

锥形扩张式消声器的声学模型

王嘉, 李孔清*, 洪娜, 张坻, 王丹凤

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:基于一维平面波理论, 推导得出了锥形扩张式消声器各消声单元对应的传递矩阵和该类消声器的噪声传递损失理论计算公式. 将球形消声器过渡段视为有限个锥形段, 利用本文提出的计算公式, 近似计算了球形扩张式消声器的噪声传递损失, 得到了 2 类消声器的噪声传递损失频率特性. 同时, 应用有限元仿真软件 Visual lab 11.0 对这 2 类消声器进行了仿真计算. 理论推导的计算公式结果与有限元计算结果吻合一致, 验证了本文推导的消声器传递损失模型的准确性. 文中提出的理论公式具有较高的精度, 可避免有限元的专业计算, 为这 2 种类型消声器的设计与优化提供简化计算方法.

关键词:声学; 扩张室消声器; 传递损失 (TL); 有限元法; 传递矩阵法; 声学特性

中图分类号: TB535⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2017)01-0060-07

Acoustic Model of Cone-shaped Expansion Muffler

WANG Jia, LI Kongqing, HONG Na, ZHANG Chi, WANG Danfeng

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on the one-dimensional plane wave theory, the corresponding transfer matrix of each unit of the cone-shaped expansion muffler and the theoretical calculation formulas of the transmission loss of the muffler are derived. The transition section of the spherical muffler is regarded as a finite conical section, using the formulas proposed in this paper. The approximate transmission loss of the spherical expansion muffler is calculated, and the frequency characteristics of the noise transmission loss of the two kinds of muffler are obtained. Besides, the finite element simulation software Visual lab 11.0 is used to simulate the two types of mufflers. The results calculated by the theoretical derivation are in agreement with the finite element calculation results, which verify the accuracy of the model of the muffler transmission loss derived in this paper. The theoretical formulas presented in this paper are of high precision, which can avoid the professional calculation of the finite element, and provide a simplified calculation method for the design and optimization of these two types of mufflers.

Key words: acoustics; expansion chamber muffler; transmission loss (TL); finite element method; transfer matrix method; acoustic characteristic

消声器在多种设备中都有着广泛的应用, 空调压缩机、工业管道以及内燃机经常利用消声元件来降低由流体流动引起的噪声和由排气装置辐射到外部大气的噪声.

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 湖南教育厅科研资助项目 (15C0541); 湖南科技大学教育科学研究资助项目 (G31401)

* 通信作者, E-mail: likongqing@qq.com

消声器的设计往往是一项复杂的工作,除了要考虑消声器的结构尺寸外,还要考虑消声材料,制造成本,消声性能等多方面的因素.

国外学者们对于消声器的研究最初是采用一维平面波理论.20 世纪 50 年代,Davis 等人^[1]在不考虑气流的状态下,用平面波理论建立了消声元件的计算公式.之后,Igarashi 和 Toyama 等人^[2,3]用等效电路的方法得到了预测消声器性能的传递矩阵.在 20 世纪七八十年代,考虑到气流和温度对消声器的影响,Alfredson, Munjal 以及 Thawani 等人提出了消声器的局部和整体建模法^[4-10].Davies^[11]对于不同管道截面的消声器的传递矩阵进行了研究.Kim 等人^[12]研究了声音在弯曲管道中的传播并提出了关于此模型的传递矩阵的表达式.FéLIX 和 Pagneux^[13]提出了声音在三维刚性弯曲管道中的传播,并且定义了一个可以数值求解的阻抗矩阵,该矩阵遵循 Riccati 方程.最近,Dowling 和 Peat^[14]提出了一种新算法,该算法可有效减少预测消声器消声性能的时间.

随着空调变频技术时代的到来.压缩机的噪声在室外机造成的噪声问题越来越突出.其噪声频谱具有范围广,动态的特征.在解决噪声的过程中,不可避免地使用消声器.现阶段由于成本的原因,主要是使用如图 1a 所示的锥形扩张式消声器,在实际使用过程中有一定的效果,但未达到要求.为了解决此问题,本文中设计了如图 1b 所示的球形扩张式消声器,这一结构具有比锥形扩张式消声器消声量更大的优点.对该消声器用一维平面波理论进行分析,先推导出锥形扩张式消声器的传递矩阵,再将该方法应用到球形扩张式消声器上,并将其结果与数值计算得到的结果进行比较,验证基于平面波理论建立的球形扩张式消声器的声学模型的准确性.

