

结构健康监测系统中传感器优化布置组合算法¹⁾

路玲玲²⁾ 王 曦³⁾ 黄晨光⁴⁾

(中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100190)

摘要 在对结构健康监测中的传感器优化布置方法进行调研和总结的基础上, 针对薄板、壳结构开展传感器优化布置的研究. 提出了一种有效的传感器优化布置组合算法, 由模态动能法、模态保证准则、遗传算法组合而成. 该方法所得的传感器位置主要位于动态响应比较大区域, 有利于提高信噪比; 同时能够有效地保证模态振型的独立性, 可以较完整地获得结构模态信息. 针对这种组合算法的有效性采用简易机翼模型从数值计算和实验两方面进行了验证.

关键词 结构健康监测, 传感器优化布置, 遗传算法, 模态动能法, 模态保证准则

中图分类号: O327 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2012)01-080-06

COMBINATORIAL OPTIMAL ALGORITHM FOR SENSOR ARRANGEMENT IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM¹⁾

LU Lingling²⁾ WANG Xi³⁾ HUANG Chenguang⁴⁾

(Key Laboratory of Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In this paper, we present an effective optimization method of sensor arrangement for monitoring the dynamic response of thin flexible structures like plates and shells. The proposed method consists of genetic algorithm, modal kinetic energy and modal assurance criterion. A simplified wing structure is used to evaluate the effectiveness of the method. The numerical analysis and experimental results demonstrate that the proposed optimization algorithm can be used to determine effectively sensor arrangements. Firstly, the modal kinetic energy algorithm is used to catch the degree of freedom of the dynamic response of the structure with a large amplitude, and effectively improves the signal-noise ratio during the health monitoring. Secondly, the combination of genetic algorithm and modal assurance criterion can effectively ensure the independence of modal shapes, and provide more modal information of the structure, such as the modal frequency and the modal shape. The damage detection and the estimation of the residual life are more accurate and effective by using the proposed optimization method.

Key words structural health monitoring (SHM), optimal sensor locations (OSL), genetic algorithm, modal kinetic energy, modal assurance criterion

引 言

在航天技术领域, 为了控制能量成本和提高运行

精度, 大量使用轻质柔性结构, 如空间站太阳能电池帆板、大型空间机械臂等. 这些结构一般具有模态频率低、阻尼小和刚度低的特点, 在内部或者外

2011-07-06 收到第 1 稿, 2011-12-22 收到修改稿.

1) 中国科学院装备项目结构健康分析项目 (0741421YB1) 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KJJCX2-EW-L04) 资助.

2) 路玲玲, 硕士, 研究方向: 结构健康监测. E-mail: lulingling@imech.ac.cn

3) 王曦, 特聘副研究员, 博士, 从事泡沫金属材料、形状记忆合金等智能材料的力学特性研究. E-mail: xiwang@imech.ac.cn

4) 黄晨光, 研究员, 博士, 博导, 从事冲击动力学、激光与物质的相互作用, 结构动力学等研究. E-mail: huangchenguang@imech.ac.cn

部扰动下，其振动不仅幅度大，而且持续时间长^[1]。这种激励诱导的振动若长期作用必然会引起结构的内部损伤。结构出现损伤的一个直接结果就是刚度发生折减，这会直接引起结构的频率和振型等结构动力学响应特征发生改变，从而影响结构的性能。

工程上一般采用埋设传感器的方法来监控结构的响应并对结构损伤进行诊断。传感器的布置方案和所采用的健康监测方法密切相关。动力指纹分析方法、模态修正方法、以及神经网络方法等全局损伤诊断方法，都需要充分了解结构的固有频率和模态等信息，这就需要安装较多数量的传感器来采集结构的振动信号。但由于经济成本、环境要求以及结构空间的限制，不可能在结构的所有自由度上安置传感器，因此传感器优化布置就变得非常重要。

Meo 等^[2]以结构信息最大化作为优化目标，采用 6 种传感器优化布置准则，优化桥梁模型的传感器位置，并比较各种优化准则的优劣。Leehter 和 Yao^[3]提出了一种强制变异方法用于改进遗传算法，使得传感器位置更加优化。Kumar 和 Narayanan^[4]以悬臂梁为研究对象，基于线性二次型调节器 (LQR) 方法对压电陶瓷传感 / 激励器组合进行传感器优化布置，并通过多种指标验证这种布置方法对结构振动控制的有效性。但综合看来，针对传感器优化布置的研究大部分集中于对优化算法、优化准则的改进，

