

大阻尼结构物理参数的测定

杨继鹤 倪乃琛

(同济大学声学研究所)

阻尼技术在减振降噪方面的应用已在近几十年内得到了飞跃的发展。但迄今为止国际上尚无统一标准方法以确定粘弹性材料及其结构的损耗因子和弹性模量等物理参数。虽然目前已有多种阻尼测量的手段,但其中的大多数仅适用于测量材料的物理参数。而频率响应法和自由衰减法等常用于测量复合结构物理参数的方法均不适用于大阻尼的结构。本文提出一种以悬臂梁为基础,利用微计算机及其接口技术,研究沿悬臂梁自由衰减的前进波,并运用线性近似理论得出复合结构物理参数的方法。实验证明该方法具有一定的精度和可重复性,是一种测量大阻尼结构物理参数的有效手段。它弥补了其它一些方法的不足,使测量阻尼的手段更趋完善。

The Measurements of the Physical Parameters
of High Damping Structures

Yang Jihou Ni Naichen

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai)

Abstract

The application of damping technology in vibration damping and noise reduction has been developed by leaps and bounds in decades. There has not been yet a normal method to determine the physical parameters of viscoelastic materials and their structures, such as loss factor and modulus of elasticity, etc. Although there are many methods to measure the physical parameters, most of them are only applicable for materials. The resonance measurements and time-decay-rate measurements, the ordinary manners for measuring the structure damping, are not suitable for high damping structures. In this paper a new technique is put forward to determine the physical parameters of high damping structures, which is by aid of a microcomputer and its interfaces to search the free decay waves along the cantilever and on the basis of theory of linear approximation to obtain the physical parameters of structures. The sources of various errors are discussed as well. The technique proposed is particularly effective on high damping structures.

一、引言

利用粘弹性材料减振降噪是近几十年中发展起来的新技术。国外从五十年代开始对粘弹性材料进行理论研究,并研制出了多种阻尼材料。由于高分子化学的发展,使阻尼技术在近二十年内获得了令人瞩目的进展。但如何确定粘弹性材料及其结构的损耗因子和弹性模量等物理参数,迄今为止国际上还没有一个统一的标准。目前常用于测量复合结构物理参数的方法有以下两种:

1. 频率响应法

这种方法以棒状试件作为对象,将棒的一端固定,另一端自由悬挂。用一外力使试件作强迫弯曲振动,找出试件的各阶共振频率 f_n 以及对应的3分贝频带宽度 Δf_n ,即可得到各阶共振频率处的结构损耗因子

$$\eta(f_n) = \frac{\Delta f_n}{f_n} \quad (1)$$

这一方法的特点是装置简单,测量方便。但它的重复性较差,而且不适用于损耗因子较小或较大的结构。当损耗因子较小时,共振峰很窄, Δf_n 很小,测量误差较大。而当损耗因子较大时, Δf_n 较宽以至各阶共振频率的3分贝带宽相互重叠无法测得 Δf_n 。此方法只能测量有限几个共振频率点的损耗因子值。

2. 自由衰减法

该方法与频率响应法基本相同,也是用一外力使棒状试件作强迫弯曲振动,找出各阶共振频率 f_n 后突然移去外力,则试件的振幅将按指数规律衰减。用一对数记录器记下它的衰减曲线便可得到它的混向时间 T_{60} ,从而结构的损耗因子为

$$\eta(f_n) = \frac{2.2}{T_{60} \times f_n} \quad (2)$$

这一方法尤其适用于小阻尼结构。当结构阻尼较大时自由衰减曲线变陡, T_{60} 测量误差增大。对于阻尼很大的结构由于仪器瞬态响应的限制而无法测出 T_{60} 。这种方法的测量频率也局限于几个共振频率点。

随着阻尼技术的不断发展,愈来愈多的大阻尼粘弹性材料不断地出现,使得现有的测量手段已不能满足新的需求,尽管各国的学者都在不断地探索和改进阻尼测量的方法,但至今尚无一个测量大阻尼结构物理参数的有效方法。本文提出一种以悬臂梁为基础,利用微计算机及其接口技术,测量复合结构损耗因子等物理参数的方法。该方法主要适用于大阻尼结构,从而弥补了前述一些方法的不足,使阻尼测量的手段更加完善。

