

文章编号:1673-2812(2007)03-0439-04

复合材料浅球壳模态分析与结构优化设计

丁磊,刘人怀,王璠

(暨南大学应用力学研究所,广东 广州 510632)

【摘要】 复合材料层合壳体在航空、航天、工程结构中得到了广泛应用。结合复合材料层合浅球壳的结构特点,基于有限元分析软件 ANSYS,采用层合壳单元建立有限元模型,分析了几种壳体参数对浅球壳自振频率的影响,并采用函数逼近法和梯度寻优法相结合的方法对壳体参数进行优化设计,给出了壳体参数的最优组合,使壳体的一阶自振频率为最大,改善了壳体的动态特性,为复合材料层合浅球壳的结构设计提供了有价值的理论依据,也为进一步进行结构动力学分析奠定基础。

【关键词】 复合材料层合浅球壳;有限元;模态分析;结构优化设计;自振频率

中图分类号:TB33 文献标识码:A

Finite Element Analysis on Vibration Modes and Structure Optimal Design of the Symmetrically Laminated Orthotropic Shallow Shells

DING Lei, LIU Ren-huai, WANG Fan

(Institute Of Applied Mechanics, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

【Abstract】 Based on ANSYS system, a structural analysis of symmetrically laminated orthotropic shallow shells, which is made up of multiple layers of different materials and meshed by linear layered structural shell elements, is represented. The effects of shells parameters on the frequencies are studied detailedly. Based on the geometrical characteristics of symmetrically laminated orthotropic shallow shells, an optimal design for shells parameters about a symmetrically laminated orthotropic shallow shell by using both the sub-problem approximation optimal method and the first-order approximation optimal method is performed, which get the maximal 1st set frequency. Calculation results of a practical example show that the design method is audio-visual and rational, which are the foundation of the further dynamical analysis.

【Key words】 symmetrically laminated orthotropic shallow shells; finite element; modal analysis; structure optimal design; natural frequency

1 引言

复合材料是一类新型材料,其强度高、刚度大、质量轻,具有抗疲劳、减振、耐高温、可设计等优点^[1],在现代工程结构、航空、航天等领域中,复合材料层合壳体得到了广泛应用^[2],对壳体振动问题的研究具有重要的工程意义。本文根据壳体的动力学基本方程,用有限元法具体分析了几种壳体参数对复合材料层合浅球壳自振频率的影响,并对浅球壳的壳体结构进行优化设计,在满足浅球壳质量要求的前提下,给出了壳体参数的最佳组合,使一阶自振频率达到最大,改善了壳体的动态特性,为浅球壳的设计提供了有价值的理论依据,也为进一步进行结构动力学分析奠定基础。

2 壳体参数对自振频率的影响

2.1 有限元法的动力学基本方程

由于复合材料层合浅球壳运动方程的复杂性,可采用将结构离散成若干单元的有限元法。

首先将复合材料层合浅球壳离散成有限多个壳体单元。复合材料层合浅球壳为各向异性体,单元刚度矩阵为各向异性单元,单元刚度矩阵:

$$[K_v]' = \int_v [B_i]^T [D] [B_j] dv \quad (1)$$

式中:[D]——弹性矩阵,[B_i],[B_j]——应力、应变关系矩阵。

收稿日期:2006-08-20;修订日期:2006-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10572054);教育部科学技术研究重点资助项目(106156)

作者简介:丁磊(1982-),男,硕士研究生,研究工程力学。E-mail: dinnerdinner@163.com。

假设复合材料结构的铺层是均匀、正交各向异性材料, 则单元的弹性矩阵^[3]:

$$[D] = \left(\sum_{j=1}^m [D]_j t_j \right) / h \quad (2)$$

式中: m ——单元内铺层数, D_j ——第 j 个铺层的弹性矩阵, t_j ——第 j 个铺层的厚度, h ——单元厚度。

单元刚度矩阵 $[K_v]^e$ 和单元质量矩阵 $[M_v]^e$ 按照单元节点自由度与总体节点自由度的一一对应关系集成结构总刚度矩阵 $[K]$ 和结构总质量矩阵 $[M]$, 如果节点上有附加质量块, 则叠加到结构总质量矩阵 $[M]$ 所对应的节点自由度位置上, 根据边界条件对结构总刚度矩阵 $[K]$ 和结构总质量矩阵 $[M]$ 进行降阶, 得到给定边界条件下的结构总刚度矩阵 $[K]$ 和结构总质量矩阵 $[M]$ ^[4]。

动力学问题的有限元法基本方程为:

$$[M]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{P(t)\} \quad (3)$$

式中: $[M]$ ——结构总质量矩阵, $[C]$ ——结构总阻尼矩阵, $[K]$ ——结构总刚度矩阵, $\{\delta\}$ ——结构位移向量, $\{P(t)\}$ ——结构外激励向量。

当 $\{P(t)\} = 0$, 且忽略阻尼 $[C]$ 的影响, (3)式变为:

$$[M]\{\delta\} + [K]\{\delta\} = 0 \quad (4)$$

则自由振动的有限元方程^[5]为:

