

# 渡槽排架结构环境激励模态试验

顾培英<sup>1,2</sup>, 刘冬梅<sup>3</sup>, 邓 昌<sup>1,2</sup>, 汤 雷<sup>1,2</sup>

(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. 南京科技职业学院建筑与艺术设计学院, 江苏 南京 210048)

**摘要:** 为获得渡槽排架结构动力特性, 开展渡槽排架单向单输入多输出(SIMO)法、双向多输入多输出(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、双向模态参数。结果表明, SIMO 法纵向模态绝大多数谱峰明显、识别效果较好, 纵向模态比横向模态丰富; MIMO 法纵向或以纵向为主的谱峰大多数明显, 横向或以横向为主、双向模态除双向第 2 阶(即横向第 1 阶)谱峰明显外, 其他较小, 甚至未能识别; 排架柱以弯曲振动为主, 纵向低阶、高阶模态横梁分别以平动或转动刚体振动、弯曲振动为主, 横向模态横梁为平动或不动刚体振动; 两种方法识别出的模态频率误差较小, SIMO 法结果更为可靠, 尤其是低阶模态。从低阶识别精度、试验工作量及操作便捷性而言, 排架结构环境激励模态试验选择单向 SIMO 法优于双向 MIMO 法。

**关键词:** 渡槽排架结构; 模态试验; 增强频域分解法; MIMO 法; 环境激励

**中图分类号:** TV332      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2019)04-0056-08

**Modal test of aqueduct bent structures based on ambient excitation**//GU Peiying<sup>1,2</sup>, LIU Dongmei<sup>3</sup>, DENG Chang<sup>1,2</sup>, TANG Lei<sup>1,2</sup>(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. *School of Architecture and Art Design, Nanjing Polytechnic Institute, Nanjing 210048, China*)

**Abstract:** Ambient excitation modal tests of one-way SIMO (single input multiple output) method and two-way MIMO (multiple input multiple output) method were carried out to obtain the dynamic characteristics of aqueduct bent structures. Longitudinal, transverse and bidirectional modal parameters were identified by enhanced frequency domain decomposition. The results show that most spectrum peaks of longitudinal modes are obvious with better identification results, and the longitudinal modes are more abundant than transverse ones by SIMO method. Most spectrum peaks of longitudinal or mainly longitudinal modes are also obvious by MIMO method. However, spectrum peaks of transverse modes or mainly transverse modes, bidirectional modes are small and some are difficult to be identified except for the second bidirectional order mode, i. e. the first transverse order mode. The column is identified with bending vibration. The beam is identified with rigid body vibration of translation or rotation for longitudinal low-order modal shapes, while it is characterized with bending vibration for high-order modes. For transverse modal shapes, the beam is identified with rigid body vibration of translation or immovability. The error of modal frequency identified by SIMO and MIMO methods is small. The results by SIMO method are more reliable, especially for low-order modes. Therefore, in the aspects of low-order modes identification accuracy, test workload and operation convenience, one-way SIMO method is better than two-way MIMO method for bent structure modal test.

**Key words:** aqueduct bent structure; modal test; enhanced frequency domain decomposition; MIMO method; ambient excitation

国内外对混凝土坝与桥梁工程安全评价、混凝土结构老化病害评估与损伤诊断已开展大量研究, 笔者对大体积混凝土结构整体安全性进行了初步探讨<sup>[1-5]</sup>, 但国内外对渡槽结构安全评价的研究较少。

笔者提出了基于振动诊断技术的大跨度高架渡槽结构安全评价技术, 已对渡槽结构典型破坏特征有了较为全面的了解<sup>[6]</sup>, 根据模态频率、振型、阻尼模态参数分析结果<sup>[7]</sup>, 评价结构安全状况。模态试验分

析是获得模态参数的主要手段,模态参数识别方法有频域法和时域法,其中时域法应用较广泛。

模态试验按输入输出方式可分为单输入单输出(single input single output, SISO)、单输入多输出(single input multiple output, SIMO)、多输入单输出(multiple input single output, MISO)和多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)。从某种意义上讲模态试验方法可划分为 SIMO、MIMO 两大类<sup>[7]</sup>。

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。本文从未考虑渡槽槽身的排架入手,通过单向 SIMO 法、双向 MIMO 法环境激励模态试验,提出排架类结构环境激励模态试验建议方法。

## 1 增强频域分解法

频域分解(frequency domain decomposition, FDD)法是根据结构在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<sup>[8]</sup>,该方法由峰值拾取法发展而来<sup>[9]</sup>。FDD 方法最早由 Brincker 等在复模态指示函数的基础上提出,在满足白噪声激励假设和小阻尼假设时,能够识别模态频率和模态振型<sup>[8]</sup>。Brincker 等随后提出了增强频域分解法(enhance frequency domain decomposition, 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<sup>[9]</sup>。

