消声室内宽频带声的自由声场偏差计算

蔡　彪　　王季卿
（华东交通大学）　（同济大学）

继“纯音”之后，我们现在对消声室内宽频带声的自由声场的偏差进行讨论。本文在指出孙广荣公式的定性结果的正确性的同时，还指出了其局限，从而导出长方体消声室、声源不在室中心、各壁面吸声系数不同的一般情况的公式。用微型计算机可以直接描绘出△L在任一方面上的分布以及△L≤1dB的自由声场在任一平面内的范围；这样，不仅清晰了解了自由声场的三维范围，还了解了其他一系列规律。

我们曾经通过解波动方程，较精确地计算了消声室内纯音的声场[1]，其计算公式相当冗长，但使用微型计算机，很方便地完成了它的计算。

机器噪声，一般都是连续频谱，且有相当的频率范围，故又称宽带噪声。测量、分析机器噪声时，需要测定其总声级和各倍频程(或1/3倍频程)的声压级，因此必须弄清宽频带声源在消声室内的自由声场，在允许偏差内，有多大范围。

一、孙广荣公式的局限

由于宽频带的直达声和反射声的迭加是不相干迭加，声场的计算，不同于对纯音声场的计算，此时室内声场的解，只是直达声波和反射声波的能量迭加，不用考虑相位问题，使得计算较为简单。

孙广荣最先导出宽频带声的由自声场偏差公式[2]：

$$\triangle L = 10\lg\left[1+6(1-\alpha)\frac{r_o^2}{L^2}\right](dB) \qquad (1)$$

这个公式对于用来测定机器噪声的消声室具有指导意义，即这类消声室不用追求α≥0.99的垂直吸声系数，只需较小的吸声系数就可以了。

但是，这个公式的局限性在于：

①只适用于正立方体型的消声室；

②声源S只能置于室中心，且传声器离S不太远。若传声器远离声源、例如接近室内边界，则(1)式就不准确。

本文将导出新公式，使之适用于一般情况：长方体型消声室、声源S和测试点P置于任一位置、各面吸声系数不同。并根据所得新公式计算一些有意义的情况。从而得出一些规律，为设计宽频带声专用消声室提供较准确的数据。

二、一般公式的导出

假设：

1.由尖劈顶部组成的平面或平面吸声材料的表面。可视为镜象反射平面。

2.尖劈或平面吸声材料的垂直吸声系数，作为各向入射的斜向吸声系数。

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。

由于界面为强吸声，其吸声系数一般在0.85左右或0.90左右，若忽略多次反射声，只考虑一次反射声对自由声场的干扰，不会

产生明显的误差。

设声源的声功率为W，声速为C，与声源相距r_o的P点处直达声的声能密度

$$E_o=\frac{W}{4\pi r_o^2 C} \tag{2}$$

六个面的一次反射声可看成象点处的虚声源发出的在自由空间传播的声波，它们各自在P点处的声能密度为：

$$E_i=\frac{(1-\alpha_i)W}{4\pi r_i^2\cdot C} \tag{3}$$

$i=1, 2, 3, 4, 5, 6$。

式中r_i为各虚声源到P点的距离，α_i为各界面的吸声系数。P点的总声能密度

$$E=E_o+E_1+E_2+E_3+E_4+E_5+E_6 \tag{4}$$

P点的实际声能密度与直达声场(自由声场)的声能密度偏差

$$\triangle L=10\lg\frac{E}{E_o}=10\lg(1+r_o^2\sum_{i=1}^{6}\frac{1-\alpha_i}{r_i^2})\quad(\mathrm{dB}) \tag{5}$$

设长方体消声室的三边分别为L_1、L_2、L_3，O为室中心(图1)，以声源S为坐标原点平行于三边分别作x、y、z坐标轴。若室中心O点的坐标为(x_o、y_o、z_o)，P点的坐标为(x、y、z)，则声源和各虚声源到P点的距离：

