

某钢筋混凝土栈桥的异常振动成因分析*

鲁文妍¹, 陈亮¹, 曹翔宇¹, 郑春锋², 刘海祥¹, 许珉凡¹

(1. 南京水利科学研究院 南京, 210029)

(2. 太湖流域管理局苏州管理局 苏州, 215011)

摘要 为研究栈桥异常振动原因并对结构进行安全性评估,在缺失结构异常振动期间观测数据的情况下,基于现场检测、动力测试及数值仿真3种方式相结合,将导致异常振动的内因和外因逐一排查,筛选高可能性因素进行异常振动成因分析。研究表明,栈桥的异常振动是由水平承载系统的第2阶自振频率与激振频率共振以及托辊转速较小差异导致的“拍现象”综合导致。其中,托辊对栈桥产生的拉扯激振是导致其异常振动的主要因素。该研究成果可为类似水运工程结构的异常振动成因分析提供参考价值。

关键词 栈桥;异常振动;动力测试;数值仿真;安全性评估
中图分类号 U656.1;TH17

引言

目前,我国暂无相应的栈桥结构设计规范,此类工程仅能依托类似结构规范进行设计^[1]。由于在设计过程中忽略了动荷载的影响^[2],使现存栈桥结构体系在实际生产运行状态下易发生异常振动现象。近年来,我国一些重要工程或重要构件出现异常振动现象^[3-4]。例如,2020年5月,虎门大桥出现异常振动,颜大椿等^[5]认为悬索桥箱梁的下部具有流线特性,在下游方向易形成旋涡,该异常振动的主要致灾因素为涡激振动。针对2021年5月深圳赛格大厦的异常振动,杨易等^[6]认为桅杆的涡振是引发赛格大厦剧烈振动的主因。张献兵等^[7]认为大厦异常振动与地震无关,应重点研究结构疲劳性以及地基的稳定性。可以看出,对于同一个异常振动事件,学者们对致灾原因的看法并不统一。致灾原因是众多因素的叠加和耦合,明晰其主因是解决问题的关键。

2019年7月,某码头栈桥在负载运行过程中出现长达30 min的异常振动,停机处理后,再次运行恢复正常。在无法获取结构异常振动期间的结构响应和环境荷载的前提下,为诊断其异常振动原因、对结构进行安全性复核并采取合理处置措施消除安全隐患,笔者采取现场调查、动力测试和数值仿真相结合的方式,针对栈桥结构的实际受力特点,研究导致

栈桥异常剧烈振动的主要成因。

1 工程概况

栈桥整体外观如图1所示。钢筋混凝土栈桥长为448 m,桥面宽为4.18 m,建筑高度为10.6 m,排架横截面为500 mm×500 mm,边梁的宽×高为400 mm×900 mm。该栈桥已出现不同程度腐蚀和劣化,在排架柱、转运站立柱、边梁等局部区域发生箍筋锈胀和露筋,构件外观检测结果如图2所示。



图1 栈桥整体外观

Fig.1 Overall appearance of trestle

2 动力测试

为便于实际工程测试和数值分析,以靠近转运站起的第1轴跨为模型起点、以靠近转运站起的第1个结构缝处为模型终点进行分析,即现场测试目标为42~47轴跨。在本次测试中,栈桥结构振动信号

* 国家重点研发计划资助项目(2020YFC1511905);江苏省自然科学基金资助项目(BK20220206);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y422003)

收稿日期:2022-09-01;修回日期:2022-09-29

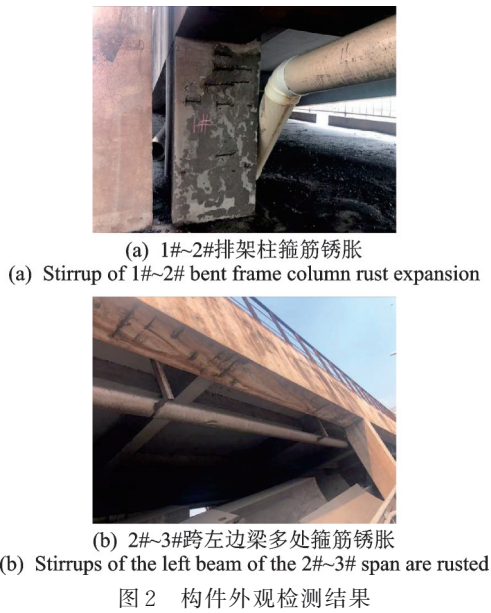


Fig.2 Visual inspection results of components

采集采用江苏东华测试技术股份有限公司的 DH5907N 无线桥梁模态测试分析系统。

2.1 测试工况及传感器布设

综合考量异常振动现象、各阶振型间的独立性及采集仪数量的限制,在实际测试过程中优化布设了 24 个采集仪。图 3 为栈桥采集器安装布设图。在本研究中, x, y, z 方向分别为纵向(桥长方向)、竖向(桥高方向)和横向(桥宽方向)。

