

基于 FEM-PIM 计及热效应的统计能量分析

陈 强^{1,2}, 张 鹏^{1,2}, 李彦斌³, 吴邵庆^{1,2}, 费庆国^{1,2}

(1. 东南大学 土木工程学院 工程力学系, 南京 210096;

2. 东南大学 江苏省工程力学分析重点实验室, 南京 210096;

3. 东南大学 机械工程学院, 南京 211189)

摘 要: 结合有限元法(FEM)和模态坐标系下计及热效应的功率输入法(PIM), 给出一种热环境下适用于复杂结构的统计能量分析方法. 以各边简支的 L 型折板为研究对象, 开展雨流载荷作用下的数值模拟验证方法的准确性. 开展 3 种工况条件下热效应对统计能量分析参数的影响研究: ①仅考虑热效应引起的材料力学性能变化; ②仅考虑热应力引起的附加刚度效应; ③同时考虑两者影响. 结果表明: 温升影响材料力学性能的同时会导致耦合损耗因子减小, 但对内损耗因子的影响不大; 热应力引起的附加刚度效应对内损耗因子和耦合损耗因子的影响较大, 两者均随温度的升高而逐渐减小; 同时考虑两者影响时, 热应力对统计能量分析参数的影响占主导地位, 内损耗因子和耦合损耗因子均随温度的升高而逐渐减小; 模态密度与温度的变化趋势基本一致.

关 键 词: 统计能量分析; 热效应; 功率输入法; 内损耗因子; 耦合损耗因子

中图分类号: V414.8; O32

文献标志码: A

Statistical energy analysis considering thermal effect based on FEM-PIM

CHEN Qiang^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, LI Yanbin³, WU Shaoqing^{1,2}, FEI Qingguo^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering,

Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics,

Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: With the combination of the finite element method (FEM) and the power injection method (PIM) under modal coordinate considering thermal effect, a statistical energy analysis method applicable of vibration analysis of complex structures under thermal environment was presented. A simply supported L-shaped folded plate under rain on the roof excitation was studied and the accuracy of proposed method was verified with numerical examples. The influence of thermal effect on the parameters in statistical energy analysis was investigated under three cases: (1) only the material properties were affected by the thermal effect;

收稿日期: 2016-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(11572086, 11402052); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0086);

江苏省自然科学基金(BK20140616)

作者简介: 陈强(1992—), 男, 博士生, 主要从事飞行器动力学环境预示研究.

通讯作者: 费庆国(1977—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事结构动力学建模与修正、响应预示和动强度评估研究.

E-mail: qgfei@seu.edu.cn

引用格式: 陈强, 张鹏, 李彦斌, 等. 基于 FEM-PIM 计及热效应的统计能量分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1366-1374. CHEN Qiang, ZHANG Peng, LI Yanbin, et al. Statistical energy analysis considering thermal effect based on FEM-PIM[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1366-1374.

(2) only the additional stiffness due to thermal stresses was considered; (3) both (1) and (2) were considered. Results showed that the increasing temperature changed the material properties and decreased the value of coupling loss factor, but had little influence on internal loss factor. The thermal stresses had great influence on the parameters in statistical energy analysis, the increasing temperature decreased both internal loss factor and coupling loss factor. When both (1) and (2) were considered, the influence of thermal stresses was dominant, the internal loss factor and the coupling loss factor gradually decreased with the increase of temperature. Similar trend was found between the change of modal density and temperature.

Key words: statistical energy analysis; thermal effect; power injection method; internal loss factor; coupling loss factor

统计能量分析 (statistical energy analysis, SEA)^[1]以统计物理学原理为基础,将系统划分为若干子系统,建立子系统间的能量传递方程,从而获取系统的振动特性.统计能量分析可以很好地描述系统各组件的平均振动特性,是目前高频激励下结构动力学分析与环境预示的有力工具,已成功应用于航空航天、船舶、汽车等领域^[2-5].

统计能量分析的计算精度很大程度上取决于其参数的准确性,即系统的模态密度(modal density)、单个子系统的内损耗因子(internal loss factor, ILF)、各个子系统间的耦合损耗因子(coupling loss factor, CLF).统计能量分析方法的参数可以通过理论分析、试验分析和数值分析等方法获取.理论分析通常只适用于 L 型板、T 型板等简单结构^[6],较难应用于复杂系统中.试验分析是较为有效的统计能量分析参数获取方式^[7],然而试验分析具有耗费大、试验条件与工况有限等缺点.随着计算机性能的提高,数值分析成为获取高频振动环境下统计能量分析参数较为方便可行的方法. Mace 等^[8]通过有限元法获取了系统的模态、质量矩阵和刚度矩阵,并结合功率输入法(power injection method, PIM)^[9]得到了能量影响系数矩阵中的各项参数. Pankaj 等^[6]分别采用理论方法、有限元法并结合 Free-SEA 软件研究了内损耗因子大小和耦合边长度对耦合损耗因子的影响.江民圣等^[10]采用波方法研究了弯曲波入射角、板厚和激励频率对能量传递系数的影响.

高速飞行器,特别是高超声速飞行器,在服役过程中面临着严酷的气动热环境.高温使得材料性能参数发生变化同时改变结构的应力分布状态^[11],从而影响结构的振动特性. Jeyaraj 等^[12]开展了热效应对复合材料板振动特性的影响.

