第34卷 第2期
2014年4月

噪 声 与 振 动 控 制
NOISE AND VIBRATION CONTROL

Vol 34 No.2
Apr. 2014

文章编号：1006-1355(2014)02-0200-03

不可分离结构的损耗因子测量研究

巨　乐，王敏庆，顾金桃

(西北工业大学 动力与能源学院，西安 710072)

摘　要：提出对不可分离结构内损耗因子和耦合损耗因子的测量方法。对于内损耗因子测量，针对实际工程中子结构不可分离的问题，提出了用总损耗因子代替内损耗因子的方法。对于耦合损耗因子测量，利用已测得的内损耗因子结合稳态振动实验测得的能量可计算出结构间耦合损耗因子。同时分析了耦合损耗因子大小对总损耗因子代替内损耗因子差值的影响。仿真结果表明，当耦合损耗因子远小于内损耗因子时，内损耗因子和总损耗因子近似相等。对双圆柱壳耦合结构进行了实验验证，实验结果证明了该方法的正确性。

关键词：振动与波；统计能量分析；损耗因子；测量

中图分类号：O328；TH113　　**文献标识码：**A　　**DOI编码：**10.3969/j.issn.1006-1335.2014.02.046

Measurement and Study of Loss Factors for Inseparable Structures

JU Le，*WANG Min-qing*，*GU Jin-tao*

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi’an 710072, China)

Abstract : Based on an actual project, a measurement method of dissipation and coupling loss factors for inseparable structures is presented. In this method, the dissipation loss factors can be considered as an approximation of total loss factors of the inseparable structures according to the method. Then the coupling loss factors can be calculated using the dissipation loss factors and steady vibration energy ratio. Additionally the difference between the total and dissipation loss factors affected by coupling loss factors is simulated. The result shows that the total loss factors are very close to the dissipation loss factors when the coupling loss factors are far less than the dissipation loss factors. Finally, the loss factors of a coupled bi-cylindrical shell structure are measured, and the experiment results show that the proposed method is reasonable and reliable.

Key words : vibration and wave ; statistical energy analysis (SEA) ; loss factor ; measurement

统计能量分析(Statistical Energy Analysis，简称SEA)作为一种简洁、有效、在中高频段具有较高精度的振动和声分析方法，被广泛应用于预测复杂结构的振动和噪声传递[1−3]。统计能量分析法运用功率流平衡方程，模型相对简单，对结构细节要求不严，适用于产品详细结构尚未确定的设计初期，与其他方法相比具有比较突出的优点，计算结果能够满足工程要求，弥补了传统方法难以准确处理中高频段结构波动的不足。近年来，该方法已逐渐应用于宇航领域，如导弹、卫星结构的分析，取得了比较好的效果。

损耗因子作为统计能量分析的必要输入参数，直接影响环境预示的精度。损耗因子是指振动结构每周期时间内损耗能量与存储能量之比，分为内损耗因子和耦合损耗因子[4]。内损耗因子由子结构内部本身损耗能量的程度决定。耦合损耗因子由相连子结构间的耦合程度决定，表示子结构间的功率流传输特性。

通常采用实验方法获取子结构间的耦合损耗因子，需经过以下几个步骤[5]：

1) 将整个结构划分为多个子结构；

2) 建立各个子结构间功率流传递关系；

3) 通过实验获得各个独立子结构的内损耗因子；

4) 稳态实验测量单独激励各子结构时，子结构间的能量比；

5) 利用能量平衡方程、各子结构的内损耗因子以及子结构间的能量比，计算子结构间的耦合损耗因子。

获得子结构内损耗因子的方法多。近年来，Tian Ran Lin[6]等学者研究了通过测量粘弹性材料的

收稿日期：2013-07-01

作者简介：巨　乐(1989-)，男，陕西宝鸡人，硕士，目前从事环境预示方法研究。
E-mail: jule1989123@163.com

复频率响应函数，而后通过最小二乘曲线拟合来获得其刚度和损耗因子的方法，该理论仅能在低频段内测得所需结果。Micha Rak [7]等学者研究了测量振动梁的复波数来计算阻尼材料的杨氏模量以及结构的损耗因子，该方法可以在较宽的频带内测得材料的动态力学参数。目前，国内获得结构内损耗因子的方法是模态圆法、自由衰减法、相位法、弯曲共振法等。其中自由衰减法因为测试频段宽，测试精度高，易于操作等优点 [7]，在内损耗因子测试过程中得到普遍应用，但其要求对每个子结构单独测试。对于航空航天器、船舶结构、建筑结构等大型结构，子结构之间通常采用铆、焊、栓的连接方式，分离子结构将显得比较困难。因此各个子结构内损耗因子也不易获取，在实际工程应用中受到限制。

利用SEA能量平衡方程，在弱耦合条件下，证明内损耗因子和总损耗因子近似相等。在不分离结构的前提下，各子结构的内损耗因子用总损耗因子近似。利用各子结构近似的内损耗因子和能量比，根据功率流平衡方程计算得到结构间耦合损耗因子。

