

文章编号:1673-2049(2007)01-0021-05

## 基于随机子空间结合稳定图的 拱桥模态参数识别方法

常 军<sup>1,2</sup>, 张启伟<sup>2</sup>, 孙利民<sup>2</sup>

(1. 苏州科技学院 管理科学与工程系, 江苏 苏州 215011;

2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**为了避免目前常用的结构模态参数识别方法容易出现虚假模态等缺陷,提出了一种将随机子空间法与稳定图法相结合的模态参数识别方法。通过随机子空间法有效地从环境激励的结构响应中获取模态参数,通过稳定图方法确定系统阶次。通过对稳定图方法的改进,避免了虚假模态的出现,进而提高了随机子空间方法的识别精度,并在—钢管混凝土拱桥上对这种新方法进行了验证。结果表明,该方法具有良好的识别效果。

**关键词:**参数识别;环境振动;动力特性;模态分析;随机子空间;稳定图;拱桥

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

## Identified Method of Arch Bridge Modal Parameters Based on Stochastic Subspace Combined with Stabilization Diagram

CHANG Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Qi-wei<sup>2</sup>, SUN Li-min<sup>2</sup>

(1. Department of Management Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology,

Suzhou 215011, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in

Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Authors presented an identified method of arch bridge modal parameters based on stochastic subspace combined with stabilization diagram for the presence methods having shortcomings for example false modes. Stochastic subspace identification (SSI) can be used to identify structural modal parameters by ambient vibration. The key work of SSI is to gain the order of the system. Stabilization diagram is a novel approach to decide the rank of the system, but this method easily yields false mode. Authors improved the stabilization diagram so that the false mode could be sought out and the results became more precise. The improved method was evaluated by an actual steel tubular concrete bridge. The result shows that the new approach can gain more precise outcome.

**Key words:** parameter identification; ambient vibration; dynamic property; modal analysis; stochastic subspace; stabilization diagram; arch bridge

## 0 引言

随机子空间方法是近年来发展起来的一种线性

系统辨识方法,该方法不需要人工激励,直接从环境激励的相应输出信号中提取结构的模态参数,这些模态参数将作为结构健康监测、有限元模型修正、受

收稿日期:2006-12-26

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2002CB412709)

作者简介:常 军(1973-),男,江苏丰县人,苏州科技学院讲师,工学博士,E-mail:changjun21@126.com。

损结构物的评定和结构控制的基础或输入<sup>[1-2]</sup>,因此,该方法越来越受到人们的青睐<sup>[3]</sup>。在随机子空间识别结构模态参数的方法中,确定系统的阶次是该方法的关键工作之一。以往的方法是直接用奇异值分解确定系统阶次,但得到的结果不是很理想。稳定图方法是一种比较新颖的确定系统阶次的方法,可以从诸多模态中鉴别真假模态,这也是随机子空间方法的一项重要工作。稳定图方法可用于有较强噪声情形下的模态识别,那些满足条件的稳定极点被认为是系统的真实极点,可是在应用中发现稳定图方法需要改进,比如尽管一些极点也可以作为稳定的极点,但它们对系统的影响很小,可以作为噪声模态,用现在的稳定图无法将这些极点剔除,通过考察这些极点对系统的影响,可以对稳定图方法进行改进,使其能够剔除这一类噪声模态。

