

◇ 研究报告 ◇

阵列式阻性消声器传递损失计算模型*

赵亚林¹ 蒋浩杰² 马建刚¹ 王 绿¹ 方庆川³ 翟国庆^{2†}

(1 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院 西安 710100)

(2 浙江大学环境与资源学院 杭州 310058)

(3 深圳中雅机电实业有限公司 深圳 518031)

摘要: 针对气流通道彼此独立且截面尺寸较小的直管式阻性消声器, Belov 基于声波导管理论推导了其消声量计算公式, 但该公式不适用于气流通道彼此连通且截面尺寸较大的阵列式阻性消声器。为此, 提出了一种阵列式消声器消声量计算方法。将阵列式消声器划分为周期性排列的消声单元, 每个消声单元包含 1 个吸声柱。分别参照扩张式消声器和直管阻性消声器计算消声单元的抗性部分 (进出口气流通道截面突变处) 和阻性部分消声量的理论值 TL_1 和 TL_2 。在此基础上, 采用有限元法仿真得到消声器消声量仿真值 TL_s , 基于阻性部分消声量仿真值和理论值的比值 $(TL_s - TL_1)/TL_2$, 拟合确定各倍频带阻性消声量修正函数 N_f , 即修正后的消声量理论值计算模型为 $TL'_t = TL_1 + TL_2 \cdot N_f$ 。作为算例, 建立了多孔吸声材料流阻率为 $11425 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 时适用于不同结构尺寸的阵列式消声器消声量计算模型。实测结果验证表明, 各倍频带修正后的消声量理论值与实测值绝对误差均小于 3 dB。当吸声材料的流阻率与算例中取值相差较大时, 消声量计算模型需参照该研究所述方法另行建立。

关键词: 阵列式阻性消声器; 消声量; 计算模型; Belov 公式

中图法分类号: TB535.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2023)06-1264-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.06.019

Calculation model of transmission loss for arrayed elements dissipative silencers

ZHAO Yalin¹ JIANG Haojie² MA Jiangang¹ WANG Lyu¹ FANG Qingchuan³ DI Guoqing²

(1 State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

(2 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

(3 Shenzhen Zhongya Mechanic and Electric Industry Co., Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract: Aiming to pipeline dissipative silencers with independent airflow channels and small cross-section size, Belov derived the calculation formula of noise elimination based on sonic catheter theory. This formula was not suitable for arrayed elements dissipative silencers with interconnected airflow channels and large cross-section size. For this reason, this study proposed a calculation method of noise elimination for arrayed elements silencers. The arrayed elements silencer was divided into periodically arranged silencing units and each silencing unit contained a sound-absorbing column. Each silencing unit was simplified as an expanded muffler and a pipeline dissipative silencer respectively and the theoretical values TL_1 and TL_2 of the resistant part (a sudden change of cross-section at inlet and outlet of airflow channel) and the dissipative part of noise elimination were calculated respectively. On this basis, the simulated value TL_s of the noise elimination of each arrayed elements silencer was obtained by the finite element method. The octave band correction function for the noise

2022-07-29 收稿; 2022-11-01 定稿

*国网陕西省电力有限公司科技项目 (5226KY20001J)

作者简介: 赵亚林 (1987-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 电气设备振动与噪声。

†通信作者 E-mail: dgq@zju.edu.cn

elimination of dissipative part, N_f , was obtained by fitting the values of $(TL_s - TL_1)/TL_2$ at all 1/1 octave bands. The modified model for calculating the theoretical value of noise elimination was $TL'_t = TL_1 + TL_2 \cdot N_f$. As an example, the calculation model of noise elimination for arrayed elements dissipative silencers with different structures and sizes was established when the flow resistance of porous sound absorbing material is $11425 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. It was testified by actual measurement results that the absolute error between modified theoretical values and measured values of noise elimination at each octave band was less than 3 dB. When the flow resistance of sound absorbing materials differs significantly from the values given in the example, the calculation models of noise elimination should be determined based on the method proposed in this study.

