

近壁圆柱翼对垂直轴风力机噪声特性影响

屈峻¹, 叶舟^{1,2}, 吴洪¹, 李春^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘要: 基于改进型延迟分离涡模拟(IDDES)与 Ffowcs Williams-Hawkings(FW-H)声学类比方法, 对采用主动控制的近壁圆柱翼型的垂直轴风力机(VAWT)开展气动噪声特性研究。结果表明: 该近壁圆柱结构有效抑制了叶片边界层流动分离, 显著降低了尾迹区监测点的压力脉动, 并随尖速比 λ 增大($\lambda=1.68 \rightarrow \lambda=3.08$)显著缩短了系统动态响应时间($2.14\text{ s} \rightarrow 1.16\text{ s}$); 在较低尖速比($\lambda=1.68$)时, 近壁圆柱翼可有效降低中低频段噪声; 在中等尖速比($\lambda=2.50$)时, 实现较显著的全频段降噪, 500 Hz 时, 监测点 A 处的最大降幅达到 13.8 dB; 当尖速比继续增大($\lambda=3.08$)时, 其对高频噪声的抑制效果有所减弱。声场指向性分析进一步表明: 在中等尖速比($\lambda=2.50$)时, 近壁圆柱翼明显优化了 VAWT 周向噪声分布; 声辐射机制随尖速比增加呈现由单极子向偶极子主导的转变。

关键词: 垂直轴风力机; 噪声特性; 近壁圆柱翼; 流动分离

中图分类号: TK 83 **文献标志码:** A

Analysis of noise characteristics for near-wall cylindrical airfoil vertical-axis wind turbines

Qu Jun¹, Ye Zhou^{1,2}, Wu Hong¹, Li Chun^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the improved delayed detached eddy simulation (IDDES) and the Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) acoustic analogy method, a numerical study was conducted on the aerodynamic noise characteristics of a vertical axis wind turbine (VAWT) with a near-wall cylindrical airfoil adopting active control. The results show that the near-wall cylindrical structure effectively suppressed blade boundary layer flow separation and significantly reduced pressure fluctuations at monitoring points in the wake region. As the tip speed ratio increased from $\lambda=1.68$ to $\lambda=3.08$, the system dynamic response

收稿日期: 2025-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976131); 上海“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目(19060502200)

第一作者: 屈峻(2002—), 男, 硕士研究生。研究方向: 风力机空气动力学。E-mail: 15182055988@163.com

通信作者: 叶舟(1973—), 男, 副教授。研究方向: 流体动力学。E-mail: yezhou_usst@usst.edu.cn

引文格式: 屈峻, 叶舟, 吴洪, 等. 近壁圆柱翼对垂直轴风力机噪声特性影响[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(4): 449-456.

Citation: Qu Jun, Ye Zhou, Wu Hong, et al. Analysis of noise characteristics for near-wall cylindrical airfoil vertical-axis wind turbines[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(4): 449-456.

time was significantly shortened from 2.14 s to 1.16 s. At a low tip speed ratio ($\lambda = 1.68$), the near-wall cylindrical airfoil effectively reduces noise in the mid- and low-frequency bands. At a moderate tip speed ratio ($\lambda = 2.50$), a significant full-band noise reduction is achieved, with a maximum reduction of 13.8 dB at monitoring point A at 500 Hz. When the tip speed ratio further increases ($\lambda = 3.08$), its suppression effect on high-frequency noise weakens. Further analysis of the sound field directivity indicates that at a moderate tip speed ratio ($\lambda = 2.50$), the near-wall cylindrical airfoil obviously optimizes the circumferential noise distribution of the VAWT. The sound radiation mechanism exhibits a transition from monopole-dominated to dipole-dominated as the tip speed ratio increases.

Keywords: vertical-axis wind turbines; noise characteristics; near-wall cylindrical airfoil; flow separation

垂直轴风力机 (vertical-axis wind turbine, VAWT) 因其结构简单、对风向不敏感及维护成本较低等优势, 在分布式发电、城市环境及近海作业等领域展现出显著的应用潜力^[1]。然而, 机组运行时产生的气动噪声, 尤其是中低频噪声, 已成为制约该技术大规模推广的关键因素之一^[2]。噪声水平过高不仅会劣化声环境, 还易诱发结构振动疲劳、危害周边居民听力健康, 大幅限制了该设备在居民区、自然保护区等噪声敏感区域的部署与应用^[3]。

