

大型风力机翼型族的设计与实验*

韩忠华, 宋文萍, 高永卫

(西北工业大学 航空学院, 翼型/叶栅空气动力学国家级重点实验室, 西安 710072)

摘要: 翼型是构成风力机叶片的基本要素,是风力机叶片设计的基础,发展适用于大型风力机叶片的高性能翼型,对于提高其风能捕获能力、减少重量以节约制造和运输成本、减轻惯性载荷和阵风载荷等具有重要意义.首先,回顾了上个世纪90年代以来风力机翼型族研究的发展历程,介绍了国外发展的S系列、DU系列、RISØ系列、FFA系列等翼型族.其次,针对兆瓦级大型风力机翼型设计的技术要求,介绍了西北工业大学NPU-WA翼型族的设计、风洞实验及改进.最后,给出了多兆瓦级风力机翼型族的研究展望.

关键词: 风力机翼型; NPU-WA翼型族; 翼型设计; 风洞实验

中图分类号: TK83; O355 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.10.002

引 言

风力机叶片设计技术是风力发电机组设计的一项核心技术,风力机叶片的性能决定了风力发电机的风能利用效率、载荷特性、噪声水平等.而作为叶片剖面的翼型是构成叶片外形的基本要素,是叶片设计的基础和核心技术,是决定叶片性能的最重要因素.因此,高性能风力机翼型设计,对于提高叶片风能捕获能力、降低叶片重量和系统载荷有着重要意义.

从上个世纪90年代开始,美国和欧洲进行了专用于风力机叶片的先进翼型族设计研究,发展出了S系列^[1]、DU(Delft university of technology)系列^[2]、RISØ系列^[3-4]、FFA系列^[5]、AH系列等翼型族.美国可再生能源实验室(national renewable energy laboratory, NREL)的Tangler和Somers^[1]、荷兰代尔夫特工业大学(Delft university of technology)风能研究所的Timmer和Van Rooij^[2]、丹麦RISØ国家重点实验室的Fuglsang和Bak等^[3-4]、瑞典航空研究院(FFA)的Björk^[5],均在风力机翼型族设计与风洞实验研究方面做了重要研究工作,推动了该领域的研究和发展.2005年以来,针对兆瓦级风力机,西北工业大学发展了高升力和高雷诺数(Reynolds number)的NPU-WA翼型族^[6-8],中国科学院工程热物理研究所发展了中等升力和中等雷诺数的CAS-W翼型族^[9-10],成为我国最早具有自主知识产权的大型风力机翼型族.

本文在介绍国外风力机翼型族研究状况的基础上,重点介绍了西北工业大学NPU-WA翼型族的设计、风洞实验及翼型族的改进,最后给出了多兆瓦级风力机翼型族的研究展望.

* 收稿日期: 2013-05-01; 修订日期: 2013-09-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA05Z448;2012AA051301)

作者简介: 韩忠华(1977—),男,四川资中人,教授,博士(通讯作者. Tel: +86-29-88492704; E-mail: hanzh@nwpu.edu.cn).

1 国外风力机翼型族的现状

在上世纪 90 年代以前,风力机叶片设计通常使用已有的传统航空翼型,如 4 位数字 NACA 44 系列和 NACA 63 或 64 系列翼型^[11],叶片中部和根部所需的厚翼型是通过将较薄的翼型坐标线性放大得到的。但是,由于风力机与飞机工况条件的差异,将传统航空翼型用于风力机叶片时,面临性能大大降低的问题。因此,随着风力发电的快速发展,人们认识到,传统航空翼型除了不能满足大功率风力机叶片风能利用系数和低载荷的设计需求外,还不能适应恶劣运行环境的需要。

上个世纪 90 年代以来,美国和欧洲陆续开展了风力机专用翼型研究。同时,针对风力机叶片需要采用一系列从根部到尖部的不同厚度翼型,且需要保证很好的过渡性需要(或几何兼容性),发展了各自的风力机翼型族。

1.1 美国 S 系列

在美国能源部的资助下,美国可再生能源国家实验室(NREL)1984 年开展了风力机翼型族的设计研究,到上世纪 90 年代,为各类风力机发展了不同性能的 9 个翼型族^[1]。这些翼型族是按风力机的大小及载荷控制类型分类的。载荷控制类型分为失速控制、变桨控制和变速控制。NREL 的 S 系列翼型族命名规则是按序列号命名的,由 Somers 设计,其命名规则为 S 8xx, xx 表示序列号。如 S 819、S 820、S 821 为一族翼型,适用于中等叶片长度(直径 10~20 m),功率 20 kW 到 150 kW 的失速控制型风力机。S 819 为风力机叶片主翼型,配置于 75% 叶片径向站位,相对厚度为 21%; S 820 为叶尖翼型,配置于 95% 叶片径向站位,相对厚度为 16%; S 821 为叶片根部翼型,配置于 40% 叶片径向站位,相对厚度为 24%。研究表明,新翼型的使用,大大增加了风电机组的能量输出,年发电量增加 10%~35%,其中以失速型控制风电机组增幅最大。这些翼型是针对较小的通用风力机设计的,其设计升力和最大升力系数较低。针对大型风力机叶片设计的需求,NREL 在 2005 年设计了具有高设计升力系数的 S 831 和 S 830 翼型^[12],相对厚度分别为 18% 和 21%,其计算预计的“最大”升力系数分别为 1.5 和 1.6,“设计”升力系数为 1.2。目前,尚未见到关于这些新翼型的风洞实验报道。图 1 和图 2 分别给出了用于中等叶片长度的 NREL 厚翼型和用于大尺寸风力机的 NREL 高升力翼型族。

1.2 荷兰 DU 系列

荷兰 Delft 工业大学在欧盟 JOULE 计划、荷兰能源与环境局(NOVEM)等方面资助下,发展了 DU 风力机翼型族^[2],1991 年和 1993 年相继设计了相对厚度分别为 25%、21% 的 DU 91-W2-250 和 DU 93-W-210 翼型(DU 系列翼型的命名遵循如下规则:DU yy-W(n)-xxx 中 DU 代表 Delft university of technology, yy 代表年份的后两位数字, W 代表 wind energy application, xxx 代表相对厚度百分数的 10 倍,对于 DU 91, W 后带一个数字 n, 则表示那一年对相对厚度为 25% 的翼型有多个设计。两个翼型在该校的低湍流风洞进行了雷诺数为 1.0×10^6 的风洞实验。此后又设计了 18% 厚度的 DU 95-W-180、DU 96-W-180 翼型、30% 厚度的 DU 97-W-300 翼型、35% 厚度的 DU 00-W-350 和 40% 厚度的 DU 00-W-401,形成了相对厚度 15%~40% 的 DU 翼型族^[2]。这些翼型的设计原则是:外侧翼型具有高升阻比、高的最大升力及和缓的失速特性、对粗糙度不敏感和低噪声等性能。内侧翼型适当满足上述要求,重点是考虑结构要求和几何兼容性。与传统航空翼型相比,DU 翼型对上表面厚度进行了限制,且具有低的粗糙度敏感性和后加载。目前,DU 翼型已应用于直径从 29 m~100 m、最大功率从 350 kW 到 3.5 MW 的十多种不同类型的风电机组。图 3 给出了 DU 翼型族的示意图。

