

通过分流扬声器实现管道噪声控制

柳维玮, 毛崎波

(南昌航空大学飞行器工程学院, 江西南昌 330063)

摘要: 提出通过分流扬声器控制管道噪声。首先采用一个干扰扬声器放置在管道的一端作为噪声源, 另一个扬声器外接分流电路组成分流扬声器对管道噪声进行控制, 并建立管道-扬声器耦合模型。然后设计参数独立可调的分流电路, 实现对分流扬声器的固有频率和阻尼比的独立调节, 通过优化分流电路的参数, 从而使得分流扬声器达到良好的控制效果。最后对所设计的分流扬声器的控制效果进行了数值计算。结果表明: 所设计的分流扬声器能够有效控制管道内的声压。与传统的噪声主动控制方法相比, 该方法的主要优点在于控制系统不需要误差传感器和控制器, 结构简单, 实际使用方便。

关键词: 管道噪声; 分流扬声器; 分流电路

中图分类号: O422.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-05-0455-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.05.010

Duct noise control by using shunt loudspeaker

LIU Wei-wei, MAO Qi-bo

(School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract: The theoretical calculation and method of shunt loudspeaker controlling duct noise are given in this paper. Firstly, with a disturbance speaker placed at one end of duct as the noise source, another speaker connected shunt circuit is placed at side of the duct as a control unit of duct noise. The duct-loudspeaker coupling model is set up. Secondly, adjustable parameters of shunt circuit are designed to realize independent regulations for the natural frequency and damping coefficient of the control speaker. According to the optimized parameters of shunt circuit, the control speaker can achieve good control effect. Finally, the control effect of the shunt speaker is calculated numerically by using Matlab software. Results show that the designed shunt speaker can control the pressure in the duct effectively. Compared with the conventional active noise control, the major advantage of this method is that the control system does not need error sensor and controller, so the structure is simple and convenient for application.

Key words: duct noise; shunt loudspeaker; shunt circuit

0 引言

管道消声技术已经广泛用于航空、船舶、车辆舱体等有界空腔的噪声控制。由于噪声频率低于管道一阶截止频率, 可以近似为平面声波, 所以理论分析和控制方法相对简单^[1]。常见的管道噪声消声方法分为主动控制和被动控制^[2]。主动控制需要复杂的算法和硬件系统, 成本相对较高, 该技术在工程应用中受到限制。而被动控制对高频的噪声在特

定的环境下控制效果良好, 但环境一旦改变, 其控制系统的自适应性不佳, 控制效果随之减弱。当需要改变被动控制系统的参数时, 就要改变吸声材料特性或者改变管道结构, 实际操作中不易实现^[3-5]。

近年来, 压电分流阻尼控制技术在结构振动控制领域受到了广泛关注, 它是利用压电效应, 将振动产生的机械能转换为电能被消耗, 从而起到减振的作用。由于压电分流控制技术不需要传感器和控制器, 所以该方法设计简单, 电路特性参数调节方便, 在振动控制领域得到了广泛应用^[6-8]。

根据压电分流阻尼控制技术的特点, 将分流电路与扬声器相连接, 实现振动能量转换为电能而消耗, 由此将扬声器命名为分流扬声器, 并应用于管道噪声控制中。本文首先建立了管道-扬声器耦合模型和分流扬声器模型, 然后根据所建立的分流扬声器模型设计相应的分流电路, 最后运用数值计算, 得到了所设计的分流扬声器控制管道噪声的效果。

收稿日期: 2016-11-25; 修回日期: 2017-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(11464031, 51265037); 航空科学基金项目(2015ZA56002); 江西省高校科技落地计划资助项目(KJLD12075); 江西省研究生创新专项资金项目(YC2016-S336)

