

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2022.01.004

低速空腔声衬降噪的试验研究

阮佳明 郭 昊 刘 媛 刘沛清*

(北京航空航天大学陆士嘉实验室(航空气动声学工业和信息化部重点实验室), 北京 100191)

摘 要: 空腔噪声为气动噪声领域中重要的一部分,声衬作为一种有效的降噪措施,其原理为微穿孔板吸声体,即多个亥姆霍兹共鸣器并联,通过激发背腔共振吸收声能。声衬的吸声效果受到多个结构参数的影响,针对低速空腔气动噪声问题,通过微穿孔板吸声体原理对声衬进行多参数混合设计,并将其加装到空腔中,对比加装声衬前后空腔噪声的频谱特性,评估声衬在空腔噪声问题中的降噪效果,分析加装声衬对空腔噪声的自激振荡及声共振产生的影响。

关键词: 空腔噪声;声衬;微穿孔板吸声体;亥姆霍兹共鸣器

中图分类号: V2

文献标识码: A

OSID:



0 引言

空腔噪声是飞机气动噪声的主要来源之一。民机起落架、前缘缝翼以及机身其它部件都存在腔体结构所引起的气动噪声,军用飞机投弹仓的空腔结构会因为空腔的自激振荡产生结构疲劳问题^[1]。

早在 20 世纪 50 年代,就已经出现了对空腔噪声的研究。目前研究自激振荡噪声应用最为广泛的是 Rossiter 公式^[2],它是 ROSSITER 于 1964 年提出的用于预测振荡频率的半经验公式。国内对空腔噪声机理和降噪技术开展了研究^[3-9]。李晓东等人^[6]用高阶低耗散的格式求解二维 URANS 方程和 k-e 湍流模型,分析了亚声速下的空腔流动机理。杨党国等^[7]应用 CFD 技术和气动声学时域理论(FW-H 积分方程),探讨了空腔自激振荡发声机理。

声衬作为一种有效的降噪措施,其原理为微穿孔板吸声体,即多个亥姆霍兹共鸣器并联,通过激发背腔共振吸收声能。早在 1947 年,BOLT^[10]就开展了穿孔板的噪声控制研究,INGARD^[11]建立了穿孔板的基本理论,我国著名声学专家马大猷教授^[12]则基于等效电路模型最早提出了微穿孔板理论模型,

并解释其吸声原理为“声场激发共鸣器然后消耗声场能量的吸声体”。钱玉洁^[13]则在研究不同结构参数对微穿孔板吸声体吸声系数以及吸声频带的影响基础上,给出了声衬降噪设计方案。声衬降噪技术在空腔气动噪声领域也有所应用,ROBERTS 等人^[14]以飞机武器舱为研究背景,在高速下探究浅腔前后壁面加装声衬对空腔噪声的影响。然而,目前声衬降噪技术主要集中在高速大长深比的空腔中,对于低速深腔的应用较少。

本文针对低速空腔气动噪声问题,通过微穿孔板吸声体原理对声衬进行多参数混合设计,并将其加装到空腔中,对比加装声衬前后空腔噪声的频谱特性,评估声衬在空腔噪声问题中的降噪效果,分析加装声衬对空腔噪声的自激振荡及声共振产生的影响。

1 实验设备

1.1 D7 气动声学风洞

本实验在北航 D7 风洞进行,该风洞是北航 4 m × 3 m 低湍流度气动声学风洞(BHAW)的 1:15 缩比模型风洞,同样为一座低湍流度低噪声的低速

基金项目: 国家自然科学基金(12072016, 11772033, 1217021666 和 11721202)

* 通信作者: E-mail: lpq@buaa.edu.cn

引用格式: 阮佳明,郭昊,刘媛,等. 低速空腔声衬降噪的试验研究[J]. 民用飞机设计与研究,2022(1):45-50. RUAN J M, GUO H, LIU Y, et al. Study on noise reduction of low speed cavity by acoustic liner[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(1):45-50(in Chinese).

