

文章编号: 1000-8055(2010)10-2223-06

复合材料板壳任意位置处载荷识别

宋 振, 郑世杰

(南京航空航天大学 航空宇航学院

智能材料与结构航空科技重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 提出了一种受载单元判别法, 根据遗传算法生成的染色体所对应的载荷作用点的横、纵坐标和每个单元四条边间的几何关系, 判断出集中载荷作用的单元, 再根据力的等效分配原则, 把载荷等效分配到所在单元的节点上, 进而基于有限元分析和遗传算法自身优越的全局搜索能力实现作用于复合材料结构网格节点或单元内部任意位置处的载荷识别. 与现有的神经网络识别法和有限元反分析法相比, 该方法具有能够识别非网格节点处的载荷的优点, 且仿真算例表明其识别精度更高.

关 键 词: 遗传算法; 载荷识别; 有限元法; 等效分配; 自诊断

中图分类号: TB381

文献标识码: A

Load identification of arbitrary position for composite plates and shells

SONG Zhen, ZHENG Shi jie

(The Aeronautical Key Laboratory for Smart Materials and Structures,

College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: A discriminance method was proposed to identify the element with concentrated load, which was judged by the geometrical relationship between the abscissa, vertical coordinates of load point generated from genetic algorithm (GA) and four edges of every element. Furthermore, the load was allocated to nodes of the element by the equivalent distribution principle. Finally, the location of arbitrary concentrated load was identified by finite element analysis and the superior global search capacity of GA. Compared with the identification methods of neural network and inverse finite element analysis method. The presented method is able to identify the concentrated load locating at the interior of a element, and the numerical examples show that this method has higher accuracy.

Key words: genetic algorithm; load identification; finite element method; equivalent distribution; self diagnosis

在航空航天工程中, 常常遇到这样的问题: 结构所承受的载荷不好确定, 甚至还有不可预知的冲击载荷, 如何依据某些传感器的测试结果和必要的分析方法, 识别出未知载荷的位置和大小是评估空天结构的健康状态、实现其剩余寿命预测

的前提. 有限元分析在结构载荷识别中发挥着重要的作用, 其与以人工神经网络、遗传算法为代表的智能算法相结合的载荷识别方法被国内外学者广泛采用^[1-5]. 从理论角度看, 神经网络能够识别出作用于非有限元网格节点处的载荷, 但考虑到

收稿日期: 2009-09-29; 修订日期: 2009-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(10772077, 50830201); 航空科学基金(2007ZD52047)

作者简介: 宋振(1986-), 男, 山东枣庄人, 硕士生, 研究方向为结构健康监测. E-mail: songzhen212@163.com

要数十倍地增加训练样本的数量,显著降低网络的学习速度,提高其计算成本,特别是考虑到神经网络的预测性能不十分稳定^[6],常出现部分点的预测精度不高等问题,因此基于神经网络预测板壳结构非网格节点处的载荷是很难实现的.另一方面,基于有限元和数值优化算法相结合^[7]的有限元反分析法,常常建立以位移、应变、频率等为特征参数的目标函数,通过高斯-牛顿迭代法的最速梯度下降或遗传算法的随机搜索进行载荷识别^[5,7-11].鉴于有限元法是以节点等效载荷为计算参数的,而连续变量的优化设计不可能保证每次给出的载荷作用位置的迭代解都恰巧位于有限元网格的节点上,现有的有限元反分析法都采用的是离散变量的优化设计方法,或辅以神经网络技术对载荷位置进行判断.考虑到工程问题的复杂性,本文提出了一种受载单元判别法,根据载荷作用点的横、纵坐标和每个单元四条边间的几何关系,判断出集中载荷作用的单元,进而把载荷等效地分配到所在单元的节点上,基于遗传算法自身优越的全局搜索能力实现复合材料结构任意位置的载荷识别.

