

# 斜拉桥传感器布置优化方法应用研究

彭卫<sup>1</sup>, 李凡<sup>1,2</sup>, 查支祥<sup>1</sup>

(1. 浙江大学宁波理工学院, 浙江宁波 315100; 2. 浙江工业大学建筑工程学院, 杭州 310014)

**摘要:**根据模态置信度准则,采用模拟退火算法,提取出斜拉桥有限元模型的动力分析数据,得到了主梁加速度传感器的优化布置方案,并根据此优化方案在实际桥梁上进行了现场动力特性测试实验。对比研究结果发现:由现场实验测得的自振频率、振型位移与 ANSYS 理论计算出的结果十分接近,从而验证了基于 MAC 准则的模拟退火算法在斜拉桥加速度传感器优化布置方面是有效的和可行的。

**关键词:**斜拉桥;模态置信度准则;模拟退火算法;传感器优化布置;Fisher 信息矩阵;现场动力测试

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S1-0013-06

## Application Study on Optimal Sensor Placement Technique of Cable-stayed Bridge

PENG Wei<sup>1</sup>, LI Fan<sup>1,2</sup>, ZHA Zhixiang<sup>1</sup>

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, P. R. China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, P. R. China)

**Abstract:**Based on the modal assurance criterion, using simulated annealing algorithm, the dynamic characteristic data of cable-stayed bridge are extracted, optimal acceleration sensor layout scheme of main beam is obtained. According to this optimization scheme, we carry out a dynamic characteristics test on one cable-stayed bridge. The results between test data and finite element modal calculation are very closely. Theory technique research and field modal test demonstrated that the simulated annealing algorithm based on modal assurance criterion is effective and viable for optimal acceleration sensors placement of cable-stayed bridge.

**Key words:**cable-stayed bridge; modal assurance criterion; simulated annealing algorithm; optimal sensor placement; Fisher information matrix; field dynamic test

在基于动力学特性指标的斜拉桥损伤识别研究中发现,在单元发生相同损伤的情况下,模态振型的变化率要比特征频率的变化率大<sup>[1]</sup>,并且模态曲率、柔度矩阵、模态应变能等损伤灵敏度较高的指标都是基于模态振型导出的,而结构的模态位移的是通过加速度传感器来拾取的,因此如何通过传感器的优化布置来准确提取结构的模态振型是用动力学指标进行斜拉桥损伤识别的关键和前提。近年来国内外学者提出很多加速度传感器优化布置方法,主要有有效独立法(EI法)<sup>[2-4]</sup>,平均模态动能法<sup>[5]</sup>,模态置信度矩阵(MAC)<sup>[6-8]</sup>等,但这些方法大多停留在有限元理论分析阶段,并没有在实际结构上用实桥测试结果加以验证。

本文以某斜拉桥现场动力测试实例为背景,通过现场实验数据与有限元分析数据的对比,分析实验数据与理论数据的误差,从而验证基于模态置信度准则、运用模拟退火算法进行传感器优化布置方法的有效性。

### 1 模态置信度准则

Canre<sup>[5]</sup>等认为模态置信度(Modal Assurance Criterion,

缩写为 MAC)矩阵是评价模态向量交角的一个很好的工具,因此,提出了 MAC 准则,以 M 矩阵非对角元素最小来优化布置测点。其公式表达如下:

$$MAC_{ij} = \frac{[\Phi_i^T \Phi_j]^2}{(\Phi_i^T \Phi_i)(\Phi_j^T \Phi_j)} \quad (1)$$

其中  $\Phi_i$  和  $\Phi_j$  分别为第  $i$  阶和第  $j$  阶模态向量,通过检查各模态在量测自由度上形成的向量 MAC 阵的非对角元,即可判断出相应两模态向量的交角状况,当 MAC 阵的某一元素  $M_{ij} (i \neq j)$  等于 1 时表明第  $i$  向量与第  $j$  向量交角为零,两向量不可分辨;而当 MAC 阵的某一元素  $M_{ij} (i \neq j)$  等于零时,则表明第  $i$  向量与第  $j$  向量相互正交,两向量可以轻易识别。Canre<sup>[5]</sup>等认为当非对角线元素低于 0.25 时,可以较轻易的识别两个向量。