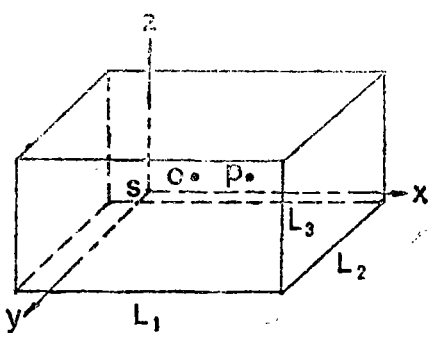

图 1

$$\left.\begin{aligned}
r_o&=(x^2+y^2+z^2)^{\frac{1}{2}}\\
r_1&=[(L_1+2x_o-x)^2+y^2+z^2]^{\frac{1}{2}}\\
r_2&=[(L_1-2x_0+x)^2+y^2+z^2]^{\frac{1}{2}}\\
r_3&=[x^2+(L_2+2y_0-y)^2+z^2]^{\frac{1}{2}}\\
r_4&=[x^2+(L_2-2y_0+y)^2+z^2]^{\frac{1}{2}}\\
r_5&=[x^2+y^2+(L_3+2z_0-z)^2]^{\frac{1}{2}}\\
r_6&=[x^2+y^2+(L_3-2z_0+z)^2]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

将式(6)式代入(5)式。若声源位置确定(已知x_0、y_0、z_0)，任意给定接受点P的位置(x y、z)，各面的吸声系数α_i给定，即可由(5)式算出此位置声场与自由声场偏差的分贝数。

本项计算工作是用微型计算机完成的，下面我们将对计算结果进行讨论。

三、新公式与孙广荣公式的关系

1.设消声室为正立方体，$L_1=L_2=L_3=L$，各面吸声系数相同$\alpha_i=\alpha$。声源在室中心($x_0=y_0=z_0=0$)，P点在坐标为(x，2，0)，当x很小时，(5)式化简为(1)式，此时，新公式和孙广荣公式一致，但当P点远离S，例如P点的坐标为(L/2，0. 0)，即沿x轴方向，离S最远的位置，(1)式简化为

$$\triangle L=10\lg[1+1.5(1-\alpha)]\,(\mathrm{dB}) \tag{7}$$

而(5)式则化简为

$$\triangle L=10\lg[1+1.9(1-\alpha)]\,(\mathrm{dB}) \tag{8}$$

相比之下，(1)式(即孙广荣公式)误差略大。

孙广荣根据(7)式算出：若在$r_0=\frac{L}{2}$处要求声场偏差1dB，只需各壁面材料的吸声系数$\alpha\geqslant0.83$即可[2]。但按本文导出的(8)式算出，这种情况下，需$\alpha\geqslant0.86$才行。

2.事实上，消声室大都为长方体型，运用(5)式对尺寸为$11.4\times7.8\times6.7\mathrm{m}^3$的消声室，(取自南京大学资料)内宽频带声的计算表明：声源置于室中心，要使坐标为(5.7，

0，0)的P点(长轴方向最远点)产生△L≤1 dB的偏差，要求 α≥0.90。

3.当各面吸声系数不等或声源偏离室中心，孙广荣公式则无法计算；而新公式却可较精确地算出。

总之，专门用来测定宽带声源的消声室，其内部六面的吸声系数用不着满足 α≥0.99，只要 α=0.86左右即可。用多层布幕结构或较厚的玻璃棉板(且后留空气层)或简易尖劈来装配消声室内表面，就可获得足够的自由声场范围。这种消声室的造价是较低的。这个具有实用意义的结论，孙广荣1980年在特殊情况下得出，本文把它推广到一般情况。

四、新公式计算结果的分析

尺寸为11.4×7.8×6.7m³的消声室，当声源置于室中心时，沿x方向(平行11.4m边)，声场与自由声场的偏差△L的分析如图2(可用微机直接绘出)，与纯音声场不同〔1〕，