为了对栈桥偶发性振动原因进行安全评估,设计了 3 种测试工况。表 1 为测试工况载荷说明。其

中:负载运行限定皮带机每小时运输 2 500 t 货物。表 1 中,√ 表示包含所述荷载。

表 1 测试工况载荷说明
Tab.1 Load description of test conditions

荷载组合	自重	地脉动	风荷载	托辊激振	货物自重
工况 1 停止运行	√	√	√	—	—
工况 2 空载运行	√	√	√	√	—
工况 3 负载运行	√	√	√	√	√

2.2 传感器布设效果

在实际工程中,由于传感器数量的限制和测量现场噪声干扰,各阶模态难以满足正交性条件。模态置信准则(modal assurance criterion,简称 MAC)是能够有效评判模态向量间交角大小的指标^[8],在一定程度上能够体现 2 个空间向量的独立性,其计算公式为

$$MAC_{ij} = \frac{(\phi_i^T \phi_j)^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)}$$

其中: ϕ_i 和 ϕ_j 分别为第*i*阶和第*j*阶模态向量。

为说明传感器布设方案的模态独立性,分别选取 MAC 矩阵非对角元素的平均值(AVE_{MAC})和 MAC 矩阵非对角元素的最大值(MAX_{MAC})作为评价指标^[9]。实测振动数据对应的 MAC 矩阵如图 4 所示。计算结果表明,AVE_{MAC}和 MAX_{MAC}分别为 0.103 58 和 0.191 5,说明现场实测振型的模态独立

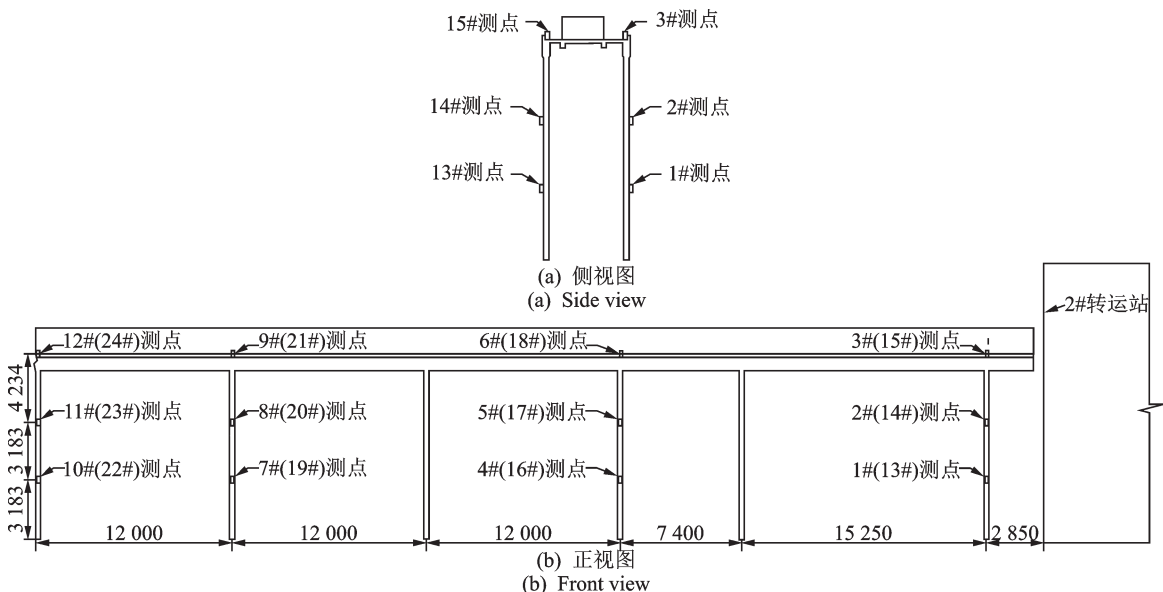


图 3 栈桥采集器安装布设图(单位:mm)

