

厅堂音质的主观评价和最佳设计参数

戴根华

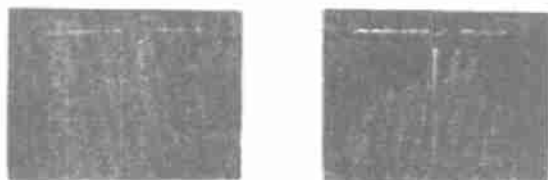
(中国科学院声学研究所)

厅堂音质的研究已有80年以上的历史,并且随着科学技术的进步不断前进。计算机的应用,理论研究的深入,以及多学科的结合,使厅堂音质研究从经验的艺术的阶段到达定量的科学水平。近年北欧国家已建造了几座由计算机辅助设计的剧院,如卑尔根的Grieghall,这是一座1600个座位的主要为演出音乐会而且也演出戏剧和歌剧的多功能厅堂。与此同时,有一系列文章发表,介绍描述厅堂音质所必需的物理参数,它们的主观评价,以及为取得最佳设计所采取的可能措施。

一、简短的回顾与存在的问题

上世纪末,本世纪初,Sabine应邀参加新落成的Fogg艺术博物馆中的厅堂的音质改建工作,从而成为厅堂音质研究的先驱,他在这项工作以及后来的几项工作中都获得成功,他所提出的混响时间和计算公式被作为音质设计的重要指标,一直沿用到现在。以后的50年中,厅堂的建造有了很大发展,厅堂的规模越来越大,功能从单一功能向多功能的发展。Beranek大量收集了各国的有关

5中可清楚地看出,磨光后的声音出现了附加的共振峰,在同样力度的激发下,强度也明显提高了。照片2和照片3是上层2号和其它声音(素面)在2131显示屏上的记录,3号强度最大的中心频率在1千赫和1.6千赫。



六、结束语

曾侯乙全套复原编声,在一九八三年元月,已由国家文化部、文物局主持召开的鉴定会上通过。在多次的试奏、展览和演出中,广大国内外观众和专家纷纷对之报以赞赏和好评。声音色清澈明亮,似今之木琴更富有

余韵,似响亮的钟声又益加透明。它展开了曾侯乙编声三个八度的音容风貌;其内材丰富的半音显示了其旋宫转调的功能;值得惊叹的是,声的最高音上层6号拾与现今钢琴最上一键同音!全套复原编声可与曾侯乙编钟复制件相配合,钟声合奏,金石之音相映成趣,为我国民族大交响乐增添了新的乐章。

参考文献

- [1] 叶林,光明日报,10/13(1983)
- [2] WARREN H. TUCKER, IEEE Trans, No6, 1978
- [3] 徐雪仙等,“编声音高的计算”,声学进展2(1983)
- [4] 黄翔鹏“钟磬复制的研究成果”,人民音乐,3(1983)
- [5] 湖北省博物馆,“湖北江陵发现的楚国彩绘石编声及其相关的问题”,考古,3.(1972)
- [6] 张宝成等,“微计算机用于声音的分析”,乐器,6.(1983)
- [7] 孙成栋,《岩石声学测试》
- [8] 徐雪仙等,“编声音时程特性的分析”,乐器1(1984)

资料,于1961年发表《音乐、音质和建筑》一书。这是一本很有价值的参改书。但是就在第二年,当Beranek自己作声学设计顾问(细节有出入)的纽约林肯艺术演出中心的Philharmonie大厅(现名Fisher大厅)揭幕时,大厅立即暴露出一些音质缺陷。这是在建筑声学界引起骚动的一起失败事例。这一事例及其它类似的事例,说明我们对获得良好音质的重要因素的理解还不够,厅堂的音质设计中还有一些基本问题需要研究。这些基本问题程度不同地表现在三个方面:

1.问题的物理方面是,当厅堂的形状和内部装饰材料确定后,声波在里面是怎么传播的。大家知道,厅堂内声场的混响过程既是时间的函数(声衰减),又是位置和方向的函数(声扩散),但混响中的许多重要细节一直未能求得。事实上,即使某些物理量例如混响时间的测量也还存在不小的困难。