整体考虑优化算法与优化准则相结合的优化布置方法还比较少。

本文的主要目的是试图提出一种合理的、通用性强、适用范围广的传感器优化布置方法，以得到较好的频率信息和结构振型等动力学特性，为结构损伤识别和寿命评估提供有效参考。

1 组合优化布置算法

传感器优化布置方法由优化方法和优化算法两者组合而成。常用的优化方法如引言所介绍，优化算法主要包括序列类 (逐步积累法和逐步消去法)、随机类方法 (模拟退火法和遗传算法^[5])、非线性优化规划方法、推断算法等。

在实际的传感器布设中，面临一些实际问题。首先，由于结构的损伤会引起其振动信息变化，因此，获得全面、完整的结构振动信息是损伤识别的必要前提条件；其次，随着经济发展，环境噪声越来越严重，把传感器放置在动态响应大的自由度上可以有效地提高信噪比；最后，有些结构由于环境、结构空间等条件的限制，在某些局部区域不能够布置传感器。针对上述 3 个问题，最终确定了一种有效的传感器优化布置方法，即基于遗传算法、模态动能法、模态保证准则的组合算法，其基本原理如图 1。

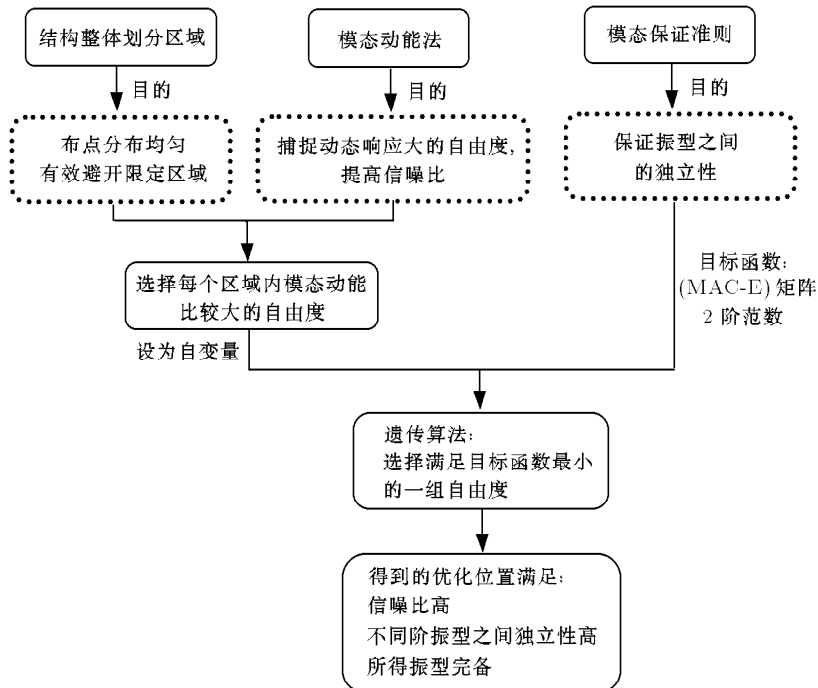


图 1 原理图

为验证这种优化布置方法的有效性和适用性, 选用简易机翼缩比模型进行分析. 在数值计算时, 采用机翼缩比模型. 通过有限元分析, 得到频率、振型、模态矩阵、刚度矩阵等结构信息. 通过结构振动信息与优化算法结合, 得到简易机翼模型的传感器的优化位置. 通过优化位置描述的结构振型与原结构振型对比以及一些量化参数, 来评估这种优化方式的有效性.

1.1 有限元模型与结构分析结果

简易机翼模型的尺寸如图 2 所示, 板厚度为 6 mm, 模型采用铝合金材料. 有限元计算利用 ANSYS 软件来完成. 计算中采用 Shell63 单元, 铝合金材料的弹性模量为 65 GPa, 泊松比为 0.33, 密度为 2800 kg/m³, 边界条件为左端固支, 右端自由.

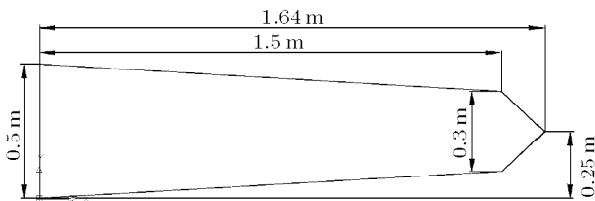


图 2 翼板模型

有限元分析得到结构振动前 4 阶频率信息如表 1 所示. 在下面的数值计算和实验中, 由于扭转振型描述的局限性, 主要采用弯曲振型探索优化算法的正确性和有效性.

