

文章编号: 1000-8055(2023)01-0160-13

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210421

节径凸起结构对串列双圆柱干涉噪声的影响

王大庆^{1,2}, 仝 帆¹, 冯和英², 王 勇¹, 杨成浩²

(1. 中国空气动力研究与发展中心 气动噪声控制重点实验室, 四川 绵阳 621000;

2. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 为探究周期性节径凸起结构对串列双圆柱体钝体杆件干涉噪声的降噪效果与降噪规律, 在 0.55 m×0.4 m 声学消声风洞开展了串列双圆柱降噪实验, 设计了 8 种不同参数的周期性节径凸起结构, 实验研究了 4 种不同来流速度(雷诺数为 $0.4 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^5$) 下周期性节径凸起结构对串列双圆柱干涉噪声的影响。研究表明: 周期性节径凸起结构可以减弱甚至完全抑制单音峰值噪声的产生, 最大峰值噪声降噪量可达近 30 dB, 总声压级最高降噪量可达 18.1 dB。不同工况状态下, 各种参数化结构对噪声抑制能力有所不同, 均存在最佳值, 其中凸起高度为 $(0.1D \sim 0.15D)$ 、凸起间距为 $0.5D$ 左右(D 为基准圆柱直径)的周期性节径凸起结构在较广工况范围内都具有较好的降噪效果。周期性节径凸起结构的引入, 不仅改变了串列双圆柱对应的峰值特征频率和涡脱落频率, 而且抑制圆柱杆件卡门涡街的产生。

关 键 词: 湍流干涉噪声; 节径凸起结构; 串列双圆柱; 峰值噪声; 涡脱频率

中图分类号: V211.7; TB535

文献标志码: A

Influence of pitch diameter protruding structure on interference noise of tandem double cylinders

WANG Daqing^{1,2}, TONG Fan¹, FENG Heying², WANG Yong¹, YANG Chenghao²

(1. Key Laboratory of Aerodynamic Noise Control,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: In order to explore the noise reduction effect and noise reduction law of the periodic pitch diameter protruding structure on the interference noise of the tandem double cylinders bluff body, noise reduction experiments of tandem double cylinders were carried out in the 0.55 m×0.4 m anechoic wind tunnel. Eight kinds of periodic pitch diameter protruding structures with different parameters were designed, and the noise reduction effects of pitch diameter periodic protruding structure on the interference noise of the tandem double cylinders were tested at four incoming flow velocities (Reynolds number $0.4 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^5$). Experiment results showed that, the tone peak noise can be reduced or even be completely suppressed by the periodic pitch diameter protruding structure. The maximum peak noise reduction can reach nearly 30 dB, and the maximum overall sound pressure level noise reduction can reach 18.1 dB. Under different working conditions, different structures had different noise suppression capability and there was an optimal value for each working condition. Generally speaking, periodic pitch diameter

收稿日期: 2021-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(12102451, 51875194, 11602290, 11802114)

作者简介: 王大庆(1996—), 男, 硕士生, 主要从事叶轮机械气动噪声控制研究。

通信作者: 仝帆(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为叶轮机械气动声学、仿生降噪技术。E-mail: tongfan@cardc.cn

引用格式: 王大庆, 仝帆, 冯和英, 等. 节径凸起结构对串列双圆柱干涉噪声的影响[J]. 航空动力学报, 2023, 38(1): 160-172. WANG Daqing, TONG Fan, FENG Heying, et al. Influence of pitch diameter protruding structure on interference noise of tandem double cylinders[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 160-172.

protruding structure with protruding height of $(0.1D \sim 0.15D)$, protruding space of $0.5D$ has the best noise reduction effect across a wide working condition range. The introduction of periodic pitch diameter protruding structure not only changed the peak characteristic frequency and vortex shedding frequency of tandem double cylinders, but also suppressed the generation of Karman vortex street.

Keywords: turbulent interference noise; pitch diameter protruding structure; tandem double cylinder; peak noise; vortex shedding frequency

圆柱等钝体扰流所引起的流致干涉噪声问题广泛存在于航空、海洋作业平台、高速列车、风工程等领域。随着民用飞机、高速列车等交通工具的快速发展,航空发动机以及机体等各方面的噪声有了很大的改善,但飞机起落架以及增升装置、列车受电弓等噪声占比增加,成为噪声的重要贡献者。串列双圆柱是气动噪声问题中的典型简化模型,抑制串列双圆柱这类钝体杆件噪声具有较强的工程意义和学术意义。

上游钝体结构产生的交替性脱落涡作用在下游钝体结构上会引起结构振动及流致噪声的产生。国内外学者对串列双圆柱振动与噪声问题开展了大量研究,Prasanth等^[1]研究表明,在串列及错列双圆柱下,流向振动表现得最为剧烈。杜晓庆等^[2]在这一方面也开展了相应的实验研究,研究表明上游圆柱不同运动状况下产生的尾迹对下游双自由度的圆柱产生强烈的涡激作用,且不同状况下产生的涡街模态也不同。赵良举等^[3]探究了横掠二维串列双圆柱扰流噪声问题,通过比较不同流速、直径、间距比分析了圆柱脱落涡和远场噪声的辐射特性。Papaioannou等^[4]通过数值计算的方法详细模拟了串列双圆柱尾迹涡脱落频率以及圆柱表面的受力情况。刘敏等^[5]采用大涡模拟(LES)结合Farassat-1A方程的方法研究了不同间距比下圆柱噪声的频谱变化情况。

为抑制气流分离、涡脱落噪声、涡激振动等现象,许多学者对圆柱钝体扰流开展了流动控制研究,如边界层吹吸气体^[6-8]、注入等离子体^[9-12]、结构旋转控制等^[13]方法。相对于主动控制,被动控制结构简单,易实施,如多孔介质、仿生结构、改变轴向间距、添加螺旋线以及附加线等^[14-18]。

基于风洞实验,圆柱钝体噪声控制也得到了广泛研究。Zdravkovich^[19]对双圆柱串列及交错排列的扰流问题进行了实验研究,研究表明两圆柱之间的流动存在相互作用,中心间距存在3倍直径的临界值,当小于临界值时,没有明显的涡从上游脱落。Geyer等^[20]使用多孔材料覆盖圆柱

表面减少流动噪声,研究表明在较高雷诺数下,空气渗透性高的材料对宽带噪声有明显的降噪效果。Shi等^[21]通过实验和数值模拟探究了表面波状结构对圆柱远场噪声辐射的影响,研究表明锯齿状表面和V形环表面可有效降低单音噪声4~5 dB。Hutcheson和Brooks^[22]通过测试提出圆柱表面添加O型环状结构,对单音和宽频都有显著的抑噪效果。Li等^[23]在串列双圆柱模型上应用螺旋形电缆,有效降低了双圆柱湍流干涉噪声。结果还表明,在大间距的串列排列中,抑制噪声的关键在于对上游圆柱尾流的控制。沈国辉等^[24]采用风洞实验研究了不同直径的圆柱以及各种圆柱表面改型对风噪声的影响,取得了一定的降噪效果。

串列圆柱噪声问题属于典型的气动噪声问题,前人大多针对不同间距比、不同模型尺寸大小、不同来流工况等问题进行了研究,对串列双圆柱干涉噪声远场辐射特性以及噪声抑制方法研究还不够系统。虽有许多学者对单圆柱气动噪声降噪开展了大量研究,但降噪结构通常复杂且降噪效果并非十分理想,工程上应用具有一定的局限性。

本文针对串列双圆柱干涉噪声的控制开展了较为系统的研究,并提出了周期性微凸起结构的降噪方案。首先基于消声风洞,实验研究了基准串列双圆柱干涉噪声的特征,然后开展了周期性凸起结构的降噪研究,分析对比不同结构参数和不同工况下的降噪规律,取得了明显的降噪效果。实验结果可为高铁受电弓、飞机起落架等钝体扰流干涉噪声的控制提供一定的技术支撑。

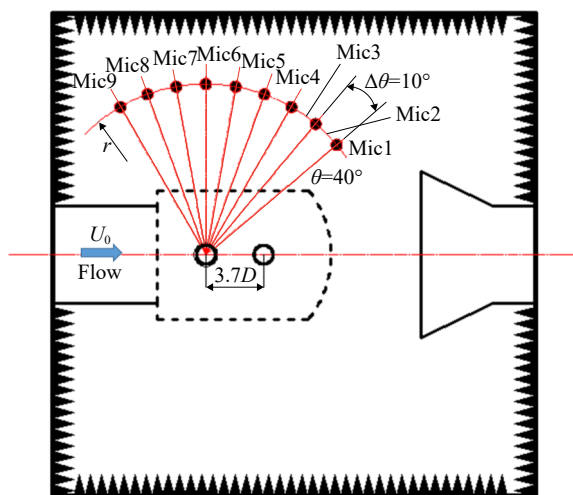
1 风洞装置及测量方法

1.1 实验环境及模型安装

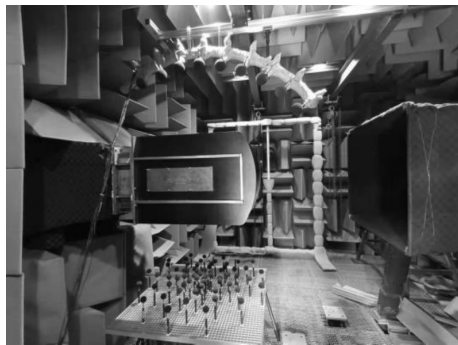
实验在中国空气动力研究与发展中心 $0.55\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 声学风洞开口实验段中进行。 $0.55\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 声学风洞是一座连续式单回流低速风洞,开口实验段长为 1.5 m ,宽为 0.55 m ,高为 0.4 m 。最大来流速度为 100 m/s ,背景噪声范围为 $75 \sim 80\text{ dB(A)}$ (来流速度为 80 m/s ,截止频率为 100 Hz ,气流轴

