

建筑科学研究报告

REPORT OF BUILDING RESEARCH

1981

No. 12

音质模型与实际建筑对比试验的研究

The Investigation of Comparative experiment on
Acoustic Models and Actual halls

中国建筑科学研究院
CHINESE ACADEMY OF BUILDING RESEARCH

提 要

本文概括介绍音质模型和实际建筑对比试验的一些结果。对比的实例为杭州剧院和中国建筑科学研究院礼堂。对比试验的参数包括有(1)混响时间;(2)反射声分布;(3)声场分布;(4)方向性扩散。试验结果表明,混响时间的差别约10~20%,反射声的对比图形是相似的,声场分布差别小于3分贝,方向性扩散的差别小于20%。

The Investigation of Comparative Experiment on Acoustic Models And actual Halls

Ye Hang-Jian, Ye Su-Juan Cui Shung-Sheng

Abstract

This paper summarizes some results of comparative experiments on the acoustic models and the actual halls carried out for the Hangzhou Theatre and the auditorium of the Chinese Academy of Building Research. The parameters used for comparison in the experiments consist of (1) the reverberation time, (2) the distribution of reflected sound, (3) the distribution of sound field, (4) the directional diffusion. The experimental results show that the reverberation times differ by about 10~20%, the comparative patterns of reflected sound are similar, the difference in distribution of sound field less than 3db, the difference in directional diffusion less than 20%.

杭州民族宫礼堂声学测量报告

目 录

一、前言	(2)
二、声学模型试验的基本要求	(2)
三、对比试验	(2)
(一) 北京民族宫礼堂舞台反射罩	(2)
(二) 杭州剧院	(4)
(三) 本院礼堂	(9)
四、讨论	(12)
五、结束语	(13)
参考文献	(14)

音质模型与实际建筑对比试验的研究

建筑物理研究所 叶恒健 叶素娟 崔顺生

一、前言

厅堂的声学模型试验已有数十年的历史,近年来这方面发展很迅速,在1974年召开的国际建筑声学讨论会“大厅声学”专题会议上,有关模型试验的文章几乎占1/3,足以表征声学工作者对它的重视程度。但是,对这门测试技术,目前国际上仍有争议,主要是模型试验与实际建筑对比的符合程度没有定论,有的工作正朝这方面努力^[1-4]。我们结合杭州剧院的音质设计工作,进行了模型和实际建筑的对比试验,还利用北京民族宫礼堂舞台反射罩和本院礼堂作为另外两个对比实例,下面概括介绍所得的一些试验研究结果。

二、声学模型试验的基本要求

欲使比例为1:n的模型试验的声场复演实际厅堂情况,必须满足下列几个模拟条件^[5-7]。

1. 模型各边界的尺度要缩小n倍,时间亦要相应缩短n倍,即

$$x_M = \frac{x_0}{n}, \quad y_M = \frac{y_0}{n}, \quad z_M = \frac{z_0}{n}, \quad t_M = \frac{t_0}{n}$$

2. 在模型中测量的频率比在实际厅堂中测量的频率要提高n倍,即:

$$f_M = n f_0$$

3. 模型与实际厅堂相应表面的边界条件要相等,即:

$$\alpha_M(f_M) = \alpha_0(f_0)$$

4. 空气介质的吸收要满足下式:

$$m_M = n m_0$$

上述各点的脚号M代表模型, 0代表实际厅堂。若采用录音机记录测量讯号, 相应的磁带速度亦要增加n倍。

第一和第二个条件是模型加工及测试设备问题, 只要模型比较大, 一般容易满足要求。第三个条件要求两者在各自测量频率的吸声系数相等比较困难, 但近年来在这方面取得了新成果^[4]。第四个条件可用于干燥空气使模型内的湿度降低至3%, 或用氮气将氧分子排除, 或用沸石使湿度降低至4%以下来达到, 目的是减少空气中水分子与氧分子对高频的吸收, 以提高实验精度。还可以在测量混响时间时采取修正的方法^[4]。

模型试验选择比例n的数值, 从经济角度考虑可取大一些, 例如选用1:20的比例, 但模型的加工要求很精确, 同时也受测试的电声元件限制, 测量频带不能很宽, 因此近年来倾向于使用1:10的模型进行试验。下面分别介绍一下我们所进行的三个对比实例所得的结果。

