



考虑近距离海洋下垫面影响的对称风机翼型静气动特性

贾晓峰 黄雯 胡传新 徐辛叶

Static aerodynamic characteristics of symmetrical wind turbine airfoils considering the influence of near-ocean underlying surface

Jia Xiaofeng, Huang Wen, Hu Chuanxin, Xu Xinye

引用本文:

贾晓峰, 黄雯, 胡传新, 等. 考虑近距离海洋下垫面影响的对称风机翼型静气动特性[J]. 空气动力学学报, 2026, 44(1): 128–136. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2024.0164

Jia Xiaofeng, Huang Wen, Hu Chuanxin, et al. Static aerodynamic characteristics of symmetrical wind turbine airfoils considering the influence of near-ocean underlying surface[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2026, 44(1): 128–136. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2024.0164

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2024.0164>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

偏航失效时海上风力机不同停机位置下响应特性

Response characteristics of offshore wind turbines under different parking positions considering yaw control system failure

空气动力学学报. 2022, 40(4): 181–190 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0438>

基于致动线方法的5 MW海上风力机气动弹性分析

Aeroelastic analysis of a 5 MW offshore wind turbine based on actuator line method

空气动力学学报. 2022, 40(4): 203–209 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2022.0048>

阵风工况下多台风力机尾流效应的非定常特性

Unsteady characteristics of wake effect for multiple wind turbines under gust wind condition

空气动力学学报. 2022, 40(4): 247–255 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0309>

浮体平台运动对浮式风电机组气动特性影响风洞试验

Influence of floating platform motion on aerodynamic characteristics of floating offshore wind turbines based on wind-tunnel tests

空气动力学学报. 2022, 40(4): 240–246 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0336>

地面粗糙度对下击暴流风剖面特征影响

Effects of terrain roughness on downburst wind profile characteristics

空气动力学学报. 2019, 37(3): 393–399 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0117>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463375

Email: kqdlxxb@163.com



关注微信公众号

获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2026)01-0128-09

考虑近距离海洋下垫面影响的对称风机翼型 静气动特性

贾晓峰, 黄雯, 胡传新*, 徐辛叶

(武汉科技大学 城市建设学院, 武汉 430081)

摘要: 为探究海洋下垫面对近海面静态风机翼型气动特性的干扰机理, 以NACA0012对称翼型为研究对象, 采用流体体积分数模型构建风浪-翼型耦合场, 结合翼型升力系数时频特征和表面流场, 分析不同风浪参数、翼型与静水面相对距离下的静气动特征, 揭示近距离海洋下垫面对大攻角静态翼型气动特征的干扰机理。研究发现: 海洋下垫面通过附加攻角 β 间接影响近海面翼型气动特性, 与风场相比, 风浪场中翼型的静态失速攻角减小, 其减小量取决于附加攻角平均值; 海洋下垫面对翼型各流动阶段均存在干扰, 但显著抑制了大攻角翼型涡的发展, 导致前缘漂移涡与尾缘脱落涡发展的机制存在差异, 前者是由海洋下垫面干扰引起的长周期高强度漂移现象, 后者由大攻角翼型自身的流动分离特性主导, 表现为短周期低强度脱落, 且风浪场翼型尾涡脱落频率均小于风场翼型的涡脱频率(0.537 Hz); 翼型距静水面30 m时, 海洋下垫面的干扰效应显著减弱, 出现独立的尾缘涡脱落频率(0.430 Hz), 且涡形态更复杂。本文研究对提高大型浮式风机安全性能具有一定的借鉴意义。

关键词: 海洋下垫面; 翼型; 流动分离; 气动特性; 数值模拟

中图分类号: TK83; V211.3 文献标识码: A doi: 10.7638/kqdlxxb-2024.0164

Static aerodynamic characteristics of symmetrical wind turbine airfoils considering the influence of near-ocean underlying surface

Jia Xiaofeng, Huang Wen, Hu Chuanxin*, Xu Xinye

(School of urban construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: This paper presents a numerical investigation into the effects of the ocean underlying surface (OUS) on the static aerodynamic characteristics of a symmetric NACA0012 airfoil near the sea surface, utilizing the volume of fluid (VOF) model. The interference of OUS on the static aerodynamic characteristics of NACA0012 is thoroughly studied by examining the time-frequency characteristics of lift coefficients and flow field characteristics under different wind-wave conditions. Results show that the interference exerted by OUS originates from an additional angle of attack. Root mean square (RMS) values of the airfoil lift coefficients and the additional angle of attack exhibit a similar variation trend with wave height and wind speed. The airfoil's static stall angle of attack in the wind-wave field is smaller than that in the wind field, with the decrement depending on the mean value of the additional angle of attack. The interference of OUS persists throughout all flow stages of the airfoil, but it significantly suppresses the development of airfoil vortices only at high angles of attack, leading to different development mechanisms for leading-edge drift vortices and trailing-edge shedding vortices. The former is a long-period (wave period of 4.5 s), high-intensity drift disturbed by OUS, while the

收稿日期: 2024-10-29; 修订日期: 2025-01-17; 录用日期: 2025-02-19; 网络出版时间: 2025-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4201501)

作者简介: 贾晓峰(2000—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向: 桥梁与结构风工程. E-mail: 2679433834@qq.com

通信作者: 胡传新*(1987—), 男, 湖北随州人, 硕士生导师, 博士, 研究方向: 桥梁与结构风工程. E-mail: chuanxinhuo@126.com

引用格式: 贾晓峰, 黄雯, 胡传新, 等. 考虑近距离海洋下垫面影响的对称风机翼型静气动特性[J]. 空气动力学学报, 2026, 44(1): 128-136.

Jia Xiaofeng, Huang Wen, Hu Chuanxin, et al. Static aerodynamic characteristics of symmetrical wind turbine airfoils considering the influence of near-ocean underlying surface[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2026, 44(1): 128-136(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2024.0164

latter is a short-period, low-intensity shedding induced by the flow separation around the high angles of attack of airfoil itself. Notably, the shedding frequency of trailing edge vortices in the wind wave field is 0.537 Hz lower than that in the wind field. When the airfoil is positioned 30 meters above the still water surface, an independent trailing-edge vortex shedding frequency of 0.430 Hz appears, accompanied by a more complex vortex shape. The findings of this study shed light on improving the safety performance of large floating wind turbines.