### 2 模拟退火算法

模拟退火法是根据固体退火过程抽象出来的一种优化算法。其基本原理<sup>[9]</sup>为:根据“退火”过程中系统的能量服从 Boltzmann 概率分布  $P(E) = e^{-E/kT}$  ( $E$  为能量,  $k$  为 Boltzmann

常数,  $T$  为温度)这一原理, 将上面的 MAC 矩阵作为目标函数, 替换能量  $E$ , 在某一给定温度  $T$  的情况下对解的状态空间进行 Metropolis 抽样, 即当  $\Delta E < 0$  时,  $P(E) = 1$ , 完全接受优化解; 当  $\Delta E > 0$  以  $P(E) = e^{-\Delta E/KT}$  接受恶化解(其中  $\Delta E$  为前后两个解的代数差), 同时不断降低温度  $T$  使  $P(E) = e^{-\Delta E/KT}$  趋近于零, 直到目标函数满足收敛条件为止实现模拟退火过程。其实现传感器优化具体流程如下:

- (1) 随机产生一组初始解  $X_0$  ( $X_0$  为所布传感器位置) 和设定一个初使温度  $T_0$ ;
- (2) 运用 Metropolis 抽样, 并返回此时的  $X_0$ , 令  $X_i = X_0$ ;
- (3) 降低温度,  $T = T_i (T_{i+1} < T_i)$ ;

(4) 检查目标函数是否满足收敛条件, 满足则输出最优解, 不满足, 则转到第二步重新计算, 直到收敛。

### 3 有限元动力特性分析和传感器布设方案的优化

某斜拉桥主桥为两跨不对称独塔双索面斜拉桥, 跨径为 54.31 m + 72.42 m, 采用塔梁固接、塔墩分离的两跨连续梁结构体系。主梁为整体双箱式预应力混凝土箱梁结构, 塔架采用直柱门式框架, 为普通钢筋混凝土结构。结构布置情况如图 1 所示:

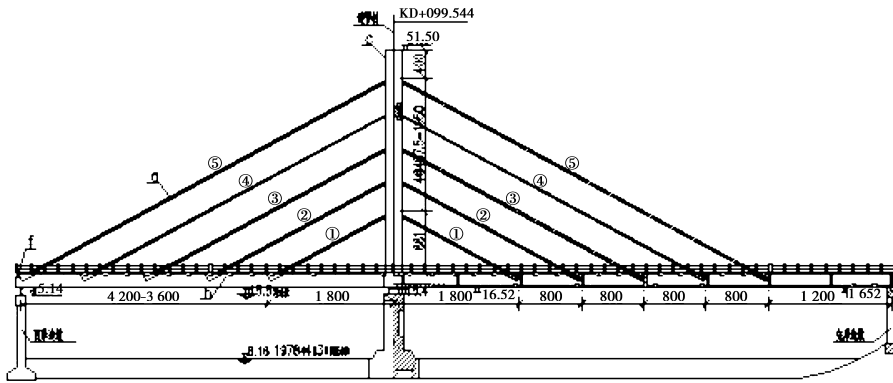


图 1 某拉桥桥型布置图

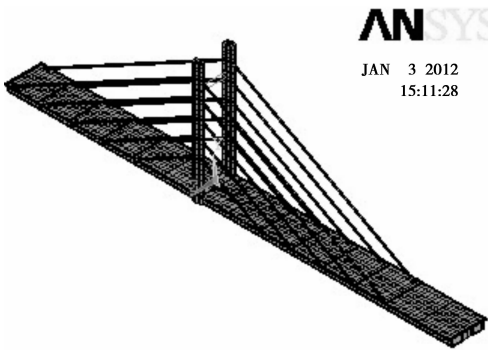


图 2 斜拉桥有限元模型

本文采用通用有限元软件 ANSYS 建立该斜拉桥数值分析模型, 其拉索部分采用只受拉的 LINK10 单元, 桥塔采用三维梁单元 BEAM44。为了更准确的得到主梁两侧的模态位移决定采用实体单元 SOLID65, 全桥总共采用 80 个杆单元, 64 个梁单元, 5 725 个实体单元, 共计 5 869 个单元。边界条件模拟为: 主梁两端和桥塔支座视为滑动铰支座, 将塔梁固处桥塔单元和此处主梁单元采用刚臂单元将连接起来模拟塔梁固接。经有限元分析得到了前 40 阶频率和振型。图 2 为全桥有限元模型, 图 3 给出了主梁竖向弯曲前三阶振型、横向弯曲前三阶振型以及扭转前三阶振型。