三、对比试验

(一) 北京民族宫礼堂舞台反射罩

1973年民族宫礼堂翻修顶棚, 同时在舞台上加一个反射罩供音乐演出用, 在这次改建工

程中，我们进行了反射罩的1/10模型试验和现场实测，以此对比测定反射声图形的相似性，反射罩的平面图如图1所示。

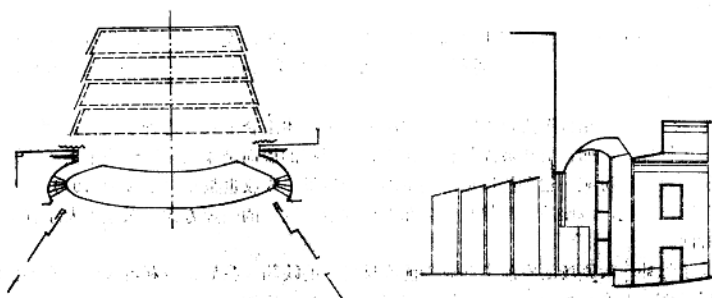
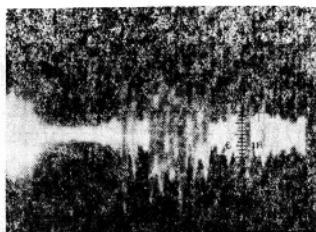
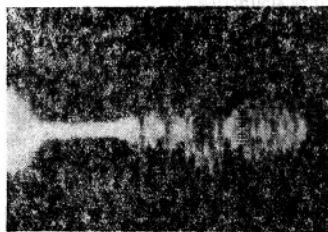


图1 民族宫礼堂反射罩平面图

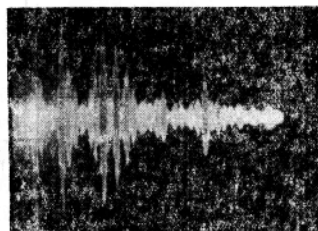
反射罩上部吊置三块厚2厘米、宽140厘米三角形折线板，每块板用钢丝绳吊在吊杆上，可以任意调节角度。反射罩的侧墙采用锯齿形，后端为三角形，用以增加舞台上的扩散。对比试验用电火花作声源，放在反射罩正中，测试频率为2000赫。图2列出两个测点的反射声对比图片，从图上可看出，反射序列两者是相似的。



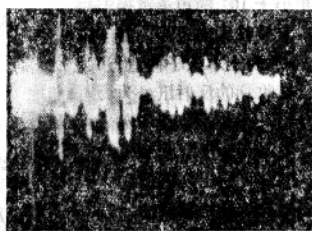
实际厅堂6排1号



实际厅堂8排1号



模型6排1号



模型8排1号

图2 反射声对比图形，时标总长100毫秒

注：在实际厅堂测定中，第一个为触发讯号，过一段时间是直达声和反射声序列。在模型试验时，因直达声比较强，用作触发讯号，随后是反射声序列。

(二) 杭州剧院

杭州剧院是一座多功能的剧场，以演出大型歌舞、音乐、戏剧为主，兼作开会和放电影等多种用途。

观众厅的平面为一钟形（平剖面参看图3），长31米，宽30米，平均高度12米，体积约10000立方米，容纳2000观众。选择混响时间满场中频为1.4~1.5秒，低频提高30%，高频争取与中频平直。

观众厅的天花板选用钢丝网水泥“船形”扩散体组合形式，这种多面壳体吸声系数小，防火性能好，而且对声波能起扩散作用。大面积的墙面是采用装饰性的木条子墙；它的背后是一般砖墙粉刷，这种构造据混响室测定的结果，吸收也很小（中频为0.07）。为了防止产生回声干扰，池座后墙局部装置穿孔吸声构造。这样的处理方式，保证了大厅有足够的混响时间。

为了弥补一般剧场池座前中部缺少前次反射声的缺陷，我们充分利用舞台口的平顶和侧墙作反射面，并在耳光后装置4块反射板（见图3），使该区域能有较多的前次反射声。

下面着重叙述一下木条子构造对声波的衰减特性及观众厅1/10音质模型试验的对比结果。

(1) 木条子构造对声波透射的影响

前面已谈到，在耳光后装置有4块反射板，它的前面是装饰性的木条子构造，从舞台来的声波穿透木条子，经反射板的反射后再透过木条子到达池座前中部，相对直达声的延迟时间分别为50至70毫秒。

图4为木条子构造的声学特性断面图。我们按1/10模型试验的实际尺寸，用图5所示的测量式测量声波透射木条子构造的声学特性。

测量时先不安装木条子构造，由声源发出（模拟试验为10千赫）的脉冲声，讯号经反射板反射到半宽角小于 10° 的声透接收器，定接收到的讯号强度为若干分贝，然后装上木条子构造，再测量接收到的反射讯号为若干分贝，图6为模型试验时得到的反射图。

