

玻碳混杂低风速风电叶片结构优化及性能分析

郭小锋, 齐剑峰, 黄鑫祥

(中原工学院机电学院, 郑州 450007)

摘要: 为了进一步减轻低风速风电叶片的重量及载荷,以长度为 54 m 的某 2 MW 风电叶片为研究对象,构建了玻碳混杂叶片铺层结构设计模型,基于 Matlab 和 ANSYS 参数化建模和分析方法,对优化设计的玻碳混杂铺层结构叶片进行了强度、载荷特性、质量与最大变形量分析。研究表明:优化后的叶片质量降低了 32.46%,其动态载荷及叶尖变形量有明显的减小;在保证叶片优化前后具有相同刚度的前提下,优化叶片的最大拉伸应力明显降低。本文的研究对低风速风电叶片的轻量化设计具有重要的参考意义,有助于降低风电叶片的成本。

关键词: 碳纤维复合材料; 铺层结构; 优化设计

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-8000(2020)06-0025-05

内陆低风速风力机叶片的长度及重量较常规风电叶片有明显的增加。为了减轻叶片的重量及载荷,提高风电机组的发电成本,探索采用碳纤维材料部分替换玻璃纤维材料的玻碳混杂风电叶片设计优化具有非常重要的意义。目前,风力机叶片主要是由玻璃纤维增强环氧树脂制备而成,其目的是在保证叶片强度和刚度的前提下,减轻叶片的质量和载荷。周红丽等对风电叶片复合材料进行了综述研究,发现碳纤维复合材料风电叶片是提高风力发电机组单机容量大型化的有效途径^[1]。NREL 实验室针对未来海上 10 MW 风电机组,设计了玻碳混杂铺层叶片概念设计模型^[2]。Kalantari 等采用改进的遗传算法(NSGA-II)使玻碳纤维复合材料在规定的最小抗弯强度约束下,材料密度和成本最小^[3]。张娜等针对多风沙环境下的固体粒子对叶片冲蚀磨损进行研究,发现玻碳混杂叶片具有良好的界面结合性和表面疏水性能,大大提高了风电叶片的抗冲蚀磨损性能^[4]。

本文以长度为 54 m 的 2 MW 内陆低风速风电叶片为研究对象,基于参数化有限元方法构建了叶片优化设计的结构模型;采用粒子群算法,在不改变预弯形状的情况下,对原叶片的铺层结构进行了优化;在 Matlab 环境下,调用 Precomp 软件计算叶片各截面的结构性能参数,采用 GH-Bladed 软件对优化设计叶片的载荷特性进行了评价;最后通过 ANSYS 软件对叶片的结构强度及结构动力学特性进行了对比和分析。本文对低风速风电叶片的玻碳混杂铺层

结构设计问题进行了研究,对低风速风电叶片轻量化、风能捕获效率最大化及总机运行成本最优设计具有非常重要的意义。

1 叶片铺层结构模型

本文研究的 2 MW 风电叶片重量为 10500 kg,长度为 54 m,主要的铺层材料有玻璃纤维和碳纤维复合材料、泡沫芯材,其规格参数和力学性能如表 1 所示。

表 1 材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of materials

材料代号	材料	h/mm	E_x/MPa	E_y/MPa	ν_{xy}	G_{xy}/MPa
UD1200E	单轴布	0.87	40000	12000	0.3	3600
Bi800E	双轴布	0.55	12000	12000	0.73	11000
Tri1200E	三轴布	0.87	27000	13500	0.38	8000
PVC60	泡沫	-	166	166	0.3	15
Carbon	碳纤维布	0.87	114500	8390	0.27	5990

