

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.029

基于模态试验的碳纤维复合材料参数识别

徐未凤, 阳光武, 肖守讷, 王明猛, 李鹏航

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:提出一种碳纤维复合材料参数识别的方法,以层合板单边约束模态试验获得的模态数据为基础,将实测频率与有限元计算频率之差的平方和作为目标函数,把参数识别问题转化为优化问题。对材料参数进行敏感性分析,通过遗传算法识别出复合材料层合板的材料参数。对同一层合板进行自由边界条件下的模态试验,比较使用识别前和识别后参数的计算-实测模态频率误差。结果表明:对同一层合板,使用识别后参数自由模态频率的计算-实测差值更小,说明该方法能准确识别碳纤维复合材料层合板的性能参数。

关键词:碳纤维复合材料;参数识别;模态试验;遗传算法

中图分类号:TP391 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)06-0146-05

Parameter Identification of Carbon Fiber Composites Based on Modal Experiment

XU Weifeng, YANG Guangwu, XIAO Shoune, WANG Mingmeng, LI Penghang

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A method for parameter identification of carbon fiber composite materials is proposed. Based on the modal data obtained from the unilateral constrained modal test of laminated plates, the square sum of the difference between the measured frequency and the calculated frequency of finite element method is used as the objective function to transform the parameter identification problem into an optimization problem. The sensitivity of material parameters is analyzed, and the material parameters of composite laminates are identified by genetic algorithm. The modal tests of the same laminated plate are carried out under free boundary conditions, and the calculated-measured modal frequency errors of the parameters before and after identification are compared. The results show that the difference between the calculated and measured free modal frequencies of the identified parameters is smaller for the same laminate, which indicates that the method can accurately identify the parameters of carbon fiber composite laminates.

Keywords: carbon fiber composite; parameter identification; modal experiment; genetic algorithm

0 引言

复合材料因比强度高、比模量高、疲劳性能好、抗腐蚀性强等优点而被广泛应用于航空航天、轨道交通、船舶、汽车等领域^[1-3]。与此同时,这也对复合材料及其结构的设计和评价提出了要求,准确的材料参数数据是这些要求的基础。然而,同金属材料相比,复合材料性能参数的分散性较大,制造加工工艺不确定,这使得实际工程应用中使用的构件性能参数与实验室标准测试试验得到的性能参数可能有较大偏差^[4-5]。随着计算机技术的发展,数值-实验参数识别方法进行复合材料性能参数的识别已经成为了研究热点。这种方法结合了数值分析与试验测试的优势^[6]。先建立合理的初始计算模型,以实测和计算模型的残差

范数最小为目标函数,再通过优化方法调整参数值以获得准确的材料参数^[7]。

遗传算法属于进化算法,它通过模拟自然界生物进化过程来寻找问题中的最优解,具有良好的收敛性,适合于求解复杂的优化问题。本文通过有限元建模,采用遗传算法,基于复合材料层合板的约束模态试验结果进行板的参数识别。分别使用识别前和识别后参数在有限元中仿真计算自由模态频率,并与试验结果相比较,以此验证参数识别方法的有效性。

1 理论基础

二维编织复合材料是由两组纱线彼此穿插而过形成的预编织件,与基体材料固化成型的复合材料。目前常见的编织方式有平纹、斜纹和缎纹,

本文所用材料为平纹编织复合材料,其多尺度模型如图1所示。

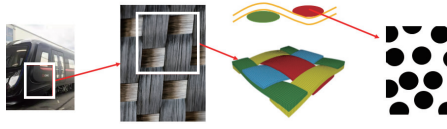


图1 多尺度模型

纤维束是将纤维和基体两种组分材料等效均质化后形成的。纤维束的材料属性可以由 Chaims 提出的经验表达式得到^[8]。

$$\begin{cases} E_{11} = E_{1f}V_f + E_m(1-V_f) \\ E_{22} = E_{33} = \frac{E_m}{1-\sqrt{V_f} \times (1-E_m/E_{2f})} \\ G_{12} = G_{13} = \frac{G_m}{1-\sqrt{V_f} \times (1-G_m/G_{12f})} \\ G_{23} = \frac{G_m}{1-\sqrt{V_f} \times (1-G_m/G_{23f})} \\ \nu_{12} = V_f\nu_{12f} + (1-V_f)\nu_m \end{cases} \quad (1)$$