## 1 随机子空间识别方法

### 1.1 系统随机状态空间模型

对于白噪声激励的线性系统,其随机状态空间模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \\ E\left\{\begin{bmatrix} \mathbf{w}_p \\ \mathbf{v}_q \end{bmatrix} (\mathbf{w}_p^T, \mathbf{v}_q^T)\right\} &= \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T & \mathbf{R} \end{bmatrix} \delta_{pq} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{y}_k$  为第  $l$  个测点在第  $k$  ( $k \in N$ ) 个采样间隔  $\Delta t$  的输出向量,  $\mathbf{y}_k \in R^{l \times 1}$ ;  $\mathbf{x}_k$  为系统的状态向量,  $\mathbf{x}_k \in R^{n \times 1}$ ,  $n$  为系统的阶数;  $\mathbf{A}$  为状态矩阵,  $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$ ;  $\mathbf{C}$  为输出矩阵,  $\mathbf{C} \in R^{l \times n}$ ;  $E$  为数学期望符号;  $\delta_{pq}$  为 kronecker 函数;  $\mathbf{w}_k$  为过程噪声,  $\mathbf{w}_k \in R^{n \times 1}$ ;  $\mathbf{v}_k$  为测量噪声,  $\mathbf{v}_k \in R^{l \times 1}$ ;  $\mathbf{w}_k$  与  $\mathbf{v}_k$  均假定为白噪声,并且  $E(\mathbf{w}_k) = 0, E(\mathbf{v}_k) = 0$ 。

### 1.2 基于参考点的随机状态子空间模型

测试桥梁环境振动时,有时由于测点较多而传感器数量有限,需分步完成整个测量过程。为了统一各个测量分步,需事先选取一个或若干个测点作为参考点,参考点上的传感器在整个测量过程中固定不动且持续记录。定义 Hankel 矩阵,见式(2)

$$\mathbf{H}^{\text{ref}} \equiv \frac{1}{\sqrt{J}} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0^{\text{ref}} & \mathbf{y}_1^{\text{ref}} & \cdots & \mathbf{y}_{j-1}^{\text{ref}} \\ \mathbf{y}_1^{\text{ref}} & \mathbf{y}_2^{\text{ref}} & \cdots & \mathbf{y}_j^{\text{ref}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}_{i-1}^{\text{ref}} & \mathbf{y}_i^{\text{ref}} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j-2}^{\text{ref}} \\ \mathbf{y}_i & \mathbf{y}_{i+1} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j-1} \\ \mathbf{y}_{i+1} & \mathbf{y}_{i+2} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}_{2i-1} & \mathbf{y}_{2i} & \cdots & \mathbf{y}_{2i+j-2} \end{bmatrix} \equiv$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{0|i-1}^{\text{ref}} \\ \mathbf{Y}_{i|2i-1}^{\text{ref}} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^{\text{ref}} \\ \mathbf{Y}_f^{\text{ref}} \end{bmatrix} \in R^{(r+l)i \times j} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{y}_k^{\text{ref}}$  为参考点输出,  $\mathbf{y}_k^{\text{ref}} \in R^{r \times 1}$ ; 当  $j/i$  足够大时,可以认为  $j \rightarrow \infty$ 。

将 Hankel 矩阵的第  $i$  块行划分的  $\mathbf{y}_k^{\text{ref}}$ 、 $\mathbf{y}_k^{\sim \text{ref}}$  为非参考点,  $\mathbf{y}_k^{\sim \text{ref}} \in R^{(l-r) \times 1}$ , 输出  $k = i-1, i, \dots, i+j-2$ , 则 Hankel 矩阵还可以表示为

$$\mathbf{H}^{\text{ref}} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{0|i}^{\text{ref}} \\ \mathbf{Y}_{i|i}^{\sim \text{ref}} \\ \mathbf{Y}_{i+1|2i-1} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^{\text{ref}+} \\ \mathbf{Y}_{i|i}^{\sim \text{ref}} \\ \mathbf{Y}_f^- \end{bmatrix} \quad (3)$$

对 Hankel 矩阵进行  $QR$  分解

$$\mathbf{H}^{\text{ref}} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^{\text{ref}} \\ \mathbf{Y}_f^- \end{bmatrix} = \mathbf{R}\mathbf{Q}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{R}_{21} & \mathbf{R}_{22} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{R}_{31} & \mathbf{R}_{32} & \mathbf{R}_{33} & \mathbf{0} \\ \mathbf{R}_{41} & \mathbf{R}_{42} & \mathbf{R}_{43} & \mathbf{R}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^T \\ \mathbf{Q}_2^T \\ \mathbf{Q}_3^T \\ \mathbf{Q}_4^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