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (5)$$

式中: ω ——固有频率。当矩阵 $[K]$ 以及 $[M]$ 的阶数为 n 时, 式(5)为 ω^2 的 n 次实系数方程, 系统自振频率和振型的求解问题, 就是求矩阵特征值 λ 和特征向量 $\{\delta_n\}$ 的问题。求解(5)式可以得到复合材料层合浅球壳自由振动的固有频率和振型。

2.2 模态分析

复合材料层合浅球壳的几何尺寸如图 1 所示, 壳体中面曲率半径为 R , 外半径为 r , 壳体总厚度为 $3h$, 分 3 层 $[\alpha, 0^\circ, \beta]$ 交叉铺设且每层等厚。

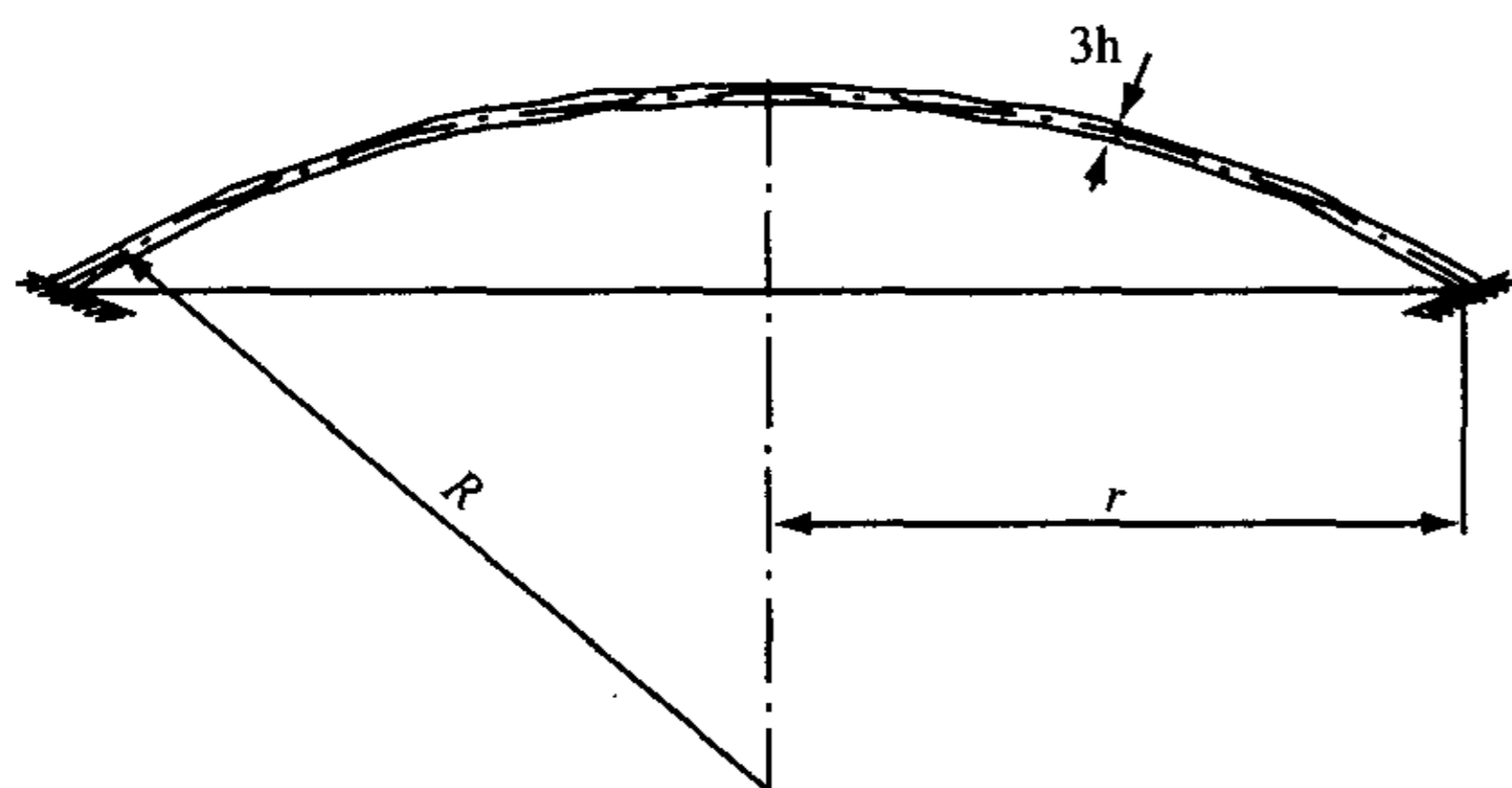


图 1 浅球壳的几何尺寸示意图
Fig.1 Geometrical construction

结合复合材料层合浅球壳的特点, 本文利用 ANSYS 软件建立有限元模型。单元采用线性、层状的结构壳单元 Shell99。Shell99 是一种 8 节点的三维壳单元, 每个节点有 6 个自由度, 该类型主要针对薄型到中等厚度的板和壳结构, 一般要求宽厚比应不小于 $10^{[6]}$ 。网格划分采用自由网格划分方法^[7], 为保证计算的精确性, 将复合材料层合浅球壳划分为 300 个层合壳单元, 节点总数共计 941 个。由此建立的有限元模型如图 2 所示。