作者简介: 柳维玮(1992—), 女, 广西桂林人, 硕士研究生, 研究方向为噪声与振动控制。

通讯作者: 毛崎波, E-mail: qbmao@nchu.edu.cn

1 管道-扬声器耦合模型

实验中使用一个扬声器向管道内输入噪声信号, 相当于干扰源, 将此取名为干扰扬声器。另一个扬声器与分流电路相连接, 由发出的噪声激励扬声器纸盆振动, 转换为分流电路中的电能而消耗, 该扬声器称为分流扬声器。实验装置如图 1 所示。

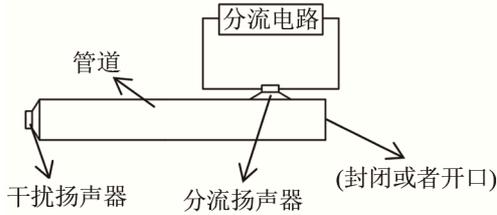


图 1 管道和扬声器的布置方式
Fig.1 Locations of duct and loudspeaker

图 1 中, 管道内的声压 p 可表示为^[3]

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

若将整个管道封闭, 边界条件:

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = \begin{cases} \rho_0 \frac{\partial^2 x_p}{\partial t^2}, & \text{干扰扬声器表面} \\ \rho_0 \frac{\partial^2 x_{sh}}{\partial t^2}, & \text{分流扬声器表面} \\ 0, & \text{刚性管壁表面} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, ρ_0 和 c_0 分别是空气密度和声速; \mathbf{n} 为垂直于扬声器振动面向里的法向量; x_p 和 x_{sh} 分别是干扰扬声器和分流扬声器纸盆表面的位移。

若选择开口管道, 在式(2)的基础上附加边界条件:

$$p=0, \text{ 开口处} \quad (3)$$

假设只考虑低于管道一阶截止频率的噪声, 可将其简化为一维模型^[1,9]。管道内任意位置 X_m 的声压可进一步表示为

$$p(X_m) = \sum_n \Omega_n(X_m) P_n \quad (4)$$

式(4)中, P_n 为对应的第 n 阶模态坐标下的声压系数, Ω_n 为第 n 阶归一化的声模态函数。

将式(4)代入式(1), 并考虑管道的黏滞阻尼, 可得管道的控制方程^[10]:

$$\ddot{P}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{P}_n + \omega_n^2 P_n = \rho_0 c_0^2 (F_{p,n} + F_{sh,n}) \quad (5)$$

式(5)中: ζ_n 是管道第 n 阶声模态的阻尼比; ω_n 为第 n 阶固有频率; $F_{p,n}$ 和 $F_{sh,n}$ 分别是由干扰扬声器和分流扬声器在第 n 阶所产生的模态压强^[10], 其表达式分别为

$$F_{p,n} = \ddot{x}_p \Omega_n(X_p) S_p, \quad F_{sh,n} = \ddot{x}_{sh} \Omega_n(X_{sh}) S_{sh} \quad (6)$$

式(6)中: X_p 和 X_{sh} 分别是干扰扬声器和分流扬声器在管道中的位置; S_p 和 S_{sh} 分别是干扰扬声器和分流扬声器纸盆的面积。

将式(5)重新表示为状态空间的形式, 即:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{P}} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{N \times N} & \mathbf{I}_{N \times N} \\ -\boldsymbol{\omega}_p^2 & -2\boldsymbol{\zeta}_p \boldsymbol{\omega}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} + \rho_0 c_0^2 \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{N \times 1} & \mathbf{0}_{N \times 1} \\ S_p \boldsymbol{\Omega}_p & S_{sh} \boldsymbol{\Omega}_{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_{sh} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中,

$$\boldsymbol{\omega}_p = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N), \quad \boldsymbol{\zeta}_p = \text{diag}(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_N),$$

$$\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_N]^T,$$

$$\boldsymbol{\Omega}_p = [\Omega_1(X_p), \Omega_2(X_p), \dots, \Omega_N(X_p)]^T,$$

$$\boldsymbol{\Omega}_{sh} = [\Omega_1(X_{sh}), \Omega_2(X_{sh}), \dots, \Omega_N(X_{sh})]^T.$$

