

文章编号:1001-9081(2010)03-0786-03

带飞行因子的粒子群算法的铝蜂窝夹层板模型修正

孔宪仁¹, 秦玉灵¹, 罗文波²

(1. 哈尔滨工业大学 卫星技术研究所, 哈尔滨 150001; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100086)

(eric2004ren@163.com)

摘要: 蜂窝板结构具有较高的比强度、比刚度和良好的隔热隔振、耐冲击等优点,在航空航天领域得到了广泛应用。根据等效板理论将蜂窝夹层板等效为壳单元,以试验测得的前五阶模态频率为基础,用带飞行因子的粒子群算法对其材料等效密度和刚度参数进行模型修正,修正后模型计算频率与试验值误差较原误差有了明显减小,与标准粒子群算法相比,带飞行因子粒子群算法修正后的模型能更好地逼近原结构,模型质量有了改善。证实了带飞行因子粒子群算法在模型修正过程中的可行性和有效性。

关键词: 蜂窝板; 等效板理论; 粒子群算法; 飞行因子; 材料参数; 模型修正

中图分类号: TP206+.3 **文献标志码:** A

Model updating of aluminum honeycomb sandwich plate based on particle swarm optimization algorithm with flying factor

KONG Xian-ren¹, QIN Yu-ling¹, LUO Wen-bo²

(1. Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100086, China)

Abstract: Honeycomb sandwich plate has high specific strength, high specific stiffness and good heat insulation, vibration insulation as well as impact resistance, which makes it widely used in the aerospace engineering. The honeycomb sandwich plate was made to be equivalent to shell element according to the equivalent plate theory, and based on the first five natural frequencies of the modal test, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm with flying factor was used to update the material parameters such as the equivalent stiffness and equivalent density and the results show that the updated natural frequencies approach the test data better than the non-updated ones. Compared with the standard PSO algorithm, the Finite Element Model (FEM) updated by PSO with flying factor can approach the real structure better, which proves the validity and efficiency of this algorithm.

Key words: honeycomb sandwich plate; equivalent plate theory; Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm; flying factor; material parameter; model updating

蜂窝板是航天工业设计中理想的热防护结构,它具有较高的比强度和比刚度,导热系数小,非常适合作为未来航天器的围壁结构,特别是在现代卫星结构中,它已经成为主要的承力结构^[1]。但是由于 NASTRAN 等通用有限元软件中没有蜂窝结构的单元,致使蜂窝结构的有限元分析不能直接进行,只能将其用等效力学模型来代替^[2]。粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是近年来新兴的生物学算法,在结构优化领域得到了广泛应用,但在模型修正领域的应用才刚刚起步。粒子群算法计算简便,但仍存在在最优解附近容易持续冗余迭代等缺点。本文对算法进行改进,将飞行因子引入粒子群算法,并根据等效板理论将蜂窝夹层板等效为壳单元,用带飞行因子的粒子群算法对其材料参数进行修正,修正后的模型能更好地体现原结构的动力学特性。

1 等效板理论

1.1 等效板单元等效刚度计算

蜂窝夹层板结构通常由上、下蒙皮层以及中间的蜂窝芯层构成,等效板理论是将其等效成与原夹层板不等厚度的各向同性的壳体,壳体不仅能像弯曲板一样承受垂直板面的剪力和弯矩,

还能像平面应力板一样承受面内的拉压和剪切载荷^[3]。

作为弯曲板,壳元符合小挠度薄板的可希霍夫(Kirchhoff)假设,硬板理论刚度为:

$$D_B = \frac{EH^3}{12(1-\mu^2)} \quad (1)$$

由此推出蜂窝夹层板刚度:

$$D_0 = \frac{E(H-t)^2t}{2(1-\mu^2)} \quad (2)$$

由于蜂窝夹层板 $H \gg t$, 故式(2)近似为:

$$D_0 = \frac{EH^2t}{2(1-\mu^2)} \quad (3)$$

作为平面应力板,壳体只能承受面内载荷,其平面应力刚度:

$$D_p = EH \quad (4)$$

蜂窝夹层板受到面内载荷时,必然由上下面板均匀承受,则面内刚度:

$$D_{p0} = 2Et \quad (5)$$

其中: H 为整个蜂窝夹层板的厚度; t 为上下面板厚度; E, μ 为弹性模量和泊松比。

根据等效定义,蜂窝夹层板弯曲刚度和面内刚度都与等

收稿日期:2009-09-11;修回日期:2009-10-23。 基金项目:长江学者创新团队发展计划项目(IRT0520)。

作者简介:孔宪仁(1961-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要研究方向:卫星动力学、热力学控制; 秦玉灵(1982-),女,河北石家庄人,博士研究生,主要研究方向:优化算法、模型修正; 罗文波(1968-),男,北京人,教授,主要研究方向:卫星结构动力学、模型修正。

