

文章编号: 1007-7294(2026)03-0498-09

基于螺旋声学黑洞的舰船通风管道减振分析

王麒凯¹, 王蔚浩¹, 林永水¹, 孔伟涛¹, 谢官模¹, 吴卫国²

(1. 武汉理工大学 物理与力学学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 绿色智能江海直达船舶与邮轮游艇研究中心, 武汉 430063)

摘要: 本文研究了螺旋声学黑洞(SABH)对通风管道的振动抑制特性以及减振机理, 与传统减振手段相比, SABH 具有轻量化、易安装、低频宽带吸振特性等方面的优势。有限元仿真结果表明, SABH 有效抑制了通风管道的振动。与未布置 SABH 的原始管道相比, 布置 SABH 后的管道监测点前三阶加速度级共振峰降低 10 dB 以上, 监测面的振动速度总级降低了 3.73 dB。振动实验结果表明, 布置 SABH 后的管道测点低频段加速度级共振峰基本降低 10 dB 以上, 高频效果更加显著。研究表明, SABH 对通风管道减振具有优异的低频宽带减振性能, 对管道结构波能量有良好的汇聚与耗散作用。

关键词: 螺旋声学黑洞; 通风管道; 减振

中图分类号: U661.44 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.03.014

Vibration reduction analysis of ship ventilation ducts based on spiral acoustic black holes

WANG Qi-kai¹, WANG Wei-hao¹, LIN Yong-shui¹, KONG Wei-tao¹, XIE Guan-mo¹, WU Wei-guo²

(1. School of Physics and Mechanics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Green & Smart River-Sea-Going Ship, Cruise and Yacht Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: This paper investigates the vibration reduction characteristics of spiral acoustic black holes (SABH) on ventilation ducts and the damping mechanism. Compared with conventional vibration damping methodologies, SABH possesses distinct advantages, including its lightweight nature, ease of installation, and the capacity for low-frequency broadband vibration absorption. The finite element simulation results demonstrate the efficacy of SABH in suppressing the vibration of ventilation ducts. Compared with the original duct without SABH, the resonance peak of the first three orders of acceleration levels at the monitoring point are reduced by more than 10 dB after installing SABH. Additionally, the total level of vibration velocity at the monitoring surface decreases by 3.73 dB. The experimental results of the vibration analysis indicate that after the implementation of SABH, the resonance peaks of the acceleration level at the measurement point in the low-frequency band are reduced by more than 10 dB. Furthermore, the high-frequency effects are found to be more pronounced. The study demonstrates that SABH exhibits superior low-frequency broadband vibration damping performance for ventilation ducts, and displays effective convergence and dissipation of wave energy within the pipe structure.

Key words: spiral acoustic black hole; ventilation ducts; vibration reduction

收稿日期: 2025-08-21

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目(工信部装函 2019(331))

作者简介: 王麒凯(2001-), 男, 硕士研究生; 王蔚浩(2000-), 男, 硕士研究生;

林永水(1983-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 通讯作者, E-mail: peakspylin@163.com。

0 引言

管道系统^[1-3]在现代工业体系中应用广泛,在舰船、邮轮、潜水器等结构中常常被用来运输燃料、空气等。通风管道(Ventilation Duct, VD)在降低船舱温度,供应新鲜空气等方面具有重要作用。在舰船通风管道系统中,低频机械振动易引发管道疲劳、结构噪声辐射等,相关研究表明,在低频段,通风管道系统中机械振动为主要的低频振动源,管道内空气流动产生的湍流随机脉动压力主要影响管道中高频段振动。在本研究中,主要考虑由风机激励所引起的低频结构振动而非空气流动湍流^[4]。由于外部环境以及机械工作产生的振动会对管道结构安全及其功能的正常使用产生危害^[5-6],因此研究低成本、宽频带、能有效抑制结构振动的新型减振技术具有重要意义。

声学黑洞(Acoustic Black Hole, ABH)作为一种新型的减振技术^[7],与传统的减振手段相比,其结构形式与材料选择更为单一,安装也较为方便,其良好的减振性能、对波动的调控和对振动能量的回收具有广泛的研究和应用前景^[8]。声学黑洞的原理是通过调整原有结构的几何参数或者材料特性而形成一种对弯曲波有汇聚作用的结构^[9]。在绝对理想的情况下,当弯曲波在结构厚度按一定幂函数变化且末端厚度为零的结构上传播,弯曲波到达结构末端时群速度与相速度会降为零,弯曲波的能量被完全吸收^[10-11]。

