

DIC 技术对通车的横向分段钢桥施工时 振动监测研究

陈柳花

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

摘要: 针对 G15 嘉浏高速改扩建工程施工中钢箱梁桥分阶段横向拼接带来的半幅通车半幅施工变形控制的难点,采用非接触数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术,结合免靶标和有靶标的多种测量方式,监测得到在车辆荷载下不同监测点的动挠度时程数据、最大挠度数据和桥梁振动变形分布情况,同时对数据分析的结果表明 DIC 技术在桥梁位移测量中应用的可行性,可以为在通车条件下横向分段拼装桥梁的连接评估振动特性,为后续的老桥改扩建项目的施工监测提供了重要的技术参考。

关键词: 桥梁;数字图像技术;动挠度;傅里叶变换;监测

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0261-06

Research on Vibration Monitoring of Transverse Sectional Steel Bridges in Operation during Construction Using DIC Technology

CHEN Liuhua

[Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: Aiming at the difficulty of controlling the deformation of half traffic and half construction caused by the transverse splicing of steel box girder bridge in stages in the construction of G15 Jialiang Expressway Reconstruction and Expansion Project, combined with a variety of measurement methods without and with targets, the non-contact digital image correlation (DIC) technology is adopted to monitor the time-history data of dynamic deflection, the maximum deflection data and the distribution of bridge vibration deformation at different monitoring points under vehicle load. Meanwhile, the results of data analysis show the feasibility of applying DIC technology in the measurement of bridge displacement, which can evaluate the vibration characteristics for the connection of transverse segmental assembled bridges under traffic conditions, and provides an important technical reference for the construction monitoring of the subsequent reconstruction and expansion projects of the old bridges.

Keywords: bridge; digital image correlation; dynamic deflection; Fourier transform; monitoring

0 引言

桥梁位移是评估桥梁安全性的重要指标之一,可用于桥梁健康监测和损伤识别等^[1]。传统的接触式测量桥梁位移的方法,如百分表、位移计和传感器等装置,基本都存在精度低、周期长、数据离散、设备难以布置等问题。而非接触测量桥梁位移的方法,如 GPS、散斑干涉法、全息干涉法、云纹干涉法测量等,虽然精度高、采集时间长、实时性强,但成本高、采样频率低、操作复杂,不适合常规的中小桥梁监测;散斑干涉法、全息干涉法、云纹干涉法测量精度

很高,适用于结构的微小位移与应变的测量,但三种干涉法非常容易受到测试环境中光照变化的影响,因而在实际中的应用受到了限制^[2]。目前针对桥梁振动的监测方式还需研究。

本文以 G15 嘉浏高速“六拓八”改扩建工程为研究对象,针对一座横向分段安装的钢箱梁桥——祁迁河桥进行拼接过程的振动监测。新桥结构的横向设计为单幅三箱,见图 1。由于需要先拆除老桥并实时保障交通,所以单幅三箱桥涉及到分阶段施工,该拼宽桥梁的施工重点在于,一幅桥梁在通车有振动的情况下要将另外半幅桥连接,因此需要了解通车桥的振动分布情况,确定合理的横向连接措施工艺,同时因桥梁下方河道通航,桥上通车的情况,接触式监测设备难以布置点位。目前行业内的监测技术