设  $x(t)$  是未知不能测量的激励,第  $k$  个离散时间点测量的响应数据为  $y(k)$ ,对欠阻尼的情况,有

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \mathbf{H}^*(j\omega) \mathbf{G}_{xx}(j\omega) \mathbf{H}^T(j\omega) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{G}_{xx}(j\omega)$ 、 $\mathbf{G}_{yy}(j\omega)$  分别为输入、输出功率谱密度函数矩阵;  $\mathbf{H}(j\omega)$  为频响函数矩阵;  $\omega$  为频率;上标 \* 表示复共轭,下同。

输入与输出功率谱密度函数矩阵均为共轭对称矩阵。当所关心频段内假设输入为一白噪声,具有平直谱,则  $\mathbf{G}_{xx}(j\omega)$  为一实常数对角矩阵,用符号  $\mathbf{D}$  表示该对角矩阵。交通和风引起的地脉动等宽带随机激励,或自然界的脉冲激励,均可认为具有平直谱<sup>[10]</sup>。

$\mathbf{H}(j\omega)$  也可用留数表示:

$$\mathbf{H}(j\omega) = \sum_{r=1}^n \left( \frac{\mathbf{R}_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{\mathbf{R}_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} \right) \quad (2)$$

其中  $\mathbf{R}_r = \boldsymbol{\phi}_r \boldsymbol{\gamma}_r^T$   
式中:  $\mathbf{R}_r$  为第  $r$  阶模态留数矩阵;  $\boldsymbol{\phi}_r$ 、 $\boldsymbol{\gamma}_r$  分别为第  $r$  阶

模态振型和模态参与向量;  $\lambda_r$  为第  $r$  阶极点;  $n$  为模态阶数。

将式(2)代入式(1),响应谱矩阵变换为

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{r=1}^n \left( \frac{\mathbf{A}_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{\mathbf{A}_r^H}{-j\omega - \lambda_r^*} + \frac{\mathbf{A}_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} + \frac{\mathbf{A}_r^T}{-j\omega - \lambda_r} \right) \quad (3)$$

其中  $\mathbf{A}_r = \sum_{k=1}^n \left( \frac{\mathbf{R}_k^* \mathbf{D} \mathbf{R}_k^T}{-\lambda_k^* - \lambda_r} + \frac{\mathbf{R}_k \mathbf{D} \mathbf{R}_k^T}{-\lambda_k - \lambda_r} \right)$

式中:  $\mathbf{A}_r$  为相关的留数项;上标 H 表示共轭转置,下同。

假设结构阻尼较小,即假设第  $r$  阶极点  $\lambda_r = -\sigma_r + j\omega_r$ ,则满足  $\sigma_r \ll \omega_r$ ,  $\sigma_r$ 、 $\omega_r$  分别为复模态阻尼、复模态阻尼固有频率。此时,  $\mathbf{A}_r \approx d_r \boldsymbol{\phi}_r^* \boldsymbol{\phi}_r^T$ ,其中  $d_r$  为实数。另外,在第  $r$  阶模态频率  $\omega_r$  的邻近谱线上,式(3)中最后两项的分母远大于前两项的分母,可近似忽略,只有少数几个模态(一般只有一个或两个)贡献显著,定义这些模态集合为  $S_{ub}(\omega)$ ,即式(3)可表示为

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{r \in S_{ub}(\omega)} \left( \frac{d_r \boldsymbol{\phi}_r^* \boldsymbol{\phi}_r^T}{j\omega - \lambda_r} + \frac{d_r \boldsymbol{\phi}_r^* \boldsymbol{\phi}_r^T}{-j\omega - \lambda_r^*} \right) = \boldsymbol{\Psi}^* \text{diag} \left( 2 \text{Re} \left( \frac{d_r}{j\omega - \lambda_r} \right) \right) \boldsymbol{\Psi}^T \quad (4)$$

式中:  $\boldsymbol{\Psi}$  为特征矢量矩阵;  $\text{diag}(\cdot)$  表示对角矩阵。

$\mathbf{G}_{yy}(j\omega)$  为共轭对称矩阵,对其进行奇异值分解,有

$$\mathbf{G}_{yy}^T(j\omega) = \mathbf{U} \mathbf{V} \mathbf{U}^H \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{U}$  为奇异值向量组成的酉矩阵;  $\mathbf{V}$  为奇异值构成的实数对角矩阵。

奇异值向量与模态振型相对应,而奇异值则等于  $2d_r$  除以频率点到极点距离的实部。最大奇异值所在位置即为该阶模态频率。

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:①激励为白噪声;②结构阻尼为小阻尼;③当有密集模态时,模态必须正交。