目前实现声学黑洞效应的方法主要是通过设计具有厚度变化的结构来实现对弯曲波的吸收效果。由于制造零尖端厚度的声学黑洞较为困难,使得 ABH 尖端具有一定截断厚度,弯曲波的能量会聚集在截断厚度处。近些年来学者们对于声学黑洞构型的优化,探究其不同结构上的减振应用进行了大量深入的研究。Krylov 等^[12]探究了在 ABH 尖端粘贴上一定量阻尼材料来吸收弯曲波; Tang 等^[13]提出了一种在原有结构随幂函数变化基础上,叠加上一个具有均匀厚度的延伸结构,来应对截断厚度过小不利于制造的困难; Lee 等^[14]提出将 ABH 基于阿基米德螺旋线进行弯曲螺旋化处理,进一步降低空间占用率; Ma 等^[15]研究了双叶 ABH 构型,在相对较薄的结构中也可以实现 ABH 效应,克服了传统单叶 ABH 会降低结构强度和刚度的缺点; Zhou 等^[16]发现在 ABH 尖端附加上一定长度的延伸平台,可以进一步提高 ABH 减振性能; Bu 等^[17]在 Euler-Bernoulli 梁模型的基础上设计了一种周期性 ABH 输流管道,可以在低频范围内抑制输流管道的振动,大部分振动能量在波传播过程中被管道的楔形边缘吸收和散射; Deng 等^[18]提出了一种与传统嵌入式声学黑洞不同的附加式声学黑洞,通过具有周期性加声黑洞的复合结构来吸收板的振动,形成紧凑的声学功能材料,不会影响主体结构的完整性,具有良好的减振效果; 温华兵等^[19]设计了一种声学黑洞加筋板,相比于普通加筋板,进一步提高了减振性能; 赵晓宇等^[20]研究了弯曲螺旋化处理后的 ABH 对弯曲波的吸收效果,提出一种增厚的螺旋声学黑洞 SABH(Spiral Acoustic Black Hole),结果表明, SABH 对弯曲波的吸收效果依然良好。

本文研究螺旋声学黑洞对通风管道的振动抑制特性以及减振机理,与传统声学黑洞相比, SABH 具有轻量化、低频宽带的吸振特性等方面的优势。通过有限元仿真,与未布置 SABH 的原始管道振动分析结果作对比,探究 SABH 对舰船通风管道的减振性能以及对管道结构波能量的汇聚与耗散作用; 通过振动实验分析 SABH 对通风管道的减振效果,验证其对通风管道优异的振动抑制性能。

1 螺旋声学黑洞模型及方法验证

1.1 结构模型

本文选取的声学黑洞如图 1 所示,其中一维声学黑洞尖端厚度表达式为

$$h(x) = H_t + \varepsilon x^m \quad (1)$$

式中: H_t 为延伸结构的长度; x 为横坐标; m 是大于 2 的指数; ε 为用于缩放 ABH 的厚度系数。本文 ε 取 0.015, m 取 2.2。声学黑洞尖端延伸长度为 L_a , 变厚度段长度为 L_b , 基座部分长度为 L_c , 厚度为 H_b , 阻尼

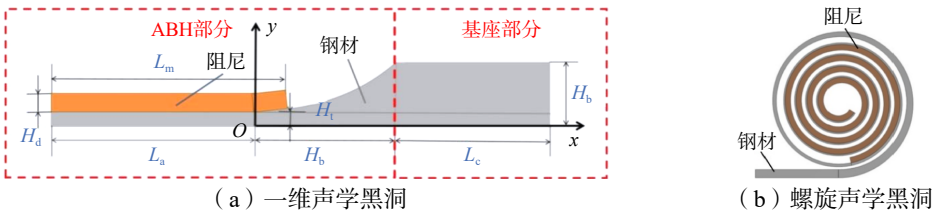


图 1 声学黑洞示意图

Fig.1 Diagram of acoustic black hole

材料长度为 L_m ,厚度为 H_d ,如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab.1 Material parameters

材料	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /Pa	泊松比	损耗因子
钢材	7850	2.1×10^{11}	0.3	0.0026
沥青阻尼	1650	2.25×10^8	0.3	0.8

基于阿基米德螺旋线将一维声学黑洞进行弯曲螺旋化处理,形成增厚螺旋声学黑洞 SABH^[19],其中阿基米德螺旋线函数为

$$r = r_0 + \Delta r \times \theta$$

(2)

式中: r_0 为阿基米德螺旋线的初始半径,取值为 55 mm; Δr 为半径变化率,取值为 $-1.273\text{ mm}\cdot\text{rad}^{-1}$; θ 为阿基米德螺旋线的螺旋角。SABH 尖端附加的阻尼材料为沥青阻尼,其余部分采用钢材,SABH 的材料属性如表 2 所示。

管道的振动主要来源于风机运行以及通风管道输送空气时产生的振动。本文对风机输气管道与通风管道连接区域进行振动分析,通风管道系统计算区域如图 2 所示。管道的横截面长 42 cm,宽 24 cm,管道壁厚 1.5 mm;管道材料为钢材,在计算区域通风管道模型的三个出口处设置固定边界,对管道模型边界条件进行一定简化,旨在探究 SABH 对于振动能量的汇聚与耗散作用。

