

# 有关音质模型试验的讨论

叶恒健 叶素娟

(中国建筑科学研究院)

## 一、前言

采用声学方法进行音质模型试验,已有二十多年的历史。五十年代苏联 Гардашьян 发表过几篇文章,讨论模型试验的模拟条件,以及柴可夫斯基音乐厅的 1/40 模型试验情况,测量频率采用 20 千赫(对应实物 500 赫),主要测量反射声的分布和混响时间,六十年代西德 Spandöck 采用 1/10 模型进行试验,测量频率从 1250 赫~40 千赫(对应实物 125 赫~4 千赫),测量的参量包括有混响时间,反射声分布,声场分布和方向性扩散,并在模型中把空气的相对湿度降低至 3%,进行主观评价试验。七十年代日本橘秀树提出在 1/10 模型中充氮气将氧分子排除,减少空气中氧分子对高频声波的吸收。木村翔对常用的建筑材料进行模拟对比试验。这些对音质模型试验都起到促进作用。但是,对这门测试技术,目前国际上仍有些争议,主要是模型试验与实际建筑对比的符合程度没有定论。我们结合过去所进行这方面的试验研究工作,拟对这种试验方法的几个问题进行一些讨论。

## 二、音质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。

1. 模型各边界的尺度要缩小几倍,时间量度亦要相应缩短 n 倍,即

$$x_m = \frac{x_0}{n}, y_m = \frac{y_0}{n},$$

$$z_m = \frac{z_0}{n}, t_m = \frac{t_0}{n}$$

2. 在模型中测量的频率比在实际厅堂要提高 n 倍,即

$$f_m = n f_0$$

3. 模型与实际厅堂对应表面的声吸收要相同,即

$$a_m(f_m) = a_0(f_0)$$

4. 空气介质的吸收要满足

$$m_m = n m_0$$

上述各符号的下角标 m 代表模型, 0 代表实际厅堂。

第 1 和第 2 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 3 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,这个问题下面将进行讨论,第 4 个条件可用于干燥空气使模型内的相对湿度降低至 3%,或充氮气,或用沸石去湿等方法来实现。

模型试验选择比例 n 的数值,从经济角度考虑可选用 1/20 或 1/40,但相应测量频率要提高到 80 千赫或 160 千赫,这样便受到测试用电声元件的指向性和空气吸收模拟等因素的限制,近年来比较普遍采用的是以 1/10 模型来进行试验,虽然测量问题得以解决,但模型比较大,制作很费时间而且费用也很大,试验的进度往往赶不上设计的要求。

## 三、吸声材料的模拟

在实际建筑中常用的吸声材料和构造包括有多孔性材料,穿孔吸声构造和薄板共振吸声构造,现分别来讨论一下它们的模拟情

况。

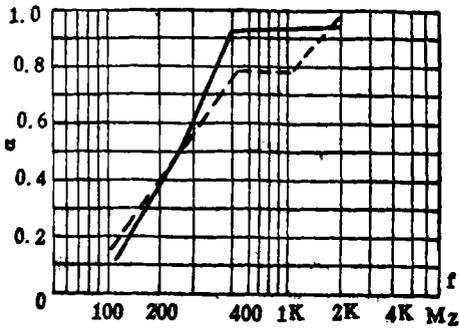
### 1. 多孔性材料

在模型试验时要模拟多孔性材料，原则上要满足

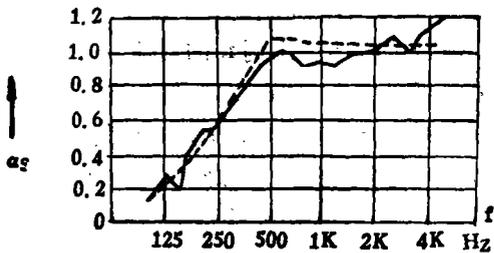
$$\gamma_M = \gamma_0 n$$

式中  $\gamma$  代表流阻率。

上式是按波动声学观点来考虑。我们在模型试验中所感兴趣的是吸声系数，因此要在混响室模型测量各种材料，寻找对应实际建筑所用材料的吸声系数。如果事先掌握材料的流阻特性，则这种材料的模拟试验会简便一些。图1是我们试验的结果。为了便于比较，图2列出 Spandöck 所得的结果。



