

## 斜拉桥监测系统传感器位置的寻优\*

郑荣跃<sup>1,2</sup>, 许凯明<sup>1</sup>, 唐国金<sup>2</sup>, 黄剑源<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 国防科技大学 航天与材料学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** :分析了传感器系统尤其是传感器布点位置在桥梁结构健康监测中的重要性,对桥梁结构传感器优化布点作了详细的分类及论述。分析了遗传算法的特点和优点,并将其与传统优化算法作了比较。利用遗传算法研究了宁波招宝山独塔不对称斜拉桥健康监测系统中传感器的最优布点问题。结果表明,用遗传算法进行传感器最优布点具有结果稳定可靠、收敛迅速的特点,能够满足系统的要求。

**关键词** :健康监测 ;传感器最优布置 ;遗传算法 ;斜拉桥

中图分类号 :U446.3 文献标识码 :A

## Optimum Algorithm for the Sensor Placement on the Structure Monitoring System of Cable-Stayed Bridge

ZHENG Rong-yue<sup>1,2</sup>, XU Kai-ming<sup>1</sup>, TANG Guo-jin<sup>2</sup>, HUANG Jian-yuan<sup>1</sup>

(1. Faculty of Architectural, Civil Engineering and environment, Ningbo Univ., Ningbo 315222, China)

(2. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** :The sensor system, especially the sensor placement, plays an importance part in the research of the health monitoring system of large-span cable-stayed bridge. The various optimum algorithms for the sensor placement at present are classified and discussed. Genetic algorithm is introduced and applied to determining the optimal position of the sensors of the monitoring system of the single-tower cable-stayed bridge of the Zhaobaoshan in Ningbo. Numerical simulation results indicates that this algorithm has a good convergence and ability to get the stable and reliable solution.

**Key words** :health monitoring ;optimal sensor placement ;genetic algorithm ;cable-stayed bridge

有关资料表明,目前美国 59 万座各种桥梁中有 29 万座存在各种问题,需要维修,全球有超过三分之一的桥梁结构存在不同程度的损伤,每年都为维护桥梁结构花费巨额费用。在各种桥梁中,斜拉桥结构属于大型复杂的结构,结构的主要承重构件多、尺寸大,运营过程中构件相互影响、受力复杂。随着社会经济的不断发展,导致斜拉桥结构承受的荷载越来越大,结构的损伤也越来越严重。为了确保斜拉桥结构的使用安全性、耐久性和舒适性,掌握结构在任意时刻的整体“健康状况”是非常必要的。对桥梁结构安全性、可靠性、经济性要求的提高和相关技术的发展,促进了实时桥梁健康监测由理论走向应用。

对结构实施有效的实时健康监测的关键在于获取有效和可靠的结构损伤信息,而数据的可靠性取决于传感器系统的优劣。作为整个健康监测体系的关键性问题之一,传感器系统对于整个系统的作用相当于感知神经系统对于人的作用。一个完整的传感器系统主要包括感知元件的类型、数量和桥梁结构上的布点位置这三个方面的内容,其中布点位置是关键点。

对结构损伤进行有效识别的前提条件是传感器系统所提供的信息必须最大程度地如实反映结构损伤。在此过程中,传感器布点位置的优劣将影响损伤识别的有效性。更进一步说,传感器测点位置布置的合理与否将影响到桥梁健康监测系统能否做到对结构实施有效的实时健康监测。

随着大量大跨度柔细结构桥梁的建设,现有桥梁结构损伤的加剧和现有健康监测系统对损伤识别的不敏感,桥梁健康监测系统的传感器优化布置问题引起了学者们的关注,并在进行了卓有成效的研究

\* 收稿日期 2004 - 11 - 15

基金项目 浙江省自然科学基金资助项目(502151)

作者简介 郑荣跃(1964—),男,副教授,博士生。

工作<sup>[1-5]</sup>。本文在分析比较传统的传感器优化布设算法和遗传算法的优劣的基础上,用遗传算法研究了宁波招宝山独塔不对称斜拉桥健康监测系统的传感器优化布置问题。