Behnke 等^[13]研究了热环境、气动载荷和声载荷对热防护结构固有频率的影响.杨雄伟、耿谦等^[14-15]以 X43 飞行器为例,分别考虑了气动加热环境下材料力学性能变化和热应力对结构振动特性的影响.李彦斌等^[11]以复合材料加筋板为例,研究了同时考虑材料物性变化和热应力对结构声-固耦合特性的影响.目前,计及热效应的动力学分析大多集中在中低频段,基于理论分析、波方法和商用软件的统计能量分析均较少考虑热效应,针对热环境下结构高频段的动力学研究处于起步阶段.

本文结合有限元法(FEM)和模态坐标系下计及热效应的功率输入法,给出一种热环境下适用于复杂结构的统计能量分析方法.首先阐述功率输入法的基本理论并建立模态坐标系下计及热效应的功率流模型,结合有限元法获取热环境下结构的统计能量分析参数;其次,以各边简支 L 型对称折板为研究对象进行数值仿真分析,对比数值解与解析解验证分析方法的准确性;再次,为研究热效应对统计能量分析参数的影响,分别开展仅考虑热效应引起材料力学性能变化、仅考虑热应力引起的附加刚度效应以及同时考虑两者影响 3 种工况下,温度对结构模态密度、结构内损耗因子和耦合损耗因子的影响研究.最后,为了验证分析方法的适用性,开展噪声激励下结构计及热效应的统计能量分析.

1 理论基础

1.1. 功率输入法

对于具有 N 个子系统的结构,其统计能量分析的动力学方程为

$$\omega \boldsymbol{\eta} [E_1 \ E_2 \ \cdots \ E_N]^T = [P_1 \ P_2 \ \cdots \ P_N]^T \tag{1}$$

其中 ω 为频带中心频率, E_a 为子系统 a 在空间内和频域内的平均能量, P_a 为子系统 a 在空间内和频域内的平均输入功率, η 为耦合系统的总损耗因子矩阵.

对于耦合系统的总损耗因子矩阵 η , 其矩阵元素为

$$\eta(a, b) = \begin{cases} [\eta_a] + \sum_{b \neq a}^n [\eta_{ab}], & a = b \\ [-\eta_{ba}], & a \neq b \end{cases} \quad (2)$$

其中 η_a 为子系统 a 的内损耗因子, η_{ba} 为子系统 b 与子系统 a 间的耦合损耗因子.

仅在子系统 a 上施加输入功率为 P_a 的载荷时, 有

$$\omega \eta [E_1^a \ E_2^a \ \cdots \ E_N^a]^T = [0 \ \cdots \ P_a \ \cdots \ 0]^T \quad (3)$$

其中 E_b^a 为仅子系统 a 受到激励时子系统 b 在空间和频域的平均能量.

对于具有 N 个子系统的结构, 逐一在各子系统上施加载荷, 将得到的如式(3)类型的 N 个方程, 以矩阵形式表达为

$$\omega \eta E = P \quad (4)$$

已知 P 和 E , 即可得到耦合系统的总损耗因子矩阵 η

$$\eta = \frac{1}{\omega} P E^{-1} \quad (5)$$

1.2 计及热效应的功率流模型

由系统的动力学方程可得, 系统振动的势能 V 和动能 T 分别为

$$V = \frac{1}{2} u^T K u, \quad T = \frac{1}{2} \dot{u}^T M \dot{u} \quad (6)$$

其中 K 为总体刚度矩阵, M 为总体质量矩阵, u 为节点位移响应向量, 以上参数均由有限元法计算得到.

对于子系统 b , 其响应向量 u_b 可通过转化矩阵 Z_b 获得, 即 $u_b = Z_b u$. 系统 b 的势能 V_b 和动能 T_b 分别为

$$V_b = \frac{1}{2} u_b^T K_b u_b, \quad T_b = \frac{1}{2} \dot{u}_b^T M_b \dot{u}_b \quad (7)$$

其中 K_b 为子系统 b 刚度矩阵, M_b 为子系统 b 质量矩阵.

相比于常温工况, 计及热效应的功率流模型主要考虑高温作用下结构的总体刚度变化. 一方面, 温度的升高会导致其弹性模量改变, 从而改变结构刚度; 另一方面, 高温使结构产生热应力, 结构在热应力的作用下会产生附加应力刚度矩阵.

因此, 计及热效应的结构整体刚度矩阵 K 可表示为

$$K = K_s + K_t + K_\sigma \quad (8)$$

其中 K_s 为常温下结构的刚度矩阵, K_t 为材料参数变化引起的刚度改变矩阵, K_σ 为热应力引起的附加刚度矩阵.

通过模态分析获得系统前 n 阶模态质量归一化后的模态振型向量. 记第 j 阶模态的振型向量为 ϕ_j , 前 n 阶模态振型向量组成的模态振型矩阵为 $\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_n]$. 根据模态的正交性: $\Phi^T M \Phi = I, \ \Phi^T (K_s + K_t + K_\sigma) \Phi = \text{diag}[\omega_j^2]$

(9)

其中 ω_j 为第 j 阶模态的固有频率, $j \in [1, n]$.

