

融合无人机线型测量与振动测试的桥梁状态评估

周云^{1,2}, 李剑³, 刘鹏¹, 周晓枫^{1†}, 潘恒³, 杜宗³

[1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082;

3. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430201]

摘要:基于无人机摄影测量及随机振动测试的方法,探索在不封闭交通条件下进行桥梁状态评估的方法.以长沙市某大桥为例,通过采用结构识别理论与无人机倾斜摄影技术分别对桥梁线型、桥梁病害、动力特性进行研究.利用无人机三维倾斜摄影技术重建目标桥梁三维实景模型并通过点云模型提取桥梁线型,将无人机测量线型与水准测量线型以及设计线型进行对比,研究发现线型差值的平均值为 0.034 m,平均相对挠度值为 $L/12705$ (L 为桥梁跨度),标准差为 0.035 m,两者结果较为接近,验证了无人机测量桥梁线型的可靠性,也验证了运营桥梁期间外观尺寸无显著改变.利用小型无人机技术对目标桥梁辅助进行外观质量调查,调查桥墩病害和支座损伤特征,结果表明桥梁无结构性损伤.通过对结构进行环境振动测试,以行车、风等荷载作为激励,利用复模态指示函数(Complex Modal Indicator Function, CMIF)法捕捉结构模态参数(频率、振型、阻尼比),对比 10 年前历史基线模态数据并综合考虑环境温度影响,判断该桥结构刚度无明显下降.研究表明采用“无人机三维建模线型测量+无人机病害调查+随机振动测试”的桥梁健康状态的综合评估技术具有可行性、经济性及实用性.

关键词:桥梁;结构识别;环境振动测试;无人机非接触式测量;线型测量;状态评估

中图分类号:U446;P231

文献标志码:A

Bridge Condition Evaluation by Integrating UAV Line Shape Measurement and Vibration Test

ZHOU Yun^{1,2}, LI Jian³, LIU Peng¹, ZHOU Xiaofeng^{1†}, PAN Heng³, DU Zong³

[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China;

3. China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd., Wuhan 430201, China]

Abstract: Based on the method of UAV photogrammetry and random vibration test, this paper explores a method to evaluate bridge conditions under non-closed traffic conditions. Using a bridge in Changsha as an example, the bridge line shape, bridge disease, and dynamic characteristics were studied by using structural identification

* 收稿日期:2022-10-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878264, 52278306), National Natural Science Foundation of China(51878264, 52278306); 湖南省重点研发计划资助项目(2022SK2096), Key Research and Development Program of Hunan Province(2022SK2096); 湖南省交通厅科技进步与创新项目(201912), Science and Technology Progress and Innovation Project of the Department of Transportation of Hunan Province(201912); 河南省交通科技项目(2020G11), Transportation Science and Technology Project of Henan Province(2020G11)

作者简介:周云(1979—),男,湖南长沙人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail: zxf1021@hnu.edu.cn

theory and UAV oblique photography technology. The UAV 3D oblique photography technology is used to reconstruct the 3D scene model of the target bridge and to extract the bridge line shape through the point cloud model. The UAV measurement line shape is compared with the leveling line shape and the design line shape. It is found that the average value of the line shape difference is 0.034 m, the average relative deflection value is $L/12705$, and the standard deviation is 0.035 m. The two results are close, which verifies the reliability of the UAV measurement bridge line shape and that there is no significant change in the appearance size during the operation of the bridge. The small UAV technology was used to investigate the appearance quality of the target bridge, and the pier disease and bearing damage characteristics were investigated. The results showed that the bridge had no structural damage. Through the environmental vibration test of the structure, the Complex Modal Indicator Function (CMIF) method is used to capture the structural modal parameters (frequency, mode shape, damping ratio) with the load of driving and wind as the excitation. By comparing the historical baseline modal data 10 years ago and considering the influence of ambient temperature, it is judged that the structural stiffness of the bridge does not decrease significantly. The research shows that the comprehensive evaluation technology of bridge health status using "UAV 3D modeling linear measurement+ UAV disease investigation + random vibration test" is feasible, economical, and practical.

Key words: bridges; structural identification; ambient vibration testing; UAV non-contact measurement; line shape test; condition evaluation

城市桥梁是城市交通线的动脉,对区域经济发展及人们的日常生活起到重要的纽带作用.然而,由于日晒雨淋、冻融循环、疲劳腐蚀、材料老化、车辆超载等因素影响,且随着服役年限增长,桥梁受到的荷载逐年增大,桥梁在运营阶段将会产生损伤甚至破坏坍塌,引发灾难性事故^[1].传统桥梁状态评估方法主要通过静动载试验结合确定结构的性能,由于封闭交通不便、检测费用高及检测时间长的特点,因此部分运营城市和高速公路桥梁的试验开展不便且成本高.

线型测量是判断桥梁结构健康状态的重要依据,通过检测桥梁线型变化,可以及时掌握桥梁使用过程各关键截面的挠度变化,进一步掌握桥梁在结构安全、行车条件、耐久性等方面的变化.现有桥梁线型测量手段主要依靠水准测量方法,使用水准仪或全站仪测量各关键点相对的高程坐标,画出断面图得到桥梁线型,该方法是一种传统的方法,精度高但效率较低^[2-3].本文使用无人机倾斜摄影技术对桥梁线型进行测量,该技术是建立实景模型的有效方法^[4-6].目前国内外学者围绕无人机倾斜摄影技术和桥梁线型测量开展了深入研究.Zhang等^[7]提出基于倾斜摄影技术的桥梁施工进度管理方法,通过建立武汉沌口长江大桥施工进度可视化管理平台,论证了该技术在桥梁施工进度管理中具有广阔的应用前

景.Pepe等^[8]使用无人机倾斜摄影技术建立一座两跨石拱桥的三维点云模型,基于工业基础类标准定义材料本构,进而重建桥梁有限元模型.刘琼琼^[9]使用非测量相机近景摄影测量方法开展了桥梁线型检测,使用实验场检校法对实桥进行实测,计算的误差为0.235 m.张绍成等^[10]采用GPS和北斗的实时差分动态(RTK)与高精度光纤惯性测量系统(INS)结合的紧组合解决方案,利用INS辅助RTK在信号失锁的时间内,实现对桥梁线型的准确测量.何聪^[3]使用倾角传感器对倾角状态进行检测,通过差分处理滤除影响测量精度的共模噪声干扰,采用微处理器对倾角电压信号进行过采样和温度补偿处理,实现对桥梁线型状态的实时监测.