风电叶片的铺层结构可通过若干典型截面的铺层结构进行定义^[5]。为了减少优化设计的变量,假定上下翼面具有相同的铺层结构。对于本文研究的 2 MW 叶片,截面的铺层结构如图 1 所示,沿叶片周向,其结构铺层划分为六个区域:(LER)前缘加强区域、(LEP)前缘面板区域、(CAP)梁帽区域、(TEP)尾缘面板区域、(TER)尾缘加强区域、(TE)尾缘区域。其中为了支撑和固定上下翼面,设有左、右两块腹板,铺层结构如图 1(f)所示,图 1(c)为 LEP 和 TEP 的铺层结构,图 1(d)为 LER、CAP 和 TER 的铺层结构,图 1(e)为 TE 的铺层结构。

收稿日期: 2019-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705545)

作者简介: 郭小锋(1983-),男,博士,副教授,主要从事风力机气弹动力学及叶片设计方面的研究工作, mexf@foxmail.com。

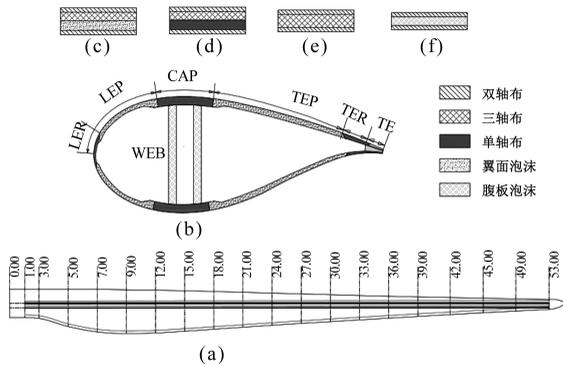


图1 叶片铺层结构模型

Fig. 1 Blade layer structure model

此外,为了保证叶片外表面的光顺性,在整个风电叶片的内、外表面铺设厚度为0.6 mm的聚氨酯涂层和两层玻璃纤维双轴布^[6]。沿展长方向,叶片叶根三轴布、主梁单轴布、尾缘单轴布、前缘和尾缘厚度分布如图2所示。

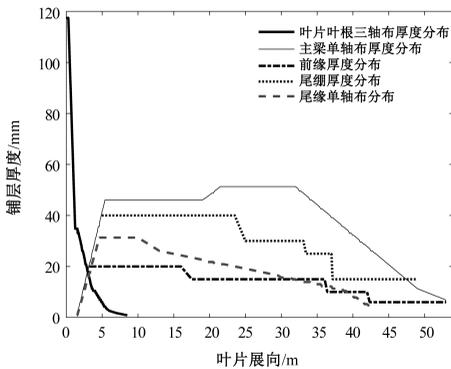


图2 叶片主要部位厚度分布

Fig. 2 Thickness distribution of main parts of blade

在叶片的参数化建模中,将叶片的弦长扭角等外形参数以及铺层结构参数放在 Excel 文件中,采用 Matlab 和 ANSYS APDL 编制的风电叶片参数化建模软件,可自动构建用于后续叶片结构、质量、最大变形量等性能分析的有限元模型^[7]。采用该方法构建的原叶片有限元模型如图3所示。

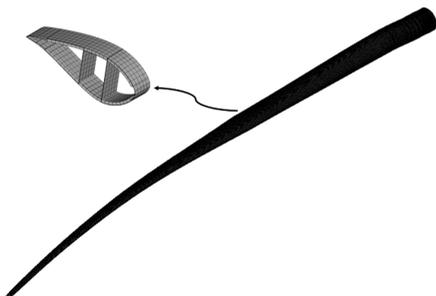


图3 叶片有限元模型

Fig. 3 Finite element model of blade

2 叶片铺层结构优化设计

叶片在恶劣工况下,挥舞和摆振方向的弯矩载荷主要由梁帽及尾缘单轴布承担。由于碳纤维布的相对密度比玻璃纤维布的小,但拉伸强度和弹性模量远大于玻璃纤维。考虑到碳纤维材料成本比较昂贵,以及当整个叶片结构采用碳纤维材料时,叶片容易受到雷击损坏等因素,本文在对玻碳混杂叶片的结构设计中,主要将梁帽和尾缘加强中单轴布玻璃纤维材料通过优化设计替换为碳纤维单轴布材料。

