

结构阻尼的声衰减时间测量方法*

张教超, 王敏庆, 马建刚

(西北工业大学航海学院 西安, 710072)

摘要 针对结构阻尼的测量,通过分析平板的辐射声压,发现结构自由振动时的声压级的衰减率与平板的振动水平的衰减率相等。基于此提出了通过测量结构自由振动时的声衰减时间来计算结构损耗因子的测量方法,采用该方法及传统的测量方法测量得到的结构损耗因子在整个测试频率范围内基本相等。分析及实验结果表明,该方法正确可行,并且可实现结构阻尼的非接触测量。

关键词 阻尼测试; 自由振动; 损耗因子; 声衰减时间

中图分类号 O329; TB52.2; TB52.3; TH82

引言

结构损耗因子是统计能量分析与振动理论中的重要参数,已有大量学者对其进行了研究,提出了各种测量方法^[1-4]。目前,对于结构损耗因子的测量,主要有半功率带宽法、自由衰减法和输入功率法^[5]。半功率带宽法主要用于测量结构中、低频的模态损耗因子。输入功率法主要用于测量频带平均损耗因子,但是由于输入功率及结构的平均振动能量难以准确测量,该方法具有一定的局限性。自由衰减法可用于测量结构的模态损耗因子及频带平均损耗因子。目前,在使用自由衰减法时,通常是利用加速度计测量结构自由振动时的振动衰减时间来计算结构损耗因子。由于加速度计具有一定的质量,因此会引入附加质量而带来测量误差。文献^[6-7]分别提出了通过测量声激励下平板产生的声场的声强和声压来计算结构阻尼,但是这两种方法需要同时用到混响室和消声室,条件难以满足,还需要测量平板的表面振动加速度,会引入附加质量。赵跃英等^[8]根据薄板弯曲振动方程的位移解的普遍形式,认为声场中某点声压与薄板上某点的位移随时间的变化规律相同,直接得出了声场中某点声压的表达式,提出了在脉冲激励下,通过测量声压来测量薄壁构件的阻尼振动衰减因子。

笔者在此基础上,将平板看成是由无限多个点声源组成的面声源,根据点声源的辐射声压推导出平板的辐射声压,得到结构自由振动时,声压级的衰

减率与平板振动水平的衰减率相等的结论。基于此,提出了通过测量结构自由振动时声压级的衰减时间来计算结构损耗因子的方法,并通过实验与常用的测量方法进行对比,以验证该方法的正确性。

1 理论基础

平板可看做一个面声源,其表面各点的振幅和相位一般说来可能是各不相同的。可以设想把该声源表面 S 分成无限多个小面元 dS , 在每个面元 dS 上,各点的振动可看成是均匀的,从而把这些面元 dS 都看成是点声源。

点声源的半径 r_0 比声波波长小很多,即满足 $kr_0 \ll 1$ 条件的脉动球源。点声源的辐射声压^[9]为

$$p \approx j \frac{k\rho_0 c_0}{4\pi r} Q_0 e^{j(\omega t - kr)} \quad (1)$$

其中: $Q_0 = 4\pi r_0^2 v_a$ 为点源强度; v_a 为小脉动球的体积速度幅值; k 为波数; ρ_0 为介质密度; c_0 为声波在介质中的传播速度; r 为空间某点与点声源的距离。

设平板上位于 (x, y, z) 处点源的振动规律为

$$v = v_a(x, y, z) e^{j[\omega t - \alpha(x, y, z)]} \quad (2)$$

其中: $v_a(x, y, z)$ 为该面元的振动速度幅值; $\alpha(x, y, z)$ 为该面元的初相位,它们都是位置的函数。

该点源的强度为 $dQ_0 = v_a(x, y, z) dS$, 于是该面元振动时在空间某点产生的声压为

$$dp = j \frac{k\rho_0 c_0}{4\pi h(x, y, z)} dQ_0 e^{j[\omega t - kh(x, y, z) - \alpha(x, y, z)]} \quad (3)$$

其中: $h(x, y, z)$ 为该面元到观测点的距离。

* 收稿日期: 2011-06-30; 修改稿收到日期: 2011-11-01

因为 S 面上各面源对空间声场都有贡献,所以将它们贡献叠加起来可得到总声压为

$$p = \iint_S j \frac{k \rho_0 c_0}{4\pi h(x, y, z)} v_a(x, y, z) \times e^{j[\omega t - kh(x, y, z) - \alpha(x, y, z)]} dS \quad (4)$$

