

文章编号: 0258-1825(2022)04-0001-21

风能利用中的空气动力学研究进展 I : 风力机气动特性

王同光^{1,*}, 田琳琳¹, 钟伟¹, 王珑¹, 朱呈勇^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 南京 210016;

2. 南京理工大学 新能源学院, 江阴 214443)

摘要:随着世界各国纲领性行业政策的积极制定, 风电行业将继续高速发展。风电机组大型化(达到多兆瓦级甚至十兆瓦级)、海洋化(从陆地扩展至海上)、智能化(辅以智能化结构、材料和控制策略)、数字化(精准预测和实时感知调控)是风电发展的大趋势。空气动力学研究作为风力机技术研发的首要任务, 由此将面临一系列新的问题和挑战。本文以水平轴风力机为研究对象, 就其风能利用中的空气动力学问题进行探讨, 本篇为第一部分“风力机气动特性”。首先分析其空气动力学问题的复杂性及原因; 然后, 针对风力机专用翼型的气动特性、风力机气动特性、现代化风力机设计(特别是海上风电技术、台风问题、大叶片气弹问题)与流动控制等关键空气动力学问题, 从理论分析、数值计算、风洞实验和外场测量等多种研究手段与技术着手, 对其研究现状及取得的关键进展进行综述和讨论; 最后对今后的研究方向进行分析与展望, 为大尺寸风力机叶片设计提供参考。

关键词: 风能; 水平轴风力机; 风力机翼型; 空气动力学; 风力机设计; 研究进展

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A **doi:** 10.7638/kqdlxxb-2021.0114

Aerodynamic research progress in wind energy I : Wind turbine aerodynamic characteristics

WANG Tongguang^{1,*}, TIAN Linlin¹, ZHONG Wei¹, WANG Long¹, ZHU Chengyong^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of New Energy, Nanjing University of Science and Technology, Jiangyin 214443, China)

Abstract: With the establishment of national policies around the world, the development of wind industry has been entering its heyday. Wind turbine systems are continuously upsized from megawatt level to multi-megawatt class, deployed for both onshore wind power and offshore wind power in diverse sea conditions, intelligentized with smart materials, structures and control strategies, and digitized with precise prediction and state-aware control system. These mainstream trends for wind energy development, in the meanwhile, raise tremendous challenging issues for wind energy research and development. Among them, wind turbine aerodynamics will face new problems and great challenges. As the first review of a successive work, this study is mainly focused on the aerodynamics of horizontal-axis wind turbines. An explanation for the aerodynamic complexity is addressed at first. Then, research progress on key aerodynamics issues, such as the aerodynamic characteristics of wind turbine airfoils and blades, as well as modern wind turbine design (special focus is put on the offshore wind power technology and the inevitable typhoon phenomenon, together with the experienced aeroelastic problem caused by the increasement in wind turbine size) and new flow control strategies are discussed. In this process, recent theoretical, experimental, and numerical studies that have contributed to

收稿日期: 2021-06-29; 修订日期: 2021-10-12; 录用日期: 2021-11-17; 网络出版时间: 2021-11-30

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0192600, 2019YFB1503700); 国家自然科学基金青年科学基金(11802122)

作者简介: 王同光^{*}(1962-), 男, 山东蓬莱人, 教授, 研究方向: 风力机空气动力学. E-mail: tgwang@nuaa.edu.cn

引用格式: 王同光, 田琳琳, 钟伟, 等. 风能利用中的空气动力学研究进展 I : 风力机气动特性[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(4): 1-21.

WANG T G, TIAN L L, ZHONG W, et al. Aerodynamic research progress in wind energy I : Wind turbine aerodynamic characteristics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(4): 1-21(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0114

improve our understanding of wind turbine aerodynamic performance, such as aerodynamic forces, flow fields and flow mechanism, are summarized. Additionally, the strength and limitation of these research approaches are discussed. Possible future research trend is analyzed and prospected, providing some references for large-scale wind turbine blade design.

Keywords: wind energy; horizontal-axis wind turbine; wind turbine airfoil; aerodynamics; wind turbine design; research progress

0 引言

面对日益严峻的生态与环境危机问题,大力发展风电已成为全球共识。为了加快风能高质量的发展,各主要国家和地区根据自身特点,制定了积极的纲领性行业政策。特别地,为了落实中国提出的“30·60”碳排放目标,2020年10月北京国际风能大会(CWP 2020)上,来自全球400余家风能企业的代表联合发布了《风能北京宣言》^[1],呼吁制定与碳中和目标相对应的规划:为达到与碳中和目标实现起步衔接的目的,需保证我国年均新增风电装机5000万千瓦以上;2025年后,中国风电年均新增装机容量应不低于6千万千瓦,到2030年至少达到8亿千瓦,到2060年至少达到30亿千瓦。然而,根据国家能源局统计,截至2020年底,我国风电累计并网装机容量达到2.81亿千瓦,与拟定目标还有相当大的差距。为了确保风电产业的健康持续发展及上述愿景的顺利实现,应对现有技术进行革新。

风力机技术涉及力学、机械工程、材料科学、电气、控制、生产和工艺等方面,是一个高度多学科交叉融合的技术。其中,风力机空气动力学决定着风力机的性能、效率、稳定性和安全性等方面,是风力机技术中首当其冲的关键问题,也是风力机理论研究的重大领域。然而,风力机运行在高度复杂的气流环境中(例如大气湍流、机组尾流及复杂地形绕流),运动形式也相当复杂(涉及旋转、静动部件耦合、柔性变形),面临空气动力学领域复杂的现象和问题(如强非定常、非线性、多尺度、流动分离及气动弹性效应等)^[2]。尽管学者们已进行了大量探索并取得了一定的进展和研究成果,但仍有一些基础科学问题亟待解决,仍存在广阔的研究空间。另外,近年来风电行业发展迅速,大型化(达到多兆瓦级甚至十兆瓦级,风轮直径100 m至200 m量级)、海洋化(从陆地扩展至海上)、智能化(新型机组结构形式,辅以智能化结构、材料和控制策略)、数字化(达到精准预测和实时状态感知调控)是未来风电发展的大趋势。现代化风力机所面临的空气动力学问题更加突出,在技术需求上达到新的高度,同时也提出了巨大的挑战。

水平轴风力机是目前安装数量最多、应用范围最广的机型,在风电市场占有主导地位。本文主要以水平轴风力机为研究对象,分析风能领域空气动力学问题的复杂性及其原因,引出气动研究面临的重要挑战。然后,针对风力机专用翼型的气动特性及其评估与分析方法、风力机气动特性及其基本理论与研究方法、现代化风力机设计与流动控制等关键空气动力学问题,分别评述国内外研究现状和进展。最后,对未来的研究趋势进行分析与展望。

1 风力机气动特性的复杂性

风力机是运行在大气边界层底部的大型旋转气动设备,面临空气动力学领域非常复杂的问题,主要体现在以下几个方面^[2-3]:

(1)来流条件复杂。风能来自地球表面的不均匀受热和地球自转的科里奥利力。受地形地貌、大气热力效应以及自由大气气压梯度的共同作用,边界层中的湍流发展、演变,产生不同的边界层结构和湍流风特性,如图1所示。现实中,风力发电所利用的风资源主要集中于0~200 m的高度范围内,面临着风切变、风转向、尾流及海-气交换等多种工况,来流条件异常复杂且不均匀,这使得风力机所有的气动现象均呈现强非定常特点。

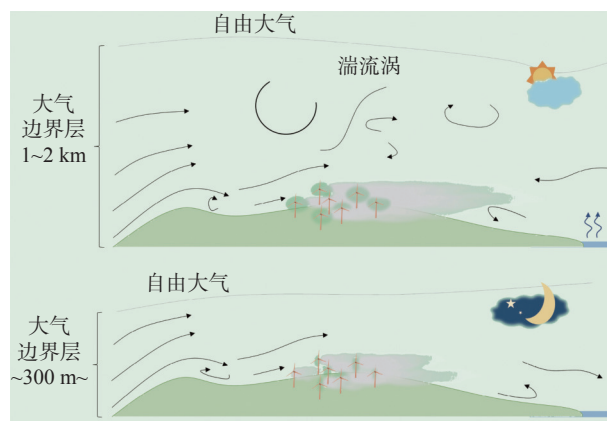


图1 白天和晚上的陆上大气边界层结构及湍流风示意图
Fig. 1 Schematic of the onshore atmospheric boundary layer (ABL) structures during the day and night as well as the evolution of the turbulent wind

(2)叶片绕流复杂。在非定常入流、偏航、变桨、动态变形等风况/运行工况条件下,风力机叶片常处

于深失速或动态失速状态。而动态失速的主要特征为叶片吸力面有分离涡的运动和脱落,对压力场产生非定常的扰动,进而产生非定常气动力^[4]。此外,不同于二维翼型绕流,叶片绕流是高度三维的;特别是

靠近叶根区域,由叶片旋转产生的科氏力和离心力共同作用,引起显著的三维旋转效应。三维旋转效应和动态失速的相互耦合使得叶片绕流更加复杂,如图2所示^[5]。

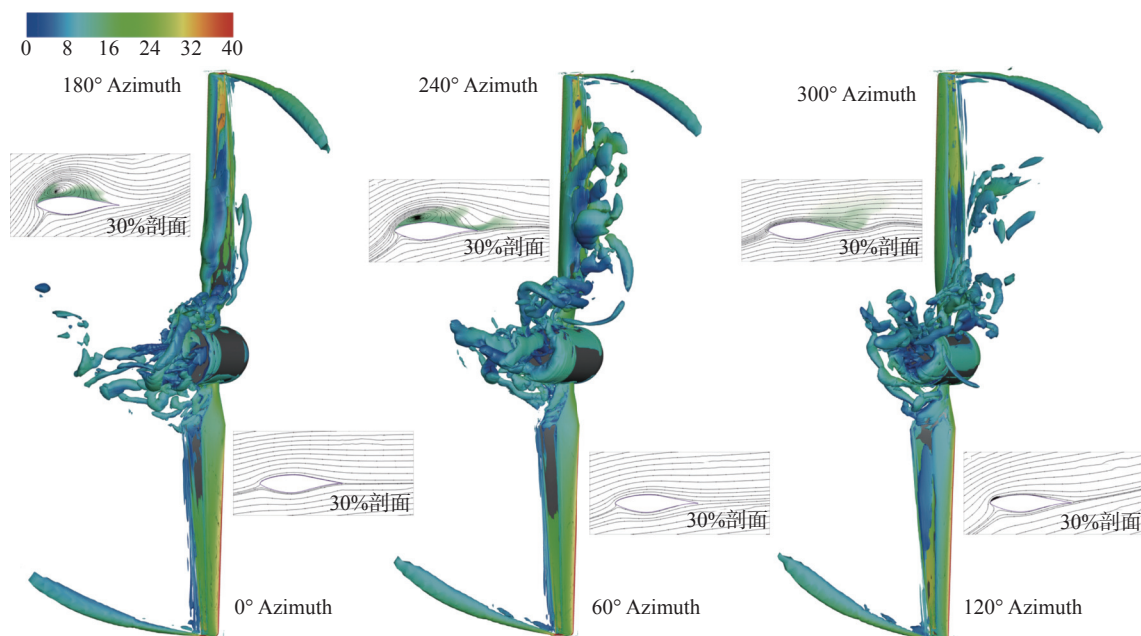


图2 偏航条件下NREL Phase VI叶片三维旋转效应和动态失速的耦合作用示意图(基于DDES方法模拟)^[5]

Fig. 2 Schematic of coupling between the three-dimensional rotational effect and the dynamic stall under yaw conditions for the NREL Phase VI blade (based on the DDES turbulence model)^[5]

(3)气动弹性问题复杂。风力机是一个刚柔耦合的多体系统,在气动力、弹性力、重力及惯性力的作用下易发生挥舞、摆振和扭转变形。另一方面,变形的叶片反过来会影响叶片周围的流场,从而进一步影响叶片气动载荷,如图3所示。这种弹性力学和空气

动力学的耦合,极大地增加了问题的复杂性。特别地,随着低风速区以及海上风能的大范围开发,叶片趋于大型化、柔性化、细长化;而细长结构的大型叶片所处气动环境更加复杂,叶片动态变形更为严重,功率输出也更不稳定。

除上述共有问题之外,不同研究对象(超大型、大型、小型风力机等)所涉及的空气动力学问题及复杂程度也各有不同。例如,由于风切变效应,大型风力机叶片运转至最高和最低处的风功率密度差别较大,此时的风工程项目必须考虑切变效应,否则会引起严重的评估偏差;然而,对于小型风力机,风切变的影响相对较小,工程领域通常假定均匀入流风条件,预测结果在可接受范围内。另外,如前所述,大型风力机叶片是大挠度的细长体,有显著的气动弹性问题,容易引起叶片的颤振失稳;而小型风力机叶片可近似为刚体。这些均说明针对中小型风力机的设计方法及规范在大型风力机设计中需进一步校验和改进。

2 风力机翼型及其气动特性

叶片外形是由一系列厚度不同的翼型构成的。风力机总体气动性能很大程度上取决于基本翼型的性能。同时,翼型也是风力机载荷的源头,从根本上

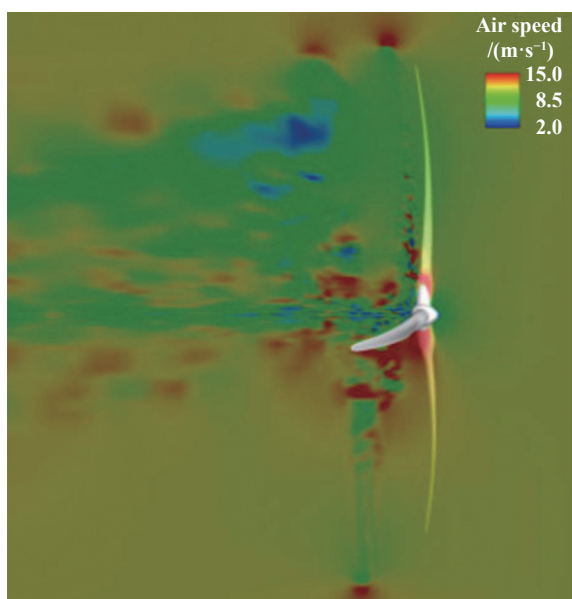


图3 大变形叶片周围的流场云图(基于CFD的气动弹性模拟)^[6]


Fig. 3 Flow contour around a largely deformed blade (CFD-based aeroelastic modelling)^[6]