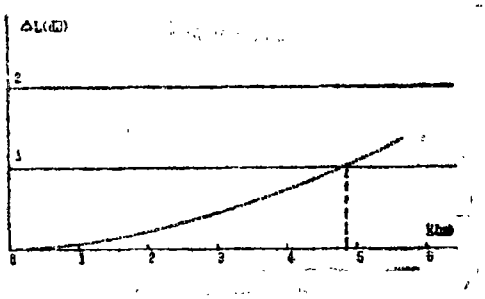

图2 室中心坐标(0，0，0)，α=0.86，x轴上线的△L－r曲线

这是一个单调函数。从图2可以看出，当六面的 α=0.86时，沿x方向，△L≤1dB的范围4.9m。给出不同 α的值，给出不同声源的位置，沿不同方位，都可以用微机很快地绘出相应的△L—r曲线。图3、图4表示另外两种情况的△L—r的曲线。

2.消声室的体型不同，对自由声场的范围或△L的分布会有影响。表1内表面积相同，但体型不同的三种消声室的自由声场范

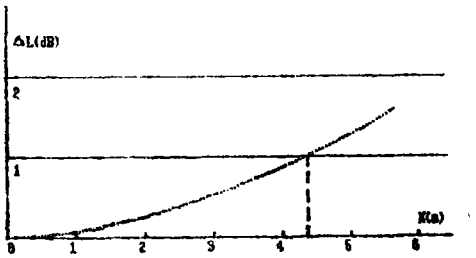

图3 室中心坐标(0，0，0)，α=0.83，x轴上的△L—r曲线

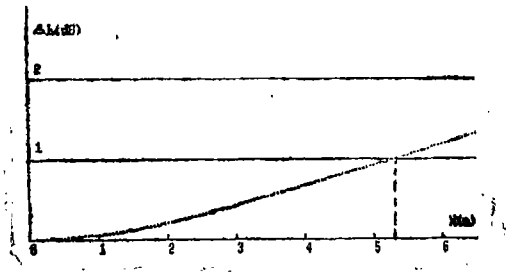

图4 室中心坐标(2，0，0)，α=0.86，x轴上的△L—r曲线

围。大量的计算表明，以三边的比例跟1相差不大的长方体为宜；若用球面布点测声功率，以接近正立方体型为好，狭长体型，或高度比长、宽小得太多，是不好的。

表1 x方向的自由声场范围

体型	声源在室中心，ΔL≤1dB的自由声场范围	
	α=0.83	α=0.86
11.4×7.8×6.7(m³)	4.4 (m)	4.9 (m)
8.52×8.52×8.52(m³)	4.0 (m)	4.2 (m)
21.8×5.0×4.0(m³)	3.4 (m)	4.0 (m)

3.声源朝某个方向偏离室中心，其相反方向上自由声场范围会适当扩大，但顺着偏离的方向，范围会缩小。用微机绘出的图5和图6表示消声室的平面和剖面中△L≤1dB的自由声场范围，使人们能较全面地看出，由于声源偏心△L≤1dB范围的变化情况。除非只需进行某一方位声场的测试，否则，一般来说，声源还是放在室中心为宜。