— 实物, 5cm A型泡沫塑料流阻率 7Rayl/cm  
 --- 模型, 5mm B型泡沫塑料流阻率 83Rayl/cm  
 图1 多孔性材料模拟特性



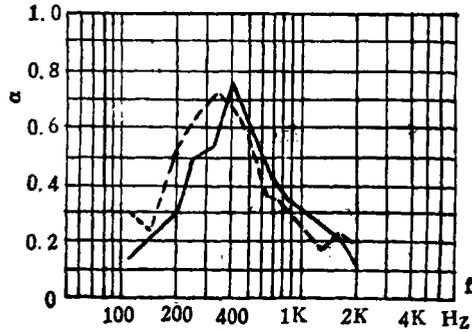
— 实物 Sillon Fily SF57 厚度  $d=5\text{cm}$  流阻率 Rayl/cm  
 --- 模型泡沫塑料流阻率 127Rayl/cm

图2 多孔性材料模拟特性, 引自[1]

控制多孔性材料吸声特性的因素包括有流阻、孔隙率, 结构因子, 材料厚度, 声波频率和入射条件等。其中流阻起着重要的作用, 但其它因素也产生一定影响, 因此模拟的结果很难完全相同。

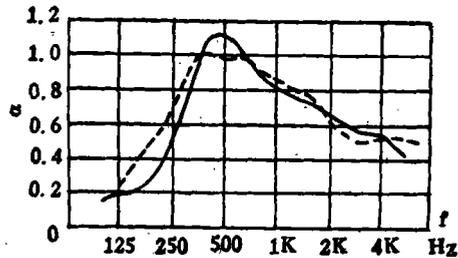
### 2. 穿孔板吸声构造

穿孔板吸声构造的共振频率模拟条件为: 穿孔率相同, 板的厚度, 孔径和空气层的厚度均要缩小  $n$  倍。图3—6分别为我们和其它作者试验所得的结果。可以看出模拟的结果是相似的, 共振频率与计算值也基本相符。



— 实物, 石棉穿孔板厚 4mm  $P=2.5\%$ , 空腔 5cm, 内填超细棉  $0.5\text{kg/m}^3$  --- 模型, 铁皮穿孔板, 厚 0.3mm,  $P=2.5\%$  空腔 5mm 内填 3.5mm 泡沫塑料  $f_0=368\text{Hz}$

图3 穿孔结构模拟特性



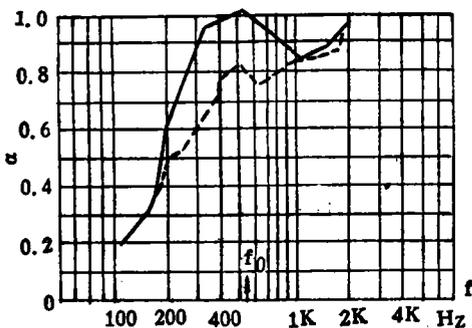
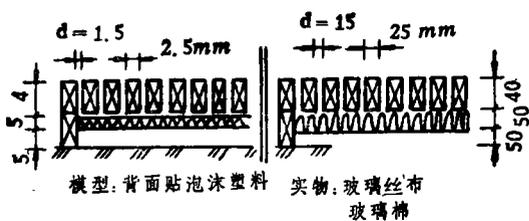
--- 实物, Rigip穿孔板, 穿孔率  $P=14.8\%$ , 板厚  $d=10\text{mm}$  孔径  $r=10\text{mm}$  空腔  $l=50\text{mm}$ , 空腔内填矿棉  
 — 模型, 铁皮穿孔板, 穿孔率  $P=15\%$  板厚  $d=1\text{mm}$  孔径  $r=1\text{mm}$ , 空腔  $l=5\text{mm}$ , 空腔内填 4mm 泡沫塑料。