从图6可看出，模型试验实物测定的结果是相似的。由于木条子构造的衍射效应，反射讯号的两侧多了两个讯号，模型和实物测定都出现这种情况。

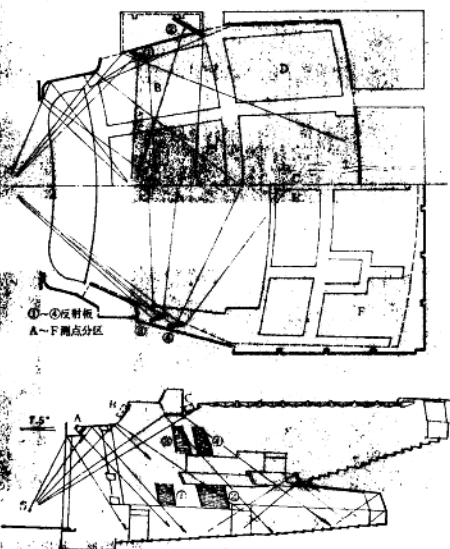


图3 杭州剧院的平、剖面图

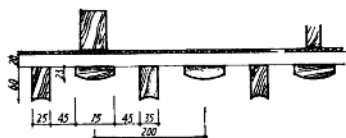


图4 木条子构造的横面图

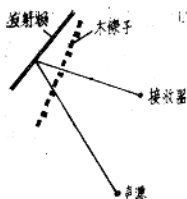
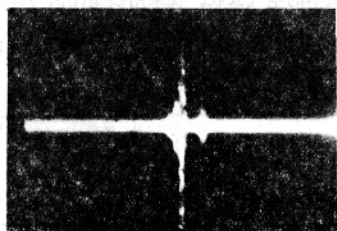
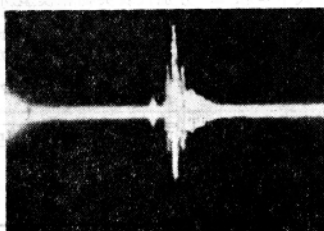


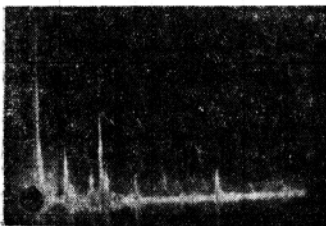
图5 测量木条子墙透声特性示意图



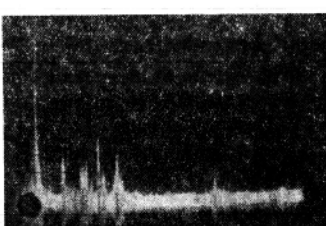
1/5比例, 未加木条子



1/5比例, 加木条子



实际尺寸, 未加木条子



实际尺寸, 加木条子

图6 木条子墙声透射对比图

(2) 音质参数的测定

根据模拟的基本理论, 模型的尺寸应按比例缩小, 测试频率要按比例提高, 在模型中各种材料和物体的吸收应满足 $\alpha_m(f_M) = \alpha_r(f_r)$, 要使所有的材料均能完全满足这个条件, 实际上是很困难的。由于通常对混响时间的要求, 允许有一定的变化范围, 因此, 只要占面积比较大的几种材料能基本上满足这个条件, 就不会引起很大的误差。

我们用有机玻璃制成的混响室模型, 测量各种模拟材料的吸声系数, 对比的数据如表1所示, 基本上是能对应的, 因测量设备的限制, 没有模拟4000赫的吸收。从表1可看出, 观众坐在软椅上的对比数据比较接近, 它的吸声量占观众厅的总吸收的很大部分, 而其它的一些材料, 因所占面积不大, 本身吸声系数也比较小, 虽然对比数据有差异, 不会影响很大。

(a) 混响时间

在模型中测量混响时间，因测试频率都很高，受温度的影响便很大，前面已谈到可采取一些措施来排除这种影响，但是这些设备都比较庞大，而且模型比较大，不容易密封，测试时经常更换传声器位置，难以保证模型内的温度不起变化。我们在考虑空气吸收的影响时，采取下列计算方法进行修正。