回流风洞。动力段采用了低噪声风扇设计、微穿孔板消声器,洞壁装有声衬降噪技术。试验段为开口,长 500 mm,其截面尺寸为 200 mm × 200 mm,射流核心区湍流度小于 0.1%,测试风速范围为 0.1 m/s ~ 50 m/s。试验段外为一座小型的消声室,如图 1 所示,消声室的长、宽、高分别为 1.4 m、1.6 m 和 1.884 m。在设计风速 50 m/s 下,场外噪声为 72 dBA。



图 1 D7 气动声学风洞

1.2 热线测量

使用 Dantec 公司生产的 55P14 热线探头进行热线实验。采样频率为 25 600 Hz,每次采样时长为 50 s。

1.3 噪声测量

本次实验使用了 4 G. R. A. S. 型 40LS 1/4" CCP 壁面传声器和 1 个 B&K 公司的 4190 型电容远场传声器,搭配 B&K 公司的 Labshop 系统进行噪声的采集和测量工作。5 个通道同时测量。采样时长均为 50 s,采样频率为 25 600 Hz。

2 声衬设计

穿孔板吸声结构是由布有穿孔的板材与板后空腔组成的空腔共振构件。结构示意图如图 2 所示。穿孔板吸声结构可理解为许多亥姆霍兹共鸣器的并联。

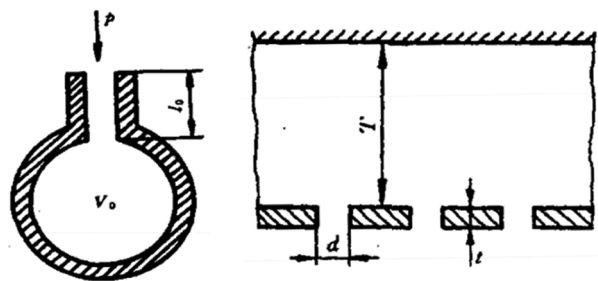


图 2 声衬结构示意图

穿孔板的声阻与其孔径的平方成反比。孔径从毫米级缩小到丝米级的穿孔板被称为微穿孔板。马氏理论模型将微穿孔板看作是大量微管的并联,微穿孔板的声阻抗公式:

$$Z_{MPP} = \frac{32\rho\mu t}{\sigma d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}kd}{8} \frac{d}{t} + j\omega\rho t \right) \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{k^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right) \quad (1)$$

深度为 D 的板后空腔微穿孔板的声阻抗公式:

$$Z_D = -j\rho c \cdot \cot(\omega D/c) \quad (2)$$

微穿孔板吸声体的声阻抗率可表示为:

$$Z_{total} = Z_{MPP} - Z_D \quad (3)$$

用对式进行归一化得到相对声阻抗率的表达式:

$$\frac{Z_{total}}{\rho c} = r + j\omega m - j\rho c \cdot \cot\left(\frac{\omega D}{c}\right) \quad (4)$$

r 为相对声阻率及 m 为相对声质量:

$$r = \frac{32\rho\mu t}{\sigma d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}k}{8} \frac{d}{t} \right) \quad (5)$$

$$m = \frac{t}{\sigma c} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{k^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right) \quad (6)$$

根据声波垂直入射条件下,微穿孔板吸声体的垂直入射吸声系数 α 为:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_{total} - 1}{Z_{total} + 1} \right|^2 \quad (7)$$

当微穿孔板吸声体的声阻抗率的实部和虚部分离时,吸声系数可表示为:

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + (\omega m - \cot(\omega D/c))^2} \quad (8)$$

微穿孔板吸声体的吸声系数在共振时达到最大值,为:

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2} \quad (9)$$

吸声系数达到最大时的频率即共振频率 f_0 满足:

$$2\pi f_0 m - \cot(2\pi f_0 D/c) = 0 \quad (10)$$

声学特性参数包括下限频率 f_1 和上限频率 f_2 。以及对应频率的吸声系数需满足的最小值限制 α_1 和 α_2 ,最大吸声系数需满足的最小值限制 α_{min} 。

