

基于二阶共鸣器单元的宽频消声器研究与设计*

施全权¹⁾²⁾ 杨玉真^{2)†} 赵准¹⁾²⁾ 安秉文²⁾ 田朋溢³⁾
 蒋成成³⁾ 邓科^{1)‡} 贾晗²⁾ 杨军²⁾

1) (吉首大学物理系, 吉首 416000)

2) (中国科学院声学研究所噪声与振动实验室, 北京 100190)

3) (中国铁道科学研究院集团有限公司机车车辆研究所, 北京 100081)

(2022年7月11日收到; 2022年8月13日收到修改稿)

近年来, 声学人工结构逐渐成为降噪领域的研究热点, 亥姆霍兹共鸣器是其中的重要结构单元之一. 本研究旨在设计基于内插管式二阶亥姆霍兹共鸣器单元的宽频消声器. 传统亥姆霍兹共鸣器仅具有单一共振峰, 为了减少单元个数、降低消声器长度, 选取了具有两个共振峰的二阶亥姆霍兹共鸣器单元作为基本结构. 通过理论计算、仿真计算和实验测试对二阶共鸣器单元的隔声性能进行分析, 并在此基础上构建了宽频抗性消声器. 针对所设计的宽频消声器, 理论计算、仿真计算和实验测试的数据结果获得了良好的一致性: 在 267—929 Hz 的频率范围内实现了 20 dB 以上的传递损失. 该消声器结构简单、实用性高, 在噪声控制工程中具有广泛的应用前景.

关键词: 二阶亥姆霍兹共鸣器, 抗性消声器, 宽频隔声

PACS: 43.20.+g, 43.40.+s, 43.50.+y, 46.40.Ff

DOI: 10.7498/aps.71.20221377

1 引言

随着社会工业化进程的发展以及交通工具的普及, 噪声成为主要的环境污染源之一, 严重危害了人们的生理健康, 并对我们的日常工作和生活造成了不可忽视的影响. 噪声法的颁布, 愈发凸显了噪声控制的重要性. 近年来, 声学人工结构的快速发展, 为解决低频吸隔声问题提供了重要的材料基础^[1–21]. 2019年, 刘志恩等^[9]提出了一种新型并排式亥姆霍兹共鸣器消声结构, 将多个不同频率的共鸣器并排布置在管道同一截面, 能够实现共鸣器传递损失性能互不影响, 达到有效消除多频率噪声的目的. 2020年, Nguyen等^[12]基于狭缝型亥姆霍兹共鸣器, 设计了一款紧凑型的双层消声器, 能够在低

频宽带隔声的同时保持通风. Sun等^[13]设计了一个中心空心孔和两个周围的螺旋路径组成的超表面, 利用角状螺旋路径, 使系统的单极模和偶极模的响应强度在 900—1418 Hz 频率范围内保持平衡, 有效阻断超过 90% 的入射能量. 2021年, Dong等^[15]设计了一个耗散和反射共同作用的超宽带通风屏障, 在 650—2000 Hz 的范围内实现高效隔声. Long等^[16]将共振有损单元与非共振无损的声学软边界单元组合, 在深亚波长通风吸声器中实现了非对称的高效吸声. Shen等^[17]设计了一种由微穿孔板和复合波导(由亥姆霍兹共鸣器和主波导组合而成)组成的声学消声器, 在 100—1600 Hz 范围内实现平均 20 dB 的传递损失. 2022年, Liu等^[19]使用与中心开孔连接的旁路空间卷绕隧道, 在周期系统中发现了一个低频的大带隙, 通过超表面的级

* 中国国家铁路集团有限公司科技研发开发计划(批准号: P2021J035)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangyuzhen@mail.ioa.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: dengke@jsu.edu.cn

联阵列, 消声器展示出宽带的大传输损耗, 通过对不同超表面的优化, 可以将 198—412 Hz 全频谱的传递损失提高到 15 dB 以上. Yu 等^[20] 利用耦合模式理论设计了一种由高阶亥姆霍兹共鸣器和通风波导组成的多波段非对称声吸收和反射系统, 能有效控制多个频率的噪声.

目前宽频消声器采用的结构大多较为复杂, 给加工制作以及工程应用带来一定的难度. 亥姆霍兹共鸣器结构简单、调节方便, 在噪声控制工程中有着重要的应用价值^[22–34]. 本文运用传递矩阵、有限元仿真与实验相结合的方法, 研究了二阶亥姆霍兹共鸣器的隔声性能和共振峰的变化规律. 相较于一阶共鸣器结构, 二阶共鸣器具有良好的低频降噪能力, 且增加了一个高频的隔声峰. 通过改变二阶共鸣器的几何参数, 可有效调控两个主消声峰的频率分布. 在二阶共鸣器单元的研究基础上, 设计出一款由 9 个二阶共鸣器单元组成的宽频抗性消声器, 在低频段实现了优异的宽频降噪效果.

2 传递矩阵法建立数值理论模型

本节运用传递矩阵法推导二阶亥姆霍兹共鸣器的系统阻抗, 并建立基于二阶亥姆霍兹共鸣器的抗性消声器的理论模型. 将理论模型编程在 Matlab 软件中, 便可通过数值计算对两个主消声频段的降噪性能进行快速分析.