线中心外 2 m 处测量); 开口实验段外配置一个全消声室, 全消声室长为 3.7 m, 宽为 5.5 m, 高为 4 m, 消声室截止频率为 100 Hz。

图 1(a) 为消声室及开口实验段远场指向性测量传声器布置方案, 采用 9 路传声器, 测量角度范围 $\theta=40^\circ\sim 120^\circ$, 间隔 $\Delta\theta=10^\circ$, 阵列方式以上游圆柱为中心, 弧形阵列半径 $r=1$ m。圆柱直径 $D=30$ mm, 两圆柱间距为 $3.7D$ 。图 1(b) 为消声室内的实验环境及实验安装测量图。



(a) 远场测量装置布置简图



(b) 0.55 m×0.4 m声学风洞开口实验段实验装置

图 1 全消声室实验装置

Fig. 1 Experimental device for full anechoic chamber

1.2 周期性节径凸起圆柱杆件

实验对象包括 9 种圆柱杆件: 基准圆柱和 8 种不同参数的周期性节径凸起结构圆柱杆件。基准圆柱直径 $D=30$ mm, 展长 $L=550$ mm。所有改型参数的杆件都基于基准圆柱, 周期性节径凸起结构示意图如图 2 所示, 衡量周期性凸起结构的参数有: 凸起高度 $A=D_0-D$ 、凸起结构间距 S 、厚度 B 。本文设置两种变化参数: 一是保证其他参数不变, 探究凸起高度 A 对远场气动噪声的影响; 二是改变不同凸起间距 S 。所有周期性凸起结构厚度 B 为常数, $B=3$ mm。周期性凸起结构具体参

数如表 1 所示。

圆柱杆件采用数控机床加工而成, 材质为铝合金, 两端中心设置有螺纹孔, 便于将圆柱杆件安装在两侧钢结构侧板上。本文实验中, 将周期性凸起圆柱置于上游, 以研究上游圆柱结构参数的改变对干涉噪声的控制影响。

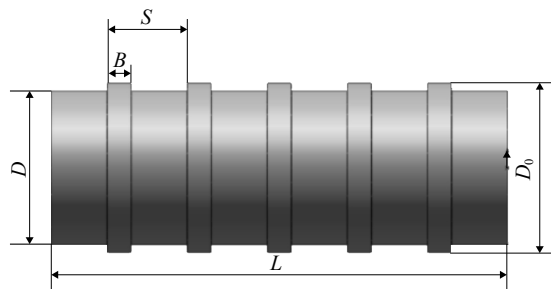


图 2 圆柱周期性节径凸起结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the periodic pitch diameter protruding structure of the cylinder

表 1 节径凸起结构设计参数

Table 1 Design parameters of pitch diameter protruding structure

序号	名称	基准直径 D/mm	凸起直径 D_0/mm	高度 A/mm	间距 S/mm
1	Baseline	30	30.0	0	0
2	A1.5S9	30	31.5	$0.05D$	$0.3D$
3	A3S9	30	33.0	$0.1D$	$0.3D$
4	A4.5S9	30	34.5	$0.15D$	$0.3D$
5	A6S9	30	36.0	$0.2D$	$0.3D$
6	A12S9	30	42.0	$0.4D$	$0.3D$
7	A3S4.5	30	33.0	$0.1D$	$0.15D$
8	A3S6	30	33.0	$0.1D$	$0.2D$
9	A3S15	30	33.0	$0.1D$	$0.5D$

1.3 实验状态及测量设备

实验中测量了 4 种来流工况 (来流速度 $U_0=20, 40, 60, 80$ m/s), 基于来流速度和基准圆柱直径, 相对应的雷诺数分别为 $Re\approx 0.4\times 10^5, 0.8\times 10^5, 1.2\times 10^5, 1.6\times 10^5$, 其中风洞开口实验段核心区的湍流强度低于 0.02%。为保证测量精度, 在测量前采用标准声源 (1 000 Hz, 114 dB) 对传声器进行校准。远场噪声测量采用 G.R.A.S 公司 (GRAS Sound & Vibration 公司) 的 46AE 型传声器, 该传声器的主要技术指标如表 2 所示。实验时设置的传声器采样频率为 51.2 kHz, 每个工况采集 20 s 的噪声数据, 每个状态进行了 2 组测量, 后处理取其代数平均。采用 BBM-PAK 噪声振动测试分析系统, 其采样频率最高可达 204.8 kHz。

表 2 G.R.A.S 46AE 型传声器主要技术指标
Table 2 Main technical specifications of the G.R.A.S
microphone type 46AE

参数	数值及说明
类型	46AE
传声器直径/cm	1.27
灵敏度/(mV/Pa)	50
频率响应/Hz	$3.15 \sim 2 \times 10^4$
频率误差/(dB/Hz)	± 3
声压动态响应上限/dB	148
麦克风热噪声/dB(A)	14.5

2 实验结果与分析

2.1 实验数据处理方法

本文对传声器测量的噪声信号进行分析, 具体处理方法如下: 为方便评估噪声信号的变化特征, 实验数据的处理上采用 Pwelch 方法计算声压信号的功率谱密度, 引入 Hamming 窗以减小信号分析的“频谱泄露”, 分块大小为 16 384, 频率分辨率为 3.125 Hz, 得到声压信号的功率谱密度(power spectra density, 记为 $\phi_i(f)$)。

参照文献 [25-26], 定义噪声声压级(sound pressure level, SPL), 记为 L_{sp} :

$$L_{sp} = 10 \lg [\phi_i(f) / p_{ref}^2] \quad (1)$$

式中参考声压 $p_{ref} = 2 \times 10^{-5}$ Pa, 下标 i 为第 i 个位置的传声器, 积分各个倍频段的声压级可计算采样点的总声压级(overall sound pressure level, OASPL), 记为 L_{OASP} : [26]

$$L_{OASP} = 10 \lg \int_{f_{min}}^{f_{max}} 10^{0.1 L_{sp}} df \quad (2)$$

式中 f 为频率(Hz); f_{min} 为所研究的声频率下限, 一般可取消声室截止频率, 即 100 Hz; f_{max} 为所研究的声频率上限, 本文取为 10 000 Hz。

串联双圆柱扰流干涉噪声频率特征采用斯特劳哈尔数 St 表示:

$$St = fD/U_0 \quad (3)$$

雷诺数处于亚临界范围的圆柱绕流, 其 St 对应的峰值特征频率为 f_s (即脱落涡对应的单音噪声频率)。

2.2 基准圆柱干涉噪声频谱特征

图 3 是消声风洞的背景噪声, 不同来流速度 U_0 下的背景噪声表现出典型的宽频噪声特征, 整个宽频域段没有出现显著的峰值。虽有小幅度单音存在, 推测其为风洞运行中, 由于水冷增加的

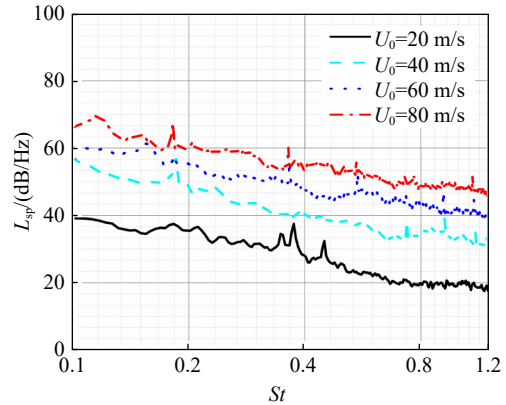


图 3 消声风洞背景噪声

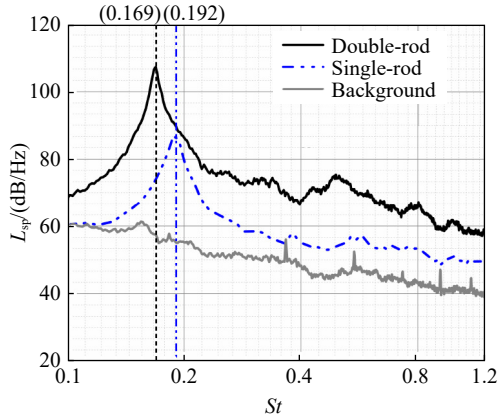
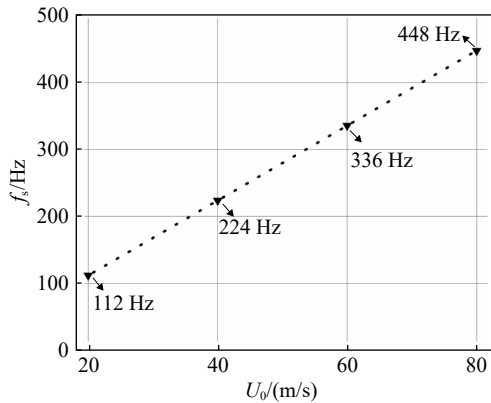
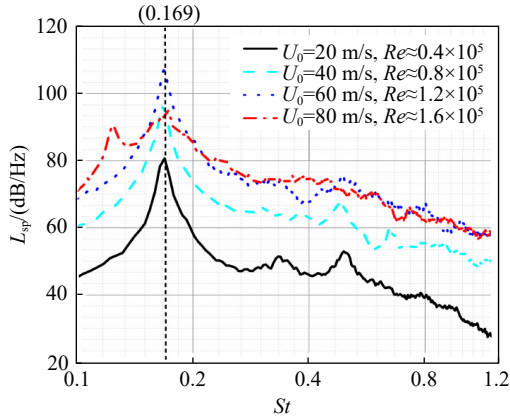
Fig. 3 Background noise of anechoic wind tunnel