表 1 简易翼板模型前 4 阶振动频率信息

阶数	频率 / Hz	振型形式
1	2.2622	1 阶弯曲
2	12.610	2 阶弯曲
3	19.378	1 阶扭转
4	34.124	3 阶弯曲

通过观察结构前 3 阶弯曲振型, 确定至少需要 5 个传感器才能捕捉结构的前 3 阶弯曲振型. 在优化布置数值计算中, 分别选择 5 和 7 个传感器的情况进行分析.

1.2 数值计算分析

这种基于遗传算法、模态动能法 (MKE)、模态保证准则 (MAC 准则) 的优化方法, 通过 3 步实现, 以 5 个传感器为例.

首先, 把整个结构沿薄板延伸方向划分成 5 个区域. 划分区域时, 观察结构前 3 阶弯曲振型, 使某些区域包含某阶振型的峰值.

其次, 在每个区域内选择 60 个模态动能较大的自由度作为遗传算法可行解的搜索空间. 第 i 自由度第 k 阶模态相对应的模态动能 E_{ik} 为

$$E_{ik} = \Phi_{ik} \sum_j M_{ij} \Phi_{jk} \quad (1)$$

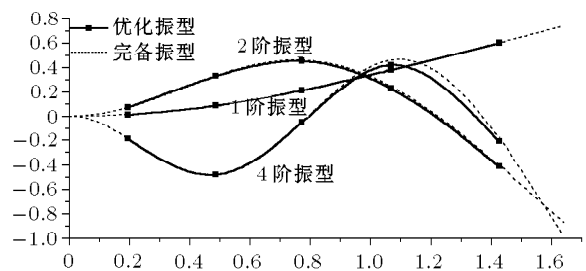
其中, Φ_{ik} 是第 k 阶模态在第 i 自由度上的分量, M_{ij} 是质量阵中的相应元素, Φ_{jk} 是第 k 阶模态在第 j 自由度上的分量. 每个自由度按照其 1,2,4 阶的模态动能之和进行从大到小的排序, 在每个区域内模态动能之和最大的 60 个自由度作为候选.

最后, 通过遗传算法与 MAC 准则的有效结合, 在候选自由度中确定最终的 5 个自由度, 即传感器布置的位置. MAC 准则^[8]用来保证各阶模态向量保持较大的空间夹角, 其计算公式为

$$C_{ij} = \frac{\Phi_i^T \Phi_j}{\sqrt{(\Phi_i^T \Phi_i)(\Phi_j^T \Phi_j)}} \quad (2)$$

其中, Φ_i 和 Φ_j 分别为第 i 阶和第 j 阶模态向量. 在与遗传算法相结合时, 以 (MAC-E) 的 2 阶范数作为遗传算法的目标函数, 以候选的自由度作为遗传算法搜索域, 所选的 5 个自由度使得目标函数越小越好, 经过代代遗传后得到最优结果.

图 3(a) 和图 3(b) 分别是 5 和 7 个自由度描述的振型与完整振型的对比图. 单从振型上看, 5 和 7 个自由度都能较好描述结构振型, 同时对于动态响应大的自由度捕捉很好. 通过数值计算得到, 5 个自由度的 MAC 矩阵最大非对角元为 0.0555, 7 个自由度 MAC 矩阵最大非对角元为 0.1264, 也都满足要求.



(a)

图 3 MKE, MAC 和遗传算法的振型图

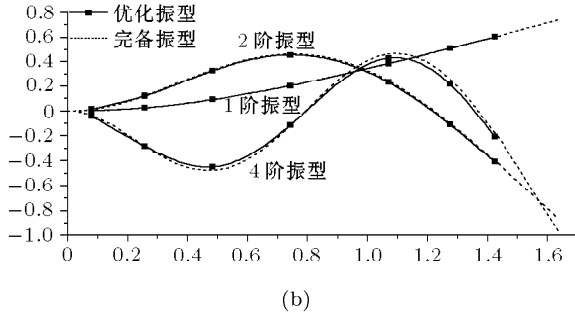


图 3 MKE, MAC 和遗传算法的振型图 (续)

1.3 讨论

结构健康监测技术发展到现在,为了解决传感器优化布置问题,已经发展了很多方法.其中,李娟和黄维平 [6] 采用了一种基于 QR 分解、MAC 准则、序列法的组合方法对海洋平台进行传感器的优化布置,刘宇等 [7] 采用遗传算法与 MAC 准则直接结合的方法对斜拉桥进行传感器的优化布置.以 7 个自由度为例,将上述两种方法与翼板模型结合,优化传感器位置,并与本文的优化方法进行比较.