定义“将来”输出的行空间在“过去”输出的行空间上的投影为

$$\mathbf{P}_i^{\text{ref}} \equiv \mathbf{Y}_f / \mathbf{Y}_p^{\text{ref}} \equiv \mathbf{Y}_f \mathbf{Y}_p^{\text{ref}T} (\mathbf{Y}_p^{\text{ref}} \mathbf{Y}_p^{\text{ref}T})^{-1} + \mathbf{Y}_p^{\text{ref}} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_{i-1}^{\text{ref}} \equiv \mathbf{Y}_f^- / \mathbf{Y}_f^{\text{ref}+} \equiv \mathbf{Y}_f^- \mathbf{Y}_f^{\text{ref}+T} (\mathbf{Y}_f^{\text{ref}+} \mathbf{Y}_f^{\text{ref}+T})^{-1} + \mathbf{Y}_f^{\text{ref}+} \quad (6)$$

根据式(2)~(6)可得

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{P}_i^{\text{ref}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{21} \\ \mathbf{R}_{31} \\ \mathbf{R}_{41} \end{bmatrix} \mathbf{Q}_1^T \in R^{li \times j} \\ \mathbf{P}_{i-1}^{\text{ref}} &= (\mathbf{R}_{41}, \mathbf{R}_{42}) \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^T \\ \mathbf{Q}_2^T \end{bmatrix} \in R^{l(i-1) \times j} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据随机子空间识别理论:投影矩阵  $\mathbf{P}_i^{\text{ref}}$  可分解为观测矩阵  $\mathbf{O}_i$  和 Kalman 滤波状态序列  $\hat{\mathbf{X}}_i$  的乘积;投影矩阵  $\mathbf{P}_{i-1}^{\text{ref}}$  可分解为观测矩阵  $\mathbf{O}_{i-1}$  和 Kalman 滤波状态序列  $\hat{\mathbf{X}}_{i-1}$  的乘积,即

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{P}_i^{\text{ref}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{i-1} \end{bmatrix} (\hat{x}_i, \hat{x}_{i+1}, \dots, \hat{x}_{i+j-1}) = \mathbf{O}_i \hat{\mathbf{X}}_i \\ \mathbf{P}_{i-1}^{\text{ref}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{i-2} \end{bmatrix} (\hat{x}_{i+1}, \hat{x}_{i+2}, \dots, \hat{x}_{i+j}) = \mathbf{O}_{i-1} \hat{\mathbf{X}}_{i-1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{A}$  为结构的系统状态矩阵; $\mathbf{C}$  为输出矩阵。

对投影矩阵  $\mathbf{P}_i^{\text{ref}}$  进行奇异值分解

$$\mathbf{P}_i^{\text{ref}} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T = (\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2) \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{V}_1^T \quad (9)$$

式中:  $\text{rank } \mathbf{P}_i^{\text{ref}} = n$ ;  $\mathbf{U}_1 \in R^{l_i \times n}$ ;  $\mathbf{S}_1 \in R^{n \times n}$ ;  $\mathbf{V}_1 \in R^{j \times n}$ 。

根据式(7)~(9)可得观测矩阵及 Kalman 滤波状态序列

$$\mathbf{O}_i = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{1/2}, \mathbf{O}_{i-1} = \mathbf{O}_i (1 : l(i-1), :),$$

$$\hat{\mathbf{X}}_i = \mathbf{O}_i^+ \mathbf{P}_i^{\text{ref}}, \hat{\mathbf{X}}_{i+1} = \mathbf{O}_{i+1}^+ \mathbf{P}_{i+1}^{\text{ref}} \quad (10)$$