图 3 为文献[13]中给出的声衬参数设计计算原理流程图。在图中,不同板材, B 取值不同。普通

非金属微穿孔板: $B = 10$,金属板或热传导系数很大的微穿孔板: $B = 22.3$ 。

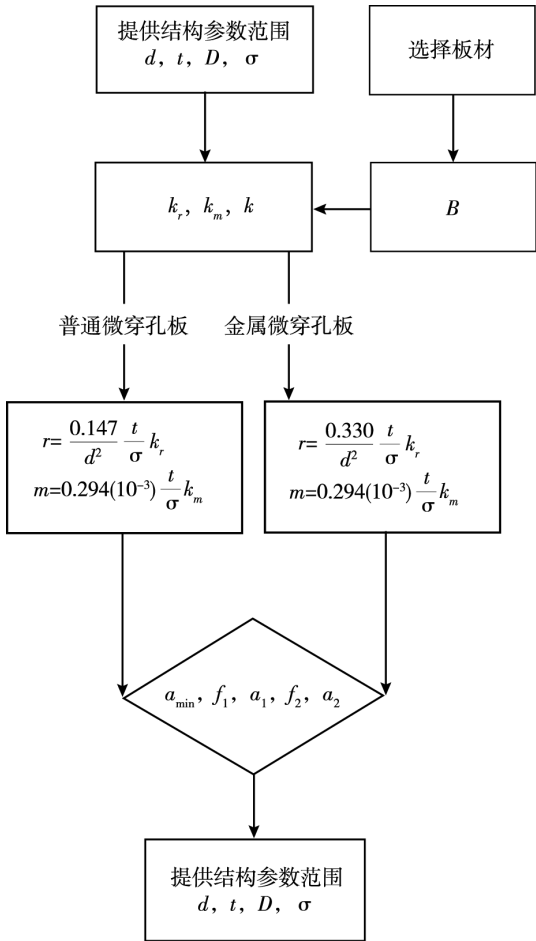


图 3 声衬参数设计计算原理流程图

如图 4 按照空腔噪声频谱特性进行声衬设计,通过 MATLAB 程序得到非金属材料所需具体结构参数如表 1 所示。

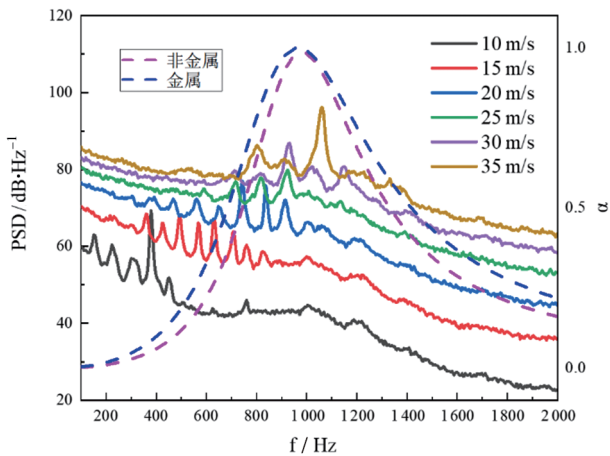


图 4 空腔频谱特性与所设计声衬吸声系数

表 1 非金属材料声衬具体结构参数				
穿孔直径 d	板厚 t	空腔深度 D	穿孔率 σ	孔间距 b
0.6 mm	2 mm	18 mm	1.8%	4 mm

3 实验测试与结果分析

3.1 来流边界层

对空腔来流边界层进行测量速度型结果如图 5 所示,可以看出所测得的速度型与布拉休斯解吻合得很好,为层流。

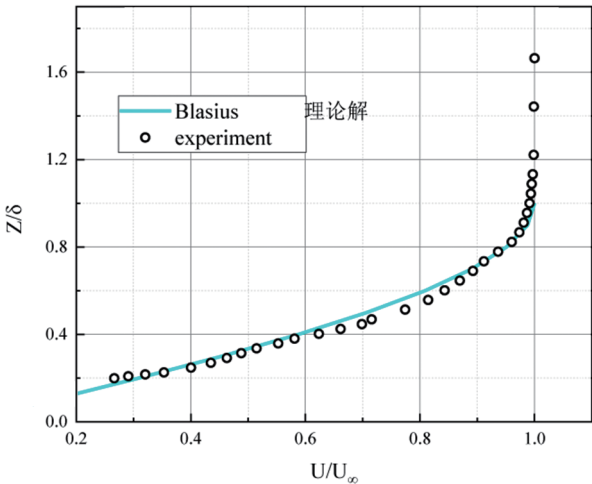


