

2.5 维树脂基编织复合材料平板 固有振动分析

刘杰明, 周 标, 温卫东, 张宏建

(南京航空航天大学 能源与动力学院

航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 开展 2.5 维 T800 碳纤维/BMP350 聚酰亚胺树脂编织复合材料平板结构固有振动特性的仿真分析与试验研究。首先,分别采用多尺度分析方法和细观尺度有限元分析方法预测复合材料悬臂平板的固有振动特性。其次,开展了复合材料悬臂平板的模态试验,获取其固有振动特性的实测数据。与试验结果对比,仿真预测固有频率最大误差在 10% 以内,验证了上述两种固有振动分析方法的有效性,可为后续 2.5 维树脂基编织复合材料叶片的动力学性能分析与设计研究提供参考。

关 键 词: 2.5 维树脂基编织复合材料; 固有振动; 多尺度分析; 有限元分析; 模态试验

中图分类号: V250; TB332

文献标志码: A

Natural vibration analysis of 2.5D resin-based braided composite plates

LIU Jieming, ZHOU Biao, WEN Weidong, ZHANG Hongjian

(Aero-engine Thermal Environment and Structure Key Laboratory of Ministry of Industry and
Information Technology, College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Modal vibration characteristics of 2.5D T800 carbon fiber/BMP350 polyimide resin braided composite plates were numerically and experimentally investigated. Firstly, the multi-scale method and meso-scale finite element method were employed to numerically predict the modal vibration characteristics of the cantilevered composite plates respectively. Secondly, modal behaviors of the cantilevered composite plates were experimentally derived by modal testing. Compared with the experimental results, the maximum error of natural frequency predicted by simulation was 10%, which verified the validity of the above two natural vibration analysis methods. This work could pave the way to the subsequent research concerning dynamic analysis and design of 2.5D resin-based braided composite blades.

Key words: 2.5D resin-based braided composite; natural vibration; multi-scale analysis; finite element method; modal testing

收稿日期: 2021-03-16

基金项目: 航空动力基金(6141B09050340)

作者简介: 刘杰明(1995—),男,硕士生,主要研究方向为航空发动机结构动力学。

通信作者: 周标(1984—),男,副教授,博士,主要研究方向为航空发动机结构动力学。E-mail:biao.zhou@nuaa.edu.cn

引用格式: 刘杰明,周标,温卫东,等. 2.5 维树脂基编织复合材料平板固有振动分析[J]. 航空动力学报, 2022, 37(7): 1469-1477. LIU Jieming, ZHOU Biao, WEN Weidong, et al. Natural vibration analysis of 2.5D resin-based braided composite plates[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(7): 1469-1477.

2.5 维编织树脂基复合材料是近年来发展运用的一种新型高性能编织复合材料,其特点为在厚度方向引入具有一定角度的纱线将平面编织结构联结成为空间网状结构。相比于层板结构复合材料,它的层间连接强度和抗冲击能力得到大幅提高^[1]。同时,它在叶片材料/结构一体化设计、制造成本和生产效率方面相较于传统的三维正交编织结构复合材料更具优势^[2]。因而 2.5 维编织树脂基复合材料成为我国新一代大涵道比涡扇发动机的风扇和压气机叶片可选材料之一。

准确分析预测 2.5 维编织树脂基复合材料叶片结构的固有振动特性是使其迈向工程实际应用需突破的关键技术之一。然而,近年来针对 2.5 维编织结构树脂基复合材料结构的研究工作大都集中在静力学性能和疲劳性能方面^[3-8],而关于其动力学性能研究的公开文献报道十分少见。究其原因,编织结构树脂基复合材料叶片的动力学性能不仅与其宏观结构特征(如几何形状、边界条件、载荷)有关,也与其组分材料参数(纤维、基体的力学性能,纤维体积含量等)、编织结构^[9-10](如编织样式、纤维编织角、经纬纱密度和层列数、加纱率等)以及纤维/基体之间的界面特性等细观特征密切相关^[11-12]。非均质各向异性材料特性和复杂的跨尺度结构特征使得准确地建模分析预测结构的动力学特性较为困难^[13]。因此在现有静力学性能研究的基础上,进一步研究复合材料叶片动力学特性的工作亟待开展。

本文开展 2.5 维 T800 碳纤维/BMP350 聚酰亚胺树脂编织复合材料平板结构的固有振动特性分析。首先分别采用多尺度分析方法和细观尺度有限元分析方法对复合材料平板结构的固有振动特性进行预测;其次开展复合材料悬臂平板结构的模态试验,获取其实测固有振动特性,最终验证前述 2.5 维树脂基编织复合材料平板结构固有振动特性预测方法的有效性。