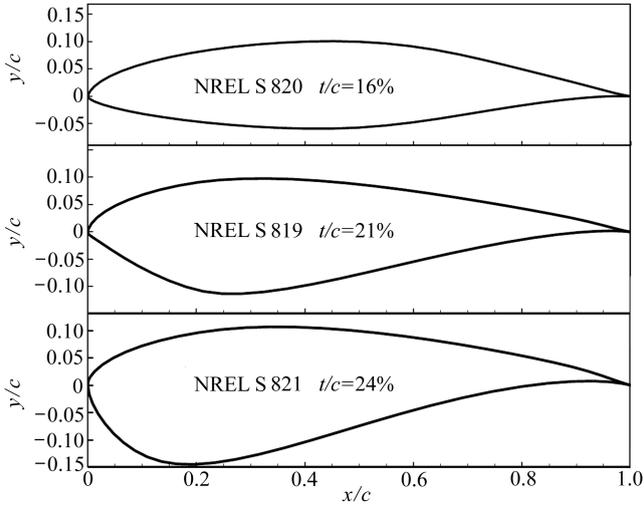


图 1 用于中等叶片长度的 NREL 厚翼型

Fig.1 NREL thick airfoils for mid-size wind turbine blades by US

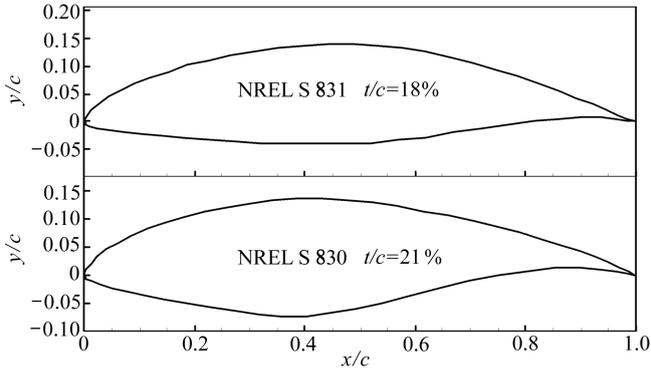


图 2 用于大尺寸风力机的美国 NREL 高升力翼型族

Fig.2 NREL high-lift airfoils for large-size wind turbine blades by US

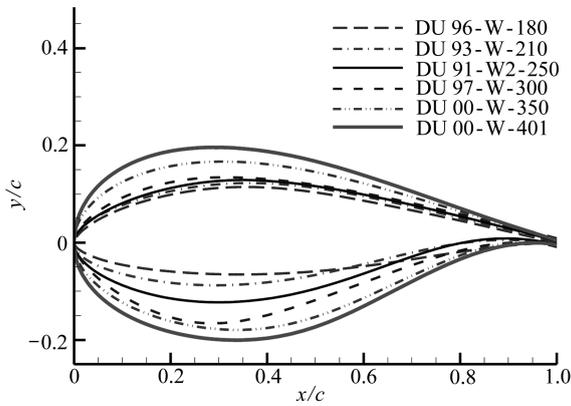


图 3 荷兰的 DU 翼型族

Fig.3 DU airfoil family developed by Holland

1.3 丹麦的 RISØ 系列

丹麦 RISØ 国家实验室 (RISØ national laboratory) 在上世纪 90 年代后期,使用计算流体力

学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法, 发展了由 RISØ-A1-18, RISØ-A1-21 和 RISØ-A1-24 三个翼型组成的 RISØ-A1 翼型族^[3], 在 VELUX 风洞中进行了雷诺数为 1.6×10^6 的风洞实验. 该翼型族主要用于 600 kW 以上的风电机组. 风场实验表明, 这些翼型非常适合于被动失速控制风力机和主动失速控制风力机, 但对粗糙度的敏感性比预期要高; 对 600 kW 主动失速控制风力发电机的风场实验表明, 在发电量相同的情况下, 疲劳载荷减少 15%, 同时还减少了叶片的重量和实度. 此外, 该实验室还设计出了 RISØ-P 族翼型和 RISØ-B1 族翼型^[4]. RISØ-P 族翼型用于变桨控制风力机, 并减小了对粗糙度的敏感性. RISØ-B1 族翼型用于变速、变桨控制的大型兆瓦级风电机组, 其相对厚度为 15% ~ 53%, 具有高的最大升力系数, 从而使更细长的叶片能保持高的气动效率. 据报道, 其中 RISØ-B1-18 和 RISØ-B1-24 两个翼型在 VELUX 风洞进行了 Re 为 1.6×10^6 的风洞实验. RISØ-B1-18 翼型的最大升力系数达到 1.64, 当使用标准粗糙带进行强制转捩后, 最大升力系数下降 3.7%, 更严重的粗糙度使最大升力系数减少 12% ~ 27%. RISØ-B1-24 翼型的最大升力系数为 1.62, 使用标准粗糙带的固定转捩使最大升力系数下降 7.4%, 结合使用涡发生器和 GURNEY 襟翼使该翼型的最大升力系数增加到 2.2. 对比研究指出: RISØ-B1 翼型族具有优良的前缘粗糙度不敏感性. 图 4、5 给出了部分 RISØ 翼型的示意图.

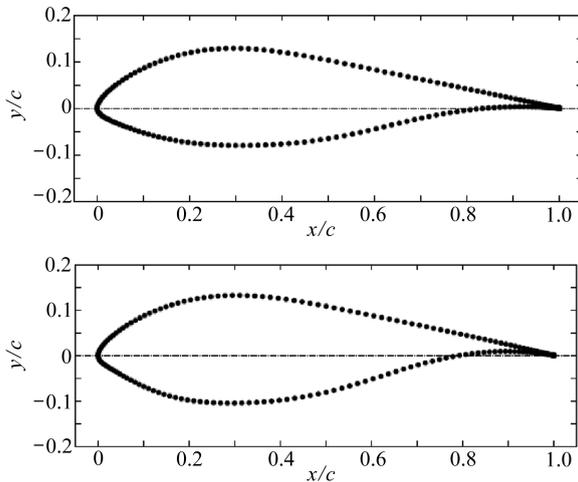


图4 丹麦的 RISØ-A1-21 翼型和 RISØ-A1-24 翼型
Fig.4 RISØ-A1-21 and RISØ-A1-24 airfoils by Denmark

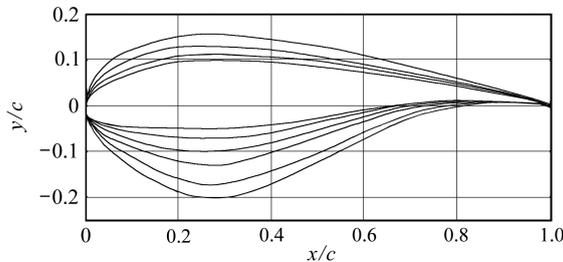


图5 丹麦的 RISØ-B1 族翼型
Fig.5 RISØ-B1 wind-turbine airfoil family by Denmark

1.4 瑞典 FFA 系列

瑞典航空研究院 (flygtekniska forsoksanstalten aeronautical research institute of Sweden) 在上世纪 90 年代设计了 FFA-W3-211 翼型以及两个较厚的翼型 FFA-W3-241 和 FFA-W3-301^[5]

(FFA 为瑞典航空研究院的缩写, W 代表 wind energy, 相对厚度分别为 21.1%、24.1%、30.1%), 并分别在 L2000 风洞和 VELUX 风洞中进行了风洞实验. 这些翼型比 NACA 翼型有更大的相对厚度和更好的高升力性能. 由于实验雷诺数低于 2×10^6 , 其高雷诺数性能需要进一步验证. 图 6 为 FFA 翼型族的示意图.

