复杂地形条件下大型风电叶片先进设计技术研究

张明明^{1,2,3,4}, 廖猜猜^{1,2,3,4}, 张磊^{1,2,3,4}, 武广兴^{1,2,3,4}, 徐建中^{1,2,3,4*}

1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190;
2. 国家能源风电叶片研发(实验)中心, 北京 100190;
3. 中国科学院风能利用重点实验室, 北京 100190;
4. 中国科学院大学, 北京 100049

* E-mail: xjz@iet.cn

收稿日期: 2020-03-11; 接受日期: 2020-05-14; 网络版发表日期: 2020-08-26

中国科学院洁净能源先导科技专项子课题(编号: XDA21050303)资助项目

摘要 近年来,我国内陆复杂地形条件下风力发电迅速发展,但相关风电机组核心设计技术水平仍然偏低.为此,在中国科学院工程热物理所过去近15年的成果和经验基础上,本文重点围绕对机组效率、可靠性和度电成本起决定性作用的关键部件——风电叶片,开展了复杂地形条件下气动增效、被动耦合降载、轻量化设计等新一代关键技术研究,以构建一体化优化设计技术体系.在填补国内行业空白的同时,力争使我国大型风电叶片的设计水平达到国际先进水平,对解决国家能源安全和环境污染问题具有重要意义.

关键词 复杂地形, 风电叶片, 降载, 轻量化, 优化设计

1 引言

能源结构优化和加快推进能源技术革命是实现国家能源结构变革的重要目标.大力发展风电等可再生能源已列入我国能源发展和战略性新兴产业规划.近年来,我国风电技术和产业实现了跨越式发展,新增和累计装机容量多年保持世界第一,已成为我国第三大电源,是我国发展最为迅速、产业规模最大、技术相对较为成熟的可再生能源形式之一.截至2018年底,我国风电累计并网装机容量达到2.09亿kW,并网容量1.84亿kW,占全部发电装机容量的9.7%;风电年发电量3057 TWh,占全部发电量的4.79%.未来风电将保持持续增长的态势,是推动我国能源转型的关键支柱

之一.

然而,近年来,由于电网接纳能力不足、风电场建设工期不匹配、风电不稳定以及发电企业自身利益等原因,我国风能资源相对较丰富的“三北”地区风电场“弃风”现象严重,仅2016,2017年弃风率就高达20%~40%.为此,国家能源局2016年底出台《风电发展“十三五”规划》,鼓励风电企业向距东部电力负荷较集中的内陆地区快速发展,致使相关地区装机容量迅速增加;根据国家能源局统计,预计到2020年中东南部地区(大部分为复杂地形区域)新增并网容量(大部分2 MW级)将占全国56%,累计装机占比将提高至33%.我国内陆地区风电场往往处于复杂地形区域,相应的风资源通常风速和空气密度较低,且在空间、时间尺

引用格式: 张明明, 廖猜猜, 张磊, 等. 复杂地形条件下大型风电叶片先进设计技术研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1391–1403
Zhang M M, Liao C C, Zhang L, et al. Research on advanced design technologies of large-scale wind turbine blades for use in complex terrain (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1391–1403, doi: [10.1360/SST-2020-0094](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0094)

度上高度非均匀、不稳定,这与欧美等风电强国的风资源情况不同。因此,传统关键部件(如风电叶片)的设计方法需较大改进,否则将极大地影响机组效率和可靠性。

在此背景下,中国科学院组织实施A类战略性先导科技专项“变革性洁净能源关键技术与示范”,项目之一——“张家口黄帝城小镇100%可再生能源示范”研究成果将在张家口涿鹿县黄帝城小镇完成现场示范验证,将为多类型可再生能源综合高效率利用提供典型解决方案,并为我国能源变革及清洁利用树立良好示范,对我国能源变革、健康可持续发展、社会进步和环境治理等方面也具有积极的意义。

在中国科学院先导项目资助下,中国科学院工程热物理研究所国家能源风电叶片研发(实验)中心(以下简称风电叶片研发中心)负责子课题“复杂地形条件下大型风电叶片先进设计技术研究及示范”的实施。针对复杂地形条件下超长、柔性大变形风电叶片流场的不稳定性和非定常性,并兼顾叶片多目标性能需求,开展了气动、结构、载荷控制等方面叶片先进设计技术研究,本文系统性地集中报道了取得的重要进展和成果,以期为我国风电叶片相关领域提供一定的理论支撑和技术储备。

2 风电叶片先进气动设计方法研究

风电叶片气动设计技术发展对实现度电成本降低具有重要意义。近年来,工程热物理所团队针对我国低风速区风场的平均风速低、地形复杂、地表粗糙、切变系数高等特点,围绕适合低风速区的风力机专用翼型开发以及风电叶片流动控制技术展开了深入研究,取得了一定成果。

