

稳态损耗因子的衰减法识别研究

顾金桃 盛美萍

Estimation of steady loss factor with decay rate method

Gu Jin-Tao Sheng Mei-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 184301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.184301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

声子晶体中的半狄拉克点研究

[Semi-Dirac points in two-dimensional phononic crystals](#)

物理学报.2015, 64(19): 194301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194301>

一维亥姆霍兹共振腔声子晶体中缺陷模式的实验研究

[Experiments on defect mode of one-dimensional phononic crystal containing Helmholtz resonators](#)

物理学报.2013, 62(9): 094304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094304>

晶格中心插入体的对称性及取向对二维声子晶体带隙的影响

[The two-dimensional phononic crystal band gaps tuned by the symmetry and orientation of the additional rods in the center of unit cell](#)

物理学报.2012, 61(23): 234302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.234302>

一种新型声学超材料平板对机械波吸收性能的模拟与实验研究

[Simulation and experimental study of a metamaterial panel for mechanical wave absorption](#)

物理学报.2012, 61(15): 154302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.154302>

稳态损耗因子的衰减法识别研究

顾金桃[†] 盛美萍

(西北工业大学航海学院环境工程系, 西安 710072)

(2015年4月2日收到; 2015年4月30日收到修改稿)

根据稳态损耗因子的定义, 推导了含多阶模态的频带稳态损耗因子公式, 得到结论: 稳态损耗因子不一定介于各阶模态损耗因子之间, 而是与各阶模态对振动响应的贡献程度有关. 提出了过程损耗因子的概念, 并给出了利用频带内各模态固有频率、损耗因子和振幅计算过程损耗因子的方法. 当时间趋于无穷时, 过程损耗因子趋于只由最小模态损耗因子贡献的稳态损耗因子. 传统衰减法测试稳态损耗因子在频带内仅有单个模态或模态密集的情况下精度较高, 但对于含有多阶模态且模态不密集的中频带, 采用传统衰减法准确获取稳态损耗因子存在困难. 根据过程损耗因子的特点, 提出了利用时域衰减曲线逐步分离频带内不同衰减特性分量及其响应幅度从而获取稳态损耗因子的方法. 仿真和实验均表明: 提出的利用时域衰减数据获取稳态损耗因子的方法具有很高精度, 可以弥补传统衰减法在中频段损耗因子实验确定中的不足.

关键词: 稳态损耗因子, 衰减法, 多模态频带

PACS: 43.40.+s

DOI: 10.7498/aps.64.184301

1 引言

结构振动响应的计算和预报是结构设计与分析的重要环节, 低频段常用的分析方法包括有限元法、边界元法、有限差分法、模态叠加法^[1-4]. 1970年代以来, 各国对航天器高频振动响应预报的需求越来越大, 由于上述方法在高频段应用受限, 统计能量分析法 (statistical energy analysis, SEA)^[5-7]应运而生. 其核心思想是基于统计平均的概念, 将结构划分为若干子结构, 用振动能量作为基本参数, 并结合各子结构的损耗因子和子结构间的耦合损耗因子建立能量平衡方程来计算结构的振动响应. 近年来, SEA方法已经广泛应用于汽车、船舶、铁道^[8-10]等其他工业的研究中.

损耗因子作为SEA分析中不可或缺的参数, 除极少数典型结构可用理论计算外, 一般需要通过实验测量获得^[11,12]. 功率输入法根据SEA对损耗因子定义测量损耗因子, 需要测量结构的输入功率和平均振动能量. 衰减法则是通过测试结

构振动响应随时间的衰减规律获得分析频带内的损耗因子, 由于其不需要测量输入功率和振动能量, 统计误差小, 是实验测量损耗因子的常用方法. Hilbert变换^[13,14]和反向积分法^[15]是两种常用的求衰减率的数据处理方法. 前者是通过对时域信号做Hilbert变换后取幅值的包络线, 并求其衰减率来获得稳态损耗因子; 后者主要是通过对脉冲响应信号的平方进行反向积分获得能级衰减曲线, 进而获得稳态损耗因子. 但是, 在中频损耗因子测试中, 经常遇到一个频带内含多个模态的情况, 此时衰减曲线幅值包络会出现明显的分段现象^[16-18], 确定中频段损耗因子存在困难.

本文主要研究含多阶模态且模态不密集的频带损耗因子的衰减法识别, 研究内容包括: 1) 推导了含多阶模态的频带稳态损耗因子公式; 2) 根据时域衰减曲线分析了衰减过程的频带损耗因子, 并提出过程损耗因子的概念; 3) 提出了逐步分离时域衰减曲线频带内不同衰减特性分量的方法获取稳态损耗因子.

