

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.01.012

渡槽整体结构环境激励模态试验

顾培英^{1,2},刘冬梅³,邓 昌^{1,2},汤 雷^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院材料结构研究所,江苏 南京 210029;
2. 水利部水科学与水工程重点实验室,江苏 南京 210029; 3. 南京科技职业学院,江苏 南京 210048)

摘要: 为获得渡槽整体结构动力特性,开展单向 SIMO 法、双向 MIMO 法环境激励模态试验,选用增强频域分解法识别纵向、横向、竖向、横竖双向模态参数。结果表明:2 种方法识别出的模态大多数谱峰明显、识别效果较好;纵向模态以排架结构振动为主,槽身整体平动或转动或不动;前 4 阶横向模态以排架结构振动为主,槽身整体平动或转动或横摇,第 5 阶模态后,绝大多数以槽身振动为主,排架几乎不动或振动幅度很小;竖向模态以槽身振动为主;横竖双向 MIMO 法识别出的模态同时包含横向、竖向模态分量;2 种方法识别出的模态频率误差较小;从模态识别准确性、信息全面性而言,渡槽整体结构环境激励模态试验选择双向 MIMO 法优于单向 SIMO 法。

关键词: 渡槽整体结构;模态试验;增强频域分解法;MIMO 法;双向模态;模态参数;环境激励

中图分类号: TV332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)01-0077-07

Modal test for overall structure of aqueduct under ambient excitation

GU Peiying^{1,2}, LIU Dongmei³, DENG Chang^{1,2}, TANG Lei^{1,2}
(1. *Materials and Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;*
2. *Key Laboratory of Water Science and Engineering, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;*
3. *Nanjing Polytechnic Institute, Nanjing 210048, China*)

Abstract: In order to obtain the dynamic characteristics of the overall structure of aqueduct, the modal tests of ambient excitation were conducted by the one-way SIMO method and the two-way MIMO method. Longitudinal, transverse, vertical and transverse-vertical bidirectional modal parameters were identified by the enhanced frequency domain decomposition. The results show that most spectrum peaks have been obviously identified by two methods with satisfactory identification results of modal parameters. The longitudinal modes and first four transverse modes of aqueduct structure are dominated by the vibration of the bent structure, and the aqueduct body is the translation or rotation or motionless. After the fifth transverse modes, most of them are dominated by the aqueduct body, and the bent structure is barely moving or vibrates very little. The vertical modes are dominated by the vibration of aqueduct body. In addition, the bidirectional modes identified by the MIMO method include both the transverse and vertical components, and the errors of modal frequency identified by both the SIMO and MIMO methods are small. According to the identification accuracy and comprehensive information of modal tests, the two-way MIMO method is better than the one-way SIMO method for the overall structure of aqueduct.

Key words: overall structure of aqueduct; modal test; enhanced frequency domain decomposition; MIMO method; bidirectional modal; modal parameters; ambient excitation

结构损伤诊断及安全评价一直是工程界关注的重点,笔者对大体积混凝土结构整体安全评价进行了某些尝试^[1-5],但国内外对渡槽结构安全评价研究较少,为此提出基于振动诊断技术的大跨高架渡槽结构安全评价技术,并用其对渡槽结构典型破坏特征进行了较为全面的研究^[6-9]。根据模态参数(包括模态频率、振型、阻尼)分析结果,评价渡槽整体结构安全状况,该方法在其他工程领域已广泛应用。模态试验分析是获得结构动力特性的主要手段。模态试验分析方法已有 40 a 的发展历史,渡槽动力特性数值模拟研究较多,但针对渡槽结构的模态试验研究较少,笔者分别对渡槽排架结构人工激励^[10]、环境激励^[11]模态试验分析开展了研究,提出排架结构模态试验选择单向 SIMO(single input multiple output)法优于双向 MIMO(multiple input

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401807)

作者简介: 顾培英(1968—),女,教授级高级工程师,博士,主要从事结构健康诊断、安全评估、抗震及振动控制研究。E-mail :pygu@nhri.cn

引用本文: 顾培英,刘冬梅,邓昌,等. 渡槽整体结构环境激励模态试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):77-83.