1.3.1 QR 分解 /MAC/ 序列法组合

由 QR 分解基本原理知道, QR 分解所得的自由度数量与待识别的模式数量一致,因此 QR 分解常用于传感器优化的初始选择.首先,通过 QR 分解选择初始的少数自由度,并计算相应的 MAC 矩阵.其次,通过逐步积累法,增加一个自由度,重新计算 MAC 矩阵,找到使得 MAC 矩阵最大非对角元减小最快的自由度.最后,重复上述步骤,直到达到自己所期望的传感器数量.

在这里,通过 QR 分解选择初始的 4 个自由度,通过 MAC 准则再选择 3 个自由度,其所描述的结构 1,2,4 阶振型如图 4 所示,黑圈位置表示初选的位置.

通过数值计算, MAC 矩阵最大非对角元达到 0.323 1,是不满足要求的.同时,由图 4 可知,QR 分解方法选择的初始位置不是很好,而序列法选择

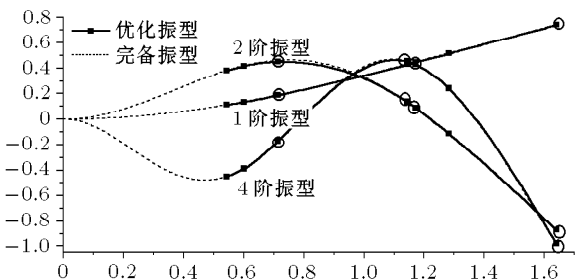


图 4 QR, MAC 和序列法的振型图

传感器优化位置时很依赖于初始选择的位置,但通过 QR 分解方法选择的初始选择位置的可靠性很难保证,因此在作者看来序列法在传感器优化布置的应用中有较大的限制.

1.3.2 遗传算法 /MAC 准则组合

该方法通过将结构划分为 7 个区间,然后采用遗传算法在区间内搜索使得 (MAC-E) 二阶范数最小的自由度组合,所得振型结果如图 5 所示.

MAC 矩阵中最大非对角元只有 0.011 1,完全符合要求.但是通过图 5 可以看出,这种方法无法有效地捕捉动态响应大的自由度,在一定程度上限制了振型描述的完整性.

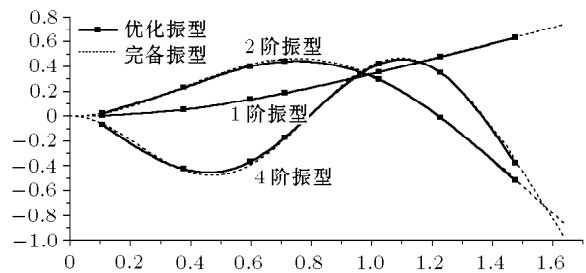


图 5 MAC 和遗传算法的振型图

1.4 3 种方法对比

为了更好地对比 3 种方法的优劣,定义两个参数 δ_1, δ_2 来量化分析这 3 种方法的差异.

第 1 个参数定义 δ_1 为

$$\delta_1 = \sum_m [(Z_{1m} - Y_{1m})^2 + (Z_{2m} - Y_{2m})^2 + (Z_{3m} - Y_{3m})^2]^{1/2} \quad (3)$$

其中, Z_i 是由整体翼板有限元计算结果通过 3 次样条函数拟合得到的翼板结构第 i 阶振型; Y_i 是由 7 个测点位置处的有限元计算结果通过 3 次样条函数拟合得到的翼板结构第 i 阶振型;在整个翼板区间 $[0, 1.64]$ 采用 0.02 的空间步长,即 $m = 83$. δ_1 反映了 7 个测点所描述的结构振型的完整性,其数值越小表明通过离散测点得到的结构振型越接近完整的结构振型.

