

礼堂音质——测试和模拟的比较

戴 根 华 郑 敏 华

(中国科学院声学研究所)

1983 年 11 月 25 日收到

摘要 用一台微处理机模拟了一个普通礼堂的音质,主要是混响时间和声场起伏。混响时间的计算、测试与模拟结果之间的比较表明,在正确选用观众吸声量后,模拟得到的混响时间比按公式计算得到的混响时间更接近实验结果,在 125Hz 到 4000Hz 的频率范围内,平均相对偏差小于 10%,而声场起伏的测试值与模拟值大致相符。文中还讨论了观众吸收及模拟中的一些细节问题。

ACOUSTICAL QUALITY OF HALLS—THE COMPARISON OF SIMULATION WITH EXPERIMENT

DAI GEN-HUA ZHEN MIN-HUA

(*Institute of Acoustics, Academia Sinica*)

Received November 25, 1983

Abstract The acoustical quality of an ordinary hall, namely the reverberation time and the spatial non-uniformity of sound pressure level in audience area, was simulated on a microcomputer. Comparison between calculation, measurement and simulation of reverberation time shows that the reverberation time from simulation is closer to that from measurement, if the absorption of the audience is properly chosen, in the frequency range from 125 to 4000 Hz, the average deviation is less than 10%. For the spatial non-uniformity of sound pressure level, there is a good correspondency between the simulation and the measurement. In addition, some details in simulation were discussed.

一、引 言

用计算机对室内的声学现象作模拟研究,已有 20 多年的历史,研究内容涉及各个方面,诸如厅堂的脉冲响应,声能的时间分布和方向分布^[1];吸声材料的布置和房间形状对混响时间的影响^[2-4];悬挂扩散板的混响室中的声衰变^[5];以及用声线法评价和预测厅堂音质的实际经验^[6]。其中一些研究证明了为建筑师沿用几十年的混响公式有根本性的缺陷,使用时必须特别注意声场是否有满意的扩散,扩散不够时测得的混响时间会明显的比预期值短。另一些研究又为建筑师指出了前景,可以用计算机代替传统的比例模型技术,来预测厅堂的混响时间,选择合适的体型以避免可能产生的音质缺陷。Krokstad 等人已积累了十五年经验,他们为挪

威和欧洲的几家剧院厅堂提供了设计和咨询。

我们以新建成的中关村礼堂为例,用一台微处理机(HP 9845B)进行了音质的计算、测试和模拟的比较研究。中关村礼堂是一个普通的大众化多功能礼堂,研究的音质指标主要是混响时间。观众吸收在满场所占比例很大。在正确选用观众吸收后,混响时间的模拟值与实测值之间的偏差显著小于计算值与实测值之间的偏差。模拟的过程是,先建立礼堂的几何数学模型,确定各个面的吸声系数,然后用我们发展的程序进行模拟计算,经过有限的机器时间(在 HP 9845B 上约几十小时)运算,就能完成普通礼堂的音质预测。

二、测试结果

中关村礼堂观众厅长 33.6m,宽 25.2m,平均高度 12m,体积约 9500m³,容纳 1990 位观众,平均每座占体积 4.7m³,面积 0.4m²。整个礼堂呈长方形。观众厅剖面见图 1。

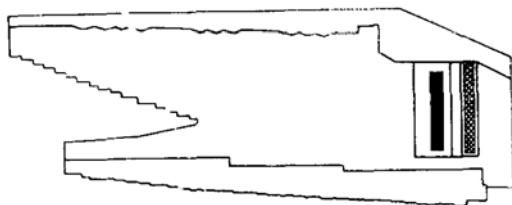


图 1 中关村礼堂观众厅剖面图

Longitudinal section of Zhongguancun Auditorium

1. 混响时间的测量

混响时间的测量按常规进行,发声部分用 BK 4417 建声分析仪和礼堂的扩声系统,接收部分分二种情况,空场测量用 4417,满场测量为了节省时间用 4417 和二台录音机同时进行。