GU Peiying, LIU Dongmei, DENG Chang, et al. Modal test f or overall structure of aqueduct under ambient excitation [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(1):77-83.

multiple output)法的结论。

实际大型结构往往在风力、水流、交通等自然力或工作状态下能激励出识别模态参数的振动响应,无需且往往现场也无法施加人工激励。根据有限元模态分析及人工激励模态试验结果,渡槽结构多向模态振型基本为横竖双向,无明显纵横竖三向模态振型,所以环境激励多向模态试验只考虑横竖双向^[10]。试验还表明,纵向模态频率较低、阶数较少,无水、有水工况识别结果基本相似;横向、竖向、横竖双向模态随水位增加,大多数模态振型基本相似,存在个别模态丢失情况。所以本文针对无水工况,首先分别对纵向、横向、竖向进行 SIMO 法单向环境激励模态试验,再用 MIMO 法同时测试横竖双向响应;选用增强频域分解法(enhance frequency domain decomposition,EFDD)分别识别纵向、横向、竖向、横竖双向模态参数,重点分析模态频率、模态振型及其相关 MAC(modal assurance criterion)矩阵校验;综合分析单、双向识别结果,比较模态参数识别精度,提出渡槽结构环境激励模态试验方法。

模态试验分析方法有频域分解法、时域分解法^[10,12]。频域分解(frequency domain decomposition,FDD)法是一类运行模态分析(operational modal analysis,OMA)方法,通过测量结构环境激励下的振动响应,得到反映真实动力特性的模态参数^[13],该方法由峰值拾取法发展而来^[14]。FDD 法最早由 Brincker 等在复模态指示函数基础上提出,在满足白噪声激励假设和小阻尼假设时,识别模态频率和模态振型^[13]。Brincker 等随后提出了增强频域分解法(EFDD),将经奇异值分解后的单自由度功率谱进行傅里叶逆变换,得到对应的自相关函数,从而通过对数衰减法获得模态频率和阻尼比^[11,14-15]。

频域分解法核心是对响应功率谱进行奇异值分解,将功率谱分解为对应多阶模态的单自由度系统功率谱。该方法识别精度较高,抗干扰能力较强。但3个假设必须同时满足:(a)激励为白噪声;(b)结构阻尼为小阻尼;(c)当有密集模态时,必须正交。

1 试验方案

根据新疆某渡槽,主要构件按1:15几何比尺制作一跨简支梁式小型排架渡槽结构,模型采用钢筋砂浆结构^[10]。排架柱与上部支撑横梁整体固接浇筑,槽身单独浇筑,槽身与横梁通过橡胶支座连接,橡胶支座用结构胶分别与槽身、横梁粘接。搅拌机搅拌砂浆,排架柱与横梁、槽身分别采用有机玻璃、木模浇筑成型。主筋选用 $\varnothing 8$ mm带肋钢筋,立柱箍筋为外径80 mm、粗5 mm的铁环。排架柱采用3根直径120 mm、高1500 mm的立柱,立柱净间距280 mm,每根立柱4根纵向钢筋,纵向钢筋底部与底座钢板固定,顶部与支撑梁钢筋绑扎,底座钢板用膨胀螺栓与地面固定,立柱箍筋间距300 mm。横梁尺寸1000 mm $\times$ 200 mm $\times$ 100 mm,上部由3根纵向钢筋、5根间距约200 mm横向钢筋组成单层钢筋网,并与立柱钢筋绑扎。槽身长2000 mm,为2孔矩形断面,单孔净宽370 mm,净高240 mm,底板厚40 mm,中墙厚40 mm,两侧墙厚60 mm,中墙及侧墙底部布置纵向底座,中墙底座尺寸130 mm $\times$ 20 mm,侧墙底座尺寸80 mm $\times$ 20 mm。采用单层钢筋网布置,底板、每个侧墙、中墙分别布置8根、3根、4根纵向钢筋,横向钢筋间隔200 mm。

环境激励模态试验装置一般包括传感及信号放大设备、信号采集设备、信号分析系统。选用CA-YD-107加速度传感器、INV-8多功能抗混滤波放大器、INV306U-6260智能信号采集处理分析仪、DASP智能数据采集和信号分析系统。布置130个测点,测点4为参考点,分多组测试,测点位置编号如图1所示。对于该小型渡槽结构,由于模态频率较高,室内试验环境安静,仍需借助锤击模拟环境激励,尽量避开模态节点,在测点1激励,但不需测试激励信号,分析方法同典型环境激励方法。