第 j 阶模态受到的模态力 $[F_j]$ 及其在该模态力作用下的位移响应 $[Y_j]$ 为

$$[F_j] = \phi_j^T F^a, \quad [Y_j] = \alpha_j [F_j] \quad (10)$$

当只在子系统 a 上施加载荷 F^a 时, 在模态坐标系下, 系统的振动动能 T 、势能 V 和对子系统 a 的输入功率 P 分别为

$$T = \frac{1}{4} \sum_j^n Q_{t,jj} \omega_j^2 |\alpha_j|^2, \quad V = \frac{1}{4} \omega^2 \sum_j^n Q_{t,jj} |\alpha_j|^2$$
$$P = \frac{1}{2} \text{Re} \left(i \omega \sum_j^n Q_{t,jj} \alpha_j \right) \quad (11)$$

其中 $\alpha_j = 1/[\omega_j^2(1+i\xi) - \omega^2]$ 为第 j 阶模态对应的导纳, ξ 为结构阻尼, $Q_t = \Phi^T Z_a A Z_a \Phi$ 表示外力 FF^H 在模态坐标下的投影, A 为载荷矩阵, 且其中元素 $A_{ij} = [F_i^{a*}][F_j^a]$, $*$ 代表伴随矩阵.

将式(10)代入式(7)中可得, 模态坐标系下子系统 b 计及热效应的动能 T_b 和势能 V_b 分别为

$$T_b = \frac{1}{4} \sum_{i,j} Q_{t,ij} k_{b,ij} \alpha_i^* \alpha_j$$
$$V_b = \frac{1}{4} \omega^2 \sum_{i,j} Q_{t,ij} m_{b,ij} \alpha_i^* \alpha_j \quad (12)$$

其中 $k_b = \Phi^T Z_b^T (K_s^b + K_t^b + K_\sigma^b) Z_b \Phi$ 为模态坐标下子系统 b 的广义刚度矩阵, $m_b = \Phi^T Z_b^T M_b Z_b \Phi$ 为模态坐标下子系统 b 的广义质量矩阵, K_s^b 为常温下子系统 b 的刚度矩阵, K_t^b 为材料参数变化引起的子系统 b 刚度改变矩阵, K_σ^b 为热应力引起的子系统 b 附加刚度矩阵.

功率流模型中的系统模态、系统刚度矩阵和质量矩阵均通过有限元法获取, 因此本文方法适用于大型复杂结构.

1.3 分析流程

为了研究热环境下的统计能量分析, 分别开展仅考虑热效应引起的材料力学性能变化(工况

1)、仅考虑热应力引起的附加刚度效应(工况 2)以及同时考虑两者影响(工况 3)3 种工况条件下,温度对模态密度、内损耗因子和耦合损耗因子的影响研究. 分析流程如图 1 所示.

具体步骤为:①建立结构有限元模型,获取常温工况和计及热效应的 3 种工况下系统的固有频

率、模态振型、刚度矩阵和质量矩阵,由系统固有频率计算得到模态密度;②通过功率流模型获取子系统的振动能量和系统的输入功率;③通过功率输入法计算得到子系统的内损耗因子和子系统间的耦合损耗因子;④开展高温环境下的高频统计能量分析,获取子系统的振动能量.

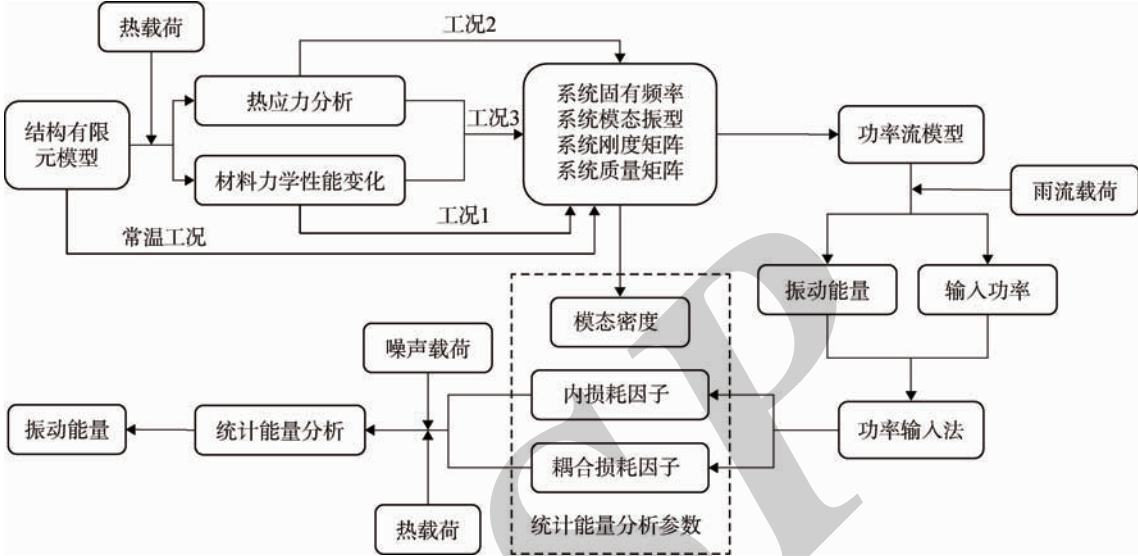


图 1 分析流程图
Fig.1 Flow chart of the analysis procedure

2 算例研究

为研究薄壁构件统计能量分析参数随温度的变化规律,本文以夹角为 90° 的 L 型对称折板为研究对象,几何模型如图 2 所示. 两板尺寸均为 $L_1 \times L_2 \times t = 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$. 板材料为 TA7 钛合金,材料属性^[16]如表 1 所示. 采用壳单元建立有限元模型,单元尺寸为 5 mm. 两板除耦合边外各边简支. 在分析过程中考虑了 2% 的结构阻尼比.