VAWT 的气动噪声主要源于旋转叶片与气流的非定常相互作用, 具体表现为两大机制: a. 叶片尖端涡与尾迹湍流引发的宽频噪声^[4]; b. 叶片吸力面边界层分离、动态失速及周期性涡脱落 (如卡门涡街) 产生的离散噪声与载荷噪声^[5]。研究表明, 流动分离和涡脱落过程是产生中低频噪声的关键物理机制^[6]。因此, 有效抑制叶片边界层流动分离并控制尾缘涡脱落, 是降低 VAWT 气动噪声的核心技术途径^[5]。

针对 VAWT 降噪, 国内外学者已开展大量研究, 主要分为两类。a. 翼型优化设计: 通过优化翼型几何 (如后缘修形、增大弯度) 改善流场, 削弱流动分离与涡脱落强度, 进而降低厚度噪声与载荷噪声。例如, 汪泉等^[7]设计的 CQU-DTU-B18 翼型, 相较 NACA-64-618 翼型可实现 2~4 dB 的降噪效果。b. 主动/被动流动控制技术: 典型方法包括涡流发生器、合成射流、变桨距控制等。闫阳阳^[8]引入智能变桨距控制策略, 通过动态调整 J 型叶片攻角抑制流动分离, 使载荷噪声峰值降低 10 dB 以上。罗文博^[9]、刘雄等^[10]、胡昊^[11]也从不同角度验证了流动控制技术的降噪潜力。现有

VAWT 流动控制技术多侧重提升气动性能, 针对不同工况 (如尖速比) 下噪声特性的系统性研究与定量分析较为匮乏。同时, 研发结构简易、调控灵活, 可同步优化气动与声学性能的流动控制方法, 仍是研究难点。

近壁圆柱结构是一种主动流动控制方法, 已有研究证实, 该结构应用于固定翼型时可有效干扰边界层、抑制流动分离并调控涡脱落现象^[12]。前期研究发现, 在 VAWT 叶片吸力面尾缘设置可移动微圆柱, 可明显改善尾缘涡脱落特征并提升气动性能, 为利用近壁圆柱控制 VAWT 气动噪声提供了理论支撑。现阶段, 该结构对 VAWT 气动噪声的作用机制尚未明确, 其降噪效果随尖速比等核心参数的变化规律, 以及结构扰动下声场辐射机制的演化过程, 仍缺少系统性研究。

本文聚焦主动控制的近壁圆柱结构对 VAWT 气动声学性能的调控机制研究。基于改进型延迟分离涡模拟 (improved delayed detached eddy simulation, IDDES) 与 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) 声学类比理论的耦合数值方法, 定量评估主动流动控制的近壁圆柱翼在不同尖速比工况下对 VAWT 气动噪声的抑制效果; 深入分析其对噪声频谱特性 (尤其是中低频段) 和声场指向性分布的影响; 揭示尖速比变化对近壁圆柱降噪效果及声辐射机制 (单极子/偶极子) 转变的规律。

1 模型及监测点

1.1 几何模型

研究选定 NACA0021 翼型为对象, 参考 VAWT 结构参数见表 1。

表 1 参考 VAWT 结构参数

Tab. 1 Structural parameters of reference VAWT

参数	数值
叶片数 <i>n</i> /个	3
弦长 <i>c</i> /mm	85.8
实度σ	0.25
风轮半径 <i>R</i> /mm	515
叶片高度 <i>H</i> /mm	1456.4

参考 VAWT 几何模型示意图见图 1。图 1 中: O 为旋转中心; θ 为叶片相位角; ω 为旋转角速度; R 为旋转半径; V_∞ 为来流风速; 方向为水平方向, 取 9 m/s。