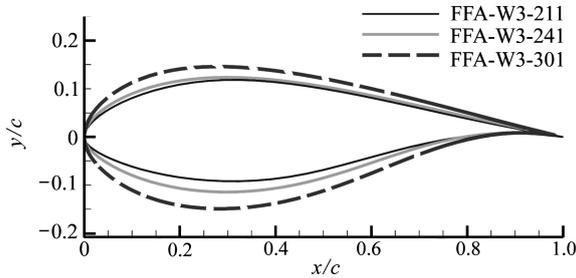


图 6 瑞典的 FFA 翼型族

Fig.6 FFA wind turbine airfoil family by Sweden

2 NPU-WA 翼型族的设计与实验

2.1 NPU-WA 翼型族设计思想、设计指标

在“十一·五”国家高技术研究发展计划(863)课题资助下,西北工业大学开展了针对兆瓦级大型风力机叶片的翼型族设计研究,设计出了 NPU-WA 翼型族.由于风力机的发电量正比于风力机叶片半径的平方,所以随风力机功率增加,风力机尺寸将会有更快的增大,更大的尺寸意味着更高的运行雷诺数、更大的重量和费用(正比于半径的 2.4 次方)、更大的阵风风载及伴随的振动和疲劳限制.因此,大型风力机叶片的主要技术要求是:减少叶片重量,以减少包括制造费用和运输成本在内的发电成本,减少惯性载荷、阵风载荷以及相应的系统载荷,提高叶片的风能捕获能力^[13].由于大型风力机在运行工况下,叶片主要剖面具有很高的雷诺数,故要求翼型在高雷诺数时具有高的气动性能.此外,大型风力机还要求翼型具有更高的设计升力系数.这是因为高设计升力系数可以减小实度(减小叶片弦长),以减小叶片面积,从而可以减小叶片重量,节约制造和运输成本,并减轻阵风载荷和惯性载荷.另外,高设计升力系数有利于在低于平均风速的使用周期内提高风能捕获能力,以增加风力机的年发电量.

NPU-WA 风力机翼型系列主要设计思想为:针对变桨或变转速型风力机,在提高风能捕获能力的同时,为减小叶片重量和载荷,要求在更高的雷诺数和更高的设计升力系数下具有: 1) 外侧翼型高的升阻比、高的最大升力系数、和缓失速特性以及对前缘粗糙度不敏感; 2) 内侧翼型高的最大升力系数、良好的结构特性和几何兼容性.

基于上述设计思想,乔志德教授等人提出的 NPU-WA 风力机翼型族设计指标如下:

1) 主翼型的设计升力系数为 1.2,设计迎角为 6° ,主翼型和叶片外侧翼型的设计升力系数等于或高于 1.2.

2) 主翼型和外侧翼型的设计雷诺数为 6×10^6 ,在高雷诺数和高升力系数设计条件下,要求 NPU-WA 翼型族的升阻比高于现有翼型.在低于 1.5×10^6 的非设计雷诺数情形下,保持与传统翼型相当的升阻比.

3) 要求 NPU-WA 翼型族的最大升力系数比传统翼型高.

4) 主翼型和外侧翼型的力矩系数接近于同类 NACA 翼型的力矩系数,内侧翼型的力矩系数不低于 -0.15.

5) 在全紊流情况下(即粗糙表面情况下),要求 NPU-WA 族翼型的升阻比高于国外同类高升力风力机翼型。此外,要求翼型的最大升力系数对粗糙度不敏感,外侧翼型的不敏感性小于 15%;内侧翼型的不敏感性小于 25%。

6) NPU-WA 族翼型相对厚度分别为 0.15, 0.18, 0.21, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40。考虑加工的需要,翼型最大厚度接近 30%弦长位置,并具有一定后缘厚度。弦长 c 取 100 时,不同相对厚度翼型的后缘厚度由表 1 给出。

表 1 NPU-WA 风力机翼型族的后缘厚度要求

Table 1 Trailing edge thickness of NPU-WA wind-turbine airfoils

relative thickness	15%	18%	21%	25%	30%	35%	40%
trailing edge thickness	0.5	0.45	0.5	0.9	1.7	2.4	3.0

2.2 NPU-WA 翼型族设计方法

综合使用了乔志德课题组多年来研究发展的翼型设计与计算方法。这些方法的详细描述请参阅所给出的相应参考文献,这里仅简介如下:

1) 反设计方法。按给定目标压力分布的翼型反设计方法,在给定较小迎角(或较低设计升力系数)时的目标压力分布条件下,设计翼型;基于亚声速速势方程的混合边界条件翼型设计方法^[14],根据部分表面给定目标压力分布,部分表面给定几何外形的设计要求,设计翼型;运用 N-S (Navier Stokes) 方程翼型设计方法,在大迎角(或高升力系数)条件下,给定目标压力分布,设计翼型,以适用于各种迎角和雷诺数。

2) 翼型数值优化设计方法。采用多目标、多约束数值优化方法,基于雷诺平均 N-S (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 方程^[15-16]、低速线化速势方程或跨声速全速势方程-附面层迭代方法,进行优化设计^[14]。优化目标是提高翼型在高升力和高雷诺数下的升阻比,并将中等升力系数、较低雷诺数等非设计条件、翼型力矩系数及翼型相对厚度作为需要满足的约束条件。

3) 人-机对话修改设计。通过计算机屏幕直接修改翼型几何外形,对修形后翼型的气动特性进行计算,检验修形效果^[17]。由于优化方法难以使翼型外形有大的改变,所以允许较大修改量的人-机对话修形是优化方法的必要补充,同时也是进行适当修形以满足非设计条件的补充手段。

4) 校核计算方法。对使用上述方法设计的翼型进行设计条件和非设计条件下的校核计算。在小迎角(或低升力)时,主要使用 XFOIL 计算软件^[17];在大迎角(或高升力系数)时,使用课题组研究发展的雷诺平均 N-S 方程计算方法^[17-18]。

图 7 给出所设计的 NPU-WA-210 翼型在设计工况下压力分布及与国外同类风力机翼型的比较。

2.3 NPU-WA 翼型族命名与几何外形

根据上述设计要求,乔志德教授等人设计的 NPU-WA 风力机翼型族对应相对厚度分别为 0.15, 0.18, 0.21, 0.25, 0.30, 0.35 和 0.40 的 7 个翼型,分别命名为: NPU-WA-150, NPU-WA-180, NPU-WA-210, NPU-WA-250, NPU-WA-300, NPU-WA-350 和 NPU-WA-400。NPU-WA 族翼型编号中的“NPU”表示该翼型族是由西北工业大学(northwestern polytechnical university)研究发展的;“WA”为表示该翼型族是为风力机设计的专用翼型;编号最后 3 位数字中的前两位表示相对厚度的百分数,最后一位“0”表示该翼型为初次设计,若为第 1 次修改设计则为 1,以此类推。图 8 给出了 NPU-WA 翼型族的几何外形。