2.问题的心理声学方面是,对于厅堂内已知的声场,人们主观上怎么描述它。不幸,我们对这方面研究更少,对目前常用的主观表示如“活跃度”、“丰满度”、“亲切感”等与物理量的相关识别,理解的比通常假设的少得多。

3.最后一个方面是美学或优选提出的问题,就是对已知的声场和给定的吸音材料,人们究竟喜欢听什么样的音质。

为了研究厅堂音质设计中存在的这些基本问题,从七十年代开始,几个国家的一些学者进行了系统的研究工作,得到一些有趣的新结果。

二、比较研究和结果

研究工作首先在Schroeder领导的西德哥廷根大学第三物理系中展开,联邦德国科学基金会(DFG)资助了一项关于厅堂物理量与其主观量之间相互关系的研究课题。首先,研究人员使用串音补偿滤波器,设计制作出了一种超级立体声系统,这种系统可

抵消左扬声器对右耳或右扬声器对左耳的作用。测试样品是在无混响的环境中录制的录声带,将录声带在被评价的厅堂中放送,同时在一定位置上用一个具有两个传声器的双通道人头模型接收并再录声。这样,人头模型可以由少数工作人员携带,在全欧洲把各个厅堂中不同位置上听到的音乐如实记录下来。这样的录声在消声室中经过超级立体声系统重放时,所录的音乐和相应厅堂的传声特性就能高保真地传达给测听人员。通过这些措施,各个厅堂之间相距遥远而给主观评价带来的困难最终被克服了,它们都被汇集到同一实验室中进行主观评价。

对不同两个厅堂或同一厅堂中两个不同座位上的音质评价由优选试验进行。测听人员只要简单地指出喜欢条件一或条件二,即两者选一,而无需采用“甜”、“干”、“冷”、“热”、“丰满”、“干瘪”、“清晰”、“亲切”之类模棱两可的词汇叙述他们的主观印象。几百个这种优选试验结果,按多维标度技术处理后,就构成一个多维知觉空间。经过分析,发现有两个坐标是主要的,可分别认为是“意见一致因子”和“个人优选”。这种二维知觉空间就表示了测听人员对厅堂音质的评价。

将厅堂的优选资料与其物理量作互相关分析后可得图1所示结果, ρ_1 代表意见一致因子, ρ_2 代表个人优选, $\rho=1$ 的圆相当于100%的相关。由图可见,厅堂宽度和双耳听觉相干性都与 ρ_1 负相关,而混响时间与 ρ_1 正相关,这表示,宽而双耳听觉相干性高的厅堂不为测听人员所喜爱,但较长的混响时间(最长为2.2秒)则使测听人员感觉厅堂的音质良好。进一步对双耳听觉相干性、混响时间、厅堂宽度三者之间的相互关系分析,又发现厅堂宽度的影响不是独立的。这样,决定音质的物理量主要的只有两个,一是混响时间,另一个是双耳听觉相干性。这是近几十年研究中的新发现。双耳听觉相干性低的