表 2 螺旋声学黑洞几何模型参数

Tab.2 Parameters of the geometric model for the spiral acoustic black hole

符号/单位	数值
H_b/mm	6.0
H_t/mm	1.0
H_d/mm	5.0
L_c/mm	60
L_a/mm	550

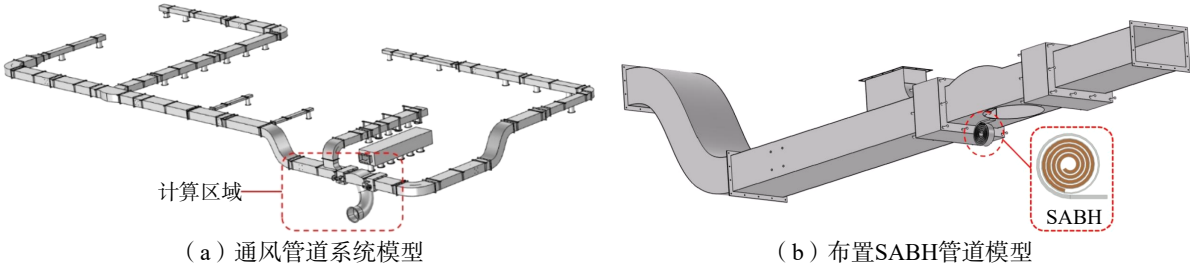


图 2 通风管道示意图

Fig.2 Diagram of ventilation duct

1.2 计算模型

SABH 布置位置和监测点、监测面的选取位置如图 3(a)所示,SABH 布置在通风管道下侧管壁的中轴线上,距离风机输气管道与通风管道连接处 1 cm,监测点位于布置 SABH 一侧管壁上,距离 SABH 底座 11 cm;监测面为布置 SABH 一侧管壁。在风机输气管道与通风管道连接处施加恒定幅值

为 1 N/m 的分布载荷,方向垂直于管壁向上,如图 3(b)所示。通风管道计算模型的质量为 406.38 kg, SABH 的质量为 0.72 kg, SABH 的质量为通风管道计算模型质量的 1.77 %。

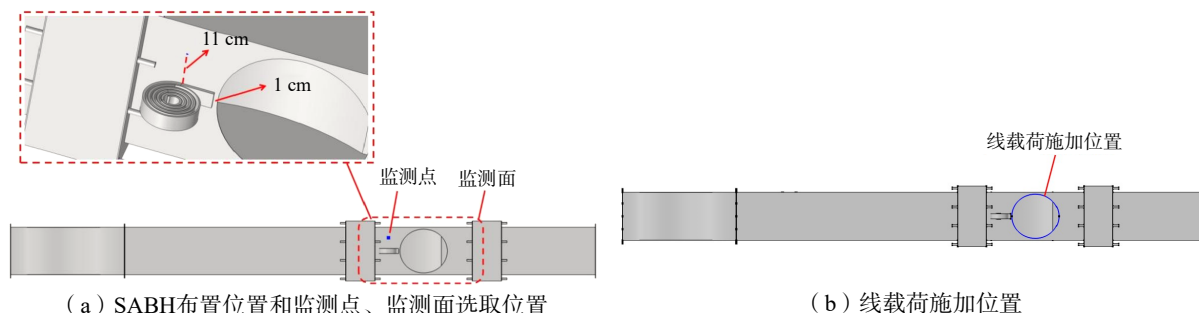


图3 通风管道计算模型示意图

Fig.3 Calculation model of ventilation duct

1.3 数值模拟方法验证

本文采用文献[21]中布置 SABH 环肋圆柱壳腹板的均方振速级计算结果作为对比,使用 COMSOL 软件进行有限元仿真计算,图 4 为在环肋圆柱壳上布置 SABH 的计算模型。在 SABH 正下方的另一侧腹板上施加大小为 1 N、方向垂直于腹板的单位载荷作为激励。选取布置 SABH 的腹板一侧作为监测面,与文献结果进行对比。

图 5 为布置 SABH 一侧腹板的均方振速级计算结果,与文献中的结果基本一致,共振峰的峰值也几乎一致,验证了本文仿真方法的准确性。

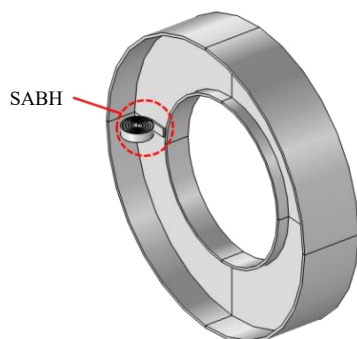


图4 环肋圆柱壳模型示意图^[21]

Fig.4 Diagram of the ring-stiffened cylindrical shell^[21]

