

DOI: 10.11779/CJGE2024S10018

TLJ 型土工离心机数据采集系统更新升级

翁效林^{1,2}, 胡继波^{*1,2}, 谢永利^{1,2}, 岳夏冰^{1,2}, 吴昊^{1,2}, 张志强³

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;
3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 长安大学 TLJ-3 土工离心机自 2004 年建成投入使用以来, 已经运行 18 a, 为该系列运行时间最长的土工离心机。由于 20 世纪初电子设备集成度较低等原因, 早期的 TLJ 型离心机数据采集系统逐渐无法满足现有试验数据的高精度、大数据量吞吐等采集需求。基于无线传输技术消除了电滑环接触电阻变化对数据传输影响的问题, 采用光纤集成多个传感器使得传感器小型化, 采用非接触式位移场扫描实现地表的全断面监测, 基于 Open CV 图像拼接技术解决了图像畸变的问题。升级改造后的 TLJ-3 土工离心机已服务于若干研究项目, 性能良好。

关键词: 土工离心机; 数据采集系统; 升级改造; 无线传输技术

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0059-05

作者简介: 翁效林(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事特殊土性状及地下工程方面的研究。E-mail: 49768532@qq.com。

Update and upgrade of data acquisition system for TLJ geotechnical centrifuge

WENG Xiaolin^{1,2}, HU Jibo^{1,2}, XIE Yongli^{1,2}, YUE Xiabing^{1,2}, WU Hao^{1,2}, ZHANG Zhiqiang³

(1. Highway College of Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering for Special Regions, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The TLJ-3 geotechnical centrifuge from Chang'an University has been in operation for 18 years since it was built and put into use in 2004, making it the longest running geotechnical centrifuge in this series. Due to the low integration of electronic devices at the beginning of the 21st century, the early data acquisition systems of TLJ centrifuge gradually could not meet the high-precision and large data throughput collection needs of the existing experimental data. Based on the wireless transmission technology, the problem of data transmission caused by changes in contact resistance of electric slip rings is eliminated. The fiber optic integration of multiple sensors is used to miniaturize the sensors, non-contact displacement field scanning is used to achieve full section monitoring of the ground surface, and the Open CV image stitching technology is used to solve the problem of image distortion. The upgraded TLJ-3 geotechnical centrifuge has served several research projects with good performance.

Key words: geotechnical centrifuge; data acquisition system; upgradation; wireless transmission technology

0 引言

在岩土工程、机械工程和水利工程等领域的研究中, 通常采用缩尺试验来分析研究对象的变形机理与破坏规律。对于线性材料而言, 可以使用小比例尺的物理模型试验来模拟研究对象。土体作为一种典型的非线性材料, 如果采用传统的缩尺方法, 模型的应力水平相较于原型会大大降低, 进而导致模拟结果的准确性严重失真。为解决上述问题, 土工离心试验技术应运而生。

1869 年, 法国学者 Phillips 首次提出土工离心技术的概念, 并基于弹性介质平衡方程推导出了相似关系^[1]。1931 年, 美国学者 Bucky^[2]在哥伦比亚大学进行了首次离心机模型试验, 研究了煤矿坑道顶板的稳

定性问题。同期, 苏联学者 Pokrovsky 和 Davidenkov 于 1932 年研究了路堤和边坡失稳影响因素的问题^[3]。受前苏联影响, 中国于 20 世纪 50 年代开始接触土工离心机的研制。但碍于经济发展等客观因素, 一直没有实质性的进展, 直到 1983 年, 由长江科学院主持设计的长科院第一代土工离心机成为中国首台具有实用价值的土工离心机。中国直升机设计研究所联合南京水利科学院和清华大学于 1992 年和 1993 年分别设计了 NHRI-400g·t 和 TH-50g·t 型土工离心机。限于人才

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277151); 国家高铁联合基金项目(U1934213)

收稿日期: 2024-04-29

*通信作者(E-mail: hujibo@chd.edu.cn)

