

厅堂中总声压级的修正计算

蒋国荣 王季卿

(同济大学声学研究所 上海 200092)

1997 年 8 月 12 日收到

摘要 完全扩散声场中的总声压级计算公式是假设混响声能在厅堂中的分布各处相等,与接收点的位置无关。实测发现该公式的计算值偏高,特别当接收点在临界距离以外时。本文提出了一个总声压级计算的修正公式,它与实测及计算机模拟的值符合较好。

关键词 室内声学,声场修正计算,大厅设计

A revised prediction of the total sound pressure level in an auditorium

Jiang Guorong Wang Jiqing

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract The classical expression for the total sound level distribution in an auditorium over-estimates the reverberant energy, which is assumed to be a constant to all receiving points beyond the critical distance in the auditorium. It was found that the predicted values have wide divergence compared with the field measurements, especially when the receivers are far away from the sound source. A revised expression is presented in this paper and the predicted values quite agree with the measured and the computer simulated results as well.

Key words Room acoustics, Sound field revised prediction, Auditorium design

1 引言

厅堂中的响度评价,在很大程度上取决于各处所接收到的总声压级,或者说听到的声压级。Beranek(1990)^[1]认为音乐厅音质评价中有五个重要指标(当然还有其它指标),响度是其中之一,并提出它的权重占 15%。他在较早著作^[2]中把此总声级又分为直达声和混响声两部分来考虑,两者对响度所起的作用为 5:3,即直达声和混响声的权重分别占 9.4% 和

5.6%。安藤四一^[3]则提出最佳音质由四个客观量所决定,其中一项是听到的声压级。本文作者之一^[4]曾提出:在厅堂中早期反射声的能量比总声压级更适合于响度评价,因为观众在厅堂中所听到的音乐或语言是非稳态的,可以看成一个个连续的脉冲,其中早期反射声对响度的作用较大。但对于早期反射声的能量积分范围及后期反射声对响度的作用等细节还有待于主观听音的研究。本文则针对稳态声条件下厅堂中总声压级的计算问题作一探讨。

在封闭空间中要得到各接收点声压级的变化,需对波动方程求解,这对于少数体型及边界条件简单的房间(如平行六面体)是可能的。而实际厅堂的体型、吸声材料布置、扩散程度等具体声学条件相当复杂,要通过波动方程得到总声压级的分布是不现实的。对此通常有两种方法:一是计算机模拟,通过建立厅堂的三维模型及大量的运算,得出设定接收点上的声压级及其它参量。随着模拟方法的不断改进,虽然可以得到较为精确的结果,但其结果的规律性不明确,更主要的是该方法不够简单直观,且需运用专业的计算机模拟软件进行。另一种方法是在统计声学的基础上通过简单的数学公式来描述总声压级在厅堂中的分布。虽然该方法的运用需满足一定的假设条件,只对特定的声场适用,对于实际厅堂只具有统计意义,但因其简单直观,故常可在厅堂方案及初步设计阶段用来估算总声压级的分布。Barron^[5]在反射声能量模型的建立中假设,到达接收点的后期反射声级随到达时间以线性衰减,从而分别导出早期、后期反射声能量随接收点到声源之间距离的关系。这一假设要求厅堂中吸收材料的分布比较均匀,同时吸收系数相对较小。对于完全扩散声场中声压级的分布有大家熟悉的公式:

$$L_p = L_w + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

式中 L_p : 声级; L_w : 声源声功率级; $R = S\alpha/(1-\alpha)$: 房间常数; r : 声源到接收点距离; Q : 声源指向性因子。

该公式所要求的声场为完全扩散,这在实际厅堂中是不可能满足的。R.N. Mile^[6]在理论上证明了厅堂中声场要达到完全扩散,除了各界面的吸声是均匀外,还要求声源到达各界面的直达声能量也必须相等。故实际厅堂中的声场条件与公式(1)的要求相差较大,这就是公式(1)的计算值与实测结果有较大差别的原因。我们在实际厅堂测量中发现:总声压级随接收点到声源的距离 r 增加而衰减(图1)。而

按公式(1)当接收点在混响半径以外时各处的声压级相等。M. Barron^[5]通过对英国17个音乐厅和多功能厅的测试发现,总声压级随接收点到声源距离的衰减率在 $-0.4\text{dB}/10\text{m}$ 到 $-2.0\text{dB}/10\text{m}$ 之间,故公式(1)对于厅堂中的总声压级计算值比实测值明显偏高。

2 厅堂中总声压级的修正公式

我们从统计声学的基础出发,提出厅堂中各接收点上的反射声能量模型,从而导出非完全扩散声场中总声压级的修正计算公式。由声像法的原理可知:接收点上的总反射声能密度 E_R 为各虚声像在該点的能量密度之和。

$$E_R = \frac{W}{c} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(1-\alpha)^{n_i}}{4\pi r_i^2} \cdot \exp(-r_i m) \quad (2)$$

