引文格式：贾东远,潘志权,张薇,等. 基于主被动传感器集成的输水隧洞检测系统研发[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 53-56. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.11.010

基于主被动传感器集成的输水隧洞检测系统研发

贾东远[1]，潘志权[1]，张　薇[1]，周　坤[1]，陈晨咏[2]
（1. 广东粤港供水有限公司，广东 深圳 518021；2. 粤海水资源工程研究中心（广东）有限公司，广东 深圳 518021）

摘　要：输水隧洞是大跨度调水工程、水资源配置工程、大型水库和水利发电站的重要基础设施，输水隧洞内部环境和沿线地形特征较复杂，在长期运行过程中可能产生裂缝、渗水、淤积、侵蚀或粉化流失等工程病害，若发现不及时可能带来灾难性后果。传统人工检测方法难以满足大规模、长距离、快速、智能的检测需求，因此提出了一种基于主被动传感器集成的输水隧洞检测系统；并在某水利工程输水隧洞对该系统进行实验测试。结果表明，该系统可用于输水隧洞表面图像采集，并为后续病害检测处理提供可靠数据，有望提高输水隧洞病害检测的效率和智能化水平。

关键词：输水隧洞；工程病害；主被动传感器；图像采集
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0053-04

Research and Development of Water Conveyance Tunnel Inspection System Based on Active and Passive Sensor Integration

JIA Dongyuan[1], PAN Zhiquan[1], ZHANG Wei[1], ZHOU Kun[1], CHEN Chenyong[2]
(1. Guangdong Water Supply Company for Hong Kong and Macao, Shenzhen 518021, China;
2. Yuehai Water Resources Engineering Research Center (Guangdong), Shenzhen 518021, China)

Abstract: The water conveyance tunnel is an important infrastructure for large-span water diversion projects, water resource allocation projects, large reservoirs and hydroelectric power stations. The internal environment of water conveyance tunnel and the terrain along the line are complex. During the long-term operation of tunnel, engineering diseases such as crack, seepage, sedimentation, erosion or powdering loss may occur. If not detected in a timely manner, it may bring catastrophic consequences. However, traditional manual detection method is difficult to meet the needs of large-scale, long-distance, fast and intelligent detection. To address the above issues, we proposed a water conveyance tunnel inspection system based on active and passive sensor integration, and conducted experimental testing on the system in a water conveyance tunnel of water conservancy project. The results show that the system can be used for surface image collection of water conveyance tunnel, and provide reliable data for subsequent disease inspection and processing, which is expected to improve the efficiency and intelligence level of water conveyance tunnel disease inspection.

Key words: water conveyance tunnel, engineering disease, active and passive sensor, image collection

输水隧洞是大跨度调水工程 、水资源配置工程、大型水库和水利发电站的重要基础设施，是国家水网建设的重要组成部分。健康稳定运行的输水隧洞是水利工程安全生产的基础[1]。输水隧洞内部环境错综复杂，管径和流量流速较大，沿线地形特征复杂，地势高低起伏变化大。由于长时间受到隧洞内外部压力和水文地质等方面的综合影响，隧洞在长期运行过程中可能产生裂缝、渗水、淤积、衬砌破损、泌钙、侵蚀或粉化流失等工程病害，若不及时处置可能带来灾难性后果。其安全状况直接关系到水利设施的安全运行，进而影响人民生活和社会经济的稳定发展[2]。

传统的输水隧洞病害检测通常在停水检修期间放空状态下采用人工巡查的方式查找工程病害并进行处置。该方法的缺点包括：①隧洞光照条件差、照明度不均匀，甚至无照明设备，不利于可见光成像观测；②洞内常见渗漏水、射水、瀑布、流水，地面湿滑，工作环境复杂，甚至存在危险；③缺乏控制网支撑，全球定位系统（GPS）在输水隧洞中无法接收信号，无法对发现的病害情况进行精确定位、测量；④需要搭设大型移动脚手架进行高空作业，在陡倾和直立条件下很难开展检测，安全风险大、效率低下且成本高。因此，传统人工检测法难以满足大规模、长距离、快速、智能的检测需求。随着摄影测量、三维激光扫描、全球卫星导航系统（GNSS）和惯性测量单元

