航空航天装备

金属基体复合材料圆锥壳的材料参数识别 及动力学敏感性研究

王珺瑶^{1,2},陈红永^{1,2},石先杰¹,左朋^{1,3}

(1.中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999; 2.工程材料与结构冲击振动四川省 重点实验室,四川 绵阳 621999; 3.中国科学技术大学 近代力学系,合肥 230026)

摘要:目的研究以金属作为基体的碳酚醛复合材料圆锥壳的动力学特性,基于模态实验建立复合材料参数 优化识别方法。方法 通过建立金属基体复合材料圆锥壳结构的动力学模型,表征各层材料参数对结构动力 学特性的影响。开展典型铝合金-环氧胶-碳酚醛圆锥壳自由模态实验,在模态实验结果基础上,采用数值仿 真开展复合材料参数识别,并采用响应面优化法研究获得材料参数的全局最优解。最后,开展结构模态对 复合材料参数的敏感性分析。结果 基于拉丁超立方抽样和多项式代理模型,建立了多层复合圆锥壳的高效 代理模型。对于[0,90]s铺层的复合材料圆锥壳结构,前5组模态频率参数对 E₁₁最敏感,对 v₂₃最不敏感, 剪切模量的影响介于拉伸模量及泊松比之间。结论建立了针对各向同性-正交各向异性材料组合的多层复合 圆锥壳结构的动力学模型及参数识别方法,可为结构动力学设计提供参考。

关键词:金属基体;复合材料圆锥壳;模态;参数识别;敏感性

中图分类号: TJ04 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2023)07-0041-08 **DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.006

Material Parameter Identification and Dynamic Sensitivity of Metal Substrate Composite Conical Shell

WANG Jun-yao^{1,2}, CHEN Hong-yong^{1,2}, SHI Xian-jie¹, ZUO Peng^{1,3}

(1. Institute of Systems Engineering, Chinese Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China;
 2. Sichuan Key Laboratory of Impact and Vibration of Engineering Materials and Structures, Sichuan Mianyang 621999, China;
 3. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

ABSTRACT: The work aims to study the dynamic characteristics of carbon phenolic composite conical shell with metal as the substrate, and establish the optimized parameter identification method of composite based on modal experiment. A dynamic

• 41 •

收稿日期: 2023-02-14; 修订日期: 2023-03-20

Received: 2023-02-14; Revised: 2023-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975547)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51975547)

作者简介:王珺瑶(1995—),女,硕士研究生。

Biography: WANG Jun-yao (1995-), Famale, Postgraduate.

通讯作者:陈红永(1986—),男,博士。

Corresponding author: CHENG Hong-yong (1986-), Male, Doctor.

引文格式:王珺瑶,陈红永,石先杰,等.金属基体复合材料圆锥壳的材料参数识别及动力学敏感性研究[J].装备环境工程,2023,20(7):041-048.

WANG Jun-yao, CHEN Hong-yong, SHI Xian-jie, et al. Material Parameter Identification and Dynamic Sensitivity of Metal Substrate Composite Conical Shell[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 041-048.

model of metal substrate composite conical shell structure was established to characterize the effect of material parameters of each layer on the dynamic characteristics of the structure. The free modal experiment of typical aluminum alloy-adhesive layer-carbon phenolic conical shell was carried out. Based on the modal experimental results and numerical simulation, the parameter identification of composite materials was carried out. The global optimal solution of material parameters was obtained by response surface optimization method, and the sensitivity analysis of structural mode to composite material parameters was carried out. Based on Latin hypercube sampling and polynomial proxy model, an efficient proxy model for multi-layer composite conical shells was established. For $[0, 90]_{\rm S}$ laminated composite conical shell structure, the first five groups of modal frequency parameters were most sensitive to E_{11} and least sensitive to v_{23} . The effect of shear modulus was between tensile modulus and Poisson's ratio. The dynamic model and parameter identification method for anisotropic isotropic-orthotropic multi-layer composite conical shell are established, which can provide reference for the design of such structures. **KEY WORDS:** metal substrate; composite conical shell; modal; parameter identification; sensitivity