式中 W 为声源声功率; c 为声速。 α 是各墙面的平均吸声系数; n_i 为第 i 个声像的阶数即反射次数; r_i 为第 i 个声像到接收点的距离, m 为空气吸收系数。假设厅堂中声源的各次声像形成连续的声像空间;对于任一接收点,在半径为 r' 范围内的声像数 $N = 4\pi r'^3/3V$, 其中 V 为厅堂的容积,则 $dN = (4\pi r'^2/V)dr'$, 对整个声像空间积分:

$$E_R = \frac{W}{c} \int_{r_1}^{r_2} \frac{4\pi r^2}{4\pi r^2 V} (1-\alpha)^{r/d} \cdot e^{-mr} dr \quad (2a)$$

式中 d 为平均自由程。 r_1, r_2 分别为积分的上下限,对于总声压级 $r_2 = \infty$, 则

$$E_R = \frac{Wd}{Vc(md - \ln(1-\alpha))} \exp(\ln(1-\alpha) / (d-m)r_1) \quad (3)$$

把平均自由程 $d = 4V/S$ 代入(3)式:

$$E_R = \frac{4W}{4mVc - Sc \ln(1-\alpha)} (1-\alpha)^{Sr_1/4V} \cdot \exp(-mr_1); \quad (3a)$$

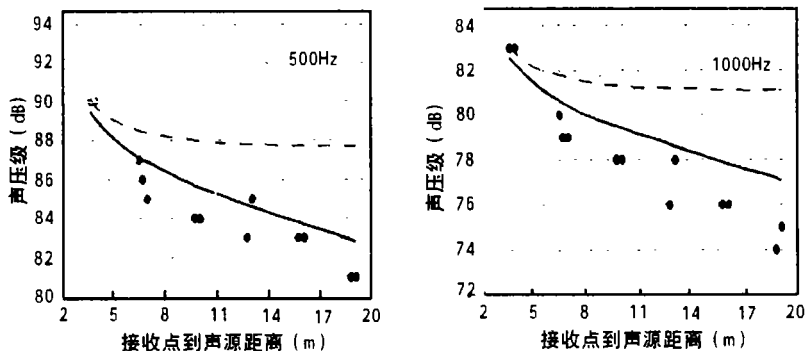


图 1 实测总声压级值与非完全扩散场修正公式 (5)、完全扩散场公式 (1) 的比较

实测值 •； 完全扩散场公式 (1) ---； 非完全扩散场修正公式 (5) —

在声像空间的积分过程中，对于确定的接收点来说并不是所有的声像都是有效的。因为虚声像到接收点的距离一定比到声源的距离 r 大，如果以接收点为球心以 r 为半径作一球，则只有那些分布于球体外的虚声像才是有效的，所以其积分下限 r_1 应取接收点到声源的距离 r ，如果忽略空气吸收，则 (3a) 式简化为：

$$E_R = \frac{4W}{-Sc \ln(1-\alpha)} (1-\alpha)^{Sr/4V} \quad (4)$$

再加上直达声的能量密度，得到如下总声压级的计算公式：

$$L_p = L_w + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha)^{r/d}}{-S \ln(1-\alpha)} \right) \quad (dB) \quad (5)$$

公式 (5) 与公式 (1) 相比，在混响声能部分增加了随接收点到声源距离的衰减因子 r/d 。如果不考虑该衰减因子即设 $r/d = 1$ ，且取 $\ln(1-\alpha)$ 的一阶近似 α ，同时不考虑声源的指向性，则由上式 (5) 得到完全扩散场公式 (1)。

图 1 所示是在一报告厅中测得的总声压级分布，声源为无指向性的球面声源。该报告厅的容积为 $2100m^3$ ，500Hz 和 1000Hz(1/3 倍频程) 的空场混响时间分别为 0.64s 和 0.8s。由图 1 可以看出，修正公式的计算值与实测值符合得相对较好，总声压级随声源到接收点的距离有明显衰减。公式 (1) 与修正公式 (5) 的计

算值最大差别在 500Hz 时达 5dB 左右。在某些测点上修正公式的计算值与实测值相差较大，尤其在 1000Hz 时。

3 与计算机模拟值的比较

为进一步比较修正公式与完全扩散场公式的差别，我们选取了一简单体型的厅堂进行计算机模拟，该厅堂 (图 2) 的容积为 $6270m^3$ 表面积为 $2249m^2$ ，设各表面吸声系数均匀分布，混响时间为 3.15s 到 0.88s，相应的吸声系数为 0.15 到 0.45。10 个接收点均匀分布在厅堂纵轴线的一侧。图 3 为不同混响时间下所对应的计算结果。