图4 穿孔结构模拟特性[1]

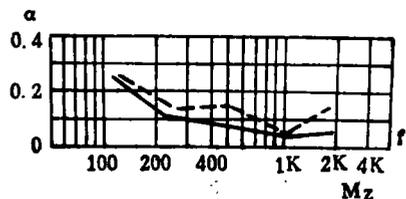
### 3. 薄板共振吸声构造

这种构造的模拟条件, 是要使薄板的面密度和空腔均缩小  $n$  倍, 图7和图8是模拟试验的结果。

吸声材料的模拟试验, 原则上要遵守各自的模拟条件, 但影响材料模拟的准确度的因素很多, 要使得整个吸声特性完全相同很困难, 但若差异不很大还是允许的, 因在混响室测得的数据, 应用于实际厅堂也还存在一

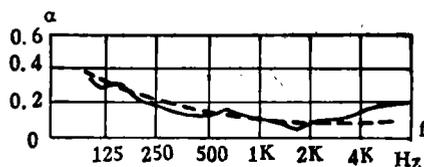


—实物 —模型  
图5 木条子构造模拟特性



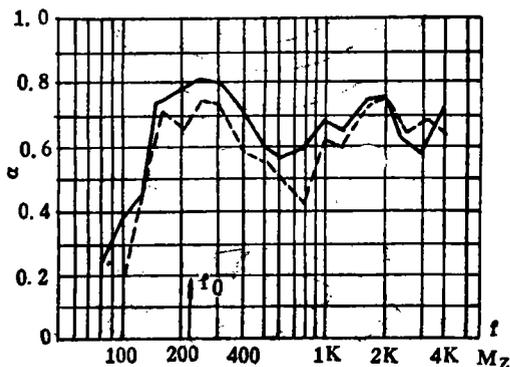
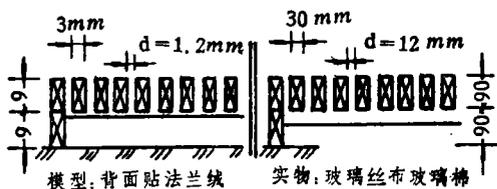
—实物, 石棉水泥板, 厚 4mm,  $7.6\text{kg/m}^2$  空腔厚 4mm,  $7.6\text{kg/m}^2$  空腔 10cm 内填玻璃棉  $6\text{kg/m}^2$  ---模型, 塑料板, 厚 0.4mm,  $0.64\text{kg/m}^2$ , 空腔 10mm 内填 3.5mm 泡沫塑料。

图7 薄板构造模拟特性



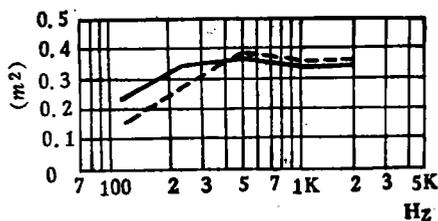
---实物, Spenholly 板, 厚 15mm,  $7.5\text{kg/m}^2$ , 空腔 5cm, —模型, 薄板  $750\text{g/m}^2$  内填 3mm 泡沫塑料, 空腔 5mm

图8 薄板构造模拟特性[1]

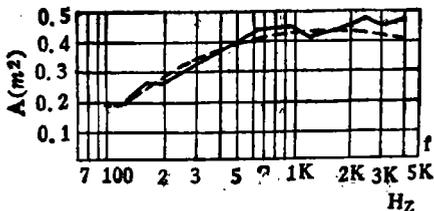


---实物 —模型  
图6 木条子构造模拟特性[2]