轻质高强度的铝合金常被应用于受力构件以保证结构的刚度和强度^[1-3],但是铝合金无法承受过高的温度,而酚醛树脂基纤维增强材料具有耐烧蚀性能适中、物理力学性能良好、工艺性好、成本低等优点^[4],常用于抗烧蚀、热防护结构^[5-6]。因此,铝合金-环氧胶-碳酚醛多层结构是一种性能优良的飞行器蒙皮材料结构。飞行器的稳定性和可靠性取决于多层复合蒙皮结构的动力学性能^[7],而复合结构的力学性能由其材料参数决定,因而获得实时准确的复合材料参数对飞行器动力学建模及力学性能预示至关重要。

金属基体-碳酚醛结构是典型的各向同性-正交各 向异性材料的多层复合结构,中间胶层保证了界面 之间的变形协调及结合强度。对于此类多材料的复 杂结构,其中的碳酚醛复合材料受到工艺过程的影 响,难以通过传统的单一材料实验获得准确的建模参 数,而实验与数值方法相结合的参数识别技术,能够 针对多材料的复杂结构获取准确的材料参数^[8]。针对 单一复合材料组成的结构参数识别方法研究较多, 如基于边界位移的有限元更新法的复合材料层合板 材料参数识别^[9],基于人工蜂群算法的复合材料层 间内聚力模型参数识别^[10],基于桥联模型的复合材 料单向板和轴向性能反演识别纤维横向性能及集体 性能[11],以及采用遗传算法和序列二次规划法的车 用复合材料的材料参数识别^[12]等研究。考虑各向同 性-正交各向异性多种材料构成的复合结构,对其中 复合材料参数进行参数识别还未见深入研究报道, 而且单层复合材料参数识别多基于大量的解析模型 计算或有限元分析^[13],结合模态实验^[14]等方式获得结 构的动力学特性,以此作为参数识别的优化目标[15-16], 可以进行复合材料单层板的参数识别。随着结构复 杂度的上升,动力学模型计算量会大幅增加,而基 于代理模型[17]的模型降阶技术建立材料参数与动力 学特性的直接关联模型,在保证精度的前提下提高

材料参数识别效率。针对金属基体-环氧胶-碳酚醛组 成的多层复合结构,基于代理模型的参数识别技术 可高效获取建模参数。

本文通过建立各向同性-正交各向异性材料圆锥 壳的动力学模型,开展了铝合金-碳酚醛复合材料圆 锥壳模型的模态实验。基于实验结果,联合实验数值 仿真分析和代理模型技术,通过在设计空间内选择足 够多的样本迭代获得设计的相应特性,并建立响应面 优化模型。最后,应用多项式算法对响应面模型进行 多目标优化,获得铝合金-碳纤维复合材料中碳纤维 复合材料单层板的9个材料参数,并研究了圆锥壳前 5 组固有频率对材料参数的敏感性。

1 多层复合圆锥壳结构动力学模型

典型金属基体-碳酚醛多层复合圆锥壳结构如图 1 所示。在结构中面 z=0 处建立正交坐标系(x, θ ,z), x 为圆锥壳的母线方向, θ 和 z 分别为圆周和厚度方向, 圆锥壳体的母线长度、厚度以及半顶角分别用符号 L、 h、a来描述, R_0 和 R_1 分别为圆锥壳的小圆半径和大 圆半径。参考给定的坐标系,根据一阶剪切变形理论, 圆锥壳上任一点沿 x、 θ 、z 方向的变形量 U、V、W 的矢量形式为 $\overline{U} = (U,V,W)$,可以由结构中面处的位 移分量 $u=(u,v,w,\psi_x,\psi_\theta)$ 表示^[18-20]:

$$U(x,\theta,z,t) = u(x,\theta,t) + z\psi_x(x,\theta,t)$$

$$V(x,\theta,z,t) = v(x,\theta,t) + z\psi_\theta(x,\theta,t)$$

$$W(x,\theta,z,t) = w(x,\theta,t)$$
(1)