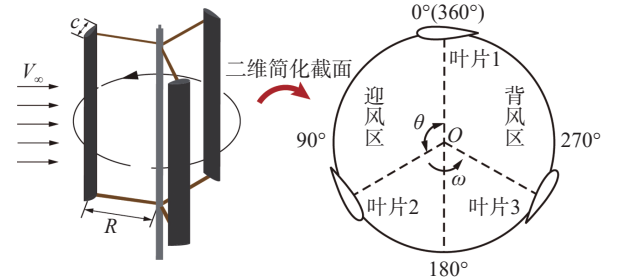


图 1 参考 VAWT 几何模型示意图

Fig. 1 Schematic of reference VAWT geometric model

图 2 为近壁圆柱翼 VAWT 模型示意图。近壁圆柱直径 d 和距翼型弦线的垂直距离 h 的选取参考团队前期研究结果^[12]。通过分析 d 、圆柱距翼型弦线水平移动距离 l 及 h 对 VAWT 气动性能的影响规律发现: $d = 0.03c$ (c 为弦长) 时, 可有效干扰边界层分离涡的尺度, 抑制流动分离; 当 $h = 0.2c$ 时, 圆柱对尾缘涡脱落的控制效果最优, 过近会加剧流动扰动, 过远则会削弱控制作用; l 是影响气动性能的主控因素(极差占比最高), 最大绝对值为 $0.2c$ 。因此, 本文采用上述优化参数组合

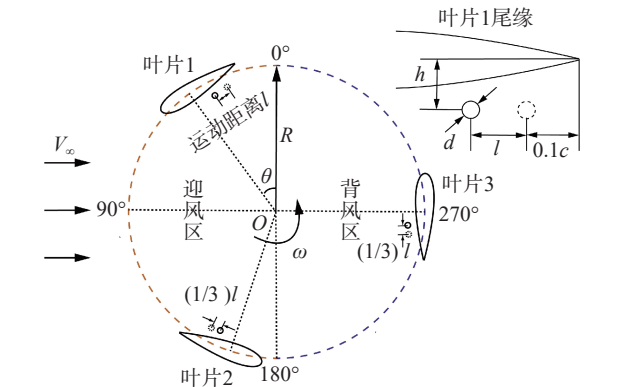


图 2 近壁圆柱翼 VAWT 模型示意图

Fig. 2 Schematic of VAWT with near-wall cylindrical airfoil

($d = 0.03c$, $h = 0.2c$, l 最大绝对值为 $0.2c$), 并通过主动控制策略调节 l , 以适配不同尖速比工况。 $0.1c$ 为近壁圆柱中心距翼型后缘顶点的最小水平距离。

1.2 计算域及网格划分

VAWT 计算域采用多区域组合结构(图 3), 整体域划分为外流域 Z_1 ($80R \times 40R$ 矩形域)、加密过渡区 Z_2 ($10R \times 4R$ 矩形域) 及旋转域 Z_3 ($17.4c$ 圆形域), 其中, Z_1 与 Z_3 通过 Interface 交界面实现动静域数据传递。边界配置包含: 距旋转轴 $20R$ 的速度入口 AB (来流速度 9 m/s); $60R$ 处的压力出口 CD (静压恢复条件); 两侧 $20R$ 对称壁面 BC 、 AD (抑制横向流动)。旋转域采用滑移网格技术处理叶片运动。流体介质为空气, 其动力黏度 $1.855 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 、密度 1.184 kg/m^3 , 入口湍流强度设定为 0.8%, 以匹配低湍流工况条件。

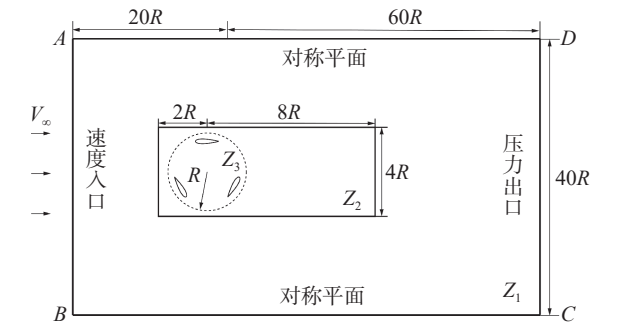


图 3 计算域及边界条件

Fig. 3 Computational domain and boundary conditions

考虑到后文对近壁圆柱的主动控制, 对近壁圆柱附近的区域采用重叠网格, 并对该部分的背景网格进行加密处理, 以精确捕捉近壁圆柱表面流体运动状态。网格划分如图 4 所示。

1.3 噪声监测点

在进行 VAWT 的噪音监测时, 监测点的位置安排至关重要。为了让数据更真实, 需要仔细规划监测点的分布位置。监测点要均匀覆盖 VAWT 的四周, 例如, 正对风来流的方向、背风方向以及左右两侧, 以完整记录不同周向位置的噪音分布。综合上述考虑, 以叶片为噪声源, 在 VAWT 转轴 $6R$ 范围半径上布置 24 个监测点, 用以监测 VAWT 周向噪声分布。同时, 依据近尾流区(距风轮 1~5 倍直径范围)是气动噪声源主导区域的特性^[13-14], 在距转轴中心下游 $2R$ 和 $4R$ 、横向距离分别为 $2R$ 和 $6R$ 的近尾流区布置 4 个监测点 A、B、C、D(图 5), 用于捕捉流动分离与涡脱落引发的