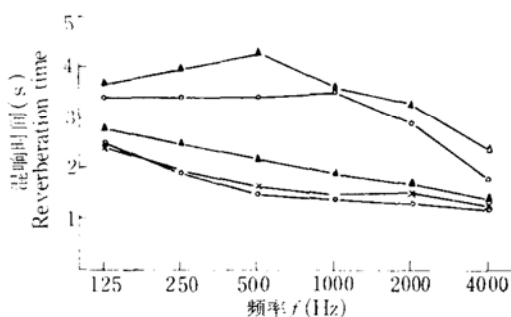


图 2 中关村礼堂混响时间的计算、测试和模拟之间的比较

Comparison between calculation, measurement and simulation of reverberation time of Zhongguancun Auditorium

- △ 空场计算值 calculated in unoccupied,
- 空场测试值, measured in unoccupied,
- ▲ 满场(80%)计算值 calculated in 80% occupied,
- 满场(80%)测试值 measured in 80% occupied,
- × 满场(80%)模拟值 simulated in 80% occupied

录音机记录的混响曲线基本平直,声级随时间线性衰减。空场和满场混响时间见图 2, 分别是九个点和五个点的平均结果,图中还给出了计算值、模拟值及比较(见三、4)。

2. 空场稳态声场起伏的测量

在观众厅对称半场中,选择 44 个点(楼下 28 个,楼上 16 个)进行了测量。测试倍频带仍是 125, 250, 500, 1000, 2000 和 4000Hz。将在楼上和楼下测得的数据一起平均,得每个频带中的平均声压级,然后分别对楼上 16 个点和楼下 28 个点,找出每个频带中与平均声压级偏差最大者(有正有负)作为声场起伏的量度,结果如下表:

表 1 空场稳态声场起伏
Spatial non-uniformity of L_p in audience area

倍频程中心 频率(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
楼下声场 起伏 (dB)	+3.1 -3.7	+2.6 -2.2	+2.4 -1.6	+2.5 -1.5	+2.0 -1.1	+3.5 -1.2
楼上声场 起伏 (dB)	+1.7 -4.3	+1.9 -3.8	+1.5 -1.7	+1.5 -1.4	+1.7 -1.6	+2.0 -3.0

三、模 拟

1. 方法

采用几何声线法,详见文献[4]。为了阅读方便,这里将要点再作简要叙述。设房间由 k 个面组成,各个面的方程是

$$A_i x + B_i y + C_i z - D_i = 0, i = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

(A_i, B_i, C_i) 是面的方向数, D_i 是法线长,用 α_i 表示该面上的吸声系数。一个无指向性点声源位于房间内 (x_0, y_0, z_0) 处,产生单位声能 E_0 的声线。声线方程用方向余弦 (p, q, r) 和参数 t 表示为

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + pt \\ y &= y_0 + qt \\ z &= z_0 + rt \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

解方程(1)和(2),选出合理的解,就得第一次反射点,从而可求出声线的传播时间 T_1 和反射声线的能量 $E_1 = E_0(1 - \alpha_{r_1})$, α_{r_1} 按反射点位置在 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ 中取值。同时计算机产生一个满足 Lambert 扩散反射定律的方向余弦矩阵,反射声线按此方向传播。经 N 次反射后,声线的能量时间关系为

$$\left. \begin{aligned} E_N(T) &= E_0 \prod_{j=1}^N (1 - \alpha_{r_j}) \\ T &= \sum_{j=1}^N T_j \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这种反射过程持续到规定的最小声能或最大时间限到达为止。由式(3)对大量声线平均后就得到房间的混响时间。

为了求得听众区的声场起伏,可将听众区按面积等分成许多小面积,同时在计算机内开辟相同数量的存储单元。当某个小面积受到声线照射时,相应的存储单元就记录下接收到的能量。长时间的平均结果就是稳态声场起伏。

2. 模型

参考中关村礼堂的建筑图,决定模型房间由 13 个平面组成,如图 3 所示。这个模型基本反映了礼堂的轮廓。平面数增加,机器时间急剧增加,这对微处理机来说是不能胜任的。

