

基于二重结构编码遗传算法的传感器优化配置

田 莉, 陈换过, 张利绍, 陈文华

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 传感器的优化配置是一类组合优化问题, 针对此问题, 文章以应变模态保证准则 SMAC 为优化原则, 以 SMAC 矩阵的最大非对角元为目标函数, 针对满足传感器数量不变的约束条件问题, 提出改进的二重结构编码遗传算法, 并通过现有文献中的算例验证本文所提算法的高效性。算例结果表明, 该遗传算法优化结果优于现有的遗传算法, 将其应用于复合材料板模型损伤诊断的传感器优化配置是可行的。

关键词: 传感器优化配置; 应变模态; 二重结构编码; 遗传算法

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

0 引 言

结构健康监测技术^[1], 利用集成在结构中的传感器网络实时监控结构对环境激励(人或自然)的响应信号, 并从中获取与结构健康状况相关的信息, 结合先进的信号处理方法, 提取结构损伤参数, 判定结构是否损伤以及损伤的位置和程度。近年来, 国内外学者普遍认同的损伤评估方法是试验模态分析法。进行模态试验的第一步就是获得被测结构激励和响应的时域信号, 而传感器的配置位置是首先要确定的。不适当的传感器配置将影响识别参数的精度, 而且传感器本身需要一定的成本, 与其配套使用的数据采集和处理设备的代价也都较高。从经济方面考虑, 希望采用尽可能少的传感器。因此, 安排有限数量的传感器来实现对结构状态改变信息的最大采集, 成为了结构健康监测的关键技术之一。

要进行传感器的优化配置, 首先要确定合理的、能反映测试要求的优化配置准则^[2]。目前发展起来的优化配置准则很多, 使用较多的是模态置信度准则(modal assurance criterion, MAC), MAC 准则通常都基于位移模态, 但研究表明, 位移模态对结构

初期的微小损伤不敏感。由于应变是位移的导数, 位移的微小变化将被放大, 引起应变类参数的显著变化。本文采用基于应变模态的试验模态分析法, 构造应变模态保证准则(strain modal assurance criterion, SMAC)。

传感器的优化配置^[3]最重要的是选择适当的优化方法。传统的优化算法主要有: 有效独立法、运动能量法、Guyan 模型缩减法等, 这些方法都有各自的局限性。近些年来, 一些新颖的智能优化方法得到了发展, 主要有模拟退火法、遗传算法和神经网络法等, 这些新的算法为解决复杂问题提供了新的思路 and 手段。遗传算法是目前为止应用最为广泛的方法。遗传算法^[4-5](genetic algorithms, GA)由 Holland 教授创立, 其基本思想是模拟生物进化的优胜劣汰原则, 将组合优化问题的一组可行解视为染色体/个体, 由一定数量的可行解构成种群, 通过自然选择、交叉、变异等具有生物意义的遗传算子来实现对种群的更新与迭代, 以搜索全局最优解。

传统的遗传算法通常采用二进制编码, 但对于传感器优化配置问题, 若采用二进制编码方法, 在进行交叉变异操作时就会因改变基因码 1 的个数而改

收稿日期: 2011-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(50805132); 教育部博士点基金(200803380001); 浙江省科技计划项目(2009C14037); 浙江省重点科技创新团队(2011R50005)

作者简介: 田 莉(1987-), 女, 宁夏中宁人, 硕士研究生, 主要从事机械动力学和结构健康监测方面的研究。

通讯作者: 陈换过, 电子邮箱: E-mail: chen8025@126.com

变传感器的数量,传统的 GA 通常用惩罚策略来满足传感器数量不变的约束条件,但是惩罚函数设定不当会掩盖目标函数的优化。为此,本文提出一种改进的遗传算法——二维结构编码遗传算法,并通过某文献中的算例^[6]来验证该算法的高效性。