时是用厚 10 毫米, 宽 57 毫米的泡沫塑料贴在 1 毫米厚, 52 毫米高的树脂胶木板小椅来模拟观众坐在软椅上的吸收, B. Day 采用氯丁橡胶切成小人形状在 1/10 模型中模拟听众。我们在试验时采用的方法是在小木椅上加一层麻布, 再放上橡胶小玩具人体来模拟 (试验结果见图 9)。图 10 为木材翔的 1/10 模型模拟结果, 可以看出两者是相似的。



—实物 —模型  
图9 人和座椅模拟吸收特性



—实物 —模型  
图10 人和座椅模拟吸收特性[3]

定的差别。

还有一个值得考虑的是人体声吸收模拟问题。人体的声吸收占观众厅总吸声量很大的比重, 模拟的准确与否直接影响混响时间的测量数据。日本 NHK 进行 1/15 模型试验

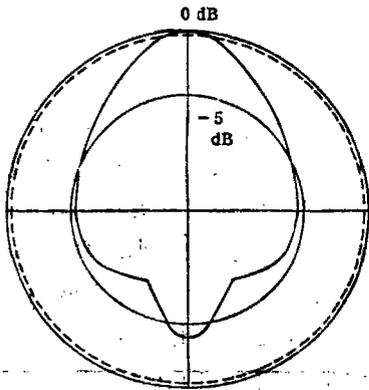
## 四、测量设备

模型试验的测试频率比较高，因此要着重考虑声源和接收器的指向性问题。

### 1. 声源

利用火花放电作为脉冲声源是比较合适的，作为点声源辐射可看做无指向性。但在高频时因波长比较短，连接电极的支架对声辐射的指向性是有影响，我们把电极竖立起来，把放电部分弄成弯曲形，指向性就有所改善。(见图11)。

电火花的脉冲声宽度是比较窄的(约为0.2毫秒)，通过滤波器虽受驰豫时间的影响，在频率20千赫时，为0.3毫秒，但对进行1/10模型试验还是合适的。



— 电极垂直排列，--- 电极弯曲形排列  
图 11 火花声源的指向性

采用小高频扬声器作脉冲声源，因受本身瞬态响应的影响，20千赫的脉冲声宽度为0.8毫秒，5千赫为1.4毫秒，在分析反射声图形时不易分辨清楚，而在模拟几个声源同时发声时，火花声源就难以胜任，只能用小高频扬声器作声源。在这种声源前面加一棱锥体，两侧各开一小洞，对指向性有改善(见图12)。

用12个小扬声器组合成直径约10厘米的球声源可作为稳态声源，但频率超过20千赫时，还是具有一定的指向性。

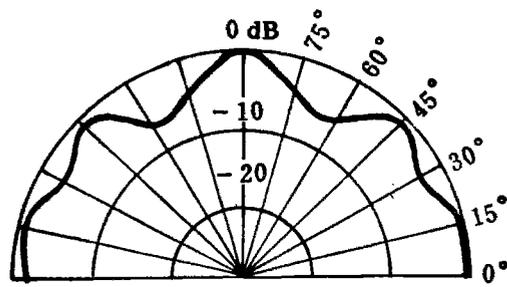
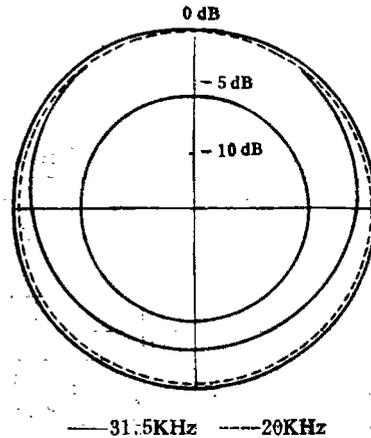