本文采用模拟退火算法, 基于模态置信度准则对主梁部分的加速度传感器进行优化布置, 其具体过程是: 将有限元分析得到的前 40 阶振型的竖向和横向位移提取出来, 然后将其分别代入到用 MATLAB 语言编写好的模拟退火法的计算程序中, 运行程序计算直到满足收敛条件, 最后输出优化后的传感器布设位置和 MAC 矩阵。如图 4 所示:

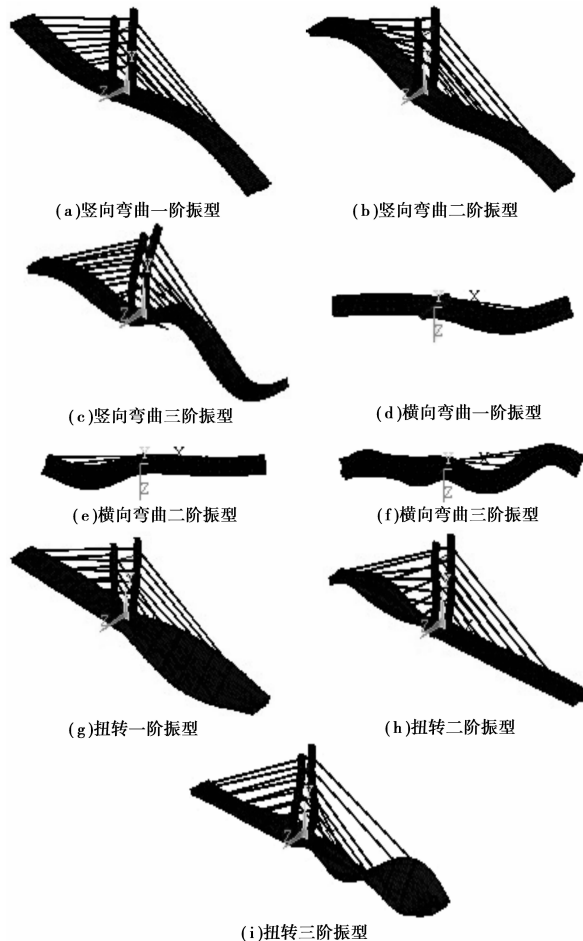


图 3 斜拉桥前三阶竖向弯曲、横向弯曲以及扭转振型图

从图 5 和 6 中的 MAC 值的分布情况可以看出,用模拟退火算法得到的传感器测点在非对角线位置的值远低于

0.25,基本接近为零。说明由该方法得出的加速度传感器布置方案能较好的识别各阶主振型。

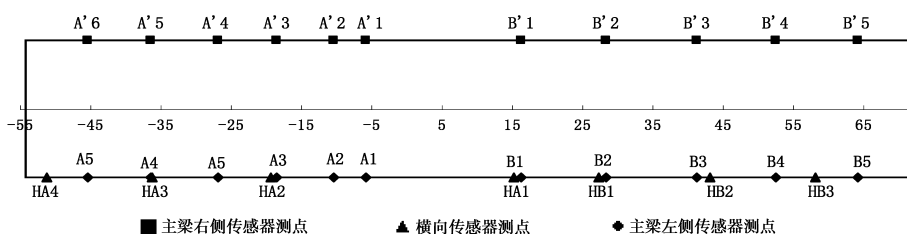


图 4 主梁加速度传感器测点优化后的布置图

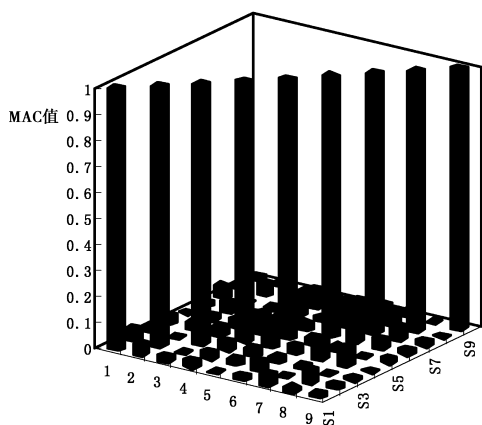


图 5 竖向测点的 MAC 直方图

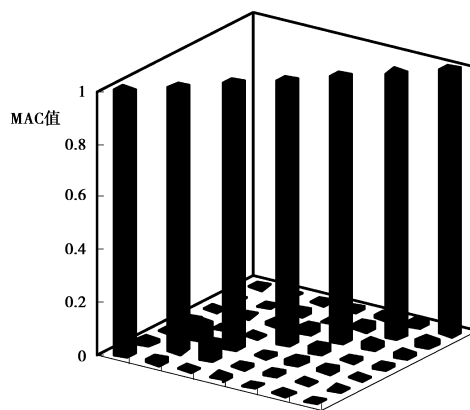


图 6 横向测点的 MAC 直方图

#### 4 现场动力实验和数据分析

本次实验在主梁上共设置了 29 个测点,其中竖向测点 22 个,横向 7 个,如图 4 所示。实验测试设备采用江苏东华 DHDAS5920 动态信号采集系统,DHMA 模态分析软件和 DH610 加速度传感器 16 个。由于测点较多,而 DHDAS5920 动态信号采集系统一次只能采集十六个测点的动态信号,因此将实验分为两组进行<sup>[10]</sup>,其中两组实验都包括测点  $A_1$ ,  $A'_1$  和  $HA_1$ 。按图 4 所示的测点位置布好传感器后,封闭交

通,等候激振车辆跳车开过桥面后开始记录。为避免频率混叠采用 25 Hz 低通滤波<sup>[11]</sup>,采样频率为 100 Hz,每个测点记录时间不少于 5 分钟。

将采集到的数据导入到 DHMA 模态分析软件中,经过去除均值和 FFT 转换得到各测点功率谱函数(如图 8 所示),拾取功率谱函数的峰值,经过参数识别计算得到各阶振型的频率和模态位移,对数据进行插值后可以输出各阶振型的变形图(图 10)。