## 1 工程概况

该桥主跨为五跨混合式预应力混凝土协作体系的独塔双索面不对称漂浮体系斜拉桥,主梁为预应力混凝土梁。主跨 258m,跨度布置自 20#墩至 25#墩为 75m+258m+102m+83m+50m,主桥长 568m,桥宽 29.5m,主桥 22#墩为主塔墩,见图 1。主梁有四种不同的截面型式,分别为:双箱单室斜腹板加强截面、双箱单室斜腹板截面、双箱双室斜腹板截面和双箱双室直腹板截面,见图 2。

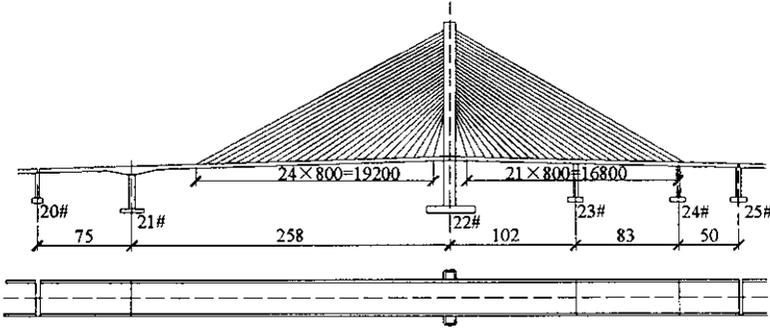


图 1 主桥平面、立面图

Fig. 1 Side view and top view of the Bridge

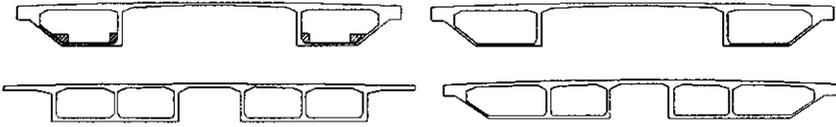


图 2 主梁截面

Fig. 2 Section view of the girder

该桥于 1995 年 5 月动工兴建,1998 年 9 月主桥施工到 23#墩时,主梁发生压溃破坏。为将损失降低到最低限度,在随后的施工过程中,有关部门开展了抢险保桥、主梁局部拆除和加固、主梁重建等一系列工作,大桥于 2001 年 6 月交付使用。实际运行情况表明,成桥状态十分复杂,基于原始设计或重建设计的相关数据分析结果与实际检测结果的差异较大。为确保大桥的安全性、可靠性,确保原设计的使用功能和使用寿命,应尽快建立先进高效的监测系统。

## 2 基于遗传算法的传感器优化布点方法

理论上,结构健康监测系统使用的传感器越多,对结构的描述就越准确,实测结果也越精确。但综合考虑结构运行状态和成本效益比等方面因素,像斜拉桥这样的大型复杂结构,在所有自由度上都布置传感器是不可能的,也是无法实现的。实际应用中,只能以最小的代价获取最大的收益作为最终的原则——由此引出如何在  $m$  个可选择的点位上布置最少的  $n$  个 ( $n < m$ ) 传感器的问题。

已发展了多种传感器优化布点方法,按优化算法的特点可划分为传统算法和非传统算法两大类。传统算法主要有有效独立法<sup>[4]</sup>(EIM 法)、Guyan 模型缩减法<sup>[5]</sup>、模态能量法<sup>[6]</sup>(MKE 法)和推断法<sup>[7]</sup>等;非传统算法主要有模拟退火法、神经网络法和遗传算法<sup>[2,8]</sup>等。各种算法各有其应用的合适范围、优势和局限性。遗传算法是一种高效并行优化概率搜索方法,具有全局最优和隐含并行性两方面的优越性,非常适用于大规模并行计算,特别适用于处理大跨度桥梁结构等复杂结构的传感器优化布点问题。

基于遗传算法的传感器优化布点方法,采用可控性和可观性两个指标来获取所有控制模态的累计性能值,并以这些指数作为优化指标,能够实时监测结构的损伤状态。它在搜索进化的过程中直接用适