外观调查也是桥梁检测中常用的手段,通过观察桥梁缺陷和损伤的部位、性质、严重程度及发展趋势,查明缺陷及损伤发生的主要原因,进而分析和评价桥梁结构的健康状态.随着无人机系统的广泛应用,使用无人机对桥梁结构进行外观调查也有了长足的发展.Gillins等^[11]对位于俄勒冈州的独立桥进行无人机巡检,重点针对焊缝开裂、混凝土裂缝、支座移动、螺栓生锈或松动等情况进行检查.Burgett等^[12]在不封闭交通的情况下,利用无人机检查贝茨大桥的螺栓松动、支座缺陷、混凝土裂缝等病害,有效节约了检测成本.

基于随机振动测试的结构识别须在环境激励(如行车、风、海浪等)作用下,通过获取输出响应进行结构参数识别,进而评估桥梁安全运营状态.国内外众多学者采用环境振动测试对连续刚构桥的结构识别进行了大量的研究工作. Pan 等^[13]研究了影响结构识别结果的各种不确定因素来源,并通过对一座大跨度钢拱桥的结构识别和模型校验说明了如何减小不确定性因素对识别结果的影响. Zhang 等^[14]介绍了一套基于环境振动测试的结构识别策略,并对一座大跨悬索桥进行了模态分析,不同结构识别方法结果的一致性验证了该策略的有效性. 周云等^[15]采用随机子空间识别法(Stochastic Subspace Identification, SSI)方法,对两座大跨度拱桥进行了结构参数识别,并利用灵敏度分析方法,精确建立了能够准确反映结构状况的有限元校验模型. Kim 等^[16]对一座单缆悬索桥进行了非平稳环境下的结构振动测试,为消除非平稳性,根据实测响应引入调幅函数,以准确识别出非平稳环境振动下桥梁的阻尼. Altunisik 等^[17]对 Buzlupinar 木桥进行了无损环境振动试验,并对该桥进行了工作模态分析,基于模态拾取动力参数,对有限元模型的弹性模量、边界条件及截面特性进行了校正,进而对桥梁健康状况进行了评估. Yang 等^[18]开发了一种确定性随机子空间识别方法,提高了在列车荷载作用下铁路桥梁的模态可识别性. Yang 等^[19]针对具有异步响应的桥梁模态分析,提出一种增强的 NExT,通过采用两阶段时滞技术同步多通道响应,并基于有限元模型及实测数据验证了该方法的有效性. Saidin 等^[20]对马来西亚一座 50 m 长的 UHPC 公路桥进行了单跨环境振动测试,采用 SSI、频域识别法、增强频域识别法获取其结构动力特性,并利用灵敏度方法对结构有限元模型进行了修正,准确评估了桥梁结构当前的状态.

本文以一座三跨连续刚构桥为研究对象,采用线型观测和结构病害调查,结合随机振动测试联合工作模态分析,综合评估目标桥梁在不封闭交通情况下的结构健康状态. 利用无人机三维倾斜摄影技术重建目标桥梁三维实景模型并通过点云模型提取桥梁线型. 利用小型无人机技术对目标桥梁辅助进行外观质量调查,调查桥墩病害和支座损伤特征. 通过对结构进行环境振动测试并利用 CMIF 法捕捉结构的模态参数,对比 10 年前历史基线模态数据并综合考虑环境温度影响,判断结构刚度无明显下降,提出了通过对比历史基线数据在不封闭交通条件下进行桥梁状态评估的系统方法.

1 工程概况

目标测试桥梁位于长沙市湘江新区,桥梁全长 842 m,全桥桥面宽 29.5 m,跨孔布置:3×30 m(北引桥)+(73+106+73) m(主桥)+3×30 m(南引桥),主桥和引桥均为预应力混凝土箱梁结构. 主桥上部结构采用预应力混凝土连续刚构,直腹板单箱单室截面. 中支点处梁高 665 cm,高跨比 1/15.9,跨中和边支点处梁高 265 cm,高跨比 1/40. 主桥 4、5 号桥墩采用双薄壁墩,墩底尺寸 7.64 m×2.14 m,墩顶尺寸 7.64 m×6.62 m. 该大桥结构示意图如图 1 所示. 湖南大学土木工程结构健康监测研究团队于 2022 年 6 月对该桥进行了动力试验及线型测量.



图1 某大桥结构示意图

Fig.1 Structure of the bridge

2 不封闭交通的桥梁状态评估

结构识别理论最早由 Hart 与 Yao 在 1977 年提出^[21],是使用输入和/或输出测试数据来识别结构参数的系统性方法,是结构健康监测应用的关键. 经过多年的发展,逐渐形成了“理论-试验-评估”六步综合圆的范式^[22],使其成为提高桥梁运营和维护管理决策可靠性的有效工具. 本文在不封闭交通的条件下,运用“无人机三维建模线型测量+无人机病害调查+随机振动测试”的结构识别方法对目标桥梁进行识别,通过综合对比历史数据(线型、外观、动力特性)进行状态评估. 具体流程如图 2 所示.

2.1 无人机摄影线型测量及外观调查

2.1.1 技术路线及实施方案

1) 整体技术路线. 本研究基于无人机倾斜摄影



图 2 “理论-试验-评估”六步综合图

Fig.2 Six-step of “Theory-Test-Evaluation” circle

技术建立桥梁三维实景模型,在模型中提取桥梁三维高程信息,确定桥梁线型,整体技术路线步骤主要分为 5 步。

第 1 步 原始数据采集.使用无人机采集目标桥梁多视图影像、POS 数据和外控成果.对采集图像进行预处理,同时确保航向重叠率不小于 80%,旁向重叠度不小于 60%,为了获取准确高程信息并控制消除由于数字积累误差造成的远距离几何失真,应同时采集 POS 数据和外控点成果。