1 消声器的数值计算法

消声器的数值计算方法主要有声学有限元和边界元 2 种.本文采用有限元方法.该方法的主要理论假设是:(1)介质为理想流体,即介质中不存在粘性,声波在介质中没有能量损耗;(2)声传播的过程是绝热过程,即介质与毗邻的部分不会由于声传播引起的温差而产生热交换;(3)介质中传播的是小振幅声波,介质中各种声场的参数都是一阶微量,可以用线性波动方程进行描述.

图 1a 为某变频外机最初采用的消声器的形状,图 b 所示的球形过渡的消声器.这 2 种扩张室的长度是一样的均 40 mm,扩张室断面为圆形,直径为 35 mm,两端接管均为 9 mm.区别在于前者是采用 30°的锥形过渡,而后者是采用半径为 15 mm 的球形过渡.

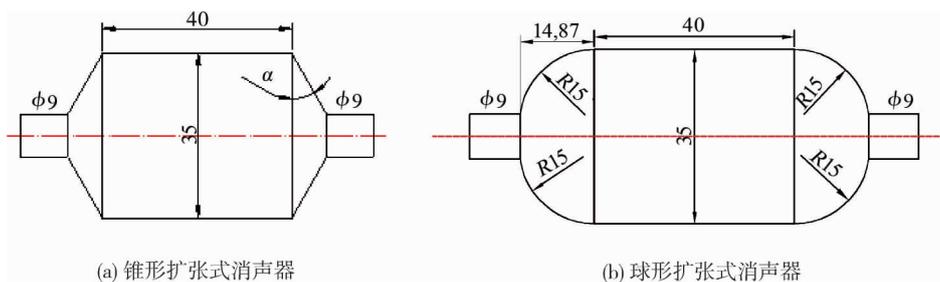


图 1 消声器

在数值计算中,采用的边界条件是:(1)进口边界假设入射波为平面波,设置法向速度为 1 m/s;(2)出口为全吸声,无反射条件,其声阻抗:17 673 (kg/m²)/s;(3)内壁面为刚性壁面,不考虑吸收;(4)采用介质的工况条件为 2.7 MPa,温度为 75 °C,速度为 340 m/s.模拟软件采用的是国际著名 LMS 公司开发的声学计算软件 Visual lab 11.0.

根据上述方法,对图 1 所示的 2 种消声器进行传递损失的数值计算.得到图 2 所示的 2 种消声器的传递损失数值计算结果.

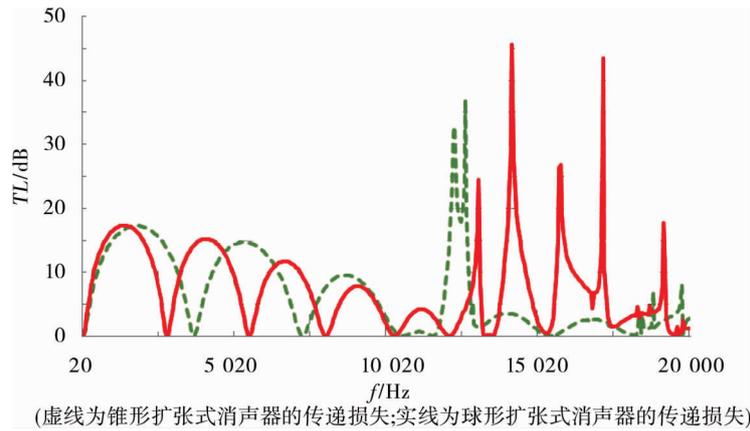
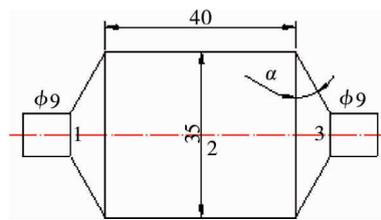


图 2

2 消声器的传递矩阵法

2.1 锥形扩张式消声器的声学模型

锥形扩张式消声器可视为 3 个不同的声学元件串联在一起,如图 3 所示.每个代表具有不同声学特性的元件.第 1 个声学元件为渐扩管段,第 2 个为直管段,第 3 个为渐缩管段.