二、原理

1. 由振动方程得出损耗因子的表达式

通常情况下粘弹性材料主要用于对壁板的阻尼处理,抑制其振动降低声辐射。而棒是板的一种特例,对它的研究可以掌握阻尼效应的主要特征,并可在一定程度上反映板的特性。此外棒的分析在理论上比板要简单得多。

为便于理论分析,对棒状试件作以下假设:

1. 沿试件的长度方向棒的横截面均匀不变,即试件为柱形棒。

2. 试件的长度 l 、宽度 b 及厚度 d 分别满足不等式 $l \gg b \gg d$ 。

3. 试件的弯曲振动振幅较相应方向的厚度要小得多。

4. 沿试件传播的弯曲波波长比试件的宽度大得多。这样便可以将试件作为细棒来处理。

由细棒弯曲振动的理论可知它的运动方程为

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{m}{B} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

式中: y 为棒上各点的振幅, 它是棒上各点位置 x 及时间 t 的函数; B 是棒的复弯曲刚度 $\bar{B} = B(1 + j\eta)$, B 是它的实部, η 是结构损耗因子; m 为棒的单位长度的质量。

假设棒的边界条件为一端受外力作用, 另一端为无限长, 及 $\eta < 1$, 可得(3)式的解为

$$y(x, t) = y_0 e^{-1/4\eta kx} \cdot e^{j(\omega t - Kx)} \quad (4)$$

弯曲波的波速为

$$C = \sqrt{\omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \quad (5)$$

又由(4)式可得任一时刻棒上沿振动传播方向两个相距为一个波长 λ 的质点, 它们的振幅比为

$$R = e^{-\frac{\pi}{2}\eta}$$

从而沿棒上振动传播方向单位长度振的衰减的分贝数为

$$D = \frac{13.64 \times \eta}{\lambda}$$

所以有

$$\eta = \frac{D \times \lambda}{13.64} = \frac{D \times C}{13.64 \times f} \quad \dots\dots (6)$$

将(5)式代入得

$$\eta = \frac{2\pi D}{13.64 \sqrt{\omega}} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \quad \dots\dots (7)$$

(7)式就是利用前进波原理测量复合结构损耗因子的基本依据。式中 B/m 可当作一个不随频率变化的常量。由(5)式得只要在某一特定频率 f_0 时测出弯曲波的传播速度 C 就可求得 B/m 值。因而只需测出在不同频率时振幅沿试件单位长度衰减的分贝数 D , 即可由(7)式得出相应的损耗因子。2—2波速与单位长度衰减量的测量

(7)式中 B/m 是一个重要的参量, 它的精度将直接影响最终测量结果, 因此波速测量的精确性也就变得至关重要。利用通常的振

动测量仪器来测定弯曲波的波速是困难的, 若借助于微计算机及其A/D转换技术则是切实可行的, 而且具有比较高的精度和准确性。

假设沿试件上振动传播方向设置二个测点, 如图1所示。选定 f_0 作为测波速的特定频率。当弯曲振动沿试件向下传播时, 由计

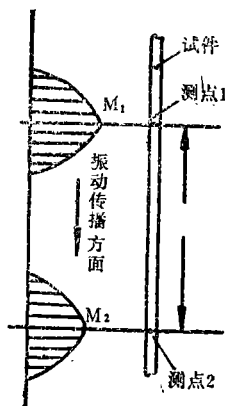


图1 测点的设置

算机通过A/D转换接口对测点1和测点2的振幅进行同时采样, 并将采样值放入计算机内存。经足够长的时间采样后, 由计算机对采样值进行处理。先找出测点1拾到的第一个峰值 M_1 , 以及从开始采样至采到第一个峰值 M_1 所需的采样数 N_1 。再找出第二个测点的采样值中对应于峰值 M_1 的峰值 M_2 , 以及相应的采样数 N_2 。若两个测点之间的距离为 L , 采样间隔为 t , 则波峰 M_1 由测点1传播到测点2的速度为

$$C = \frac{L}{(N_2 - N_1)t} \quad (8)$$

影响波速测量的准确性的主要因素是当弯曲波沿试件向下传播时, 在某一时刻 t_1 测点1拾到第一个峰值 M_1 时, 测点1与测点2之间还存在其它峰值如图2所示。这样测点2所拾到的第一个峰值就不是与 M_1 所对应的波峰值, 而是波峰 M' , 这将使测量值产生很大偏差。为避免这种偏差, 回顾波速表达式(5)式