第 2 步 空中三角测量.以倾斜摄影瞬间 POS 系统的观测值作为多角度倾斜影像的初始方位元素,根据成像模型,可计算每个像元的物方坐标.利用基于物方的多基线多特征匹配技术可生成倾斜影像之间大量的连接点,使用光束法区域网平差空中三角测量,使用中心投影共线方程[式(1)]进行平差,基于最小二乘法解算误差方程,实现稀疏点云构建。

$$\begin{cases} x-x_0+\Delta x=-f \frac{a_1(X-X_s)+b_1(Y-Y_s)+c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \\ y-y_0+\Delta y=-f \frac{a_2(X-X_s)+b_2(Y-Y_s)+c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中:\$(x,y)\$为像点坐标;\$(x_0,y_0)\$为像主点坐标;\$X,Y,Z\$为像点坐标对应的物方点坐标;\$X_s,Y_s,Z_s\$为成像投影中心坐标;\$a_i,b_i,c_i(i=1,2,3)\$是 3 个姿态角的方向余弦;\$f\$为焦距。

第 3 步 多视图影像匹配.空中三角测量解算出各影像外方位元素,使用最佳影像匹配单元进行特征匹配和逐级像素匹配,利用多视图视觉匹配算法对稀疏点云进行加密,将这些匹配单元定义成种子面片,将种子面片进一步扩展,过滤错误面片,迭代

扩散,得到稠密的面片结构,完成密集点云的重建。

第 4 步 构建 TIN 模型.基于点云采用 Delaunay 三角化方法对三维密集点云进行三角剖分,构建不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN),通过优化三角网,调整内部三角尺寸并简化相对平坦地区三角网络,获得 TIN 模型。

第 5 步 纹理映射.将建立的 TIN 模型封装成三维白模,建立三维点与图像中坐标的对应关系,基于瓦片技术将三维白模分割成若干个子区域,将图像纹理映射到空间三维白模上,实现目标桥梁三维实景模型重建。

2) 基于整体最小二乘法进行坐标提取.对于海量点云数据,很难找到中心点并确定其坐标,本文采用整体最小二乘法对分割后的目标区域进行平面拟合,提取拟合后的中心坐标作为中心点坐标,用中心点表示目标区域的实际高程。

整体最小二乘法是通过最小化误差的平方和寻找数据最佳匹配函数方法,在点云平面拟合过程中保证所有数据点到拟合平面的平均距离最小,具体方法如下。

点云 \$M\$ 任意一点坐标表示为 \$M_i(x_i, y_i, z_i)\$, \$i=0, 1, \dots, n-1\$. 对于一般线性方程 \$A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0\$, 将其用矩阵表示为:

$$Ax = L \quad (2)$$

改写为:

$$AL[x^T - E]^T = 0 \quad (3)$$

记增广矩阵 \$C = AL\$, 对增广矩阵 \$C\$ 进行奇异值分解:

$$C = U \sum V^T \quad (4)$$

其中,

$$\sum = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n, \sigma_{n+1}) \quad (5)$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq \sigma_{n+1} \geq 0 \quad (6)$$

整体最小二乘解可由增广矩阵右奇异向量的最后一列 \$V_{n+1}\$ 得到,即整体最小二乘解为:

$$x = -\frac{1}{V_{n+1, n+1}} [V_{1, n+1} \dots V_{n, n+1}] \quad (7)$$

对倾斜摄影技术生成的点云数据进行预处理后使用整体最小二乘法进行拟合.对数据进行边界拟合后的中心即为目标物表面中心,提取中心点坐标并记录。

2.1.2 桥梁线型测量分析

线型同样是评估桥梁健康状况的重要指标,基于线型几何参数的实测数据,可确定桥梁结构持久荷载状态的变化以及推求判定基础变位情况.采用无人机倾斜摄影方法对桥梁线型进行检测。

无人机测量时使用 DJI Mavic2 无人机,其最大像素 2 000 万,等效焦距 28 mm,可实时接收全球卫星导航系统信号,获取准确的无人机飞行定位信息.基于 2.1.1 节无人机倾斜摄影技术原理,利用 Context-Capture10.17 软件建立某大桥三维实景模型,如图 3 所示.采用精密水准仪并使用普通水准测量方法对无人机倾斜摄影方法所获取的桥梁线型进行校核.对桥梁上具有显著性特征的盲道和伸缩缝宽度及 3 处车行道与人行道的高度差进行了实测.以盲道 X 向(桥梁横向)和伸缩缝 Y 向(桥梁纵向)长度误差表征模型 X 向和 Y 向精度,以车行道与人行道高度差表征模型 Z 向精度. X 、 Y 、 Z 三个方向及三维精度计算公式分别如式(8)、式(9)所示.

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T'_i)^2}, \quad T = X, Y, Z \quad (8)$$

$$S = \sqrt{S_X^2 + S_Y^2 + S_Z^2} \quad (9)$$

式中: T_i 和 T'_i 分别为 X 、 Y 、 Z 三个方向第 i 段的现场实测值和模型分析值; S 为均方根误差.

相应的计算结果如表 1 所示, X 、 Y 、 Z 向及其三维误差在 1.6%~3.5% 之间,三维实景模型的精度和镜头成像质量、飞行高度、光照条件等密切相关,本模型精度满足要求.



图 3 某大桥三维实景模型

Fig.3 3D real scene model of the bridge

表 1 精度计算结果

Tab.1 Accuracy calculation results

实测位置	X 向		Y 向		Z 向		三维/mm
	实测值/mm	计算值/mm	实测值/mm	计算值/mm	实测值/mm	计算值/mm	
桥北侧	508	495	798	783	215	206	—
桥中	498	490	946	933	212	205	
桥南侧	495	489	662	653	255	247	
均方根误差	9.47		12.58		8.04		17.68

1) 主桥桥面线型检测.将某大桥按照主跨 8 等分点、边跨和引桥 4 等分点布置测试断面,在车行道上、下游边缘线 2 条线上分别布设观测点,如图 4 所示.

2) 引桥桥面线型检测.采用水准仪、无人机对引桥桥面线型进行测量.南引桥和北引桥测点布设如图 5 所示.