1 数学模型

传感器优化配置问题是一类特殊的背包问题,将给定的传感器配置在最优位置上,其数学模型实际上是一个 0-1 规划问题^[7]。如果第 i 个基因码为 1,则将传感器布置在第 i 个自由度上;如果第 i 个基因码为 0,则该自由度处不布置传感器。假设传感器数目为 m ,候选测点数目为 n ,其数学模型可表示为,

$$\left. \begin{array}{l} \text{Maximize Fitness}(X) \\ \text{Subject to } \sum_{i=1}^n x_i = m \\ x_i = 0 \text{ or } 1 \quad i = 1, \dots, n \end{array} \right\} \quad (1)$$

关键问题是如何表达 x_i 使得目标函数最大化。

2 改进的二重结构编码遗传算法

传统的遗传算法通常采用二进制编码,但对于传感器优化配置问题,若采用二进制编码方法,在进行交叉变异操作时就会因改变基因码 1 的个数而改变传感器的数量,传统的 GA 通常用惩罚策略来满足传感器数量不变的约束条件,但是惩罚函数设定不当会掩盖目标函数的优化。本文采用二重结构编码遗传算法来满足约束条件。此外,采用基于应变模态的试验模态分析法,构造了应变模态保证准则 SMAC。

2.1 应变模态保证准则 SMAC

位移模态和应变模态都反映了结构的固有特征,具有正交性,依据模态保证准则的定义,MAC 矩阵^[8-9]可以表示为:

$$MAC(i, j) = \frac{|\{\Phi_i\}^T \{\Phi_j\}|^2}{(\{\Phi_i\}^T \{\Phi_i\})(\{\Phi_j\}^T \{\Phi_j\})} \quad (2)$$

其中 $[\Phi] = [\{\phi_1\}, \{\phi_2\}, \dots, \{\phi_i\}, \dots, \{\phi_m\}]$, 为选取的 m 阶正则化位移振型矩阵,上标 T 表示转置,下标 i, j 分别表示第 i 阶、第 j 阶振型。与 MAC 矩阵的定义类似,SMAC 矩阵可表示为:

$$SMAC(i, j) = \frac{|\{\Psi_i\}^T \{\Psi_j\}|^2}{(\{\Psi_i\}^T \{\Psi_i\})(\{\Psi_j\}^T \{\Psi_j\})} \quad (3)$$

其中 $[\Psi] = [\{\Psi_1\}, \{\Psi_2\}, \dots, \{\Psi_i\}, \dots, \{\Psi_m\}]$, 为应变模态矩阵,上标 T 表示转置,下标 i, j 分别表示第 i 阶、第 j 阶应变模态矢量。由上式可以看出,SMAC 矩阵的非对角元素 $SMAC(i, j), (i \neq j)$ 代表

了应变模态向量的交角状况。当其为 0 时,表明第 i 向量和第 j 向量相互正交,而当其为 1 时,表明两向量不可分辨;故测点的布置应力求使 SMAC 矩阵的最大非对角元小于某个阈值,阈值的选取应根据试验对象及设备精度而定,Carne 建议在较为复杂的结构中可取至 0.25。

2.2 适应度函数的设定

GA 在搜索进化的过程中直接用适应度值作为遗传操作的依据。适应度函数基本上依靠优化问题的目标函数来确定。在 GA 中,适应度是最大化问题,而基于应变模态保证准则的目标函数是求最小值,因此需将目标函数的极小化问题转化为适应度函数的最大化问题。因 SMAC 矩阵的值是 0 到 1 之间的数,所以构造如下适应度函数:

$$F(x) = 1 - f(x) \quad (4)$$

其中 $f(x) = \max\{SMAC(i, j)\}, (i \neq j)$ 。

2.3 初始种群的产生

初始种群的好坏对算法收敛速度有一定影响。本文假定种群规模为 $popsiz$,随机产生 $N \times popsiz$ 个可行解,计算每个解的适应度值,从中选取适应度值较大的 $popsiz$ 个可行解构成初始种群 pop 。

2.4 二重结构编码

编码是设计遗传算法时的一个关键步骤。二重结构编码方法如表 1 所示。个体染色体由变量码和附加码两行组成。上行附加码表示传感器可布置的位置,下行变量码由 0/1 表示是否在该位置布置传感器(值为 1,即布置;为 0,则不布置)。