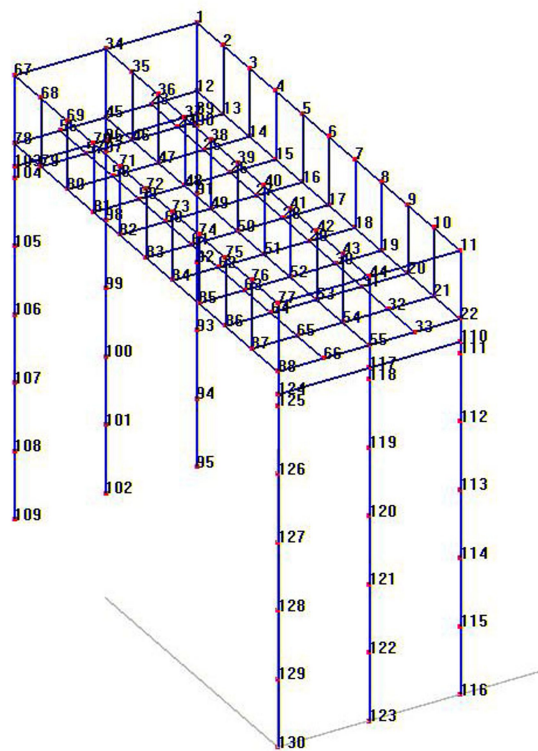


图1 测点位置编号

Fig.1 Point number of measuring points

2 模态试验结果及分析

2.1 纵向模态识别结果及分析

环境激励下纵向模态响应功率谱奇异值曲线如图 2 所示,尽量在峰值处收取模态主峰,收取了 3 阶模态,渡槽结构纵向模态谱峰明显。纵向前 3 阶模态频率分别为 9.616 Hz、16.896 Hz、100.732 Hz。

采用模态振型相关 MAC 矩阵非对角线元素平均值、最大值为评价指标,二数值越小越好。Carne 提出,工程上非对角线元素一般小于 0.25 可近似认为模态正交^[10,16-17],0.25 作为阈值普遍应用于传感器优化布置研究中。本文将 0.25 作为两模态正交性好坏的阈值。

3 个非对角线元素中MAC₀₁₀₂、MAC₀₂₀₃(01、02 分别代表 1 阶、2 阶模态,其余类推)分别为 0.1596、0.0416,小于 0.25,MAC₀₁₀₃ 为 0.3105,略大于 0.25,整体上模态振型正交性较好,模态识别精度较高。

环境激励下纵向前 3 阶模态振型如图 3 所示。由图 3 可知,除第 2 阶个别点拟合较差外,其他识别效果均较好。模态以排架结构振动为主,槽身整体平动或转动或不动。

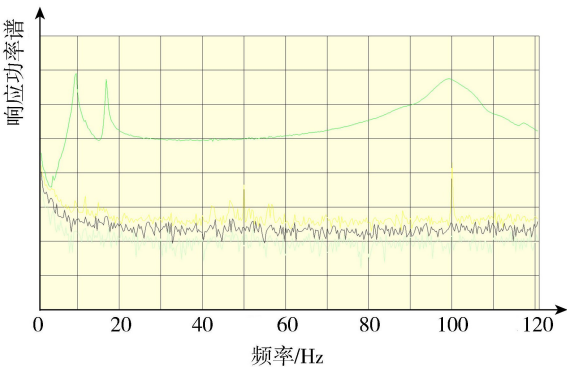


图 2 环境激励下纵向模态响应功率谱奇异值曲线

Fig.2 Singular value curve of response power spectrum of longitudinal modes under ambient excitation

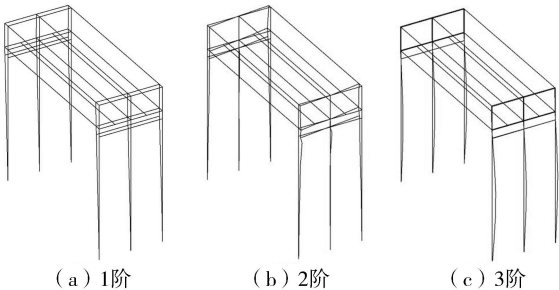


图 3 环境激励下纵向前 3 阶模态振型

Fig.3 First three order modal shapes of longitudinal modes under ambient excitation

