

国外航空气动技术在风力机上的应用进展

战培国*

中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000

摘要: 风力机气动技术是提高风能捕获能力的核心技术。在调研近两年国外文献资料的基础上, 概述了航空气动技术在风力机上应用的最新研究进展。主要包括水平轴大型风力机发展的新概念、垂直轴风力机专用翼型研究、各种气动技术在叶片上的应用研究、美国缩尺风场技术设备 (SWIFT) 建设和测试技术发展。目的是跟踪国外风力机气动布局概念和技术应用研究进展, 意在为我国该领域研究工作提供参考。

关键词: 风力机; 叶片; 风力机试验; 气动技术

中图分类号: V211.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 10-0008-04

为了降低风电成本, 风力机一直在向大型化发展。叶片是风力机捕获风能和风力的承载部件, 其成本约占整个风力机成本的 20%, 叶片的气动性能直接影响风力机的发电能力。目前, 额定功率 5~8MW 的大型风力机已经商业化, 10MW 以上大型风力机已经成为研究和发展目标。为了提高风力机风能捕获能力和准确评估风场性能, 众多航空气动技术成果被应用到风力机领域, 如航空多翼面机翼、后掠概念、格尼襟翼、主动流动控制、光学试验测量技术等, 借鉴这些航空技术, 国外大型风力机向创新叶片气动布局概念和优化气动性能方向发展。

1 水平轴叶片气动布局和垂直轴叶片翼型

1.1 水平轴叶片气动布局

商业化的常规气动布局叶片的水平轴风力机已发展到 8MW, 如丹麦维斯塔斯 (Vestas) 公司的 V164-8.0MW 海上风力机、德国爱纳康 (Enercon) 公司的 Enercon 7.5MW 风力机等。针对 10MW 风力机叶片的设计, 丹麦理工大学 (DTU) 与维斯塔斯公司联合开展了“轻桨叶”合作研究项目, 设计了 10MW 参考风力机^[1], 他们改进了传统的叶片设计方法, 通过采用厚翼型、叶片后掠和优化结构等措施, 设计了 10MW 参考风力机, 叶片长 89.17m, 翼型采用 FFA-W3 系列, 质量 47.9t^[1]。

然而, 传统水平轴风力机叶片的继续增长面临重量、结构刚度和气动效率等挑战。高刚度要求叶片根段采用更厚的

翼型, 而更厚的翼型在气动上面临失速、阻力增加和气动噪声等负面影响。因此, 国外出现了双 (多) 翼面叶片气动布局新概念研究。美国加利福尼亚大学、伊利诺斯大学等开展了双 / 多翼面气动布局叶片气动问题的风洞试验和数值分研究^[2,3]。

图 1 为采用 NASA SC (2) -0714 翼型的双翼面气动布

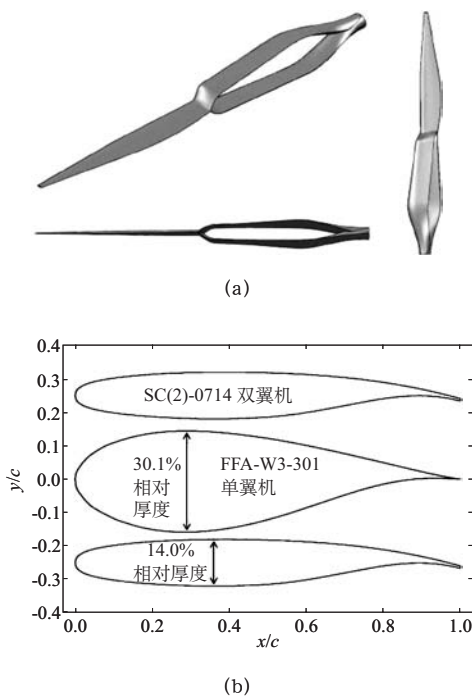


图 1 双翼面根段叶片气动布局研究
Fig.1 Biplane blade aerodynamic configuration

收稿日期: 2016-08-05; 录用日期: 2016-09-01;

* 通讯作者. Tel.: 0816-2463158 E-mail: zpg63@163.com

引用格式: ZHAN Peiguo. Application of aerodynamic technology in wind turbine abroad [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (10): 08-11. 战培国. 国外航空气动技术在风力机上的应用进展 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (10): 08-11.