图 7 现场测试照片

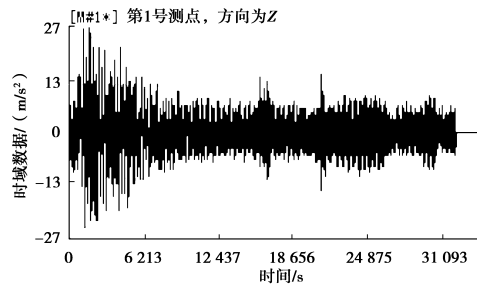


图 8 加速程时域数据

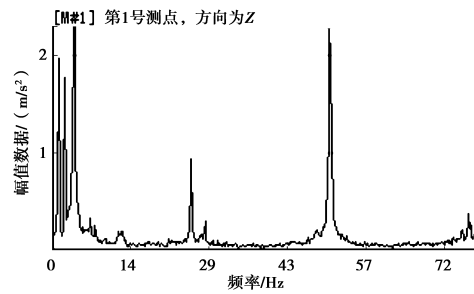


图 9 自功率谱

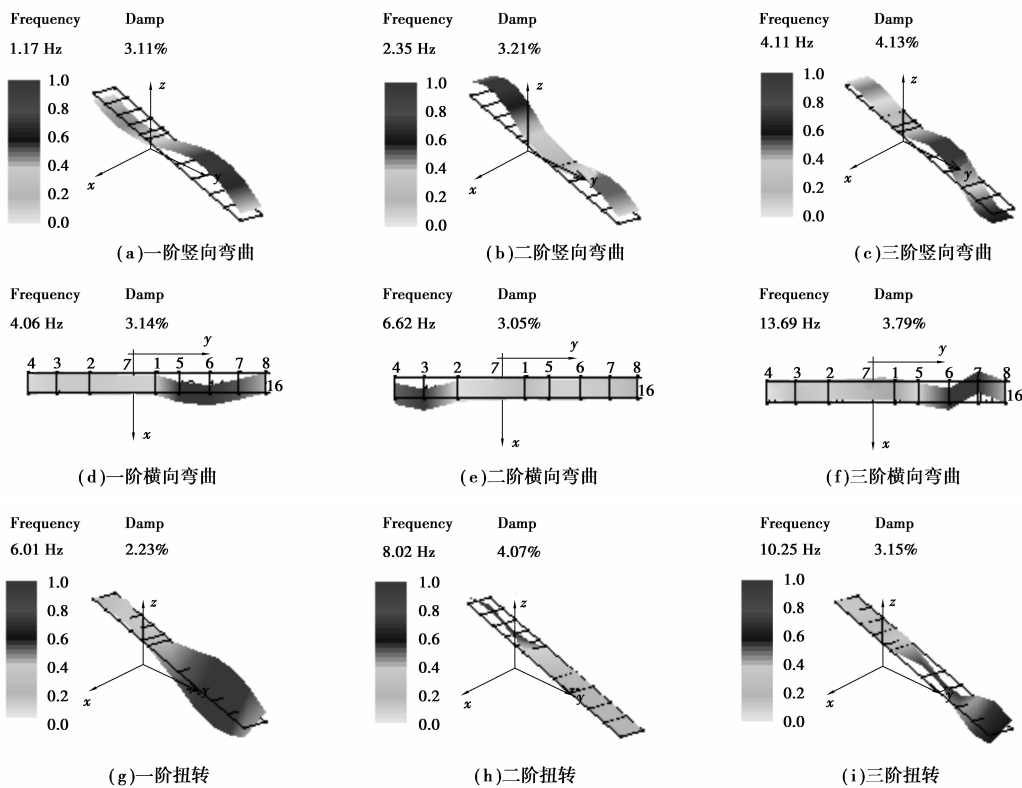


图 10 DHMA 模态分析软件生成的部分振型形状图

## 5 现场实验结果与有限元分析结果的比较

提取出来,与 ANSYS 有限元分析计算出的结果相比较,得到的对比结果如表 1 和图 11—图 13 所示:

将 DHMA 模态分析软件中分析得到的频率和振型位移

表 1 DHMA 模态分析软件与 ANSYS 理论分析所得频率比较表

自振频率阶数	竖向弯曲振型频率			横向弯曲振型频率			扭转振型频率		
	理论值/Hz	实测值/Hz	误差/%	理论值/Hz	实测值/Hz	误差/%	理论值/Hz	实测值/Hz	误差/%
1	1.187 8	1.173	-1.48	4.0468	4.063	1.62	5.957	6.016	5.90
2	2.379 3	2.346	-3.33	6.5952	6.617	2.18	8.085	8.023	-6.15
3	4.140 8	4.106	-3.48	13.645			10.248	10.253	0.50
4	6.454 5	6.450	-0.45	19.039			13.066	13.102	3.60
5	8.815 0	8.794	-2.10	22.826			14.824	14.851	2.70
6	13.754 0	13.728	-2.60	31.149			16.348	16.304	-4.40
7	14.655 0	14.623	-3.20	32.783			22.083	22.073	-1.00
8	23.243 0	23.250	0.70				22.743	22.765	2.20