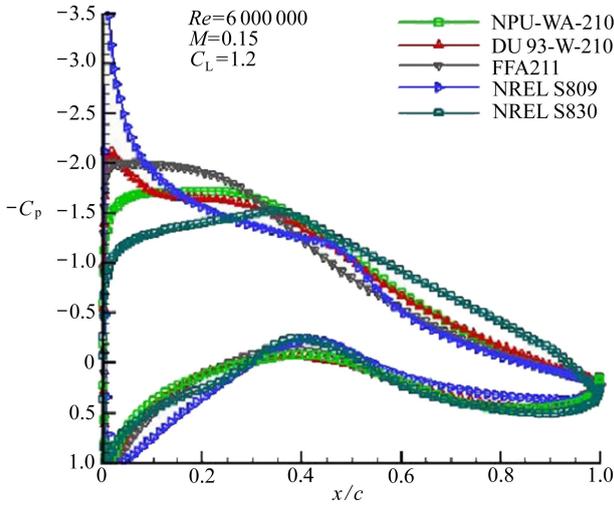


图7 设计升力系数和设计雷诺数下 NPU-WA-210 翼型压力分布及与其他相同厚度风力机翼型压力分布的比较

Fig.7 Comparison of pressure distributions between NPU-WA-210 airfoil and other wind-turbine airfoils of the same thickness at design lift coefficient and Reynolds number

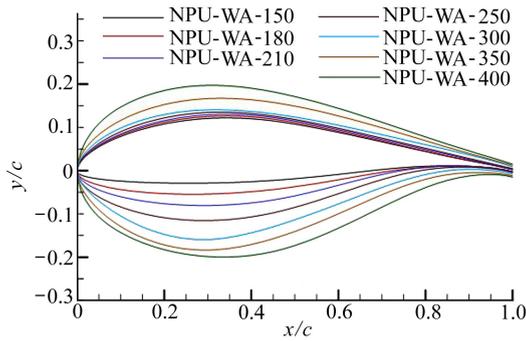


图8 NPU-WA 风力机翼型族

Fig.8 Geometries of NPU-WA wind-turbine airfoils



图9 NPU-WA 风力机翼型族试验模型(左)和在 NF-3 风洞中的安装(右)

Fig.9 Experiment models (left) of NPU-WA wind-turbine airfoils and the installation in NF-3 wind tunnel of northwestern polytechnical university (right)

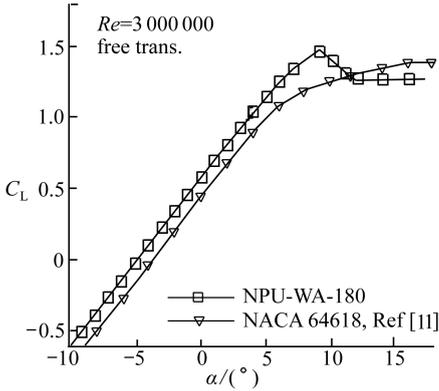
2.4 NPU-WA 翼型族的风洞实验

2009—2010 年,在西北工业大学 NF-3 低速翼型风洞对所设计翼型进行了风洞实验(如图9),

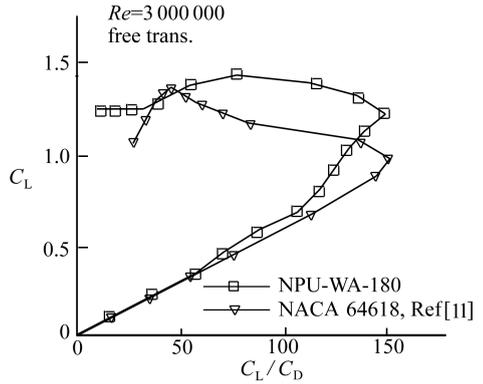
包括自由转换和固定转换实验,实验雷诺数范围覆盖 100 万到 500 万,迎角范围 -10° 至 $+20^{\circ}$,得到了约 2 000 个状态的翼型表面压力分布实验结果及尾迹测量结果.与已有国外风力机翼型较低雷诺数实验数据相比,给出了具有更高雷诺数、更完整的气动性能实验数据.限于篇幅,这里只给出了部分实验结果.

2.4.1 NPU-WA 翼型的高升力特性

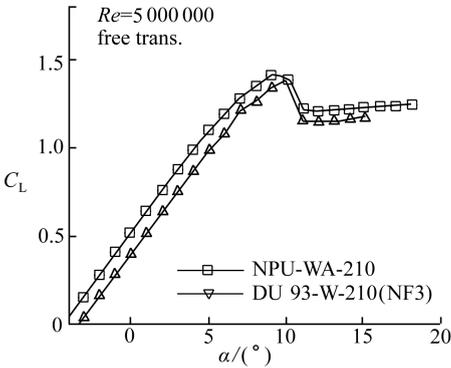
由图 10 可见,主翼型与外侧翼型具有高于 1.2 的设计升力系数,最大升阻比对应的升力很接近于最大升力是该翼型族的主要特点之一.与国外同类翼型气动特性的实验结果对比,可看出 NPU-WA 翼型族在高设计升力系数下具有高升阻比的优势.



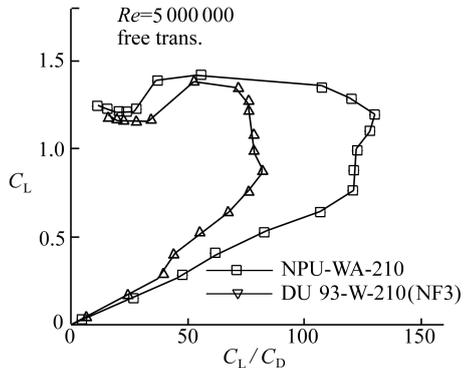
(a) NPU-WA-180 升力特性与 NACA 翼型的对比
(a) Comparison of lift curves between NPU-WA-180 and NACA 64618 airfoils



(b) NPU-WA-180 升阻比与 NACA 翼型的对比
(b) Comparison of lift-to-drag ratios between NPU-WA-180 and NACA 64618 airfoils



(c) NPU-WA-210 升力特性与 DU 翼型的对比
(c) Comparison of lift curves between NPU-WA-210 and DU 93-W-210 airfoils



(d) NPU-WA-210 升阻比与 DU 翼型的对比
(d) Comparison of lift-to-drag ratios between NPU-WA-210 and DU 93-W-210 airfoils

图 10 NPU-WA-180 翼型和 NPU-WA-210 翼型的高升力特性

Fig.10 High-lift aerodynamic performances of NPU-WA-180 and NPU-WA-210 airfoils

2.4.2 NPU-WA 翼型的高雷诺数特性

虽然由于风洞条件限制,对于 800 mm 弦长的模型,最高实验雷诺数为 500 万,没有在设计雷诺数为 600 万条件下对 NPU-WA 翼型进行验证.但与国外同类实验相比,NPU-WA 翼型族是国内外首次进行了直到 500 万雷诺数系统风洞实验的翼型族,而国外很少有雷诺数 300 万

以上的翼型族风洞实验.通过风洞实验,NPU-WA 翼型族的良好高雷诺数特性得到了验证.图 11 为 NPU-WA-210 翼型的最大升阻比在自由和固定转捩条件下随雷诺数变化曲线,以及与 DU 93-W-210 的对比.由图 11 可见,翼型的气动特性随雷诺数的变化和缓,在直到 $Re = 5.0 \times 10^6$ 时仍能保持高的升阻比.