[†] 通信作者. E-mail: gujintao@yeah.net

2 稳态损耗因子

统计能量分析关心的是频带内的损耗因子, 主要反映结构在分析频带内消耗振动能量的能力. 如果频带内存在多阶模态, 统计能量分析意义的稳态损耗因子定义为稳态振动一个周期内损耗的能量与结构振动的机械能之比^[19]. 结构的输入功率等于各模态的输入功率之和, 结构的振动能量等于各模态的能量之和. 由此可得

$$\eta_c = \frac{\omega_1 \eta_1 E_1 + \omega_2 \eta_2 E_2 + \cdots + \omega_N \eta_N E_N}{\omega_c \sum_{i=1}^N E_i} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i \eta_i}{f_c} \frac{E_i}{\sum_{i=1}^N E_i}, \quad (1)$$

式中 η_c 即为根据 SEA 定义推导的稳态损耗因子, ω_c 为分析频带的中心圆频率, f_c 为分析频带的中心频率, f_i 为各阶稳态频率, E_i 为各阶模态的振动能量, ω_i 为各阶模态圆频率, N 为频带内的模态数. η_i 为各阶模态的损耗因子, 可由 (2) 式计算:

$$\eta_i = c_i / (m_i \omega_i), \quad (2)$$

式中 m_i 为各阶模态质量, c_i 为各阶模态的黏性阻尼系数.

模态间的耦合刚度和耦合损耗因子对稳态损耗因子几乎没有影响^[20], 因此建立如图 1 所示的 N 阶模态简化振动系统. 系统的运动方程如 (3) 式所示.

$$m_i \ddot{x}_i + c_i \dot{x}_i + k_i x_i = F_i \quad (i = 1, 2, \cdots, N), \quad (3)$$

式中 k_i 为各阶模态的刚度, F_i 为各阶模态受到的激励力, x_i 为振子的振动位移, $\dot{x}_i$ 为振子的振动速度, $\ddot{x}_i$ 为振子的振动加速度.

文献 [5] 证明了在简单振子系统的随机强迫振动响应中, 共振区内的响应占据绝对优势, 并且

$$\langle \ddot{x}^2 \rangle = \omega_n^2 \langle \dot{x}^2 \rangle = \omega_n^4 \langle x^2 \rangle, \quad (4)$$

式中 $\langle \ddot{x}^2 \rangle$, $\langle \dot{x}^2 \rangle$ 和 $\langle x^2 \rangle$ 分别为加速度时间平均响应值、速度时间平均响应值和位移时间平均响应值.

对于稳态振动, 各阶模态的振动幅值 A_i 可以表示为

$$A_i = \sqrt{2 \langle x_i^2 \rangle}, \quad i = 1, 2, \cdots, N. \quad (5)$$

对于含 N 阶模态的频带, 可假设 $m_i = 1$ ($i = 1, 2, \cdots, N$), 于是

$$k_i = \omega_i^2, \quad i = 1, 2, \cdots, N. \quad (6)$$

将 (4)–(6) 式代入 (1) 式可得

$$\eta_c = \sum_{j=1}^N \frac{f_j \eta_j}{f_c} \frac{f_j^2 A_j^2}{\sum_{i=1}^N f_i^2 A_i^2}. \quad (7)$$

(7) 式即为含有多阶模态的频带损耗因子. 以频带内含两阶模态为例, 分析振幅对稳态损耗因子的影响规律. 根据模态固有频率与中心频率的位置关系可分为四种情况: 1) 两阶模态固有频率分居中心频率两侧, 较大的固有频率模态损耗因子较大; 2) 两阶模态固有频率分居中心频率两侧, 较大的固有频率模态损耗因子较小; 3) 两阶模态固有频率均小于中心频率; 4) 两阶模态固有频率均大于中心频率. 对应的模态参数列于表 1. 图 2 是四种情况下稳态损耗因子随模态振幅比变化的曲线.

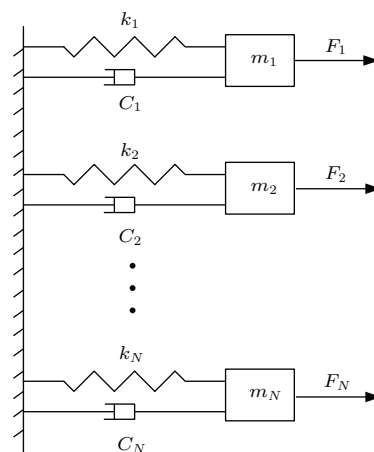


图 1 多模态振动系统简化图

Fig. 1. Simplified multimode vibration system.

表 1 四种算例的模态参数

Table 1. Modal parameters of four cases.