1　理论分析

1.1　耦合损耗因子

耦合损耗因子 η_{ij} 是两个子结构间振动能量耦合作用大小的一种度量。一个结构整体受到外界激励时，能量通过耦合联接由直接受激子系统流向间接受激子系统。在稳态条件下，设只对子结构K激励，可以获得能量平衡方程 [5]，

$$P_k=\omega E_k\eta_k+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq k}}^{N}\omega E_k\eta_{kj}-\sum_{\substack{j=1\\ j\neq k}}^{N}\omega E_j\eta_{jk} \tag{1}$$

$$0=\omega E_i\eta_i+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\omega E_i\eta_{ij}-\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\omega E_j\eta_{ji} \tag{2}$$

$$i=1,\cdots,N和i\neq k$$

其中 η_k 是子结构 k 的内损耗因子；η_{ij} 是子结构 i 到子结构 j 的耦合损耗因子；N 为子结构数目。

方程(2)为 $(N-1)$ 个方程组成的方程组。如果外力依次输入到 N 个子结构，由方程(2)可以获得 $N\times(N-1)$ 个方程组，可以将 $N\times(N-1)$ 个方程组写成矩阵形式。

如果子结构数目较多，则矩阵的形式很复杂。以子结构数 $N=2$ 为例，矩阵形式为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{E}_{1,1}&\boldsymbol{E}_{1,1}&-\boldsymbol{E}_{2,1}&0\\0&-\boldsymbol{E}_{1,1}&\boldsymbol{E}_{2,1}&\boldsymbol{E}_{2,1}\\\boldsymbol{E}_{1,2}&\boldsymbol{E}_{1,2}&-\boldsymbol{E}_{2,2}&0\\0&-\boldsymbol{E}_{1,2}&\boldsymbol{E}_{2,2}&\boldsymbol{E}_{2,2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\eta_1\\\eta_{12}\\\eta_{21}\\\eta_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_1/\omega\\0\\0\\\boldsymbol{P}_2/\omega\end{bmatrix} \tag{3}$$

其中，$E_{i,j}$ 表示当子系统 j 被激励时，储存在子系统 i 种的振动能量。

由方程可见，在现场测量时，只要对每个结构顺序激励，测得内损耗因子 η_i 和能量比 E_i/E_j，代入方程(3)即可获得耦合损耗因子 η_{ij}

$$\begin{aligned}\eta_{12}&=\frac{E_{12}E_{21}\eta_1+E_{21}E_{22}\eta_2}{E_{11}E_{22}-E_{12}E_{21}}\\\eta_{21}&=\frac{E_{12}E_{11}\eta_1+E_{21}E_{12}\eta_2}{E_{11}E_{22}-E_{12}E_{21}}\end{aligned} \tag{4}$$

1.2　不可分离结构的内损耗因子

当不可分离结构受到稳态激励作稳态振动时，统计能量分析(SEA)模型中子结构 i 的功率流平衡方程为

$$P_{i,in}=\omega E_i\eta_i+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}(E_i\eta_{ij}-\omega E_j\eta_{ji}) \tag{5}$$

式中 $P_{i,in}$ 是输入到子结构 i 的输入功率；$\omega=2\pi f$ 是圆频率；E_i 是储存在子结构 i 中的振动能量；η_i 是子结构 i 的内损耗因子；η_{ij} 是子结构 i 到子结构 j 的耦合损耗因子。

根据互易原理公式

$$n_i\eta_{ij}=n_j\eta_{ji} \tag{6}$$

式中 n_i、n_j 分别为子结构 i、j 的模态密度。

可将式(5)简化为

$$P_{i,in}=\omega E_i\left[\eta_i+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\eta_{ij}(1-\frac{n_iE_j}{n_jE_i})\right] \tag{7}$$

子结构 i 的稳态总损耗因子 η_{Ti} 定义为

$$\eta_{Ti}=\frac{P_{i,in}}{\varepsilon E_i}=\eta_i+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\eta_{ij}(1-\frac{n_iE_j}{n_jE_i}) \tag{8}$$

如仅子结构 i 是唯一直接受激的子结构，且其它间接受激的子结构 j 的阻尼足够大，此时子结构能量比 $E_j/E_i\to 0$，那式(5)就简化为

$$\eta_{Ti}=\eta_i+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\eta_{ij} \tag{9}$$

由式(8)可知：总损耗因子包括结构本身内部损耗和传给其它子结构能量的耦合损耗。

当只有两个子结构且只有第一个子结构受到激励时，有如下功率流平衡方程式

$$\begin{aligned}\omega E_1\eta_1+\omega E_1\eta_{12}-\omega E_2\eta_{21}&=P_{1,in}\\\omega E_2\eta_2+\omega E_2\eta_{21}-\omega E_1\eta_{12}&=0\end{aligned} \tag{10}$$

由上式可得

$$\frac{E_2}{E_1}=\frac{\eta_{12}}{\eta_2+\eta_{21}}=\frac{n_2\eta_{21}}{n_1(\eta_2+\eta_{21})} \tag{11}$$

