厅堂内声场强度的计算

向 斌 南
（北京市建筑设计院研究所）
1989年2月1日收到

厅堂内的声场强度通常只能通过实测或模型试验得到．但从几何声学的观点，厅堂内一点的声强可以射向该点的直接声和各早期反射声的声强之和加以表达．本文介绍了一种计算直接声和各早期反射声之和的方法．通过对一个剧场的实测和计算对比，证明计算是相当可靠的．计算时反射次数最多为三次，声线长度最长为三倍直接声线长．各点的偏差大部分均小于 1dB．若计算满场情况或增加反射次数和计算的声线长度，则偏差还可减小．

一、引 言

声场强度的分布是厅堂音质的重要指标之一．在文献中一般是给出下列公式，

$$L_p = L_w + 10\lg\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_0}\right)\text{dB} \qquad (1)$$

式中，L_p 是所计算点的声压级（dB），L_w 是声源的声功率级（dB），Q 是指向性因子，r 是所计算点与声源的距离（m），R_0 是房间常数（m^2）．

但由于(1)式所假定的声场，在厅堂中极少碰到，因而很难期望它与实际情况吻合良好．图1为一实例．

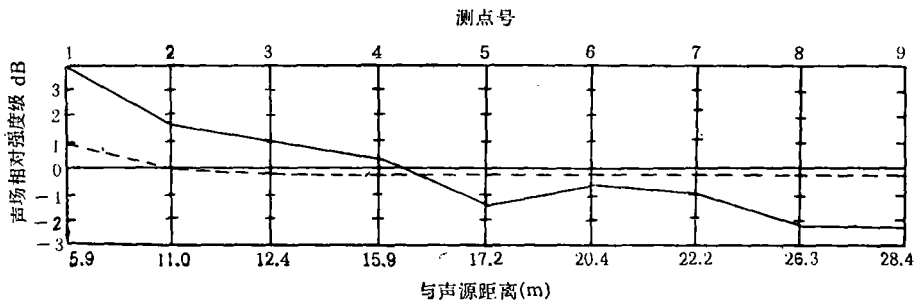

图1 某厅堂内声场强度级的分布
——测量值 ------(1)式计算值（250Hz 倍频带噪声）

本图所示是某厅堂空场情况下，在九个点计算和实测声场强度级的比较．声源为倍频带白噪声，0dB 相当于九个点上声压级的平均值．计算时的 R_0 是从实测混响时间推算得到的．由图可见实测值与计算值相差颇大．用模型试验虽可得到比较接近的结果，但常配合不上设计的进度，而且费用也很大．因此寻找一种比较可靠的声场强度计算法就十分必要了．本文的目的即为介绍这样一种方法．

二、声场强度计算法

从几何声学的观点，可以认为厅堂内任一点上声音的强度为到达该点的直接声和各反射声强度之和．若所计算的声线最长为 r，则到达该点的长度小于 r 的声线的数目，近似地等于以 r 为半径的球所能容纳该厅堂的数目．即若厅堂的容积为 V，声线个数为 N，则 $N \approx$

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$\frac{4\pi r^3}{3V}$，从而 $\Delta N \approx \frac{4\pi r^2}{V}\Delta r$．如厅堂的内表面积为 S，声的平均自由射程为 r'，直接声线的长度为 r_0，则第 n 次反射声的个数为

$$\Delta N_n \approx 16\pi[r_0 + (n-1)r']^2/S \quad (2)$$

若声源声功率为 W，声速为 C，平均声能反射系数为 R，则

直接声能为 $E_0 = W/4\pi r_0^2 C$

一次反射声能为

$$E_1 = (W/4\pi C)\left[\frac{16\pi r_0^2 R}{S(r_0 + r'/2)^2}\right]$$

第 n 次反射声能为

$$E_n = \frac{16\pi W}{4\pi C S}\left[\frac{r_0 + (n-1)r'}{r_0 + (n-1)r' + r'/2}\right]^2 R^n$$

从而这一点的声能为

$$E = \frac{W}{4\pi C}\left[\frac{1}{r_0^2} + \frac{16\pi}{S}\sum_{i=1}^{\infty} \times \left(\frac{r_0 + (i-1)r'}{r_0 + (i-1)r' + r'/2}\right)^2 R^i\right] \quad (3)$$

当然实际上上式右边并不需要计算至无穷．如计算的最长声线为 $l = 3r_0$，可以认为较 l 更长的声线已很密集而趋于连续，于是此后的声线所具有的声能之和可表为

$$E' = \frac{W}{4\pi C}\int_l^{\infty}\frac{R^{r/r'}}{r^2}dr = \frac{W}{4\pi C} \times \left\{\frac{R^{l/r'}}{l} - \frac{\ln R}{r'}\left[E_i\left(-\frac{l}{r'}\ln\frac{1}{R}\right)\right]\right\} \quad (4)$$

