



# 高桩码头结构健康监测传感器优化布置

张 迅, 王 平, 邢建春, 杨启亮  
(解放军理工大学, 江苏南京 210007)

**摘要:** 总结了高桩码头结构检测的研究现状, 并对现有检测方法的不足进行了分析和讨论, 给出了高桩码头结构健康监测系统的基本原理。对监测系统中加速度传感器的优化布置进行了初步的研究, 采用一种自适应遗传算法进行加速度传感器的优化布置。最后通过对一个高桩码头工程的实例分析, 证明该算法可用于高桩码头健康监测系统的加速度传感器优化布置。

**关键词:** 高桩码头; 检测; 结构健康监测; 遗传算法; 传感器优化布置

中图分类号: U 658.91

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0080-05

## Optimal placement of sensor for health monitoring of high-piled wharf structures

ZHANG Xun, WANG Ping, XING Jian-chun, YANG Qi-liang

(PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** This paper summarizes the existing inspection content and methods for high-piled wharf, analyzes the deficiencies of the inspection methods, and discusses the basic principle of the structural health monitoring system (SHMs) of high-piled wharf. The optimal sensor placement of the SHMs is studied, and an adaptive genetic algorithm (GA) is applied to optimize the layout of the acceleration sensors. Based on the case analysis of a high-piled wharf is taken for example engineering, it proves that the method can be applied to the SHMs of high-piled wharf.

**Key words:** high-piled wharf; inspection; structural health monitoring; genetic algorithm; optimal sensor placement

高桩码头结构简单、自质量小, 波浪反射小, 泊稳条件好, 适宜做成透空式结构, 且能用于软土地基, 已经成为我国港口码头的主要结构形式之一, 然而高桩码头在其服役期内易于发生损伤。造成其损伤的因素是多方面的<sup>[1]</sup>, 一方面可能是码头建设时设计以及施工质量的局限性造成的; 另一方面码头结构在实际服役过程中, 因受台风或地震影响、超负荷运行、船只非正常撞击、材料老化、环境侵蚀以及地基条件改变等因素, 导致其无法正常使用, 极端情况下甚至引发灾难性的突发事件。为了保障码头结构的安全性、完整性、适用性与耐久性, 采取有效手段监

测和评定其健康状态非常必要。码头结构健康监测系统的有效运行离不开各种传感器, 这些传感器的布置对系统的监测结果起着决定性的作用。考虑系统的经济性和码头结构自身的限制, 不可能在其所有自由度上都布设传感器, 因此, 如何将有限的传感器布置在最优的位置以获取最丰富的结构信息, 对码头结构健康监测系统十分重要。

本文在简要对比码头现有检测方法不足的基础上, 给出了码头结构健康监测系统的基本原理。对监测系统中传感器的优化布置问题进行了研究, 采用一种自适应遗传算法进行加速度传感器的优化布置。最后, 通过仿真算例验证了该算

收稿日期: 2013-03-11

作者简介: 张迅(1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能结构。

法用于高桩码头结构监测系统加速度传感器优化布置的有效性。

### 1 高桩码头结构检测现状分析

码头结构现有检测方法主要依靠工程人员定期检测, 采用现场巡查和专项检测相结合的手段, 即先采用现场巡查的方法初步确定码头结构损伤类型、位置以及程度, 而后根据巡查结果, 对破损严重的结构构件进行专项检测。通过整理分析检测结果, 对码头结构的健康状况做出诊断, 对其安全性做出评价, 为码头的合理维修与加固提供科学依据<sup>[2]</sup>。本文简要总结了码头结构现有的检测内容及其具体的检测方法(表1)<sup>[3-5]</sup>。

