 mm 表面病害面积误差 1 cm ² 激光测距 0.1 mm 轮廓扫描±1 cm	0~80
公路隧道检测车	武汉武大卓越科技有限公司	ZOYON-TFS 隧道快速检测系统	GPS/INS 组合定位测量;衬砌裂缝检测;衬砌漏水、漏水、脱空检测;衬砌形变检测;隧道通风监测(可加);隧道亮度检测(可加)	定位精度 1 m 裂缝精度 0.2 mm	0~80
隧道智能检测设备	北京雷德华澳检测技术有限公司	以机动车为平台,装备先进的传感器、线性照相机、车载计算机	隧道裂缝、渗水、剥落等外观病害进行数据采集并检查	画面采集宽度 4 m GPS 定位精度±0.2% 水平精度 1.2 m 裂缝宽度0.2 mm	0~80

4 结论与展望

经过多年持续不断的发展与工程应用,公路隧道检测车得到不断的改进和完善,高效快速检测隧道病害,为公路隧道的运营养护提供数据支持。

1) 公路发展迅速,隧道得到广泛应用,但隧道所处环境复杂,在运营过程中会出现渗漏水、衬砌破损、路面开裂等病害,严重危及行车安全,如何准确高效地检测出隧道病害是公路养护工作的重要前提。

2) 公路隧道检测技术通过多年的发展,由传统的人工检测转变为高效智能检测,利用摄像机技术、激光扫描技术、红外线高温摄像及地质雷达等技术对隧道病害进行非接触无损检测,排除人工检测的主观偏差。

3) 国内外公路检测车发展迅速,现代检测车将检测技术集成于一体,针对隧道病害进行快速检测,并对检测得到的数据进行自动化处理,大大提高了隧道检测的效率,为公路隧道的运营养护提供了强有力的保障。

目前公路隧道检测车主要集中在表观病害检测,对衬砌背后的空洞、渗漏水等病害检测较少。如何利用声振法、基于地质雷达检测等技术对衬砌背后的病害进行非接触、快速无损检测是当前隧道检测的未来发展方向之一,虽然目前此类技术还在研究阶段,但随着技术发展,应用高新技术检测衬砌背后病害会逐渐应用于公路隧道检测中。

参考文献:

- [1] 王春景,雷明锋,彭立敏. 病害隧道结构安全性评价模型与方法[J]. 铁道科学与工程学报,2011,8(3):73-77.
- [2] 赖金星,邱军领,潘云鹏,等. 盾构隧道管片裂缝病害的综合监测与分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(2):186-191.
- [3] 马建,孙守增,赵文义,等. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报,2015,28(5):1-65.
- [4] 王平让,黄宏伟,薛亚东. 隧道衬砌裂缝自动检测性能影响因素模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(8):1705-1714.
- [5] 卢颖明,陈礼伟. 既有隧道病害现象分类及原因分析[J]. 铁道建筑,2010(11):46-49.
- [6] 张素磊,丰权章,应国刚,等. 公路隧道渗漏水成因及新型排水材料现场试验研究[J]. 公路交通科技,2013,30(10):86-140.
- [7] AJ H. Report on the damaging effects of water on tunnels during their working life[J]. Tunnelling & Underground Space Technology,1991,6(1):11-76.
- [8] 丁兆民,杨晓华. 某黄土隧道病害原因分析及处治措施[J]. 工程地质学报,2009,17(1):138-144.
- [9] WANG W,LLAO S C,DING P,et al. Analysis of tunnel defect characteristic caused by cavities behind lining[J]. Advanced Materials Research,2011,261-263:1265-1269.
- [10] 江星宏,闫明超,曾鹏,等. 高铁隧道复合衬砌脱空统计分析与防治[J]. 华东交通大学学报,2015,32(6):8-13.
- [11] TIONG P L Y,MUSTAFFAR M,HAININ M R. Road surface assessment of pothole severity by close range digital photogrammetry method[J]. World Applied Sciences Journal,2012,19(6):867-873.
- [12] 邱军领,赖金星,张广龙,等. 季节性寒区隧道主动加热保温防冻方法及其试验[J]. 地下空间与工程学报,2017(4):982-987.
- [13] 邓涛,杨林德,夏才初,等. 基于超声回弹综合法的公路隧道混凝土衬砌的强度检测[J]. 混凝土,2005(12):80-84.
- [14] 张智. 钻芯法与回弹法在隧道衬砌强度检测中的应用分析[J]. 铁道建筑,2014(5):60-62.
- [15] 杨玲芝,方恩权. 轨道交通隧道结构病害检测技术综述与发展趋势[J]. 都市快轨交通,2017,30(1):20-25.
- [16] DAVIS A G,LIM M K,PETERSEN C G. Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods[J]. Ndt & E International,2005,38(3):181-186.
- [17] 王荣本,王超,初秀民. 路面破损图像识别研究进展[J]. 吉林大学学报:工学版,2002,32(4):91-97.
- [18] YU S N,JANG J H,HAN C S. Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel[J]. Automation in Construction,2007,16(3):255-261.

