

消声室内最大自由声场误差的估算

孙广荣

(南京大学声学研究所)

消声室内声场与理想自由声场之间的误差估计,是消声室设计的重要依据。本文指出了Olson公式的前提不适用于消声室内的声场,进而对消声室内不同方向、不同测试位置上的自由声场误差进行了理论估算,并对纯音源与宽带噪声源给出了不同的估算公式。

一、引言

进行消声室设计时,如何估计消声室内的自由声场误差,是确定消声室的大小和吸声结构选用的关键。消声室内自由声场误差的理论估计,以往多沿用Olson公式^[1],它基于室内直达声能 E_D 和混响声能 E_R 的相对大小。消声室内距声源 r 处的自由声场误差 ΔL :

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

式中 S 是消声室内表面积, α 是表面平均吸声系数。式(1)的导出,是基于室内声场充分扩散,各点混响声能密度均为 E_R 的假设。这个条件在各面吸声系数高达90%以上,甚至达99%的消声室内是不适用的。此外,对于纯音讯号来说,反射波与直达波的叠加,明显地随位相关系的变化,使误差可正可负。这在(1)式中是未曾反映出的。所以(1)式只能给出定性解释:要使自由声场误差小,即要 E_R 小,必须使 α 大或 S 大。有人改用下式估计^[2]:

$$\frac{E_R}{E_D} = \frac{16\pi r^2}{s \ln(1-\alpha)} \quad (2)$$

这在原理上仍然是模糊的。

消声室界面接近于全吸收,因此只需考虑一次反射声对直达声的影响。

J. Duba^[3]只考虑消声室内一次反射声的干扰,给出一个包括六项反射声贡献在内的误差表示式。但未作简化,颇为不便。

作者^[4]曾对立方形消声室情况也考虑只计算一次反射声的干扰,并对纯音源及宽带噪声源分别作了估计。本文考虑了消声室内多种测量位置,给出在只计及一次反射声条件下各种最大误差计算公式之后,建议采用一个公式来估算消声室内最大自由声场误差。

二、最大自由声场误差的近似计算

设消声室内部尺寸为 L_x 、 L_y 、 L_z (参见

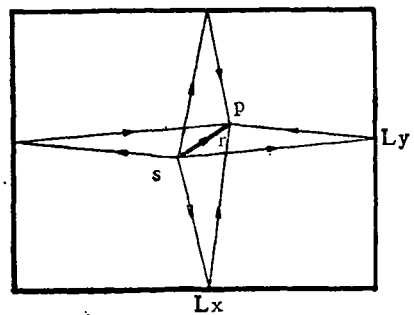


图1 消声室内的直达声和一次反射声

图1), 点声源S在室中心(或整个测试系统的中心在室中心), 辐射单频声波。接收点P与声源相距r。P点除了有直达声外还有从六个边界面来的一次反射声, 反射声的路程为 r_i 。

假定边界吸声层的声压反射系数模量 $|R|$ ($|R| = \sqrt{1-\alpha}$) 不随入射角变化, 反射角等于入射角。考虑六个反射声到达P点时的位相都相同; 也考虑与直达声在P点的位相相同或相反的极端情况。这在低频时是可以作此近似的, 因而也是考虑为可能出现的“最大”误差的理由。

考虑六个反射声引起的对自由声场的干扰, 并计算其分贝数(已经简化了位相条件):

$$\Delta L = 20 \lg \frac{p_d + \sum_{i=1}^6 p_{ri}}{p_d} \quad (3)$$

式中直达声压 $p_d \propto 1/r$, 反射声压 $p_{ri} \propto |R|/r_i$ 。

1. 接收点离声源较近的区域, 即r比 L_x 、 L_y 、 L_z 甚小的情况下, 这时在三对边界面上反射声到达P点的路程分别接近于 L_x 、 L_y 、 L_z (声源在室中心附近), 因此近似地有:

$$\begin{aligned} \Delta L &= 20 \lg \left[1 \pm |R| \left(\frac{2}{L_x} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{2}{L_y} + \frac{2}{L_z} \right) \right] \\ &= 20 \lg \left[1 \pm |R| \frac{S}{V} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

式中 $S = 2(L_x L_y + L_y L_z + L_z L_x)$ 是室内表面积, $V = L_x L_y L_z$ 是室内体积。对 $L_x = L_y = L_z = L$ 的立方消声室,

$$\Delta L = 20 \lg \left(1 \pm 6 |R| \frac{r}{L} \right) \quad (5)$$

2. 立方消声室, 接收点较远, $r \rightarrow L/2$, 声源在中心, 沿中心轴线方向:

$$\begin{aligned} \Delta L &= 20 \lg \left[1 \pm |R| \left(\frac{1}{L/2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{3L/2} + \frac{4}{\sqrt{5}L/2} \right) \right] \\ &= 20 \lg (1 \pm 3.1 |R|) \quad (6) \end{aligned}$$

3. 立方消声室, $r \rightarrow L/2$, 声源与接收点在中心轴线上的对称位置时:

$$\Delta L = 20 \lg (1 \pm 2.8 |R|) \quad (7)$$

4. 立方消声室, $r \rightarrow L/2$, 声源在室中心, 沿平面对角线方向:

$$\begin{aligned} \Delta L &= 20 \lg \left[1 \pm |R| \left(\frac{2}{\sqrt{\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(L - \frac{r}{\sqrt{2}}\right)^2}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(L + \frac{r}{\sqrt{2}}\right)^2}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{2}{\sqrt{r^2 + L^2}} \right) \right] \\ &= 20 \lg (1 \pm 2.95 |R|) \quad (8) \end{aligned}$$