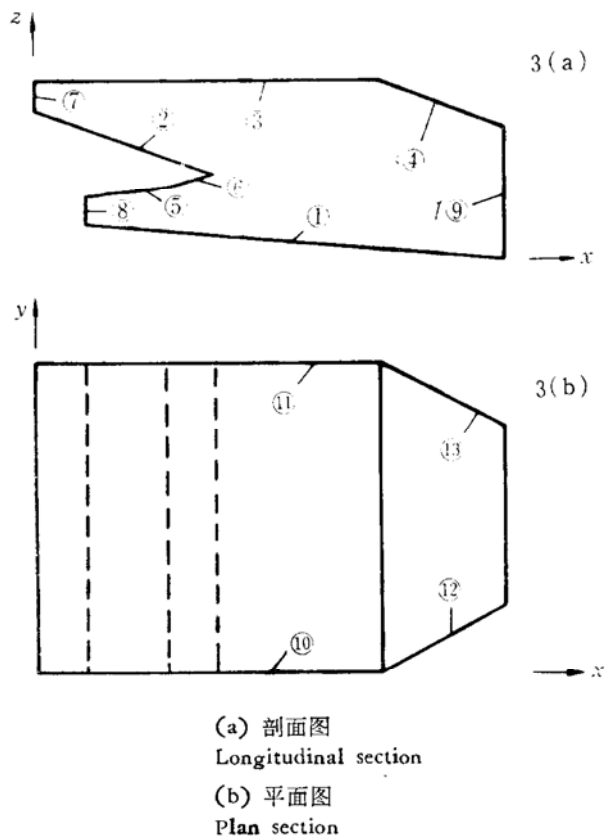


图 3 礼堂的模型,共有 13 个面组成,各个面的方程见正文
Model hall consisting of 13 planes

3. 数据准备

房间各个平面的方向数 (A_i, B_i, C_i) 和法线长 D_i 确定房间的几何形状,是模拟中的输入量。13 个面的具体数据列于表 2。

各个面的吸声系数 α_i 是模拟中的另一批输入量。吸声系数是指每个面上的平均值。面上尺寸很小而吸声系数与其他部位不同的建筑部位,例如通风孔等,不必单独考虑。如设两条声线交角 5° ,经过一个平均自由程后它们之间的距离已是 0.89m ,即声线与这种小部位的碰撞机会是很少的。为反映这类小部位时音质的影响,必须大大增加声线数目。木板,水泥,橡胶,丝绒等普通建筑和装饰材料的吸声系数有现成的图表可查。观众吸声在满场时所占比例很大,是影响礼堂音质的重要因素。正确地选用观众吸声系数是个关键问题,而这方面的数据又彼此分散。比较国内外的资料^[7]后,我们选用的每名观众的吸声量列于表 3。

表 2 礼堂模型的各个面的方向数和法线长
Direction numbers and normal lengths of the planes of the model hall

i	A_i	B_i	C_i	D_i
1	0.08893	0	0.99604	3.33495
2	0.39491	0	0.91872	11.20837
3	0	0	1	14.8
4	-0.35522	0	-0.93478	-23.60329
5	0.05224	0	-0.99863	-5.18885
6	0.22723	0	-0.97384	-3.22665
7	1	0	0	0
8	1	0	0	3.9
9	1	0	0	37.5
10	0	1	0	0
11	0	1	0	25.2
12	-0.56231	0.82693	0	-16.86931
13	-0.56231	-0.82693	0	-37.70785

表 3 每名观众吸声量(m^2)
Absorption of a single person

频率(Hz) Frequency	125	250	500	1000	2000	4000
吸声量 Absorption(m^2)	0.10	0.20	0.25	0.27	0.30	0.30