收稿日期：2023-10-07。
第一作者简介：贾东远（1991—），工程师，从事智慧水利工作，E-mail：1026052537@qq.com。

（IMU）在水利行业的推广应用，采用先进创新方法对输水隧洞进行巡检成为快速检测隧洞病害的有效途径[3-4]。摄影测量能够非接触地对物体外观进行二/三维全场、全过程监测，几乎能够提供物体外观的所有信息[5]；三维激光扫描是一项全新的高科技立体扫描技术，具有全自动、高精度等优势[6]；GNSS是一种利用卫星进行定位和导航的技术，能在不通视的情况下提供高精度的空间坐标[7]；IMU利用陀螺和加速度计等惯性元件测量运动目标旋转角速度和加速度，进而得到目标的相对位置、速度和姿态等参数，可在全密闭的情况下获取高精度的姿态信息[8]。本文结合摄影测量、三维激光扫描、GNSS和IMU等技术，设计了一种基于高速线阵相机和激光雷达等主被动传感器集成的输水隧洞监测系统，可精细复现长大管线内部场景；在此基础上实现了快速巡查和健康诊断，及时发现病害情况并进行修复，确保水资源配置工程发挥正常效益。

1 系统硬件结构设计

本文提出的主被动传感器集成方案是以线阵相机为基础设计的，系统硬件主要包括多目线阵相机系统、红外光源系统、同步控制系统、微机处理系统、动力与行驶系统。多目线阵相机系统利用多个高速线阵相机组成视觉系统，视野能覆盖整个隧道断面，负责采集整个隧道洞体表面的图像。红外光源系统采用激光光源，以保证线阵相机在暗光条件下仍能获得清晰图像。同步控制系统通过驱动板对相机和激光光源进行同步控制，可动态自适应或手动调整相机参数。同步控制系统还接入了里程计数传感器同步定位相机里程，配置了工业级操作面板。微机处理系统负责数据存储，支持FTP方式数据云盘同步。动力与行驶系统为整个系统提供电力和行驶动力。主被动传感器集成方案的具体设计见图1。

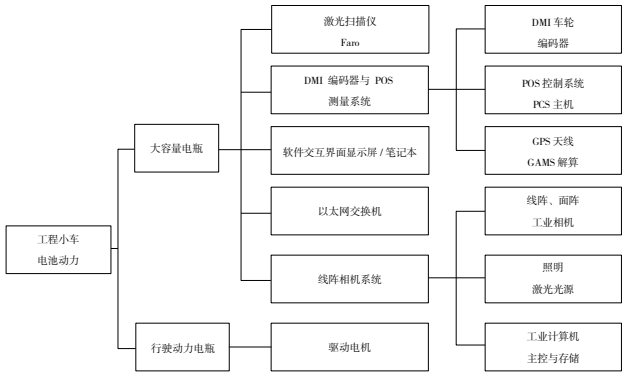


图1 主被动传感器集成系统逻辑结构图

1.1 高速线阵相机系统设计

将多个线阵激光光源首尾错位相连可拼接为一条光带，对隧道断面轮廓进行强光照明，用于高速线阵相机的图像采集。首先利用高速线阵相机分区域连续采集隧道表面图像，并配合大功率激光光源采集隧道弱光环境图像；然后通过算法的加持，解算得到连续的拼图结果。高速线阵相机系统包括线阵相机、镜头、激光器、激光镜头、同步器、交换机、图像采集软件和测试平台。相机、激光器、镜头等设备参数见表1、2。

表1 相机参数表

参数名称	典型值
行频/kHz	52
光谱	黑白
像元尺寸/μm	7.04×7.04
曝光控制	编程控制
分辨率	2 048×1
芯片类型	CMOS
像素位深/bit	8/12