背景噪声经风洞传入消声室中, 但其频率低幅值小, 影响可以忽略。

图 4 为来流速度为 60 m/s 的工况下 (对应的雷诺数 $Re \approx 1.2 \times 10^5$), 单圆柱与串联双圆柱的噪声频谱特性对比。实验首先进行了基准单圆柱 ($D=30$ mm) 噪声、基准串联双圆柱干涉噪声和背景噪声的对比分析, 可以看出在对应的斯特劳哈尔数 ($St=0.1 \sim 1.2$) 频域范围内, 单圆柱噪声和串联双圆柱噪声的声压强度远大于风洞的背景噪声。且单圆柱噪声的纯音频率对应的 $St=0.192$, 与文献 [27] 基本一致, 与经典的涡脱频率基本一致; 而串联双圆柱噪声的纯音频率与单圆柱噪声不一致, 对应的 $St=0.169$, 可能是在串联双圆柱干涉作用下, 下游圆柱对上游圆柱脱落涡频率产生一定的影响, 因此串联双圆柱的纯音频率有所改变; 但两者特征频率下的单音噪声频谱形状均为“钟形”结构, 整体宽频特性类似。

图 5 为不同来流速度下基准串联双圆柱噪声频谱特性分析, 由图 5(a) 可知: ① 串联双圆柱干涉噪声的单音特征频率 f_s 随来流速度以及雷诺数的增大而呈线性增大; ② 根据式 (3) 获得的 4 组来流速度特征频率对应的 St 基本保持一致, 均在 0.169 左右。基准双圆柱干涉噪声频谱特性如图 5(b) 所示, 整体宽频噪声 ($St=0.1 \sim 1.2$) 对应的声压级随雷诺数的增加而增加, 但增加量逐级减小; 单音噪声频谱形状在 80 m/s 来流速度下 (对应的雷诺数 $Re \approx 1.6 \times 10^5$) 发生一些变化, 单音频带变宽, 声压幅值减小, 并观察到两个“驼峰”状单音噪声。

此外, 为了更好地揭示串联双圆柱的流动和噪声产生机制, 还采用大涡模拟方法 (LES) 对不同雷诺数下的基准串联双圆柱进行了模拟。图 6

图 4 单圆柱与串联双圆柱噪声频谱对比 ($U_0=60$ m/s)Fig. 4 Comparison of noise spectrum of single cylinder and tandem double cylinders ($U_0=60$ m/s)(a) 基准圆柱特征频率 f_s 变化分析

(b) 基准圆柱噪声频谱分析

图 5 不同来流速度下基准双圆柱噪声频谱特性分析

Fig. 5 Analysis of noise spectrum characteristics of reference double cylinders under different incoming flow velocities

给出了不同雷诺数条件下串联双圆柱瞬时展向(z)涡量云图,分析其涡量形态随雷诺数的变化情况。图中可以看出,在雷诺数 $Re \approx 0.4 \times 10^5$ 时,双圆柱之间上下两侧交替旋涡形态较弱,随着向下游发展过程中,逐渐形成周期性涡街;随着雷诺数的

增大,涡量强度也随之增强,并形成大尺度的涡街;在来流速度达到 80 m/s 时(对应的雷诺数 $Re \approx 1.6 \times 10^5$),涡街形态和尺度进一步增大,下游圆柱附近的流动和涡量分布更为复杂。

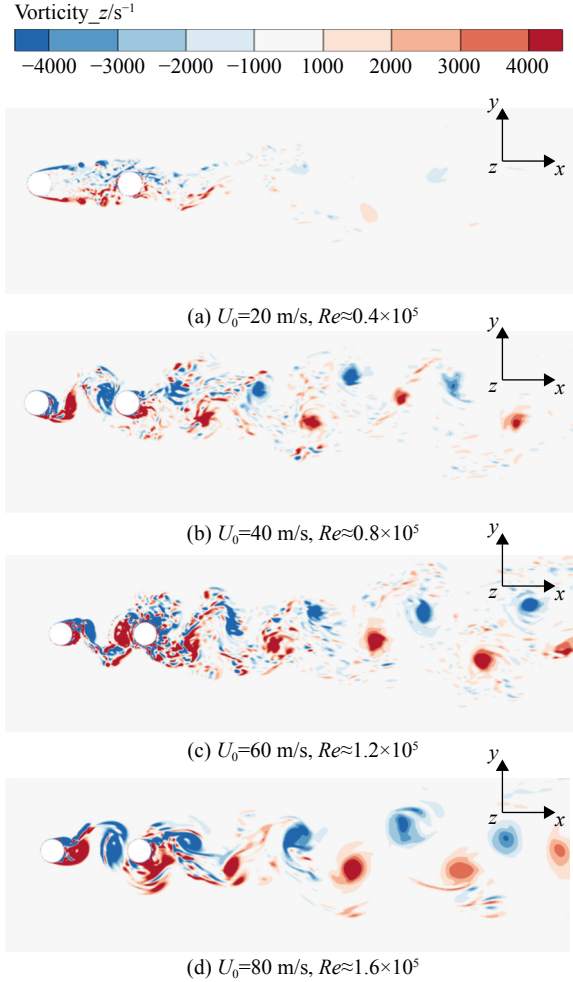


图 6 不同雷诺数条件下对应的瞬时展向涡量云图

Fig. 6 Corresponding instantaneous spanwise vorticity cloud images under different Reynolds number conditions

2.3 节径凸起结构对干涉噪声特性影响

2.3.1 节径凸起结构高度对噪声特性的影响

如图 7 所示为不同来流速度状态下不同节径凸起结构高度对串联双圆柱干涉噪声的影响,其中凸起结构周期性间距 S 均为 9 mm。在不同来流速度状态下,每种结构的降噪能力存在一定差异。如图 7(a)所示,在来流速度为 20 m/s(对应的雷诺数 $Re \approx 0.4 \times 10^5$)的状态下,凸起高度最小和最大的两个结构降噪效果最差,其余结构均有较好的降噪能力,但在低频域内出现幅值较低的单音噪声,且单音频率也发生改变。随着雷诺数的增大,所有结构都表现出一定的噪声抑制能力,且部分结构如 A3S9、A4.5S9 在一定程度上,可以完

