

城市在役隧道渗漏水联合检测方法与智能分析

何磊

同济大学土木工程学院地质与水利工程系 上海 200092

【摘要】：随着我国隧道建设规模的不断扩大，在役隧道的渗漏水病害日益突出，传统人工检测方式效率低、风险高。本文提出一种分布式光纤与轨道机器人联合的隧道渗漏水检测方法，通过光纤实时监测温度异常定位渗漏点，再由轨道机器人搭载红外热成像仪进行定点成像与智能识别。开展了现场试验，结果表明该方法可有效识别渗漏位置及严重程度；结合基于红外图像的渗漏水分级程序，实现了渗漏水的自动化评估。研究成果为隧道智能化检测提供了新思路。

【关键词】：在役隧道；渗漏水检测；分布式光纤；轨道机器人；红外热成像；智能分析

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.009

1 引言

1.1 研究背景与意义

截至2024年底，我国隧道总数超过35000座，总里程逾3700万米，已跃居世界前列。然而，随着隧道服役年限增加，渗漏水、衬砌裂缝、仰拱变形等病害频发，其中渗漏水是最普遍且危害最大的病害之一。据董飞等对北京5条地铁线路112.7km盾构区间的统计，渗漏水病害占比高达64.95%；刘亚江对北京12条地铁线路41个盾构区间的统计分析显示，渗漏水占比超过70%；刘德军等对上海地铁1、4、9、10号线的调研同样表明，渗漏水发生率远高于其他病害^[1-3]。渗漏水不仅加速衬砌腐蚀、降低结构耐久性，还会引发路面积水、冻害等次生灾害，严重影响行车安全。北方寒冷地区渗漏水冻结成冰溜、冰锥，可能导致衬砌冻融破坏；腐蚀性地下水会加剧钢筋锈蚀，威胁结构安全^[4]。

目前隧道渗漏水检测仍以人工巡检为主，即依靠人眼观察和简单仪器测量。这种方法对检测人员技术要求高，且需在行车间隙进行，危险性大，效率低下。随着隧道里程增加和通行量提升，人工检测已难以满足运维需求。近年来，传感器检测、数字照相、激光扫描等自动化检测技术发展迅速，但单一技术难以兼顾实时性与全面性：分布式光纤可连续监测温度变化，但无法直观反映渗漏水形态；轨道机器人可高精度成像，但无法实现全隧道实时覆盖；检测车虽能快速采集表面信息，但受使用频率限制，难以实时监测，且无法深入衬砌背后或狭小空间^[5]。因此，将多种技术优势互补，构建“全域监测+定点详查”的联合检测体系，成为解决上述问题的有效途径。

针对上述问题，本文提出采用加热光纤增强温度信号，并联合轨道机器人搭载红外热成像仪进行定点详查，同时开发图像识别程序实现渗漏水自动化分级，旨在为隧道渗漏水检测提供一种高效、智能的解决方案。

2 联合检测系统设计

2.1 系统总体框架

联合检测系统由分布式光纤测温模块、轨道机器人模块、

云端处理平台三部分组成，其工作流程如图1所示。光纤沿隧道纵向全线布设，实时监测温度数据并上传至云端；当检测到温度异常（局部低温）时，云端解算出异常点坐标并发送给轨道机器人；机器人自动运行至目标位置，利用搭载的可见光与红外热成像相机拍摄图像；图像上传至云端后由渗漏水识别程序进行分级，结果通过短信通知管理人员，以便采取相应治理措施。

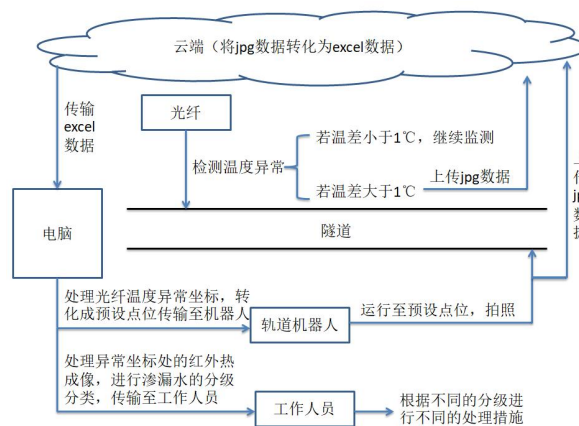


图1 系统工作流程图

2.2 分布式光纤测温模块

分布式光纤测温系统基于拉曼散射原理：激光脉冲在光纤中传播时产生背向拉曼散射光，其中反斯托克斯光强度对温度敏感，通过测量反斯托克斯光与斯托克斯光强度的比值，即可得到光纤沿线的温度分布^[6]。系统由传感光纤、解调仪和上位机组成。解调仪通过网线与电脑连接，采样间隔可设置为1m，测温精度±0.5℃，空间分辨率1m。