计算随机状态空间模型方程组

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{i+1} \\ \mathbf{Y}_{i|i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_i + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_i \\ \mathbf{v}_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: 输出序列  $\mathbf{Y}_{i|i} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{21} & \mathbf{R}_{22} & \mathbf{0} \\ \mathbf{R}_{31} & \mathbf{R}_{32} & \mathbf{R}_{33} \end{bmatrix}$ , 由此得结构的系统状态矩阵  $\mathbf{A}$  及输出矩阵  $\mathbf{C}$  的最小二乘解与噪声序列

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{i+1} \\ \mathbf{Y}_{i|i} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_i^+, \begin{bmatrix} \mathbf{w}_i \\ \mathbf{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{i+1} \\ \mathbf{Y}_{i|i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_i \quad (12)$$

### 1.3 结构模态分析

在确定系统的状态矩阵  $\mathbf{A}$  及输出矩阵  $\mathbf{C}$  后, 结构振动参数可按下列步骤进行识别<sup>[4-5]</sup>:

(1) 对系统的状态矩阵  $\mathbf{A}$  进行特征值分解

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Psi} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Psi}^{-1} \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_i) \in C^{n \times n}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。  $\lambda_i$  为离散时间系统的特征值;  $\mathbf{\Psi}$  为系统的特征向量矩阵,  $\mathbf{\Psi} \in C^{n \times n}$ 。

(2) 计算结构振动频率  $\omega$  及模态阻尼比  $\xi$

根据离散时间系统与连续时间系统的特征值的关系

$$\lambda_i^c = \frac{\ln \lambda_i}{\Delta t} \quad (14)$$

和模型特征值  $\lambda_i^*$  与系统固有振动频率  $\omega$  及模态阻尼比  $\xi$  的关系

$$\lambda_i^* = -\xi_i \omega_i \pm j \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (15)$$

可计算得系统固有振动频率  $\omega$  及模态阻尼比  $\xi$ 。

(3) 计算结构模态振型  $\Phi$

$$\Phi = \mathbf{C} \mathbf{\Psi} \quad (16)$$

## 2 稳定图方法

稳定图方法<sup>[6]</sup>的基本思路如图 1 所示。

稳定图的做法: 依次假定系统的阶次为从  $n_{\min}$  到  $n_{\max}$ 。由于系统的特征值具有两两共轭的特点, 所以阶次必须是偶数, 从而得到  $(n_{\max} - n_{\min})/2 + 1$  个结果, 然后把所计算的结果画到二维坐标图中(坐标图的横坐标为频率值, 纵坐标为阶次), 便可得到稳定图, 此图中若两相邻点的频率和阻尼在容许误

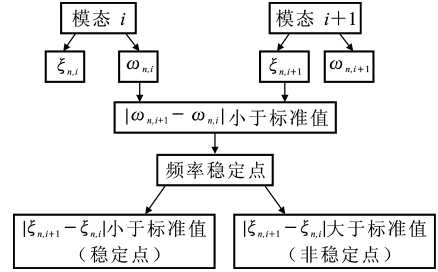


图 1 稳定图方法的原理

Fig. 1 Principle of Stabilization Diagram Method

差范围内, 则认为是相同的, 最后得到各阶模态参数。稳定图方法也存在缺点, 即容易出现虚假模态, 这些虚假模态不是系统本身的特性, 对系统的影响很小, 其主要是因为噪声的影响产生的, 可称之为噪声模态。如何剔除噪声模态是获取稳定图方法的重点。

为了得到比较精确的识别结果, 对稳定图进行改进, 先建立几个矩阵: 频率矩阵、阻尼矩阵、振型矩阵。

频率矩阵的行数为假设的阶次数:  $(n_{\max} - n_{\min})/2 + 1$ 。列数为以下两个值的最小者: ①  $0.5 F_s / f_g$ ; ② 所要识别的系统的频率最大值除以  $f_g$ 。其中  $F_s$  为采样频率;  $f_g$  为频率分辨率, 它为下面两值的最大值: ① 每个假设的阶次算出的频率结果中, 两相邻频率差值的最小者; ② 预先设定的一个分辨率。然后把所有的计算频率放到频率矩阵相应的位置, 最后得到完整的频率矩阵, 该矩阵为一稀疏矩阵。阻尼矩阵、振型矩阵为相应的位置放入相应的计算结果。