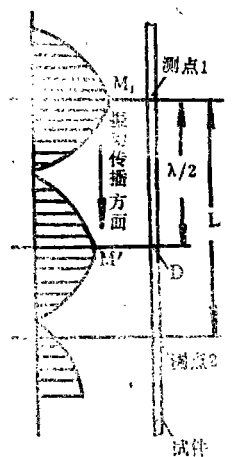


图2 测量误差的分析

$$C = \sqrt{\frac{B}{m}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\omega}}$$

频率选定后,弯曲波的波速将取决于试件的弯曲刚度与单位长度的质量之比。一般来说,试件的长、宽、高一经确定, B/m 数值范围是可以确定的,这样就可以估算出波速的大致范围。所以只要适当地选择两测点间的距离 L 和频率 f_0 , 使得波峰 M' 以最快的速度由测点1传播到测点2所需要的时间 T 大于 M' 以最慢的速度由 D 点传播到测点2的时间 T' 。测量时只要剔除 $T \leq T'$, 即 $(N_2 -$

$N_1)t \leq T'$ 之值,就能保证波速测量的可靠性

(7) 式中另一个需要测定的量是 D 。这只要对两个测点的振幅进行分别采样,找出各自的极大值 A_1 和 A_2 , 则有

$$D = \frac{20}{L} (\log A_1 - \log A_2) \quad (9)$$

利用计算机工作速度快的特点,可对测点的振幅进行多次重复采样再取平均。这不仅有利于排除环境振动对测量系统的偶然性干扰,还能保证测量的可重复性和准确性。

三、实 验

1. 试件及实验装置

试件选用长宽高为 $130 \times 3 \times 0.2 \text{ cm}$ 的不锈钢条作为基板,将阻尼材料粘贴在基板上构成棒状试件,并认为它满足细棒假设(1)。

实验装置如图3所示。装置的底座是一块厚铁板,并将它置于橡胶垫块上,以降低系统的固有频率,抑制外界振动对系统的影响。试件的上端刚性固定,下端粘贴上劈状高阻尼材料并置入稀浆糊液中,以吸收振动,抑制末端反射。在试件上端用一电磁激励器使试件作强迫弯曲振动,振动由上向下

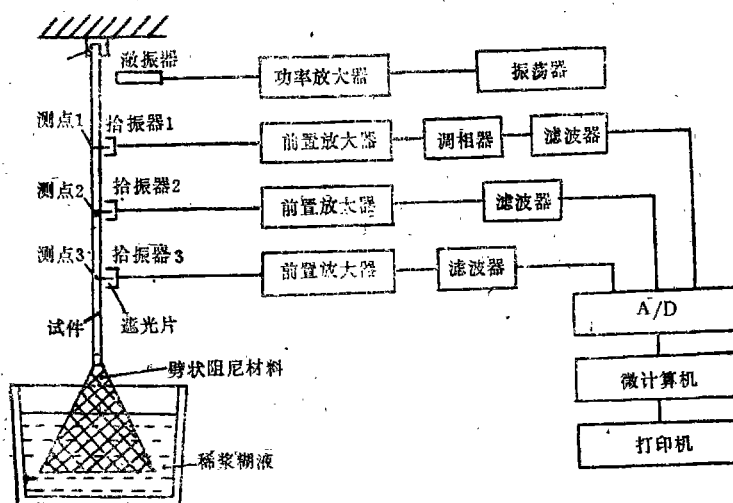


图3 实验装置方块图

传播。只要能有效地抑制末端反射就可以认为试件的边界条件为一端受外力激振，另一端为无限长。这就与理论假设相符合。

沿试件设置三只拾振器。由以上的分析可知，要测定波速和衰减量需要两只拾振器。由以上的分析可知，要测定波速和衰减量需要两只拾振器，这里设置第三只拾振器目的是为了判别末端反射的情况。回顾波动方程的解

$$y(x, t) = y_0 e^{-\frac{1}{2} \eta k x} \cdot e^{j(\omega t - kx)}$$

如果没有末端反射，则试件上各点的振幅随距离 x 按指数规律衰减，所以试件上任意两点之间的单位长度衰减分贝数就应该是相等的。由于试件振动的能量主要由结构本身的阻尼及粘贴在末端的劈状高阻尼材料来耗散，而对于结构阻尼比较小的试件就有可能产生末端反射而在试件上形成驻波，影响测量的精度。设置第三只拾振器的目的就是判别末端反射的情况，只要测出其中任意两对之间的单位长度衰减分贝数 D_1 、 D_2 ，由以上分析可知在没有末端反射的情况下两者应是相等的。这样就可以根据 D_1 和 D_2 的差异来判别末端反射的程度，以便确定测量结果的可信度。