图 3 锥形扩张式消声器 ($\alpha=30^\circ$)

串联声学系统中,前一个元件的输出即为后继元件的声学输入.因此,该系统的串级声学传递矩阵为三者单独的传递矩阵之乘积.即:

$$\begin{pmatrix} p_i \\ q_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_0 \\ q_0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

式中, p_i, q_i, p_0, q_0 : 入口和出口处的声压和质点速度.

直管段的声学传递矩阵为^[15]

$$\begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(kl) & j \frac{\rho_0 c_0}{S_2} \sin(kl) \\ j \frac{S_2}{\rho_0 c_0} \sin(kl) & \cos(kl) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

问题主要是渐扩与渐缩管段的传递矩阵,后文将推导这两者的传递矩阵.

2.2 锥形扩张式消声器的渐扩与渐缩管段的传递矩阵

一维管道内声波的运动方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

式中, u : 质点速度; ρ_0 : 平衡态下的介质密度; p : 声压.

忽略声压与密度的高阶项,可得到一维平面波在变截面管道内的控制方程为

$$\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0. \quad (4)$$

式中, S : 在坐标 x 处的截面积.

假设声波变化为正弦式 $p = p(x) \exp(j\omega t)$, 在无内部声源的前提下, 式(4)可写成:

$$\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + k^2 p = 0. \quad (5)$$

式中, k : 波数, $k = \omega/c_0$; c_0 : 声速, $\omega = 2\pi f$ 为角频率.

当式(3)应用到渐扩单元, 其截面积与 x 的变化关系为(图4a)

$$S = S_T \left(1 + \frac{x}{x_0} \right)^2. \quad (6)$$

式(3)的解为

$$p = \frac{P_+}{x + x_0} e^{j(\omega t - kx)} - \frac{P_-}{x + x_0} e^{j(\omega t + kx)}. \quad (7)$$

平面波的质点速度为

$$u = \frac{1}{\rho_0 c_0} \left[\left(1 + \frac{c_0/(j\omega)}{x + x_0} \right) \frac{P_+}{x + x_0} e^{j(\omega t - kx)} + \left(1 - \frac{c_0/(j\omega)}{x + x_0} \right) \frac{P_-}{x + x_0} e^{j(\omega t + kx)} \right]. \quad (8)$$

式中, “+”号表示向右的声波, “-”号表示向左传播的声波.

根据式(7)和式(8), 可以直接写出渐扩管如下形式的传递矩阵:

$$\begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix}.$$

式中:

$$A_1 = \left(1 + \frac{l}{x_0} \right) \cos(kl) - \frac{c_0}{\omega x_0} \sin(kl); \quad (9)$$

$$B_1 = j \frac{\rho_0 c_0}{S_2} \left(1 + \frac{l}{x_0} \right) \sin(kl); \quad (10)$$

$$C_1 = j \frac{S_1}{\rho_0 c_0} \left[\left(1 + \frac{l}{x_0} + \frac{c_0^2}{\omega^2 x_0^2} \right) \sin(kl) - \frac{l c_0}{x_0^2 \omega} \cos(kl) \right]; \quad (11)$$

$$D_1 = \frac{S_1}{S_2} \left(1 + \frac{l}{x_0} \right) \left(\cos(kl) + \frac{c_0}{\omega x_0} \sin(kl) \right). \quad (12)$$

上述方程所有符号如图4a所示.

当式(3)应用到渐缩单元, 其截面积与 x 的变化关系为(图4b)

$$S = S_T \left(1 + \frac{l-x}{x_0} \right)^2. \quad (13)$$

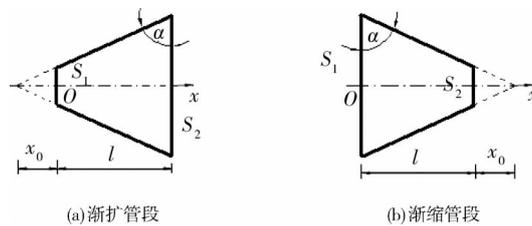


图4 渐扩与渐缩管段示意图

其解为

$$p = \frac{P_+}{l-x+x_0} e^{j(\omega t - kl + kx)} - \frac{P_-}{l-x+x_0} e^{j(\omega t + kl - kx)}; \quad (14)$$