## 2 试验方案

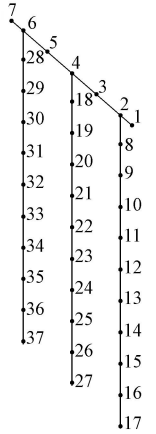
将渡槽排架柱与横梁统称为渡槽排架结构,根据新疆某渡槽,主要构件按 1:15 几何比尺制作 2 榀小型渡槽排架钢筋砂浆结构<sup>[7]</sup>,记为 1 号排架、2 号排架。

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。共布置 37 个测点,其中测点 1 为参考点,分多组测试,部分试验照片及测点位置编号如图 1 所示。对于本小型排架结构,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 6 附近激励,但不需测试激励信号。



(a) 双向模态试验



(b) 测点位置编号

图 1 部分试验照片及测点位置编号

### 3 模态试验结果及分析

#### 3.1 纵向模态识别结果及分析

##### 3.1.1 1 号排架

1 号排架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 11 阶模态。

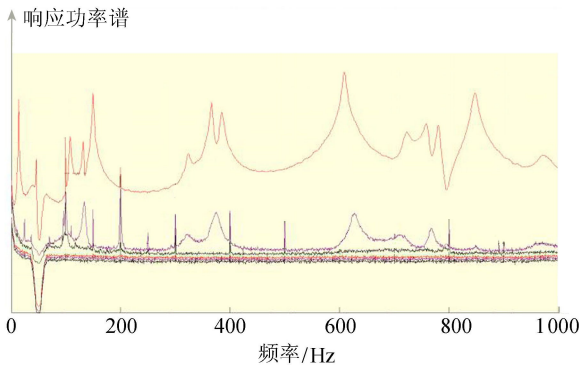


图 2 1 号排架环境激励下纵向模态响应功率谱奇异值曲线

1 号排架环境激励下纵向模态振型相关 MAC 矩阵校验如图 3 所示。采用 MAC 矩阵非对角线元素平均值、最大值作为评价指标,二者数值越小越好。孙正华等<sup>[11-12]</sup>提出,工程上一般当 MAC 矩阵非对角线元素小于 0.25 时,可近似认为两个模态正交,因此 0.25 可作为阈值普遍应用于传感器优化布置研究中。本文将 0.25 作为两模态识别效果好坏

的阈值。

根据图 3,大多数非对角线元素很小,接近于 0,90.9% 的非对角线元素小于 0.25,平均 0.1155,说明大多数模态振型具有较好的正交性,识别精度较高。MAC<sub>0607</sub>、MAC<sub>0809</sub> (式中下标 06、07 分别代表第 6 阶、第 7 阶模态,其余类推)分别为 0.2635、0.3104,略大于 0.25,识别效果尚可;MAC<sub>1011</sub> 最大,为 0.7325;MAC<sub>0810</sub>、MAC<sub>0910</sub> 次之,分别为 0.4302、0.4407。这说明第 10 阶与第 11 阶模态正交性较差,第 8 阶与第 10 阶、第 9 阶与第 10 阶次之。

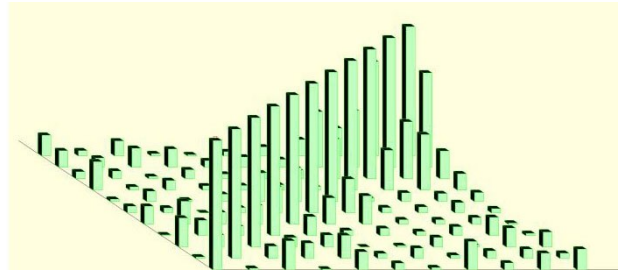


图 3 1 号排架环境激励下纵向模态振型相关 MAC 矩阵校验

前 11 阶模态振型如图 4 所示。根据图 2、图 4,1 号排架纵向模态除第 5 阶谱峰较小,第 5 阶、第 10 阶、第 11 阶模态振型较差外,其他模态识别效果较好。

1 号排架环境激励下纵向模态参数识别结果见表 1。由表 1 可知,1 号排架纵向模态阻尼比为 0.384% ~ 1.160%,平均 0.666%,阻尼偏小,但仍在正常范围内<sup>[7]</sup>。柯国军等<sup>[13]</sup>试验得到普通混凝土阻尼比在 0.9% ~ 2.0% 之间,轻骨料混凝土阻尼比小于普通混凝土,一般小于 1.0%。同一材料,不同结构形式、不同模态振型、不同截面形式,阻尼比可能相差很大。本模型为砂浆结构,阻尼偏小。一般情况下阻尼识别精度较低、离散性大,本文对模态阻尼不作重点分析。