本研究采用传递矩阵法对内插管式二阶亥姆霍兹共鸣器进行建模. 图 1 所示的二阶共鸣器的总传递矩阵包含: 2 个内插管的传递矩阵 M_n^p , 2 个腔体管道的传递矩阵 M_c^p , 2 个内插管末端膨胀腔的传递矩阵 M_e^p , 以及 4 个由内插管末端截面突变引起的末端修正长度带来的传递矩阵 M_q^p , 其中

$p = 1, 2$ 表示结构序号, $q = f, b$ 分别代表内插管前端和后端.

本文中亥姆霍兹共鸣器各部分的复波数和复阻抗的表达式为^[25,32–34]

$$k_m^p = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + \frac{\delta(1-i)}{\sqrt{2}r_m^p} \left(1 + \frac{\gamma-1}{\sqrt{P_r}} \right) \right],$$

$$m = n, c; \quad p = 1, 2, \quad (1)$$

$$Z_m^p = \frac{\rho_0 c_0}{\pi(r_m^p)^2} \left[1 + \frac{\delta(1-i)}{\sqrt{2}r_m^p} \left(1 - \frac{\gamma-1}{\sqrt{P_r}} \right) \right],$$

$$m = n, c; \quad p = 1, 2, \quad (2)$$

其中下标 $m = n$ 时, 表示内插管的参数; 下标 $m = c$ 时, 表示空腔的参数; r_m^p 为结构等效半径: 对于圆形内插管即为内插管半径 r_n^p ; 本文同一个二阶共振器的两个空腔截面积相同, 对于方形空腔等效半径 $r_c^p = r_c = \sqrt{S_c/\pi}$, 其中 S_c 为空腔截面积. $\omega = 2\pi f$ 为角频率, i 是虚数单位, $\rho_0 = 1.21 \text{ kg/m}^3$ 和 $c_0 = 343 \text{ m/s}$ 分别为空气的密度和声速. $\delta = \sqrt{2\mu/(\rho_0\omega)}$ 为边界黏滞层厚度, $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 为空气黏滞系数, $\gamma = 1.4$ 为空气热容比, P_r 为标压下的普朗特数 0.702.

内插管中声波传播的传递矩阵表达式如下:

$$M_n^p = \begin{bmatrix} \cos(k_n^p l_n^p) & iZ_n^p \sin(k_n^p l_n^p) \\ \frac{i \sin(k_n^p l_n^p)}{Z_n^p} & \cos(k_n^p l_n^p) \end{bmatrix}, \quad p = 1, 2. \quad (3)$$

空腔中声波传播的传递矩阵表达式如下:

$$M_c^p = \begin{bmatrix} \cos[k_c^p (l_c^p - l_n^p)] & iZ_c^p \sin[k_c^p (l_c^p - l_n^p)] \\ \frac{i \sin[k_c^p (l_c^p - l_n^p)]}{Z_c^p} & \cos[k_c^p (l_c^p - l_n^p)] \end{bmatrix},$$

$$p = 1, 2. \quad (4)$$

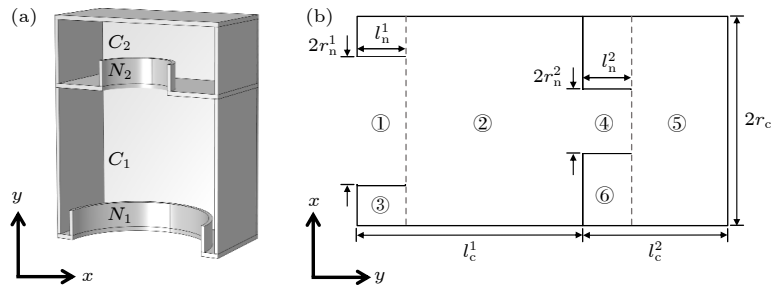


图 1 (a) 二阶共鸣器的三维截面示意图; (b) 二维结构示意图及几何参数

Fig. 1. (a) 3D cross-sectional schematic diagram of second-order resonator; (b) 2D structure schematic diagram and geometrical parameters.

内插管末端膨胀腔的传递矩阵表达式如下:

$$\mathbf{M}_c^p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ iS_c^p \frac{\tan(kl_n^p)}{\rho_0 c_0} & 1 \end{bmatrix}, \quad p = 1, 2, \quad (5)$$

其中 $k = \omega/c_0$ 为波矢, S_c^p 为内插管末端膨胀腔的横截面积: $S_c^p = S_c - \pi(r_n^p)^2$.

内插管末端修正长度带来的传递矩阵表达式如下:

$$\mathbf{M}_q^p = \begin{bmatrix} 1 & iZ_n^p k \Delta l_q^p \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad p = 1, 2; \quad q = f, b, \quad (6)$$

第一内插管与波导管连接处的修正长度为

$$\Delta l_f^1 = 0.82 \left[1 - 0.235 \frac{r_n^1}{r_t} - 1.32 \left(\frac{r_n^1}{r_t} \right)^2 + 1.54 \left(\frac{r_n^1}{r_t} \right)^3 - 0.86 \left(\frac{r_n^1}{r_t} \right)^4 \right] r_n^1, \quad (7)$$

其中 r_t 为波导管等效半径, 有 $r_t = \sqrt{S_t/\pi}$, S_t 是波导管横截面积.

