

# 基于遗传算法的海洋平台损伤诊断\*

刘娟<sup>1,2</sup>, 黄维平<sup>1</sup>, 石湘<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室 青岛, 266071) (2. 青岛农业大学建筑工程学院 青岛, 266009)

**摘要** 海洋平台结构在环境因素下可能出现局部破损, 提出一种快速诊断结构损伤的损伤探测方法, 而遗传算法因其方法简单及较强的鲁棒性成为近年来发展较快的一种全局优化方法。以海洋平台实测的固有频率和振型为诊断依据, 将海洋结构的损伤诊断归结为优化问题, 采用遗传算法进行优化搜索。考虑到平台结构刚度的方向性, 针对测量噪声和海洋平台模态的特点, 提出了一种修正的目标函数作为遗传算法进行损伤诊断的适应度函数。数值模拟和物理模型试验结果表明, 该方法能够准确地诊断出导管架海洋平台结构的损伤, 改进了进化搜索的鲁棒性, 提高了海洋平台结构损伤诊断的可靠性。

**关键词** 损伤诊断; 遗传算法; 海洋平台; 物理模型

**中图分类号** TE42; P751

## 引言

近年来随着海上油气资源的大力开发, 大量海洋结构工程陆续建成并投入使用, 这些海洋结构投入使用后在环境因素作用下可能出现局部破损, 从而对整个结构的安全构成潜在危险; 因此, 为了保证结构的安全, 需要提出探测结构损伤的方法, 以快速检测损伤的出现及损伤位置。结构静态检测和动力检测是结构损伤诊断常用的两种方法, 动力检测相对于静态检测有不进一步损伤构件、获取数据方便和动力数据能反映整体性能等优点, 近年来许多学者对利用振动参数进行损伤诊断的方法进行了研究<sup>[1]</sup>。由于损伤诊断可归结为结构参数的识别问题, 通常用最优优化方法求解。

遗传算法作为一种模拟自然界进化过程的最优化方法, 具备较完整的理论和方法。因其只需计算各可行解的目标值而不要求目标函数的连续性, 且不需要梯度信息而具有很强的鲁棒性。将损伤诊断归结为参数识别的最优化问题, 遗传算法可以在测试信息不多的情况下, 迅速找到损伤位置并模拟损伤程度<sup>[2-3]</sup>。笔者将遗传算法用于海洋平台的损伤诊断, 针对测量噪声和海洋平台模态参数识别的特点, 对基于结构模态频率和模态振型构建的目标函数进行了修正, 提出一种更适合海洋平台结构的目标函数。针对渤海湾 NP1-29 导管架平台, 制作了平台的缩尺物理模型, 将修正后的目标函数用作适应度函

数, 采用遗传算法处理该模型的损伤诊断, 各工况下均取得较好的诊断结果。

## 1 基本原理

### 1.1 优化的数学模型

结构损伤以结构刚度降低为特征, 表现为结构动态特性的变化, 可以通过定义单元刚度系数描述结构破损的位置及程度<sup>[4]</sup>。用动力学方法进行损伤诊断时, 实测的固有频率和振型是诊断的依据, 即改变结构物理参数使其对应的模态数据与实测模态数据吻合, 这是一个优化的过程, 频率误差最小和振型误差最小可作为两个不同的目标函数<sup>[5]</sup>

$$F_{\omega} = \sum_{i=1}^m \left( \frac{f_i^{\text{test}} - f_i^{\text{cal}}}{f_i^{\text{test}}} \right)^2 \quad (1)$$

$$F_{\phi} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\phi_{ij}^{\text{test}} - \phi_{ij}^{\text{cal}})^2 \quad (2)$$

将两者加权组合

$$F = C_{\omega} F_{\omega} + C_{\phi} F_{\phi} \quad (3)$$

其中:  $C_{\omega}$  和  $C_{\phi}$  为权因子;  $f_i^{\text{test}}$  和  $f_i^{\text{cal}}$  分别为实测和计算的第  $i$  阶固有频率;  $\phi_{ij}^{\text{test}}$  和  $\phi_{ij}^{\text{cal}}$  分别为实测和计算的第  $i$  阶振型;  $m$  为参与评估的频率阶数;  $n$  为参与评估的振型阶数;  $k$  为节点位移总数。