收稿日期: 2025-04-17

作者简介: 陈柳花(1988—),女,硕士,高级工程师,从事市政桥梁施工及数字化工作。

基本都是对已经运营的桥梁进行监测^[3],但本文是对带交通荷载的在建单幅桥梁进行非接触监测研究。

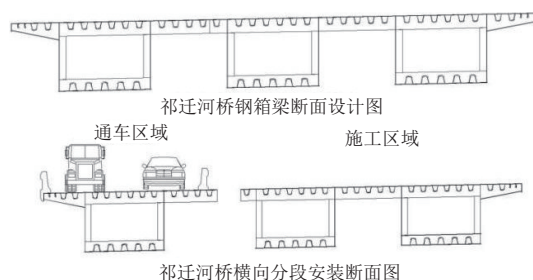


图1 新建祁迁河桥总体布置横断面图和分段施工断面图

数字图像相关技术(Digital Image Correlation, 以下简称 DIC)是近年来新发展的一种非接触的监测方式,随着计算机运算能力和图像采集设备的快速发展,基于机器视觉的测量技术有着精度高、非接触、工作环境要求低、适合连续在线监测的优势^[4-6],同时它的测量精度可以达到亚毫米级,测量距离也可以达到百米。DIC 技术目前在桥梁形变监测中均有多个应用案例。Alipour 等^[7]利用 DIC 技术,对一座跨度长达 300 m 的实桥进行挠度测试,实测表明基于消费级相机的二维 DIC 系统的实测精度可达 0.2 mm。Dhanasekar 等^[8]利用 DIC 技术对两座年代久远的砖石拱桥进行了运营状况评估,分别对两座拱桥的拱顶、支点处以及四分点处在列车荷载下进行了挠度测试,结果显示最大挠度为 0.5 mm,同时与有限元计算结果吻合,表明两座砖石拱桥运营状况良好。潘兵等基于 DIC 技术研制的无靶标视频挠度仪^[9],已在武汉长江大桥、塑黄铁路桥、市政桥梁等众多桥梁健康监测中获得应用,测得现场桥梁挠度测量可实现 3 510 目标点/s 的实时处理和显示速度,图像位移精度优于 0.01 像素。Yoneyama 等^[10]利用 DIC 技术进行了实桥静荷载试验,结果表明,进行多点 DIC 位移测试时,无需人为涂抹随机散斑特征,也能够顺利进行实桥挠度测试。

本项目采用 DIC 技术,对祁迁河桥在通车状态的桥梁进行了动挠度监测,并对实测数据分析,结果表明该幅桥在完成横向连接后,整体刚度提高,同时说明 DIC 用于桥梁位移监测具有可行性,有助于工程中准确有效地测量桥梁位移、评估桥梁振动特性,为工程提供重要的数据参数。

1 监测原理

DIC 技术的基本原理是将测试对象变形前后的

两张图像进行网格划分,对划分所得的子区域图像数据进行分析处理确定此区域的中心点,即追踪目标点,进而能追踪多个目标点。获得目标点后基于整像素匹配及亚像素匹配算法对目标点分析,得到后续每一帧图像的目标点信息,从而测得其位移的时程变化情况。

1.1 DIC 技术监测靶标选择

本次测量部分监测点采用免靶标追踪体系,可以摆脱传统光学测量依赖于特定靶标图案的缺陷,凭借 DIC 技术优势,可实现对任意图像纹理的精确追踪,大大提升 DIC 技术在实际工程项目中的普适性,有效避免了靶标图案污损老化使得传统图像识别算法失效的问题。本项目主要是在桥梁跨中无法贴靶标的情况下采用此方法。

有靶标监测技术可以实现对测点位置的自动识别以及对图像的自标定,本项目采用了一种用于点位移测量的靶标图案^[11],基于计算机视觉原理,可通过中心处的同心圆进行测点识别,并基于已知尺寸的四角点圆形图案进行二维或三维场景的自标定^[12],从而避免测量前对数字图像采集设备进行人工标定,可以大大提高工作效率及精准度。同心圆靶标规格为 20 cm×20 cm,见图 2。

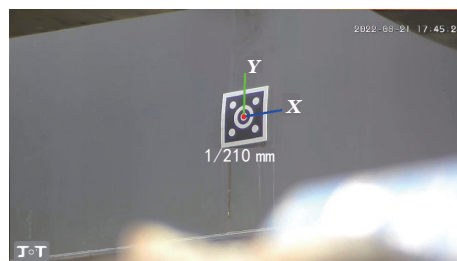


图2 测点靶标图案

1.2 监测相机选择

DIC 技术测量中可以采用无线工业相机和有线工业相机两种方式。无线工业相机主要适用于现场布线条件差、目标物振动频率较低的测量场景^[13]。无线工业相机参数:传感器为 200 MP、1/2.9'' CMOS,配备 16~48 mm 变焦镜头,分辨率为 1 920×1 080 像素,采样频率为 0~20 Hz。在保证图像高质量传输的情况下,可大大降低传输数据量,使得在同一路由器下可同时传输多个无线工业相机的数据,从而实现多测点同步测量。

有线工业相机可满足高频测量需求,适合于布线条件好的测试场景。有线工业相机参数:传感器为 1/1.8'' CMOS,配备 16~48 mm 变焦镜头,分辨率为 1 600×1 200 像素,采样频率为 0~160 Hz。有线工