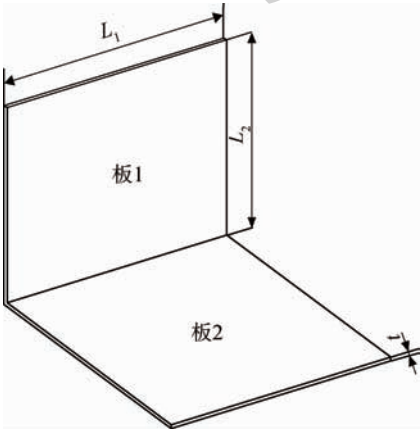


图 2 L 型对称折板

Fig.2 L-shaped symmetry folded plate

表 1 TA7 钛合金材料属性

Table 1 Material properties of TA7 titanium alloy				
温度/ ℃	弹性模量/ GPa	热膨胀系数/ ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	泊松比	密度/ (kg/m^3)
20	109.5		0.33	4 420
100	103.4	8.5		4 420
200	98.1	8.9		4 420
300	90.9	9.1		4 420
400	85.7	9.3	0.43	4 420
500	79.2	9.5		4 420
600	72.2	9.6	0.45	4 420

统计能量分析理论假设分析频带内各模态的振动能量相等,因此计算中宜选取对系统各阶模态输入功率相近的载荷. 雨流载荷(rain on the roof, ROF)^[17]可以均等地、充分地激励起子系统的局部模态,在后续的计算均在结构上施加单位雨流载荷. 雨流载荷的定义为:空间内各点不相关的宽带激励,任一处的载荷的幅值与该点的材料密度成正比. 对离散的有限元模型而言,雨流载荷对应 Q_i 中的矩阵 A ,满足 $A = S^2 M_a$,其中 S 表示载荷强度.

2.1 方法验证

将 L 型对称折板分为板 1 和板 2 两个子系

统. 常温(20 ℃)环境下,结构的固有频率分布如图 3 所示,计算可得 0~7 000 Hz 内平均模态密度为 37.41 kHz.

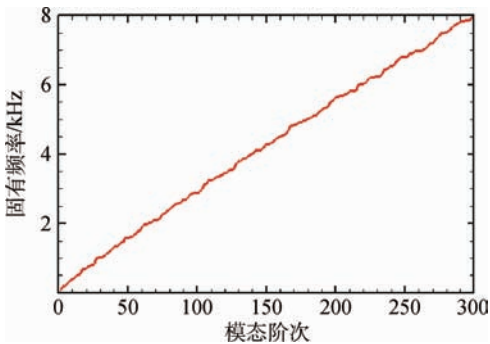


图 3 结构固有频率分布

Fig. 3 Distribution of structural eigenfrequencies

在板 1 上施加单位雨流载荷,基于 FEM-PIM 开展常温工况下结构的统计能量分析. 由于功率输入法在模态坐标下需要进行模态截断,选取前 n 阶模态进行计算. 本文以 4 500~5 600 Hz 频段 $\Delta\omega_1$ (中心频率为 5 000 Hz) 内的输入功率为例,考察模态截断阶数对计算结果的影响,计算结果如表 2 所示. 结果表明,使用前 400 阶模态计算与使用前 300 阶模态计算得到的数值结果基本一致. 因此,综合考虑计算精度及分析效率,选取前 300 阶模态数据进行计算分析.

表 2 模态截断对 $\Delta\omega_1$ 频段内平均输入功率的影响	
Table 2 Influence of modal truncation on the average injected power in frequency band $\Delta\omega_1$	
模态截断阶数	平均输入功率/ 10^{-3} W
250	2.126
300	2.273
350	2.278
400	2.278

通过功率流模型中的式(11)计算得到 0~7 000 Hz 内板 1 上载荷输入功率如图 4 所示,图中横坐标按照标准 1/3 倍频程进行处理. 图 4 中虚线代表 1/3 倍频程频段内平均后的输入功率. 由图 4 可知,各 1/3 倍频程内板 1 的平均输入功率基本一致,这表明雨流载荷满足对各个模态输入功率相等的要求.

对于 L 型对称折板,两板的内损耗因子相等,且两板间的耦合损耗因子满足 $\eta_{12} = \eta_{21}$. 在常温环境下通过理论分析^[18]可得板 1 的内损耗因子 η_1 及板 1 对板 2 的耦合损耗因子 η_{12} 为

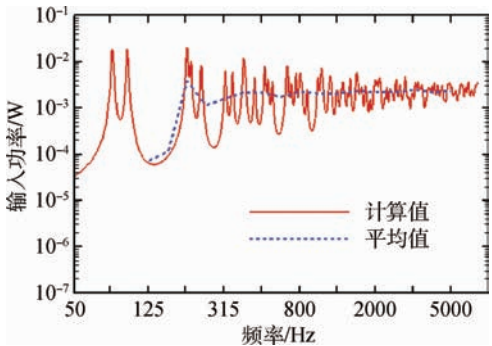


图 4 板 1 上载荷输入功率

Fig. 4 Injected power of plate 1

$$\eta_1 = 2\xi_1, \quad \eta_{12} = \frac{2C_b L_1 \tau_{12}}{\pi A \omega} \tag{13}$$

其中 ξ_1 为板 1 的平均模态阻尼比, C_b 为板弯曲波速, L_1 为耦合边长度, τ_{12} 为波传递系数, A 为板面积.