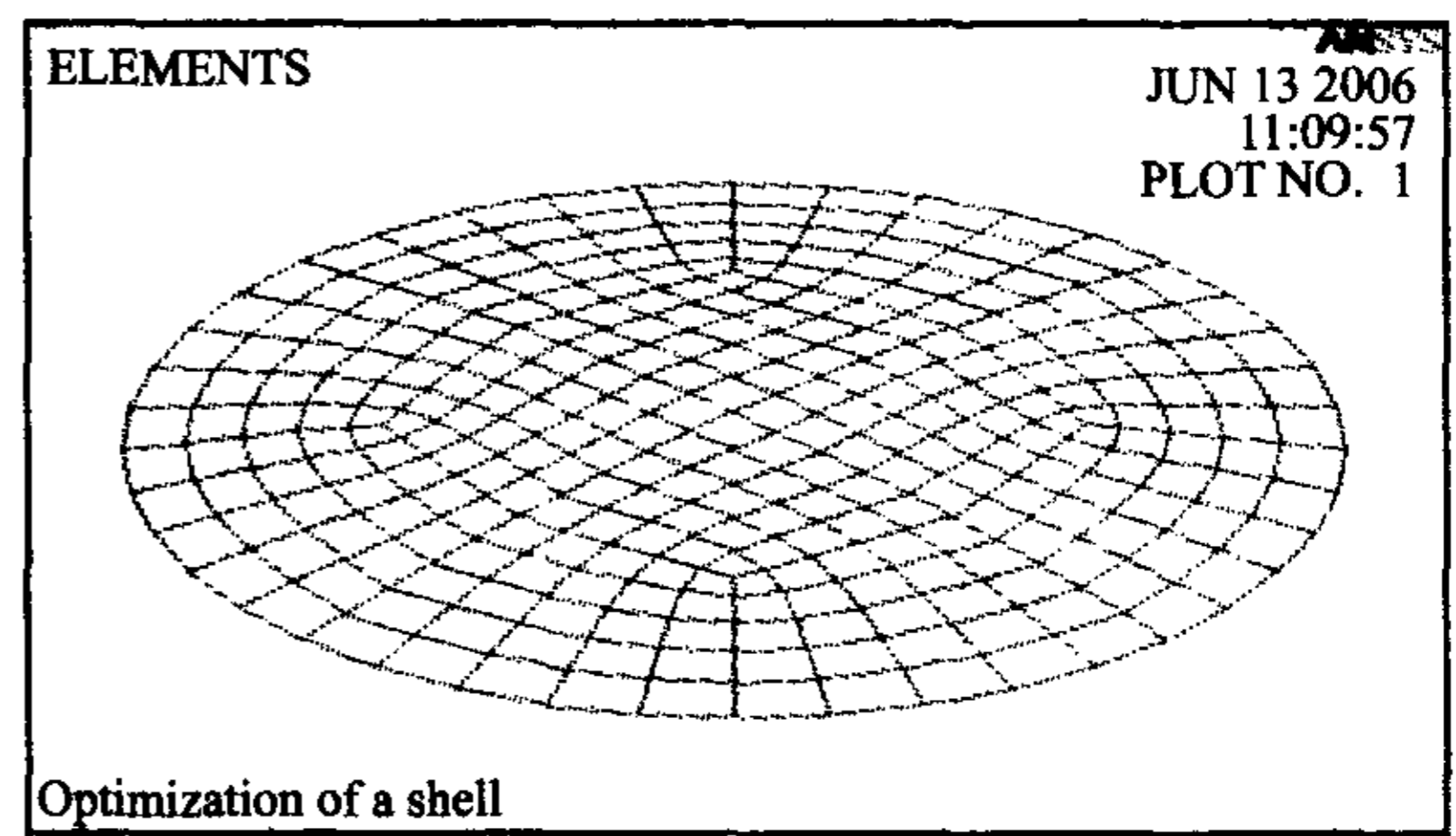


图 2 浅球壳的有限元模型示意图
Fig.2 Finite element model

模态分析采用具有较高精度的子空间法 (Subspace method)。子空间法是使用子空间迭代法的技术, 子空间迭代法通过选取 m 个 n 维向量, 线性叠加为猜想振型, 从而将计算 n 维空间的特征值问题, 转化为计算其 m 维子空间上的特征值问题。

选定以下壳体参数, 分别研究这些壳体参数对复合材料层合浅球壳自振频率的影响:

- ① 壳体总厚度 $3h$, 取每层厚度 $h = 0.01\text{m} \sim 0.2\text{m}$;
- ② 壳体中面曲率半径 R , 取值范围 $R = 35\text{m} \sim 45\text{m}$;
- ③ 铺层角度 $[\alpha, 0^\circ, \beta]$, 在此令 $\alpha = \beta$, 取值范围 $\alpha, \beta = 0^\circ \sim 90^\circ$ 。

以下所比较的浅球壳均为 3 层 $[\alpha, 0^\circ, \beta]$ 交叉铺设, 且每层等厚, 其他的壳体参数为定值: $E_2 = 8.35\text{GPa}$, $E_1 = 20 E_2$, $G_{12} = G_{13} = 0.55 E_2$, $G_{23} = 0.2 E_2$, $\rho = 1650\text{kg/m}^3$, $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{13} = 0.27$, 边界条件为周边固支。