局叶片构型,其单位展长横截面投影面为 0.28m^2 ,翼面间距与弦长之比为 0.5;瑞典 FFA-W3-301 翼型传统气动布局叶片构型的单位展长横截面投影面为 0.301m^2 ,二者接近,但横截面转动惯量前者比后者高一个量级,结构分析表明,在气动载荷作用下,前者翼尖的偏转比后者低 30%。气动性能研究表明,在迎角 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内,升阻比前者远高于后者。尽管二者投影面积相当,浸湿面积前者约是后者的 2 倍,但前者压差阻力和总阻力更低。

图 2 为多翼面 (2 个以上) 气动布局。多翼面气动布局通常由一个主翼、一个以上副翼和一个支撑翼构成,叶片根段采用多翼面布局能很好地满足结构刚度要求,而气动效率取决于多翼面之间的布局优化。多翼面布局研究源自飞机的襟翼,不同的是对风力机应用而言不需要可收放。风洞试

验和数值计算研究表明,多翼面布局气动性能取决于翼型、各翼面之间间距、相对倾角和位置。例如,小的翼面间距能增加流速,但过小的间距将加大之间的边界层和复杂尾流的干扰。最佳的间隙距离通常是系统弦长的 1.3%~2.0%。多翼面之间空气动力流动特性复杂,需要进一步的深入研究。

此外,常规迎风桨叶概念为了满足承受结构和气动载荷的刚度要求,随着大型风力机桨叶长度的增加,桨叶重量急剧增大、成本增加,因此,需要能保持良好的气动性能,同时降低桨叶质量的桨叶设计。背风预置桨叶概念又获得重视,研究表明,在相同条件下,这种设计概念能够降低桨叶重量 25%,减少结构破坏载荷 60% 以上。

1.2 垂直轴风力机翼型

水平轴风力机结构简洁、可靠耐用,是目前大型风力机的主要布局形式,但叶片长度增加,叶片的气动和结构问题挑战性增大。随着海上风力机、分布式风力机和城市风力机等不同环境风力发电需求的发展,垂直轴风力机在特定环境应用的优点开始重新受到重视,如风向的适应性强、低噪声、结构重心低等,在海上漂浮式大型风力机上应用有优势,因此,近年来围绕垂直轴风力机的相关研究增多。

荷兰代夫特理工大学进行了 10~20MW 垂直轴风力机研究,对“H”和“Darrieus”型结构形式进行了结构优化设计和动力学问题研究^[4],利用后缘调整片对风力机气动性能进行优化^[5],如图 3 所示;日本长冈技术科技大学采用 Kriging 响应面模型对“Darrieus”型小型风力机翼型进行气动性能优化,开展了数值和风洞试验研究^[6];荷兰代夫特理工大学、丹麦理工大学等开展了垂直轴风力机流动弯曲效应的研究^[7];美国杨百翰大学、爱荷华州立大学等开展了垂直轴风力机尾涡模型研究,以便对垂直轴风力机风场进行布局优化^[8]。

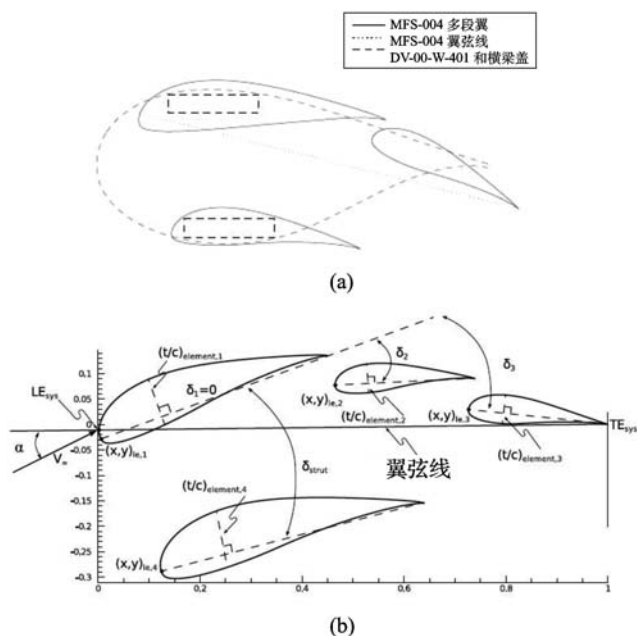


图 2 多翼面根段叶片气动布局研究
Fig.2 Multielement blade aerodynamic configuration

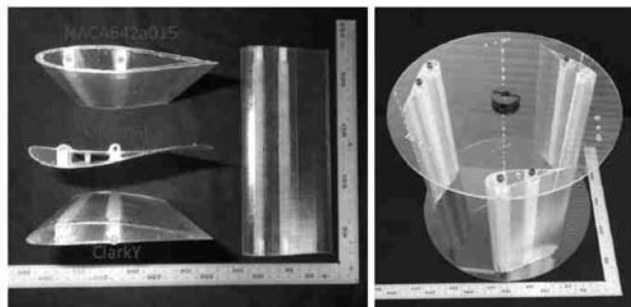
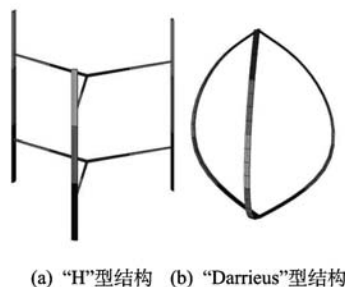