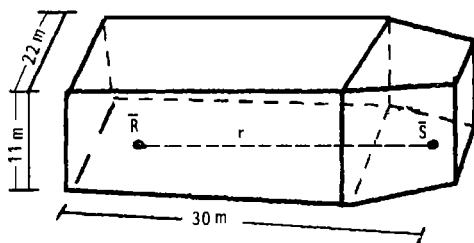


图 2 模拟厅堂，容积 $V=6270m^3$ ；
表面积 $=2240m^2$ ； $\bar{R}$ ：接收点； $\bar{S}$ ：声源。

从图 3 的比较中也可以看出，因修正公式中带有随距离衰减因子，故与计算机模拟结果比较接近，修正公式与完全扩散场公式的差别随混响时间的减小而增加，即混响越短，声场扩散程度越差。而在混响较长的空间中反射声

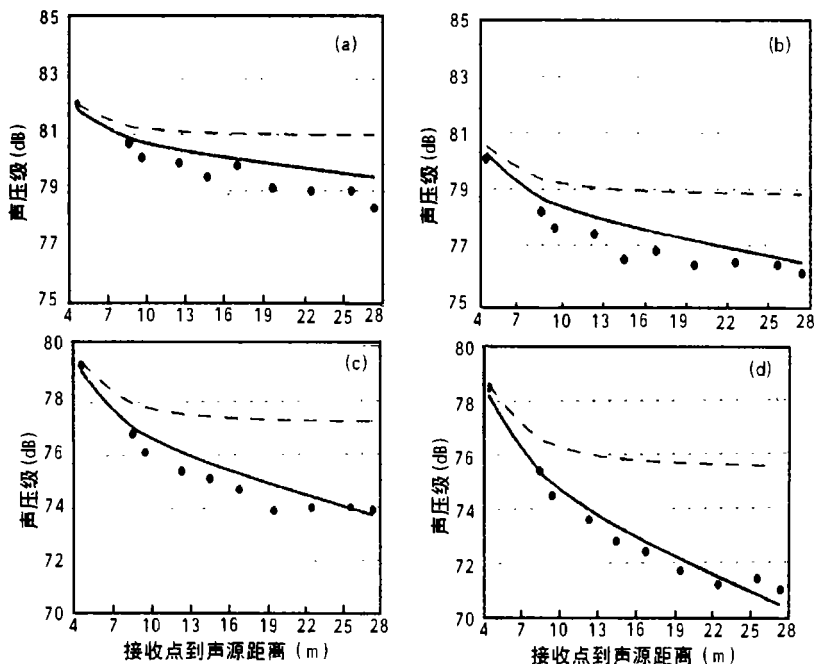


图 3 总声压级与接收点到声源距离的关系

实测值 • ; 完全扩散场公式 (1) ---; 非完全扩散场修正公式 (5) —

(a): $\alpha=0.15$ 混响时间 $RT=3.15s$; (b): $\alpha=0.25$ 混响时间 $RT=1.90s$;

(c): $\alpha=0.35$ 混响时间 $RT=1.31s$; (d): $\alpha=0.45$ 混响时刻 $RT=0.88s$;

能随声源到接收点距离的衰减率较小, 这点从修正公式中可以看出。同时发现, 在大部分接收点, 修正公式的值仍较模拟值偏大, 但比完全扩散场公式有了明显的改进。

4 总结

本文在统计声学的基础上提出实际厅堂中总声压级计算的一种修正公式, 该公式是在一定的假设条件下得出的。该假设条件并不要求声场是完全扩散的, 所以与实际厅堂中的声场条件较为接近, 即用修正公式计算厅堂中的总声压级分布比完全扩散场公式更合适。同时假设条件要求声源的各阶虚像在空间上的分布是均匀的, 且满足统计上的要求, 这对于高阶声像是容易满足的, 但对于低阶的声像因其数量较少, 且受到厅堂复杂体型及接收点位置的影响较大, 故会产生误差。另一方面, 公式中的各阶声像的能量衰减是均匀的 (由平均吸声系数

决定), 这要求厅堂中吸声材料的分布是均匀的, 这也是误差产生的一个原因。最后需指出的是, 修正公式是建立在声像的统计分布基础上的, 故描述的只是大量接收点上总声压级分布的平均规律。对于一些特定位置的接收点, 如那些靠近反射面的接收点, 则与实测值之间的误差较大。

参 考 文 献

- 1 Beranek L L. *Applied Acoustics*, 1990, 31(3):
- 2 Beranek L L. *Music, Acoustics and Architecture*, Wiley, New York, 1962, 438-442.
- 3 Ando, 戴根华译. 音乐厅声学. 北京: 科学出版社, 1990, 76.
- 4 王季卿. 声学学报, 1995, 20(4): 308-314.
- 5 Barron M, Lee L J. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988, 84(2): 618-629.
- 6 Miles R N. *J. Sound and Vibration*, 1984, 92(2): 203-226.