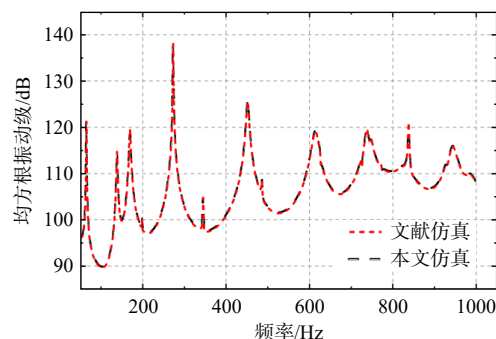


图5 均方振速级对比

Fig.5 Comparison of mean square velocity level

2 SABH 安装前后通风管道系统振动性能比较及分析

2.1 谐响应分析

采用均方振速级(L_v)、振动速度总级(L_T)和加速度级(L_a)来评估通风管道的振动。

(1) 均方振速级

$$\langle v^2 \rangle = \frac{1}{S} \iint_S |V|^2 ds \quad (3)$$

$$L_v = 10 \lg(\langle v^2 \rangle / v_0^2) \quad (4)$$

式中: V 为振动速度幅值, $\langle v^2 \rangle$ 为振动速度幅值; v_0 为参考速度幅值, 数值为 1×10^{-9} m/s; S 为待计算振动面的面积。

(2) 振动速度总级

$$L_T = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{(L_{vi}/10)} \right) \quad (5)$$

式中: L_{vi} 为第 i 个频点的振动的速度级; n 为计算振动所取的频点数。

(3) 加速度级

$$L_a = 10 \lg(a^2/a_0^2) \quad (6)$$

式中: a 为测点的振动加速度幅值, a_0 为参考加速度幅值, 数值为 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。

(4) 振动加速度总级

$$L_A = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{(L_{ai}/10)} \right) \quad (7)$$

式中: L_{ai} 为第 i 个频点的加速度级; n 为计算振动所取的频点数。

图 6 为计算区域布置 SABH 的通风管道与原始通风管道的监测点加速度级对比图, 布置 SABH 之后监测点的加速度级明显低于未布置 SABH 的管道的加速度级, 在 101 Hz 处共振峰降低了 11.02 dB; 在 162 Hz 处共振峰降低了 18.34 dB; 在 503 Hz 处共振峰降低了 10.02 dB; 在 1039 Hz 处共振峰降低了 18.82 dB; 在 1250 Hz 处共振峰降低了 13.22 dB; 在 1922 Hz 处共振峰降低了 7.98 dB。未布置 SABH 的振动加速度总级 L_A 为 175.22 dB, 布置 SABH 的 L_A 为 172.99 dB, 降低了 2.23 dB。

图 7 为计算区域布置 SABH 的通风管道与原始通风管道监测面的均方振速级对比图, 相比于未布置 SABH 的管道, 布置 SABH 通风管道的均方振速级明显降低, 在 101 Hz 处共振峰降低了 12.87 dB; 在 244 Hz 处共振峰降低了 5.53 dB; 在 408 Hz 处共振峰降低了 10.84 dB; 在 1039 Hz 处共振峰降低了 12.45 dB; 在 1249 Hz 处共振峰降低了 10.00 dB; 在 1695 Hz 处共振峰降低了 6.00 dB。未布置 SABH 的振动速度总级 L_T 为 163.41 dB, 布置 SABH 的 L_T 为 159.68 dB, 降低了 3.73 dB。

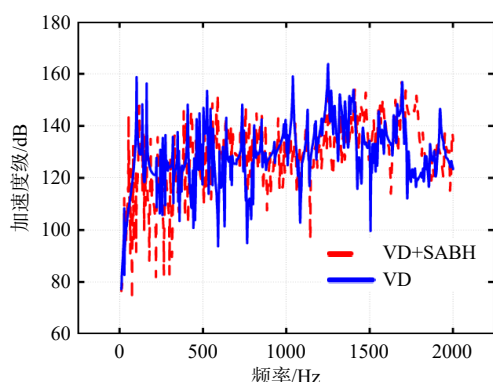


图 6 加速度级曲线图

Fig.6 Curve of acceleration level

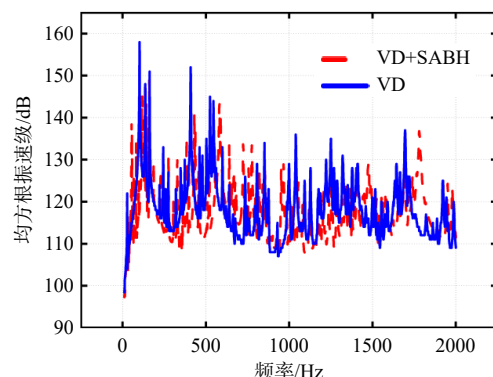


图 7 均方振速级曲线图

Fig.7 Curve of mean square velocity level

2.2 减振机理

结构声强^[22] 公式为

$$I = \sigma \cdot \mathbf{v} \quad (8)$$

式中: σ 为应力张量, $\mathbf{v}$ 为速度矢量。

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中: σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 为法向应力分量, 例如 σ_{xx} 表示作用于垂直于 x 轴的平面且方向沿 x 轴的应力; σ_{xy} 、 σ_{xz} 、 σ_{yx} ……为剪切应力分量, 例如 σ_{xy} 表示作用于垂直于 x 轴的平面且方向沿 y 轴的应力。