2.1 玻碳混杂叶片结构优化

对于原叶片的极限载荷,本文采用 GH-Bladed 软件参照 GL 2010 标准对叶片的 1200 种细分工况进行计算^[8],得到叶片的每个截面的最大极限载荷如图4所示。

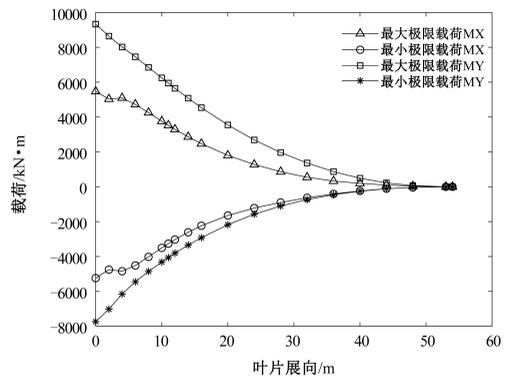


图4 原叶片极限载荷

Fig. 4 Extreme loads of original blade

将原叶片梁帽及尾缘中的单轴布玻纤替换成单轴布碳纤维材料,并假定优化设计中主梁和尾缘各截面处碳纤维材料的厚度为原叶片的 k_1 和 k_2 倍,即设计变量为 k_1 和 k_2 ,在原叶片的极限载荷下(如图4所示),以优化叶片与原叶片的最大叶尖变形量相等为目标,通过优化设计确定设计叶片中碳纤维铺层的厚度。

叶片主梁及尾缘加强处的铺层结构设计模型如图5(b)所示,由于碳纤维单轴布的弹性模量远大于玻璃纤维单轴布,且厚度小于玻璃纤维单轴布,在用碳纤维单轴布替换玻璃纤维单轴布后,为了避免叶片沿弦长方向上厚度分布不均匀和避免叶片在此位置产生应力集中,所以替换后用泡沫填补替换位置解决厚度差问题。