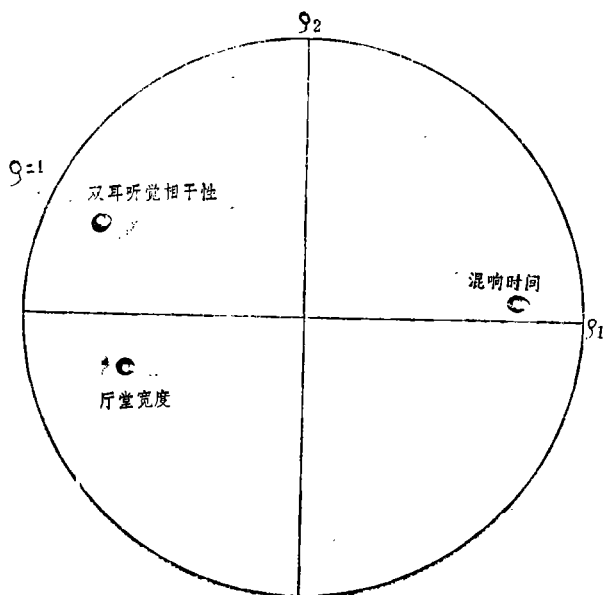


图1 厅堂音质主观评价和三个物理的相关分析

厅堂，主观感觉立体感强，有置身于音乐包围之中的亲切感。

三、主观优选理论和最佳设计参数

在进行比较研究的同时，Ando进行了主观优选的理论研究及计算机模拟研究。借助计算机，使我们有可能对混响结构和双耳听觉相干性如何影响厅堂音质作出仔细的定量的研究。Ando发现有四个客观参数，即信号声压 P ，初始时延 Δt_1 、后期混响时间 T_{sub} 和时延1ms内双耳听觉相干性的最大值（绝对值）IACC，它们共同地但又独立地决定厅堂的音质。Ando的计算机模拟研究结果与Schroeder等人的比较研究结果是一致的。

每个参数对音质的贡献用其主观优选给分表示。如把最高给分定为零，则四个参数的主观优选给分可统一表示为

$$S_i = -\alpha_i |x_i|^{3/2}, i=1,2,3,4 \quad (1)$$

其中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 和 α_4 是四个常数， $x_1 = 20 \log(P/[P]_p)$ ， S_1 是声压的给分； $x_2 = \log(\Delta t_1/[\Delta t_1]_p)$ ， S_2 是初始时延间隔的给

分； $x_3 = \log(T_{sub}/[T_{sub}]_p)$ ， S_3 是后期混响时间的给分； $x_4 = IACC$ ， S_4 是双耳听觉相干性的给分；下标 p 表示优选条件下的值。有趣的是，四个参数都以 $3/2$ 方的形式出现在公式(1)中，但其中有三个取了对数，只有IACC直接作为底出现，按照叠加原理，厅堂的总得分为

$$S = \sum_{i=1}^4 S_i = -\sum_{i=1}^4 \alpha_i |x_i|^{3/2} \quad (2)$$

余下的问题是常数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 以及优选条件下的声压 $[P]_p$ ，初始时延间隔 $[\Delta t_1]_p$ 、后期混响时间 $[T_{sub}]_p$ 和IACC如何决定。这要由实验来完成。用五种不同风格和节奏的音乐和一个女声朗读诗歌的口声（它们的自相关函数的有效持续时间从10ms至127ms不等）作为测试样本，对包括德国人、日本人和朝鲜人在内的测听人员作实验，结果如下：

1. 优选声压级 $[P]_p$ 为79dBA。如演出时厅堂中的实验声压级高于优选值， $\alpha_1 = 0.07$ ，否则 $\alpha_1 = 0.04$ ，自然，厅堂内声场应均匀。需要说明的是，演出现代音乐时，为了所谓

够味，声压级远高于79dBA，这不在我们的讨论的范围内。

2. 优选初始时延间隔 $[\Delta t_1]_p$ 由信号的归一化自相关函数的包络减小为0.1的时延 τ 和总的反射幅度A决定，关系为 $[\Delta t_1]_p = [1 - \log A] \tau_0$ 。如信号的初始时延间隔大于优选值， $\alpha_2 = 1.42$ ，否则 $\alpha_2 = 1.11$ 。

3. 优选后期混响时间 $[T_{\text{混}}]_p$ 为信号自相关函数有效持续时间的23倍。如信号的后期混响时间大于优选值， $\alpha_3 = 0.45 + 0.74A$ ，否则 $\alpha_3 = 2.36 - 0.42A$ ，A为总的反射幅度。

4. IACC应尽可能低。为了取得低的IACC，最有效的办法是使厅堂成为不对称。Bekesy就发现，在庭院中演交响乐音质有时比在音乐厅中演还好，因为庭院没有天花板反射，而且围墙往往有一大部分空缺因而也没有反射。另外也可使早期反射在与垂直于听众两耳连线的中面成 $\pm(55^\circ \pm 20^\circ)$ 的角度范围内到达听众。计算IACC的得分的常数 $\alpha_4 = 1.45$ 。