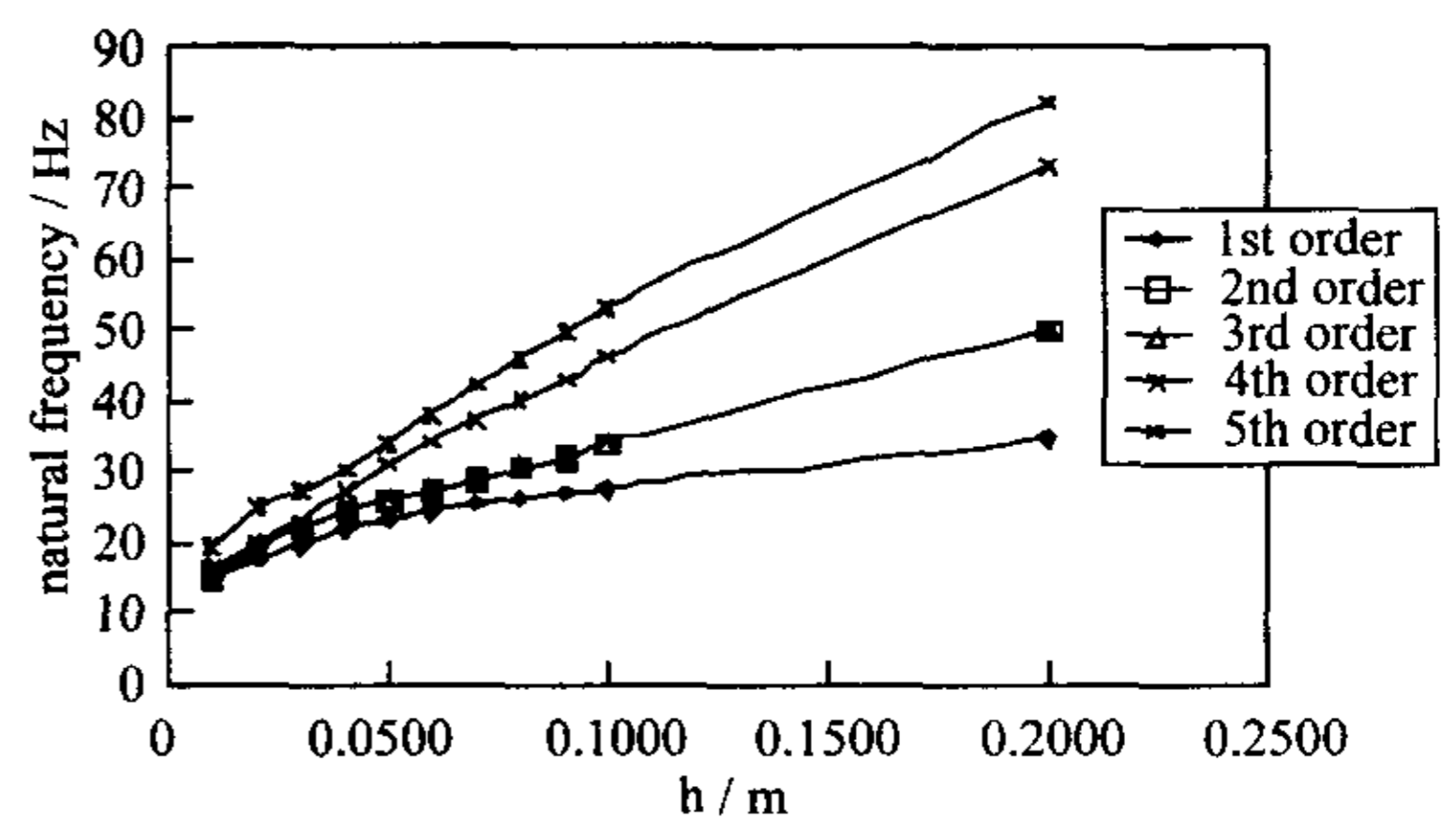


图 3 ω 随 h 的变化曲线 ($\alpha = \beta = 45^\circ, R = 40.5$)
Fig.3 Natural frequency changing curve with h

图 3 为前五阶自振频率随 h 的变化曲线, 5 条曲线反映趋势一致, ω 随 h 的增大而增大, 原因是浅球壳厚度的增加导致壳体整体刚度增大, 从而导致 ω 增加, 且当 h 在 n 较小时对频率影响较小, n 越大影响越大。图 4 为前五阶自振频率随 R 的变化曲线, 5 条曲线反映的趋势一致, ω 随 R 的增大而减小; 图 5 为前五阶自振频率随铺层角度的变化曲线, ω 随铺层角度的变化而变化, 按 $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$ 铺设时的各阶频率均最小。