1 固有振动仿真分析

文中第一部分介绍 2.5 维树脂基编织复合材料平板结构的固有振动仿真方法,包括多尺度分析方法和细观尺度有限元分析方法。

1.1 多尺度分析方法

复合材料结构固有振动多尺度分析方法遵循“编织结构细观尺度结构几何模型-双胞胎结构代表性体积单元模型-宏观尺度结构动力学模型”的建

模思路来处理其跨尺度特征,其分析预测流程如图 1。

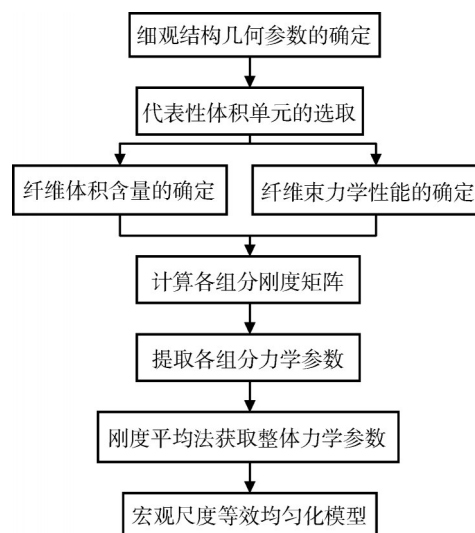


图 1 多尺度分析流程

Fig.1 Multi-scale analysis process

该方法首先从纤维细观结构入手,对纤维截面形状和空间走向做出合理假设,建立 2.5 维编织树脂基复合材料的几何模型;接着采用刚度体积平均法,基于双胞胎模型建立 2.5 维编织树脂基复合材料的弹性常数预测模型;然后建立宏观尺度的均匀化等效力学有限元模型进行模态仿真分析,从而获得复合材料结构的振动模态参数。

1.1.1 细观几何模型

本文选用的 2.5 维树脂基编织复合材料为浅交弯联编排结构,纬纱层数为 4 层。为了从细观角度定量分析 2.5 维树脂基编织复合材料的力学性能,采用如下假设^[14]:

- 1) 预制件内部纤维和基体组分分布均匀,材料内没有气泡生成^[15-17];
- 2) 经纱束截面为矩形,其编织轨迹类似正弦函数曲线;
- 3) 纬纱束截面呈双凸透镜形状,沿长度方向截面形状保持不变;
- 4) 纤维束无扭转现象,除外层经纱和表面经纱外,织物内部各处纤维束截面形状沿轴向保持不变;
- 5) 纤维束内树脂填充均匀,同一根纱线中纤维聚集密度沿轴向保持不变。

基于上述假设针对 2.5 维树脂基编织复合材料内部最小重复单元建立细观几何模型,如图 2 所示。

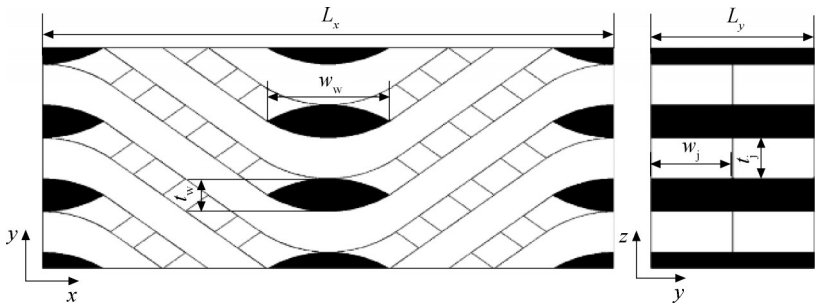


图 2 2.5 维编织复合材料细观几何模型

Fig.2 Mesoscopic geometric model of 2.5D braided composites

图 2 中 x 、 y 、 z 方向为 2.5 维树脂基编织复合材料中经纱铺设方向、纬纱铺设方向和厚度方向； L_x 、 L_y 为代表性体积单元在 x 、 y 方向上的长度； w_w 和 t_w 为纬纱束宽度和厚度； w_j 和 t_j 为经纱束宽度和厚度。假设纬纱横截面轮廓形状与二次函数曲线形状一致，与纬纱束接触的经纱束部分满足同样的二次函数，其他经纱束部分均呈直线分布。

基于上述几何参数和假设即可计算出 2.5 维树脂基编织复合材料中经纱、纬纱和基体的体积分数 V_j 、 V_w 和 V_m ^[18-19]。

1.1.2 组分材料刚度矩阵

本文 2.5 维树脂基编织复合材料的组分材料为国产 T800-12K 碳纤维和 BMP350 聚酰亚胺树脂，其力学性能参数由材料制造方提供，如表 1 所示。其中 E_{ij} 为组分材料的弹性模量， G_{ij} 为切变模量， ν_{ij} 为泊松比， ρ 为密度。 $i, j=1, 2, 3$ 为材料的局部坐标系方向。

表 1 T800 碳纤维和 BMP350 聚酰亚胺树脂力学性能参数

Table 1 Mechanics properties parameters of T800 carbon fiber and BMP350 polyimide resin