这样S就可计算，它是厅堂音质的数值表示，S大的厅堂听众总是喜爱的，理论上音质最佳的厅堂的得分应为零。

以上就是目前我们所达到的关于厅堂音质的最新知识水平。从讨论可以看到，一个厅堂的音质不仅取决于厅堂本身，而且在很大程度上取决于所要演奏的乐曲，取决于乐曲的自相关函数。

四、主观评价优选得分 计算实例

为了使读者对优选得分的计算有个比较具体的了解，以下用一个例子来加以详细说明。

算例中使用的厅堂形状与波士顿交响乐大厅相似，水平截面如图2所示。厅堂宽25米，长50米，高18米。为了简单起见，暂时不考虑楼厅和地板引起的反射和散射。设单个声源位于舞台中心线上，高出舞台地板1.2

米，接收点高出听众席地板1.1米，即相当于坐看的听众的耳的位置。

根据镜像法，共考虑了三十阶镜像，各阶镜像的强度，发出的声波到达听众的时延（与直达声相比）和方向都可计算。

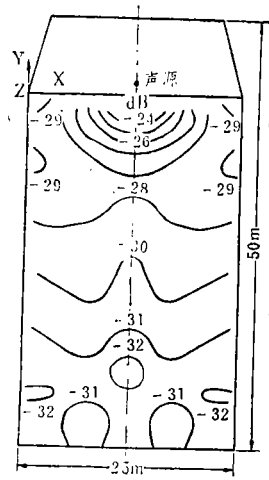


图2 算例中使用的厅堂的水平截面图及按式(3)计算所得的声级L的等值线

厅堂中r处的声级为

$$L_p = L_w + L$$

$$L = 10 \log(1 + A^2) - 20 \log d_0 - 11, \text{dB}$$

$$A = \left(\sum_{n=1}^{30} A_n^2 \right)^{1/2}$$

(3)

式中 L_w 是声源功率级， A_n 是n次镜像的幅度，A是总的反射幅度， $d_0 = |r - r_0|$ ， r_0 是声源位置。因为 L_w 在设计阶段是未知数所以只有每个座席位置上的L和A可以计算L和A的等值线分别示于图2图3。 $d_0 < 12$ 米处声源附近，L和A的变化很快是由于反平方律的缘故， $d_0 > 12$ 米时，L的变化范围在 $\pm 1.5\text{dB}$ 内，与到声源的距离关系不大。

直达声与第一个反射之间的初始时延间隔为

$$\Delta t_1 = (d_1 - d_0) / c \quad (4)$$

这里是第 d_1 一个反射的程长。 Δt_1 的等值线见图4。十分自然，最大时延将出现在厅

堂的中心线上，离声源越近 Δt_1 越大。

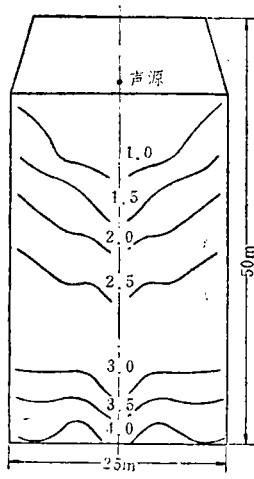


图3 总的反射幅度A的等值线

所用的音乐的自相关函数原则上应在消声室中测定。Ando给出了五种不同风格和节奏的乐曲的自相关函数及有效持续时间 τ 。读者可参考使用。这里选用其中的样本B(Maicolm的小型交响乐作品48)，其 τ 为43 ms。