Keywords: ocean underlying surface; airfoil; flow separation; aerodynamic characteristics; numerical simulation

0 引言

海洋下垫面,即大气边界层与下方海洋的分界面,其与大气边界层间的耦合效应会增强近海面空气非定常特性^[1],引发风机叶片的气动弹性稳定性问题,威胁大型浮式风机的安全运行。随着浮式风机向大型化发展,其风能捕获率虽显著提升,但过长的叶片缩短了叶尖与海面的距离,使得近海面大气与高柔性叶片直接作用更加显著^[2],并在海洋下垫面干扰的影响下,进一步加剧叶片的气动弹性问题,导致较高的疲劳载荷,极端情况下会造成叶片断裂。因此,海洋下垫面对近海面流场的干扰效果是大型浮式风机安全性设计不可避免的考虑因素。

目前,海洋下垫面对地效机翼气动特性的干扰研究相对广泛,且取得了一定的进展。地效机翼与风机翼型均起源于飞机机翼,二维翼型气动特性是风机叶片空气动力学特性的基础,二者之间存在紧密关联^[3],因此研究地效机翼对于开展风力机叶片研究有较好的参考价值。赵奥博等^[4]、Qu等^[5]、秦绪国等^[6]、Hu和Ma^[7]分别探讨了平坦地面、固定起伏地面、静水面与波浪水面等下垫面形态下,风浪参数、攻角、飞行高度等因素对于翼型气动特性的影响规律。他们的研究发现:翼型与地面之间的气流通道形状是影响翼型气动性能的重要因素,攻角和飞行高度对于气动性能具有正负效应区间,波长和波幅对于气动系数的影响各有差异。在对称翼型近海面工况下的气动特性研究中,米百刚和詹浩^[8]分析攻角 10° 以下俯仰运动 NACA0012 翼型在自由空间、近刚性地面及近水面效应的动导数,发现地面/水面的存在影响了翼型的动态稳定特性,且不同下垫面影响效果差异大;韩龙等^[9]考虑当地较大风浪参数的高海况影响,研究 NACA0015 翼型在 9° 攻角波浪条件下的气动特性,发现非定常气动力随着波面起伏作近似正(余)弦变化,升阻力曲线相位角不一致,升阻比随翼型高度提高而减小。

以上研究表明下垫面扰动近海面流场导致翼型

气动力非定常变化,翼型高度、风浪参数对翼型的气动性能均有显著影响。然而,刚性较大机翼的研究重点在于提高小攻角翼型升力、升阻比等问题,海洋下垫面对大攻角翼型流动分离特性的干扰机理研究相对匮乏。大攻角翼型表面流动与小攻角翼型存在显著差异,例如,杨筱沛等^[10]研究 NACA4412 翼型不同雷诺数时的尾涡脱落机制发现:随着攻角的增加,翼型表面发生流动分离并进入周期性脱落状态,大攻角翼型流动分离会形成涡流,导致边界层显著变厚、阻力增大、升力减小、压力损失等问题^[11],这些在对风机翼型的研究中不可忽视。

鉴于此,开展海洋下垫面对近海面风机翼型大攻角流动分离引起的涡脱落现象干扰效应研究具有一定理论和实际应用价值。计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法能够准确模拟翼型气动力、流场分布、旋涡发展,同时可以探究各种参数对翼型性能的影响^[12-14]。例如,Zhang等^[15]采用 CFD 方法针对三种翼型分析了各自在大攻角下的流动分离特征以及风速和攻角对气动性能的影响规律,为大攻角翼型静态绕流数值分析提供了基础。本文以 NACA0012 翼型为研究对象,采用 Fluent 软件构建二维数值模型,旨在探究风浪参数、翼型与静水面距离对附加攻角及翼型升力系数的影响规律,并对比分析翼型升力系数与流场变化,揭示海洋下垫面对大攻角翼型的气动干扰机理。

1 数值模型

1.1 模型与工况

通过用户自定义函数(user defined function, UDF)定义边界条件,构造风浪-翼型耦合场,采用边界造波法生成二阶 Stokes 波,此方法能有效模拟弱非线性波,采用源项消波法实现消波。速度入口处,风速为均匀水平风速,因此 y 方向速度仅存在于波面以下。 x 方向速度定义如式(1)所示^[16]:波面以下为波浪水平速度;从波面到静水面加一半波高的区域内,风速方向与波浪速度方向一致;最上层为均匀水平风速。

$$U = \begin{cases} u, & z < \eta \\ u_f \cdot \frac{u}{|u|}, & \eta \leq z < D + H/2 \\ u_f, & z \geq D + H/2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: U 为入口处 x 方向速度, u 为波浪水平速度, u_f 为风速, D 为静水面高度, H 为波高, η 为波面高度, z 为距底部边界高度。本工作的数值计算得到武汉科技大学高性能计算平台的支持。

风浪-翼型几何与网格划分如图1所示, 计算域为 120 m(长)×25 m(宽), 压力出口前设置消波区主动消波。翼型弦长为 1 m, 距入口 30 m。左侧为速度入口, 右侧为压力出口, 上下面均为无滑移壁面。通过流体体积分数(volume of fluid, VOF)模型追踪两相交界面, 湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型, 压力-速度解耦

采用 PISO 算法, 时间步长为 0.005 s。考虑到空气相所需网格更精细, 在静水面以下一个波高处设置分界线, 分界线以上网格加密处理, 消波区网格变稀疏以辅助消波, 包含翼型的圆形区域通过滑移网格连接外流场, 不同区域之间采用交界面连接, 翼型边界层网格无量纲高度 y^+ 值基本小于 1, 满足计算需求。

图2定义了文中所涉及的攻角概念及相互之间的关系。流场风速定义为: 入口水平风速在海洋下垫面干扰下大小和方向会发生非定常变化, 变化之后的风速称为流场风速。翼型初始攻角 α 为翼型弦线与入口水平风速方向的夹角; 附加攻角 β 为流场风速方向与水平方向的夹角; 相对攻角 γ 为翼型弦线与流场风速方向的夹角。