表 1 二重结构编码

附加码	$u(1)$	$u(2)$	\dots	$u(i)$	\dots	$u(n)$
变量码	$y_u(1)$	$y_u(2)$	\dots	$y_u(i)$	\dots	$y_u(n)$

对某个体编码时,首先采用洗牌方法产生上行的附加码,然后随机生成下行相对应的变量码,构成一个个体的二重结构编码。对于上述二重结构编码,其交叉和变异算子都与传统 GA 不同,需重新设计。

2.5 交叉算子

采用双切点交叉的方式设计交叉算子。在二重结构编码中,如果采用通常的交叉算子,产生新个体的上行附加码就会出现重复,从而产生矛盾的个体。本文采用部分映射交叉(partially matched crossover, PMX)的方法来解决双切点交叉引起的非法性。PMX 操作只针对个体的上行附加码,具体步骤是首先在父个体中随机选取两个交叉点,互换两点间的匹配段,然后根据匹配段确定的映射关系将未交换部分恢复合法性,即可生成两个子个体。以上

步骤可用图 1 来说明,其中“|”表示交叉点。

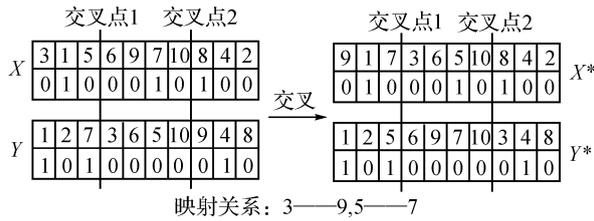


图 1 二重结构的 PMX 示意

2.6 变异算子

对于二重结构编码的变异操作,采用逆位变异遗传算子,即对父个体随机选择两个变异点,只将两点间的上行附加码按相反顺序重新排列,如图 2 所示。

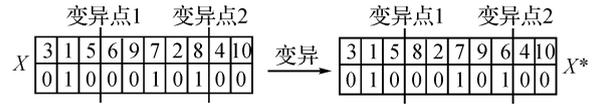


图 2 二重结构的逆位变异示意

2.7 选择操作及精英策略

根据个体适应度值的大小,采用轮盘赌选择法进行群体选择,即适应度越高的个体被选中的几率越大。为了不丢失最优解,在选择过程中实施精英策略,即将性能最好的个体保留下来,待算法完成交叉、变异操作后,用最优个体替换下一代种群中的最差个体,确保种群适应度不被降低。

综上所述,算法实现的流程如图 3 所示。

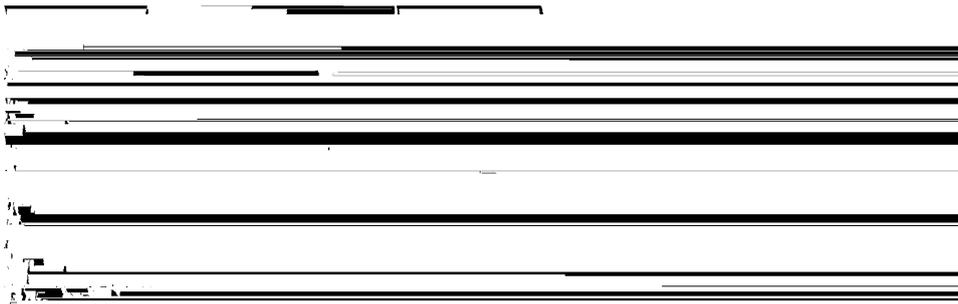


图 3 算法流程

算法的部分代码:

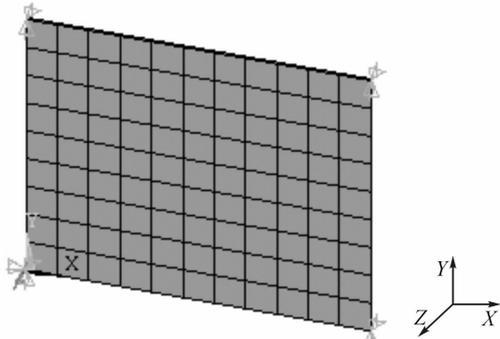
```
while g<= NG && p<= fix(NG/2)%以最大进化代数或最优解连续多代未变化为终止条件
    newpop=select(pop, fitvalue, popsize);%轮盘赌选择
    newpop=crossover(newpop, pc, popsize, chromosome_length);%交叉操作
    newpop=mutation(newpop, pm, popsize, chromosome_length);%变异操作
    freedom_matrix=freedomjz(newpop, sensors);%求解种群的自由度矩阵
    fitvalue=fit(motaizx, freedom_matrix);%计算个体适应度值
    %精英选择策略,最优个体直接进入子代
    [minfit rk]=min(fitvalue);%寻找适应度最小的个体
    newpop(2 * rk - 1,:) = jychromosome(1,:);%二重结构编码的附加码
    newpop(2 * rk,:) = jychromosome(2,:);%二重结构编码的变量码
    pop=newpop;%子代种群替换父代解群
    freedom_matrix=freedomjz(pop, sensors);%求解新一代种群的自由度矩阵
```

```
fitvalue=fit(motaizx, freedom_matrix);%计算适应度值
[bestfreedom, bestfit, place]=best(freedom_matrix, fitvalue, popsize);%寻找最优个体
if bestfit>gbest
    gbest=bestfit;
    gbestindi=bestfreedom;
    jychromosome=[pop(2 * place - 1,:);pop(2 * place,:)];
    jyfit=bestfit;
    p=0;
else p=p+1;%每一代最优解连续不变的次数
end
everybestfit(g)=gbest;%记录每代的最优值
everybestindi(g,:)=gbestindi;%记录每代的最优个体自由度
g=g+1;%进化进程
end
```

3 实例分析

为验证本文提出的传感器优化配置算法的高效性,选择文献[6]中的复合材料四端简支板结构为算

例,利用有限元分析软件 ANSYS 建立其有限元模型,见图 4(a)。复合材料的弹性参数分别为: $E_x = 38.6 \text{ GPa}$, $E_y = 8.27 \text{ GPa}$, $G_{xy} = G_{xz} = 4.14 \text{ GPa}$, $G_{yz} = 3.10 \text{ GPa}$, $\mu_{xy} = \mu_{xz} = 0.26$, $\mu_{yz} = 0.52$, 密度 $\rho = 1033 \text{ kg/m}^3$ 。简支板选用板壳单元 shell63 模拟,几何尺寸为 $220 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。



(a) 有限元模型

48	56	64	72	80	88	96	104	112	120
47	55	63	71	79	87	95	103	111	119
46	54	62	70	78	86	94	102	110	118
45	53	61	69	77	85	93	101	109	117
44	52	60	68	76	84	92	100	108	116
43	51	59	67	75	83	91	99	107	115
42	50	58	66	74	82	90	98	106	114
41	49	57	65	73	81	89	97	105	113

(b) 节点编号

图 4 复合材料四端简支板有限元模型

有限元模型划分 99 个单元,120 个节点,每个节点有 3 个自由度,观察其前 10 阶振型图,发现模型主要在 Z 方向有变形,所以设定只考虑 Z 方向的位移模式。又因实际布置时,四边较难安置传感器,故传感器测点的选择范围为:41_z~120_z(其中数字为节点号,下标字母 z 为方向),共 80 个测点,见图 4(b)。考虑到结构的低阶位移模式具有较大的参与系数,且损伤诊断以低阶位移模式为依据,因此只选择前 5 阶模态作为优化的目标。表 2 列出了由有限元计算的前 5 阶模态频率。

表 2 前 5 阶模态频率

阶次	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶	第 5 阶
频率/Hz	73.987	137.80	157.11	224.10	359.01

本文取与文献[6]相同的参数进行运算。设种群规模 $popsize$ 为 30,交叉概率 P_c 为 0.7,变异概率 P_m 为 0.08,终止进化代数为 300,SMAC 矩阵最大非对角元素值满足设计要求的阈值为 0.01,利用