表2 激光器、镜头等设备参数表

参数名称	典型值
镜头焦距/mm	28
发射角/(°)	70
中心波长/nm	808
波长温漂系数/(nm/℃)	0.3
同步器分辨率/脉冲	0~5 000
滤光片	有
镜头对焦物距/mm	3 000
中心波长偏差/nm	808
光谱宽度/nm	≤0.7
计米轮/mm	Φ160

面阵相机对光照亮度具有很强的依赖性，最高快门速度有限，移动行驶中更容易产生像移模糊，适用于较低移动速度，如速度为5 km/h，快门为1/10 000 s，像移仅为0.27 mm[9]。线阵相机的扫描频率约为20~40 kHz/s，能满足高速运行时的像移模糊控制需求，适用于较高移动速度，如速度为60 km/h，快门为1/26 000 s，像移仅为0.64 mm[10]。面阵相机采用35 mm镜头，线阵相机采用20/28 mm镜头均可获得较大的视场角与镜头重量的平衡；两种技术均易受景深问题影响（约60~180 cm清晰景深范围），可通过设置不同的镜头对焦距离，应对隧洞断面结构和距离的变化。系统采用的线阵和面阵相机参数见表3。

1.2 同步控制系统设计

同步控制系统由同步控制驱动板（图2）和控制程序组成，负责对相机和激光光源的同步控制。隧洞内部无法进行GPS定位，IMU组合导航也会产生漂移误差，累积误差程度与IMU精度等级和软件算法正相关[11]。百万级以上的高精度IMU/GPS系统也会在GPS

表3　面阵相机和线阵相机参数

参数名称	面阵相机	线阵相机
图像分辨率	5 120×5 120	4 096
焦距/mm	35	20/28
像元尺寸/μm	4.5	7
物方分辨率/mm	0.45	约1.2
影像帧率/Hz	5	26
快门速度	15 us/10 sec	3 us/10 ms
景深范围/cm	约80	约150

失锁的情况下随IMU漂移引起较大误差[12-13]。POS是DGPS/IMU组合定位定向系统的统称，同时具备差分GPS实时定位功能和IMU测定姿态能力。由于隧洞内材质纹理无变化，结构无显著差异，且没有均匀的大范围照明，双目相机导航算法无法适用。采用物联网标签对距离进行标记需要前期进行测量并提前安装在隧洞内壁，贴附方式固定不可靠，前期施工量较大。激光光学速度计的工作距离为20~40 cm，一般针对铁轨安装，对内壁进行采集需设计3 m左右的悬浮支架配合导向轮，整体重量将大幅增加，检测车辆的结构无法安装。车载平台在隧洞上移动，车轮与道面直接接触，因此采用DMI里程计辅助惯导定位是一种可以保证精度的方案。里程计一般通过支架与车载平台转动轴固定连接，可通过测量车轮的旋转圈数和周长来推算车辆行驶里程，同时辅助传感器等距离触发数据采集信号。里程计测量的是沿车轮与地面接触的切向方向的速度，其测量误差不会随着时间变化。DMI车轮编码器结构简单，且国内外厂商均提供，技术难度小，光栅测量精度较高，质量稳定；但需考虑车轮打滑情况引起的里程累积误差，需通过二度冗余数据排除误差。