式中:u, v, w分别为对应点在 x, θ, z 方向上的线性位移分量; ψ_x, ψ_θ 分别为绕 x, θ 方向的旋转位移;t为时间分量。结构中面处的膜应变 ($\varepsilon_x^0, \varepsilon_\theta^0, \varepsilon_{x\theta}^0$)、曲率变化率($\kappa_x^0, \kappa_{\theta}^0, \kappa_{x\theta}^0$)和横向切应变 ($\gamma_{xz}^0, \gamma_{\theta z}^0$)可以由位移分量描述^[18-20]:



图 1 金属基体复合材料圆锥壳模型 Fig.1 Metal substrate composite conical shell model

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u}{\partial x}, \ \varepsilon_\theta^0 = \frac{1}{B} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{w}{R_\theta}, \ \varepsilon_{x\theta}^0 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{\partial u}{\partial \theta}$$
(2)

$$\kappa_{x} = \frac{\partial \psi_{x}}{\partial x}, \, \kappa_{\theta} = \frac{1}{B} \frac{\partial \psi_{\theta}}{\partial \theta}, \, \kappa_{x\theta} = \frac{\partial \psi_{\theta}}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{\partial \psi_{x}}{\partial \theta}$$
(3)

$$\gamma_{xz}^{0} = \frac{\partial w}{\partial x} + \psi_{x}, \gamma_{\theta z}^{0} = -\frac{v}{R_{0}} + \frac{1}{B} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \psi_{\theta}$$
(4)

式中: $B=xsin\alpha$ 、 $R_{\theta}=xtan\alpha$ 分别为 θ 方向的拉梅 常数及曲率半径。

在材料本构方面,将铝合金和环氧胶看作特殊的 正交各向异性材料单层板处理。根据广义胡克定律, 铝合金-环氧胶-碳酚醛复合材料层合板任意第 k 层的 应力-应变关系^[19]如式(5)所示。材料铺设顺序为铝 合金(k=1)、环氧胶(k=2)、碳酚醛单层板(k≥3)。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x} \\ \sigma_{\theta} \\ \tau_{x\theta} \\ \tau_{\thetaz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix}^{k} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} & 0 & 0 \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} & 0 & 0 \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{Q}_{44} & \overline{Q}_{45} \\ 0 & 0 & 0 & \overline{Q}_{45} & \overline{Q}_{55} \end{bmatrix}^{k} \begin{bmatrix} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\theta} \\ \gamma_{x\theta} \\ \gamma_{\thetaz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}^{k}$$
(5)

根据坐标转换关系 $T^{[19]}$, 层合板刚度系数 \bar{Q}_{ij} 和 材料常数 Q_{ij} 间的关系为: $\bar{Q}^{k} = T^{-1}Q^{k}T$ 。任意一层材 料常数 Q_{i}^{k} 的具体表达式为:

$$\begin{aligned} Q_{11}^{k} &= E_{11} \frac{1 - v_{23} v_{32}}{\Delta}, \qquad Q_{22}^{k} &= E_{22} \frac{1 - v_{31} v_{13}}{\Delta}, \\ Q_{44}^{k} &= G_{23}, \qquad Q_{55}^{k} &= G_{13}, \\ Q_{33}^{k} &= E_{33} \frac{1 - v_{12} v_{32}}{\Delta} , \\ Q_{66}^{k} &= G_{12} \\ Q_{12}^{k} &= E_{11} \frac{v_{21} + v_{31} v_{23}}{\Delta} &= E_{22} \frac{v_{12} + v_{32} v_{13}}{\Delta} \\ Q_{13}^{k} &= E_{11} \frac{v_{31} + v_{21} v_{32}}{\Delta} &= E_{22} \frac{v_{13} + v_{12} v_{23}}{\Delta} \\ Q_{23}^{k} &= E_{22} \frac{v_{32} + v_{12} v_{31}}{\Delta} &= E_{33} \frac{v_{23} + v_{21} v_{13}}{\Delta} \\ \Delta &= 1 - v_{12} v_{21} - v_{23} v_{32} - v_{31} v_{13} - 2 v_{21} v_{32} v_{13} \end{aligned}$$
(6)