将上式带入(9)式中的第一个式子可得

$$\eta_{T1}=\eta_1+\eta_{12}-\frac{\eta_{12}\eta_{21}}{\eta_2+\eta_{21}}=\eta_1+\frac{\eta_2\eta_{12}}{\eta_2+\eta_{21}} \tag{12}$$

如耦合损耗因子 η_{12}、η_{21} 远小于内损耗因子 η_1、η_2，则式(11)可简化为

$$\eta_{T1}\approx\eta_1 \tag{13}$$

即内损耗因子近似等于总损耗因子。

因此，用自由衰减法，通过分析振动衰减的规律获得损耗因子，其常用的公式为

$$\eta=\frac{2.2}{fT_{60}} \tag{14}$$

上式中 f 为分析频带中心频率，而 T_{60} 为振动能量衰减60 dB所经历的时间，它与能量下降曲线的斜率有关。

2 仿真及实验验证

2.1 仿真计算

根据式(12)，建立双子结构耦合模型，具体参数选择如下：η_1=0.001 η_2=0.005，当 η_{12}、η_{21} 同时依次由 1.0×10^{-6}～1.0×10^{-3} 取值时，总损耗因子 η_{T1} 的变化曲线如图1所示。其中横坐标为耦合损耗因子与内损耗因子的比值，即 η_{12}/η_1。

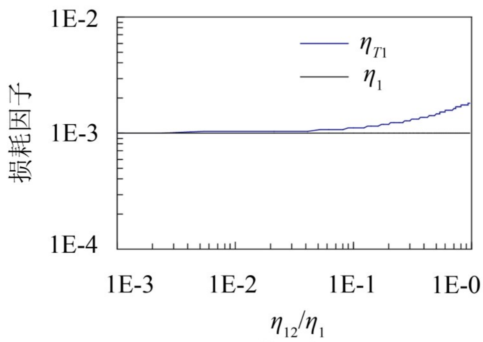

图1 仿真对比图

由图可见：当耦合损耗因子远小于内损耗因子时，总损耗因子和内损耗因子近似相等。并且当耦合损耗因子越小，总损耗因子和内损耗因子也越接近。当 $\eta_{12}/\eta_1<0.1$ 时，总损耗因子与内损耗因子相对差值 $(\eta_{T1}-\eta_1)/\eta_1<8\,\%$。

2.2 实验验证

为验证所提方法的正确性，对两圆柱壳耦合结构进行实验测试，分析频带为400 Hz～10 kHz(小于400 Hz时，结构模态密度过小，实验误差较大)。测试中，圆柱壳耦合结构自由吊挂。

实验分为以下四个步骤：

1) 首先各个子结构分离，用自由衰减法获取各个结构的内损耗因子；

2) 随后子结构耦合连接，用自由衰减法获取各个子结构的总损耗因子；

3) 用输入功率法依次激励各个子结构，获得各子结构的稳态振动能量；

4) 最后据能量平衡方程，计算出结构间的耦合损耗因子。

图2为自由衰减法测试系统图，即瞬态测试。

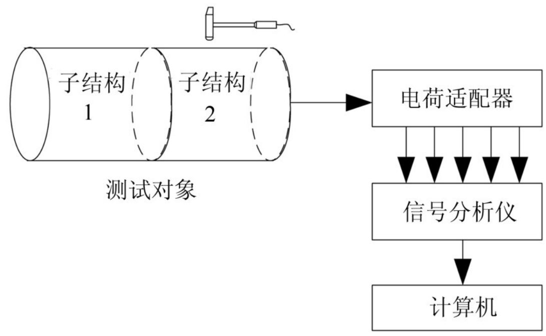

图2 瞬态测试系统简图

图3为输入功率法测试系统图，即稳态测试。

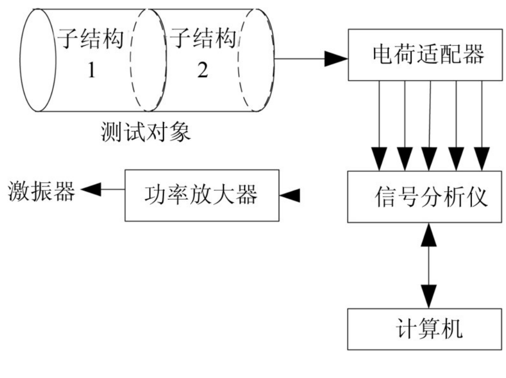

图3 稳态测试系统简图

图4所示为实验所获得的子结构1的内损耗因子和总损耗因子以及子结构1、2之间的耦合损耗因子。

由图可见：结构间的耦合损耗因子在所测频率范围内(除630 Hz以外)均远小于结构内损耗因子，因此，所测得子结构1的内损耗因子和总损耗因子一致性好。分析630 Hz处，η_{21} 与 η_1 量级接近，而 η_{12} 远小于 η_1，子结构1的内损耗因子和总损耗因子一致性的原因，从式(12)不难看出，上述条件下，式(13)依然成立。

实验结果表明了所提出的近似方法的正确性，同时用测得的内损耗因子及振动能量比，计算得到结构间的耦合损耗因子。

(下转第211页)