Fig.3 Installation layout of trestle collector (unit: mm)

性较高,能够保障用于结构振动特性分析的实测数据可靠性。

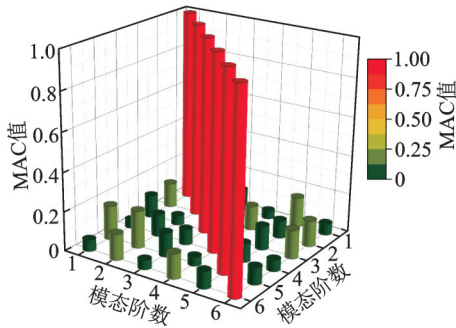


图4 实测振动数据对应的MAC矩阵

Fig.4 MAC matrix corresponding to the measured vibration data

2.3 测试数据分析

以振动幅值较大的3号测点为典型,3种工况下3#测点的纵向速度时程曲线如图5所示。各测点工况下的采样时间为360 s,采样频率为20 Hz。图6为3种工况下3#测点的频谱曲线。

关键测点实测振动结果如表2所示,可以发现:

1) 停止运行工况:栈桥各测点的振动速度较

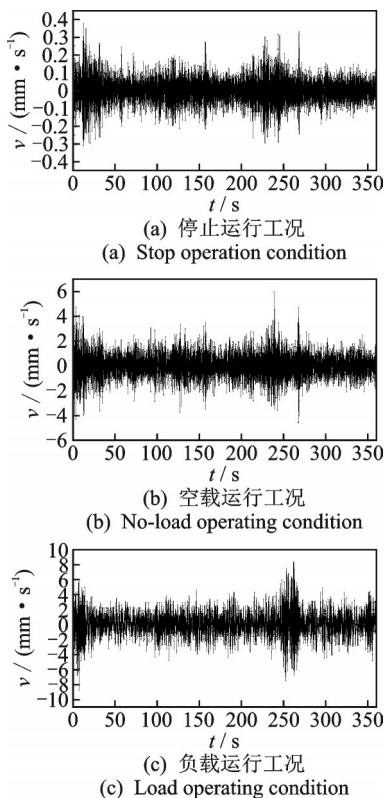


图5 3种工况下3#测点的纵向速度时程曲线

Fig.5 Longitudinal speed time history curve of measuring point 3# under three test conditions

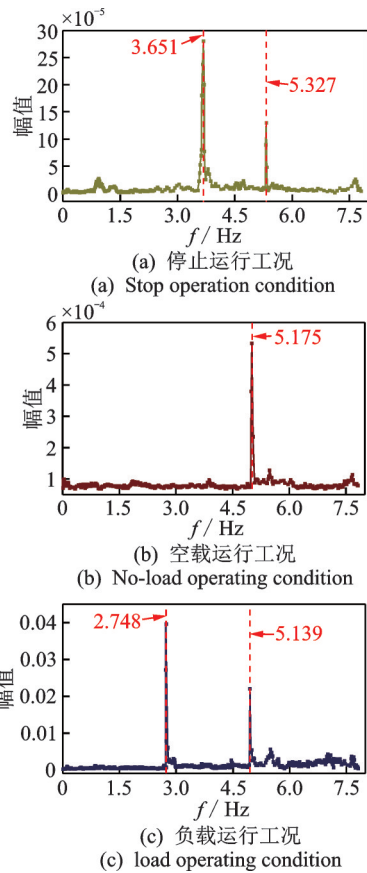


图6 3种工况下3#测点的频谱曲线

Fig.6 Spectrum curve of measuring point 3# under three test conditions

小,最大纵向振动速度为0.381 mm/s,最大横向振动速度为0.154 mm/s;栈桥的振动频率稳定在3.741 Hz附近。

2) 空载运行工况:栈桥各测点的振动速度明显增大,最大纵向振动速度为6.016 mm/s,最大横向振动速度为2.622 mm/s;栈桥的振动频率稳定在5.177 Hz附近。

3) 负载运行工况:栈桥各测点的振动速度继续增大,最大纵向振动速度为9.124 mm/s,最大横向振动速度为3.895 mm/s。栈桥同时包含2.754 Hz和5.149 Hz 2种频率成分,其中5.149 Hz与托辊的转动频率5.14 Hz较为接近。