式中:下标 f 表示纤维, m 表示基体;复合材料的工程弹性模量由纤维和基体分别的模量 E_{1f} 、 E_{2f} 、 E_m 、 G_{12f} 、 G_m 、 G_{23f} 与纤维体积分数 V_f 决定。结合本文编织复合材料的特性,3 个方向弹性模量的公式可修正为^[9]

$$\begin{cases} E_{11} = E_{22} = \frac{1}{2}E_{1f}V_f + \frac{1}{2}E_{2f}V_f + E_m(1-V_f) \\ E_{33} = \frac{E_m}{1-\sqrt{V_f} \times (1-E_m/E_{2f})} \end{cases} \quad (2)$$

编织碳纤维复合材料层合板的坐标系如图2所示,其中1方向和2方向分别为纤维纵向和横向铺设方向,3方向为厚度方向。

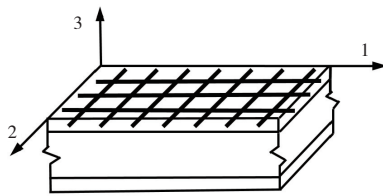


图2 层合板坐标系

碳纤维复合材料有不同铺层方向,任意纤维铺设角度的矩阵可以表示为

$$\bar{Q}_{ij} = T^{-1} Q_{ij} T^{-T} \quad (3)$$

式中: $\bar{Q}$ 为层合板的转轴刚度矩阵,由刚度矩阵 Q 变换所得; T 为坐标变换矩阵。 Q_{ij} 使用工程常数

表达如下:

$$\begin{cases} Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}; Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}; \\ Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}; Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}; \\ Q_{66} = G_{12}; Q_{44} = G_{23}; Q_{55} = G_{13} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_1 和 E_2 分别是材料在1方向和2方向的弹性模量; G_{ij} 为 $i-j$ 平面内的切变模量;泊松比 ν_{ij} 为 i 方向应变与 j 方向应变之比的负值,且满足关系式 $\frac{\nu_{12}}{E_2} = \frac{\nu_{21}}{E_1}$ 。

2 基于遗传算法的参数识别

以厂家给予的材料参数作为初始值,在有限元软件中建立碳纤维复合材料层合板的模型,采用模型修正的思想,将复合材料的参数识别问题转化为优化的问题。优化的数学模型一般包含3种参数:设计变量、目标函数、约束条件。数学模型如下:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T \\ \text{s.t.} \quad g_i(\mathbf{X}) \leq 0, \quad (i=1,2,\cdots,m) \\ \quad \quad h_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad (j=1,2,\cdots,p) \\ \max(f(\mathbf{X})) \quad \text{or} \quad \min(f(\mathbf{X})) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{X}$ 为设计变量,由 n 个分量组成,代表设计变量的个数; $f(\mathbf{X})$ 是目标函数; m 是性能约束条件 $g_i(\mathbf{X})$ 的个数; p 是几何约束条件 $h_j(\mathbf{X})$ 的个数。

本文以复合材料层合板的前4阶计算-实测频率误差平方和作为目标函数,待识别参数作为设计变量,在合理取值范围内计算求解使目标函数取最小值,优化计算中采用了遗传算法。

遗传算法本质上属于随机搜索算法,是根据大自然中生物体进化规律而设计提出的。该算法通过模拟生物进化过程中适者生存规则与群体内部染色体的信息随机交换机制,配合计算机仿真运算,用以解决一些实际问题中的优化问题。遗传算法不仅具有在全局中寻找最优解的能力,同时具有更高的寻优效率。相比传统搜索算法,遗传算法可直接对目标函数信息进行操作,无需求导和其他辅助信息的限定,因此这种算法可处理更多通用性问题。具体分析流程如图3所示。

遗传算法主要构成分为基因、个体、种群3个维度的对象。搜索过程通过进化来进行,群体中的每个个体是问题的一个解,称为染色体。这些

染色体在后续迭代中不断进化,称为遗传。遗传算法主要通过交叉、变异、选择运算实现。选择是指以适应度衡量染色体好坏,个体根据适应度大小按一定比例复制到交配池中;交叉是交配池中的2个个体进行交配,组合形成1个(或几个)新个体,复制和交叉将好特性进行遗传;变异则是发生在少数字符串某基因位上基因的突变,它使搜索过程能够有机会从搜索到的局部最优解逃出^[10]。