- [19] BANG YEON LEE, YUN YONG KIM, SEONG TAEYI, et al. Automated image processing technique for detecting and analysing concrete surface cracks[J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2013, 9(6): 567–577.
- [20] 李成林. 基于激光测距的隧道断面监测系统[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [21] 杨露, 蒋雅君, 刘会钢, 等. 建立既有隧道衬砌表面检测坐标系的初步研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S2): 792–797.
- [22] 雷坚强. 公路隧道二次衬砌混凝土厚度及密实性试验研究[J]. 公路, 2016(2): 201–208.
- [23] 杨艳青, 贺少辉, 齐法琳, 等. 铁路隧道衬砌地质雷达非接触检测模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1761–1771.
- [24] 王薇, 向延念. 无损检测及其在隧道病害检测中的应用[J]. 铁道工程学报, 2001, 18(3): 85–88.
- [25] 陈东生. 一种基于爬壁机器人装置的隧道检测方法[J]. 铁道建筑, 2017(5): 49–82.
- [26] 胡忠林, 齐英杰, 白璐. 国外公路路面、隧道检测车发展概况[J]. 林业机械与木工设备, 2016, 44(5): 4–7.
- [27] 李莉, 孙立军, 谭生光, 等. 用于路面车辙检测的线结构光图像处理流程[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(5): 710–715.
- [28] 王平让. 隧道病害快速检测技术现状及分析比较[J]. 公路与汽运, 2016(3): 241–245.
- [29] 王建锋, 马建, 马荣贵, 等. 路面三维检测技术研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2010, 34(6): 1202–1205.
- [30] 张智, 王奎学. 多功能道路综合检测车的应用[J]. 施工技术, 2011(S1): 204–207.
- [31] 王金洋. 车载式道路破损自动识别系统[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [32] 曹建农, 许素素, 李长青. 路面裂缝自动识别与测量[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(3): 17–22.
- [33] 贺安之, 徐友仁, 贺宁, 等. 路面状况激光三维智能检测车: CN1548653[P]. 2004.
- [34] 赵珊. 路面车辙检测系统中结构光三维测量技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [35] 黄建平. 基于二维图像和深度信息的路面裂缝检测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

Review of Rapid Test Vehicles for Highway Tunnel Structure

Yang Jun¹, Liu Xiaodi^{2,3}, Liu Xingen^{2,3}, Zhang Ping¹, Peng Fei⁴

(1. Guizhou Expressway Group Co., Ltd., Guiyang 550004, China; 2. Shanghai Tongyan Civil Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Detecting Equipment for Underground Infrastructure, Shanghai 200092, China; 4. Shanghai Tongji Testing Technology Co., Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract: The phenomenon of highway tunnel disease is inevitable during daily operation. Traditional detection methods mainly relying on manual detection are characterized by low detection efficiency and obvious subjectivity in test results. At the same time, it is difficult to guarantee the safety of the detector. With the rapid development of highway in our country, traditional detection methods can no longer meet the needs of highway operation and maintenance, then the rapid non-destructive detection was introduced at the right moment. At present, a variety of highway tunnel inspection vehicles have been developed to detect tunnel diseases efficiently and accurately and can automatically process data with supporting software. Highway tunnel inspection has such advantages as high degree of automation, rapid detection speed, high accuracy, objective results, full coverage and so on. This paper summarizes the highway tunnel detection technology to explore the development of highway tunnel disease inspection vehicles in China.

Key words: highway tunnel; tunnel diseases; detection technology; highway tunnel inspection vehicle