分别对比 h, R, α, β 不同取值时浅球壳的各阶振型图, 观察到各阶振型图均非常相似, 壳体参数的变化基本不影响各阶振型。

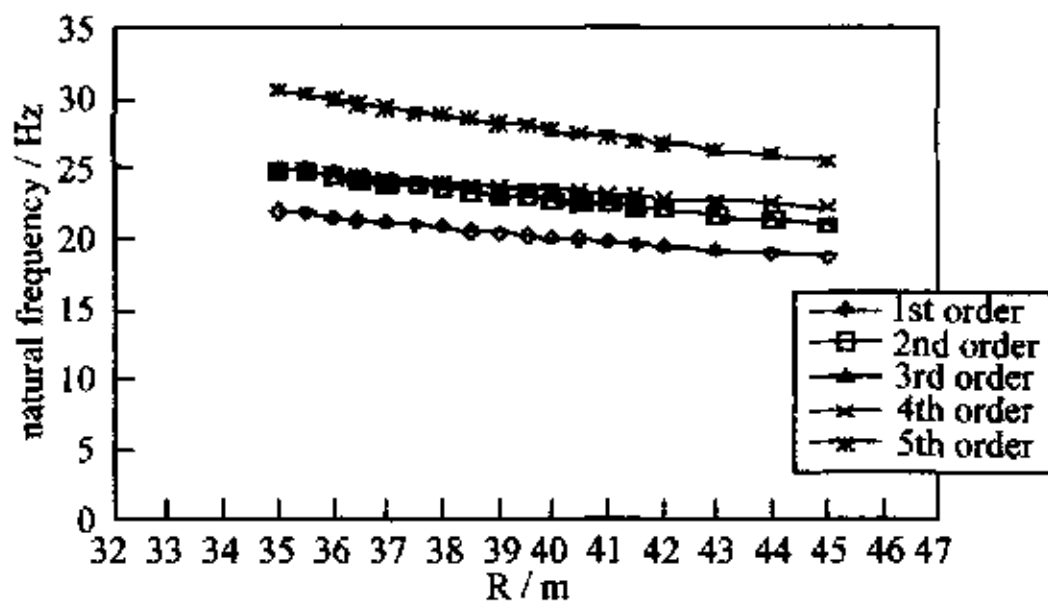


图 4 ω 随 R 的变化曲线 ($\alpha = \beta = 45^\circ, h = 0.03$)

Fig.4 Natural frequency changing curve with R

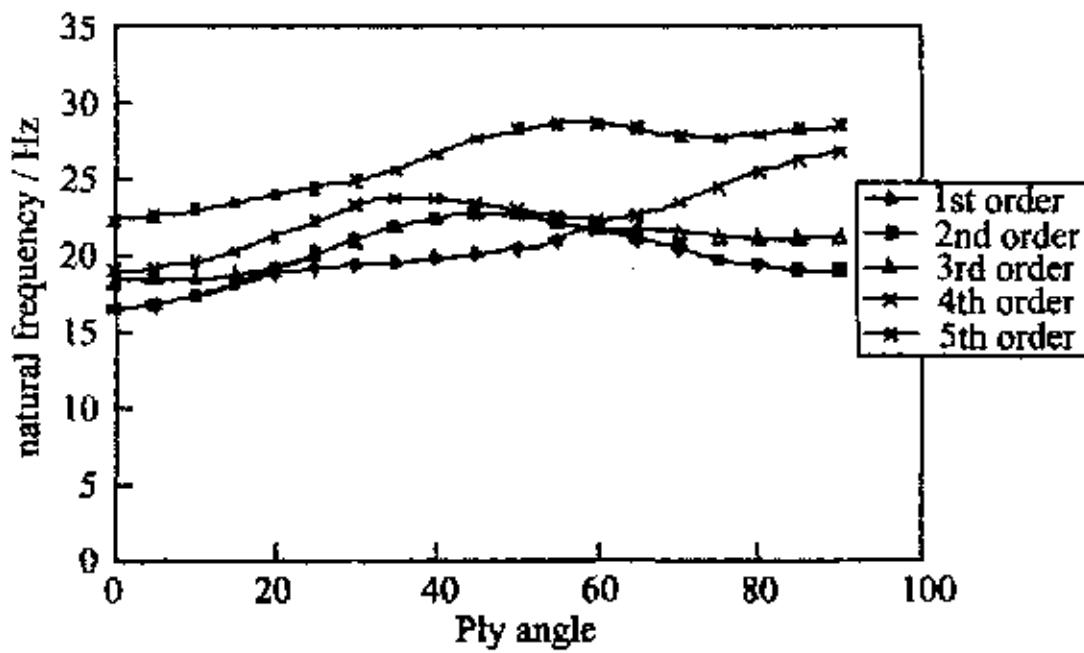


图 5 ω 随铺层角度 $[\alpha, 0^\circ, \beta]$ 的变化曲线 ($R = 40.5m, h = 0.03m$)

Fig.5 Natural frequency changing curve with ply angle

3 结构优化设计

提高壳体的一阶固有频率是提高壳体刚性、避免共振、降低振幅的有效措施^{[8][9]}。图 3 ~ 图 5 反映了 h 、 R 、 α 、 β 这几种壳体参数对浅球壳自振频率的影响,若以这几种壳体参数为设计变量,在满足浅球壳质量要求的前提下,可求得这几种壳体参数的最佳组合,使壳体的一阶自振频率达到最大,从而提高壳体刚性,提高其工作的可靠性。

3.1 基于 ANSYS 优化设计的基本原理

优化设计是一种寻找确定最优设计方案的技术。所谓最优设计方案,指可以满足所有的设计要求,而且所需的支出(如质量、面积、体积、应力、费用等)最小的方案,即最优设计方案是一个最有效率的方案。设计方案的任何方面都是可以优化的,比如尺寸、形状、支撑位置、制造费用、自然频率及材料特性等。