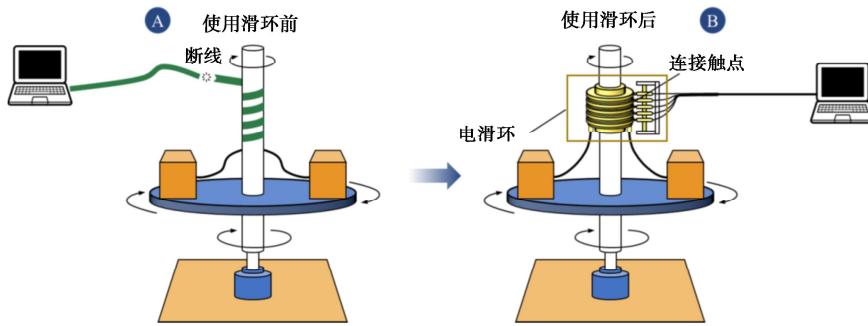


图 1 数据传输方式

Fig. 1 Data transmission modes

结构关系, 上述两家单位逐渐减少了对土工离心机的研发, 中国目前的土工离心机主要由中国工程物理研究院进行研发。自 1991 年开始, 中物院分别研制了 TLJ-1~TLJ-500 等大型土工离心机, 其中位于成都理工大学的 TLJ-500 是中国目前保有的最大重度的土工离心机。

TLJ 型土工离心机主要包括机械系统、电气系统和数据采集系统。根据南京水科院与长江科学院土工离心机的使用情况可知, 土工离心机基本上每 10 a 需要对数据采集系统进行一次维修^[4]。另外鉴于 20 世纪初电子设备集成性较低等原因, 早期的 TLJ 型离心机仅配置了 4 块 IMP 数据采集模块。该模块主要存在以下缺点: ①采集频率较低, 最大频率为 1 Hz; ②最大直流电压为 2 V, 无法满足激光位移计等高精度传感器的工作电压; ③数据吞吐量低, 无法满足高清摄影的图像传输要求。根据西南交通大学新采购的土工离心机招标文件可知, 目前新建土工离心机的费用平均为每 100g·t, 需花费 1000 万元。目前主流土工离心机的最小重度也达到了 200g·t。显然新建大型土工离心机对于各高校及研究所而言是十分昂贵的。

鉴于上述原因, 如何在现有的土工离心机基础上, 对原有的数据采集系统进行升级, 使其能够满足现有岩土试验数据的高精度、大数据量吞吐等采集需求具有十分重要的现实意义。

1 传统数据采集系统的不足及解决方案

1.1 电信号传输不稳定

数据采集系统主要是将传感器采集的电信号通过导线传递至 PC 主机进行数据分析。如图 1 所示, 在离心试验中, 传感器导线会围绕着离心机主轴旋转进而出现断线的问题。为解决这一问题, 传统的数据采集系统通过电滑环来传递电信号。然而传统的电滑环的接触电阻在高速运转中极易发生变化从而导致电流与电压信号发生较大的波动, 这也是离心试验数据

离散性较大的原因。

无线传输技术由于不存在电滑环这一物理实体, 因此电信号可以准确的由传感器传输至 PC 主机。随着 WiFi 技术的发展, 最新的 WiFi 7 传输速率能够达到稳定的 5 Gbps, 这使得更大的数据传输量成为可能。另外随着网线信号屏蔽工艺的提升, 现阶段离心室内的强电流对无线信号的干扰也得到极大的缓解。因此无线传输技术可以大幅度提高数据的准确性。

无线传输技术的系统组成及工作流程如图 2 所示。测试系统主要包含 4 个子系统: ①传感器子系统; ②数据采集子系统, 主要为带有 LAN 口的工控机, 其功能将传感器采集的电信号转换为数字信号; ③数据传输子系统, 主要由两台无线路由器组成, 通过无线桥接的方法传输数字信号; ④数据接收与管理子系统。

基于无线传输技术, 各高校研究所可自行定制数据采集系统, 实现更多功能、更高精度的数据采集需求。诸如动静态应变仪(市场价约为(2~4)万元)、光栅光纤解调仪((8~10)万元), 相较于原有的数据采集系统, 该方案具有更好的经济性。