第 2 个参数 δ_2 定义为

$$\delta_2 = \frac{|x_1 - X_a|}{x_1} + \frac{|x_2 - X_b|}{x_2} + \frac{|x_3 - X_c|}{x_3} \quad (4)$$

其中, x_1, x_2 和 x_3 分别是翼板结构第 2 阶振型和第 4 阶振型峰值所在的位置 (有限元计算得 $x_1 = 0.7429, x_2 = 0.4860, x_3 = 1.0857$); X_a, X_b, X_c 分别是 7 个

测点中离这些峰值点最接近的测点的位置。 δ_2 反映了优化结果对动态响应大的自由度的捕捉能力， δ_2 越小表明捕捉能力越强。

3种优化方法所对应的 δ_1 和 δ_2 结果如表2所示。通过表2，可以看出MAC, GA方法和MKE, MAC, GA在振型描述差别不大，但是对峰值的捕捉，MAC, GA要比MKE, MAC, GA差很多，进一步验证了1.3.2中的结论。

表2 δ_1 和 δ_2 的结果

方法	δ_1	δ_2
模态动能法, 模态保证准则, 遗传算法	2.1911	0.0211
QR分解, 模态保证准则, 序列法	29.4637	0.2104
模态保证准则, 遗传算法	2.7840	0.3277

通过3种方法对比，可以看出该方法的优点：

- (1) 能够捕捉到动态响应大的自由度，有效提高信噪比，适用于环境噪声较大的结构。
- (2) 保证了振型之间的独立性。
- (3) 布点分布较均匀全面，便于捕捉结构的完整振型；能够有效的避开结构受限制的区域。

2 实验验证

2.1 实验

实验中，采用简易机翼缩比模型，机翼材料采用LY-12铝，左端通过9排螺栓固定，按照组合算法得到的布点位置把传感器布置在机翼中轴上。实验中，通过力锤敲击激发结构振动，利用DASP模态分析软件对所得到的结构振动和激励信号分析处理，得到结构的振型信息，其实验过程如图6。

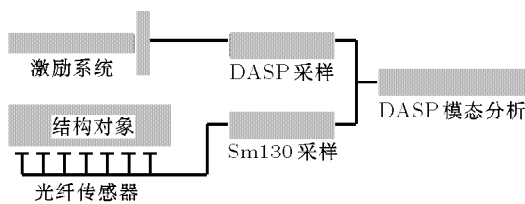


图6 实验过程

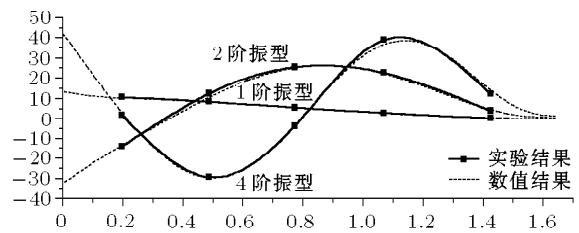
2.2 实验验证结果

采用5个和7个测点的两组实验所测量的频率结果如表3所示，两组实验所得频率和有限元数值计算结果对比，误差都在5%以内。图7(a),7(b)是两组实验所得到的结构振型与完整振型的对比图，从图7可以看出，两组传感器布置方案都可以很好的描述出结构振型，7个自由度时的结果更加完善。通过实验，进一步证明这种组后优化算法可以有效地描述结构振动信息。

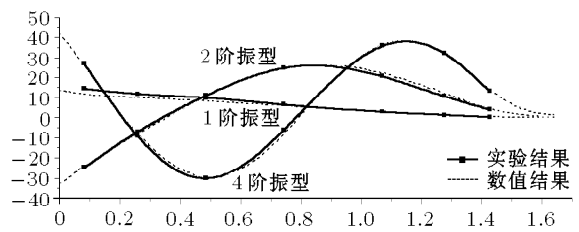
表3 实验与数值频率结果对比

5个自由度	实验结果 /Hz	数值结果 /Hz	频率误差 /%
1	2.267	2.262	-0.21
2	12.410	12.610	1.58
4	32.999	34.124	3.30

7个自由度	实验结果 /Hz	数值结果 /Hz	频率误差 /%
1	2.267	2.262	-0.21
2	12.423	12.610	1.48
4	32.989	34.124	3.33



(a)



(b)

图7 实验与数值振型结果对比

3 结论

在对翼板模型的传感器优化布置研究中，我们通过分析多种方法对结构振型描述的不足，最终找到一种综合性能最优的优化布置方案，即形成一种基于遗传算法、模态动能法、模态保证准则的组合优化算法。在数值计算方面，通过与QR分解、MAC和序列法，遗传算法和模态动能法的对比，我们可以发现这种组合算法可以很好地描述出结构振型。最后，通过实验也验证了这种组合算法的有效性和适用性。