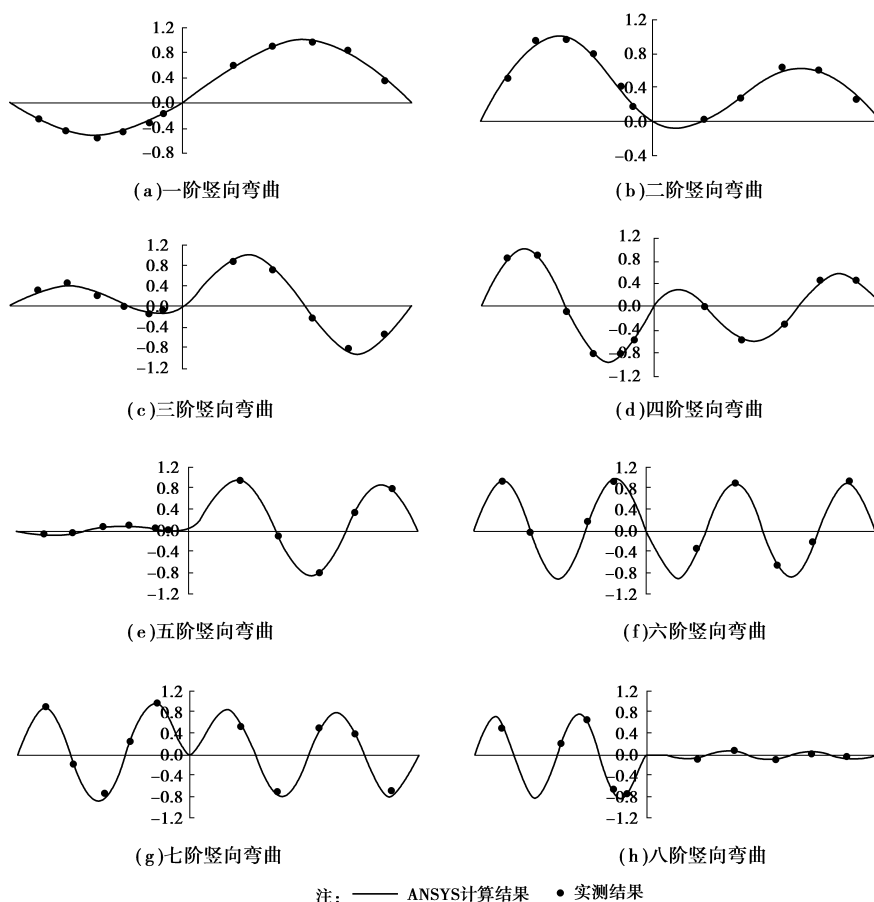


图 11 部分实测竖向弯曲模态位移与 ANSYS 计算结果比较图

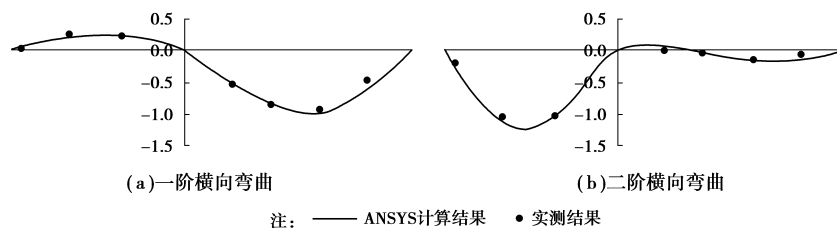


图 12 实测横向弯曲模态位移与 ANSYS 计算结果比较图

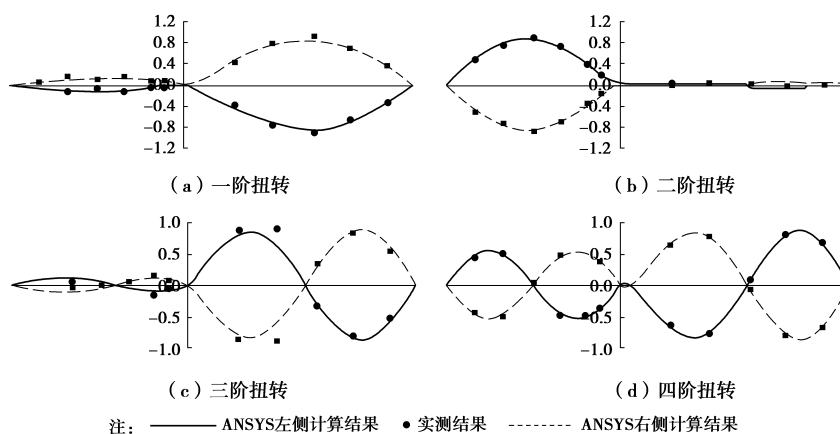


图 13 部分实测扭转模态位移与 ANSYS 计算结果比较图

从上表中可以看出,实测的结构自振频率和 ANSYS 计算所得的自振频率十分接近,平均误差在 3%左右,这面说明了该加速度传感器的布设方法能真实的反应结构动力特性。另外由于激振方法采用的是竖向跳车激振,对桥的横向没有充分的激振力,因此只测到横向前两阶的自振特性。