式中: E_{11} 、 E_{22} 和 E_{33} 分别为正交各向异性材料 的 3 个弹性模量; G_{12} 、 G_{23} 和 G_{13} 为剪切模量; v_{ij} 为 泊松比。k=1和 k=2时,该层材料为各向同性,有 $E=E_{11}=E_{22}=E_{33}$ 和 $v = v_{ij}$ 等 2 个独立的材料参数, G = E/2(1+v); $k \ge 3$ 时,该层材料为正交各向异性, 有 E_{11} 、 E_{22} 、 E_{33} 、 G_{12} 、 G_{23} 、 G_{13} 、 v_{12} 、 v_{23} 和 v_{13} 等 9 个独立的材料参数($v_{ij}/E_{ii} = v_{ji}/E_{ij}$)。

根据建立的本构方程表达式,可得到圆锥壳的动能 T 和势能 U,将圆锥壳的动能和势能代入 Lagrange 方程,可得:

$$\frac{\partial (T-U)}{\partial A} = 0, \ \frac{\partial (T-U)}{\partial B} = 0, \ \frac{\partial (T-U)}{\partial C} = 0 \tag{7}$$

通过数值求解方程矩阵的特征值,即可获得复合圆锥壳结构的固有频率。

从式(4)—(7)中可以看出,3层结构的材料 参数均会影响圆锥壳的动力学特性。对于金属及高聚 物等各向均质材料,材料性质较为确定,且不易发生 变化,仿真建模参数易通过材料实验获取;而碳酚醛 复合材料参数较多,与加工工艺、材料特性及结构构 型有关,为获得较为准确的复合材料参数,基于模态 实验进行反向识别是一种可行的办法。

2 复合材料圆锥壳模态实验

模态实验是获取结构动力学特性的有效手段。本 文研究对象是由 3 种材料制成的多层圆锥壳结构,其 中内层是作为结构层的铝合金,外层铺设用于隔热的 碳酚醛复合材料层合板,2 层结构用环氧胶粘接在一 起。圆锥壳母线长度为 553 mm,顶面内直径为 285 mm,底面内直径为 120 mm,3 层材料从内到外 厚度分别为 3、1、11 mm,如图 2 所示。





开展复合圆锥壳结构的自由模态实验时,采用低 刚度的橡皮绳将圆锥壳大端悬吊,以模拟自由边界条 件。圆锥壳模态实验的实验测点布局如图 3 所示,沿 圆锥壳周向和母线方向分别均布 8×5 共计 40 个测点。 实验采用 SIMO 识别方法,测试系统如图 4 所示。由 于复合圆锥壳低阶模态对结构响应影响较大,且初步 分析显示,前10阶非零频率模态均为对称/反对称模态,每对模态缩并为1组,取前5组。通过实验提取 前5组模态结果(见表1),作为参数识别的优化目标。



图 3 圆锥壳自由模态实验及测点布局

Fig.3 Free modal experiment of the conical shell and layout of the measurement points: a) free modal experiment of the conical shell; b) layout of the measurement points of the modal experiment





表 1	复合材料圆锥壳模态实验前 5 组模态及阻尼比
Tab.1	Modes and damping ratios of the first five groups of
C	composite conical shell in the modal experiment

composite contear sheri in the modul experiment							
模态组	固有频率/Hz	阻尼比/%					
1	410.66	0.48					
2	853.75	0.48					
3	1 127.90	0.56					
4	1 369.39	0.52					
5	1 551.40	0.51					

3 复合材料参数识别

3.1 圆锥壳动力学代理模型

采用有限元法开展复合圆锥壳结构的模态分析 均需开展大量计算,代理模型可以降低计算量,并提 高效率。为对参数进行快速优化,需建立复合圆锥壳 动力学特性的代理模型,利用近似化的方法对离散的 响应数据集合进行插值或拟合化,构建响应面替代实 际复杂的仿真计算^[21]。

建立试件前 5 组固有频率与结构材料参数之间 的代理模型时,首先建立试件的动力学仿真模型;其 次对材料参数在不确定性范围内抽样取点,仿真获得 不同材料参数下复合圆锥壳的固有频率。仿真模型 中,采用层合板理论对圆柱壳复合材料层进行建模, 根据设计定义碳酚醛复合材料的铺层为[90/0]s。将铝 合金及环氧树脂看作各向同性的特殊材料参数的单 层板,其材料参数由材料手册获得,密度 ρ 分别为 2 800、1 160 kg/m³,弹性模量 *E* 分别为 68、3 GPa, 泊松比ν分别为 0.33、0.3。