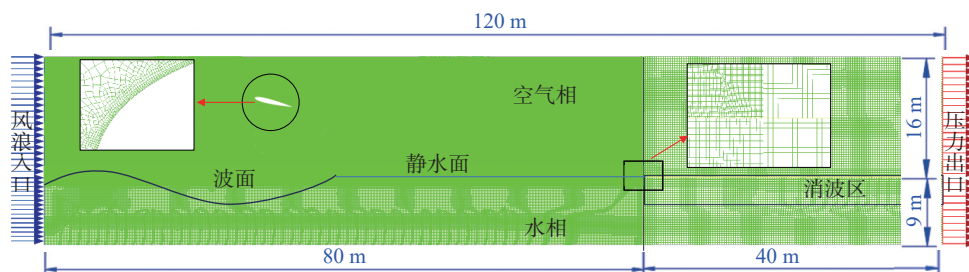


图1 风浪-翼型几何与网格划分示意图

Fig. 1 Schematic of geometry and mesh generation for the airfoil under wind-wave conditions

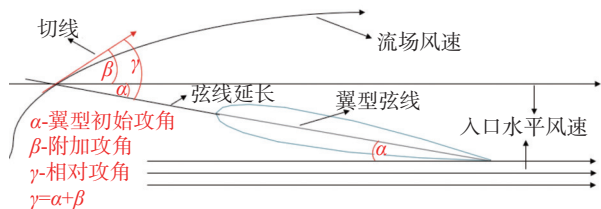


图2 攻角概念示意图

Fig. 2 Angles of attack concept diagram

设置标准环境风浪参数如下: 波浪周期为 4.5 s、波长为 27 m、静水深度为 9 m、波高为 1.3 m、入口水平风速为 6 m/s, 翼型初始攻角 α 为 6° 、位于静水面以上 5 m。文中无特别说明则默认为标准环境。表1为风场和风浪场工况条件, 工况 A 为翼型无干扰的风场, 工况 B、C、D 为翼型存在海洋下垫面干扰的风浪场, 翼型与静水面距离分别为 5、10、30 m。

1.2 数值模拟验证

网格分辨率对于计算精度具有重要影响, 本文进行了网格无关性验证。表2对比了波高与理论值以及翼型升力系数与试验值在不同网格数下的差异。结果表明, 波高与理论值在不同网格数下的差异均较小, 而翼型升力系数随网格数量的增加逐渐趋近于试

验值。网格数为 23 万和 38 万时的升力系数误差差异仅为 1.48%。综合考虑计算效率与计算精度, 本文选择计算网格数为 23 万。

为了说明风浪模拟的合理性, 对比仿真风浪场、波浪场及波浪解析解得到的波面高度, 如图3所示, 风浪参数设置如下: 风速为 10 m/s、波高为 1.7 m、波长为 37 m、周期为 5.1 s、静水深度为 12 m。波浪场模拟结果与解析解波面曲线吻合较好, 说明本文数值造

表1 风场和风浪场工况条件

Table 1 Operating conditions of wind field and wind-wave field

工况	有无波浪	翼型与静水面距离/m
工况A	无	无
工况B	有	5
工况C	有	10
工况D	有	30

表2 网格无关性验证

Table 2 Grid independence verification

	网格数			
	7万	12万	23万	38万
波高平均误差/%	3.87	2.62	2.98	2.53
升力系数误差/%	8.63	6.49	4.26	2.78

波的可靠性。而风浪场波面波动幅度显著高于波浪场, 符合风浪发育成长的运动结果^[17], 说明风浪耦合模拟的合理性。

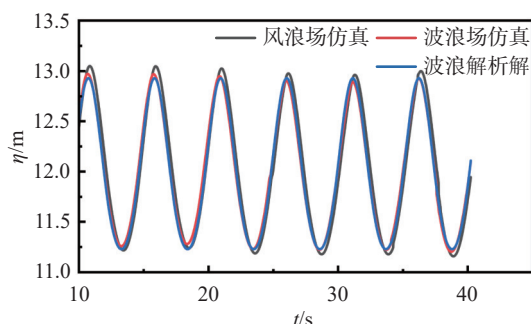
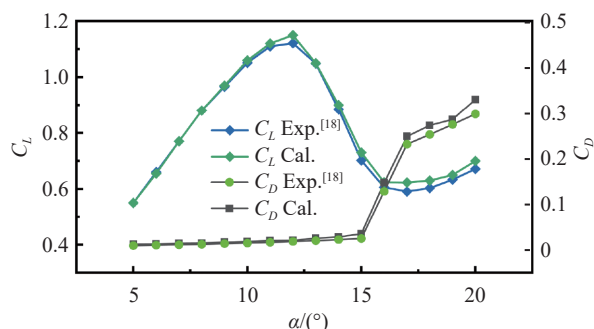


图3 风浪波面高度模拟验证

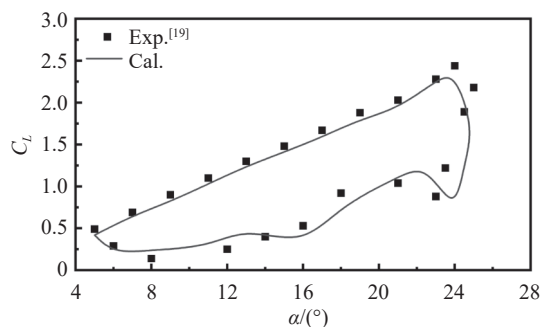
Fig. 3 Simulation verification of wind-wave surface elevation

图4(a)展示了雷诺数为 1×10^7 时 NACA0012 翼型静态升阻力系数的仿真结果与风洞试验结果^[18]的对比。结果表明, 仿真与试验得到的失速攻角一致, 失速前升阻力系数吻合较好, 失速后表现出的差异与涡脱落有关, 采用的湍流模型并不能完全捕捉到涡的变化。鉴于仿真结果与试验结果变化趋势基本一致, 可以说明数值模拟的可靠性。

本文研究条件为静态翼型与非定常变化流场, 有必要验证翼型动态气动力系数计算的准确性。基于美国 NASA Ames 研究中心试验条件^[19], 在雷诺数 $Re = 1 \times$