根据频率矩阵、阻尼矩阵确定各阶的频率、阻尼, 频率、阻尼为矩阵各列的平均值。振型的判断用模态置信因子  $I_{\text{MAC}}$ , 其平均值最接近 1 的振型即为该阶振型

$$I_{\text{MAC}}(\phi_r, \phi_s) = \frac{|\phi_r^T, \phi_s|^2}{(\phi_r^T, \phi_r)(\phi_s^T, \phi_s)} \quad (17)$$

如果  $\phi_r$  和  $\phi_s$  是同一振型的估计, 那么  $I_{\text{MAC}}$  应接近 1; 否则  $I_{\text{MAC}}$  应很低。

判定各点稳定状况的依据为: ① 频率与平均频率的偏差; ② 阻尼与平均阻尼的偏差; ③  $I_{\text{MAC}}$  与 1 的偏离值。与预先设定的偏差值进行比较, 比预先设定值小的即为稳定点, 否则为非稳定点。

实际应用中发现, 阻尼比的偏差值要达到 40% 以上, 如果预先设定阻尼比的容许误差低于 10%, 则大多数点都不是稳定点。这是因为目前人们对阻尼的认识还不够彻底, 还存在很多模糊的地方, 在计算和理论分析时, 只是采用了几种假定的阻尼形式。

为此,笔者建议在稳定图中将阻尼比的判定取消,这样不仅对识别结果的负面影响不大,而且还可以减少计算量。

原来的稳定图中没有提到振型,这是不合理的。有时从频率上看是 1 阶振型,但从振型上看可能不是,通过采用  $I_{MAC}$  来对振型进行判定,可以消除虚假的振型。

3 算例分析

该钢管拱桥是位于中国西部某一级公路上的一座连线桥,桥型为中承式钢管混凝土系杆拱桥,净跨 90 m,矢跨比 1/5,拱轴线为悬链线,拱轴系数  $m=1.167$ ;桥面净跨宽 21.6 m,双向 4 车道,由吊杆吊在桥面以上 5.5 m 处。主拱圈由 4 根  $\Phi 650\times 10$  钢管组成, $\Phi 400\times 8$  上下平联和  $\Phi 250\times 8$  的直腹杆和斜腹杆组成高 3 m、宽 1.5 m 的桁式主拱肋,锚固在拱脚处;钢管内灌筑 C50 混凝土;吊杆采用 127 $\Phi$ 5 高强碳素钢丝,全桥共 16 对吊杆,横梁采用 C40 钢筋混凝土变截面工字梁,横梁间距 5 m,桥面现浇 250 mm 厚 C30 混凝土,水平系杆选用  $\Phi 5$  高强钢丝束;桥面设 3 道横撑,以增强桥的整体性和稳定性。该桥振动特性测试采用环境随机振动方法,通过测量大桥主梁的环境振动响应,识别大桥固有振动特性,包括结构前若干阶振动的频率、振型和阻尼比。识别方法采用了两种:一种是随机子空间识别方法,另一种是峰值法(PP 法)。测点布置如图 2 所示,每个位置布置 1 个竖向测点,测取主梁竖向加速度响应,测试结果见表 1。

