

可变腔亥姆霍兹共振式管道消声系统

左亚文¹ 陈鑫¹ 黄傲哲¹ 许龙^{1,2}

(1. 中国计量大学理学院, 浙江杭州 310018;

2. 浙江省智能制造质量大数据溯源与应用重点实验室, 浙江杭州 310018)

摘要: 亥姆霍兹共鸣器在工程应用中有着十分重要的作用, 将其与传声管道相结合, 设计可变腔亥姆霍兹共振式管道消声系统, 可用于解决管道消声问题。本文以单腔体、双腔体与四腔体管道为例, 通过 COMSOL 有限元仿真对该消声系统进行设计与研究, 并制作实验装置, 通过理论计算与实验测试验证仿真结果。结果表明: 共振频率理论值、实验值与仿真值的相对误差均在 10% 以内, 证明了仿真模型的可靠性; 消声系统在四个共鸣腔的结构下消声量仿真值最大可达 180dB, 单腔体、双腔体和四腔体管道模型最大消声频带的带宽分别可达到 5Hz、21Hz 和 53Hz, 具有良好的消声性能, 随着共鸣腔数量的增加, 可以有效地拓宽消声频带。本文研究结果为管道消声的工程设计提供了理论基础、设计模型与实验数据。

关键词: 亥姆霍兹共鸣器; 共振式消声系统; 有限元仿真; 消声频带

管道传声在日常生活中随处可见, 如木管乐器、号筒式扬声器、发动机的排气管道等等。随着现代工业技术的发展, 带来了日益严重的噪声危害, 噪声污染已与大气污染、水污染、固体废弃物污染并列成为当今社会的“四大污染”, 且是人们感受最直观的污染因素之一。另外, 我国于 2021 年 12 月 24 日通过了《中华人民共和国噪声污染防治法》, 自 2022 年 6 月 5 日起施行, 以强制措施治理噪声污染。消除或减弱由这些系统和设备的进排气传播的强噪声, 即管道消声问题也已成为管道传声研究的重要课题。

赫尔曼·冯·亥姆霍兹 (Hermann von Helmholtz) 于 150 年前发明了研究语言和听觉的亥姆霍兹共鸣器。亥姆霍兹共鸣器作为重要的吸声体, 因其结构简单, 被广泛应用于内燃机、风机和发动机等管路系统的管道消声中。利用其强大的“共振吸声”特性应用于音乐厅的建筑结构用来调节厅堂的混响时间; 另外亥姆霍兹共鸣器也常用作乐器的共鸣箱以增强乐器的演出效果。

为了实现管中多频噪声的消声, 将亥姆霍兹共鸣器与传声管道相结合, 设计并加工制作了一种可变腔亥姆霍兹共振式管道消声系统。通过有限元仿真和实验测试对消声系统的消声性能进行了研究, 研究结果为该类消声系统的工程应用提供了理论和实验数据。

一、实验仿真

(一) 共振频率公式

亥姆霍兹共鸣器通常由密闭的空腔通过较小的短管开口与外部空间相连而成, 在共振频率具有很强的吸声能力, 如图所示的共鸣器由截面积为 S_0 , 长度为 l_0 的短管和容积为 V_0 的腔体相连接而成。

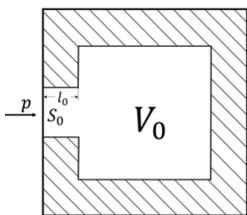


图1 亥姆霍兹共鸣器

亥姆霍兹共鸣器中空气密度为 ρ_0 , 空气中声速为 c_0 , 则声质量 M_a 与声容 C_a 分别为

$$M_a = \frac{\rho_0 l_0}{S_0} \quad (1)$$

$$C_a = \frac{V_0}{\rho_0 c_0^2} \quad (2)$$

根据出口、入口、分支各点声波的声压及速度表达式、主管和旁支需满足的声压连续条件和体积速度连续条件可推导得到共鸣器的共振频率, 为

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_a C_a}} \quad (3)$$

当入射声波的频率 $f = f_r$, 即共鸣器发生共振时, 共鸣器吸声系数达到极大值。

(二) 有限元模型

为了仿真可变腔亥姆霍兹共振式管道的消声性能, 在 COMSOL 有限元仿真软件中建立了如图 2 所示的单腔体、双腔体和四腔体管道 (分别简称单管、双管与四管) 模型, 包括主管道、颈、共鸣腔与活塞四部分。