建立复合圆锥壳前几阶模态频率与复合材料参数之间的代理模型时,首先建立圆锥壳动力学有限元 模型,其几何尺寸与试件保持一致,采用壳单元对复 合结构进行建模。经计算,全局网格尺寸为 0.02 m 时可保证收敛性,边界条件为自由状态。其中铝合金、 碳酚醛以及粘接层环氧树脂各层之间采用共节点形 式建模,以降低多层界面接触状态差异导致的对结构 固有频率的影响。碳酚醛单层板的 9 个材料参数均根 据工程经验,考虑参数的不确定性区间(见表 2), 进行初始赋值,并将其作为待识别参数,根据基于响 应面优化的参数识别算法进行修正。

代理模型的精度依赖于合理、有效的参数采样策略。拉丁超立方法^[22]采用特殊的分层抽样方法,能够 保证采样点在整个样本空间随机分布、不聚集,且拟 合非线性响应能力强,因此本文选择拉丁超立方法为 采样方法。完成采样后,采用合适的代理模型对样本 点进行数据拟合,构建响应面。多项式响应面是利用 拟合原理构造代理模型的方法,通过最小二乘法获得 近似多项式的参数建立多项式模型,具有结构简单、 计算量小、能够有效过滤计算中的数值噪声等优点, 如式(8)所示。

$$f_k\left(\lambda_j, \omega_j^k\right) = \xi_0 + \sum_{i=1}^n \xi_i \lambda^i + \sum_{i=1}^n \sum_{c \ge i}^n \xi_{ic} \lambda^i \lambda^c + \cdots$$
(8)

式中: λ_j 代表样本点; ω_j^k 表示 λ_j 对应的实验第 k个固有频率值; $\xi_0 、 \xi_i 、 \xi_{ic}$ 是多项式的常数项,通 过最小二乘法进行数据拟合求解。

基于代理模型进行参数识别时,考虑工程上在对 各阶模态对结构响应影响不明时,假设各阶模态对响 应的影响贡献一致,因此取前5组模态频率平均绝对 误差最小进行优化, 定义优化函数, 如式(9) 所示。

$$F_{\text{obj}} = \min\left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \left| \frac{W_j^l - \omega_j^l}{\omega_j^k} \right| \times 100\%\right)$$
(9)

式中: *m* 为样本点的个数; *W^I* 为第 *j* 个样本点所 对应的第 *l* 组代理模型的计算频率值。通过仿真建立 前 5 组模态频率值与 9 个材料参数的响应面多项式代 理模型, 以第 1、2 组模态频率的响应面为例, 如图 5 所示。其中图 5 d 给出了复合材料泊松比及剪切模 量影响第 2 组频率的响应面。

从图 5 可以看出,在所取值的区间内,第1 组模态频率相对材料参数的响应面线性度较好。可见,随着材料参数变化,频率可能为线性变化。弹性模量对结构固有频率的影响是可以预见的,如式(6)所示,复合材料的泊松比和剪切模量会在不同程度上影响结构复合材料各层的刚度系数,进而对整体结构的刚度矩阵产生影响,最终影响复合圆锥壳结构的固有频率。随着泊松比变大,第2 组模态频率升高;随着剪切模量变大,固有频率也呈上升趋势。第2 组模态频率随剪切模量的变化斜率大于随泊松比的变化斜率。

为保证构建完全多项式代理模型的可靠性,参数 优化后,采用均方根误差 η_{RMSE}、决定系数 R²等指标 评估优化结果^[23],如式(10)和式(11)所示。均方 根误差 η_{RMSE} 越接近 0、决定系数 R^2 越接近最大值 1, 表明代理模型拟合度越好。

$$\eta_{\rm RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2}$$
(10)

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m} (y_{i} - \hat{y}_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{m} (y_{i} - \overline{y}_{i})^{2}}$$
(11)