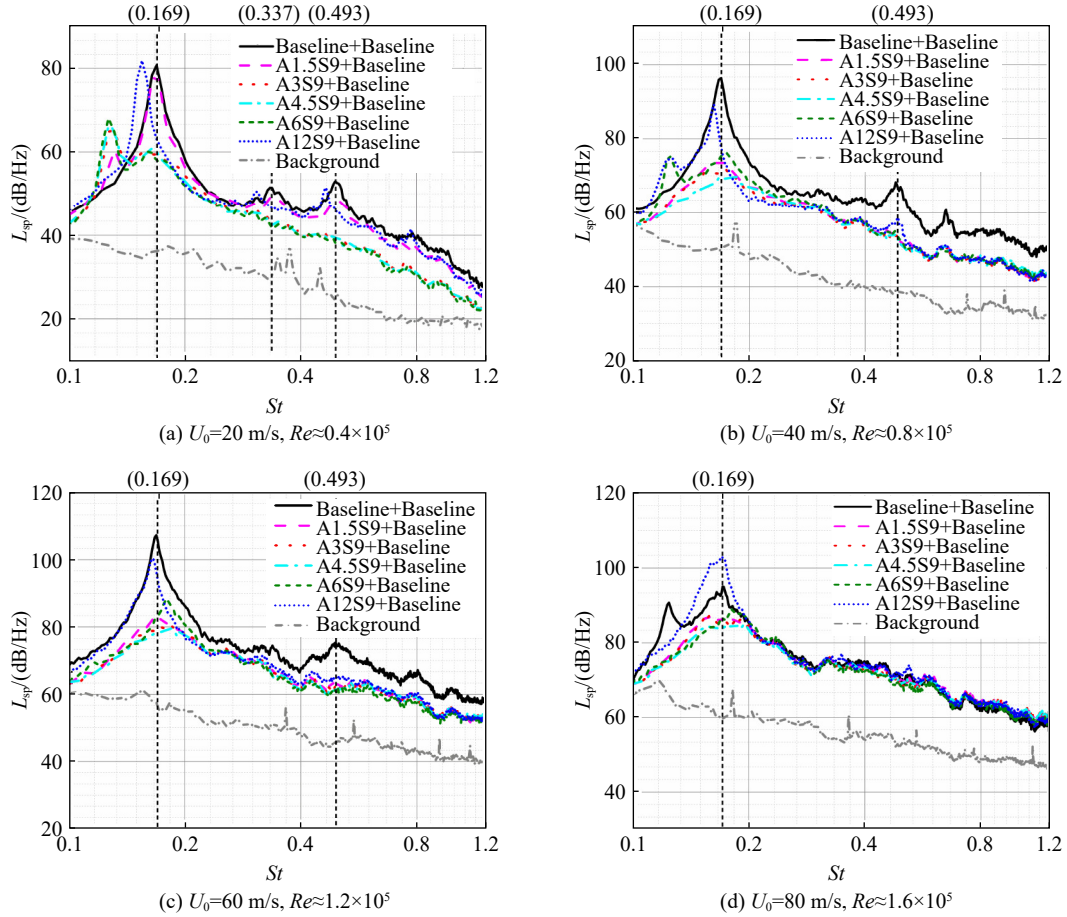


图7 不同凸起高度对串联双圆柱干涉噪声的影响

Fig. 7 Influence of different protruding heights on the interference noise of tandem double cylinders

全抑制单音噪声,对高频域段宽频噪声也有较好的抑制效果,且效果显著。在较高速状态下(对应的雷诺数 $Re \approx 1.2 \times 10^5$ 时),其凸起结构对噪声的抑制能力有所降低,如 A12S9 结构对干涉噪声的影响反而增大,中高频域段噪声基本保持一致,无明显的降噪效果。

图 8 为不同凸起高度对串联双圆柱降噪量的影响,如图 8(a) 所示,当来流速度为 20 m/s 时, A3S9、A4.5S9、A6S9 三种结构降噪效果较好,在中高频域段 ($St=0.2 \sim 1.4$) 降噪量平均可达 5 dB 以上,特征频率下单音噪声最大声压级降噪量达 24 dB,在低频域段噪声有所增加,但整体上所有结构都有一定的降噪效果。如图 8(b)、图 8(c) 两种来流速度状态下,凸起结构降噪效果最为明显,单音频率声压值降噪量可达近 30 dB,与低速状态下相比,所有结构宽频降噪能力都有所提升,但凸起高度较大的结构 A12S9 相比其他几种结构降噪能力差,在低频域段有较低幅值的单音产生,使其低频噪声值增加。如图 8(d) 所示,在 80 m/s 来流速度工况下,低频域段 ($St=0.1 \sim 0.2$) 范围内,

除 A12S9 以外,其他凸起高度参数结构都有一定降噪效果,最大降噪量可达 15 dB 左右,而对于中高频域段 ($St=0.2 \sim 1.4$) 降噪量几乎为零,无降噪效果。总体来说:不同高度的凸起结构在不同来流工况状态下,其降噪能力都有所改变,每种工况都有不同的最优降噪结构,综合分析,凸起结构凸起高度在 $0.1D \sim 0.15D$ 之间降噪效果最佳。

图 9 为不同高度下,串联双圆柱总声压级 (OASPL) 指向性分布,频域计算范围为 $100 \sim 10\,000$ Hz。从图中可以看出,来流速度为 20 m/s 时,在各个方位角下,与其他高度参数结构相比,串联双圆柱凸起高度 A 过大或过小(如 A1.5S9、A12S9) 降噪效果较小,甚至总声压级值有所增加;随着雷诺数的增加,尤其在 40、60 m/s 来流速度工况下(对应的雷诺数 $Re \approx 0.8 \times 10^5, 1.2 \times 10^5$),各种参数高度的凸起结构圆柱在各方位角下都有较好的噪声抑制能力;在高来流速度状态下,凸起结构的高度越大,噪声抑制能力越差, A12S9 结构总声压级噪声值反而增大 5 dB 以上,总声压级的大小主要取决于低频噪声,与噪声频谱图 7(d) 相对应,

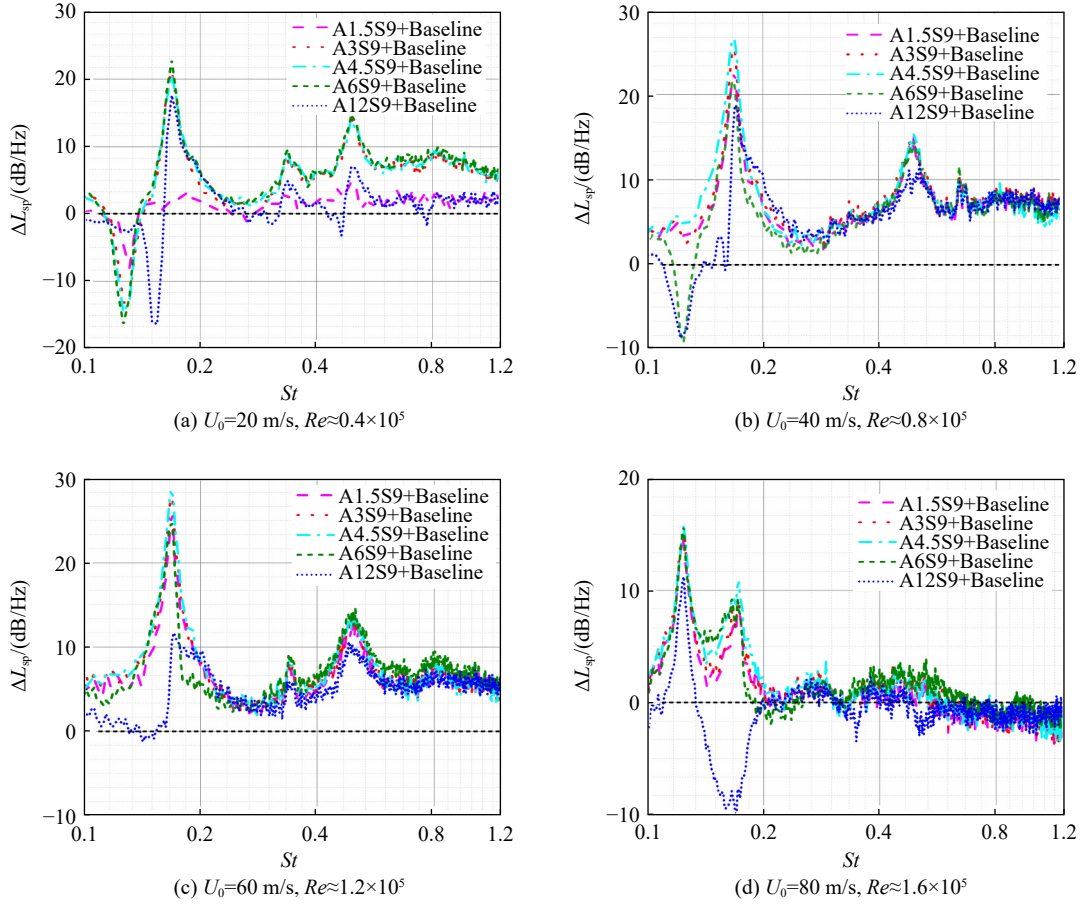


图 8 不同凸起高度对串联双圆柱干涉噪声降噪量的影响

Fig. 8 Influence of different protruding heights on the interference noise reduction of tandem double cylinders

由此可见,大高度参数的凸起结构在高速状态下重新“诱发”产生高峰值单音噪声,导致串联双圆柱远场辐射干涉噪声总声压级增大。整体来看,不同工况下,每种参数结构对总声压级噪声抑制的能力都有所不同,而凸起结构 A4.5S9 能在不同来流速度工况下有较好的综合降噪能力,可见凸起结构高度变化对串联双圆柱干涉噪声总声压级值有较为明显的影响,但凸起高度并非越大或越小对噪声抑制能力就越好。

图 10 所示为不同凸起高度的串联双圆柱总声压级(L_{oasp})与来流速度的变化关系。实验共测量了 4 种来流速度, $U_0=20, 40, 60, 80$ m/s。以 $U_{\text{ref}}=20$ m/s 状态下的总声压级值作为参考值,分别用各来流速度下的总声压级减 20 m/s 状态下的参考总声压级,从而得到差值(ΔL_{oasp})。图中可以看出,随着来流速度增加,串联双圆柱干涉噪声总声压级增加量逐渐减小;且总声压级差值大致与来流速度的 6 次方成正比。