表1 码头结构现有检测内容与检测方法

检测内容	检测方法
混凝土外观	目测巡查
整体不均匀沉降、水平位移、倾斜	全站仪和静力水准仪等测量仪器检测
结构完整性检测	脉动法检测结构动力反应信号
整体稳定性检测	伺服加速度测斜技术
结构受力检测	振弦式表面应变计
土体变形、土性检测	测倾仪、孔隙水压力观测仪及钻孔检测
混凝土强度	回弹法逐点检测
混凝土表面碳化程度	酚酞试剂滴定法测量
混凝土保护层厚度	钢筋位置测定仪结合局部剔除法测量
混凝土中钢筋锈蚀	外观检查结合钢筋锈蚀测定仪进行检测
氯离子含量	分层取样实验室检测
基础及桩基可靠性	水下探测与录像

通过比较上述检测方法发现, 现有的方法主要存在着操作工序复杂、受环境影响大且不能实时在线监测等许多不足。为了能实时在线监测高桩码头的健康状态, 获取其内部信息并处理数据, 判断和评估结构因损伤或退化导致的主要性能指标的改变, 建立健康监测系统非常有必要。

### 2 高桩码头结构健康监测系统基本原理

构建码头结构健康监测系统能够实时在线监测和评价其健康状态, 诊断结构出现的各种损伤, 并对其安全状态进行评估, 从而达到实时发现损伤并使结构损伤得到及时控制和修复的目的。码头结构健康监测系统应包括传感器系统,

数据采集、传输、分析与处理系统, 损伤诊断、安全评估与预警系统。图1给出了码头结构健康监测系统基本原理。

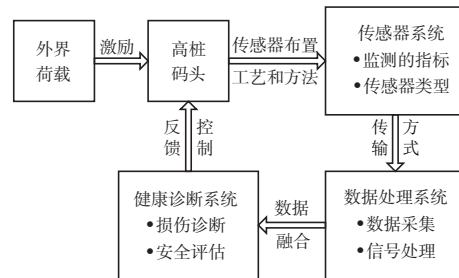


图1 码头结构健康监测系统基本原理

### 3 监测系统中加速度传感器的优化布置

高桩码头健康监测主要是通过监测其动力特性的变化, 结合模态分析理论及有限元计算准确推断出结构的健康状况。测量结构的动力特性所采用的传感器主要是加速度传感器。选择所需要的加速度传感器数目并将其合理布置, 与监测成本和监测精度有直接的关系。如果传感器数量过多, 会提高振动测试成本; 如果传感器数量过少或者布置不合理, 将导致测量数据匮乏, 甚至可能会毫无用处。如何将有限的传感器最优地布置在结构的待选位置中, 以获取最多的反映结构健康状况的信息, 是结构健康监测系统中必须解决的问题。

传统的传感器优化布置算法往往采用迭代法, 得到的一般是局部最优解。随着优化算法的发展, 一些随机类算法开始在优化布置领域得到了很好的应用, 这些布置算法的本质是: 优化能反映结构特性的参数所构成的目标函数。遗传算法(Genetic Algorithm, GA)作为一种模仿生物进化过程的随机优化算法, 对求解优化问题具有较好的全局搜索性、高效的并行性、鲁棒性和通用性, 使得其在处理加速度传感器优化布置问题上具有独特的优势<sup>[6]</sup>。近年来, 采用遗传算法对加速度传感器进行优化布置成为研究的热点之一, 许多学者采用遗传算法及其改进方法对多种结构的传感器优化布置进行了讨论<sup>[7-9]</sup>。鉴于遗传算法在解决传感器优化布置问题上的优势, 本文研究将一种自适应遗传算法用于高桩码头健康监测系统中加速度传感器的优化布置, 以期获得较好的布置效果。

## 4 自适应遗传算法

### 4.1 浮点编码

遗传算法主要有二进制编码和浮点编码两种编码方式,二进制编码由二进制符号0和1组成,浮点编码直接由实数构成。浮点编码与二进制编码相比,存在一定的优势:一方面,浮点编码不受维数限制,不存在解码过程,从而简化了计算过程,提高了运算效率;另一方面,用浮点编码产生的种群经变异操作后,能够保持更好的种群多样性。为取得较好的优化效果,本文采用浮点编码方式。

