

扬声器纸盆材料动态弹性模量的新测量方法

杜学超 王文建 沙家正

(南京大学声学所 南京 210093)

1996 年 6 月 6 日收到

摘要 本文从理论上对末端有负载的悬臂梁的自由振动频率进行了计算, 并采用新的激振和拾振装置, 建立一种扬声器纸盆材料的动态弹性模量的新测量方法, 测量了若干纸盆试样, 得出典型的幅频响应曲线, 并对实验结果进行了分析。

关键词 杨氏模量, 损耗因数

A new method of measuring the dynamic elastic modulus of paper for loudspeaker

Du Xuechao, Wang Wenjian, Sha Jiazheng

(Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract A theory is developed to calculate the inherent frequency of a cantilever with attached mass at the free end. At the same time, a new apparatus for activating and sensing of vibration is designed to measure the dynamic young's modulus of paper for the paper basin of a loudspeaker. Some test papers have been measured and typical amplitude-frequency response curves acquired and analysed.

Key words Young's modulus, Attenuation coefficient

1 引言

扬声器的振动部件材料的杨氏模量 E 和损耗因数 η 同其音响特性有着很密切的关系。它们对扬声器的谐波失真、频响曲线的平坦程度、音色的纯真及清晰度等都有影响^[1]。扬声器振动系统的主要部件是振膜, 最常用的是纸质振膜, 即纸盆。动态弹性模量较之静态弹性模量能更好地反映扬声器工作时纸盆材料的内在特性。因此建立准确、简便、快速的扬声器纸盆材料动态弹性模量的测试方法, 对于指导扬声器的设计研究工作以及在生产中选择新材料、

鉴定新工艺或制订各振动部件的材料标准, 都具有极其重要的意义。

目前已有一些测量纸盆材料动态弹性模量的方法。其中有 Hahnemman-Hecht 的挠曲弹性模量测试法^[2], C.Bordone-Sacerdote 的动磁式复弹性模量测试法^[3], 光电法^[5] 以及一些改进的测试法^[4], 属于共振强迫振动法。荷兰 Philips 公司采用一种扭摆试验机测试, 为自由振动摸索出一套规律, 制定了生产用纸浆的定量标准。至八十年代初, 研制成功非共振强迫振动的新型测量仪器-DDV 动态粘弹性测试仪^[5]。国内对扬声器纸盆材料的杨氏模量和损耗

因数初步确立了以四周固定的园板振动法的测量方法 [6].

但是上述动态弹性模量试验机的使用往往受到一定的限制. 它们中有些是进口设备, 价格昂贵, 维修保养困难复杂. 有些仪器需要自制, 测得的数据一致性较差. 由于目前无法给出扬声器纸盆材料的动态弹性模量全面、定量的标准, 也就无法对设计、研究和实际生产作出有效的指导. 这对我国的扬声器质量提高有很大限制. 所以, 亟需一种比较实用、准确的测量方法.

我们在总结以往测量方法的基础上, 尤其是振动簧片法的基础上, 采用新的实验装置, 得出新的测量方法.

2 理论

对扬声器纸样表面结构的研究表明, 扬声器纸样的纤维在平面上是无规取向的, 这是由纸盆成形时纤维自由沉积的工艺特性所决定的. 因此对于一长条纸样, 我们可以认为它是各向同性的细棒的模型. 根据细棒的振动方程, 由一端钳定, 一端自由的棒的振动模式, 给出扬声器纸盆材料的动态弹性模量 E 和内损耗因子 η 的计算公式如下.

不考虑内损耗, 细棒的振动方程:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial^4 x} = -\frac{\rho}{E\kappa^2} \frac{\partial^2 y}{\partial^2 t} \tag{1}$$

其中, E - 杨氏模量, ρ - 棒的密度, κ - 回转半径, 转动惯量 $I = \kappa^2$.

令 $y = Y e^{i\omega t}$, 则

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = \frac{\rho\omega^2}{EI} y \tag{2}$$

令 $\psi = \left(\frac{\rho\omega^2}{EI}\right)^{\frac{1}{4}} l$, l 为棒的长度, 可以写出方程 (2) 的通解:

$$Y = a \cos h\left(\frac{\psi}{l} x\right) + b \sin h\left(\frac{\psi}{l} x\right) + c \cos\left(\frac{\psi}{l} x\right) + d \sin\left(\frac{\psi}{l} x\right)$$

细棒的边界条件是:

应用声学

$x = 0$ 一端钳定:

$$y = 0$$
$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0$$

$x = l$ 一端自由: 设 s 为棒的横截面积, 则

挠矩: $M = E s \kappa^2 \frac{d^2 Y}{dx^2} = 0$

剪力: $F = -E s \kappa^2 \frac{d^3 Y}{dx^3} = 0$

代入边界条件可得

$$1 + \cos h \psi \cos \psi = 0 \tag{3}$$

用数值方法求解方程 (3), 求出 ψ_n , 再代入下式得出 E ,

$$E = \frac{\rho \omega_n^2 l^4}{\psi_n^4 I}$$

当 $\eta \ll 1$ 时: 定义损耗因子 $\eta = \frac{\Delta f_n}{f_n}$

ω_n - 第 n 阶模式的共振频率
 Δf_n - 第 n 阶模式的 3dB 带宽

如果试片底部附有拾振和激振装置, 应考虑试片自由端有负载的情况. 这时边界条件修改为:

$x = 0$ 一端固定:

$$y = 0$$
$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0$$

$x = l$ 一端自由, 并有负载:

挠矩: $M = J \frac{\partial^3 y}{\partial t^2 \partial x}$

剪力: $S = W \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}\right)$

式中 J - 负载对钳定端的转动惯量, W - 负载的质量. 由文献 [7],

$$M = -IE \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$
$$S = IE \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$$

所以 $x = l$ 的边界条件写为:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = J \frac{\omega^2}{IE} \frac{\partial y}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = -W \frac{\omega^2 y}{IE}$$

令 $y = Y e^{i\omega t}$,
并令

$$A = \frac{W}{\rho l}$$

$$B = \frac{J}{\rho l^3}$$

$$\psi = \left(\frac{\rho \omega^2}{EI} \right)^{\frac{1}{4}} l$$

则在 $x = l$ 处,

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} = \frac{B \psi^4}{l} \frac{\partial Y}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^3 Y}{\partial x^3} = -\frac{A \psi^4}{l^3} Y$$

方程的通解:

$$Y = a \cosh \left(\frac{\psi}{l} x \right) + b \sinh \left(\frac{\psi}{l} x \right)$$

$$+ c \cos \left(\frac{\psi}{l} x \right) + d \sin \left(\frac{\psi}{l} x \right)$$

代入边界条件:

$$AB \psi^4 (1 - \cosh \psi \cos \psi)$$

$$- B \psi^3 (\cosh \psi \sin \psi + \sinh \psi \cos \psi)$$

$$+ A \psi (\sinh \psi \cos \psi - \cosh \psi \sin \psi)$$

$$+ 1 + \cosh \psi \cos \psi = 0$$

求出 ψ 的数值解, 再代入公式得:

$$E = \frac{\rho \omega_n^2 l^4}{\psi_n^4 I}$$

$$\eta = \frac{\Delta f_n}{f_n}$$

3 实验装置及测量方法

实验装置示意图如图 1. 振动装置如图 2 所示: 从扬声器纸盆中剪取一细长条纸片试样, 如图 2 所示, 在钳定装置上装好试片, 使试片满足一端钳定, 一端自由的边界条件, 试片自由端粘有两根极细的导线. 如图 1 所示, 一根导线中通以经过功率放大器的正弦激励信号, 由于通电的导线在磁场中受到力的作用, 试片受力作简谐弯曲振动, 当激励信号的频率与试片弯曲振动的固有频率一致时, 发生共振, 因为在磁场中, 运动的导线产生电动势, 同样位置的另一根导线作检拾振动用, 导线中产生的电动势经过放大器放大, 用动态信号分析仪得出幅度频率曲线. 发生共振时, 拾取的对应该电动势最大, 反映在幅度频率曲线上, 就是此时对应曲线上的共振峰, 这就把振动信号的测量转换为对电量的测量. 由共振峰的中心频率和 3dB 带宽, 根据上述公式求出材料的杨氏模量 E 和内损耗因子 η .

先测出试片的密度 ρ , 厚度 t , 长度 l , 宽度 d . 如果可以近似认为试片的截面为矩形截面, 则 $\kappa = \frac{t}{\sqrt{12}}$. 用正弦信号发生器发变频的正弦波信号, 测得一个幅度频率曲线, 由共振频率 f , 计算出杨氏模量 E . 再由共振峰的 3dB 带宽, 得出 η .