双耳听觉相干性IACC定义为

$$IACC = | \phi_{lr}^{(N)}(\tau) |_{\max} \quad | \tau | \leq 1\text{ms}$$

$$\phi_{lr}^{(N)}(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^N A_n^2 \phi_{lr}^{(n)}(\tau)}{\sqrt{\sum_{n=0}^N A_n^2 \phi_{ll}^{(n)}(0) \sum_{n=0}^N A_n^2 \phi_{rr}^{(n)}(0)}} \quad (5)$$

式中 A_0 是直达声幅度， $\phi_{ll}^{(n)}(0)$ 和 $\phi_{rr}^{(n)}(0)$ 分别为第 n 阶镜像在左耳和右耳上的自相关函数， $\phi_{rl}^{(n)}(\tau)$ 是在第 n 阶镜像在左右耳上的互相关函数， $\phi_{lr}^{(N)}(\tau)$ 是合成声场的归一化互相关。音乐样本B的相关函数见Ando给出的表D1。在我们这个例子中 $N=30$ ，这样可计算得到图5所示的IACC的等值线。

至此，我们已有了声级、总的反射幅度、初始时延间隔、和IACC在厅堂内的分布，这是计算优选得分的必要的准备工作。以下我们分五步来计算该厅堂的优选得分。

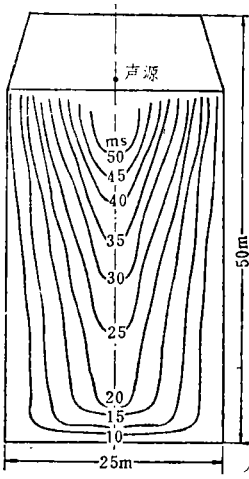


图4 初始时延间隔 Δt_1 的等值线

1. 设厅堂中央距声源20米处的声级(图2 $L = -30\text{dB}$)为优选声级 $[P]_p$ ，则其余座席上的声级给分可由 S_i 的表示式计算，结果如图6。这一步可用到其它任何的音乐样本，因为不同的声源在厅堂内的声级分布基本上相同。

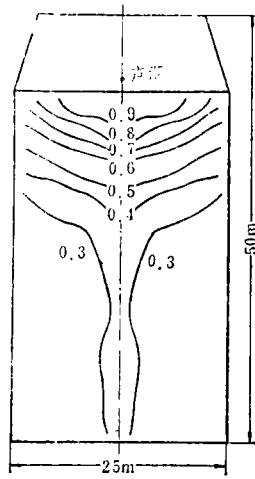


图5 双耳听觉相干性IACC的等值线

引起的。

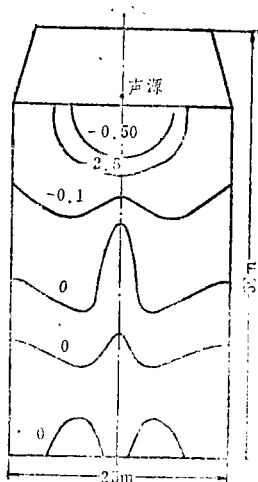


图6 声级给分 S_1 的等值线, $L = -30\text{dB}$ 是优选声级

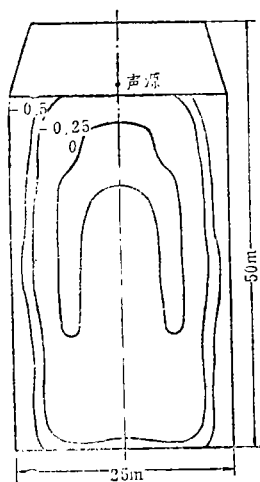


图7 初始时延间隔给分 S_2 的等值线

2. 初始时延间隔的优选值 $[\Delta t_1]$ 由 $(1 - \log A)\tau$ 计算, 后再结合图3图4并根据 S_2 的表示式, 可得厅堂内初始时延间隔的给分, 图7, 由于音乐样本B的 τ 为43ms, 这对于25米的厅堂宽度来说已够短, 所以就有一个给分为0的音叉状的优选座席区。