式中: $y_i 和 \hat{y}_i$ 分别为第 i 个样本的实验值和参数 优化后的预测值。

3.2 材料参数优化识别

考虑到复合材料加工工艺等带来的不确定性,在 优化初值的基础上,对所有复合材料参数考虑±10% 的偏差区间,以此作为材料参数不确定性范围。经过 多轮迭代优化后,可以确定碳酚醛单层板的等效材料 参数,结果见表 2。优化过程中引入最大允许 Pareto 百分比和收敛稳定性百分比评估收敛性。最大允许 Pareto 百分比定义为:每次优化迭代过程中想获得的 满足 Pareto 最优解的点个数与每次迭代样本点数量 之比。收敛稳定性百分比是基于均值和均方差表示全 局稳定性的参数,定义如下:



图 5 第 1、2 组模态频率的响应面 Fig.5 Response surface of the 1st and 2nd groups of modal frequencies

$$S = \frac{|A_i - A_{i-1}|}{W_{\text{max}} - W_{\text{min}}} \times 100\%$$
(12)

式中: *S* 为收敛稳定性百分比; *W*_{max}、*W*_{min}为初始迭代目标值的最大值和最小值; *A_i*和 *A_{i-1}*分别代表 第 *i* 次和第 *i*-1 次迭代目标值的均值,也可用均方差 来计算。优化过程中,设置最大允许 Pareto 百分比为 70%,收敛稳定性百分比为 2%。

	表 2	碳酚醛复合	材料参数仿	忧化结果				
Tab.2 Material parameter optimization results of the								
carbon phenolic composite								

碳酚醛单层板		优化	不确定性	优化后结果				
参数		初值	区间					
	拉伸模量 E ₁₁ /GPa	25	[22.5, 27.5]	27.229				
	拉伸模量 E ₂₂ /GPa	2.3	[2.07, 2.53]	2.517				
	拉伸模量 E33/GPa	2.3	[2.07, 2.53]	2.409				
	泊松比 v ₁₂	0.3	[0.27, 0.33]	0.329				
	泊松比 v23	0.3	[0.27, 0.33]	0.330				
	泊松比 V ₁₃	0.3	[0.27, 0.33]	0.327				
	剪切模量 G12/GPa	1.5	[1.35, 1.65]	1.645				
	剪切模量 G23/GPa	1	[0.9, 1.1]	1.094				
	剪切模量G ₁₃ /GPa	1.5	[1.35, 1.65]	1.643				

参数的收敛性如图 6 所示,模型在经过 8 次迭代 后即可收敛。模型预测结果与实验值的对比如图 7 所 示,均方根误差 η_{RMSE}均接近 0,决定系数 R²达到 1, 表明本文建立的优化代理模型具有较高的准确度和 可靠性。从优化结果可以看出,优化后除第 2、3 组 模态频率误差分别为 2.62%和 9.94%之外,其他组次 均优于 1%。



图 6 优化结果的收敛性 Fig.6 Convergence of optimization results



图 7 材料参数优化后试件模态仿真与实验结果对比

Fig.7 Comparison between modal simulation results and experimental results of the specimen after optimization of material parameters

4 参数敏感性分析

为分析碳酚醛的各材料参数对圆锥壳动力学特

性的影响程度,采用敏感性指标进行表征^[24-25]。本文 优化变量为碳酚醛单层板的9个材料参数,通过代理 模型分析圆锥壳前5组模态频率对复合材料参数的

• 47 •

敏感性,以前3组模态频率为例,如图8所示。

从图 8 中可以看出,针对本文中圆锥壳结构的前 3 组模态频率,碳酚醛复合材料参数中,纤维方向的 拉伸模量 *E*₁₁对固有频率的影响最大,三向拉伸模量 中,厚度方向拉伸模量 *E*₃₃的影响最小。3 类参数中, 拉伸模量的影响最大,泊松比的影响最小,剪切模量 的影响介于拉伸模量及泊松比之间。图 8 中也显示 出,针对不同组模态频率,各参数的影响程度各不同。 敏感性结果可为识别影响复合圆锥壳结构动力学特 性的关键参数提供直观的参考。



