

缩尺模型混响测量中的几个问题

康 健

(清华大学建筑系)

用缩尺模型来研究厅堂影响已有五十多年历史。大量对比实验表明了这种方法的可用性。但此方法尚须向更快速、简捷、准确发展，本文即试图做一些方法上的探讨。

一、缩尺模型混响测量之计算机法

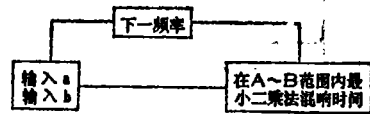
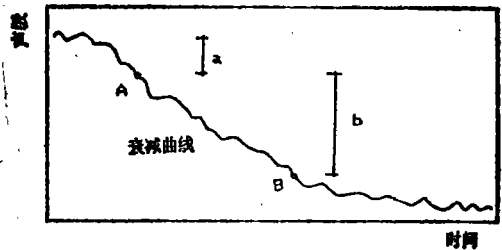
测点数目较多时，手工量测衰变曲线求混响时间的方法工作量很大。为提高混响测量的速度和精度，人们发展了相位重合法、脉冲积分法、计算机法三种新方法。

与以上方法相应的一些常规仪器有一共同特点即发声系统与接收处理系统须统一控制。由于模型混响时间一般低于这些仪器的测量低限，故须将混响过程录下后慢速重放再行处理。而变速后的磁带信号与接收处理系统很难统一控制。因此上述仪器对模型混响时间的测量不尽适用。

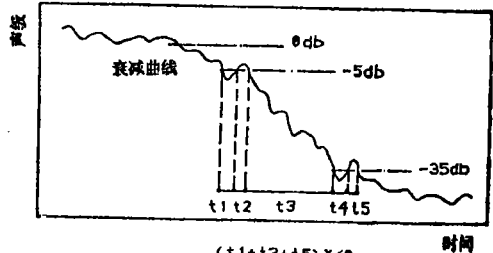
鉴于此，有必要寻求一种用于缩尺模型的快速混响测量方法。

考虑到计算机法迅速、简便的特点，我们尝试用实时分析仪联微机来自动测量模型混响时间，即用实时分析仪将录音机慢速重放的混响过程转换为数字信号后用计算机进行处理。图1是两种计算机法测混响时间的原理图。其中a的缺点是须分频输入起始点进行计算，因而测量速度较慢；b的缺点是不能给出衰变线性程度信息。

因此我们从另一途径来编制程序。方法的基本思想是：先计算稳态声级，尔后分别计算稳态声级以下5~15dB、15~25dB、25~35dB三段各自的衰变时间 T_1 、 T_2 、 T_3 ，据此了解衰变曲线的线性程度并计算混响时