3 数值仿真

3.1 数值模型

图7为栈桥42~47轴跨有限元模型。模型共包括317 631个单元和407 049个节点,其中:混凝土采用Solid 65单元模拟,钢筋采用Beam 188单元模拟。根据现场检测结果,对存在箍筋锈胀、破损露筋以及

表 2 关键测点实测振动结果

Tab.2 Measured vibration results at key measuring points

测点 编号	工况 1 停止运行			工况 2 空载运行			工况 3 负载运行		
	最大速度/ (mm·s ⁻¹)		主频率/ Hz	最大速度/ (mm·s ⁻¹)		主频率/ Hz	最大速度/ (mm·s ⁻¹)		主频率 /Hz
	纵向	横向		纵向	横向		纵向	横向	
1	0.184	0.092	3.667	2.893	1.424	5.175	4.341	2.150	2.755,5.155
2	0.211	0.117	3.654	3.317	1.837	5.169	4.992	2.733	2.751,5.148
3	0.378	0.154	3.651	5.942	2.419	5.157	8.824	3.597	2.748,5.139
4	0.175	0.082	3.688	2.917	1.367	5.177	4.369	2.053	2.766,5.162
5	0.195	0.104	3.684	3.250	1.724	5.163	4.875	2.576	2.756,5.151
6	0.361	0.137	3.679	6.016	2.291	5.154	9.124	3.393	2.751,5.144
7	0.181	0.091	3.667	3.198	1.616	5.171	4.796	2.299	2.759,5.159
8	0.204	0.147	3.661	3.604	2.162	5.159	5.415	3.071	2.749,5.148
9	0.364	0.148	3.657	5.901	2.615	5.151	8.891	3.895	2.743,5.137
10	0.191	0.111	3.741	2.921	1.427	5.173	4.513	2.198	2.767,5.163
11	0.216	0.119	3.672	3.314	2.178	5.167	4.997	2.971	2.754,5.154
12	0.381	0.150	3.648	5.997	2.622	5.161	8.844	3.643	2.749,5.139

裂缝的局部区域采用弹性模量折减的方式近似再现。胀、破损露筋以及裂缝的局部区域采用弹性模量折减的方式近似再现。该栈桥运行 1 h 可运输 2 500 t 货物,结合托辊转速和 42~47 轴跨总长度,计算出该栈桥在负载运行工况下可承载 13.02 t 货物。笔者采用在桥面均匀附加 Mass 21 单元的方式模拟负载状态。在模态分析和静力计算过程中,对栈桥排架底部节点施加全约束。

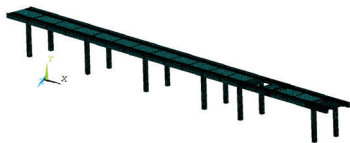


图 7 栈桥 42~47 轴跨有限元模型

Fig.7 Finite element model of 42~47 axle span of trestle

3.2 自振特性分析

考虑皮带机上的物料质量影响栈桥结构的自振

频率,按工况 1 停止运行和工况 3 负载运行分析结构的自振特性。表 3 为栈桥 42~47 轴跨前 2 阶振型和相应的自振频率。由于结构在 2 种工况下的振型相近,图 8 为停止运行工况下栈桥 42~47 轴跨前两阶振型图。可以发现,数值仿真结果与现场动力测定结果具有较高的一致性,能够保障数值分析有效性。

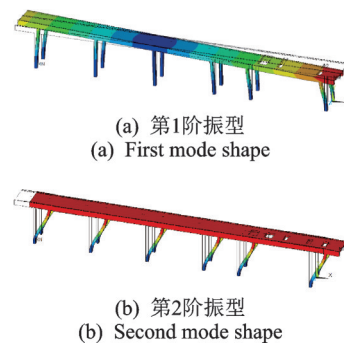


图 8 停止运行工况下栈桥 42~47 轴跨前两阶振型图

Fig.8 The first two modes of the 42~47 axis span of the trestle under out of service condition

表 3 栈桥 42~47 轴跨前 2 阶振型和相应的自振频率

Tab.3 Finite element model of 42~47 axle span of trestle

模态 序号	f/Hz(数值结果)		f/Hz(实验结果)		振型描述
	停止运行	负载运行	停止运行	负载运行	
1	3.624	2.716	3.667	2.753	上部结构在水平面内,围绕结构中部转动
2	6.279	5.155	6.417	5.149	上部结构在水平面内,沿纵向来回运动