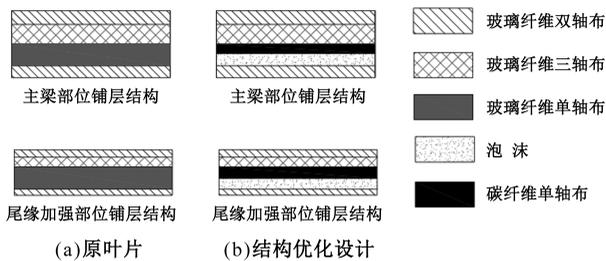


图5 叶片优化设计方案铺层结构图

Fig. 5 Schematic diagram of blade payups before and after optimization design

2.2 优化算法

优化设计采用单目标粒子群算法进行,粒子群算法中相关参数如下设置:种群大小取 10;粒子维数取 2;进化代数数为 150,其流程图如图 6 所示。

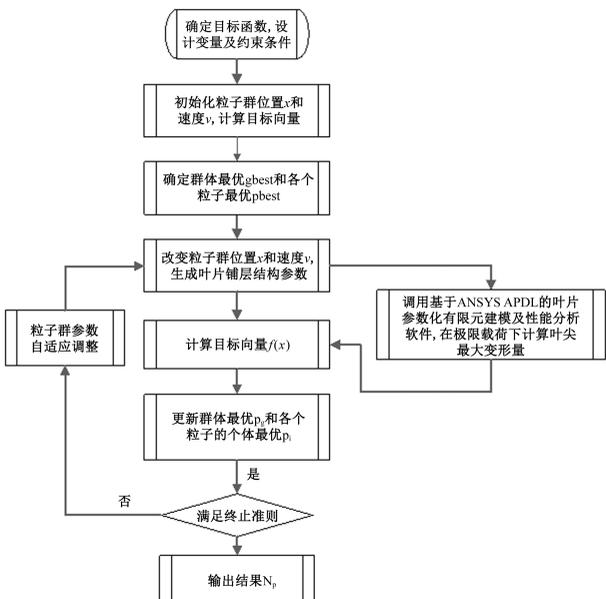


图6 优化设计算法流程图

Fig. 6 Flow chart of optimization design algorithm

叶片是一个柔性体,叶片的设计需要满足强度和刚度两个方面的要求,在以往叶片的结构性能分析研究中,发现叶片的最大变形量是叶片结构性能分析的首要考虑因素,而叶片的最大单元应力要远小于其许用应力^[9]。因此,在优化进程中,根据设计变量参数,采用 ANSYS 参数化设计语言建立叶片有限元模型;在原叶片的极限载荷下,分析其叶尖最大变形量。然后,根据约束条件计算出个体的计算适应度值。

2.3 优化结果

图 7 为优化叶片与原叶片在梁帽和尾缘加强部位单轴布的铺层厚度对比图,从中可以看到,采

用碳纤维材料后,梁帽和尾缘加强部位单轴布的铺层厚度明显减少。

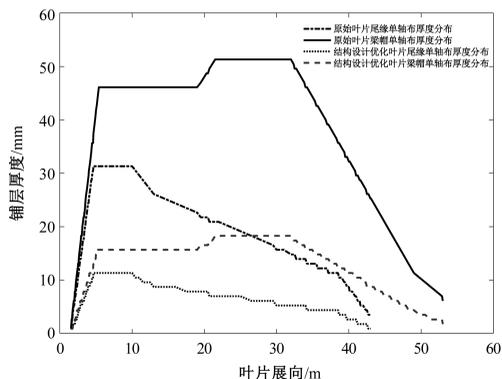


图7 梁帽和尾缘铺层厚度对比

Fig. 7 Comparison of thickness between spar-cap and trailing edge of the blade

3 设计结果分析

3.1 刚度和质量对比

采用 PreComp 软件对叶片结构优化模型和原始叶片模型进行截面刚度特性及质量分布的对比分析^[10],其结果如图 8 和图 9 所示。

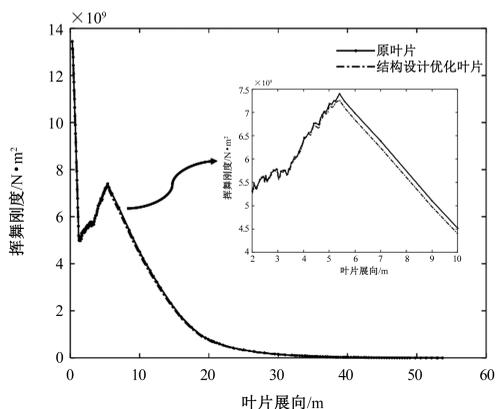


图8 叶片挥舞刚度分布

Fig. 8 Distribution of blade section stiffness

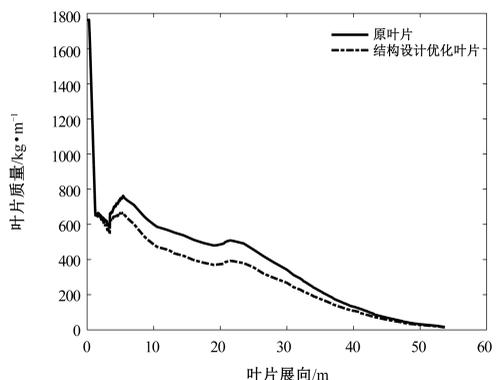


图9 叶片质量分布

Fig. 9 Distribution of blade section mass

由图8可知,结构设计优化后的叶片相对于原叶片的挥舞刚度略有下降。在最大弦长即距叶根9 m的截面处,挥舞刚度较原叶片下降了8.28%;由图9可知,结构设计优化后的叶片截面质量分布明显小于原叶片,优化后的叶片总重为7092 kg,碳纤维复合材料约为1152 kg,对比原叶片总重量为10500 kg,质量减少了32.46%。