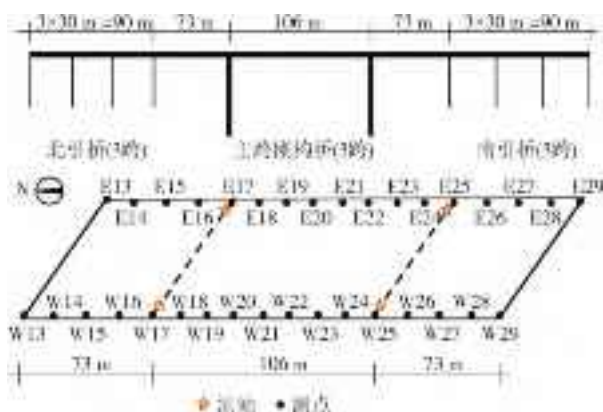


图 4 桥面线型测试测站设置

Fig.4 Bridge line shape test station setting

使用普通水准测量方法人工测量桥梁线型,并保证闭合差满足规范要求;使用五视倾斜摄影方法采取桥梁多视图序列影像,利用 2.1.1 节的倾斜摄影原理建立三维实景模型提取桥梁线型.

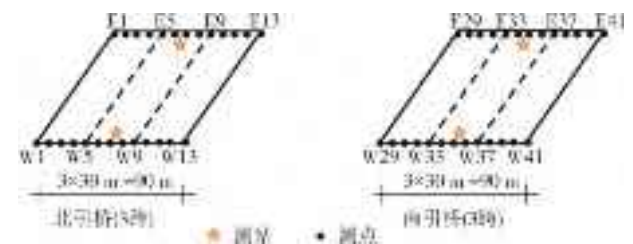


图 5 南北引桥 3 跨连续梁线型测试测点布置图

Fig.5 Layout diagram of linear measuring points for three span continuous beams of the north-south approach bridge

以关键点坐标建立桥梁线型,假设刚构桥中间两支座为不动点,处理数据时以两支座平均高程作为 ± 0 ,以实测点的高程至 ± 0 的差值作为相对高程,西、东侧桥梁线型实测结果分别如图 6 和图 7 所示.

2.1.3 桥梁线型结果分析

由图 6、图 7 可知,水准测量东、西侧线型差值最大值为 0.091 m,相对挠度值为 $L/4747$ (L 为桥梁跨度);无人机测量东、西侧线型差值最大值为 0.141 m,相对

挠度值为 $L/3063$, 说明桥梁左、右幅相对位移较小. 水准测量与设计线型相对位移最大值为 0.163 m , 相对挠度值为 $L/2650$; 无人机测量与设计线型相对位

移最大值则为 0.149 m , 相对挠度值为 $L/2899$, 说明桥梁设计线型与实测结果较为接近. 由于设计与施工存在偏差, 因此会存在一定误差.

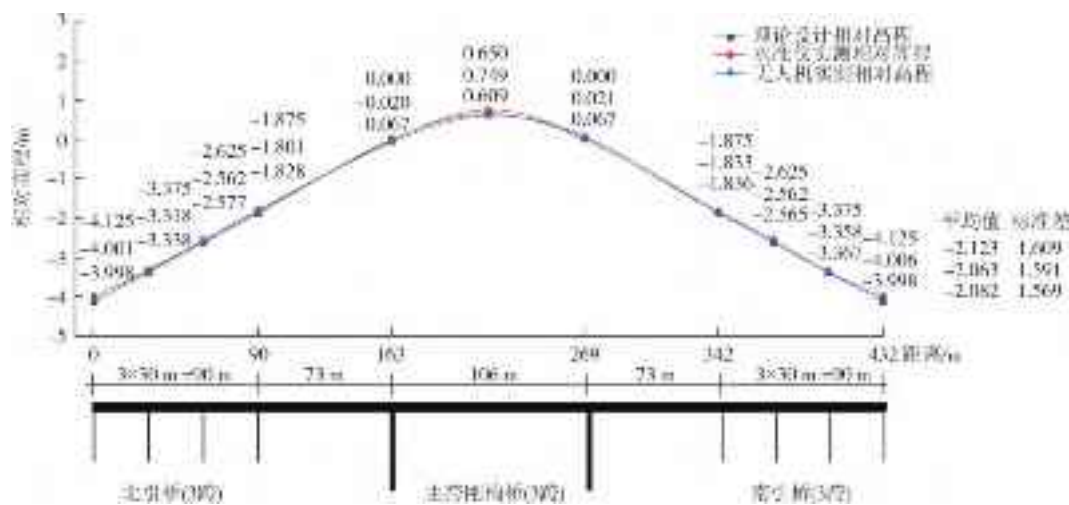


图 6 西侧桥梁线型实测结果

Fig.6 Measured results of western bridge line shape

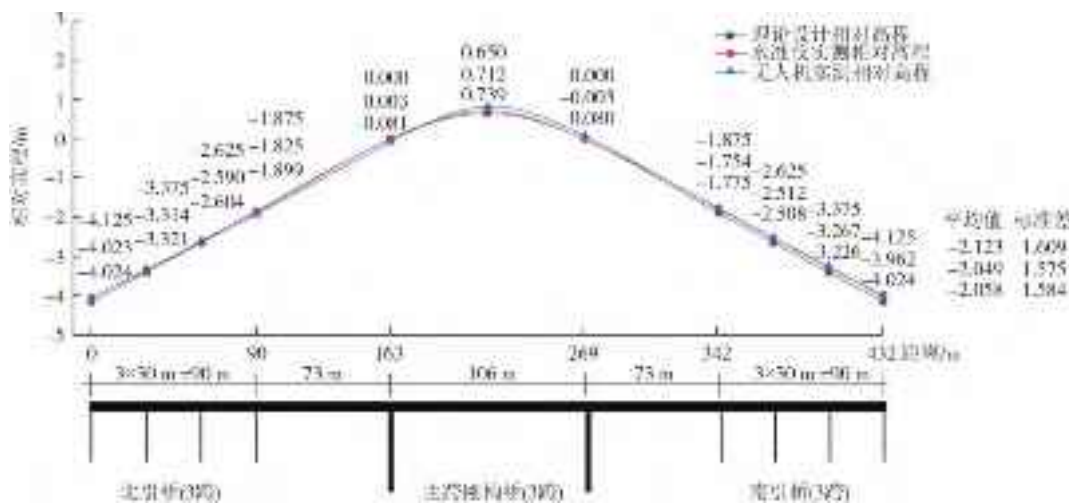


图 7 东侧桥梁线型实测结果

Fig.7 Measured results of eastern bridge line shape

水准测量与无人机测量线型相对位移最大值为 0.140 m , 相对挠度值为 $L/3085$; 相对位移的整体平均值为 0.034 m , 平均相对挠度值为 $L/12705$, 标准差为 0.035 m , 说明水准测量与无人机测量结果较为接近. 总结以上误差产生的原因, 主要有:

1) 竣工线型数据缺失, 实测线型只能与设计线型比较, 会导致一定偏差.

