

声源空腔对抗性消声器插入损失的影响

王佐民

(同济大学声学所)

本文根据声能守恒基本原理和四端网络等效电路的方法,将声源空腔对抗性消声器插入损失的影响进行了若干讨论,利用本文导出的计算结果与其它文献中的计算结果针对同一单级扩张抗性消声器做了比较,并对此比较作了合理的说明。

抗性消声器是噪声控制中经常使用的有效装置。许多文献介绍了抗性消声器的原理和消声计算。通常,采用传递损失TL和插入损失IL来描述消声器的消声特性。其中,传递损失TL反映了消声器本身的消声特性,而插入损失IL反映了消声器的实际使用效果。插入损失IL是指使用消声器前后由末端声管辐射的两种噪声声功率级的差值。某些文献介绍了相应的计算公式[1]。但是,在这些公式中,对于内燃机气缸等声源空腔的影响仍需更深入的讨论。这种影响有时是十分明显的。

本文根据声能守恒的基本原理和四端网络等效电路的方法,对声源空腔的影响进行若干讨论。

在四端网络等效电路中,假如网络入口端的声压和体积速度为 \dot{P}_1 、 \dot{U}_1 ,出口端的声压和体积速度为 \dot{P}_2 、 \dot{U}_2 ,则有关系

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_1 \\ \dot{U}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P}_2 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}$$

其中,ABCD称为四端网络常数。如果在四端网络输出端连接 Z_2 的负载阻抗,四端网络的输入阻抗则为

$$\dot{Z}_{11} = \frac{\dot{P}_1}{\dot{U}_1} = \frac{AZ_2 + B}{CZ_2 + D}$$

这里,符号“·”表示相应的物理量是复数量。

图1表示,空腔 V 内有一简谐声源 Q ,腔壁处有截面积 S 的出口与抗性消声器相连接。在稳态情况下,有声能守恒方程

$$\frac{d}{dt} \int_V E_0 dV = -a \int_S t_l E_0 dS + \beta \int_V E_0 dV + W_0$$

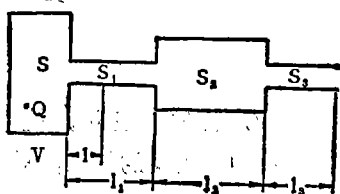


图1 带消声器的声源空腔

其中 $W_0 e^{-i\omega t}$ 为声源 Q 发出的声能, $E_0 e^{-i\omega t}$ 为腔内各点的声能密度, t_l 为 S 处的声透射系数, β 为耗散系数, a 为声速, ω 为角频率。

上式左端表示腔内声能随时间 t 的变化率,右端第一项表示单位时间内经 S 处传出的声能,第二项表示单位时间内由腔壁透射、刚性传递、壁面吸收和腔内气体吸收等原因所引起的声耗

散。一般来讲，上述各项的积分值不仅与腔体体积和出口面积有关，而且也应与腔体的形状及其声源的位置等因素有关。在腔内声场分布均匀的情况下，可由上式得到

$$-i\omega V E_0 = -t_1 S a E_0 - \beta V E_0 + W_0$$

于是

$$E_0 = \frac{W_0}{t_1 S a + \beta V - i\omega V} \quad (1)$$

假定，由 S 处输出的声功率为 W_1 ，由末端声管出口处输出的声功率为 W_2 ，则由(1)可得

$$W_1 = t_1 S a E_0 = \frac{t_1 W_0}{t_1 + \frac{\beta V - i\omega V}{S a}}$$

对于垂直入射情况

$$t_1 = \frac{4R_{12}}{(1 + R_{12})^2}$$

其中 $R_{12} = \frac{S \dot{Z}_{11}}{\rho a}$ ， ρ 为空气密度

因此

$$\frac{W_0}{W_1} = \frac{t_1 + \frac{\beta V - i\omega V}{S a}}{t_1}$$

通常，开口 S 的面积很小，故 $|R_{12}| \ll 1$ ，有 $t_1 \cong 4R_{12}$ 。

这时

$$\frac{W_0}{W_1} \cong \frac{\dot{Z}_{11} + \dot{Z}_0}{\dot{Z}_{11}}$$

其中， $\dot{Z}_0 \equiv \frac{\beta V - i\omega V}{4S a} \frac{\rho a}{S}$ ，相当于四端网络等效电路中的声源内阻。