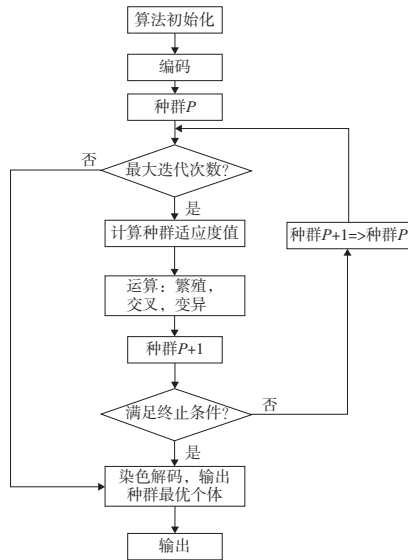


图3 遗传算法分析流程

3 碳纤维复合材料性能参数识别

3.1 约束模态试验

对单边约束边界条件下的碳纤维复合材料层合板开展模态试验,模态测试系统如图4所示。试验采用多点激励,单点拾振的方法。在层合板上固定加速度传感器,用力锤依次敲击各个测点。测试信号采集仪中的两个通道分别用于采集力锤的激振力信号和加速度传感器的响应信号,通过在峰值拾取的参数计算出各阶模态频率,具体装置如图5所示。由于人工敲击方式难以保证每次均相同,本试验采取同一测点进行多次敲击,取效果最优的3组数据进行平均处理,以降低干扰信号造成的随机误差。

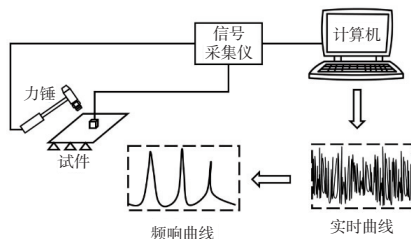


图4 模态测试系统

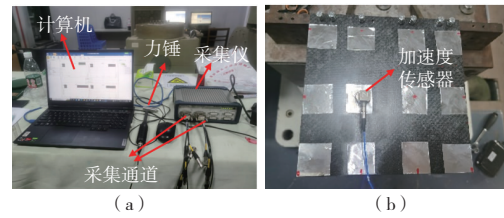


图5 模态试验装置图

使用厂家给予的材料参数作为初始值,如表1所示,在有限元软件中计算模态频率。图6为复合材料层合板的前4阶振型图。

表1 复合材料层合板材料参数初始值

材料参数	初始值
E_{11}/MPa	73 400
E_{22}/MPa	73 400
ν_{12}	0.066
G_{12}/MPa	4 970
G_{13}/MPa	4 970
G_{23}/MPa	3 500
$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.97

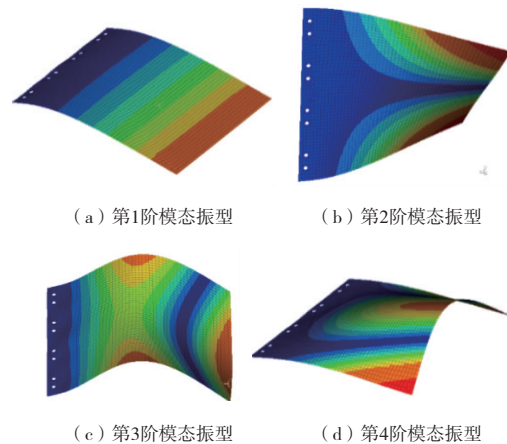


图6 复合材料层合板前4阶模态振型

有限元模型计算、实测频率比较如表2所示。可以看出,误差绝对值最大的是第2阶频率,达到11.64%,前4阶平均误差为-7.77%,使用工厂给予的初始值得到的计算-实测频率的误差较大。

表2 层合板实测与计算各阶模态频率值比较

项目	1阶	2阶	3阶	4阶
实测频率/Hz	33.23	50.54	195.04	221.80
计算频率/Hz	30.45	44.63	191.39	201.37
误差/%	-8.37	-11.69	-1.87	-9.21

分析误差主要原因可能来自以下几个方面:

1) 复合材料性能参数的分散性较大,工厂测试所得数据与实际所用层合板性能参数有偏差;

2) 建模简化引起的误差,但本次试验件结构较为简单,因此可基本忽略几何建模的影响;