Keywords: Arrayed elements dissipative silencers; Noise elimination; Calculation model; Below formula

0 引言

阵列式阻性消声器是近年来一种非常有潜力的新型消声器^[1]。与片式阻性消声器相比,阵列式消声器吸声柱宽度和总吸声面积较大,具有更高消声量,且具有通流面积大、气流阻力小、气流再生噪声和压力损失小等优点^[2],在大风量的地铁风亭、空冷器、冷却塔和航空发动机试车间等场所得到广泛应用^[3-4]。

消声器消声量通常采用传递损失(Transmission loss, TL)进行评价。TL指消声器入口端声功率级和出口端声功率级的差值,其可通过测量或理论计算确定。阵列式消声器几何尺寸通常较大,《声学 管道消声器和风道末端单元的实验室测量方法插入损失、气流噪声和全压损失》(GB/T 25516-2010)中给出的常规试验台无法满足其测试要求。为此,《声学 单元并排式阻性消声器传声损失、气流再生噪声和全压损失系数的测定等效法》(GB/T 36079-2018)提出采用等效法测量阵列式消声器消声量,该方法需测量断面参数完全相同但长度不等的2台消声器,根据测试结果确定阵列式

消声器单位长度消声量,消声量测量费时费力且投入大,有必要发展阵列式消声器消声量计算模型。阻性消声器消声量计算公式主要有Belov公式和Sabine公式^[5-6]。Belov在声波导管理论基础上,假设导管壁面为非刚性壁面且导管截面尺寸较小,推导了适用于直管式消声器的消声量计算公式^[7-9]。Sabine建立了实际管道系统,通过测量不同长度、尺寸和形状的管道中声衰减量,根据实验数据总结出直管式消声器消声量计算公式^[10-11]。Belov公式和Sabine公式均针对单通道的直管式阻性消声器,不适用于横截面尺寸较大且气流通道彼此连通的阵列式阻性消声器。

本文根据阵列式消声器结构特点,在合理划分消声单元基础上,建立了半理论半经验消声量计算模型,并采用实测数据对模型进行了验证。

1 阵列式消声器消声量计算模型构建方法

阵列式阻性消声器由吸声柱、外壳、支架杆组成,吸声柱在垂直气流断面上呈阵列式分布,吸声柱两端装有导流罩,吸声柱横截面通常为矩形。阵列式阻性消声器结构示意图见图1。

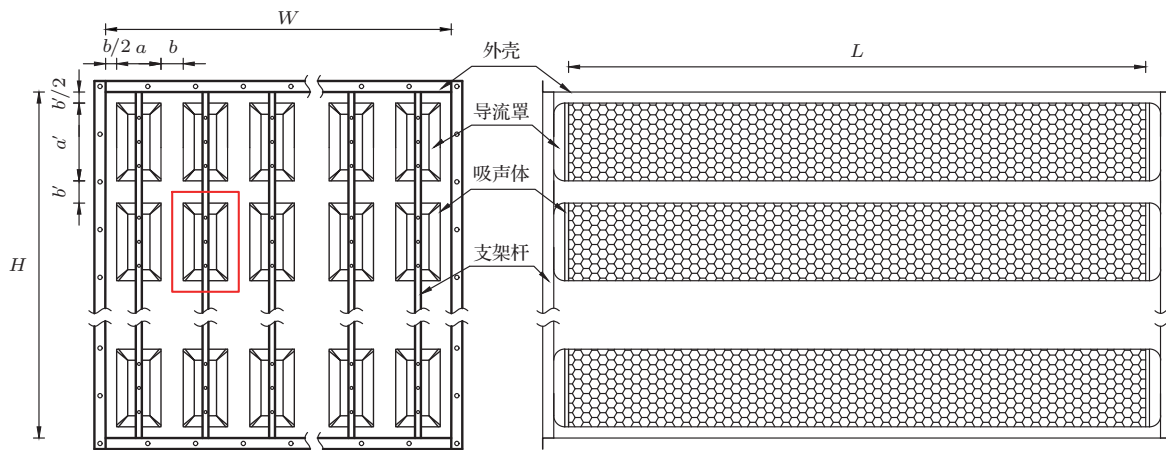


图1 阵列式阻性消声器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of arrayed element dissipative silencer