现设想将平板分成 N 个振动均匀的小区域,即看成 N 个点声源,则总声压为

$$p = j \frac{k \rho_0 c_0 dS}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{v_{ia} e^{j[\omega t - kh_i - \alpha_i]}}{h_i} \quad (5)$$

第 i 个点声源产生的声压为

$$p_i = j \frac{k \rho_0 c_0 dS}{4\pi} \frac{v_{ia} e^{j[\omega t - kh_i - \alpha_i]}}{h_i} \quad (6)$$

因此,第 i 个点声源产生的声压级为

$$L_{ip} = 10 \lg \left(\frac{p_{ie}^2}{p_{ref}^2} \right) = 8.69 \lg |p_{ie}| + C \quad (7)$$

其中: $p_{ie} = \frac{p_{ia}}{\sqrt{2}} = \frac{k \rho_0 c_0 v_{ia} dS}{4 \sqrt{2} \pi h_i}$,为声压的有效值; $p_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$,为参考声压; C 为一常数。

定义声压级的衰减率为

$$\Delta_{pt} = -dL_p/dt \quad (8)$$

将式(7)代入式(8),可得第 i 个点声源产生的声压的声压级衰减率为

$$\Delta_{ipt} = -dL_{ip}/dt = -8.69 d \ln |v_{ia}|/dt = -dL_{iv}/dt = \Delta_{iv} = \Delta_i \quad (9)$$

由式(9)可以看出,每个点声源产生的声压级的衰减率等于平板结构表面速度级的衰减率,即为平板的振动水平的衰减率 Δ_i 。平板结构振动水平的衰减率^[10]为

$$\Delta_i = -dL_v/dt = 8.69 \xi \omega \quad (10)$$

其中: ω 为结构振动的圆频率; ξ 为结构的阻尼比。

由此可得,整个平板在空间某点产生的声压级衰减率为

$$\Delta_{pt} = -dL_p/dt = 8.69 \xi \omega \quad (11)$$

定义声衰减时间 T'_{60} 为声压级衰减60 dB所经历的时间,则声衰减时间 T'_{60} 可表示为

$$T'_{60} = \frac{60}{\Delta_{pt}} = \frac{60}{8.69 \xi \omega} = \frac{1.1}{\xi f} \quad (12)$$

其中: $f = \frac{\omega}{2\pi}$ 为结构振动的频率。

平板结构的损耗因子可表示为

$$\eta = 2\xi = \frac{\Delta_{pt}}{27.3f} = \frac{2.2}{fT'_{60}} \quad (13)$$

在消声室内进行。图1为振动衰减时间与声衰减时间测量系统示意图。

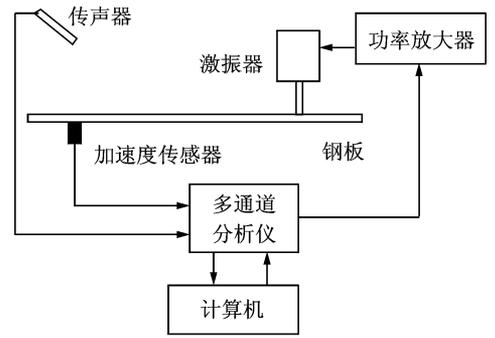
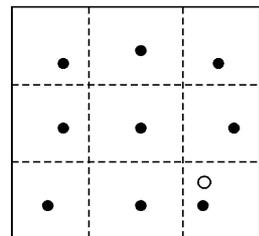


图1 振动衰减时间 T_{60} 与声衰减时间 T'_{60} 的测量系统示意图

测量试件为钢板,长为520 mm,宽为480 mm,厚为3 mm,测试中试件采用长、细并且柔软的绳子水平悬挂。多通道分析仪产生100~8 000 Hz的白噪声,经功率放大器放大后输入到激振器,对试件施加白噪声激励。待试件达到稳定振动状态后,切断激励信号,停止激励,试件做自由衰减振动。用加速度计拾取试件表面振动加速度信号,用两个传声器在不同测点拾取声压信号,输入到多通道分析仪,分别得到加速度信号和声压信号的自功率谱密度,并做1/3倍频程分析,经计算分别得到各个频带内的振动衰减时间 T_{60} 和声衰减时间 T'_{60} ,再由式(13)计算得到试件的各项频带内的平均结构损耗因子。