第二内插管与第一空腔连接处的修正长度为

$$\Delta l_f^2 = 0.82 \left[1 - 1.35 \frac{r_n^2}{r_c} + 0.31 \left(\frac{r_n^2}{r_c} \right)^3 \right] r_n^2, \quad (8)$$

内插管与后端空腔连接处的修正长度为

$$\Delta l_b^p = \left(0.6165 - 0.7046 \frac{r_n^p}{r_c} + 0.2051 e^{-3.4453 \frac{l_n^p}{2r_n^p}} - 0.3749 \frac{r_n^p}{r_c} e^{-2.6023 \frac{l_n^p}{2r_n^p}} \right) r_n^p, \quad p = 1, 2. \quad (9)$$

通过传递矩阵模型推导出二阶共振器管口与末端的声压、体积速度关系如下所示:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_f^1 \mathbf{M}_n^1 \mathbf{M}_b^1 \mathbf{M}_c^1 \mathbf{M}_c^1 \mathbf{M}_f^2 \mathbf{M}_n^2 \mathbf{M}_b^2 \mathbf{M}_c^2 \mathbf{M}_c^2 \begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix} \\ = \mathbf{M} \begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

二阶共鸣器单元作为波导管旁支结构时可以等效为一超薄的阻抗边界, 由于末端刚性边界

$V_2 = 0$, 代入 (10) 式可得共鸣器等效阻抗为 $Z_R = M(1, 1)/M(2, 1)$, 此时波导管的传递矩阵是:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_R} & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

综上, 可以求得系统的传递损失 TL 如下所示:

$$TL = 20 \log \left[\frac{\left| T_{11} + \frac{T_{12}}{Z_t} + T_{21} * Z_t + T_{22} \right|}{2} \right], \quad (12)$$

其中, T_{ij} 为传递矩阵 \mathbf{T} 的第 i 行 j 列的元素 ($i, j = 1, 2$); $Z_t = \rho_0 c_0 / S_t$ 为波导管的平面波阻抗, S_t 为波导管横截面积.

3 二阶共鸣器单元计算、仿真与实验的验证

本文为了验证上述二阶共鸣器理论模型的正确性, 对两组几何参数不同的二阶共鸣器单元分别进行 Matlab 数值计算、Comsol Multiphysics 有限元仿真和 B&K 方形驻波管实验测量. 图 2(a) 所示是二阶共鸣器单元在主波导管流道的侧方工作的三维仿真示意图, 图 2(b) 所示是二阶共鸣器单元在方形驻波管侧方工作的实验测量示意图. 本研究验证的两个二阶共鸣器单元的几何参数如表 1 所示. 数值计算、仿真计算与实验测量的传递损失结果的对比数据如图 2(c), (d) 所示.

从图 2(c), (d) 可以看到, 二阶共鸣器单元有两个传递损失峰. B&K 方形驻波管的测量数据表明: 1 号样品共振频率在 470 Hz 和 920 Hz, 2 号样品共振频率在 450 Hz 和 864 Hz. 从图中可以观察到, 1 号和 2 号样品的理论计算结果、仿真计算结果与实验测量结果的一致性很好.

4 二阶共鸣器单元的声学特性

4.1 二阶共鸣器的双峰特性

为讨论二阶共鸣器的优越性, 做以下对比分析.

表 1 两个二阶共鸣器单元的几何参数表

Table 1. Geometrical parameters of two 2nd-order resonators.

NO.	S_c/mm^2	$l_n^1, l_n^2/\text{mm}$	l_c^1/mm	l_c^2/mm	r_n^1/mm	r_n^2/mm
1	100×100	10	70	30	40	20
2	115×100	10	70	30	42.5	20