图1中, W 为消声器宽度; H 为消声器高度; L 为消声器有效长度; a 为矩形吸声柱横截面长度; a' 为矩形吸声柱横截面宽度; b 为吸声柱横向柱间距; b' 为吸声柱纵向柱间距; $b/2$ 和 $b'/2$ 分别为吸声柱与外壳的横向间距和纵向间距, 其通常为柱间距的 $1/2$ 。

$m \times n$ 阵列式阻性消声器含有 $m \times n$ 个吸声柱, 将其划分为 $m \times n$ 个周期性排列的消声单元 (见图1中红色框), 每个消声单元包含1个吸声柱。阵列式消声器具有周期性结构, 可以将单个消声单元的消声量视为阵列式消声器消声量。每个消声单元的倍频带消声量理论值 TL_t 为抗性部分 (进出口气流通道截面突变处) 倍频带消声量理论值 TL_1 和阻性部分倍频带消声量理论值 TL_2 之和:

$$TL_t = TL_1 + TL_2. \quad (1)$$

将抗性部分等效为扩张式消声器, 计算其每个频率上的消声量理论值。对第 i 个倍频带, 其频率范围记为 $[f_{i,a}, f_{i,b}]$, 中心频率为 f_i 。对闭区间 $[f_{i,a}, f_{i,b}]$ 做 n 等分, 获得 n 个子区间 $[x_0, x_1]$ 、 $[x_1, x_2]$ 、 $\dots$ 、 $[x_{n-1}, x_n]$, 取每个子区间的频率中值, 记作 $f_0, f_1, \dots, f_{n-1}$ 。根据黎曼积分定义计算抗性部分第 i 个倍频带消声量理论值 $TL_{1,i}$,

$$TL_{1,i} = \frac{\int_{f_{i,a}}^{f_{i,b}} 10 \lg \left[1 + \frac{1}{4} \left(M - \frac{1}{M} \right)^2 \sin^2(kL) \right] df}{f_{i,b} - f_{i,a}} \\ \approx \frac{\sum_{j=0}^{n-1} 10 \lg \left[1 + \frac{1}{4} \left(M - \frac{1}{M} \right)^2 \sin^2(kL) \right] (x_{j+1} - x_j)}{f_{i,b} - f_{i,a}}, \quad (2)$$

式(2)中, M 为消声单元扩张比,

$$M = \frac{(a+b)(a'+b') - aa'}{(a+b)(a'+b')};$$

L 为消声器有效长度; k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$ 。

阻性部分倍频带消声量理论值 TL_2 采用 Belov 公式计算:

$$TL_2 = \varphi(\alpha_0) \frac{P}{S} L, \quad (3)$$

式(3)中, $\varphi(\alpha_0)$ 为消声系数; α_0 为吸声材料垂直入射吸声系数; P 为消声单元中吸声柱横截面周长, $P = 2(a+a')$; L 为消声单元有效消声长度; S 为消声单元有效通风面积,

$$S = (a+b)(a'+b') - aa'.$$

根据《工业企业噪声控制设计规范》(GB/T 50087-2003) 给出的垂直入射吸声系数与消声系数换算表可确定消声系数 $\varphi(\alpha_0)$ 和吸声系数 α_0 换算关系:

$$\varphi(\alpha_0) = \begin{cases} 1.59\alpha_0 - 0.08, & \alpha_0 < 0.9, \\ 1.50, & \alpha_0 \geq 0.9. \end{cases} \quad (4)$$