(a) 时均升/阻力系数对比



(b) 动态升力系数对比

图4 NACA0012 翼型升阻力系数仿真与试验结果的对比验证

Fig. 4 Comparative validation of simulated and experimental lift and drag coefficients for the NACA0012 airfoil

10^6 、翼型攻角变化规律为 $\alpha = 15^\circ + 10^\circ \sin(\omega t)$ (其中, ω 为正弦振荡的角频率, t 为时间)、衰减频率 $k = 0.15$ 下进行了数值模拟。图4(b)对比了升力系数的仿真结果与试验结果, 二者吻合度较高, 进一步证明了仿真模拟的可靠性。

本节验证了风浪-翼型的数值模拟方法, 基于此开展海洋下垫面对近海面附加攻角 β 及翼型升力系数的参数化分析, 着重研究大攻角翼型的流动分离特性。

2 计算结果与分析

2.1 附加攻角参数化分析

攻角是影响翼型气动特性的重要因素, 本文附加攻角 β 提取自翼型正前方 $10c$ (c 为翼型弦长) 位置, 其与波面高度有直接关系。图5展示了波浪场距入口 5、20 (β 提取点)、30 m (翼型所在位置) 处的波面高度曲线, 及有无翼型干扰下的 β 曲线对比。分析表明: 一方面, 距入口 20 m 与 30 m 位置处的波面高度曲线的均方根 (root mean square, RMS) 值仅相差 0.8%, 说明翼型正前方 $10c$ 位置处 β 受波面干扰的程度几乎相同; 另一方面, 有无翼型干扰的 β 曲线几乎重叠, 说明翼型的存在对于该位置处的附加攻角 β 无明显干扰。综上所述, 将 β 提取点设置在翼型正前方 $10c$ 位置处具有合理性。

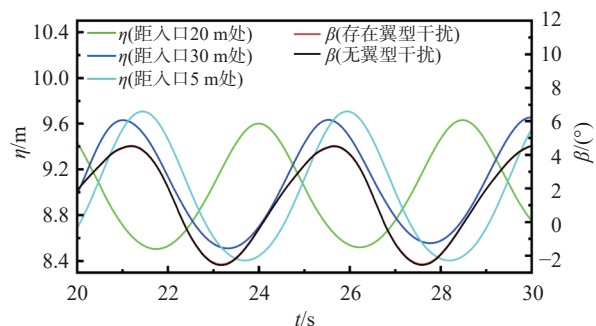


图5 波浪场距入口不同位置处的波面高度及有无翼型干扰下的附加攻角随时间变化曲线的对比

Fig. 5 Comparison of the variation curves of wave surface elevation at different distances from the wave inlet and additional angles of attack with and without airfoil interference over time

在标准环境基础上改变波高、风速, 以探究风浪参数对附加攻角 β 的干扰效果。图6为附加攻角 RMS 值随波高和风速的变化曲线。随着波高的增大, 附加攻角 RMS 值线性增大; 当风速为 5~11 m/s 时, 附加攻角 RMS 值随着风速增大近乎线性减小, 风速为 11~13 m/s 时, 附加攻角 RMS 值基本保持不变。

图7为 β 平均值与 RMS 值随距离静水面高度变化曲线。可以看出, 随着距离静水面高度越高, 二者

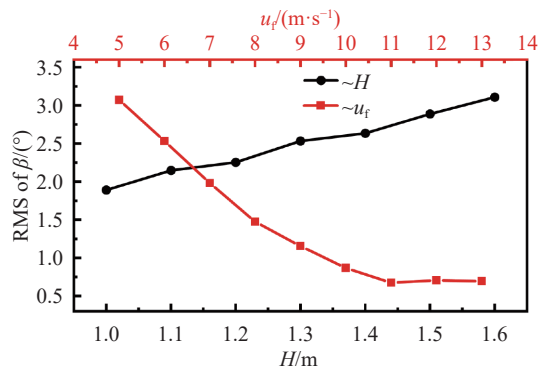


图6 附加攻角 RMS 值随波高和风速的变化

Fig. 6 Variation of RMS values of additional angles of attack

呈非线性递减,在不同的高度段表现出不同的变化特征,平均值从 1.47° 下降至 0.01° , RMS 值从 2.66° 下降到 0.02° 。平均值和 RMS 值的变化均说明距离静水面越远,附加攻角 β 受到海洋下垫面的干扰越小。

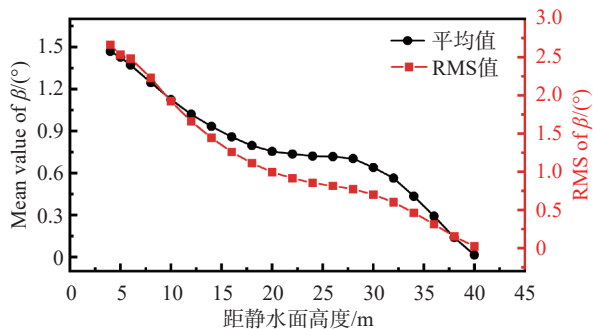


图7 附加攻角随距离静水面高度的变化

Fig. 7 Variation of additional angles of attack with altitudes above water surface

综上,风浪参数与距静水面高度均对 β 产生规律性影响,而相对攻角 γ 随 β 同步变化, γ 的非定常变化势必影响静态翼型气动特征,有必要分析海洋下垫面对翼型静气动特征的干扰效应。

2.2 升力系数参数化分析

在标准环境基础上改变波高、风速,以探究风浪参数对升力系数的干扰规律。图8为翼型升力系数 RMS 值随波高和风速的变化曲线,升力系数 RMS 值与图6中附加攻角 RMS 值随波高和风速的变化保持相似的增减趋势,这是由于 γ 在 $2.72^\circ \sim 12.25^\circ$ 之间变化,未达到翼型静态失速攻角 15° ,所以升力系数随 γ 呈线性变化。