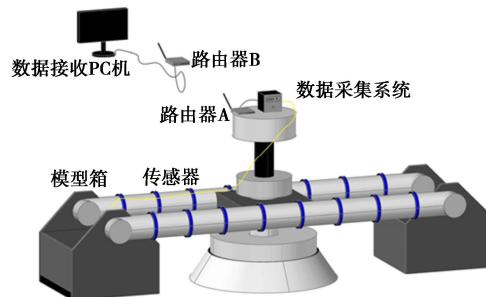


图 2 土工离心机无线测试系统

Fig. 2 Wireless testing system for geotechnical centrifuge

1.2 传感器的锚固加筋现象

离心试验中模型的尺寸一般在 0.2~1 m, 而传统的传感器尺寸往往相对较大且需要通过导线引出。在测试点位较少时, 误差范围尚可接受。但在使用电阻

式应变片时, 往往需要布设大量的点位, 根据相似定律, 大量埋藏于土体内部的导线经放大后尺寸与锚杆相接近, 起到了锚固的作用, 进而对试验结果造成较大的影响。与传统监测技术相比, 光纤传感器的优点包括抗电磁干扰、体积小、结构轻。光纤传感器也可以多路复用, 这意味着一根光纤可集成多个传感器。如图 3 所示, 光纤的直径约为 0.25 mm, 能够较好地解决传统传感器的锚固加筋问题^[5]。

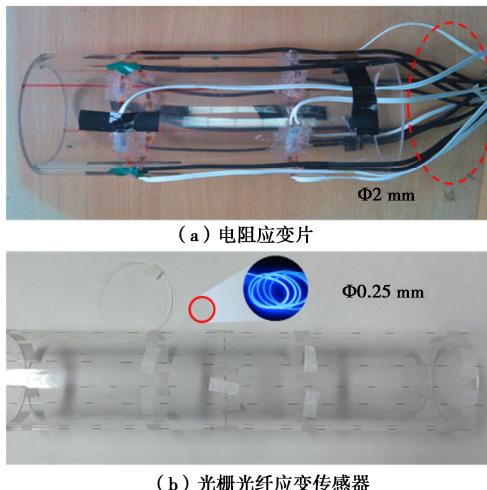


图 3 传感器对比

Fig. 3 Comparison of sensors

1.3 变形监测不全面

模型变形是离心试验中重要的监测对象之一。目前主流的方法包括线性可变差动变压器 (LVDT) 和激光位移传感器 (LDS) 两种。其中 LVDT 在测量一些刚性模型的变形时具有较好的效果, 但当测试对象为软黏土时, 铁芯在离心力的作用下会直接贯穿土体, 造成较大的偏差。此外由于模型箱的尺寸限制, 一般位移传感器的数量不会超过 5 个。在对边坡进行变形监测时, 通常会出现监测点未发生变形的情况。

为了解决上述问题, 如图 4 所示, 开发了非接触式竖向位移场扫描系统。竖向位移数据通过高精度激光位移传感器 (LDS) 采集, 采集精度 0.01 mm; 横向位置信息利用机械手对 x 轴和 y 轴进行定位与采集, 采集精度为 0.1 mm。非接触式竖向位移场扫描系统通过上机位软件控制机械手带动激光位移传感器 (LDS) 沿被测断面进行动态扫描。相较于传统测量方法, 本装置采用非接触式传感器对竖向位移场进行测量, 提高了测量精度, 实现了竖向位移场的全断面测量。

1.4 传统摄影技术的缺陷

粒子图像测速法 (PIV) 是岩土工程研究中常用的位移测量和应变可视化工具。其工作原理是拍摄一系列照片, 通过一定的换算比例关系将像素坐标转换为实体空间坐标。因此, 如何拍摄出完整清晰的照片是