本研究使用 Delany-Bazley-Miki 模型对阵列式阻性消声器采用的多孔吸声材料进行表征, 吸声材料的垂直入射吸声系数计算见公式(5)。其中, 表面声阻抗 Z_s 、特征声阻抗 Z_c 和传播常数 K_c 见公式(6)、公式(7)和公式(8)。

$$\alpha_0 = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \right|, \quad (5)$$

$$Z_s = -jZ_c \cot(K_c d), \quad (6)$$

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 5.05 (10^3 f / \sigma)^{-0.632} - j8.43 (10^3 f / \sigma)^{-0.632} \right], \quad (7)$$

$$K_c = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + 7.81 (10^3 f / \sigma)^{-0.618} - j11.41 (10^3 f / \sigma)^{-0.618} \right], \quad (8)$$

其中, α_0 为吸声材料垂直入射吸声系数; σ 为材料流阻率; ρ_0 、 c_0 、 f 和 ω 分别为空气密度、空气中的声速、声波频率和角频率; d 为多孔材料厚度, $d = 0.5(a+a')$ 。

消声器气流通道截面较大时, 随着入射声波频率增高, 声波逐渐呈声束状传播, 与吸声材料很少或不完全接触, 入射至吸声材料处的声能量明显下降, 这种现象称为高频失效。常见阻性消声器高频失效修正见公式(9), 高频失效频率计算见公式(10)^[5]:

$$TL'_2 = \frac{3-N}{3} \times TL_2, \quad (9)$$

$$f_u \approx 1.85 \frac{c}{d_{eq}}, \quad (10)$$

其中, TL'_2 为高频修正后的阻性部分消声量理论值; N 为大于高频失效频率的倍频带数; f_u 为高频失效频率; c 为声速; d_{eq} 为气流通道有效直径。

阻性消声器高频失效频率与气流通道横截面形状和尺寸有关。阵列式阻性消声器各消声单元彼此连通, 气流通道横截面呈异形且等效尺寸较大, 无法利用公式(10)计算气流通道的高频失效频率, 且公式(9)只能用于修正大于 f_u 的3个倍频带消声量。为此, 本研究拟参考公式(9)在各倍频带引入消

声量修正系数 β ,对阻性部分各倍频带消声量理论值进行修正。通过拟合各倍频带修正系数得到倍频带修正函数 N_f 。引入倍频带修正函数 N_f 后阻性部分倍频带消声量理论值 TL_2'' 见公式(11):

$$TL_2'' = TL_2 \times N_f = \varphi(\alpha_0) \frac{P}{S} L \times N_f. \quad (11)$$

综上,修正后的阵列式阻性消声器倍频带消声量理论值 TL_t' 计算模型见公式(12):

$$TL_t' = TL_1 + TL_2'' = TL_1 + \varphi(\alpha_0) \frac{P}{S} L \times N_f. \quad (12)$$

根据公式(12),可得到倍频带修正函数 N_f 的表达式,见公式(13):

$$N_f = \frac{TL_t' - TL_1}{\varphi(\alpha_0) \frac{P}{S} L}. \quad (13)$$

为确定不同吸声材料对应的倍频带修正函数 N_f ,需对阵列式消声器倍频带消声量理论值 TL_t' 进行仿真。采用有限元法仿真计算阵列式消声器每个频率下的消声量,通过拟合可建立消声量仿真值 TL_s 和 f 的关系函数 $TL(f)$ 。根据黎曼积分定义计算第 i 个倍频带消声量仿真值 $TL_{s,i}$ (见公式(14))。将各倍频带消声仿真结果 TL_s 代替 TL_t' 代入公式(13),可得到阵列式消声器阻性部分消声量倍频带修正函数 N_f 。

$$TL_{s,i} = \frac{\int_{f_{i,a}}^{f_{i,b}} TL(f) df}{f_{i,b} - f_{i,a}} \approx \frac{\sum_{j=0}^{n-1} TL(f_j)(x_{j+1} - x_j)}{f_{i,b} - f_{i,a}}. \quad (14)$$

2 算例分析

根据前面所述阵列式消声器消声量计算模型构建方法,当多孔吸声材料流阻率不同时,阵列式消声器阻性部分消声量倍频带修正函数 N_f 会有所不同。本研究以流阻率为 $11425 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 的多孔吸声材料为例,建立了适用于不同结构尺寸的阵列式消声器消声量计算模型。

