

论厅堂音质的评价及设计

向 斌 南

(北京市建筑设计院研究所)

1983 年 8 月 25 日收到

良好的厅堂音质是评价厅堂设计质量的重要内容之一。但截至目前为止,还不能说已有一套妥善的办法足以保证建成后的厅堂音质。从国内外的情况来看,虽然不少厅堂在音质方面经过精心的设计和施工,但建成后发现音质不好或很糟的却不乏实例。另一方面在现有厅堂中,未经仔细作声学设计而效果不错的也不少。造成这种情况的主要原因是厅堂音质的设计和评价还有不少不确定的因素。这些不确定的因素如不加以检讨并寻求解决的途径,那么厅堂音质设计就不可能在科学的基础上逐步前进。本文愿就这方面提出一些看法。

一、厅堂音质的主观评价

在讨论厅堂音质的主观评价时,首先必须撇开那种以某些个人的片言只语来评定优劣的情况,而着眼于目前经常采用的比较正规的有组织有计划的主观评价来讨论。目前进行主观评价的办法一般是在建成后的厅堂内演出一次或几次,并发出大量的音质调查表请观众填写。当然观众中也可能预邀一些在这方面比较有经验的人员。然后就根据收回来的调查表(有时回收得的数量很少)对各项反应进行统计,从而得出该厅堂的音质评价。这种评价法的构成,可用简化的方框图表示如下:



图1 主观评价法构成方框图

由图1可以看到声源、扩声系统、厅堂传输和观众都能影响到评价结果。关于扩声系统,本文内不拟讨论,这是因为它已不属建筑音质设计范围,而且它也有一套比较成熟而确定的指标可资遵循。但本文内不讨论并不是说它与音质无关,相反扩声系统与厅堂音质关系很大。

我们曾遇到不少厅堂音质不好是由于扩声系统未经仔细考虑和安排,而是买了一些电声器材想当然地安装造成。这一点在音质设计中务必慎重对待。目前在本文内不妨假定声源是自然声或是所用的扩声系统是经过精心设计和施工,质量符合要求的情况。

在除去扩声系统后,评价将由声源、厅堂传输和观众三个环节所决定。在这三个环节中建筑设计只能控制厅堂传输,而对声源和观众却无法加以控制。例如在声源方面,演奏者的艺术表现力、技术、声望、所演奏的曲调的内容、风格、演奏者的位置,乐器的优劣,以及语言的口音、速度等都能影响到音质评价的好坏。在观众方面,他们的爱好、当时的心情、健康情况以及座位环境等也都会影响到他对音质的评价。加之观众对厅堂音质评价的术语,例如明亮度、温暖感、亲切感等又可以有各自的理解。因此用包含这许多在厅堂音质设计中无法控制和不确定因素在内的综合反应,来评定厅堂音质和它的设计,其不恰当是显而易见的。

为了获得可靠的厅堂音质评价,就必须将声源和观众加以固定。例如在声源方面可以选择一组固定的,各有特色的节目,而且演出人员和使用器材也是固定的。为了避免演出人员多次重复演奏会引起疲劳而产生偏差,也可以使

用录音重放作为声源。但这时所使用的电声器材,安放位置和调节就必须固定。对于评价人员也必须固定,再给以专门音质鉴定训练,(这正如茶、酒等的专业品尝人员一样)。然后还要统一他们对音质评定术语的含义和掌握。利用这样的声源和评价人员,对同一厅堂作几次评定,其所得结果才比较可靠。当然这里所提出的做法还只是一个轮廓,具体做起来,还有不少细节有待研究和确定。

二、厅堂音质设计的现状

在厅堂音质设计工作中,一般要考虑混响时间、稳态声场分布、扩散、早期反射声和噪声控制等几方面。有时还用模型试验来进一步了解和预计将来实际厅堂的音质情况。下面将就除噪声控制以外的这些指标和考虑方法所存在的问题进行讨论。

1. 混响时间 混响时间的计算,可以说是

目前厅堂音质设计中最常用和比较最能量的一个重要步骤。它有时甚至成为音质设计的唯一指标。但遗憾的是这样重要的指标,就同一厅堂来计算,由于不同的人所选用的吸声系数、计算公式、计算方法等的差异,结果相差百分之二、三十是常事。即使我们可以用拟订混响时间计算规范来使这些计算归于统一而得出一致的结果,但仍不能保证计算结果和实际相符。这是因为推导混响时间的计算公式时,所作的假定,在实际建筑中不易满足。例如计算混响时间的赛宾公式:

$$T = \frac{KV}{A} \quad (1)$$

式中 T 为混响时间 (s), V 为厅堂体积 (m^3), A 为厅堂内全部吸声力 (m^2), K 为与厅堂体形有关的常数 (s/m)。

从式 (1) 可以看出一个厅堂只有一个混响时间。但实际情况告诉我们,同一厅堂内不同的点的混响时间并不相同。见下表

表 1 厅堂内不同点混响时间变化表^[1]