2.1 高性能风力机专用翼型族开发

“低风速区”风场具有平均风速低、地形复杂、地表粗糙、切变系数高等特点,使得水平轴风力机受不同时间和空间尺度的大气湍流的影响尤为显著。传统的风力机翼型设计方法通常假设自由来流湍流强度极低,而实际风场中来流具有高端流特性。这种时空非定常性和不确定性不仅会导致叶片的气动效率偏低,疲劳载荷增加,更会使得叶片功率与极限载荷具有不可预测性^[1]。另一方面,低风速区风场中的风电机组通常

具有细长叶片、大叶轮等特征,对复杂地形的高端流剪切入流、偏航入流的不均匀性的感知也更为突出,进一步凸显了叶片效率、载荷的矛盾及其波动特性^[1]。为提高叶片在复杂地形风场条件下的风能捕获效率,降低运行安全风险,在传统的风力机翼型设计需求之外,必须考虑叶片低载、高效和变工况性能稳定性需求,尤其是须将高端流自由来流对翼型气动性能的影响考虑到设计之中,发展风力机翼型气动模型和优化设计方法。为此,团队构建了复杂地形下低风速风电叶片专用翼型设计优化平台^[2,3],如图1所示。

在翼型优化设计过程中以增加最大升阻比实现提高翼型气动效率的目标,以增加设计升力系数、限制最大升力系数、降低失速参数实现降低重力载荷、极限载荷与疲劳载荷的目标,以增加非设计攻角范围、降低升力及升阻比随着攻角的平均变化率实现拓宽翼型的高性能工作范围的目标,以降低翼型的效率、载荷随着流动条件变化的敏感性实现翼型气动性能稳定性的目标;通过多目标全局最优化算法对以上复杂目标和约束的权衡最终实现翼型综合性能提升。

应用前述优化设计平台,采用多目标遗传算法-存档型微遗传算法(AMGA)设计得到新翼型。在此基础上,结合叶片不同位置的实际需求,依次开展了复杂风场低风速叶片根部大厚度翼型高升力设计、叶片中部翼型气动特性的综合优化以及叶片外侧翼型的气动-结构-噪声多学科优化设计,形成了新一代适合于低风速风场需求的风力机专用翼型族CAS-W2系列。CAS-W2翼型族包含相对厚度依次为21%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%和60%等9种翼型,其基本几何轮廓如图2所示,具体几何和性能参数可参考文献[3~5]。

以新翼型CAS-W2-210^[1]为例,和初始翼型NACA 63421相比,新翼型的最大升阻比和设计升力系数得到显著提高,最大升力系数得到有效限制,同时新翼型的气动噪声也得到降低。更重要的是新翼型的效率与载荷随着自由来流湍流的敏感性得到了大幅度降低,如图3和表1所示。表1中 $S_{ti,cl}$ 和 $S_{ti,ld}$ 两个参数指标分别用来表示翼型升力系数和升阻比对湍流度的敏感性程度。其计算方法如下:

$$S_{ti} = \frac{P_{ti} - P_{ti*}}{P_{ti}}, \quad (1)$$

其中, P_{ti} 表示低湍流度时的翼型性能, P_{ti*} 表示典型入

图 1 (网络版彩图)复杂地形风电叶片专用翼型综合设计优化平台^[3]

Figure 1 (Color online) Wind turbine blade dedicated airfoils design and optimization platform in complex terrain ^[3].

图 2 (网络版彩图)CAS-W2翼型族的几何形状

Figure 2 (Color online) Geometry profiles of CAS-W2 airfoils.

流湍流度 ti^* 时的翼型性能, S_{ti} 统一表示 $S_{ti,cl}$ 和 $S_{ti,ld}$ 等翼型性能对湍流度的敏感性程度指标。

由于最大升力系数和最大升阻比是翼型设计关键参数, 对叶片极限载荷以及风能利用效率最重要, 因此表1中主要对比了以上两个参数的敏感性。其值越低, 说明该翼型的对应性能的敏感性越低。可以看出, 新

图 3 (网络版彩图)新翼型与初始翼型在不同入流湍流条件下的气动特性对比(其中 $N=9.0$ 对应湍流度 $ti=0.07\%$, $N=2.6$ 对应湍流强度 $ti=1\%$)^[1]

Figure 3 (Color online) Aerodynamic performance comparison of new airfoil and initial airfoil under different inflow turbulence conditions ($N=9.0$ means turbulence intensity $ti=0.07\%$, $N=2.6$ means turbulent intensity $ti=1\%$) ^[1].