图 12 小高频扬声器 20KHz 时的指向性

### 2. 接收器

1/2 或 1/4 吋电容传声器适合于作 1/10 模型试验的接收器，最好外加直径 4 毫米的探管，则指向性可得到改善(见图13)。

测量方向性扩散要求接收器具有强指向性，我们曾制作了一个声抛物镜，具有较强的指向性(见图14)。



— 31.5KHz --- 20KHz  
图 13 探管(直径 4 毫米)的指向性

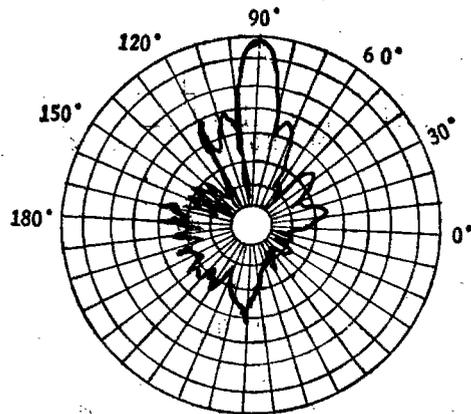


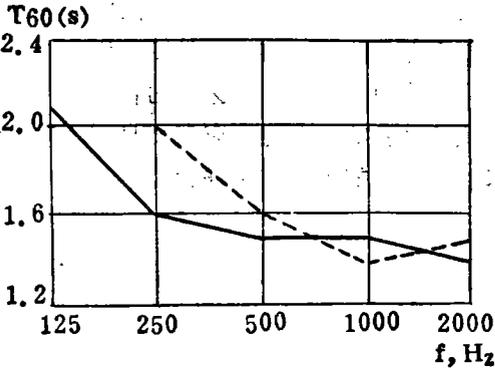
图 14 小抛物镜的指向性图测试频率 20kHz

## 五、对比试验

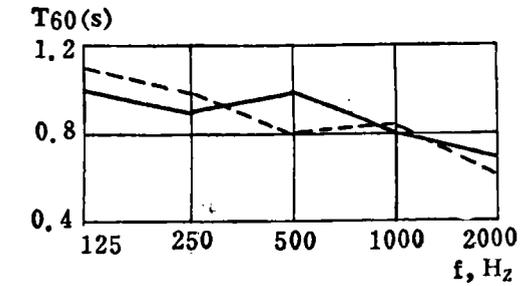
模型试验是否有价值，主要看它与实物的对比试验符合程度如何。目前这方面还没有结论性意见。许多文章只是介绍具体某一工程的对比情况。通常模型测量的参数包括有：

### 1. 混响时间

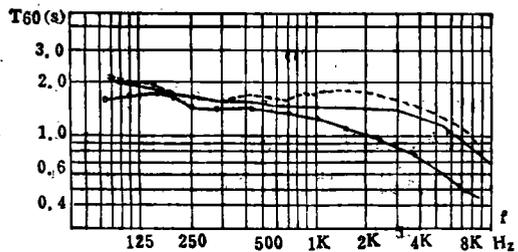
它的对比准确程度，很大程度上取决于吸声材料的模拟情况。上面已讨论过，要使



— 实物(满场) --- 模型(1/10满场)  
图 15 杭州剧院 T60 模拟特性



— 实物(满场) --- 模型(1/10 满场)  
图 16 建筑研究院礼堂 T60 模拟特性



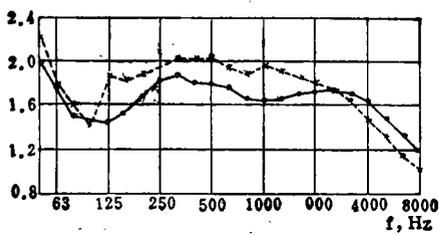
— 模型(1/10加N2) --- 实际厅堂 。。 模型(空气)  
图 17 日本 Kanagawa-Kenmin 厅堂 T60 模拟特性[4]

表 1 实物和模型混响的误差(%)