业相机直接与终端电脑连接,因此图像不需做编解码处理,仅需终端电脑搭配有高速传输的数据接口。

1.3 DIC 光学测量算法及硬件选择

在实际工程应用中,依托上海交通大学自主研发的光学测量算法与配套仪器系统^[14],开展桥梁动挠度监测。所采用的核心算法为基于单目视觉与同心圆靶标的自标定三维位移测量算法,该算法通过识别靶标特征点,结合其几何结构,利用 PnP 算法估算相机的三维位置与姿态变化,进而计算结构表面的三维位移,可实现无需人为介入的自动外参标定,配套的监测仪器为 JT-1022 多点动位移光学传感器^[15]。

电脑配置参数:多核 i5CPU 及以上,运行内存 8GB 以上,硬盘容量 128G 及以上。

2 监测方案

2.1 监测工况

G15 嘉浏段是上海市与江苏联系的重要高速公路之一,车流量较高,改扩建前全天双向车流量在 16.6 万车次左右,高峰时段单向车流量约 6 100 车次/h,货车流量占总流量达到 25%。

本次监测试验设计了两种工况,工况一:半幅通车的情况下监测通车桥梁振动情况,了解半幅梁体动态变形情况,为后续半幅梁体在通车情况下进行横向拼接的施工工艺提供数据支持。工况二:分段拼装横向连接后监测整幅桥梁振动情况,了解全桥的动态振动情况。

对工况一、二梁体动挠度分别进行监测,现场监测时间均为 1h。通过动挠度曲线得到动位移幅值,再根据快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)分析得到频率,进而可以反映桥梁动力特性。

2.2 测点布置及监测方式

针对祁迁河桥的南岸边跨中点内外侧、北岸边跨中点和主跨 1/3 处、中点处设置监测点,见图 3。通过 DIC 技术获取测点的动位移幅值及频率,进而掌握通车条件下桥梁振动情况。



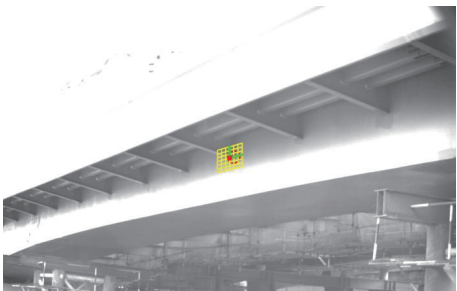
图 3 测点示意图

现场的视觉测量系统由便携式相机、三脚架、移动笔记本电脑、移动电源和无线路由器等设备组成。测量主跨的振动时,相机架在岸边平地上,见图 4,测量边跨的振动时,相机架在临近便道上,并调整相机的焦距和角度。

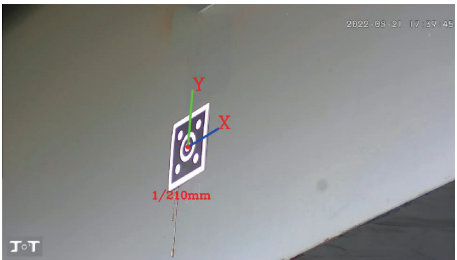


图 4 现场测量相机位置

对于跨中无法贴靶标点的情况,采用免靶标的 DIC 监测方式,现场采用箱梁托架角点作为主跨跨中测点,见图 5(a)。而其余监测点均采用有靶标的 DIC 监测方式,靶标贴在钢箱梁腹板中间,见图 5(b)。基于同心圆的靶标专用图案,可以实现测点自动识别及图像自动标定。图 5 中红色点为追踪点,该单应性矩阵^[16]对应坐标系的原点建于追踪点附近, x 轴为纵桥向, y 轴建于竖直面内向上。标定单应性矩阵的目标在于将 DIC 测得的像素位移结果转换为公米制(如 m、cm、mm)位移。像素与毫米间的转换关系中的误差已由 Busca 等^[17]利用 DIC 技术在一座铁路简支钢桁架梁桥在列车经过时的位移响应中得到验证。



(a) 中跨跨中免靶标测量



(b) 其他测点靶标测量

图 5 测点示意图

2.3 监测设备布置

针对现场桥梁跨中和边跨不同的监测工况,本

项目采用有线和无线结合的测量方式,具体监测设备布置情况及测量距离见表 1。

表 1 监测设备布置及技术参数		
相机类型	测点位置	测距/m
无线	北岸边跨	8
	南岸边跨外侧	8
	南岸边跨内侧	12
有线	主跨跨中	30
	北岸中跨 1/3	15
	南岸中跨 1/3	15