动控制, 则可有效抑制边界层分离、减弱尾缘涡脱落强度。作者前期在对 VAWT 进行气动性能研究时发现, 近壁圆柱平移运动可有效改善尾缘涡脱落^[12], 为此, 本文提出近壁圆柱周期性运动控制策略: 在相位角 $0^\circ \sim 90^\circ$ 与 $180^\circ \sim 270^\circ$ 时, 近壁圆柱从 $0.3c$ 位置向右匀速移动至 $0.1c$ (正向速度) 位置, 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 与 $270^\circ \sim 360^\circ$ 时, 近壁圆柱从 $0.1c$ 位置向左匀速移动至 $0.3c$ (负向速度) 位置。具体控制方程为

$$V = \begin{cases} l/(T/4), & 0^\circ \leq \theta < 90^\circ & 180^\circ \leq \theta < 270^\circ \\ -l/(T/4), & 90^\circ \leq \theta < 180^\circ & 270^\circ \leq \theta < 360^\circ \end{cases} \quad (7)$$

$$T = 2\pi/\omega \quad (8)$$

式中: V 为圆柱运动的速度; T 为周期; ω 为角速度。

2.3 网格无关性及模型可靠性验证

为消除网格分辨率对数值模拟精度的影响, 需进行网格无关性验证。选取尖速比 $\lambda = 2.63$ 作为验证工况, 分别对网格规模约为 140 000、230 000、280 000 的 VAWT 模型进行计算, 并对比了 3 种不同网格密度下 VAWT 风能利用系数 C_p , 如图 6 所示。

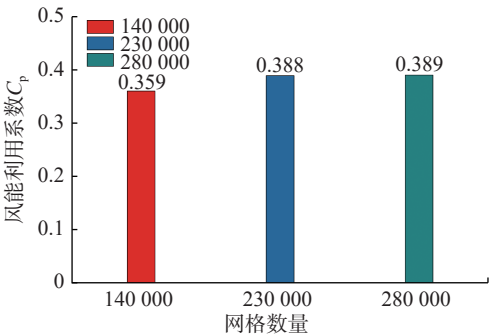


图 6 网格无关性验证
Fig. 6 Grid independence verification

由图 6 可知, 当网格规模从 140 000 增加至 230 000 时, C_p 变化显著, 相对偏差达到 7.92%。然而, 当网格继续加密至 280 000, C_p 的变化率急剧减小至 0.43%。这表明在 230 000 网格规模下, 计算结果对网格密度的依赖性已显著降低。基于此, 后续计算采用 230 000 网格方案。

为验证保数值模型可靠性, 将不同尖速比 λ 工况下的 C_p 计算结果与文献 [14] 的实验数据进行对比, 结果如图 7 所示。分析表明: 在 $\lambda < 2.33$ 的低尖速比区间, 计算值与实验值吻合良好, 最大相对误差低于 5%; 当 $\lambda > 2.33$ 时, 计算值呈现系统性偏高趋势, 此差异主要源于二维模型未考虑转

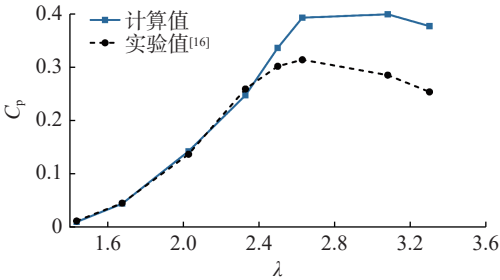


图 7 计算值与实验值对比
Fig. 7 Comparison of calculated values with experimental values

轴机械损耗、支撑臂气动干扰及三维叶尖涡效应等实际因素^[15-16]。此外, 计算曲线与实验数据的变化趋势较一致, 且最佳尖速比预测值吻合度较好。综合表明, 本文采用的 IDDES/FW-H 耦合模型在非定常气动噪声模拟中具有较高的可信度。