$$\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)^T \quad (10)$$

式中: v_x 、 v_y 、 v_z 表示速度沿 x 、 y 、 z 方向的分量。

图 8 为布置 SABH 之后通风管道的几个振动响应共振峰对应频率的结构声强云图, 管壁的结构声强要远小于 SABH 上的结构声强, 管壁振动产生能量汇聚到了 SABH 上。在 38 Hz 时, SABH 上最大结构声强为 4707.56 W/m^2 , 管壁上最大结构声强为 38.91 W/m^2 ; 在 849 Hz 时, SABH 上最大结构声强

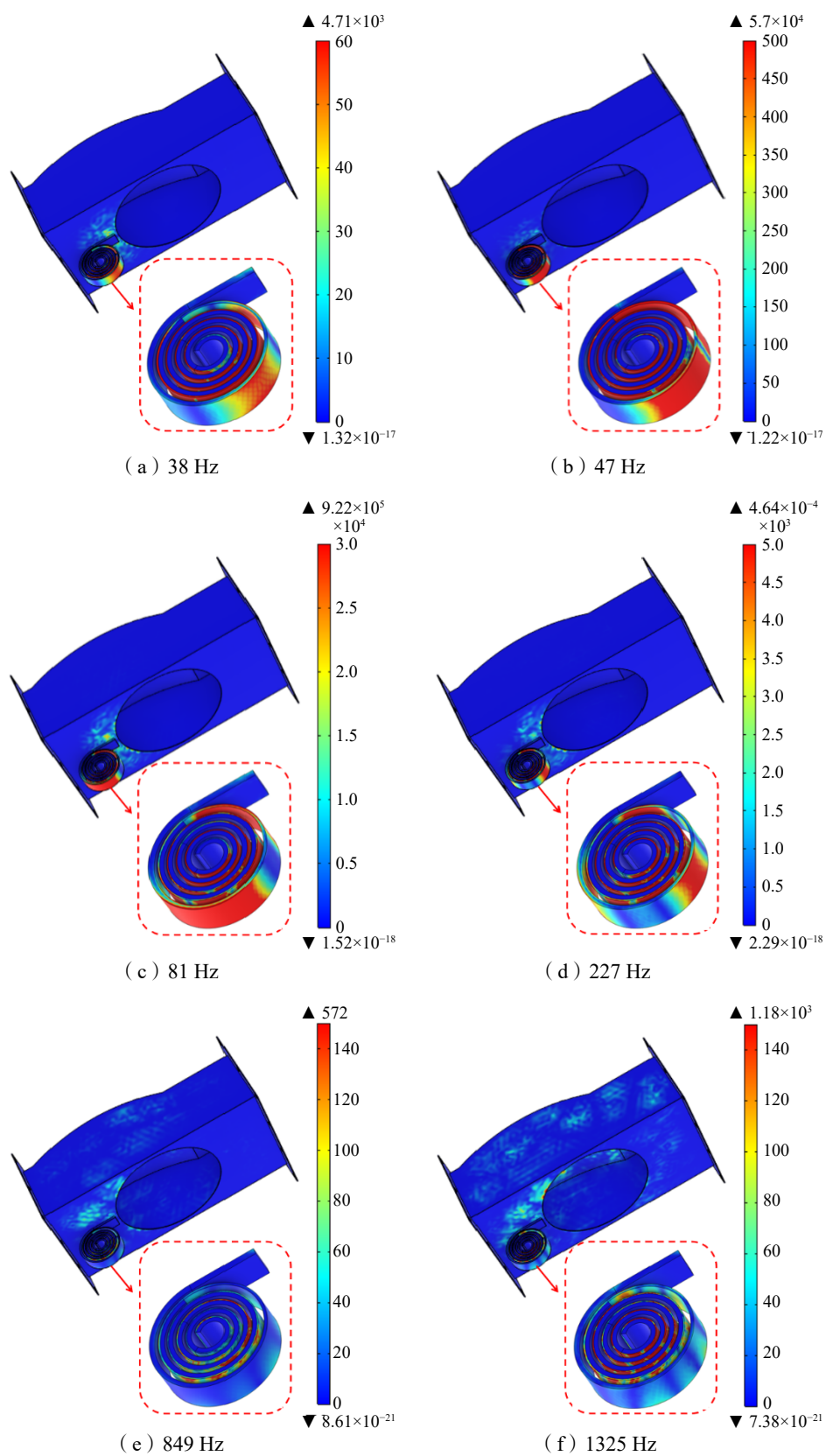


图8 通风管道的结构声强云图

Fig.8 Structured sound intensity cloud image of a ventilation duct

为 572.45 W/m^2 , 管壁上最大结构声强为 56.54 W/m^2 ; 在 1325 Hz 时, SABH 上最大结构声强为 1178.05 W/m^2 , 管壁上最大结构声强为 148.78 W/m^2 。可见 SABH 具有很好的能量汇聚性能。