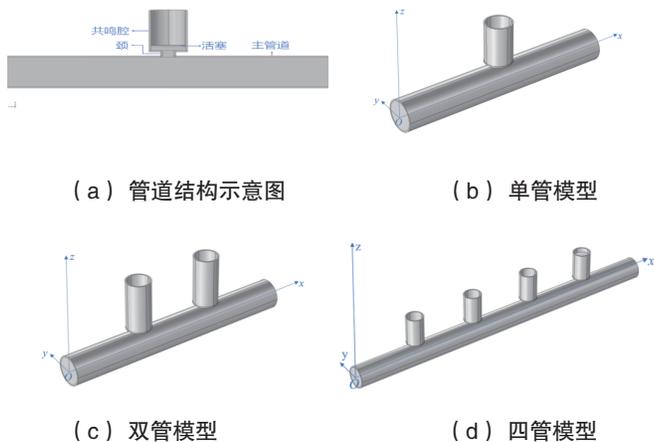


图2 仿真模型

三种模型中, 主管道长分别为 0.80m、0.95m 和 1.90m, 其他各结构参数均相同, 具体如表 1 所示。

表1 仿真模型结构参数

主管半径 / mm	壁厚厚度 / mm	颈高 / mm	颈半径 / mm	共鸣腔高度 / mm	共鸣腔半径 / mm
60	5	25	20	150	50

注: 表中半径均是指外半径 (外半径 = 内半径 + 壁厚厚度); 活塞半径等于共鸣腔内半径

对仿真模型的边界状态进行设置: 1) 左侧边界为声压入口边界, 向管道输入 1atm 的连续声压; 2) 边界壁面设为硬声场边界; 3) 管道壁面材料设置为亚克力材料, 属性如表 2 所示。

表 2 管道壁面材料参数

密度 / (kg/m ³)	声速 /(m/s)	热膨胀系 数 / (1/K)	导热系数 / (W/(m·K))	杨氏模量 / (Pa)	泊松比 /()
1190	2689	7 × 10 ⁻⁵	0.18	3.2 × 10 ⁻⁹	0.35

(三) 仿真模型验证

为了验证本文建立的有限元仿真模型的可靠性, 分别通过理论与实验得到不同体积参数下的最佳消声频率的理论计算与仿真结果的相对误差。

1. 理论验证

理论计算取共鸣器短管长度为(即颈高) h_m 、共鸣器短管半径为(即颈半径) r_m 、共鸣腔高度为 h_c 、共鸣腔半径为 r_c , 空气中声速 c_0 已知, 将上述参数值代入即可计算得共鸣器的共振频率为

$$f_r = \frac{c_0 r_m}{2\pi r_c} \sqrt{\frac{1}{h_m h_c}} \quad (4)$$

频率计算结果展示如表 3。

2. 实验验证

依据仿真中各结构参数制作单腔体亥姆霍兹消音测试管, 并设计实验测试不同体积参数下的最佳消声频率。实验装置制作中, 在活塞中心处增加一个底面半径为 15mm、高度为 170mm 的圆柱形连杆, 便于实验中调整活塞位置。

实验中, 扬声器与信号发生器相连, 输出定频声波, 声波通过亥姆霍兹消音测试管, 由管道出口处的声级计测试出口处声压级。多次改变声波频率进行测试, 找出出口处声压级达到最低时的声波频率, 即为共振频率实验值。下图为整套实验装置:

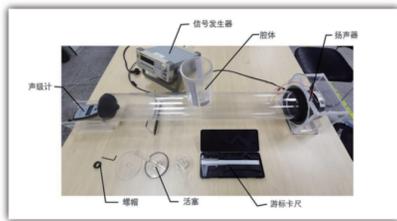


图 3 实验装置

图 4 所示的曲线表示不同高度下共振频率的理论值与实验值。表 3 为理论计算、有限元仿真和实验测试在不同高度共鸣腔尺寸下消声器的最佳消声频率及频率相对误差。

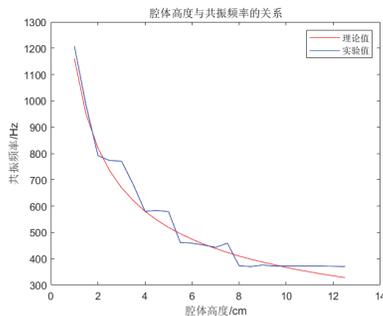


图 4 理论与实验数据对比图

综合图 4 和表 3 可知, 消声器的最佳消声频率的理论计算值与仿真值和实验测试值基本一致, 最佳消声频率的理论计算值和仿真值与实验测试值之间的相对误差较小, 均在合理的范围内。

表 3 共振频率理论、实验、仿真值及相对误差

共鸣腔高度 / mm	理论值 / Hz	实验值 / Hz	仿真值 / Hz	相对误 差 1	相对误 差 2
45	547	583	565	3.19%	3.19%

65	455	452	465	2.15%	2.80%
85	398	370	400	0.50%	7.50%

注: 相对误差 1 为理论值与仿真值的相对误差; 相对误差 2 为实验值与仿真值的相对误差

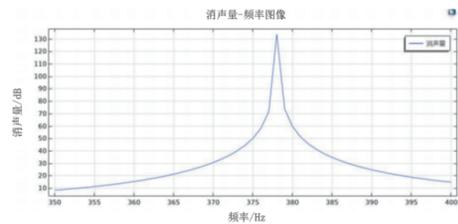
三、结果与讨论

(一) 管道的消声性能

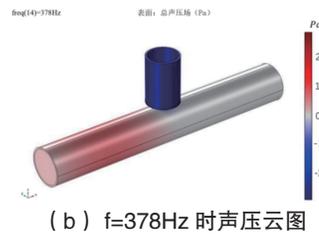
通过有限元仿真分别得到了单管、双管与四管模型的声压云图及消声量 - 频率响应曲线。结果表明: 每一个高度的共鸣腔对应一个吸收峰, 观察每一吸收峰频率下的声压云图, 可见声压主要集中在共鸣腔中, 出口处声压明显接近于 0, 与入口处声压差距明显。同时, 消声量 - 频率响应曲线表明三种模型均具有较大的消声量, 消声效果良好。具体结果如下:

1. 单管模型

共鸣腔高度设置为 100mm, 仿真结果如图 5。



(a) 消声量 - 频率响应曲线



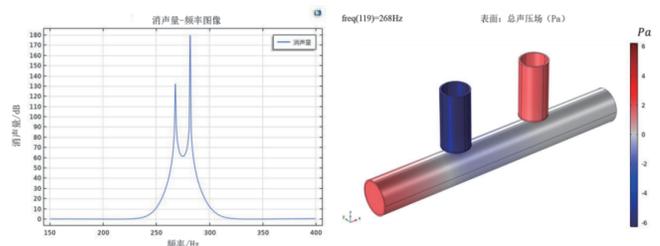
(b) f=378Hz 时声压云图

图 5 单管模型仿真结果

根据消声量 - 频率响应曲线, 单管模型在频率 378Hz 处消声量最大, 约为 133dB, 仅在 378Hz 有一处吸收峰。

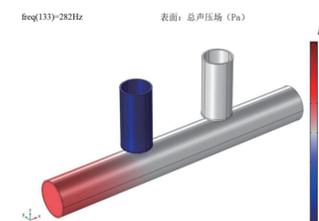
2. 双管模型

共鸣腔高度从左至右分别设置为 9cm、9.5cm, 仿真计算结果如图 6。



(a) 消声量 - 频率响应曲线

(b) f=268Hz 时声压云图



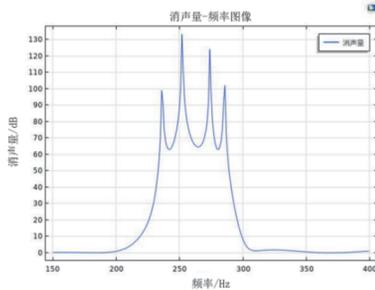
(c) f=282Hz 时声压云图

图 6 双管模型仿真结果

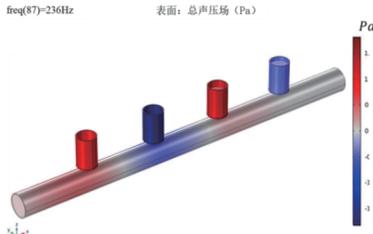
根据消声量-频率响应曲线,双管模型在频率282Hz处消声量最大,约为180dB,有两处吸收峰,分别出现在268Hz和282Hz。

3. 四管模型

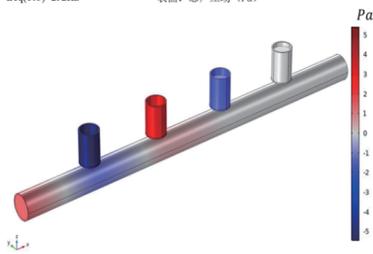
共鸣腔高度从左至右分别设置为8.8cm、9.5cm、11.1cm、12.5cm,仿真计算结果如图7。



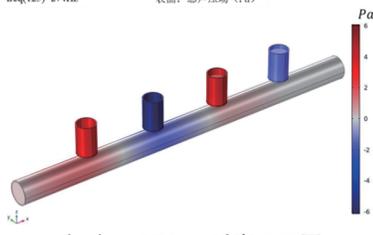
(a) 消声量-频率响应曲线



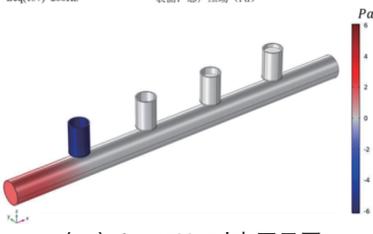
(b) f=236Hz 时声压云图



(c) f=252Hz 时声压云图



(d) f=274Hz 时声压云图



(e) f=286Hz 时声压云图

图7 四管模型仿真结果

根据消声量-频率响应曲线,双管模型在频率252Hz处消声量最大,约为133dB,有四处吸收峰,分别在236Hz、252Hz、274Hz和286Hz。

(二) 线阵列消声系统的宽频特性

多次调试腔体高度进行仿真计算,以消声量大于60dB为标准

计算消声频带,发现单管模型仅有一个吸收峰,消声频带较小,约在5Hz,而双管与四管模型,在共鸣腔取到适当的高度时,消声频带会得到明显的拓宽,表4与表5即为双管与单管模型部分腔体高度下对应的消声频带及带宽。

表4 双管模型不同腔高下消声频带及带宽

序号	共鸣腔高度 /cm		消声频带 /Hz	带宽 /Hz
	腔 1	腔 2		
1	13	14.4	[216, 235]	19
2	12	13.2	[226, 245]	19
3	11	12	[239, 257]	18
4	10	11	[250, 270]	20
5	9	9.9	[265, 285]	20
6	8	8.7	[284, 303]	19
7	7	7.6	[305, 325]	20
8	6	6.5	[331, 352]	21
9	5	5.3	[368, 386]	18
10	4	4.2	[415, 431]	16

表5 双管模型不同腔高下消声频带及带宽

序号	共鸣腔高度 /cm				消声频带 /Hz	带宽 /Hz
	腔 1	腔 2	腔 3	腔 4		
1	10.5	11.8	12.9	14.3	[217, 262]	45
2	9.5	10.3	11.9	12.8	[230, 277]	47
3	8.8	9.5	11.1	12.5	[235, 288]	53
4	7.7	8.3	9.5	10.3	[258, 309]	51
5	5.3	5.5	5.9	6.7	[324, 373]	49