a. 2131 数字频率分析仪取计算机



$$\text{混响时间} = \frac{(t_1 + t_3 + t_5) \times 60}{30} \text{ (s)}$$

b. 4418 建筑声学分析仪

图1 计算机法测混响时间原理图示意

间。依此思路编制的程序框图如图2。

由于衰变曲线的起伏性，从稳态声级开

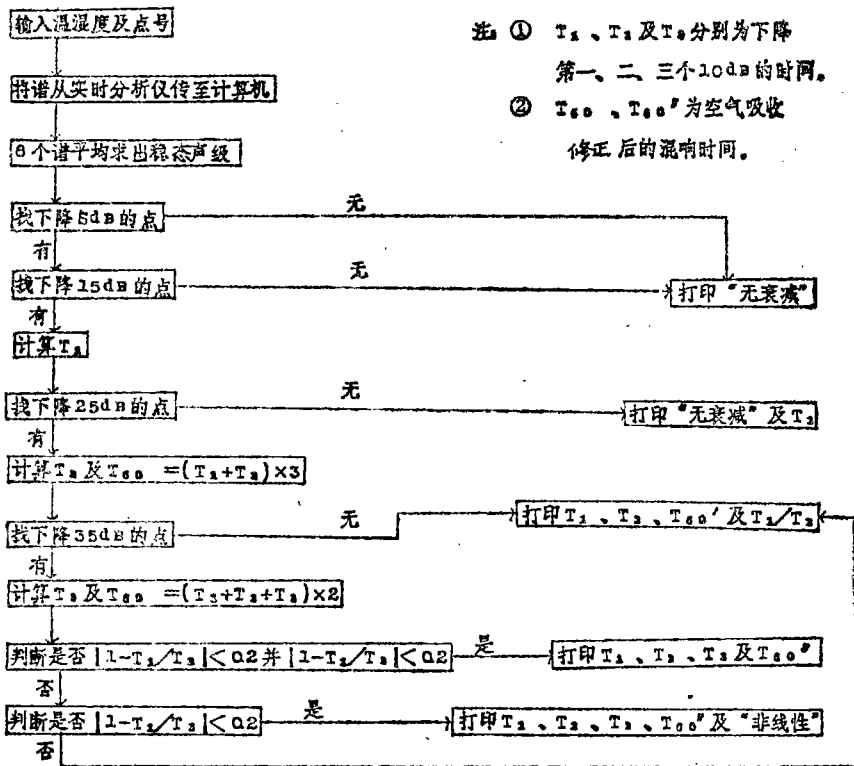


图2 用计算机自动测量模型混响时间程序框图

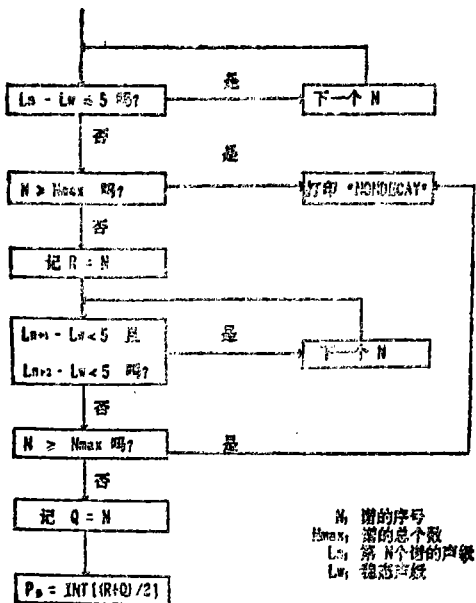


图3 程序中对谱波动性的处理方法(以求稳态声级下降 5dB 的谱 P_5 为例)

始下降 5dB、15dB、25dB、35dB 的点不是唯一的。程序中对此的处理方法如图 3 所示。

计算机最后可给出以下信息：空气的吸收修正前后的混响时间；衰变曲线的线性程度； T_1 、 T_2 、 T_3 值。若需要，还可绘出衰变曲线供详细研究。

为验证本方法的准确性，在一典型音乐厅的 1:10 模型(图 4)内用本法和记录仪法作了对比测量。结果表明，二种方法测值之平均相对差异为 2%，最大不超过 10%，符合精度要求。图 5 是仪器框图。