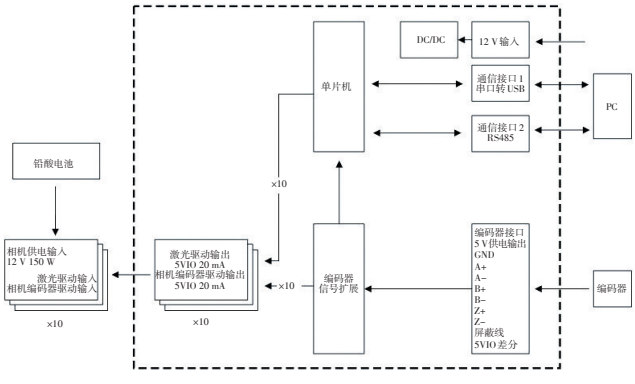


图2　同步控制驱动板系统结构图

同步控制系统接入里程计数传感器，实现相机里程的同步定位；配置工业级操作面板，线阵相机控制程序面板见图3。



图3　隧道图像采集系统界面

1.3　红外光源系统设计

隧洞内部没有光照设施，部分区域有少量自然光，属于不均匀光照。通过大功率激光匀化照明技术解决补光困难和亮度不均匀等问题。隧洞尺度较大，光源补光随距离衰减较快，但激光LiDAR传感器在有效测程范围内对衰减不敏感，测距精度影响出厂时已校正，最主要的影响在于距离远近不同激光点云的强度亮度不同。考虑到隧道断面构型的特殊性（非半圆），激光照明补光距离在4 m以上时，需增加激光光源数量，因此设计在左右横向采用单光源，斜上和顶部采用双光源，为线阵相机提供充足的照明，以保证在20 kHz/s的扫描频率下，相机传感器获得足够的照明。此外，传感器部分构造还加入了面阵相机的多个补光工作灯和带状补光灯，通过灯珠排列结合面状布局和带状布局，平衡照亮区域的宽度和高度，但采用LED补光灯发热量较大，需考虑散热和备份。

2　原型测试

为验证基于高速线阵相机的隧道信息采集系统的可靠性，本文对系统进行了原型测试。实验测试小车见图4，采集的影像数据通过影像拼接处理（图5）后可在2 500 ~6 000 mm物距范围内达到良好的拼接效果。



图4　系统原型测试小车示意图



a 镜头A　　b 镜头B　　c 影像拼接效果

图5　影像数据与拼接效果

测试中发现受限于定焦镜头的景深调焦和测试靶标为平面等条件，实际测试中该组合实际最小有效物距为2 m，单像素点对应的实际宽度约为0.98 mm；最大有效物距为2.6 m（此时图像边缘与镜头的斜距为3.68 m），单像素点对应实际宽度约为1.71 mm。由图6可知，2 K线性相机搭配28 mm镜头拍摄的图片整体

亮度均匀，各镜头拍摄的图像无明显色差，拼接缝隙不明显。

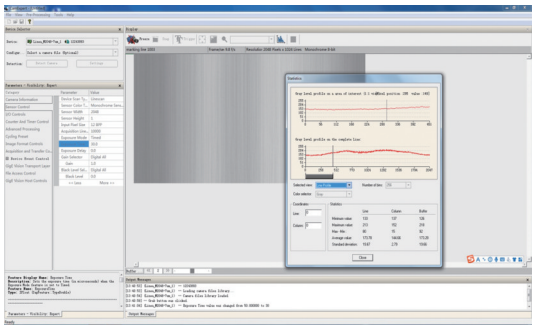
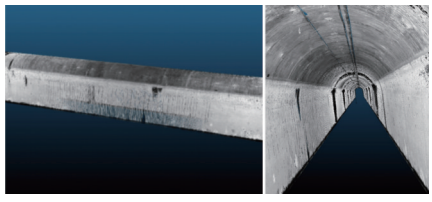


图6 图像光斑均匀度示意图

3 实验验证

3.1 应用背景

某水利工程输水隧洞长约0.74 km，为无压隧洞，形状为城门洞形，横断面大小为6 400 mm×7 200 mm，拱顶呈半圆。经过多年运行，隧洞已出现脱落、混凝土裂缝、渗水、泌钙、剥落坑槽、侵蚀或粉化流失等问题。由于隧洞横断面大、无照明，过往均采用传统人工方法进行检测，工作量大、效率低、成果带有人为主观性。为解决人工巡检效率低、误差大、安全风险大等问题，实现大规模、长距离、快速、智能的输水隧洞表观缺陷检测，在停水检修期间采用本文系统进行检测实验。输水隧洞内外部激光扫描点云数据见图7。