分析表格可发现:1)双管模型最宽频带可达到21Hz,四管模型最宽频带可达到53Hz,分别在单管模型的4倍与10倍之上;2)腔体间高度差需适当小才能达到最宽消声频带,且随着腔体整体高度的降低,腔体间高度差需随之降低;3)随着腔体整体高度的降低,消声频带随之升高。

(三) 共鸣腔位置对消声系统的影响

在仿真实验中,改变共鸣腔在主管道上的相对位置,会对管道消声性能产生影响,以双管与四管模型为例,仿真结果对比如下:

1. 双管模型

两个共鸣腔分别按照如下两组位置进行设置:

表6 双管模型共鸣腔位置

组别	腔 1 位置	腔 2 位置
1	L/3	2L/3
2	L/4	3L/3

将腔体1、2高度分别设置为9cm、9.9cm,计算得到消声量-频率响应曲线,第1组双管模型计算结果如图6(a)所示,第2组双管模型计算结果如下图所示:

序号	共鸣腔高度 /cm		消声频带 /Hz	带宽 /Hz
	腔 1	腔 2		
1	13	14.4	[216, 235]	19
2	12	13.2	[226, 245]	19
3	11	12	[239, 257]	18
4	10	11	[250, 270]	20
5	9	9.9	[265, 285]	20
6	8	8.7	[284, 303]	19

7	7	7.6	[305, 325]	20
8	6	6.5	[331, 352]	21
9	5	5.3	[368, 386]	18
10	4	4.2	[415, 431]	16

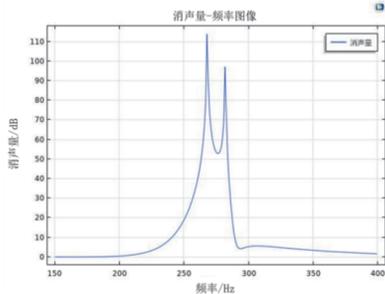


图 8 第 2 组双管模型消声量 - 频率响应曲线

2. 四管模型

两个共鸣腔分别按照如下两组位置进行设置:

表 7 四管模型共鸣腔位置

组别	腔 1 位置	腔 2 位置	腔 3 位置	腔 4 位置
1	$L/5$	$2L/5$	$3L/5$	$4L/5$
2	$L/4$	$L/3$	$2L/3$	$3L/4$

腔体 1、2、3、4 高度分别设置为 8.8cm、9.5cm、11.1cm、12.5cm，得到消声量 - 频率响应曲线，第 1 组如图 7 (a)，第 2 组如下:

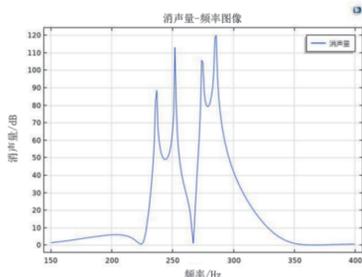


图 9 第 2 组四管模型消声量 - 频率响应曲线

对比单管与双管模型的上述结果，可以看出：消声频带无明显变化，但按照组别 1 位置设置时，整体消声量更大。改变腔体位置与腔体高度，进行多组仿真计算，均满足腔体在长管等分点处时整体消声效果最好。

四、结论

本文将亥姆霍兹共鸣器与传声管道相结合，设计并加工制作了一种可变腔亥姆霍兹共振式管道消声系统，以单管、双管与四管模型为例研究了该消声系统的消声量、声压分布、宽频特性与共鸣腔的排列特性，通过仿真计算与实验验证，得出如下结论：

根据仿真计算结果，每一个高度的共鸣腔在消声量 - 频率响应曲线中对应一个吸收峰，吸收峰所在频率处管道消声效果最佳，最高可达 180dB；声波在管道内部传播过程中，声压主要集中于共鸣腔内部，管道出口处声压接近于 0，远低于入口处声压，本文所设计消声系统具有良好消声性能。