### 4.2 最优保存策略

根据适应度的相对值大小来选择群体,使适应度较大的个体具有较大的生存机会,采用锦标赛选择法(Tournament selection)。同时为了避免算法出现过早收敛的现象,采用了最优保存策略(Elitist strategy)。其实现过程为:将每一次迭代产生的新种群的最优适值与整个种群迄今为止的最优适值相比较,若当前种群最优适值比整个种群迄今为止的最优适值要好,用当前种群中的最优个体替代整个种群迄今为止的最优个体;否则,用整个种群迄今为止的最优个体替代当前种群中的最优个体。最优保存策略可避免交叉、变异等遗传操作破坏种群的优良个体,从而保证算法的收敛。

### 4.3 自适应交叉变异概率

遗传算法的控制参数中,交叉概率 $P_c$ 和变异概率 $P_m$ 的选择对算法的性能有关键性的影响。传统遗传算法中,种群的整个进化过程中,都采用固定的交叉率和变异率,不仅增加了算法的复杂度,而且还使得算法的收敛速度下降,严重影响了算法的性能。为了克服传统遗传算法的不足,本文采用一种自适应遗传算法<sup>[10]</sup>,其交叉率 $P_c$ 和变异率 $P_m$ 随适值自动改变,主要依据是种群平均适值,当个体适值低于平均适值时,说明该个体性能较差,对其采用较大的交叉率和变异率;若个体适值高于平均适值,说明个体性能优良,对其取较小的交叉率和变异率,这样在保证种群多样性的同时,又保证了遗传算法的收敛性<sup>[11]</sup>。计算 $P_c$ 和 $P_m$ 的公式如下:

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f_i - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f_i \geq f_{avg} \\ p_{c1} & f_i < f_{avg} \end{cases} \quad (1)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})(f_2 - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f_2 \geq f_{avg} \\ p_{m1} & f_2 < f_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{c1}=0.9$ ;  $P_{c2}=0.6$ ;  $P_{m1}=0.1$ ;  $P_{m2}=0.001$ ;  $f_{max}$ 为种群中最大的适值;  $f_{avg}$ 为每次迭代种群的平均适值;  $f_1$ 为要交叉的两个个体中较大的适值;  $f_2$ 为要变异个体的适值。

### 4.4 适应度函数

适应度函数是进化算法用来判断个体好坏的衡量尺度,在遗传算法中是非常重要的。Carne等<sup>[12]</sup>认为MAC矩阵是评价模态向量交角的一个很好的工具,其矩阵元素表达式为:

$$MAC_{ij} = \frac{(\phi_i^T \phi_j)^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)} \quad (3)$$

式中:模态振型向量 $\phi_i$ 和 $\phi_j$ 分别为振型矩阵中第*i*列和第*j*列。该式确定的MAC矩阵中,非对角元代表两个不同模态向量间的交角,且其值位于0和1之间。

一组数据的均方根值给出了该数据的量级,是对这组数据大小的度量。为了评价整个MAC矩阵非对角元,本文选择该矩阵非对角元的均方根值来度量其非对角元的大小<sup>[13]</sup>。易知该问题为一个最小化问题,其值越小越好,而在遗传算法中,种群的适应度为最大化问题,故应将目标函数的最小化问题转化为适应度函数的最大化问题。MAC矩阵非对角的各个数值最大不会超过1,因此构造如下的适应度函数:

$$f = 1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (4)$$

式中: $X_i$ 是MAC矩阵非对角元的各个数值。

## 5 高桩码头加速度传感器布置

### 5.1 概况

某码头采用全直桩高桩梁板结构形式,长36.5 m,宽25 m,由5跨6个横向排架组成,排架间距6.5 m,预制横梁高1 600 mm,预制轨道梁高1 400 mm,预制纵梁高1 200 mm,预制面板厚250 mm,现浇板厚150 mm,桩基采用 $\phi$ 1 000 mm的预应力混凝土管桩。码头结构断面如图2所示。