表 3 给出了不同凸起高度参数下 90° 方位角传声器(Mic6)的总声压级。整体来看,除 A12S9

圆柱在部分工况条件下噪声总声压级增加外,其余工况条件下均有良好的降噪效果,其中 A4.5S9 圆柱在不同工况状态下对噪声的抑制能力最佳,总声压值最大降噪量在 60 m/s 来流速度工况状态下可高达 18.1 dB。图 11 为不同凸起高度参数的干涉噪声在不同来流速度下的总声压级降噪量 ΔL_{oasp} (单位: dB),由图分析可知,同种结构在不同来流速度下对噪声的抑制能力不同,且各参数凸起结构在来流速度为 40、60 m/s 时(对应的雷诺数 $Re \approx 0.8 \times 10^5, 1.2 \times 10^5$)降噪效果较佳;不同来流速度下,凸起高度参数对串联双圆柱降噪量的影响存在最佳值,约为 $0.1D \sim 0.15D$ 。

声功率的大小可以直接反映物体辐射噪声能力的强弱,与传声器的距离无关。由于圆柱展向长度 L 与直径 D 之比较大,因此,串联双圆柱模型可看作向远场辐射噪声的线性声源,其声功率 $W(f)$ 公式表示如下^[25]:

$$W(f) = \frac{L}{\rho_0 c_0} \sum_{i=1}^n (L_{\text{sp}} r \Delta\theta) \quad (4)$$

式中 $W(f)$ 为远场噪声辐射角度 ($\theta = 40^\circ \sim 120^\circ$)

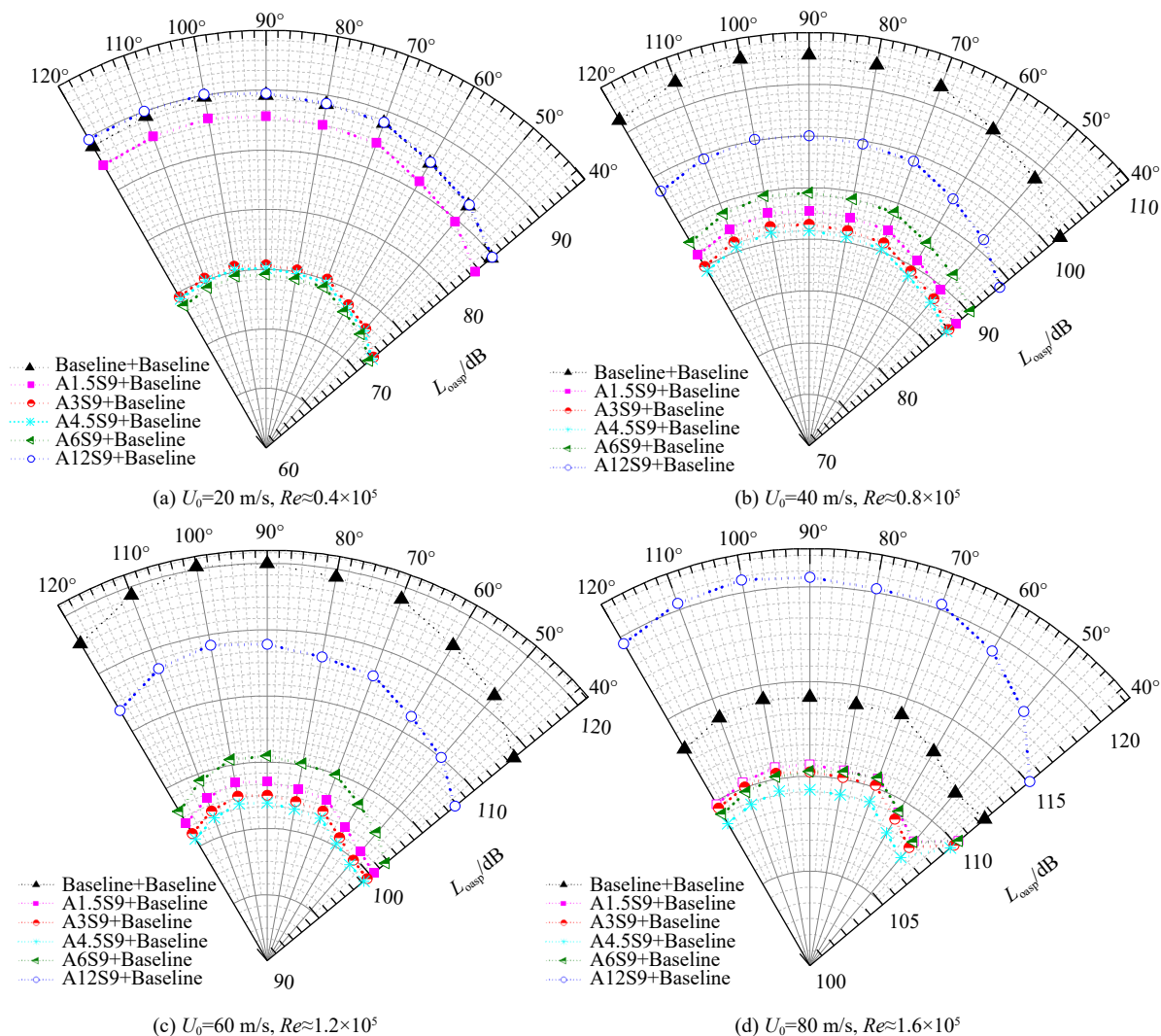


图9 不同凸起高度的串联双圆柱总声压指向性分布

Fig. 9 Overall sound pressure directivity distribution of tandem double cylinders with different protruding heights

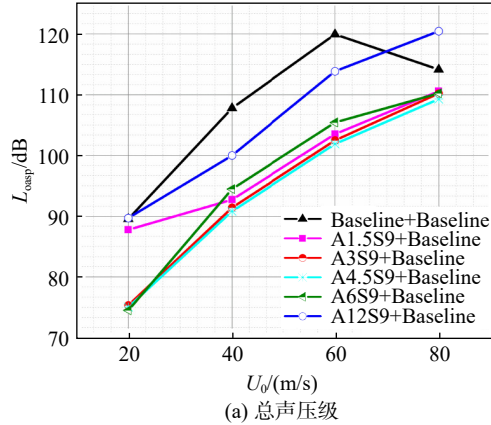
之间声功率积分, L 为圆柱展向长度, r 为传声器距离圆柱轴线的距离, $\Delta\theta$ 为两相邻传声器之间的夹角, ρ_0 是空气密度, c_0 为声速。图 12 给出了来流工况在 $U_0=60$ m/s 时 (对应的雷诺数 $Re\approx 1.2\times 10^5$), 不同凸起高度参数对声功率变化的影响分析。由图可知, 噪声辐射强度变化较大主要集中在 ($St=0.15\sim 0.2$) 频域内, 且基准圆柱在斯特劳哈尔数 $St=0.169$ 左右时, 噪声辐射能力最强; 凸起高度 A 为 $0.4D$ 次之; A 为 $0.1D\sim 0.15D$ 辐射强度最弱, 基本一致。这也是图 7 中串联双圆柱声压级峰值噪声出现差异的主要原因。

2.3.2 节径凸起结构间距对噪声特性的影响

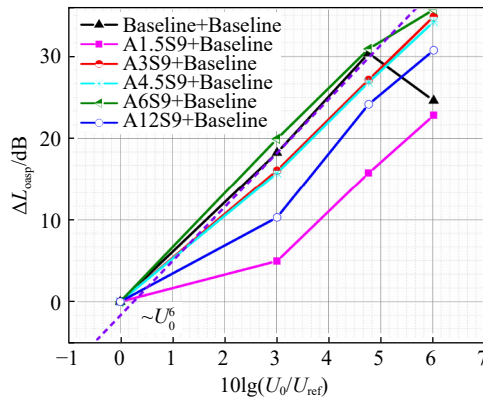
图 13 为不同来流速度状态下凸起间距 S 对串联双圆柱干涉噪声频谱的影响, 其中凸起结构高度 A 均为 3 mm, 即 $0.1D$ 。整体来看, 在不同来流速度状态下, 随着凸起间距变小, 降噪能力变

差。如 A3S4.5 小间距结构, 随着来流速度、雷诺数的增大, 噪声抑制能力减弱, 甚至使得噪声幅值增加; 而且随着凸起间距的逐渐增大, 降噪能力也不断增强, 但并非线性增加。从图 13(a)、图 13(b) 可以看出: 在 20、40 m/s 来流速度下, 凸起间距较小的两种结构使得单音幅值大幅度降低, 但在较低频域段也出现小幅值的窄带单音噪声, 且随着间距的增大, 逐渐减小。当来流速度、雷诺数增大后, 由图 13(c)、图 13(d) 可知, 低频单音消失, 不同参数的凸起间距对中高频域段 ($St=0.2\sim 1.2$) 噪声抑制效果逐渐减弱。

图 14 为不同来流速度状态下凸起间距 S 参数对降噪量的影响情况, 与改变凸起高度参数相比, 改变不同凸起间距参数, 对低频域段降噪量影响较大, 而中高频域段降噪效果虽好, 但各工况状态下降噪量基本保持不变, 说明凸起间距变



(a) 总声压级



(b) 总声压级差值

图 10 不同凸起高度的串联双圆柱总声压级与来流速度的关系

Fig. 10 Relationship between the overall sound pressure level of tandem double cylinders with different protruding heights and the incoming flow velocity