纵向前 3 阶模态阻尼比分别为 2.464%、1.448%、2.162%,在正常范围内^[10,11,18-20]。

2.2 横向模态识别结果及分析

环境激励下横向模态响应功率谱奇异值曲线如图 4 所示,收取了 11 阶模态,其中 8 阶谱峰明显或较明显、3 阶较小,大多数谱峰明显或较明显。

环境激励下横向模态振型相关 MAC 矩阵校验如图 5 所示。MAC 矩阵大多数非对角线元素较小,80.0%的非对角线元素小于 0.25,平均 0.1659,大多数模态振型正交性较好,模态识别精度较高。MAC₀₂₀₃、MAC₀₃₀₆、MAC₀₄₀₈、MAC₀₈₀₉、MAC₁₀₁₁略大于 0.25,识别效果尚可;MAC₀₅₀₉最大,为 0.7879;MAC₀₁₀₃、MAC₀₃₀₈、MAC₀₆₀₈、MAC₀₈₁₀、MAC₀₉₁₀次之,分别为 0.5590、0.3934、0.3583、0.3911、0.4235。说明第 5 阶与第 9 阶模态正交性

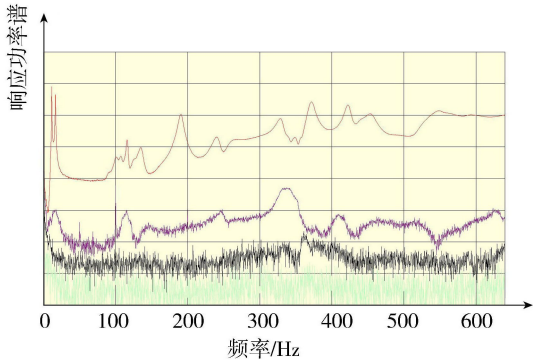


图 4 环境激励下横向模态响应功率谱奇异值曲线

Fig.4 Singular value curve of response power spectrum of transverse modes under ambient excitation

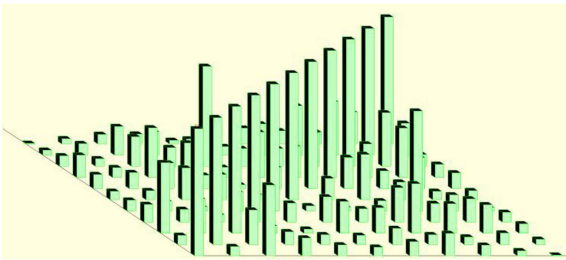


图 5 环境激励下横向模态振型相关 MAC 矩阵校验

Fig.5 Modal correlation MAC matrix calibration of transverse modes under ambient excitation

较差,第1阶与第3阶、第3阶与第8阶、第6阶与第8阶、第8阶与第10阶、第9阶与第10阶次之。

环境激励下横向模态参数识别结果见表1,前11阶模态振型图如图6所示。根据模态振型图可知,除第3阶、4阶、6阶、9阶模态振型尚可、较差或稍差外,大多数模态识别效果较好。前4阶模态以排架结构振动为主,槽身整体平动或转动或横摇(纵向跨中振幅大),第5阶模态之后(包括第5阶),绝大多数以槽身振动为主,排架几乎不动或振动幅度较小。由表1可知,模态阻尼比为0.901%~2.289%,平均值1.535%,横向模态阻尼在正常范围内。

表1 环境激励下模态参数识别结果汇总及比较

方向		模态频率			模态阻尼比		
		单向 SIMO 法/Hz	双向 MIMO 法/Hz	误差/%	单向 SIMO 法/%	双向 MIMO 法/%	误差/%
横向	1	11.687	11.687	0.0	1.493	1.491	0.1
	2	16.879	16.878	0.0	0.901	0.901	0.0
	3	101.465	101.682	0.2	1.828	2.146	17.4
	4	135.260	136.795	1.1	2.289	2.298	0.4
	5	191.160	191.210	0.0	1.692	1.593	5.9
	6	241.907	241.874	0.0	1.771	1.664	6.0
	7	328.973	329.143	0.1	1.264	1.366	8.1
	8	372.133	372.188	0.0	1.514	1.520	0.4
	9	422.334	422.357	0.0	1.096	1.087	0.8
	10	452.558	453.467	0.2	1.151	1.303	13.2
	11	549.501	549.493	0.0	1.890	1.831	3.1
竖向	1	101.733	101.682	0.1	2.471	2.146	13.2
	2	136.931	136.795	0.1	2.106	2.298	9.1
	3	191.295	191.210	0.0	1.408	1.593	13.1
	4	373.750	372.188	0.4	1.112	1.520	36.7
	5	423.284	422.357	0.2	0.868	1.087	25.2
	6	455.642	453.467	0.5	0.608	1.303	114.3