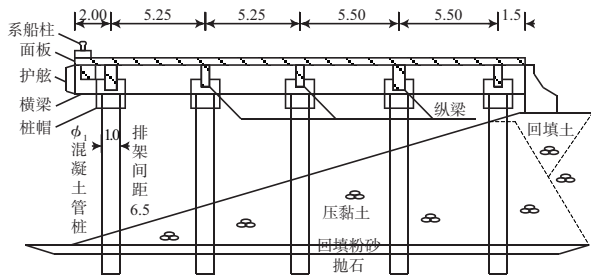


图2 高桩码头结构断面 (单位: m)

### 5.2 有限元模型

由于采用梁单元方式建模能以较少的节点数和单元数达到实体模型相同的结果, 且建模计算比实体建模节省工作量<sup>[14]</sup>。因此本文高桩码头的数值模拟采用梁单元和壳单元简化的梁单元模型。

高桩码头横梁、纵梁采用梁单元beam4, 码头面板采用壳单元shell63, 码头桩采用管单元pipe16, 不考虑桩土作用, 采用假想嵌固点的方法, 取土层以下10 m处完全约束, 整体模型采用APDL参数化设计语言进行建模, 建立的有限元模型如图3所示。

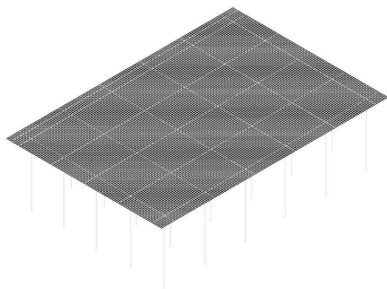


图3 高桩码头梁单元模型

采用ANSYS软件可对结构进行模态分析, 其目的是计算结构的固有频率和模态振型, 这些参数反映了结构的自振特性。本文就是根据高桩码头的模态振型构造的适应度函数, 考虑到结构的低阶模态具有较大的振型参与系数, 这里只提取了码头模型前10阶振型, 其中前4阶振型分别如图4所示, 这10阶模态的固有频率如表2所示。

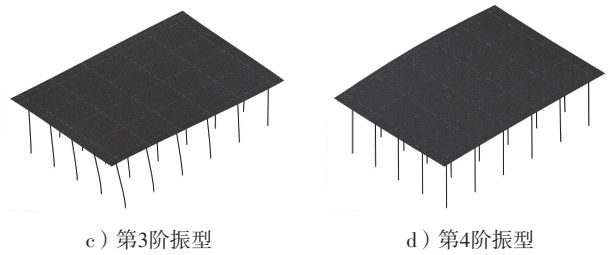


图4 高桩码头模型前4阶振型

表2 高桩码头模型前10阶固有频率

阶次	频率	阶次	频率
1	2.557 67	6	7.019 32
2	2.580 27	7	7.428 56
3	2.780 45	8	7.629 87
4	6.516 58	9	8.371 57
5	6.878 86	10	9.100 26

### 5.3 优化布置结果

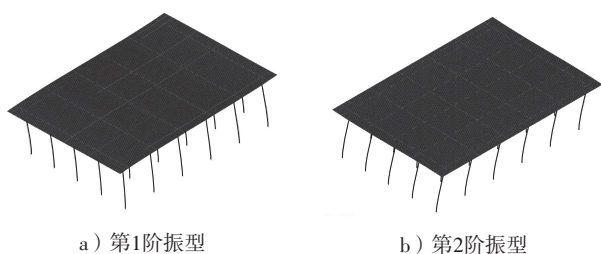
限于篇幅, 本文针对码头面板结构进行传感器的优化布置。采用11个传感器, 选取面板部分共14 847个节点, 通过MATLAB编写遗传算法程序, 在这些节点自由度上进行传感器优化布置 (算法中的种群规模为80, 迭代次数为500)。算法优化得到的传感器布置结果如表3所示, 得到MAC矩阵图及进化曲线分别如图5,6所示。从MAC矩阵分布图可以看出, 其非对角元素值总体保持在一个较低水平, 说明在该传感器布置方案下获取的模态向量易于分辨; 从遗传算法的进化曲线可以看出, 该算法能够较快收敛到一个稳定的最优值, 表明了遗传算法应用于码头结构传感器优化布置的有效性。