参数	T800-12K	BMP350
E_{11}/GPa	294	6.5
E_{22}/GPa	19	6.5
G_{12}/GPa	14	2.43
G_{23}/GPa	6.78	2.43
ν_{12}	0.3	0.34
ν_{23}	0.4	0.34
$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.8	1.2

2.5 维树脂基编织复合材料中的组分树脂为各向同性材料，其柔度矩阵和刚度矩阵分别为

$$\mathbf{S}_m = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_m} & -\frac{\nu}{E_m} & -\frac{\nu}{E_m} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E_m} & \frac{1}{E_m} & -\frac{\nu}{E_m} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E_m} & -\frac{\nu}{E_m} & \frac{1}{E_m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_m} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{C}_m = \mathbf{S}_m^{-1} \quad (2)$$

考虑到树脂基编织复合材料中纤维束渗有树脂材料，通常采用 CHAMIS 模型^[20]来获取纤维束的力学性能并构建其柔度矩阵和刚度矩阵 $\mathbf{S}_f$ 、 $\mathbf{C}_f$ 。基于 CHAMIS 模型的纤维束力学性能计算如下式：

$$\begin{cases} E_1 = k [p_f E_{f1} + (1 - p_f) E_m] \\ E_2 = E_m / \left[1 - \sqrt{p_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_{f2}} \right) \right] \\ G_{12} = G_{23} = \frac{K G_m}{\left[1 - \sqrt{p_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_{f12}} \right) \right]} \\ G_{23} = G_m / \left[1 - \sqrt{p_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_{f23}} \right) \right] \\ \nu_{12} = \nu_{13} = p_f \nu_{f12} + (1 - p_f) \nu_m \end{cases} \quad (3)$$

2.5 维编织树脂基复合材料纤维束系统由经纱系和纬纱系组成，纱线走向方向为 1 方向，纱线走向的法线方向为 3 方向。如图 3 所示，弯曲的横观各向同性经纱纤维束任意微元段 ds 在局部坐标系下的柔度矩阵为

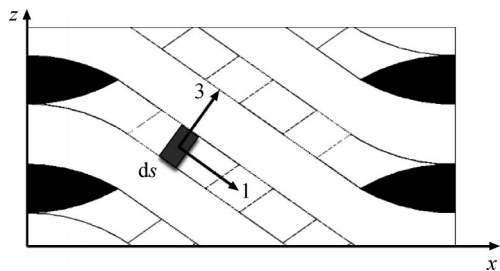


图3 经纱微元段局部坐标系与全局坐标系

Fig.3 Local coordinates and global coordinates of the warp yarn differential section

$$S'_{je} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于该微段局部坐标系与复合材料的整体坐标系不一致,需要将局部坐标系下的柔度矩阵 S'_{je} 转换到全局坐标系下的柔度矩阵 S_{je} :

$$S_{je} = TS'_{je}T^T \quad (5)$$

其矩阵 T 为坐标转换矩阵。将全局坐标系下的微元段柔度矩阵 S_{je} 沿纱线延伸方向进行曲线积分并求平均值,即可得到完整经纱纤维束在全局坐标系下的平均柔度矩阵 S_j 和刚度矩阵 C_j :

$$S_j = \frac{1}{L} \int S_{je} ds \quad (6)$$

$$C_j = S_j^{-1} \quad (7)$$

纬纱系中的纤维束为平直纱线,其局部坐标系与全局坐标系一致,无需进行坐标转化。因此,纬纱束的刚度矩阵与纤维束刚度矩阵相同,表示为 C_w 。

1.1.3 材料弹性常数计算

考虑到 2.5 维树脂基编织复合材料表层和内部细观结构和力学性能差异,可以将材料代表性体积单元视为如图 4 所示双胞胎模型^[21],由表面胞元和内部胞元构成。

内部胞元和表面胞元的刚度矩阵 C_n 和 C_b 具

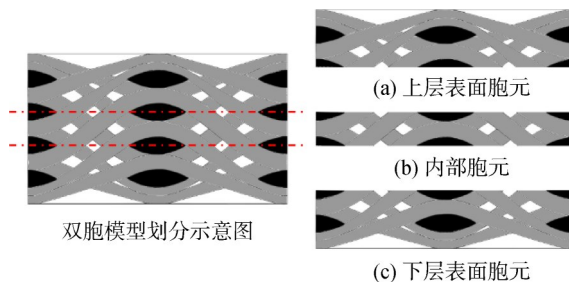


图4 双胞胎模型

Fig.4 Double-cell model

体表示为

$$C_n = V_{mn}C_m + V_{jn}C_{jn} + V_{wn}C_{wn} \quad (8)$$

$$C_b = V_{mb}C_m + V_{jb}C_{jb} + V_{wb}C_{wb} \quad (9)$$

其中 C_{jn} 、 C_{wn} 表示内部胞元的经纱束和纬纱束刚度矩阵, C_{jb} 、 C_{wb} 表示表面胞元的经纱束和纬纱束刚度矩阵; V_{mn} 、 V_{jn} 、 V_{wn} 表示内部胞元的基体体积分、经纱体积分、纬纱体积分, V_{mb} 、 V_{jb} 、 V_{wb} 表示表面胞元的基体体积分、经纱体积分、纬纱体积分。