图 8 前 3 组模态材料参数对复合圆锥壳固有频率敏感性

Fig.8 Sensitivity of the first three groups of modal material parameters to the natural frequency of composite conical shells: a) 1st group; b) 2nd group; c) 3rd group

5 结论

本文基于代理模型方法,建立了针对铝合金-环 氧胶-碳酚醛多层复合圆锥壳的材料参数优化识别方 法,并分析了圆锥壳结构动力学特性对材料参数的敏 感性。主要研究结论如下:

 1)基于拉丁超立方抽样及多项式代理模型,可 在仿真模型基础上建立精度较好的圆锥壳结构前 5 组模态频率对复合材料参数的代理模型。

2)通过考虑材料参数不确定性区间,经过参数 优化识别之后,复合圆锥壳结构的碳酚醛单层板的结 构固有频率与实验值吻合较好,优化后的材料参数可 用于进一步结构动力学分析。

3)通过参数敏感性分析可知,铝合金-环氧胶-碳酚醛圆锥壳结构中,碳酚醛单层板 *E*₁₁对固有频率的影响最为显著。

4)与复合材料弹性模量参数影响类似,泊松比 和剪切模量等参数也会同时影响复合材料层合板的 刚度系数,从而影响复合圆锥壳结构的固有频率。与 弹性模量相比,泊松比v₂₃对前 5 组模态频率的影响 最小,剪切模量的影响介于拉伸模量及泊松比之间。

参考文献:

- 田济民.导弹及固体火箭的外防护材料[J].固体火箭 技术, 1998, 21(3): 53-57.
 TIAN Ji-min. External Protection for Missile and Solid Rocket[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1998, 21(3): 53-57.
- [2] 刘聪,吴臣武. 高超声速飞行器结构热-声振耦合动力 学研究进展[J]. 强度与环境, 2022, 49(4): 1-8.

LIU Cong, WU Chen-wu. Research Progress on Thermal-Acoustic Vibration Coupling Dynamics of Hypersonic Aircraft Structures[J]. Structure & Environment Engineering, 2022, 49(4): 1-8.

- [3] 朱文海. 导弹弹体结构材料的分析研究[J]. 系统工程 与电子技术, 1992, 14(11): 73-81.
 ZHU Wen-hai. A Research of Structural Material for Missile Body[J]. Systems Engineering and Electronics, 1992, 14(11): 73-81.
- [4] 张凯, 佘祖新, 王玲, 等. 导弹用高硅氧/酚醛结构件贮 存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 36-40.
 ZHANG Kai, SHE Zu-xin, WANG Ling, et al. Storage Life Evaluation of Silica Phenolic Component Used in Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 36-40.
- [5] 刘永胜,曹立阳,张运海,等.高超声速飞行器热防护 用超高温复合材料的研究进展[J].复合材料科学与工 程,2022(10):107-118.

LIU Yong-sheng, CAO Li-yang, ZHANG Yun-hai, et al. Research Progress on Ultra-High Temperature Composites for Thermal Protection of Hypersonic Vehicles[J]. Composites Science and Engineering, 2022(10): 107-118.

[6] 徐世南,吴催生.高超声速飞行器热防护材料研究进展[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(5): 221-226. XU Shi-nan, WU Cui-sheng. Research Progress of Hypersonic Vehicle Thermal Protection Material Technology[J]. Mechanical Research & Application, 2018, 31(5): 221-226.

- [7] HATTA H, GOTO K, AOKI T. Strengths of C/C Composites under Tensile, Shear, and Compressive Loading: Role of Interfacial Shear Strength[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(15/16): 2550-2562.
- [8] 姜潮,李超,陶友瑞.冲压成型板材特性参数的反求方法[J].汽车工程,2012,34(4):373-378.

JIANG Chao, LI Chao, TAO You-rui. An Inverse Technique for Determining the Material Property Parameters of Sheet Metal after Stamping[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(4): 373-378.

[9] 赵冬梅,邓建伟,孙直,等.基于边界位移的复合材料 力学参数无损反演方法[J]. 计算力学学报, 2022, 39(1): 57-62.

> ZHAO Dong-mei, DENG Jian-wei, SUN Zhi, et al. Nondestructive Identification of the Mechanical Properties of Layered Structures Based on Surface Displacements[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2022, 39(1): 57-62.