影响机组的安全性与经济性。因此,对风力机专用翼型的研究和开发尤为重要。

2.1 风力机专用翼型

20世纪80年代之前,风力机设计时多数直接采用航空翼型。其中,NACA63与LS等系列翼型迄今仍在叶片设计上有较多应用。随后,在欧洲风能发展的带动下,学者们根据需求开始研发风力机专用翼型,相继设计了一系列经典翼型族,如瑞典FFA-W系列、美国NREL-S系列、丹麦Risø-A系列以及荷兰DU系列等^[7]。这些翼型族凝聚了设计者对风力机设计需求的理解,其各自的几何特点及气动特性详见文献^[8]。总体而言,与传统航空翼型相比,风力机翼型存在明显不同:(1)航空翼型的相对厚度通常为4%~18%,而风力机翼型的相对较厚(约为15%~53%)且大厚度翼型的后缘为钝体;(2)航空翼型通常更注重在巡航马赫数下具有高升阻比,而风力机翼型需在宽风速范围内有较高升力系数和升阻比(其目的是增加功率输出);(3)风力机翼型需具备平缓的失速特性和表面粗糙度不敏感性;(4)风力机翼型还需更多兼顾气动噪声、结构强度、生产制造等方面的要求。

荷兰代尔夫特大学的van Rooij^[9]归纳了风力机叶片典型截面的特点,如图4所示。根据实际运行经验,van Rooij将叶片划分为叶根、叶中、叶尖三个典型区域,并将各区域的相对位置及对翼型的设计要求归纳如下:叶根区(外侧30%以内),以满足结构需求和几何相容性为主,对翼型气动特性要求相对较低,且不追求粗糙度低敏感特性;叶中区(30%~80%),叶片的主出力区,翼型相对厚度21%~28%,且具有较高的升阻比和较低的粗糙度敏感性;叶尖区(80%以外),一般采用相对厚度小于21%的薄翼型,要求翼型升阻比较高、最大升力系数偏低、失速特性和缓、粗糙度不敏感及低噪声。该设计方案既能较好地满足叶片气动性能的要求,又能有效增强叶片的结构强



	>0.28	0.28~0.21	<0.21
相对厚度	>0.28	0.28~0.21	<0.21
高升阻比	★	★★★	★★★★★
低最大升力、和缓的失速特性			★★★
粗糙度不敏感	★	★★★	★★★★★
低噪声		★	★★★★★
几何相容性	★★★	★★★	★★★
满足结构需求	★★★★★	★★★	★

图4 水平轴风力机对翼型的要求(根据文献^[9]重绘)

Fig. 4 Design goals of horizontal-axis wind turbine airfoils (adapted from reference^[9])

度,是兆瓦级叶片设计常用策略。此外,对于多兆瓦级大型叶片,结构、制造、控制、噪声等方面的约束更突出,相应的翼型性能需求也发生了改变^[2],但上述原则仍具有参考意义。

目前,风力机翼型研究主要包括两方面:翼型设计/优化设计和翼型气动性能计算分析。下文主要介绍这两方面的研究方法和相关进展。

2.2 风力机翼型设计与优化设计

翼型设计有两条技术思路:正问题设计法和反问题设计法^[10]。反问题设计法在早期的翼型设计中得到广泛使用,其基本思路为:基于设定的目标气动状态(如压力分布)和基础翼型,通过迭代求解几何外形和流动控制方程,逐步逼近设定目标,最终得到满足要求的翼型。其中,贡献最大的为Tangler等^[11]提出的反问题设计法,并据此设计了NREL-S系列翼型族。在设计工具/代码方面,美国麻省理工学院的Mark Drela教授^[12]基于位势流理论和黏性修正理论编写了XFOIL程序用于翼型设计与分析,得到了普遍认可与应用;但在后续研究中逐渐发现其对厚翼型失速特性预测精度不足。荷兰TUDelft的van Rooij等^[13]改进开发了RFOIL程序,并且大量风洞实验证实了该程序对翼型气动特性和旋转效应的预测精度有所提升,因此成为当前翼型设计的核心软件之一。

另一方面,随着优化算法的迅速发展,遗传算法、模拟退火算法等被应用于翼型设计,正问题设计成为主流^[8]。其基本思想为:将翼型作参数化描述,结合计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)或其他方法计算翼型气动性能;然后,设定优化目标(如升力、升阻比、失速特性等),通过优化算法不断调整气动外形,最后得到最优的翼型形状。该方法能够满足多种设计需求,可处理多学科设计问题,成为风力机翼型设计的有效方法和手段。此外,针对风力机专用翼型,其他学者还开展了正向和反向相结合的混合设计^[14]、不同翼型族的融合设计^[15],以及翼型-叶片联合设计^[16]等先进研究工作。

在翼型轮廓和外形方面,大厚度、钝后缘是风力机翼型的显著特点。美国Sandia国家实验室指出钝尾缘设计具有提高叶片结构特性、增加截面最大升力系数及升力线斜率、降低翼型粗糙度敏感性等优点^[17],但同时也带来阻力增大和气动噪声增强等缺点。对此,文献^[18-19]开展了翼型改进研究,以期减小钝尾缘翼型的阻力系数并降低噪声影响。此外,西北工业大学叶正寅团队还利用环量控制方法对钝尾缘翼型进行了流动控制研究^[20]。近年来,平底翼型(截断尾缘)引起关注。Miller等^[21]设计了具有良好

气动和结构性能的 CU-WI-XX 翼型系列。针对高湍流度低风速区风电开发的特殊需求, Li 等^[22]提出了新的综合设计标准, 拓展了常规翼型优化设计方法。另外, 针对多兆瓦级风力机的运行需求, 中国科学院工程热物理研究所团队^[23]研究了 6 MW 风力机大厚度钝尾缘翼型的设计准则和设计方法。2019 年, Wen 等^[24]还将人工神经网络方法引入风力机翼型优化设计。这些工作均为新型翼型、特殊翼型设计提供了新思路, 对后续研究具有很好的参考价值。

目前, 大型风力机的运行雷诺数达百万或更高量级, 超过了风力机经典翼型族的设计雷诺数范围。对此, Peeringa 等^[25]采用 PFOIL 软件研究了雷诺数对翼型气动特性的影响, 结果表明, 高雷诺数会使其最大升力系数明显提高同时阻力系数降低, 对气动性能的提升有利; 这也在 Pires 等^[26]的风洞实验研究中得到了证实。由此可知, 大型风力机翼型必须考虑高雷诺数进行设计。另外, 随着叶片大型化以及运行环境恶劣化, 对叶片和翼型的需求也发生了一系列变化。对叶片的要求是高效率、低载荷和轻量化; 相应地, 对翼型的要求是较好的升阻比特性(确保叶片气动效率高)、较低的最大升力系数(确保叶片低载荷)、较大的升力系数(确保叶片轻量化)。然而, 这些性能要求存在一定的矛盾(特别是对升力系数的要求), 在翼型/叶片设计时应应对载荷和重量需求进行折中和平衡^[10]。

国内, 中国空气动力研究与发展中心最早开展了风力机专用翼型的风洞实验研究工作, 并编写了《风力机翼型大攻角气动性能手册》, 初步探索了国内外常用的 30 种风力机翼型的特点及性能, 并在之后持续致力于风力机翼型和叶片的设计工作^[27]。另外, 随着风电产业的大力发展, 风力机专用翼型的开发日益受到重视, 相继设计形成了多类满足结构相容性的高性能翼型族。2007 年, 在贺德馨研究员等的推动下, “十一五”国家 863 计划“先进风力机翼型族设计、实验与应用”项目启动。项目成员共同开发了 WA 系列翼型族, 并开展了相应的风洞实验测量, 达到了设计指标^[28]。2012 年, “十二五”国家 863 计划“先进风力机翼型族设计与应用技术”项目启动, 旨在开发适用于大型风力机叶片的先进翼型族和叶片应用技术^[14]。除此之外, 国内其他单位如重庆大学、南京航空航天大学等, 也陆续开展了类似工作并在兆瓦级风力机设计中得到应用。近年来, 一方面, 风力机翼型的设计流程、参数化方法均已成熟, 但针对多元化/复杂应用场景的翼型和相关数据依旧缺乏, 如翼型在高雷诺数($6.0 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^7$)下的气动数据; 另一方面, 大型多兆瓦级风力机特别是海上风力机, 对

翼型设计技术提出了新的挑战, 翼型的开发仍有较大提高空间。

2.3 翼型气动性能评估与分析

准确的气动性能评估是风力机翼型设计的前提和基础, 目前主要有两大类方法: 基于势流理论的面元法和基于求解 Navier-Stokes 方程的 CFD 方法。前者对低雷诺数、中等厚度以下、小迎角条件的翼型性能计算较为准确, 且求解速度快、鲁棒性良好。其中, XFOIL 和 Profili 是基于面元法开发的软件(二者区别在于黏性边界层的处理和对分离流动的捕捉能力), 当前多款优秀翼型族都是基于这类软件优化设计而来。需要指出, 面元法及相应软件相对适用于翼型设计的初步阶段, 如选型、修型等需要快速可靠的气动评估工作, 以缩短翼型开发周期。

除了翼型气动评估, 部分风工程业务还需流场细节的揭示, CFD 因此可在翼型性能分析中发挥关键作用。其中, 由于优越的经济性和鲁棒性, 雷诺平均(RANS)成为当前应用最广泛的 CFD 方法之一。但前人研究表明, 在小入流角条件下, RANS 方法能给出准确的气动预估; 而对于大迎角或大厚度翼型绕流, RANS 方法的预测精度不足, 且不同湍流模型的结果差别很大^[2], 但尚未得到明确的湍流模型性能优劣结论。尽管如此, 经过十几年的不断测试, SST $k-\omega$ 成为风力机气动性能计算中应用最广的湍流模型。此外, 为了实现复杂工况模拟, 如翼型动态失速伴随的非定常大尺度分离湍流, Lin 等^[29]还采用了分离涡模拟(DES)方法。为了实现更高分辨率的精细化模拟, Solis-Gallego 等^[30]还借助大涡模拟(LES)方法开展了翼型绕流及相应的尾缘噪声问题研究。这些基于较高分辨率的 DES、LES 研究为湍流模型的改进提供了宝贵的数据库和建模指导, 将有效促进 RANS 方法的发展及其在工程项目中的应用。

从更细致的角度考虑, 由于风力机工作环境和运行工况复杂, 叶片上的流动更容易发生从层流向湍流的转捩。而相比于三维叶片, 二维翼型流场更敏感, 特别是风洞实验中的翼型模型(雷诺数相对较小)或现实中的大厚度翼型(在迎角较小时就易发生转捩)。因此, 气动力计算必须考虑转捩过程^[31]。转捩流动被认为是经典物理学遗留的最具挑战性的问题之一, 多数常用湍流模型假定流场为全湍流状态而忽略了层流区域的存在, 造成结果偏离实际。2015 年, 陈进等^[32]对比了全湍流模型和湍流转捩模型对风力机翼型气动性能的预测效果, 发现湍流转捩模型的结果更为准确。此外, 2020 年 Cui 等^[33]提出了一种改进型转捩/湍流模型, 成功模拟了风力机翼型前缘附

近的分层分离泡和边界层转捩过程,提高了翼型气动力计算精度。

除上述数值方法之外,风洞实验仍是当前获取翼型设计所需关键气动数据的最主要手段。前期已开展的风力机翼型风洞实验研究详见综述[34],这里不再赘述。特别值得一提的是,大型风力机实际运动过程复杂,叶片或翼型常常处于动态失速工况。考虑此现状,李国强等[35]建立了翼型俯仰振荡和横摆振荡动态风洞实验手段,开展了风力机翼型动态失速特性实验研究;此外,为获取风力机设计所需的全面准确的翼型动态载荷,该团队还开展了偏航振荡翼型的动态气动特性风洞实验研究[36]。

3 风力机气动特性研究

气动特性决定了风力机的风能利用效率和气动载荷大小,是风力机研究的热点和重点。一般而言,风力机气动特性是由叶片表面流场结构决定的,对其研究主要是对叶片绕流流场与受力等因素的分析。但由于风力机运行在高度复杂的大气湍流环境中,且叶片绕流具有复杂的三维非定常特性,导致气动特性分析与计算难度很大。当前,准确、可靠、高效的气动特性计算尚未达到成熟程度,仍面临不小的挑战。在风力机空气动力学研究和工程应用中,相继出现了许多方法和理论。其中,叶素动量理论、涡尾迹方法和计算流体力学方法是三大主流的气动特性计算/分析方法。此外,风洞实验和外场测试也是实现风力机气动性能(如机械功率、功率系数和弯扭矩)、揭示叶片旋转流动机理的重要途径。以下将详细阐述这几类研究方法的内涵及取得的相关研究进展。

3.1 叶素动量理论

叶素动量方法(BEM)是最早提出的风力机气动力计算与分析方法,其基本思想是[4]:首先,将叶片沿展向离散成若干小段,每一段称为一个叶素(类似图5的截面段);其次,假设各叶素之间互不干扰,结合动量理论可建立当地诱导因子与叶素翼型升/阻力特性之间的关系,进而计算各叶素的推力和扭矩;最后,积分求得叶片整体的气动力。在此过程中,翼型气动数据是计算的前提和基础,其通常由翼型实验或计算获得,其质量决定了叶片气动力计算的准确性。前者是开展翼型在各迎角和雷诺数条件下的众多实验,收集汇成翼型气动数据库供查表使用;但该方式较为昂贵和耗时[37]。后者多数基于第2.3小节介绍的数值方法进行模拟仿真,可以高效、较准确地得到翼型在各类工况(含常规工况及实验条件无法顾及的极端工况)条件下的气动特性。此外,也有少部分工

作基于几组典型迎角下的实验结果进一步结合数学建模的方式实现翼型在全迎角范围内的气动特性快速预测[38]。

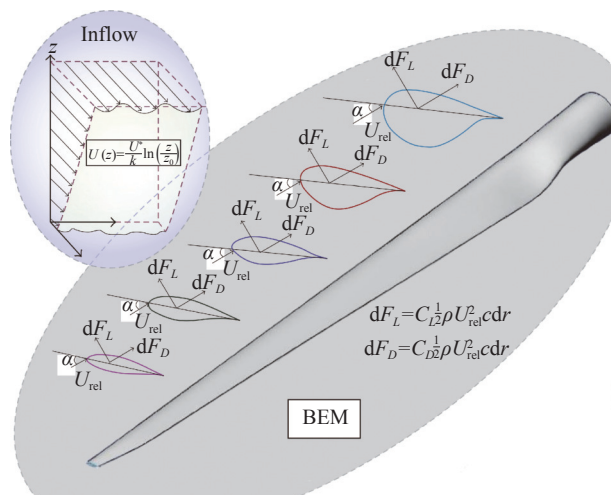


图5 水平轴风力机叶片几何构型和单个叶素的当地入流与气动力示意图[39]

Fig. 5 Schematic of the horizontal-axis blade geometry and the local inflow and aerodynamic forces of blade elements[39]