将翼型表面流动划分为3个阶段,以说明海洋下垫面对各阶段静气动特性影响。图9为工况 A、B、C、D 下翼型升力系数随初始攻角的变化曲线,以风场(工况 A)为例,翼型初始攻角 $\alpha = 4^\circ \sim 10^\circ$ 时,表面流动紧贴翼型,为附着流; $\alpha = 11^\circ \sim 14^\circ$ 时,表面流动出现分离,为分离流; $\alpha = 15^\circ$ 为静态失速攻角, α 大于

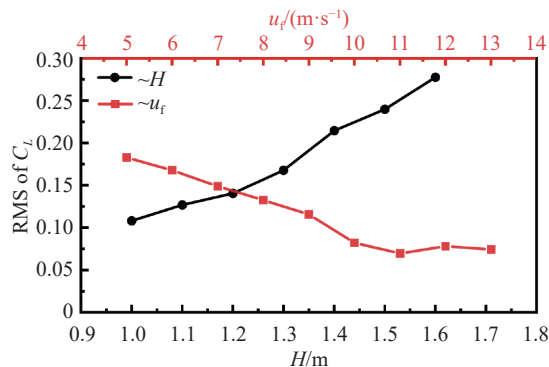


图8 翼型升力系数 RMS 值随波高和风速的变化

Fig. 8 Variation of airfoil lift coefficient RMS values with wave heights and wind speeds

15° 时,翼型表面流动完全分离,为涡脱落阶段。图9中各工况升力系数整体上表现出类似趋势,工况 B、C、D 的静态失速攻角相较工况 A 分别减小 1.4° 、 1.2° 和 0.6° ,与各工况附加攻角相同。工况 A、B、C、D 最大升力系数分别为 1.11、1.18、1.16、1.15,风浪场分离流和涡脱落阶段的升力系数均高于风场。这说明海洋下垫面不仅使得翼型提前发生静态失速,且在失速之后翼型周围流场特征也发生变化。在涡脱落阶段,3 种风浪场工况的升力系数曲线较接近,说明海洋下垫面对大攻角翼型流场的非定常特征影响较大。

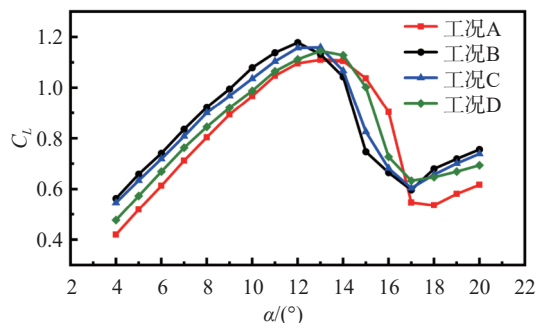


图9 不同工况条件下翼型升力系数均值随初始攻角的变化

Fig. 9 Variation of mean lift coefficients with initial angles of attack under different operating conditions

为了进一步明确海洋下垫面对3个阶段的干扰效果,对风浪场与风场各阶段流场特征进行了对比。图10为风场(工况 A)和风浪场(工况 B)中翼型初始攻角 α 为 9° 、 12° 和 18° 时的瞬时流线图,图11为风浪场(工况 B)中 α 为 9° 、 12° 、 18° 的翼型升力系数时程曲线。对比附着流阶段流场($\alpha = 9^\circ$),翼型表面流动均未分离(见图10)。从图11可以看出, $\alpha = 9^\circ$ 时,升力系数曲线为周期性平滑波动,其波动周期与波浪周期和附加攻角周期(即相对攻角周期)一致(见图5),因此可以推断,升力系数均随相对攻角 γ 线性变化。对比分离流阶段流场($\alpha = 12^\circ$),翼型表面流动均发生分

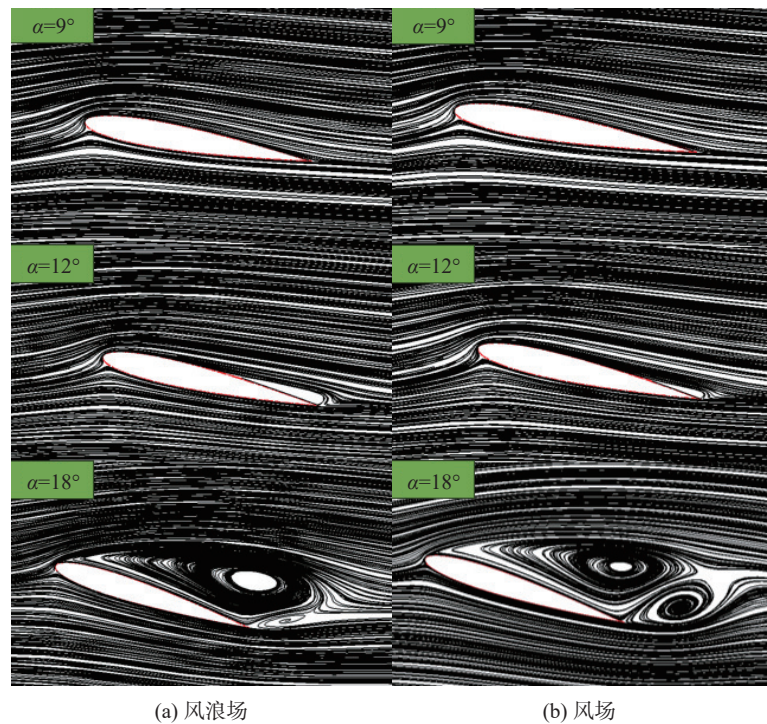


图 10 风浪场与风场中翼型在不同初始攻角下的绕流场对比

Fig. 10 Comparison of flow fields around an airfoil at different initial angles of attack in wind-wave fields and wind fields

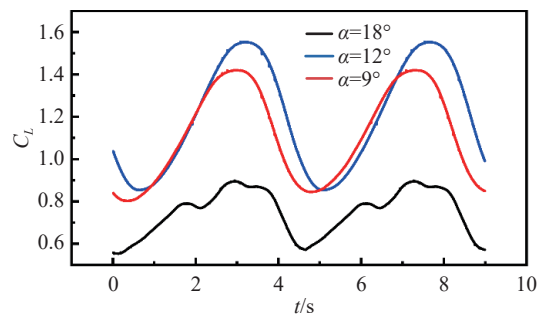


图 11 风浪场中不同初始攻角下的升力系数时程曲线

Fig. 11 Time history curves of lift coefficients at different initial angles of attack in wind-wave fields