图 9 为通风管道模态损耗因子图, 与未布置 SABH 的通风管道相比, 布置 SABH 之后通风管道的模态损耗因子在 $0 \sim 2000 \text{ Hz}$ 频段内明显增加, 在低频段内效果显著, 最高值达到 0.068 。振动产生的波能量被 SABH 尖端布置的阻尼耗散, 提高了波能量的耗散性能。

2.3 实验验证

将制备好的 SABH 布置在通风管道上进行振动实验, SABH 使用 α -氰基丙烯酸乙酯胶水黏接于管壁上, 选取两个测点来监测管壁的加速度级, 分别设计未布置 SABH 与布置 SABH 的两组实验。测点 1 布置在风机输气管道附近, 如图 10(b) 所示, 距离通风管道中轴线 11 cm , SABH 布置在管壁中轴线上, 距离风机输气管道 1 cm ; 测点 2 布置在管壁中轴线上, SABH 布置在距离测点 2 外侧 2 cm 处, 如图 10(d) 所示。

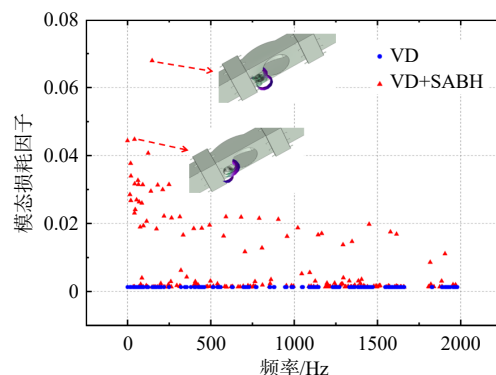


图 9 通风管道结构模态损耗因子

Fig.9 Model loss factor of a ventilation duct structure

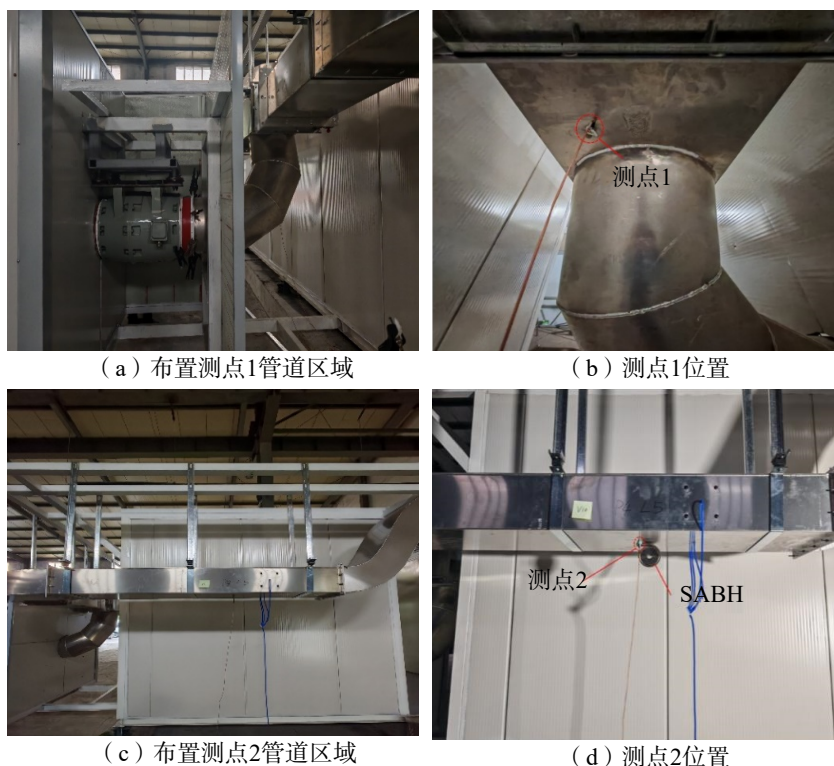


图 10 测点位置图

Fig.10 Schematic diagram of measurement points arrangement

开启风机向通风管道内输入空气, 风机输气管道内空气流量为 $1633 \pm 25 \text{ m}^3/\text{h}$, 使用 LMS SCADAS 数据采集系统测量管壁测点的振动, 实验管道与数据采集仪如图 11 所示。两个测点的加速度级如图 12 所示。 $0 \sim 2000 \text{ Hz}$ 频段内, 未布置 SABH 时, 测点 1 的 L_A 为 137.09 dB , 测点 2 的 L_A 为 138.74 dB ; 布置 SABH 之后, 测点 1 的 L_A 为 126.7 dB , 测点 2 的 L_A 为 127.21 dB , 分别降低了 10.39 dB , 11.53 dB 。加速度级共振峰基本降低 10 dB 以上。在 2000 Hz 之后的频段, 加速度级显著下降。振动实验结果验证了 SABH 低频宽频带减振特性, 对管道的振动抑制效果明显。