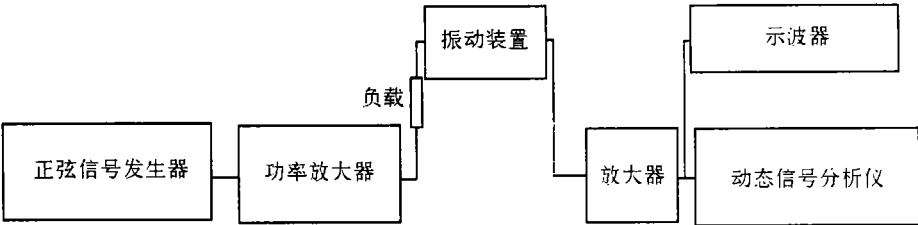


图 1 实验装置示意图

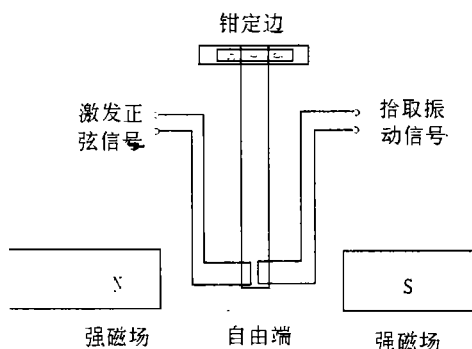


图 2 振动装置示意图

4 实验结果

图 3 给出 40% 广州浆 +60% 佳木斯浆纸盆材料的幅度频率响应曲线。测得

共振峰中心频率 $f=43.35\text{Hz}$, $\Delta f=2.68\text{Hz}$ 。另测得材料的平均厚度 $t=3.64 \times 10^{-4}\text{m}$, 密度为 $\rho=0.515 \times 10^3\text{kg/m}^3$, 试片的长度 $l=4.7 \times 10^{-2}\text{m}$, 宽度 $d=2.2 \times 10^{-3}\text{m}$ 。可算出杨氏模量 $E=1.37 \times 10^9\text{N/m}^2$, 损耗因数 $\eta=0.062$ 。

图 4 是 50% 广州浆 +45% 佳木斯浆 + 5% 羊毛纸盆材料的幅度频率响应曲线。图中共振峰中心频率 $f=34.5\text{Hz}$, $\Delta f=4.42\text{Hz}$ 。试片平均厚度 $t=4.8 \times 10^{-4}\text{m}$, 密度为 $\rho=0.773 \times 10^3\text{kg/m}^3$, 长度 $l=6.0 \times 10^{-2}\text{m}$, 宽度 $d=2.4 \times 10^{-3}\text{m}$ 。得出杨氏模量 $E=1.98 \times 10^9\text{N/m}^2$, 损耗因数为 $\eta=0.128$ 。

根据我们的测试实践, 认为测量中应注意的问题:

(1) 试片的制作是获得有意义结果的关键之一, 因为试片的杨氏模量的计算公式是依据细棒的弯曲振动理论得出的, 所以试片应做的尽可能与细棒的条件接近, 满足长度 $\gg$ 宽度 $\gg$ 厚度, 如果这个条件不能很好满足, 可能会出现许多振动模式, 以至于捡不出我们需要的模式。

(2) 因为高阶模式振动时, 测得的信号比较弱, 易受到噪声干扰, 我们希望仅对基频进行分析, 有明显的共振峰, 所以扫频到几百 Hz, 在这个频率范围内只拾取一至二阶模式, 以便

于分析。实际中, 更高阶模式既难拾取, 由于仪器精度的限制, 也难分析。试片振动也有可能被激发起其他模式, 如扭曲振动, 纵波模式等, 我们适当选取扫频频率在 400Hz 以下, 所以纵波模式不出现在扫频曲线上, 扭曲振动模式表现在扫频曲线为小的杂峰干扰。

(3) 当激励信号过强, 试片会有非线性振动, 为避免出现这种情况, 实验时, 先调整激励信号幅值, 使拾取的信号为不失真的正弦信号, 然后再用扫频仪得出幅频响应曲线。

(4) 钳定装置的好坏影响测试结果。如果试片夹持的不紧, 有可能出现扭曲振动等其它振动模式, 幅频响应曲线上表现为许多杂峰干扰, 甚至可能使共振峰淹没其中, 我们调整钳定装置使边界条件严格实现, 避免了出现此类问题。