适应度(目标函数)来评判解群或串的优劣,并作为以后遗传操作的依据。因此,适应度函数在遗传算法中十分重要,它的选取直接影响最优解。遗传算法对适应度函数的惟一要求是所选择的函数不能是负的,所以适用于大部分问题。考虑到该桥现有的桥梁监测系统所使用的传感器——振弦式混凝土表面应变计和千分表应变计,并考虑到桥的结构特点——独塔不对称协作梁漂浮体系和目前所掌握的数据,在进行传感器最优点布置时,设计了以静力计算数据为基础的基于应变能的适应度 $f_1$ 、以动力分析数据为基础的基于振型的适应度 $f_2$ 和基于变形能的适应度 $f_3$ 这3个量。

#### (1) 基于弯曲应变能的适应度 $f_1$ (静力)

选用应变能损伤指标 $f_1$ 作为适应度函数。 $f_1$ 的具体表达式如下:

$$f_1 = \frac{U - U^*}{U} \times 100 \quad (1)$$

式中, $U$ 表示未损伤时的应变能,“ $*$ ”表示损伤。

考虑结构特点,应变能 $U$ 的具体表达式如下:

$$U = \frac{1}{2} \int_l E(x) I(x) (\nu^*)^2 dx \quad (2)$$

式中, $E(x)$ 、 $I(x)$ 分别为梁柱的弹性模量、截面惯性矩, $\nu^*$ 是构件的曲率。

#### (2) 基于振型的适应度函数 $f_2$

设计得到的 $n$ 个振型为: $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}$ 基于模态应变能的适应度表示如下:

$$f_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left| \sum_{r,s \in m} \phi_{ri} k_{rs} \phi_{sj} \right| \quad (3)$$

式中, $k_{rs}$ 表示第 $r$ 点和第 $s$ 点之间的刚度影响系数; $r, s \in m$ 表示 $r$ 和 $s$ 取所有的测点,此适应度越大越好。

#### (3) 基于变形能的适应度函数 $f_3$

$$f_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{r \in o} (EI)_r \phi_{ri}'' \phi_{rj}'' \quad (4)$$

式中, $r = N - m$ , $N$ 是系统的自由度, $m$ 是测点, $o$ 是非测点,此适应度越小越好。

一种优化算法的优劣性由它的收敛性决定,收敛性越好的算法越优越。遗传算法的收敛性与解群的大小、适应度函数、交叉算子和变异算子等的选择密切相关。

在遗传搜索过程中,群体规模大小影响到遗传算法的最终性能和效率。一个新的解群的性能和当前解群大小有关,当前解群越大,串的多样性越高,参与运算的串越多,产生新的模式及高适应度串的几率也就越高,算法陷入局部最优解的危险性也越小。所以,从解群的多样性考虑,解群应该越大越好。但是,随着解群规模的增大,计算工作量将大大增加,可能导致一个无法接收的慢收敛率。考虑到计算机的性能与算法的可接受性和可操作性,不可能将解群规模无限制地增加。相反,如果初始解群的规模过小,则解群所包含的信息将很不充分,搜索计算的结果也就可能导致局部最优。考虑到经典的遗传算法在大解群时进行的搜索可能将遗漏一些最优点,在本文中,采用四分之一择优的选择方式,即采用广义遗传算法。

### 3 传感器优化布置

根据有限元模型,主梁有144个单元、145个节点,索塔有114个单元、114个节点,在计算中为减少计算量,在不影响精度的情况下,主梁取94个节点,索塔每个塔柱仅考虑3个单元、4个节点,每根横梁仅作为一个单元考虑,所以,计算中索塔为8个单元、8个节点。

考虑两个弯曲、一个扭转共三个方向的自由度,则意味着每个串有306个基因。具体在Matalab编程中先定义一个初始的解群,考虑到计算机的计算性能和计算的精度要求,定义60个串的初始解群,每代都产生出60个新的串。同时选择20个串作为交配池,并保证这交配池中的串的单一化。每一代的父代都是从交配池中选择的,选择的原则如下:初始解群是60个串,以后每代则是从父代60个新串和交配池中的20个串进行交叉、变异而生成的40个新串和20个交配池中的串组成的新代。再选择最优