3 气动噪声分析

3.1 压力脉动

VAWT 旋转时, 气流经过叶片表面和支撑结构会产生压力脉动。这种脉动的大小和频率会随着风速、叶片旋转速度以及气流方向的变化而动态变化。当这些压力脉动通过空气向外传播时, 会形成声波并转化为气动噪声。为此, 通过分析不同尖速比下, VAWT 尾迹区监测点 A、B、C、D 4 个压力脉动值, 绘制压力脉动曲线, 为预测噪声分布提供依据。如图 8 所示。

根据图 8 监测数据可知, 监测点 A、B (近旋转中心) 压力极值变化剧烈, 监测点 C、D (远场) 脉动幅度受距离衰减较小。压力曲线清晰显示, λ 从 1.68 增至 3.08 时, 各监测点压力达到稳定周期性波动所需时间 (初始脉动衰减至 $\pm 10\%$ 稳态幅值范围) 显著缩短 ($2.14\text{ s} \rightarrow 1.16\text{ s}$)。该动态响应加速源于涡旋演化改变。涡量图对比表明低尖速比 ($\lambda = 1.68$) 时, 大尺度强相干涡 (图 8(a) 上) 非定常性强、耗散慢, 而高尖速比 ($\lambda = 3.08$) 时, 脱落涡尺度减小、频率增高 (图 8(c) 上) 促使涡动能耗散加快。在 $\lambda = 1.68$ 工况下, 提取监测点 B 压力首次达峰 (标记为 N 点) 后 0.5 s 时间窗口 (即 $t = t_N$ 到 $t_N + 0.5\text{ s}$) 内的压力数据计算标准差, 近壁圆柱翼 VAWT (6.24) 较参考 VAWT (11.51) 显著降低 45.8%, 印证其细化涡结构 (图 8(a) 下) 削弱大尺度涡脱落的作用; 针对中高尖速比 ($\lambda = 2.50, 3.08$), 图 8(b)、(c) 初始阶段 ($t < 0.5\text{ s}$) 的监测点 A、B 压

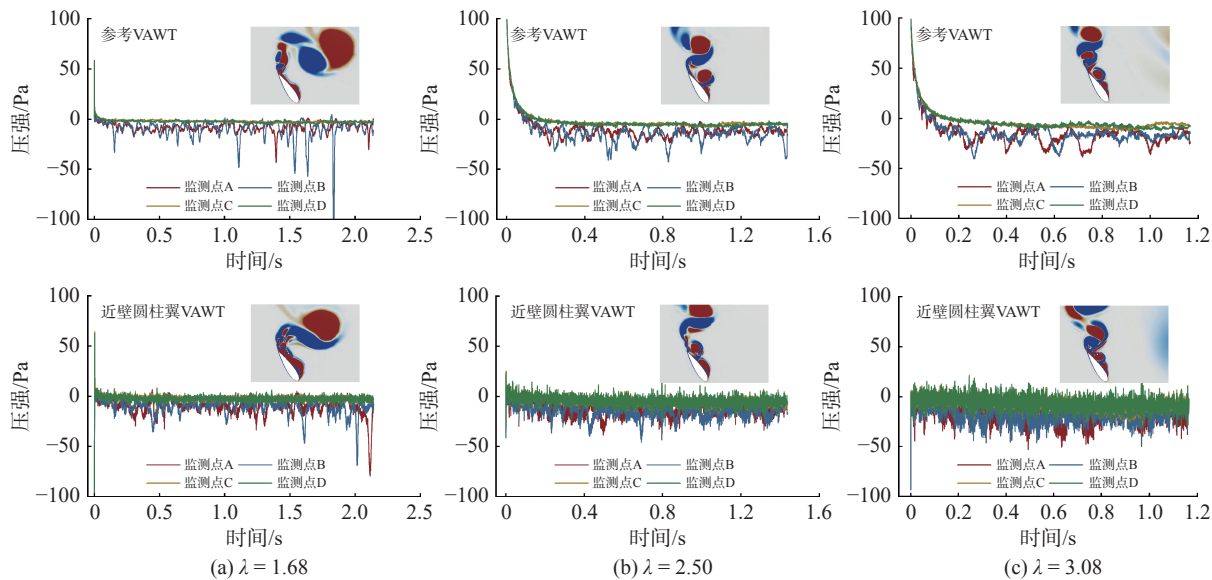


图 8 不同监测点压强变化及涡量分布

Fig. 8 Pressure variation and vorticity distribution at different monitoring points