在管道内任意位置 X_m 处的声压 $p(X_m)$ 可表示为^[9]

$$p(X_m) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega}_m^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

为了评价管道的整体降噪效果, 可以用管道内各个位置的声压均方来评估^[8]。假设管道被平均分为 N 个小段, 声压均方为

$$A = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N p^2(X_i)} \quad (9)$$

2 分流扬声器模型

将扬声器与电路相连接, 扬声器纸盆受到声压振动, 使得背腔中的磁铁相对于音圈运动, 从而将声能转化为电能, 再由电路中的耗能元件将电能消耗。这类类似于压电分流技术的能量转化过程。

扬声器的机械模型如图 2 所示, 扬声器运动方程可表示为^[11-12]

$$M_m \ddot{x}_{sh} + C_m \dot{x}_{sh} + K_m x_{sh} = Bl \cdot I - p S_{sh} \quad (10)$$

式(10)中: M_m 、 C_m 和 K_m 分别是扬声器的移动质量、阻尼和刚度; Bl 是音圈的力电耦合因子; I 为电流; p 是作用在纸盆上的压强。

纸盆表面所受的压强为:

$$p = p_F - p_R \quad (11)$$

$$p_R = -\frac{S_{sh} \rho_0 c_0^2}{V_s} x_{sh} \quad (12)$$

式(12)中, p_F 和 p_R 分别是纸盆前面和背面的压强, V_s 是扬声器背腔体积。

扬声器的等效刚度可表示为 $K_T = K_m + S_{sh}^2 \rho_0 c_0^2 / V_s$, 结合式(10)~式(12)可得扬声器的状态空间方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{sh} \\ \dot{x}_{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K_T}{M_m} & -\frac{C_m}{M_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{sh} \\ \dot{x}_{sh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{Bl}{M_m} & -\frac{S_{sh}}{M_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ p_F \end{bmatrix} \quad (13)$$

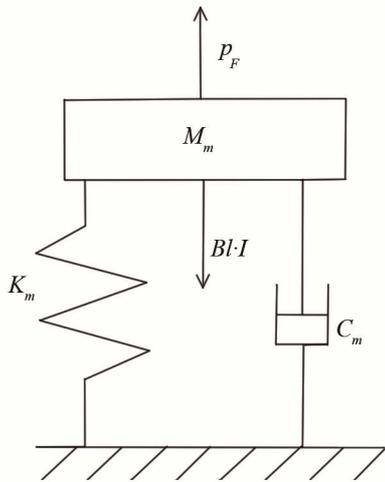


图 2 扬声器的机械模型
Fig.2 Mechanical model of loudspeaker

由于式(13)中的扬声器输入电流 I 并不能直接得到, 根据扬声器的等效电路原理图(如图 3 所示), 可以得到扬声器的输入电压与电流的关系^[13-14]:

$$L_m \dot{I} + R_m I = V_{in} - BL \cdot \dot{x}_{sh} \quad (14)$$

式(14)中, L_m 和 R_m 是扬声器自身的电感和电阻; V_{in} 是外接在音圈两端的输入电压。

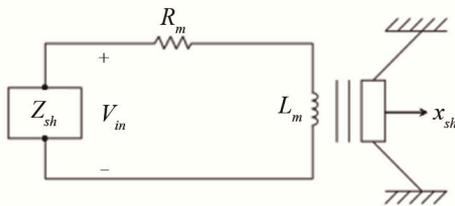


图 3 扬声器的等效电路原理图
Fig.3 Equivalent circuit of loudspeaker

对于本文所提出的分流扬声器, 由于没有外接电源, 所以 V_{in} 为分流电路两端电压, 可以将其电压定义为

$$V_{in} = -Z_{sh} I \quad (15)$$

式中, Z_{sh} 为分流电路的阻抗。

由式(14)和式(15)可以得到分流电路电流 I 与速度 \dot{x}_{sh} 之间的传递函数:

$$H_{sh}(s) = \frac{I}{\dot{x}_{sh}} = -\frac{BL}{L_m s + R_m + Z_{sh}} \quad (16)$$