3.2 载荷特性分析

为了评估叶片在复杂风况下的载荷及结构动力学性能,本文采用GH-Blade软件,以平均风速为9 m/s的湍流风对叶片进行动态载荷分析,其湍流强度纵向为15.46%,横向为12.16%,垂直方向为8.71%。

图10为叶片在距叶根1.5 m处的挥舞弯矩,可以看出结构优化后的叶片较原叶片挥舞方向上的载荷要明显降低,且对比于原叶片的挥舞弯矩,结构优化后的叶片挥舞弯矩最大降低了3.1%,表明对叶片进行轻量化设计后可有效降低叶片及风力机的载荷。

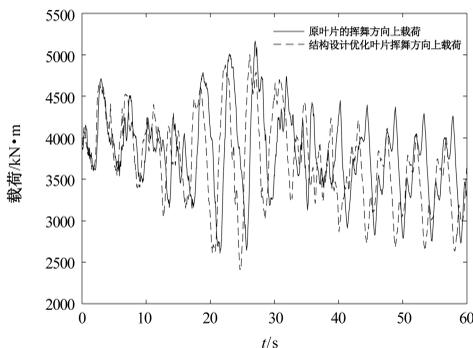


图10 叶片叶根部位挥舞弯矩载荷对比

Fig. 10 Comparisons of brandishing moment loads at blade root

图11为风力机在上述湍流风工况下的叶尖变形量对比图,由图可知,采用玻碳混杂复合材料进行叶片的设计,叶片的叶尖变形量较原叶片有较大的减小,且结构设计优化后的叶片较原叶片叶尖变形量最大减小了7.96%。

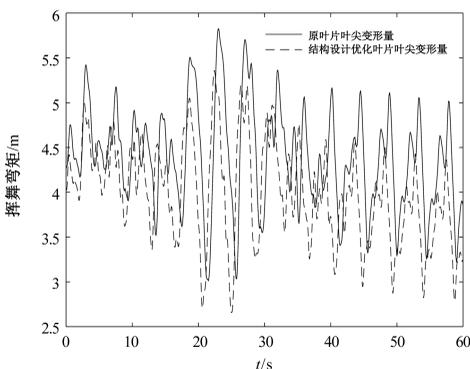


图11 叶片叶尖变形情况对比

Fig. 11 Comparisons of blade tip deformations

综合分析,玻碳混杂铺层结构叶片经过轻量化优化设计后,可显著减小叶片的载荷和叶尖变形量。

3.3 结构强度分析

在原叶片的极限载荷下(见图4),本文对叶片的结构强度进行了分析,叶片的应力云图如图12所示,原叶片最大拉伸应力为157 MPa,最大应力集中在叶片压力面叶根与腹板端部相接的部位;而结构设计优化后的叶片最大拉伸应力为112 MPa,这是由于相比于结构强度,叶尖变形量是叶片设计中的主要约束条件;另外,碳纤维材料的弹性模量明显高于玻璃纤维,用碳纤维单轴布材料替换梁帽和尾缘部分的玻璃纤维单轴布材料后,在满足叶片原有强度和刚度的条件下,碳纤维单轴布的铺层厚度要低于原玻璃纤维单轴布的铺层厚度,使叶片更加柔韧,且替换后的叶片在施加相同的载荷下,叶片的最大应力要明显降低。