3. 后期混响时间的优选值 $[T_{\text{sub}}]_p$ 为 τ 。假定厅堂内的实际混响时间为1.8S, 这样结合图3和 S_3 的表示式, 可算得后期混响时间给分, 图8。由于厅堂的混响时间不随位置变化, 所以后期混响时间的给分也不随位置而有很大的改变, 微小的改变是总的反射幅度

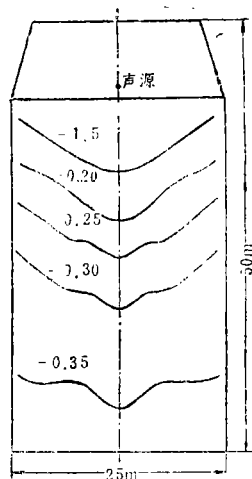


图8 后期混响时间给分 S_3 的等值线

4. IACC的给分由图5和 S_4 的表示式求得图9。

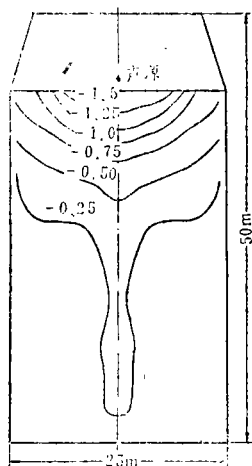


图9 双耳听觉相干性给分 S_4 的等值线

5. 根据叠加原理式(2), 该厅堂内声场B的主观评价优选总得分由图6, 7、8和9相加而得, 结果见图10, 在-0.75等值线包围的座席区听音乐B比在其余的座席区主观感觉音质更好。显然, 总得分不太满意。也许在这波士顿交响乐大厅中演奏Haydn的第102交响乐($\tau = 65\text{ms}$)更适宜, 主观评价会更好。

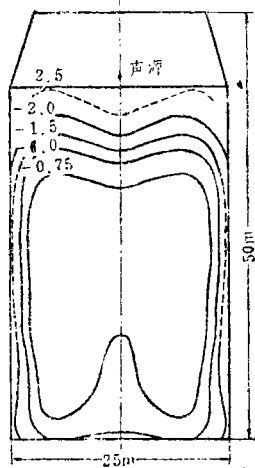


图10 音乐样本B的主观评价优选总得分

五、未来的厅堂设计

大型多功能厅堂是目前世界上建造厅堂的潮流，从简单而且有效来说，厅堂可设计得对称，但除了追求新奇外，目前建筑师采用不对称形状的厅堂设计的情况还不多见。从节约造价着眼，厅堂的天花板不宜太高，由此而产生的有害的天花板反射又不宜作声吸收处理予以消除。那么，能否通过天花板结构的合理设计来减小IA CC而得到良好的音质呢？答案是肯定的。

一种简单办法是把天花板做成抛物面形状，使声波达到天花板后能向侧墙反射，但这样会使厅堂的体积变小从而缩短混响时间。最好是使天花板保持通常的平面形状，同时又有一点不规则的构造，这种不规则的构造有均匀散射的能力。解决办法来自数论理论。

有一种无理序列数叫做平方余数序列，它是对称性和周期性，但最突出的特点是以 e 为底，平方余数为指数而构成的指数函数的离散傅立叶变换的系数是常数。基于这种特性，如天花板上不规则构造按平方余数设计，图11，则其声散射特性在半空间 180° 范围内差不多是均匀的，从而避免了有害

的天花板反射。可以根据素数根序列设计天花板上的不规则构造，它除了能均匀扩散入射声波外，还可减小 0° 方向上的镜面反射，进一步减弱天花板反射的不利影响。

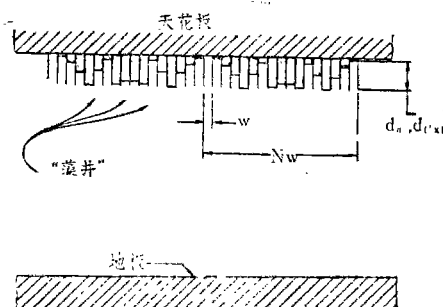


图11 按平方余数序列设计的天花板结构

六、一点评论

本文介绍的是西德 Schroeder 和日本 Ando 的研究工作，整个工作延续了25年。Ando在该领域中坚持耕耘10年多，最后写成 Concert Hall Acoustics 一本专著，Schroeder为此书题写了前言。该书出版后，已有10多位专家包括著名声学家 Beranek 和 Marshall 在10家杂志上发表书评，褒贬不一。