3) 铺层角度对振动特性的影响,但本次试验层合板铺层为 $[0]_{12}$,角度常规,也可基本忽略该项误差。

综上,选取复合材料层合板各向弹性力学性能参数作为待识别参数。

3.2 敏感性分析

为确定模态频率对不同参数的敏感程度,对

待识别参数进行敏感性分析。由于试验件铺层采用的是编织碳纤维复合材料,可以近似地看作平面内1方向和2方向力学性能相同的正交各向异性材料。故可将 E_{11} 与 E_{22} 、 G_{12} 与 G_{13} 看作一个参数,因此仅需对4个材料参数 E_{11}/E_{22} 、 ν_{12} 、 G_{12}/G_{13} 和 G_{23} 进行分析。

对复合材料中的4个材料参数给出了7个水平参数值,由于设计变量的量纲不同,直接求解得到的结果可能会存在数量级差异,因此在初始值的10%~190%范围内选取设置变量的值,消除参数之间数量级差异较大对结果的影响,如表3所示。

表3 材料参数水平表

设计变量	下限值	上限值	水平设置						
			1	2	3	4	5	6	7
$(E_{11}/E_{22})/\text{MPa}$	7 340	139 460	7 340	29 360	51 380	73 400	95 420	117 440	139 460
ν_{12}	0.006 6	0.125 4	0.006 6	0.026 4	0.046 2	0.066 0	0.085 8	0.105 6	0.125 4
$(G_{12}/G_{13})/\text{MPa}$	497	9 443	497	1 988	3 479	4 970	6 461	7 952	9 443
G_{23}/MPa	350	6 650	350	1 400	2 450	3 500	4 550	5 600	6 650

计算得到不同参数下复合材料层合板的前4阶模态频率,结果如表4—表7所示。

表4 不同 E_{11}/E_{22} 下的复合材料层合板模态频率 单位:Hz

$(E_{11}/E_{22})/\text{MPa}$	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
7 340	10.03	30.24	62.88	81.14
29 360	19.62	36.85	123.18	134.55
51 380	25.67	41.11	161.30	171.40
73 400	30.45	44.63	191.39	201.37
95 420	34.49	47.74	216.93	227.28
117 440	38.05	50.57	239.44	250.43
139 460	41.25	53.19	259.74	271.53

表5 不同 ν_{12} 下的复合材料层合板模态频率 单位:Hz

ν_{12}	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
0.006 6	30.38	44.51	191.17	200.68
0.026 4	30.40	44.55	191.37	200.72
0.046 2	30.42	44.59	191.44	200.95
0.066 0	30.45	44.63	191.39	201.37
0.085 8	30.48	44.67	191.23	201.96
0.105 6	30.52	44.72	191.00	202.68
0.125 4	30.57	44.77	190.71	203.52

表6 不同 G_{12}/G_{13} 下的复合材料层合板模态频率 单位:Hz

$(G_{12}/G_{13})/\text{MPa}$	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
497	29.40	31.94	186.15	191.60
1 988	30.09	37.05	189.38	195.96
3 479	30.31	41.11	190.59	198.81
4 970	30.45	44.63	191.39	201.37
6 461	30.56	47.77	192.00	203.77
7 952	30.64	50.63	192.50	206.07
9 443	30.72	53.27	192.92	208.27

表7 不同 G_{23} 下的复合材料层合板模态频率 单位:Hz

G_{23}/MPa	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
350	29.08	43.22	182.32	200.36
1 400	30.08	44.24	189.08	201.07
2 450	30.33	44.50	190.65	201.27
3 500	30.45	44.63	191.39	201.37
4 550	30.52	44.70	191.83	201.44
5 600	30.57	44.76	192.13	201.48
6 650	30.61	44.80	192.35	201.52

对数据进行整理,以所用参数值/初始值的百分比作为横坐标,模态频率作为纵坐标,分析不同

参数对4个阶次模态频率的影响,分析其敏感性,结果如图7所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