分别对内部胞元和表面胞元的刚度矩阵求逆,即可得到各自的柔度矩阵 S_n 和 S_b 为

$$S_n = C_n^{-1} \quad (10)$$

$$S_b = C_b^{-1} \quad (11)$$

内部胞元和表面胞元的各项弹性常数可使用各自柔度矩阵中的元素 S_{ij} 按照式(12)、式(13)计算获得。

$$\begin{cases} E_{x,n} = \frac{1}{S_{11}}, E_{y,n} = \frac{1}{S_{22}}, E_{z,n} = \frac{1}{S_{33}} \\ G_{yz,n} = \frac{1}{S_{44}}, G_{xz,n} = \frac{1}{S_{55}}, G_{xy,n} = \frac{1}{S_{66}} \\ \nu_{yz,n} = -\frac{S_{23}}{S_{33}}, \nu_{xy,n} = -\frac{S_{12}}{S_{22}}, \nu_{xz,n} = -\frac{S_{13}}{S_{33}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} E_{x,b} = \frac{1}{S_{11}}, E_{y,b} = \frac{1}{S_{22}}, E_{z,b} = \frac{1}{S_{33}} \\ G_{yz,b} = \frac{1}{S_{44}}, G_{xz,b} = \frac{1}{S_{55}}, G_{xy,b} = \frac{1}{S_{66}} \\ \nu_{yz,b} = -\frac{S_{23}}{S_{33}}, \nu_{xy,b} = -\frac{S_{12}}{S_{22}}, \nu_{xz,b} = -\frac{S_{13}}{S_{33}} \end{cases} \quad (13)$$

结合内部胞元和表面胞元各自在整体双胞胎模型的体积分 λ 和 θ , 采用体积平均法亦可获得双胞胎模型整体的弹性常数

$$\begin{cases} E_x = \lambda E_{x,n} + \theta E_{x,b} \\ E_y = \lambda E_{y,n} + \theta E_{y,b} \\ E_z = \lambda E_{z,n} + \theta E_{z,b} \\ G_{yz} = \lambda G_{yz,n} + \theta G_{yz,b} \\ G_{xz} = \lambda G_{xz,n} + \theta G_{xz,b} \\ G_{xy} = \lambda G_{xy,n} + \theta G_{xy,b} \\ \nu_{yz} = \lambda \nu_{yz,n} + \theta \nu_{yz,b} \\ \nu_{xz} = \lambda \nu_{xz,n} + \theta \nu_{xz,b} \\ \nu_{xy} = \lambda \nu_{xy,n} + \theta \nu_{xy,b} \end{cases} \quad (14)$$

1.1.4 宏观尺度固有振动分析

在获得内部胞元和表面胞元的弹性常数后,将2.5维编织树脂基复合材料近似等效为具有两种力学性能参数的均质,如图5所示,即可开展宏观尺度的固有振动分析。

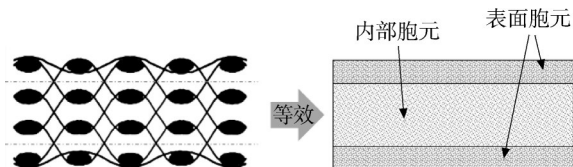


图5 基于双胞模型的均匀化等效过程

Fig.5 Homogenization equivalent process based on double-cell model

在实际操作层面,以平板结构为例,首先在有限元软件中通过共节点的方式建立3个相邻的矩形薄板模型;然后,对其中上下两层的矩形薄板赋予对应2.5维树脂基编织复合材料双胞模型中的表层胞元的弹性常数,对中间层薄板赋予对应内部胞元的弹性常数;最后对复合材料平板一端的两侧表面施加固定约束,模拟悬臂平板试验夹持状态的边界条件并进行理论模态分析,获取其固有振动特性预测结果。

1.2 细观尺度有限元分析方法

与多尺度分析方法不同,细观尺度有限元分析方法针对复合材料代表性体积单元的细观结构几何模型进行有限元网格划分,以实现纤维束和基体组分材料的离散化。然后,将代表性体积单元进行复制,得到与实际复合材料结构具有相同的宏观尺寸以及细观结构特征的有限元模型。在图6所示的建模过程中,假设纤维与基体之间为理想黏结,忽略纤维/基体界面可能发生的脱黏和滑移现象。最后,通过模态仿真分析计算获得细观尺度下材料内部完整的应力-应变关系,并进一步反映复合材料结构的宏观固有振动特性。这使得复合材料结构固有振动仿真分析的计算量大大