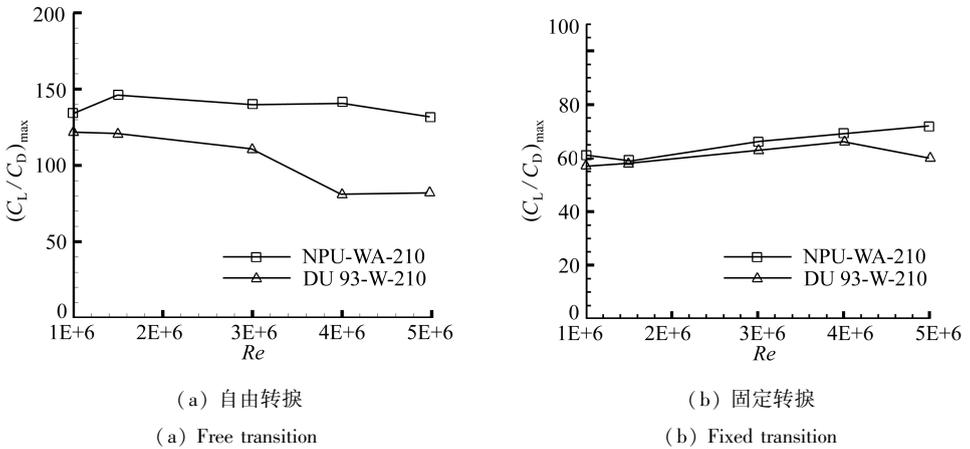


图 11 NPU-WA-210 翼型与 DU 93-W-210 翼型高雷诺数特性对比
(自由转捩和固定转捩条件下最大升阻比随雷诺数的变化)

Fig.11 Comparison between NPU-WA-210 and DU 93-W-210 airfoils at high Reynolds number

(maximum lift-to-drag ratio vs. Reynolds number under free transition and fixed transition)

2.4.3 NPU-WA 翼型最大升力系数对粗糙度的敏感性

对实验结果进行整理分析,得到了 NPU-WA 翼型的粗糙度敏感性.最大升力系数 $C_{L,max}$ 对粗糙度敏感性可定义为 $(C_{L,max,fr} - C_{L,max,fix})/C_{L,max,fr}$.下标中的“fr”表示自由转捩,“fix”表示固定转捩.一般来说,高设计升力系数和大相对厚度都会增加翼型对粗糙度的敏感性.用于叶片外侧剖面的 NPU-WA-150 和 NPU-WA-180 翼型在所有实验雷诺数范围内,最大升力系数对粗糙度的敏感性都低于 10%,分别为 0.049~0.076 和 0.052~0.095.表明其对粗糙度不敏感^[6].主翼型 NPU-WA-210 在高雷诺数下,如 $Re = 5.0 \times 10^6$ 时敏感性参数为 0.097, $Re = 3.0 \times 10^6$ 时为

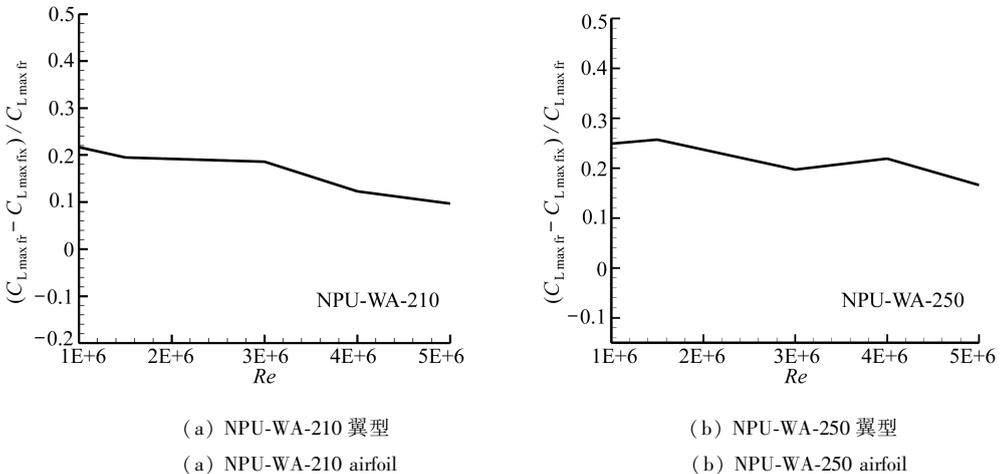


图 12 NPU-WA 翼型的粗糙度敏感性

Fig.12 Sensitivity to leading-edge roughness of NPU-WA wind-turbine airfoils

0.123(如图12),内侧翼型最大升力系数对粗糙度敏感性通常是不很重要的,可以允许较高的敏感性,但不高于25%。

2.4.4 NPU-WA 厚翼型的气动特性

由于缺乏公开发表的厚翼型的风洞实验数据可供对比,图13给出了用于叶片内侧剖面的NPU-WA-300翼型空气动力学特性风洞实验结果。

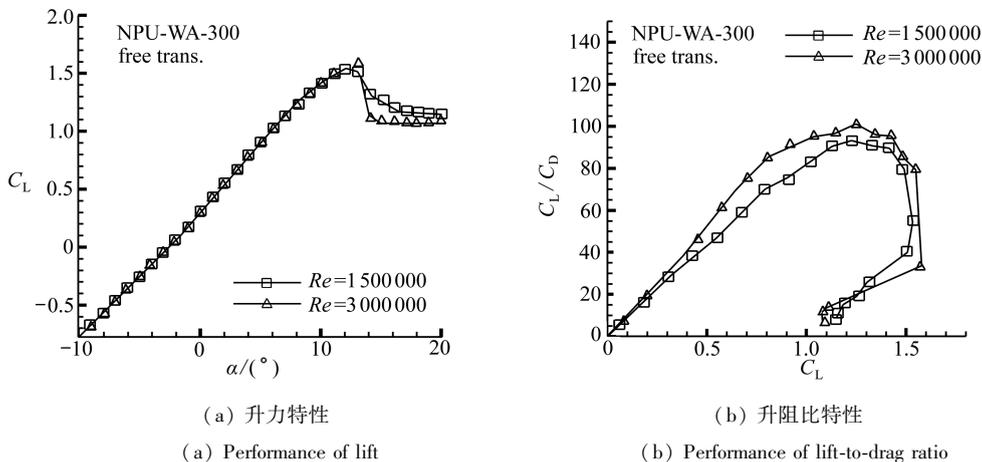


图13 NPU-WA-300翼型在不同雷诺数下的气动特性(自由转捩)

Fig.13 Performances of NPU-WA-300 airfoil at different Reynolds numbers (free transition)

3 NPU-WA 翼型族的改进与风洞实验

风洞实验表明,NPU-WA 翼型族达到了在高雷诺数、高升力系数条件下实现高升阻比和外侧翼型对粗糙度不敏感的主要设计要求,乔志德教授在充分分析风洞实验数据的基础上,指出:1) 主翼型 NPU-WA-210 在中、低雷诺数下的最大升力对粗糙度敏感性略为偏高;2) 在高升力系数和高雷诺数下风洞实验结果比理论预计转捩位置提前,导致高雷诺数时和较高升力系数下的升阻比低于设计目标,因此,为了满足工程应用的需要,需要对 NPU-WA 翼型进行进一步改进,并开展相应的风洞试验验证。