由式(5)计算得到板 1 的内损耗因子及板 1 对板 2 的耦合损耗因子的计算值,两者与通过式(13)计算得到的理论值的对比分别如图 5、图 6 所示. 当频带中心频率低于 1 000 Hz 时,内损耗因子和耦合损耗因子的计算值与理论值相差较大,这是因为分析频段内的模态数较少,未能满足统计能量分析的分析频段内模态数大于 5 的假设条件^[1]. 随着中心频率的增加,内损耗因子的计算值逐渐接近理论值. 中心频率为 1 000 Hz 至 5 000 Hz 频段内,耦合损耗因子平均误差低于 5%.

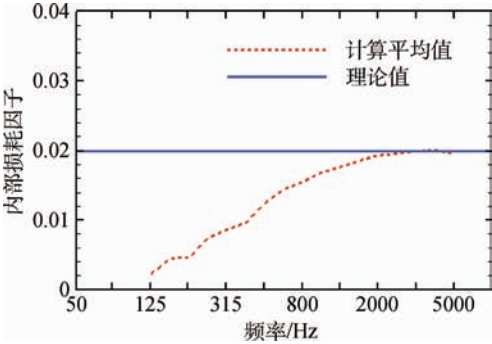


图 5 板 1 内损耗因子

Fig. 5 Internal loss factor of plate 1

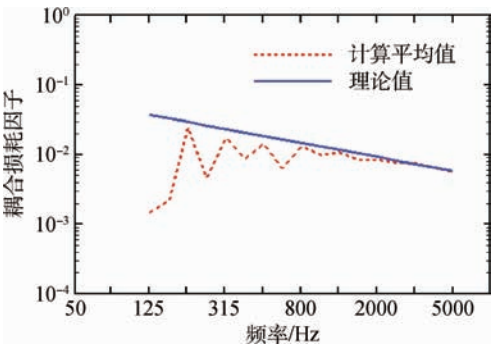


图 6 板 1 对板 2 的耦合损耗因子

Fig. 6 Coupling loss factor of plate 1 to plate 2

由于目前缺乏高温环境下统计能量分析参数的理论值,且高温环境下的高频试验开展难度较大.由式(11)和式(12)可知,本文所提出的基于 FEM-PIM 计及热效应统计能量分析方法的准确性主要取决于热环境下系统的固有频率、模态振型、刚度矩阵和质量矩阵等参数的准确性.本文中这些参数主要通过有限元方法获得,目前计及热效应的结构有限元计算精度较高且已有较多研究成果^[13-16],因此本文采用的 FEM-PIM 方法在高温环境下统计能量分析所得结果是可信的.

2.2 热效应对统计能量分析参数的影响

为研究热效应对统计能量分析参数的影响,开展 3 种工况下的计算分析:工况 1 仅考虑热效应对材料力学性能的影响;工况 2 仅考虑热应力引起的附加刚度效应;工况 3 同时考虑两者影响.取 3 550~4 500 Hz 频段 $\Delta\omega_2$ (中心频率为 4 000 Hz)为分析频段.

2.2.1 热效应对模态密度及固有频率的影响

不同温度条件下 $\Delta\omega_2$ 频带内模态密度如图 7 所示.由于高频段系统模态较为密集且不同工况下同阶数固有频率变化较大,为研究热效应对结构固有频率的影响,取 $\Delta\omega_2$ 频带内模态阶数上下界进行对比分析,如图 8 所示.计算结果表明:3 种工况下温度的升高整体上使得模态更加密集.工况 1 中, $\Delta\omega_2$ 频带内模态阶数的上下界随温度升高逐渐上升,这是由于温度的升高导致材料的弹性模量降低,从而降低了结构刚度.工况 2 中, $\Delta\omega_2$ 频带内模态阶数的上下界随温度的升高先升高后降低,这是由于高温使得结构发生了热变形,热变形在约束条件下使结构内部产生预拉应力或预压应力或两者同时存在,使得结构发生软化或硬化.工况 3 时,在材料力学性能和附加刚度效应的综合影响下, $\Delta\omega_2$ 频带内模态阶数的上下界仍

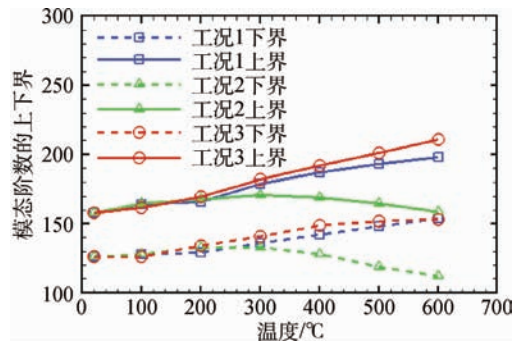


图 8 不同温度下 $\Delta\omega_2$ 频带内模态阶数上下界
Fig. 8 Upper and lower boundaries of the modal order in frequency band $\Delta\omega_2$ under different temperatures

呈现出与温度变化相同的趋势,这说明材料力学性能变化对结构的固有频率影响占主导地位.