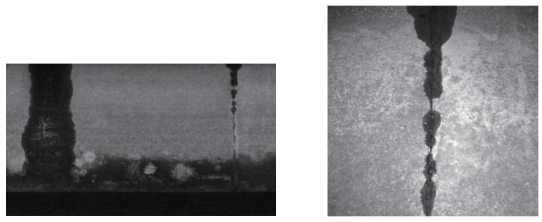


a 外部 b 内部

图7 输水隧洞内外部激光扫描点云数据

3.2 实验过程与结果

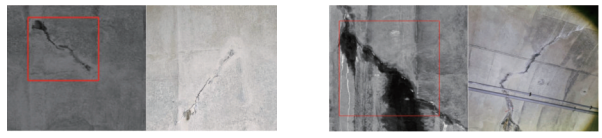
集成作业时采用的移动拖车组成部件包括4台2 500万像素高分辨率面阵相机、1套激光雷达、1套4 K高分辨率线阵相机、1套惯导设备、2套DMI轮速计、2套工控机处理系统、12个补光灯电源系统和触摸屏。系统采集数据前，需布设地面基站进行GPS数据的差分处理或采用当地的CORS观测数据。观测开始前，需对系统进行GAMS解算，捕获GPS天线之间的相对位置关系，并与IMU和DMI的传感器测量参数进行紧密耦合，以提高整体方位解算的可靠性和精度。因此，在进入输水隧洞正式开始数据采集前，设备在地面进行了15~20 min的开机和初始化操作，达到固定解后再开始测量。数据采集过程中，通常尽量靠近隧道中线，这主要是由于中心位置到内壁距离较近，传感器对距离变化敏感，从传感器到物体的距离一般为2.5~6 m，因此靠近隧洞中线有助于实现激光点的均匀分布，特别是对于相机系统，需尽可能在景深范围内保证对焦效果的一致性。系统设置了双向测距指示装置，以提高中线贴合度。采集的部分原始数据见图8。



a 线阵相机输出原始影像 b 面阵相机输出原始影像

图8 采集的部分原始影像图

对实验采集的原始数据进行数据处理和整理后发现，该输水隧洞共有339处缺陷，缺陷类型主要为裂缝（143条）、渗水（93处）和伸缩缝破损（87处）。本文系统能识别出裂缝、渗水、伸缩缝破损、泌钙、剥落坑槽等缺陷。检测精度为结构变形0.2 mm、裂缝0.5 mm、破损1 mm^2。将典型缺陷成果图与拍摄照片进行对比（图9），将隧洞分为15段，Q7+816.30表示距离第0号桩7 816.3 m，可以发现，输水隧洞混凝土表面主要以线状轻微渗水裂缝为主，裂缝表面局部伴有钙质析出现象，成果数据与拍摄成果数据一致，验证了本文系统在输水隧洞检测中缺陷识别的准确性。



a 拱顶 Q7+816.30处裂缝 b 拱顶 Q8+107.10贯穿型裂缝伴泌钙

图9 缺陷激光成果图和高清相机拍摄照片比对

通过现场勘察和实验数据统计分析发现，该隧洞在长期大流量水流冲刷和外部因素影响下，内部已出现一系列表观缺陷，缺陷数量多、类型多、分布密度大，总体包括：①渗漏水较严重，且多集中在左右边墙；②裂缝多集中在拱顶，裂缝呈不规则形状，且边墙裂缝多伴随渗水；③多处伸缩缝均出现不同程度破损，破损伸缩缝处左右边墙多伴随渗水，拱顶伴随裂缝与泌钙；④泌钙与剥落坑槽总体较好，存在几处泌钙现象，后期需重点关注。

4 结 语

本文针对输水隧洞常规检修的迫切需求，提出了基于主被动传感器集成的输水隧洞病害检测系统，是智能检测技术在水利领域的应用创新，具备重要的实践意义和推广价值。

（下转第72页）