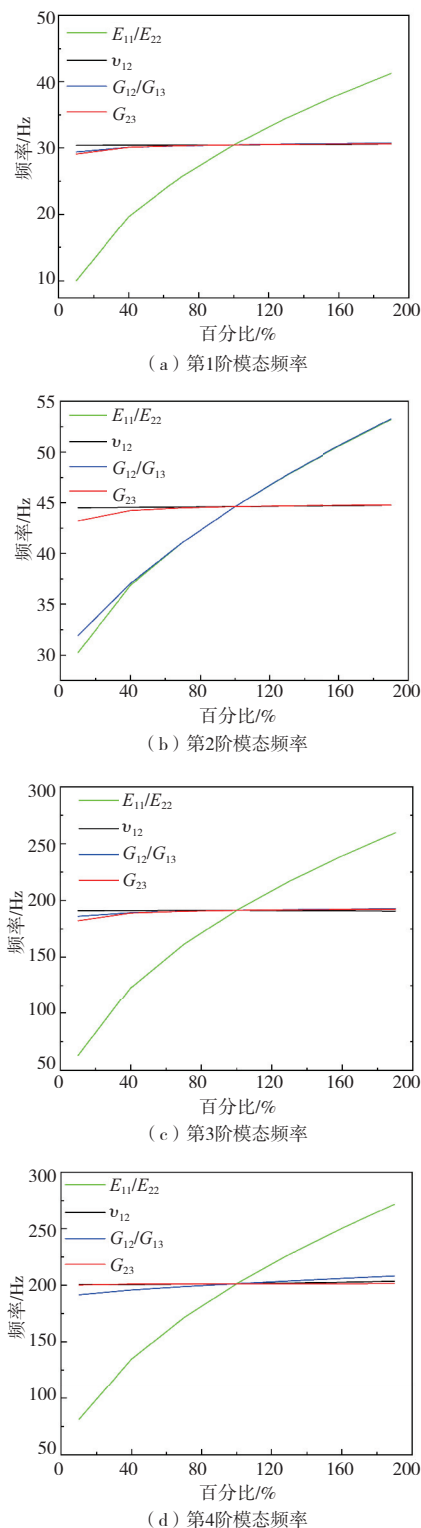


图7 不同参数值下的复合材料层合板模态频率

从图7中可以看出,对于第1、3、4阶模态频率,弹性模量 E_{11}/E_{22} 影响最大, G_{12}/G_{13} 、 G_{23} 与泊松比 v_{12} 影响较小,其中 v_{12} 影响最小。对于第2

阶模态频率, E_{11}/E_{22} 和 G_{12}/G_{13} 的影响较大,泊松比 v_{12} 影响最小。

3.3 材料参数识别

通常选取对结构动态特性敏感性较大的参数作为待识别参数,根据上节对各参数的敏感性分析,选择 E_{11}/E_{22} 、 G_{12}/G_{13} 和 G_{23} 作为待识别参数,在 Python 中编写程序通过遗传算法实现识别过程。识别前后的复合材料层合板的计算-实测频率误差比较如表8所示。由表8可知,识别后误差明显降低,误差绝对值的最大值由 11.69% 降至 5.32%,平均值由 7.77% 下降至 2.23%。

表8 识别后层合板实测与计算约束模态频率值比较

项目	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
实测频率/Hz	33.23	50.54	195.04	221.80
计算频率/Hz	33.05	47.85	194.13	227.55
误差/%	-0.55	-5.32	-0.47	2.59

3.4 参数识别方法有效性验证

为验证参数识别结果的准确性,将约束模态试验中识别出的材料参数代入自由边界条件下的有限元模型进行计算。用柔性绳将同一复合材料层合板悬挂用以模拟自由边界条件,使用锤击法获得该层合板的自由模态频率。比较识别前和识别后参数的自由模态计算-实测频率误差,结果如表9所示。由表9可知,对自由模态频率,使用识别后参数的计算-实测频率误差绝对值最大值由 18.61% 降至 5.10%,平均值由 7.18% 降至 2.34%。以上结果说明基于模态试验的参数识别方法是准确的。

表9 识别前后层合板实测与计算自由模态频率值比较

模态阶次	实测频率/Hz	识别前		识别后	
		频率/Hz	误差/%	频率/Hz	误差/%
1	63.58	51.75	-18.61	66.82	5.10
2	193.48	184.90	-4.44	193.68	0.10
3	195.31	193.55	-0.90	195.41	0.05
4	225.78	214.98	-4.78	235.04	4.10

4 结语

本文根据厂家提供的参数建立有限元初始模型,基于单边约束条件下复合材料层合板的模态试验结果,通过分析参数敏感性选取待识别参数,采用遗传算法在 Python 中编写程序识别复合材

(下转第 163 页)

采用 CFA 方法进行分析时,为了实现低阻尼比条件下也达到理想的分辨性能,形成了不均匀的小波参数划分状态。对上述结果进行对比可知,CFA 相对本文方法的识别状态存在明显差异,同时计算时间也明显延长。

4 结语

1) 仿真信号波形内形成了明显的周期故障冲击特征,采用本文方法计算的 Morlet 小波参数,能极大地缩短算法所需的时间。与 CFA 方法相比,本文方法对原子小波参数具有更准确的识别性能,具备更强抗噪能力,算法效率也获得明显提升。