海洋平台的实时监测中, 由于传感器安装的限制, 只能测量平台部分节点水平两个方向的响应信号并识别出相应的低阶模态参数, 其中前 3 阶模态

\* 收稿日期: 2010-04-13; 修改稿收到日期: 2010-09-25

分别为平台1阶 $x$ 方向、1阶 $y$ 方向和1阶扭转。平台局部发生损伤对结构频率影响较小,而平台某方向支撑发生损伤仅对相应方向结构刚度产生较大影响从而影响该方向振型,对另一方向振型的影响也较小,由于测量噪声的存在,该方向信噪比相对较小,如果将各方向振型误差函数叠加,刚度影响较小方向的振型往往由于信噪比较小而对诊断带来不利影响。基于上述考虑,笔者将振型误差函数作为优化的目标函数,并尝试分别采用某一方向振型误差函数来判断损伤发生的方向并确定具体的损伤位置,用修正后的振型误差函数作为遗传算法的适应度函数来处理数值模型和物理模型的损伤诊断问题。结果表明,该方法具有较强的鲁棒性,能够准确地诊断出导管架海洋平台结构的损伤位置和损伤程度。

## 1.2 遗传算法求解

遗传算法(GA)是J. H. Holland<sup>[6]</sup>于20世纪70年代中期提出来的,是一种在思想上和方法上都别具特色的新的搜索与优化方法。

遗传算法作为一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的高度并行、随机和自适应的搜索算法,它把优化问题的解的搜索空间映射为遗传空间,把每一可能的解编码为一个称为染色体的串。每个染色体(对应一个个体)代表一个解,一定数量的个体组成群体。GA首先随机地产生一些个体组成初始群体,按预先根据目标函数确定的适应度函数计算各个体对问题函数的适应度,再根据个体适应度进行选择,然后进行交叉、变异等遗传操作产生进化的新一代群体。如此反复,不断向更优解方向进化,从而获得问题的最优解。

遗传算法求解问题时,首先确定适应度函数、设计变量、编码方式及遗传算子(选择、交叉和变异),即算法设计过程。

### 1.2.1 适应度函数

遗传算法在进化搜索中以适应度函数为依据,利用种群中每个个体适应度值来进行搜索。因此,适应度函数的选取至关重要。一般而言,适应度函数是由目标函数变换而成的<sup>[7]</sup>。笔者采用界限构造法来形成适应度函数,在损伤诊断的优化计算中,目标函数是修正后的振型误差函数,为最小问题,因此适应度函数为

$$\text{Fit}(f(x)) = \frac{1}{1 + c + f(x)} \quad (c \geq 0, c + f(x) \geq 0) \quad (4)$$

其中: $c$ 为目标函数界限的保守估计值。

由于本问题误差函数的最小值为0,故取 $c=0$ ,此时适应度函数为

$$\text{Fit}(f(x)) = \frac{1}{1 + f(x)} \quad (5)$$

其适应度函数的最大值为1。

### 1.2.2 设计变量及编码方式

结构的损伤是通过定义结构单元刚度系数来描述的,因而第 $i$ 个设计变量取为第 $i$ 个单元的刚度折减系数 $a_i$ ( $0 < a_i \leq 1$ )。另外考虑到实际问题的性质和遗传操作的设计,采用二进制编码方式 $b = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ , $a \in \{0, 1\}$ , $n$ 代表设计变量的二进制串长,其值可由实际问题对设计变量的取值精度来确定。

### 1.2.3 遗传算子

选择算子在遗传算法中起着向导的作用,以搜索朝着空间内可能的最优区域进行。笔者采用了随机遍历抽样法进行选择,每个个体的选择概率 $p_i$ 采用线性排序的选择概率计算公式为

$$p_i = c(1 - c)^{i-1} \quad (6)$$

其中: $i$ 为个体的排序序号; $c$ 为排序第一的个体的选择概率。

交叉算子是对群体内现有的信息进行重组以发现与环境更为适应的个体的遗传操作。笔者采用变量级杂交<sup>[5]</sup>,即两个不同父体中代表同一设计变量的染色体进行单点杂交,产生子代个体中代表相应设计变量的染色体。这样将基于个体级别的杂交变为基于设计变量级别的杂交,加大了对模式的破坏概率,提高了算法的收敛速度。