离,风浪场情况下,流动分离程度更大(见图 10)。此时,风浪场升力系数均值大于风场(见图 9),原因是前者相对攻角波动范围超过静态失速攻角 15°,但图 11 中升力系数曲线并未出现失速现象致其急剧下降。对比涡脱落阶段流场($\alpha=18^\circ$),翼型前缘和尾缘均存在脱落涡(见图 10);此时风浪场翼型升力系数均值明显大于风场(见图 9),原因与分离流阶段相同;另外,二者翼型表面涡结构差异明显,且在图 11 风浪场中升力系数时程曲线未见高频率波动,说明风浪场翼型的脱落涡与风场不同。

图 12 对比了不同工况下升力系数 RMS 值随初始攻角的变化。工况 B、C、D 中附加攻角随与静水面距离不同而产生的差异导致了升力系数 RMS 值整体大小差异。攻角大于静态失速攻角时,工况 A 升力系

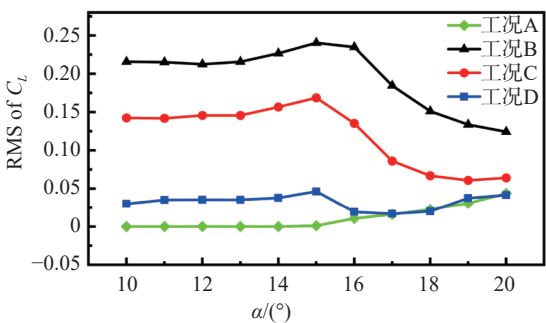


图 12 不同工况下升力系数 RMS 值随初始攻角的变化

Fig. 12 Variation of lift coefficient RMS values with initial angles of attack under different operating conditions

数 RMS 值逐渐增大;工况 B、C、D 翼型表面流动分离加剧,升力系数波动范围随初始攻角 α 增大先变大后变小,其中,工况 B 曲线保持下降,工况 C、D 升力系数 RMS 值下降至最小值之后开始反转。说明波浪场中翼型距离静水面越远,升力系数 RMS 值的变化趋势与风场越相似。另一方面,各工况曲线差异验证了大攻角翼型受干扰程度更大。

综上所述,风浪场相较风场翼型提前达到静态失速攻角,提前量取决于附加攻角平均值;翼型与静水面距离越远,其翼型气动特性越符合风场翼型;海洋下垫面对附着流、分离流及涡脱落阶段的干扰效果依次增强,主要干扰翼型大攻角流动分离特性。

2.3 大攻角翼型流动分离特征

以翼型 $\alpha=18^\circ$ 时的气动力时频与流场特征为例,

揭示海洋下垫面对大攻角翼型流动分离特性的干扰机理。

图13给出了工况A、B、C、D在一个波浪周期内的升力系数及工况B相对攻角时程曲线。工况B、C、D升力系数曲线随波浪运动发生周期性大幅波动,其中,工况B、C升力系数曲线在相对攻角 γ 峰值附近有非连续小幅波动,而工况D翼型距静水面较远,还保留着由自身大攻角时表现出的非定常特性导致的连续小幅波动,同工况A类似。升力系数波动预示旋涡脱落和漂移^[20]。工况A升力系数波动仅与翼型自身大攻角流动分离特性有关,工况B、C、D升力系数的波动既有波浪运动控制的长周期(波浪周期)波动,又包含短周期波动,说明风浪场中翼型的涡脱落现象与翼型自身大攻角特性和海洋下垫面干扰均有关。

在海洋下垫面干扰下,工况B、C、D的流场相似,以工况B为例,对比其与工况A的流场特征。图14为工况A、B旋涡漂移流线图,子图左上角1~4分别表示前缘涡开始脱落尾缘涡生成、前缘涡脱落尾缘涡向后漂移、前缘涡生成尾缘涡开始脱落、前缘涡向后漂移尾缘涡脱落过程,二者旋涡特征具有一定差异。一方面,工况B前缘涡的尺寸大于工况A,前缘涡提供翼型上表面吸力,导致图13中风浪场的升力系数时程曲线整体高于风场,尾缘涡尺寸则相反;另一方面,工况A前缘涡与尾缘涡交替脱落,工况B并非如此,而是前缘涡周期性(波浪周期)向尾缘漂移再附着前缘的过程。B1~B4对应时刻在图13中标出,风浪场中翼型前缘涡的发展周期为波浪周期,前缘涡尺寸及漂移位置的变化导致升力系数出现长周期波动,而B2、B3位置即相对攻角峰值附近产生的尾缘涡导致升力系数小幅短周期波动。这表明升力系数曲线的长周期波动是翼型受到海洋下垫面的干扰效应引起的,而短周期波动则是翼型在大攻角时表现出的流动分离特征。工况D翼型周围流场发展机理与工况

B、C相同,区别在于其距离海洋下垫面相对较远,尾缘涡生成与脱落是连续的。

对比升力系数频谱以进一步说明海洋下垫面对各工况涡脱现象的影响,图15为工况A、B、C、D下升力系数功率谱密度图。工况A仅有卓越频率,为0.537 Hz;工况B、C、D的卓越频率即波浪频率,均为0.037 Hz,工况B、C中仅存在高次谐波频率,工况D同时存在高次谐波频率与独立频率(0.430 Hz)。升力系数频谱特征取决于脱落涡的形态与频率,结合图13与图14进行分析,工况A的卓越频率为翼型前缘涡和尾缘涡交替脱落频率,对应幅值为0.019;工