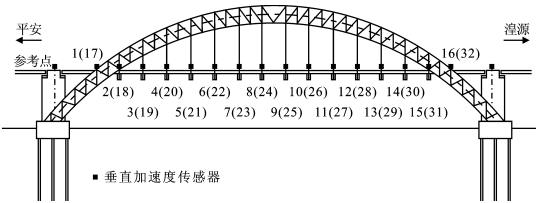


图 2 振动特性试验测点布置  
Fig. 2 Testing Points Arrangement of Vibration Characteristics

由表 1 可见,通过将随机子空间方法的实测值与理论值、比较成熟的峰值法的识别结果相比较,可以认为随机子空间方法可以比较精确地识别出拱桥的频率,从图 3~5 中可以看出,识别的振型比较真实(图 4、5 中纵坐标  $s$  为相对位移),因此该方法不失为一个行之有效的识别结构模态参数的方法。

表 1 动力特性参数

Tab. 1 Dynamic Characteristic Parameters

| 阶次 | 振动频率/Hz |         |          | 随机子空间实测阻尼比/% | 模态    |
|----|---------|---------|----------|--------------|-------|
|    | 理论值     | PP 法实测值 | 随机子空间实测值 |              |       |
| 1  | 1.966   | 2.012   | 1.988 0  | 0.744        | 1 阶竖向 |
| 2  | 2.638   | 2.519   | 2.667 4  | 1.240        | 2 阶竖向 |
| 3  | 2.784   | 2.812   | 2.856 8  | 2.440        | 1 阶扭转 |
| 4  | 3.501   | 3.457   | 3.471 7  | 0.374        | 3 阶竖向 |
| 5  | 4.106   | 3.926   | 4.026 4  | 3.500        | 2 阶扭转 |
| 6  | 4.512   | 4.628   | 4.597 2  | 0.850        | 4 阶竖向 |
| 7  | 6.107   | 5.390   | 6.166 9  | 0.640        | 3 阶扭转 |

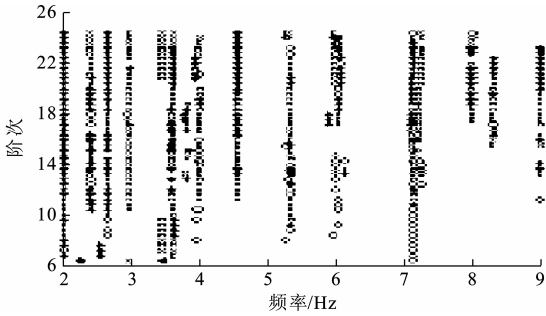


图 3 稳定图  
Fig. 3 Stabilization Diagram

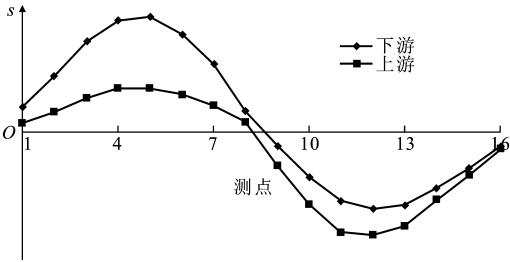


图 4 1 阶竖向弯模态振型 ( $f=1.988\text{ Hz}$ )  
Fig. 4 The 1st Vertical Bending Modal Vibration Shape( $f=1.988\text{ Hz}$ )

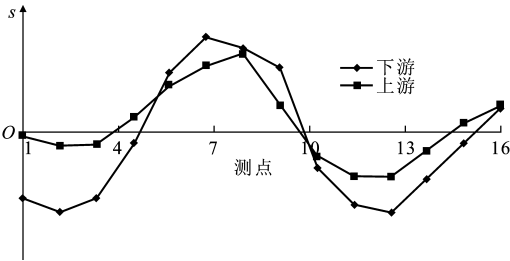


图 5 2 阶竖向弯模态振型 ( $f=2.667\text{ Hz}$ )  
Fig. 5 The 2nd Vertical Bending Modal Vibration Shape( $f=2.667\text{ Hz}$ )