BEM理论思路简明,操作简单,计算量较小,易耦合至气动弹性和结构动响应计算。因此,在相当长的时间内是风力机设计、性能计算及载荷预测的重要手段,也被多个主流风力机设计软件(如Aerodyn和GH Bladed)采用[40]。但同时,由于基本假设的简化,使其存在一定的局限性[2]。这种局限性可能导致风力机的实际发电效率与设计不符,图6给出了某风电场1.5 MW机组的实际与设计功率曲线对比。该图显示,当风速小于额定风速时,功率曲线偏差明显;当风速大于额定风速时,风力机满发状态下,额定功率与设计值仍略有差别。造成这种误差的原因可归纳为:(1)BEM方法无黏假设下的一维动量理论与实际黏性三维流动之间存在差异;(2)BEM方法的定常假设与实际非定常流场(存在风切变、风速/风向变化、偏航等工况条件)存在差异;(3)BEM方法简化理论与实际物理过程存在差异,尽管在具体应用中会给予修正,但修正模型通常存在很强的经验性,这又引入了新的不确定性;(4)大气边界层湍流的复杂性以及大型叶片变形显著等因素,进一步增加了BEM方法在理论、边界条件、叶素气动数据等方面的误差体现。因此,在设计过程中,应当综合考虑复杂大气环境及其物理机理,改善现有的气动模型,准确评估多种因素耦合作用下风力机的气动性能,从而提高风力机设计的鲁棒性和可靠性。特别地,有必要针对风力机大型化以后所面临的新情况,在上述几个方面继续开展研究工作。

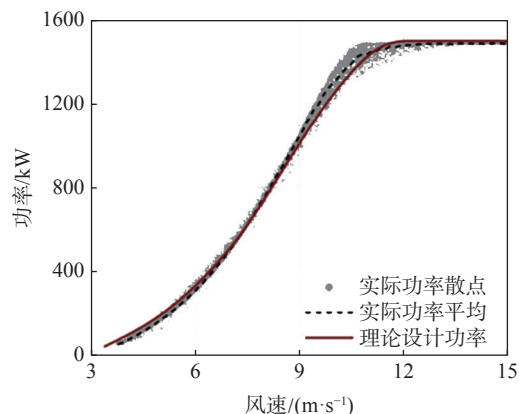


图6 风力机 SCADA 数据和叶片设计的功率曲线对比
Fig. 6 Wind turbine's power curve comparison between the measured SCADA data and the theoretical design

如前所述, BEM 理论对于均匀入流、无偏航、定桨距、定转速工况的风力机气动计算较为有效, 但如果面对真实复杂工况(如阵风、偏航、风剪切、塔影等), 该方法的准确性下降。对此, 后续相继出现了一系列修正模型, 以反映真实流动情况, 提高预测精度。以下将简要介绍三类重要的工程修正模型及其工程适用性: 第一类为叶尖损失修正模型, 用于描述风力机叶片实际为有限个数而非假定无限个的影响; 第二类为三维旋转效应修正模型(三维失速延迟模型), 用于描述科氏力和离心力导致的旋转叶片失速延迟的现象; 第三类为动态失速修正模型, 用于描述旋转叶片当地迎角随时间变化而导致的叶片气动力非定常效应。

3.1.1 叶尖损失修正模型

由翼型的气动特性可知, 叶片吸力面的压力低于压力面, 空气会在叶尖处沿径向二次流动(如图7所示, 从下表面绕至上表面), 从而导致叶尖附近的气动性能降低, 这在较宽的叶片上尤为显著。叶尖处叶素的受力情况对整个叶片气动特性影响较大, 此时 BEM 方法的二维叶素假设不再适用于有显著三维绕流的叶尖区, 应引入叶尖损失修正模型。

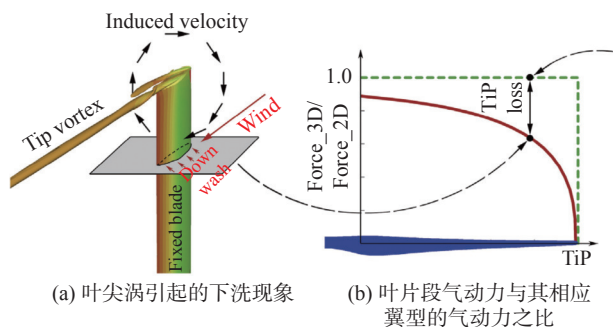


图7 叶片气动特性^[41]

Fig. 7 Blade aerodynamic characteristics^[41]

应用最广泛的 Glauert 修正模型^[42], 其基本思想是针对轴向和切向诱导因子引入修正函数; 但研究表

明, 修正后的叶尖气动数据仍高于实验数据, 仍需继续发展更准确的工程模型。Shen 等^[43]提出了一个附加的修正因子, 用于直接修正叶尖区域的法向力和切向力。Wimshurst 等^[44]对 Shen 模型的修正因子进行了分析和校准, 并给出了不同取值。Schmitz 等^[45]在 Glauert 修正模型中嵌入一个经验函数以考虑叶尖涡卷起和尾流膨胀效应。之后学者们进一步加以改进, 如 2020 年 Zhong 等^[41]将三维效应和旋转效应对叶尖损失的影响分别建模, 提出了一种新型叶尖修正方法, 该方法在高诱导因子和大迎角情况下弥补了 Glauert 模型精度不足的问题。总之, 上述研究一定程度上提高了 BEM 方法在叶素二维假设失效区域(如叶尖)的计算准确性。

3.1.2 三维旋转效应修正模型

水平轴风力机叶片绕流和翼型绕流的主要差别在于离心力和科氏力共同作用产生的三维旋转效应。离心力在分离区容易产生展向流动(又称径向流动), 进而产生弦向科氏力; 弦向科氏力有助于抵消部分弦向逆压梯度, 从而抑制流动分离并延缓失速, 提高叶片剖面的升力。因此, 三维旋转效应一方面压扁剖面分离区, 另一方面延缓分离区的扩张, 进而延迟失速^[46]。通常, 叶根剖面最先发生流动分离, 同时三维旋转效应对静态失速的延迟作用也在叶根处最为明显。

三维旋转效应在叶片气动性能上的具体影响为: 叶片剖面升力和低头力矩变大, 风力机整体输出功率变大。最早的失速延迟现象是 1945 年 Himmelskamp^[47]在螺旋桨叶片的叶根处发现叶根升力系数较二维翼型数据增加了近 3 倍, 失速迎角也增加。此后, 许多理论、实验、数值研究都围绕着这一现象展开。例如, 在理论研究方面, Snel 等^[48]通过求解动量积分型边界层方程, 深入分析了三维旋转效应的形成机理, 以及其对边界层特性的影响; 在实验研究方面, Lee 等^[49]使用层析粒子图像测速仪研究了 5 kW 风力机上的三维旋转效应, 清晰地证明了旋转效应在降低弦向逆压梯度、抑制流动分离方面的作用(如图 8 所示)。

在数值研究方面, 为满足工程应用的需求, 学者们先后提出了多类三维旋转失速延迟修正模型^[5], 用于添加到叶素动量方法或涡尾迹方法, 以提高风力机气动特性的预测合理性。这些修正模型的统一化表达式为:

$$\begin{aligned} C_{L,3D} &= C_{L,2D} + F_L \Delta C_L \\ C_{D,3D} &= C_{D,2D} + F_D \Delta C_D \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $C_{L,2D}$ 、 $C_{D,2D}$ 为二维翼型的升力、阻力系数;

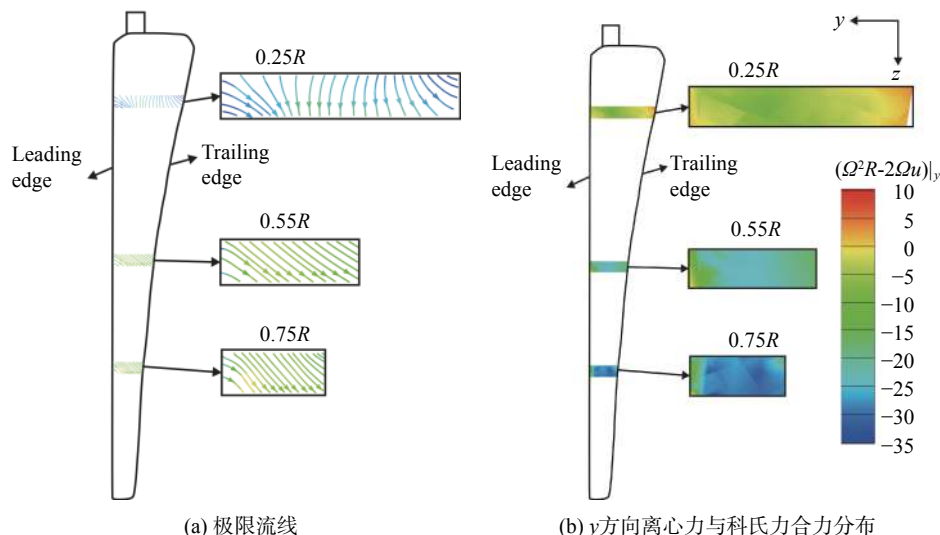


图8 水平轴风力机叶片 PIV 风洞实验的流动显示结果 (叶尖速比为 3)^[49]

Fig. 8 Flow visualisation of the PIV measured windtunnel experimental data for the horizontal-axis turbine (tip speed ratio $TSR = 3$)^[49]

$C_{L,3D}$ 、 $C_{D,3D}$ 为修正后叶片剖面的升力、阻力系数。式(1)右端的第二项是修正模型所要确定的量,根据其确定方式又可将修正模型大致分为两类:第一类是针对 F_L 和 F_D 建模,较为常用的有 Snel、Chaviaropoulos-Hansen、Du-Selig 模型等;第二类针对 ΔC_L 和 ΔC_D 建模,包括 Corrigan-Schillings、Lindenburg、Bak 模型等^[5]。南京航空航天大学、华北电力大学、兰州理工大学团队近年来也相继开展了考虑旋转效应的风力机三维非定常气动特性研究^[50]。

尽管国内外已经开展了大量的研究工作,但三维旋转效应的流动机理和物理本质至今仍未被透彻理解^[5]。表现在:首先,旋转效应对剖面阻力的影响至今没有形成统一的认知;其次,工程计算中使用修正模型预测叶尖附近气动力时,计算结果通常大于实验值,误差原因目前尚不清楚,亟需未来开展深入研究。

3.1.3 动态失速修正模型

实践表明,风力机叶片约 70%(失速型风力机)或 30%(变速型风力机)的时间处于失速运行状态,使其气动特性存在高度非定常性。失速的基本物理机制是流动分离,而分离的形成和发展需要一定的时间,并依赖其历史流动状态,因此在相同迎角下的分离区流动,动态和静态有别^[2]。例如:动态失速迎角明显大于静态失速迎角,即失速延迟;动态失速的分离涡要比静态失速的分离涡更严重,且更为顽强持久。动态失速产生的气动力迟滞,对风力机的输出功率、结构疲劳强度都有负面影响^[51],在风力机设计与研究中应予以充分考虑。

针对该现象,在实验研究方面,1995 年 Ramsay 等^[52]测量了 NREL S809 翼型绕 1/4 弦向位置俯仰振荡所

产生的气动力,研究了多种工况(不同平均迎角、振幅迎角、缩减频率、雷诺数)下的动态失速特性,为后续数值模拟和工程模型的验证提供了可靠数据。之后,Sheng 等^[53]同样研究了 NREL S809 翼型的静态、动态失速特性,还研究了翼型以恒定角速度上仰/下俯运动的动态失速行为。近年来,Disotell 等^[54]采用新型的表面测量技术,对 DU97-W-300 翼型开展了静态和动态失速研究,获得了可视化流场及定量的气动数据。需要注意的是,在风洞实验中,目前动态失速的产生形式主要是翼型绕 1/4 弦向位置俯仰振荡;然而这只能代表部分运动形式(如叶片变桨或气动弹性扭转)产生的动态失速历程。对于叶片周围流场结构变化(如塔影效应、风剪切、尾流干扰等)产生的动态失速,是否可以等效为俯仰振荡,仍需进一步的详细研究。

在数值计算方面,为了快速、准确评估动态载荷对风力机叶片结构的影响,通常的做法是:基于静态翼型数据,采用经验或半经验的动态失速模型描述失速延迟和气动力迟滞效应。其中,在水平轴风力机上使用较为广泛的是 Leishman-Beddoes(L-B)模型^[4],最早是基于直升机翼型提出的。之后,针对风力机翼型与直升机翼型的诸多不同,Gupta 进一步改进 L-B 模型,使其更适用于风力机专用翼型的非定常气动力预测。2013 年,Pereira 等^[55]修正了前缘分离流动模块,并在 MEXICO 风力机上证实了修正 L-B 模型可提高偏航工况下叶片气动力的预测精度。2020 年,朱呈勇等^[5]在 Gupta L-B 模型的基础上进一步改进,得到了与实验值整体上吻合较好的预测结果(尤其是迟滞环大小和下俯段气动力),如图 9 所示。

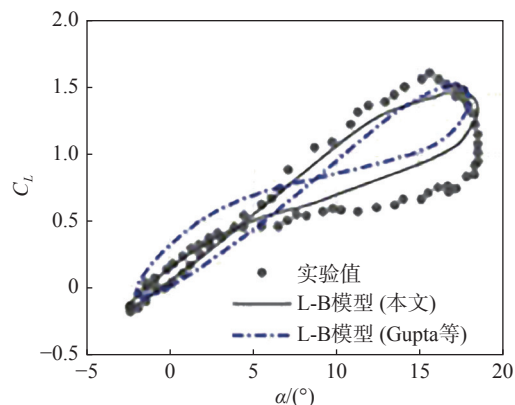


图9 基于动态失速模型预测到的NREL S809翼型升力系数迟滞环与实验值对比 ($8^\circ \pm 10^\circ$, $k = 0.078$)^[5]

Fig. 9 Comparison between the lift force curve obtained with dynamic stall models and experimental measurement for the NREL S809 airfoil ($8^\circ \pm 10^\circ$, $k = 0.078$)^[5]

尽管前人已针对性地开展了一些改进研究,但仍存在部分问题未得到很好的解决。面临的主要挑战为:(1)动态失速开始的迎角与相应的 C_L 难以准确预测;(2)流动再附阶段的气动力难以准确预测;(3)难以兼顾考虑三维效应的影响。这为后续的模型改进工作提供了指导方向。

3.2 涡尾迹方法

涡尾迹方法(VWM)是基于涡流理论建立的一种风力机气动性能分析方法,其指出尾涡的发展形状和强度决定着叶片性能。图10给出了叶片尾迹的离散示意图^[56]。尾涡形状的描述是涡尾迹方法的关键,目前主要归纳为预定涡尾迹模型和自由涡尾迹模型两类。前者是基于大量尾流数据建立尾迹形状描述函数,描述函数可以是诱导速度因子或叶片环量的函数,然后根据尾迹形状计算新的诱导速度场和环量分布,反复迭代直至流场收敛。1987年,Kocurek^[57]将预定尾迹与升力面方法耦合。1999年,Dumitrescu等^[58]将预定尾迹与升力线方法耦合。2000年前后,Wang^[59]和Coton^[60]也发展一类预定涡尾迹模型,并基于此开展了大量研究,如计算偏航状态下非定常气动力,评估塔影效应对下风向风力机的影响,研究三维旋转效应模型在该模型中的应用等。上述结果表明,预定涡尾迹模型可以较好预测风力机的气动力,具有计算效率高的优势,一般用于与动态失速模型耦合、快速计算叶片的气动特性等^[60-62]。但同时预定涡尾迹模型也存在一些不足,比如:尾迹几何形状的建立密切依赖于大量实验和计算,具有很强的经验因素;不能模拟尾迹形状的畸变和叶尖涡的卷起。这些均限制了预定涡尾迹模型的发展和应用。

