

徐云乾, 袁明道, 陈晓文, 等. 基于无损多源异构数据融合的水利工程隐蔽结构隐患探测技术[J]. CT理论与应用研究, 2019, 28(2): 187-194. doi:10.15953/j.1004-4140.2019.28.02.04.
XU Y Q, YUAN M D, CHEN X W, et al. Detection technology of concealed structure of hydraulic engineering based on the fusion of nondestructive multi-source heterogeneous data[J]. CT Theory and Applications, 2019, 28(2): 187-194.

基于无损多源异构数据融合的水利工程 隐蔽结构隐患探测技术

徐云乾^{1,2,3}✉, 袁明道^{1,2,3}, 陈晓文^{1,2,3}, 史永胜^{1,2,3},
刘建文^{1,2,3}, 杨文滨^{1,2,3}, 林悦奇^{1,2,3}

1. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510635
2. 广东省山洪灾害防治工程技术研究中心, 广州 510635
3. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广州 510635

摘要: 本文介绍了水利工程外露结构和隐蔽结构的不同检测方法和特点以及相关研究现状, 总结了之前水利工程隐蔽结构隐患检测探索经验, 结合横琴新区澳门大学中心沟东闸翼墙断裂探测等工程应用为例, 通过三维激光扫描技术、探地雷达技术相结合的多源无损探测技术为例, 对水利工程隐蔽结构的多源异构探测数据的融合应用做了相应探索研究。

关键词: 水利工程; 隐蔽结构; 三维激光扫描技术; 探地雷达

doi:10.15953/j.1004-4140.2019.28.02.04 中图分类号: TV 697.3; TV 698.23 文献标志码: A

水利工程结构按照位置分为外露结构和隐蔽结构。外露结构检测方法多样, 可以利用如眼看、耳听、手摸、脚踩直观检测手段; 尺仪、钻探等常规量测; 探地雷达、高密度电法、地震法等物探手段进行综合检测。

水利工程隐蔽结构主要包含正常蓄水位水面以下或被土、淤泥、砂石等覆盖的迎水坡护面结构、进水塔结构以及铺盖、底板、护坦、沉箱、挡土墙等。其常出现的隐患主要为建筑物整体沉降; 混凝土结构表面的裂缝、分缝或止水破损; 金属结构锈蚀等。水利工程隐蔽结构检测的主要方法包括目视检测、ROV检测、激光扫描、扇扫声纳成像、探地雷达等。

1 研究现状

水利工程隐蔽构筑物隐患具有发现难、处理难、突发性强及后果严重的特点, 为隐蔽构筑物检测工作带来了极大的挑战和机遇。

李鹏飞等^[1]、王祥等^[2]系统性地总结了近年来水下探测技术在水利工程中的成果及技术优势^[3-8], 取得了较为宝贵的成果。但是针对基于ROV的水下探查作业, 尚未建立统一的水下探测技术标准。李斌等^[9]归纳总结了三维成像技术在富阳岩石岭水库和玉环坎门渔港防波堤修复工程中的应用情况和技术特点, 饶光勇等^[10]将其运用北江堤围险段水下地形变化监测中, 杨志等^[11]利用该系统对南京市红山窑水利枢纽泵站、镇江市谏壁河口码头、长江下

收稿日期: 2019-03-01。

基金项目: 深圳市水务发展专项资金科技创新项目(20170103)。

游和畅洲汉道崩窝水下岸坡等进行了检测应用研究。谢昭晖等^[12]利用探地雷达技术对水利工程隐蔽病害进行无损检测,认为其能快速准确圈定大坝及其附属构筑物等区域的隐蔽病害范围、规模和埋深。丁凯^[13]博士利用地雷达技术在水下抛石、大坝防渗墙检测等方面做了大量有益的探索,认为地质雷达方法在特定的水下检测环境和地下板墙模型体等隐蔽结构检测能够发挥不可替代的作用。

有学者利用雷达技术对水下水闸底板渗流隐患探测进行相关研究,同时也对利用三维激光扫描技术、高密度电法、探地雷达、水下机器人及多波速测深仪等综合探测方法在水利工程隐患探测以及对取得的多源异构探测数据融合应用中进行了探索研究^[14-18]。以上研究均取得了较为理想的成果,积累了一整套的实践经验。