##### 3.1.2 2 号排架

2 号排架纵向模态试验分析结果与 1 号排架相似,也识别出前 11 阶模态(图略)。

同样,根据模态振型相关 MAC 矩阵校验图(图略),大多数非对角线元素很小,接近 0,89.1% 非对角线元素小于 0.25,平均 0.1206,大多数模态振型具有较好的正交性,识别精度较高。MAC<sub>0607</sub>、MAC<sub>0507</sub> 分别为 0.2887、0.3048,略大于 0.25,识别效果尚可;MAC<sub>1011</sub> 最大,为 0.8018;MAC<sub>0810</sub>、MAC<sub>0809</sub>、MAC<sub>0910</sub> 次之,分别为 0.3650、0.3920、0.4559,表明第 10 阶与第 11 阶模态正交性较差,第 8 阶与第 10 阶、第 8 阶与第 9 阶、第 9 阶与第 10 阶次之。

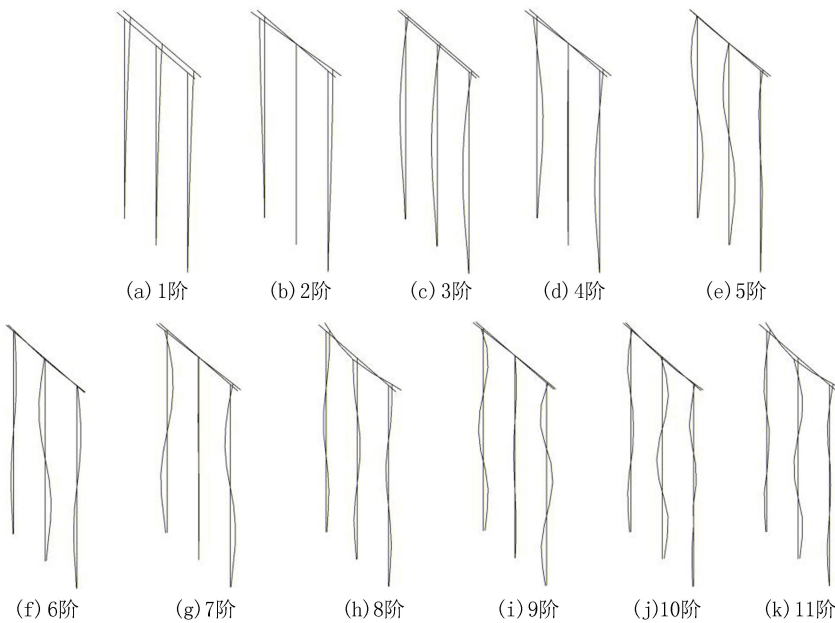


图4 1号排架环境激励下纵向前11阶模态振型

表1 1号排架环境激励下模态参数识别结果

方向	阶数	模态频率/Hz		模态频率 相对 误差/%	模态阻尼比/%		模态阻尼比 相对 误差/%	其他说明
		单向 SIMO 法	双向 MIMO 法		单向 SIMO 法	双向 MIMO 法		
纵向	1	14.272	13.918	2.5	0.991	1.151	16.1	阻尼误差较大
	2	46.380	45.946	0.9	0.384	0.715	86.2	阻尼误差大
	3	108.831	107.468	1.3	1.160	1.316	13.4	
	4	150.436	149.106	0.9	0.752	0.622	17.3	阻尼误差较大
	5	324.282	322.854	0.4	1.042	0.977	6.2	
	6	367.172	364.102	0.8	0.503	0.559	11.1	
	7	385.754	383.520	0.6	0.803	0.466	42.0	阻尼误差大
	8	608.279	606.260	0.3	0.399	0.301	24.6	阻尼误差较大
	9	723.232	719.307	0.5	0.432	0.409	5.3	双向以x向为主
	10	761.229	759.302	0.3	0.457	0.455	0.4	双向以x向为主
	11	847.736	844.396	0.4	0.406	0.437	7.6	
横向	1	24.434	24.283	0.6	1.025	1.065	3.9	
	2	123.244	121.622	1.3	1.032	0.899	12.9	
	3	154.048			0.715			双向未能识别
	4	343.059	342.489	0.2	0.905	0.628	30.6	阻尼误差较大,双向模态
	5	363.400			1.095			双向未能识别
	6	413.712	411.788	0.5	1.004	0.603	39.9	阻尼误差较大,双向模态
	7	700.011	689.446	1.5	0.410	0.728	77.6	阻尼误差大,双向模态
	8	766.121			0.388			双向未能识别

注:表中x向代表渡槽纵向。

2号排架环境激励下纵向模态参数识别结果见表2。由表2可知,模态阻尼比为0.381%~1.554%,平均0.796%,阻尼总体略大于1号排架,仍偏小,但仍在正常范围内。此外,2号排架纵向各阶模态频率略低于1号排架,除1阶相差较大(约13.3%)外,其余较小,在2.5%~6.0%之间,平均4.0%。