为提高渗漏水检测灵敏度，本研究采用加热光纤。加热光纤是在普通光纤外包裹导电层，通电后使光纤整体升温，渗漏水点因水流冷却而呈现更明显的低温异常。加热功率可调，一般将光纤加热至高于环境温度20~30℃，使温差放大至10℃以上，显著增强信号可辨性。现场试验中，加热光纤稳定温度约56℃，与环境温差约40℃，渗漏水温差达8~12℃，效果显著。

2.3 轨道机器人成像模块

轨道机器人采用悬挂式单轨结构，沿隧道壁安装的工字钢轨道运行。机器人主体由驱动单元、控制单元和成像单元组成（图2）。驱动单元通过带齿轮的钢条与轨道啮合，可实现前进、后退及预设点位停靠；控制单元接收云端指令，控制机器人运动与相机动作；成像单元搭载高分辨率可见光相机（200万像素）与红外热成像仪（384×288像素，测温精度±2℃，热灵敏度<0.05℃），支持360°旋转，可多角度拍摄。



图2 轨道机器人

机器人预设多个点位（如每隔60cm一个），支持一键巡航模式。当接收到光纤异常坐标后，系统自动将坐标转换为最近的点位编号，机器人运行至该点位后自动调整相机角度进行拍摄，并将图像实时上传。

2.4 渗漏水分级与图像识别方法

针对打浦路隧道现场渗漏水特征，参考国内外规范^[7-8]并结合实际观测，将渗漏水分为6级：

- B级：无渗漏水，边墙干燥；
- A级：边墙有肉眼可见的湿润现象；
- 2A级：边墙有水的流动现象；
- 2A I级：边墙有水的流动现象，伴有黄泥渗出；
- 2A II级：边墙有水的流动现象，伴有白色晶体析出；
- 3A级：边墙有水的喷出现象（现场未见）。

为实现自动化分级，基于Python与OpenCV开发红外图像识别程序。其原理为：红外热像仪输出的伪彩色图像中，低温区域通常呈现蓝色或深色，因此可通过颜色分割提取低温像素。首先将RGB图像转换为HSV格式，设定蓝色调的范围（H:100~124, S:43~255, V:46~255），遍历图像每个像素，统计满足条件的像素数，计算低温面积占比P。根据大量样本统计分析，设定分级阈值：P<20%为B级，20%≤P<60%为A级，P≥60%为2A级。对于2A I和2A II级，需结合可见光图像识别黄泥或晶体，暂未纳入自动识别，留待后续完善。

3 现场试验

3.1 工程概况

依托上海打浦路隧道老线开展现场试验。该隧道1971年建成通车，全长2780m，采用盾构法施工，衬砌为钢筋混凝土管片。隧道已运营近50年，渗漏水病害普遍，2019年检测报告显示其结构服役状态为III级（性能劣化），具有典型代表性。隧道内部有电缆通道（暗线）和车行道侧墙（亮线）两种典型断面，便于铺设光纤与轨道。

3.2 光纤现场试验

3.2.1 试验方案

在暗线和亮线各布设400m加热光纤。暗线位于隧道底部电缆通道，环境温度较稳定；亮线位于车行道侧墙，受行车影响较大。光纤沿隧道纵向紧贴壁面布设，用专用夹具固定。连接解调仪与电源，分别采集常温状态和加热稳定状态（56℃）下的温度曲线，对比分析异常点。

3.2.2 试验结果

暗线常温下平均温度15℃，温度曲线整体平稳（图3）。放大纵坐标后，188m处出现明显低温，比周边低约2℃。加热稳定后，温度曲线整体抬升至56℃，多处出现显著低温谷：130m处温差6℃，188m处温差10℃，256m处温差8℃，316m处温差5℃，320m处温差7℃，360m处温差9℃（图4）。异常点位置与常温检测基本吻合，但温差更大，更易识别。降温过程中，异常点坐标不变，进一步证实其为渗漏点。亮线因光纤打结仅有效布设300m，常温下在229m和244m处发现低温异常，温差约2~3℃，加热后因线路故障未成功升温。

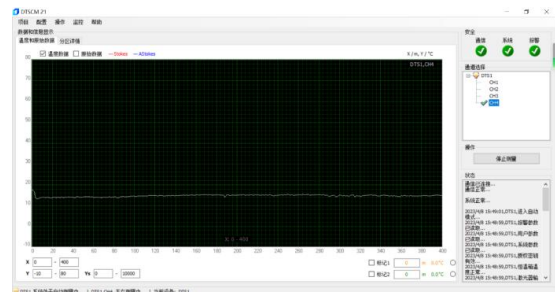


图3 正常温度下光纤温度曲线

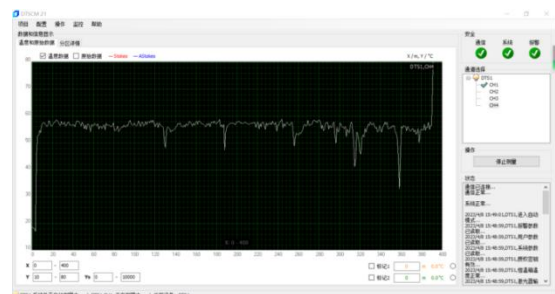


图4 高温状态下光纤温度曲线

3.2.3 分析与讨论

现场试验表明,加热光纤将渗漏引起的温差由 2~3°C 放大至 5~10°C,显著提高检测灵敏度。暗线中多个异常点经后续目视确认存在渗漏痕迹(如湿渍、钙化物),验证了检测结果的可靠性。亮线故障提醒我们,现场布线需保证光纤完好,避免过度弯折。