加速度计的测试位置和激励点位置如图2所示。将钢板均分为9个区域,分别在每个区域随机选取一点测量其加速度信号。激励点位置位于钢板边角处,可以较大程度地激起钢板的各阶模态^[5]。传声器的测点位置布置参考文献[11],其位置布置示意图如图3所示,表1为传声器各测点的坐标值(以平板中心为原点)。



●-加速度计位置; ○-激励点位置

图2 加速度计及激励点位置示意图

2 实验

为了避免周围反射声及环境噪声的干扰,实验

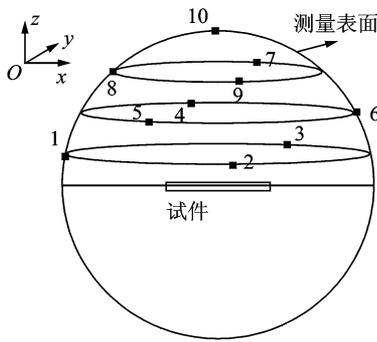


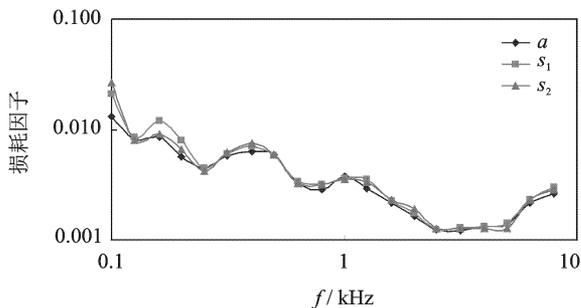
图3 传声器测点布置示意图

表1 传声器各测点坐标值

编号	x/m	y/m	z/m
1	-1.030	0.000	0.165
2	0.515	-0.892	0.165
3	0.515	0.892	0.165
4	-0.463	0.802	0.468
5	-0.463	-0.802	0.468
6	0.926	0.000	0.468
7	0.354	0.613	0.780
8	-0.707	0.000	0.780
9	0.364	-0.613	0.780
10	0.000	0.000	1.040

3 测量结果与分析

由测量得到的振动衰减时间和声衰减时间分别计算得到的结构损耗因子随频率的变化曲线如图4所示。从图4可以看出,由振动衰减时间和声衰减时间计算得到的结构损耗因子随频率的变化曲线在整个测量频率范围内基本重合,验证了笔者提出的利用传声器测量声衰减时间来计算结构损耗因子的方法是正确可行的。



α -对9个测点测量得到的振动衰减时间取平均后计算得到的结构损耗因子; s_1, s_2 -分别对2个传声器10个测点测量得到的声衰减时间取平均后计算得到的结构损耗因子
图4 分别由振动衰减时间和声衰减时间计算得到的平均结构损耗因子随频率的变化曲线

图5所示为不同传声器不同测点测量得到的结构损耗因子随频率的变化曲线。由图5可以看出,不同测点测量得到的结构损耗因子在整个测试频率范围内具有很好的一致性。由此可知,在信噪比足够的条件下,传声器的位置不会对测量结果产生影响,在测量结构自由振动的声衰减时间时,传声器的位置可以灵活布置,但需要保证足够的信噪比。