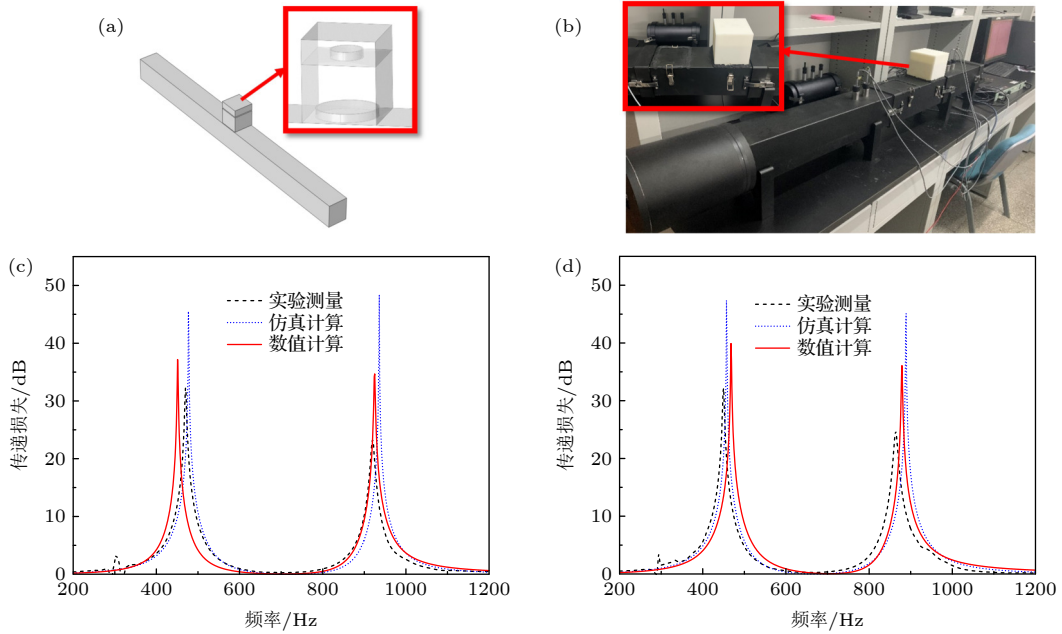


图 2 二阶共鸣器单元在波导管侧壁作为消声器的三维仿真示意图 (a) 和实验测量示意图 (b); 1 号 (c) 和 2 号 (d) 二阶共鸣器单元的数值计算、仿真计算与实验测量的传递损失结果对比数据图

Fig. 2. 3D simulation schematic diagram (a) and experimental test diagram (b) of the second-order resonator as a muffler on the side of a waveguide; transmission loss results of the numerical calculation, simulation calculation and experimental measurement of No. 1 (c) and No. 2 (d) second-order resonators, respectively.

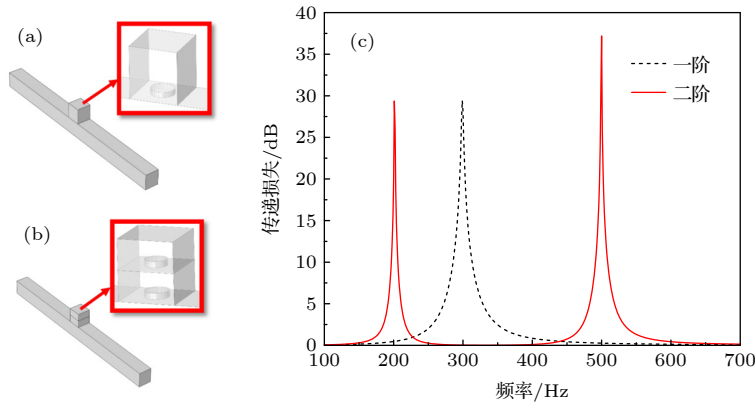


图 3 (a) 传统共鸣器; (b) 二阶共鸣器; (c) 仿真计算的传递损失结果对比图

Fig. 3. (a) Schematic diagram of traditional resonator; (b) schematic diagram of second-order resonator; (c) transmission loss results of structures corresponding to (a), (b).

表 2 图 3(a), (b) 中三维结构的几何参数及共振峰结果表

Table 2. Geometrical parameters and resonance peak results of the structures in Fig. 3(a), (b).

类型	l_c^1/mm	l_c^2/mm	l_n^1/mm	r_n^1/mm	l_n^2/mm	r_n^2/mm	f_1/Hz	f_2/Hz	TL_{f_1}/dB	TL_{f_2}/dB
一阶	100	—	20	20	—	—	299	—	29.4	—
二阶	50	50	20	20	20	10	201	500	29.3	37.1

首先仿真模拟一个横截面为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的传统一阶亥姆霍兹共鸣器, 结构如图 3(a) 所示, 几何参数见表 2, 传递损失如图 3(c) 中黑色点线所示, 共振频率在 299 Hz , 传递损失为 29.4 dB ; 在不改变传统亥姆霍兹共鸣器几何参数的条件下, 在

结构腔体内加入隔板及内插管形成二阶共鸣器结构, 如图 3(b) 所示, 几何参数见表 2, 对其进行仿真计算, 结果如图 3(c) 中红色实线所示. 第一共振峰频率 (f_1)、第二共振峰频率 (f_2)、第一共振峰隔声量 (TL_{f_1}) 以及第二共振峰隔声量 (TL_{f_2}) 在表 2

中给出, 共振频率分别是 201 Hz 和 500 Hz, 相应的传递损失分别为 29.3 dB 和 37.1 dB. 对比黑色点线和红色实线, 发现二阶共鸣器结构在不改变总体积的情况下会形成两个共振峰: 第一个共振峰比传统共鸣器单元的共振峰更低, 且新增一个较高频率的共振峰.

4.2 结构参数对共振频率的影响

在 Comsol Multiphysics 中仿真计算 3 个不同几何参数的二阶共鸣器单元, 3 个结构的腔体总体积以及内插短管的几何参数保持一致, 只改变上腔与下腔的深度分布. 3 个结构如图 4(a)–(c) 所示, 腔体横截面积均为 100 mm×100 mm, 结构中内插管长度均为 20 mm, 其中第一内插管半径均为 20 mm, 第二内插管半径为 10 mm, 腔体深度参数如表 3 所示. 对各结构进行仿真分析, 传递损失曲线如图 4(d) 所示, 第一共振峰频率 (f_1) 第二共振峰频率 (f_2) 和第一共振峰隔声量 (TL_{f1}) 第二共振峰隔声量 (TL_{f2}) 的具体数值列在表 3.