图 5 空腔前缘来流边界层速度型

边界层 RMS 如图 6 所示,RMS 值偏大的原因是边界层中感受到了空腔自激振荡的频率脉动,从边界层频谱云(图 7)中也可以看出。

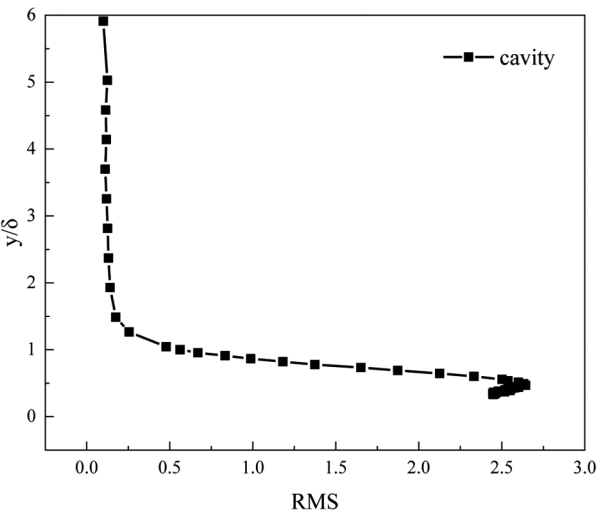


图 6 空腔前缘来流边界层 RMS

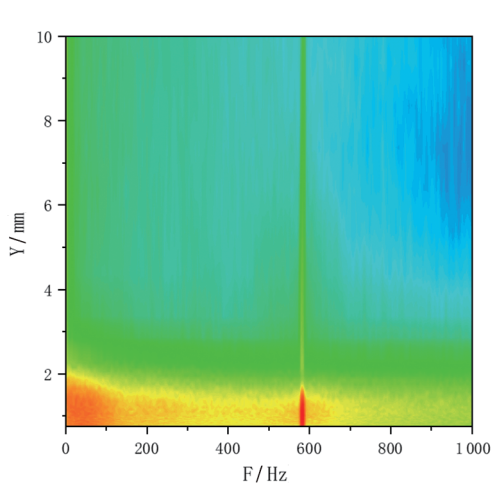


图 7 空腔前缘来流边界层频谱云图

3.2 声衬布置于空腔底部

空腔模型如图 8 所示,流向长度为 80 mm,深度为 50 mm,宽度为 60 mm,声衬布置在空腔底部。

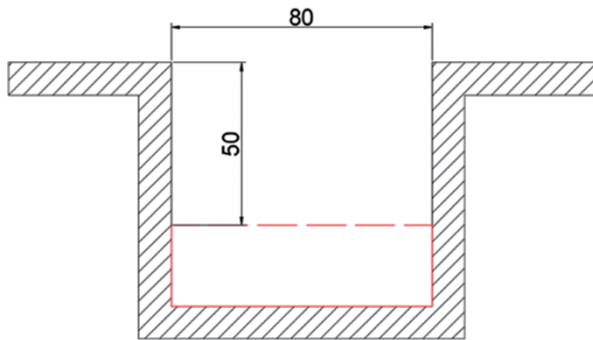
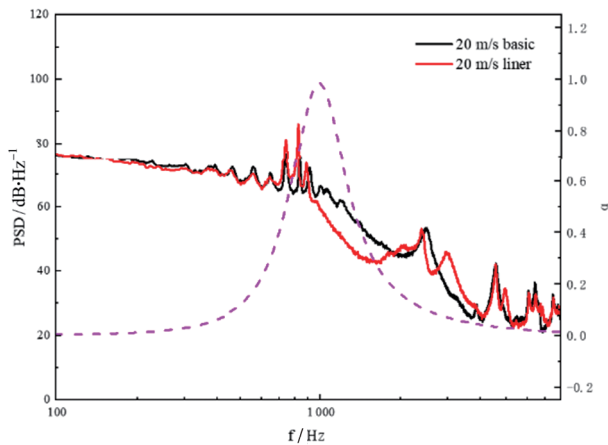
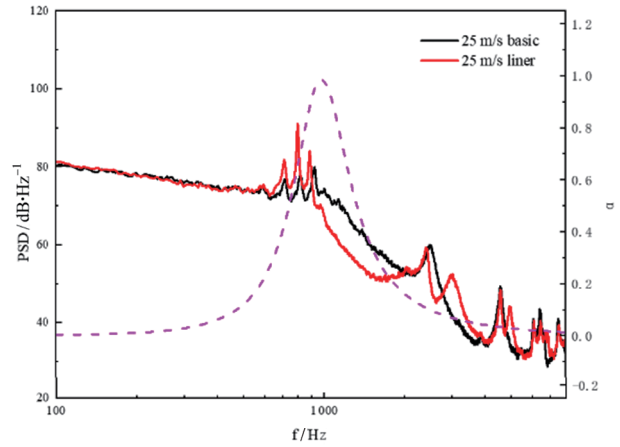
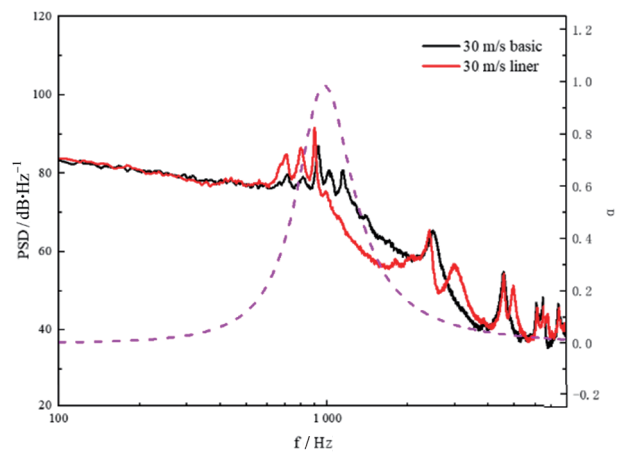
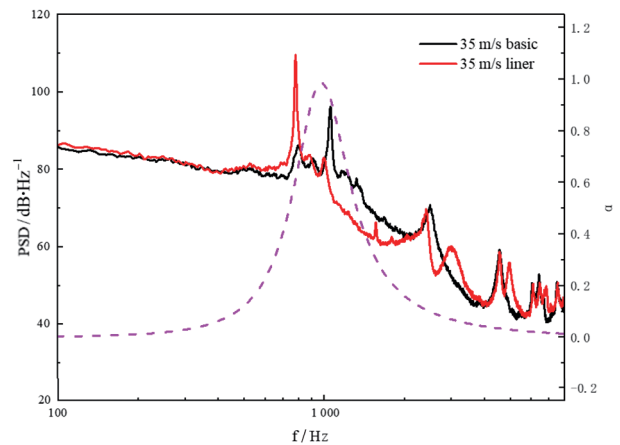