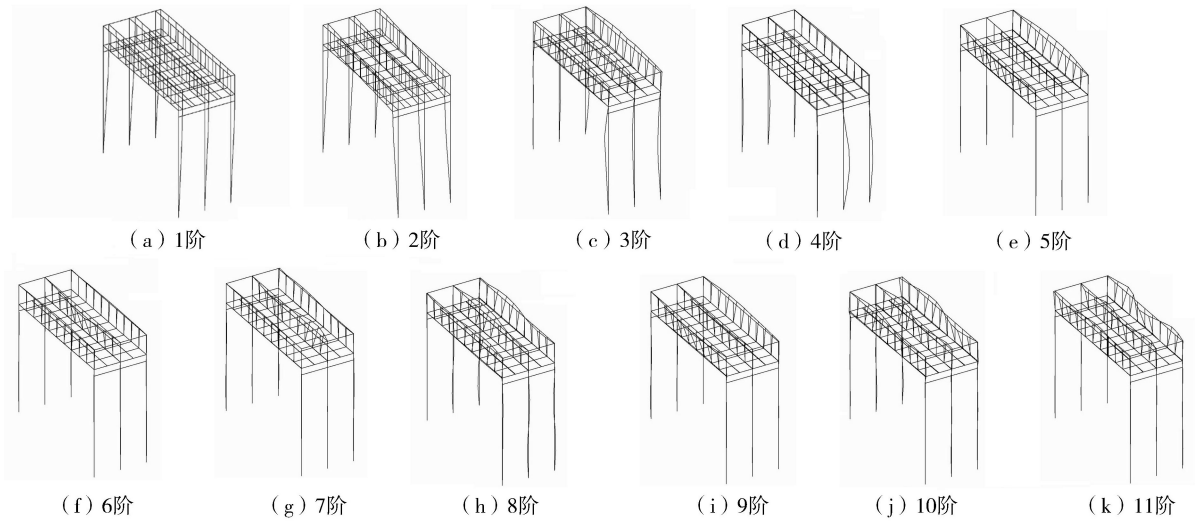


图6 环境激励下横向前11阶模态振型

Fig.6 First 11 order modal shapes of transverse modes under ambient excitation

2.3 竖向模态识别结果及分析

根据环境激励下竖向模态响应功率谱奇异值曲线(图略),收取了6阶模态,其中4阶谱峰明显、2阶很小,大多数谱峰明显。

模态振型相关MAC矩阵(图略)非对角线元素稍大,只有60.0%非对角线元素小于0.25,平均0.2808,即只有60.0%模态振型正交性较好。 MAC_{0104} 、 MAC_{0106} 略大于0.25,识别效果尚可; MAC_{0102} 最大,为0.7614; MAC_{0305} 、 MAC_{0405} 、 MAC_{0506} 次之,分别为0.3706、0.4224、0.5625。说明第1阶、第2阶模态正交性较差,

第 3 阶与第 5 阶、第 4 阶与第 5 阶、第 5 阶与第 6 阶次之。

环境激励下竖向模态参数识别结果见表 1,前 6 阶模态振型图如图 7 所示。根据模态振型图,前 3 阶模态振型识别效果较好,第 4~6 阶模态振型尚可。竖向模态以槽身振动为主。由表 1 可知,模态阻尼比为 0.608%~2.471%,平均值 1.429%,阻尼比在正常范围内。