厅堂名称	体 积 (m^3)	人数 (人)	测量情况	测点数	平均 (s)	范 围 (s)	变异系数 $\sigma/\bar{x}$
人民大会堂	91000	10,000	满场, 500Hz	13	2.44	2.2 至 2.7	0.0576
建工部展览会场	6500	1400	空场 500Hz	6	3.27	2.9 至 3.8	0.112
首都体育馆	168000	16700	空场 1000Hz	9	2.85	2.5 至 3.3	0.0924
扎伊尔人民官会堂	33700	3500	模型、满场 10,000Hz	21	0.074	0.058 至 0.086	0.115

为了弄清上述变化是否由某些偶然因素造成。我们可以取同一点的几次测量和不同点的测量相比较。下面即以首都体育馆和扎伊尔人民官会堂模型试验为例:

表 2 各点混响时间变化与偶然变化比较表

厅堂名称	测 量 情 况	测点数	厅内各点混响时间的 变异系数 ν	各点几次测量变异 系数的标准差 σ	$\frac{\nu}{\sigma}$
首都体育馆	1000Hz, 1/3 倍频程白噪声, 空场	9	0.0924	0.0148	6.24
扎伊尔人民官会堂	10000Hz, 1/3 倍频程白噪声, 满场	21	0.115	0.0220	5.22

从上表可以说明,如果认为各点混响时间的变化和同一点几次测量数据的变化,都属于某些相同的偶然因素造成,那么由于 $\nu/\sigma > 5$, 因此这种论据成立的概率将远小于千万分之一。所以我们可以断言,厅堂内不同的点的混响时间之所以不同,确实是由各点的位置不同造成的。

应用声学

我们现在习惯于把在厅堂内测得的混响时间的平均值拿来和所设计的混响时间比较。然而我们从来没有证明过实测的平均值和计算的单一数值之间这种对等关系。虽然可以认为厅堂内混响时间的平均值将逼近总体的众值,因而如平均值和计算值相符,那么厅堂内必有较多点的混响时间和计算值相符。但即使这样,

• • •

由于测点太少和它们的离散程度又没有控制, 音质还是难于充分保证。

上述讨论并不是说混响时间不必再计算了, 而是想指出我们不应满足于目前习用的混响时间计算法, 从而积极地探索其它计算法, 使结果更接近实际一些。譬如说能不能算出厅堂内不同点的不同混响时间来, 或者在单一混响时间之外再给出一个变动的范围等。如果能做到这一点, 即使工作量大些, 对提高厅堂音质设计的质量来说也是值得的。

2. 稳态声场分布 广泛介绍和采用的稳态声场分布计算式是:

$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (2)$$

式中 L_p 为厅堂中某点的声强级 (dB), L_w 为声源声功率级 (dB), Q 为声源指向性因子, r 为

接收点与声源距离 (m), R 为厅堂的房间常数 (m^2)。

从式 (2) 可以看出声场只受到 Q 、 r 和 R 的影响。在无指向声源情况下 $Q = 1$, 这时只有 r 和 R 起作用。 r 决定了直达声场, 而 R 则决定了混响声场。由于 R 是不变的, 所以混响声场也是不变的。因此从式 (2) 的计算只能得到声场的声级是随 r 的增大而单调地减小, 并且最后趋于定值。然而已有不少文献证明室内的混响声场是不均匀的^[2]。而且某些早期反射对声场也有影响。我们曾就某厅堂的声场分布作过测量和计算。所用信号为 250c/s 倍频带白噪声, 经十二面体扬声器发出。厅堂的吸声量是根据混响时间的测量结果计算得到为 440 m^2 。在厅堂内由前至后选了九个点作比较, 其结果如下表:

表 3 厅堂内声场分布实测和计算比较表

点 次 序	1	2	3	4	5	6	7	8	9
与声源距离 (m)	6.21	10.87	12.08	15.67	17.03	20.25	22.02	25.97	28.05
实测值 (dB)	0	-2	-3	-3	-5	-4	-4	-5	-4
计算值 (dB)	0	-0.6	-0.67	-0.77	-0.79	-0.83	-0.85	-0.87	-0.88