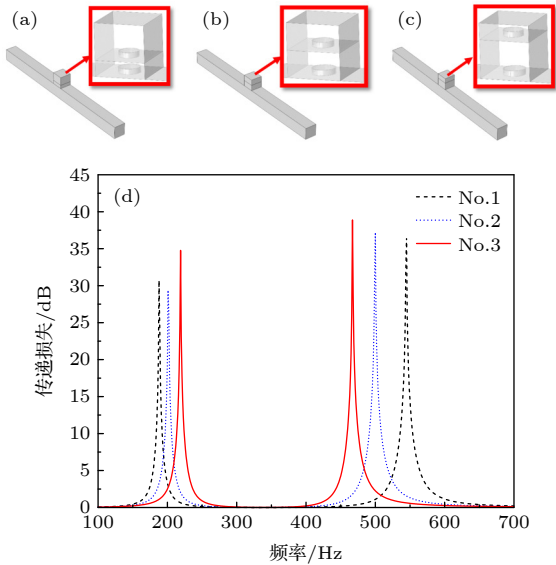


图 4 (a)–(c) 表 3 中不同腔体深度分布的二阶共鸣器单元结构示意图; (d) 仿真计算的 3 个二阶共鸣器单元传递损失结果对比图

Fig. 4. (a)–(c) Schematics of second-order resonators with different cavity depths shown in Table 3; (d) transmission loss results of structures corresponding to Fig. 4(a), (b) and (c).

观察图 4(d) 中传递损失曲线的变化规律发现: 在不改变共鸣器整体体积, 下腔深度增大且上腔深度减小的条件下, 传递损失曲线的第一共振峰向高频偏移, 但移动范围较小; 第二共振峰则向低频偏

移, 频率变化范围较大; 两个共振峰有向中间聚拢的趋势.

表 3 图 4(a)–(c) 中三维结构的几何参数及共振峰结果表

Table 3. Geometrical parameters and resonance peak results of the structures in Fig. 4(a)–(c).

No.	l_c^1/mm	l_c^2/mm	f_1/Hz	f_2/Hz	TL_{f1}/dB	TL_{f2}/dB
1	40	60	188	545	30.7	36.4
2	50	50	201	500	29.3	37.1
3	60	40	219	467	34.7	38.8

然后, 设定二阶共鸣器的基准几何参数为: 腔体横截面积均为 100 mm×100 mm, 下腔深度为 60 mm, 上腔深度为 40 mm, 第一内插管半径为 20 mm, 长度为 20 mm, 第二内插管半径为 10 mm, 长度为 20 mm. 在基础参数上分别改变两个内插管的长度和半径, 对其进行仿真计算. 如图 5 所示, 子图均是单个参数变化的传递损失结果对比, 其余参数保持设定的基准参数不变. 观察图 5(a), (c) 中传递损失曲线的变化规律发现: 在其他参数不变的情况下, 共振频率随着内插管的半径增大而升高; 从图 5(b), (d) 中的曲线可以看出: 在其他参数不变的情况下, 共振频率随着内插管的长度增大而降低.

以上仿真计算结果表明, 影响二阶亥姆霍兹共鸣器传输损失峰值频率的参数很多, 即二阶共鸣器调节的自由度多. 这有利于通过改变二阶共鸣器的几何参数, 进而有效调控两个主消声峰的频率分布, 实现宽频消声器的设计.

5 基于串联二阶共鸣器单元的宽频抗性消声器的设计与实验验证

通过上述理论推导与经验规律的总结, 可以掌握二阶共鸣器单元结构参数对传递损失共振峰的影响规律. 因此, 可将具有不同共振峰的二阶共鸣器单元组合起来, 实现宽频消声. 为方便设计基于二阶共鸣器单元的宽频消声器, 减少调节参数的自由度, 这里采用固定上腔深度 30 mm, 下腔深度 70 mm 以及内插管长度 10 mm 的二阶共鸣器结构. 本研究采用的是内插管式二阶共鸣器单元, 内插管长度不宜高于腔体深度的 1/2, 否则共振峰的共振频率将发生强烈变化, 不利于调控且消声效果较差. 通过改变内插管的半径大小 (r_n^1, r_n^2) 以及