此外,各个面对 x, y, z 三条轴的交角也是模拟所必需的,在确定反射声线的走向时要用到。

4. 结果和比较

混响时间的模拟结果以“×”示于图 2。由图可见,模拟与实测之间的最大差值为 0.2s, 平

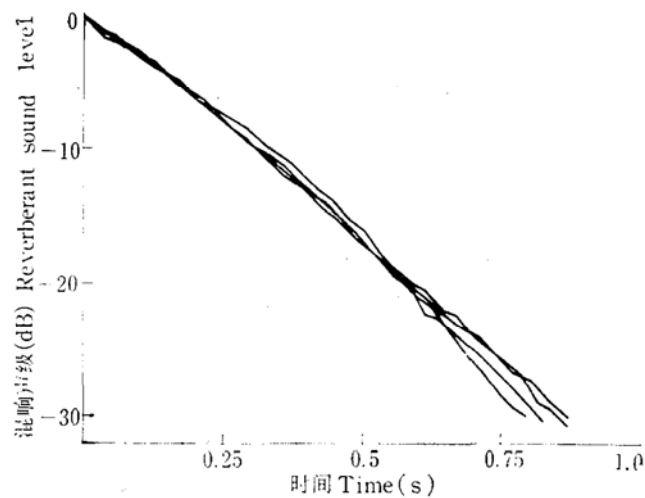


图 4 500Hz 的混响曲线,是对四个不同声源位置模拟得到的
Reverberation curves at 500Hz for 4 positions of sound source

均偏差小于 10%, 而计算与实测之间的最大偏差为 0.6s, 平均偏差达 25%。显然模拟优于计算而更接近于实测。这是十分明白的, 因为计算用的公式没有反映礼堂的几何形状及吸声体的分布对混响时间的影响, 仅适用于完全扩散的声场, 而这种完全扩散的声场实际上是不能实现的。模拟已将礼堂形状和吸声体的分布的影响计及在内, 得到的混响时间更接近实测数据就很自然的了。

图 4 是 500Hz 的混响曲线, 是对四个不同声源位置模拟得到的, 声源位置对结果的影响很小。

声场起伏的模拟由于机器时间太长而未全部进行, 只对楼下第 13 排取其中 25 个坐椅面积作了模拟。同时又由于几何声线模拟只适用于中高频范围, 所以我们仅在 500, 1000, 2000, 4000Hz 的频率上作了模拟。所得四个频带上峰峰起伏的平均值为 4.3dB。从表 1 中, 求得中高频段实测全场峰峰起伏的平均值为 3.8dB, 二者基本相符。

四、结 语

本文的研究表明, 用一台微处理机是可以比较正确的预测一个礼堂的混响时间的。观众的吸声量可采用表 3 建议的数值。还可以模拟早期反射声的方向分布和时间分布, 但没有实测资料可资对比。

要想对音质要求高而体型复杂的大型厅堂作全面的音质预测, 模型房间的平面必须增加到上百个, 声线增加到上万条, 一台中型计算机的运算时间将是上百个小时, 而数据的准备时间为两星期左右。这对建筑师似乎仍有相当大的吸引力。

该工作是在马大猷教授和陈通教授指导下进行的, 徐协海同志参加部分工作, 工作中还得到声学所九室许多同志的支持, 作者向他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Krokstad, A., Strøm, S. and Sørnsdal, S., "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique", *J. Sound Vib.*, 8(1968), 118.
- [2] Schroeder, M. R., "Digital simulation of sound transmission in reverberant spaces", *J. Acoust. Soc. Am.*, 47(1970), 424.
- [3] Kuttruff, H., "Simulierte Nachhallkurven in Rechteckräumen mit diffusen Schallfeld", *Acustica*, 25(1971), 333.
- [4] Dai Genhua, "Computer studies of sound field", *Chinese journal of Acoustics*, 3(1983).
- [5] Kuttruff, H., "Sound decay in reverberation chamber with diffusing elements", *J. Acoust. Soc. Am.*, 69(1981), 1716.
- [6] Krokstad, A., Strøm, S. and Sørnsdal, S., *The 103rd Meeting of The Acoustical Society of America*, 1982.
- [7] 徐之江, 上海体育馆音质设计, 声学技术, 1(1982), 30.