本文所提遗传算法进行传感器优化配置。将优化结果与文献[6]中结果进行对比,结果见表 3。

表 3 两种算法的结果对比

传感器数目	优化方法	适应度值	SMAC 矩阵最大非对角元素值
25	文献算法	0.982 8	0.017 2
	本文算法	0.986 5	0.013 5

本文算法与文献中遗传算法在应变模态保证准则 SMAC 下的结果比较,本文算法优化结果更优,因此该算法应用于复合材料结构模型损伤诊断的传感器优化配置是可行的。

利用本文优化算法得到的传感器优化配置结果如下:

随着传感器数目的增加,SMAC 矩阵最大非对角元的变化曲线如图 5 所示。可以看出,当传感器数目超过一定值后,随着传感器数目的增加,目标函数数值变化并不明显。当配置 14 个传感器时,SMAC 矩阵最大非对角元素值为 0.005 2,就已经达到了很好的优化效果,因此本算例最佳配置数目是 14 个,相应的配置位置如表 4 所示。

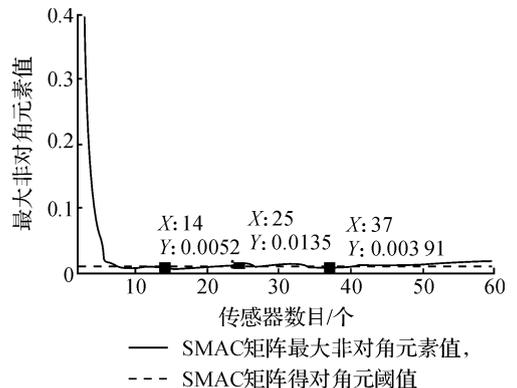


图 5 SMAC 矩阵最大非对角元的变化曲线

表 4 传感器最优配置

传感器序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
节点编号	41	45	48	57	59	71	72	81	90	96	102	113	116	120

图 6 给出了布置 14 个传感器时遗传算法寻优过程的历代最大适应度变化曲线。该曲线表明,在遗传算法进化至 40 代时,适应度最大值为 0.994 8,其对应 SMAC 矩阵的最大非对角元值为 0.005 2,此时的 SMAC 矩阵如图 7 所示。

因本文有限元模型的节点编号顺序与文献[6]中不一致,图 8 给出了两种方案的测点在结构上的布设位置图,其中数字表示节点编号,实心圆点表示测点位置。对比可知,本文所述的遗传算法优化结果要优于文献[6]中的方法。

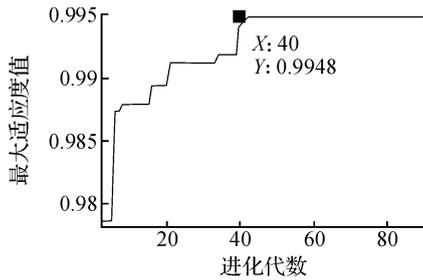


图 6 历代最大适应度变化曲线

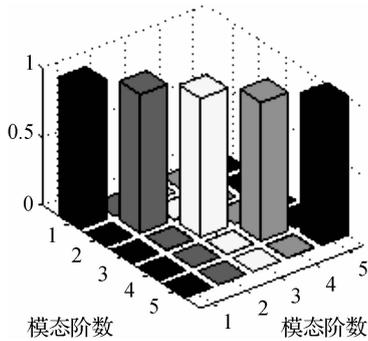
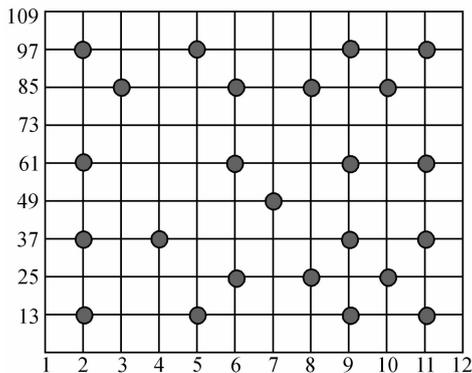