1 压电元件电荷响应的计算

力电耦合的变分方程可写为

$$\int_V \rho(\delta \mathbf{u})^T \ddot{\mathbf{u}} dV + \int_V \sigma^T \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV - \int_V \mathbf{D}^T \delta \mathbf{E} dV^p = \delta W \quad (1)$$

其中

$$\sigma = C \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{e}^T \mathbf{E}; \quad \mathbf{D} = \mathbf{e} \boldsymbol{\varepsilon} + \kappa \mathbf{E}$$

式(1)中 σ 为应力, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变, $\mathbf{E}$ 为电场强度, $\mathbf{D}$ 为电位移, C 为弹性刚度矩阵, κ 为介电常数矩阵, $\mathbf{e}$ 为压电应力常数矩阵, $\mathbf{e}^T$ 为 $\mathbf{e}$ 的转置矩阵, 含上标 p 的项仅适用于压电微元, 不含上标 p 的项则同时适用于结构微元和压电微元.

本文采用的单元模式为八节点 EAS(加强假定应变)固体壳单元,电自由度的插值模式同文献[12],坐标、位移插值为常规的标准形式,由应变定义,逆变应变为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_b = (\mathbf{X}_{,a}^T \mathbf{U}_{,b} + \mathbf{X}_{,b}^T \mathbf{U}_{,a})/2$$

其中

$$a, b = \xi \ \eta \ \zeta \quad (2)$$

此外本文中采用如下的 ANS(假定自然应变)和 EAS 模式以克服固体单元用于薄板壳分析时表现出的过高剪切应变能和厚度闭锁等问题^[12-13]

$$\tilde{\gamma}_{\xi \xi} = [\gamma_{\xi \xi}]_{\xi}, \quad \tilde{\gamma}_{\eta \eta} = [\gamma_{\eta \eta}]_{\eta}, \quad \tilde{\varepsilon}_{\zeta} = [\varepsilon_{\zeta}]_{\zeta} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} [\gamma_{\xi \xi}]_{\xi} &= \frac{1-\eta}{2} \gamma(0, -1, 0) + \frac{1+\eta}{2} \gamma(0, 1, 0) \\ [\gamma_{\eta \eta}]_{\eta} &= \frac{1-\xi}{2} \gamma(-1, 0, 0) + \frac{1+\xi}{2} \gamma(1, 0, 0) \\ [\varepsilon_{\zeta}]_{\zeta} &= N_1 \varepsilon(-1, -1) + N_2 \varepsilon(1, -1) + \\ &\quad N_3 \varepsilon(1, 1) + N_4 \varepsilon(-1, 1) \\ \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{\zeta b}^{\text{EAS}} &= \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 1 & \xi & \eta & \xi \eta \end{bmatrix} \Delta \lambda = \mathbf{B}_{\zeta b}^{\text{EAS}} \Delta \lambda \quad (4) \end{aligned}$$

式中 $\xi \ \eta \ \zeta$ 为等参坐标, λ 是加强假定应变中的内部参数,将在单元级中凝聚掉.在应变中忽略关于 ζ 的二次项,综合考虑后得

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_\Lambda &= \boldsymbol{\varepsilon}_m + \zeta \boldsymbol{\varepsilon}_b = \mathbf{B}_m \mathbf{U} + \zeta \mathbf{B}_b \mathbf{U} = \mathbf{B}_\Lambda \mathbf{U} \quad (5) \\ \boldsymbol{\varepsilon}_s &= \mathbf{B}_s \mathbf{U} \quad (6) \\ \boldsymbol{\varepsilon}' &= \boldsymbol{\varepsilon}'_m + \zeta \boldsymbol{\varepsilon}'_{\zeta b} = \mathbf{B}'_m \mathbf{U} + \zeta \mathbf{B}'_{\zeta b} \lambda = \mathbf{B}'_{\zeta} \mathbf{U} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_\Lambda &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}'_\Lambda \\ \boldsymbol{\varepsilon}_\Lambda \end{bmatrix} = \mathbf{T}_\Lambda \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}'_\Lambda \\ \boldsymbol{\varepsilon}_\Lambda \end{bmatrix}, \quad \Lambda = m, b \\ \boldsymbol{\varepsilon} &= \begin{bmatrix} 2\boldsymbol{\varepsilon}'_{x'} \\ 2\boldsymbol{\varepsilon}'_{y'} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_t \begin{bmatrix} 2\boldsymbol{\varepsilon}'_{\xi} \\ 2\boldsymbol{\varepsilon}'_{\eta} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}' = \mathbf{T}_z \boldsymbol{\varepsilon}_\zeta \quad (8) \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{T}_\Lambda, \mathbf{T}_t, \mathbf{T}_z$ 为坐标转换矩阵, $\mathbf{U}$ 表示单元节点位移矢量.