与之不同的是,自由涡尾迹模型不需要涡元位置

的形状,因此能够计算尾迹的畸变和卷起。它有着更严格的理论支撑和更好的普适性,成为风力机气动特性分析的重要方法。特别地,近年来随着风力机尺寸的大型化以及海洋化发展,风力机气动力的非定常效应越来越显著,此时,自由涡尾迹方法的优越性得到进一步体现,相关研究和应用也越来越多。例如,Xu等^[63]采用三阶精度时间推进算法,并将三维旋转效应模型和动态失速模型耦合到自由涡尾迹模型中进行气动特性计算。Shen等^[64]采用自由尾迹模型计算了海上漂浮式风力机在预设运动下的非定常气动性能。Rodriguez等^[65]将自由涡尾迹与气动弹性算法相结合,模拟了海上风力机与尾流的相互作用。此外, Lee等^[66]对其进行改进,提出了非线性涡格升力面方法,用于描述叶片在较大迎角变化范围内的非线性失速和后失速行为。2021年, Greco等^[67]提出了一种自由涡尾迹与面元法耦合的气动特性计算方法,并以MEXICO叶片在轴流/偏航工况下的实验数据为基准进行了精度测试。上述研究一定程度上促进了自由涡尾迹模型精度和鲁棒性的改善。在后续研究中,除了继续提高计算准确度(比如与动态失速模型、三维旋转效应模型相结合),还应进一步降低计算量,使其满足风力机日常气动设计需求。

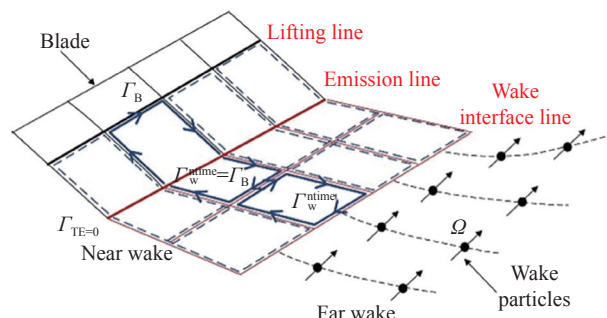


图10 自由涡尾迹方法的尾迹离散示意图^[56]

Fig. 10 Layout of the free-wake modelling of a blade^[56]

总之,相较于BEM方法,涡尾迹方法具有更宽的适用范围,可以计算非定常及偏航工况下的风力机气动特性。此外,实际上,尾涡耗散与环境流场相关,且随着叶片载荷的不同而有着较大差别,后续还需进一步开展考虑黏性效应的涡方法研究。

3.3 计算流体力学方法

与上述两类方法相比,CFD方法对实际流场没有太多简化,而是通过数值求解流体控制方程来获得完整的流场信息,显示了其对风力机气动性能计算和流动机理分析的强大能力,因此也是风力机空气动力学研究的重要手段。

CFD计算过程中,网格生成、风力机建模和湍流

描述是其核心内容和关键技术。网格生成方面,针对旋转的风力机叶轮,主要有三种方法^[68]:(1)多重坐标系法。叶片的旋转通过动坐标系的旋转产生相对运动来实现,是一种准定常方法,适用于风力机轴向入流状态的流场仿真。此外,该方法只需围绕一只叶片生成网格(通过周期边界实现整个风轮的几何描述),大大降低了网格数量及对计算资源的要求。(2)滑移网格法。叶片跟随旋转区网格一同旋转,适用于非定常流场仿真。由于需要针对整个风轮,网格量的显著增多对计算资源提出了一定要求。(3)嵌套网格法。易于处理动和静部件同时存在的情况,网格处理比滑移网格更灵活,常用于包括叶轮和塔架在内的风力机整机流场的非定常模拟。

风力机建模,主要是指采用合适的模型描述风力机的存在及其对周围大气产生的影响。目前,主要有两大类方法:全尺寸直接模拟方法和致动系列方法。全尺寸直接模拟方法是指围绕真实的风力机叶片外形生成计算网格,求解流动方程以直接捕捉叶片绕流流场和计算风力机气动性能。为了精确体现叶片的几何外形以及解析/模拟叶片边界层,通常需要数千万网格以满足解析壁面(近壁模型, $y^+ < 1$)或模拟壁面(壁面函数, $y^+ \sim (30, 250)$)的需求,计算成本高,在注重效率的工程应用中可行性偏低。致动类方法是采用虚拟体积力(在控制方程中具体为动量源项)作用于流场特定区域,放弃对叶片局部流场的精细再现,大量减少了网格数量并降低了网格生成难度。但由于未准确刻画叶片外形且基于叶素理论,因此叶片气动性能的计算精度不会明显高于 BEM/VWM 方法;同时,剩余较多的计算资源可用于风力机尾流的捕捉,因此比较适用于尾迹流场计算^[2]。特别地,对于风力机尾流的大涡模拟,通常采用致动方法代替真实叶片,可显著降低网格生成难度;尤其是在大规模风电场中,需要考虑数十甚至上百台机组尾流,致动类方法的优势更为突出。

另外,湍流模拟的准确性是风力机流场 CFD 仿真的关键之一。按照能够识别的湍流尺度分辨率,主要分为直接数值模拟(DNS)、大涡模拟(LES)和雷诺平均(RANS)三类。目前 DNS 和 LES 方法在风力机上的工程应用受限于计算资源^[69];而对计算条件要求不高的 RANS 加湍流模型的方法得到工程界的普遍认可和广泛使用。特别地,2010 年美国航空航天局(NASA)针对湍流模拟方法的应用和未来发展进行了深入讨论,结论之一即是:尽管对于许多工程流动的模拟性不尽完美,基于湍流模型的 RANS 方法在未来 20 至 50 年内仍然是 CFD 的主流^[70]。特别地,湍

流模型被认为是 RANS 方法的决定因素;同样,2018 年, Durbine 在 *Annu Rev Fluid Mech* 中明确“湍流模型是应用型 CFD 方法的核心”^[70]。

湍流模型通常可归纳为两类:涡黏性模型(EVM)和雷诺应力模型(RSM)。对于前者,风力机气动特性研究中常用的模型包括 S-A、 $k-\varepsilon$ 、SST $k-\omega$ 、转捩型 SST($\gamma-Re_\theta$)等。已开展的相关工作包括: Zhang 等^[71]基于 S-A 模型开展了仿生构型 Phase VI 叶片的气动特性研究; Moshfeghi 等^[72]基于 SST $k-\omega$ 和转捩型 SST($\gamma-Re_\theta$)对 Phase VI 叶片绕流开展研究,还测试了不同近壁面网格处理方式对计算精度的影响。2019 年,文献^[73]中以 NREL 5MW 风力机为研究对象,测试了四种不同 EVM 模型对气动扭矩的预测精度;综述性文献^[74]中梳理归纳了 2002 年至 2018 年已开展的风力机气动特性研究及取得的关键成果。结果表明,RANS 方法的计算精度对湍流模型较为敏感,不同模型得到的结果不尽相同。尽管如此,经过对各湍流模型的多年不断实践、总结和摸索,一般认为 SST $k-\omega$ 模型因精度可接受、鲁棒性强等优势更适用于风力机气动性能计算;而考虑转捩现象的 SST($\gamma-Re_\theta$)模型更适用于风洞实验工况的风力机研究。总体而言,目前仍未有哪种湍流模型显示出普遍性、压倒性的优势,也就没有严格、明确的性能结论,因此有待后续进一步进行研究及确认。在这种形势下,为了确保结果的可靠性,湍流模型使用者应重视如下问题:充分了解各湍流模型的基本性能和特点,注意模型参数的选取原则,搭配正确设置的边界条件及近壁面网格处理方式,通过多种手段保证计算的收敛性等^[70]。

事实上,经典湍流模型是兼顾流体的普适性提出的,而对于风力机这一特定研究对象,其计算精度存在或多或少的不足。据此, Abdelsalam 等^[75]对比分析了两种修正型 $k-\varepsilon$ 模型在风力机气动和流场方面的改进效果; Zhong 等^[76]对 SST $k-\omega$ 模型进行修正,得到了适用于 S809 翼型和 NREL VI 叶片动态失速模拟的湍流模型系数;2020 年, Li 等^[77]提出了修正型三方方程湍流模型,用于结冰工况下的翼型失速行为预测。除上述研究之外,针对 RANS 方法的固有缺陷(对复杂的分离流及多尺度结构模拟能力不足),学者们将目光投向 DES。例如,文献^[78]中采用 DDES 方法模拟了 S809 翼型在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 迎角范围内的气动特性,相较于非定常 RANS 方法,取得了与实验数据更为靠近的结果。Qian 等^[79]提出了一种修正型 SST $k-\omega$ 模型结合 PANS 的方法用于风力机尾流研究。Rasam 等^[80]采用改进型 IDDES 方法对小型风力机的气动力、压力分布、功率等基本特性展开了研究。随

着风能领域对流动精细化模拟的需求越来越强, 学者们逐渐采用高精度高分辨率的 LES 方法。文献 [81] 采用 LES 方法精细模拟了风力机叶片与塔架之间的相互干扰效应, 为塔架结构设计提供了技术支撑。钱耀如 [82] 在其博士论文中基于 ALM-LES 方法开展了风力机非定常气动特性和流场的数值计算研究。Li 等 [83] 对风力机翼型的动态失速过程进行了 LES 数值研究, 且探索了非稳态脉冲等离子体的流动控制及机理分析。文献 [84-85] 还采用 LES 方法精确捕捉了复杂尾涡的形成和发展过程, 并基于流场进一步研究了气动噪声的产生与辐射规律, 复现了实验观测现象和结果。特别地, 在计算资源相对充足的现今时代, 应逐渐重视 LES 的作用, 借助其提供宝贵的数据库、精细化流场结构和多尺度非定常流动机理, 为湍流模型修正建模提供指导。

3.4 CFD/BEM 混合方法

BEM 方法在风力机气动特性计算方面简便快捷, 但由于无黏假设, 精度相对较低; CFD 方法能够较为全面准确地反映全流场信息, 但需大量的计算资源。文献 [86] 以新一期 MEXICO 实验选取的风力机为研究对象, 给出了前述三大类方法 (VWM、BEM、CFD) 计算得到的结果, 如图 11 所示, 图中直观地体现了 CFD 方法较其他两类模型化方法更接近实验值。

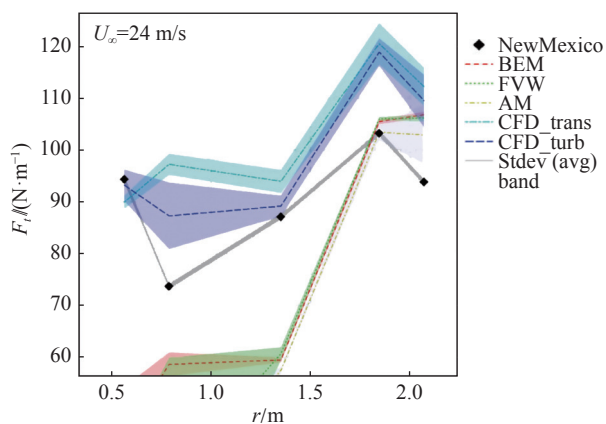


图 11 新一期 MEXICO 风力机实验: 不同计算方法 (包含 VWM、BEM、CFD) 得到的切向力随径向位置分布 [86]

Fig. 11 New MEXICO wind turbine experiment: tangential force along the radial direction for different computational methods (including VWM, BEM and CFD) [86]

为了综合利用 CFD 方法高精度及 BEM 方法高效率的优势, 文献 [87] 采用 CFD-BEM 混合方法预测了 NREL Phase II 叶片气动特性, 如功率曲线、力和力矩等。主要做法是通过 CFD 方法计算二维叶素段在全迎角和宽雷诺数范围内的气动特性, 以此作为输入再采用 BEM 方法模拟三维流场。该混合策略较单一 CFD 方法计算效率有所提高, 且精度较 BEM 方法

可接受。类似地, Yang 等 [88] 针对 IEA Wind 的标模 MEXICO 风力机, 开展了 CFD-BEM 方法的精度校核研究, 结果表明, 该方法计算到的气动力与实验数据吻合较好, 证明了方法的有效性。2019 年, Torregrosa 等 [89] 基于 BEM-RANS 方法开展了小型失速调节型风力机设计研究, 并与常规设计流程得到的外形进行了对比分析。除上述水平轴风力机之外, 混合方法还被用于潮汐/海流涡轮机气动计算及设计 [33, 90]。

3.5 外场测试和风洞实验

一方面, 风力机绕流计算十分复杂, 前述数值计算方法的精度和适用范围尚未明确, 需要全方位的实验进行验证与确认。另一方面, 通过实验获得的数据, 可以发现新的流动现象和机理, 据此可修正计算模型, 进一步提高数值方法预测精度。因此, 实验测量 (主要包含外场测试和风洞实验两种方式) 是风力机气动性能研究的重要手段以及揭示风力机空气动力学机理的重要途径。

在外场试验方面, 1997 年起, 由国际能源署 (IEA) 发起及国际著名研究机构牵头, 先后设置了两个研究专题 (Task 14 和 Task 18) 开展外场实测研究, 获得的实验数据参见 IEA 工作报告 [91-92]。通常做法是使用探针或测风仪获取风速、风向信息 (如图 12 所示), 安装压力传感器测量旋转叶片表面的压力分布信息, 进而计算叶片气动载荷、风轮轴向推力系数和功率系数等典型气动参数, 获得实际工况下风力机的气动性能。2017 年, Schaffarczyk 等 [93] 以直径 30 m 的 E-30 风力机为研究对象, 使用 40 个压力传感器和 23 个热膜传感器阵列, 测量不同工况条件下的吸力面边界层, 并开展了流动机理研究。此外, 由 IEA 组织的 Task 29 (第四阶段, 起止时间 2018 年 1 月至 2020 年 12 月) 针对 DANAERO 2 MW 风力机开展了外场环境下的一系列研究, 基于实测数据进一步探索了大气和尾流湍流对兆瓦级风力机性能、载荷和稳定性的影响 [94]。一般来说, 理想情况下外场实测结果具有较高的可靠性和较好的实践指导意义, 能够给出风力机的整体特性 (如功率、弯矩和扭矩等)。但是, 因外场环境受诸多因素的影响, 实测结果也存在较大的不确定性因素。此外, 由于无法提供 “统一” 的风环境, 实验的重复性也较差。

相对而言, 风洞实验可以有效地控制入流和风力机运行状态, 并对绕流细节进行测量, 更有助于理解旋转叶片流动机理。文献 [34] 详细总结了 2005 至 2014 年间所开展的经典风洞实验, 综述性文献 [86] 也详细地分析了近三十年的实验研究历程及取得的重要成果, 对这部分内容本文不再详细展开论述。其