摄影系统研制的关键。

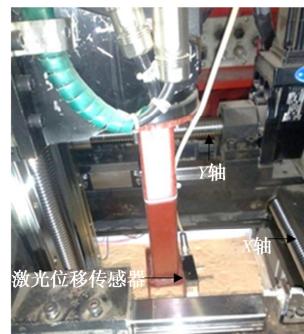


图 4 非接触式竖向位移场扫描系统

Fig. 4 Non-contact vertical displacement field scanning system

摄影技术根据摄像头所在位置可分两种^[6]: ①定点高速闪光摄影技术, 该方案的摄像头布置在离心室顶部。摄影时需要关闭室内灯光, 对闪光灯进行充能, 当转臂下方的位置传感器的磁铁经过霍尔传感器时, 启动相机快门进行拍摄。该方案由于摄像头安装在离心室顶部, 不受离心力影响, 且物距较大, 成像质量较好。但由于需要对闪光灯进行充能, 因此无法进行连续拍照, 在一些变形迅速的试验中, 往往因为采集照片过少, 无法进行全面分析。②同步摄影技术, 该方案的摄像头通过支架固定在玻璃面板前方, 相机与模型相对静止。该方案由于无需充能, 可以进行长时间的录像。对试验全过程的变形都能够进行监测。但是由于离心室的空间限制, 拍摄物距较小, 拍摄时往往采用广角镜头, 因此拍摄的图片往往出现较大的畸变。另外由于早期工业相机质量较大, 在离心力的作用下, 镜头会发生一定的下沉。基于上述两点原因, 同步摄影技术的相机标定和图形校正会对试验结果造成一定的影响。

为了解决上述问题, 基于树莓派研制了一套小型摄影系统 (图 5), 该系统主要由树莓派主板和摄像头组成。

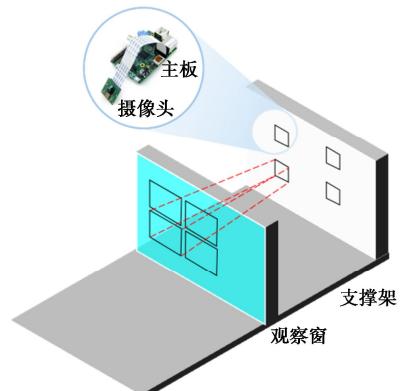


图 5 树莓派摄影系统

Fig. 5 Raspberry pie photography system

摄像头与树莓派主板通过 HDMI 线连接, 因此只需要将摄像头固定在观测区域前方即可。另外摄像头的重量仅有 3 g, 在 100 g 的离心力作用下, 摄像头对固定装置的作用力也仅有 3 N, 避免了摄像头的下沉问题。多个树莓派也可以组成拍摄阵列以观察不同的区域, 最后借助 Open CV 将多张照片拼接成一张照片, 该方法可以解决上述的畸变问题^[7]。

2 升级改造后部分试验

2.1 湿陷性黄土地区地铁隧道受力机理试验^[8]

随着西安地铁的快速发展, 越来越多的地铁隧道穿越了湿陷性黄土地区。基于土工离心机无线传输技术, 研究了地铁隧道在不同浸水条件下的受力特征。模型布置图可参考文献[7]。项目研究了在地基横向半幅浸水工况下, 地铁隧道拱底的受力特征。其中 L1~L6 处分别布置了电阻应变片和光栅光纤应变传感器。

图 6 为基底横向半幅浸水拱底应变值。可以看出: ①光栅光纤传感器与电阻应变片的监测结果变形规律大体相似, 但电阻式应变片的数据不稳定, 整体表现出较大的波动。因为无线传输技术没有滑环的电阻变化, 且光栅光纤是通过光信号传输数据, 因此光栅光纤传感器具有良好的稳定性和抗干扰性。②随着基地浸水高度的增加, 隧道的应变不断增大, 当浸水高度为 150 mm 时应变达到最大值。③隧道底部应变均为负值, 且湿陷区域 (L4~L5) 的应变值大于非湿陷区域 (L1~L3) 的应变值。说明地基发生不均匀沉降, 隧道底部受压。