## 6 结论

1) 为了实时在线监测码头结构健康状况信息, 并对其因损伤或退化而导致的结构性能改变做出准确及时的判断与评估, 建立码头结构健康

表3 传感器优化布置结果

测点号	节点号	测点号	节点号
1	198	7	6 848
2	310	8	7 284
3	582	9	9 186
4	1 770	10	10 557
5	3 462	11	11 929
6	4 825		



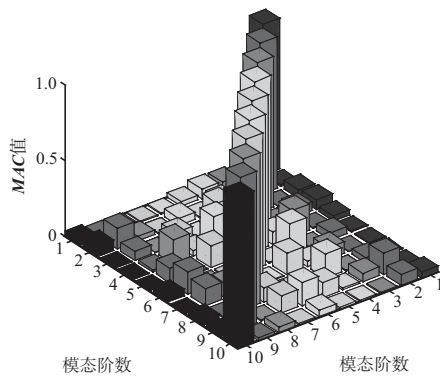


图5 MAC矩阵图

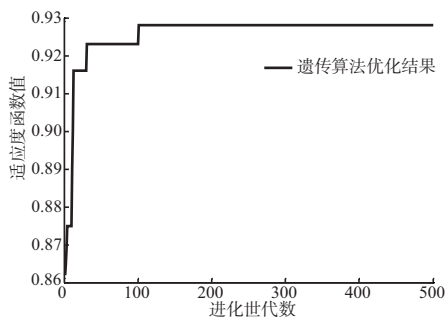


图6 自适应遗传算法的进化曲线

监测系统十分必要。

2) 传感器优化布置是码头结构健康监测系统中的—个关键问题。由于遗传算法不易陷入局部最优解，且具有较好的搜索能力和计算效率，将其用于传感器的优化布置，可取得令人满意的结果。

3) 在构造遗传算法种群编码时，利用浮点编码代替二进制编码，可解决编码的困难，最优保存策略可很好保留种群中适应度最好的个体。同时采用自适应的交叉变异概率，既能保持种群多样性又保证了算法的收敛性，确保进化迭代向有利于最优解的方向发展。

4) 采用遗传算法进行传感器的优化布置是以有限元模型为基础的，所以不可避免存在有限元建模误差，从而对优化结果产生—定的影响，因此，下一步将重点考察模型误差对优化布置的影响。

参考文献:

[1] 孙学英, 冉昌国. 高桩码头结构损伤机理浅析及其健康

监测技术简介[J]. 水文地质工程地质, 2005(5): 110-112.

[2] 武清玺, 江泉. 码头结构的健康诊断及安全性评价[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 75-78.

[3] 田双珠, 王笑难, 李颖. 港口工程已建码头的检测与评估[J]. 水道港口, 2004, 25(4): 219-221.

[4] 张琦彬, 蒋江波, 谢万彤. 梁板式码头检测实例及分析[J]. 水运工程, 2010(1): 62-65.

[5] 秦网根, 方海东, 吉同元, 等. 在役高桩码头结构物的检测与评估[J]. 水运工程, 2012(1): 69-72.

[6] 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[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(4): 825-829.

[7] Kang Fei, Li Jun-jie, Xu Qing. Virus coevolution parthenogenetic algorithms for optimal sensor placement [J]. Advanced Engineering Informatics, 2008, 22: 362-370.

[8] Cha Y J, Agrawal A K. Kim Y, et al. Multi-objective genetic algorithms for cost-effective distributions of actuators and sensors in large structures[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(9): 7 822-7 833.

[9] Dhuri K D, Seshu P. Multi-objective optimization of piezo actuator placement and sizing using genetic algorithm [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 323: 495-514.

[10] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1994, 24(4): 656-667.

[11] 单德山, 王振华, 李乔. 大跨度铁路刚桁斜拉桥传感器优化布置[J]. 土木建筑与环境工程, 2011(S1): 156-160.

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

[13] 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[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(4): 825-829.

[14] 李王红, 何良德. 两种ANSYS有限元模型在高桩码头计算中的对比研究[J]. 现代交通技术, 2007(5): 84-86.

( 本文编辑 武亚庆 )