3.3 轨道机器人现场试验

3.3.1 试验方案

在隧道内选择一段典型渗漏区段(约 10m 长),安装 6m 长轨道,机器人搭载可见光与红外相机。将机器人接入现场网络,通过 CMS 软件远程控制。选取 3 个已知渗漏点,指令机器人运行至对应位置拍摄,并与人工目视结果对比。

3.3.2 试验结果

机器人顺利运行至各预设点位,拍摄图像清晰。图 5 为某一渗漏点的红外图像,可见深色低温带沿接缝分布,与周边形成鲜明对比;可见光图像显示边墙湿润,有黄泥渗出(对应 2A I 级)。将红外图像输入识别程序,计算低温面积占比为 32.6%,判定为 A 级(实际应为 2A I 级,因程序暂未区分黄泥,故输出 A 级)。人工复核认为,该处渗漏为流动且有黄泥,应属 2A I 级,但低温面积确实不大,程序判定 A 级也合理,说明单靠低温面积难以完全反映渗漏特征,需结合可见光信息。

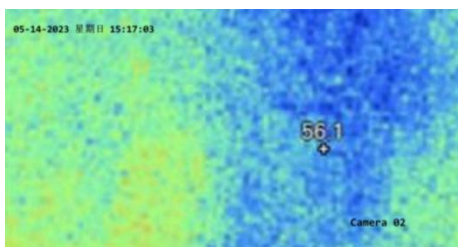


图 5 渗漏点红外热成像图

另一处渗漏点红外图像低温占比达 78%,程序判定 2A 级,现场为明显流水,符合预期。第三处渗漏点低温占比 15%,程

序判定 B 级,现场仅轻微湿润,肉眼不易察觉,红外却捕捉到微弱低温,说明红外对早期渗漏敏感。

3.3.3 分析与讨论

现场试验验证了轨道机器人在真实隧道环境中的可行性,红外成像能有效识别渗漏区域,识别程序与人工判断基本一致。但程序仅依据低温面积分级,对伴有黄泥、晶体的渗漏无法细分,需后续融合可见光图像进行多模式识别。

4 结论与展望

4.1 结论

本文提出并验证了分布式光纤与轨道机器人联合检测隧道渗漏水的方法,主要结论如下:

1. 设计了“光纤全域监测+机器人定点成像”的联合检测系统,实现渗漏实时监测与精细成像一体化,解决了单一技术覆盖不全或信息不足的问题。

2. 采用加热光纤显著提升温度异常信号,试验温差达 10~15°C,定位精度达米级,较普通光纤更易识别渗漏点。

3. 红外热成像能清晰显示渗漏区域低温特征,结合基于 HSV 颜色空间的图像识别程序,可实现渗漏等级自动化判定(B/A/2A),准确率满足工程需求。

4. 现场试验成功应用于打浦路隧道老线,验证了系统在实际环境中的可行性与可靠性,并针对不同渗漏等级提出了治理建议。

4.2 展望

本研究尚存在以下不足:轨道长度有限,仅验证短距离检测,长隧道需多台机器人接力;机器人电源依赖现场接线,稳定性有待提高;图像识别程序未融合可见光信息,无法细分黄泥、晶体等类型。后续可在更长隧道中部署,并探索联合检测方法在大坝、矿道等领域的推广应用。随着人工智能与物联网技术的发展,此类智能化检测系统有望全面替代人工巡检,提升隧道运维的安全与效率。

参考文献:

[1] 董飞,房倩,张顶立,等.北京地铁运营隧道病害状态分析[J].土木工程学报,2017,50(6):104-113.
 [2] 刘亚江.北京害下结构安全及行车动力特性研究[D].北京交通大学,2019.
 [3] 刘德军,仲飞,黄宏伟,等.运营隧道衬砌病害诊治的现状与发展[J].中国公路学报,2021,34(11):178-199.
 [4] 张学文.运营期地铁隧道常见结构病害成因及治理方法研究[D].南京:南京大学,2014.
 [5] 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].都市轨道交通,2017,30(1):20-25,76.
 [6] 肖衡林,周锦华.渗漏监测技术研究进展[J].中国水运(学术版),2007(2):87-91.
 [7] JTG H12—2015 公路隧道养护技术规范[S].北京:人民交通出版社,2015.
 [8] JGJ/T 212—2010 地下工程渗漏治理技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.