翼型的综合性能水平得到明显改进, 尤其适用于复杂地形低风速区叶片应用。

2.2 叶片表面数值涡流发生器方法开发

复杂的流动环境, 使风力机运行中叶片的根部发生严重流动分离, 甚至可能扩展至叶尖范围, 降低了风力机的捕获效率。涡流发生器(vortex generators,

表 1 最大升力系数和最大升阻比敏感性程度对比**Table 1** Sensitivity comparison of maximum lift coefficient and maximum lift to drag ratio

翼型	$S_{H,cl}$ (%)	$S_{H,ld}$ (%)
CAS-W2-210	0.78	17.30
NACA 63421	3.67	32.32

VG)是一种控制流动分离的有效方法. 从空气动力学原理来说, 叶片安装VG后, 将叶片流动边界层内的低能量流体与外层的高能量流体进行掺混, 相当于向边界层内注入了新的涡流能量, 保持边界层速度型的饱满, 从而达到增加涡诱导升力和延缓、阻止分离的目的, 使叶片能够保持较好的升力特性, 增加风轮的功率输出^[6]. 本团队已经在应用于风电机组的VG流动控制技术方面进行了系统研究^[6-11], 其中最具特色的成果为开发了利用VG参数进行优化的数值模型^[7,8], 其计算结果如图4所示.

安装VG造成的计算域复杂的拓扑结构及巨大的网格数限制了数值模拟方法在VG参数设计时的应用. 因而, 基于VG数值模型的计算流体动力学(CFD)方法则可能成为更好的途径, 其中可以采用简单的网格拓扑和稀疏的网格结构. VG的模型化常见的有模拟VG的形状、模拟脱落涡的形状及统计模型等三种方式. 第一种方式由Bender等人^[12]于1999年提出, 文献中称为BAY模型^[13]. 它是一种基于网格的模型, 用一定数目的网格单元代替VG, 将VG对流体的作用力均匀分配到每个网格单元上, Navier-Stokes(N-S)方程离散到该区域时便将网格上的力当作方程的源项增加到差分格其中. 第二种类型为源项模型, 1986年, Kunik^[14]提出了一种在涡动力学方程中增加涡量源项, 从而实现VG数值模拟的办法. 此后, 针对源项强度、速度分布等进行了更加精细的研究^[15-19]. 第三种方式为统计方法, 即用统计方法将VG引起的流场速度的三维变化等效为二维流场中的湍流应力增加量^[20-22]. 针对VG数值模型的网格相关性、程序依赖性、参数局限性问题, 发展了一种新的3D数值模型, 如式(2)~(5)所示.

$$\Gamma_0 = U_\infty c \sin \alpha \cos \alpha \left(\frac{2h}{c} + \frac{1}{2} C_{Dp} \sin \alpha \right), \quad (2)$$

$$V_\phi = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} \left[1 - \exp \left(-\frac{\pi \omega_{\max} r^2}{\Gamma_0} \right) \right], \quad \omega_{\max} = \frac{U_\infty \Gamma_0}{4\pi v z}, \quad (3)$$

图 4 (网络版彩图)三维数值模型与实体建模流场对比(h 为VG高度, s 为排列周期)^[10]**Figure 4** (Color online) Comparison of flow field between 3D numerical model and solid model (h is the height of VG, and s is the periodic array) [10].

$$F(r)_{\text{source}} = \frac{F}{\delta AL} = \frac{\delta Q/r}{\delta AL} = \frac{\rho U_\infty}{L} V_\phi(r), \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}. \quad (5)$$

首先根据VG的几何参数及流场特征, 利用式(2)求解VG诱导涡的强度 Γ_0 , 其次将 Γ_0 带入Lamb-Oseen涡的求解公式(3)中, 得到诱导速度的分布, 然后将该速度分布转化为流场中的非保守力场, 如式(4), 最后将此力场代入动量方程(5), 完成VG数值模型. 该模型可简化网格拓扑结构并在一定程度上降低数值模拟所需的网格数. 由于VG对流场的作用具有局部性, 源项也需要仅作用于流场的局部, 由Lamb-Oseen涡自身的特性, 在VG安装位置的法向可以不予考虑, 而在切向通常使源项作用于2倍VG高度的范围, 其下游的发展完全有流动控制方程决定, 其验证请见文献[8]. 以50%厚度翼型为例, 安装VG后气动升阻力变化如图5所示. 可以看出, 安装VG后, 翼型的失速攻角增大, 失速延迟, 这些将对50%厚度翼型附近的大攻角分离流动产生一定的抑制作用. 同时其升力系数增大, 阻力系数减小, 升阻比增大, 将有效提高此处的气动效率.

2.3 风电叶片增效方法开发

随着低风速叶片不断增长, 叶片的长度均在60 m以上, 而且公开的叶片数据较少. 为此, 本文选取文献[23]中的叶片作为参考叶片进行设计. 由于其设计额定功率为3.35 MW, 本文为了比较, 将其额定功率设定为2 MW, 并将叶片长度由63 m延长至65 m进行设计研究, 以适应更低风速的风资源开发.

图 5 (网络版彩图)50%厚度翼型安装VG后的前后升力系数(a)和阻力系数(b)变化对比

Figure 5 (Color online) Comparison of lift (a) and drag (b) coefficient before and after VG installation for airfoil with 50% relative thickness.