变异算子给群体带来新的遗传基因以恢复由于选择算子的作用而失去的个体的多样性。二进制编码的变异操作非常简单,只是以一定的变异概率将所选个体的位取反。为了减少结构分析的次数,笔者只对每代中的最优个体实施变异操作,变异操作仍采用变量级,即随机选取设计变量的某一位进行变异。

## 2 数值算例

用数值计算模拟结构发生损伤后的固有频率和振型。假设结构未损伤时材料分布均匀,结构的损伤表现为构件弹性模量 $E$ 的折减,即以单元的弹性模量乘以折减系数表示该单元的损伤,然后用求得的固有频率和振型作为实测固有频率和振型输入遗传算法程序进行损伤诊断。

图1为渤海湾NP1-29导管架平台的有限元模型。该平台是位于渤海的一座四腿桩基钢制导管架结构,平台就位水深为6.4 m,上部模块设备重量约600 t,设3层水平横撑。由于平台的实时监测中出现一处损伤即可测出响应的变化从而识别出模态的变化,而桩和导管架又不易发生损伤,因此仅模拟平台在较易发生损伤的横撑或斜撑上出现一处损伤的情况。

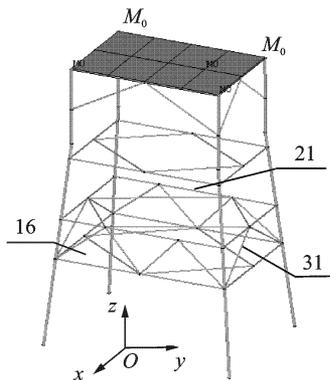


图1 海洋平台数值模型

首先选用前两阶振型作为损伤指标,设计变量的二进制串长取4位。图2给出了模拟平台第21单元刚度折减20%即刚度为未损伤刚度80%时的计算结果,诊断结果比较理想。图3给出了用遗传算法进行进化搜索过程中历代适应度变化曲线,最大适应度值为1。

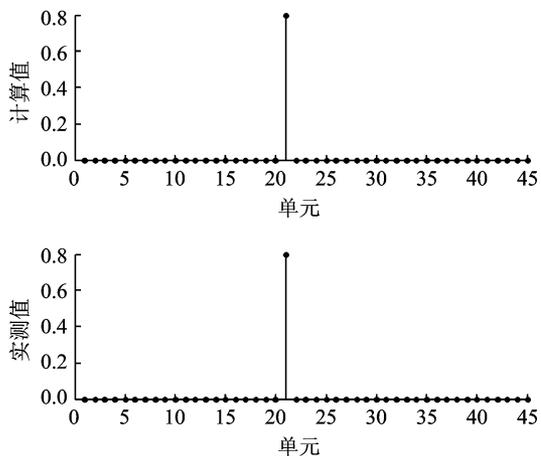


图2 海洋平台刚度折减系数比较

由平台模型可以看出,21单元为平台y向横撑,对平台y方向刚度贡献较大。数值模拟平台第21单元发生损伤,然后用求得的x,y两方向的振型与结构未损伤时两方向振型比较,可得该横撑损伤对两方向振型的影响系数分别为0.578和201.45,可见该横撑损伤对y方向振型产生较大影响,而对x

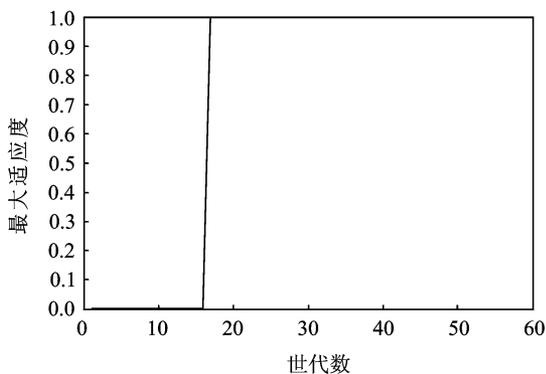


图3 历代最大适应度变化曲线

方向振型影响较小。表1为平台模型其他支撑发生损伤时对其两方向振型的影响系数,各损伤杆件在平台中的位置如图1所示。

表1 各杆件损伤对平台x,y方向振型的影响系数

损伤杆件	杆件位置	振型影响系数	
		x	y
21	y方向横撑	0.578	201.45
16	x方向横撑	215.360	1.6157
31	y方向斜撑	2.074	168.53