力曲线揭示：参考 VAWT 存在显著更大的峰值谷值差，表明剧烈初始载荷不稳定性，对应涡量图中大尺度不规则初始涡，而近壁圆柱翼 VAWT 从起始即呈现更小振荡幅度与更快收敛，其细化涡结构有效抑制大尺度分离涡的生成，促使压力更快进入稳定状态。

3.2 噪声频谱

噪声频谱特性表征了声压级在频域的能量分布规律，通过分析频谱曲线的形态特征可辨识噪声源的声源性质。选取 VAWT 进入稳定状态后的第 10

周期进行分析，当离散时间步长设置为 0.5° 时，对应尖速比 $\lambda = 1.68, 2.50, 3.08$ 工况的采样间隔分别为 $2.97 \times 10^{-4}, 1.99 \times 10^{-4}, 1.62 \times 10^{-4}$ s，经计算获得采样频率 f_s 分别为 3 367、5 025、6 173 Hz。依据奈奎斯特-香农采样定理，设定最高分析频率 $f_{\max} = 0.5f_s$ ，对应各工况理论频率上限分别为 1 684、2 513、3 087 Hz。图 9 为主动控制下的近壁圆柱翼 VAWT 和参考 VAWT 在 3 种尖速比下的监测点 A、B、C、D 的噪声频谱对比，通过声压级 (SPL) 随频率的分布规律揭示近壁圆柱对宽频噪声

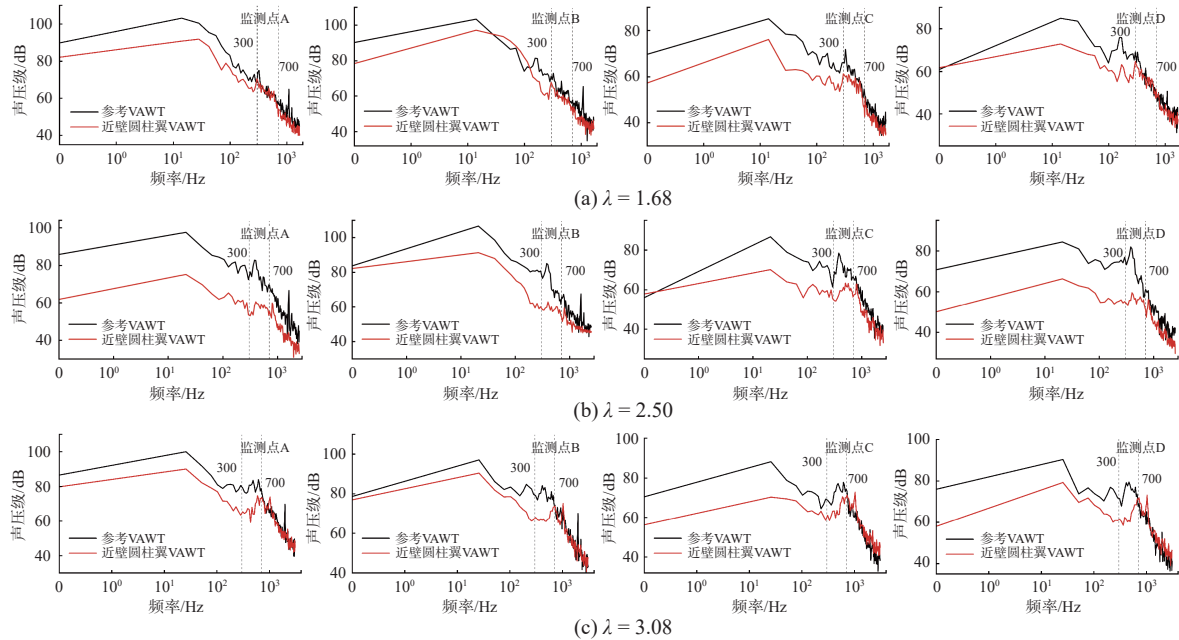


图 9 不同尖速比下不同监测点噪声声压级变化

Fig. 9 Variation of noise sound pressure levels at different monitoring points under different tip speed ratios