3 监测结果

3.1 动挠度数据

基于 DIC 技术实测得到动挠度监测数据进行分析,得出各测点的挠度曲线,工况一和工况二的动挠度分别见图 6、图 7,动挠度曲线图仅放跨中中点的监测数据,其他监测点的数据与之相似。其中图 6(a)、图 7(a)中产生较大挠度值的原因是对应时间内桥面上有货车经过,进一步可以证明 G15 高速交通流量的繁重。

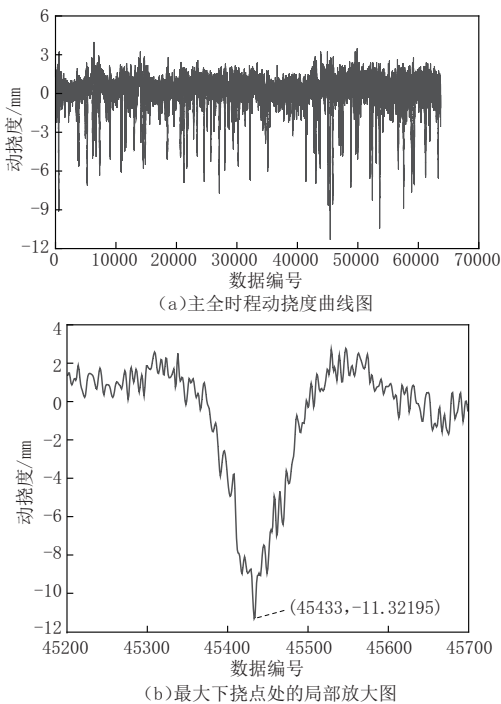


图 6 工况一主跨跨中动挠度曲线

同时整理了六个监测点的曲线数据,得到最大上挠、最大下挠、全局最大振幅与瞬时最大振幅,工况一数据见表 2,工况二数据见表 3。

3.2 频率分析

对时程数据进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),分别得到工况一和工况二桥梁振动的前两阶频率见图 8、图 9,振动频谱仅放跨中中点

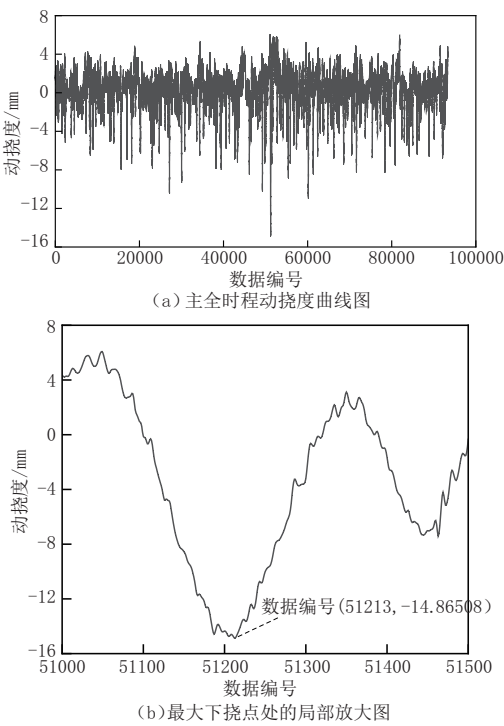


图 7 工况二主跨跨中动挠度曲线

表 2 工况一桥梁动挠度监测数据				
测点位置	工况一动挠度监测数据/mm			
	最大上挠	最大下挠	全局最大振幅	瞬时最大振幅
主跨跨中	3.988	-11.322	15.310	14.041
北岸边跨	3.406	-6.780	10.186	9.993
南岸边跨外侧	2.420	-6.792	9.212	8.988
南岸边跨内侧	1.674	-3.116	4.790	4.491
主跨靠近北岸 1/3	3.368	-7.104	10.472	10.472
主跨靠近南岸 1/3	2.545	-5.601	8.145	7.545

表 3 工况二桥梁动挠度监测数据				
测点位置	工况二动挠度监测数据/mm			
	最大上挠	最大下挠	全局最大振幅	瞬时最大振幅
主跨跨中	6.075	-14.865	20.940	18.522
北岸边跨	4.083	-7.278	11.361	10.748
南岸边跨外侧	3.043	-6.511	9.554	7.916
南岸边跨内侧	2.687	-4.144	6.831	5.921
主跨靠近北岸 1/3	6.152	-10.988	17.139	8.634
主跨靠近南岸 1/3	3.739	-5.507	9.246	8.986