利用 ANSYS 进行优化设计的优化模块中包括三大变量:设计变量(DV),状态变量(SV),目标函数(OBJ)。设计变量即自变量,优化结果的取得通过改变设计变量的数值来实现;状态变量用来体现优化的边界条件,是因变量,是设计变量的函数;目标函数是最终优化的目的,也必须是设计变量的函数,并且在 ANSYS 中,目标函数只能取其最小值。ANSYS 的优化模块中支持两种优化方法,即函数逼近法(Sub-Problem)和梯度寻优法(First-Order)。函数逼近法的本质是采用最小二乘法逼近,求取一个函数面来拟合解空间,然后再对该函数面求极值。这是一种普适的优化方法,不

容易陷入局部极值点,但优化精度一般不是很高,因此多用作粗优化的手段。梯度寻优法基于目标函数对设计变量的敏感程度,是一阶、局部寻优的精优化方法。

3.2 ANSYS 优化求解

“将正确的纤维放在正确的位置”是复合材料及其结构设计的一个重要关键^[10],合理选择铺层角度是改善浅球壳动态特性的一方面,合理选择 R 、 h 等壳体参数对提高壳体刚性、避免共振也功不可没。因此,选定壳体中面曲率半径 R 、每层壳体厚度 h 和铺层角度作为优化设计的设计变量,浅球壳结构优化设计的最终目的是在满足设计变量和状态变量取值范围的要求下使壳体的一阶自振频率 ω 达到最大,其他壳体参数的取值同前。

由于在 ANSYS 中,目标函数只能取其最小值,如果要最大化壳体的自振频率 ω ,可以将问题转化为求数值 $\omega^* = C - \omega$ 或 $\omega^* = 1/\omega$ 的最小值,其中 C 是远大于 ω 的数值。采用 $C - \omega$ 的方法比用 $1/\omega$ 的方法要好,因为后者是反比关系,这在函数逼近法中不能得到准确的逼近。

浅球壳结构优化设计的数学模型为:

$$\min \omega^* = \min f(X), X = [x_1, x_2, x_3, x_4] = [R, h, \alpha, \beta]$$

$$\text{s.t. } 35 \leq R \leq 45; 0.01 \leq h \leq 0.05; 0 \leq \alpha \leq 90; 0 \leq \beta \leq 90; W_i ([W_i] = 25000).$$

其中, $f(X)$ 表示浅球壳的一阶固有频率,“s.t.”为约束条件, W_i 为浅球壳的质量。

首先建立有限元模型进行模态分析,求解完成后提取并指定状态变量 W_i 和目标函数 ω^* ,保存模态分析的求解结果。使用 ANSYS 的 Design Opt 模块进行优化设计,为取得较为精确的结果,采用两种优化方法,先用函数逼近法初步求得最优解的基本位置,再采用梯度寻优法,对最优解的位置进行更精确的确定。

在制定优化分析文件后,定义设计变量 R 的取值范围为 $35m - 45m$, h 的取值范围为 $0.01m - 0.05m$, α 、 β 的取值范围为 $0^\circ - 90^\circ$;定义状态变量的上限值为 $25000Kg$;设置目标函数为 $\omega^* = C - \omega$,为确保 ω^* 为正值,取 $C = 100$ 。设计变量、状态变量和目标函数的允差采用 ANSYS 的默认值。

首先选用函数逼近法(Sub-Problem)运行,ANSYS 优化模块中循环计算至第 7 次后,计算结果收敛。目标函数 ω^* 的收敛情况如图 6 所示,序列 2 是最佳设计序列,此时壳体参数的最佳组合为: $\alpha = 76.260^\circ, \beta = 41.196^\circ, h = 0.02552m, R = 41.924m$,对应的一阶自振频率为 $22.553Hz$,比初始设计方案的自振频率($12.868Hz$)提高了 75.26% ,优化效果十分明显。

为得到更精确的结果,在函数逼近法优化的基础上再进行下一阶梯度优化,为便于更好地收敛,把设计变量 R 的允差改为 0.01 , h 的允差改为 0.00005 , α 、 β 的允差改为 0.1 ;状态变量 W_i 的允差改为 50 ;目标函数 ω^* 的允差改为 0.1 。

选用梯度寻优法(First-Order),ANSYS 优化模块中循环计算至第 17 次,计算结果收敛。在优化结果中,序列 14 是最佳设计序列,对应的浅球壳的自振频率 $\omega = C - \omega^* = 100 - 70.183 = 29.817Hz$ 。相对于前次粗优化的设计方案,自振