为了尽可能提高2 MW叶片的风能转换效率, 本文以最大功率系数为目标, 采取如下思路进行叶片气动设计: 首先, 基于参考叶片的标准翼型进行叶片的气动外形优化; 然后, 在叶尖部分采用更高性能CAS-W2-250风力机专用翼型替换参考叶片的25%厚度和21%厚度翼型并进行气动优化; 最后, 在叶中和叶根位置, 安装VG, 以对此处的流动分离进行流动控制. 最终达到提高风能转换效率的目标. 因此本文的气动设计方案如下: (1) 对参考叶片的弦长和扭角进行气动优化设计, 优化得到的叶片用“优化叶片”表示; (2) 在叶尖部分采用更高性能CAS-W2-250翼型替换参考叶片的25%厚度和21%厚度翼型并对叶片的弦长和扭角进行气动优化设计, 优化得到的叶片用“CAS_优化叶片”表示; (3) 在叶尖部分采用更高性能CAS-W2-250翼型替换参考叶片的25%厚度和21%厚度翼型, 在叶片截面相对厚度大于30%展向位置加装VG, 并对叶片的弦长和扭角进行气动优化设计, 优化得到的叶片用“VG_CAS_优化叶片”表示.

为了便于对比, 各方案得到的叶片以及参考叶片均采用国际上通用的风电机组专用计算分析软件GH

Bladed进行评估.

表2给出了叶片的最大功率系数变化情况及对应的最优尖速比. 图6给出了各方案优化设计得到的叶片弦长和扭角分布. 由表2可以看出, 随着CAS-W2-250翼型的使用以及VG的安装, 叶片的性能由最初的0.484不断增加到0.490以上, 具有较好的增效潜力和应用价值. 同时, 由图6可以看出, 叶片的弦长和扭角分布光滑, 符合叶片设计要求. 且采用CAS-W2-250翼型和VG后, 叶片在大部分展向范围内弦长降低, 有利于降低叶片载荷. 其主要原因是采用CAS-W2-250翼型和VG后提高了叶片截面的最大升阻比和对应的升力系数, 从而使得弦长减小. 但弦长的降低可能对叶片刚度产生

表 2 2 MW叶片最大功率系数与最优尖速比对比

Table 2 Comparison of maximum power coefficient and optimal tip speed ratio of 2 MW blade

叶片名称	最大功率系数 (-)	相对变化值 (%)
参考叶片	0.484	-
优化叶片	0.488	0.83
CAS_优化叶片	0.490	1.24
VG_CAS_优化叶片	0.492	1.65

图 6 (网络版彩图)不同设计方案得到的叶片弦长(a)和扭角(b)变化对比

Figure 6 (Color online) Comparison of chord length (a) and twist (b) changes of different design schemes.

图 8 (网络版彩图)最大叶尖偏移对比

Figure 8 (Color online) Comparison of maximum blade tip displacement.

图 9 (网络版彩图)叶片最大 C_p 在不同风速下的相对变化情况

Figure 9 (Color online) Relative change of maximum C_p of blade under different wind speeds.

图 10 (网络版彩图)叶片频率的相对变化情况

Figure 10 (Color online) Relative change of blade frequency.

移、最大功率系数、自振频率以及载荷的相对变化情况,用百分比表示。由图8可以看出,叶片最大叶尖偏移有所降低,一方面由于后掠的降载效应,另一方面也是由于铺层的调整导致的刚度变化。由图10可以看出,叶片的频率有所增大,主要是铺层调整所致。从不同风速下的最大功率系数 C_p 变化来看,由于气弹耦合效应作用, C_p 在高风速下幅度最大,可能需要功率补偿以提高其年发电量。

从叶片不同截面的极限载荷来看,由于后掠带来的被动降载效果,叶片各截面的极限载荷均有所降低,

图 11 (网络版彩图)叶片不同截面极限载荷 M_{xy} 的相对变化情况

Figure 11 (Color online) Relative change of the extreme load M_{xy} at different blade sections.

图 12 (网络版彩图)轮毂中心和塔体不同截面极限载荷 M_{xy} 的相对变化情况

Figure 12 (Color online) Relative change of the extreme load M_{xy} at hub center and different tower sections.

图 13 (网络版彩图)叶根、轮毂中心和塔顶等效疲劳载荷的相对变化情况

Figure 13 (Color online) Relative change of equivalent fatigue load at blade root, hub center and tower top.