的20个串作为交配池进行下一代的遗传操作,如此循环,直到收敛为止。在搜索过程中,如果父代在30次的循环内一直保持不变,则认为搜索到最优解,停止遗传操作。

实际根据主梁的竖向、横向弯曲振型以及轴向扭转的振型分析结果寻找主梁的传感器优化布点,采用文[9]动力计算得出结构的前100阶振型数据,静力部分数据也引自文[9]计算结果。

具体计算时,用前50阶和前100阶竖向振型和适应度函数 $f_2$ 、 $f_3$ 分别计算了10、15和20个竖向加速度计在纵向主梁上的最优布点,同时用静力弯曲应变能适应度 $f_1$ 作为校核。图3是用100阶振型搜索10、15和20个竖向加速度传感器的最优布置结果,图中“|”表示在该位置布置传感器,由上向下的3行分别表示测点数为10、15和20。由图可见,随着测点的增加,最优测点位置间存在着包容关系。

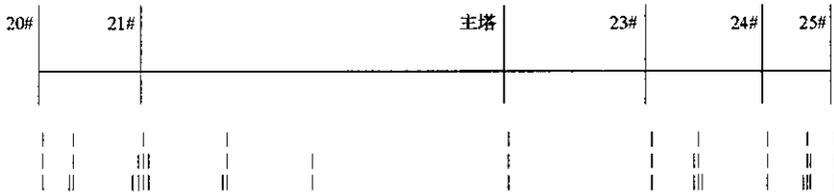


图3 用100阶振型计算搜索出的10、15、20个传感器的最优布置

Fig.3 Optimal placement of 10, 15, 20 sensors for the first 100 modes

## 4 结论

(1)遗传算法是一种高效并行优化概率搜索方法,将其应用到一座独塔不对称协作梁体系大跨度桥梁的健康监测系统的传感器优化布点研究中是合适和有效的。

(2)适应度函数的选择在遗传算法中十分重要,本文采用了基于静力、动力的三个适应度,得到了很好的效果。

(3)应用遗传算法,在各种情况下的迭代过程是以概率1平稳收敛的,且收敛迅速。在以不同的初始解群、交叉变异算子重复计算下,最优测点位置基本保持不变,因此可以认为得到的是全局最优解。

(4)进一步分析用遗传算法计算得到的结构的传感器优化布点位置,发现最终的测点基本位于应力和挠度的极值点附近,这和结构理论分析的结果基本符合。

## 参考文献:

- [1] 崔飞,高岩. 结构损伤识别的传感器优化布设方法[J]. 铁道建设, 2003, 3: 51-54.
- [2] 李戈,秦权,董聪. 用遗传算法选择悬索桥监测系统中传感器的最优布点[J]. 工程力学, 2000, 17(1): 25-34.
- [3] 刘效尧,蔡键,刘晖. 桥梁损伤诊断[M]. 北京:人民交通出版社, 2002.5.
- [4] Kammer D C. Sensor Placement for On-orbit Modal Identification of Large Space Structure[J]. Journal of Guidance, Control and dynamics, 1991, 14(2) 251-259.
- [5] O'Callahan J. A Procedure for an Improved Reduced System(IRS) Modal[A]. In: Demichele D J ed. Proceedings of the 7th IMAC Conference [C], 1989: 17-21.
- [6] Larson C B, Zimmerman D C, Marek E L. A Comparison of Modal Test Planning Technique: Excitation and Sensor Placement Using the NASN 8-bay Truss[A]. In: Allemang R ed. Proceeding of the 12th IMAC conference[C], 1994: 205-211.
- [7] Haftka R T, Adelman H M. Selection of Actuator Locations for Static Shape Control of Large Space Structures by Heuristic Integer Programming[J]. Computers and Structures, 1985, 20(3): 575-58.
- [8] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 82-90.
- [9] 许凯明. 基于非线性的斜拉桥静、动力分析与健康监测寻优研究[D]. 宁波大学硕士学位论文, 2004.