2.2.2 热效应对输入功率及振动能量的影响

$\Delta\omega_2$ 频带内输入功率随温度的变化如图 9 所示.由图 9 可知 3 种工况下 $\Delta\omega_2$ 频带内输入功率随温度的变化趋势与模态密度基本一致.由于雨流载荷的假设为各模态的输入功率基本一致,因此相同频段内,模态密度的增多会使得输入功率增大.

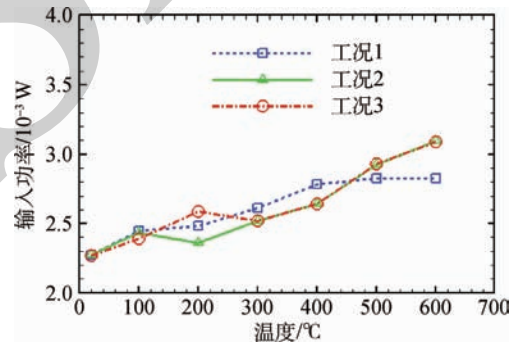


图 9 不同温度下 $\Delta\omega_2$ 频带内输入功率
Fig. 9 Injected power in frequency band $\Delta\omega_2$ under different temperatures

不同温度条件下板 1 和板 2 的振动能量分别如图 10 和图 11 所示.3 种工况下,板 1 和板 2 的振动能量均随温度的升高而逐渐升高.工况 1 时,结构刚度的下降使得结构模态密度增大、输入功率增加,从而导致板的振动能量增大.工况 2 时,热应力较大的幅值和其非均匀分布对结构的模态振型有较大影响,使得振动能量增大.工况 3 下,两者同时作用时,热应力的影响起主导作用,因此两板的振动能量与工况 2 基本一致.

2.2.3 热效应对内损耗因子及耦合损耗因子的影响

不同温度条件下 $\Delta\omega_2$ 频带内板 1 的内损耗因子和板 1 对板 2 的耦合损耗因子分别如图 12 和图 13 所示.工况 1 时板 1 的内损耗因子基本未

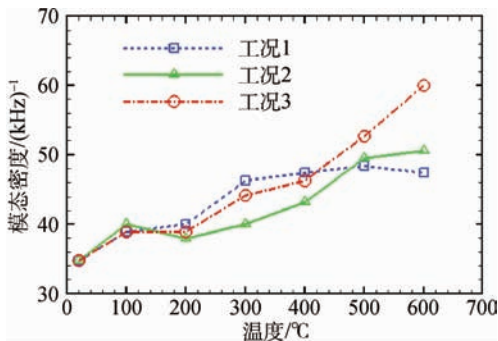


图 7 不同温度下 $\Delta\omega_2$ 频带内模态密度
Fig. 7 Modal density in frequency band $\Delta\omega_2$ under different temperatures

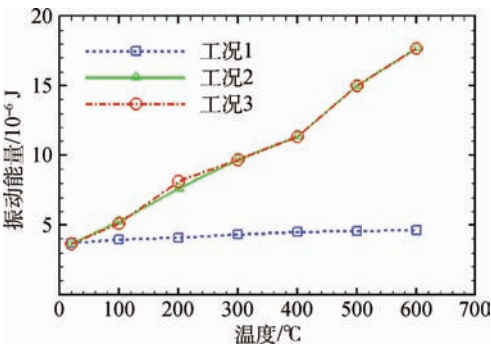


图 10 不同温度下 $\Delta\omega_2$ 频带内板 1 振动能量
Fig. 10 Vibration energy of plate 1 in frequency band $\Delta\omega_2$ under different temperatures

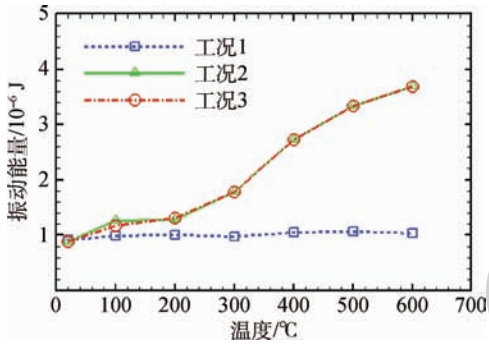


图 11 不同温度下 $\Delta\omega_2$ 频带内板 2 振动能量
Fig. 11 Vibration energy of plate 2 in frequency band $\Delta\omega_2$ under different temperatures

发生变化;耦合损耗因子随温度的升高而逐渐降低,与常温状态相比,600℃时结构的耦合损耗因子降低了约 11%.工况 2 时板 1 的内损耗因子和耦合损耗因子均随温度升高而逐渐降低;与常温状态相比 600℃时,板 1 的内损耗因子和耦合损耗因子分布降低了约 72%和 77%.这是由于两板的振动能量均随温度有较大幅度的升高.工况 3 条件下两者同时作用时,内损耗因子和耦合损耗因子与工况 2 基本一致,这说明热应力的影响起主导作用.