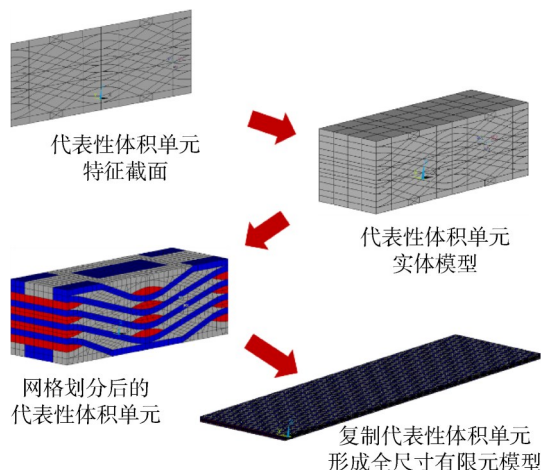


图6 有限元分析建模流程

Fig.6 Modeling process of finite element analysis

增加,对计算资源提出了较高的要求。

2 模态试验分析

2.1 试验件制备

首先采用RTM(resin transfer molding)成型工艺,制备T800/BMP350材料体系的2.5维树脂基编织复合材料方形整板预制件3件(400 mm×400 mm×2 mm);接着采用水刀工艺从整板预制件中切割出长宽高尺寸为130 mm×30 mm×2 mm的经向和纬向2.5维树脂基编织复合材料平板,如图7所示。

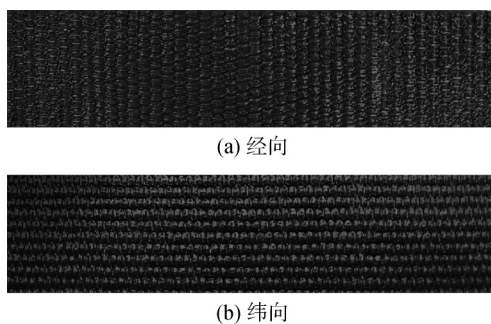


图7 2.5维树脂基编织复合材料平板试验件

Fig.7 2.5D resin-based braided composite test plates

2.2 模态测试方法

本文采用单点激励多点测量(单输入多输出, SIMO)的方法开展2.5维树脂基编织复合材料悬臂平板试验件的模态测试。

模态测试系统如图8所示。试验设计了专用夹具用以施加边界条件,夹持段为30 mm,试件安装及约束施加如图9所示。试验使用的测振设备是PSV-400非接触式激光多普勒测振系统,测振

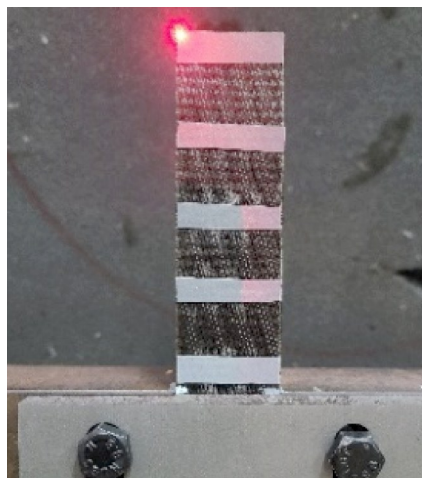


图8 模态测试约束施加

Fig.8 Restraint of modal test

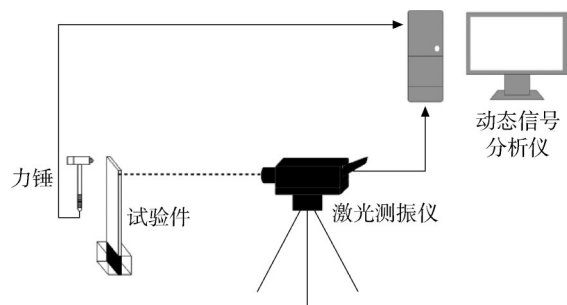


图9 模态测试系统

Fig.9 Modal test system

系统内置信号发生器和动态信号分析仪。激振方式采用力锤激励,力锤选用PCB-086E80小型力锤。测试过程中,通过动态信号分析仪测量激励点和响应点的时域信号三次并作平均处理,以保证测试数据的有效性;接着通过快速傅里叶变换(FFT)将其转变为频域信号,并计算获取频响函

数;最后使用模态分析软件进行模态参数辨识,采取峰值拾取法获取固有频率和振型。

3 试验与仿真结果对比分析

本节首先通过试验和仿真的手段获取了2.5维树脂基编织复合材料的拉伸模量;接着按照上述模态测试方法开展了2.5维编织树脂基复合材料悬臂平板的模态试验,测取了2.5维编织树脂基复合材料悬臂平板的固有频率和振型;同时采用多尺度分析方法和细观尺度有限元分析方法预测了悬臂平板的固有频率和振型;最后将预测结果与试验值对比,分析仿真预测方法的可行性。