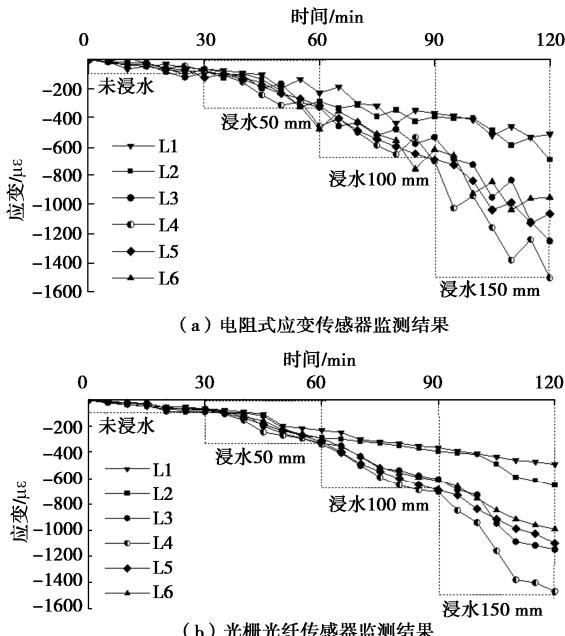


图 6 基底横向半幅浸水拱底应变值

Fig. 6 Strain values of arch bottom in horizontal half immersion of foundation

2.2 隧道下穿既有轨道开挖试验^[9]

以沣河东路大跨度连拱隧道下穿地铁五号线工程为背景, 凭借非接触式竖向位移场扫描系统, 研究了暗挖法隧道下穿施工对地表沉降的影响规律。图 7 为中隔墙开挖时地表的全场位移。试验结论如下: ①相较于传统的位移监测方法, 非接触式竖向位移场扫描系统具有数据量丰富、数据精度高、非接触、测量效率高等优点, 所测得的数据经过处理后能够较为直观地呈现扫描区域的地表沉降特征。②中隔墙开挖引起的横向沉降范围约为开挖孔直径的 3 倍, 横向表面沉降的最大值为-6.44 mm, 位于洞口开挖处。③纵向地表沉降随着进深逐渐减小, 存在时空分布效应。

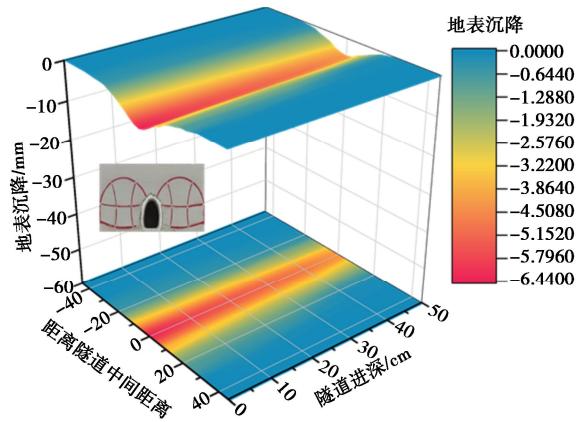
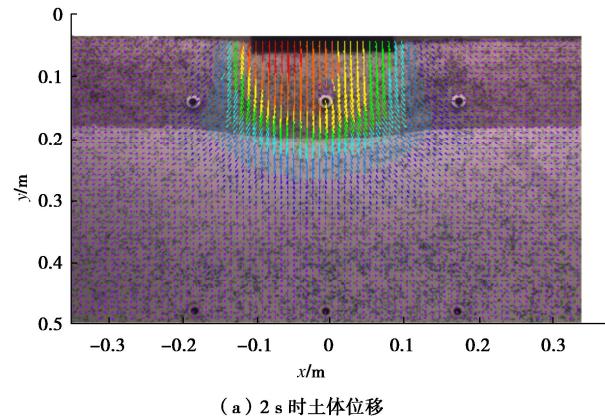


图 7 地表全场位移

Fig. 7 Full-field displacements of ground

2.3 地基承载力试验

为了验证树莓派摄影系统的可靠性, 在 TLJ-3 土工离心机上开展了地基承载力试验。摄像头型号为 Raspberry Pi Camera Model 3.1, 摄像头距离玻璃板 0.5 m。采用录像方式记录了加载过程。试验结束后结合 PIVlab 软件分析得到了土体的位移云图。图 8 分别为第 2 秒和第 15 秒的位移云图。可以看出: ①树莓派摄影系统可以清晰的记录土体的变形过程, 图像未发生明显畸变。②随着加载的进行, 土体的竖向位移逐渐增大, 加载块下方土体位移呈对称分布的趋势。