将上述各式代入变分方程(1),即可推导出力电耦合的有限元单元方程,经装配及凝聚掉电自由度后可求出总的节点位移,再带入式(8)即可求得各单元的应变. PZT(铅钛酸铅)传感器,法向方向电场强度为 0,由力电耦合的本构方程不难得到压电元件产生的电位移与薄板壳结构表面的应变关系为

$$D_3 = e_{31} \boldsymbol{\varepsilon}_x + e_{32} \boldsymbol{\varepsilon}_y + e_{33} \boldsymbol{\varepsilon}_z \quad (9)$$

则压电元件集聚电荷为

$$q(t) = \iiint_V (e_{31} \boldsymbol{\varepsilon}_x + e_{32} \boldsymbol{\varepsilon}_y + e_{33} \boldsymbol{\varepsilon}_z) dx dy dz \quad (10)$$

其中 V 为压电传感器的体积.

2 载荷识别算法

2.1 载荷识别问题求解的基本思路

压电智能结构载荷识别问题是典型的力学反问题,求解的要旨在于反演作用在结构表面的未知载荷的位置和大小,使其对应的结构表面若干压电元件的电荷响应的计算值 q_i 在最小二乘意义下逼近压电元件的实测值 $\tilde{q}_i$, 相应的目标函数为

$$O_{bj} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q}_i)^2} \tag{11}$$

其中 n 为压电传感器的数量, 考虑到解的唯一性^[14], 文中取 4, 且 4 个传感器均匀分布在结构的 4 个角点附近. 作为理论计算阶段, 本文暂用已知载荷作用下的计算电荷值代替实验电荷值.

近年来随着智能算法的快速发展, 神经网络、遗传算法等被广泛应用于力学反问题的求解. 其中基于生物进化理论发展起来的遗传算法是一种广为应用的、高效的随机搜索与优化方法. 其基于染色体群的并行搜索, 不依赖于目标函数的梯度信息, 带有猜测性质的选择、交叉、变异等遗传操作, 具有自组织、自适应和自学习性, 故本文拟采用遗传算法进行求解.

编码方式的选择是遗传算法设计中要考虑的首要问题, 现有的优化类载荷识别方法大多以载荷作用的节点号为寻优变量, 具体到遗传算法中即是对结构有限元网格的所有节点进行二进制编码, 由节点号与坐标的对应关系确定载荷的作用位置. 这种方法简单、高效, 但仅能识别作用于节点上的载荷, 在工程中没有任何实际应用价值. 从理论上来看, 载荷识别问题中的待识别载荷的大小是任意的, 其作用点可位于受载结构的任意位置处. 要想识别作用于任意位置处的载荷, 首先必须对载荷作用点的横、纵坐标进行编码, 鉴于二进制编码处理连续函数时存在的离散化误差等问题, 本文对载荷大小以及载荷作用位置变量采用浮点数编码的方法, 其取值范围作为约束条件由所考虑问题的实际情况和算法的求解规模确定. 一个利用浮点数编码方法的染色体串如图 1 所示, 其解码后表示大小为 17.568 的载荷作用在坐标为(0.3532, 0.373 1)的位置上.

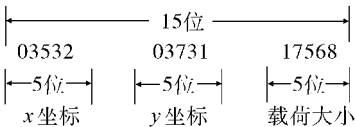


图 1 浮点数编码的染色体串

Fig. 1 Float coded chromosome string

群体规模的大小是影响遗传算法收敛性和计算效率的另一关键因素, 种群过小, 容易收敛到局部最优解; 种群过大, 则会显著降低计算效率, 本文算例的种群大小设定为 25.

2.2 受载单元判别法

众所周知, 有限元计算最基本的前提之一就是要把作用在结构上的载荷等效的分配到单元的节点上去, 但对于浮点数编码的遗传算法而言, 很难保证在进化过程中产生的每条染色体所对应的载荷作用位置均恰好位于单元的节点处, 因此判别载荷作用点所处的单元(本文称之为受载单元) 成为问题的关键所在. 实际上这也正是大多数基于优化求解的载荷识别算法共同面临的一大棘手问题. 为此本文提出如下的受载单元判别法.

