

测量声学材料复杨氏模量的传递函数方法

张同根 郝龙胜 李秀云

(中国科学院声学研究所)

在噪声振动的隔离和阻尼处理中,测定声学材料,特别是粘弹性材料的动态杨氏模量和损耗因子具有重要意义。过去一般用悬臂梁或自由梁方法来测量,常用的仪器如 B/K3930 复模量仪、N-VES 和 Metravib 粘弹谱仪等,这些方法各有特点,但都不能在频率域上连续测量。我们根据 Pritz 原理^[1],新建了一套测量复杨氏模量的装置——传递函数法测量系统。本系统工作频率范围为 60Hz 至 10 kHz,在共振频率以上范围中,精度优于 5%。

一、原理和设备

我们的测量装置是将一个矩形或圆柱形样品放在振动台上激振,样品顶部有一负载质量,测定系统的传递函数,就可确定材料的杨氏模量和损耗因子。测量系统见图 1。

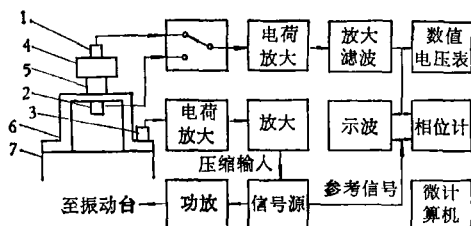


图 1 测量系统图

1. 加速度计 1; 2. 加速度计 2; 3. 加速度计 3; 4. 负载质量; 5. 测量样品; 6. 振动膜; 7. 振动台

假定样品材料均匀,各向同性,横向尺寸远小于波长,在线性与简谐激励条件下,振动系统的传递函数 T^* 为激励端与质量负载端的振动加速度 A^* 的复数比^[2],即

$$T^* = A_1^*/A_2^* = T e^{i\varphi} = [chal + (M/m) \gamma lsh\gamma l]^{-1}, \quad (1)$$

式中 $\gamma = \alpha + j\beta$, γ , α , β 分别为传播常数、衰减常数和相位常数。将(1)式的实部与虚部分开,可以得到一非线性方程组:

$$\left. \begin{aligned} f_1(\alpha, \beta) &= [chal \cos \beta l + (M/m)(alshal \cos \beta l - \beta lchal \sin \beta l)] - (\cos \varphi/T) = 0 \\ f_2(\alpha, \beta) &= [shal \sin \beta l + (M/m)(alchal \sin \beta l + \beta lshal \cos \beta l)] + (\sin \varphi/T) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

本系统配备微计算机,编制了专用程序,用下降法求解方程组(2),得到 α , β 的精确值,由此可以确定被测材料的复杨氏模量 E^* ,即

$$E^* = E(1 + j\eta_E), \quad (3)$$

$$E = (\rho\omega^2/\beta^2)[(1 - d^2)/(1 + d^2)^2], \quad (4)$$

$$\eta_E = 2d/(1 - d^2), \quad (5)$$

式中 $d = \alpha/\beta$, ρ , l , m 为样品的密度、长度、质量, M 为负载质量。

为了提高测试精度,我们的装置作了改进。由于振动台台面本身各点的振幅和相位起伏分布不均,例如在 315Hz 时,实测台面八个点,振幅变化 5—10%,相位变化 1—7°,在负载改变时,振幅与相位的分布随之变化。按过去一般做法,将加速度计 2 放在振动台面边上,测量误差大,修正也不方便。我们采用如图 1 所示的振动膜安装方式进行中心检测,两个加速度计保证在中心线位置上,减小了这种影响。由于两加速度计安装方向相反,相差 180°,计算时要加修正:

$$T = (V_1/V_2)S_V, \quad (6)$$

$$\varphi = \varphi_1 - (\varphi_2 + 180) - \Delta\varphi, \quad (7)$$

式中 V_1 , V_2 , φ_1 , φ_2 分别是有样品时加速度计 1 和 2 输出信号的幅度和相位, S_V 和 $\Delta\varphi$ 是无样品时两加速度计输出的幅度比和相位差。