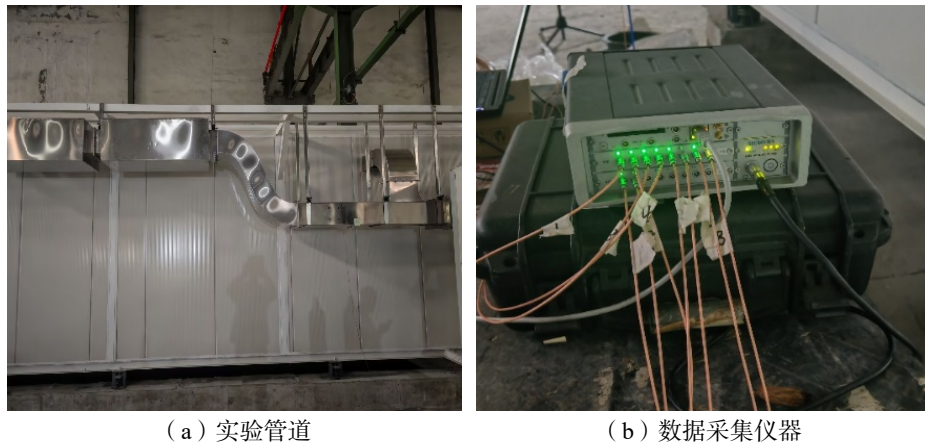


图 11 实验现场图

Fig.11 Diagram of experimental field

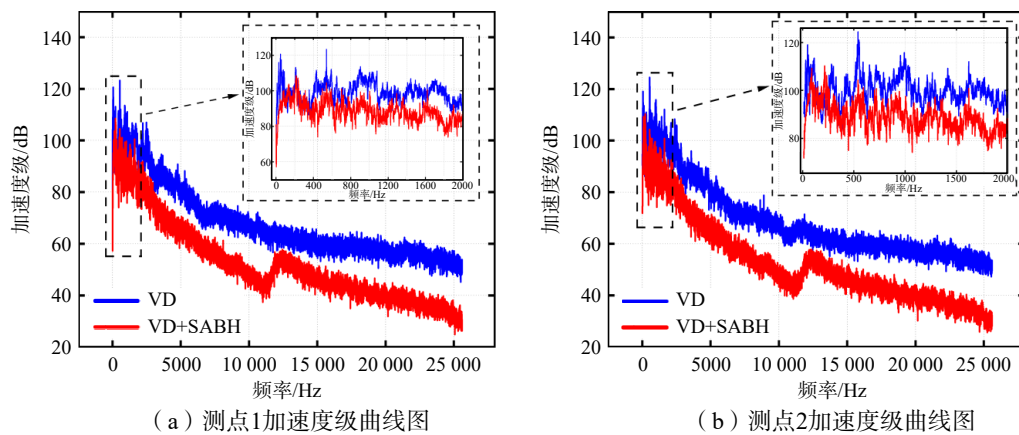


图 12 实验振动曲线

Fig.12 Vibration curve of experiment

3 结 论

本文进行了有限元数值仿真以及振动实验,验证了 SABH 对通风管道的振动抑制性能,主要结论如下:

(1) SABH 可以有效地抑制通风管道的振动。通风管道布置 SABH 仿真与实验结果表明, SABH 有效降低了低频振动响应共振峰,具有良好的减振效果。

(2) SABH 对管道结构具有很好的能量汇聚耗散作用。布置 SABH 后改变了管道的能量分布, SABH 的结构声强显著大于管道结构,有效实现了能量汇聚;布置 SABH 后通风管道的模态损耗因子显著增大,提高了振动能量的耗散,低频范围内能量耗散效果也显著增强。

参 考 文 献:

- [1] 刘忠族,孙玉东,吴有生. 管道流固耦合振动及声传播的研究现状及展望[J]. 船舶力学, 2001(2): 82-90.
Liu Z Z, Sun Y D, Wu Y S. Current situation and trends on the study of coupled fluid-structure vibration and sound propagation of pipeline systems[J]. Journal of Ship Mechanics, 2001(2): 82-90. (in Chinese)
- [2] 徐万海,谢武德,高喜峰,等. 考虑跨肩管土作用的悬跨管道涡激振动特性研究[J]. 船舶力学, 2018, 174(4):