本文主要研究多源异构数据的处理和研判方法,比如三维激光扫描技术能够精确测量到工程结构的外部精细尺寸,探地雷达、高密度电法等可以通过电磁波反射、视电阻率的分布探测到物体内部的隐患,管道闭路电视系统(closed circuit television inspection)管道内窥技术能够探索到管道内部的隐患情况。通过两者融合^[16],能够精确定位隐患的位置、大小等,为水利工程隐蔽构筑物的探测及除险加固设计提供依据。

表 1 Leica ScanStation C10 指标和参数
Table 1 Indicators and parameters of Leica ScanStation C10

类型	脉冲方式
激光颜色	绿色, 波长 532 nm
扫描范围	300 m @90%; 134 m @18% 反射率 (最近扫描范围 0.1 m)
扫描速度	最高速度 5 万点/s
扫描光斑直径	0~50 m 范围: 4.5 mm
扫描点间距	可自定义水平和垂直方向间距; 最小可小于 1 mm
单次测量点位精度	6 mm
单次测量距离精度	4 mm
角度精度 (水平/垂直)	60 μ rad/60 μ rad (12"/12")
模型表面精度	2 mm
标靶扫描精度	2 mm
视场角	垂直 270°, 水平 360°

2 系统介绍及特点

2.1 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是逆向工程的一种重要形式。三维扫描技术可以直接将各种大型的、复杂的、不规则、标准或非标准等实体或实景的三维数据完整的采集到电脑中,进而快速重构出目标的三维模型及线、面、体、空间等各种精细制图数据。本次工程应用使用了 Leica ScanStation C10 三维激光扫描仪,参数见表 1。

2.2 探地雷达技术

探地雷达是用高频无线电波来确定介质内部物质分布规律的一种探测方法,利用宽带电磁波以脉冲形式来探测地表之下或确定不可视物体内部或结构。探地雷达采用的高频电磁波频率范围一般分布在 1 MHz~10 GHz 之间。本次探地雷达探测采用加拿大探头与软件公司生产的 pulse EKKO PRO 专业型探地雷达,使用发射频率为 250 MHz 的屏蔽天线。

3 工程应用情况

3.1 工程概况

珠海市横琴新区口岸服务区堤岸澳门大学中心沟东闸施工期间，发现水闸北岸翼墙出现倾斜偏移（约 70 cm，倾斜角 7° ），为防止倾斜量变大，立即采用了钢绞线进行临时加固和卸载（图 1），同时为了完善修复方案，需要开展破损情况调查及量测：