本文提出的分流电路目的是通过改变分流电路的元件参数, 调节扬声器质量、阻尼和刚度, 从而改变扬声器的固有频率和阻尼比。为此采用如图 4 所示的分流电路。基本思路为: 首先通过集成运放实现负电阻和负电感来抵消扬声器自身的电阻值及电感值, 再加入一组并联的 LRC 电路, 使得扬声器的固有频率和阻尼比可以独立调节。

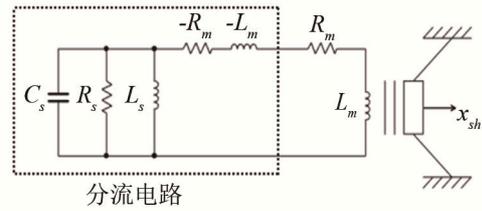


图 4 分流电路原理图
Fig.4 Principle diagram of shunt circuit

由图 4 所示电路元件的连接方式可以得到分流电路的等效阻抗为

$$Z_{sh} = -sL_m - R_m + \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{L_s s} + C_s s} \quad (17)$$

式(17)中, C_s 、 R_s 和 L_s 分别是分流电路中的电容、电阻和电感。

把式(17)代入式(15), 整理可得:

$$\frac{I}{\dot{x}_{sh}} = H_{sh}(s) = -BL \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{L_s s} + C_s s \right) \quad (18)$$

如果把式(18)代入式(10), 整理后可得:

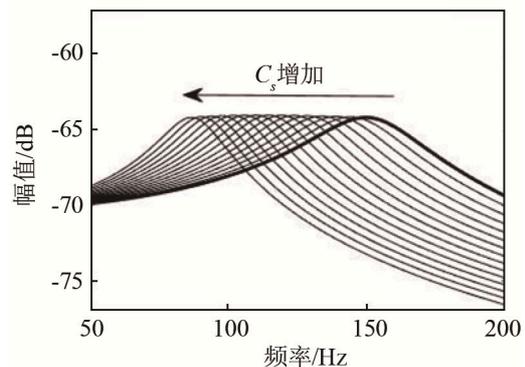
$$[M_m + (BL)^2 \cdot C_s] \ddot{x}_{sh} + [C_m + (BL)^2 \cdot \frac{1}{R_s}] \dot{x}_{sh} + [K_T + (BL)^2 \cdot \frac{1}{L_s}] x_{sh} = -p_F S_{sh} \quad (19)$$

从式(19)可以发现, 分流电路中的电容 C_s 、电阻 R_s 和电感 L_s 分别改变的是扬声器的等效质量、等效阻尼和等效刚度。

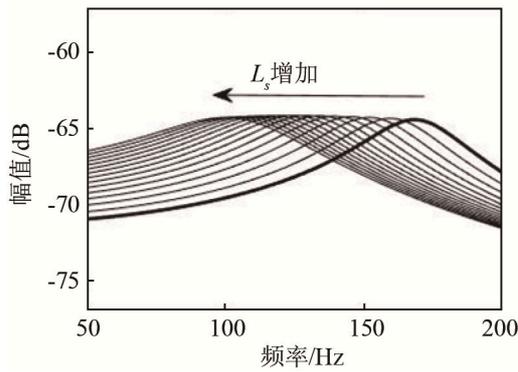
运用 Matlab 软件后, 再分别绘制得到: 通过改变分流电路的电容 C_s 、电感 L_s 和电阻 R_s 值; 分流扬声器系统输出为位移、输入为压强的频域特性 bode 图(如图 5 所示)。