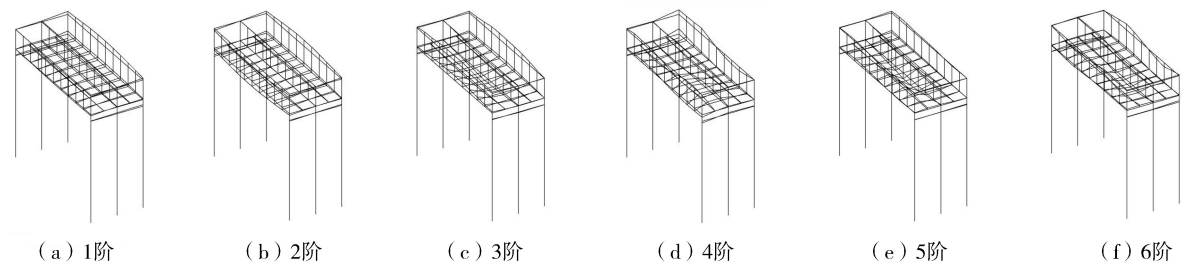


图 7 环境激励下竖向前 6 阶模态振型

Fig.7 First six order modal shapes of vertical modes under ambient excitation

2.4 横竖双向模态识别结果及分析

环境激励下横竖双向模态响应功率谱奇异值曲线如图 8 所示,收取了 11 阶模态,其中 8 阶谱峰明显或较明显,3 阶较小,大多数谱峰明显或较明显。

模态振型相关 MAC 矩阵大多数非对角线元素较小,87.3% 非对角线元素小于 0.25,平均 0.131 4,大多数模态振型正交性较好,模态识别精度较高。MAC₀₁₀₃、MAC₀₈₀₉、MAC₁₀₁₁略大于 0.25,识别效果尚可;MAC₀₃₀₄最大,为 0.4637;MAC₀₅₀₉、MAC₀₈₁₀、MAC₀₉₁₀次之,分别为 0.432 6、0.325 2、0.442 2。说明第 3 阶与第 4 阶模态正交性较差,第 5 阶与第 9 阶、第 8 阶与第 10 阶、第 9 阶与第 10 阶次之。

环境激励下横竖双向模态参数识别结果见表 1,前 11 阶模态振型图如图 9 所示。由图 9 可知,除第 3 阶、4 阶、6 阶、9 阶模态振型尚可、较差或稍差外,大多数模态识别效果较好。前 4 阶模态以排架结构振动为主,槽身整体平动或转动或横摇(纵向跨中振幅大),第 5 阶模态之后(包括第 5 阶),绝大多数以槽身振动为主,排架几乎不动或很小。由表 1 可知,模态阻尼比为 0.901%~2.298%,平均值 1.564%,在正常范围内。

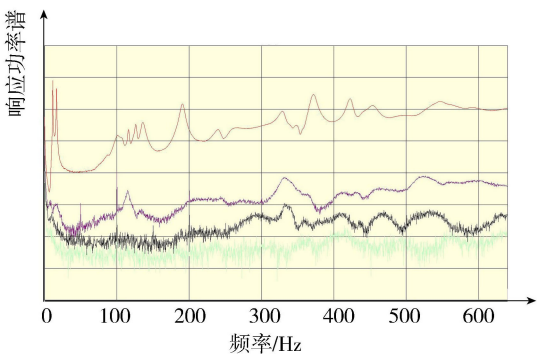


图 8 环境激励下横竖双向模态响应功率谱奇异值曲线

Fig.8 Singular value curve of response power spectrum of bidirectional modes under ambient excitation

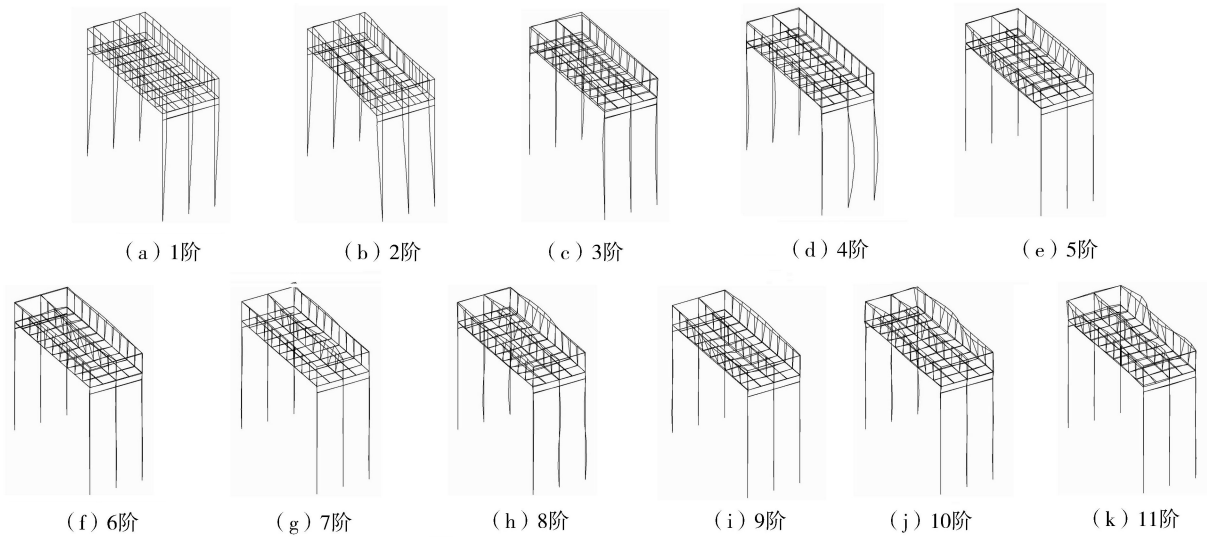


图 9 环境激励下横竖双向前 11 阶模态振型

Fig.9 First 11 order modal shapes of bidirectional modes under ambient excitation