(1) 调查量测现状翼墙结构现状，包括轮廓高程、结构尺寸，及其破坏。

(2) 调查量测现状挡墙位移、沉降及脚趾冲刷情况。

(3) 调查量测翼墙基础是否完好，临水侧墙是否破坏，墙堤外侧是否有隆起。特别是重点查明墙与端脚、基础、墙身与基础结合部的破损情况。

但是在墙背土体开挖时，发生涌水情况，无法止水，无法对底板进行详细探摸。因此决定采用三维激光扫描技术和探地雷达技术进行破损情况量测。

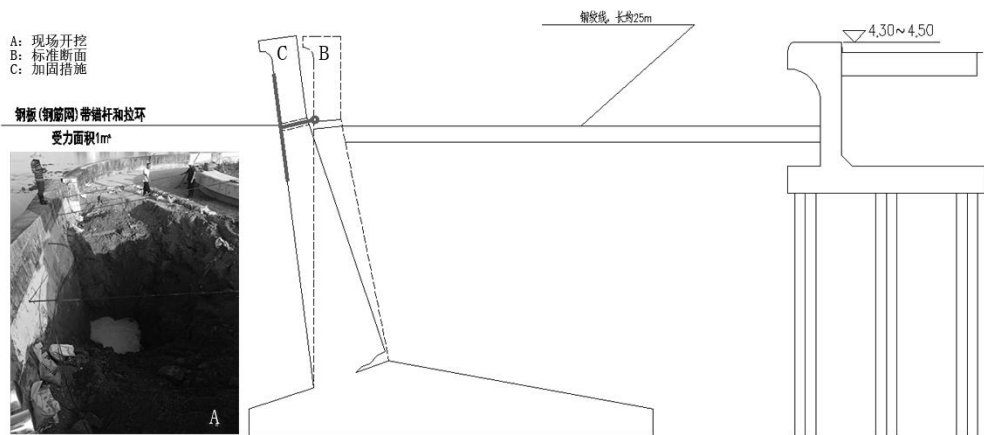


图 1 现场开挖、翼墙标准断面和临时加固措施图

Fig.1 Site excavation, standard section of wing wall and temporary reinforcement measures

3.2 三维激光扫描技术检测方法及结论

针对目前挡墙现状，用三维激光扫描仪（Leica C10）对建筑物的各部位的相对高程和垂直度、尺寸进行检测。对目前倾斜段的挡墙均匀选取 5 个剖面，由内江向外江方向依次编号为 1#~5#，（图 2（a）和图 2（b））。将剖切出的点云数据分别提取出各剖面的倾斜角度和位移，并与设计剖面进行对比分析（图 3）。挡墙发生较为严重的倾斜，其中挡墙 1#剖面到 5#剖面顶部倾角从 7.10° 依次增大到 9.25° ，位移从 34 cm 依次增大到 43 cm（表 2）。

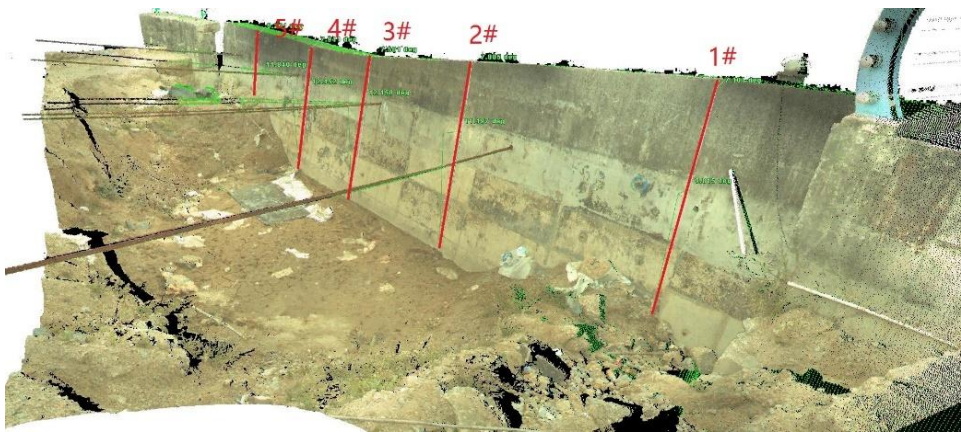
3.3 探地雷达检测方法及结论

探地雷达探测使用发射频率为 250 MHz 的屏蔽天线。以里程轮标记关键点的方式采集数据。图 4 展示了平行于翼墙的测线 30 雷达波形图，底板回波较强，同相轴连续且波形水平，判定底板未发生倾覆。图 5 展示了垂直于翼墙的测线 32 以及测线 33 雷达波形图，并融合了地面以上的三维激光扫描雷达测线所在的翼墙剖面数据，基础墙踵附近位置波形同相轴中断，中断前有连续的水平强反射波形，较为直观地表明墙内侧墙身与基础的结合面发生断裂。

表 2 三维扫描检测数据与设计体型数据对比

Table 2 Comparison of three-dimensional scanning test data with design figure data

测量位置	检测尺寸/°	设计尺寸/°	差值/°	最大位移值/cm
内侧挡墙 1#上段	82.90	90.00	7.10	—
内侧挡墙 1#下段	99.81	101.00	1.19	—
内侧挡墙 5#上段	80.75	90.00	9.25	—
内侧挡墙 5#下段	101.85	101.00	-0.85	—
外侧挡墙 1#	84.65	90.00	5.35	43
外侧挡墙 2#	85.41	90.00	4.59	34
外侧挡墙 5#	84.95	90.00	5.05	34