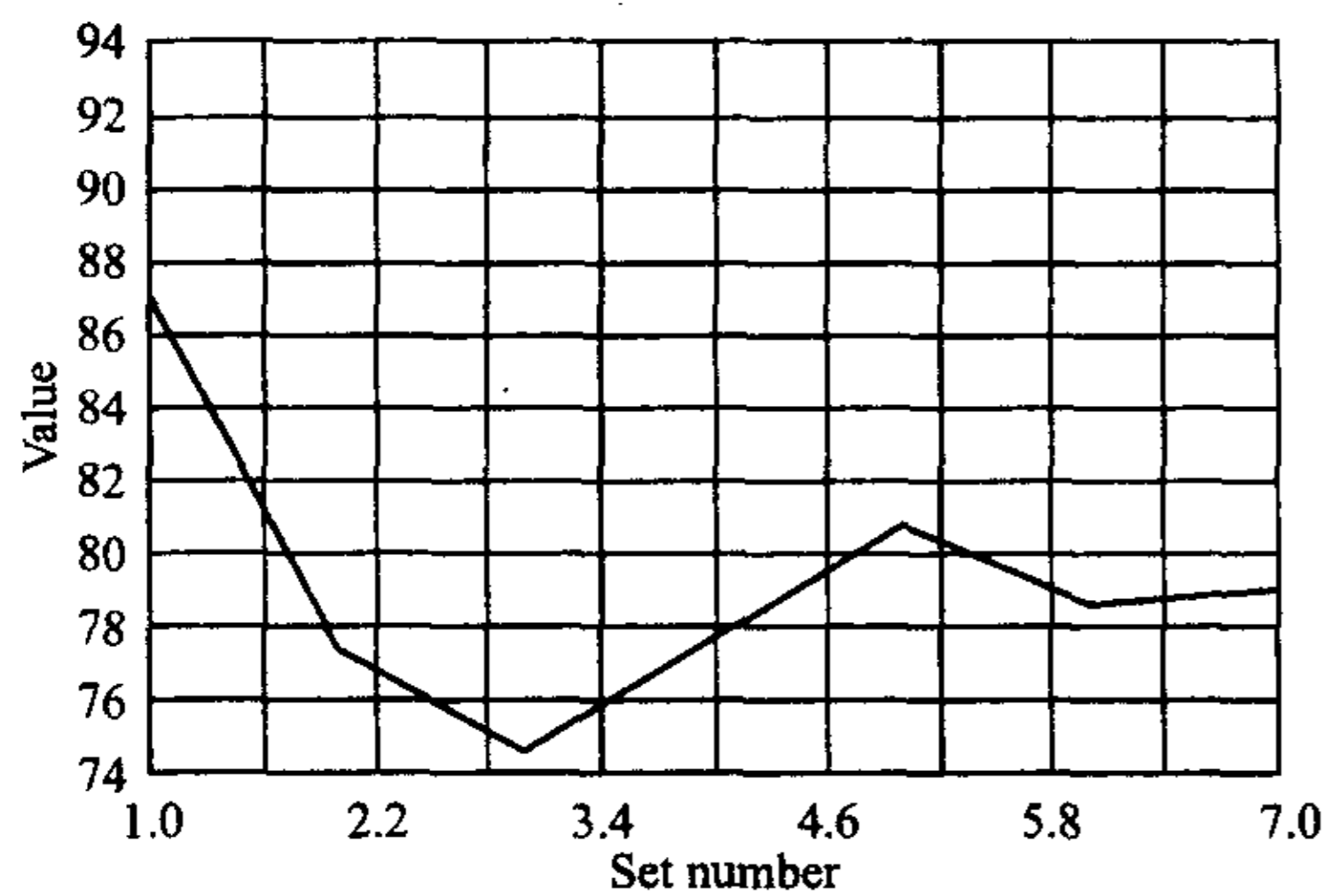


图6 采用函数逼近法目标函数的收敛曲线

Fig.6 Convergent curve with sub-problem approximation optimal method

频率提高了 21.31%，由此得到更为精确的结果。

综上所述,得到目标函数 ω^* 的总的收敛情况如图 7 所示,图 7 清楚地反映出浅球壳优化过程向目标函数逼近的情况,其中,前 7 次迭代采用的是零阶、大范围普适的粗优化方法——函数逼近法;后 10 次迭代采用的是一阶、局部寻优的精优化法——梯度寻优法,通过这两种方法的结合运用,基本上得到了较为精确的壳体参数的最佳组合。