2) 桥梁下部为大面积水域, 使用倾斜摄影技术建模时无法提取水面特征点, 对测量精度产生一定影响.

由以上线型分析结果可知, 桥梁线型没有发生较大变化, 无人机线型测量与水准测量结果接近, 说

明无人机非接触测量桥梁线型具有可行性.

2.2 无人机桥梁病害调查

依据结构或构件缺损的类别、范围、分布特征以及严重程度, 可推断其发展变化趋势及可能造成的不利影响, 进而评定其技术状况等级.

通过相机拍摄桥面系、桥墩及桥台处的外观, 进行质量调查, 而对于桥墩支座的外观采用无人机进行调查. 调查结果如图 8 所示.

在外观质量调查时发现, 桥梁下部结构桥台部分挡块破损, 桥墩涂刷层开裂; 上部结构箱型梁个别位置出现龟裂、蜂窝麻面、析白等现象, 部分支座处

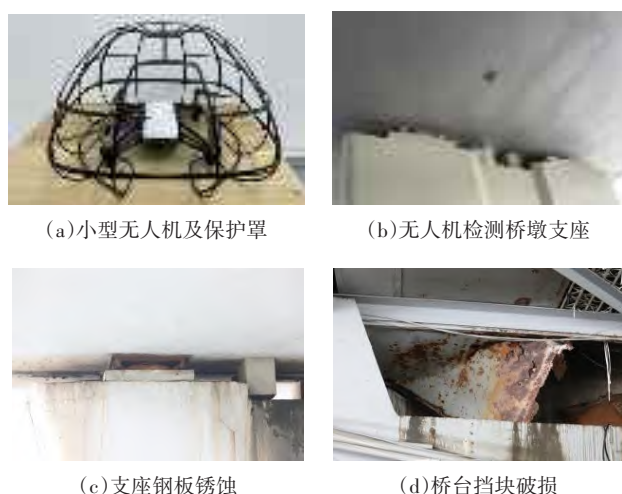


图8 桥梁外观质量检查

Fig.8 Bridge appearance quality inspection

钢板锈蚀;但未发现支座移位、脱空、剪切变形等明显影响结构安全的问题.表明桥梁的结构安全性能

没有明显下降,进而辅助佐证了随机振动测试及无人机线型测量结果的准确性.

2.3 基于随机振动测试的动力特性

2.3.1 随机振动测试

环境振动测试,也称随机振动测试.为准确获取桥梁在运营过程中的模态参数,动力测试时使用 LMS Cadax-16 通道动态分析仪进行数据采集.在不封闭交通的情况下,将测点布置在行车道边缘靠近人行道的位

受到传感器数量限制,每幅桥梁进行3组测试,每组测试中包含2个参考点(固定)与6~7个移动点,模态测试的测点布置如图9所示.使用铅垂向传感器测试竖直方向的模态,每次测试时间约为20 min,采样频率为50 Hz,整个试验过程在1 d内完成,现场大气温度为25~30 °C.拾取的典型竖向加速度响应时程如图10所示.

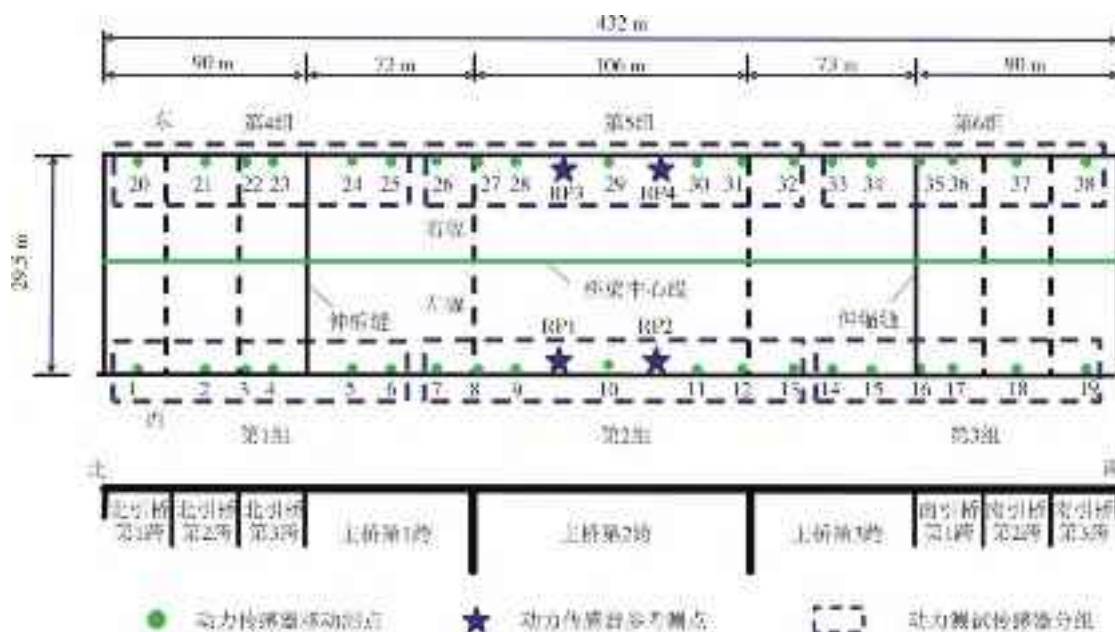


图9 模态测试的测点布置

Fig.9 Test point layout in modal test

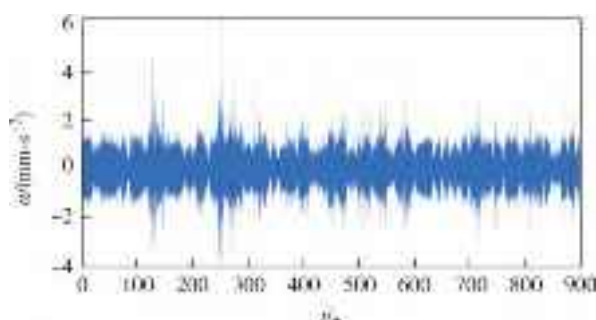


图10 典型竖向加速度响应时程

Fig.10 Typical vertical acceleration time history

2.3.2 振动数据预处理及特征提取

振动数据预处理及模态分析对应结构识别六步圆中的第4步,主要对采集到的加速度信号进行处理以获取结构动力特性.数据预处理主要包括数据质量检查及过滤、数据处理,模态分析通过 CMIF 方法捕捉结构模态参数,数据处理流程如图11所示.