图 8 空腔底部加装声衬示意图

图 9 为风速 20 m/s ~ 35 m/s 时空腔原始构型频谱图与加装声衬频谱图的对比,从图中可以看出,空腔底部加装声衬后,会对声衬吸声频带内的离散噪声

(a) $U_{\infty} = 20 \text{ m/s}$ (b) $U_{\infty} = 25 \text{ m/s}$ (c) $U_{\infty} = 30 \text{ m/s}$ (d) $U_{\infty} = 35 \text{ m/s}$ 图 9 $U_{\infty} = 20 \text{ m/s} \sim 35 \text{ m/s}$ 空腔原始构型与加装声衬频谱对比

声及宽频噪声有一定的抑制作用,但由于空腔噪声“模态切换”的现象存在,当抑制一个模态的离散噪声后会导致其他模态噪声发生时间的增加。

3.3 声衬布置于空腔后缘

空腔模型如图 10 所示,流向长度为 55 mm,深度为 80 mm,宽度为 60 mm,声衬布置在空腔后缘。

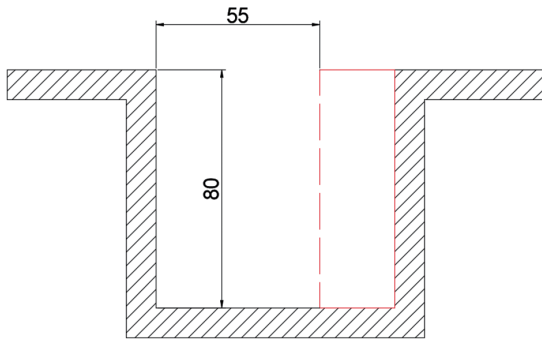
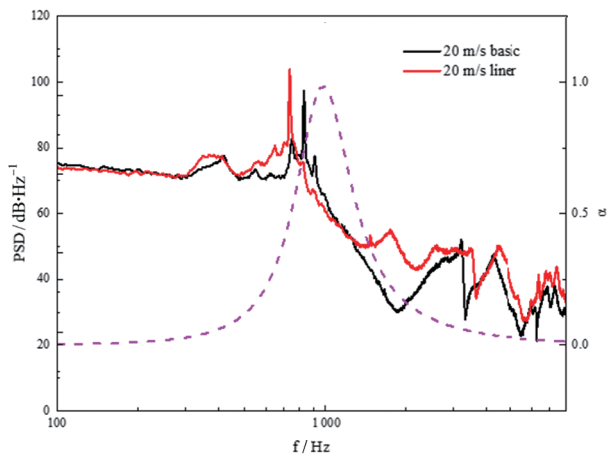
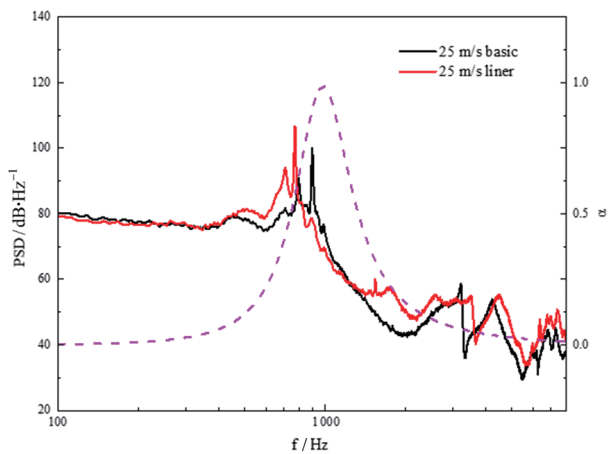