由表 3 可以看到, 根据式 (2) 的计算根本不能反应厅堂内实际的声场分布。这样的计算当然不能保证声场接近均匀。因此必须另觅其它的途径来计算, 使在设计时就能掌握有关点的声级, 然后再根据均匀的要求来调整厅堂的体形和吸声材料的分布。

3. 其它厅堂音质参数 近来在厅堂音质的探讨中, 早期反射声占有愈来愈重要的位置^[3]。一般认为, 早到的反射声作用大一些, 迟来的作用小一些, 再迟来的就认为是无用甚至是有害的了。若用数学形式来表达这一概念就是:

$$N = \int_0^{\infty} \alpha(t) [g(t)]^2 dt \quad (3)$$

式中 N 为接收点所受到的声能的总作用, $\alpha(t)$ 为随时间变化的计权函数, $g(t)$ 为接收点声压的函数。

目前对 $\alpha(t)$ 的见解还不一致。虽然有人定义了声学比等参数, 但并没有把反射声到达

接收点的方向考虑在内。应该说早期反射声的方向对接收点的音质是有相当大的影响的。也有人给稳态声场扩散下了定义^[4-6], 并在定义中对声场的方向性给予了充分的考虑, 但又苦于在设计中尚无法进行稳态声场的计算。因此这些参数只能对探讨厅堂音质有所帮助, 还不能对厅堂音质设计起到可靠的指导作用。另外也还有一些新的见解被提出来, 但由于比起上述的一些还更不成熟, 所以此地就不讨论了。

4. 厅堂音质模型试验 声学法厅堂音质模型试验已有数十年的历史。但对它的作用还存在不同的看法。有人认为它不仅能预测出混响时间、声场分布、脉冲响应、传声增益等一系列声学参数, 甚至还能把音乐录音在模型内快速放录, 然后再拿出来慢放还原而进行主观评价^[7]。但也有人认为音质模型试验, 目前比较可靠的还只是混响时间、声场分布的测量和观察早期反射声的情况等。

不可否认,在模型中测量混响时间、声场分布比现在的手算办法要可靠得多。但存在的问题是制作模型费时太久。而且厅堂内吸声材料的模拟又只能在比较窄的频带内进行。因此若要测几个频带就必须更换几种不同的材料,这样所需的时间就更长。结果模型音质试验只能作为验证或总结经验之用,起不到辅助设计的作用。这个突出的矛盾只有通过寻求简化模型的制作和加快测试过程来解决。而且若一旦厅堂混响时间和声场分布有了较准确而又实用的计算办法时,远赶不上设计进度的模型试验就要相形失色了。因此厅堂模型音质试验在谋求加快进度以直接为音质设计服务的同时,还必须开辟新的领域使其发挥更大的作用。例如在模型中研究声场扩散以及其它新的音质参数等。这样比在实际厅堂中去研究测量要节约很多的人力和时间。当然它也还不能完全代替在实际厅堂中的测量研究。

关于在模型内作反射声图谱的测量,确实也有一定的帮助。但由于声波对界面的入射大多是倾斜的,而模型中材料的模拟都是以混响室吸声系数为依据,因此模拟得并不全面。它只能反映早期反射声序列,而在相对的幅度方面就可能不是实际情况。为了改善对反射声的模拟,在界面性能符合局部反应条件下,可以采用模拟法向声阻抗率的办法。若取厅堂中材料的法向声阻抗率 Z 等于模型中相应材料的法向声阻抗率 Z' ,则厅堂中材料的反射系数 R_θ 和模型中材料的反射系数 R'_θ 之间有下列关系

$$R_\theta = \frac{Z \cos \theta - \rho_0 c}{Z \cos \theta + \rho_0 c} = \frac{Z' \cos \theta - \rho_0 c}{Z' \cos \theta + \rho_0 c} = R'_\theta \quad (4)$$

式中 θ 为声音对材料表面的入射角, $\rho_0 c$ 为空气的特性阻抗。

这样就解决了倾斜入射反射系数的模拟。因而不不管是瞬态还是稳态,都可以得到较为接近实际的结果。但是怎样作法向声阻抗率的模拟测量,还有待探讨实践。而且观众席、穿孔板、帘幕等这时该怎样处理,也是要探索解决的问题。

应用声学

至于在模型中模拟传声增益,或是在模型中快速放录某些音乐,然后再慢放来评定音质,在目前仪器、电声器材的频率响应、指向性等还不能很好地模拟实物的情况下,是没有什么实用价值的。尤其是建筑材料,目前还很困难在广大的频率范围上同时进行模拟,这就使得所谓模型内音质的主观评价失去了意义。