(a) 2 s 时土体位移

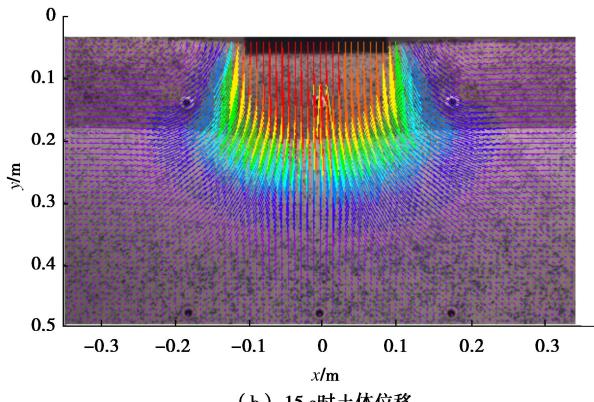


图 8 土体位移云图

Fig. 8 Cloud chart of soil displacement

3 结 论

回顾了现有离心机数据采集系统的一些缺点, 基于无线传输技术, 建立了一种新的数据采集系统, 并将这一系统应用于各种土工离心模型试验中, 测试结果良好, 主要得出 4 点结论。

(1) 无线传输技术消除了电滑环实体, 具有较好的抗电磁干扰能力, 基于 WIFI 7 的传输协议使得高吞吐量的数据传输成为可能, 应用前景广阔。

(2) 光栅光纤传感器相较于电阻式传感器具有体积小、可分布式布设的优点, 避免了传统传感器导线对土体的干扰。

(3) 开发了一种非接触式竖向位移场扫描系统, 该系统高了测量精度, 实现了竖向位移场的全断面测量。避免了单点位移计采集数据失败的风险。

(4) 基于树莓派套件搭建了一套摄影采集装置, 相较于传统的消费级相机, 该装置体积小, 价格便宜, 解决了图像畸变和离心力导致镜头下沉的问题。

参考文献:

- [1] CRAIG W H. Geotechnical centrifuges: past, present and future// Geotechnical Centrifuge Technology. Boca Raton: CRC Press, 2018: 1-18.
- [2] BUCKY Philip Barnett. Use of Models for the Study of mining Problems[M]. Columbia: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1931.
- [3] 王年香, 章为民. 土工离心模型试验技术与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (WANG Nianxiang, ZHANG Nianxiang, et al. Geotechnical Centrifuge Model Test Technology and its Application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [4] 陈生水, 顾行文, 任国峰, 等. NHRI-400 g·t 大型土工离心机升级改造[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 7-12. (CHEN Shengshui, GU Xingwen, REN Guofeng, et al. Upgrade of NHRI-400 g·t large geotechnical centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 7-12. (in Chinese))
- [5] 贾立翔, 施斌, 魏广庆, 等. 土工离心机光纤光栅测试系统及其模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 896-905. (JIA Lixiang, SHI Bin, WEI Guangqing, et al. Fiber Bragg grating test system and model tests based on geotechnical centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 896-905. (in Chinese))
- [6] 王新伦, 赵文凯, 林明, 等. 定点高速闪光摄影技术在土工离心机中的应用[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(3): 87-90. (WANG Xinlun, ZHAO Wenkai, LIN Ming, et al. Fixed-spot high-speed flash photography technique applied to geotechnical centrifuge[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(3): 87-90. (in Chinese))
- [7] PULLI K, BAKSHEEV A, KORNYAKOV K, et al. Real-time computer vision with OpenCV[J]. Communications of the ACM, 2012, 55(6): 61-69.
- [8] 董岳林. 深厚黄土地层湿陷对地铁盾构隧道结构变形的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2018. (DONG Yuelin. Effect of Tunnel Deformation on Metro Shield Tunnel Structure in Deep Loess Areas[D]. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese))
- [9] 翁效林, 陈禹勋, 贾金昌, 等. 大跨度双连拱隧道下穿既有地铁近接施工的围岩力学特征模型试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(6): 137-147. (WENG Xiaolin, CHEN Yuxun, JIA Jinchang, et al. Model test study on mechanical characteristics of surrounding rock of long-span double-arch tunnel underpassing existing subway close-spaced construction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6): 137-147. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)