2) 试验信号下 OMP 方法受到噪声频率影响时实际强度很低,不能实现准确识别的效果。本文方法的试验信号时域波形内存在明显故障冲击信号,从包络谱内观察到齿轮故障频率与倍频,实现齿轮故障精确诊断。

参考文献:

- [1] 吴磊,张新,王家序,等. 基于增强自适应盲解卷积方法的齿轮故障诊断[J]. 振动与冲击, 2023, 42(7): 123-132.
- [2] 范志锋,张融,王婷,等. 行星轮系早期故障诊断的研究与进展[J]. 机械传动, 2023, 47(3): 156-164.
- [3] 袁荷伟,李高磊,袁黎,等. 基于 LF-GWO 优化 FKCA 模型的齿轮箱故障诊断研究[J]. 机械设计与制造, 2023(4): 239-242.

- [4] 朱渔,李丹,李晓明,等. 基于 EEMD 和 BLSTM 算法的齿轮泵行星轮典型故障诊断[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(4): 198-201, 207.
- [5] FENG Z P, ZHOU Y K, ZUO M J, et al. Atomic decomposition and sparse representation for complex signal analysis in machinery fault diagnosis: a review with examples[J]. Measurement, 2017, 103: 106-132.
- [6] 郭俊峰,石斌,魏兴春,等. 基于 K-SVD 字典学习算法的稀疏表示振动信号压缩测量重构方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(7): 97-106.
- [7] 田赛,姚斌,陈彬强,等. 基于 Morlet 小波和改进峭度的滚动轴承故障诊断方法[J]. 工具技术, 2022, 56(10): 141-146.
- [8] 艾延廷,田博文,田晶,等. Morlet 复小波频带优化及其在中介轴承故障诊断中的应用[J]. 航空动力学报, 2020, 35(1): 153-161.
- [9] 张龙,毛志德,熊国良,等. 滚动轴承故障诊断的自适应包络谱峰因子算法[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(4): 507-514.
- [10] 邓飞跃,强亚文,郝如江,等. 基于自适应 Morlet 小波参数字典设计的微弱故障检测方法研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(8): 187-193, 254.
- [11] 王冉,余龙靖,余亮,等. 基于 RPCA 低秩稀疏分解的循环频率检测方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(4): 88-94.
- [12] 李静娇,陈恩利,刘永强. BSS 与 Morlet 小波变换在轴承声学故障诊断中的研究[J]. 机械强度, 2018, 40(3): 528-533.

收稿日期:2023-03-22

(上接第 150 页)

料层合板参数。再对同一层合板进行自由模态试验,通过比较识别前、后参数下的计算-实测频率误差来验证识别参数的准确性。结果表明:参数计算-实测自由模态频率误差由识别前的 18.61% 降至识别后的 5.10%, 这说明了基于模态试验的参数识别方法的有效性。

参考文献:

- [1] 肖守讷,江兰馨,蒋维,等. 复合材料在轨道交通车辆中的应用与展望[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 154-176.
- [2] 刘镇阳,翟雨农,李东升,等. 飞机复合材料壁板装配变形控制技术研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(18): 46-54, 78.
- [3] 邹瑞睿,张坤. 纤维增强塑料复合材料在汽车轻量化中的应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57(5): 123-126.
- [4] WANG W T, KAM T Y. Material characterization of laminated composite plates via static testing [J].

Composite Structures, 2000, 50(4): 347-352.

- [5] LECOMPTE D, SMITS A, SOL H, et al. Mixed numerical-experimental technique for orthotropic parameter identification using biaxial tensile tests on cruciform specimens [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(5): 1643-1656.
- [6] 张令弥. 动态有限元模型修正技术及其在航空航天结构中的应用[J]. 强度与环境, 1994, 21(2): 10-17.
- [7] 郭勤涛,张令弥,费庆国. 结构动力学有限元模型修正的发展:模型确认[J]. 力学进展, 2006, 36(1): 36-42.
- [8] PRODROMOU A G, LOMOV S V, VERPOEST I. The method of cells and the mechanical properties of textile composites [J]. Composite Structures, 2011, 93(4): 1290-1299.
- [9] JIANG L X, XIAO S, YANG B, et al. Bimodulus constitutive relation and mesoscopic model of braided composites [J]. Composite Structures, 2021, 270: 114115.
- [10] 吉根林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(2): 69-73.

收稿日期:2023-02-21