算例	m_1/kg	$k_1/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$c_1/\text{N}\cdot\text{sm}^{-1}$	m_2/kg	$k_2/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$c_2/\text{N}\cdot\text{sm}^{-1}$
1	1	1.1×10^4	4	1	9×10^3	0.8
2	1	1.1×10^4	4	1	9×10^3	8
3	1	9.5×10^3	4	1	9×10^3	8
4	1	1.1×10^4	4	1	1.2×10^4	0.8

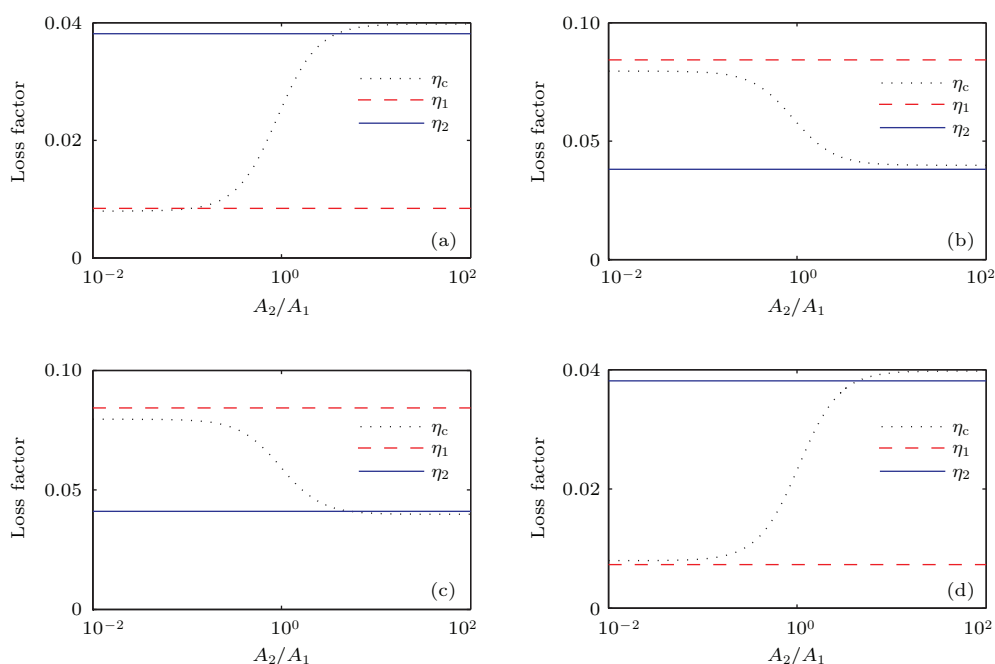


图2 (网刊彩色) 稳态损耗因子 (a) 算例1; (b) 算例2; (c) 算例3; (d) 算例4

Fig. 2. (color online) Steady loss factor: (a) case 1; (b) case 2; (c) case 3; (d) case 4.

由图2(a)可见, 随初始模态振幅比的变化, 稳态损耗因子介于两阶模态损耗因子之外. 并且, 1) 当初始模态振幅比 $A_2/A_1 \ll 1$ 时, 稳态损耗因子小于各阶模态损耗因子; 2) 当 $A_2/A_1 \gg 1$ 时, 稳态损耗因子大于各阶模态损耗因子; 3) 当两阶模态初始振幅相当时, 稳态损耗因子介于两阶模态损耗因子之间. 这是由于: 1) 当 $A_2/A_1 \ll 1$ 时, 模态1对振动响应的贡献远大于模态2, 因此稳态损耗因子主要由模态1决定, 而 $f_1 < f_c$, 因此稳态损耗因子小于模态1的模态损耗因子; 2) 当 $A_2/A_1 \gg 1$ 时, 模态2对振动响应的贡献远大于模态1, 因此稳态损耗因子主要由模态2决定, 由于 $f_2 > f_c$, 所以稳态损耗因子大于模态2的模态损耗因子; 3) 当两阶模态初始振幅相当时, 稳态损耗因子受两阶模态损耗因子影响, 介于两阶模态损耗因子之间.

由图2(b)可见, 当模态损耗因子较大的模态固有频率小于中心频率且模态损耗因子较小的模态固有频率大于中心频率时, 随着模态初始振幅比的变化, 稳态损耗因子始终介于两阶模态损耗因子之间.

由图2(c)可见, 模态固有频率均小于中心频率的情况下, 当模态损耗因子较小的模态对稳态损耗因子做主要贡献时, 稳态损耗因子小于各阶模态损耗因子, 否则稳态损耗因子介于两阶模态损耗因子之间.

由图2(d)可见, 模态固有频率均大于中心频率的情况下, 当模态损耗因子较大的模态对稳态损耗因子做主要贡献时, 稳态损耗因子大于各阶模态损耗因子, 否则稳态损耗因子介于两阶模态损耗因子之间.

进一步分析图2可得: 当频段内模态损耗因子与其对应固有频率乘积最大的模态, 其固有频率小于中心频率, 并且模态损耗因子与其对应固有频率乘积最小的模态, 其固有频率大于中心频率时, 稳态损耗因子一定介于模态损耗因子之间. 否则, 稳态损耗因子可能介于模态损耗因子之间, 可能超出模态损耗因子的范围.