(a) 贴图渲染



(b) 点云数据

图 2 真三维点云数据

Fig.2 True 3D point cloud data

3.4 数据综合分析判断

(1) 挡墙顶部倾角从 7.10° 依次增大到 9.25° ；顶部位移从 34 cm 依次增大到 43 cm。

(2) 背水侧结合三维激光扫描和地质雷达的相关成果，其中雷达探测到底板基本水平，推测挡墙没有发生整体的倾覆。

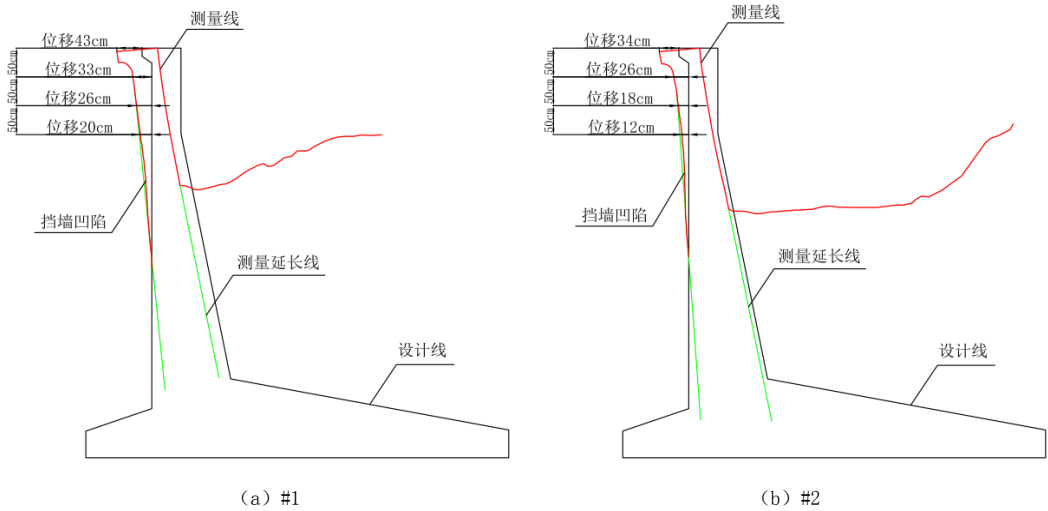


图 3 1#和 2#测量剖面与设计剖面对比图

Fig. 3 Comparison of 1 # and 2 # survey profiles with design profiles

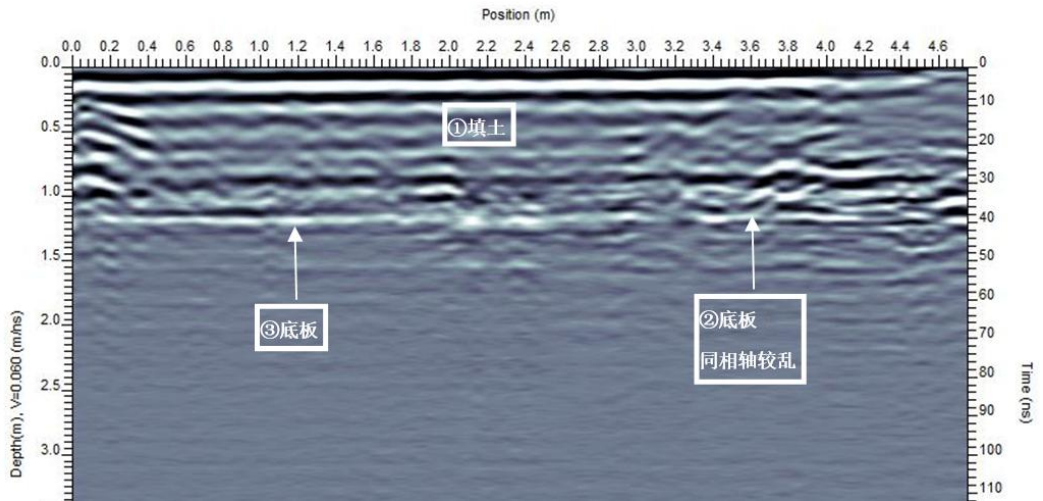


图 4 测线 30 雷达波形图