### 3 模型试验

针对渤海湾NP1-29导管架平台,根据市场材料尺寸、实验室要求及模型与实际平台的动力相似制作了平台的缩尺物理模型,如图4所示。该物理模型的缩尺比例为15:1,模型结构共4层,其中下面3层为水平支撑,顶层甲板用厚度为10 mm的钢板模拟,另外在该钢板一侧用螺栓固定了一块20 kg的钢板模拟其他上部结构重量,导管架采用无缝钢管制作,桩腿由泥面向下延长了7倍桩径作为结构的固定处。该模型短边方向为x轴,长边方向为y轴,固定桩腿处z=0。

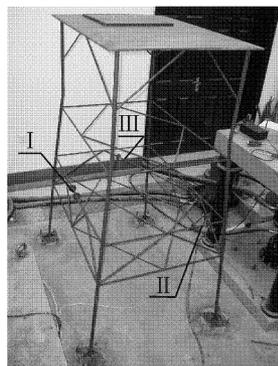


图4 平台物理缩尺模型

模型安装后,在顶层甲板、3层水平支撑与桩腿的16个连接节点处分别安装了 $x, y$ 方向32个加速度传感器,如图5所示数值模型的红点位置。采用力锤冲击激励,获得模型未损伤时的振动响应信号并识别结构的低阶模态,如表2和图6所示,可见平台1阶振型为 $x$ 方向,2阶为 $y$ 方向,3阶为扭转。

在损伤诊断模型试验中,设置如图7所示的

表2 平台模态频率识别结果

阶数	1阶	2阶	3阶
频率	4.76	4.98	7.67
方向	$x$ 方向	$y$ 方向	扭转

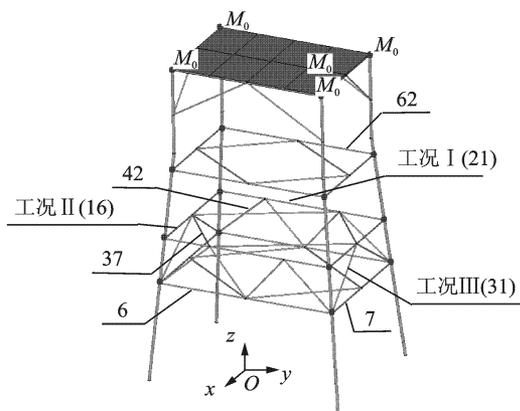


图5 传感器布置方案

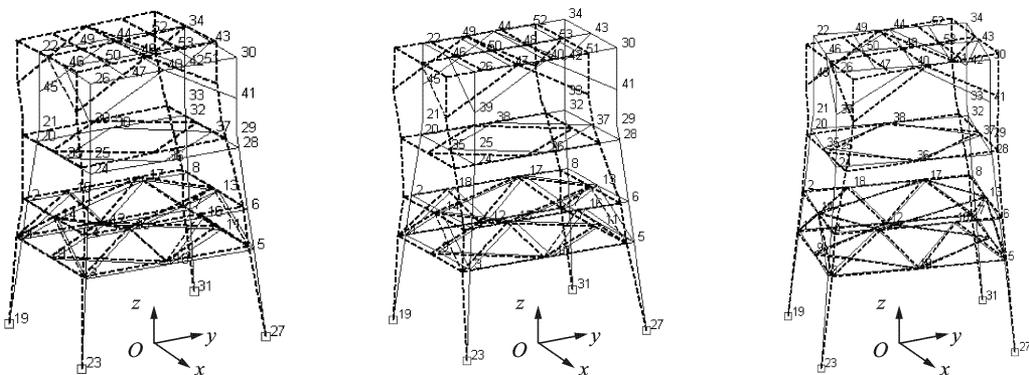


图6 平台模型前3阶模态振型识别结果

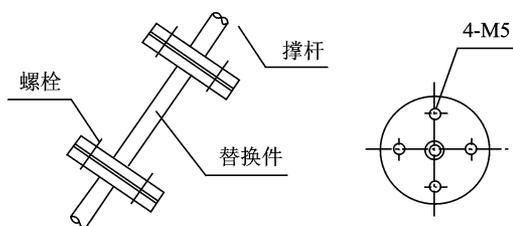


图7 模拟构件损伤的替换件

兰接头改接替换件来模拟杆件发生损伤,拆开两端法兰接头取下替换件,模拟构件完全损伤;安装杆件尺寸小的替换件,模拟构件部分损伤。同样采用力锤冲击激励,获得模型损伤后的振动响应信号并识别结构模态参数,作为式(1)和式(2)中的实测模态频率和振型输入遗传算法程序进行损伤诊断。