另外，由四端网络的基本关系可知

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\dot{P}_1 \dot{U}_1}{\dot{P}_2 \dot{U}_2} = \frac{\dot{Z}_{11}}{\dot{Z}_2} (C\dot{Z}_2 + D)^2$$

于是

$$\frac{W_0}{W_2} = \frac{W_0}{W_1} \cdot \frac{W_1}{W_2} = \frac{t_1 + \frac{\beta V - i\omega V}{S a}}{t_1} \cdot \frac{\dot{Z}_{11}}{\dot{Z}_2} (C\dot{Z}_2 + D)^2 \quad (2)$$

$$\text{若令 } L = 10 \log \left| \frac{W_0}{W_2} \right| \quad L' = 10 \log \left| \frac{W_0}{W_2'} \right| \quad (3)$$

则插入损失

$$IL = L - L' \quad (4)$$

其中，符号“'”表示未加消声器时的相应物理量。

因此，对于某一确定的消声器，只要知道使用消声器前后的声管辐射阻抗，就可使用(2)、(3)和(4)求得插入损失。对于非简谐声源，也只要利用Fourier变换的技巧，就能由这些公式求得插入损失。

为便于计算，一般将声管辐射阻抗的虚部折算成声管的等效修正长度，而仅考虑其实部。

R_2 。对于半径 r 的圆管端面，其辐射阻抗

$$R_2 \cong \frac{\rho a}{\pi r^2} \frac{(kr)^2}{4} = \omega^2 \frac{\rho}{4\pi a} \quad kr < 0.6, \quad k = \omega/a$$

可见，在波长范围内，声阻与出口尺寸大小无关。

为了比较本文导得的公式与文献[1]给出的恒速声源时的插入损失公式

$$IL = 20 \log \left| \frac{D}{D'} \right| + 10 \log \frac{R_2'}{R_2}$$

和恒压声源时的插入损失公式

$$IL = 20 \log \left| \frac{B}{B'} \right| + 10 \log \frac{R_2'}{R_2}$$

间的差异，给出用这三种公式对同一单级扩张抗性消声器算得的插入损失频响曲线。

对于单段声管

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & j \frac{\rho C}{S} \sin kl \\ j \frac{S}{\rho C} \sin kl & \cos kl \end{bmatrix}$$

对于单级扩张消声器

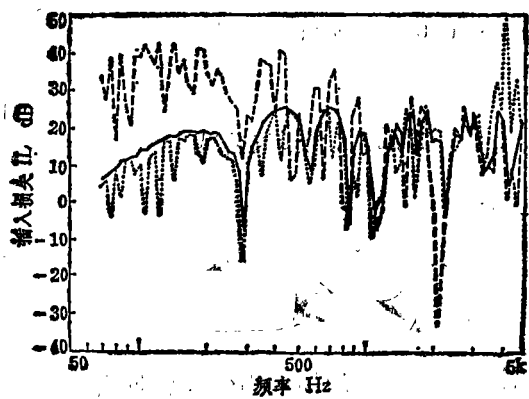
$$\begin{aligned} A &= \cos kl_1 \cos kl_2 \cos kl_3 - \frac{S_2}{S_1} \sin kl_1 \sin kl_2 \cos kl_3 \\ &\quad - \frac{S_3}{S_2} \cos kl_1 \sin kl_2 \sin kl_3 - \frac{S_3}{S_1} \sin kl_1 \cos kl_2 \sin kl_3 \\ B &= j \frac{\rho a}{S_1} \left(\sin kl_1 \cos kl_2 \cos kl_3 + \frac{S_1}{S_2} \cos kl_1 \sin kl_2 \cos kl_3 \right. \\ &\quad \left. - \frac{S_2}{S_3} \sin kl_1 \sin kl_2 \sin kl_3 - \frac{S_1}{S_3} \cos kl_1 \cos kl_2 \sin kl_3 \right) \\ C &= j \frac{S_1}{\rho a} \left(\sin kl_1 \cos kl_2 \cos kl_3 + \frac{S_2}{S_1} \cos kl_1 \sin kl_2 \cos kl_3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{S_3}{S_1} \cos kl_1 \cos kl_2 \sin kl_3 - \frac{S_3}{S_2} \sin kl_1 \sin kl_2 \sin kl_3 \right) \\ D &= \cos kl_1 \cos kl_2 \cos kl_3 - \frac{S_1}{S_3} \sin kl_1 \cos kl_2 \sin kl_3 \\ &\quad - \frac{S_2}{S_3} \cos kl_1 \sin kl_2 \sin kl_3 - \frac{S_1}{S_2} \sin kl_1 \sin kl_2 \cos kl_3 \end{aligned}$$