$$\text{实物} \quad T_r = \frac{0.16}{\alpha \frac{S_r}{V_r} + 4m} \quad (1)$$

$$\text{模型} \quad T_M = \frac{0.16}{\alpha \frac{S_M}{V_M} + 4m'} \quad (2)$$

式中 m 和 m' 分别代表实物和模型所用测试频率的空气吸收。现采用模型比例为 $1/10$ ，即

$$\frac{V_r}{S_r} = 10 \frac{V_M}{S_M} \quad (3)$$

应用 (3) 式将 (1) 和 (2) 式合并简化可得

$$T_r = 10 T_M \frac{1}{1 + \frac{40m - 4m'}{0.16} T_M} \quad (4)$$

实物和模型吸声材料对照表

表 1

材料名称和面积	频 率				
	125 赫	250 赫	500 赫	1000 赫	2000 赫
O: 天花水泥“船型”扩音体, 600平方米	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04
M: 石膏“船型”扩音体, 1.7米高	0.05	0.10	0.09	0.09	0.08
O: 舞台口、天花、1.8米高反射面, 两厘米厚木板外贴夹板, 32平方米	0.14	0.21	0.11	0.05	0.11
M: 三夹板	0.18	0.15	0.12	0.09	0.10
O: 舞台口前天花和舞台下脚平置吸声材料, 520平方米	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04
M: 五夹板, 一道清漆	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07
O: 木条子构造, 后为砖灰砖墙204平方米	0.05	0.05	0.07	0.07	0.06
M: 五夹板一道清漆	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07
O: 舞台开口, 150平方米	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
M: 0.8毫米厚绒布	0.20	0.30	0.40	0.60	0.62
O: 舞台口侧墙, 墙裙(假石墙)282平方米	0.04	0.04	0.07	0.07	0.09
M: 3毫米厚玻璃	0.03	0.04	0.04	0.06	0.08
O: 门, 帷幔, 48平方米	0.50	0.63	0.67	0.70	0.64
M: 1.6毫米厚绒布	0.40	0.56	0.69	0.80	0.90
O: 乐池, 木地板, 70平方米	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06
M: 三夹板	0.18	0.16	0.12	0.09	0.10
O: 人造革软椅2000把	0.21	0.28	0.30	0.28	0.15
M: 小木椅	0.10	0.10	0.23	0.12	0.23
O: 观众坐在软椅上2000座	0.23	0.34	0.37	0.33	0.34
M: 麻布和小木椅	0.16	0.28	0.38	0.36	0.36

T_m 为模型中测量出的混响时间, m 和 m' 值可从文献中查出, 计算出 (4) 式修正项, 便可得到符合实际厅堂混响时间 T_a 值。测量混响时间的方框图如图 7 所示, 测量的结果列于表 2。表中的数值已通过上述计算方法进行修正。为了便于比较, 把实际厅堂测量数值也列于表 2。



图 7. 测量混响时间方框图

1—高频扬声器声发生器; 2—话筒; 3—小高频扬声器; 4—扬声器; 5、7—示波器;
6—磁带记录仪 (录音速度 15.2 厘米/秒); 8—声级记录仪

表 2 空场和满场混响时间测量值

频率 (赫)	125	250	500	1000	2000
混响时间 (秒)					
空场模型	2.8	1.8	2.1	2.3	2.5
空场实物	2.1	1.6	1.5	1.5	1.4
满场模型	2.0	2.0	1.6	1.4	1.5

从表 2 可以看出, 在满场时两者比较接近, 而空场差别则较大。按表 1 的模拟对比情况, 座椅吸收的模拟存在较大的差异, 低频时模型比实物小, 高频时模型比实物大, 因此在表 2 的空场数值便反映出来这差别。在满场时, 观众坐在软椅的吸收数据模拟比较相近, 因此两者比较符合 (250 赫有差别, 可能是实物的“船形”扩散体顶棚吸收过多所引起)。因为观众厅内只在池座后墙装少量穿孔结构, 其它地方没有布置吸收较大的材料, 因此混响时间的对比差别是否大, 在很大程度上取决于观众和座椅的模拟准确性。

(b) 反射声

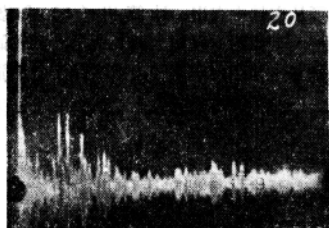
采用脉冲声作声源, 可研究室内的瞬态响应。通常这种声源有下列几种类型:

- A、枪声或爆炸声—适合于作满场测量, 把接收到的讯号录在环形磁带上重放。
- B、用扬声器发出调制的脉冲声—脉冲宽度约 10 毫秒。
- C、电火花—脉冲宽度很窄, 便于分辨反射声序列。

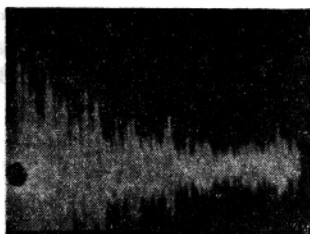
在对比试验中, 为了观察反射声图形的相似性, 我们采用电火花作声源, 通过长余辉示波器拍摄反射声图形, 因为 100 毫秒前的前次反射声对音质影响比较大, 因此反射声图形的时间轴总长取 200 毫秒。

图 8 列出模型和实物两个测点的反射声对比图形。可以看出, 两者是相似的。由于实际观众厅的建筑装饰比模型复杂, 相应的反射声数目也较多一些, 因此对比图形难以完全相同, 只是整个轮廓相似。