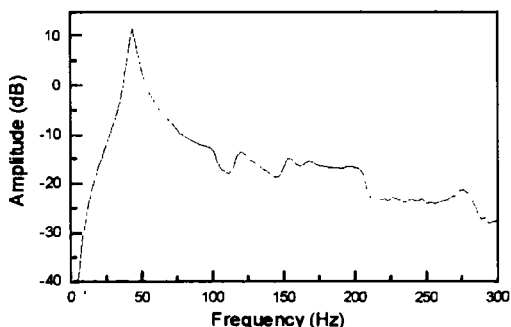


图 3 40% 广州浆 +60% 佳木斯浆纸盆材料幅度频率响应曲线

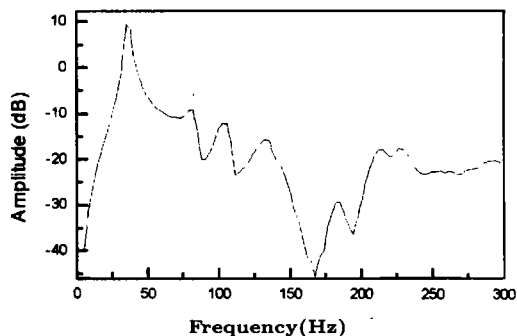


图 4 50% 广州浆 +45% 佳木斯浆 + 5% 羊毛纸盆材料的幅度频率响应曲线

5 结果讨论

两点说明:

(1) 两根导线在纸片上振动, 导线是金属的(极轻、极薄), 本身损耗因素可不考虑, 导线不影响纸片振动, 所以测得的损耗是纸片的损耗。

(2) 因待测纸片的 E 本身是未知的, 为了验证本方法测试结果的准确性, 故对已知 E 的标准试样——磷铜片做同样测试, 数据如下, 已知磷铜片 $E = 10 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, 测得 $E = 11.2 \times 10^{10} \text{N/m}^2$. 可得出结论: 误差范围在 10% 左右. 因此本方法是行之有效的。

本方法的优点:

传统的振动簧片法, 采用复杂的激振装置和拾振装置, 一般在试片的钳定端激振, 自由端拾取信号, 这时激振器和拾振器都对试片本身的自由振动有较大影响. 在钳定边激振, 也使钳定条件难以准确实现。

本方法采用的新颖的激振和拾振装置, 在自由端激振和拾振, 可以严格实现一端钳定, 一端自由的边界条件, 激振、拾振方法简单, 准确, 所用仪器均为常用仪器, 整套实验装置简单, 数据重复性好. 激振和拾振装置对试片本身振动的影响小, 我们也能计及它们的影响, 即考虑试片自由端的负载情况, 结果可靠. 实验得出的幅度频率响应曲线, 共振峰明显, 便于分析计算。

对于测试结果, 我们认为仍然存在着局限:

由于扬声器纸盆振膜制作的工艺问题, 一般纸浆的抄片往往存在 5—10% 的厚度差别, 使振膜一般上薄下厚(测试纸片是沿径向剪取的), 又由于振膜上有网眼. 而我们采用的是均匀棒的模型得出计算公式的, 这就需要修正 E 的计算公式. 如果纸片截面是均匀变化的, 则它的共振频率比相应的均匀纸片高, 如自由端的厚度是钳定端的 $3/4$, 则基频升高 7.7%. 但事实上振膜的 t 并不是均匀变化的, 这对 E 的准确计算会有一定影响。

另外, 由于试片与棒的理想模型不可能没有差异, 所以我们尽可能使试片做的接近细棒, 但是棒是理想模型, 试片不可能绝对等同于棒, 这对 E 的计算公式会有影响。

我们认为本方法可以准确、简便地测量扬声器纸盆材料的动态弹性模量, 并可应用于实际生产中。

参 考 文 献

- 1 曹水轩, 沙家正. 扬声器及其系统. 南京: 江苏科技出版社, 1991. 82—85.
- 2 Merhaut J. 3th I.C.A 会议文集. 1961. 660.
- 3 Bordone-Sacerdote C. 3th I.C.A 会议文集. 1961. 665.
- 4 朱国春. 电声技术, 1979, (2): 33—36.
- 5 I.M. 沃德著, 徐懋等译. 固体高聚物的力学性能, 第二版. 北京: 科学出版社, 1988. 128—148.
- 6 SJ2317-83, 扬声器纸浆弹性模量、损耗因数测量方法(暂行).
- 7 Bland D R., Lee E H. *J.Applied Physics*, 1955, 26(12): 1497—1503.

波兰第七届声光及其应用讲授班暨欧洲声光 AA-O'98 将举办联合会议

时间: 1998 年 5 月 18—22 日

地点: 波兰 Gdansk

论文摘要: 1998 年 3 月 1 日前寄到.

会议费: 550\$US. 包括食宿.

详情请联系

Dr. BOgumil Inde

Secretary of the Organizing Committee of the joint meeting

Institute of Experimental Physics

University of Gdansk

ul. Wita Stwosza 57

80-952 Gdansk

Poland

E-mail: fizbl univ.gda. pl

Fax: (+48)(58)41-31-75

(本刊讯)