的抑制效果。

由图9可知,各尖速比下,监测点A、B的声压级均比监测点C、D的声压级稍大,符合声波传播的距离衰减规律。需要说明的是,图中声压级的数据90%都在频率300 Hz以上,因此,着重观察和分析频率在300 Hz以上的数据。在频率维度上,中高频段(300 Hz以上)呈现系统性变化。 $\lambda = 1.68$ 时,近壁圆柱翼在中高频段(300~700 Hz)实现稳定降噪,监测点A在500 Hz处声压级降低4.4 dB,监测点B降低2.8 dB。该效应源于圆柱对边界层流动分离的抑制(如图8涡量场显示的尾缘涡结构细化),使大尺度涡脱落引发的宽频噪声能量减弱; $\lambda = 2.50$ 时,降噪效果达到峰值,300 Hz处监测点A、B、C、D声压级分别降低18.8、17.9、5.8、12.4 dB;500 Hz处监测点A最大降幅为13.8 dB。全频段降噪尤其突出在300~700 Hz,说明圆柱优化涡核尺度显著抑制宽频噪声源强度; $\lambda = 3.08$ 时,高频段(>1 000 Hz)噪声抑制效果衰退,检测点A在500 Hz处声压级降幅减小至11.4 dB。

3.3 指向性分布

为进一步研究主动控制下的近壁圆柱对VAWT噪声周向分布的影响,在距转轴中心6R的圆周上以15°为间隔均匀布置了24个监测点,对各监测点的噪声数据进行均方根处理,绘制出声压强度在周向360°范围内的表现,如图10所示。

由图10可知,随着尖速比增大,VAWT总声压级强度也随之增加,这是因为来流速度不变,尖速比增加会导致VAWT转速增加,从而会影响周向声压级强度增加。具体来看, $\lambda = 1.68$ 时,声场出现单极子源特性,两者并未出现大的差距,但除在135°~210°相位角内,近壁圆柱翼大于VAWT的总声压级强度都略高于参考VAWT; $\lambda = 2.5$ 时,声压级曲线表现出偶极子源特性,近壁圆柱翼VAWT总声压级除在0°~15°、150°~180°与315°~360°相位角内高于参考VAWT,其余相位角都低于参考VAWT。在45°相位角下,两者最大差值为1.03 dB; $\lambda = 3.08$ 时,近壁圆柱翼VAWT声压级曲线整体都大于参考VAWT,近壁圆柱的降噪效果减弱。