如图 2 所示, 所谓判别受载单元, 实质上就是判断坐标为 x_A, y_A 的载荷作用点 A 是否位于如图所示①, ②, ③, ④四条边围成的狭小区域内. 令单元逐个循环, 由每个单元上表面四个节点的坐标, 不难写出上述四条边的直线方程为

$$y - k_j x - b_j = 0, \quad j = 1, 2, 3, 4$$

其中 k_j, b_j 分别为四条边的斜率和在 y 轴上的割距.

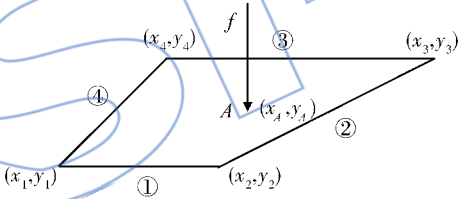


图 2 集中力作用下的四节点单元

Fig. 2 Four node element under concentrated load

$$\text{令} \quad Y_j = y_A - k_j x_A - b_j$$

当点位于直线 $y = k_j x + b_j$ 的上方时, $Y_j > 0$. 则不难看出, 当且仅当 $Y_1 Y_3 \leq 0$ 时, 点 A 位于边①, ③间的区域内.

而判断点 A 是否位于边②, ④间的区域的依据为

1) 当 $k_2 k_4 \geq 0$ 时, 当且仅当 $Y_2 Y_4 \leq 0$ 时, 点 A 位于边②, ④间的区域内;

2) 当 $k_2 k_4 \leq 0$ 时, 当且仅当 $Y_2 Y_4 \geq 0$ 时, 点 A 位于边②, ④间的区域内.

考虑到本文的载荷识别方法主要用于判别作用于板壳结构表面的法向载荷, 因此由虚功方程可推导出受载单元任意一个节点的等效节点力为

$$\begin{bmatrix} P_{jx} \\ P_{jy} \\ P_{jz} \end{bmatrix} = N_j(\xi_j, \eta_j) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_z \end{bmatrix}, \quad (j = 1, 2, 3, 4)$$

其中 $N_j(\xi_j, \eta_j)$ 为受载单元第 j 个节点的形函数在集中力作用点 A 处的值, ξ_j, η_j 的值可根据等

参元的理论由点 A 的直角坐标 x_A, y_A 和受载单元四个节点的直角坐标计算得到.

2.3 遗传算子

选择: 选择运算采用随机竞争选择机制. 每次从父代种群中随机的选择两对个体, 分别取两对个体中适应度较大的个体, 为下一步的交叉运算做准备. 为了使当前种群中的最优个体不被破坏, 本文在采用随机竞争选择的基础上采用了最佳保留选择, 即将当前群体中最高适应度的个体结构完整地复制到下一代群体中, 其优点是能够保证遗传算法终止时得到的最后结果是历代出现过的最高适应度的个体.

交叉: 常规的交叉运算是指将群体内的各个个体随机搭配成对, 对每一对个体, 以某个概率 (称为交叉概率) 交换它们之间的部分染色体. 本文采用的是均匀交叉, 交叉概率为 0.5, 利用选择算子得到的两个适应度较大的个体进行均匀交叉, 把交叉后得到的一个个体作为子代种群中的一个个体.

变异: 变异运算是指将个体染色体编码串中的某些基因座上的基因值用该基因座的其他等位基因来替换, 从而形成新的个体. 其与选择和交叉算子结合后, 能够避免由于选择和交叉运算而造成的某些信息丢失, 保证遗传算法的有效性, 决定了遗传算法的局部搜索能力. 本文采用基本位变异, 变异概率为 0.2.

如此循环执行 n 次, 即得到子代种群的 n 个个体.

3 数值模拟分析

为验证本文所提方法的可行性及有效性, 本文分别对方形薄板、圆形板和圆柱壳结构进行了载荷识别研究, 表 1~ 表 3 中带* 的为实际载荷的大小和作用位置, 带下划线的为相关参考文献的识别结果, 不带下划线的为本文的识别结果. 算例 1, 3 中的载荷工况分别取自参考文献[3~4], 算例 2 中的载荷工况系在取值范围内随机生成. 在所有算例中, 利用本文方法识别载荷位置和大小的过程中未出现结果过早收敛或者陷入局部最优等现象. 此外, 在载荷大小相同, 及其他参数的设置相同的情况下, 对同一位置的多次载荷识别得到的最优结果是一致的, 从而说明了本方法识别的稳定性. 文中算例都是限定遗传迭代次数为 400 次迭代.