振动数据质量检查及过滤共包含3个步骤,旨在使获得的数据更适于采用数学方法解释.第1步,异常峰值检查/移除,指在动力测试过程中,间歇性



图 11 数据处理流程

Fig.11 Flowchart of the data processing

传感器连接故障、微波干扰、数据采集系统故障等因素的存在,导致环境振动测试的数据不稳定,甚至出现明显的误差(如尖峰),需要进行人为或设置参数进行检查.第2步,时间窗选择是通过人为选取合适的时域信号,以避免异常数据的干扰.第3步,基于工程经验初步分析,确定主要关注的低阶频率在10 Hz以内.为了获取目标频段内的信号,设置了一个截止频率为10 Hz的巴特沃夫低通过滤波器,以消除目标频段外的信号影响.

振动数据处理包含4个步骤,主要目的是对上一步骤中过滤后的信号进行计算,进而获取包含结构模态信息的频率响应函数.

第1步 在输入信号缺失的情况下,通过将移动点信号与参考点信号做互相关得到互功率谱密度函数,用以代替脉冲响应函数.本文中使用的自相关函数(R_{xx})和互相关函数(R_{xy})分别为^[23]:

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} x(t_i)x(t_i+\tau) \quad (10)$$

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} x(t_i)y(t_i+\tau) \quad (11)$$

式中: R_{xx} 代表自相关函数; R_{xy} 代表互相关函数; $x(t_i)$ 代表随机信号; $x(t_i+\tau)$ 与 $y(t_i+\tau)$ 代表时移信号.

第2步 对测试信号进行线性平均以提高测量信噪比,减小随机振动信号的影响.

第3步 对脉冲响应函数添加指数函数窗进行预处理以防止信号泄露.

第4步 进行快速傅里叶变换得到结构的伪频率响应函数.

CMIF是一种零阶空间域算法,用于估算结构的模态参数,分为两阶段算法.第1阶段:计算频率响应函数中的CMIF函数,并将其作为频率的函数以对数幅度绘制,选取频率响应函数中的明显峰值,以识别近似的固有频率,基于对选定频率下的频率响应函数矩阵进行奇异值分解,如式(12)所示,得出模态参与因子及模态向量.第2阶段:对测试数据的频率响应函数计算加权和得到增强的频率响应函数,采用单自由度算法在增强的频率响应函数中算得结构的频率与阻尼系数,通过提取左奇异矩阵与右奇异矩阵中的系数,计算系统的模态振型.

$$H(j\omega) = U(j\omega)\Sigma(j\omega)V^H(j\omega) \quad (12)$$

式中: $H(j\omega)$ 为频率响应函数矩阵; $U(j\omega)$ 为左奇异矩阵; $\Sigma(j\omega)$ 为对角矩阵; $V^H(j\omega)$ 为右奇异矩阵;上标H表示矩阵的转置复共轭.

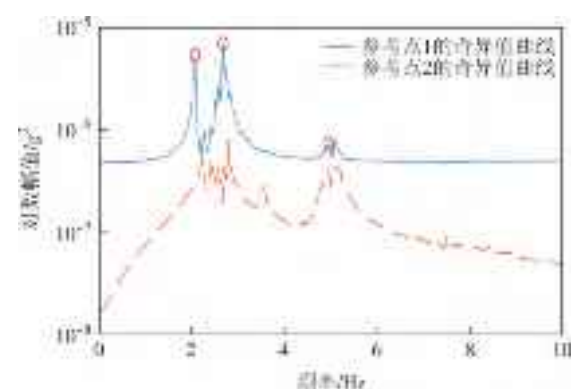
经过数据质量检查及过滤、数据处理和结构模态识别获取的桥梁竖向CMIF图如图12所示.将识别得到的前3阶模态分别列于表2、表3及表4中,左、右两幅桥前3阶测试频率基本一致.图13、图14、图15中分别给出了某大桥主桥、北引桥、南引桥前3阶的测试模态振型.

目标桥梁于2012年12月—2013年1月完成首次动载试验和计算分析,根据建模计算确定的第1阶振动频率为1.99 Hz;环境振动测试测得右幅主桥的第1阶振动频率为2.1 Hz,此时环境温度为0~5℃.

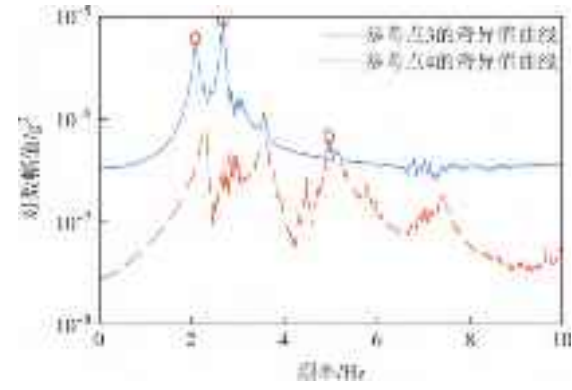
2.3.3 动力参数综合评估

通过比较本次测量模态数据与历史基线模态数据发现,10年内目标桥梁1阶频率仅降低了1.43%~1.90%,综合无人机病害检查及桥梁线型观测结果,未发现可引起结构安全问题的病害,桥梁线型变化较小,因此判断桥梁刚度无显著变化.