的监测数据,其他监测点的数据与之相似。

3.3 数据分析

通过分析表 2 可以得到,工况一的桥梁动挠度基本都在 10 mm 以内,振动变形基本都在施工可控范围内,因此在进行另外半幅钢箱梁安装时,架设到位时选取几个不同位置点的横梁进行焊接,使其与通车半幅的钢箱梁形成初固定,随后再进行整体的焊接使其连成一体。

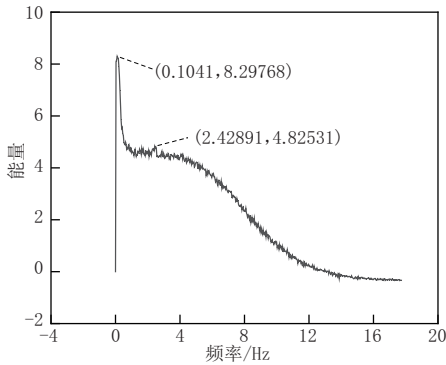


图8 工况一主跨跨中位移振动频谱

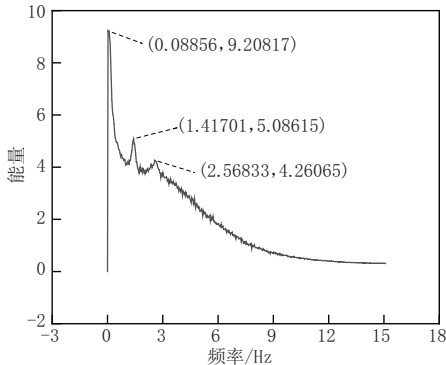


图9 工况二主跨跨中位移振动频谱

随后对工况二与工况一动挠度和频率数据进行对比,得到动挠度的变化幅度(见表4)及桥梁振动频率的变化(见表5)。

表4 动挠度变化幅度

测点位置	动挠度变化幅度			
	最大上挠	最大下挠	全局最大振幅	瞬时最大振幅
主跨跨中	0.523	0.313	0.368	0.319
北岸边跨	0.199	0.073	0.115	0.076
南岸边跨外侧	0.257	-0.041	0.037	-0.119
南岸边跨内侧	0.605	0.330	0.426	0.318
主跨靠近北岸 1/3	0.827	0.547	0.637	-0.176
主跨靠近南岸 1/3	0.469	-0.017	0.135	0.191

表5 桥梁频率变化

频率	工况一	工况二	工况一	工况二
	(一阶频率)	(一阶频率)	(二阶频率)	(二阶频率)
主跨跨中	0.104	0.089	2.429	1.417
北岸边跨	0.128	0.146	2.266	2.067
南岸边跨外侧	0.266	0.142	不明显	2.044
南岸边跨内侧	0.295	0.157	不明显	2.123
主跨靠近北岸 1/3	0.105	0.122	2.416	2.13
主跨靠近南岸 1/3	0.123	0.151	不明显	2.083

(1)研究表4的动挠度幅值变化,由于工况二双向四车道通车,相较于工况一单向一车道通车,车辆荷载增大至4倍,但动挠度增幅基本不超过0.5,最高为0.827,说明等效挠度还是降低的,证明了在两种

工况梁体横向连接后,桥梁的整体刚度确有增强。

(2)从表5可以看出,工况一和工况二的一阶振动频率差异不大,均约为0.1 Hz,说明在车辆荷载作用下,桥梁一阶振动频率主要由车辆荷载决定,这与实际情况相符,证明测试无误。而边跨测点振动频率大于0.2 Hz,比主跨测点的振动频率要高,这是因为连续梁桥的边跨测点处于桥墩附近,受到的约束较多,桥墩的刚度对其振动起着一定的限制作用。相对而言,主跨测点由于离桥墩较远,所受到的约束较少,因此具有更大的自由度和振动幅度,其振动频率相对边跨测点较低。

(3)研究表5的二阶频率,其中工况一南岸边跨内侧、南岸边跨内侧、主跨靠近南岸 1/3 三个测点未测到明显二阶振动频率。而考虑到车桥的耦合作用,桥梁二阶振动频率应该主要与桥梁本身的刚度有关,可以看到,二阶振动频率工况二较工况一基本一致,都为2 Hz左右,证明了车桥耦合作用下桥梁本身的刚度特性是二阶频率的主要影响因素,进一步的验证了 DIC 技术用于桥梁动位移测量中的可行性。