中最为经典的是 IEA 先后设置的研究专题 Task 20 (2003 至 2007 年) 和 Task 29 (2008 至 2020 年), 旨在利用风洞实验数据加深风力机气动机理的理解, 并验证和改进现有的气动计算模型。Task 20 主要是在 NASA Ames 中心开展的 NREL 全尺寸模型 (风轮直径 10.06 m 的 Phase VI 两叶片失速型风力机) 实验^[95], 实验测试了多种工况条件下的风力机性能及叶片载荷数据, 为气动计算方法及程序的验证提供了大量有价值的数据库。Task 29 在欧洲最大的低速开口风洞 DNW 中, 以直径 4.5 m 的三叶片、失速型风力机 MEXICO 为研究对象^[96], 开展了常规气动载荷和压力分布等实验, 还基于 PIV 技术开展了尾迹流场可视化实验, 获得了风轮周围流场进而分析流动机理和风力机运转规律, 同时也开展了数据分析和气动建模等研究。



图 12 IEA 任务 14/18 中的外场实验图
(采用探针测量入流角)^[86]

Fig. 12 IEA Task 14/18 facility with probes^[86]

特别地, 围绕 NREL Phase VI 和 MEXICO 风洞实验, 针对轴流和偏航入流条件, 学者对比研究了风力机的三维旋转效应、动态失速特性、动态入流响应、近尾流场特征等方面内容^[97-98]。在气动力方面, 尽管在均匀来流、无偏航的简单入流条件下, 气动力计算值与风洞实验值吻合较好, 但是一旦涉及非定常、大分离流动, 计算与实验值存在明显偏差。总体来说, 工程气动力模型由于难以刻画复杂的风力机流动特性, 预测精度偏低; 而高精度的 CFD 数值方法能捕捉复杂的流动现象, 相对而言能获得较为精确的气动力。在流动特征和流场结构方面, 叶片构型会造成流动特征上的明显差异。例如, MEXICO 叶片由于特定翼型的过渡, 在叶中区域会产生叶中涡^[96] (如图 13 所示), 因此 60% 展向剖面气动力计算值与实验值偏差较大; 而 NREL Phase VI 叶片不存在叶中涡。在三维旋转效应方面, 受叶片边界层内科氏力和离心力作用, NREL Phase VI 叶片由明显的二维后缘分离转变

为较弱的三维前缘分离; 然而, MEXICO 叶片的三维分离与对应的二维翼型分离保持一致, 均为后缘分离, 旋转效应使得叶片后缘分离点后移。这些流动特征的差别, 使得气动力模型缺乏足够的通用性和可靠性, 大大增加了建模难度。

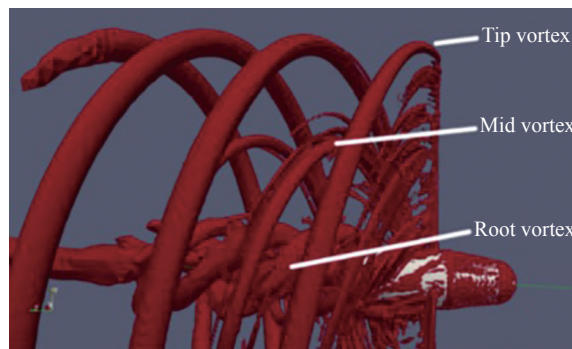


图 13 MEXICO 风力机尾涡结构^[96]

Fig. 13 Vortex structures in the wake region of the MEXICO turbine^[96]

综上所述, 前述工作一定程度上促进了风力机气动特性计算方法的完善和发展。除了上述大规模实验项目支撑之外, 国内外学者还相继开展了精细的研究型实验工作。如 Monteiro 等^[99] 针对洞壁干扰和支架干扰等因素开展了相关的数据修正研究, Li 等^[100] 开展了实验过程中的叶片气动特性不确定性分析研究。这些工作有助于实验结果的可靠性和精度的进一步提升, 可为数值方法验证提供更高质量的参考数据。

4 现代化风力机设计与流动控制

2016 年底国家能源局印发的《能源技术创新“十三五”规划》指出: “十三五”期间重点研究 8 MW~10 MW 陆/海上风电机组关键技术, 建设百万千瓦及以上规模风电场群高效运行示范工程^[101]。风电机组大型化、推动陆上及近海风电产业技术达到世界先进水平, 已成为风电技术发展的必然趋势。随之而来的叶片尺寸增大、气动弹性问题严峻、多尺度流动现象显著等问题, 使得风力机处于更加复杂的风况和载荷环境中, 加剧了叶片所承载的不均匀性和复杂性^[102]。另外, 海上风能开发利用技术近年来发展迅猛, 其风况好、风能资源能量效益高、电网接入便利、节约土地、适合大规模开发等独特优势, 使其成为风能开发的重要战略目标。下文对风力机大型化、海洋化和智能化发展过程中涉及的关键空气动力学研究进行概述。

4.1 海上风电与台风影响

现阶段海上风电已成为全球范围内的风能研发热点。海上风电项目依据所在水域深度一般分为: 潮

间带及潮下带滩涂风电场(指多年平均大潮高潮线以下至理论最低潮位以下 5 m 水深)、近海风电场(5~50 m 水深)和深远海风电场(水深大于 50 m)。“十三五”期间我国海上风电实质开发的区域主要集中在潮间带及近海风电区域^[103],学术界及工程界也陆续启动了深远海海上风电前瞻性探索工作^[104]。

2019 年 *Science* 发表了综述文章,探讨了未来风能研究中的三大挑战,并指出第二大挑战为“大型风力机空气动力学与结构力学及超大型海上风力机的流体力学问题”^[105]。海上风电与陆上风电相比,有着明显的区别:(1)来流风特性;(2)基础结构形式;(3)机组系统的水力作用。在风特性方面,海上风资源有其自身特点:风切变普遍较小、湍流强度偏低、动力粗糙度为变量、风速非平稳特性显著、风向较稳定、阵风系数小、伴有台风(飓风)等。工程实践表明,台风导致风力机结构破坏是风电场安全运行的重要威胁,海上风力机抗台风设计是保证海上风电快速发展的关键之一。因此,针对我国容易遭受台风侵袭的现状,下文将台风作为讨论的重点。

研究台风对海上风力机的作用,首先需掌握海上台风的边界层风场特性。现场实测是必不可少的手段,常采用浮标、观测塔、风廓线雷达、下探式探空仪等,记录台风过境时的风速场信息,再从统计意义上将风速变化过程转换为数值模拟和风洞实验所需的输入参数。然而,受动力粗糙度、热力效应、潮汐、波浪、水深分布等多重因素的影响,台风风场直接测量,尤其是海洋环境下的台风风场观测,难度非

常大。总体而言,基于现有研究尚未形成比较完善的海上台风风特性数据库^[103]。

另外,国内外学者还开展了大量三维台风场的数值模拟研究。Rotunno 等^[106]使用 WRF(Weather Research and Forecast)模式结合 LES 方法将台风的模拟精度提高至米量级。Ulmer 等^[107]开展了更为细致的研究,指出 WRF 的风场模拟存在一个“螺旋上升”的时间,并建议将该时间设置为 12 h。近期,中科院团队^[108]开发了 FGOALS-3 模式并对台风进行了模拟研究,指出提高模拟分辨率及解决相关物理参数化问题能够更加真实地模拟台风。此外,南京航空航天大学王浩^[101]为了填补强台风下大型海上风力机结构安全性可靠分析方法的空白,建立了中/小尺度耦合台风过境多阶段三维风速场模拟方法架构,并基于此进行了多阶段台风场模拟;以台风“黑格比”为例,给出了不同影响阶段风力机轮毂位置模拟风谱与目标谱对比(如图 14 所示),由此发现风工程规范中的常用经验谱与实际台风风谱存在显著差异。

疲劳荷载特性是风力机设计的重要问题。目前运行的风力机控制系统多数未考虑极端条件台风的影响,可能会导致风力机结构在台风作用下发生破坏甚至失效。对此,学者们相继开展了系列研究,主要是针对台风下的停机工况进行气动载荷分析及风-浪联合作用下风力机的疲劳载荷分析^[109-110]。例如, Han 等^[111]采用改进的 von Karman 谱结合实测数据,重建了台风眼壁区的流场并用于风力机的载荷模拟,发现眼壁区的载荷超过风力机的设计载荷。Tang

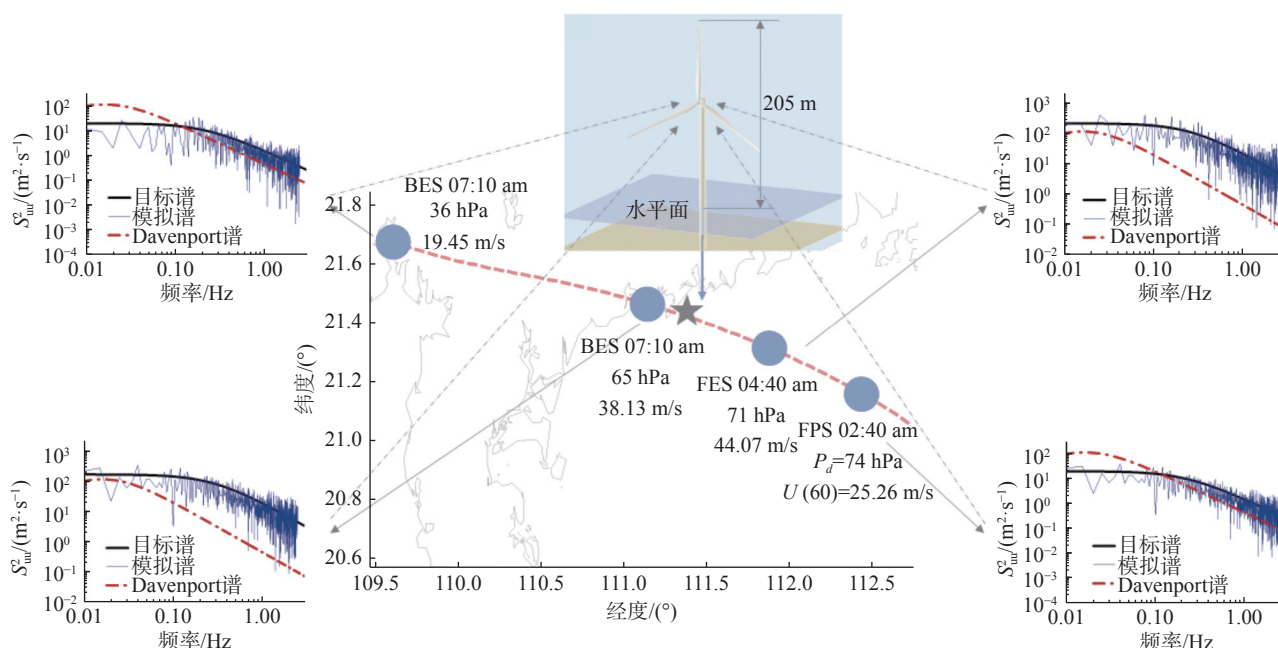


图 14 台风“黑格比”(0822)全过程风场模拟^[101]

Fig. 14 Typhoon “Hagupit” (0822) full-track simulation^[101]

等^[112]基于超强台风观测数据,分别建立了风速、风向和湍流强度模型,并基于此研究了台风作用下处于停机状态的风力机整机(包括三个叶片、机舱和塔架)的非定常载荷分布特性。Sheng 等^[113]提出了一种整体模拟的程序框架,用于评估热带气旋对海上风力机的危害及风力机失效概率,结果表明,对于半潜式风力机来说塔架屈曲及浮台倾覆为其主要失效方式。

综上所述,海上风电时代的到来为风力机空气动力学引入了新内容和问题,其中特别突出的几点归纳如下:(1)海上风资源缺乏准确评估。与陆上风资源相比,我国近海风资源的普查和详查工作还比较薄弱,尚缺乏高分辨率风能资源图谱。海上风资源数据目前多来源于船舶、石油平台、沿岸测风塔、海岛测风塔和自动气象观测站的观测资料,海上风能资源、海洋水文、地质勘测等资料的积累相对滞后。(2)海上风电机组受强风载荷、海水腐蚀、海浪潮汐等复杂环境的耦合作用,设备故障率较高。由于风电基础受复杂的水下环境影响,因此在设计过程中,需综合考虑海床地质结构、离岸距离、风浪等级、海流情况等多方面因素。(3)海上风力机叶片需采用抗台风、抗盐蚀设计。我国东南沿海为台风多发地带,台风极具破坏力,其极限风速可超过 90 m/s,对沿海风电场危害极大。因此,增强海上风力机的抗风能力是一个重要的研究内容。一方面,需采用柔性桨叶,减小台风下受力,保护机组安全;另一方面,需增加刚性塔架的壁厚,避免局部缺陷引发结构失稳。此外,我国东南沿海气候湿润,空气湿度大,沿海风电机组受盐雾腐

蚀严重,风力机气动效率明显降低,因此机组设备应当采用防腐防潮设计。(4)海上风电具有夜大昼小的日特性及冬大夏小的季特性(以广东等沿海地区为例);此外,发电功率具有波动性、间歇性的特点。这些均使得风电出力具有显著的反调峰特性,与当地电力负荷特征匹配性较差,这对电网的调节能力提出了新的挑战。

4.2 气动弹性效应

风力机是一个刚柔耦合的多体系统。随着风力机的大型化,柔性叶片在结构和气动方面表现出明显的非线性特征,由气动载荷、弹性变形和结构惯性耦合作用产生的叶片的气动弹性特性日益受到关注。气动弹性可能带来以下几方面重要影响^[2]:(1)容易引起柔性风轮、主轴、塔架等构件的耦合振动,影响风力机性能和使用寿命。(2)构件柔性变形对气动载荷的反馈及两者的耦合效应,影响风力机性能与稳定性。Kaminski 等^[114]针对 13 MW 风力机的缩比测试表明:实际运行过程中,超大型风力机叶片将会表现出非常复杂的气动弹性特性,甚至诱导产生颤振等现象。尤其是现代大型风力机,因具有叶片、主轴和塔架等部件柔性较大的特性,气弹研究具有十分重要的意义。

一般而言,柔性叶片的气动弹性模型由空气动力学模型和结构模型两部分构成,前者用来计算气动载荷,后者则决定了结构的动态响应特性,图 15 给出了典型的风力机的气动弹性建模与模拟策略示意图。叶片的气动计算模型已在前文详述。需要注意的是,