图 10 空腔后缘加装声衬示意图

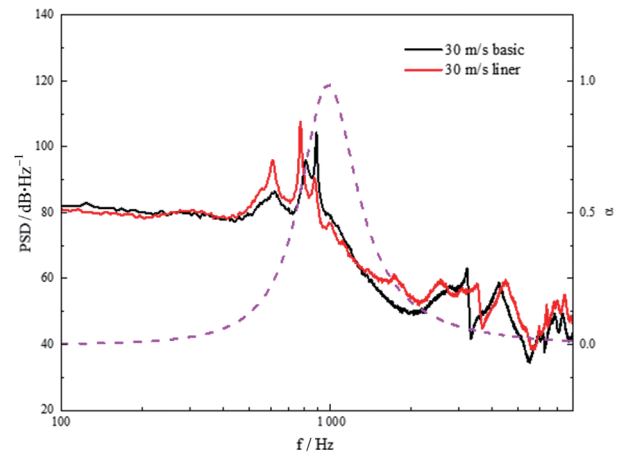
如图 11 所示为风速 20 m/s ~ 35 m/s 时空腔原始构型频谱图与加装声衬频谱图的对比,从图中可以看出,空腔后缘加装声衬后同样会抑制声衬吸声



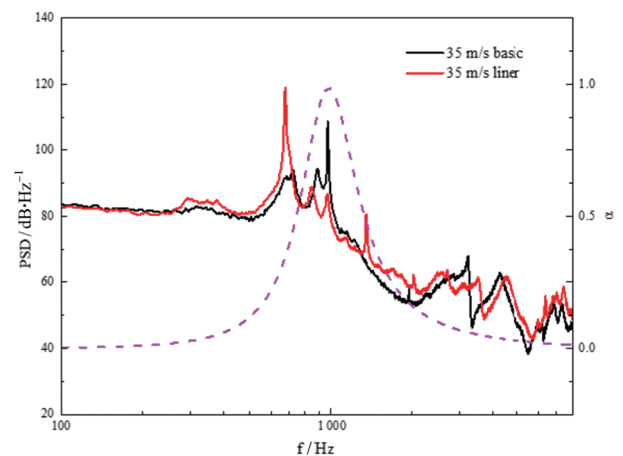
(a) $U_\infty = 20 \text{ m/s}$



(b) $U_\infty = 25 \text{ m/s}$



(c) $U_\infty = 30 \text{ m/s}$



(d) $U_\infty = 35 \text{ m/s}$

图 11 $U_\infty = 20 \text{ m/s} \sim 35 \text{ m/s}$ 空腔原始构型与加装声衬频谱对比

频带内的峰值,同时激发不在吸声频带内的离散噪声。在空腔后缘加装声衬还会导致额外的声共振模态,导致部分噪声的增加。

4 结论

声衬作为一种吸声材料在空腔噪声的抑制方面有一定的效果。

1) 在空腔中加装声衬可以明显抑制在其吸声系数较高频带内的离散噪声,但会激发吸声系数不高的频带的离散噪声,这主要是由于空腔自激振荡噪声的模式切换现象引起的。

2) 由于声衬本身为腔体结构,在空腔中加装声衬会改变空腔的声共振模态,声衬加装的位置不同,对声共振模态的改变也不同。

参考文献:

- [1] 杨党国. 内埋武器舱气动声学特性与噪声抑制研究[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2010.
- [2] ROSSITER J E. Wind tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds [R]. Farnborough: Royal Aircraft Establishment, 1964.
- [3] 郭昊, 王骁原, 刘沛清. 圆形空腔气动噪声特性实验研究: 2016 年全国气动声学学术会议[C]. 北京: [s. n.], 2016.
- [4] 章文文, 何琳, 徐荣武. 腔深对水中空腔流激振荡影响的实验研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2021(6): 92-97.
- [5] 梁勇, 陈迎春, 赵鲲, 等. 低速开式空腔自激反馈流场结构与流致噪声的风洞试验研究[J]. 声学学报, 2020, 45(6): 10.
- [6] 李晓东, 刘靖东, 高军辉. 空腔流激振荡发声的数值模拟研究[J]. 力学学报, 2006, 38(5): 599-604.
- [7] 杨党国, 李建强, 梁锦敏. 基于 CFD 和气动声学理论的空腔自激振荡发声机理[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(6): 724-730.
- [8] 梁勇, 赵鲲, 陈迎春, 等. 低速空腔齿形降噪措施设计及降噪效果试验研究: 2019 年全国声学大会[C]. 深圳: [s. n.], 2019.
- [9] 刘瑜, 石泳, 童明波, 等. 基于 DDES 算法的腔体气动噪声被动控制分析[J]. 航空计算技术, 2018, 48(6): 5.
- [10] BOLT R H. On the design of perforated facings for acoustic materials [J]. The Journal of Acoustical Society of America, 1947, 19(5): 917-921.
- [11] INGARD U, BOLT R H. Absorption characteristics of acoustics material with perforated facings [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1951, 23: 533-540.
- [12] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 中国科学, 1975(5): 385-393.
- [13] 钱玉洁. 宽频带单层微穿孔板吸声体的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [14] ROBERTS D A, MACMANUS D G, JOHNSON R A, et al. Passive attenuation of modal cavity aeroacoustics under supersonic and transonic conditions [J]. Aiaa Journal, 2015, 53(7): 1861-1877.

作者简介

阮佳明 男, 硕士。主要研究方向: 空腔气动噪声机理及降噪技术。E-mail: a741108712@163.com

郭昊 男, 副教授, 博士生导师。主要研究方向: 湍流理论及飞机减阻降噪流动控制技术研究等领域。E-mail: guohao@buaa.edu.cn

刘媛 女, 博士。主要研究方向: 空腔气动噪声机理及降噪技术。E-mail: liuyuan1217@buaa.edu.cn

刘沛清 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 旋涡分离流与流动控制、飞行器大迎角空气动力学、鸭式布局涡系干扰与控制、高速层流控制技术、现代轻质高效螺旋桨设计与优化、飞行器低 Re 数流动机理与控制、大型飞机起飞着陆气动性能、水上迫降性能、气动噪声研究等领域。E-mail: lpq@buaa.edu.cn

Study on noise reduction of low speed cavity by acoustic liner

RUAN Jiaming GUO Hao LIU Yuan LIU Peiqing *

(Beihang University (Key Laboratory of Aeroacoustics of Ministry of Industry and Information Technology), Beijing 100191, China)

Abstract: In the field of aerodynamic noise, cavity noise is an important part, and acoustic liner. As an effective noise reduction measure, the principle of sound absorption is the principle of micro-perforated plate absorber, that is, multiple helmholtz resonators are connected in parallel to absorb sound energy by excitation resonance of the back cavity. The sound absorption was affected by various structure parameters of the lining. Aiming at the problem of aerodynamic noise in the low speed cavity, this paper makes a multi-parameter mix design of the sound liner through the principle of micro perforated plate sound absorber, and adds it to the cavity. The spectral characteristics of cavity noise before and after the installation with acoustic liner were compared, and the noise reduction effect of the sound liner in the cavity noise problem was evaluated. The influence of adding acoustic liner to the noise of the self-excited oscillation cavity and the effect of the acoustic resonance were analyzed.

Keywords: cavity noise; acoustic Liner; microperforated plate sound absorber; helmholtz resonator

* Corresponding author. E-mail: lpq@buaa.edu.cn