对实尺房间的对比测量表明此方法亦可用于实尺测量。

实际表明，上述方法可比记录仪法提高速度约 15 倍。

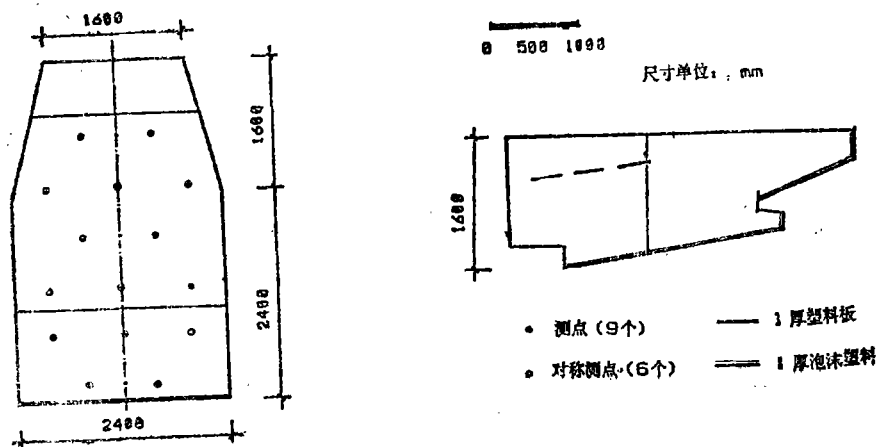


图4 典型音乐厅的1:10模型

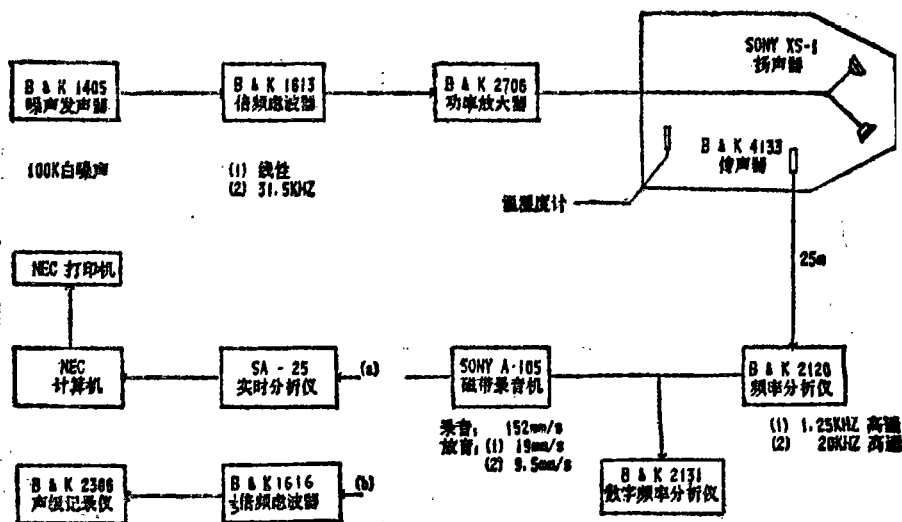


图5 用计算机法及记录仪法测模型混响时间的仪器框图

二、关于模型中空气过量吸收的计算修正

空气对声能的吸收系数 m 随频率增加而增加。因此缩尺模型与原型相比，存在着空气过量吸收的问题。

将模型内空气湿度降至3~4%，或在模型中充氮气可解决这一问题。但这二种方法均需较复杂的设备，造价较高。比较简便的办法是计算修正法。

根据艾润公式易导出：

$$T_a = \frac{0.161}{\frac{0.161}{n \cdot T_m} - \frac{4}{n} m_{nf} - 4m_f} \quad (1)$$

式中： T_m 为修正前的模型混响时间， T_a 为修正后的实尺混响时间， m_{nf} 、 m_f 分别是频率 nf 、 f 上的 m 值， n 是模型比例。

可见，若已知 m_{nf} 及 m_f ，则可用计算的方法对模型内的空气过量吸收加以修正。修

正的精度依赖于 m_{af} 、 m_i 的准确度。

目前尚无一套公认的 m 值。1975年Sutherland在总结前人研究成果的基础上提

出的一套计算方法^[2]被认为是目前最好的 m 值算法。但他的数据与其它学者发表的一些数据尚存差异(表1)。

表1 用Sutherland的方法计算出的 m 值与其它学者给出的 m 值之相对差异(%)^[2]

研究者	年代	频率	温度(℃)	湿度(%)	相对差异
Sivian	1947	15K	26.5	36.6	14
		20K			38
		30K			43
		43K			-9
Penn.state Univ.	1950	44K	20	36.9	42
				73.7	36
Evans & Bazley	1956	12.5K	20	26	4
				52	3
				78	2
Pohlman	1959	50K	20	38	-18
				48	-15
				60	2
				80	11
Harris	1963	12.5K	20	20	-3
				40	-18
				70	-17
Evans & Sutherland	1970	12.5K	22.2	30	-28
				40	-27
				65.5	-19
				80.5	-13

鉴于此,有必要定量了解 m 的误差引起的混响时间误差值。图6是依式(1)用计算机计算的当 m 有10%及20%误差时不同室内平均吸声系数下混响时间的相对误差,计算对象仍是图1所示的厅堂。由图6知,若 m 值有10%的误差,则40KHZ以下混响时间的误差皆小于10%,符合精度要求;若 m 有20%的误差,则在20KHZ以上修正后的混响时间误差较大,仅可供参考。

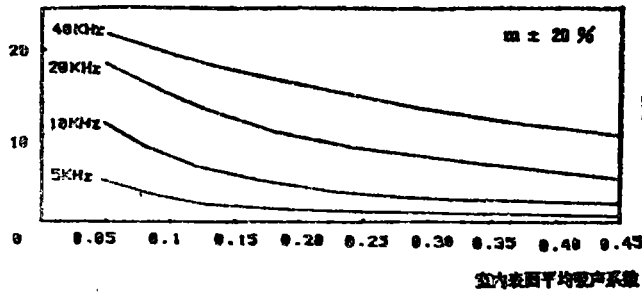
鉴于表1中Sutherland的值与其它学者的值相差一般为10~20%,为保险起见,建议对20KHZ以上的混响时间修正值不应十分信赖。

根据Sutherland的方法,我们编制了一个空气吸收修正程序作为计算机法测模型混响程序,应用时,只要键入测量时的温度和相对湿度,计算机即可打印出修正后的混响时间。

三、缩尺模型混响测量中数目的确定

1、问题的提出

混响时间的相对误差 (%)



混响时间的相对误差 (%)