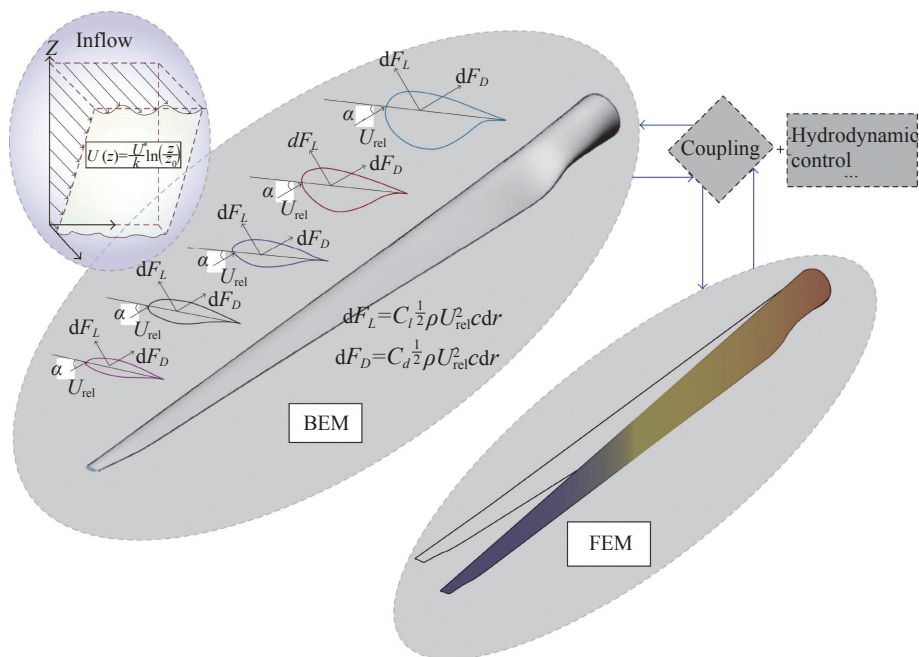


图 15 风力机的气动弹性建模与模拟策略示意图^[39]

Fig. 15 Schematic of the wind turbine aeroelastic modelling strategy^[39]

由于柔性叶片工作时会产生弯曲和扭转振动,翼型攻角随结构变形而变化,其气动载荷的非定常特性显著,应考虑动态失速效应。结构模型则可以大致分为:基于壳单元的三维有限元模型和基于梁单元的一维梁模型。三维有限元模型的准确性很高,但过高的计算成本限制了其应用范围。相比之下,梁模型兼顾了计算速度和准确度,是目前应用最广泛的柔性叶片非线性动力学模型。典型的一维梁模型有 Euler-Bernoulli 梁模型、Timoshenko 梁模型、几何精确梁模型等^[115]。文献^[116]的研究表明,几何精确梁模型由于考虑了叶片大变形产生的非线性特性,其结果更为准确。

此外,为了在实现叶片轻量化设计的同时提高叶片承载能力,现代大型风力机叶片多由高强度比、高刚度比且低密度的复合材料制造。为此,在使用一维梁模型对叶片进行气动弹性分析时,还必须考虑材料本身的性质,即对叶片的横截面性质进行分析。然而,复合材料本身的非线性特征以及复杂的拓扑结构,使得叶片的横截面准确建模变得非常困难。目前,常用的建模方法有三维有限元模型、二维有限元模型、经典层合板理论等^[6]。其中,三维有限元方法计算准确度最高,但耗时也最长;经典层合板理论准确性相对较差,但速度最快。在实际工程应用中应根据项目需求和条件进行折中选择。

4.3 流动控制和新概念风力机设计

近年来,研究人员开始关注如何利用流动控制技术改善叶片周围流动状态或改善叶片载荷分布。Aubrun 等^[117]归纳了流动控制技术应用于风力机时将带来的益处:(1)提升风力机气动性能,特别低风速条件下的发电能力;(2)降低叶片的载荷波动,进而降低诱发的疲劳损伤,缩减维护成本;(3)降低高风速条件下的极限载荷,从而减轻叶片质量,降低生产成本。因此,风力机流动控制技术近年来成为风力机流体力学研究的热点。

根据是否需要额外的能量输入,流动控制技术可分为两大类:主动流动控制技术与被动流动控制技术。主动流动控制技术有:合成射流、等离子体激励、尾缘襟翼、吹/吸气等,被动流动控制技术有:涡发生器、翼刀、凹凸前缘、格尼襟翼、后缘变形等。主动流动控制技术具有较高的可靠性和适用性,但需要额外的能量输入,因此增加了控制系统的复杂性。被动流动控制技术结构较为简单,且不需要额外的能量消耗,只着眼于叶片局部,可以以较小的结构成本换取气动性能的提升,但其无法根据流场状态调整控制策略,存在一定的局限性。各控制技术的实现途径及特

点,可参阅风力机叶片气动降载与流动分离控制技术的综述文献^[102, 118-119]。

针对风力机叶片增效的现实需求,主动流动控制技术、被动流动控制技术均可采用,其基本原理均是对流动分离的控制。Zhu 等^[50]研究了涡流发生器在风力机叶片上的控制机理;Troshin 等^[120]通过在叶片表面布置合成射流孔,有效提高了风力机发电量;Cooney 等^[121]采用等离子体技术将风力机发电功率提升了 2%~6%;李春等^[122]将自适应襟翼布置于叶片吸力面,实现了对流动分离的有效控制;Sedighi 等^[123]在叶片吸力面增加一些凹坑将扭矩最大提升了约 16.08%。值得一提的是,自适应襟翼技术因同时具备无需能量注入和附着流工况自动收回的优势,被认为是最具发展潜力的流动控制技术之一^[118]。

在实际应用中,根据风力机叶片降载的需求,主动流动控制技术应用较为常见,且多以智能叶片的形式体现^[124]。其中,最具代表性的是尾缘襟翼方式(如图 16 所示)。其基本原理是:通过一定的控制策略,控制作动器的运行,以驱动相关气动装置,精细快速地调控叶片局部载荷,从而辅助实现对叶片整体载荷的控制。国内外科研机构及企业对此开展了大量研究工作。德国联邦经济事务和能源部(BMWi)自 2012 年起先后投入了 2700 万欧元用于资助超大型风力机的智能叶片设计研究(以尾缘襟翼为主要形式),以实现多兆瓦级大型风力机在复杂工况条件下的减振、降载、增效等全方面设计指标^[125-126]。2021 年,丹麦 DTU 风能团队^[127]在外场环境下针对 4 MW 风力机开展了襟翼系统控制研究,通过测量叶片整体气动参数、载荷及动态响应,检验控制系统的降载效果。此外,其他学者还提出了在翼型尾缘布置微插片和在前缘布置缝翼的设计思路^[128],其基本设计思想是通过增加附加结构,使叶片的局部叶素从单叶素变为多叶素,以实现升力和气动效率的提升。

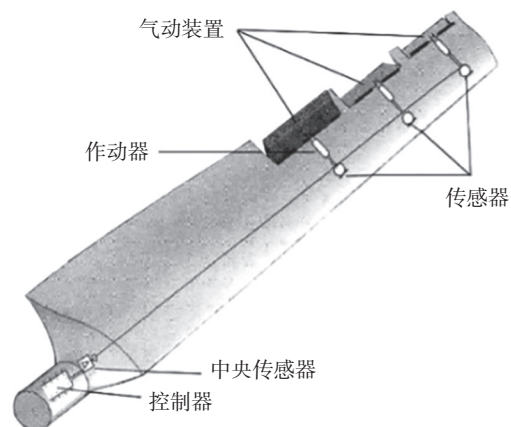


图 16 基于摆动尾缘襟翼的智能叶片示意图^[124]

Fig. 16 Smart blade with flapping trailing edges^[124]

总体而言,当前流动控制技术大多处于在研阶段,尚未在风力机叶片中得到广泛应用。主要原因为:叶片的流动控制技术,特别是主动控制技术,难以与机组的主体控制技术结合以达到相辅相成地适配总体效果;此外,部分技术的控制特点和机理,特别是真实运行工况条件下的可行性,尚不明确。因此,今后研究中应尝试主动、被动流动控制相结合的技术,以及叶片流动控制与机组主体控制相协同的先进控制策略,进一步探明流动控制机理,为工程应用提供更全面更可靠的参考。

此外,受自然界中鸟类飞行、鱼类游泳时呈现的低阻力、高升力的特性启发,许多学者借鉴动植物生理结构特征,对风力机叶片外形进行仿生设计,以提高风力机发电效率。近期突出的研究工作包括:Zhang等^[129]借鉴座头鲸鱼鳍前部的结节构造,设计不同叶片模型(图17a),从实验和数值模拟两方面分析验证了这一结构在提升叶片气动性能方面的效果。Zhong等^[130]以NREL Phase VI叶片为基础,在靠近叶片根部的位置重新设计了一种双层结构(图17b),数值模拟结果表明这种结果可以有效增加转矩,抑制叶片表面的分离流和径向流;Momeni等^[131]采用4D打印技术,通过模拟树叶的纹理结构,设计了一种新型风力机叶片(图17c),测试结果表明该叶片能够实现可逆的弯扭耦合,从而有望解决大型

柔性叶片所面临的颤振等问题。此外,有关大型水平轴风力机新型叶片结构设计方面的研究进展,可参阅清华大学团队的综述性文献^[128]。

虽然当前新概念风力机叶片的研究还处于初期,研究对象多是小型风力机,且缺乏实际外场环境下的验证,但是这一方向的研究具备广阔的发展前景,有望为解决当前大型风力机发展过程中所面临的复杂气动弹性问题提供借鉴和参考。

5 结论

全球风能产业前景广阔,各国政府不断出台鼓励政策,风电发展正在进入迅速扩张阶段。与此同时,相应的风力机技术也需蓬勃发展与革新。其中,空气动力学作为首要和关键问题,一直是风力机技术研究的重点和热点。然而,鉴于风能问题本身的特殊性和复杂性,风力机空气动力学问题亦呈现其特殊性和复杂性,面临着诸多困难及挑战。

本文以水平轴风力机为研究对象,就所涉及的关键空气动力学问题,从理论分析、风洞实验、外场测量、数值模拟和建立工程模型等方面着手,综述了国内外研究现状,并梳理和总结了已经取得的重要进展。文章主要内容归类如下:

1) 风力机空气动力特性的复杂性。重点分析了风力发电所面临的复杂、严峻的流动问题,特别指出后续风力机大型化发展将面临的新挑战。

2) 风力机翼型及其气动特性。梳理了风力机专用翼型的设计历程及特点,概述了翼型设计、优化以及翼型气动性能评估、分析相关研究方法与进展,指出了研究方法的提升空间和改进方向。

3) 风力机气动特性。从数值计算角度,以风力机气动特性相关的三大类主流计算分析方法为重点,介绍了近年来的研究进展以及在风力机设计方面的应用情况。从实验角度,列举了已开展的重要外场测试和风洞实验工作,并介绍了国际著名机构发起的具有较大影响力的研究专题。

4) 现代化风力机设计与流动控制。针对风力机大型化、海洋化和智能化的发展趋势及其带来的新问题和现象,重点阐述了海上风电和台风影响问题的研究进展,探讨了气动弹性现象及相关研究方法,分析了流动控制技术和新概念风力机设计思想,为相关研究与应用提供具体参考及实现途径。

鉴于上述关键问题,水平轴风力机空气动力学的后续研究方向和重点可归纳为:

1) 大气湍流风。风电机组运行环境高度复杂,涉

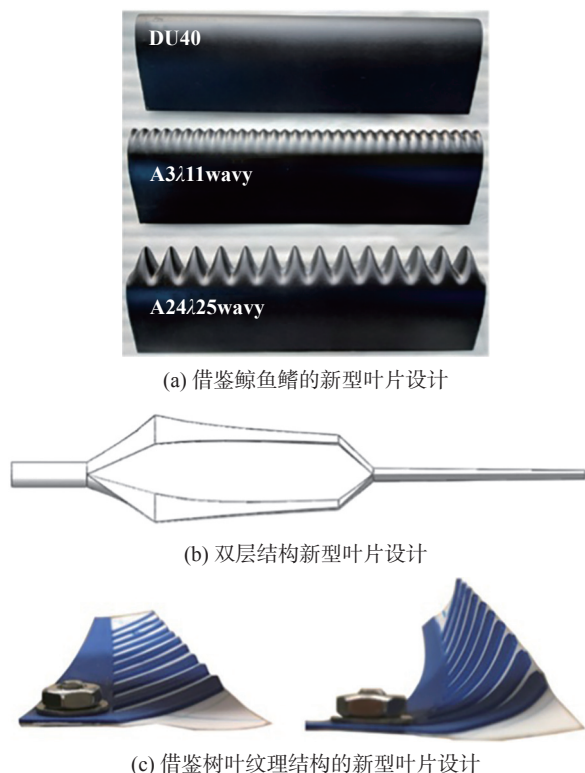


图17 各种不同类型的风力机仿生叶片设计

Fig. 17 Various types of biomimetic wind turbine blade design

及大气湍流、分离流、动态入流、动态尾流、尾流干扰等空间非均匀、时间非常常的来流条件, 这些流动又受制于大气环境、叶片/机组几何外形、运行状态及风轮气动特性等因素的影响, 形成交互融合的状态。因此, 需重点开展外场真实复杂风况的测量、仿真与建模研究, 提供准确可靠的机组运行条件和工况。

2) 风力机空气动力学的几大类研究方法。实验方面, 建立基础研究所需的测试实验平台, 设计和开展高质量的风洞和外场实验, 提供宝贵的数据库、流场结构和机理模型, 并指导数值模型的验证和改进。CFD 方面, 继续改进、完善和发展现有物理模型, 提高预测精度, 扩展适用性和预测能力, 重视高阶、高效数值算法的发展及高精度模拟手段(如 DES 和 LES 技术)的应用。

总之, 风能技术是一个高度多学科交叉融合的技术。对于这类涉及多学科的不确定度较大的系统, 应当采用钱学森提出的系统工程方法, 突破传统风力机/风电场设计思路, 推进新型的系统设计方案, 开发面向未来需求的风力机/风电场, 为风电大规模发展提供重要保障。

参 考 文 献:

- [1] 搜狐网. 开发30亿风电, 引领绿色发展, 落实“30·60”目标——《风能北京宣言》发布[EB/OL]. http://www.cnenergynews.cn/huizhan/2020/10/15/detail_2020101579954.html, [2020-10-15].
- [2] 黎作武, 贺德馨. 风能工程中流体力学问题的研究现状与进展[J]. 力学进展, 2013, 43(5): 472-525.
LI Z W, HE D X. Reviews of fluid dynamics researches in wind energy engineering[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(5): 472-525 (in Chinese).
- [3] 王同光. 风力机空气动力学面临的挑战[C]//第五届全国风能技术应用年会论文集. 中国空气动力学会, 2008: 59-68.
- [4] 王同光, 钟伟, 钱耀如. 风力机空气动力学性能计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [5] 朱呈勇. 水平轴风力机叶片三维旋转动态失速特性研究[D]. 南京航空航天大学, 2020.
ZHU C Y. Three-dimensional rotational and dynamic stall of horizontal axis wind turbine blades[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [6] WANG L, LIU X W, KOLIOS A. State of the art in the aeroelasticity of wind turbine blades: Aeroelastic modelling[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 64: 195-210.
doi: 10.1016/j.rser.2016.06.007
- [7] 孙振业. 大型海上风力机叶片气动与结构设计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [8] TIMMER W A, BAK C. 4-Aerodynamic characteristics of wind turbine blade airfoils[M]//BRØNDSTED P, NIJSSEN R P L. *Advances in wind turbine blade design and materials*. Woodhead Publishing, 2013: 109-149.
doi: 10.1533/9780857097286.1.109
- [9] VAN ROOIJ R, TIMMER N. Design of airfoils for wind turbine blades[EB/OL]. http://gcep.stanford.edu/pdfs/energy_workshops_04_04/wind_van_rooij.pdf
- [10] 黎作武, 陈江, 陈宝, 等. 风力机组叶片的先进翼型族设计[J]. *空气动力学学报*, 2012, 30(1): 130-136.
LI Z W, CHEN J, CHEN B, et al. Design of advanced airfoil families for wind turbines[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, 30(1): 130-136 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.0258-1825.2012.01.023
- [11] TANGLER J L, SOMERS D M. Status of the special-purpose airfoil families[R/OL]. SERI/TP-217-3264, 1987: 229-335.
<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/3264.pdf>
- [12] DRELA M. XFOIL: an analysis and design system for low Reynolds number airfoils[C/OL]//Low Reynolds Number Aerodynamics, 1989.
http://web.mit.edu/drela/Public/papers/xfoil_sv.pdf
- [13] VAN ROOIJ R. Modification of the boundary layer in XFOIL for improved airfoil stall prediction[R]. IW-96087R. The Netherlands: Delft University of Technology, 1996.
- [14] 李星星, 杨科, 张磊, 等. 大厚度钝尾缘翼型的设计研究[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(9): 1744-1748.
LI X X, YANG K, ZHANG L, et al. Design of large thickness airfoil with blunt trailing edge[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(9): 1744-1748 (in Chinese).
- [15] WANG Q, LI D S. A new airfoil design method for wind turbine to improve maximum lift of airfoil[J]. *Wind Engineering*, 2021: 0309524X2098442.
doi:10.1177/0309524x20984428
- [16] 吴江海. 大型风力机叶片及翼型优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
WU J H. Large-scale wind turbine blade and airfoil optimization design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012 (in Chinese).
- [17] BAKER J P, MAYDA E A, VAN DAM C P. Experimental analysis of thick blunt trailing-edge wind turbine airfoils[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2006, 128(4): 422-431.
doi: 10.1115/1.2346701
- [18] PAPADAKIS G, MANOLEOS M, DIAKAKIS K, et al. DES vs RANS: The flatback airfoil case[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2020, 1618: 052062.
doi: 10.1088/1742-6596/1618/5/052062
- [19] 吕文春, 汪建文, 段亚范, 等. 翼型凹变对风轮旋转噪声影响特性分析[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(1): 45-51,85.
LYU W C, WANG J W, DUAN Y F, et al. Effects of airfoil concave change on rotating noise of wind turbine[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(1): 45-51,85 (in Chinese).
- [20] 乔晨亮, 许和勇, 叶正寅. 钝后缘风力机翼型的环量控制研究[J]. *力学学报*, 2019, 51(1): 135-145.
QIAO C L, XU H Y, YE Z Y. Circulation control on wind turbine airfoil with blunt trailing edge[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 135-145 (in Chinese).
doi: 10.6052/0459-1879-18-164
- [21] MILLER M, LEE SLEW K, MATIDA E. The development of a flatback wind turbine airfoil family[J]. *Wind Energy*, 2018, 21(12): 1372-1382.
doi: 10.1002/we.2260
- [22] LI X X, ZHANG L, SONG J J, et al. Airfoil design for large horizontal axis wind turbines in low wind speed regions[J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 2345-2357.
doi: 10.1016/j.renene.2019.07.163
- [23] 吴蔚, 杨科, 张磊, 等. 6 MW大厚度钝尾缘风电叶片结构分析[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(6): 1074-1078.
WU W, YANG K, ZHANG L, et al. Structure analysis of 6 MW wind turbine blade with large thickness and blunt trailing edge[J]. *Journal of*

- Engineering Thermophysics, 2013, 34 (6): 1074–1078 (in Chinese).
- [24] WEN H, SANG S, QIU C H, et al. A new optimization method of wind turbine airfoil performance based on Bessel equation and GABP artificial neural network[J]. *Energy*, 2019, 187: 116106. doi: 10.1016/j.energy.2019.116106
- [25] PEERINGA J, BROOD R, CEYHAN O, et al. Upwind 20 MW wind turbine pre-design[R/OL]. ECN-E-11-017, 2011. <https://publications.tno.nl/publication/34629096/7MK62j/e11017.pdf>
- [26] PIRES O, MUNDUATE X, CEYHAN O, et al. Analysis of high Reynolds numbers effects on a wind turbine airfoil using 2D wind tunnel test data[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2016, 753: 022047. doi: 10.1088/1742-6596/753/2/022047
- [27] 乔志德. 先进翼型设计技术及应用研究进展[C]//中国风能发展战略论坛. 北京: 中国工程院, 中国可再生能源学会. 2006: 206-214.
- [28] 韩忠华, 宋文萍, 高永卫. 大型风力机翼型族的设计与实验[J]. *应用数学和力学*, 2013, 34 (10): 1012–1027. HAN Z H, SONG W P, GAO Y W. Design and wind-tunnel verification of large-size wind turbine airfoils[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, 34 (10): 1012–1027 (in Chinese). doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.10.002
- [29] LIU J, ZHU W Q, XIAO Z X, et al. DDES with adaptive coefficient for stalled flows past a wind turbine airfoil[J]. *Energy*, 2018, 161: 846–858. doi: 10.1016/j.energy.2018.07.176
- [30] SOLÍS-GALLEGO I, MEANA-FERNÁNDEZ A, FERNÁNDEZ ORO J M, et al. LES-based numerical prediction of the trailing edge noise in a small wind turbine airfoil at different angles of attack[J]. *Renewable Energy*, 2018, 120: 241–254. doi: 10.1016/j.renene.2017.12.082
- [31] 侯银珠, 宋文萍, 张坤. 考虑转捩影响的风力机翼型气动特性计算研究[J]. *空气动力学学报*, 2010, 28 (2): 234–237. HOU Y Z, SONG W P, ZHANG K. Calculation of aerodynamic performance of wind turbine airfoil incorporating transition prediction[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2010, 28 (2): 234–237 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.0258-1825.2010.02.019
- [32] 陈进, 孙振业, 谢翌, 等. γ - Re_{θ} 转捩模型在风力机翼型数值计算中的应用[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2015, 36 (2): 218–221. CHEN J, SUN Z Y, XIE Y, et al. Γ - Re_{θ} transition model in numerical simulation of airfoil for wind turbine[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36 (2): 218–221 (in Chinese).
- [33] CUI W Y, XIAO Z X, YUAN X J. Simulations of transition and separation past a wind-turbine airfoil near stall[J]. *Energy*, 2020, 205: 118003. doi: 10.1016/j.energy.2020.118003
- [34] BAI C J, WANG W C. Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines (HAWTs)[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 63: 506–519. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.078
- [35] 李国强, 张卫国, 陈立, 等. 风力机叶片翼型动态试验技术研究[J]. *力学学报*, 2018, 50 (4): 751–765. LI G Q, ZHANG W G, CHEN L, et al. Research on dynamic test technology for wind turbine blade airfoil[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50 (4): 751–765 (in Chinese). doi: 10.6052/0459-1879-18-108
- [36] LI G Q, HUANG X, JIANG Y B, et al. An experimental study of the dynamic aerodynamic characteristics of a yaw-oscillating wind turbine airfoil[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31 (6): 067102. doi: 10.1063/1.5088854
- [37] LANZAFAME R, MESSINA M. Fluid dynamics wind turbine design: Critical analysis, optimization and application of BEM theory[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32 (14): 2291–2305. doi: 10.1016/j.renene.2006.12.010
- [38] LIU S, JANAJREH I. Development and application of an improved blade element momentum method model on horizontal axis wind turbines[J]. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2012, 3 (1): 1–10. doi: 10.1186/2251-6832-3-30
- [39] AGEZE M B, HU Y F, WU H C. Wind turbine aeroelastic modeling: basics and cutting edge trends[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 2017: 1–15. doi: 10.1155/2017/5263897
- [40] 王琰, 王同光. 风力机设计及其空气动力学问题[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2013, 43 (12): 1579–1588. WANG L, WANG T G. Wind turbine design and its aerodynamic issues[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43 (12): 1579–1588 (in Chinese).
- [41] ZHONG W, SHEN W Z, WANG T, et al. A tip loss correction model for wind turbine aerodynamic performance prediction[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 223–238. doi: 10.1016/j.renene.2019.08.125
- [42] GLAUERT H. *Airplane propellers*[M]//DURAND W F, ed. *Aerodynamic Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg: 169-360. doi: 10.1007/978-3-642-91487-4_3
- [43] SHEN W Z, MIKKELSEN R, SØRENSEN J, et al. Tip loss corrections for wind turbine computations[J]. *Wind Energy*, 2005, 8 (4): 457–475. doi: 10.1002/WE.153
- [44] WIMSHURST A, WILLDEN R H J. Analysis of a tip correction factor for horizontal axis turbines[J]. *Wind Energy*, 2017, 20 (9): 1515–1528. doi: 10.1002/we.2106
- [45] SCHMITZ S, MANIACI D C. Methodology to determine a tip-loss factor for highly loaded wind turbines[J]. *AIAA Journal*, 2017, 55 (2): 341–351. doi: 10.2514/1.j055112
- [46] DU Z H, SELIG M. A 3-D stall-delay model for horizontal axis wind turbine performance prediction[C]// 1998 ASME Wind Energy Symposium, Reno, NV. Reston, Virginia: AIAA. AIAA 98-16846. doi: 10.2514/6.1998-21
- [47] HIMMELSKAMP H. *Profile investigations on a rotating airscrew*[D]. Germany: Göttingen University, 1945.
- [48] SNEL H, HOUWINK R, BOSSCHERS J. *Sectional prediction of lift coefficients on rotating wind turbine blades in stall*[R]. ECN-C-93-052. Netherlands: Energy Research Center of the Netherlands, 1994.
- [49] LEE H M, WU Y H. An experimental study of stall delay on the blade of a horizontal-axis wind turbine using tomographic particle image velocimetry[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 123: 56–68. doi: 10.1016/j.jweia.2013.10.005
- [50] ZHU C Y, CHEN J, WU J H, et al. Dynamic stall control of the wind turbine airfoil via single-row and double-row passive vortex generators[J]. *Energy*, 2019, 189: 116272. doi: 10.1016/j.energy.2019.116272
- [51] SCHEPERS J G, BOORSMA K, CHO T, et al. Final report of IEA wind task 29: Mexnext (Phase 2)[R]. Energy research Centre of the Netherlands, 2014.
- [52] RAMSAY R F, HOFFMAN M J, GREGOREK G M. Effects of grit roughness and pitch oscillations on the S809 airfoil[R]. NREL/TP-442-

- 7817, 1995.
<https://www.osti.gov/servlets/purl/205563>
doi: 10.2172/205563
- [53] SHENG W N, GALBRAITH R A M, COTON F N. On the S809 airfoil's unsteady aerodynamic characteristics[J]. *Wind Energy*, 2009, 12(8): 752–767.
doi: 10.1002/we.331
- [54] DISOTELL K J, NIKOUEEYAN P, NAUGHTON J W, et al. Global surface pressure measurements of static and dynamic stall on a wind turbine airfoil at low Reynolds number[J]. *Experiments in Fluids*, 2016, 57(5): 1–15.
doi: 10.1007/s00348-016-2175-z
- [55] PEREIRA R, SCHEPERS G, PAVEL M D. Validation of the Beddoes-Leishman dynamic stall model for horizontal axis wind turbines using MEXICO data[J]. *Wind Energy*, 2013, 16(2): 207–219.
doi: 10.1002/we.541
- [56] PROSPATHOPOULOS J M, RIZIOTIS V A, SCHWARZ E, et al. Simulation of oscillating trailing edge flaps on wind turbine blades using ranging fidelity tools[J]. *Wind Energy*, 2021, 24(4): 357–378.
doi: 10.1002/we.2578
- [57] KOCUREK D. Lifting surface performance analysis for horizontal axis wind turbines[R/OL]. SERI/STR-217-3163. DE87001176.
<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/3163.pdf>
- [58] DUMITRESCU H, CARDOS V. Wind turbine aerodynamic performance by lifting line method[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 1998, 4(3): 141–149.
doi: 10.1155/s1023621x98000128
- [59] WANG T G. Unsteady aerodynamic modelling of horizontal axis wind turbine performance[D]. University of Glasgow, 1999.
<http://theses.gla.ac.uk/4039/1/1999WangPhD.pdf>
- [60] COTON F N, WANG T G. The prediction of horizontal axis wind turbine performance in yawed flow using an unsteady prescribed wake model[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 1999, 213(1): 33–43.
doi: 10.1243/0957650991537419
- [61] WANG T G, COTON F N. A high resolution tower shadow model for downwind wind turbines[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(10): 873–892.
doi: 10.1016/S0167-6105(01)00072-1
- [62] WANG T G, COTON F N. Prediction of the unsteady aerodynamic characteristics of horizontal axis wind turbines including three-dimensional effects[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2000, 214(5): 385–400.
doi: 10.1243/0957650001537958
- [63] XU B F, LIU B B, CAI X, et al. Accuracy of the aerodynamic performance of wind turbines using vortex core models in the free vortex wake method[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2019, 11(5): 053307.
doi: 10.1063/1.5121419
- [64] SHEN X, HU P, CHEN J G, et al. The unsteady aerodynamics of floating wind turbine under platform pitch motion[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2018, 232(8): 1019–1036.
doi: 10.1177/0957650918766606
- [65] RODRIGUEZ S N, JAWORSKI J W. Strongly-coupled aeroelastic free-vortex wake framework for floating offshore wind turbine rotors. Part 2: Application[J]. *Renewable Energy*, 2020, 149: 1018–1031.
doi: 10.1016/j.renene.2019.10.094
- [66] LEE H, LEE D J. Numerical investigation of the aerodynamics and wake structures of horizontal axis wind turbines by using nonlinear vortex lattice method[J]. *Renewable Energy*, 2019, 132: 1121–1133.
doi: 10.1016/j.renene.2018.08.087
- [67] GRECO L, TESTA C. Wind turbine unsteady aerodynamics and performance by a free-wake panel method[J]. *Renewable Energy*, 2021, 164: 444–459.
doi: 10.1016/j.renene.2020.08.002
- [68] LIU Z Y, WANG X D, KANG S. Stochastic performance evaluation of horizontal axis wind turbine blades using non-deterministic CFD simulations[J]. *Energy*, 2014, 73: 126–136.
doi: 10.1016/j.energy.2014.05.107
- [69] 杨祥生, 赵宁, 田琳琳. 基于改进 $k-\omega$ SST模型的风力机尾流数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(4): 920–927.
- YANG X S, ZHAO N, TIAN L L. Numerical simulation OF wind turbine wake based ON improved $k-\omega$ sst model[J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2017, 38(4): 920–927 (in Chinese).
- [70] 阎超, 屈峰, 赵雅甜, 等. 航空航天CFD物理模型和计算方法的述评与挑战[J]. *空气动力学学报*, 2020, 38(5): 829–857.
- YAN C, QU F, ZHAO Y T, et al. Review of development and challenges for physical modeling and numerical scheme of CFD in aeronautics and astronautics[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2020, 38(5): 829–857 (in Chinese).
- [71] ZHANG R K, WU V D J Z. Aerodynamic characteristics of wind turbine blades with a sinusoidal leading edge[J]. *Wind Energy*, 2012, 15(3): 407–424.
doi: 10.1002/we.479
- [72] MOSHFEGHI M, SONG Y J, XIE Y H. Effects of near-wall grid spacing on SST-K- ω model using NREL Phase VI horizontal axis wind turbine[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 107-108: 94–105.
doi: 10.1016/j.jweia.2012.03.032
- [73] MUIRURI P I, MOTSAMAI O S, NDEDA R. A comparative study of RANS-based turbulence models for an upscale wind turbine blade[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(3): 1–15.
doi: 10.1007/s42452-019-0254-5
- [74] KHLAIFAT N, ALTAEE A, ZHOU J, et al. A review of the key sensitive parameters on the aerodynamic performance of a horizontal wind turbine using Computational Fluid Dynamics modelling[J]. *AIMS Energy*, 2020, 8(3): 493–524.
doi: 10.3934/energy.2020.3.493
- [75] ABDELSALAM A M, RAMALINGAM V. Wake prediction of horizontal-axis wind turbine using full-rotor modeling[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 124: 7–19.
doi: 10.1016/j.jweia.2013.11.005
- [76] ZHONG W, TANG H W, WANG T G, et al. Accurate RANS simulation of wind turbine stall by turbulence coefficient calibration[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1444.
doi: 10.3390/app8091444
- [77] LI H R, ZHANG Y F, CHEN H X. Aerodynamic prediction of iced airfoils based on modified three-equation turbulence model[J]. *AIAA Journal*, 2020, 58(9): 3863–3876.
doi: 10.2514/1.J059206
- [78] XU H Y, QIAO C L, YANG H Q, et al. Delayed detached eddy simulation of the wind turbine airfoil S809 for angles of attack up to 90 degrees[J]. *Energy*, 2017, 118: 1090–1109.
doi: 10.1016/j.energy.2016.10.131
- [79] QIAN Y R, WANG T G, YUAN Y P, et al. Comparative study on wind turbine wakes using a modified partially-averaged Navier-Stokes method and large eddy simulation[J]. *Energy*, 2020, 206: 118147.
doi: 10.1016/j.energy.2020.118147