3 过程损耗因子

频带内含有高阶模态且模态不密集是实验获取中频段稳态损耗因子经常遇到的情况, 有时衰减曲线会出现明显的分段现象. 本节通过研究频带振动能量的时域衰减过程, 分析不同衰减特性的模态分量在此过程中对频带损耗因子的贡献, 提出了过程损耗因子概念定义衰减过程频带损耗因子, 并给出了利用频带内各模态损耗因子、模态振幅计算过程损耗因子的方法.

假设频带内含有 N 阶模态, 则其在稳态激励突然撤去时的衰减振动可表示为

$$u = \sum_{i=1}^N A_i e^{-\pi f_i \eta_i t}, \quad (8)$$

式中 A_i 为衰减初始时刻各阶模态的振动位移幅值, 也是稳态位移幅值. 这里的振幅也可以是速度幅值或加速度幅值, 本文以位移幅值开展讨论, 另外两种情况类似, 不再赘述.

假设衰减过程的位移依然可以用指数形式来表示

$$u = A e^{-\pi f_c \eta_{cp} t}, \quad (9)$$

式中 $A = \sum_{i=1}^N A_i$, η_{cp} 为过程损耗因子.

将 (9) 式代入 (8) 式可以得到

$$\eta_{cp} = \frac{1}{-\pi f_c t} \ln \left(\sum_{i=1}^N R_i (e^{-\pi f_i \eta_i t}) \right), \quad (10)$$

式中 $R_i = A_i / \sum A_i$. 过程损耗因子是与各阶模态的损耗因子相关、受各阶模态振动幅度影响的时间

函数.

以频带内含两阶模态为例, 分析振幅和计算时刻对过程损耗因子的影响. 模态参数如表 1 所列, 另外 $s_1 = 0.8$, $s_2 = 1$. 图 3 为算例 1 的振动响应的时域衰减曲线, 图 4 为各算例的过程损耗因子.

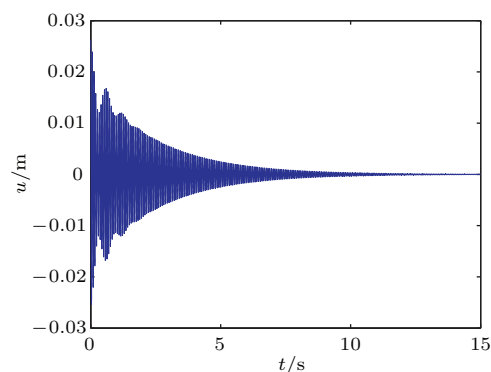


图 3 算例 1 时域衰减曲线

Fig. 3. Time decay curve of case 1.

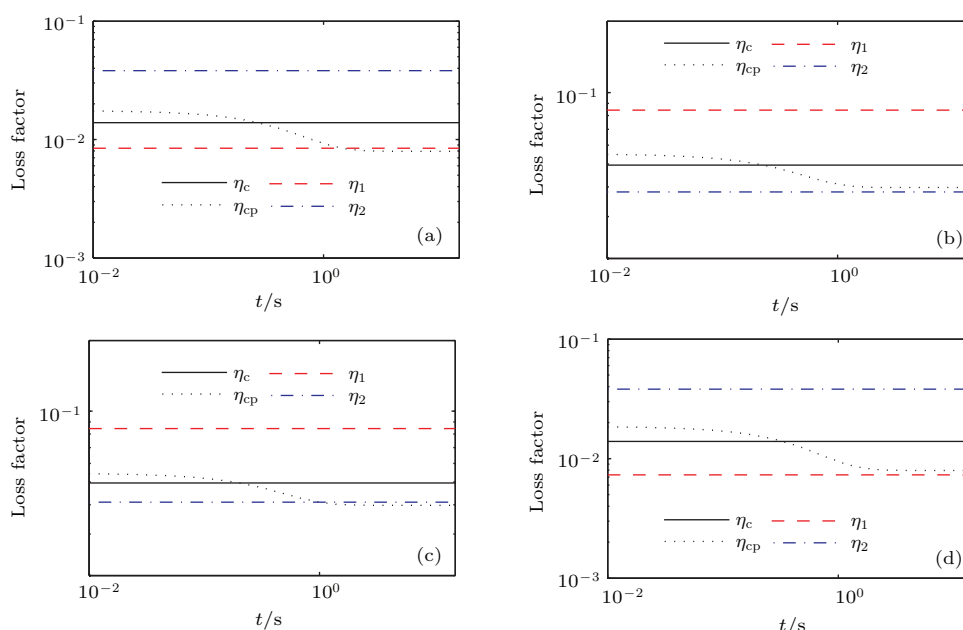


图 4 (网刊彩色) 过程损耗因子 (a) 算例 1; (b) 算例 2; (c) 算例 3; (d) 算例 4

Fig. 4. (color online) Process loss factor: (a) case 1; (b) case 2; (c) case 3; (d) case 4.