从图 5 中可以发现, 通过改变电路的元件参数, 可以实现对扬声器的固有频率和阻尼比独立调节。

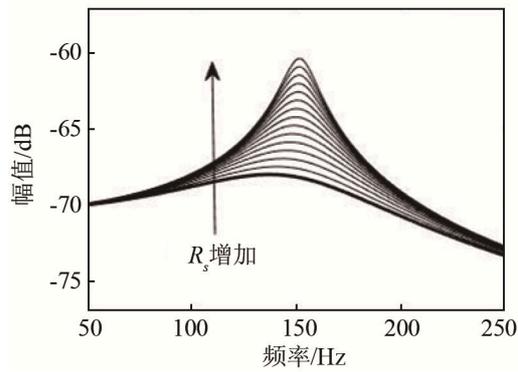
分流扬声器在控制管道噪声中的作用, 类似于 Helmholtz 共振器。对分流电路的优化, 等同于对分流扬声器的固有频率和阻尼比的优化。根据



(a) 改变电容 C_s



(b) 改变电感 L_s



(c) 改变电阻 R_s

图 5 分流扬声器参数变化的 Bode 图

Fig.5 The Bode diagram of shunt loudspeaker parameter change

Helmholtz 共振器的理论可知，其最优固有频率 ω_{sh}^{opt} 与目标声模式的固有频率 ω_n 一致^[9]：

$$\omega_{sh}^{opt} = \sqrt{[K_T + (Bl)^2 \cdot \frac{1}{L_s}] / [M_m + (Bl)^2 \cdot C_s]} = \omega_n \quad (20)$$

而最优阻尼比 ζ_{sh}^{opt} 可以由以下方程得到^[15]：

$$\varepsilon^4 \left(\frac{1}{2\zeta_{sh}^{opt}} \right)^4 + 4\varepsilon^2 \zeta_n \left(\frac{1}{2\zeta_{sh}^{opt}} \right)^3 + \varepsilon^2 \left(\frac{1}{2\zeta_{sh}^{opt}} \right)^2 - 1 = 0 \quad (21)$$

式(21)中， $\varepsilon^2 = \Omega_n^2(x_{sh})V_{sh}/V_d$ 。 V_d 为管道体积， V_{sh} 为分流扬声器的等效体积： $V_{sh} = \rho_0 c_0^2 S_{sh}^2 / [K_T + (Bl)^2 / L_s]$ 。

3 数值计算

根据前面所建立的扬声器-管道模型，运用 Matlab 软件编程计算所设计的分流扬声器的控制效果。管道参数及扬声器参数如表 1、2 所示。

分别以封闭和开口管道为例进行数值计算，分流扬声器放置在封闭及开口管道的位置均为 $X_{sh}=0.9$ m，结果分别如图 6 和图 7 所示。例如，为了控制管道的第一阶声模式，通过调节分流电路参数，使分流扬声器的固有频率与管道噪声的第一阶固有频率一致，并使其达到最优阻尼比。控制效果如图 6(a)和 7(a)所示。若需要控制第 2、第 3、第 4

表 1 管道参数表

Table 1 Duct parameters

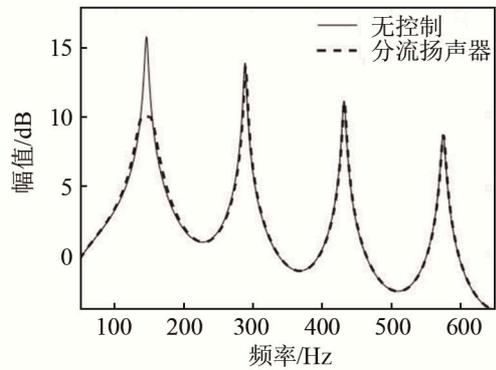
参数	长 L_x/m	宽 L_y/m	高 L_z/m	空气密度 $\rho_0/(kg/m^3)$	声速 $c_0/(m/s)$
值	1.2	0.2	0.2	1.205	344