这也进一步解释了叶片最大叶尖偏移下降的原因。同时从图12可看出,叶片后掠将有效减小轮毂中心和塔体极限载荷,对于降低机组塔架和其他部件的整体成本具有巨大潜力,可以考虑将塔架一起优化进一步减少机组成本。此外,从等效疲劳载荷来看,叶片后掠能有效减少叶根弯矩但会增大塔体疲劳载荷。

3.2 纤维方向角调控设计

纤维角度调控是一种材料层级的被动降载方式, 已有研究主要集中在气弹耦合数值建模及气弹耦合特性分析. 在气弹耦合数值建模方面, 目前国内外主要针对纤维角度改变带来的质量和刚度影响进行建模分析, 尤其是对叶片截面的弯扭耦合刚度影响方面. 通过数值分析, 发现铺层角在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间弯扭耦合因子取最大值, 玻璃纤维和碳纤维混合材料可以增大耦合因子, 相同纤维材料铺设在不同叶片部位其最佳偏轴角也有所不同^[33-37]. 在气弹耦合特性分析方面, 目前国内外主要针对纤维方向角改变带来的叶片载荷以及功率输出影响等进行研究^[38-40]. 研究发现, 综合调整叶片壳体以及梁帽纤维铺层角度能够降低叶片的等效疲劳载荷以及叶片质量, 且改变靠近叶尖壳体的纤维角度相比于改变整个叶片壳体的纤维角度具有更好效果. 此外, 纤维铺层角度的变化也会降低叶片的功率输出. 但是, 大型叶片的柔性越来越强, 而且通过改变纤维方向角增强叶片的弯扭耦合效应后, 其颤振裕度进一步降低^[41,42]. 因此, 纤维方向角调控技术具有两面性, 同时其对叶片其他性能如频率、塔尖间隙以及叶片载荷分布的影响规律还不清楚, 需要进一步深入研究. 为此, 本团队基于经典层合板理论推导了叶片纤维铺层参数与叶片截面刚度的关系式^[43], 并采用Cp-Max对纤维方向角改变对整个风电机组的影响进行了系统研究.

依据叶片铺层中纤维方向角的坐标定义(图14, z 轴即为叶片轴, 从叶根指向叶尖为正, x 轴在叶根平面内, 逆时针偏移为正, 反之为负), 风电叶片研发中心基于第3.1节得到的2 MW后掠叶片优化设计结果, 将纤维

图14 (网络版彩图)纤维方向角的坐标定义

Figure 14 (Color online) Coordinate definition of fiber direction angle.

维方向角调控技术运用到2 MW级叶片进行进一步优化, 以得到更低的载荷和叶片质量. 依据IEC标准考虑DLC1.1, 1.3, 2.1, 2.3, 6.1, 6.2和6.3等主要设计工况进行载荷计算, 并进行综合性能分析, 评估优化前后风电机组各性能的性能变化. 优化设计过程中, 考虑到叶片制造的可行性, 取了较小的纤维方向偏移角, 并采用两种方案进行优化设计, 具体如图15所示: D134DT3表示2 MW后掠风电叶片, D134DT3B35FG5表示在2 MW后掠风电叶片设计基础上, 叶片梁帽纤维方向角为 5° 铺设; D134DT3B35FG5S5表示在2 MW后掠风电叶片设计基础上, 叶片的壳体和梁帽均为 5° 铺设.

图15~20给出了纤维方向角变化后对叶尖偏移、最大功率系数、自振频率以及载荷的综合影响. 由图15可以看出, 叶片最大叶尖偏移增大, 主要是叶片质量减少刚度下降带来的影响, 但是后两种纤维方向角调控方案带来的叶尖偏移变化很小, 主要是在梁帽和壳体均采用纤维方向角偏置时, 叶片铺层有所增加而使其刚度有所增大. 从不同风速下的最大 C_p 变化来看, C_p 在不同风速下均出现下降. 由图17可以看出, 在梁帽和壳体均采用纤维方向角偏置时, 叶片的自振频率上升, 主要是铺层有所增加而使得刚度增加.

从叶片不同截面的极限载荷变化来看, 由于气弹

图15 (网络版彩图)最大叶尖偏移结果

Figure 15 (Color online) Results of maximum blade tip displacement.

图16 (网络版彩图)叶片最大 C_p 在不同风速下的变化情况

Figure 16 (Color online) Relative change of maximum C_p of blade under different wind speeds.

图 17 (网络版彩图)叶片频率的变化情况

Figure 17 (Color online) Relative change of blade frequency.

图 18 (网络版彩图)叶片不同截面极限载荷 M_{xy} 的变化情况Figure 18 (Color online) Relative change of the extreme load M_{xy} at different blade sections. 图 19 (网络版彩图)轮毂中心和塔体不同截面极限载荷 M_{xy} 的变化情况Figure 19 (Color online) Relative change of the extreme load M_{xy} at hub center and different tower sections.

图 20 (网络版彩图)叶根、轮毂中心和塔顶等效疲劳载荷的变化情况

Figure 20 (Color online) Relative change of equivalent fatigue load at blade root, hub center and tower top.