测量时为了满足细棒假设(3)就必须尽量减小试件的振动，这就对拾振器提出了更高的要求，既要能准确地拾取微小的振动，又不能影响测点的振动状态，还要求三只拾振器具有相同的频率响应特性和灵敏度。实验证明，通常测量振动的拾振器——电磁式速度传感器和压电加速度计都不能满足这一要求。这两种拾振器不仅会对测点的振动状态产生一定的影响，还会相互产生影响。此外也很难保证三只拾振器具有相同的灵敏度。

考虑到实验时只需测出振幅的相对衰减量，而不必知道它的绝对量，所以光断续器是一种比较理想的拾振器。它由一只红外发光

二极管和一只硅光敏三极管构成耦合对。其工作原理如图4所示。通电后发光二极管发

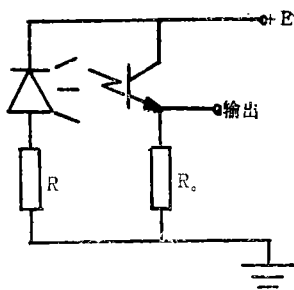


图4 光断续器工作原理

射红外光，并被硅光敏三极管所接收，后者产生光电流在电阻 R_e 上就有电压输出。如果在发光二极管与和光敏三极管之间插入一片遮光片，就可以控制光通量的大小，从而控制输出电压。用它作为拾振器只需在测点处粘贴上一片很薄的遮光片，就可以准确地拾振。它对测点的振动几乎不产生任何影响。它的频响范围较宽（经测定为 $5\text{Hz} \sim 10\text{KHz}$ ），灵敏度便于调整（只要改变电阻 R_e 值就可改变它的灵敏度），这就能使得三只拾振器具有比较好的一致性。

拾振器的输出信号经放大、滤波和整形，送至A/D转换器由计算机对数据进行处理，并将最终结果通过打印机输出（见图3）。图中第一通道中的调相器是为提高波速测量精度而设置的。前面曾经叙述了波速的测量是通过对两测点的信号进行同时采样，并找出峰值的位置。这就要求两个通道的信号处理电路具有相同的相位特性，利用调相器就能达到这一要求。

2. 试验误差分析

测量误差的来源可分为两类。第一类是由理论近似引入的误差。在推导(5)式时曾假设 $\eta < 1$ ，所以有

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \sqrt{\omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{m}} (1 + \frac{1}{4} j \eta + \frac{5}{32} \eta^2 + \dots) \\ &= \sqrt{\omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{m}} (1 + \frac{1}{4} j \eta) \quad (10) \end{aligned}$$

由于本方法主要用于大阻尼结构的测量, η 值一般不会远小于1, 忽略了二次项引起的误差是比较可观的。因此须对测量结果进行修正。

假设由实验测得结构损耗因子为 η_m , 代入(10)式并取波速的实部为

$$C = \sqrt{\omega} \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \left(1 + \frac{5}{32} \eta_m^2\right)$$

代入(6)式即得修正后的损耗因子

$$\eta = \frac{2\pi D}{13.64\sqrt{\omega}} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \left(1 + \frac{5}{32} \eta_m^2\right) \quad (11)$$

第二类是实验误差。它又可分为两部分, 即测量系统误差和末端反射误差。经测定, 在10Hz至500Hz的频率范围内, 三只光断续器的灵敏度误差为不大于2.5%, 三

$$\varepsilon_{\Delta} = \sqrt{\left(\frac{2\Delta}{2D_1} \cdot \frac{D_1}{\Delta} \cdot 3.9\%\right)^2 + \left(\frac{2\Delta}{2D_2} \cdot \frac{D_2}{\Delta} \cdot 3.9\%\right)^2} = 5.5\%$$