3.1 弹性模量仿真预测与试验结果对比

为了保证固有振动特性预测结果的准确性,本文开展2.5维编织树脂基复合材料经/纬向平板试验件的静力学拉伸试验,对其弹性模量仿真预测结果进行验证。静力学拉伸试验所采用的试验件从整板预制件中切割得到,其尺寸为 $190\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。试验在南京航空航天大学能源与动力学院实验室中进行,试验设备有MTS-10t试验机、配套引伸计和数据采集分析计算机。试验测得三组2.5维树脂基编织复合材料平板试验件的平均经、纬向拉伸弹性模量为 $E_x = 25.01\text{ GPa}$, $E_y = 45.01\text{ GPa}$ 。其中,所有测试数据离散系数仅有1.24%,因此测试结果是可信的。

采用文中第1.1.3节所述的弹性常数预测的方法对2.5维树脂基编织复合材料内、外胞和双胞模型整体结构的弹性常数进行预测,结果如表2所示。其中 E_{ij} 为弹性模量, G_{ij} 为切变模量, ν_{ij} 为泊松比($i, j = x, y, z$)。

表2 基于双胞模型的2.5维树脂基编织复合材料的弹性参数预测结果

Table 2 Prediction results of elastic parameters of 2.5D resin-based braided composites based on the double-cell model

胞体类型	E_x/GPa	E_y/GPa	E_z/GPa	G_{xy}/GPa	G_{xz}/GPa	G_{yz}/GPa	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}
内部单胞	27.11	46.55	42.01	4.25	4.50	4.26	0.22	0.24	0.34
外部单胞	25.19	41.02	39.97	4.66	4.87	4.63	0.23	0.24	0.41
双胞模型	26.04	43.70	40.98	4.35	4.69	4.46	0.22	0.24	0.37

试验件经/纬向拉伸弹性模量试验与预测结果对比情况如表3所示。其中,经/纬向拉伸弹性模量最大预测误差仅为3.61%,说明所获取的2.5维树脂基编织复合材料弹性常数预测结果有效。

3.2 固有振动仿真预测与试验结果对比

经验证的弹性常数预测数值将应用于基于多尺度分析方法的固有振动分析;同时将文中第2.1节中获取的组分材料力学性能参数输入细观尺度有限元分析方法的有限元模型中,分别获得两种

表 3 2.5 维树脂基编织复合材料弹性参数预测值与试验值对比

Table 3 Comparison of predicted and tested values of elastic parameters of 2.5D resin-based braided composites

弹性参数	预测值/GPa	测试值/GPa	误差/%
E_x	26.04	25.10	3.61
E_y	43.70	45.01	-3.00

不同方法预测的 2.5 维树脂基编织复合材料悬臂平板的固有振动特性。

由表 4 可知,采用多尺度分析方法进行仿真计算时,划分单元数远小于细观有限元分析方法,占用计算资源小且计算效率显著提高。

表 4 多尺度分析方法及细观有限元分析方法计算效率对比

Table 4 Comparison of computational efficiency between multi-scale analysis and mesoscopic finite element methods

分析方法	单元数	计算平均时长
有限元分析方法	1.20×10^6	28 h
多尺度分析方法	7 200	10.2 s

此外,根据文中第 2.2 节介绍的方法开展模态试验,测得了 8 组经/纬向复合材料悬臂平板前五阶平均固有频率和模态振型,分别是 1 阶弯曲模态(1B)、1 阶扭转模态(1T)、2 阶弯曲模态(2B)、1 阶弯扭模态(1BT)和 3 阶弯曲模态(3B)。所有试验件固有频率测试值分布如图 10 和图 11

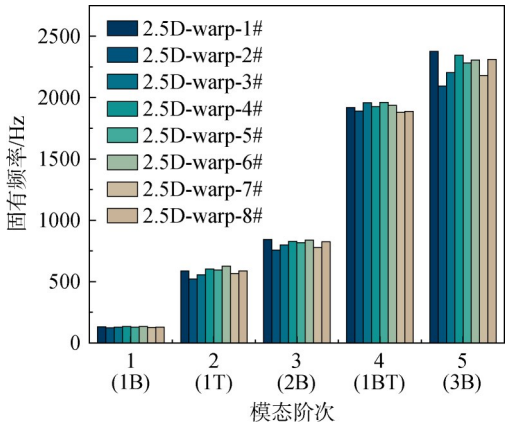


图 10 经向 2.5 维树脂基编织复合材料悬臂平板模态频率测试结果

Fig.10 Test results of modal frequencies of 2.5D warp resin-based braided composite cantilevered plates