### 3.1.3 排架纵向模态规律

综合分析得出排架纵向模态有以下规律:

a. 识别出11阶纵向模态,响应功率谱奇异值曲线绝大多数谱峰明显,大多数模态识别效果较好,尤其是低阶模态。

b. 排架结构以排架柱弯曲振动为主,低阶模态横梁以平动或转动刚体振动为主,高阶模态横梁以弯曲振动为主。

c. 除第10阶与第11阶模态正交性较差,第8阶与第10阶、第9阶与第10阶次之,2号排架第8阶与第9阶模态正交性也稍差外,大多数模态振型具有较好的正交性。

## 3.2 横向模态识别结果及分析

### 3.2.1 1号排架

1号排架环境激励下横向模态响应功率谱奇异值曲线如图5所示,收取了8阶模态。

表2 2号排架环境激励下模态参数识别结果

方向	阶数	模态频率/Hz		模态频率 相对 误差/%	模态阻尼比/%		模态阻尼比 相对 误差/%	其他说明
		单向 SIMO 法	双向 MIMO 法		单向 SIMO 法	双向 MIMO 法		
纵向	1	12.373	12.198	1.4	1.554	1.424	8.4	
	2	44.319	44.068	0.6	0.707	0.372	47.4	阻尼误差大
	3	102.267	101.499	0.8	1.101	0.789	28.3	阻尼误差较大
	4	142.888	142.038	0.6	0.734	0.782	6.5	
	5	308.260	308.428	0.1	1.223	1.650	34.9	阻尼误差较大
	6	352.011	348.385	1.0	0.612	0.908	48.4	阻尼误差大,双向以x向为主
	7	372.913	372.738	0.0	0.692	1.493	115.8	阻尼误差大
	8	588.942	586.414	0.4	0.530	0.546	3.0	
	9	696.915	693.848	0.4	0.761	0.825	8.4	双向以x向为主
	10	741.659	737.824	0.5	0.381	0.678	78.0	阻尼误差大,双向以x向为主
	11	826.230	821.986	0.5	0.463	0.600	29.6	阻尼误差较大
横向	1	21.703	21.662	0.2	1.001	1.315	31.4	阻尼误差较大
	2	147.011	146.259	0.5	0.649	0.843	29.9	阻尼误差较大
	3	349.249			1.076			双向未能识别
	4	400.275	400.117	0.0	0.744	0.452	39.2	阻尼误差较大,双向模态
	5	735.747			0.911			双向未能识别

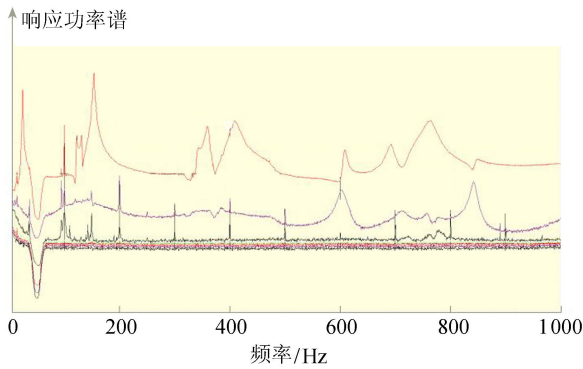


图5 1号排架环境激励下横向模态响应功率谱奇异值曲线

模态振型相关 MAC 矩阵(图略)大多数非对角线元素较小,平均 0.1846,最大值  $MAC_{0708}$  为 0.5518,有 32.1% 的非对角线元素大于 0.25,67.9% 的模态振型具有较好的正交性。总的来说,环境激励下横向模态没有纵向正交性好,识别精度也没有纵向高。

1号排架环境激励下横向模态参数识别结果见表1,前8阶模态振型如图6所示。由表1可知,模态阻尼比为 0.388% ~ 1.095%,平均 0.822%,阻尼偏小,但仍可认为该阻尼在正常范围内。

根据功率谱奇异值曲线、模态振型图,相对而言,1号排架环境激励下横向模态谱峰没纵向明显及丰富,第2阶、第5阶、第7阶谱峰较小,第4阶几乎无谱峰,第4阶、第5阶、第7阶、第8阶模态振型较差或略差,其他4阶即 50.0% 的模态识别效果较好。总之,横向模态没纵向丰富,识别效果也没纵向好。

### 3.2.2 2号排架

2号排架横向收取了5阶模态(图略),模态振型相关 MAC 矩阵(图略)大多数非对角线元素较小,平均 0.1979,最大值  $MAC_{0304}$  为 0.4592,有