图 7 SMAC 矩阵柱状图

48	56	64	72	80	88	96	104	112	120
47	55	63	71	79	87	95	103	111	119
46	54	62	70	78	86	94	102	110	118
45	53	61	69	77	85	93	101	109	117
44	52	60	68	76	84	92	100	108	116
43	51	59	67	75	83	91	99	107	115
42	50	58	66	74	82	90	98	106	114
41	49	57	65	73	81	89	97	105	113

(a) 本文测点位置



(b) 文献[6]中测点位置

图 8 测点布置方案

4 结 论

提出了一种基于应变模态矩阵非对角元素最小化的二重结构编码遗传算法,结合有限元分析软件 ANSYS,得到了一种新的传感器优化配置方法,在此基础上编写了 MATLAB 搜索最佳测点的程序,并对一复合材料四端筒支板结构进行传感器优化配置,给出了测前五阶振型情况传感器的配置位置。结果表明:本文算法比现有的遗传算法具有相对的优势,能够利用较少的传感器实现结构整体状态的检测,搜索能力、精度、可靠性和效率均有所提高。

参考文献:

- [1] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 18-22.
- [2] 许 强. 模态测试中传感器优化布设的初步研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2007.
- [3] Montalvão D, Maia N M M, Ribeiro A M P. A Review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials[J]. Shock and Vibration Digest, 2006, 38(4): 295-324.
- [4] Roy, Tarapada. Genetic algorithm based optimal design for vibration control of composite shell structures using piezoelectric sensor and actuators [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2009, 5 (1): 45-60.
- [5] 张连振, 黄 侨, 王潮海. 基于多目标遗传算法的传感器优化布点研究[J]. 工程力学, 2007, 24(4): 168-172.
- [6] 董晓马. 智能结构的损伤诊断研究及其传感器优化配置 [M]. 河南: 黄河水利出版社, 2008: 103-104.
- [7] 宗周红, 孙建林, 徐立群, 等. 大跨度连续刚构桥健康监测加速度传感器优化布置研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(2): 150-158.
- [8] 刘 娟, 黄维平. 二重结构编码遗传算法在传感器配置中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(4): 281-284.
- [9] 袁爱民, 戴 航. EI 法和 MAC 法在模态试验传感器优化布置中应用比较[J]. 工业建筑, 2008, 38(增刊): 344-347.

Optimal Sensor Placement Based on an Improved Dual-Structure Coding Genetic Algorithm

TIAN Li, CHEN Huan-guo, ZHANG Li-shao, CHEN Wen-hua

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Optimal sensor placement (OSP) is a critical issue in the construction and implementation of an effective structural health monitoring system; it is a combinatorial optimization problem. To solve the problem, this paper uses a strain modal assurance criterion (SMAC) and takes the maximum off-diagonal element of an SMAC matrix as a target function. A dual-structure coding genetic algorithm is developed to solve the constraint problem of unchanging number of sensors. The proposed algorithm is validated by an example in literature [6], and the results clearly show that the proposed algorithm performs better than other genetic algorithms. Therefore, this method is feasible in the optimal sensor placement of composite laminates aimed at damage diagnosis.

Key words: optimal sensor placement; strain modal; dual-structure coding; genetic algorithms

(责任编辑: 杨元兆)

(上接第 676 页)

Analysis of Laser Heterodyne Interferometric Straightness Measurement Errors Induced by Wollaston Mirror Tilting

ZHANG Hua-ye, ZHANG En-zheng, YAN Li-ping, CHEN Ben-yong

(Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In this paper, a method of measuring the straightness error and its position was developed based on laser heterodyne interferometry. The measurement error of straightness as well as the displacement caused by the pitch and roll angles of the Wollaston mirror were analyzed. One corresponding mathematical model was achieved and the simulation was carried out. The simulation experiments show that the error caused by the pitch and roll angles of the Wollaston mirror is a sinusoidal error. The measurement errors of the straightness error and of the position error produced by 1° of the pitch angle are about 100 and 1 nm, respectively. The measurement errors of the straightness error and of the position error produced by $15''$ of the roll angle are approximately 700 and 15 nm, respectively.

Key words: heterodyne interferometer; wollaston mirror; straightness; pitch angle; roll angle

(责任编辑: 朱松英)