因而当 $\varepsilon_{\Delta} < 5.5\%$, 可以为末端反射的影响较小而予忽略。

3. 实验数据及结果分析

为了对本文提出的方法进行可行性检

个通道的相对偏差小于1.5%, A/D转换器的精度为0.4%。其它一些误差相对以上三项均可忽略。根据误差的均匀分布合成法则可得总的系统误差为

$$\varepsilon = \frac{2.3}{\sqrt{3}} (2.5^2 + 1.5^2 + 0.4^2)^{\frac{1}{2}} \% = 3.9\%$$

由于末端反射误差是随机的, 无法确定其具体数值, 只能用前面描述的方法来判断其影响的程度。假设 D_1 、 D_2 分别为任意两对测点间测得的单位长度衰减分贝数, 用

$$\Delta = \frac{D_1 - D_2}{D_1} = 1 - \frac{D_2}{D_1}$$

来判别两点间的偏差因为 D_1 、 D_2 的测量误差均小于3.9%, 所以 Δ 的相对误差为

验, 选用了几种不同类型的试件, 对它们的物理参数进行测定。

1号试件为在基板上均匀粘贴ZN05型兰色阻尼材料, 并用0.3mm厚的铝箔作为约束层。测量结果见表1。

表1

$$\sqrt[4]{B/M} = 176.4 (\text{C.G.S})$$

f(Hz)	500	400	300	200	100	70	40
D_1 (dB/CM)	0.270	0.277	0.207	0.197	0.148	0.121	0.730
D_2 (dB/CM)	0.262	0.266	0.216	0.211	0.152	0.121	0.106
$\varepsilon_{\Delta}(\%)$	3	4	4.3	-7.1	-2.7	0	86
η	0.387	0.438	0.389	0.465	0.516	0.476	—

实验结果表明, 当 $f \geq 70\text{Hz}$ 基本满足 $|\varepsilon_{\Delta}| < 5.5\%$, 因而实验数据是可信的。只有在200Hz处不满足这一条件, 这是由外界偶然性干扰引起的。这种干扰主要有两种, 外界振动对系统的影响和环境光强变化引起光敏三极管光通量的变化。当这些干扰的频率与测试频率相近时, 将对测量产生一定程

度的影响。从表1中还可以看出当 $f \leq 40\text{Hz}$ $|\varepsilon_{\Delta}| > 5.5\%$, 测量结果应于屏弃。

2号试件是一种波纹状的夹芯结构, 见图5。它用橡胶型阻尼材料ZN22制成波纹状作为阻尼层粘贴在基板上, 用0.3mm厚的铝箔作为约束层构成复合结构。其测量结果见表2。

表2

$$\sqrt{B/M} = 294.4 (\text{C.G.S})$$

f(Hz)	500	400	300	200	100	70	40
D ₁ (dB/CM)	0.262	0.259	0.219	0.219	0.152	0.203	0.207
D ₂ (dB/CM)	0.281	0.225	0.238	0.184	0.180	0.145	0.149
$\varepsilon\Delta(\%)$	7.2	13	7.8	16	18	28	28
η	0.578	0.536	0.633	0.625	0.828	0.821	1.070

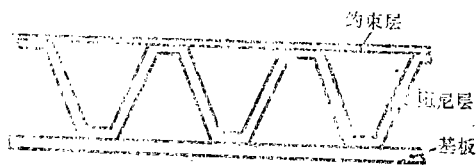


图5 波纹夹层结构

从实验结果看尽管 $\varepsilon\Delta$ 均超出允许范围，但实验结果仍有参考价值。因为这种试件并

非均匀结构，在波纹夹层与基板、约束层的粘胶处必然存在一定程度的波反射现象，因而在这类试件上不可能得到比较近似的前进波。从D₁、D₂及 η 的变化范围及趋势来看，起伏不是很大，具有一定的规律。所以实验结果有一定的可信度，只是误差稍大些。

3号试件是用发泡塑料作阻尼，以ZN05型阻尼橡胶作约束层，将它们贴到基板上构成的复合结构。其测量结果见表3。

表3

$$\sqrt{B/M} = 171.4 (\text{C.G.S})$$

f(Hz)	500	400	300	200	100	70	40
D ₁ (dB/CM)	0.164	0.069	0.687	0.051	0.113	0.003	0.020
D ₂ (dB/CM)	0.156	0.074	0.336	0.152	0.105	0.027	0.133
$\varepsilon\Delta(\%)$	4.9	-7.2	51	66	7.1	800	565
η	0.227	0.117	—	—	—	—	—