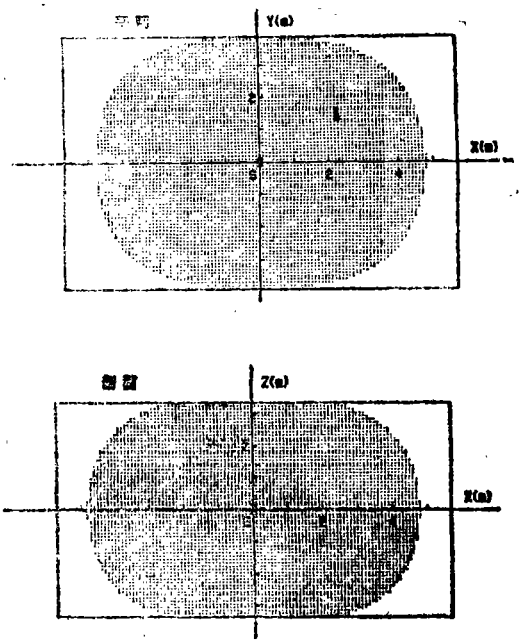

图5 室中心坐标(0, 0, 0)，$\alpha=0.86$，消声室平面内剖面内，$\triangle L=1dB$的范围。

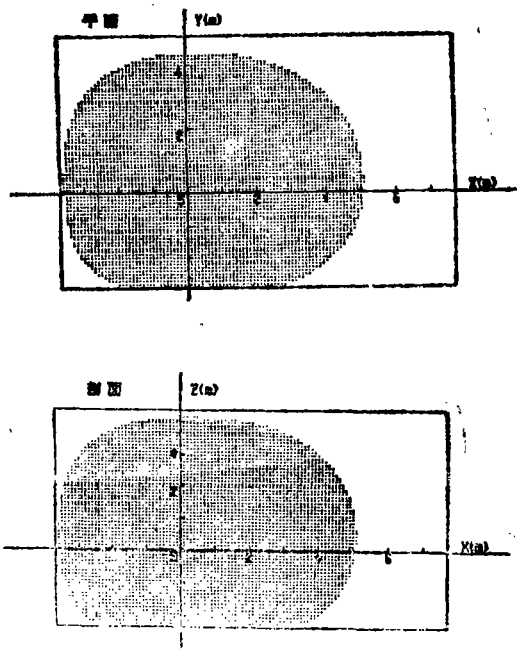

图6 室中心坐标(2, 1, 1)，$\alpha=0.86$，消声室平面内剖面内，$\triangle L\leq 1dB$的范围。

4.有的简易消声室，四壁用吸声尖劈(例如 $\alpha_1=0.99$)，地面和顶面用平面吸声材料(例如 $\alpha_2=0.67$)，或 $\alpha_1=0.95$， $\alpha_2=0.73$。对于$11.4\times7.8\times6.7m^3$的消声室来说，这两种情况的平均吸声系数为0.86。计算表明，它们和六面 $\alpha=0.86$的情况(图5)相比，$\triangle L\leqslant 1dB$的自由声场范围相差不大。图7是 $\alpha_1=0.99$，$\alpha_2=0.067$时，$\triangle L\leqslant 1dB$在平面和剖面中的范围。与图5比较，前者在x方向上，范围稍扩大了，但在z方向上，

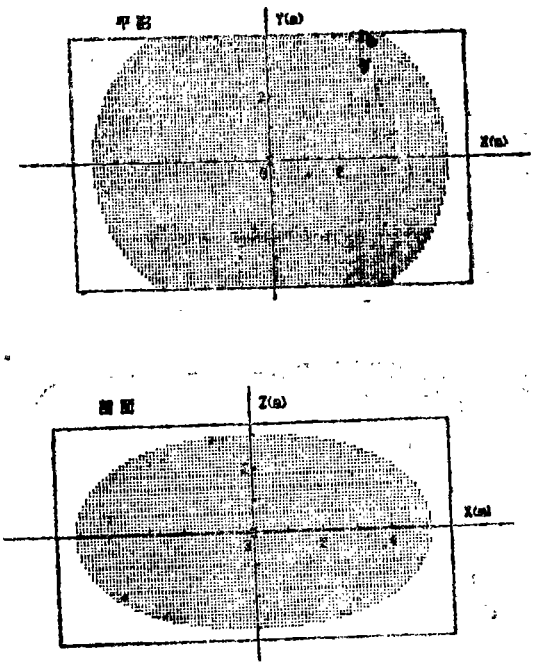

图7 室中心坐标(0, 0, 0)，六面的吸声系数不全相同，$\alpha_1=0.99$(四壁)，$\alpha_2=0.67$顶面和地面，消声室平面内剖面内$\triangle L=1dB$的范围。