由图 4 可见, 稳态损耗因子不随时间变化, 而过程损耗因子与计算的时刻有关, 随着时间推移逐渐趋于最小的模态损耗因子. 这是因为模态损耗因子较大者衰减较快, 相当于随着时间的变化, 模态损耗因子较大的模态振幅相对于模态损耗因子较小者在减小. 同时可以看到, 过程损耗因子与稳态损耗因子存在显著差异, 两者的相对大小与各阶模态的振动幅度和损耗因子有关. 图中过程损耗因子

“穿过”模态损耗因子的原因是模态频率不等于频带中心频率.

4 利用过程损耗因子获取稳态损耗因子

计算稳态损耗因子需要知道各阶模态的固有频率、损耗因子和衰减振动的初始振幅. 随着时间

推移, 过程损耗因子总是趋于最小的模态损耗因子, 本节提出了利用时域衰减信号末段衰减率获得最小模态损耗因子及其振幅后, 逐步分离各阶模态振动, 并最终获得各阶模态固有频率、损耗因子及对应振幅的方法。

对于频带内含有 N 阶模态的情况, 当衰减时间足够长时, 末段的振动响应幅值可用模态损耗因子最小的模态振动表示, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u = A'_k e^{-\pi f'_k \eta'_k t}, \quad (11)$$

式中, $\eta'_k = \lim_{t \rightarrow \infty} \eta_{cp} = \min(\eta_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$; A'_k 为该阶模态的衰减振动初始振幅; f'_k 为该阶模态的固有频率。

对衰减信号幅值取自然对数可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \ln u = \ln A'_k - \pi f'_k \eta'_k t. \quad (12)$$

由 (12) 式可以看出, 对衰减振动曲线的振幅取对数之后得到斜率为 $-\pi f'_k \eta'_k$ 的直线, 由此计算频带最小损耗因子与其对应固有频率的乘积 $f'_k \eta'_k$. 同时利用该直线与纵坐标轴的交点值 $\ln A'_k$ 计算最小模态损耗因子的初始振幅 A'_k . 获取模态固有频率、初始振幅和损耗因子的过程分以下几步完成:

1) 对实验时域信号做傅里叶变换, 得到 $U(\omega)$ 和各阶稳态频率 $\{f_i\}$;

2) 滤波获得各模态的频域信号 $\{U_i(\omega)\}$;

3) 将滤出的各阶模态的频域信号做傅里叶逆变换, 再对得到的时域信号绝对值包络线取对数, 可计算出 $\{\eta_i\}$;

4) 实验得到的时域衰减信号的幅值取对数后得到函数 u_1 ;

5) 根据 u_1 的末段直线斜率计算 u_1 的最小损耗因子与其固有频率的乘积 $f'_k \eta'_k$, 根据末段直线与纵坐标轴的交点值计算出振幅初始值 A'_k ;

6) 将 u_1 减去上步中获取的信号成分, 如 (13) 式所示, 得到新的 u_1 ;

7) 对新 u_1 重复步骤 5) 和 6), 直到求出所有模态对应的 $f'_k \eta'_k$ 和 A'_k , 得到 $\{f'_k \eta'_k\}$ 和 $\{A'_k\}$;

8) 找出 $\{f_i \eta_i\}$ 和 $\{f'_k \eta'_k\}$ 中对应相等的项, 则固有频率为 $\{f_i\}$, 模态损耗因子为 $\{f'_k \eta'_k / f_i\}$, 初始振幅为 $\{A'_k\}$.

$$u_1 = u_1 - A'_k e^{-\pi f'_k \eta'_k t}. \quad (13)$$

5 仿真分析

频带内含两阶模态为例, 对本文提出的方法开展仿真分析. 两阶模态对应的参数同图 4(a). 可以计算出模态频率 $f_1 = 15.1$ Hz, $f_2 = 16.7$ Hz, 模态损耗因子 $\eta_1 = 8.43 \times 10^{-3}$, $\eta_2 = 3.81 \times 10^{-2}$, 稳态振动的幅值 $A_1 = 9.19 \times 10^{-3}$ m, $A_2 = 7.95 \times 10^{-3}$ m. 由 (7) 式可以计算出稳态振动频带损耗因子 $\eta_c = 2.30 \times 10^{-2}$.

当系统受稳态激励突然中止后, 位移的幅值取对数随时间的变化曲线如图 5 所示, 位移的傅里叶变换如图 6 所示.

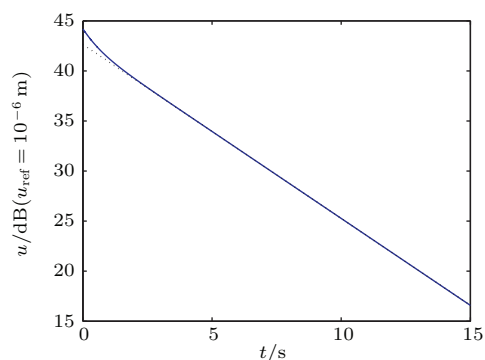


图5 位移振动级包络曲线

Fig. 5. Envelope of vibration level of displacement.