3.1 NPU-WA 翼型改进设计指标和设计方法

根据乔志德教授提出对 NPU-WA 翼型的改进思路,同时针对某直径为 110 m 的兆瓦级风力机叶片 25%厚度翼型成为主翼型的设计需求,本文作者对 NPU-WA-210 和 NPU-WA-250 翼型提出了如下的改进设计指标:

- 1) 设计升力系数 1.1~1.2,设计攻角 $5^\circ \sim 6^\circ$ 左右,设计雷诺数为 5~6 百万;
- 2) 高雷诺数和高升力系数设计条件下,改进的 21%厚度翼型 NPU-WA-210 翼型升阻比相当,并优于 DU 93-W-210 翼型;
- 3) 高雷诺数和高升力系数设计条件下,改进的 25%厚度翼型升阻比优于 NPU-WA-250 翼型,并优于 DU 93-W-250 翼型;
- 4) 改进的 21%厚度和 25%厚度翼型的最大升力系数和失速特性与改进前相当,并优于 DU 翼型;
- 5) 前缘 5%固定转捩情况下,改进的 21%厚度和 25%厚度翼型的升阻比与改进前翼型相当,并优于 DU 翼型;

6) 在中、低雷诺数(3 百万和 1 百万左右)情况下,改进的 21%厚度和 25%厚度翼型最大升力对前缘粗糙度不敏感性优于改进前翼型,接近 DU 93-W-210 翼型;

7) 改进后翼型力矩特性与改进前翼型相当,最好不小于-0.14.

小攻角(或低升力)采用 MESE 软件计算其气动特性;大攻角(或高升力)采用课题组发展的含转捩预测的 N-S 方程程序(PMNS2D).为了使所设计翼型对风洞湍流度不敏感,转捩预测 e^N 方法的 N 值取较小的值.设计中采用了课题组最新发展的基于代理模型的多目标、多约束并行优化程序“SurroOpt”^[19-23].该程序采用拉丁超立方、均匀试验设计等试验设计方法选取初始样本点,采用二次响应面、Kriging、径向基函数等方法建立代理模型^[24-27],采用遗传算法(单、多目标)、quasi Newton 方法、Hooks & Jeevs 模式搜索等求解子优化问题,采用“期望提高方法”(EI)等 5 种方法优化加点,直到获得全局最优解.该程序可求解多约束下的单、多目标全局优化问题,可实现并行优化设计,具有很高的求解效率(比直接采用遗传算法效率提高 1 个量级).

3.2 NPU-WA 改进翼型的风洞实验结果

2012 年下半年,在西北工业大学 NF-3 风洞中开展了改进后的翼型的风洞实验.为了更好地验证改进效果,同时也对改进前的翼型以及 DU 翼型进行了风洞实验,并进行了对比.实验雷诺数 1.0 百万~5.0 百万.限于篇幅,这里只给出了部分实验结果.

3.2.1 NPU-WA-210 改进翼型风洞实验

图 14 给出了 NPU-WA-210 翼型改进前后升力和升阻比特性的比较(改进后的翼型这里用 NPU-WA-210_new 表示),以及与 DU 翼型在相同风洞实验条件下的性能的比较.可看出,在 3 百万雷诺数情况下,改进后的翼型在最大升力系数和设计升力系数 1.2 下的升阻比均略有下降,但下降不明显,仍显著优于 DU 翼型.图 15 示出了 NPU-WA-210 改进翼型最大升力对前缘粗糙度敏感性因子随雷诺数变化.可见改进后,在中低雷诺数情况下,最大升力系数对前缘粗糙度敏感性显著改善,高雷诺数下与 DU 翼型相当.总之,经过风洞实验验证,改进后翼型显著降低了最大升力系数对前缘粗糙度敏感性,且保持了最大升力和升阻比特性,达到了改进设计的指标.

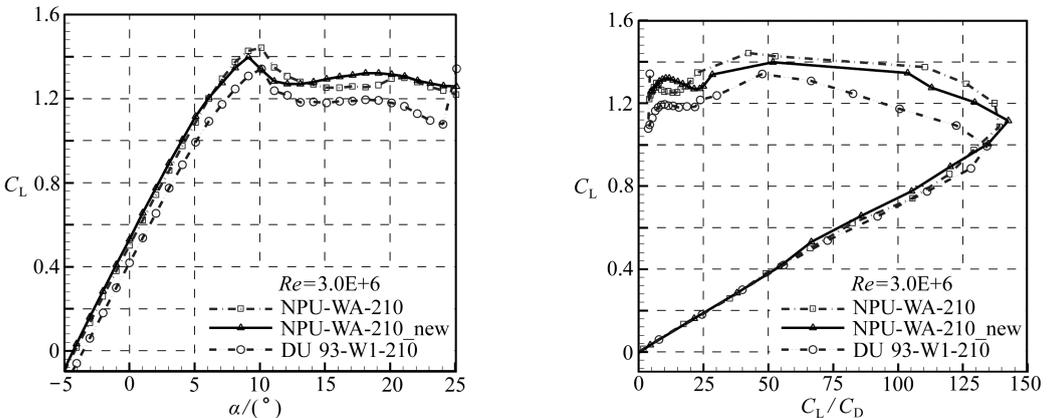


图 14 NPU-WA-210 改进翼型升力和升阻比特性 ($Re = 3.0 \times 10^6$)

Fig. 14 Lift and drag characteristics of the improved NPU-WA-210 airfoil ($Re = 3.0 \times 10^6$)

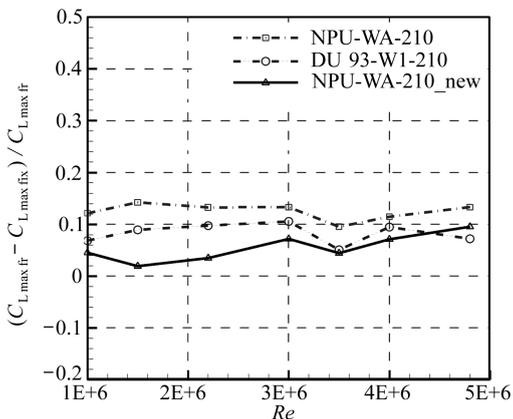


图 15 NPU-WA-210 改进翼型最大升力对前缘粗糙度敏感性

Fig.15 Sensitivity of the maximum lift to leading-edge roughness of the improved NPU-WA-210 airfoil