耦合效应, 叶片的极限载荷均有所降低, 为达到预期的极限载荷下降值提供了有效贡献. 从图19可以看出, 除塔底外, 纤维方向角的偏移将有效减小轮毂中心和塔顶的极限载荷, 对于降低机组塔架和其他部件的整体成本具有巨大潜力. 此外, 从等效疲劳载荷来看, 纤维方向角的增大能有效减少叶根弯矩以及塔体的疲劳载荷.

4 风电叶片轻量化设计方法开发

叶片轻量化设计技术是风电机组大型化发展趋势下的又一关键技术. 它不仅影响叶片本身的制造成本, 同时对机组其他部件如塔架载荷具有重要影响, 但叶片轻量化将带来叶片刚度减小, 柔性增大, 其可靠性面临挑战. 为了保证叶片在满足安全可靠的前提下, 尽可能降低叶片质量, 本团队以梁帽铺层为优化变量, 将叶片设计过程中的主要安全性能作为约束条件, 采用智能优化算法建立了风电叶片铺层优化设计模型, 取得了一定成果^[44,45]. 随着研究深入, 对叶片各部件的质量组成进行了分析, 发现叶根增强, 梁帽以及尾缘增强在叶片整个质量组成中占60%以上. 为了更好地实现叶片减重, 需要将这些位置的铺层均作为优化设计变量进行优化. 此外, 为了提高叶片的安全裕度, 拓宽设计变量的寻优范围, 可以结合第3节的载荷控制技术进行优化, 从而达到最佳效果, 其设计思路如图21所示.

因此, 下面将基于以上的2 MW叶片降载设计结

图 21 (网络版彩图)叶片轻量化设计思路

Figure 21 (Color online) Blade lightweight design idea.

表 3 2 MW叶片主要性能对比

Table 3 Comparison of main performances of 2 MW blades

2 MW风电叶片 (IEC 3A)	质量 (kg)	叶根极限弯矩 M_{xy} (kN m)	叶根等效疲劳载荷 M_x (kN m)	叶根等效疲劳载荷 M_y (kN m)
参考叶片	15036.40	12470.63	6495.55	6165.77
优化设计叶片	13674.00	11066.88	5884.98	5695.92
相对变化值(%)	-9.06	-11.26	-9.40	-7.62

果, 采用Cp-Max对叶根增强, 梁帽以及尾缘增强进行铺层优化, 最终得到叶片的质量和载荷对比如表3所示. 可以看出, 叶片的质量和载荷均显著下降. 其主要原因是叶片的载荷下降, 叶片梁帽和尾缘增强所需铺层减少. 同时, 叶片根部铺层较厚, 刚度较大, 对叶片频率以及叶尖偏移影响较小, 所以此处铺层通过优化后实现了下降.

5 讨论与结论

本文对在复杂地形条件下超长、柔性大变形风电叶片先进设计技术方面所做的研究工作进行了总结, 主要包括叶片气动增效技术、载荷控制方法以及轻量化设计. 为了更好地验证以上各项技术的应用效果, 以目前低风速区的主流2 MW级风电叶片为基础, 对各项技术进行了应用设计研究, 结果表明, 在气动增效方面, 针对“低风速区”风场开发的CAS-W2-250翼型具

有很好的气动性能, 能有效提高风轮的转换效率, 对于替换已有叶片叶尖部分的翼型具有较好潜力. 此外, 对叶片叶中和叶根部分适当安装VG, 能进一步提高风电机组的风能转换效率, 为机组成本的降低提供有效的技术手段. 在载荷控制方面, 采用后掠方法, 能够有效降低叶片的极限载荷和疲劳载荷; 对于降低机组的极限载荷也有较好的效果, 但会降低机组的风能转换效率, 以及增大塔体的疲劳载荷. 采用后掠设计和纤维方向角调控集成被动降载设计后, 叶片的极限载荷和疲劳载荷均有所降低, 但叶尖偏移增大, 机组的风能转换效率有少许降低. 总的来看, 两种被动降载技术的有效结合能够大大降低风电叶片和塔架载荷, 为实现叶片乃至整个风电机组的轻量化设计打下了基础, 也为降低叶片和机组成本提供了行之有效的方法. 在轻量化设计方面, 通过优化梁帽和尾缘增强处的材料和铺层, 同时对叶根铺层进行精细化优化, 可以有效降低叶片的重量, 从而进一步降低叶片成本和机组重量.

致谢 中国科学院战略性先导科技专项子课题在石可重、张磊、秦志文、蔡畅、李星星、李苏威、荣晓敏、宋娟娟、白井艳、钟晓晖、孙香宇等20人的通力协助下得以顺利实施, 在此深表谢忱.