4 结 语

介绍了随机子空间识别方法和稳定图相结合进

行桥梁结构的模态参数的识别方法,并用该方法对一钢管混凝土拱桥进行了识别,得到了比较理想的结果。

该方法也有一定的局限性。由于该方法应用的前提是环境激励为白噪声,与实际情况并不相符,导致识别的结果与实际结构有一定的偏差;同时,实际识别证明,阻尼比在影响识别结果。从稳定图中可以看出,大多数点都满足频率和振型的稳定,而阻尼稳定的情况较少。笔者认为,阻尼本来就是一个还没有研究彻底的物理量,只是根据假设的理论进行识别的,所以结果不理想,建议在稳定图中将阻尼比的限制取消。该方法不失为一种识别结构模态参数的有效方法,具有一定的应用前景。

### 参考文献:

### References:

- [1] PEETERS B,DEROECK G. Reference-based Stochastic Subspace Identification for Output-only Modal Analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999,13(6):855-878.

(上接第 20 页)

量和施工安全。另外,设计人员应根据构件实际烧伤状况随时调整和改进行加固设计构造细节,保证加固质量。

(3)商业大楼加固完毕后,进行了加固后检测,检测结果表明,加固的各项指标均满足设计要求,达到了预期的加固效果。

### 参考文献:

### References:

- [1] 霍 然,胡 源. 建筑火灾安全工程导论[M]. 北京:中国科学技术大学出版社,1999.
- HUO Ran, HU Yuan. Introduction of Safe Engineering for Building Fire[M]. Beijing: University of Science and Technology of China Press,1999.
- [2] 靳 飞,李国强. 全盛期室内火灾参数化模型的参数随机性[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(4):44-48.
- JIN Fei, LI Guo-qiang. Parameters Randomness of Parametric Model of Fully-developed Compartment Fire [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006,23(4):44-48.
- [3] 申爱琴,朱建辉,王晓飞,等. 聚合物改性超细水泥修补混凝土结构物微裂缝的性能及机理[J]. 中国公路学报,2006,19(4):46-51.

- [2] PEETERS B,DEROECK G. Reference-based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering[J]. Inverse Problems in Engineering,2000,8(1):47-74.
- [3] VANOVERSCHEE P,DEMOOR B. Subspace Identification for Linear Systems: Theory-implementation-applications[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,1996.
- [4] 傅志方. 振动模态分析与参数识别[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- FU Zhi-fang. Vibration Modal Analysis and Parameter Identification[M]. Beijing: China Machine Press,1990.
- [5] WARD H,STEFAN L,PAUL S. Modal Analysis Theory and Testing[M]. Leuven: KUL Press,1997.
- [6] CHANG J, ZHANG Q W, SUN L M. Application of Improved Stabilization Diagram in Modal Parameter Identification by Stochastic Subspace Identification [C]//ISHMII. Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. London: Taylor & Francis Group, 2005:863-868.

- SHEN Ai-qin, ZHU Jian-hui, WANG Xiao-fei, et al. Performance and Mechanism of Polymer Modified Superfine Cement for Microcrack Mending of Concrete Structure[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(4):46-51.
- [4] 陈拴发,郑木莲,王秉纲. 粉煤灰混凝土应力腐蚀特性试验研究[J]. 中国公路学报,2005,18(3):14-17.
- CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang. Experimental Research on Stress Corrosion Character of Fly-ash-cement Concrete[J]. China Journal of Highway and Transport,2005,18(3):14-17.
- [5] 张小云. 某厂房火灾事故后结构鉴定与加固设计[J]. 山东建筑工程学院学报,1997,12(2):25-29.
- ZHANG Xiao-yun. Inspection and Design for Reinforce of Factory After Fire[J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering,1997,12(2):25-29.
- [6] 万墨林,韩继云. 混凝土结构加固技术[M]. 北京:中国建筑业出版社,1995.
- WAN Mo-lin, HAN Ji-yun. Technology of Structure Reinforcement for Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,1995.
- [7] CCES 02—2004,自密实混凝土设计与施工指南[S].
- CCES 02—2004, Guide to Design and Construction of Self-compacting Concrete[S].