上面将厅堂音质设计的现状作了概略的介绍,并讨论了它们的一些不确定因素。如果再考虑到前面提到的主观评价所存在的问题,那么便可看出音质设计之所以没有把握的原因。为了突破这种困境,必须正视这些问题,并积极谋求解决的办法,才能使音质设计早日走上更为实用的道路。

三、厅堂中某一点接收到的声音的变化过程

厅堂中声源发出的声音,将经由厅堂的空间和界面传输给观众。声源停止后,观众听到的声音并不立即停止而是有一段衰减过程。因此观众在某点听到的声音变化将如图 2。

图 2 中纵座标表示声压,横座标表示经过的时间。我们把整个过程划分为成长($a \rightarrow c$)、稳态($c \rightarrow d$)、衰减($d \rightarrow f$)三个阶段。在成长最初很短的时间里,(图中 $a \rightarrow b$ 所示的时间),首先来的是直接声,继之而来的是各界面的反射声。它们到达的时间都有一定的间隔,这就是现在研究得很广泛的早期反射声阶段。在 $b \rightarrow c$ 时间里,到达的反射声愈来愈多,互相重叠直至稳态阶段 $c \rightarrow d$ 。到达 d 点后,首先消失的是直接声,继之依次消失的是各早期反射声。而且它们消失的顺序和成长的顺序一样。再后面是 $e \rightarrow f$ 阶段,这时消失的反射声已经很多,而声音的衰减则逐渐转由混响的衰减所决定。

在实际厅堂中,语言和音乐都是一系列脉冲或是不稳定的声音。因此研究厅堂中稳态情况,例如混响时间、声场分布、扩散等固然需要,但对瞬态方面的研究,包括脉冲声的衰减、方向以及瞬态的声场变化等似应赋予更多的注意。

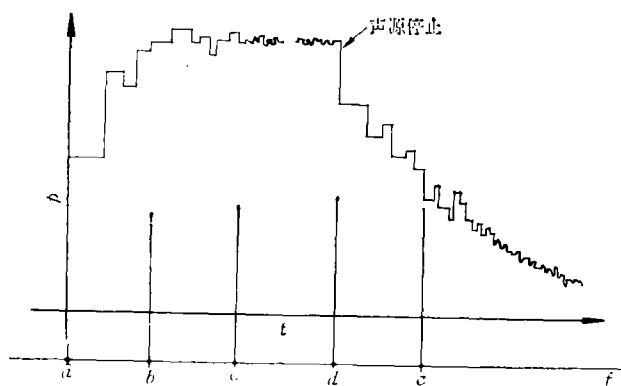


图2 厅堂中各点声音变化过程图
a→c 成长, c→d 稳态, d→f 衰减.



图3 厅堂中各点脉冲声音变化过程图,划线区域是声源发出的脉冲幅度及宽度.

如果我们着眼于脉冲声,那么厅堂中各点声音变化过程将如图3.从图3可以看出,声音已只剩下成长和衰减的交替变化了.其中成长过程的时宽完全由脉冲宽度所决定.而衰减过程则由于有继之而来的各个反射声和正在逐个消失的反射声,它们综合的结果便很复杂.实际语言和音乐由于并不是图中所示脉冲方波,情况还要复杂不少.但不管怎样,只要我们掌握了各反射声的情况,那么成长和衰减过程总是可以得到的.

对成长过程的研究,实际上就是对早期反射声的研究.对早期衰减过程的研究,实际上就是对最初一段混响时间的研究.混响时间的最初一段,由于起伏过大,因此有人主张最初5dB的衰减不计入内.这样固然在混响时间的读数方面有所方便,但从厅堂音质来说,这5dB的早期衰减的变化情况,也可能是不容忽视的.而且正如上面所指出的早期衰减和早期反射有着内在的密切联系,因而对其中之一的研究也

将有助于对另一的了解.

对早期反射和早期衰减的研究,最有利的武器莫过于利用厅堂内反射声线的方法了.而厅堂内混响的情况,虽然从表面来看好象和反射声线没有多大联系,但由于混响声场也无非是由极多的反射声综合而成,因此它们之间的关系总是可以用适当方式加以计算的.所以如果说要寻找新的厅堂音质的研究途径,那么几何反射声的研究应说是极有前景的手段之一.而且几何反射声的计算,只要在厅堂体形和装修初步拟订后就可以进行.若能保证施工时不作改变,那么计算结果和实际也应该是符合的.这样我们就有条件把计算结果和改进方法后的主观评价相对照,订出各项指标.然后再根据这些指标进行设计,再与主观反应对照,进一步完善这些指标.如此周而复始地进行,必将有助于厅堂质设计的逐步完善而达到科学可靠的地步.