参考文献

- 1 Li X, Zhang L, Song J, et al. Airfoil design for large horizontal axis wind turbines in low wind speed regions. [Renew Energy](#), 2020, 145: 2345–2357
- 2 Li X, Yang K, Liao C, et al. Overall design optimization of dedicated outboard airfoils for horizontal axis wind turbine blades. [Wind Energy](#), 2018, 21: 320–337
- 3 Li X, Yang K, Bai J, et al. A new optimization approach to improve the overall performance of thick wind turbine airfoils. [Energy](#), 2016, 116: 202–213
- 4 Li X, Yang K, Zhang L, et al. Large thickness airfoils with high lift in the operating range of angle of attack. [J Renew Sust Energy](#), 2014, 6: 033110
- 5 Li X, Yang K, Zhang L, et al. Experimental study of Reynolds number effects on performance of thick CAS wind turbine airfoils. [J Renew Sust Energy](#), 2017, 9: 063309

- 6 Zhang L, Yang K, Xu J Z. Effects on wind turbine airfoils by vortex generators (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2010, 5: 749–752 [张磊, 杨科, 徐建中. 涡流发生器对风力机专用翼型气动特性的影响. *工程热物理学报*, 2010, 5: 749–752]
- 7 Zhang L. Wind turbine blade with blunt trailing-edge and improvements of its aerodynamic performance (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2011 [张磊. 风力机钝尾缘叶片及其气动性能改进研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2011]
- 8 Zhang L, Yang K, Xu J Z, et al. Modeling of delta-wing type vortex generators. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 277–285
- 9 Yang K, Zhang L, Xu J Z. Simulation of aerodynamic performance affected by vortex generators on blunt trailing-edge airfoils. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2010, 53: 1–7
- 10 Zhang L, Yang K, Huang C W, et al. Parameters design of vortex generators based on numerical models (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2012, 33: 2084–2087 [张磊, 杨科, 黄宸武, 等. 基于数值模型的涡流发生器参数设计. *工程热物理学报*, 2012, 33: 2084–2087]
- 11 Zhang L, Li X, Yang K, et al. Effects of vortex generators on aerodynamic performance of thick wind turbine airfoils. *J Wind Eng Indust Aerodyn*, 2016, 156: 84–92
- 12 Bender E E, Anderson B H, Yagle P J. Vortex Generator Modeling for Navier-Stokes Codes. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1999
- 13 Jirásek A A. Vortex generator model and its application to flow control. In: 22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit. Providence: AIAA, 2004
- 14 Kunik W G. Application of a computational model for vortex generators in subsonic internal flows. In: 22nd Joint Propulsion Conference. Huntsville: AIAA/ASME/SAE/ASEE, 1986
- 15 Wendt B J, Reichert B A. The modeling of symmetric airfoil vortex generators. In: 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 1996
- 16 May N E. A new vortex generator model for use in complex configuration CFD solvers. In: 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 11 June 2001–14 June 2001. Anaheim, 2001
- 17 Wendt B J. Parametric study of vortices shed from airfoil vortex generators. *AIAA J*, 2004, 42: 2185–2195
- 18 Dudek J C. Empirical model for vane-type vortex generators in a Navier-Stokes code. *AIAA J*, 2006, 44: 1779–1789
- 19 Booker C, Zhang X. Large-scale source term modeling of vortex generation. In: 27th AIAA Applied Aerodynamics Conference. San Antonio: AIAA, 2009. 2009-3951
- 20 Nikolaou I G, Politis E S, Chaviaropoulos P K. Modelling the flow around airfoils equipped with vortex generators using a modified 2D Navier-Stokes solver. *J Sol Energy Eng*, 2005, 127: 223–233
- 21 Törnblom O, Johansson A V. A Reynolds stress closure description of separation control with vortex generators in a plane asymmetric diffuser. *Phys Fluids*, 2007, 19: 115108
- 22 Von Stillfried F, Wallin S, Johansson A V. Application of a statistical vortex generator model approach on the short-chord flap of a three-element airfoil. In: KATnet II Conference on Key Aerodynamic Technologies. Bremen: KATnet, 2009
- 23 Bortolotti P, Bottasso C L, Croce A, et al. Integration of multiple passive load mitigation technologies by automated design optimization—The case study of a medium-size onshore wind turbine. *Wind Energy*, 2019, 22: 65–79
- 24 Ashwill T D. Sweep-Twist Adaptive Rotor Blade: Final Project Report. Technical Report. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2010
- 25 Ashwill T D, Kanaby G, Jackson K, et al. Development of the sweep-twist adaptive rotor (STAR) blade. In: 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando, 2010
- 26 Larwood S, van Dam C P. Dynamic analysis tool development for swept wind turbine blades. *Wind Energy*, 2013, 16: 879–907
- 27 Larwood S, van Dam C P, Schow D. Design studies of swept wind turbine blades. *Renew Energy*, 2014, 71: 563–571
- 28 Larwood S, Zuteck M. Swept wind turbine blade aeroelastic modeling for loads and dynamic behavior. *Am Wind Energy Associat Windpower*, 2006, 2006: 1–17
- 29 Kang C M, Zhang W M. Study on reducing the load of wind turbine blades by using the effect of swept-torsion coupling (in Chinese). *Wind Energy*, 2010, 8: 58–60 [康传明, 张卫民. 利用掠-扭耦合效应降低风电机组叶片载荷的研究. *风能*, 2010, 8: 58–60]
- 30 Li Y, Kang S, Fan X L, et al. Numerical investigation on aerodynamic performance of a back-swept wind turbine blade (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2011, 32: 1497–1500 [李媛, 康顺, 樊小莉, 等. 后掠风力机叶片气动性能数值模拟. *工程热物理学报*, 2011, 32: 1497–1500]
- 31 Wu G X, Zhang L. Aerodynamics simulation method for swept wind turbine blades based on improved vortex lattice method. In: Proceedings of