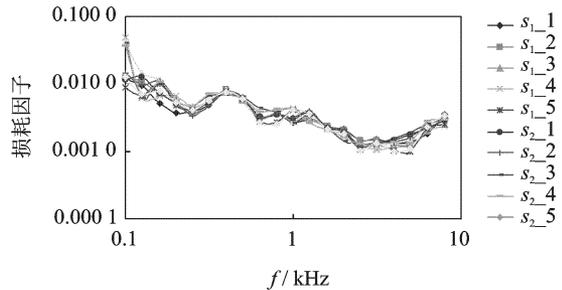


图5 不同传声器、不同测点测量得到的结构损耗因子随频率的变化曲线

采用传声器测量结构声衰减时间来计算结构的损耗因子,实现了非接触测量,与传统的接触测量方法相比,可以避免由于附加质量而引入测量误差。

4 结论

1) 通过测量声衰减时间计算得到的结构损耗因子,与通过测量振动衰减时间计算得到的结构损耗因子在整个测试频率范围内基本相等,验证了该方法的正确性。

2) 利用该方法测量结构损耗因子时,传声器位置可以灵活布置,但需要有足够的信噪比。

3) 实现了非接触测量,能够减少附加质量对测试结果的影响。

参 考 文 献

- [1] 程广利,朱石坚,伍先俊. 统计能量分析法及其损耗因子确定方法综述[J]. 船舶工程, 2004, 26(4): 10-15. Cheng Guangli, Zhu Shijian, Wu Xianjun. A summary of statistical energy analysis method and its loss factor's determination[J]. Ship Engineering, 2004, 26(4):10-15. (in Chinese)
- [2] Wu L, Agren A, Sundback U. A study of the initial decay rate of two-dimensional vibrating structures in relation to estimates of loss factor [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 206(5): 663-684.
- [3] Ranky M F, Clarkson B L. Frequency average loss

factors of plates and shells[J]. Journal of Sound and Vibration, 1983, 89(3): 309-323.

[4] 胡卫强,王敏庆,刘志宏,等. 阻尼材料动态力学参数自动测试系统的设计[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(4):347-349, 411.
Hu Weiqiang, Wang Minqing, Liu Zhihong, et al. An automatic test system for damping material's DMP test by swept sine half power bandwidth method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(4):347-349, 411. (in Chinese)

[5] 孙进才,王冲. 机械噪声控制原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1993:65-90.

[6] Lim M K. A sound intensity technique for determining structural damping of a panel exposed to noise[J]. Applied Acoustics, 1991, 32:311-319.

[7] Chen Y H, Chen K T, Chaing Y H. Plate-damping measurements in a single reverberation room[J]. Applied Acoustics, 1996, 47(3):252-261.

[8] 赵跃英,盛胜我. 薄壁构件的阻尼振动衰减因子的测量[J]. 同济大学学报, 2002, 30(7):900-903.

Zhao Yueying, Sheng Shengwo. Measurement of attenuation factor for damped vibration of thin-shell structures[J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(7):900-903. (in Chinese)

[9] 杜功焕,朱哲明,龚秀芬. 声学基础[M]. 南京:南京大学出版社,2001:340.

[10] 戴德沛. 阻尼减振降噪技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986:10.

[11] GB 6882—1986 声学噪声声功率级的测定 消声室和半消声室精密法[S].



第一作者简介:张教超,男,1985年12月生,硕士研究生。主要研究方向为噪声与振动控制、机械设计。曾发表《齿形滑环式组合密封的有限元分析》(《润滑与密封》2011年第36卷第5期)等论文。
E-mail: jczhang@yahoo.cn

《振动、测试与诊断》2011年影响因子

根据中国科学技术信息研究所《2012年版中国科技期刊引证报告(核心版)》最新公布,《振动、测试与诊断》2011年影响因子为0.626,在29种航空、航天科学技术类期刊中排名第一。在收录的1998种中国科技核心期刊中(不含港澳台地区),综合评价排名为244名。在此,编辑部衷心感谢广大读者、作者和审稿人对本刊的一贯支持与关怀!

表1 2011年航空、航天科学技术类期刊影响因子

刊名	影响因子		刊名	影响因子	
	数值	排名		数值	排名
振动、测试与诊断	0.626	1	中国空间科学技术	0.281	15
航空学报	0.604	2	空气动力学学报	0.279	16
宇航学报	0.592	3	航天返回与遥感	0.278	17
CHINESE JOURNAL OF AERO-NAUTICS	0.543	4	航天器工程	0.264	18
计算机测量与控制	0.438	5	航空制造技术	0.261	19
电光与控制	0.435	6	飞行力学	0.255	20
南京航空航天大学学报	0.381	7	强度与环境	0.250	21
航空动力学报	0.351	8	测控技术	0.248	22
推进技术	0.315	9	航空计算技术	0.206	23
北京航空航天大学学报	0.310	10	导弹与航天运载技术	0.175	24
固体火箭技术	0.300	11	南昌航空大学学报自然科学版	0.132	25
航天控制	0.298	12	中国民航大学学报	0.130	26
航天器环境工程	0.295	13	飞行器测控学报	0.117	27
实验流体力学	0.283	14	航空精密制造技术	0.109	28
			宇航计测技术	0.104	29

(数据摘自中国科学技术信息研究所《2012年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,科学技术文献出版社)