名 称	体 积 (米 <sup>3</sup> )	座位数	频 率							绝对 平均值
			125	250	500	1000	2000	4000		
日本岛根县民会馆, 空场	3210	594	+21	+5	-10	+11	-16	-6	11	
日本岛根县民会馆, 空场	9250	1620	+35	+25	+14	+7	-13	-15	18.2	
日本 Kanagawa Kenmin Hall, 满场	16000	2500	-10	-12	-11	-17	-13	-13	13.2	
英国 Maida Vale Studio 空场	-	乐队70人	+30	+11	+11	+19	+6	-13	15	
西德 Meistersinger Hall 满场	23000	2123	-11	+15	-13	0	0	+6	75	
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	
建筑研究院礼堂, 空场	4400	1000	+5.9	+14	-25	-24	-21	-	18	
建筑研究院礼堂, 满场	4400	1000	+10	+11	-12	+3	-10	-	10.8	

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

吸声材料在整个测量频带都模拟相一致是很困难的, 对比的结果总是有差别(见图15~18和表1), 若误差能控制在10%之内则能满足要求。



×—×实际播音室 ——模型(1/8)  
图 18 英国 B.B.C 播音室 T60 模拟特性[5]

## 2. 反射声分布

过去许多对比试验表明，反射声的对比图形是相似的(见图19)，在模型中测量反射声分布可及早发现声学缺陷，研究体型对音质的影响，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。此外，利用录音机的变速方法，可以监听是否出现回声，这比根据反射声图形来判断更形象化一些，近年来国外在这方面的测试工作有了进一步发展，把各部分反射声能直接以数字表示出来。

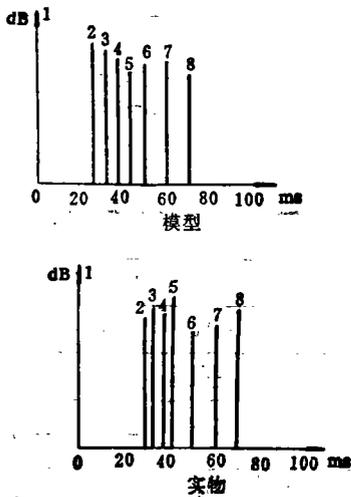


图 19 杭州剧院模型和实物池座前区反射声剖析图

测试频率 2000Hz 1~直达声，2~台口 1.6 米宽板材平顶；3~台口 3 米宽粉刷平顶；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。

## 3. 其它参数

我们曾对两个厅堂进行过声场分布和方

向性扩散对比试验，前者差别约 3 分贝，后者差别约 20%，据文献报导，Meisterisinger 大厅的方向性扩散对比误差平均为 18%。通常模型测量值偏低，产生这些差别的原因，是因为制作模型时把一些细部作法省略，而测试频率又很高(1/10 模型为 20 千赫)，因此对测试结果影响比较大。

在模型中进行音质主观评价，是一个很复杂的问题。尽管空气介质吸收的模拟问题已基本解决，目前各种电声设备也比较先进，但是有关声源和接收器的指向性，评价方法等问题都未能得到很好解决。因此这种试验仍处于探索阶段。我们曾尝试对语言进行评价，粗略地对比模型各区域的音质概况。由于试验设备的限制对(应实物只到 2 千赫)，未能对音乐的效果作出评价。

## 六、几点看法

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，对比的准确度还难以作出定量的估计，但这种试验方法有几点是可以肯定的。

1. 在音质设计过程中，采用这种试验方法，可检查出观众厅是否会出现音质缺陷，调整好反射面和吸收面的位置和控制混响时间在一个适当的范围，这些依靠几何声学作图往往是难以办到的。

2. 由于在现场(特别是满场)进行试验，受着人力、物力和时间等方面的限制，许多试验研究工作很难细致地深入进行，而模型试验可弥补这方面的不足。近年来的一些音质研究工作，例如早期衰减时间，房间响应，侧向反射，座椅共振吸收和人体对声波散射等，多借助这种试验方法来进行。