- the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2016). Phoenix, 2016
- 32 Bortolotti P, Bottasso C L, Croce A. Combined preliminary-detailed design of wind turbines. [Wind Energ Sci](#), 2016, 1: 71–88
- 33 Ong C H, Tsai S W. Elastic Tailoring of a Composite D-spar Progress Report for Calendar Year 1998. Technical Report. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1998
- 34 Ong C H, Tsai S W. Design, Manufacture and Testing of a Bend-Twist D-spar. Technical Report. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1999
- 35 Ong C H. Composite wind turbine blades. Dissertation for Doctoral Degree. Palo Alto: Stanford University, 2000
- 36 Locke J, Valencia U. Design Studies For Twist-Coupled Wind Turbine Blades. Technical Report. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 2004
- 37 Liu W Y, Zhang Y. Bending-torsion coupling design of spar cap of compliant wind turbine blade (in Chinese). *J South China Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2010, 38: 1–6 [刘旺玉, 张勇. 柔性风力机叶片主梁弯扭耦合设计. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38: 1–6]
- 38 Bottasso C L, Campagnolo F, Croce A, et al. Optimization-based study of bend-twist coupled rotor blades for passive and integrated passive/active load alleviation. [Wind Energ](#), 2012, 16: 1149–1166
- 39 Capuzzi M, Pirrera A, Weaver P M. Structural design of a novel aeroelastically tailored wind turbine blade. [Thin-Walled Struct](#), 2015, 95: 7–15
- 40 Ståblein A R, Carlo T, Hansen M H. Using pretwist to reduce power loss of bend-twist coupled blades. In: Proceedings of the 34th Wind Energy Symposium. American Institute of Aeronautics & Astronautics. San Diego: AIAA, 2016. 2016–1010
- 41 Lobitz D W. Aeroelastic Stability Predictions for a MW-sized Blade. Technical Report. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 2003
- 42 Ren Y S, Zhang M H. Aeroelastic stability of a horizontal axis wind turbine blade with bending-torsion coupled (in Chinese). *J Vibrot Shock*, 2010, 29: 196–200 [任勇生, 张明辉. 水平轴风力机叶片的弯扭耦合气弹稳定性研究. 振动与冲击, 2010, 29: 196–200]
- 43 Liao C C. Study on wind turbine blade layers optimization design under extreme loads (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2012 [廖猜猜. 极限载荷条件下的风力机叶片铺层优化设计研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2012]
- 44 Liao C C, Zhao X L, Xu J Z. Blade layers optimization of wind turbines using FAST and improved PSO algorithm. [Renew Energy](#), 2012, 42: 227–233
- 45 Xu Y, Liao C C, Rong X M, et al. Independent research and development progress in large-scale wind turbine blade with coordinated aerodynamics, structure, and load. *Appl Math Mech (Eng Ed)*, 2016, 37: S85–S96

Research on advanced design technologies of large-scale wind turbine blades for use in complex terrain

ZHANG MingMing^{1,2,3,4}, LIAO CaiCai^{1,2,3,4}, ZHANG Lei^{1,2,3,4}, WU GuangXing^{1,2,3,4} & XU JianZhong^{1,2,3,4}

¹ Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² National Laboratory of Wind Turbine Blade Research & Development Center, Beijing 100190, China;

³ Key Laboratory of Wind Energy Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

In recent years, wind power has rapidly developed in China's inland complex terrain. However, the level of core design technologies for related wind turbines is low. Therefore, on the basis of the achievements and experiences of the Institute of Engineering Thermophysics, the Chinese Academy of Sciences for the past 15 years, this study focuses on wind turbine blades, which are essential for the efficiency, reliability, and power cost of the wind power unit. In this study, the new generation of key technologies are researched (e.g., aerodynamic efficiency increase, passive coupling load reduction, and lightweight optimization under complex terrain conditions) to build an integrated optimization design technology system. This study fills the gaps in the domestic industry and strives to make the design level of large-scale Chinese wind turbine blades achieve the international advanced level. In addition, this study is essential for solving national energy security and environmental pollution problems.

complex terrain, wind turbine blade, load reduction, lightweight, optimization design

doi: [10.1360/SST-2020-0094](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0094)