首先，书评者们都肯定本书是 Ando 对厅堂音质研究的重要贡献，值得那些对音质问题有兴趣的科研设计人员一读。厅堂音质研究中最重要的是听众周围声场的精细时间结构的解释，Ando提出了四个独立的物理量共同决定声场的音质，可以在设计阶段予测堂厅音质。声场的实验室模拟很成功，大量实验证明，双耳听觉相干性是主观评价中特别重要的因素，一些结果支持了现有的结论，并丰富了研究内容和方向。Schroeder 甚至说，Ando的书把厅堂音质设计从艺术阶段提高到了可靠的科学水平之上。

同时，书评者们也提出了若干问题，主

(下转第47页)

图2, 图3所示。

四、结语

综上所述, 可以提出如下初步结论:

(1) 由听众吸声增量的统计分布状况(图1)可见, 离散度是较大的, 但应该说是正常的、难以避免的、原因在于:

- 听众本身: 不同季节的吸声量不同;
- 观众厅的影响: 同一穿着的听众在扩散程度、本底吸声量不同的观众厅内, 其吸声量会有较大的差别, 扩散好, 本底吸声量小, 听众吸声量大; 反之, 则较小。此外, 观众所占容积的大小, 也会影响到听众本身的吸声量, 而上述问题是难以避免的。

(2) 由空场实测混响时间, 用听众吸声

增量推算满场混响的方法是可取的。它既有使各剧场的满场混响值避免季节的影响, 能进行对比和评价的可能性, 又能减少测量的工作量;

(3) 有关听众吸声增量的统计值, 如果有更多测定资料, 如空、满实测值各有30个剧场, 而不是本文的15个; 肯定会使吸声增量值更接近实际。这有待今后继续进行这方面的工作。

致谢: 本所陈金京、葛砚刚同志参加了剧场的测定和大量计算工作、笔者谨此致谢

参 考 文 献

- [1] 项端祈 王 峰 吴竹莲等 <我国多功能剧场声学设计的研究> 北京建筑设计院研究报告, 1987
- [2] <建筑声学设计手册> 中国建工出版社 1986年

(上接第43页)

要有: 音乐信号是否可用自相关函数来表征为什么声场的自相关函数或双耳听觉相干性是计算厅堂音质的最好参数; 单个扬声器怎么能模拟整个乐队; Ando所得的最佳混响时间比通常我们所接受的短; 楼厅和地板的反射被忽略了, 而多年的经验表明, 楼厅在建立初始时延间隔中起重要作用; 遗漏了一些重要参考文献。

象所有书评一样, 发表不同意见是正常现象。一种新思想需要时间加以验证, 尤其是建筑声学, 厅堂的建筑周期长, Beranek说需要30—50年来检验Ando的主要断论。

参考文献

- [1] Y.Ando, Concert Hall Acoustics, Springer Verlag 1985(将有中译本出版)

- [2] M.R.Schroeder, Progress in Architectural Acoustics, 贝尔实验室内部文献
- [3] L.L.Beranek, Physics Today/December 1986
- [4] A.H.Marshall, J.A.S.A79(2), 1986

(上接第32页)

- [5] K.R.Erikson et al, in Acoustical Holography, Vol.6, Plenum Press, N.Y., 1976, P15—55.
- [6] Edited by G.Wade, Acoustical Holography, Vol.4, Plenum Press, N.Y., 1972, P51—71
- [7] L.Weiss et al, surg. Gyn., Obstet., 128(5), 1969, 953.
- [8] B.P.Hildebrand and B.B.Brenden, An Introduction to Acoustical Holography, Plenum Press, N.Y., 1972 P137—147