- [80] RASAM A, POURANSARI Z, BOLIN K, et al. Detached-eddy simulation of a horizontal axis wind turbine[M]//Progress in Hybrid RANS-LES Modelling, 2018: 357-367.
doi: 10.1007/978-3-319-70031-1_30
- [81] REN N X, OU J P. Aerodynamic interference effect between large wind turbine blade and tower[M]//Computational Structural Engineering, 2009: 489-495.
doi: 10.1007/978-90-481-2822-8_54
- [82] 钱耀如. 风力机非定常气动特性和流场的数值计算[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
QIAN Y R. Numerical study on unsteady characteristics of wind turbine aerodynamics and wake[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018 (in Chinese).
- [83] LI G Q, YI S H. Large eddy simulation of dynamic stall flow control for wind turbine airfoil using plasma actuator[J]. *Energy*, 2020, 212: 118753.
doi: 10.1016/j.energy.2020.118753
- [84] LUO K, ZHANG S X, GAO Z Y, et al. Large-eddy simulation and wind-tunnel measurement of aerodynamics and aeroacoustics of a horizontal-axis wind turbine[J]. *Renewable Energy*, 2015, 77: 351-362.
doi: 10.1016/j.renene.2014.12.024
- [85] WASALA S H, STOREY R C, NORRIS S E, et al. Aeroacoustic noise prediction for wind turbines using Large Eddy Simulation[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 145: 17-29.
doi: 10.1016/j.jweia.2015.05.011
- [86] SCHEPERS J G, SCHRECK S J. Aerodynamic measurements on wind turbines[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2019, 8(1): e320.
doi: 10.1002/wene.320
- [87] ESFAHANIAN V, SALAVATI POUR A, HARSINI I, et al. Numerical analysis of flow field around NREL Phase II wind turbine by a hybrid CFD/BEM method[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 120: 29-36.
doi: 10.1016/j.jweia.2013.06.006
- [88] YANG H, SHEN W Z, XU H R, et al. Prediction of the wind turbine performance by using BEM with airfoil data extracted from CFD[J]. *Renewable Energy*, 2014, 70: 107-115.
doi: 10.1016/j.renene.2014.05.002
- [89] TORREGROSA A J, GIL A, QUINTERO P, et al. Enhanced design methodology of a low power stall regulated wind turbine. BEMT and MRF-RANS combination and comparison with existing designs[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 190: 230-244.
doi: 10.1016/j.jweia.2019.04.019
- [90] LOMBARDI N, ORDONEZ-SANCHEZ S, ZANFORLIN S, et al. A hybrid BEM-CFD virtual blade model to predict interactions between tidal stream turbines under wave conditions[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(12): 969.
doi: 10.3390/jmse8120969
- [91] SCHEPERS J G, BRAND A, MADSEN H. Final report of IEA Annex XVIII: Enhanced field rotor aerodynamics database[R]. ECN-C-02-016, 2002.
- [92] SCHEPERS J G, BRAND A, BRUINING A, et al. , Final Report of IEA Annex XIV: Field Rotor Aerodynamics[R]. ECN-C-97-027, 1997.
- [93] SCHAFFARCZYK A P, SCHWAB D, BREUER M. Experimental detection of laminar-turbulent transition on a rotating wind turbine blade in the free atmosphere[J]. *Wind Energy*, 2017, 20(2): 211-220.
doi: 10.1002/we.2001
- [94] BANGGA G, LUTZ T. Aerodynamic modeling of wind turbine loads exposed to turbulent inflow and validation with experimental data[J]. *Energy*, 2021, 223: 120076.
doi: 10.1016/j.energy.2021.120076
- [95] HAND M M, SIMMS D A, FINGERSH L J, et al. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns[R]. NREL/TP-500-29955, 2001.
<https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/29955.pdf>
doi: 10.2172/15000240
- [96] SCHEPERS J G, BOORSMA K, CHO T, et al. Final report of IEA Task 29, Mexnext (phase 1): analysis of MEXICO wind tunnel measurements [R]. ECN-E-12-004, 2012.
- [97] SCHEPERS J G, BOORSMA K, MADSEN H A, et al. IEA Wind TCP Task 29, Phase IV: Detailed Aerodynamics of Wind Turbines[R /OL]. IEA Wind, 2021.
https://zenodo.org/record/4817875/files/Final_report_Task29_May26_with_cover.pdf?download=1
doi: 10.5281/zenodo.4817875
- [98] AHMED I, TEICH M, LAWRENZ M. 3D RANS Simulation of NREL Phase-VI and MEXICO Wind Turbines [C]. 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC2017), Dec 2017, Maui, United States.
- [99] MONTEIRO J P, SILVESTRE M R, PIGGOTT H, et al. Wind tunnel testing of a horizontal axis wind turbine rotor and comparison with simulations from two Blade Element Momentum codes[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 123: 99-106.
doi: 10.1016/j.jweia.2013.09.008
- [100] LI S N, CARACOLIA L. Experimental error examination and its effects on the aerodynamic properties of wind turbine blades[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 206: 104357.
doi: 10.1016/j.jweia.2020.104357
- [101] 王浩. 强台风过境海上风力机风速场模型及风致振动研究[D]. 南京航空航天大学, 2020.
WANG H. Investigation on Wind Speed Field Model and Wind-induced Effects on Offshore Wind Turbine under Severe Typhoon[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020 (in Chinese).
- [102] 张卫国, 史喆羽, 李国强, 等. 风力机翼型动态失速等离子体流动控制数值研究[J]. *力学学报*, 2020, 52(6): 1678-1689.
ZHANG W G, SHI Z Y, LI G Q, et al. Numerical study on dynamic stall flow control for wind turbine airfoil using plasma actuator[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(6): 1678-1689 (in Chinese).
doi: 10.6052/0459-1879-20-090
- [103] 张佳丽, 李少彦. 海上风电产业现状及未来发展趋势展望[J]. *风能*, 2018(10): 48-52.
- [104] 许移庆, 张友林. 漂浮式海上风电发展概述[J]. *风能*, 2020(5): 56-61.
doi: 10.3969/j.issn.1674-9219.2020.05.019
- [105] VEERS P, DYKES K, LANTZ E, et al. Grand challenges in the science of wind energy. Science[J]. *Science*, 2019, 366(6464): eaau2027.
doi: 10.1126/science.aau2027
- [106] ROTUNNO R, CHEN Y, WANG W, et al. Large-eddy simulation of an idealized tropical cyclone[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(12): 1783-1788.
doi: 10.1175/2009bams2884.1
- [107] ULMER F G, BALSS U. Spin-up time research on the weather research and forecasting model for atmospheric delay mitigations of electromagnetic waves[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(1): 016027.
doi: 10.1117/1.jrs.10.016027

- [108] LI J X, BAO Q, LIU Y M, et al. Effect of horizontal resolution on the simulation of tropical cyclones in the Chinese academy of sciences FGOALS-f3 climate system model[J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(10): 6113. <https://gmd.copernicus.org/articles/14/6113/2021/gmd-14-6113-2021.pdf>
doi: 10.5194/gmd-14-6113-2021
- [109] JU S H, HSU H H, HSIAO T Y. Three-dimensional wind fields of tropical cyclones for wind turbine structures[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 237: 109437.
doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109437
- [110] CHEN Y S, WU D, YU Y G, et al. Do cyclone impacts really matter for the long-term performance of an offshore wind turbine?[J]. *Renewable Energy*, 2021, 178: 184–201.
doi: 10.1016/j.renene.2021.06.044
- [111] HAN T, MCCANN G, MÜCKE T A, et al. How can a wind turbine survive in tropical cyclone?[J]. *Renewable Energy*, 2014, 70: 3–10.
doi: 10.1016/j.renene.2014.02.014
- [112] TANG D, XU M, MAO J F, et al. Unsteady performances of a parked large-scale wind turbine in the typhoon activity zones[J]. *Renewable Energy*, 2020, 149: 617–630.
doi: 10.1016/j.renene.2019.12.042
- [113] SHENG C, HONG H P. Reliability and fragility assessment of offshore floating wind turbine subjected to tropical cyclone hazard[J]. *Structural Safety*, 2021, 93: 102138.
doi: 10.1016/j.strusafe.2021.102138
- [114] KAMINSKI M, NOYES C, LOTH E, et al. Gravo-aeroelastic scaling of a 13-MW downwind rotor for 20% scale blades[J]. *Wind Energy*, 2021, 24(3): 229–245.
doi: 10.1002/we.2569
- [115] HODGES D H. Geometrically exact, intrinsic theory for dynamics of curved and twisted anisotropic beams[J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(6): 1131–1137.
doi: 10.2514/2.2054
- [116] LI Z W, WEN B R, DONG X J, et al. Aerodynamic and aeroelastic characteristics of flexible wind turbine blades under periodic unsteady inflows[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 197: 104057.
doi: 10.1016/j.jweia.2019.104057
- [117] AUBRUN S, LEROY A, DEVINANT P. A review of wind turbine-oriented active flow control strategies[J]. *Experiments in Fluids*, 2017, 58(10): 1–21.
doi: 10.1007/s00348-017-2412-0
- [118] 郝文星, 李春, 刘青松, 等. 风力机叶片气动降载与流动分离控制技术综述[J]. *热能动力工程*, 2019, 34(9): 1–13.
HAO W X, LI C, LIU Q S, et al. Review of aerodynamic load reduction and flow separation control technology for wind turbine blades[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2019, 34(9): 1–13 (in Chinese).
- [119] MOHAMED GAD-EL-HAK. *Flow control: Passive, active, and reactive flow management*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN-13: 978-0521770064
- [120] TROSHIN V, SEIFERT A. Performance recovery of a thick turbulent airfoil using a distributed closed-loop flow control system[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(1): 1–19.
doi: 10.1007/s00348-012-1443-9
- [121] COONEY J A, SZLATENYI C, FINE N E. The development and demonstration of a plasma flow control system on a 20 kW wind turbine[C]// 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, California, USA. Reston, Virginia: AIAA, 2016
doi: 10.2514/6.2016-1302
- [122] 郝文星, 李春, 丁勤卫, 等. 自适应襟翼流动分离控制数值研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(2): 536–542, 650.
HAO W X, LI C, DING Q W, et al. Numerical study on flow separation control of adaptive flap[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(2): 536–542, 650 (in Chinese).
- [123] SEDIGHI H, AKBARZADEH P, SALAVATIPOUR A. Aerodynamic performance enhancement of horizontal axis wind turbines by dimples on blades: Numerical investigation[J]. *Energy*, 2020, 195: 117056.
doi: 10.1016/j.energy.2020.117056
- [124] ZHUANG C, YANG G, ZHU Y W, et al. Effect of morphed trailing-edge flap on aerodynamic load control for a wind turbine blade section[J]. *Renewable Energy*, 2020, 148: 964–974.
doi: 10.1016/j.renene.2019.10.082
- [125] PEREZ-BECKER S, MARTEN D, PASCHEREIT C O. Active flap control with the trailing edge flap hinge moment as a sensor: using it to estimate local blade inflow conditions and to reduce extreme blade loads and deflections[J]. *Wind Energy Science*, 2021, 6(3): 791–814.
doi: 10.5194/wes-6-791-2021
- [126] BARTHOLOMAY S, WESTER T T B, PEREZ-BECKER S, et al. Pressure-based lift estimation and its application to feedforward load control employing trailing-edge flaps[J]. *Wind Energy Science*, 2021, 6(1): 221–245.
doi: 10.5194/wes-6-221-2021
- [127] GOMEZ GONZALEZ A, ENEVOLDSEN P B, BARLAS A, et al. Field test of an active flap system on a full-scale wind turbine[J]. *Wind Energy Science*, 2021, 6(1): 33–43.
doi: 10.5194/wes-6-33-2021
- [128] 杨阳, 曾攀, 雷丽萍. 大型水平轴风力机新型叶片结构设计思想和研究进展[J]. *工程力学*, 2019, 36(10): 1–7.
YANG Y, ZENG P, LEI L P. Concept and development of novel blade structure of large horizontal-axis wind turbine[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(10): 1–7 (in Chinese).
- [129] ZHANG Y N, CAO H J, ZHANG M M. Investigation of leading-edge protuberances for the performance improvement of thick wind turbine airfoil1 [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 217: 104736.
doi: 10.1016/j.jweia.2021.104736
- [130] ZHONG J W, LI J Y. Aerodynamic performance prediction of NREL phase VI blade adopting biplane airfoil[J]. *Energy*, 2020, 206: 118182.
doi: 10.1016/j.energy.2020.118182
- [131] MOMENI F, SABZPOUSHAN S, VALIZADEH R, et al. Plant leaf-mimetic smart wind turbine blades by 4D printing[J]. *Renewable Energy*, 2019, 130: 329–351. DOI: 10.1016/j.renene.2018.05.095

(本文责编: 王颖 英文编审: 杨强)