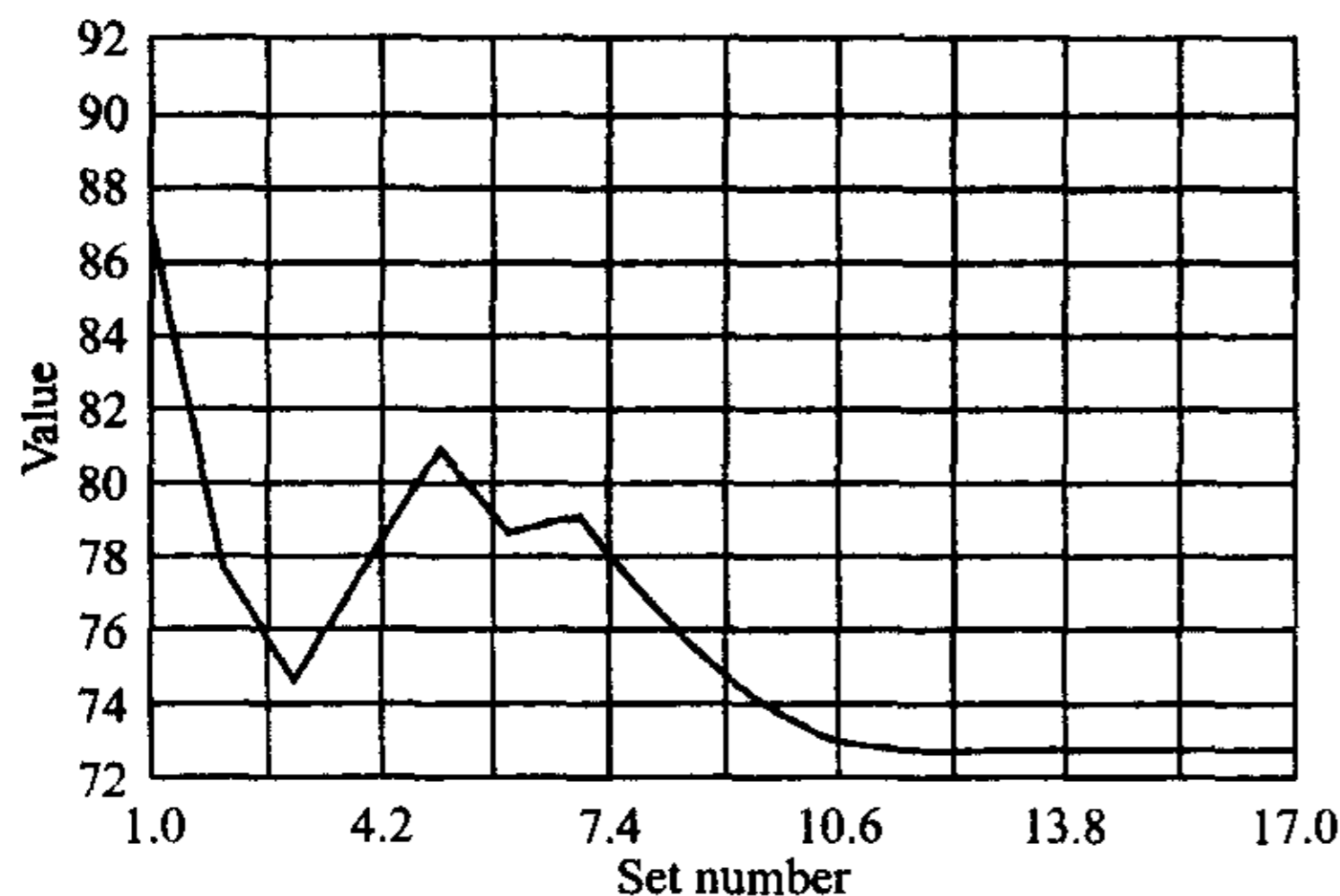


图7 浅球壳优化目标函数的总迭代曲线

Fig.7 Convergent curve through whole structure optimal design

4 结 论

1.根据壳体的动力学基本方程,通过有限元方法得到

几种壳体参数对复合材料层合浅球壳自振频率的影响:浅球壳前五阶自振频率随 h 的增大而增大,随 R 的增大而减小,随铺层角度的变化而变化,壳体参数的变化基本不影响浅球壳的各阶振型。

2.基于 ANSYS 对复合材料层合浅球壳的自振频率进行优化分析,较好地协调、匹配了浅球壳的壳体参数,在满足质量要求的条件下,提高了自振频率,提高了工作的可靠性;较好地印证了有限元分析技术在优化设计中的应用价值,摒弃了传统结构设计的被动校核方法,进而主动地在可行域内寻求最佳设计方案^[11],简化有限元建模以及计算过程,提高了计算效率,在很大程度上减少了设计成本和设计周期,使计算结果更为直观、全面,使产品设计更为合理,可取得良好的经济效益。

参 考 文 献

- [1] 刘人怀. 板壳分析与应用[J]. 中国工程科学, 2000, (11): 63.
- [2] 张志民. 复合材料结构力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1993, 1~2.
- [3] 李友和. 复合材料接头三维有限元技术研究[J]. 洪都科技, 2001, (01):6~8.
- [4] 韩淑洁, 王心丰. U型波纹管振动特性的有限元分析[J]. 压力容器, 2004, (11):24.
- [5] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南[M]. 北京:清华大学出版社, 2005, 87.
- [6] 陈晓霞. ANSYS 7.0 高级分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2004, 397.
- [7] 张立新. ANSYS 7.0 基础教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2004, 230~244.
- [8] 贺兵. 基于 ANSYS 的超高速平面磨床结构优化设计[J]. 机械, 2004, (01):7.
- [9] 张朝晖. ANSYS 8.0 结构分析及实例解析[M]. 北京:机械工业出版社, 2006, 181.
- [10] 王震鸣. 复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价[M]. 北京:北京大学出版社, 1998, 160.
- [11] 郝金伟. 基于 ANSYS 的结构优化设计有限元分析[J]. 山西建筑学, 2005, (3):31~32.

(上接第 438 页)

参 考 文 献

- [1] Guggi Kofod, et al. Actuation response of polyacrylate dielectric elastomers[C]. Proceedings of SPIE, 2001, 4329: 141~147.
- [2] Lu Xingsheng, Zhao Cuiqing, Chen Juan, Zhang Ye. Experimental Study on Dielectric Elastomers[C]. 第三届中日机电技术学术交

流会(CJCM2006)论文, 2006.

- [3] 吕新生, 居刚. An Edge-collect Method for medical Image based on B-Spline Wavelet[C]. Proceedings of SPIE Vol. 6040. 60401M.
- [4] 孙大涌. 先进制造技术[M]. 机械工业出版社, 1999, 132.
- [5] 高济众, 吕新生. 正交回归优化设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1988, (1):9~17.