保证高的信噪比是影响精度的重要因素之一。我们采用屏蔽的转接器，用同一路电子仪表分别测量两加速度计的输出信号，并采用了滤波器和低噪声电缆。另外用加速度计3的输出作为振动台控制信号源的压缩回路输入，这种独立的反馈系统避免了变换加速度计时带来的压缩量不等的影响。采取了这些措施后，测量时信噪比一般可保证在60dB以上。

除了温度外，复模量还与振幅大小有关，必须注意保证线性和小振幅条件。一般试验时的加速度小于1g，并使材料的相对应变小于0.1%，试样尺寸为1.0×1.0×0.5cm，端质量块(包括加速度计)要求质量比(M/m)为50—100。

二、实验结果与讨论

图2是CB-5氯化丁基胶与DA6-1阻尼胶板的杨氏模量与损耗因子测量结果，图中带“*”号的点为DA6-1阻尼胶板用自由梁复模量测量的值，其结果是一致的。

Pritz将(1)式按级数展开，得到E和η_E的二阶近似公式，仅在η_E<0.6条件下，精度才有10%。而实际上，有许多材料的损耗因子都高于0.6。我们建立的测试系统，配备微计算机，用数值计算方式求解(2)式，因而使本系统在测量损耗因子η_E>0.6的材料时，同样具有高的精度。表1比较了两种材料用两种方法得到的结果。对于CB-5材料，由于η_E≈1，故

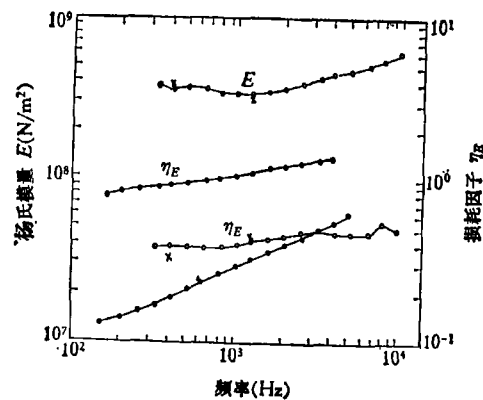


图2 两种材料的杨氏模量和损耗因子
○—○ DA6-1 阻尼胶板；●—● CB-5 氯化丁基胶

在2kHz以上，按Pritz近似公式计算的结果，偏高5.4—22.5%。

测量系统的精度可按下式估计：

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{\Delta f}{f} + 2 \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + W_{ET} \cdot \frac{\Delta T}{T} + W_{E\varphi} \cdot \frac{\Delta \varphi}{\varphi}$$

$$\frac{\Delta \eta_E}{\eta_E} = W_{\eta T} \cdot \frac{\Delta T}{T} + W_{\eta \varphi} \cdot \frac{\Delta \varphi}{\varphi}$$

当频率高于系统共振频率 f_0 时，式中诸误差放大因子分别近似地为： $W_{ET} \approx 1$ ， $W_{\eta T} \approx -(f_0/f)^2$ ， $W_{E\varphi} \approx \pi \eta_E$ ， $W_{\eta \varphi} \approx -(\pi/\eta_E)$ 。挑选合适的仪器，特别是高精度相位计，则E、η_E的测量精度可达±5%。对于η_E<0.1的材料，η_E的测量精度较低。另外，在共振频率以下时，由于φ

表1 两种方法测量杨氏模量E的结果比较 (E的单位为10⁷N/m²)

材料	频率 f/Hz	315	500	1000	2000	4000	5000	8000	10000
DA6-1 (η _E ≈0.4)	本方法	39.6	35.4	33.1	37.8	46.2	47.4	53.9	62.6
	Pritz 近似法	39.7	35.5	33.1	37.9	46.7	48.3	56.2	66.2
	相对偏差%	0.25	0.28	0	0.26	1.1	1.9	4.3	5.8
CB-5 (η _E ≈1.0)	本方法	1.70	2.10	2.83	3.91	5.45	6.08		
	Pritz 近似法	1.70	2.11	2.88	4.12	6.32	7.45		
	相对偏差%	0	0.48	1.8	5.4	16.0	22.5		

(下转第224页)