图 3 垂直轴风力机翼型优化
Fig.3 Optimum airfoil of vertical-axis wind turbine

2 水平轴大型风力机叶片气动性能改进

对大型风力机而言,为了满足结构承载要求,针对叶片根段,国外研发出了平后缘大厚度翼型,平后缘翼型截面积大,相对具有更好的抗弯扭结构特性,如图4所示。但这付出的气动性能代价就是平后缘使阻力增大,其中主要是底阻。目前,针对平后缘大厚度翼型的减阻改进研究出现,美国马里兰大学对平后缘翼型进行了沿展向的正弦波结构造型设计,以此来降低阻力并改进气动噪声^[9],通过研究波长和波幅,优化气动性能。希腊雅典国家理工大学也开展了平后缘翼型附加各种减阻装置的风洞试验研究,试验翼型采用30%厚度的厚翼型、10.6%的平后缘,对后缘减阻装置襟翼、分隔片的不同组合形式和放置位置进行了试验研究^[10]。

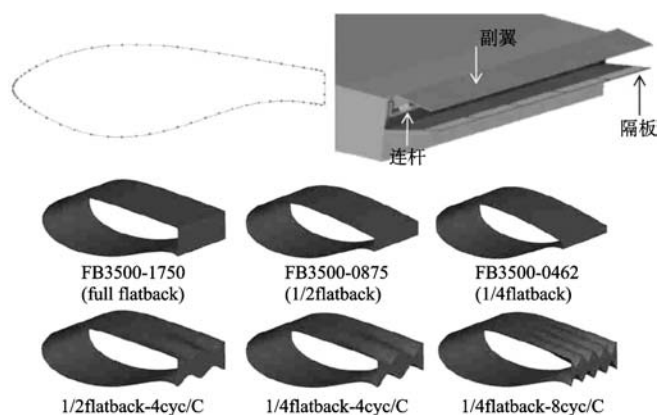


图4 叶片根段平后缘翼型减阻降噪研究

Fig.4 Research of flatback airfoil on reducing drag and noises

在叶片外段研究方面,丹麦荷兰代夫特理工大学对10MW风力机叶片外段进行了主动后缘控制研究,改进叶片不同风环境下的气动弹性性能;美国开展了涡发生器阵列控制叶片上流动分离、改善驱除叶片附着物污染能力的应用研究;除此之外,后缘小格尼襟翼改善叶片在湍流中的升力特性、小调整片改善非定常气动性能、微射流改进疲劳和极端载荷等也是研究的热点。如图5所示。

3 发展大型风力机试验场测试能力

众所周知,在飞行器试验研究中,飞行试验是风洞试验和数值模拟不可替代的重要手段之一。对由大型风力机组成的风电场而言,为了降低成本,提高风能捕获效率,需要准确了解风力机与复杂大气流动结构的干扰机理,研究风场内风力机之间的干扰,这些研究需要实地的试验场和测试技术。为了支持未来风力机和风电场发展,开展先进桨叶在气

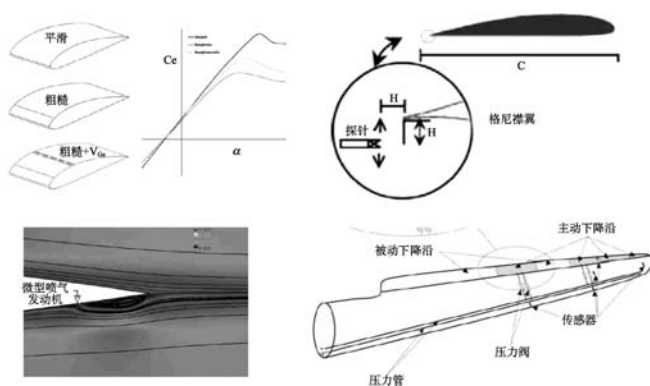


图5 叶片外段流动控制研究

Fig.5 Active flow control on outboard blade

动弹性、气动声学 and 空气动力学方面的基础研究。2013年,美国能源部风能计划和圣地亚国家实验室建设了缩尺风场技术设备(SWiFT),其主要目的是:(1)降低因风力机相互干扰造成的风场性能不足和运行/维护成本;(2)利用先进的桨叶设计,增加风能捕获,降低不平衡载荷和尾流损失;(3)通过提升对空气动力学、气动弹性和气动声学知识的认知,促进未来技术创新;(4)为风能研究领域提供一个开放的公共试验研究平台。