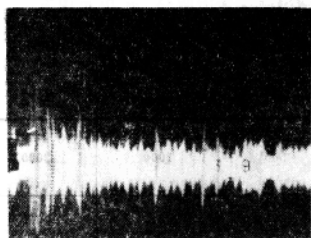
为了便于对比分析, 在模型和实际厅堂分别用声抛物镜及声透镜探测来自各反射面的反



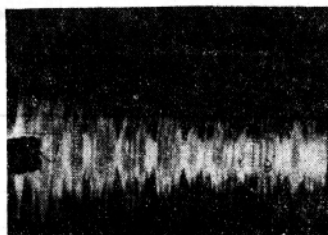
模型池座4排中



模型楼座左侧3排中

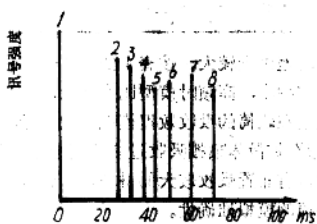


实物池座4排中

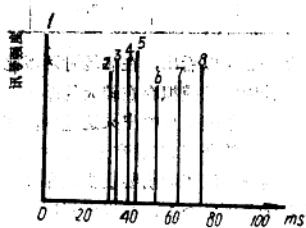


实物楼座左侧3排中

图8 模型和实物反射声图形对照, 测试频率2000赫, 时标总长200毫米



模型



实物

图9 模型和实物池座前区反射声剖析图, 测试频率2000赫

- 1—直达声; 2—台口1.6米宽板对平顶; 3—台口3米宽板对平顶; 4—台框;
5—台口侧墙; 6—第一号反射板; 7—第三号反射板; 8—第二号反射板

射声。图9列出采用这种测试方法所得到的池座前区反射声的剖析图。

从图9可以看出, 两者对来自各反射面的讯号强度有些差别, 但时间序列是基本相同的。因为模型和实物的各个反射面的吸声系数难以模拟完全相同, 因此相对应的反射讯号强度就会有差异, 如果模拟的符合程度比较准确, 则这种差异就小一些。

(c) 声场分布

在空场的情况下, 我们在舞台表演区放一扬声器, 沿着观众厅的纵向, 测量对比高频的稳态声场分布, 测量结果见表3。

对比的结果, 除少数几个测点差别为2分贝外, 其余都少于1分贝, 两者的对比是很接近的。

观众厅空场声场分布对比 (单位: 分贝)

表 3

频率	测点	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
2000 赫	模型 池座正中	0	+1	-1	0	-1	-2	-2	-4	-3	-5	-3	-3
	实物 池座正中	0	0	-1	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-4	-5
2000 赫	模型 池座左侧	-5	-5	-4	-3	-4	-4	-3	-4	-5	-6	-6	-6
	实物 池座左侧	-5	-5	-4	-2	-4	-4	-3	-3	-4	-4	-4	-4

(d) 方向性扩散

我们按梯雷的方法, 在模型和实物分别测量水平的方向性扩散, 测试频率分别为20千赫和2千赫。在模型测量时, 我们试制了一个半宽角小于 10° 的声抛物镜作接收器 (见图10), 代替在实际厅堂测量常用的声透镜。试验时取6个测点进行对比, 所得结果见图11。

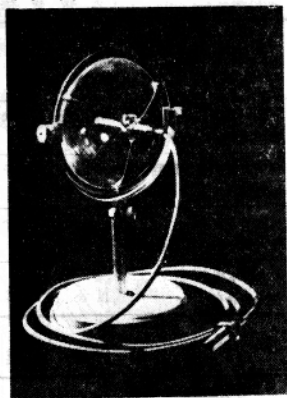
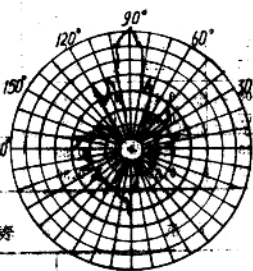


图10 声抛物镜的外形和指向性 (20千赫)

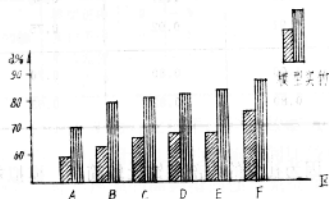


图11 模型和实物方向性扩散对比图

因模型制作时省略一些细部构造, 而方向性扩散是采用高频来测量, 这会影响扩散程度, 因此数值普遍偏低, 但对比总的趋向是近似的, 池座前区数值低, 而池座后区和楼座数值高。