计算中选取(图1)，原有声管长度 $l=2\text{cm}$ ，消声器的几何尺寸 $l_1=50\text{cm}$ ， $l_2=60\text{cm}$ ， $l_3=15\text{cm}$ ，空腔体积 $V=800\text{cm}^3$ ，且令 $S_1=S_3=S$ ， $M=S_2/S_1$ 。

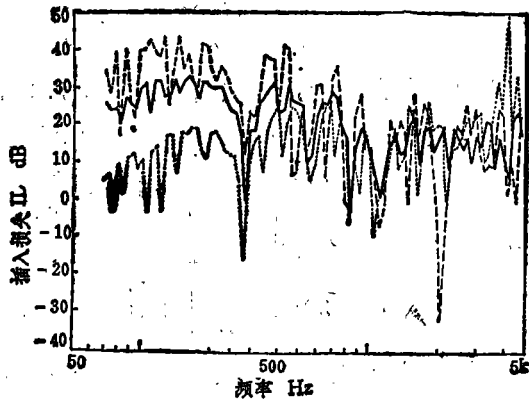
计算表明，耗散系数 β 对插入损失的影响很小。这是因为在所讨论的消声器有效频段内，与 β 有关的声源内阻 Z_0 的实部通常总是比与 ω 有关的虚部小很多的缘故。

图2表明，对于 S 较小的情况，由本文公式算得的插入损失频响曲线在低于1KHz的频段内，基本上是由恒速声源公式算得的频响曲线的包络线，起伏明显减少。这有利于提高消声性能。在高于1KHz的频段内，两者基本一致。对于 S 较大的情况，在低于1KHz的频段内，由本文公式算得的频响曲线介于其他两条曲线之间，低于由恒压声源公式算得的曲线值。在高于1KHz的频段内，三者差异不大。这种关系在其他扩张比 M 时，也是类同的。

对于其他类型的抗性消声器，只要根据四端网络等效电路的理论求出其特性常数，就能



(a) $S=1.7\text{cm}^2$ $M=20$



(b) $S=80\text{cm}^2$ $M=20$

图2 插入损失的频响曲线

——由本文公式算得的曲线

.....由恒速声源公式算得的曲线

——由恒压声源公式算得的曲线

由本文公式方便地计算插入损失。

总之,研究表明,声源空腔对抗性消声器的插入损失影响很大,腔体的作用相当于四端网络等效电路中的声源内阻。它的影响主要决定于腔体的体积(及其形状)与连接消声器的腔壁出口截面积间的比值,而与腔壁的声透射和腔内的声吸收等因素关系不大。因此,在实际设计抗性消声器时应该考虑声源空腔的影响,而这种影响一般只要知道腔体的几何尺寸就可加以估算。

参 考 文 献

1. [日] 福田基一 奥田襄介 合著 张成译: 噪声控制与消声设计, 国防工业出版社 1982年

(上接第11页)

- [4] Fisch, N. P., Wille P., Platform and Ship Radiated Noise at the Research Platform Northsea. NUSC TR 5995. FWG-Bericht 1978-6
- [5] Wille, P. C. Geyer D., Measurements on the origin of the winddependent ambient noise variability in shallow water. J. Acoust. Soc Am. Vol.75, No.1, Jan.84, p.173
- [6] Wille P, C. Ambient Noise: Characteristics of the Noise Field. H. G. Urban (ed.), Adaptive Methods in Underwater Acoustics 1985 p.13
- [7] Koenigs, P. D. Monti; J. M. Nützel; B. Herwig, H. Acoustic Scattering from the Sea Surface. J. Acoust. Soc. Am. Supplement 1 Vol.76 Fall 1984 S.55
- [8] Monti, J. M. Nützel B., Acoustic Scattering from the Sea Floor. J. Acoust. Soc. Am. Supplement 1 Vol.76 Fall 1984 S.55
- [9] Herwig, H. Nützel B. Channel reverberation in shallow water. J., Acoust. Soc. Am. Supplement 1, Vol.77 Spring 1985 S.102
- [10] Wille P. C. Measurements of wind dependent acoustic transmission loss in shallow water under breaking wave conditions. ICA Halifax/Can. July 1986
- [11] Schneider H. G. Modelling wind dependent acoustic transmission loss due to bubbles in shallow water. ICA Halifax/Can. July 1986

编者注: 本文对原稿有所删减。