范围稍缩小。

仍然是 $\alpha_1=0.99$(四壁)， $\alpha_2=0.67$(顶面和底面)，但当声源由中心向下移至离地面1m高，即室中心坐标为(2.35，0，0)时，则$\triangle L\leqslant 1dB$的范围明显缩小，特别是在地面附近(图8)。

5.对半消声室，也可用公式(5)进行计算，计算结果表明，过去对半消声室自由声

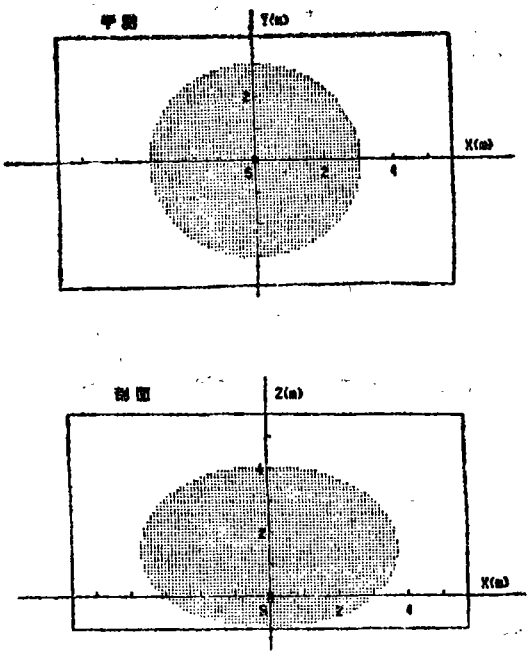

图8 室中心坐标(2.35,0,0)，$\alpha_1=0.99$，(四壁) $\alpha_2=0.67$上下底)，$\Delta L\leq 1dB$的范围。

场的一些认识和作法有改进的必要，对此，我们将在另一篇专文中予以讨论。

五、结束语

对于仅用于测试宽频带声的消声室，可根据式(5)较精确地计算其自由声场范围。设计此类消声室时，可按照用户要求，运用(5)式的计算来选定消声室的体型、尺寸和吸声材料。用微机进行计算和绘图，可以很快地对各种情况进行分析、比较。

对于宽频带声，也有截止频率，因为吸声系数与频率有关，若采用平面吸声材料，则不仅有低限截止频率，还会有高限截止频率。

本文得到南京大学孙广荣教授的审阅，并提出宝贵意见，谨致谢意。

参考文献

〔1〕蔡彪、王季卿，消声室内纯音的自由声场偏差的计算 第五届全国建筑物理学术会议论文，1986年11月17—20日于上海。或见《声学技术》1987年第2期。

〔2〕孙广荣，《电声技术》1980年2期p63—65

上接第6页

参 考 文 献

〔1〕B & K 4418，B & K 2131 说明书。

〔2〕L.C.Sutherland：Review of Experimental Date in Support of a proposed New Method for Computing Atomospheric Absorption Losses. 1975.(研究报告)。

〔3〕Stein. C. Ann. Math. Stat 16 〔1945〕. 243—258.

〔4〕Graybill. F. A and Connell. T. L，Ann. Math. Stat. 35 〔1964〕 438—440

〔5〕Seelbinder. B. M，Ann. Math. Stat. 24 〔1953〕. 640—649.

〔6〕Moshman. J，Ann. Math. Stat. 29〔1958〕，1271—1275.

上接第14页

〔10〕金树武、SGS—1型医用超声功率计研制、中国医学超声联合会全国学术交流会文集1985。

〔11〕金树武，双管浮子式医用超声功率计的研制，中国生物医学工程学报 1986 5(2)：106—112

〔12〕S.A.Goss et al,Ultrasonic absorption and attenuation in mammalian tissues. Ultras.Med.Biol,1979,5,181—186

〔13〕A.Laurie，Frequency dependence of Ultrasonic attenuation coeffcient assessent in fresh tissue,Ultrasonic Symposium 1983,797—799