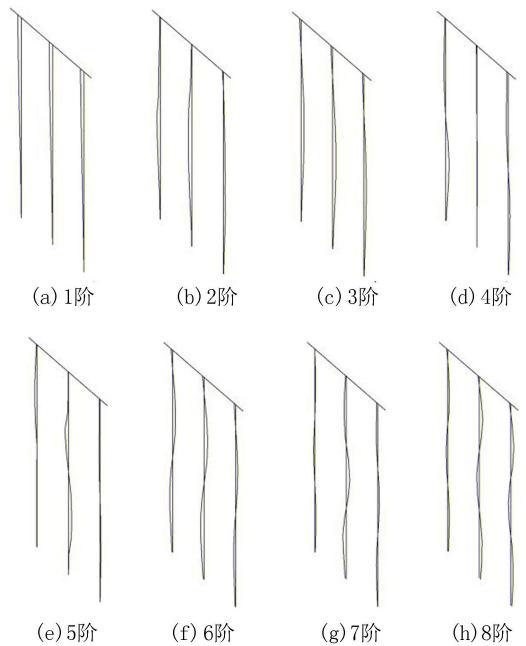


图6 1号排架环境激励下横向前8阶模态振型

30.0% 的非对角线元素大于 0.25,70.0% 的模态振型具有较好的正交性。

根据功率谱奇异值曲线、模态振型图,2号排架环境激励下横向模态谱峰没有纵向明显及丰富,也无1号排架横向模态丰富,第3阶无谱峰,第3阶、第5阶模态振型较差或略差,其他3阶即 60.0% 的模态识别效果较好。

2号排架环境激励下横向模态参数识别结果见表2,根据表2,模态阻尼比在 0.649% ~ 1.076% 之间,平均 0.876%,阻尼偏小,但仍在正常范围内。另外,2号排架横向对应模态频率略低于1号排架,除1阶相差较大,约 11.2% 外,其余较小,在 3.2% ~ 4.6% 之间,平均 3.9%。

### 3.2.3 排架横向模态规律

a. 识别出 5~8 阶横向模态,功率谱奇异值曲线谱峰没有纵向明显及丰富,只有 50.0%~60.0% 的模态谱峰明显、识别效果较好。

b. 排架结构以排架柱弯曲振动为主,横梁为平动或不动的刚体振动。

c. 67.9%~70.0% 的模态振型具有较好的正交性。

## 3.3 双向模态识别结果及分析

### 3.3.1 1 号排架

1 号排架环境激励下双向模态响应功率谱奇异值曲线如图 7 所示,收取了 16 阶模态。

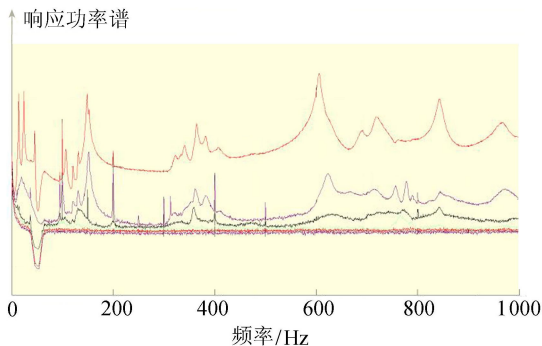


图 7 1 号排架环境激励下双向模态响应功率谱奇异值曲线

模态振型相关 MAC 矩阵(图略)大多数非对角线元素很小,接近 0,平均 0.1142,大多数模态振型正交性较好,模态识别精度较高。 $MAC_{0809}$ 、 $MAC_{0911}$ 、 $MAC_{1213}$ 、 $MAC_{1215}$ 、 $MAC_{1216}$  略大于 0.25,识别效果尚可; $MAC_{1415}$  最大,为 0.6938; $MAC_{0708}$ 、 $MAC_{0910}$ 、 $MAC_{1011}$ 、 $MAC_{1314}$ 、 $MAC_{1315}$  次之,为 0.3812~0.5346,