平面波的质点速度为

$$u = -\frac{1}{\rho_0 c_0} \left[\left(1 + \frac{c_0/(j\omega)}{l-x+x_0} \right) \frac{P_+}{l-x+x_0} e^{j(\omega t - kl + kx)} + \left(1 - \frac{c_0/(j\omega)}{l-x+x_0} \right) \frac{P_-}{l-x+x_0} e^{j(\omega t + kl - kx)} \right]. \quad (15)$$

从式(14)和式(15)可以得到渐缩管段的声学传递矩阵:

$$\begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix}.$$

式中:

$$A_3 = \frac{x_0}{l+x_0} \left[\cos(kl) + \frac{c_0}{\omega x_0} \sin(kl) \right]; \quad (16)$$

$$B_3 = j \frac{\rho_0 c_0}{S_2} \frac{x_0}{l+x_0} \sin(kl); \quad (17)$$

$$C_3 = j \frac{S_1}{\rho_0 c_0} \frac{x_0}{l+x_0} \left[\left(1 + \frac{c_0^2}{\omega^2 x_0 (l+x_0)} \right) \sin(kl) + \frac{c_0}{\omega} \left(\frac{1}{l+x_0} - \frac{1}{x_0} \right) \cos(kl) \right]; \quad (18)$$

$$D_3 = \frac{S_1}{S_2} \frac{x_0}{l+x_0} \left[\cos(kl) - \frac{c_0}{\omega(l+x_0)} \sin(kl) \right]. \quad (19)$$

2.3 锥形扩张式消声器的传递损失

目前用来描述消声器的性能参数指标有很多,最常见的参数是传递损失.其计算式为

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{4} \left| A + B \frac{S}{\rho_0 c_0} + C \frac{\rho_0 c_0}{S} + D \right|^2 \right). \quad (20)$$

2.4 球形扩张式消声器的声学模型及传递损失

将球形截面管道进行10等分,每1等分近似看作1个锥形管道单元,如图5所示.1~5的声学元件为渐扩单元,11为直管段,6~10为渐缩声学元件.然后根据上述已经推导出来的渐扩、渐缩管段的传递矩阵公式求出其传递损失.

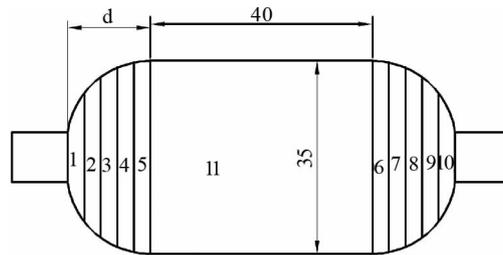


图5 球形扩张式消声器

1)图5中1~5部分可近似看作锥形渐扩管段,其截面积与 x 的变化关系为图4a所示.其中 $d = 14.87 \text{ mm}$,每个部分的 $l = d/5 = 2.97 \text{ mm}$.

其中,渐扩管段1部分:

$$x_0 = 1.87 \text{ mm}, l = 2.97 \text{ mm}, S_1 = \pi 4.5^2 \text{ mm}^2, S_2 = \pi 11.64^2 \text{ mm}^2;$$

渐扩管段2部分:

$$x_0 = 11.86 \text{ mm}, l = 2.97 \text{ mm}, S_1 = \pi 11.64^2 \text{ mm}^2, S_2 = \pi 14.56^2 \text{ mm}^2;$$

渐扩管段3部分:

$$x_0 = 25.29 \text{ mm}, l = 2.97 \text{ mm}, S_1 = \pi 14.56^2 \text{ mm}^2, S_2 = \pi 16.27^2 \text{ mm}^2;$$

渐扩管段4部分:

$$x_0 = 51.93 \text{ mm}, l = 2.97 \text{ mm}, S_1 = \pi 16.27^2 \text{ mm}^2, S_2 = \pi 17.2^2 \text{ mm}^2;$$

渐扩管段5部分:

$$x_0 = 175.88 \text{ mm}, l = 2.97 \text{ mm}, S_1 = \pi 17.2^2 \text{ mm}^2, S_2 = \pi 17.5^2 \text{ mm}^2;$$

2)6~10部分可近似看做锥形渐缩管段,其截面积与 x 的变化关系为图4b所示.