2.1 消声量仿真计算

2.1.1 建立几何模型

阵列式消声器具有周期性结构,将单个消声单元消声量视为阵列式消声器消声量,即忽略吸

声柱数量对消声量的影响,不妨 m 取5, n 取5。工程上所采用的阵列式阻性消声器吸声柱横截面通常为矩形,消声器通流比(有效通风截面与消声器横截面面积之比)大于0.5,吸声柱横截面长度和宽度通常取 $100\sim 500 \text{ mm}$,相邻两个吸声柱间距常取 $50\sim 500 \text{ mm}$ 。为此,本研究选取3种典型吸声柱,其横截面尺寸分别为 $100 \text{ mm}\times 100 \text{ mm}$ 、 $200 \text{ mm}\times 200 \text{ mm}$ 和 $300 \text{ mm}\times 300 \text{ mm}$,3种典型消声器柱间距分别为 100 mm 、 150 mm 和 200 mm 。由于消声量与消声器长度成正比,故消声器长度均取 1000 mm 。采用多物理场仿真软件建立3种典型阵列式消声器模型,其结构参数见表1,仿真模型见图2。

表1 阵列式消声器模型结构参数

Table 1 Structural parameters of arrayed element dissipative silencer models

(单位:mm)							
消声器	W	H	L	a	a'	b	b'
A	1000	1000	1000	100	100	100	100
B	1750	1750	1000	200	200	150	150
C	2500	2500	1000	300	300	200	200

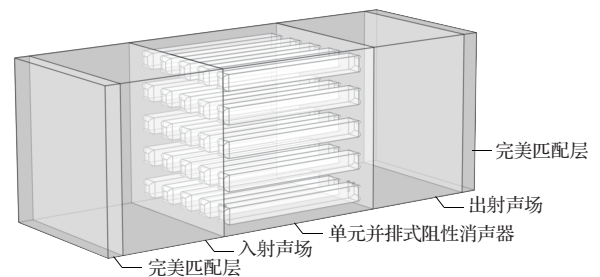


图2 阵列式阻性消声器仿真模型

Fig. 2 Simulation model of arrayed elements dissipative silencer

2.1.2 定义材料属性

声学计算中使用Delany-Bazley-Miki模型对多孔吸声材料进行表征,需要定义材料流阻率 σ 。本算例中,选取的多孔吸声材料流阻率为 $11425 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。

2.1.3 物理场设置

仿真模型中空气域采用压力声学模块进行建模,吸声柱内部吸声材料采用多孔介质声学建模,模型两端最外侧空气域设为完美匹配层。消声器壁面

设置为硬声场边界,吸声柱两端导流罩设置为内部硬声场边界。入射声场设置背景压力场,压力场类型为平面波,声压幅值为1 Pa,入射方向为垂直入射。当声源激发频率高于管道的截止频率,管道中会存在大量的高阶模态声波,此时管道内的声场是各个模态叠加的稳态声场。

2.1.4 网格划分

采用三棱柱单元对完美匹配层进行网格划分,气流垂直入射方向上网格层数设为8层,其余区域均采用自由四面体单元划分网格。为保证求解精度,最大网格单元尺寸设为最小波长的1/8。本研究中仿真计算63~4000 Hz各倍频带消声量,其频率上限为5600 Hz,故最大网格单元尺寸取5600 Hz对应波长的1/8。

2.2 仿真结果

垂直入射情况下,阵列式消声器各倍频带消声量仿真值 TL_s 见表2。

由表2可知,阵列式消声器各倍频带消声量随着频率升高先增大后减小,在1000 Hz倍频带上达到峰值。

本研究以Delany-Bazley-Miki模型为理论基础,采用多物理场仿真软件建立多孔吸声材料等效模型,仿真计算流阻率为11425 Pa·s/m²,厚度为100 mm、200 mm和300 mm的多孔吸声材料垂直入射吸声系数。根据公式(4)计算多孔吸声材料消声系数(见表3)。