效板相等,联立求解则等效厚度 H_{eq} ,等效刚度 E_{eq} ,等效泊松比 μ_{eq} 分别为:

$$H_{eq} = \sqrt{3}H \quad (6)$$

$$E_{eq} = 2Et/H_{eq} = 1.1547Et/H \quad (7)$$

$$\mu_{eq} = \mu \quad (8)$$

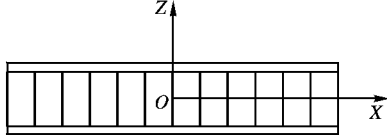


图1 蜂窝板3D有限元模型

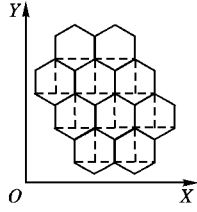


图2 蜂窝板平面模型

1.2 等效板单元等效质量计算

工程分析中一般还要进行振动分析和动力响应计算,因此对于等效壳单元还要求出等效密度^[4]:

$$\rho_{eq0} = \frac{(H - 2t)\rho_1 + 2t\rho_2}{H_{eq}} \quad (9)$$

其中: ρ_1 为蜂窝芯材料密度; ρ_2 为蜂窝面板密度; H_{eq} 为等效板厚度。

以上仅考虑蜂窝板金属部分的结构质量,实际结构中还应包括粘接面板与蜂窝芯的胶膜等,在上述等效密度基础上乘以附加质量系数 k (一般取2),则等效密度为:

$$\rho_{eq} = \frac{(H - 2t)\rho_1 + 2t\rho_2}{H_{eq}} \times k \quad (10)$$

单元等效质量为:

$$m_{eq} = \rho_{eq}AH_{eq} \quad (11)$$

其中 A 为单元面积。

2 带飞行因子的粒子群算法

传统粒子群算法中粒子位置更新时,每次粒子的飞行时间都保持不变,固定为1,这是导致粒子在最优解附近来回振荡的一个重要因素^[3],因此可以根据迭代次数来改变粒子飞行时间,提高粒子搜索能力。基于这一思想,标准粒子群算法变为^[5-9]:

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^t) \\ x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} T \end{cases} \quad (12)$$

其中 T 表示第 i 个粒子的飞行时间,在传统的粒子群算法中 $T = 1$,考虑到粒子在飞行过程中应不断接近全局最优解,飞行时间应越来越短,故令 T 线性减小,计算公式如下:

$$T = T_{\max} \left[1 - k \frac{iter}{iter_{\max}} \right] \quad (13)$$

其中: T_{\max} 为最长飞行时间; $iter$ 为当前进化代数; $iter_{\max}$ 为最大迭代次数; k 为比例系数(一般取1至4之间的整数,本文取2)。

3 带飞行因子的粒子群算法修正铝蜂窝板模型

3.1 铝蜂窝板结构参数

某雷达卫星结构安装板是铝蜂窝夹层板,上下表层厚度均为 $t = 0.3 \text{ mm}$,夹芯厚度 $h = 14.4 \text{ mm}$,则蜂窝夹芯板总厚度 $H = h + 2t = 15 \text{ mm}$,蜂窝板长和宽为 $a = b = 1 \text{ m}$,铝密度

为 $\rho = 2.7 \text{ e3 kg/m}^3$,铝弹性模量为 $E = 70 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$ 。根据等效板理论计算等效刚度和等效质量,边界条件为四角点固支如图3、4所示。

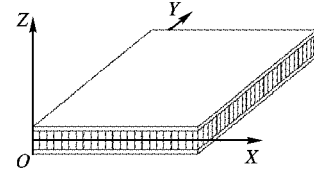


图3 蜂窝板坐标系

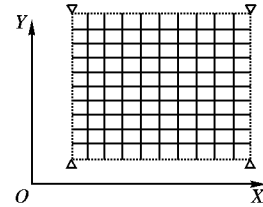


图4 等效板离散模型

3.2 模型修正适应度函数的确定

用等效板模型前5阶模态频率解析解和有限元解相对误差来评定修正后模型的优劣^[10]:

$$ER(f_i^e, f_i^c) = \left| \frac{f_i^e - f_i^c}{f_i^e} \right| \quad (14)$$

其中: f_i^e, f_i^c 分别表示第 i 阶解析计算频率和有限元计算频率。

对于第 i 阶自振频率和振型来说,式(14)中 $ER(f_i^e, f_i^c) \rightarrow 0$ 意味着好的修正结果,假定 x 表示由待修正参数所组成的向量,则模型修正的优劣可用式(15)从总体上进行度量^[4]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N ER(f_i^e, f_i^c) \quad (15)$$