随着共鸣腔数量的增加，消声系统的消声频带会得到明显的拓宽，对比分析单管、双管与四管模型的消声量 - 频率响应曲线，以消声量大于 60dB 为标准，三者最大带宽依次为 5Hz、21Hz、53Hz，双管与四管模型的带宽分别在单管模型的 4 倍与 10 倍之上。

改变共鸣腔在主管道上的相对位置，观察消声量 - 频率响应

曲线，分析消声频带与消声量，共鸣腔位于管道等分点处时，消声系统整体消声效果最好，如具有 N 个共鸣腔的消声管道，共鸣腔位于主管道的 $(N+1)$ 等分点处时整体消声效果最好。

本文通过有限元仿真与实验对可变腔亥姆霍兹共振式消声系统的消声性能进行了研究，并通过理论计算进行验证，可为后续管道消声工程的研究提供参考。

参考文献:

- [1] 张丽娜. 我国噪声污染现状和防治技术展望 [J]. 科技风, 2009 (13): 214.
 - [2] 黄润秋. 深入贯彻实施噪声污染防治法用法治方式法律武器守护和谐安宁家园 [J]. 环境保护, 2022, 50 (13): 8-10.
 - [3] Yun Y, Mak C M. The theoretical fundamentals of an adaptive active control using periodic Helmholtz resonators for duct-borne transmission noise in ventilation systems [J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2013, 34 (2): 195-201.
 - [4] 程伟明. 多种消声结构设计及性能研究 [D]. 大连理工大学, 2020.
 - [5] 张京明, 刘文文, 崔双双. 赫姆霍兹消声器共振腔结构形状对消声性能的影响 [J]. 四川兵工学报, 2010, 31 (9): 79-82.
 - [6] 原凯, 秦朝红, 任方, 等. 亥姆霍兹共鸣器降噪技术研究 [C]// 北京力学学会第二十二届学术年会会议论文集. 2016.
 - [7] 刘文文. 赫姆霍兹消声器的消声性能研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
 - [8] 北京市劳动保护科学研究所噪声控制组, 天津市空气压缩机厂技术组. 共鸣型消声器的试验研究 [J]. 劳动保护, 1973 (06): 19-23.
 - [9] 阮登芳. 共振式进气消声器设计理论及其应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
 - [10] 刘凤娟, 季振林. 《消声器声学理论与设计》[J]. 声学学报, 2016, 41 (4).
 - [11] 辛锋先, 刘学伟, 伍晓红等. COMSOL 可视化仿真在声学理论课程中的应用与实践 [J]. 高教学刊, 2018 (24): 1-4.
 - [12] 付强. 基于 COMSOL 的消声器声学性能研究 [D]. 宁夏大学, 2019.
 - [13] Xue R, Mak C M, Wu D, et al. The acoustic performance of a dual Helmholtz resonators system in the presence of a grazing flow [J]. International Journal of Aeroacoustics, 2023, 22 (1-2): 23-40.
 - [14] 施全权, 杨玉真, 赵准等. 基于二阶共鸣器单元的宽频消声器研究与设计 [J]. 物理学报, 2022, 71 (23): 302-310.
 - [15] 葛茂鑫, 李吉. 双颈部亥姆霍兹共振器的声学特性 [J]. 噪声与振动控制, 2020, 40 (04): 231-234.
 - [16] 钱中昌, 冯涛, 李晓东等. 延长颈式赫姆霍兹共鸣器的研究 [C]// 中国声学学会. 中国声学学会 2009 年青年学术会议 [CYCA' 09] 论文集. 中国科学院噪声与振动重点实验室 (声学研究所); 北京工商大学机械工程学院; , 2009: 2.
 - [17] Gourdon E, Ture Savadkoohi A, Cauvin B. Effects of shape of the neck of classical acoustical resonators on the sound absorption quality for large amplitudes: Experimental results [J]. Building Acoustics, 2020, 27 (2): 169-181.
- 基金项目: 浙江省大学生科研创新团队资助项目 (2022R409A019)
- 作者简介: 左亚文 (2003 -), 女, 河南商丘人, 本科在读, 声学专业。