将各倍频带消声仿真结果 TL_s 代替 TL'_t 代入公式(13),可计算得到各倍频带消声量修正系数,结

果见表4。由表4可知,不同阵列式消声器各倍频带消声量修正系数相近,故取算术平均值作为各倍频带消声量修正系数。

由表4可知,各倍频带消声量修正系数随频率升高先增大后减小,在1000 Hz处达到峰值,整体呈现中间高两边低的特点,类似高斯分布。采用高斯分布函数对各倍频带消声量修正系数进行拟合(见图3),可得到倍频带修正函数 N_f (见式(15))。

$$N_f = 1.08e^{\left[-0.5\left(\frac{\lambda_f - 5.1}{1.74}\right)^2\right]} - 0.05, \\ \lambda_f = \log_2(f_i/31.5), \quad (15)$$

式(15)中, f_i 为第*i*个倍频带中心频率。

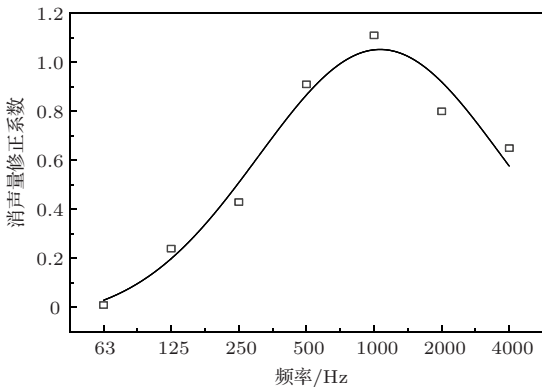


图3 倍频带消声量修正系数拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of correction coefficients of noise elimination at 1/1 octave band

综上,修正后的阵列式阻性消声器第*i*个倍频带消声量理论值 $TL'_{t,i}$ 计算模型见公式(16)。

$$TL'_{t,i} = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} 10 \lg \left[1 + \frac{1}{4} \left(M - \frac{1}{M} \right)^2 \sin^2(kL) \right] (x_{j+1} - x_j)}{f_{i,b} - f_{i,a}} + \varphi(\alpha_0) \frac{P}{S} L \left[1.08e^{-0.5\left(\frac{\lambda_f - 5.1}{1.74}\right)^2} - 0.05 \right]. \quad (16)$$

表2 阵列式消声器消声量仿真值 TL_s

Table 2 Simulated values, TL_s of noise elimination of arrayed element dissipative silencers

(单位: dB)

消声器	倍频带中心频率						
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
A	0.3	1.1	4.2	10.4	18.2	14.7	13.1
B	0.7	2.4	5.4	11.6	16.7	12.7	10.4
C	0.8	2.3	5.0	10.0	13.4	9.6	8.1

表 3 吸声材料的消声系数

Table 3 Anechoic coefficients of sound-absorbing materials

材料厚度/mm	倍频带中心频率						
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
100	0.18	0.30	0.77	0.92	1.34	1.50	1.50
200	0.41	0.94	1.19	1.30	1.50	1.50	1.50
300	0.68	0.93	1.12	1.50	1.50	1.50	1.50

表 4 阵列式消声器各倍频带消声量修正系数

Table 4 Correction coefficients of noise elimination of arrayed element dissipative silencers at each 1/1 octave band

消声器	倍频带中心频率						
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
A	0.008	0.222	0.375	0.844	1.015	0.728	0.639
B	0.026	0.225	0.406	0.919	1.141	0.852	0.670
C	0.007	0.267	0.493	0.976	1.184	0.813	0.642
平均值	0.014	0.238	0.425	0.913	1.113	0.798	0.650

3 实验验证

采用 1×2 阵列式消声器实测数据和文献 [12] 给出的 2×2 阵列式消声器实测数据, 对修正后的阵列式阻性消声器消声量计算模型进行验证, 上述消声

量均按 GB/T 25516-2010 标准进行测量, 消声器结构参数见表 5。修正后的消声量理论值 TL'_t 和实测值见表 6。

由表 6 可知, 各倍频带修正后的消声量理论值 TL'_t 与实测值绝对误差均小于 3 dB。

表 5 验证用阵列式消声器结构参数

Table 5 Structural parameters of arrayed element dissipative silencer models for verification