文献[24]对20座桥梁的频率与环境温度相关关系进行了统计研究.研究表明,混凝土桥梁自振频率与环境温度呈负相关关系,当温度大于0℃时,每



(a)左幅主桥CMIF图



(b)右幅主桥CMIF图

图12 模态测试CMIF图

Fig.12 CMIF plot of modal test

表2 目标桥梁主桥前3阶频率

Tab.2 First 3 order frequency of target bridge main bridge

阶数	2022年6月				2012年12月
	左幅		右幅		右幅
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz
1阶	2.06	0.81	2.07	2.53	2.10
2阶	2.68	1.63	2.65	1.20	—
3阶	4.99	2.22	4.96	1.79	—

表3 南引桥前3阶频率

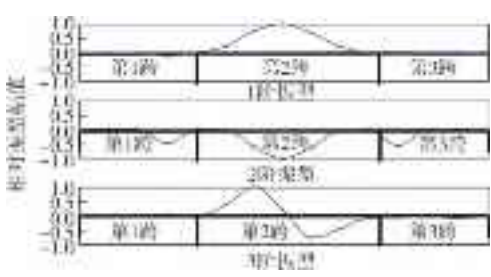
Tab.3 First 3 order frequency of south approach bridge

阶数	左幅		右幅	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1阶	4.42	1.42	4.46	1.31
2阶	4.86	1.50	4.99	2.31
3阶	5.55	3.32	5.54	1.78

表4 北引桥前3阶频率

Tab.4 First 3 order frequency of north approach bridge

阶数	左幅		右幅	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1阶	4.45	1.32	4.52	1.32
2阶	4.97	1.67	4.99	1.67
3阶	5.54	2.55	5.50	3.33



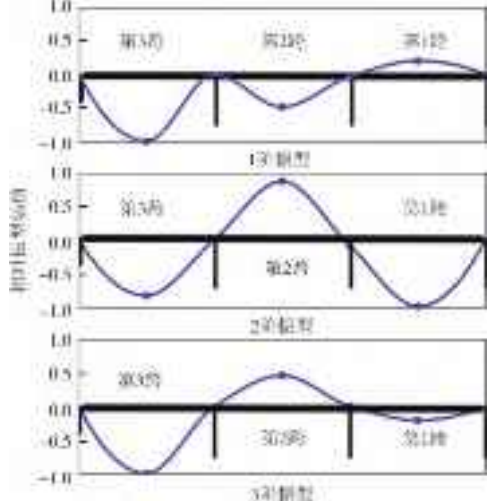
(a)左幅主桥前3阶振型



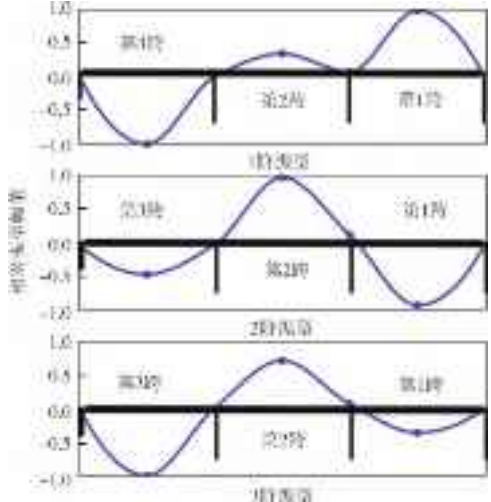
(b)右幅主桥前3阶振型

图13 主桥前3阶振型

Fig.13 First 3 order modes of main bridge



(a)左幅北引桥3阶振型



(b)右幅北引桥3阶振型

图14 北引桥前3阶振型

Fig.14 First 3 order modes of north approach bridge

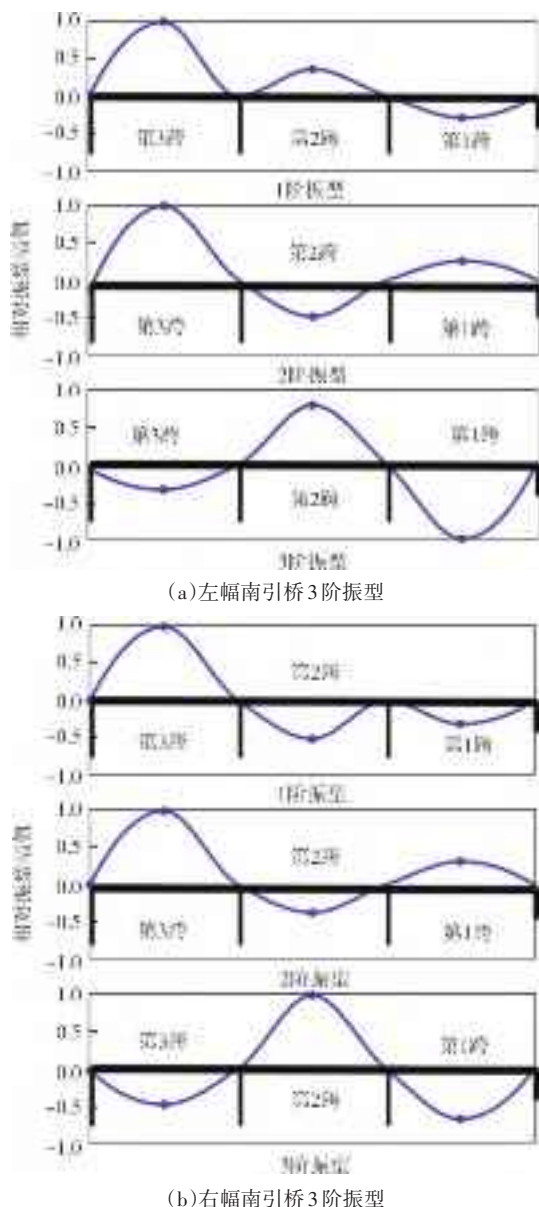


图 15 南引桥前 3 阶振型

Fig.15 First 3 order modes of south approach bridge

升高 1°C , 桥梁的自振频率减小量的范围为 $0.08\%\sim 0.39\%$. 考虑到两次测试时的环境温度相差超过 25°C , 推测受到温度变化影响导致结构频率降低, 而非出现结构性损伤.

因此, 考虑两次振动测试时的环境温度影响, 判断结构刚度无明显下降, 且均略高于 2012 年建模计算确定的第 1 阶振动频率, 表明该桥目前的结构刚度和整体性能较好.