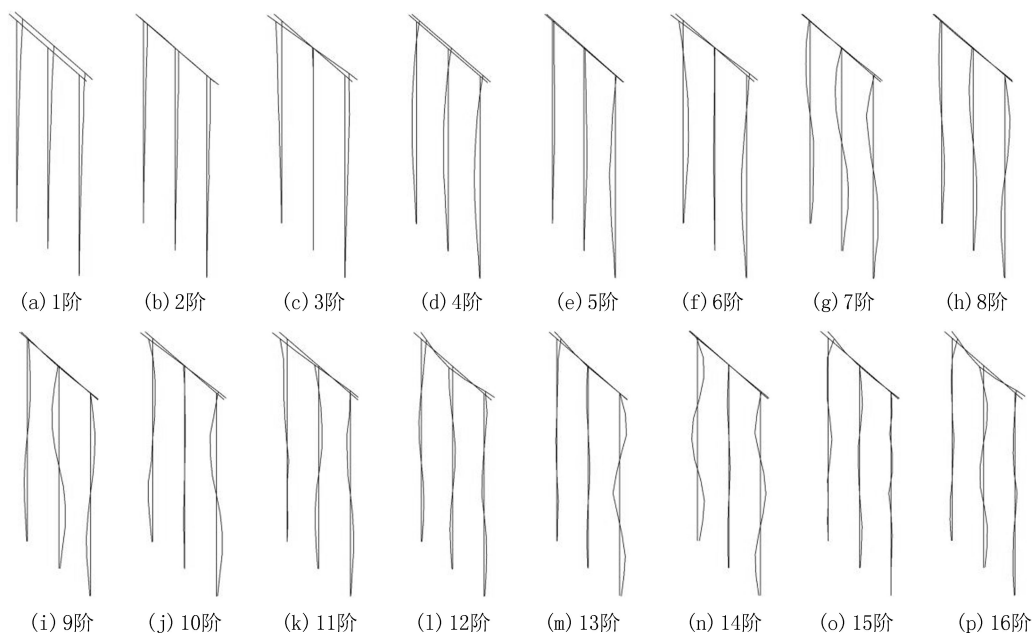


图 8 1 号排架环境激励下双向前 16 阶模态振型

表明第 14 阶与第 15 阶模态正交性较差,第 7 阶与第 8 阶、第 9 阶与第 10 阶、第 10 阶与第 11 阶、第 13 阶与第 14 阶、第 13 阶与第 15 阶次之。对应单向 SIMO 法环境激励,相当于纵向第 9 阶与第 10 阶正交性较差,纵向第 5 阶与横向第 4 阶、纵向第 6 阶与 7 阶、纵向第 7 阶与横向第 6 阶、横向第 7 阶与纵向第 9 阶、横向第 7 阶与纵向第 10 阶次之。由此可知,双向 MIMO 法环境激励识别出的模态,低阶模态识别精度较理想,高价模态较差。

1 号排架环境激励下双向模态参数识别结果见表 1,前 16 阶模态振型如图 8 所示。由表 1 可知,模态阻尼比为 0.301%~1.316%,平均 0.708%,阻尼偏小,但仍在正常范围内。

根据图 7、图 8,1 号排架环境激励下双向模态试验共识别出 11 阶纵向或以纵向为主的模态,其中有 8 阶谱峰明显或较明显,有 3 阶谱峰较小,可见纵向或以纵向为主的模态谱峰大多数明显;识别出 2 阶横向或以横向为主的模态,其中第 2 阶(即横向第 1 阶)谱峰明显,第 5 阶(即横向第 2 阶)较小,另外 3 阶单向模态试验识别出的横向模态在双向模态试验中呈双向模态,即第 8 阶、第 11 阶、第 13 阶,谱峰较小或几乎无谱峰,还有 3 阶横向模态未能识别。第 8 阶与单向 SIMO 法模态振型不同,为双向模态;第 10 阶、第 16 阶模态略差;第 11 阶、第 13 阶、第 15 阶模态较差;其他 10 阶模态识别效果较好。总之,识别出的横向模态没有纵向模态丰富,识别效果也没纵向好。

### 3.3.2 2 号排架

2 号排架双向收取了 14 阶模态(图略)。模态振型相关 MAC 矩阵(图略)大多数非对角线元素很

小,接近0,平均0.1155,大多数模态振型正交性较好,模态识别精度较高。 $MAC_{1114}$ 略大于0.25,识别效果尚可; $MAC_{1213}$ 最大,为0.6327; $MAC_{0506}$ 、 $MAC_{0809}$ 、 $MAC_{0910}$ 、 $MAC_{1314}$ 次之,为0.4314~0.5584,表明第12阶与第13阶模态正交性较差,第5阶与第6阶、第8阶与第9阶、第9阶与第10阶、第13阶与第14阶次之。对应单向SIMO法,相当于纵向第9阶与第10阶正交性较差,纵向第4阶与横向第2阶、纵向第6阶与第7阶、纵向第7阶与横向第4阶、纵向第10阶与第11阶次之。

2号排架环境激励下双向模态参数识别结果见表2。根据表2,模态阻尼比为0.372%~1.650%,平均0.906%,阻尼偏小,但仍在正常范围内。

根据功率谱奇异值曲线、模态振型图,2号排架环境激励下双向模态试验共识别出11阶纵向或以纵向为主的模态,与1号排架类似;识别出2阶横向或以横向为主的模态,其中第2阶谱峰明显,第6阶(即横向第2阶)较小,另外1阶单向模态试验识别出的横向模态在双向模态试验中呈双向模态,即第10阶,谱峰较小,还有2阶横向模态未能识别。第13阶、第14阶模态略差;第9阶、第10阶模态较差;其他10阶模态识别效果较好。