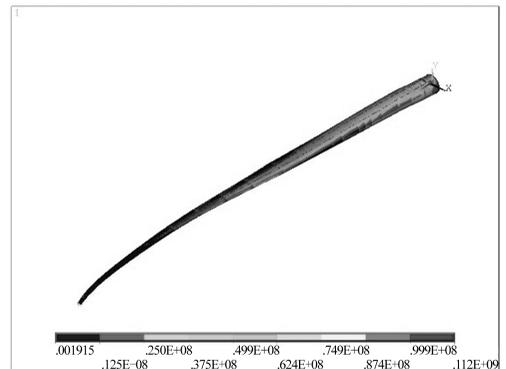


图12 结构设计优化后叶片应力云图

Fig. 12 Stress nephogram of blade after structural design optimization

4 结论

本文以某54 m、2 MW低风速风电叶片为对象,研究将其梁帽和尾缘加强处的单轴玻璃纤维纤维布替换为单轴碳纤维布后叶片的刚度、质量、载荷及结构强度等性能。通过以上研究,可得出以下结论:

- (1)在不改变叶片气动外形的基础上,玻碳混杂风电叶片的重量较原叶片可减少32.46%,在湍流风况下,叶根最大挥舞弯矩可减少3.1%;在保证优化前后叶片刚度相同的前提下,优化后叶片的最大拉伸应力减小至112 MPa,相比原叶片减少了28.66%;
- (2)对原叶片进行结构设计优化后,叶尖的动态变形量较原叶片有明显的减小。

本文的研究为低风速以及超低风速下风电叶片的减载、减重及降低叶片成本的轻量高效设计提供了参考依据。

参考文献

- [1] 周红丽, 王红, 罗振, 等. 风力发电复合材料叶片的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(3): 65-68.
- [2] 田德, 罗涛, 林俊杰, 等. 基于额定载荷的10 MW海上风电叶片铺层优化[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2195-2202.
- [3] Kalantari M, Dong C, Davies I J. Multi-objective analysis for optimal and robust design of unidirectional glass/carbon fibre reinforced hybrid epoxy composites under flexural loading[J]. Composites Part B, 2016, 84: 130-139.
- [4] 张娜, 龙春光, 何宏燕, 等. 碳纳米纤维纸-玻纤/环氧复合材料对风力发电叶片的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(1): 90-95.
- [5] 郭小锋, 郭士锐, 杨树峰, 等. 风力机叶片结构强度复合材料力学分析方法研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(5): 16-21.
- [6] 薛彩虹, 李军向, 王超, 等. 复合材料风电叶片有限元建模和屈曲稳定性分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(1): 4-7.
- [7] 陈进, 李松林, 沈文忠, 等. 气动弹性影响下复合材料风力机叶片结构设计[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1354-1360.
- [8] Ju S N, Park Y J, Chang H S. Dynamic life prediction of pitch and yaw bearings for wind turbine[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2016, 30(1): 249-256.
- [9] 郭小锋, 郭士锐, 杨树峰, 等. 风力机预弯叶片多目标优化设计[J]. 可再生能源, 2017, 35(6): 875-883.
- [10] Shakya P, Sunny M R, Maiti D K. A parametric study of flutter behavior of a composite wind turbine blade with bend-twist coupling[J]. Composite Structures, 2019, 207: 764-775.

STRUCTURAL DESIGN OPTIMIZATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF GLASS-CARBON HYBRID LOW WIND SPEED WIND TURBINE BLADES

GUO Xiao-feng, QI Jian-feng, HUANG Xin-xiang

(School of Mechanical Science & Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In order to further reduce the weight and load of low wind speed wind turbine blades, a design model of glassy carbon hybrid blade lamination structure was established based on a 2 MW wind turbine blade with a length of 54 meters. Based on the parametric modeling and analysis methods of MATLAB and ANSYS, the strength and load of the optimized glassy carbon hybrid laminated blade were carried out, as well as the characteristic, mass and maximum deformation analysis. The results show that the optimized blade mass decreases by 5.34%, and its dynamic load and tip deformation decrease significantly. On the promise of ensuring the same stiffness before and after optimization, the maximum tensile stress of the optimized blade decreases by 28.66%. This study provides important reference for lightweight design of low wind speed wind turbine blades, which is helpful to reduce the cost of wind turbine blades.

Key words: carbon fiber composites; layer structure; optimum design