式中

$$E_i(x) = 0.5772 + \ln(-x) + \sum_{j=1}^{\infty}\frac{1}{j \cdot j!}(x)^j,$$

$$x = -\frac{l}{r'}\ln\frac{1}{R}$$

为了说明 E' 可以忽略，不妨举一通常的厅堂来计算．若厅堂的内表面积为 2500m²，r' 为 8m，r_0 为 16m，取 $l = 3r_0 = 48$m，则舍去 E' 后所产生的误差为 $D = 10\lg\frac{E + E'}{E}$dB．从而误差为

当 $R = 0.9$ 时，$D = 0.57$dB

$R = 0.8$ 时，$D = 0.25$dB

$R = 0.7$ 时，$D = 0.11$dB

由上述可见，若将长度小于 $3r_0$ 的反射声线的声能相加，则已很接近实际的声场强度了．这就是本文所介绍计算法的出发点．

三、实例计算验证

对一个实际剧场内的九个点，进行了空场声场强度的计算和测量．测量所用信号为倍频带粉红噪声，声源为十二面体的扬声器箱．经磁带记录后再读数．计算程序的简化流程见图 2．

计算时 l 取三倍直接声线长，最多反射次数为三次，声源的声功率为 1W．计算中各界面所取吸声系数见表 1．

计算及实测的结果绘制在图 3 中．图中的 0dB 分别相当于计算和实测的 9 个点的声压级平均值．由图可见，在所比较的54组（9 个点，每个点 6 个频率）数据中，差别小于 1dB 者为 40 组，差别大于 2dB 者为 4 组．若增加反射次数至 4 次，则差别小于 1dB 者为 44 组，差别大于 2dB 者仅为一组（第一点 125Hz）．且差别小于 0.5dB 的达 30 组．由此可见，这里提出的计算方法是比较可靠的．

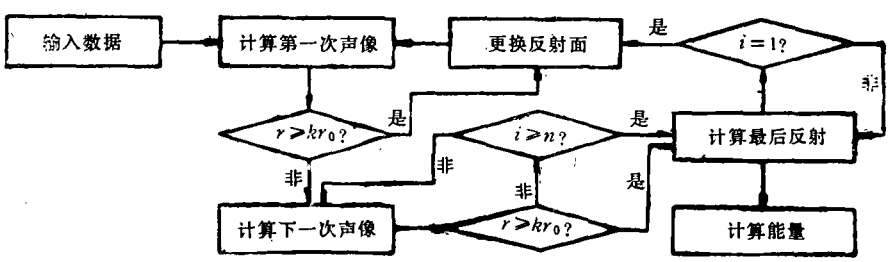

图 2 计算程序简化流程

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　材料吸声系数表

部　位	做　法	频率（Hz）					
		125	250	500	1000	2000	4000
空气		0	0	0	0	0	0.007
墙面吊顶	扶灰	0.02	0.02	0.04	0.04	0.06	0.06
吊顶中央	硬纤维板	0.30	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10
舞台台面	木地板	0.15	0.12	0.10	0.10	0.10	0.05
帷幕	丝绒	0.20	0.27	0.35	0.40	0.50	0.50
坐椅	多层板	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.10