试验中,取下第2层某横撑模拟该构件完全损伤,如图4所示工况 I (21 单元)。将修正后的目标函数变换为适应度函数,即用实测的第1阶和第2阶模态振型分别输入遗传算法程序,诊断出两根损伤构件,如图5所示。其中输入第1阶振型诊断出42杆损伤,输入第2阶振型诊断出21杆损伤,即工况 I 所示

构件,具体损伤构件可采用超声波等物理探测方法实际探测确定。表3为用未修正和修正后的目标函数变换为适应度函数在几种工况下的识别结果,各工况损伤杆件在数值模型中的位置如图5所示。由图可见,用未修正的目标函数进行诊断,其诊断结果受到测量噪声的影响,而修正后的目标函数改进了该方法的鲁棒性,提高了海洋平台结构损伤诊断的可靠性。

表3 几种工况下不同损伤指标的损伤识别结果

工况	损伤杆件位置	对应数值模型损伤杆件	损伤指标		
			第1阶振型	第2阶振型	前2阶振型
工况 I	第2层 $y$ 方向横撑	21	42	21	62
工况 II	第2层 $x$ 方向横撑	16	16	37	6
工况 III	1,2层间 $x$ 方向斜撑	31	31	7	31

## 4 结束语

遗传算法能够应用于海洋平台的损伤诊断领域

域,且能够同时识别出结构损伤的位置和程度。与其他方法相比,它具有需要信息少、算法简便和全局寻优等优点。针对目标平台制作了其物理缩尺模型,用法兰接头改接替换件模拟构件发生损伤,采用遗传算法进行损伤诊断,并针对测量噪声的存在,根据某方向构件发生损伤对 $x, y$ 两方向振型影响的不同,提出修正的目标函数,即仅将某一方向振型误差函数输入遗传算法程序来判断构件损伤位置,试验证明,用修正后的目标函数进行诊断具有更好的鲁棒性。

### 参 考 文 献

- [1] 李宏男,高东伟,伊廷华. 土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 151-166.  
Li Hongnan, Gao Dongwei, Yi Tinghua. Advances in structural health monitoring systems in civil engineering[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2): 151-166. (in Chinese)
- [2] 黄维平, 王晓燕, 唐世振. 基于结构部分结点振动相应信息的海洋平台损伤诊断研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 218-221, 226.  
Huang Weiping, Wang Xiaoyan, Tang Shizhen. Damage diagnosis of offshore structures based on responses of a part of nodes [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(5): 218-221, 226. (in Chinese)
- [3] 郭佳凡, 于吉全. 基于遗传算法的大型钢塔结构的节点损伤参数识别方法[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2009, 31(4): 379-383.  
Guo Jianfan, Yu Jiquan. Recognition approach of joint damage parameters in high-rising tower structures on the basis of genetic algorithms [J]. Journal of Hubei University: Edition of Natural Science, 2009, 31(4): 379-383. (in Chinese)
- [4] 黄维平, 王晓燕. 基于改进CHC遗传算法的结构损伤诊断研究[J]. 振动、测试与诊断, 2007, 27(3): 232-235.  
Huang Weiping, Wang Xiaoyan. Structural damage diagnosis based on improved chc algorithm [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007, 27(3): 232-235. (in Chinese)
- [5] 易伟建, 刘霞. 基于遗传算法的结构损伤诊断研究[J]. 工程力学, 2001, 18(2): 64-71.  
Yi Weijian, Liu Xia. Damage diagnosis of structures by genetic algorithm [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(2): 64-71. (in Chinese)
- [6] 王小平, 曹立明. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [7] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

**第一作者简介:**刘娟,女,1977年12月生,讲师、博士研究生。主要研究方向为海洋结构健康监测。曾发表《二重结构编码遗传算法在传感器配置中的应用》(《振动、测试与诊断》2004年第24卷第4期)等论文。

E-mail: qianqian070712@163.com