

消声室内纯音的自由声场偏差的计算

蔡彪

王季卿

(华东交通大学声学组)

(同济大学声学研究所)

本文对已有的关于消声室内纯音的自由声场范围的各种计算方法进行了评论。我们提出的计算中,象Duda、孙广荣那样,只考虑一次反射声的干扰,但却是通过解波动方程,对声场进行了较精确的计算。由于考虑了相位因子,室内声场与自由声场的偏差 $\Delta L(\text{dB})$ 与声源位置、不同方向、不同距离和不同频率均有关系。对这个偏差的计算所得出的一系列结果,是以前不曾具体认识的。本文提供的计算方法,可供消声室设计时采用,也有助于消声室的鉴定和使用。

一、历史的评述

从Bedell等设计第一个消声室起,50年来。消声室已成为电声、噪声、语言、听觉等的重要测量设备。

建造消声室,是为了获得室内的自由声场。在允许的误差内,消声室内的自由声场有多大范围;或者根据用户需要的自由声场范围,如何确定消声室的体型、尺寸和尖劈的吸声系数、截止频率,是消声室设计中的首要问题。

估计自由声场范围,最早是使用Olson公式^[1]:

$$\Delta L = 10 \lg \left[1 + \frac{16\pi r^2(1-\alpha)}{Sa} \right] (\text{dB}) \quad (1)$$

允许偏差 ΔL 给定,即可算出自由声场的半径 r 。正如我们下面的计算所指出的,自由声场的范围与声源位置、尖劈的截止频率、消声室的尺寸、体型等因素有关;不同方位有不同范围;除了正偏差外,还有负偏差;纯音和宽频带声有不同结果。这些,都是Olson公式不能反映的。何况,这个公式是在扩散声场的假设下导出的,显然不符合消声室的强吸声情况。

1977年,Duda指出了Olson公式与物理概念的不相容,提出仅用一次反射声来计算自由声场的偏差^[2]:

$$\Delta L = 20 \lg \left[1 \pm R \left(\sum_{i=1}^6 \frac{r}{d_i} \right) \right] (\text{dB}) \quad (2)$$

其中 $R = \sqrt{1-\alpha}$

孙广荣在Duda之前就给出估计自由声场偏差的公式,1980年,正式发表了他的近似计算公式^[3],也是只考虑一次反射声,在假设消声室是正立方体的条件下,导出了较简单公式:

$$\Delta L = 20 \lg \left(1 \pm 6R \frac{r}{L} \right) (\text{dB}) \quad (3)$$

L 为消声室净空间的边长, r 为到声源的距离。

孙和Duda的理论出发点是对的,他们的结果含有Olson公式所没有的负偏差,也指出了自由声场的范围与声源位置有关。

值得重视的是,孙广荣首先指出纯音和宽频带声有不同的估算公式。(3)式是纯音偏差公式。关于宽频带声的偏差公式,我们将另文专门讨论。

孙和Duda公式的建立,都是假定出现这种极端情况:到达接受点的所有的反射声均同相,且与直达声同相(或反相)。不论从大量的实测结果看,还是从我们用下面的较精

确方法的大量计算看,均远未出现这种极端情况。(2)和(3)式的计算结果,与实测数据相差甚远。如用Duda公式算得南京大学消声室(11.4×7.8×6.7m³),当声源在室中心,其长轴方向偏差±1dB的自由声场范围为1.7m,远低于实测的2.7m^[4]。而对同样上述情况,用孙广荣公式算得其轴向上偏差±1dB的自由声场范围为2.3m;我们用较精确方法计算结果为4.3m(设截止频率为70Hz);若有一个这样大的消声室,其测试结果肯定会远大于2.3m,也会比2.7m大许多。

二、较精确的计算方法

当声源在室内某点发出稳定的纯音时,由于其波动方程有确定的边界条件,所以室内声场有确定解。

假设:

(1) 尖劈顶部连成的平面作为镜象反射平面;声波从尖劈上反射时,声压无相位突变。

(2) 用驻波管中测得的尖劈的垂直吸声系数,作为其各向入射的吸声系数。

(3) 不考虑室内设置对声场的干扰。

(4) 声源为点声源或无指向性声源。

按以上假设,可较易地求出室内声场的解。

当声源为频率 f 的纯音点声源(球面无指向性声源在球面外等效一个在球心的点声源),其声波在各向同性的自由空间传播,设距声中心单位距离处声压的振动方程为

$$p_0 = p_m e^{j(2\pi f t + \varphi_0 - \frac{2\pi f}{c} r)} \quad (4)$$

则波动方程在无边界的特解为

$$p = \frac{p_m}{r} e^{j(2\pi f t + \varphi_0 - \frac{2\pi f}{c} r)} \quad (5)$$

这就是纯音点声源的自由声场。

在强吸声条件下,仅考虑一次反射声对自由声场的干扰,而忽略多次反射声,可获得室内声场足够精确的解。

声源在每个界面上的反射声波,可看成象点处虚声源声波在自由空间传播。因而可以把具有边界的波动方程的解看做是无边界的一个直达声波的波函数和六个象声源在室范围自由空间内的波函数的叠加。这七个点声源的初相相同,频率相同,室内形成一稳定的干涉声场,即确定点的声压有效值是确定的,因而传声器在确定位置的读数,在理论上是确定的、可求的,不是随机的。

室内声场的解为下列波函数的叠加:

$$\left. \begin{aligned} p_d &= \frac{p_m}{r_0} e^{j(2\pi f t + \varphi_0 - \frac{2\pi f}{c} r_0)} \\ p_{r1} &= \frac{R p_m}{r_1} e^{j(2\pi f t + \varphi_0 - \frac{2\pi f}{c} r_1)} \\ p_{r2} &= \frac{R p_m}{r_2} e^{j(2\pi f t + \varphi_0 - \frac{2\pi f}{c} r_2)} \\ p_{r3} &= \frac{R p_m}{r_3} e^{j(2\pi f t + \varphi_0 - \frac{2\pi f}{c} r_3)} \\ p_{r4} &= \frac{R p_m}{r_4} e^{j(2\pi f t + \varphi_0 - \frac{2\pi f}{c} r_4)} \\ p_{r5} &= \frac{R p_m}{r_5} e^{j(2\pi f t + \varphi_0 - \frac{2\pi f}{c} r_5)} \\ p_{r6} &= \frac{R p_m}{r_6} e^{j(2\pi f t + \varphi_0 - \frac{2\pi f}{c} r_6)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

第一个波函数为直达声波,其他六个波函数为象声源的声波(即一次反射声波)。 r_0 为声源到室内空间一点的距离, $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 分别为各个象声源到这一点的距离。

设长方体消声室的三边分别为 L_1, L_2, L_3 。O为室中心,以声源S为坐标原点,分别平

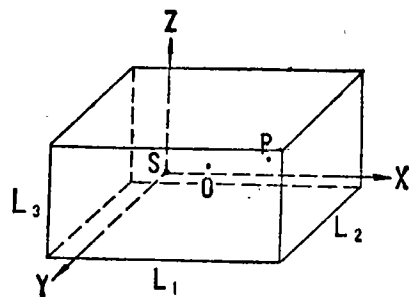


图 1

行于三边作 x 、 y 、 z 坐标轴。若室中心的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , P 为室内任意一点, 坐标为 (x, y, z) , 则各声源到 P 点的距离:

$$\begin{aligned} r_0 &= (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \\ r_1 &= [(L_1 + 2x_0 - x)^2 + y^2 + z^2]^{1/2} \\ r_2 &= [(L_1 - 2x_0 + x)^2 + y^2 + z^2]^{1/2} \\ r_3 &= [x^2 + (L_2 + 2y_0 - y)^2 + z^2]^{1/2} \\ r_4 &= [x^2 + (L_2 - 2y_0 + y)^2 + z^2]^{1/2} \\ r_5 &= [x^2 + y^2 + (L_3 + 2z_0 - z)^2]^{1/2} \\ r_6 &= [x^2 + y^2 + (L_3 - 2z_0 + z)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