3. 目前这种试验方法还不完善，吸声材料的模拟和电声元件的指向性问题，还要进一步研究解决。采用计算机进行音质模拟试

(下转第10页)

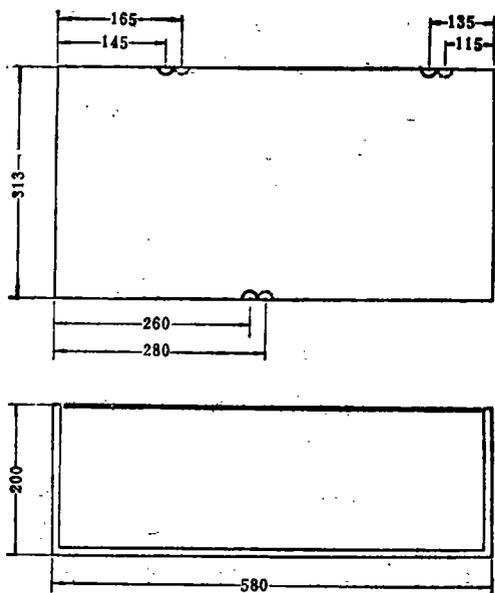


图8 发声箱打击器位置的偏移

变化, 见图7所示。消声室内两个木箱声功率级各倍频带差值的平均值达4.1分贝, 混响室差值的平均值为3.3分贝。打击器在发声箱上的支承位置目前尚无明确规定, 但作为标准声源, 其发声功率应该一致, 故其细节尺寸也应严格控制。

## 结 论

机械打击式标准声源的声学特性, 发声功率, 方向性, 稳定性等方向, 基本符合我

国制定的标准声源的技术要求。但声功率的频率响应不够均匀。250~500赫范围存在一个低谷。从测量用的两台打击机来看, 其辐射的声功率级基本一致。但发声箱固定打击器的位置对辐射声功率级影响很大, 从测试的两个发声箱来看, 这个位置虽只偏移20毫米, 但已导致声功率级平均相差达4分贝左右。因此, 为了保证产品性能的一致性, 这种位置的尺寸也应严格规定。

王季卿先生对本文提了许多宝贵意见, 朱芳英和刘明明同志参加了一些测试工作, 作者深表感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 马大猷、冯禹正、王宏玉, 《噪声功率测量和撞击式标准声源》, 中国科学院物理研究所, (1975), 11.
- [2] 《声学——建筑和建筑构件的隔声测量》, 国际标准ISO 140/VI—1978 (E).
- [3] 《标准声源》, JJG277—81(试行), 国家计量总局.
- [4] BERANEK L. L., NOISE REDUCTION (1960) p168
- [5] 《声学——噪声源的声功率测定——混响室内宽带声源的精密测定法》(ISO3741)
- [6] FRANCOIS P., «Characteristics and calibration of reference sound sources», Noise Control Engineering, 9, p6-15 (1977).
- [7] BRUEL P. V., «The Enigma of sound power measurements at low frequencies», BRUEL & KJAER Technical Review No. 3-(1978), p3-40.

(上接第16页)

验是一种新途径, 国外在这方面已取得一些初步成果。

## 参 考 文 献

- [1] Spandöck, F. "Acoustically Similar Models as Auxiliary Means in Room Acoustics", Acustica, Vol.18, (1967). 213.
- [2] 橘秀树, «Simulation of the Sound Absorption Characteristics of the Absorbents for Acoustic Scale Model Experiment», 日

本音响学会志, 28卷4号, (1972), p.169.

- [3] 木村翔, «Sound Absorbing Characteristics of Materials for Acoustic Model Experiment», 音响技术, Vol.5, (1976), p.143.
- [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.417
- [5] Harwood, H. D. «Acoustic Scaling of Studios and Concert Halls», Acustica, Vol.28, (1973), p.330.
- [6] 叶恒健, 叶素娟, 崔顺生, «杭州剧院的声带模型试验», 声学学报, (1980年)Vol.1, p.55.