综合以上各节所述,可见1.厅堂音质主观评价法必须改进,成立专业或兼职的演奏和评价队伍势在必行.2.厅堂几何反射声学虽然已经很古老,但还应着力研究发展并在实际工作中加以运用.

参 考 文 献

- [1] 建筑科学研究院物理所,建筑物理会议资料之二,建筑声学选集,1960,38.

(下转第27页)

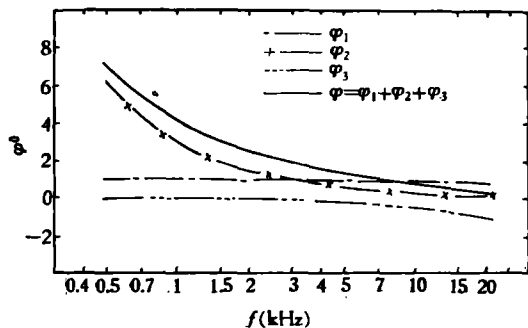


图3 相位与工作频率的曲线

变化 3° ; 离散度为 0.5° 。

四、讨 论

我们看一下 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 及 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 、 $\Delta\varphi_3$ 这二组分量的数值变化, 物理意义及选取方法。

φ_1 及 $\Delta\varphi_1$ 不随工作频率而改变, 在数值上起主要作用的是压电材料的介电损耗 $\text{tg}\delta$ 。如要减小此项数值, 可选用低耗材料, 如选用 PZT-8, 则 φ_1 及 $\Delta\varphi_1$ 可比 PZT-5 材料减小一个量级^[2]。

再看 φ_2 和 $\Delta\varphi_2$, 它们是随工作频率上升而减小的, 此项是由前置放大器输入阻和水听器低频电容组成的高通网络的相位影响。要减小此项值, 主要靠提高前置放大器的输入阻及增大水听器的低频电容。

第三项 φ_3 及 $\Delta\varphi_3$ 是随工作频率升高而增大的。此项数值主要决定于工作频率和水听器基频之比。减小此项的方向是设计带宽更宽的水听器。

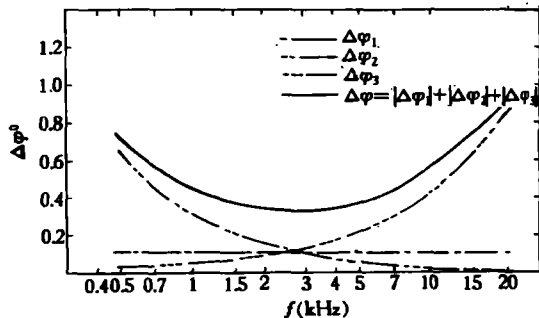


图4 相位离散与工作频率的曲线

我们推导关系式是基于水听器的基频等效电路, 如在基频以下有寄生振动就会使 φ_3 及 $\Delta\varphi_3$ 的值增大。这就要求水听器要合理设计, 在基频下接收灵敏度响应平坦, 无明显共振峰出现。至于比基频频率更高的高次模, 其影响是很小的。

五、结 论

我们推导的利用水听器常用特性参数表示的相位及其离散度的计算关系式, 使有相位要求的水听器的设计及参数选择有了定量的依据, 尤其是对一些由于条件限制, 结构尺寸不适宜实测的水听器阵的相位及其离散度有一个定量的估算。这在实用上是很必要的。

参 考 文 献

- [1] R. H. 秋林, 水声学的理论基础, 科学出版社, 1959, 60—72.
- [2] H. Jaffe and D. A. BarLincourt "Piezoelectric Transducer Materials" Proc. IEEE 53, (1965), 1372.

(上接第12页)

- [2] R. Plomp, H. J. M. Steenken, *Acustica*, **38** (1973), 50.
- [3] H. Kuttuff, «Room Acoustics», Applied Science Pub. Ltd. London, 1973, 180.
- [4] 马大猷 王晓震, 建筑物理会议资料之二, 建筑声学选集, 1960, 66.

- [5] E. G. Richardson, E. Meyer, «Technical Aspects of Sound» III, 1962, 243.
- [6] Б.В. Фурдыев, 声学译丛之四, 建筑声学, 上海市物理学会声学工作委员会主编, 1962, 1.
- [7] H. D. Harwood, A. N. Burd, *Acustica*, **28** (1973), 330.