表 3 不同凸起高度结构的总声压级

Table 3 Overall sound pressure level of different protruding height parameter structures

结构	L_{oasp}/dB			
	$U_0=20 \text{ m/s}$	$U_0=40 \text{ m/s}$	$U_0=60 \text{ m/s}$	$U_0=80 \text{ m/s}$
Baseline-Baseline	89.55	107.80	119.96	114.15
A1.5S9-Baseline	87.77	92.73	103.52	110.59
A3S9-Baseline	75.34	91.41	102.50	110.22
A4.5S9-Baseline	75.04	90.80	101.91	109.27
A6S9-Baseline	74.51	94.46	105.44	110.24
A12S9-Baseline	89.70	99.99	113.87	120.46

化对高频域噪声敏感度较低,随着来流速度的增加噪声抑制能力也在减弱。低频域段最大降噪量可达 28.5 dB 左右,而中高频域段最高可达 15 dB 左右。

图 15 为不同凸起间距 S 下,串联双圆柱总声压级指向性分布结果。当来流速度为 20 m/s 时,由图分析可知,随着周期性凸起间距 S 的增大,噪

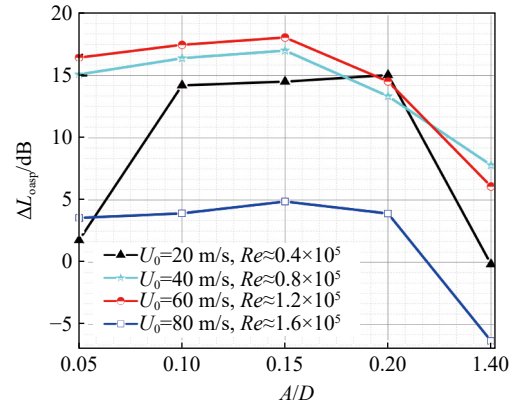
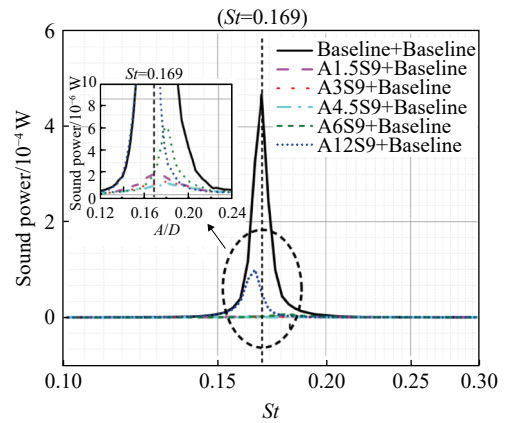


图 11 不同凸起高度结构的总声压级降噪量

Fig. 11 Overall sound pressure level noise reduction of different protruding height parameter structures

图 12 不同凸起高度的串联双圆柱声功率变化 ($U_0=60 \text{ m/s}$, $Re\approx 1.2\times 10^5$)Fig. 12 Variation of sound power of tandem double cylinders with different protruding heights ($U_0=60 \text{ m/s}$, $Re\approx 1.2\times 10^5$)

声抑制能力减弱,但不同的凸起间距参数在低速状态下都有较好的降噪效果。随着来流速度的逐渐增加,总声压级的降噪效果发生明显的变化,与低速状态降噪效果恰好相反,凸起间距 S 越大,总声压级就越小,降噪效果越明显,但随着凸起间距的增大,降噪量有所降低,并非呈线性增长,存在一定上限值。且波长参数较小的圆柱凸起结构(如 A3S4.5)对来流速度的变化敏感程度较大,来流速度达到 80 m/s(对应的雷诺数 $Re\approx 1.6\times 10^5$)时,总声压级值反而超过基准圆柱,出现恶化。总体来说,凸起结构(A3S15)在较广的来流速度范围状态下有较好的噪声抑制能力,尤其在来流速度 40、60 m/s 工况状态下,各方位角总声压级降噪效果均比较明显。

图 16 为不同凸起间距 S 的串联双圆柱总声压级与来流速度的变化关系。4 种不同的凸起间

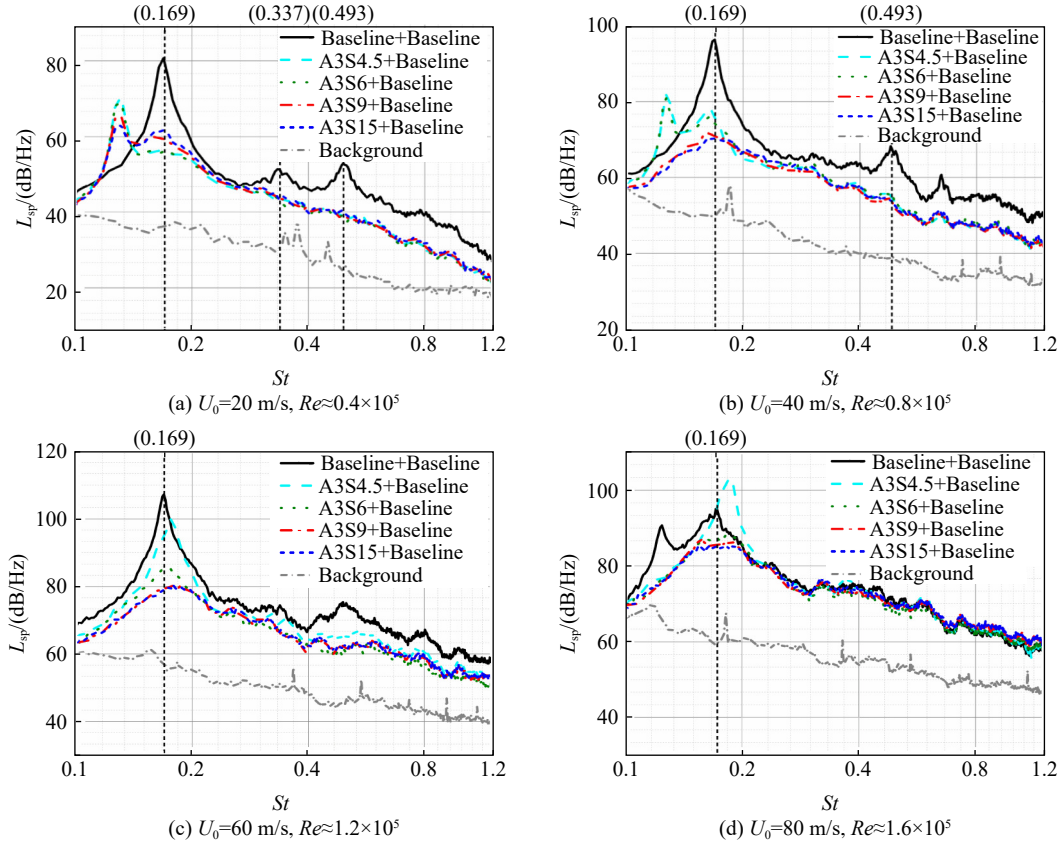


图 13 凸起间距对串联双圆柱干涉噪声频谱的影响

Fig. 13 Influence of protruding spaces on the interference noise spectrum of tandem double cylinders

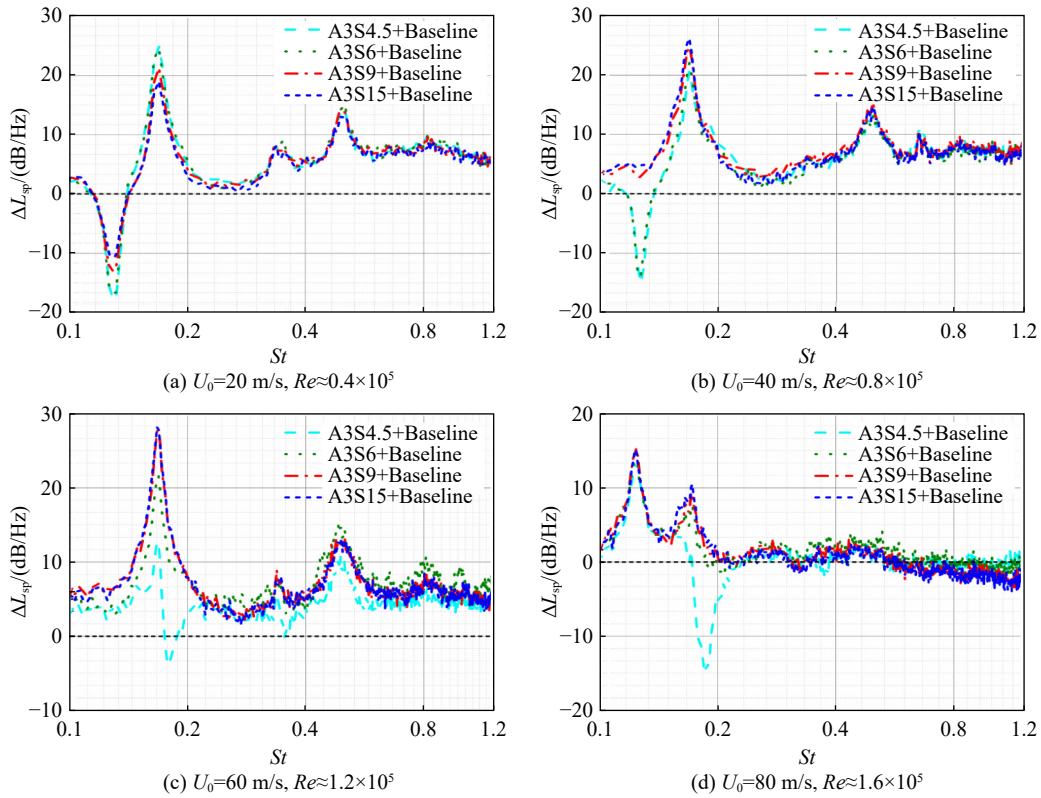


图 14 凸起间距对串联双圆柱干涉噪声降噪量的影响

Fig. 14 Influence of protruding spaces on the interference noise reduction of tandem double cylinders