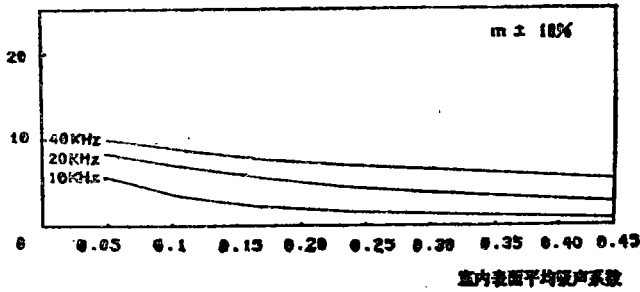


图6 m 有误差时混响时间相对误差

人们常用缩尺来研究厅堂的平均混响时间及混响时间在各点的分布情况，可是取多少测点才能可靠地表征厅堂内混响时间分布这一问题一直未见到严格的论证。

不少测试均表明一般厅堂内各点的混响时间服从正态分布。在此前提下上述问题的数学提法是：

已知 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ， μ, σ^2 未知， μ, σ 分别是均值和方差，

给定 $\alpha (0 < \alpha < 1)$ 及 $L, d (L > 0, d > 0)$ 要求找到抽样数目 n

$$\text{使: } P(\bar{\mu} \in (l_1, l_2)) \geq 1 - \alpha \quad (2)$$

$$P(\bar{\sigma}^2 \in (d_1, d_2)) \geq 1 - \alpha \quad (3)$$

这里： $\bar{\mu}, \bar{\sigma}$ 分别是 μ, σ 的估计，

$$\text{而 } l_1 = \mu - L/2 \quad l_2 = \mu + L/2$$

$$d_1 = \sigma^2 - d/2 \quad d_2 = \sigma^2 + d/2$$

已经有人从理论上证明了用固本样本数的一次抽样无法达到上述要求，实际工作中

人们常用下述方法解决此问题：给出 μ 或 σ^2 的经验值使上述问题转换为可用一次抽样法解决的下述问题：

已知 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ， μ 或 σ^2 已知

求 σ^2 或 σ 的区间估计，使其达到指定精度。

这样做理论上不严格，从而可能导致错误；另外，为安全起见，一般抽样数目都选得偏大，结果降低了方法效率。

解决这一问题较好的方法是40年代发展起来的序贯抽样法。其中Stein的两阶段抽样法较为简便，对于缩尺模型混响测量比较适用。

2、Stein的两阶段抽样法

1945年，Stein从理论上证明了如下结论：^[3]指定自然数 n_0 ，抽iid样本 X_1, X_2, \dots, X_{n_0} ，

则总抽样个数取

$$n_1 = s^2/c + 1$$

即可证明(2)

式中: S^2 为样本 X_1, X_2, \dots, X_{n_0} 的方差

$$C = L^2/[4(t_{n_0-1}^2(\alpha/2))]]$$

在此之后,有人将Stein的方法用于 σ^2 的有界长区间估计^{[4]~[6]},证明了如下定理:

取 $n_0 \geq 2$, 抽出 iid 样本 X_1, X_2, \dots, X_{n_0} .

$$\text{则取 } n_2 = 2 + \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{2}{n_0-1}} - 1 \right]^2 \cdot$$

$$\frac{1}{d^2} S^4 (n_0 - 1)^2 \quad (5)$$

即可保证(3)

综(4)、(5)知取 $n = \max \{n_1, n_2\}$ 即可同时保证(2)、(3), 这样前述问题圆满解决。

3、初始样本的选定

表2 n与A, B的关系

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A	1134	287	151	105	83	71	62	57	53	50	47
B	74	41	31	26	24	22	21	20	20	19	19

4、Stein方法应用举例

如果第一阶段抽样后整理数据及计算n值所需时间较长,而这段时期内模型条件有所变化,则两阶段抽样法稍显麻烦。

我们在研究浮云吊厅堂的混响时间分布时应用了下述方法:先在模型内打方格划定30个测点,然后随机抽取其中9点,就某种浮云吊顶测量混响时间,据此结果依(4)、(5)算出 $n = 12$ 。取n比12略大为15,对某种浮云吊顶依次进行测量,每测一种,则取其中9个测点作为n。计算n,若 $n \leq 15$ 则以已有的15个点来计算这种情况下的混响时间分布;若 $n > 15$ 则增加测点至n进行测量计算。实测发现n一般皆小于15,因而上述方法实际上

依前述知,初始样本点可以任意选定。但n不同会导致n的不同。因此应选择最优的n₀使n₀与n都尽量小,此时方法的效率最高。目前这方面尚无成熟理论,一般都用试算法。

(4)、(5)中令

$$A = 4 \left[t_{n_0-1} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right]^2 + 1 \quad (6)$$

$$B = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{2}{n_0-1}} - 1 \right]^2 \cdot (n_0 - 1)^2 \quad (7)$$