(三) 本院礼堂

本院的西郊礼堂主要用途是供作报告会和放电影, 形状为矩形, 长33米, 宽19米, 高7米, 体积约4400立方米, 能容纳1000观众,

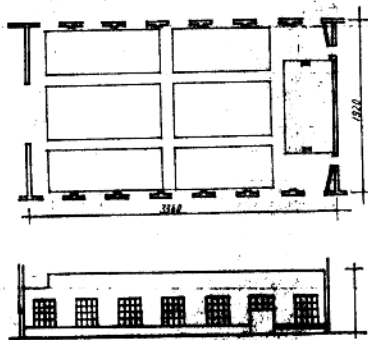


图12 建群院礼堂平面、剖面图

座椅为木椅子。礼堂的内部装饰比较简单，除台度为木板外，其余墙面（有十四个玻璃窗）和天花均为木丝板，讲台后面的墙面挂有电影银幕。礼堂的平面图见图12。我们按1/10比例制作了一个模型，作为模型与实物对比的另一个实例，对比的音质参数如下。

(a) 混响时间

我们在混响室模型测量了模拟实际建筑的各种材料的吸声系数，测量结果列于表4。从表上可看出，模拟材料的吸声系数，基本上是与实际建筑相对应的。将模拟材料布置后，测量了模型和实物的空、满场混响时间，所得结果列于表5。

实物和模型吸声材料对照表

表4

材 料 名 称	频 率				
	125 赫	250 赫	500 赫	1000 赫	2000 赫
O, 顶棚、墙面、木丝板、厚木板、油漆、水泥 M, 泡沫塑料、5毫米厚	0.10	0.30	0.81	0.63	0.70
	0.25	0.26	0.80	0.62	0.75
O, 台度、五夹板、层板、油漆 M, 三夹板	0.11	0.26	0.15	0.04	0.05
	0.18	0.15	0.12	0.09	0.10
O, 木椅子 M, 五夹板一道清漆、油漆	0.08	0.06	0.11	0.11	0.06
	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07
O, 人坐在木椅上 M, 木椅加座垫	0.23	0.25	0.31	0.35	0.37
	0.16	0.28	0.38	0.36	0.36

模型混响时间测量值

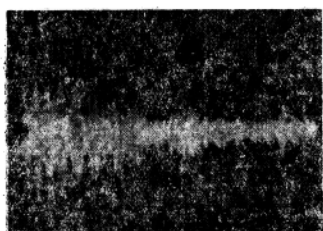
表5

频率 (赫)	125	250	500	1000	2000
混响时间 (秒)					
空 场 实 物	1.35	1.08	1.16	1.17	0.96
空 场 模 型	1.43	1.08	0.91	0.92	0.75
满 场 实 物	1.00	0.90	1.00	0.80	0.70
满 场 模 型	1.10	1.00	0.80	0.82	0.63

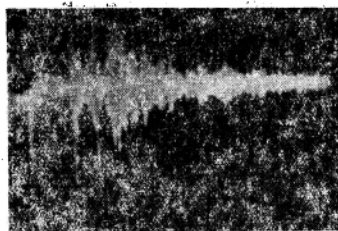
对比空、满场混响时间，两者基本上是近似的，因为礼堂的内部装饰比较简单，模拟对比为简便。

(b) 反射声

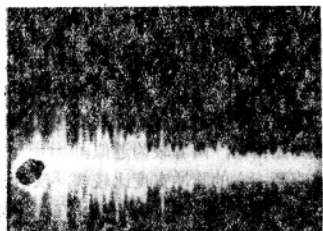
用电火花作声源，在几个区拍摄了反射声的图形，图13为模型和实物反射声图形的对照。可以看出，整个图形的轮廓是相似的。



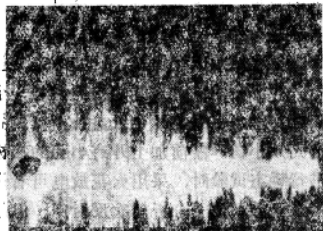
模型前区



模型后区



实物前区



实物后区

图13 模型和实物反射声图形对照，频率2000赫，时标总长200毫秒

(6) 声场分布

在空场的情况下，我们在讲台上放一扬声器作声源，沿着礼堂的纵向，测量模型和实物的中、高频稳态声场分布，测量结果见表6。

空场声场分布对比(单位:分贝)

表6

频率	排号	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
500赫	模型正中	0	-5	-5	-4	-7	-5	-7	-6	-6	-8	-8	-7	-8	-10
	实物正中	0	-4	-5	-6	-6	-8	-8	-10	-10	-10	-11	-12	-11	-12
	模型左侧	-10	-11	-14	-13	-11	-13	-11	-12	-9	-12	-11	-13	-14	-16
	实物左侧	-10	-11	-9	-9	-11	-12	-13	-12	-12	-12	-11	-12	-13	-13
2000赫	模型正中	0	-3	-2	-2	-6	-5	-6	-6	-6	-7	-9	-7	-9	-9
	实物正中	0	-1	0	0	-1	-1	-2	-3	-3	-5	-6	-6	-7	-8
	模型左侧	-5	-4	-1	-3	-2	-4	-1	-4	-2	-2	-3	-4	-5	-6
	实物左侧	-5	-6	-6	-7	-6	-7	-6	-6	-5	-7	-7	-8	-8	-9