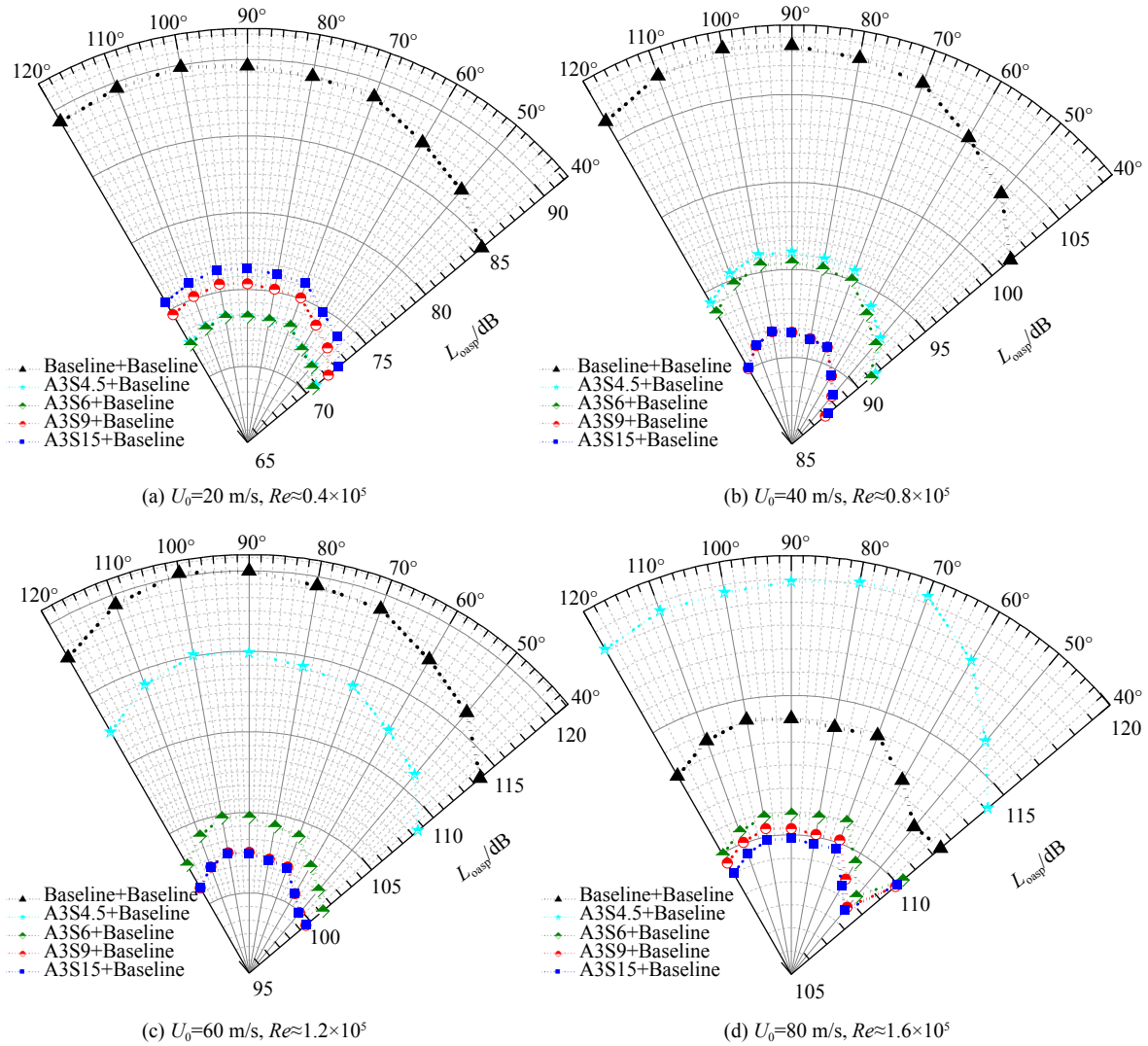


图 15 不同凸起间距的串联双圆柱远场辐射噪声总声压指向性分布

Fig. 15 Overall sound pressure directivity distribution of the far-field radiated noise of tandem double cylinders with different protruding spaces

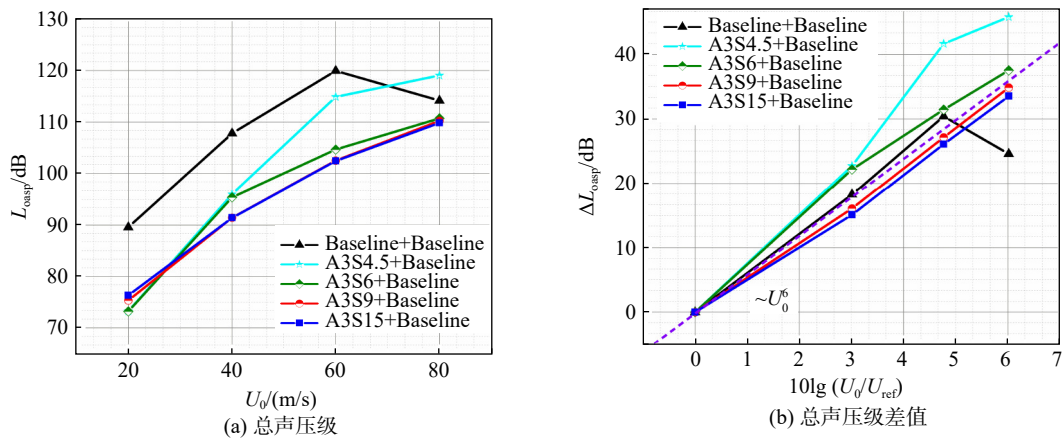


图 16 不同凸起间距的串联双圆柱总声压级与来流速度的关系

Fig. 16 Relationship between the overall sound pressure level of tandem double cylinders with different protruding spaces and the incoming flow velocity

距结构基本都能减小噪声总声压级。基准串联双圆柱以及改型串联双圆柱干涉噪声的声功率仍近似与来流的 6 次方成正比。

表 4 为不同结构间距 S 参数下 90° 方位角传声器(Mic6)的总声压级值。凸起高度参数一定时,随着凸起间距的增大,总声压降噪量也随之增大;从总声压级值上整体分析,A3S15 结构相比其余不同间距参数结构来讲,对干涉噪声抑制能力最佳,在 60 m/s 时降噪量可达 17.54 dB,降噪效果显著。

表 4 不同凸起间距结构的总声压级

Table 4 Overall sound pressure level value of different protruding space structures

结构	$L_{\text{oasp}}/\text{dB}$			
	$U_0=20 \text{ m/s}$	$U_0=40 \text{ m/s}$	$U_0=60 \text{ m/s}$	$U_0=80 \text{ m/s}$
Baseline-Baseline	89.55	107.80	119.96	114.16
A3S4.5-Baseline	73.25	95.98	114.90	119.05
A3S6-Baseline	73.19	95.38	104.66	110.73
A3S9-Baseline	75.34	91.41	102.50	110.22
A3S15-Baseline	76.31	91.39	102.42	109.85

图 17 为不同凸起间距结构的总声压级降噪量,在来流速度为 40、60、80 m/s 下,凸起间距越大,降噪量越大;在来流速度为 20 m/s(较低雷诺数)下,凸起间距越小降噪效果越好。图 18 为不同凸起间距结构($U_0=60 \text{ m/s}$)对声功率变化的影响分析,图中随着凸起间距参数的增加,噪声辐射能力减弱,对噪声的抑制能力增强,与图 13(c)的变化规律一致。

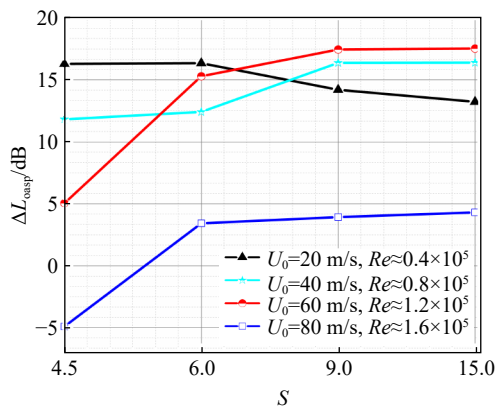


图 17 不同凸起间距结构的总声压级降噪量

Fig. 17 Overall sound pressure level noise reduction of different protruding space structures