渐缩管段6部分:

$$x_0 = 175.88 \text{ mm}, l = 2.97 \text{ mm}, S_1 = \pi 17.5^2 \text{ mm}^2, S_2 = \pi 17.2^2 \text{ mm}^2;$$

渐缩管段 7 部分:

$$x_0 = 51.93 \text{ mm}, l = 2.97 \text{ mm}, S_1 = \pi 17.2^2 \text{ mm}^2, S_2 = \pi 16.27^2 \text{ mm}^2;$$

渐缩管段 8 部分:

$$x_0 = 25.29 \text{ mm}, l = 2.97 \text{ mm}, S_1 = \pi 16.27^2 \text{ mm}^2, S_2 = \pi 14.56^2 \text{ mm}^2;$$

渐缩管段 9 部分:

$$x_0 = 11.86 \text{ mm}, l = 2.97 \text{ mm}, S_1 = \pi 14.56^2 \text{ mm}^2, S_2 = \pi 11.64^2 \text{ mm}^2;$$

渐缩管段 10 部分:

$$x_0 = 1.87 \text{ mm}, l = 2.97 \text{ mm}, S_1 = \pi 11.64^2 \text{ mm}^2, S_2 = \pi 4.5^2 \text{ mm}^2;$$

3) 渐扩管段 1~5 的传递矩阵应用式(9)~式(12),可分别得到:

$$T_1 = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix}; T_2 = \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix}; T_3 = \begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix}; T_4 = \begin{pmatrix} A_4 & B_4 \\ C_4 & D_4 \end{pmatrix}; T_5 = \begin{pmatrix} A_5 & B_5 \\ C_5 & D_5 \end{pmatrix}.$$

4) 渐缩管段 6~10 的传递矩阵应用式(16)~式(19),可分别得到:

$$T_6 = \begin{pmatrix} A_6 & B_6 \\ C_6 & D_6 \end{pmatrix}; T_7 = \begin{pmatrix} A_7 & B_7 \\ C_7 & D_7 \end{pmatrix}; T_8 = \begin{pmatrix} A_8 & B_8 \\ C_8 & D_8 \end{pmatrix}; T_9 = \begin{pmatrix} A_9 & B_9 \\ C_9 & D_9 \end{pmatrix}; T_{10} = \begin{pmatrix} A_{10} & B_{10} \\ C_{10} & D_{10} \end{pmatrix}.$$

5) 直管段 11 的传递矩阵应用式(2),可得到:

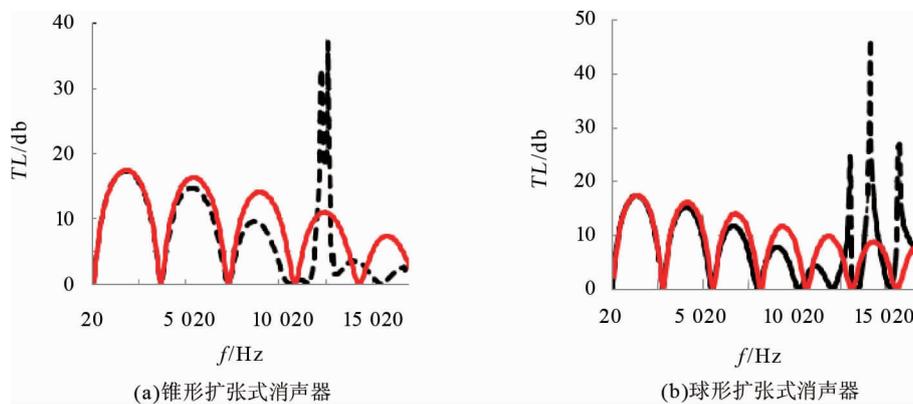
$$T_{11} = \begin{pmatrix} A_{11} & B_{11} \\ C_{11} & D_{11} \end{pmatrix};$$

$$T = T_1 \times T_2 \times T_3 \times T_4 \times T_5 \times T_6 \times T_7 \times T_8 \times T_9 \times T_{10} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}. \quad (21)$$

6) 将式(21)得到的 A, B, C, D 代入到式(20)中,可得到球形扩张式消声器的传递损失的计算式.