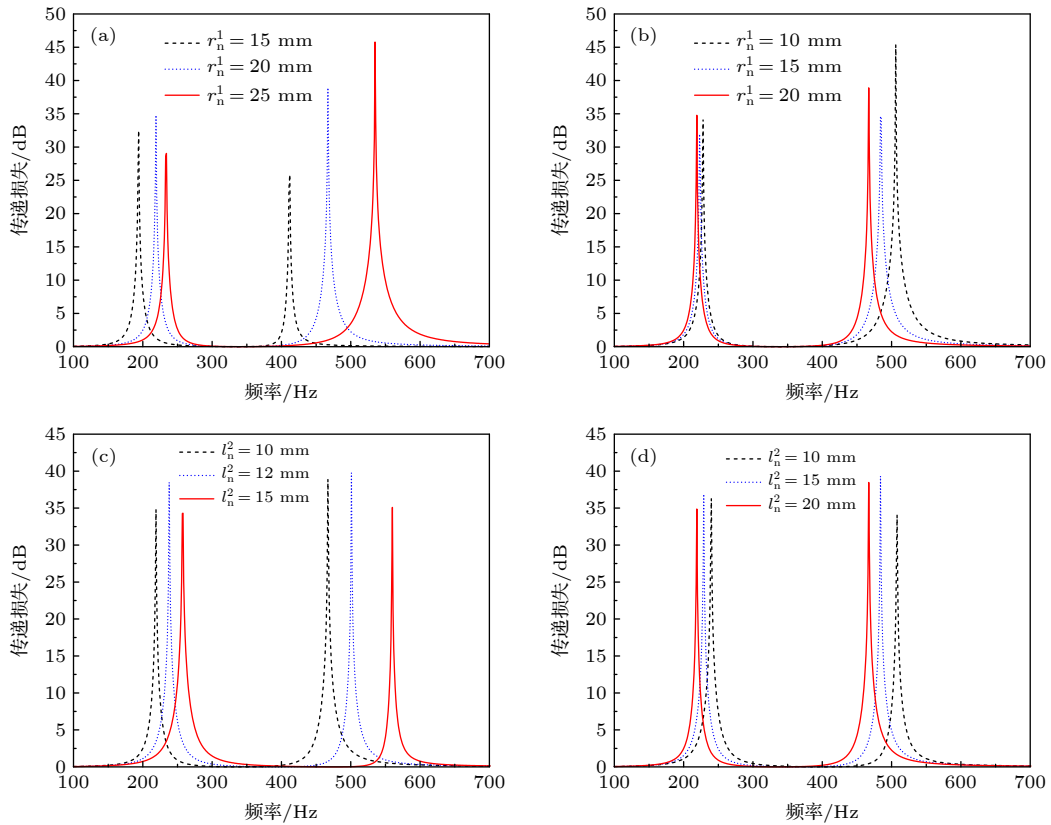


图 5 (a) 不同第一内插管半径 r_n^1 的传输损失曲线; (b) 不同第一内插管长度 l_n^1 的传输损失曲线; (c) 不同第二内插管半径 r_n^2 的传输损失曲线; (d) 不同第二内插管长度 l_n^2 的传输损失曲线

Fig. 5. (a) Transmission loss curves of different r_n^1 ; (b) transmission loss curves of different l_n^1 ; (c) transmission loss curves of different r_n^2 ; (d) transmission loss curves of different l_n^2 .



图 6 (a) 由 9 个二阶共鸣器单元组成的抗性消声器仿真模型; (b) 实验测试图; (c) 实验测量与 Comsol Multiphysics 仿真、Matlab 计算结果的传递损失对比图

Fig. 6. (a) The simulation model of the resistant muffler composed of nine second-order resonators; (b) experimental measurement photo; (c) transmission loss curves of experimental measurement, simulation with Comsol Multiphysics and calculation with Matlab.

腔体截面积 S_c 来调控共振峰的共振频率, 设计了一个由 9 个二阶共鸣器单元组成的宽频抗性消声器, 如图 6(a) 所示. 在设计过程中, 首先采用传递矩阵法快速预测不同几何尺寸的宽频消声器的消声性能, 获得初步几何参数后再采用有限元仿真对消声器进行精细设计. 最终结构的几何参数如表 4 所示, 表中二阶共鸣器单元的序号与图 6(a) 中序号相对应. 其中, 单元的排列顺序按共振频率依次

排列, 让共振频率相近的结构相邻排列能增强单元间的耦合作用, 这样能提高相邻共振峰之间的传递损失. 该结构的主管流道截面尺寸为 $110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ (包含预留壁厚 5 mm), 消声器结构总长度为 1530 mm . 图 6(b) 是实验测试图, 通过 3 D 打印技术采用光敏树脂加工制作二阶共鸣器, 在侧壁带开孔的方形阻抗管上进行实验测试, 样品前端和后端各装配两个传声器进行数据采集, 采用双负载

法测试消声器的隔声性能. 图 6(c) 为实验测量的传递损失的数据结果 (红色实线)、Comsol Multiphysics 仿真计算结果 (黑色虚线) 和 Matlab 数值计算结果 (蓝色点线) 的对比图, 图中黑色实线为 20 dB 参考线. 从数据结果可以看到, 计算数据、仿真数据与实验数据匹配度良好, 在宽频范围内 (267—929 Hz) 实现 20 dB 以上的传递损失, 最大传递损失达到 60 dB 以上, 在连续谱上实现宽频消声的效果.

表 4 9 个二阶共鸣器单元的几何参数表
Table 4. Geometrical parameters of nine second-order resonators.