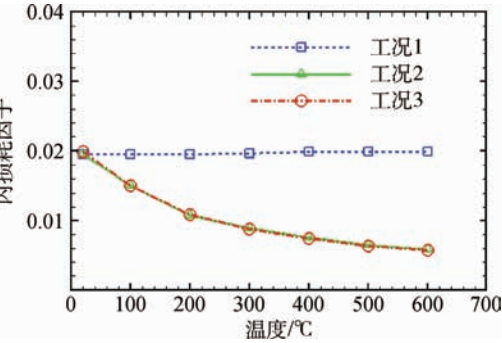


图 12 不同温度下 $\Delta\omega_2$ 频带内板 1 的内损耗因子
Fig. 12 Internal loss factor of plate 1 in frequency band $\Delta\omega_2$ under different temperatures

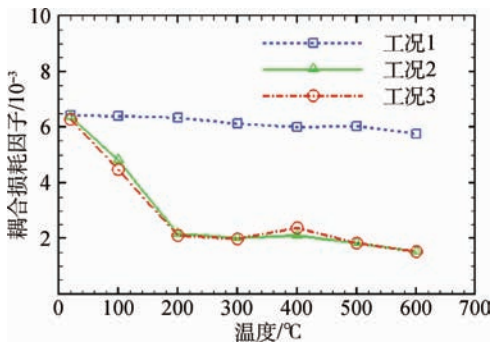


图 13 不同温度下 $\Delta\omega_2$ 频带内板 1 对板 2 的耦合损耗因子
Fig. 13 Coupling loss factor of plate 1 to plate 2 in frequency band $\Delta\omega_2$ under different temperatures

2.3 计及热效应的统计能量分析

为考察 FEM-PIM 方法的适用性,开展计及热效应的 L 型对称折板的统计能量分析.在板 1 表面施加均匀分布的总声压级为 160 dB 的声激励荷载,噪声激励谱如图 14 所示.对两板均施加 300℃的均匀温度载荷,分析 3 种工况下高温对系统能量特性的影响.

计算得到 300℃下 3 种工况在 2 000~5 000 Hz 内板 1 和板 2 的振动能量分别如图 15 和图 16 所示.板 1 和板 2 的振动能量均随频率的升高逐渐降低,板 2 的振动能量要低于板 1.对比 3

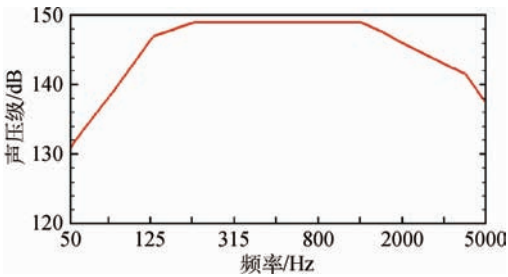


图 14 噪声激励谱
Fig. 14 Spectrum of the noise excitation

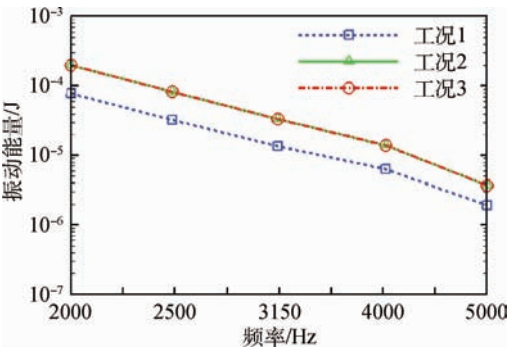


图 15 300℃时不同频率下板 1 的振动能量
Fig. 15 Vibration energy of plate 1 under different frequencies at 300℃

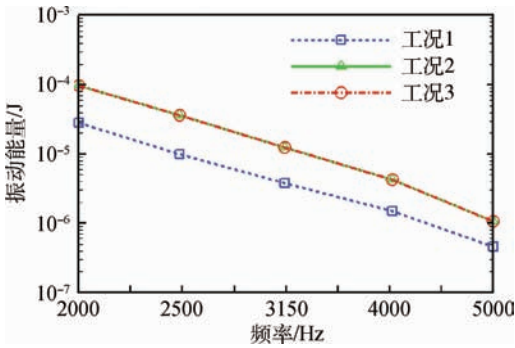


图 16 300 °C 不同频率下板 2 的振动能量

Fig. 16 Vibration energy of plate 2 under different frequencies at 300 °C

种工况可知:工况 2 和工况 3 条件下的计算结果基本一致,说明热应力引起的附加刚度效应对高温环境下结构的振动特性影响较大;工况 1 计算得到的两板的振动能量均小于其他两种工况,这是由于其内损耗因子和耦合损耗因子大于其他两种工况. 本文所采用的数值方法同样适用于复杂结构热环境下的高频统计能量分析.