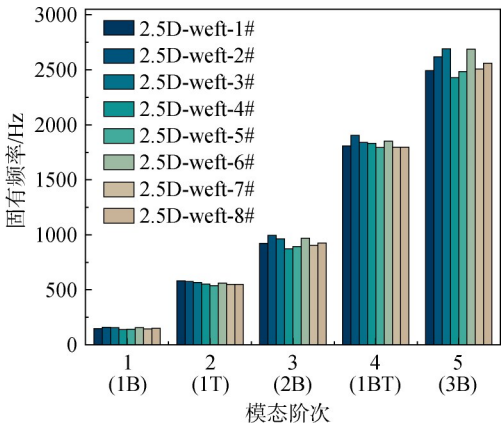


图 11 纬向 2.5 维树脂基编织复合材料悬臂平板模态频率测试结果

Fig.11 Test results of modal frequencies of 2.5D weft resin-based braided composite cantilevered plates

所示,最大离散系数为 5.4% 和 4.9%。其中,2.5D 代表 2.5 维树脂基编织复合材料;warp 与 weft 分别代表纤维的经、纬方向;1~8#为经向与纬向试验件各 8 件。经、纬向复合材料悬臂平板平均固有频率测试值与仿真结果对比如表 5 和表 6 所示。

综合观察表中预测结果与试验结果的对比情况可以发现:采用多尺度分析方法预测得到的复合材料平板试验件各阶固有频率与测试值相比,最大误差为 10.44%,其中经、纬向悬臂平板弯曲模态固有频率的预测误差均显著大于扭转模态和弯扭模态。采用细观尺度有限元分析方法获得的复合材料平板试验件各阶预测值与测试值相比,最大误差为 9.12%,其中经向悬臂平板弯曲模态固有频率的预测误差高于扭转模态和弯扭模态,而纬向悬臂平板反之。

总的来说,两种预测方法的预测结果与试验结果吻合较好。多尺度分析方法在预测效率方面有突出优势,而细观尺度有限元分析方法的预测精度稍有提高。

经分析,两种 2.5 维树脂基编织复合材料平板固有振动预测方法的误差可能源自以下因素:①理想化细观几何模型与实际复合材料的细观结构特征并不完全一致;②目前,基于 T800 碳纤维/BMP350 聚酰亚胺树脂材料体系的 2.5 维树脂基编织复合材料制备工艺尚不成熟,使得复合材料力学性能并不稳定;③两种方法均未考虑纤维/基体界面的相互作用。此外,多尺度固有振动分析过程中所采用的复合材料弹性常数预测值的误差(最大为 3.61%)也可能对悬臂平板固有振动频率

表 5 经向 2.5 维树脂基编织复合材料模态测试数据与仿真结果对比

Table 5 Comparison of modal test and simulation results of 2.5D warp resin-based braided composites

模态阶次	测试结果		多尺度分析方法			细观尺度有限元分析方法		
	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型	频差/%	频率/Hz	振型	频差/%
1	130.5		144.6		9.7	143.5		9.0
2	580.5		603.7		3.8	557.6		-4.1
3	811.3		904.3		10.3	862.8		9.1
4	1 919.7		1 973.3		2.7	1 836.2		-4.6
5	2 262.1		2 525.7		10.4	2 378.5		8.7

表 6 纬向 2.5 维树脂基编织复合材料模态测试数据与仿真结果对比

Table 6 Comparison of modal test and simulation results of 2.5D weft resin-based braided composites

模态阶次	测试结果		多尺度分析方法			细观尺度有限元分析方法		
	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型	频差/%	频率/Hz	振型	频差/%
1	149.3		161.3		7.4	146.1		-2.2
2	559.1		556.1		-0.5	606.1		7.8
3	931.3		1 007.3		7.6	909.8		-2.4
4	1 828.0		1 873.2		2.4	1 940.5		5.8
5	2 558.9		2 808.3		8.9	2 521.3		-1.5

的预测结果造成影响。

4 结 论

本文开展了 2.5 维 T800 碳纤维/BMP350 聚酰亚胺树脂编织复合材料平板结构固有振动特性的仿真分析与试验研究。文中依次采用多尺度分析方法和细观尺度有限元分析方法获取的 2.5 维树脂基编织复合材料平板结构固有振动特性,且与复合材料悬臂平板的模态测试结果基本吻合,经过验证,采用多尺度分析方法预测的复合材料弹性模量最大预测误差仅为 3.61%,固有频率预测误差在 10% 以内。细观有限元分析方法的优

点在于其能够有效反映结构发生宏观尺度振动时材料内部的应力-应变分布状态,但其庞大的模型规模会消耗大量计算资源,导致计算效率低下。相较于细观尺度有限元分析方法,多尺度分析方法较高的预测效率使其在快速获取 2.5 维树脂基编织复合材料平板固有振动特性方面具有突出优势,可为后续发展 2.5 维树脂基编织复合材料叶片的动力学性能分析与设计工具提供参考。