No.	S_c/mm^2	r_n^1/mm	r_n^2/mm
1	100×100	40	20
2	115×100	42.5	20
3	130×100	42.5	21
4	145×100	43	21
5	160×100	43	21
6	175×100	43	20
7	190×100	41	20
8	205×100	41	15
9	220×100	41	15

图 6(c) 中计算数据、仿真数据与实验数据存在一定差别, 以下几点是带来误差的主要原因. 传递矩阵法理论模型中为了简化模型忽略了相邻单元间的耦合作用, 以及内插管的修正长度公式取近似等给计算结果带来误差. 实验测试中, 样品加工精度有限, 几何尺寸存在误差, 且样品内表面的粗糙度会增大结构的黏滞; 以及测试环境的声学参数和仿真参数的细微差别等都会带来偏差. 总的来说, 理论计算、仿真计算和实验测量三者的结果虽存在一定差异, 但总体的一致性较好, 误差在可以接受的范围内.

6 总 结

本文采用传递矩阵法对内插管式二阶亥姆霍兹共鸣器建立了理论计算模型; 通过仿真计算与实验测量对传递矩阵理论模型进行验证; 并通过控制结构几何参数变化, 总结了二阶共鸣器结构的频率响应规律; 然后在理论模型与经验规律的基础上, 设计出一款由 9 个二阶共鸣器单元组成的宽频抗性消声器, 并对 3D 打印的消声器实验样品进行了

实验测量与性能分析. 实验中, 采用双负载法测量了本研究设计的消声器的传递损失曲线. 测量结果与数值计算、有限元仿真结果进行了对比分析, 数据一致性很好; 在 267—929 Hz 宽频范围内, 消声效果优异, 可实现 20 dB 以上的传递损失. 本文设计的消声器具有很强的应用性和拓展性, 可推动声学人工结构在噪声控制工程中的应用与发展.

参考文献

- [1] Liu Z Y, Zhang X X, Mao Y W, Zhu Y Y, Yang Z Y, Chan C T, Sheng P 2000 *Science* **289** 1734
- [2] Allard J, Atalla N 2009 *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials* (2nd Ed.) (Hoboken: John Wiley & Sons) p15
- [3] Yang Z, Mei J, Yang M, Chan N H, Sheng P 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 204301
- [4] Yang Z, Dai H M, Chan N H, Ma G C, Sheng P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 041906
- [5] Cheng Y, Zhou C, Yuan B G, Wu D J, Wei Q, Liu X J 2015 *Nat. Mater.* **14** 1013
- [6] Soto G, Castro A, Vecchiatti N, Lasi F, Armas A, Marcovich N E, Mosiewicki M A 2017 *Polym. Test.* **57** 42
- [7] Cai X B, Guo Q Q, Hu G K, Yang J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 121901
- [8] Chen C R, Du Z B, Hu G K, Yang J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 221903
- [9] Liu Z E, Wu X C, Du S Z, Huang T, Lu Z H, Ruan J, Shao J Y, Liu G Q 2019 *Digit. Manu. Sci.* **6** 143 (in Chinese) [刘志恩, 吴旭昌, 杜松泽, 黄涛, 卢焯华, 阮杰, 邵炯炆, 刘国强 2019 *数字制造科学* **6** 143]
- [10] Shao C, Zhu Y Z, Long H Y, Liu C, Cheng Y, Liu X J 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 083504
- [11] Gu Y, Long H Y, Cheng Y, Deng M X, Liu X J 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** 014021
- [12] Nguyen H, Wu Q, Xu X C, Chen H, Tracy S, Huang G L 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 134103
- [13] Sun M, Fang X S, Mao D X, Wang X, Li Y 2020 *Phys. Rev. Appl.* **13** 044028
- [14] Shao C, Xiong W, Long H Y, Tao J C, Cheng Y, Liu X J 2021 *J. Acoust. Soc. Am.* **150** 1044
- [15] Dong R Z, Mao D X, Wang X, Li Y 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** 024044
- [16] Long H Y, Shao C, Cheng Y, Tao J C, Liu X J 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 263502
- [17] Shen L, Zhu Y F, Mao F L, Gao S Y, Su Z H, Luo Z T, Zhang H, Assouar B 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** 064057
- [18] Gao Y X, Cheng Y, Liang B, Li Y, Yang J, Cheng J C 2021 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **64** 1
- [19] Liu C K, Wang H J, Liang B, Cheng J C, Lai Y 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 231702
- [20] Yu Y C, Yang Y Z, Zhao H, Shi Q Q, Kong P, Yang J, Deng K 2022 *J. Appl. Phys.* **131** 135102
- [21] Zhu Y Z, Long H Y, Liu C, Zhang H X, Cheng Y, Liu X J 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 141701
- [22] Selamat A, Lee I 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **113** 1975
- [23] Ji J, Li D T, Li Y, Jing Y 2020 *Front. Mech. Eng-Switz.* **6** 94
- [24] Huang S B, Fang X S, Wang X, Assouar B, Cheng Q, Li Y 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **145** 254