(单位: mm)							
消声器	W	H	L	a	a'	b	b'
1×2	1000	630	1000	300	300	200	
2×2	850	850	1000	300	300	150	150

表 6 修正后的消声量理论值 TL'_t 和实测值

Table 6 Modified theoretical values TL'_t and measured values of noise elimination

消声器		倍频带中心频率						
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
1×2 阵列式消声器	修正后的理论值	0.5	1.1	3.3	6.7	8.3	7.4	4.8
	实测值	0.0	2.0	5.0	6.0	8.0	7.0	6.0
	绝对误差	0.5	0.9	1.7	0.7	0.3	0.4	1.2
2×2 阵列式消声器	修正后的理论值	1.8	3.2	8.9	16.7	20.7	18.7	12.7
	实测值	2.2	4.0	10.3	17.8	17.9	15.8	11.0
	绝对误差	0.4	0.8	1.4	1.1	2.8	2.9	1.7

4 结论

针对 Belov 基于声波导管理论推导的阻性消声器消声量计算公式, 不适用于气流通道彼此连通且截面尺寸较大的阵列式阻性消声器问题, 本研究提出了一种阵列式消声器消声量计算方法。同时, 以流阻率为 $11425 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 多孔吸声材料为例, 建立了适用于不同结构尺寸的阵列式消声器消声量计算模型。实测结果验证表明, 各倍频带修正后的消声量理论值与实测值绝对误差均小于 3 dB。当吸声材料的流阻率与算例中取值相差较大时, 消声量计算模型可参照本研究所述方法另行建立。可进一步研究吸声材料流阻率对各倍频带阻性消声量修正函数 N_f 的影响, 通过在模型中增加与流阻率有关的消声量修正项, 建立计算阵列式阻性消声器消声量的普适模型。

参 考 文 献

- [1] 方庆川, 李清. 阵列式消声器: 广东, CN200810066387.5[P]. 2008-10-01.
- [2] 邹刚, 牛军川, 白国锋, 等. 阵列式结构消声器的通风阻力特性研究 [C]//2018 年全国声学大会论文集 I 噪声与振动控制, 2018.
- [3] 胡自林, 方庆川. 阵列式消声器性能曲线在地铁环控系统中的应用 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(6): 1794–1800.
- [4] 赵传辉, 韦红旗, 伍豪, 等. 阵列式消声器对自然通风逆流湿式冷却塔性能的影响 [J]. 发电设备, 2021, 35(2): 94–100. Zhao Chuanhui, Wei Hongqi, Wu Hao, et al. Effects of array mufflers on performance of a natural draft counter-flow wet cooling tower [J]. Power Equipment, 2021, 35(2): 94–100.
- [5] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [6] Dokumac E. Duct acoustics: fundamentals and applications to mufflers and silencers [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [7] Belov A I, Faynshteyn N D. Experimental study of sound attenuation in ventilation ducts [J]. Journal of Technical Physics, 1938, 8(16): 499–509.
- [8] Belov A I. On acoustic design of ventilation units [J]. Journal of Technical Physics, 1938, 8(7): 654–660.
- [9] Yang H, Lee J, Lee C W, et al. Transmission loss calculation of a pipe with dissipative silencer containing porous materials [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 150(4): A100.
- [10] Sabine H J. The absorption of noise in ventilating ducts [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1940, 12(1): 53–57.
- [11] Zhuravlev E, Chugunkov D, Seyfelmlyukova G. Improving the acoustic efficiency of laminated dissipative noise silencers for boiler gas-air paths [C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2019, 140: 02005.
- [12] 蒋昭旭, 龚凤海. 阵列式阻性消声器声学性能预测方法研究 [C]//2020 中国西部声学学术交流会, 2020.