(4)同时在工况二中,主跨跨中、主跨靠近北岸 1/3、主跨靠近南岸 1/3 三个测点还测到了三阶频率,说明这些位置属于动力特性较为活跃的区域。

4 结 语

本项目采用 DIC 技术,结合试验对在建的祁迁河桥进行多测点动挠度监测,并对两种施工工况进行对比分析,得到结论如下:

(1)采用 DIC 亚像素算法技术,结合现场免靶标与有靶标、有线相机与无线相机并用的方法,测量精度达到0.01 mm,满足桥梁监测的精度要求。

(2)通过对祁迁河桥半幅通车和横向拼接后通车的两种状态进行多个相同点位监测,经过动挠度和振动频率分析得到梁体横向连接后的整体刚度明显增强,与工程实际施工受力变化相符。

(3)针对改扩建项目中桥梁需要二次连接,特别是带交通荷载情况下需要了解桥梁的振动情况以此来确定合理的施工连接时机和工艺措施,用 DIC 技术的非监测方式效果良好,也突破了传统设备现场布点的局限性,并成本可控。

(4)验证了 DIC 技术在桥梁施工监测中的有效性,但在便捷的数据后处理、监测的连续性等方面需要进一步优化,同时该监测技术易受环境光照条件、

环境温度、湿度、气压、散斑特征等影响,后续还将继续研究让其在桥梁监测中发挥更大的价值。

(5)验证了DIC技术对在桥梁的监测的适用性,未来也可在桥梁运营期的日常监测、铁路桥的振动监测、受损桥梁的振动监测等方向进行应用。

参考文献:

- [1] 邢亚鹏,何家源,刘国銮.基于DIC技术的桥梁非接触变形测量研究[J].市政技术,2022,40(4):214-217;236.
- [2] 晏班夫,欧阳康,梁才.桥梁工程中非接触位移测量技术研究综述[J].交通运输工程学报,2024,24(1):43-67.
- [3] 孙利民,尚志强,夏烨.大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J].中国公路学报,2019,32(11):1-20.
- [4] 周云,程依婷.基于数字图像相关理论的非接触式结构位移测量方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(5):1-9.
- [5] 李得睿.基于数字图像相关与视频运动放大技术的结构形变测试[D].长沙:湖南大学,2020.
- [6] 顾盛,史慧媛,张军,等.数字图像相关技术在土木工程中的应用进展[J].南京工程学院学报(自然科学版),2024,22(4):21-30.
- [7] Alipour M, Washlesky S J, Harris D K. Field Deployment and Laboratory Evaluation of 2D Digital Image Correlation for Deflection Sensing in Complex Environments[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(4): 04019010.
- [8] Dhanasekar M, Prasad P, Dorji J, et al. Serviceability assessment of masonry arch bridges using digital image correlation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(20): 04018120.
- [9] Pan B, Tian L, Song X. Real-time, non-contact and targetless measurement of vertical deflection of bridges using off-axis digital image correlation[J]. Ndt & E International, 2016(979): 73-80.
- [10] Yoneyama S, Kitagawa A, Iwata S, et al. BRIDGE DEFLECTION MEASUREMENT USING DIGITAL IMAGE CORRELATION[J]. Experimental Techniques, 2007, 31(1): 34-40.
- [11] 周豪,李得睿,王凯,等.多点动位移数字图像相关法光测技术研究[J].科学技术与工程,2023,23(18):7709-7715.
- [12] 程斌,黄斌,李得睿.基于平行激光测距的图像自标定方法[J].上海交通大学学报,2022,56(7):850-857.
- [13] 林运飞,陈琳,李倍安,等.基于边缘检测与数字图像相关的桥梁结构变形测试[J].公路工程,2024,49(3):13-21;28.
- [14] Li D, Cheng B, Wang K. Self-calibrating technique for 3D displacement measurement using monocular vision and planar marker[J]. Automation in Construction, 2024(159):105263.
- [15] 上海交途科技有限公司,上海交通大学.一种基于机器视觉的位移自动测量方法及系统:ZL202210104210.X[P].2024-07-19.
- [16] 刘星.基于数字图像相关的桥梁结构动态位移监测方法研究[D].长沙:湖南大学,2022.
- [17] Busca G, Cigada A, Mazzoleni P, et al. Vibration Monitoring of Multiple Bridge Points by Means of a Unique Vision-Based Measuring System[J]. Experimental Mechanics, 2014, 54(2): 255-271.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