2.5 横竖双向与单向模态识别结果比较分析

综合前面分析结果,横竖双向 MIMO 法识别出的模态规律与横向 SIMO 法相似。模态振型图显示,单向 SIMO 法识别出的横向、竖向模态分别为横竖双向 MIMO 法的槽身横向、竖向分量。所以,渡槽结构横竖双向 MIMO 法识别出的槽身模态信息更为全面。

为进一步比较单向 SIMO 法、双向 MIMO 法模态识别结果,环境激励下模态参数识别结果汇总及比较列于表 1。根据表 1,环境激励下单向 SIMO 法与双向 MIMO 法模态频率相差很小,平均误差 0.2%,最大误差 1.1%。但模态阻尼比误差较大,尤其是竖向。横向模态阻尼比平均误差 5.0%,最大误差 17.4%。竖向第 6 阶阻尼比误差高达 114.3%,其他阶阻尼比平均误差 19.5%。一般情况下模态阻尼识别精度较低,离散性大^[7-8],本次环境激励获得的大多数模态阻尼比在正常范围,误差可接受。

渡槽结构由于横竖双向 MIMO 法识别出的槽身模态信息全面,同时包含了横向、竖向模态分量。从槽身模态识别准确性、信息全面性而言,渡槽结构环境激励模态试验选择双向 MIMO 法优于单向 SIMO 法。

3 结论与展望

a. 采用 2 种方法识别出的模态功率谱奇异值曲线大多数谱峰明显或较明显,大多数模态识别效果较好。

b. 纵向模态以排架结构振动为主,槽身整体平动或转动或不动。

c. 前 4 阶横向模态以排架结构振动为主,槽身整体平动或转动或横摇(纵向跨中振幅大),第 5 阶模态之后(包括第 5 阶),绝大多数以槽身振动为主,排架几乎不动或振动幅度很小。

d. 竖向模态以槽身振动为主。

e. 横竖双向 MIMO 法识别出的模态规律与横向 SIMO 法结果相似。单向 SIMO 法识别出的横向、竖向模态分别为横竖双向 MIMO 法识别出的槽身横向、竖向分量。

f. 环境激励下单向 SIMO 法与双向 MIMO 法识别出的模态频率误差较小,模态阻尼误差较大,但仍在正常范围内。由于横竖双向 MIMO 法识别出的槽身模态信息全面,同时包含了横向、竖向模态分量。从模态识别准确性、信息全面性而言,渡槽整体结构环境激励模态试验选择双向 MIMO 法优于单向 SIMO 法。

需要指出的是,本文研究只是渡槽结构整体安全评价的基础,下一步即将开展损伤状态下渡槽模态参数变化规律研究。以上研究成果可推广应用于排架类整体结构工程的模态参数识别中。

参考文献:

- [1] 顾培英,黄勤红,邓昌,等. 基于重整化群的水工混凝土结构整体破坏概率研究[J]. 水利水运工程学报,2010(4):1-5. (GU Peiying, HUANG Qinrong, DENG Chang, et al. Damaged probability of concrete for hydraulic structure based on renormalization group theory[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(4):1-5. (in Chinese))
- [2] GU Peiying, DENG Chang, ZHANG Daosheng, et al. Probability of overall collapse for concrete gravity dam based on renormalization group theory of unequal probability unit[C]// The 2nd SREE Conference on Hydraulic Engineering (CHE 2013). London: CRC Press, 2014:135-140.
- [3] 顾培英,邓昌,汤雷. 基于重整化群方法的三棱柱单元整体破坏概率模型[J]. 水利水电科技进展,2014,34(3):16-19, 80. (GU Peiying, DENG Chang, TANG Lei. A model of overall damage probability of triangular prism unit based on renormalization group method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(3):16-19, 80. (in Chinese))
- [4] 顾培英,邓昌,汤雷. 基于重整化群有限原胞级整体安全性分级评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(4):355-360. (GU Peiying, DENG Chang, TANG Lei. Safety classification evaluation of an overall structure based on limited primitive cell level using renormalization group theory[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014, 42(4):355-360. (in Chinese))
- [5] 顾培英,邓昌,肖仕燕,等. 基于二维逾渗相变重整化群的混凝土重力坝断面破坏评价[J]. 水利水电科技进展,2015,35(6):31-36, 85. (GU Peiying, DENG Chang, XIAO Shiyang, et al. Development of cross-section damage based on two-dimensional percolation transition with renormalization group theory for concrete gravity dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6):31-36, 85. (in Chinese))
- [6] 顾培英,王岚岚,邓昌,等. 我国渡槽结构典型破坏特征研究综述[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):1-8. (GU