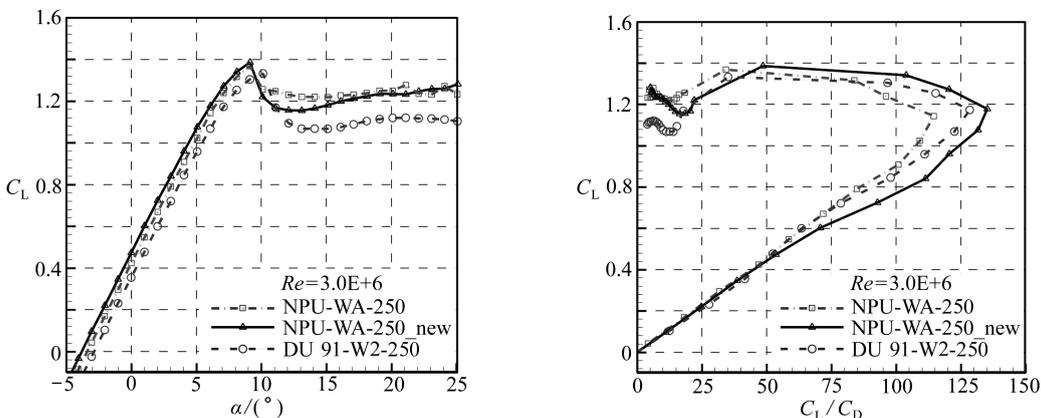


图 16 NPU-WA-250 改进翼型升力和升阻比特性 ($Re = 3.0 \times 10^6$)

Fig.16 Lift and drag characteristics of the improved NPU-WA-250 airfoil ($Re = 3.0 \times 10^6$)

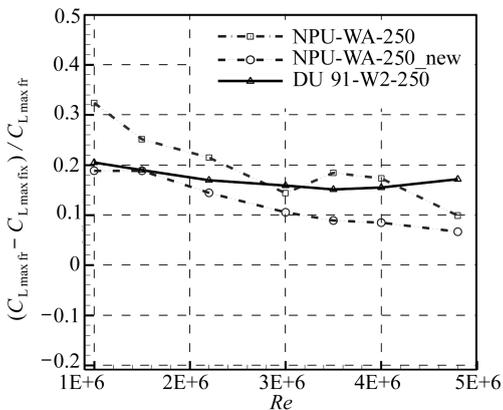


图 17 NPU-WA-250 改进翼型最大升力对前缘粗糙度敏感性

Fig.17 Sensitivity of the maximum lift to leading edge roughness of the improved NPU-WA-250 airfoil

3.2.2 NPU-WA-250 改进翼型风洞实验

图 16 给出了 NPU-WA-250 翼型改进前后升力和升阻比特性的比较(改进后翼型这里用

NPU-WA-250_new 表示), 以及与 DU 翼型在相同风洞实验条件下的性能的比较. 可看出, 在 3 百万雷诺数情况下, 改进后翼型在最大升力系数和设计升力系数 1.2 下的升阻比均有所改善, 且优于 DU 翼型. 图 17 示出 NPU-WA-250 改进翼型最大升力系数对前缘粗糙度敏感性因子随雷诺数变化; 可见改进后, 在中低雷诺数情况下, 最大升力对前缘粗糙度敏感性显著改善, 与 DU 翼型相当; 高雷诺数下与改进前相当. 总之, 经过风洞实验验证, 提高了最大升力和升阻比特性, 并降低了中低雷诺数下最大升力对前缘粗糙度敏感性, 达到了改进设计的指标.

4 多兆瓦级风力机翼型研究展望

近年来, 一方面使用兆瓦级 (1.0~3.0 MW) 风力机翼型族的风力机技术已经日趋成熟, 并且正在被制造和使用; 另一方面, 受到广泛重视的多兆瓦级风力机 (3~10 MW) 特别是海上风力机的应用前景, 对风力机设计技术提出了新的挑战. Enercon 的 6 MW, 7 MW 风力机已经在德国和比利时成功运行, Vestas 的 6 MW 风力机已经安装, 其 10 MW 风力机和 GE 的 7 MW, DOWEC 的 6 MW 风力机已在研发.

针对多兆瓦级风力机的运行特点, 需要开发更高性能的新翼型族, 要求翼型在设计雷诺数大于 9×10^6 左右时具有高的气动性能, 有更高的设计升力系数和最大升力. 其中需要突破的关键技术包括: 1) 对于外侧翼型, 需要设计在更高的雷诺数和更高设计升力系数的高性能翼型, 从而尽可能减少风力机实度和叶片弦长, 以减少叶片重量和阵风风载; 2) 对于内侧翼型, 需要发展高性能“平底”后缘翼型技术, 以提高叶片结构性能, 同时兼顾气动性能; 3) 多兆瓦级风力机翼型的高雷诺数 ($6.0 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^7$) 风洞实验验证技术.

5 结 论

本文介绍了目前国外可用于大型风力机的 S 系列、DU 系列、RISØ 系列、FFA 系列等翼型族, 以及西北工业大学 NPU-WA 翼型族的设计、实验及改进, 并给出了多兆瓦级风力机翼型族研究展望.

研究表明: 1) NPU-WA 翼型族经过实验验证, 在高雷诺数下和高设计升力系数下具有优良性能, 可满足兆瓦级风力机叶片设计需要; 2) NPU-WA 翼型族经过改进设计, 在保持气动性能的情况下, 最大升力系数对前缘粗糙度的敏感性得到改善.

致谢 谨以此文献给已故的著名空气动力学家、翼型设计专家、全国先进工作者、翼型叶栅空气动力学国家级重点实验创始人乔志德教授. 乔志德教授在“十一·五”期间为 NPU-WA 翼型族的设计和研发付出了大量的心血, 并为“十二·五”风力机翼型项目研究提出了许多关键性的建议. 谨以此文表达对乔老师的深切怀念.

感谢中国风能协会理事长贺德馨教授长期以来对风力机翼型族研究的大力支持、指导和无私帮助. 感谢胡文瑞院士对本文的指导. 感谢风力机翼型设计 863 课题组的全体同仁. 感谢博士研究生余雷、刘俊, 硕士研究生刘方良、黄意坚在完成论文过程中给予的支持.

感谢国家高技术研究发展计划课题 2007AA05Z448 和 2012AA051301 的支持.

参考文献 (References):

- [1] Tangler J L, Somers D M. NREL airfoil families for HAWT's [C]//Proc WINDPOWER' 95.