3.3 静力分析

荷载取值及其效应组合根据实际情况按荷载规范的取值和组合原则确定^[10]。静力计算的永久荷载主要包括自重以及设置在栈桥楼板上的皮带运输机系统的皮带和支架等重量,可变荷载主要包括风荷载和雪荷载。

表4为2种测试工况下42~47轴跨数值计算结

果。在2种工况下,各方向应力的最大拉应力与最大压应力均位于栈桥桥面横梁与纵梁的交界区域,且均在混凝土的强度安全范围内。其中,仅最大主拉应力超过了混凝土的抗拉强度1.78 MPa,是由局部的应力集中所导致,且超过该区域混凝土抗拉强度的区域很小。负载运行工况下栈桥42~47轴跨的第1主应力与第3主应力云图如图9所示。结果表明,异常振动与结构自身的承载能力相关性较低。

表4 2种测试工况下42~47轴跨数值计算结果

Tab.4 Numerical calculation results of 42~47 axle span of the trestle bridge under two test conditions

工况	纵向			横向			竖向			第1主应力/MPa	第3主应力/MPa
	最大位移/mm	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa	最大位移/mm	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa	最大位移/mm	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa		
1	0.89	0.40	-0.75	2.27	1.02	-0.45	3.58	1.39	-0.52	2.03	-0.82
3	1.26	0.50	-0.85	2.71	1.37	-0.58	5.26	1.67	-0.59	2.47	-0.93

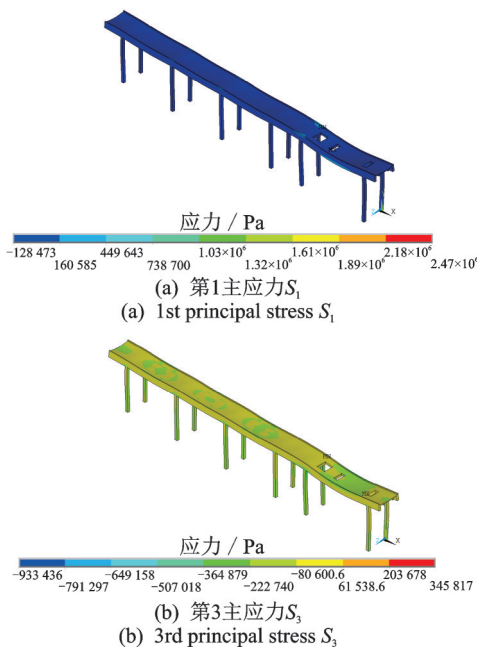


图9 负载运行工况下栈桥42~47轴跨的第1主应力与第3主应力云图

Fig.9 Cloud diagram of the first principal stress and the third principal stress of the 42~47 axle span of the trestle bridge under load operating conditions

4 异常振动原因分析

综合现场检测、动力测试和数值仿真分析,该码头栈桥的异常振动分析原因如下。

1) 动力设备的振动会对结构产生简谐激励,皮带机上的物料也会对托辊产生冲击作用,引起结构

自振。该栈桥的动力设备包括电机和托辊,由于电机在转运站内与栈桥独立且相隔较远,不足以对结构产生激振。托辊的正常振动频率为5.14 Hz,与结构在负载运行工况下的第2阶自振频率(5.155 Hz)很接近,容易激发结构的第2阶振型。

2) 结构的固有频率首先出现在刚度较小的部位和方向。由于该栈桥较为高长,其沿着纵向和横向的刚度较小。数值仿真结果表明,栈桥在停止运行工况下的前两阶自振频率分别为3.624 Hz和6.279 Hz,在负载运行工况下的前两阶自振频率分别为2.716 Hz和5.155 Hz。根据结构的动力学方程可知,结构的自振频率会随着物料荷载的增加而减少,而现场实测的负载运行工况并未达到额定载重。因此,结构在负载运行时的前两阶自振频率应分别在2.716~3.624 Hz和5.155~6.279 Hz区间。第2阶频率包含了托辊转动速率,在栈桥运行状态下,应综合协调托辊转速与结构自振频率。