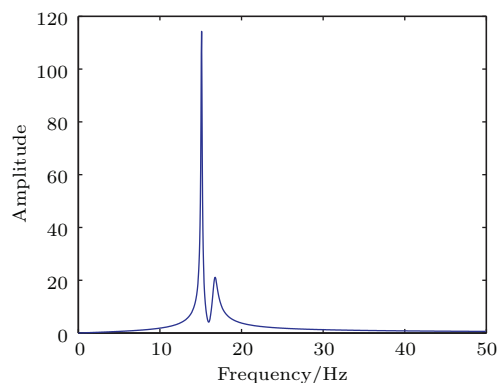


图6 位移的傅里叶变换

Fig. 6. Fourier transformation of displacement.

由图 5 中虚线的斜率可得较小模态损耗因子与其模态频率的乘积 $f'_1 \eta'_1 = 1.27 \times 10^{-1}$. 虚线与 y 轴的交点可得较小模态损耗因子对应的衰减初始振幅 $A'_1 = 9.19 \times 10^{-3}$ m. 根据 (13) 式计算得到 u_1 如图 7 所示. 同样可以得到 $f'_2 \eta'_2 = 6.37 \times 10^{-1}$ 和 $A'_2 = 7.95 \times 10^{-3}$ m.

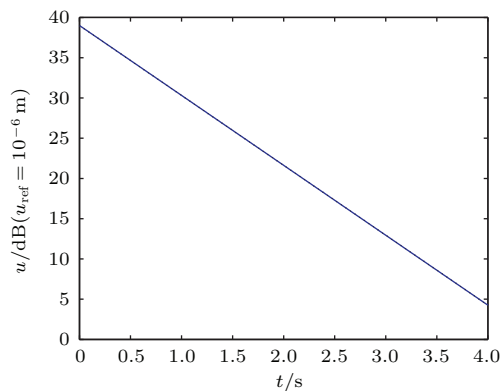


图7 模态 f_2' 的位移包络

Fig. 7. Envelope of displacement of modal frequency f_2' .

从图6可以读取两个峰值处的频率, 即固有频率 $f_1 = 15.1$ Hz, $f_2 = 16.8$ Hz. 对两个模态的频域数据滤波后进行傅里叶逆变换, 分别得到两者振幅随时间的变化如图8和图9所示, 图中的虚线为包络线, 可以计算得 $f_1\eta_1 = 1.27 \times 10^{-1}$,

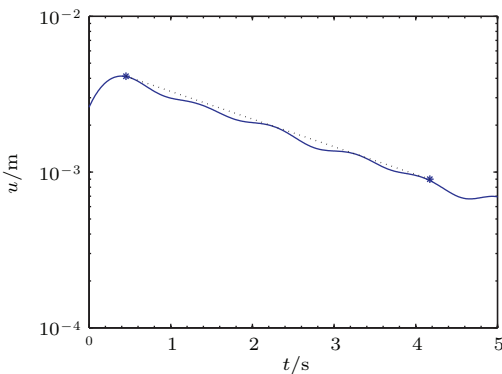


图8 f_1 模态振幅随时间的变化

Fig. 8. Amplitude of modal frequency f_1 .

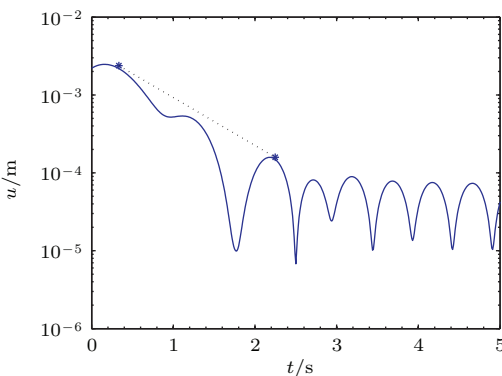


图9 f_2 模态振幅随时间的变化

Fig. 9. Amplitude of modal frequency f_2 .

$f_2\eta_2 = 6.37 \times 10^{-1}$. 与 $f_1'\eta_1' = 1.27 \times 10^{-1}$ 和 $f_2'\eta_2' = 6.37 \times 10^{-1}$ 对比可得 $f_1' = f_1$, $f_2' = f_2$, 稳态损耗因子理论结果与本文方法计算结果列于表2.

由表2可见, 本文提出的方法与稳态方法的一致性非常好, 说明本文方法用衰减法数据计算稳态损耗因子具有很高的精度.