参考文献

1 Qiu ZC, Wu HX, Ye CD. Acceleration sensors based modal identification and active vibration control of flexible smart cantilever plate. *Aerospace Science and Technology*, 2009, 13: 277-290

参 考 文 献

- 1 李银山. Maple 材料力学. 北京: 机械工业出版社, 2009
- 2 Manning RS, Hoffman KA. Stability of n-covered circles for an elastic rod with planar intrinsic curvature. *Journal of Elasticity*, 2001, 62(1): 1-23
- 3 刘延柱. 弹性杆基因模型的力学问题. 力学与实践, 2003, 25(1): 1-5 (Liu Yanzhu. Mechanical problems on elastic rod model of DNA. *Mechanics in Engineering*, 2003, 25(1): 1-5(in Chinese))
- 4 王晓艳, 苏飞, 张铮. 弹性杆的大变形分析及全国数模大赛题的解答. 力学与实践, 2010, 32(6): 94-95 (Wang Xiaoyan, Su Fei, Zhang Zheng. Analysis of large deflections of buckled bars and the solution to the 2010 mathematical modeling contest of China. *Mechanics in Engineering*, 2010, 32(6): 94-95(in Chinese))
- 5 刘鸿文. 高等材料力学. 北京: 高等教育出版社, 1985

(责任编辑: 张 静)

附录: 细长柔韧压杆弹性失稳后计算机仿真的 Maple 程序

```

> restart:
> with(plots):
> with(student):
> a:=130.7099107:
> alpha:=a*Pi/180:
> p:=sin(alpha/2):
> phi:=arcsin(1/p*sin(theta/2)):
> z:=sin(phi):
> K:=EllipticK(p):
> KK:=EllipticF(z,p):
> E:=EllipticE(p):
> EE:=EllipticE(z,p):
> u:=1/K*(2*EE-KK):
> v:=2*p/K*(1-cos(phi)):
> plot([v,u,theta=-alpha..alpha]);
> for j from 0 to 13 do
> U[j]:=evalf(subs(theta=j*Pi/18,u),4):
> V[j]:=evalf(subs(theta=j*Pi/18,v),4):
> od;
# 清零.
# 加载绘图库.
# 加载学生库.
# 挠曲线封闭时自由端转角  $\alpha$ .
#  $\alpha$  弧度值.
#  $p = \sin \alpha/2$ .
#  $\varphi = \arcsin\left(\frac{1}{p} \sin \frac{\theta}{2}\right)$ .
#  $z = \sin \varphi$ .
# 第一类完全椭圆积分.
# 第一类椭圆积分.
# 第二类完全椭圆积分.
# 第二类椭圆积分.
# 轴向位移.
# 挠度.
# 失稳后挠曲线绘图.
# 循环开始.
# 轴向位移值.
# 挠度值.
# 循环结束.

```

~~~~~  
(上接第 84 页)

- 2 Meo M, Zumpano G. On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure. 2005, 27: 1488-1497
- 3 Yao L, Sethares WA. Sensor placement for on-orbit modal identification via a genetic algorithm. *AIAA Journal*, 1993, 31(10): 1922-1241
- 4 Kumar KR, Narayanan S. Active vibration control of beams with optimal placement of piezoelectric sensor/actuator pairs. *Smart Mater Struct*, 2008, 17: 1-15
- 5 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用. 西安电子科技大学, 2005 (Lei Yingjie, Zhang Shanwen. Matlab genetic algorithm toolbox and the applications. Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2005(in Chinese))
- 6 刘娟, 黄维平. 模态试验中传感器优化配置的逐步消减法. 海洋工程, 2004, 22(1): 32-45 (Liu Juan, Hang Weiping. The gradual reduction method of optimal sensor locations in the modal test. *China Ocean Engineering*, 2004, 22(1): 32-45(in Chinese))
- 7 刘宇, 毕丹, 李兆霞. 大跨斜拉桥基于遗传算法的传感器优化布置方法. 东南大学学报, 2009, 39(4): 825-829 (Liu Yu, Bi Dan, Li Zhaoxia. Optimal sensor locations for span cable-stayed bridge based on genetic algorithm. *Journal of Southeast University*, 2009, 39(4): 825-829(in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)