Fig. 4 Line 30 Radar waveform

(3) 挡墙迎水面发生弯曲，延长其迎水墙面测量线，推测挡墙断裂处位于顶部以下约 4m 上下位置。

(4) 三维激光扫描点云轮廓延长线则基本到达底板墙踵处，推测背水侧墙面为墙踵处断裂。

(5) 该咨询意见得到了开挖验证并受到了项目修复设计人员的充分肯定和认可。

4 结论及建议

(1) 三维激光扫描能获取真实反映物体的三维坐标点云，后处理中可对被测物进行任何方式的三维测量，具有其高效、高精度、高采样率的特点。

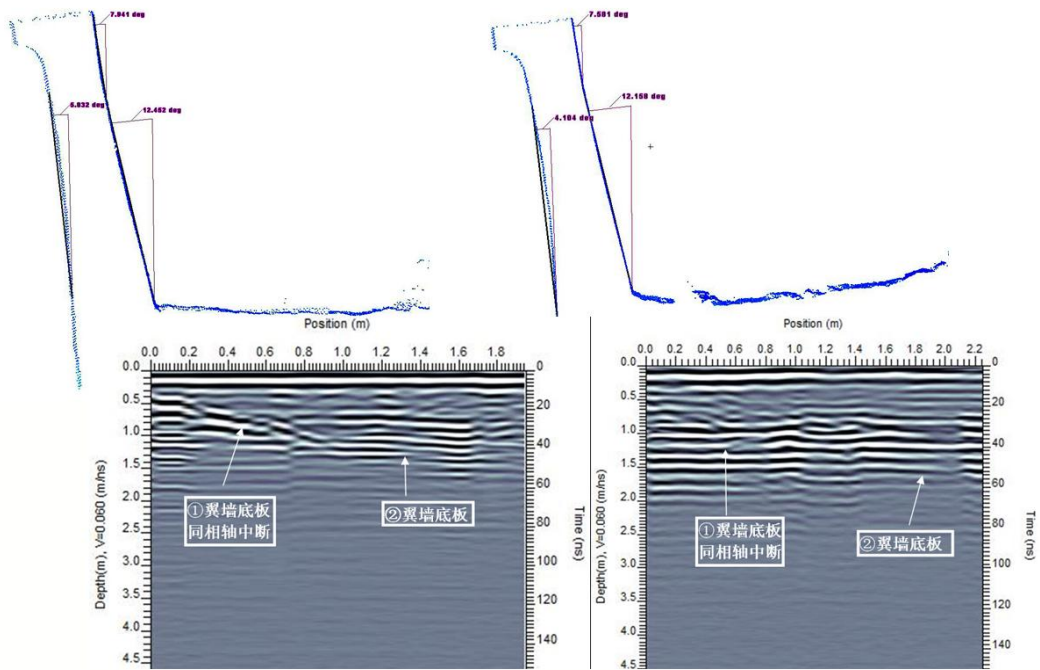


图 5 三维激光扫描数据及测线 32 和测线 33 雷达波形图融合

Fig. 5 The fusion of 3D laser scanning data and line 32 and line 33 Radar waveform