室内干涉声场为

$$P = p_d + p_{r_1} + p_{r_2} + p_{r_3} + p_{r_4} + p_{r_5} + p_{r_6} \quad (8)$$

因而, 不难求出声场在某点的声压幅值的表达式, 即复数 p 的模 $|p|$ 。它与直达声(即自由声场)幅值的偏差

$$\Delta L = 20 \lg \frac{|p|}{p_0} \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

三、计算结果的分析

我们用16位微型计算机完成了叠加声场 p 和偏差 ΔL 的计算。离散取点, 算出了 p 和 ΔL 随空间坐标的分布规律。

南京大学消声室的净空间为 $11.4 \times 7.8 \times 6.7 \text{ m}^3$, 尖劈 $\alpha = 0.99$ 的截止频率为 70 Hz 。

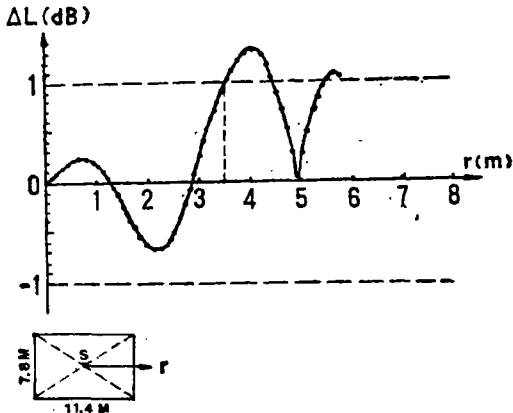


图2 声源在室中心, 沿长轴方向的 ΔL 的分布, ($|\Delta L| \leq 1 \text{ dB}$ 的范围为 3.5 m)

我们首先对它进行了一系列计算, 现将计算结果分析如下。

1. 声源在室中心, 在长轴方向上, 随离声源 S 的距离 r 不同, ΔL 的变化规律如图 2。可以看出, $|\Delta L| \leq 1 \text{ dB}$ 的自由声场范围为 3.5 m 。南京大学的实测值为 2.7 m 。计算值异于实测值的原因有:

(1) 尖劈的斜入射吸声系数和垂直入射吸声系数会有些差别。方启文^[7]虽然只测出中、高频段上它们的差别, 但在低频段上, 它们的差别也可能存在。因此假设(2)可能给我们的计算带来误差, 只是没有实验数据供我们来确定这种误差的大小。

(2) 南京大学鉴定时, 是将声压级随距离变化的实测曲线与理论曲线重叠进行比较^{[4][6]}, 这种方法有目视所产生的人为误差。例如图 3 是该消声室声源在某一位置、沿某一方位的 ΔL 分布规律的计算结果, 在这个方向上的 $|\Delta L| \leq 1 \text{ dB}$ 的范围为 6.4 m 。但即使无其他影响, 用目视比较理论和实测曲线, 有可能仅仅由于 0.1 dB 的目视误差, 而认为 2.4 m 为实测范围。

(3) 室内设置(传声器的夹子和支架、蒙面、地网等)的散射未计。近年来, Zaveri 等曾对传声器的夹子和支架的装配和取向不同而对声场产生的干扰不同进行了系统研究^[5],

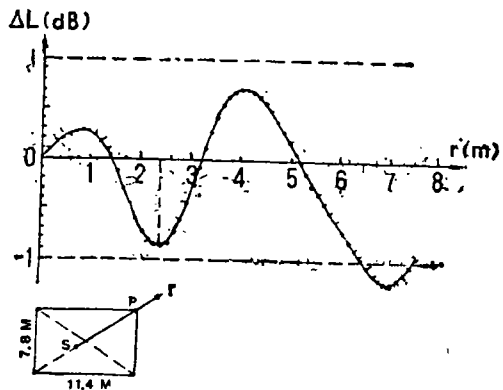


图3 室中心坐标为 $(1, 0.7, 0)$, 通过室中心的水平面对角线的 SP 段上的 ΔL 的分布 ($|\Delta L| \leq 1 \text{ dB}$ 的范围为 6.4 m)。