表 2 扬声器参数表

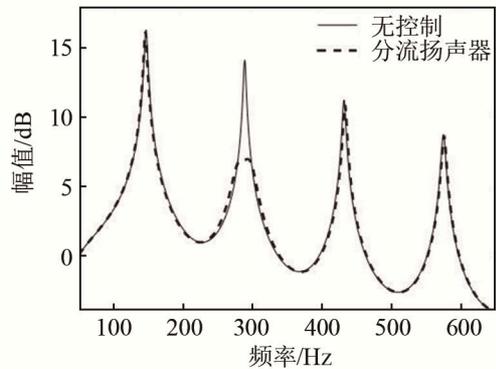
Table 2 Loudspeaker parameters

参数	圆锥面积 S_{sh}/m^2	移动质量 M_m/kg	固有频率 ω_m/Hz	背腔体积 V_s/m^3
值	90×10^{-4}	9.6×10^{-3}	47.5	90×10^{-5}

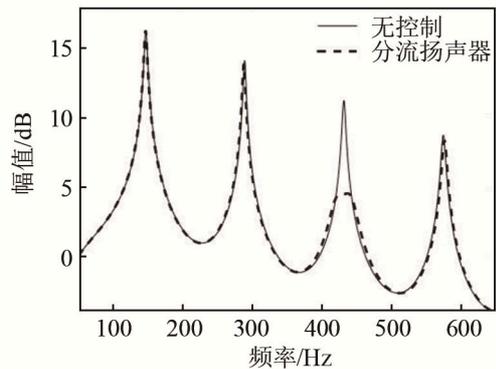
参数	力电耦合因子 $Bl/(T \cdot m)$	电感 L_m/H	电阻 R_m/Ω
值	4.5	0.8×10^{-3}	5.6



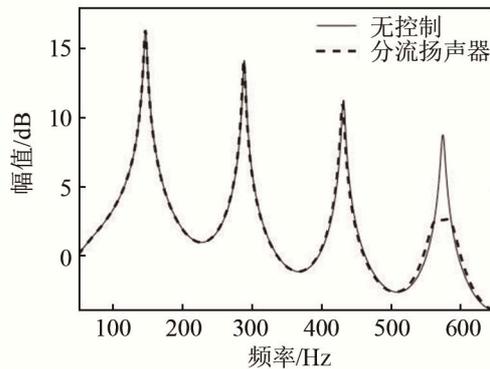
(a) 分流扬声器控制第 1 阶模式



(b) 分流扬声器控制第 2 阶模式



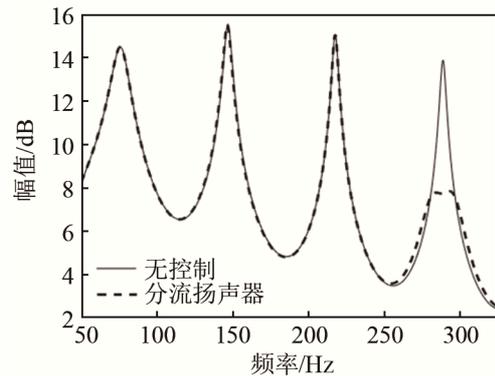
(c) 分流扬声器控制第 3 阶模式



(d) 分流扬声器控制第 4 阶模态

图 6 封闭管道噪声控制效果图

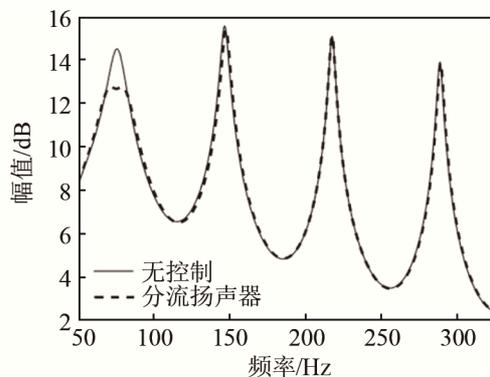
Fig.6 Closed duct noise control effect diagram