3.1 方形板

四边夹支方板长 1 m, 厚 5 mm, 材料参数为: $\mu_{12} = \mu_{21} = 0.14, G = 3.79 \text{ GPa}, E_1 = E_2 = 21.63 \text{ GPa}$. 本文采用 20×20 的均匀网格模型, 4 只厚度为 1 mm 的 PZT 传感器分别布置在 (4, 4), (4, 17), (17, 4), (17, 17) 四个单元处. 表 1 对本文与文献[3]的识别结果进行了对比, 对比两组识别的结果可以发现, 利用本文提出的识别方法所得到的结果更准确.

表 1 方形板结构的识别结果

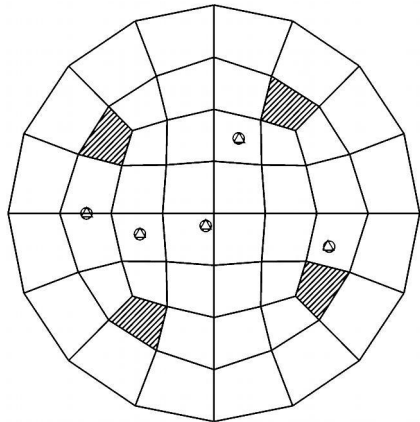
Table 1 Identification results of rectangular plate

载荷的大小、位置			相对误差/ %		
f/N	x/m	y/m	$\Delta f/f$	$\Delta x/x$	$\Delta y/y$
2.000*	0.650*	0.650*			
2.011	0.651 1	0.650 2	0.550	0.169	0.031
<u>2.024</u>	<u>0.642</u>	<u>0.664</u>	<u>1.20</u>	<u>1.23</u>	<u>2.15</u>
6.000*	0.450*	0.450*			
6.000	0.450 5	0.449 6	0	0.111	0.089
<u>5.884</u>	<u>0.458</u>	<u>0.460</u>	<u>1.93</u>	<u>1.78</u>	<u>2.22</u>

3.2 圆形板模型

如图 3 所示的周边固支圆形板, 直径 1 m, 板厚 0.1 m, 采用非均匀网格划分, 板上共有 4 个传感器, 分布在如图 3 所示的斜线部分, 用来测量载荷作用下产生的电荷量. 薄板材料参数为

$$\begin{aligned} E_1 &= 108 \text{ GPa}, \quad E_2 = E_3 = 10.3 \text{ GPa}, \\ G_{12} &= G_{23} = G_{13} = 7.17 \text{ GPa}, \\ \mu_{12} &= \mu_{23} = \mu_{13} = 0.28. \end{aligned}$$



○ 载荷实际作用位置
△ 识别的载荷位置

图 3 圆形板的网格及 PZT 位置图

Fig. 3 Grid of circular plate and the PZT location

PZT 传感器材料参数为

$E_1 = E_2 = 66.7 \text{ GPa}$, $E_3 = 52.6 \text{ GPa}$,

$G_{12} = 25.3 \text{ GPa}$, $G_{23} = G_{13} = 45.5 \text{ GPa}$,

$\mu_2 = \mu_3 = 0.32$, $\mu_{13} = 0.6$,

$d_{31} = d_{32} = -185 \times 10^{-12} \text{ C/N}$,

$d_{33} = 400 \times 10^{-12} \text{ C/N}$,

$d_{24} = d_{15} = 650 \times 10^{-12} \text{ C/N}$.

表 2 给出了系统对所施加的集中载荷的识别结果,可见本方法对于作用在非节点处的载荷也能得到较好的识别结果.图 4 所示的为识别结果随迭代代数的变化曲线,图中算例取自表 2 中第 4 行算例.