指出,不利的取向(在中、高频段)可使声场产生 $\pm 0.5dB$ 的偏差。在低频段,如有尺寸较大的设施,其对声场的干扰也是可想而知的。

(4) 鉴定时,带动传声器运动的传动机构的噪声未计。

(5) 实际的尖劈并非完全理想的渐变吸声层,反射波相位的微小变化,也是产生实测和计算的差异的因素之一。

(6) 实测时,当传声器离声源较远,记录仪可能出现信噪比不足的情况,从而增大测试误差。

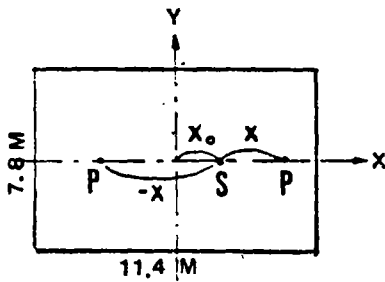
2. 计算表明,沿从声源出发的不同方位,自由声场范围不同。南京大学消声室声

源在室中心时,计算出 $|\Delta L| \leq 1dB$ 的自由声场范围是:沿x轴(平行于11.4m边)3.5m,沿y轴(平行于7.8m边)3.8m,沿水平对角线4.8m,沿空间对角线5.1m。我们还可以用微机直接绘出自由声场的三维空间范围。

3. 自由声场范围与声源位置有关。从表1看出,移动声源,自由声场的范围会发生变化。在 $-x_0$ 的值从0.5m变到0.7m时,似乎自由声场的范围是突变的,实际上是渐变的。离声源2.4m处,当 $-x_0=0.5m$ 时, $\Delta L=-0.86dB$; $-x_0=0.6m$ 时, $\Delta L=-0.93dB$; $-x_0=0.7m$ 时,此处 $|\Delta L|$ 刚刚超过1dB。我们确定自由声场的范围是以 $|\Delta L| \leq 1dB$ 为界线,所以出现表1中的表现的某些“突变”。

表1 (单位: m)

$-x_0$	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5	3.7	3.9	4.1
x	3.5	3.6	3.9	5.0	2.4	2.2	2.2	2.3	3.5	3.4	3.3	3.2	3.2	>3.2	>3.0	2.1	1.9	1.8	1.9	2.0	>1.8	>1.6
$-x$	3.5	3.4	3.4	3.6	5.1	4.9	2.4	2.4	2.6	3.5	3.4	3.3	3.1	3.1	3.3	2.0	1.9	2.0	2.4	2.6	2.5	2.6



南京大学消声室室中心相对声源S沿x轴向负方向移动,使得声源在不同位置。表中数据为计算结果,表明声源在不同位置时,在x轴的正负方向, $|\Delta L| \leq 1dB$ 的范围。

南大的实测值和我们的计算值之间的差异,还由于他们测试时声源并不是准确在室中心^[6],若能提供其测试时声源的精确位置,我们将有不同的计算结果。

从表1还可以看出,声源离开室中心太远,不仅不能增大反而会缩小自由声场的范围,(声源沿其他方位移动的计算也有这个规律),所以声源最好置于室中心附近。

4. 假设南京大学的 $\alpha=0.99$ 的截止频率

表2 11.4×7.8×6.7m³消声室,截止频率不同,自由声场范围不同(声源在室中心,沿长轴方向)。

$\alpha=0.99$ 的截止频率(Hz)	40	50	60	70	80	90	100
$ \Delta L \leq 1dB$ 的范围(m)	3.6	2.2	2.8	3.5	4.3	3.2	3.5

不是70Hz,而是其他值,则其 $|\Delta L| \leq 1dB$ 的范围会不同。表2为我们的计算结果。可以看出,截止频率的数值对自由声场范围的大小有很大影响。

杭州电声厂消声室的尺寸基本仿照南京大学(11.46×7.38×6.49m³),但其截止频率为63Hz,计算表明,当声源在室中心,沿长轴方向的 $|\Delta L| \leq 1dB$ 的范围为2.7m(实测为2.5m^[6]);而沿平行于7.38m边的轴向,其范围>3.5m,较长轴方向大不少,这一点,还有待杭州电声厂的实验验证。