SWiFT主要由维斯塔斯公司提供的多台经改造的Vestas V27风力机组组成,该风力机能体现大多数兆瓦级风力机的性能特征,场地选在美国南部德克萨斯州的拉伯克。

为了改进风力机内流和尾流的速度测量能力,圣地亚国家实验室发展了尾流成像系统,如图6所示。其原理是采用多普勒全场测速方法(DGV),它能捕获瞬间大区域的速度分布图像。喷雾系统由20个喷嘴组成,示踪粒子采用氯化钾水溶液,该溶液安全且在户外容易大量制备。激光器置于运输箱内,功率300mJ/脉冲。利用该系统在SWiFT进行了测试,获得了9.8m高处、3.5m×3.5m视场的单分量速度

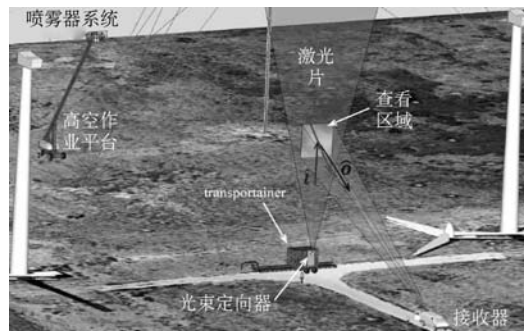


图6 尾流成像系统

Fig.6 Wake imaging system

变化图, 试验结果与其他校准测量方法(声速测量、无线电测量)进行了对比, 结果具有较好的一致性^[11]。

4 结束语

利用空气动力技术改进风力机性能, 提高风能捕获效率, 降低风电成本, 始终是气动研究领域的努力方向。10MW 以上水平轴大型风力机技术突破有待于叶片气动布局概念创新、局部气动性能改进; 垂直轴风力机在海上漂浮平台等特定领域存在结构上的优势, 相应专用翼型优化研究有增多趋势。美国能源部风能计划和圣地亚国家实验室建设的缩尺风场技术设备(SWiFT)和发展的测试技术, 则面向未来风能技术创新, 为实地研究大型风力机气动弹性、气动声学 and 空气动力学提供了一个试验平台, 为发展可靠的数值模拟分析和评估工具提供有力的支撑。

AST

参考文献

- [1] Frederik Z. Comprehensive aerodynamic analysis of a 10 MW wind turbine rotor using 3D CFD[J]. AIAA, 2014.
- [2] Richard E W. Aero-structural performance of multiplane wind turbine blades[J]. AIAA, 2011.
- [3] Chiu P K Optimal aerodynamic design of a biplane wind turbine blade[J]. AIAA, 2016.
- [4] Schelbergen M. Structural optimization of multi-megawatt,

offshore vertical axis wind turbine rotors[J]. AIAA, 2014.

- [5] Sercan E. Aerodynamic optimization of vertical axis wind turbine with trailing edge flaps[J]. AIAA, 2016.
- [6] Wataru Y. Numerical/Experimental investigation of airfoil shape for small VAWT[J]. AIAA 2016-1733.
- [7] Sander H. Flow curvature effects for VAWT: a review of virtual airfoil transformations and implementation in XFOIL[J]. AIAA, 2016.
- [8] Eric B T. Parameterized vertical-axis wind turbine wake model using CFD vorticity data [J]. AIAA, 2016.
- [9] Seung J Y. Aerodynamic drag and aeroacoustic noise mitigation of flatback airfoil with spanwise wavy trailing edge[J]. AIAA, 2015.
- [10] Marinos M. Study of drag reduction devices on a flatback airfoil[J]. AIAA, 2016.
- [11] Thomas H. Field demonstration of the sandia wake imaging system capabilities at the scaled wind farm technology facility[J]. AIAA, 2016.

作者简介

战培国(1963—)男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 空气动力学。

Tel: 0816-2463158 E-mail: zpg63@163.com

Application of Aerodynamic Technology in Wind Turbine Abroad

ZHAN Peiguo*

China Aerodynamics Research and Development Center, CARI, Mianyang 621000, China

Abstract: Wind turbine aerodynamic techniques are the key factor of improving wind energy productivity. This paper gave a literature survey on aerodynamic techniques in papers of AIAA wind energy symposiums, including new concept of horizontal-axis wind turbine, airfoil shape of vertical-axis wind turbine, some other aerodynamic techniques, and American SWiFT development. The purpose is to study oversea new configuration concept and techniques development trends, and provide references for our national development in this field.

Key Words: wind turbine; blade; wind turbine test; aerodynamic technology

Received: 2016-08-05; Accepted: 2016-09-01

*Corresponding author. Tel.: 0816-2463158 E-mail: zpg63@163.com