表 2 圆形板结构的识别结果

Table 2 Identification results of circular plate

识别结果			载荷实际大小、位置			相对误差/ %		
力	载荷位置		力	载荷位置		力	载荷位置	
f/N	x/m	y/m	f^*/N	x^*/m	y^*/m	$\Delta f/f^*$	$\Delta x/x^*$	$\Delta y/y^*$
15.549	0.479 9	0.470 0	15.55	0.48	0.47	0.006	0.021	0
12.342	0.320 1	0.450 1	12.35	0.32	0.45	0.065	0.031	0.022
16.520	0.561 2	0.677 9	16.58	0.56	0.68	0.362	0.214	0.309
12.915	0.191 0	0.499 6	12.95	0.19	0.50	0.270	0.526	0.080
16.547	0.777 1	0.419 8	16.66	0.78	0.42	0.678	0.372	0.048

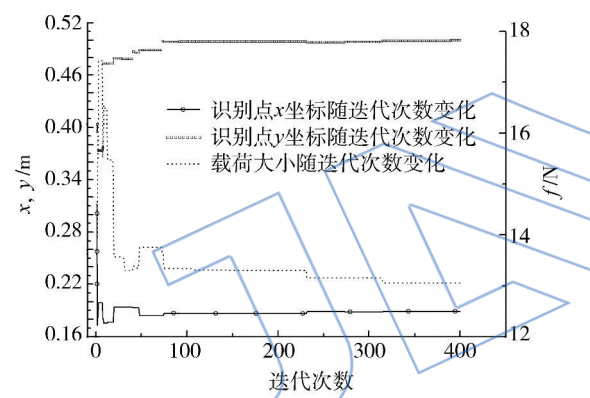


图 4 识别结果随迭代次数的变化

Fig. 4 Variation of recognition results with the age of iterations

3.3 复合材料圆柱壳

如图 5 所示,一四边固支的横观各向同性层合圆柱壳,其铺层形式为 $[-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]$,壳的上表面均匀布置四片厚度为 1.5 mm 的压电传感器,圆柱壳及压电片的材料参数同 3.2 节算例.表 3 中对本文与文献[4]中利用径向基函数神经网络的识别结果进行了对比.其中文献[4]采用 14×14 的有限元网格,表中的载荷作用位置均位于其节点处,而本文采用 10×10 的单元划分,载荷作用位置都是位于单元的内部,识别结果表明本文的识别精度明显优于文献[4].

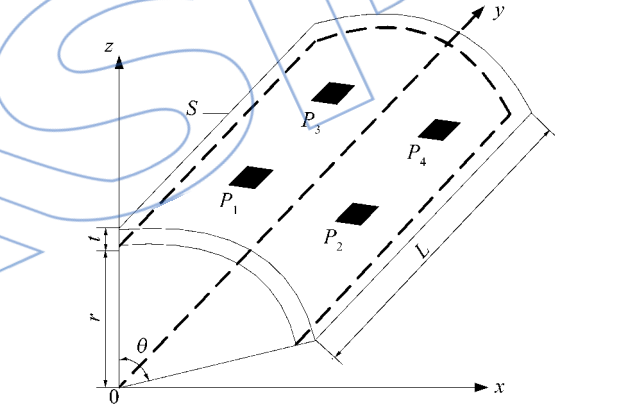


图 5 复合材料圆柱壳结构

Fig. 5 Piezoelectric laminated shell

表 3 复合材料圆柱壳模型的识别结果

Table 3 Identification results of the composite shell

载荷的大小、位置			相对误差/ %		
f/N	x/mm	y/mm	$\Delta f/f$	$\Delta x/x$	$\Delta y/y$
20°	108.9°	90.7°			
19.8	107.7	91.0	1.00	1.10	0.33
<u>21.4</u>	<u>105.5</u>	<u>92.5</u>	<u>7.00</u>	<u>3.12</u>	<u>1.98</u>
32°	163.4°	108.9°			
31.4	166.1	109.5	1.88	1.65	0.55
<u>33.3</u>	<u>171.7</u>	<u>109.8</u>	<u>4.06</u>	<u>5.08</u>	<u>0.83</u>
32°	163.4°	145.1°			
31.8	164.0	145.0	0.63	0.37	0.07
30.1	171.0	152.1	5.94	4.65	4.82

4 结 论

作用于任意位置处的载荷识别是结构健康监测技术中的难点之一, 本文提出了一种受载单元判别法, 把载荷等效地分配到所在单元的节点上, 通过对载荷作用点的横、纵坐标和载荷大小进行浮点数编码, 将遗传算法和力电耦合有限元分析相结合, 实现了复合材料板壳上非节点处载荷的准确识别, 提高了计算精度. 与现有文献中仅讨论采用均匀网格划分的模型不同, 本文给出了一个圆板的载荷识别仿真算例, 结果表明针对作用于单元节点上的载荷, 本文方法的识别精度优于现有方法, 更重要的是本文方法对于作用于单元内部的载荷也有非常高的识别精度.