[10] 饶玉文,林仁邦,杨颜志,等.基于人工蜂群算法的复合材料层间内聚力模型参数反演[J].机械强度,2021, 43(2):287-292.

RAO Yu-wen, LIN Ren-bang, YANG Yan-zhi, et al. Inversion of Parameters for Composite Interlayer Cohesive Zone Model by Using Artificial Bee Colony Algorithm[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(2): 287-292.

- [11] 杨万庆, 王艳超, 李能文, 等. 基于桥联模型参数反演的复合材料力学性能预测[J]. 复合材料科学与工程, 2021(2): 84-88.
 YANG Wan-qing, WANG Yan-chao, LI Neng-wen, et al. Prediction of Composite Mechanical Properties Based on Material Parameters Reversely Calculated by the Bridging Model[J]. Composites Science and Engineering, 2021(2): 84-88.
- [12] 杨思满,姜潮,倪冰雨.结合 DIC 技术的车用复合材料 参数反演方法[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(12): 1944-1949.

YANG Si-man, JIANG Chao, NI Bing-yu. An Parameter Estimation Method of Composite Used in Vehicle Based on DIC Technique[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(12): 1944-1949.

- [13] KROUPA T, LAŠ V, ZEMČÍK R. Improved Nonlinear Stress-Strain Relation for Carbon-Epoxy Composites and Identification of Material Parameters[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(9): 1045-1057.
- [14] SEPAHVAND K, MARBURG S. Identification of Composite Uncertain Material Parameters from Experimental Modal Data[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2014, 37: 148-153.
- [15] CUADRADO M, PERNAS-SÁNCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J A, et al. Model Updating of Uncertain Parameters of Carbon/Epoxy Composite Plates Using

Digital Image Correlation for Full-Field Vibration Measurement[J]. Measurement, 2020, 159: 107783.

- [16] CHANDRA S, MAEDER M, BIENERT J, et al. Identification of Temperature-Dependent Elastic and Damping Parameters of Carbon-Epoxy Composite Plates Based on Experimental Modal Data[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 187: 109945.
- [17] DAGAUT P, EL BAKALI A, RISTORI A. The Combustion of Kerosene: Experimental Results and Kinetic Modelling Using 1- to 3-Component Surrogate Model Fuels[J]. Fuel, 2006, 85(7/8): 944-956.
- [18] LEISSA A W. Vibration of Shells[M]. Washington: Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, 1973.
- [19] QATU M S. Vibration of Laminated Shells and Plates[M]. Amsterdam: Elsevier, 2004: 109-179.
- [20] 石先杰, 左朋. 温度场影响下功能梯度圆锥壳振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(18): 9-15.
 SHI Xian-jie, ZUO Peng. Vibration Analysis of Functionally Graded Conical Shells in Thermal Environment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(18): 9-15.
- [21] 段辉亚,杨昌棋,贾子初.基于多项式代理模型的薄膜 材料力学参数识别[J]. 实验力学, 2020, 35(4): 577-587. DUAN Hui-ya, YANG Chang-qi, JIA Zi-chu. Mechanics Parameter Identification of Thin Film Materials Based on Polynomial Proxy Model[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(4): 577-587.
- [22] SHANG Xiao-bing, CHAO Tao, MA Ping, et al. An Efficient Local Search-Based Genetic Algorithm for Constructing Optimal Latin Hypercube Design[J]. Engineering Optimization, 2020, 52(2): 271-287.
- [23] 王红珂, 刘啸天, 林磊, 等. 机器学习在材料服役性能 预测中的应用[J]. 装备环境工程, 2022, 19(1): 11-19.
 WANG Hong-ke, LIU Xiao-tian, LIN Lei, et al. Application of Machine Learning in Predicting Service Performance of Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(1): 11-19.
- [24] LI Hong-shuang, LÜ Zhen-zhou, YUE Zhu-feng. Support Vector Machine for Structural Reliability Analysis[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(10): 1295-1303.
- [25] CONTE J P. Earthquake Engineering Frontiers in the New Millennium[M]. New York: Routledge, 2017: 395-401.

责任编辑:刘世忠