从上面竖向弯曲、横向弯曲以及扭转振型位移的实测结果与理论计算的结果比较可以看出,实测结果和理论计算结果十分接近,因此可以证明用基于 MAC 准则的模拟退火法所产生的传感器优化方案是有效的,它能精确的测出各阶振型的位移。

## 6 结 语

通过斜拉桥的现场动力测试实验实测结果与理论计算结果对比,发现该方案由现场实验测得的自振频率、振型位移与 ANSYS 理论计算出的结果十分接近,从而验证了基于 MAC 准则的模拟退火算法在斜拉桥加速度传感器优化布设方面是有效的,可行的。但针对损伤指标敏感性模式识别<sup>[12-15]</sup>的传感器优化布置还要进一步结合实桥开展研究。

### 参考文献:

- [1] Peng W, Zha Z. Sensitivity study on damage indexes of cable-stayed bridges[J]. *Advanced Materials Research*, 2011(243-249): 1573-1577.
- [2] Kammer D C. Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1991, 14(2):251-259.
- [3] Kammer D C. Effect of modal error on sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1992, 15(2): 334-341.
- [4] Kammer D C. Effect of noise on sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1992, 15(2): 341-352.
- [5] Canre T G, Dhammn C R A. Modal test design strategy for model correlation. In: Bathe, ed. *Proc 13th Intl Modal Analysis Conference* [C]. New York: Union College, Schenectady, 1995:927-933.
- [6] 袁爱民,戴航,孙大松. 基于 EI 及 MAC 混合算法的斜拉桥传感器优化布置[J]. *振动、测试与诊断*, 2009, 29(1): 55-59. YUAN Aimin, DAI Hang, SUN Dasong. Optimal sensor placement of cable-stayed bridge using mixed algorithm based on effective independence and modal assurance criterion methods [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*; 2009, 29(1): 55-59.
- [7] 刘斌,姚永丁,叶贵如. 斜拉桥传感器优化布点的研究[J]. *工程力学*, 2005(5):171-176. LIU Bin, YAO Yongding, YE Guiru. Study of optimal sensor placement for cable-stayed bridge[J]. *Engineering Mechanics*, 2005(5):171-176.
- [8] 崔飞,袁万城,史家钧. 传感器优化布设在桥梁健康监测中的应用[J]. *同济大学学报*, 1999, 27(2):165-169. CUI Fei, YUAN Wancheng, SHI Jiajun. Application of optimal sensor placement algorithms for health monitoring of bridges [J]. *Journal of Tongji University*, 1999, 27(2):165-169.
- [9] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.
- [10] 朱乐东,张之勇,张志成,等. 香港汲水门大桥的模式识别[J]. *振动工程学报*, 1999, 12(4): 506-521. ZHU Ledong, CHANG Paul Tseyung, CHANG Chihchen, et al. Modal identification of Kap Shui Mun Bridge in Hong Kong[J]. *Journal of vibration engineering*, 1999, 12(4): 506-521.
- [11] 张俊平. 桥梁检测[M]. 北京:人民交通出版社, 2002.
- [12] 张敏,谢慧才, Sim Sunghan, 等. 基于分布式传感网络的结构模态识别方法[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(3):106-110. ZHANG Min, XIE Huicai, Sung-Han SIM, et al. Modal identification technique based on distributed sensor networks[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(3):106-110.
- [13] 黄朝俊,贺瑞,秦权. 基于不完备损伤指标和遗传算法的特大桥损伤识别和传感器布点优化[J]. *工程力学*, 2008, 25(12): 92-97. HUANG Chaojun, HE Rui, QIN Quan. Damage detection and optimum sensor localization based on incomplete damage indexes and genetic algorithms for long-span bridges[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(12):92-97.
- [14] 吴子燕,何银,简晓红. 基于损伤敏感性分析的传感器优化配置研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(5):239-244. WU Ziyang, HE Yin, JIAN Xiaohong. Optimal sensor placement based on sensitivity analysis of structural damage[J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(5):239-244.
- [15] 孙小猛,冯新,周晶. 基于损伤可识别性的传感器优化布置方法[J]. *大连理工大学学报*, 2010, 50(2):264-270. SUN Xiaomeng, FENG Xin, ZHOU Jing. A method for optimum sensor placement based on damage identifiability[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2010, 50(2):264-270.

(编辑 罗 敏)