实验结果表明，由于试件本身的损耗因子较小，末端反射比较严重。400Hz以上的测量结果有一定的参考价值。在低于300Hz的频率段，由于D₁、D₂偏差较大， $\varepsilon\Delta$ 起伏也很大，实验结果无意义。

四、结 论

从以上三种试件的测量结果分析可以得出下列结论：

对均匀试件，只要它的单位长度衰减量足够大，就可以得到相当近似的前进波，从

而获得比较满意的测量结果，如1号试件。当结构的单位长度衰减量较小时，由于末端反射严重，无法得到有效的结果，如3号试件。

对于非均匀试件，尽可以均超出允许范围，但只要 $\varepsilon\Delta$ 和 η 值起伏不大，且有一定的变化规律，则测量结果还是具有一定的参考价值，如2号试件。

该方法的测量频率不受试件共振频率限制。可在10Hz至500Hz的频率范围内的任意频率点上测定结构的物理参数。它的最大

特点是可在共振法和自由衰减法等常用测量方法不适用的条件下,测定大阻尼结构的物理参量,从而弥补了其它方法的不足。

由于采用光断续器作为拾振器,有效地克服了拾振器引入的误差,提高了测量精度。用微计算机作为智能终端,不仅能准确地测量波速,而且还可以避免人为的误差,提高了测量的可重复性。

参考文献

- [1] A. Schlagel, "Measurements of Modulus of Elasticity and Loss Factor for Solid Materials", B.K.
- [2] H. Oberst, "Über Dämpfung der Bieg Eschwingungen Dunner Bleche Durch Fest Haf teend Belage.", Acustica, No. 4, 1952.
- [3] Ahip D. "Nashif, Vibration Damping" 1985.
- [4] J. T. Broch, "Mechanical Vibration and shock Measurements", 1984.
- [5] "噪声和电声测量", 同济大学声学研究所, 1984.
- [6] 倪乃琛 "噪声与振动控制中的粘弹性阻尼", 1984.
- [7] 赵松龄 "噪声的降低和隔离", 1985.
- [8] 周明德 "微计算机硬件、软件及其应用", 1984.
- [9] 袁忠长 "微计算机的接口及控制系统", 1983.
- [10] 肖明辉 "实验误差估计与数据处理", 1980.
- [11] F. H. Chu "Experimental Determination on of Damping in Materials and structures AMD V01. 38, 1980
- [12] Morse "Sound and Vibration", 1948.
- [5] Z. Dao, A tentative study of the fuzzy feature of the sound quality perception. 84th AES Convention (March 1-4, 1988) Paris, 2640 (L-4).
- [6] L. Cremer et al; Principles and Applications of Room Acoustics. (德文原版1987年, 英译本1982年)
- [7] J. Q. Wang and L. Zhao, An experimental study of acoustic ratio and speech intelligibility 12th ICA (July 25-31, 1986) Toronto E10-4
- [8] T. Houtgast et al, A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. JASA 77 (3) (1985) 1069-1077.
- [9] 王季卿: 国外音乐厅声学设计中的一些新设想, 声学学报 1981年2期123-125页
- [10] 王炳麟: 日本的厅堂音质研究近况, 声学进展, 1984年2期9-15页, 4期13-21页。
- [11] 戴根华: 厅堂音质的主观评价和最佳设计参数, 声学技术1988年2期. 7-43页,
- [12] A. H. Marshall, Book Review of "Concert Hall Acoustics" by Y. Ando. JASA 79 (2) (1966) 582-583; JASA 82 (1) (1987) 402-430.
- [13] D. A. Paoletti et al, The acoustical design of the Orange County Performing Arts Center Theater. 11th ICA (1983) Paris, 71-74.
- [14] D. A. Paoletti et al, The use of large models and computers in determining the acoustical environment for performing arts facilities. Proc. Research and Design '85. AIA Conference, Los Angeles (1985).
- [15] 彭杰, 室内声场的数字模拟—历史、现状和发展, 电声技术 1987年6期2631页。

(上接第21页)