2.5 传递矩阵法与有限元法计算结果比较

分别将 2 种消声器的传递矩阵法的计算结果与有限元法的计算结果进行比较,得到图 6 所示的 2 种消声器的传递损失.



(实线为传递矩阵法计算结果,虚线为有限元计算结果)

图 6 有限元计算的结果与传递矩阵法计算的结果

3 结论

1) 10 000 Hz 以下其传递损失数值上基本相当,10 000 Hz 以上采用球形扩张式消声器的传递损失要比锥形扩张式消声器的传递损失要大,说明其 10 000 Hz 以上的消声能力强一些.此外可以看出,球形扩张式消声器在 10 000 Hz 以下的消声频带段数增加,说明球形扩张式消声器的选择性更强.

2) 扩张式消声器在中低频段两者吻合较好,在高频段略微差异大一点,总体上趋势是一致的.说明基于平面波理论的传递矩阵法对于球形扩张式消声器的计算是适用的.从图中也可以看出,传递矩阵法的计

算不能够体现消声器的高频失效现象,主要是因为应用了平面波的假设,不过在实际使用当中,一般并没有涉及到这样的一个频率范围.因此,传递矩阵法还是可以在实践中使用.

3)采用球形过渡的扩张式消声器优于锥形过渡的消声器,其在高频消声能力和对频率的选择能力上具有明显优势.在中低频段可使用传递矩阵法来计算消声器的传递损失,基于平面波理论的传递矩阵法计算速度快,公式简单,使用方便,能对所设计的消声器的性能准确做出预测,从而避免了有限元的专业计算.而且此计算过程还可以借助计算机来完成,可使计算变得更加简便.

参考文献:

- [1] Davis D D, Stokes G M, Moore D, et al. Theoretical and Experimental Investigation of Mufflers with Comments on Engine Exhaust Muffler Design[J]. National Advisory Committee for Aeronautics Report, 1954.
- [2] Igarashi J, Toyama M. Fundamentals of Acoustic Silencers: (I) Theory and Experiment of Acoustic Low-pass Filters[J]. Report, 1958, 24:223-241.
- [3] Igarashi J, Arai M. Fundamentals of Acoustical Silencers: (III) Attenuation Characteristics Studied by Electric Simulator[J]. Report, 1960, 26:17-31.
- [4] Alfredson R J. The Design and Optimization of Exhaust Silencers[D]. Southampton: University of Southampton, 1970.
- [5] Munjal M L. Velocity Ratio-cum-transfer Matrix Method for the Evaluation of a Muffler with Mean Flow[J]. Journal of Sound & Vibration, 1975, 39(1):105-119.
- [6] Sullivan J W, Crocker M J. Analysis of Concentric-tube Resonators Having Unpartitioned Cavities[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1978, 64(1):207-215.
- [7] Sullivan J W. A Method for Modeling Perforated Tube Muffler Components. I. Theory [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1979, 66(3):772-778.
- [8] Jayaraman K, Yam K. Decoupling Approach to Modeling Perforated Tube Muffler Components [J]. Acoustical Society of America Journal, 1981, 69(2):390-396.
- [9] Munjal M L, Prasad M G. On plane-wave Propagation in a Uniform Pipe in the Presence of a Mean Flow and a Temperature Gradient[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1986, 80(5):1501-1506.
- [10] Munjal M L. Acoustics of Ducts and Mufflers[M]. New York: Wiley-interscience Publisher, 1987.
- [11] Davies P O A L. Practical Flow Duct Acoustics[J]. Journal of Sound & Vibration, 1988, 124(1):91-115.
- [12] Kim J T, Ih J G. Transfer Matrix of Curved Duct Bends and Sound Attenuation in Curved Expansion Chambers[J]. Applied Acoustics, 1999, 56(4):297-309.
- [13] Félix S, Pagneux V. Multimodal analysis of acoustic propagation in three-dimensional bends[J]. Wave Motion, 2002, 36(2):157-168.
- [14] Dowling J F, Peat K S. An Algorithm for the Efficient Acoustic Analysis of Silencers of Any General Geometry[J]. Applied Acoustics, 2004, 65(3):211-227.
- [15] Fahy F. Foundations of Engineering Acoustics[M]. New York: Academic Press, 2000.