### 3.3.3 排架双向模态规律

综合分析得出2号排架环境激励下双向MIMO法环境激励识别出的模态规律与1号排架类似,只是2号排架双向只识别出14阶(1号排架16阶),具体规律如下:

a. 环境激励下双向模态试验识别出14~16阶模态,其中纵向或以纵向为主的模态谱峰大多数明显,横向或以横向为主、双向模态谱峰除第2阶明显外,其他较小,有的几乎无谱峰,有的甚至未能识别。

b. 排架结构以排架柱弯曲振动为主,低阶模态下横梁以平动或转动的刚体振动为主,高阶模态下横梁以弯曲振动为主。

c. 大多数模态振型具有较好的正交性。

d. 双向MIMO法环境激励识别出的模态,低阶模态识别精度较为理想,高价较差。

### 3.4 双向与单向模态识别结果比较分析

综合前面分析结果,得到以下几点规律:

a. 单向SIMO法纵向模态功率谱奇异值曲线大多数谱峰明显,大多数模态识别效果较好,横向只有50.0%~60.0%的模态谱峰明显,纵向模态比横向模态丰富,识别效果也优于横向模态。

b. 双向MIMO法识别出的纵向或以纵向为主的模态谱峰绝大多数明显,横向或以横向为主、双向模态谱峰除双向第2阶明显外,其他较小,有的几乎

无谱峰,有的甚至未能识别。

c. 排架结构以排架柱弯曲振动为主,纵向低阶模态下横梁以平动或转动的刚体振动为主,纵向高阶模态下横梁以弯曲振动为主,横向模态横梁为平动或不动的刚体振动。

d. 大多数模态振型具有较好的正交性。

值得一提的是,前两点规律说明双向MIMO法容易漏掉排架横向模态,从振动能量角度而言,渡槽排架模态振型所占能量以纵向为主,横向模态能量远低于纵向。

根据表1,1号渡槽排架环境激励下单向SIMO法与双向MIMO法模态频率相差较小,平均误差0.8%,最大2.5%。但识别出的模态阻尼比变化较大,因为阻尼比值偏小,误差难免会偏大,50.0%的模态阻尼比误差大于15.0%,最大误差达86.2%,其余50.0%的模态误差在0.4%~13.4%之间,平均7.6%。前面也已介绍,一般情况下模态阻尼比识别精度较低,离散性大,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。

根据表2,2号渡槽排架环境激励下单向SIMO法与双向MIMO法模态频率相差很小,平均0.5%,最大1.4%。大多数模态阻尼比误差偏大,但阻尼比仍在正常范围内。

综合表1、表2,单向SIMO法与双向MIMO法识别出的模态频率误差较小,模态阻尼均在正常范围内,误差较大,应用双向MIMO法部分横向模态未能准确识别。当然双向MIMO法也识别出少部分SIMO法不能全面识别的双向模态。对于环境激励,若时间、经费充足,可以同时进行单向SIMO法与双向MIMO法试验分析,相互验证、相互补充。

排架这种平面特性明显的结构以单向模态为主<sup>[7]</sup>。从模态识别精度本身而言,按两方向分别进行单向SIMO环境激励模态试验,大多数模态结果较为可靠,尤其是低阶模态,这也能满足实际需要。所以,从模态识别精度、试验工作量,兼顾操作便捷性而言,排架结构模态试验选择SIMO单向环境激励模态试验优于双向MIMO法。

## 4 结论

a. 单向SIMO法纵向模态功率谱奇异值曲线绝大多数谱峰明显,大多数模态识别效果较好,横向只有50.0%~60.0%的模态谱峰明显,纵向模态比横向模态丰富,识别效果也优于横向模态。

b. 双向MIMO法识别出的纵向或以纵向为主的模态谱峰大多数明显,横向或以横向为主、双向模态谱峰除双向第2阶明显外,其他较小,有的几乎无

谱峰,甚至未能识别。

c. 排架结构以排架柱弯曲振动为主,纵向低阶模态横梁以平动或转动刚体振动为主,纵向高阶模态横梁以弯曲振动为主,横向模态横梁为平动或不动刚体振动。

d. 单向 SIMO 法和双向 MIMO 法识别出的大多数模态振型具有较好的正交性。

e. 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,模态阻尼误差偏大,但在正常范围内,尽管双向 MIMO 法识别出少部分 SIMO 法不能全面识别的双向模态,但部分横向模态未能准确识别。平面特性明显的排架结构以单向模态为主,按两单向 SIMO 环境激励模态试验分析结果更为可靠,尤其是低阶模态。从低阶模态识别精度、试验工作量及操作便捷性而言,排架结构模态试验选择 SIMO 单向环境激励模态试验优于双向 MIMO 法。

#### 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. Damage probability of hydraulic concrete 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. (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. (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. (GU Peiying, DENG Chang, XIAO Shiyan, 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. (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 ] 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): 146-154. (GU Peiying, DENG Chang, WANG Lanlan, et al. Modal test analysis of an aqueduct bent structure under artificial excitation[ J ]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(7): 146-154. (in Chinese))

[ 8 ] 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))

[ 9 ] 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. (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 Science Edition ), 2011, 39(9): 41-47. (in Chinese))

[ 10 ] 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))

[ 11 ] 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, CHEN Hongtian, 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))

[ 12 ] CARNE T G, DOHMANN C R. A modal test design strategy for model correlation[ C ]// Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference. New York: Union College, Schenectady, 1995:927-933.

[ 13 ] 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:2018-07-17 编辑:雷燕)