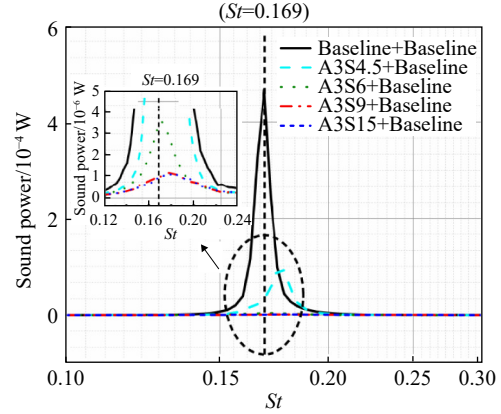


图 18 不同凸起间距结构的串联双圆柱声功率变化
($U=60 \text{ m/s}$, $Re \approx 1.2 \times 10^5$)

Fig. 18 Variation of sound power of tandem double cylinders with different protruding space structures
($U=60 \text{ m/s}$, $Re \approx 1.2 \times 10^5$)

3 结 论

基于声学消声风洞探究了节径凸起结构对串联双圆柱干涉噪声的抑制能力,分析其频谱变化及远场噪声辐射特性,并研究了不同来流速度和雷诺数工况状态下,不同参数化凸起结构对串联双圆柱干涉噪声的影响规律。

1) 实验结果表明,两圆柱间距为 $3.7D$ 的串联双圆柱干涉噪声,其对应的纯音频率($St=0.169$)与单圆柱钝体杆件($St=0.192$)有所不同,但两者单音噪声频谱形状均为钟形结构,宽频特性类似,且纯音频率随来流速度呈线性增加。

2) 在基准串联双圆柱存在较为明显的单音峰值噪声状态下,凸起结构的引入在一定程度上可以减弱甚至完全抑制圆柱钝体杆件干涉所产生的单音峰值噪声。不同工况条件下,各参数凸起结构对单音峰值噪声以及各方位角总声压级的降噪能力不同,最高峰值降噪量可达近 30 dB,总声压级降噪量最高可达 18.1 dB。

3) 在测试的来流速度工况范围内,部分参数凸起结构能够在较宽广的频域范围内($St=0.1 \sim 1.4$)对串联双圆柱干涉噪声有较为明显的抑制效果。随着雷诺数增大,当来流速度达到 80 m/s 时(对应雷诺数 $Re \approx 1.6 \times 10^5$),对中高频率段($St=0.2 \sim 1.4$)噪声抑制效果减弱。

4) 凸起高度越大、凸起间距越小的凸起结构(如 A12S9、A3S4.5),其干涉噪声总声压级对来流速度变化的敏感程度较大。在凸起间距一定时,凸起结构高度并非越大越好或越小越好,而是存

在最佳值($A=0.1D\sim 0.15D$);当凸起高度一定时,低来流速度、低雷诺数工况条件下,凸起间距越小,其降噪效果越好,反之,随着雷诺数的增大,凸起间距越大降噪效果越好,且并非呈线性增大,而是存在最佳的上限值($S=0.5D$ 左右)。

本文未深入探究串列双圆柱直径与凸起结构的高度、间距、厚度等多参数的综合关系对干涉噪声的影响规律,流场机理分析还需进一步深入研究。本文的实验结果可以为后期开展高铁受电弓、起落架等工程应用提供一定的降噪参考和技术支撑。

参考文献:

- [1] PRASANTH T K, MITTAL S. Vortex-induced vibration of two circular cylinders at low Reynolds number[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2009, 25(4): 731-741.
- [2] 杜晓庆, 郭伟伟, 赵燕, 等. 低雷诺数下两类串列圆柱的涡激振动[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(2): 283-291.
DU Xiaoqing, WU Weiwei, ZHAO Yan, et al. Vortex-induced vibration of two types of tandem circular cylinders at low Reynolds number[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(2): 283-291. (in Chinese)
- [3] 赵良举, 杨南奇, 吴朵, 等. 横掠二维串列双圆柱绕流气动噪声的数值模拟[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(8): 943-949.
ZHAO Liangju, YANG Nanqi, WU Duo, et al. Aeroacoustics numerical simulation of flow past tow-dimensional two circular cylinders in Tandem arrangements[J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(8): 943-949. (in Chinese)
- [4] PAPAIOANNOU G V, YUE D K P, TRIANTAFYLLOU M S, et al. Three-dimensionality effects in flow around two tandem cylinders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 558: 387-413.
- [5] 刘敏, 刘飞, 胡亚涛, 等. 三维串列双圆柱绕流气动流场及声场模拟[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(3): 403-406.
LIU Min, LIU Fei, HU Yatao, et al. Aerodynamics and aeroacoustics numerical simulation of flow past two circular cylinders in tandem arrangements[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(3): 403-406. (in Chinese)
- [6] CHEN W L, XIN D B, XU F, et al. Suppression of vortex-induced vibration of a circular cylinder using suction-based flow control[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 42(10): 25-39.
- [7] BOWER W, KIBENS V. An overview of active flow control applications at the Boeing company[R]. AIAA-2004-2624, 2004.
- [8] PATEL M, CAIN A. Numerical simulation of flow control techniques for separation control[R]. AIAA-2002-668, 2002.
- [9] NATI G, KOTSONIS M, GHAEMI S, et al. Control of vortex shedding from a blunt trailing edge using plasma actuators[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 46: 199-210.
- [10] SILVA G P G DA, EGUEA J P, CROCE J A G, et al. Slat aerodynamic noise reduction using dielectric barrier discharge plasma actuators[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 97: 105642.1-105642.11.
- [11] FOSHAT S. Numerical investigation of the effects of plasma actuator on separated laminar flows past an incident plate under ground effect[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 98: 105646.1-105646.10.
- [12] ZHU H, HAO W, LI C, et al. Application of flow control strategy of blowing, synthetic and plasma jet actuators in vertical axis wind turbines[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 88: 468-480.
- [13] FLINOIS T L B, COLONIUS T. Optimal control of circular cylinder wakes using long control horizons[J]. *Physics of Fluids*, 2015, 27(8): 1-22.
- [14] 魏峥, 夏超, 袁海东, 等. 覆盖多孔介质的圆柱尾迹实验研究[J]. *空气动力学学报*, 2017, 35(2): 265-270.
WEI Zheng, XIA Chao, YUAN Haidong, et al. Experimental study on the wake of a circular cylinder with porous layer coating[J]. *Journal of Aerodynamics*, 2017, 35(2): 265-270. (in Chinese)
- [15] LIU F, GUO H, HU T, et al. Experimental investigation on the aeroacoustics of circular cylinders covered with metal foam[R]. AIAA-2019-2715, 2019.
- [16] ARCONDOULIS E, LIU Y, LI Z, et al. Structured porous material design for passive flow and noise control of cylinders in uniform flow[J]. *Materials*, 2019, 12(18): 2905.1-2905.16.
- [17] BULATHSINGHALA D, WANG Z, GURSUL I. Modified near-wakes of axisymmetric cylinders with slanted base[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 86: 351-363.
- [18] BERNICKE P, AKKERMANS R A D, ANANTHAN V B, et al. A zonal noise prediction method for trailing-edge noise with a porous model[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, 80: 108469.1-108469.11.
- [19] ZDRAVKOVICH M M. The effects of interference between circular cylinders in cross flow[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1987, 1(2): 239-261.
- [20] GEYER T F, SARRADJ E. Circular cylinders with soft porous cover for flow noise reduction[J]. *Experiments in Fluids*, 2016, 57(3): 30-45.
- [21] SHI L, WANG W Q, ZHANG C C, et al. The effect of bionic v-ring surface on the aerodynamic noise of a circular cylinder[R]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 461: 751-762.
- [22] HUTCHESON F V, BROOKS T F. Noise radiation from single and multiple rod configurations[J]. *International Journal of Aeroacoustics*, 2012, 11(3/4): 291-333.
- [23] LI L, LIU P, XING Y, et al. Experimental investigation on the noise reduction method of helical cables for a circular cylinder and tandem cylinders[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 152: 79-87.
- [24] 沈国辉, 张扬, 郑翀. 光滑圆柱风噪声的降噪措施研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(23): 52-57.
SHEN Guohui, ZHANG Yang, ZHENG Chong. Denoising measures against aeolian noise of smooth circular cylinders[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(23): 52-57. (in Chinese)
- [25] PARUCHURI C, SUBRAMANIAN N, JOSEPH P, et al. Broad-band noise reduction through leading edge serrations on realistic aero-foils[R]. AIAA-2015-2202, 2015.
- [26] ASGHAR A, PEREZ R E, JANSEN P W, et al. Application of leading-edge tubercles to enhance propeller performance[J]. *AIAA Journal*, 2020, 58(11): 4659-4671.
- [27] REVELL J D, PRYDZ R A, HAYS A P. Experimental study of aerodynamic noise vs drag relationships for circular cylinders[J]. *AIAA Journal*, 1997, 16(9): 889-897.

(编辑: 陈越)