模型修正问题可描述为典型的约束优化问题如下:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \min \sum_{i=1}^N ER(f_i^e, f_i^c); \quad x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}, \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (16)$$

其中: x_{\min} 和 x_{\max} 分别为修正量的最大和最小界限, N 为待修正参数的个数。

3.3 飞行因子粒子群算法模型修正

用 NASTRAN 对等效板进行模态分析,取前5阶模态频率与解析结果的前5阶频率进行比较,发现等效模型有限元计算结果虽然与解析结果近似,但仍存在差异。分析原因认为差异产生于对刚度和密度进行等效的过程中,选取等效刚度 E_{eq} 和等效密度 ρ_{eq} 的偏差量 ΔE_{eq} 和 $\Delta \rho_{eq}$ 为待修正量,粒子种群规模 $N = 30$,迭代20次。为比较带飞行因子的粒子群算法和标准粒子群算法的修正效率和精度,对两种算法选取相同修正参数和迭代次数,修正过程中适应度函数收敛曲线及修正后计算结果分别如图5和表1所示。

由图5可知,在搜索过程中两种算法的适应度函数不断减小,说明算法都能引导粒子搜索最优解。而且通过两者收敛曲线变化趋势可知,在相同迭代次数内,带飞行因子的粒子群算法比标准粒子群算法收敛程度更高。而且在程序运行过程中发现,种群越大,短时间内搜索到最优解的概率越大,而且小种群只要时间足够长,也能搜索到最优解。

表1可以比较铝蜂窝板的等效板前5阶解析解和修正前后有限元解,以相对误差为标准进行评价,可见标准粒子群算法和带飞行因子的粒子群算法修正后模态频率均比修正前有改善,标准粒子群算法修正后误差降到了8.42%,带飞行因子粒子群算法修正后频率误差降到1.19%,可见,两种算

法均能对模型进行修正,且后者较前者有更高的修正精度。

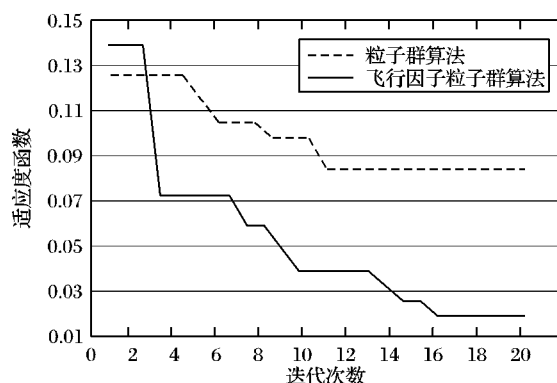


图5 适应度函数收敛曲线

表1 计算结果

参数	阶数	解析解	修正前 有限元解	修正后 PSO	修正后 飞行因子 PSO
模态 频率	1	16.177	15.782	15.820	16.132
	2	25.837	24.336	24.926	25.738
	3	41.995	40.473	41.257	41.864
	4	55.066	54.161	54.693	55.031
	5	64.631	63.744	64.471	64.529
相对 误差		$\frac{f_i - f_i^c}{f_i^c}$	—	14.89%	1.19%

4 结语

带飞行因子的粒子群算法在模型修正过程中能有效修正模型质量,修正后的模型模态频率有了明显改善。同时作为

一种生物学随机搜索算法,带飞行因子的粒子群算法本身的随机性和对结果的复现性虽然比标准粒子群算法良好,但本身仍有待改进。

参考文献:

- [1] 罗亚军,牛红攀,徐卫秀,等. 安装蜂窝板动力学特性分析及主动控制试验研究[J]. 应用力学学报, 2006, 23(2): 267-270.
- [2] 徐胜今,孔宪仁,王本利,等. 正交异性蜂窝夹层板动、静力学问题的等效分析方法[J]. 复合材料学报, 2000, 17(3): 92-95.
- [3] 祝涛,王德禹. 蜂窝芯层非线性等效弹性参数[J]. 上海航天, 2008, 25(4): 15-21.
- [4] 陈昌亚,宋汉文,王德禹,等. 卫星结构铝蜂窝板非线性振动试验与参数辨识研究[J]. 振动与冲击, 2004, 23(1): 8-11.
- [5] VENTER G, SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Particle swarm optimization [J]. AIAA Journal, 2003, 41(8): 1583-1589.
- [6] FOURIE P C, GROENWOLD A A. The particle swarm optimization algorithm in size and shape optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 23(4): 259-267.
- [7] VENTER G, SOBIESKI J S. Multidisciplinary optimization of a transport aircraft wing using particle swarm optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(1/2): 121-131.
- [8] ZITZLER E, THIELE L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271.
- [9] 张建科,刘三阳,张晓清. 飞行时间自适应调整的粒子群算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(10): 2513-2515.
- [10] 孙木楠,史志俊. 基于粒子群优化算法的结构模型修改[J]. 振动工程学报, 2004, 17(3): 350-353.

(上接第782页)

随之变大。这一结果提示委托人,当高效率的代理人人数在总代理人人数中的比例增加时,应该略微减少高效率代理人的工资,而较大幅度地减少低效率代理人的工资。

图5的结果表明:在其他参数不变的情况下,随着代理人效用比例 k_2 的增加,均衡点 (e^C, w^C) 向右上角移动, (e^B, w^B) 向左下角移动,合约均衡点 (e^C, w^C) 与 (e^B, w^B) 之间的距离由小变大。这一结果提示委托人,随着两类代理人的工作能力差距加大,激励合约应使能力强者完成更难的工作并获取更高的工资,而使能力弱者完成更易的工作并获取更低的工资。

以上量化分析方法除了可以给出定性的结果外,经完善后还能给出定量结果,用于实际激励合约的设计。

4 结语

本文通过应用SVR对效用函数建模,解决了效用函数无法用解析函数表达的问题,进而提出了逆向选择优化模型的量化计算分析方法,即在利用SVR对效用函数建模的基础上,用梯度法量化求解逆向选择优化模型。本文对两种典型的逆向选择模型(委托人达到效益最大化时,代理人在自然条件好与差两种情形下的逆向选择模型,和代理人效率类型为高和低的两种情形下的逆向选择模型)进行了定量计算和分析。由于定量计算数值结果的直观和易于理解,容易发现解析分析难以得到的信息,甚至发现已有理论模型的矛盾。本文的量化分析方法可以作为研究逆向选择理论的新方法,经完善后也可以应用于含有逆向选择的实际委托—代理合约的设计。进一步的研究主要包括:如何根据实际情形得到可用于实际合约设计的效用函数、努力程度的量度,以及设置合适的量化计算参数等。

参考文献:

- [1] STADLER I M, CASTRILLO J D P. 信息经济学引论: 激励与合约[M]. 管毅平,译. 上海: 上海财经大学出版社, 2004.
- [2] LAHIRI S K, GHANTA K C. Support vector regression with parameter tuning assisted by differential evolution technique: Study on pressure drop of slurry flow in pipeline [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2009, 26(5): 1175-1185.
- [3] CHEKMAREV D, KHOLODOVYCH V, KORTAGERE S, et al. Predicting inhibitors of acetylcholinesterase by regression and classification machine learning approaches with combinations of molecular descriptors [J]. Pharmaceutical Research, 2009, 26(9): 2216-2224.
- [4] WANG SHI-TONG, ZHU JIA-GANG, CHUNG F L, et al. Theoretically optimal parameter choices for support vector regression machines Huber-SVR and Norm_r-SVR with noisy input [J]. Soft Computing, 2005, 9(10): 732-741.
- [5] WANG S, ZHU J, CHUNG F L, et al. Experimental studies on the optimal parameter choice of Norm-r support vector regression machine Norm_r-SVR with noisy input [J]. Soft Computing, 2006, 10(3): 219-223.
- [6] ZHU JIA-GANG, WANG SHI-TONG, WU XI-SHENG, et al. A novel adaptive SVR based filter ASBF for image restoration [J]. Soft Computing, 2006, 10(8): 665-672.
- [7] 朱嘉钢,王士同,杨静宇. 鲁棒的r-支持向量回归机中参数r的选择研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(12): 1383-1386.
- [8] LI SHAN-LIANG, WANG CHUN-HUA. Linear incentive contract for principal-Agent problem with asymmetric information and moral hazard [C]// APCCAS 2006: Proceedings of the 2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 634-637.