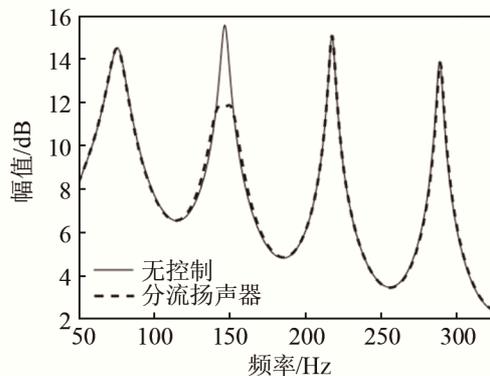
(d) 分流扬声器控制第 4 阶模态

图 7 开口管道噪声控制效果图

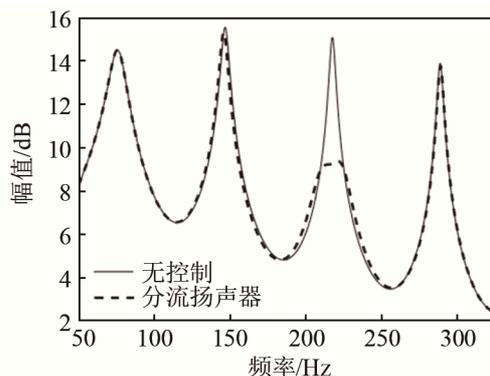
Fig.7 Opening duct noise control effect diagram



(a) 分流扬声器控制第 1 阶模态



(b) 分流扬声器控制第 2 阶模态



(c) 分流扬声器控制第 3 阶模态

阶模态时，同样可以通过调节分流电路，使得分流扬声器具有良好的控制效果，其效果分别如图 6(b)、6(c)、6(d)和图 7(b)、7(c)、7(d)所示。

4 结束语

运用分流扬声器控制管道噪声，是通过所建立的管道-扬声器耦合模型和分流扬声器模型设计了分流电路，模型可以应用于封闭或者开口管道。根据所要控制的某阶模态调节分流电路中元件参数来改变分流扬声器的固有频率和阻尼比，使之达到最佳的控制效果。数值计算结果表明，所设计的分流扬声器能有效实现管道的噪声控制，并且不需要传感器和控制器，结构简单，这说明本方法有一定的实用价值。本文的实验工作已在进行中。

参 考 文 献

- [1] 吴斌, 周大森, 费仁元, 等. 管道有源消声实验系统的阻抗控制研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(6): 457-504.
WU Bin, ZHOU Dasen, FENG Renyuan, et al. Study on the impedance control of duct active sound attenuation experimental system[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(6): 457-504.
- [2] 史东伟, 冯声振, 邱小军. 有源吸声尖劈的实验研究[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 773-777.
SHI Dongwei, FENG Shengzhen, QIU Xiaojun. Experimental study of active acoustic wedge[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(6): 773-777.
- [3] ZHANG Yumin, CHAN Yumji, HUANG Lixi. Thin broadband noise absorption through acoustic reactance control by electro-mechanical coupling without sensor[J]. J. Acoust. Soc. Am., (S0001-4966), 2014, 135(5): 2738-2745.
- [4] TAO Jiancheng, JIAO Qijin, QIU Xiaojun. Sound absorption of a finite micro-perforated panel backed by a shunted loudspeaker[J]. J. Acoust. Soc. Am. (S0001-4966), 2014, 135(1): 231-238.
- [5] TAO Jiancheng, JIAO Qijin, QIU Xiaojun. A composite sound absorber with micro-perforated panel and shunted loudspeaker[C]// Proceedings of Meetings on Acoustics (S1939-800X). Acoustical