这样(4)、(5)中仅A、B与n₀有关。

令 $\alpha = 0.05$, 由(6)、(7)式计算可得表2。由表2知,当n₀由3开始逐渐增加时, A、B值下降很快;到n₀ = 9~11时,下降速度明显减慢,此时再增加n₀, n不会有大幅度下降。据此,再结合一些实测及试算的结果,建议在模型混响时间的测量中取n₀ = 9~11。

是在严格的两阶段理论保证下的一次抽样。这样做可避免前面提到的两阶段抽样法的某些不足。当然,这种方法仅是一种带有经验性质的试算法。

若联机测量且计算速度很快,则应该用两阶段抽样法,这样方法的效率更高。

Stein的方法亦可用于实尺测量,原理同上。

本文在车世光教授指导下完成。叶恒健、王炳麟、秦佑国、刘志超等先生对本文给予了许多帮助。另外,本文第三部分得到北京大学概率统计系陈家鼎教授的指点。在此一并致谢。

(下转第11页)

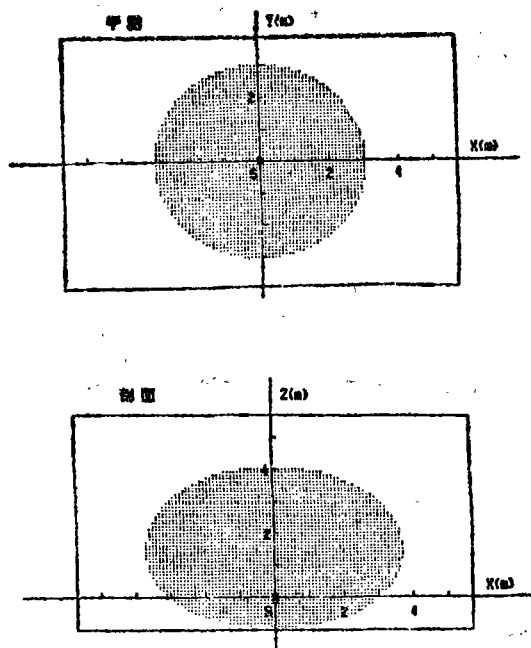


图8 室中心坐标(2.35,0,0), $\alpha_1 = 0.99$, (四壁)
 $\alpha_2 = 0.67$ 上下底), $\Delta L \leq 1\text{dB}$ 的范围。

场的一些认识和作法有改进的必要, 对此, 我们将在另一篇专文中予以讨论。

上接第 6 页

参 考 文 献

- [1] B & K 4418, B & K 2131 说明书。
- [2] L.C.Sutherland, Review of Experimental Date in Support of a proposed New Method for Computing Atmospheric Absorption Losses. 1975.(研究报告)。
- [3] Stein. C. Ann. Math. Stat 16 [1945]. 243—258.
- [4] Graybill. F. A and Connell. T. L, Ann. Math. Stat. 35 [1964] 438—440
- [5] Seelbinder. B. M, Ann. Math. Stat. 24 [1953]. 640—649.
- [6] Moshman. J, Ann. Math. Stat. 29[1958]. 1271—1275.

五、结束语

对于仅用于测试宽频带声的消声室, 可根据式(5)较精确地计算其自由声场范围。设计此类消声室时, 可按照用户要求, 运用(5)式的计算来选定消声室的体型、尺寸和吸声材料。用微机进行计算和绘图, 可以很快地对各种情况进行分析、比较。

对于宽频带声, 也有截止频率, 因为吸声系数与频率有关, 若采用平面吸声材料, 则不仅有低限截止频率, 还会有高限截止频率。

本文得到南京大学孙广荣教授的审阅, 并提出宝贵意见, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 蔡彪、王季卿, 消声室内纯音的自由声场偏差的计算 第五届全国建筑物理学术会议论文, 1986年11月17—20日于上海。或见《声学技术》1987年第2期。
- [2] 孙广荣, 《电声技术》1980年2期P63—65

上接第14页

- [10] 金树武、SGS—1型医用超声功率计研制、中国医学超声联合会全国学术交流会文集1985。
- [11] 金树武, 双管浮子式医用超声功率计的研制, 中国生物医学工程学报 1986 5(2); 106—112
- [12] S.A.Goss et al, Ultrasonic absorption and attenuation in mammalian tissues. Ultras.Med.Biol, 1979, 5, 181—186
- [13] A.Laurie, Frequency dependence of Ultrasonic attenuation coefficient assessor in fresh tissue, Ultrasonic Symposium 1983, 797—799