表2 稳态损耗因子本文方法与功率输入法结果对比

Table 2. Loss factor of frequency band with power injection method and method proposed here.

f_i /Hz	η_i	η_c 功率输入法	η_c 本文方法
15.1	8.94×10^{-3}	2.30×10^{-2}	2.34×10^{-2}
16.7	3.81×10^{-2}		

6 实验验证

本文对一块尺寸 $0.52\text{ m} \times 0.48\text{ m} \times 0.002\text{ m}$ 的钢板开展了损耗因子测量实验. 实验时, 板用柔性绳悬挂模拟自由边界, 如图10所示. 采用功率输入法和本文方法测量了板的频带损耗因子, 数据记录采用1/3倍频程. 输入功率是利用阻抗头测得激励点的速度和力的互谱获得, 振动能量是通过将板分成9个区域, 将各区域的振动响应基于能量平均得到. 两种方法的频带损耗因子识别结果列于表3.

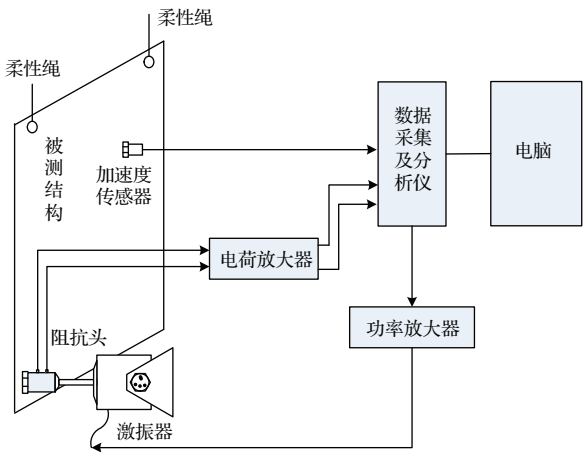


图10 实验系统

Fig. 10. Experimental system.

由表3可见, 本文方法和功率输入法识别的稳态损耗因子一致性表明: 本文提出的方法利用时域衰减信号获得稳态频带损耗因子具有很高的精度.

表3 本文方法和功率输入法实验结果对比

Table 3. Experimental results of loss factor of power injection method and method proposed here.

1/3 OCT 中心频率/Hz	模态频率/Hz	模态损耗因子	本文方法损耗因子	功率输入法损耗因子
31.5	28.1	1.99×10^{-2}	2.36×10^{-2}	2.41×10^{-2}
	33.1	2.31×10^{-2}		
40	42.2	4.46×10^{-2}	4.70×10^{-2}	4.81×10^{-2}
50	无	无	无	无
63	68.8	1.03×10^{-2}	1.12×10^{-2}	1.15×10^{-2}
80	78.1	3.01×10^{-2}	2.94×10^{-2}	2.87×10^{-2}
100	110.6	8.69×10^{-3}	9.61×10^{-2}	1.15×10^{-2}
	124.7	6.26×10^{-3}		
125	132.8	7.00×10^{-3}	6.88×10^{-3}	8.24×10^{-3}
	138.1	6.09×10^{-3}		
160	161.3	4.23×10^{-3}	4.26×10^{-3}	4.47×10^{-3}
200	207.5	3.92×10^{-3}	4.92×10^{-3}	5.24×10^{-3}
	219.4	4.54×10^{-3}		

7 结 论

本文主要对含多模态频带的损耗因子实验获取展开了研究, 得到以下结论:

1) 稳态损耗因子并不是各阶模态损耗因子求平均, 其值也不一定介于各阶模态损耗因子之间, 与各阶模态对振动响应的贡献和损耗因子有关;

2) 当频段内模态损耗因子与其对应固有频率乘积最大的模态, 其固有频率小于中心频率, 并且模态损耗因子与其对应固有频率乘积最小的模态, 其固有频率大于中心频率时, 稳态损耗因子一定介于模态损耗因子之间; 否则, 稳态损耗因子可能介于模态损耗因子之间, 可能超出模态损耗因子的范围;

3) 提出了过程损耗因子概念定义衰减过程的频带损耗因子, 过程损耗因子是与各阶模态的损耗因子相关, 受各阶模态振动幅度影响的时间函数. 给出了利用频带内各模态固有频率、损耗因子和振幅计算某时刻过程损耗因子的方法; 当时间趋于无穷时, 过程损耗因子趋于只由最小模态损耗因子贡献的频带损耗因子;

4) 提出了逐步分离时域衰减曲线频带内不同衰减特性分量的方法获取稳态损耗因子的方法, 并

对该方法开展了仿真和实验验证, 两者结果均表明, 本文所提出的方法获得稳态损耗因子具有很高的精度, 弥补了传统衰减法在中频段难以识别稳态损耗因子的不足.