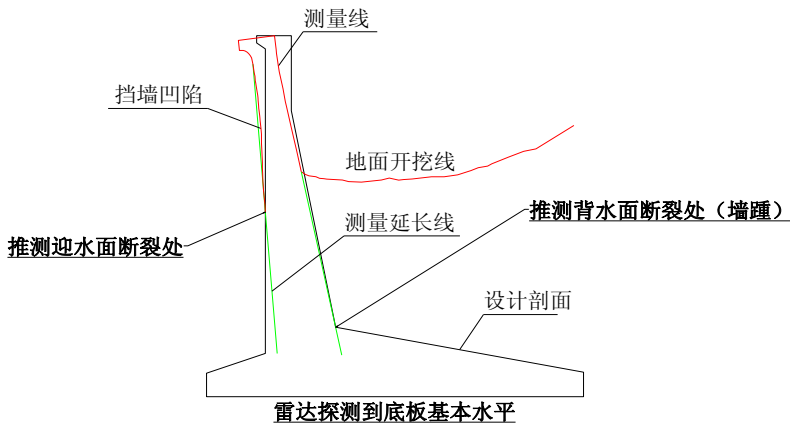


图 6 数据融合判断结论

Fig. 6 Judgment conclusion of data fusion

(2) 隐蔽结构的各种病害在探地雷达图像中具有较为明显的特征和规律。

(3) 本文成功将外露结构检测技术和隐蔽工程检测技术相互结合应用并进行合理分析, 为协助查找水利工程病害和分析原因提供了有益的参考。

(4) 将三维激光扫描技术和探地雷达隐患探测技术相结合, 具有检测时效快, 对结构无破损, 检测结果直观, 检测成本较低, 已在天堂山水库、东莞大堤、郁南大堤、东河水闸等多宗大中型水库、堤防和水闸等水利工程中得到了较好的验证。

参考文献

- [1] 李鹏飞, 吉同元, 汤子璇, 等. 涉水工程水下结构检测现状分析及展望[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(5): 301-302.
- [2] 王祥, 宋子龙. ROV 水下探测系统在水利工程中的应用初探[J]. 人民长江, 2016, 47(2): 101-105. doi:10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.02.023.
WANG X, SONG Z L. Preliminary analysis on application of ROV underwater detect system in water conservancy project[J]. Yangtze River, 2016, 47(2): 101-105. doi:10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.02.023. (in Chinese).
- [3] P. 托尔斯滕, 徐耀, 张垚, 等. 基于无人水下机器人的水电站和大坝检测技术[J]. 水利水电快报, 2015, 36(7): 26-29. doi:10.15974/j.cnki.slsdkb.2015.07.011.
- [4] 李璐. 水下机器人在病险水利工程检测中的应用[J]. 湖南水利水电, 2015(5): 46-49. doi:10.16052/j.cnki.hnslsd.2015.05.016.
- [5] 杨胜梅, 赵秋云. 水下机器人的应用现状[J]. 水利水电快报, 2015, 36(11): 29-31. doi:10.15974/j.cnki.slsdkb.2015.11.009.
- [6] 李钟群, 孙从炎, 蒋晓旺, 等. 水下机器人在浙江省水库大坝检测中的初步应用[J]. 浙江水利科技, 2010(3): 57-59. doi:10.13641/j.cnki.33-1162/tv.2010.03.031.
LI ZQ, SUN C Y, JIANG X W, et al. Preliminary application of underwater robot to reservoir engineering testing in Zhejiang province[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2010(3): 57-59. doi:10.13641/j.cnki.33-1162/tv.2010.03.031. (in Chinese).
- [7] 吕骥, 张洪星, 陈浩. 水下机器人(ROV)在水库大坝检测作业的安全分析[J]. 水利规划与设计, 2017(10): 112-114. doi:10.3969/j.issn.1672-2469.2017.10.031.
- [8] 张晏方, 邓勇, 毕文焕, 等. 水下隐蔽工程检测技术在长江航道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2010(10): 64-69. doi:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2012.10.024.
ZHANG Y F, DENG Y, BI W H, et al. Application of underwater concealed engineering detection technology in the Yangtze River Waterway regulation engineering[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(10): 64-69. doi:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2012.10.024. (in Chinese).
- [9] 李斌, 金利军, 洪佳, 等. 三维成像声纳技术在水下结构探测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 184-188+192.
LI B, JIN L J, HONG J, et al. Application of three-dimensional imaging sonar technology in detection of underwater structure[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering. 2015, 26(3): 184-188+192. doi:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.03.38. (in Chinese).
- [10] 饶光勇, 陈俊彪. 多波速测深系统和侧扫声纳系统在堤围险段水下地形变化监测中的应用[J]. 广东水利水电, 2014(6): 69-72.
RAO G Y, CHEN J B. Application of multibeam bathymetry system and side-scan sonar system to the monitor of underwater terrain changes in dangerous section of embankment[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2014(6): 69-72. (in Chinese).
- [11] 杨志, 王建中, 范红霞, 等. 三维全景成像声纳系统在水下细部结构检测中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 59-62+47.
YANG Z, WANG J Z, FAN H X, et al. Application of 3D imaging sonar system in detection of underwater detailed structure[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(6): 59-62+47. (in Chinese).
- [12] 谢昭晖, 陈义军, 张辉. 水利工程隐蔽病害的探地雷达探测方法[J]. 工程勘察, 2010, 38(8): 77-81.
XIE Z H, CHEN Y J, ZHANG H. Detecting process with ground penetrating radar for the hidden defects in water conservancy engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(8): 77-81. (in Chinese).
- [13] 丁凯. 地质雷达技术在隐蔽工程质检评价中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
Ding K. Research on ground penetrating radar technique applied to the concealment engineering quality detection and evaluation[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese).
- [14] 徐云乾, 杨文滨, 袁明道, 等. 水闸底板渗流隐患的探地雷达检测[J]. 无损检测, 2017, 39(9): 83-86.
XU Y Q, YANG W B, YUAN M D, et al. The detection of seepage hazard in sluice gate bottom plate using GPR[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(9): 83-86. doi:10.11973/wsjs201709021. (in Chinese).
- [15] 杨文滨, 李德吉, 王瑞兰, 等. 大坝水库坝体渗漏原因探查与治理对策探讨[J]. 广东水利水电, 2017(3): 55-59+67.
YANG W B, LI D J, WANG R L, et al. Leakage causes of daba reservoir dam and its countermeasures[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2017(3): 55-59+67. (in Chinese).