5. 立方消声室, $r \rightarrow L/2$, 声源与接收点在平面对角线上对称位置时:

$$\Delta L = 20 \lg (1 \pm 2.75 |R|) \quad (9)$$

6. 长方形消声室, 若 $L_y = L_z$, 声源在室中心, $r \rightarrow L_x/2$:

$$\begin{aligned} \Delta L &= 20 \lg \left[1 \pm |R| \left(1.3 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{2}{\sqrt{1/4 + \left(\frac{L_y}{L_x}\right)^2}} \right) \right] \quad (10) \end{aligned}$$

以上列举了不同情况下的消声室内由一次反射声引起的自由声场的最大误差估算公式, 这些都是纯音源的结果。

从(7)式与(6)式相比以及(9)式与(8)式相比, 说明在相同测试距离下, 使测试系统的中心在室中心要比声源在中心时的误差要小; (8)式与(6)式相比, (9)式与(7)式相比, 斜方向的误差要比沿轴线方向的误差为小。这两点结论是很有实用意义的。

若在(5)式中以 $r = L/2$ 代入, 所得结果与(6)~(9)式相差并不大。所以对于立方消声室, 在整个室内都可以近似地用(5)式来估算最大的自由声场误差。此外, 在(4)式中以 $r = L_x/2$ 代入, 并令 $L_y = L_z$, 计算几种 L_x/L_y ,

比值的结果, 与(10)式相比差别也不大。所以对于长方形消声室(消声室的长、宽、高之比不可能甚大于1), 在整个室内也可近似地应用(4)式来估算最大自由声场误差。总的来说, 均可以(4)式来估算。

三、宽频带噪声源的

自由声场误差

当声源辐射的是宽频带噪声时, 因不同频率的反射波与直达声波之间的位相关系不同, 所以应以能量的叠加来计算自由声场误差。实际上(1)式和(2)式就是考虑所有反射波能量叠加的结果。当吸声系数很高时, 仍然只考虑一次反射声能量的影响。直达声能密度 $E_D \propto \frac{1}{r^2}$, 一次反射声能密度 $E_r \propto |R|^2 / r^2$ 。我们只计算边长为 L 的立方形消声室的简单情况, 于是得到宽频带噪声的自由声场误差:

$$\begin{aligned} \Delta L &= 10 \lg \frac{E_D + E_r}{E_D} \\ &= 10 \lg \left(1 + 6 |R|^2 \frac{r^2}{L^2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

如果将(1)式中 $S = 6L^2$, $\alpha \rightarrow 1$, 则得到

$$\Delta L = 10 \lg \left(1 + 8.4 |R|^2 \frac{r^2}{L^2} \right) \quad (12)$$

(12)式与(11)式很相似, 当 α 不是很大时, 就不宜忽略掉二次以上的反射声, 这时就要用(12)式来估算了。

四、小结和讨论

1. 在消声室设计时, 可以用(4)式来估计消声室内声场与理想自由声场相比的误差。对于立方形消声室, 可以直接应用(5)式。如要使 $\Delta L \leq \pm 1\text{dB}$, 则要求

$$-0.11 \leq 6 |R| \frac{r}{L} < 0.12$$

若有 $\alpha = 0.99$, 即 $|R| = 0.1$, 则 $+1\text{dB}$ 的范

围为 $\frac{r}{L} < 0.20$, -1dB 的范围为 $\frac{r}{L} < 0.18$,

$+2\text{dB}$ 范围为 $\frac{r}{L} < 0.43$, -2dB 范围为 $\frac{r}{L} <$

0.34。根据类似计算, 就可由实验要求的允许误差, 来设计消声室大小和吸声结构的吸声系数了。

2. 对于主要用于测定机器噪声的消声室, 如果机器辐射宽频带噪声, 则从(11)式或(12)式可以知道, 界面的吸声系数无需达到0.99, 就可获得很小的测试误差了。若按(11)式, 当声源放在中心时, 若要求 $\Delta L < 1\text{dB}$, 即使 $r = L/2$, 则只要求 $\alpha = 0.83$ 就足够; 若根据(12)式, $\alpha = 0.88$ 也就满足要求了。而当 $\alpha > 0.72$ 时, 可使消声室内的自由声场误差均小于 2dB 了。这就说明对于工程级的噪声测量用消声室, 毋需追求 $\alpha > 0.99$ 的高吸声系数的吸声结构, 而可用各种型式的简易吸声结构(如多层布幕结构或各种纤维的废料做成的尖劈), 使有效频率范围内保证有 $\alpha > 0.85$ 的条件即可。

3. 对于纯音源的测量, 从(4)~(10)式表明, $\alpha > 0.99$ 的条件还是需要的。但这些公式都是考虑一次反射波相位均相同的极端条件, 因此是最大可能的自由声场误差。从实际声场鉴定的结果^[5]来看, 实际存在的误差要比(4)~(10)给出的误差要小一些, 所以在消声室设计时, 可以对测量距离放宽一些, 或消声室体积稍为缩小一些。

4. 安排测试系统时, 使测试系统的中心在室中心, 测试方向在斜对角线方向, 可得到最小的自由声场误差条件。

参 考 文 献

- [1] H. F. Olson《声学工程》1957年版中译本458—459页, 科学出版社, 1964年。
- [2] W. Bausch, R. Schubert Frequenz B 324-331 (1959)
- [3] J. Duda Noise Control Engineering 9(2) 60-67 (1977)
- [4] 孙广荣 电声技术 1980年2期63—65页
- [5] 南京大学声学实验室 物理学报24 252—259 (1975)