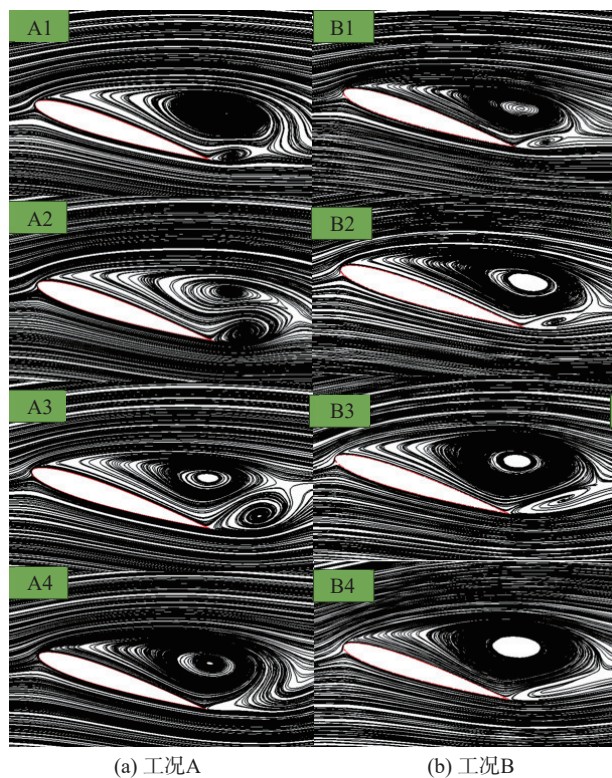


图14 不同工况下翼型涡脱落流线图(初始攻角 $\alpha = 18^\circ$)

Fig. 14 Streamline diagram of vortex shedding around the airfoil under various operating conditions (initial angle of attack $\alpha = 18^\circ$)

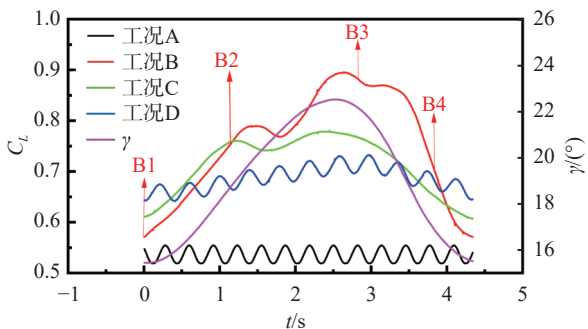


图13 不同工况下升力系数及工况B相对攻角时程曲线

Fig. 13 Time history curves of lift coefficients under various operating conditions and relative angles of attack for condition B

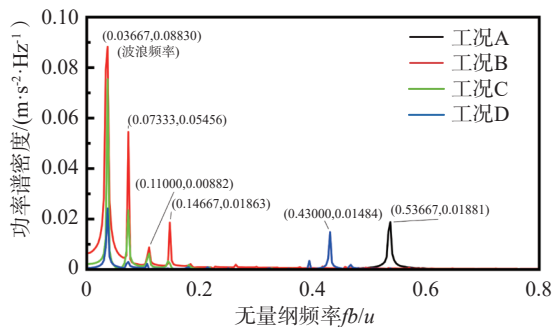


图15 不同工况下升力系数功率谱密度对比

Fig. 15 Comparison of power spectrum under different operating conditions

况 B、C、D 的卓越频率对应升力系数的长周期波动,为海洋下垫面干扰下的翼型前缘涡漂移频率。其中,工况 B 的四次谐波频率幅值为 0.019,高于三次谐波频率幅值 0.009,且其频谱中未见由尾缘涡脱落导致的独立频率,因此四次谐波频率 0.147 即为尾缘涡脱落频率。工况 D 中独立频率 0.430 为该工况的尾缘涡脱落频率,此频率左右各有一个明显的小波峰,表明涡脱落的形态更复杂,正弦来流的圆柱绕流问题中也出现了类似现象^[21]。

综上所述,海洋下垫面对于近海面大攻角翼型的涡脱落具有抑制效果;相较风场,风浪场大攻角翼型前缘涡周期性漂移且尺寸变大,其漂移及结构变化是由海洋下垫面的干扰效应引起的;尾缘涡脱落频率变低且尺寸减小,是大攻角翼型自身表现出的流动分离特征;由风浪参数决定的相对攻角波动范围与变化速率势必影响其涡脱特征^[22],当翼型距离静水面较远时,海洋下垫面对翼型干扰效应削弱,工况 D 出现独立的尾缘涡脱落频率,在该频率附近的两个小波峰表明涡脱形态更为复杂。

3 结 论

基于海洋下垫面对近海面流场的显著干扰效应,以对称翼型为研究对象构建风浪-翼型数值模型,对比分析翼型在不同风浪参数、距静水面高度下气动力变化规律及大攻角翼型升力系数时频与流场演化,揭示海洋下垫面对翼型静气动特征尤其是大攻角涡脱落特征的干扰机理。主要研究结论如下:

1) 附加攻角 RMS 值随波高与风速呈现规律性变化,平均值与 RMS 值均随距静水面距离增大而减小。

2) 相较风场翼型,风浪场翼型静态失速攻角减小,减小量取决于附加攻角平均值;海洋下垫面对翼型涡脱落阶段干扰效应尤为显著,表现为均值升力系数变大、分离涡形态差异明显。

3) 海洋下垫面干扰大攻角翼型流动分离导致前缘涡与尾缘涡产生机理的差异,前者是由海洋下垫面干扰效应引起的低频漂移,频率即为波浪频率,后者则是大攻角翼型自身流动分离引起的脱落但频率小于风场翼型涡脱频率;翼型与海洋下垫面相距较远时,出现独立的尾缘涡脱落频率且涡形态更复杂。

未来研究将考虑风机专用翼型,并将研究扩展至三维叶片空气动力学性能,以提升研究的适用性。

参 考 文 献:

[1] Lee C Y, Chen S S. Stable boundary layer and its impact on tropical

cyclone structure in a coupled atmosphere-ocean model[J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(5): 1927-1944.

doi: 10.1175/mwr-d-13-00122.1

[2] Ke S T, Ge Y J, Wang T G, et al. Wind field simulation and wind-induced responses of large wind turbine tower-blade coupled structure[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2015, 24(8): 571-590.

doi: 10.1002/tal.1200

[3] 钟伟,王同光. 转换对风力机翼型和叶片失速特性影响的数值模拟[J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(3): 385-390.

Zhong Wei, Wang Tongguang. Numerical analysis of transition effect on stall performance of wind turbine airfoils and blades[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(3): 385-390 (in Chinese).

doi: 10.3969/j.issn.0258-1825.2011.03.021

[4] 赵奥博,郑冠男,黄程德,等. 地效翼的颤振特性研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(17): 265-274.