参考文献

- [1] Wang C, Zhou Y Q, Shen G W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 124601
- [2] Li X G, Yang K D, Yang Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 064302
- [3] Pan X J, He X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7911 (in Chinese) [潘晓娟, 贺西平 2010 物理学报 **59** 7911]
- [4] He X S, Deng F Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 25 (in Chinese) [和兴锁, 邓峰岩 2010 物理学报 **59** 25]
- [5] Lyon R H 1975 *Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems: Theory and Applications* (MIT Press) pp3–10
- [6] Fahy F J 1994 *Philos. T. Roy. Soc. A* **346** 431
- [7] Langley R S, Bardell N S 1998 *Aeronaut. J.* **102** 287
- [8] Zhang Q, Hao Z Y, Mao J, Chen X R 2014 *Automot. Eng.* **36** 1004 (in Chinese) [张强, 郝志勇, 毛杰, 陈馨蕊 2014 汽车工程 **36** 1004]
- [9] Yu M S, Zhu Z D 2007 *J. Ship Mech.* **11** 273 (in Chinese) [俞孟萨, 朱正道 2007 船舶力学 **11** 273]
- [10] Li X Z, Zhang X, Liu Q M, Zhang Z J, Li Y D 2013 *J. China Railway Soc.* **35** 101 (in Chinese) [李小珍, 张迅, 刘全民, 张志俊, 李亚东 2013 铁道学报 **35** 101]
- [11] Li L, Wen J H, Cai L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014301
- [12] Lei B, Yang K D, Ma Y L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 054301

- [13] Ning F H, Zhang J 2002 *J. Shangdong Inst. Technol.* **16** 17 (in Chinese) [宁方华, 张建 2002 山东工程学院学报 **16** 17]
- [14] Cheng G L, Guan C B 2006 *Noise and Vib. Control* **26** 105 (in Chinese) [程广利, 关成彬, 胡声亮 2006 噪声与振动控制 **26** 105]
- [15] Schroeder R M 1965 *J. Acou. Soc. Am.* **37** 409
- [16] Sheng M P, Wang M Q, Sun J C 2001 *J. Northwest. Polytechnical Univ.* **19** 130 (in Chinese) [盛美萍, 王敏庆, 孙进才 2001 西北工业大学学报 **19** 130]
- [17] Yin B H, Wang M Q, Wu X D 2014 *J. Vib. Shock* **33** 100 (in Chinese) [尹帮辉, 王敏庆, 吴晓东 2014 振动与冲击 **33** 100]
- [18] Sheng M P 2001 *Tech. Acoust.* **20** 56 (in Chinese) [盛美萍 2001 声学技术 **20** 56]
- [19] Ungar E E, Edward J, Kerwin M 1962 *J. Acoust. Soc. Am.* **34** 945
- [20] Wang M Q, Sheng M P, Sun J C 2000 *J. Northwest. Polytech. Univ.* **18** 553 (in Chinese) [王敏庆, 盛美萍, 孙进才 2000 西北工业大学学报 **18** 553]

Estimation of steady loss factor with decay rate method

Gu Jin-Tao[†] Sheng Mei-Ping

(Department of Environmental Engineering, School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 2 April 2015; revised manuscript received 30 April 2015)

Abstract

Steady loss factor is derived according to its definition, and a conclusion is obtained that steady loss factor is not always among modal loss factors but related to contributions of each modal response to vibration response. To obtain the conclusions about the range of steady loss factor, four cases are discussed according to positions of the two natural frequencies related to the central frequency. 1) Both natural frequencies are lower than the central frequency. 2) Both natural frequencies are higher than the central frequency. 3) One natural frequency, whose modal loss factor is smaller, is higher than the central frequency and the other natural frequency is lower than the central frequency. 4) One natural frequency, whose modal loss factor is larger, is higher than the central frequency and the other natural frequency is lower than the central frequency. Steady loss factor ranges between modal loss factors only if the frequency, whose value of multiplying modal loss factor is largest, is lower than central frequency of frequency band and at the same time, the frequency, whose value of multiplying modal loss factor is the smallest, is higher than the central frequency. Process loss factor which is a time-dependent function is proposed for the description of loss factor of decay process. Meanwhile, the way to calculate process loss factor with modal frequency, loss factor and amplitude is presented. Process loss factor tends to steady loss factor contributed by the mode with smallest loss factor over time. The accuracy is good enough for traditional decay rate method to estimate steady loss factor when there is only one mode or lots of modes in the frequency band. It is difficult for traditional decay rate method to be used to evaluate steady loss factor in the mid-frequency band where frequency density is not enough. A new method is proposed to estimate steady loss factor through separating the smallest modal loss factor components in the frequency band with time decay curve step by step according to the different decay characteristics. Simulation and experimental results indicate that the proposed method can cover the shortage of traditional decay rate method of estimating the steady loss factor in mid-frequency band.

Keywords: steady loss factor, decay rate method, multimode frequency band

PACS: 43.40.+s

DOI: 10.7498/aps.64.184301

[†] Corresponding author. E-mail: gujintao@yeah.net