- Washington DC, 1995: 117-123.
- [2] Timmer W A, Van Rooij R P J O M. Summary of the Delft university wind turbine dedicated airfoils[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003, **125**(4): 488-496.
- [3] Fuglsang P, Bak C. Design and verification of the new Risø-A1 airfoil family for wind turbines [R]. AIAA paper 2001-0028, 2001.
- [4] Fuglsang P, Bak C, Antoniou I. Design and verification of the Risø-B1 airfoil family for wind turbines[R]. AIAA paper 2004-668, 2004.
- [5] Björk A. Coordinates and calculations for the FFA-W1-xxxx, FF-AW2-xxxx and FFA-W3-xxxx series of airfoils for horizontal axis wind turbines[R]. FFA, aeronautical research inst of Sweden, TN 1990-15, Stockholm, 1990.
- [6] 乔志德, 宋文萍, 高永卫. NPU-WA 系列风力机翼型的设计与风洞实验[J]. *空气动力学学报*, 2012, **30**(2): 260-265. (QIAO Zhi-de, SONG Wen-ping, GAO Yong-wei. Design and experiment of the NPU-WA airfoil family for wind turbines[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, **30**(2): 260-265. (in Chinese))
- [7] 乔志德, 宋文萍, 高永卫, 许建华, 孟宣市. 一族用于兆瓦级风力机叶片的翼型[P]. 中国, ZL201110023115.1, 2011. (QIAO Zhi-de, SONG Wen-ping, GAO Yong-wei, XU Jian-hua, MENG Xuan-shi. A family of airfoils for megawatt-size wind-turbines [P]. China, ZL201110023115.1, 2011. (in Chinese))
- [8] Han Z-H, Zhang K-S, Liu J, Song W-P. Surrogate-based aerodynamic shape optimization with application to wind turbine airfoils[R]. AIAA paper 2013-1108, 2013.
- [9] 白井艳, 杨科, 李宏利, 徐建中. 水平轴风力机专用翼型族设计[J]. *工程热物理学报*, 2010, **31**(4): 589-592. (BAI Jing-yan, YANG Ke, LI Hong-li, XU Jian-zhong. Airfoil family dedicated to horizontal axis wind turbines[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, **31**(4): 589-592. (in Chinese))
- [10] 杨科, 杨宏利, 徐建中. 风力机叶片翼型族[P]. 中国, ZL200910083401, 2010. (YANG Ke, YANG Hong-li, XU Jian-zhong. A family of airfoils for wind turbines [P]. China, ZL200910083401, 2010. (in Chinese))
- [11] Abbott F T, von Doenhoff A E. *Theory of Wing Sections*[M]. New York: Dover Publications, Inc, 1959.
- [12] Somers D M. The S 830, S 831, and S 832 airfoil[R]. NREL/SR-500-36339, 2005.
- [13] Wind PACT Blade System Design Studies. Innovative design approaches for large wind turbine blades[R]. Final Report, SAND 2004-0074, Sandia National Laboratories, USA.
- [14] Qiao Z D. *Subsonic Airfoil Design With Mixed Boundary Conditions*[M]. Numerical and Applied Mathematics. IMACS. Scientific Publishing Co, 1989: 209-212.
- [15] 钱瑞战, 乔志德, 宋文萍. 基于 N-S 方程的跨声速翼型多目标多约束优化设计[J]. *空气动力学学报*, 2000, **18**(3): 350-355. (QIAN Rui-zhan, QIAO Zhi-de, SONG Wen-ping. Multiobjective optimization design of transonic airfoils with constraints based on Navier-Stokes equations [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2000, **18**(3): 350-355. (in Chinese))
- [16] Qiao Z D, Qin X L, Yang X D. Wing design by solving adjoint equations[R]. AIAA 2002-0263, 2002.
- [17] 乔志德. 先进翼型的 CFD 设计及应用. “现代力学与科技进步”[M]. 庄逢甘 主编. 北京: 清华大

- 学出版社, 1997: 984-987. (QIAO Zhi-de. *Design of High-Performance Airfoil Based on CFD. Modern Mechanics and Advance in Science and Technology* [M]. ZHUANG Feng-gan ed. Beijing: Tsinghua Press, 1997: 984-987. (in Chinese))
- [18] 乔志德. 翼型设计的计算空气动力学 [C]//Dubois F, 邬华谟 编. 计算流体力学新进展——理论、方法和应用. 北京: 高等教育出版社, 2001: 273-294. (QIAO Zhi-de. Computational aerodynamics of wing design [C]//Dubois F, WU Hua-mo, eds. *Advance in Computational Fluid Dynamics—Theory, Methods and Applications*. Beijing: Higher Education Press, 2001: 273-294. (in Chinese))
- [19] 韩忠华, 刘俊, 宋文萍. 基于代理模型的多目标、多约束高效通用优化软件: SurroOpt [CP]. No 2013SR029774, 2013. (HAN Zhong-hua, LIU Jun, SONG Wen-ping. Efficient multi-objective and multi-constrained optimization software via surrogate models: SurroOpt [CP]. No 2013SR029774, 2013. (in Chinese))
- [20] Liu J, Han Z-H, Song W-P. Efficient Kriging-based aerodynamic design of transonic airfoils: some key issues [R]. AIAA paper 2012-0967, Nashville, Tennessee, Jan 4-7, 2012.
- [21] HAN Zhong-hua, ZHANG Ke-shi. Surrogate based optimization [C]//Olympia Roeva ed. *Intec Book, Real-World Application of Genetic Algorithm*. InTech, 2012: 343-362.
- [22] Han Z-H, Deng J, Liu J, Zhang K-S, Song W-P. Design of laminar supercritical airfoils based on Navier-Stokes equations [C]//28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. paper ICAS 2012-2.2.2. Brisbane, Australia. Sep 23-28, 2012.
- [23] Liu J, Han Z-H, Song W-P. Comparison of infill sampling criteria in kriging-based aerodynamic optimization [C]//28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. paper ICAS2012-11.10ST. Brisbane, Australia. Sep 23-28, 2012.
- [24] Han Z-H, Zhang K-S, Song W-P, Qiao Z-D. Optimization of active flow control over an airfoil using a surrogate-management framework [J]. *Journal of Aircraft*, 2010, **47**(2): 603-612. doi: 10.2514/1.45899.
- [25] Han Z-H, Görtz S, Zimmermann R. Improving variable-fidelity surrogate modeling via gradient-enhanced kriging and a generalized hybrid bridge function [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, **25**(1): 177-189. doi:10.1016/j.ast.2012.01.006.
- [26] Han Z-H, Görtz S. A hierarchical Kriging model for variable-fidelity surrogate modeling [J]. *AIAA Journal*, 2012, **50**(9): 1885-1896. doi:10.2514/1.J051354.
- [27] Han Z-H, Zimmermann R, Görtz S. An alternative Cokriging model for variable-fidelity surrogate modeling [J]. *AIAA Journal*, 2012, **50**(5): 1205-1210. doi: 10.2514/1.J051243.
- [28] Qiao Z D, Yang X D, Qin X L, Zhu B. Numerical optimization design of wings by solving adjoint equations [R]. ICAS2002-1104.1, 2002.
- [29] Drela M. XFOIL: an analysis and design system for low Reynolds number airfoils [C]//*Conference on Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics*. University of Notre Dame, Jun, 1989.

Design and Wind-Tunnel Verification of Large-Size Wind Turbine Airfoils

HAN Zhong-hua, SONG Wen-ping, GAO Yong-wei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research, School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, P.R.China)

Abstract: For a family of specially tailored airfoils, the shapes of sections along the span of the blades are the most important elements for design of wind turbine blades. The airfoils with excellent performance can dramatically improve the capability of capturing wind power, reducing structural weight to save cost of manufacturing and transportation, and lowering inertial loads as well as loads due to gust. First, the development of the main wind turbine airfoil families around the world since 1990's was reviewed, such as S series, DU series, RISØ series, and FFA series. Second, the progress of NPU-WA series for megawatt-size wind turbine was summarized, including the design process and wind-tunnel experiments. Model tests were carried out in NF-3 wind-tunnel's two dimensional test section, which was the largest low-speed two dimensional test section in Asia with the Reynolds number up to 5 millions. The further improvement of NPU-WA airfoils for lower roughness sensitivity was also reviewed. Last, the outlook on developing new NPU-WA series for multi-megawatt wind turbines in the near future was presented.

Key words: wind-turbine airfoil; NPU-WA airfoil family; airfoil design; wind-tunnel experiment

Foundation item: The National High-tech R&D Program of China (863 Program)
(2007AA05Z448; 2012AA051301)