5. 尖劈的吸声系数 α 随频率变化的曲线,一般有一谷点。南京大学消声室在 $f=100$ Hz出现谷点(此时 $\alpha=0.993$)^{[4][6]}。经过计算,

对于100Hz的声波, $|\Delta L| \leq 1\text{dB}$ 的范围与截止频率(70Hz)的声波相近。假如南京大学的尖劈在 $f=90\text{Hz}$ 处出现谷点, 此处 $\alpha=0.993$, 则算得90Hz声波的 $|\Delta L| \leq 1\text{dB}$ 的范围小于70Hz($\alpha=0.99$)的声波的范围。因而不仅要截止频率的声波进行计算, 还应对谷点频率的声波进行计算, 若谷点的范围小于截止频率的, 则要改进尖劈的结构, 以调整谷点的位置。

6. 若分别以对应 $\alpha=0.90, 0.91, 0.92, \dots$ 等的频率为截止频率, 计算结果如图4。可以看出, $\alpha < 0.99$ 时, 所能获得的自由声场很小, 还是用 $\alpha=0.99$ 确定截止频率为宜。当然, 这只是对纯音而言, 对宽频带声则另作别论,

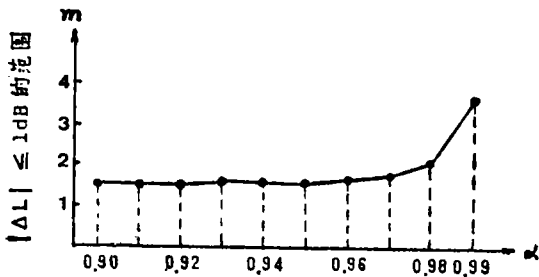


图4 $11.4 \times 7.8 \times 6.7\text{m}^3$ 消声室, 以不同的吸声系数(α)确定尖劈的截止频率, 其自由声场范围不同

7. 我们对不同体型的消声室进行了计算, 结果如表3所列。为了便于比较, 三种

表3 体型对自由声场范围的影响

体型 (m^3)	长轴方向 $ \Delta L \leq 1\text{dB}$ 的范围
$11.4 \times 7.8 \times 6.7$	3.5m
$8.52 \times 8.52 \times 8.52$	3.2m
$21.8 \times 5.0 \times 4.0$	2.0m

体型的内表面积相等 (因为消声室的造价主要决定于尖劈的造价), 截止频率均为70Hz。可见体型是很有影响的。

四、结 论

1. 本文的计算, 相对于以前的一些估算公式来说, 是较精确计算。此计算方法, 可供消声室设计时使用, 以便确定消声室的尺寸、比例、尖劈的吸声系数以及截止频率。以取代以前的与物理概念不符的(Olson)或极粗略的(孙.Duda)的估算。

2. 对于已建成的消声室, 较精确的计算结果和实测结果比较, 可帮助找出并消除或减小尖劈以外干扰自由声场的因素的影响。

3. 使用消声室进行纯音测量时, 较精确计算对声源位置、传声器方位的选取等, 可提供指导性意见。

× × × ×

本文曾得到南京大学孙广荣副教授的一些有益意见, 并审阅了全文, 谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] H. Olson, 声学工程, 科学出版社, (1964) P. 456-459.
- [2] J. Duda, Noise Control Engineering, 9 (1977), 60-67.
- [3] 孙广荣, 电声技术, 总No: 6(1980. 2) P. 64.
- [4] 孙广荣等, 消声室和混响室的声学设计原理, 科学出版社, (1981) p. 12-13, 20, 48, 53
- [5] K. Zaveri and M. Phil, Bk. Technical Review, No. 4, 1985.
- [6] 南京大学物理系声学实验室, 物理学报, 24(1975) P. 254-258.
- [7] 方启文, 声学技术, 3(1984)2期P. 27-28.
- [8] 项端祈等, 杭州电声厂消声室的声学设计 (1986.1)