3) 现场可明显观察到托辊的转动频率不一致、部分托辊腐蚀严重、部分托辊不参与转动。根据实测的各个托辊的转动频率,可得出多种拍周期。工程现场观测到众多托辊的转轴处已被矿渣浮尘包裹,托辊辊轴老化、锈蚀严重如图10所示。不同托辊的转动频率不一致导致拍现象的产生,致使栈桥发生间隔时间无明显规律的间歇性振动。停止托辊运行后,栈桥的异常振动现象立即消失,表明托辊对栈桥产生的拉扯激振也是结构异常振动的因素之一。



图10 托辊辊轴老化、锈蚀严重

Fig.10 The roller shaft is aging and corroded seriously

5 结束语

栈桥的异常振动是由水平承载系统的第2阶自振频率与激振频率共振,以及托辊转速较小差异导致的“拍现象”综合导致。其中,托辊对栈桥产生的拉扯激振是导致其异常振动的重要因素,亟需对锈蚀的托辊进行清淤和修复。建议对钢筋混凝土破损、锈胀等缺陷进行修复,对钢结构进行防腐处理,对托辊进行及时清理和防腐处理,避免由于栈桥系统出现运行不畅、卡阻问题导致的共振现象。此外,在栈桥的后期运行过程中,需确保皮带机配重与两侧导杆的驱动运行顺畅、无卡阻,避免栈桥由于偏心受压引发的异常振动。需要说明的是,该栈桥的异常振动是偶发的,说明异常振动发生时间段的环境因素也是导致异常振动的因素之一。此外,皮带机配重与两侧导杆的运行卡阻,导致结构由于偏心受压引发异常振动,在日常巡检和监测过程中应重点关注皮带机配重与导杆的连接情况。本工程的异常振动现场是水运工程结构领域的典型事故,研究成果可为类似水运工程结构的异常振动成因分析提供参考价值。

参 考 文 献

- [1] 付晨涛. 动载荷作用下大跨度输煤栈桥振动响应分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [2] 胡韶懿. 大跨度输煤栈桥振动分析及安全性评价[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [3] 舒相挺, 杨璋, 徐逸哲, 等. 某循环海水泵振动故障诊断与趋势分析[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(4): 791-796.
- SHU Xiangting, YANG Zhang, XU Yizhe, et al. Vibration fault diagnosis and trend analysis of circulating seawater pump [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(4): 791-796. (in Chinese)
- [4] 韩腾飞, 赵立勇, 王旭. 钢结构输煤栈桥间歇性振动原因分析与治理方案研究[J]. 钢结构, 2017, 32(10):

90-93.

HAN Tengfei, ZHAO Liyong, WANG Xu. Intermittent vibration analysis and treatment scheme of a coal feeding steel bridge[J]. Steel Construction, 2017, 32(10): 90-93. (in Chinese)

- [5] 颜大椿. 湍流, 风工程和虎门大桥的风振[J]. 力学与实践, 2020, 42(4): 523-525.
- YAN Dachun. Turbulence, wind engineering and wind vibration of Humen Bridge [J]. Mechanics in Engineering, 2020, 42(4): 523-525. (in Chinese)
- [6] 杨易, 麻福贤, 谭健成, 等. 赛格大厦振动事件中的大气边界层风场实测与分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(10): 122-129.
- YANG Yi, MA Fuxian, TAN Jiancheng, et al. In site measurement and analyses on boundary layer wind during the SEG Plaza vibration event [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(10): 122-129. (in Chinese)
- [7] 张献兵, 雷军, 张秀玲, 等. 深圳赛格大厦异常振动成因分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10588-10602.
- ZHANG Xianbing, LEI Jun, ZHANG Xiuling, et al. Analysis of the causes of abnormal vibration of Shenzhen SEG building [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10588-10602. (in Chinese)
- [8] CAO X Y, CHEN J Y, XU Q, et al. A distance coefficient-multi objective information fusion algorithm for optimal sensor placement in structural health monitoring [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 24(4): 718-732.
- [9] 曹翔宇. 高拱坝动力监测的传感器优化布置与基于深度学习的损伤识别方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.



第一作者简介:鲁文妍,女,1985年7月生,博士,正高级工程师。主要研究方向为水工、水运结构静动力仿真分析。曾发表《基于损伤模型的输泄水塔地震响应分析》(《水力发电》2015年第3期)等论文。

E-mail: wylu@nhri.cn

通信作者简介:曹翔宇,男,1992年7月生,博士。主要研究方向为水工建筑物的风险评价、适应智能诊断与概率分析。

E-mail: yxcao@nhri.cn