Zhao Aobo, Zheng Guannan, Huang Chengde, et al. Flutter characteristics of ground effect wings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(17): 265-274 (in Chinese).

doi: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.17.033

[5] Qu Q L, Wang W, Liu P Q, et al. Airfoil aerodynamics in ground effect for wide range of angles of attack[J]. *AIAA Journal*, 2015, 53(4): 1048-1061.

doi: 10.2514/1.j053366

[6] 秦绪国,刘沛清,屈秋林. 翼型波浪水面巡航地面效应数值模拟[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(3): 295-299,304.

Qin Xuguo, Liu Peiqing, Qu Qiulin. Numerical simulation on aerodynamics of airfoil flying over wavy water surface[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(3): 295-299,304 (in Chinese).

doi: 10.1016/S1872-2040(10)60412-4

[7] Hu H D, Ma D L. Airfoil aerodynamics in proximity to wavy ground for a wide range of angles of attack[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(19): 6773.

doi: 10.3390/app10196773

[8] 米百刚,詹浩. 近地、水面时的飞行器动态稳定特性数值模拟[J]. *船舶力学*, 2017, 21(11): 1348-1355.

Mi Baigang, Zhan Hao. Numerical simulation of aircraft dynamic stability characteristics flying over ground and water surface[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2017, 21(11): 1348-1355 (in Chinese).

doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2017.11.004

[9] 韩龙,陈阳陵,王福新,等. 高海况机翼波浪地面效应数值模拟与分析[J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(8): 1127-1133.

Han Long, Chen Yangling, Wang Fuxin, et al. Numerical simulation and aerodynamic analysis of airfoil flying over wave ground at high grade sea condition[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2014, 48(8): 1127-1133 (in Chinese).

[10] 杨筱沛,王威,蒋博彦,等. 不同雷诺数下二维翼型尾缘脱落的流动分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(10): 96-104,112.

Yang Xiaopei, Wang Wei, Jiang Boyan, et al. Wake vortex shedding flow analysis of two-dimension airfoil with different Reynolds numbers[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(10): 96-104,112 (in Chinese).

[11] 刘志勇,罗振兵,袁先旭,等. 周期性激励控制翼型流动分离研究综述[J]. *力学进展*, 2020, 50(0): 221-248.

Liu Zhiyong, Luo Zhenbing, Yuan Xianxu, et al. Review of controlling flow separation over airfoils with periodic excitation[J]. *Advances in Mechanics*, 2020, 50(0): 221-248 (in Chinese).

doi: 10.6052/1000-0992-19-019

- [12] Samara F, Johnson D A. Dynamic stall on pitching cambered airfoil with phase offset trailing edge flap[J]. AIAA Journal, 2020, 58(7): 2844–2856.
doi: [10.2514/1.j059115](https://doi.org/10.2514/1.j059115)
- [13] 李银然, 赵丽, 李德顺, 等. 偏航工况下叶片翼型动态特性研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 326–333.
Li Yinran, Zhao Li, Li Deshun, et al. Study on dynamic characteristics of blade airfoil under yaw condition[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(7): 326–333 (in Chinese).
doi: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-1221](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-1221)
- [14] 李德顺, 何婷, 王清. 颗粒直径对风力机翼型动态失速特性的影响研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 207–213.
Li Deshun, He Ting, Wang Qing. Influence of particle diameter on dynamic stall characteristics of wind turbine airfoil[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(12): 207–213 (in Chinese).
doi: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1232](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1232)
- [15] Zhang Y, Ye J J, Huang X H, et al. Aerodynamic performances of the wind turbine airfoils in the condition of low wind speed[J]. International Journal of Fluid Dynamics, 2020, 8(1): 1–8.
doi: [10.12677/ijfd.2020.81001](https://doi.org/10.12677/ijfd.2020.81001)
- [16] 王硕, 柯世堂, 张伟, 等. 风、浪、流复合作用下海上风力机基础波浪荷载分布特性研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(5): 653–666.
Wang Shuo, Ke Shitang, Zhang Wei, et al. Research on the characteristics of wave load distribution of offshore wind turbine foundations under the combined action of wind, wave and current[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(5): 653–666 (in Chinese).
doi: [10.3969/j.issn.1007-7294.2022.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7294.2022.05.005)
- [17] Phillips O M. On the generation of waves by turbulent wind[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1957, 2: 417–445.
doi: [10.1017/S0022112057000233](https://doi.org/10.1017/S0022112057000233)
- [18] Sheldahl R E, Klimas P C. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines[R]. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 1981.
- [19] Mcalister K, Pucci S L, McCroskey W J, et al. An experimental study of dynamic stall on advanced airfoil sections. volume 2. Pressure and force data[R]. NASA-TM-84245-VOL-2, 1982.
<https://ntrs.nasa.gov/citations/19830003778>
- [20] Hu C X, Zhao L, Guan X L, et al. Mitigation mechanism of torsional vortex-induced vibrations using aerodynamic countermeasures: Case study on a typical closed-box girder[J]. Engineering Structures, 2024, 318: 118611.
doi: [10.1016/j.engstruct.2024.118611](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118611)
- [21] 于春放, 靖洪淼, 王仰雪, 等. 顺向正弦来流条件下圆柱气动力和绕流流场数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(6): 216–224.
Yu Chunfang, Jing Hongmiao, Wang Yangxue, et al. Numerical study on the aerodynamic forces and flow around a circular cylinder under streamwise sinusoidal inflow condition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(6): 216–224 (in Chinese).
doi: [10.13465/j.cnki.jvs.2024.06.023](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2024.06.023)
- [22] 王清, 招启军, 赵国庆. 变来流速度下旋翼翼型非定常气动特性分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 364–372.
Wang Qing, Zhao Qijun, Zhao Guoqing. Unsteady aerodynamic characteristic analysis of rotor airfoil under variational free stream velocity condition[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 364–372 (in Chinese).
doi: [10.13224/j.cnki.jasp.2017.02.014](https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.2017.02.014)

(本文责编: 徐燕)