参考文献:

- [1] Haywood J, Coverley P T, Staszewski W J. An automatic impact monitor for a composite panel employing smart sensor technology [J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(1): 265-271.
- [2] Chandrashekhara K, Okafor A C, Jiang Y P. Estimation of contact force on composite plates using impact induced strain and neural networks [J]. *Composites Part B: Engineering*, 1998, 29(4): 363-370.
- [3] 周晚林, 王鑫伟, 胡自立. 压电智能结构荷载识别方法的研究[J]. *力学学报*, 2004, 36(4): 491-495.
ZHOU Wanlin, WANG Xinwei, HU Zili. On load identification for piezoelectric smart structures [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 36(4): 491-495. (in Chinese)
- [4] 董会丽, 郑世杰. 基于RBF神经网络的复合材料层合壳荷载识别[J]. *工程力学*, 2008, 25(3): 64-67.
DONG Huili, ZHENG Shijie. Load identification for a composite laminated shell using radial base function neural network [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(3): 64-67. (in Chinese)
- [5] 郑世杰, 郭腾飞, 董会丽, 等. 基于混合编码遗传算法和有限元分析的压电结构荷载识别[J]. *计算力学学报*, 2009, 26(3): 330-335.
ZHENG Shijie, GUO Tengfei, DONG Huili, et al. Load identification of piezoelectric structures by using genetic algorithm and finite element analysis [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, 26(3): 330-335. (in Chinese)
- [6] Hagan M T, Demuth H B, Beale M H. 神经网络设计[M]. 戴蔡, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
Hagan M T, Demuth H B, Beale M H. *Neural network design* [M]. Translated by DAI Cai. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese)
- [7] 王书法, 邬月琴, 李卓球. 智能结构荷载识别的有限元反分析方法[J]. *力学与实践*, 2000, 22(5): 17-19.
WANG Shufa, WU Yueqin, LI Zhuoqiu. Finite element inverse analysis of load identification for intelligent structures [J]. *Mechanics in Engineering*, 2000, 22(5): 17-19. (in Chinese)
- [8] Gaul L, Hurlbauss S. Identification of the impact location on a plate using wavelets [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1998, 12(6): 783-795.
- [9] Meo M, Zumpano G, Piggott M. Impact identification on a sandwich plate from wave propagation responses [J]. *Composite Structures*, 2005, 71(3-4): 302-306.
- [10] Gaul L, Hurlbauss S. Determination of the impact force on a plate by piezoelectric film sensors [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1999, 69(9-10): 691-701.
- [11] Hu N, Fukunaga H, Matsumoto S. An efficient approach for identifying impact force using embedded piezoelectric sensors [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(7): 1258-1271.
- [12] ZHENG Shijie, WANG Xinwei, CHEN Wanji. The formulation of a refined hybrid enhanced assumed strain solid shell element and its application to model smart structures containing distributed piezoelectric sensors/actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2003, 13(4): N43-N50.
- [13] 郑世杰. 八节点压电固体单元的再研究[J]. *压电与声光*, 2004, 26(4): 321-324.
ZHENG Shijie. The comprehensive investigation of eight node piezoelectric solid element [J]. *Piezoelectrics and Acoustoptics*, 2004, 26(4): 321-324. (in Chinese)
- [14] 周晚林, 王鑫伟. 反求压电薄板智能结构荷载的有限元逆逼近法[J]. *计算力学学报*, 2004, 21(2): 164-168.
ZHOU Wanlin, WANG Xinwei. Inverse finite element analysis of load on piezoelectric thin plate smart structure [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2004, 21(2): 164-168. (in Chinese)