参考文献:

[1] GUO Junhua, WEN Weidong, ZHANG Hongjian, et al. Representative cell modeling strategy of 2.5D woven composites considering the randomness of weft cross-section for mechan-

- ical properties prediction[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 237:107255.1-107255.24.
- [2] 张洪斌. 航空发动机设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
- [3] 刘浩龙, 崔海涛, 温卫东. 2.5维机织复杂结构件的静强度[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(3):656-664.
- LIU Haolong, CUI Haitao, WEN Weidong. Static strength of 2.5 dimensional woven complex structural[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(3):656-664. (in Chinese)
- [4] 邱睿, 温卫东, 崔海涛. 2.5维机织复合材料疲劳寿命预测方法[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(9):2113-2120.
- QIU Rui, WEN Weidong, CUI Haitao. Fatigue life prediction method of 2.5 dimensional woven composites[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(9):2113-2120. (in Chinese)
- [5] 赵哲, 温卫东, 宋健, 等. 2.5维机织复合材料的纬向力学性能试验[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(11):2729-2736.
- ZHAO Zhe, WEN Weidong, SONG Jian, et al. Experimental study on zonal mechanical properties of 2.5D woven composites[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(11):2729-2736. (in Chinese)
- [6] SONG J, WEN W, CUI H, et al. Study on static and fatigue behaviors of carbon fiber bundle and the statistical distribution by experiments[J]. *Journal of Composite Materials*, 2015, 49(25):3157-3168.
- [7] 朱永新, 崔海涛, 温卫东. 2.5维机织复合材料经向拉伸弹性模量预测与试验验证[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(3):198-204.
- ZHU Yongxin, CUI Haitao, WEN Weidong. Prediction and experimental verification of meridional elastic modulus of 2.5D woven composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2013, 30(3):198-204. (in Chinese)
- [8] 孔春元, 孙志刚, 高希光, 等. 2.5维C/SiC复合材料单胞模型及刚度预测[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(11):2459-2467.
- KONG Chunyuan, SUN Zhigang, GAO Xiguang, et al. Unit cell of 2.5 dimension C/SiC and its stiffness prediction[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(11):2459-2467. (in Chinese)
- [9] ABARCAR R B, CUNNIFF P F. The vibration of cantilever beams of fiber reinforced material[J]. *Journal of Composite Materials*, 1972, 6(4):504-517.
- [10] KUANG J H, HSU M H. The effect of fiber angle on the natural frequencies of orthotropic composite pre-twisted blades[J]. *Composite structures*, 2002, 58(4):457-468.
- [11] 郑君, 温卫东, 崔海涛, 等. 2.5维机织结构复合材料的弹性性能预测[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(11):2031-2035.
- ZHENG Jun, WEN Weidong, CUI Haitao, et al. Elastic property prediction of 2.5 dimensional woven structures composites[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(11):2031-2035. (in Chinese)
- [12] 郑君, 温卫东, 崔海涛. 几何假设对2.5D机织复合材料刚度预测的影响[C]//中国航空学会第十四届发动机结构强度振动学术研讨会论文集. 贵阳: 中国航空学会, 2008: 418-423.
- [13] GREEN S D, MATVEEV M Y, LONG A C, et al. Mechanical modelling of 3D woven composites considering realistic unit cell geometry[J]. *Composite Structures*, 2014, 118:284-293.
- [14] 郑君, 温卫东, 崔海涛, 等. 2.5维机织结构复合材料的几何模型[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(2):143-148.
- ZHENG Jun, WEN Weidong, CUI Haitao, et al. Geometric model of 2.5-dimensional woven structure composites[J]. *Journal of Composites*, 2008, 25(2):143-148. (in Chinese)
- [15] DONG A, LI S, ZHU W. Investigation of elastic parameters of three-dimensional full five-directional braided composite materials[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2020, 44(1):119-128.
- [16] LI J C, CHEN L, ZHANG Y F, et al. Microstructure and finite element analysis of 3D five-directional braided composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, 31(2):107-115.
- [17] XU K, XU X W. Finite element analysis of mechanical properties of 3D five-directional braided composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 487(1/2):499-509.
- [18] 宋健. 2.5维机织复合材料力学行为及寿命预测模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- SONG Jian. Study on mechanical behavior and life prediction model of 2.5D woven composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [19] HALLAL A, YOUNES R, FARDOUN F, et al. Improved analytical model to predict the effective elastic properties of 2.5 D interlock woven fabrics composite[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(10):3009-3028.
- [20] CHAMIS C C. Simplified composite micromechanics equations of hygral, thermal, and mechanical properties[J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, 39(3):999-1004.
- [21] 赵思波. 2.5维编织复合材料叶片振动分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- ZHAO Sibo. Research on vibration analysis method of 2.5-dimensional braided composite blade[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)