- [16] 徐云乾. CCTV 和三维激光扫描技术在水利工程输排水管道隐患探测中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2014(3): 68-70.
Xu Y Q. The application of CCTV and 3D laser scanning technology in the detection of hidden dangers of drainage pipeline in water conservancy engineering[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(3): 68-70. (in Chinese).
- [17] 徐云乾, 黄春华, 陆雪萍, 等. 高密度电阻率法在水库坝肩渗漏隐患检测中的应用[J]. 无损检测, 2016, 38(5): 41-44+68.
XU Y Q, HUANG C H, LU X P, et al. Application of high-density electrical method in leakage danger detection of dam abutment[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(5): 41-44+68. doi:10.11973/wsyc201605011. (in Chinese).
- [18] 徐云乾, 袁明道, 刘建文, 等. 地面三维激光扫描技术及其在水利工程中的应用[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2016, 14(1): 13-16.
XU Y Q, YUAN M D, LIU J W, et al. Terrestrial 3D laser scanning technology and its application in hydraulic engineering[J]. Journal of Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, 2016, 14(1): 13-16. (in Chinese).

Detection Technology of Concealed Structure of Hydraulic Engineering Based on the Fusion of Nondestructive Multi-source Heterogeneous Data

XU Yunqian^{1,2,3}✉, YUAN Mingdao^{1,2,3}, CHEN Xiaowen^{1,2,3}
SHI Yongsheng^{1,2,3}, LIU Jianwen^{1,2,3}, YANG Wenbin^{1,2,3}, LINE Yueqi^{1,2,3}

1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China

2. Guangdong Research Center of Mountain Torrent Disaster Control Engineering Technology, Guangzhou 510635, China

3. Guangdong Hydrodynamics Application Research Key Laboratory, Guangzhou 510635, China

Abstract: This paper introduces the different detection methods and characteristics of the exposed structure and concealed structure of hydraulic engineering and the status quo of relevant research and exploration. In this paper, the application of the hidden trouble detection of the Zhongxingou East Gate of the University of Macau in Hengqin New Area is presented. Take the method of 3d laser scanning and ground-penetrating radar technology. This paper discusses and studies the fusion application of multi-source heterogeneous detection data of hidden structure of hydraulic engineering.

Keywords: hydraulic engineering; concealed structure; three-dimensional laser scanning technology; GPR



作者简介: 徐云乾✉ (1986—), 男, 江西丰城人, 工学硕士, 高级工程师, 注册土木工程师, 主要从事水利工程咨询设计、水工结构隐患探测、水利工程安全管理、水利先进适用技术的应用等研究工作, Tel: 15989168280, E-mail: xuyunqian@foxmail.com.