4 结 论

论文采用IDDES湍流模型结合FW-H声学类

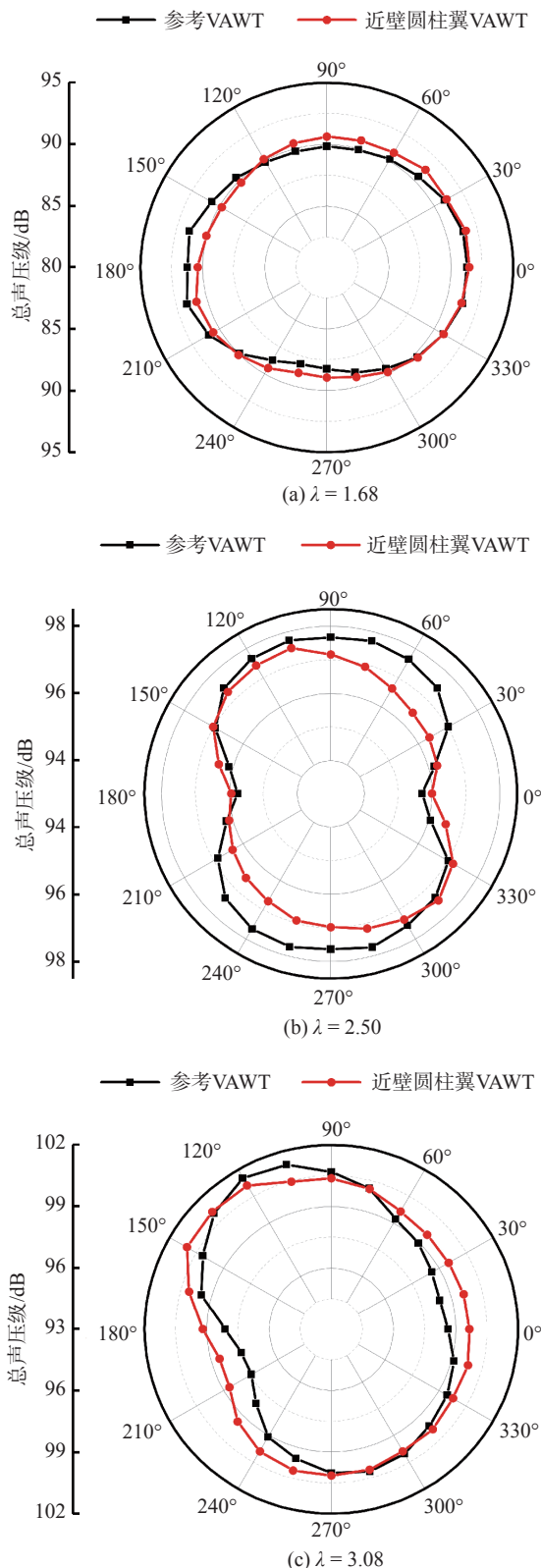


图10 不同尖速比下VAWT总声压级指向性分布

Fig. 10 Directivity distribution of total sound pressure levels of VAWT under different tip speed ratios

比方程,分析预测了VAWT气动噪声分布情况,对比研究主动控制下的近壁圆柱翼VAWT与参考

VAWT 的气动噪声特性，主要结论如下：

- a. 近壁圆柱翼结构有效抑制了叶片吸力面的流动分离，显著降低了尾迹区压力脉动的强度，缩短了各监测点压力达到稳定周期性波动的时间。
- b. 近壁圆柱翼通过改善涡脱落特性，在不同尖速比下均表现出降噪效果，尤其在中等尖速比($\lambda = 2.50$)工况下降噪效果最为显著，500 Hz 下监测点 A 处最大降幅达到 13.8 dB。
- c. 在 VAWT 总声压级指向性分布方面，随着尖速比增大，VAWT 周向总声压级随之增加。在中等尖速比($\lambda = 2.5$)下，VAWT 噪声指向性表现出偶极子源特性，近壁圆柱翼作用下总声压级大范围内降低；随尖速比增加近壁圆柱翼效果减弱。

参考文献：

[1] Shen Z, Gong S G, Zuo Z J, et al. Darrieus vertical-axis wind turbine performance enhancement approach and optimized design: a review[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 311: 118965.

[2] 刘希昌, 莫秋云, 李帅帅, 等. 小型垂直轴风力发电机的气动噪声数值模拟与试验验证 [J]. *流体机械*, 2016, 44(6): 11-16.

[3] 戴庚, 徐璋, 皇甫凯林, 等. 垂直轴风力机研究进展 [J]. *流体机械*, 2010, 38(10): 39-43.

[4] Ottermo F, Möllerström E, Nordborg A, et al. Location of aerodynamic noise sources from a 200 kW vertical-axis wind turbine[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 400: 154-166.

[5] Yue Q P. Aerodynamic noise prediction and reduction of H-Darrieus vertical axis wind turbine[J]. *Australian Journal*

of Mechanical Engineering, 2023, 21(3): 1093-1102.

[6] 毛义军, 祁大同. 叶轮机机械气动噪声的研究进展 [J]. *力学进展*, 2009, 39(2): 189-202.

[7] 汪泉, 陈进, 程江涛, 等. 低噪声风力机翼型设计方法及实验分析 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(1): 23-28.

[8] 闫阳阳. 基于 J 型叶片的变桨距垂直轴风力机气动性能优化研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2024.

[9] 罗文博. 考虑气动噪声的风力机翼型设计及其应用 [D]. 汕头: 汕头大学, 2011.

[10] 刘雄, 罗文博, 陈严, 等. 风力机翼型气动噪声优化设计研究 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(14): 134-139.

[11] 胡昊. 风力机叶片气动噪声特性与降噪方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2016.

[12] 吴洪, 叶舟, 余豪. 基于正交试验微圆柱垂直轴风力机气动性能研究 [J]. *热能动力工程*, 2024, 39(12): 159-167.

[13] Ghasemian M, Nejat A. Aero-acoustics prediction of a vertical axis wind turbine using Large Eddy Simulation and acoustic analogy[J]. *Energy*, 2015, 88: 711-717.

[14] Li S T, Chen Q, Li Y, et al. Experimental investigation on noise characteristics of small scale vertical axis wind turbines in urban environments[J]. *Renewable Energy*, 2022, 200: 970-982.

[15] Islam M, Ting D S K, Fartaj A. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(4): 1087-1109.

[16] Rahman M, Salyers T E, El-shahat A, et al. Numerical and experimental investigation of aerodynamic performance of vertical-axis wind turbine models with various blade designs[J]. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2018, 6(5): 26-63.

(编辑：毕莉明)