- 446–453.
- Xu W H, Xie W D, Gao X F, et al. Study on vortex-induced vibrations(VIV) of free spanning pipeline considering pipe-soil interaction boundary conditions[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2018, 174(4): 446–453. (in Chinese)
- [3] 余建星, 杨 恂, 傅明炆, 等. 基于多项式逼近的管道悬跨响应谱研究[J]. *船舶力学*, 2009, 13(4): 579–586.
- Yu J X, Yang Y, Fu M Y, et al. Polynomial-approximation-based study on response spectrum for a pipeline span[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2009, 13(4): 579–586. (in Chinese)
- [4] Norton M P, Karczub D G. *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [5] 李 凯, 黎 胜, 赵德有. 耦合板结构振动波传递及能量分布可视化研究[J]. *船舶力学*, 2011, 90(4): 419–426.
- Li K, Li S, Zhao D Y. Visualizing vibration wave flow characteristics in plate structures by vibration intensity techniques[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2011, 90(4): 419–426. (in Chinese)
- [6] 刘建成, 闫宏生, 孟祥伟. 深海悬浮隧道缆索振动与腐蚀疲劳可靠性研究[J]. *船舶力学*, 2023, 238(8): 1231–1239.
- Liu J C, Yan H S, Meng X W. Vibration and corrosion fatigue reliability analysis of submerged floating tunnel cables[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2023, 238(8): 1231–1239. (in Chinese)
- [7] 高南沙, 张智成, 王 谦, 等. 声学黑洞研究进展与应用[J]. *科学通报*, 2022, 67(12): 1203–1213.
- Gan N S, Zhang Z C, Wang Q, et al. Progress and applications of acoustic black holes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(12): 1203–1213. (in Chinese)
- [8] Pekeris C L. Theory of propagation of sound in a half-space of variable sound velocity under conditions of formation of a shadow zone[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1946, 18(2): 295–315.
- [9] Mironov M A. Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval[J]. *Soviet Physics Acoustics*, 1988, 134: 318–319.
- [10] Krylov V V. On the velocities of localized modes in immersed solid wedges[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 103: 767–770.
- [11] Krylov V V. New type of vibration dampers utilising the effect of acoustic 'black holes'[J]. *Acta Acustica united with Acustica*, 2004, 90(5): 830–837.
- [12] Krylov V V, Winward R. Experimental investigation of the acoustic black hole effect for flexural waves in tapered plates[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 300(1-2): 43–49.
- [13] Tang L L, Cheng L. Enhanced acoustic black hole effect in beams with a modified thickness profile and extended platform[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 391: 116–126.
- [14] Lee J Y, Jeon W. Vibration damping using a spiral acoustic black hole[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 141: 1437–1445.
- [15] Ma L, Zhou T, Cheng L. Acoustic black hole effects in thin-walled structures: Realization and mechanisms[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 525: 116785.
- [16] Zhou T, Tang L L, Ji H L, et al. Dynamic and static properties of double-layered compound acoustic black hole structures[J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2017, 9(5): 1750074.
- [17] Bu Y, Tang Y, Ding Q. Novel vibration self-suppression of periodic pipes conveying fluid based on acoustic black hole effect[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 567: 118077.
- [18] Deng J, Chen X, Yang Y, et al. Periodic additive acoustic black holes to absorb vibrations from plates[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 267: 108990.
- [19] 温华兵, 黄惠文, 史自强, 等. 声学黑洞加筋板结构的声振特性分析[J]. *船舶力学*, 2024, 245(3): 442–449.
- Wen H B, Huang H W, Shi Z Q, et al. Acoustic and vibration characteristics analysis of acoustic black hole stiffened plate structures[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2024, 245(3): 442–449. (in Chinese)
- [20] 赵晓宇, 吴卫国, 林永水. 波导吸振器的低频减振设计 and 应用[J]. *力学学报*, 2023, 55(11): 2636–2646.
- Zhao X Y, Wu W G, Lin Y S. Low-frequency vibration reduction design and application of waveguide absorber[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(11): 2636–2646. (in Chinese)
- [21] 王蔚浩, 林永水, 刘昊宇, 等. 基于螺旋声学黑洞的环肋圆柱壳减振技术仿真分析[J]. *中国舰船研究*, 2024: 1–10.
- Wang W H, Lin Y S, Liu H Y, et al. Investigation on vibration reduction performance of spiral acoustic black hole for ring-stiffened cylindrical shell[J]. *Journal of Ship Research*, 2024: 1–10. (in Chinese)
- [22] Park S, Lee J Y, Jeon W. Vibration damping of plates using waveguide absorbers based on spiral acoustic black holes[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 521: 116685.