3 结 论

本文结合有限元法和模态坐标系下计及热效应的功率输入法给出一种热环境下适用于复杂结构的统计能量分析方法. 以 L 型对称折板为研究对象,首先对比了单位雨流载荷作用下,子系统内损耗因子及子系统间耦合损耗因子的计算值和理论值,验证了数值方法的正确性;随后探讨了仅考虑热效应引起的材料力学性能变化、仅考虑热应力引起的附加刚度效应及同时考虑热效应引起的材料力学性能变化和热应力引起的附加刚度效应 3 种工况条件下高温对统计能量分析参数影响. 最后开展了噪声激励下计及热效应的统计能量分析. 结果表明如下:

- 1) 热效应引起的材料力学性能变化对内损耗因子的影响不大,但导致耦合损耗因子随温度的升高而减小.
- 2) 热应力引起的附加刚度效应对内损耗因子和耦合损耗因子的影响较大,两者均随温度的升高而减小.
- 3) 同时考虑热效应引起的材料力学性能变化和热应力引起的附加刚度效应时,热应力对统计能量分析参数的影响占主导地位,内损耗因子和耦合损耗因子随温度的变化规律与仅考虑热应力引起的附加刚度效应时所得结果基本一致,均随温度的升高而减小.

4) 3 种工况条件下,模态密度随温度的变化规律基本一致,均随温度的升高而增大.

5) 噪声激励下仅考虑热效应引起的材料力学性能变化时两板的振动能量均小于其他两种工况,热效应中热应力对统计能量分析的影响占主导地位.

本文所采用的数值方法同样适用于复杂结构热环境下的高频统计能量分析.

参考文献:

[1] LYON R H. Statistical energy analysis of dynamical systems; theory and applications [M]. Massachusetts, US: Massachusetts Institute of Technology Press, 1975.

[2] 张婧雯,孟光,游进,等. 基于统计能量法的声场-结构耦合模型高频振动隔振分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12): 19-22.
ZHANG Jingwen, MENG Guang, YOU Jin, et al. Analysis on high frequency vibration isolation of coupled sound cavity-structure model based on statistical energy method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12): 19-22. (in Chinese)

[3] CHEN Xin, WANG Dengfeng, MA Zhengdong. Simulation on a car interior aerodynamic noise control based on statistical energy analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(5): 1016-1021.

[4] 谢琼,谢石林,张希农. 结构高频载荷识别的统计能量分析法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(8): 1765-1772.
XIE Qiong, XIE Shilin, ZHANG Xinong. Statistical energy analysis method applied to high frequency load identification of structures[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(8): 1765-1772. (in Chinese)

[5] SHENG M P, WANG M Q, SUN J C, et al. Statistical energy analysis for complicated coupled system and its application in engineering[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 274(3/4/5): 877-891.

[6] PANKAJ A C, SRIDHAR S, MURIGENDRAPPA S M. A comparison of different methods for determination of coupling factor and velocity response of coupled plates[J]. Journal of Vibroengineering, 2013, 15(4): 1885-1897.

[7] HOPKINS C. Experimental statistical energy analysis of coupled plates with wave conversion at the junction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 322(1/2): 155-166.

[8] MACE B R, SHORTER P J. Energy flow models from finite element analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 233(3): 369-389.

[9] BIES D A, HAMID S. In situ determination of loss and coupling loss factors by the power injection method[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 70(2): 187-204.

[10] 江民圣,牛军川,郑建华,等. L 型耦合板结构能量传递系数特性的研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(17): 131-136.
JIANG Minsheng, NIU Junchuan, ZHENG Jianhua, et al.

Energy transfer coefficients' features of L-shaped coupled plates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(17): 131-136. (in Chinese)

[11] 李彦斌,张鹏,吴邵庆,等. 复合材料加筋板计及热效应的声-固耦合分析[J]. 振动工程学报, 2015, 28(4): 531-540. LI Yanbin, ZHANG Peng, WU Shaoqing, et al. Structural-acoustic coupling analysis of a composite stiffened panel in a thermal environment[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(4): 531-540. (in Chinese)

[12] JEYARAJ P, GANESAN N, PADMANABHAN C. Vibration and acoustic response of a composite plate with inherent material internal in a thermal environment[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320(1/2): 322-338.

[13] BEHNKE M N, SHARMA A, PRZEKOP A. Thermal-acoustic analysis of a metallic integrated thermal protection system structure[R]. AIAA-2010-3121, 2010.

[14] 杨雄伟,李跃明,闫桂荣. 考虑材料物性热效应飞行器声振耦合动态特性分析[J]. 固体力学学报, 2010, 31(增刊 1): 134-142. YANG Xiongwei, LI Yueming, YAN Guirong. Vibro-acoustic dynamic analysis of aircraft with temperature-dependent material property[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(Suppl. 1): 134-142. (in Chinese)

[15] 耿谦,李跃明,杨雄伟. 热应力作用下结构声-振耦合响应数值分析[J]. 计算力学学报, 2012, 29(1): 99-104. GENG Qian, LI Yueming, YANG Xiongwei. Vibro-acoustic numerical analysis of thermally stressed aircraft structure[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(1): 99-104. (in Chinese)

[16] 刘芹. 弹体结构热振动特性分析[D]. 西安:西北工业大学, 2004. LIU Qin. Vibration analysis of missile structure under thermal environment[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)

[17] ICHCHOU M N, HIVERNIAU B, TROCLET B. Equivalent 'rain on the roof' loads for random spatially correlated excitations in the mid-high frequency range[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 322(4/5): 926-940.

[18] BOT A L, COTONI V. Validity diagrams of statistical energy analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(2): 221-235.

(编辑:陈 越)