3 结论

本文提出了一种不封闭交通条件下的桥梁健康状态评估方法, 采用“无人机三维建模线型测量+无

人机病害调查+随机振动测试”综合评估了长沙市某大桥的健康状态, 通过现场实测验了该方法的可行性, 可以得到以下结论:

1) 使用无人机倾斜摄影技术重建桥梁三维实景模型提取的桥梁线型与水准测量结果接近, 差值平均值为 0.034 m , 平均相对挠度值为 $L/12705$, 标准差为 0.035 m , 说明该方法可以反映桥梁真实线型状况, 是一种较为可靠的桥梁检测方法. 外观病害调查中, 采用无人机对桥梁支座进行观测, 可清晰了解支座处病害情况; 病害调查中未发现明显影响结构安全的问题, 可辅助佐证随机振动测试及线型测量结果的可靠性.

2) 通过对比历史基线模态数据, 在不考虑温度影响情况下, 目标测试桥梁 1 阶频率仅降低了 $1.43\%\sim 1.90\%$, 综合无人机病害检查及桥梁线型观测结果, 判断桥梁刚度无显著变化.

3) 综合采用“无人机三维建模线型测量+无人机病害调查+随机振动测试”的方式, 可对目标桥梁进行多维度健康状态评估, 互相佐证各测量结构的有效性, 为不封闭交通的桥梁健康状况检测提供新思路.

参考文献

- [1] SARMADI H, ENTEZAMI A, SAEEDI RAZAVI B, et al. Ensemble learning-based structural health monitoring by Mahalanobis distance metrics[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(2): e2663.
- [2] YANG X L, WEI G X, ZHANG W. Monitoring and evaluation on girder alignment of suspension bridge based on MATLAB[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 275/276/277: 1136–1140.
- [3] 何聪. 基于倾角传感器的桥梁线形实时监测系统设计与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
HE C. Design and realization of real-time monitoring system for bridge alignment based on inclinometer[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)
- [4] 余加勇, 薛现凯, 陈昌富, 等. 基于无人机倾斜摄影的公路边坡三维重建与灾害识别方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 77–86.
YU J Y, XUE X K, CHEN C F, et al. Three-dimensional reconstruction and disaster identification of highway slope using unmanned aerial vehicle-based oblique photography technique[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 77–86. (in Chinese)
- [5] 陈仁朋, 吴熠文, 余加勇, 等. 基于无人机影像序列的城市精细化三维模型精度评估[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019,

- 46(11):172-180.
- CHEN R P, WU Y W, YU J Y, et al. Method accuracy evaluations of building urban detailed 3D model based on the unmanned aerial vehicle image sequences and its accuracy evaluatios[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11):172-180. (in Chinese)
- [6] 陈昌富,何旷宇,余加勇,等. 基于无人机贴近摄影的高陡边坡结构面识别[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 145-154.
- CHEN C F, HE K Y, YU J Y, et al. Identification of discontinuities of high steep slope based on UAV nap-of-the-object photography [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(1):145-154. (in Chinese)
- [7] ZHANG J, HU Q W. A visualization progress management approach of bridge construction based on mixed panoramic and oblique photogrammetry [C]//2018 26th International Conference on Geoinformatics, June 28-30, 2018. Kunming: IEEE, 2018: 1-6.
- [8] PEPE M, COSTANTINO D, RESTUCCIA GAROFALO A. An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds[J]. Applied Sciences, 2020, 10(4):1235.
- [9] 刘琼琼. 非量测相机近景摄影测量在桥梁线形监测上的研究与应用[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- LIU Q Q. Research and application of non-metric camera photogrammetry in the alignment of the bridge monitoring [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [10] 张绍成,殷飞,胡俊亮,等. GPS/BDS-RTK 与惯导组合实现大型桥梁垂向线形测量[J]. 测绘科学, 2022, 47(6):1-7.
- ZHANG S C, YIN F, HU J L, et al. Large bridge vertical alignment surveying with GPS/BDS-RTK and INS integration[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(6):1-7. (in Chinese)
- [11] GILLINS M N, GILLINS D T, PARRISH C, et al. Cost-effective bridge safety inspections using unmanned aircraft systems (UAS) [C]//Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016, February 14-17, 2016, Phoenix, Arizona. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2016:1931-1940.
- [12] BURGETT J M, BAUSMAN D, COMERT G. Unmanned aircraft systems (UAS) impact on operational efficiency and connectivity [R]. Clemson: Center for Connected Multimodal Mobility, Clemson University, 2019.
- [13] PAN Q, GRIMMELSMAN K, MOON F, et al. Mitigating epistemic uncertainty in structural identification: case study for a long-span steel arch bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(1):1-13.
- [14] ZHANG J, PRADER J, GRIMMELSMAN K A, et al. Experimental vibration analysis for structural identification of a long-span suspension bridge [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(6):748-759.
- [15] 周云, 张军凯, 陈松柏, 等. 大跨度拱桥静动力试验与结构识别的实践[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 10-19.
- ZHOU Y, ZHANG J K, CHEN S B, et al. Practice of static and dynamic experiments and structural identification of long-span arch bridges [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(5):10-19. (in Chinese)
- [16] KIM S, KIM H K. Damping identification of bridges under nonstationary ambient vibration [J]. Engineering, 2017, 3(6): 839-844.
- [17] ALTUNISIK A C, KALKAN E, OKUR F Y, et al. Non-destructive modal parameter identification of historical timber bridges using ambient vibration tests after restoration [J]. Measurement, 2019, 146:411-424.
- [18] YANG X M, YI T H, QU C X, et al. Performance assessment of a high-speed railway bridge through operational modal analysis[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, 35(6): 04021091.
- [19] YANG X M, YI T H, QU C X, et al. Modal identification of bridges using asynchronous responses through an enhanced natural excitation technique [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2021, 147(12):04021106.
- [20] SAIDIN S S, KUDUS S A, JAMADIN A, et al. Operational modal analysis and finite element model updating of ultra-high-performance concrete bridge based on ambient vibration test [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16:e01117.
- [21] HART G C, YAO J T P. System identification in structural dynamics [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1977, 103(6):1089-1104.
- [22] MOON F L. Impacts of epistemic (bias) uncertainty on structural identification of constructed (civil) systems[J]. The Shock and Vibration Digest, 2006, 38(5):399-420.
- [23] CIOGLU K, ZHOU Y, MOON F, et al. Impacts of epistemic uncertainty in operational modal analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(9):1059-1070.
- [24] 刘星. 考虑温度效应的铁路桥梁刚度参数概率模型[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
- LIU X. A probabilistic model of railway bridge stiffness parameters considering temperature effect [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)