- [25] Romero-Garc V, Theocharis G, Richoux O, Pagneux V 2016 *J. Acoust. Soc. Am.* **139** 3395
- [26] Long H Y, Liu C, Shao C, Cheng Y, Tao J C, Qiu X J, Liu X J 2020 *J. Sound Vib.* **479** 115371
- [27] Li Y, Assouar B M 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 063502
- [28] Ryoo H, Jeon W 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 121903
- [29] Chen J S, Chen Y B, Cheng Y H, Chou L C 2020 *Phys. Lett. A* **384** 126887
- [30] Liu C R, Wu J H, Ma F Y, Chen X, Yang Z R 2019 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52** 105302
- [31] Huang S B, Zhou Z L, Li D T, Liu T, Wang X, Zhou J, Li Y 2020 *Sci. Bull.* **65** 373
- [32] Jiménez N, Groby J P, Romero-García V 2021 *Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials, and Porous Media* (Cham: Springer International Publishing) p103
- [33] Kang Z X 2009 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [康钟绪 2009 博士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [34] Long H Y 2019 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [龙厚友 2019 博士学位论文 (南京: 南京大学)]

Research and design of broadband muffler based on second-order Helmholtz resonators*

Shi Quan-Quan¹⁾²⁾ Yang Yu-Zhen^{2)†} Zhao Zhun¹⁾²⁾ An Bing-Wen²⁾
Tian Peng-Yi³⁾ Jiang Cheng-Cheng³⁾ Deng Ke^{1)‡} Jia Han²⁾ Yang Jun²⁾

1) (*Department of Physics, Jishou University, Jishou 416000, China*)

2) (*Key Laboratory of Noise and Vibration Research, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China*)

(Received 11 July 2022; revised manuscript received 13 August 2022)

Abstract

Noise is always a serious factor affecting people's quality of life. The most common sound-absorbing materials are porous materials, which work based on the principle that sound waves entering into the pores inside the material are subjected to air friction and viscous resistance, thus converting sound energy into heat. Porous materials have excellent performance of absorbing medium-frequency and high-frequency sound, but they are required to be thick enough to control the low-frequency sound waves with large wavelengths, which limits the application of porous materials in low-frequency noise control. In recent years, acoustic artificial structures have become a research hotspot, which can realize exotic effective acoustic parameters based on periodical structure or local resonance. Acoustic artificial structure provides a new material basis for noise control, in which Helmholtz resonator plays an important role because of its simple geometry. In this study, a broadband muffler is designed based on the second-order neck embedded Helmholtz resonator. In order to achieve low-frequency and broadband sound insulation with a limited number of units and structure length, the second-order resonator is chosen as a basic structure unit, which has a stronger low-frequency noise reduction capability and has one high-frequency transmission loss peak more than a conventional Helmholtz resonator. The acoustic characteristics and insulation performance of second-order resonators are analyzed through theoretical calculation, simulation calculation and experimental test. Then, based on the theoretical model and empirical rules, a broadband muffler composed of nine second-order resonators is designed by carefully adjusting the geometry parameters of each resonator. The three-dimensional printed resonators are installed on the side wall of a square standing wave tube for experimental measurement. In the experiment, the transmission loss curve of the muffler is measured by the two-load method. The result shows that the designed muffler has good sound insulation performances in a frequency range of 267–927 Hz, with the whole transmission loss above 20 dB and the maximum sound insulation up to 60 dB. The experimental result is consistent with the calculation result and simulation result. The muffler has simple structure and high practicability, which will have a wide application prospect in noise control engineering.

Keywords: second-order Helmholtz resonator, resistance mufflers, broadband sound insulation

PACS: 43.20.+g, 43.40.+s, 43.50.+y, 46.40.Ff

DOI: 10.7498/aps.71.20221377

* Project supported by the Science and Technology Research and Development Program of China National Railway Group Co. LTD (Grant No. P2021J035).

† Corresponding author. E-mail: yangyuzhen@mail.ioa.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: dengke@jsu.edu.cn



基于二阶共鸣器单元的宽频消声器研究与设计

施全权 杨玉真 赵准 安秉文 田朋溢 蒋成成 邓科 贾晗 杨军

Research and design of broadband muffler based on second-order Helmholtz resonators

Shi Quan-Quan Yang Yu-Zhen Zhao Zhun An Bing-Wen Tian Peng-Yi Jiang Cheng-Cheng Deng Ke Jia Han Yang Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 234301 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221377

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221377>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非线性表面波的二阶微扰解及特性分析

Second-order perturbation solution and analysis of nonlinear surface waves

物理学报. 2022, 71(16): 164301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212445>

二阶梯度交叉耦合超导量子干涉仪电流传感器研制

A second-order gradiometric superconducting quantum interference device current sensor with cross-coupled structure

物理学报. 2021, 70(12): 128501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201816>

基于自发参量下转换源二阶激发过程产生四光子超纠缠态

Generation of four-photon hyperentangled state using spontaneous parametric down-conversion source with the second-order term

物理学报. 2018, 67(6): 060302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172230>

薄膜底面Helmholtz腔声学超材料的隔声性能

Sound insulation performance of Helmholtz cavity with thin film bottom

物理学报. 2019, 68(21): 214302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191131>

一种准零刚度声学超材料板的低频宽频带隔声行为

Broadband low-frequency sound insulation performance of quasi-zero stiffness local resonant acoustic metamaterial plate

物理学报. 2021, 70(24): 244302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211203>

面向激光跟踪仪宽频隔振器的理论分析及试验评价

Theoretical analysis and experimental evaluation of vibration isolation system with broadband characteristic for laser tracker

物理学报. 2022, 71(16): 160701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220307>