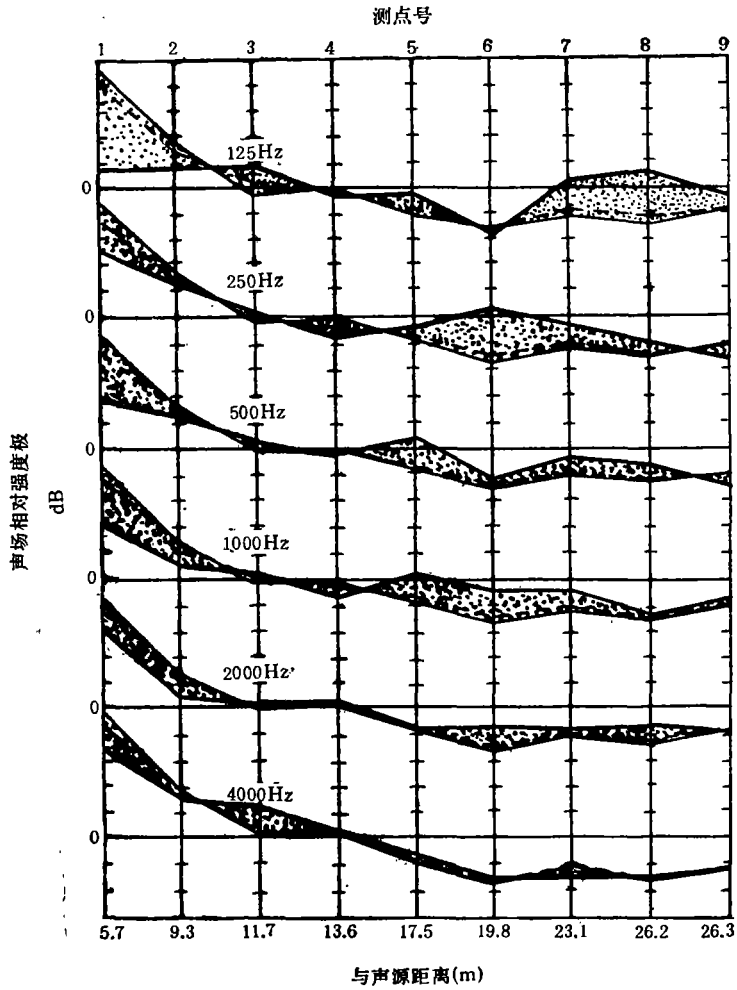

图 3　某剧场九个点上计算和实测的声场强度级

（图中 1 格为 1dB）

——测量值(倍频带噪声)　——计算值(三次反射,$3r_0$)　----计算值(四次反射 160ms)

四、讨　论

误差的产生主要是吸声系数估计不准．尤其是各反射线对界面的入射大多是倾斜的，吸声系数就更无所依据．其它如座位的吸声系数和吊顶的低频吸收都可能有很大的误差．

由图 3 可见，第一点的计算值都高于实测

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

值．这主要是因为第一点离声源较近，此时直接声和前次反射声的声能在该点全部声能中所占的比重较大的缘故．第二点也有类似的情况．

考虑到满场实测困难，所以计算是按空场进行的，以便和实测结果核对．在实际工作中座席可按观众考虑．这样一方面吸声系数估计的误差可较小，而且由于平均吸声系加大，总的计算误差还可以减小．

由图3还可见，计算到四次反射时较计算到三次反射更接近于实测值，但改进并不很大，而且工作量要增加很多．所以通常计算到三次反射，三倍直接声线长已可满足实际需要了．

本文所介绍的方法可开拓应用于多声源扩声系统的声场，厅堂的瞬态扩散系数，清晰率，侧向反射声能系数等音质参数的计算以及噪声预报等．由于本文已证明了计算的可靠性，因此它的开拓应用也是可靠的．

五、结　语

过去声场强度的计算很不准确．一般都是通过实测或模型试验解决．应用本文所介绍的方法，不但在设计过程中即可预知未来厅堂内声场分布的情况，而且所花费用也比做模型便宜得多．若再考虑入它的开拓应用，则它的实用价值是很大的．

最后对本研究所的王峥、陈金京、葛砚刚三位同志参加了本研究的部分工作表示感谢．

SWT 声雷达探测系统

熊小芸　赵松年

（中国科学院大气物理所）

1989年2月18日收到

本文结合 SWT 声雷达探测系统的研制，对声雷达系统的测风、测温原理；衰落信道对声回波的影响；强噪声背景中微弱随机信号的检测问题；以及作者在 SWT 声雷达探测系统的研制过程中首次提出和采用的锁相跟踪滤波（PLTF）检测方法和 V-F-BCD 变换技术作了详细的讨论．对声雷达探测系统的测试作了初步的阐述．

一、引　言

声雷达是七十年代末发展起来的探测低空（大气边界层）风场结构的新型声学设备，是微气象学领域和大气边界层研究的重要探测设备和科研手段，是一种主动式声遥感方法．在探测大气边界层的热结构与湍流特性方面，声雷达具有突出优势，能有效地探测出大气边界层风场与温度结构的实时变化，为环保，机场、局地、基地气象研究提供宝贵的资料．通过研制声雷达系统可以发展大气的随机微弱回波信号的检测方法，可以开拓声波在大气中的传播以及大气温度层结、湍流之间的相互作用机理等方面的研究．

二、SWT 声雷达探测系统的功能与组成

SWT 声雷达探测系统的主要功能是探测大气边界层1000m—1500m 范围内不同高度上的温度梯度和风速风向值，并获得相应的风速风向廓线，有关的统计参量和频谱．

SWT 声雷达探测系统由以下三部分组成：

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net