- Peiying, WANG Lanlan, DENG Chang, et al. Review of typical failure characteristics of aqueduct structures in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017, 37(5):1-8. (in Chinese))
- [7] 李遇春. 某双悬臂渡槽风致破坏原因分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2008,36(11):1485-1489. (LI Yuchun. Wind damage mechanism analysis of a double-cantilever aqueduct bridge[J]. Journal of Tongji University(Natural Sciences),2008, 36(11):1485-1489. (in Chinese))
- [8] 常周梅. 寒旱区渡槽排架的侵蚀破坏机理及结构性态分析[D]. 郑州:华北水利水电大学,2014.
- [9] 何祥瑞,张华,纪爱丽. 基于 XFEM 的渡槽单向地震动作用下裂纹开展分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):186-189,194. (HE Xiangrui, ZHANG Hua, JI Aili. Analysis of crack growth of aqueduct under effect of single dimensional earthquake force based on XFEM[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2016, 27(1):186-189,194. (in Chinese))
- [10] 顾培英,邓昌,王岚岚,等. 渡槽排架结构人工激励模态试验分析[J]. 振动与冲击,2019,38(7):56-65. (GU Peiying, DENG Chang, WANG Lanlan, et al. Modal test analysis of aqueduct bent structure by artificial excitation[J]. Journal of Vibration and Shock,2019, 38(7):56-65. (in Chinese))
- [11] 顾培英,刘冬梅,邓昌,等. 渡槽排架结构环境激励模态试验[J]. 水利水电科技进展,2019,39(4):56-63. (GU Peiying, LIU Dongmei, DENG Chang, et al. Modal test of aqueduct bent structure based on ambient excitation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019, 39(4):56-63. (in Chinese))
- [12] 刘进明,应怀樵,章关永. OMA 模态参数的优化及盲分析技术探讨[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(6):1016-1020. (LIU Jinming, YING Huaqiao, ZHANG Guanyong. Optimization of oma parameters and blind analysis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2012, 32(6):1016-1020. (in Chinese))
- [13] 杭晓晨,蒋令闻,顾明华,等. 频域分解模态识别方法的阻尼识别精度研究[J]. 振动工程学报,2015,28(4):518-524. (HANG Xiaochen, JIANG Lingwen, GU Minghua, et al. Accuracy of modal damping identification using frequency domain decomposition method[J]. Journal of Vibration Engineering,2015, 28(4):518-524. (in Chinese))
- [14] 叶锡钧,颜全胜,王卫锋,等. 基于多参考点稳定图的斜拉桥模态参数识别[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2011, 39(9):41-47,53. (YE Xijun, YAN Quansheng, WANG Weifeng, et al. Modal parameter identification of cable-stayed bridge based on multiple reference dofs stabilization diagram[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Sciences), 2011, 39(9):41-47,53. (in Chinese))
- [15] 王彤,张令弥. 运行模态分析的频域空间域分解法及其应用[J]. 航空学报,2006,27(1):62-66. (WANG Tong, ZHANG Lingmi. Frequency and spatial domain decomposition for operational modal analysis and its application[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2006, 27(1):62-66. (in Chinese))
- [16] 孙正华,李兆霞,陈鸿天,等. 大跨斜拉桥基于结构模拟的环境振动测点优化布置[J]. 应用科学学报,2007,25(4):411-417. (SUN Zhenghua, LI Zhaoxia, CHAN Hongtin, et al. Optimal configuration of ambient vibration sensors based on structural modeling for long cable-stayed bridge[J]. Journal of Applied Sciences,2007, 25(4):411-417. (in Chinese))
- [17] CARNE T G, DOHMANN C R. A modal test design strategy for model correlation[C]// In Bathel ed. Proc. 13th international Modal Analysis conference. New York: Union college, 1995:927-933.
- [18] 艾贻学. 大型土木结构的阻尼特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构抗震设计规范:GB 5001—2010(2016 年版)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [20] 柯国军,郭长青,胡绍全,等. 混凝土阻尼比研究[J]. 建筑材料学报,2004,7(1):35-40. (KE Guojun, GUO Changqing, HU Shaoquan, et al. Study on the damping ratio of concrete[J]. Journal of Building Materials,2004, 7(1):35-40. (in Chinese))

(收稿日期:2019-03-28 编辑:张志琴)