- Society of America, 2013, 19(1): 015068.
- [6] Kim J, Jung Y C. Piezoelectric smart panels for broadband noise reduction[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures (S1045-389X)*, 2006, 17(8/9): 685-690.
- [7] ZHANG Yumin, HUANG Lixi, ZHANG Zeyi. Tunable noise absorption by shunted loudspeaker[C]//*International Congress on Sound and Vibration (ICSV)*. Beijing, 2014.
- [8] Lissek H. Electroacoustic metamaterials: achieving negative acoustic properties with shunt loudspeakers[C]//*Proceedings of Meetings on Acoustics*. Acoustical Society of America(S1939-800X), 2013, 19(1): 1-8.
- [9] MAO Qibo, Pietrzko S. Control of noise and structural vibration[M]. London: Springer(S0018-1560), 2013: 213-355.
- [10] Pietrzko S, MAO Qibo. Noise reduction in a duct using passive/semiactive shunt loudspeakers[C]//*The 16th International Congress on Sound and Vibration, Kraków, Poland*. 2009: 5-9.
- [11] 陆晓, 徐楚林, 温周斌. 动圈式扬声器数值分析方法[J]. *声学技术*, 2012, 31(4): 407-412.
- LU Xiao, XU Chulin, WEN Zhoubin. Research on a new numerical simulation method of moving-coil loudspeaker[J]. *Technical Acoustics*, 2012, 31(4): 407-412.
- [12] Černík M, Mokřý P. Sound reflection in an acoustic impedance tube terminated with a loudspeaker shunted by a negative impedance converter[J]. *Smart Materials and Structures (S0964-1726)*, 2012, 21(11): 1-9.
- [13] Lissek H, Boulandet R. Design of shunt electric networks in view of sound absorption with loudspeakers[C]// *Proceedings of the 6th European Congress on Acoustics*, 2011: 1-6.
- [14] 刘成, 沈勇, 董桂官. 蠕变效应对微型扬声器小信号参数建模的影响[J]. *声学技术*, 2011, 30(3): 250-253.
- LIU Cheng, SHEN Yong, DONG Guiguan. The influence of creep effect on small signal parameters modeling of microspeaker[J]. *Technical Acoustics*, 2011, 30(3): 250-253.
- [15] Fahy F J, Schofield C. A note on the interaction between a Helmholtz resonator and an acoustic mode of an enclosure[J]. *Journal of Sound and Vibration(S0022-460X)*, 1980, 72(3): 365-378.

中国声学学会水声学分会 2017 年换届会议纪要

2017 年全国声学学术会议于 9 月 22~25 日在哈尔滨工程大学召开。在此期间, 水声学分会于 2017 年 9 月 23 日进行了 2017 年换届工作会议, 共有来自中国科学院声学研究所、西北工业大学、北京大学、哈尔滨工程大学等 27 个单位的参会代表 52 人, 其中应到水声学分会委员 45 人, 实到 42 人。本次会议由副主任委员、中国科学院声学研究所东海研究站胡长青研究员主持。

会议在哈尔滨工程大学启航活动中心黄河厅拉开帷幕, 第八届主任委员李琪教授首先总结了水声学分会第八届委员会的工作, 然后胡长青介绍了水声学分会 2017 年换届方案以及各单位酝酿推荐产生委员候选人的过程。大会选举产生了第九届水声学委员会委员 45 名, 并选举产生了第九届水声学委员会主任委员 1 名、副主任委员 7 名。西北工业大学杨益新教授当选主任委员, 海军研究院刘清宇研究员、哈尔滨工程大学殷敬伟教授、中国科学院声学研究所李整林研究员、中国科学院声学研究所东海研究站许伟杰研究员、中国船舶重工集团公司第 715 研究所杜栓平研究员、中国船舶重工集团公司第 726 研究所杜选民研究员、海鹰企业集团有限责任公司刘宇研究员等当选副主任委员。

选举结束后召开了水声学分会第九届委员会第一次会议。杨益新主任委员主持会议, 与会委员踊跃发言, 献计献策, 围绕本届委员会的工作计划、水声学的发展问题以及如何更好地开展学术交流来为广大会员服务等问题进行了深入的讨论。会议研究部署了分会在 2018 年的工作重点, 明确了本届委员会工作的方向和目标, 并重点强调了要重视青年学生和青年科技工作者的培养, 做到水声学科研究工作后继有人, 研究工作具有延续性, 从而提高我国水声学研究的水平。参会的水声学分会委员表示一定会努力工作, 团结联系广大水声科技工作者, 推动我国水声学事业蓬勃发展。

中国声学学会水声学分会委员会