分析表6的对比结果，除少数测点差别为5分贝外，大部分测点都小于3分贝，中频的差别小一些。因为礼堂的混响时间比较短，声场分布容易受声源指向性的影响，在模型和实物测量时其声源的高频指向性不完全相同，因此对比数值差异就大些。此外，声场扩散的程度，对于声场分布的对比也会有影响，下面将会谈到，本礼堂的扩散是比较差的。

(d) 方向性扩散

我们选择了5个测点，测量对比模型和实物的方向性扩散，测试频率为2000赫。图14表示对比的结果。从图上看，模型测量的数值均偏低，这与制造模型时省略一些细部作法有关。因为礼堂的墙面和天花板都是木丝板，吸收比较大，声场的扩散比较差，各测点对比差异也相应大一些。

四、讨论

关于音质模型试验与实际建筑对比的准确度问题，目前国际上还没有结论性的意见，许多文章都是结合具体工程实践介绍一些对比的结果。影响因素很多，难以做出定量的判断。这里概括讨论一下影响对比准确度的因素。

1. 声源一测试时声源的指向性是一个很重要的因素。在实际建筑测量时，声源分布或方向性扩散，可采用两个鼓盆扬声器倒扣方式，近似看作一个球声源。而在模型试验时，则在超高频小扬声器前加上开有小孔的挡板，可近似为无指向，两者较为近似。

进行瞬态试验时，采用火花放电可看作是一个点声源，它的脉冲宽度比较窄，反射讯号互相不致干涉，便于分析首次反射声。但是，由于它的频率高和脉冲宽度窄，在现场测量时，许多面积比较小的物体、表面和建筑装饰，都会对来自声源的讯号起反射作用，而在制造模型时，这些细部是省略的，因对比反射声图形时，在实物拍摄到的反射讯号就比较多，两者难以完全相似。若用扬声器发出调制的脉冲声作声源，脉冲的宽度比较窄，反射讯号的数目相应少一些，对比容易相似。但脉冲太宽，反射讯号互相干涉，不便于分析前次反射声。

2. 接收器一在进行模型试验时，可采用B&K厂的1/2或1/4英寸电容传声器作接收器，再加上一个鼻上锥可改善指向性。1/4英寸的传声器体积小，适合于作1/10模型试验，但灵敏度低，要求声源有足够的输出功率。由于模型试验的测试频率比较高，在这种情况下，接收器总是具有一定的指向性。这对测量反射声分布是有影响的。

3. 吸声材料的模拟一从理论上要求 $\alpha(f_0) = \alpha(f_M)$ ，但实际上很难完全符合。通常在建筑测量音质参数的频带为125~4000赫，模拟的吸声系数往往在某些频率比较符合，但另一些频率则有差异。而且混响室测量的数据，还不能完全反映建筑物的实际情况，因此虽然考虑空气吸收的影响，但对比混响时间必然还有一定的误差。表7列出这方面的差别情况。

从表7可看出，除西德 Meistersinger halle 的绝对值平均小于10%以外，其余都在10~20%，杭州剧院和建研院礼堂空场的对比误差较大，而满场比较接近为10%，在允许误差范围以内。一般说来，如果吸声材料模拟得比较准确，对比不会引起很大的误差，但目前只局限对比模拟混响室的数据，而混响室测得数值与实际建筑的情况往往还有出入，例如，后空很大的天花吸收，就不容易得到确切数值，这些因素都影响对比的准确度。

关于方向性扩散对比情况，我们只查到西德 Meistersinger halle 的6个测点测量的数据，它的误差绝对值平均为18%，杭州剧院和建研院礼堂对比的结果分别为18%及21%，对

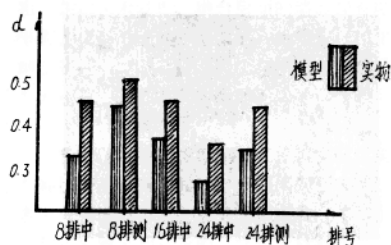


图14 模型和实物方向性扩散对比图

名 称	体 积 (米 ³)	座位数	频 率 (赫)						绝对值 平均
			125	250	500	1000	2000	4000	
岛根县民会馆 ⁽⁵⁾ 空场	3210	594	+21	+5	-10	+11	-16	-6	11
岛根县民会馆礼堂 ⁽⁵⁾ 空场	9250	1620	+35	+25	+14	+7	-13	-15	18.2
Kanagawa kenmin Hall ⁽⁴⁾ 满场	16000	2500	-10	-12	-11	-17	-13	-13	13.2
Maida Vole studio ⁽³⁾ 空场	—	乐队70人	+30	+11	+11	+19	+6	-13	15
Meistersinger Halle ⁽²⁾ 满场	23000	2123	-11	+15	-13	0	0	+6	7.5
杭州剧院 空场	10000	2000	+17	+39	+17	+17	-20	—	22
杭州剧院 满场	10000	2000	-5	+25	+7	-7	+7	—	10
建研院礼堂 空场	4400	1000	+5.9	+14	-25	-24	-21	—	18
建研院礼堂 满场	4400	1000	+10	+11	-12	+3	-10	—	10.8

注: 混响时间误差 $\frac{T_M - T_0}{T_0} \times 100(\%)$

比的误差是相同或相近的。

岛根县民会馆在空场时取14个测点对比中频的声场分布, 个别测点差6分贝, 大部分测点差别小于3分贝, 与建研院礼堂对比的结果相近, 图15为这两个厅堂声场分布对比图形, 为了便于比较, 建研院礼堂的测量数据曾作过适当的换算。关于声场分布的对比, 在文献上很少报导, 难以作更多的比较, 1975年矢野博夫发表的文章^[4]只取6个测点在1000赫进行比较, 差别小于2分贝, 因测点数目少, 不能说明太多问题。总的说来, 室内的混响时间、扩散程度和声源的指向性, 都影响声场分布对比的准确度。杭州剧院的声场分布对比很接近, 与观众厅的扩散比较好有关。

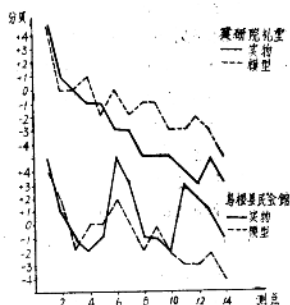


图15 声场分布对比图形, 测试频率500赫

五、结 束 语

综上所述, 模型和实物音质参数的对比, 受着许多因素的影响, 它的对比准确度还难以作出定量的估计。我们通过杭州剧院和建研院礼堂两个对比实例, 有下列几点体会。

1. 反射声的对比图形是相似的, 在模型中测量反射声分布可及早发现声学缺陷、研究形体对音质的影响、调整反射面和吸收面的布置方式以及评定早期声能与混响声能的比例, 这些将有助于完善音质的设计方案。

2. 混响时间的对比误差, 取决于材料模拟的准确程度, 目前误差范围控制在10~20%以内还是有把握的, 随着材料模拟的试验研究工作的发展, 它的误差范围还能进一步缩小。

3. 其它的一些音质参数如声场分布和方向性扩散, 因对比的资料积累不多, 还作不出确切的估计, 按我们所作的两个对比实例和国外的资料报导, 声场分布的差别小于3分贝, 方向性扩散的误差小于20%。

4. 我们在模型中还进行过清晰度、人体对侧向反射的影响、座椅共振吸收和主观评价

等试验工作^[1]，这些仅属于摸索它们的试验方法，有待于进一步提高。总的说来，我们认为音质模型试验这门技术，对于音质的设计和研究工作是有帮助的，最近发展起来的用电子计算机进行音质模拟试验，虽然有它的优点，可以更为细致地研究声能的方向分布，但也受了一系列的局限，还不能取代采用声波进行的音质模型试验。

参 考 文 献

- [1] D. Brebeck. F. Spandock «Acoustically Similar Models as Auxiliary Means in Room Acoustics» *Acustica*, Vol 18 1967. p.213
- [2] 小西睦男«Examples of Comparative Study on the Acoustical Scale Model», 1971, 日本音响学会杂志, 26卷, 3号 p.144
- [3] H. D. Harwood «Acoustic Scaling of Studios and Concert Hall» *Acustica*, Vol 28. 1973. p.330
- [4] 矢野博夫 «Scale Model Experiment of Kanagawa-Kenmin Hall». 日本音响学会讲演论文集 1975, p. 471
- [5] 小西睦男 «Absorption Coefficient of Acoustic Material for Model and its Application» 日本音响学会杂志, Vol. 32, № 7, p. 560
- [6] В. М. Гардбшьян. условия тождественности акустический свойство помещения и его модели. *инжфиз* выпуск 28, 1959, p52.
- [7] 叶恒健、曹绍平 «音质模型试验的模拟条件及试验设备研究», 建筑科学研究院内部资料, 1964年
- [8] 木村翔«Sound Absorbing Characteristics of Materials for Acoustic Model Experiment», 音响技术, Vol. 5, 1976, p. 148
- [9] 叶恒健、叶素娟、崔顺生 «杭州剧院的声学模型试验», 声学学报, 1980年, 第1期, p. 55