

基于额定载荷的10 MW海上风电叶片铺层优化

田 德¹, 罗 涛¹, 林俊杰¹, 王煜翔¹, 邓 英¹, 廖猜猜²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;
2. 中国科学院风能利用重点实验室(中国科学院工程热物理研究所), 北京 100190)

摘 要:以某10 MW海上风电机组叶片为模型,基于经典层合板理论、欧拉伯努利理论和复合梁剪切流动理论,采用粒子群优化算法,对额定载荷下叶片结构铺层进行仿真优化。在满足对最大应力、弯曲、偏转和叶片固有频率的条件下,优化复合铺层厚度和主梁弦向位置,最小化叶片质量。优化结果:叶片质量减少9.66%,轴向刚度、挥舞刚度和扭转刚度均有所提升,Tsai-Wu强度因子远小于1,不会造成静态失效和疲劳损伤。

关键词:风电机组;结构优化;粒子群算法;有限元分析;载荷特性

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

叶片是风电机组的关键部件,随着海上风电的发展,叶片尺寸越来越大,重量急剧上升。叶片占整个系统成本的10%~15%,当重量减少10%~20%时,可显著降低其他主要部件(如塔筒和传动系)的成本,因此叶片的可靠性和重量成为设计大型风电机组主要考虑因素之一。叶片维护困难、维修成本高,对叶片进行结构优化设计具有重要意义。

风电机组叶片铺层优化设计主要包括铺层角度、铺层厚度和铺层顺序等,在综合考虑叶片结构、铺层原则、加工制造等基础上,以整体性能最优为目标,优化铺层方案,保证叶片在各种载荷下的强度和刚度尽可能达到最优。Lin Ching-Chieh等^[1]采用有限元和遗传算法相结合的方法进行复合材料层合板铺层优化。Chehouri等^[2]研究了优化后的铺层对风电叶片的静态失效和疲劳损伤的影响。张兰挺等^[3]通过优化铺层参数,对风电机组叶片静态结构性能的影响进行研究。廖猜猜等^[4]使用粒子群优化算法对风电机组叶片主梁铺层厚度进行优化设计。刘 博等^[5]对叶片结构铺层进行优化,提出梯形截面主梁结构。孙鹏文等^[6]对铺层角度、铺层厚度及铺层顺序分别进行优化,得到叶片的优化

铺层方案。

为优化风电机组叶片铺层设计,降低设计周期和成本,以最小化风电叶片质量为目标,基于额定载荷,满足对最大应力、弯曲、偏转和叶片固有频率的约束,从叶片铺层厚度出发,结合主梁弦向位置,对风电机组叶片结构进行优化设计。借助粒子群优化算法对叶片铺层进行结构优化计算;对优化后的叶片采用刚度分析和Tsai-Wu强度失效准则判断优化结果的可靠性。

1 叶片参数化建模理论分析

将风电机组叶片简化为承受挥舞弯曲、摆振弯曲、轴向位移和弹性扭转的悬臂梁。基于经典层合板理论、欧拉伯努利理论和应用于复合梁的剪切流动理论,对复合材料叶片进行简化处理。弯曲、拉伸和扭转之间的耦合作用通过梁剪切中心、张力中心和质心的偏移来拟合。基本的夹层复合层合板材料可简化为2个薄的纤维增强层合板材料(FRP)和夹在中间低密度的夹芯材料构成。

1.1 经典层合板理论

经典层合板理论(CLT)包括拉伸、弯曲和扭转、弯曲和扭曲、弯曲和拉伸、扭曲和拉伸等的耦合效应。由CLT计算的有效杨氏模量、有效剪切模量、

收稿日期: 2017-05-10

基金项目: 中国科学院风能利用重点实验室开放课题(KLWEU-2016-0101)

通信作者: 田 德(1958—),男,博士、教授、博士生导师,主要从事风力发电系统理论与技术方面的研究。tdncepu@163.com

有效泊松比、厚度和密度定义层合板,使用模量加权特性的方法来计算复合梁的整体截面性质,据此对叶片铺层进行优化设计。

空气动力载荷施加于气动中心 (x_{ac}, y_{ac}) , 体力作用于质心 (x_{cm}, y_{cm}) 。弯曲、拉伸和扭转之间的附加耦合通过弹性轴、形心轴和惯性轴的偏移来拟合。通过张力中心 (x_{tc}, y_{tc}) 来计算弯矩 (M_x, M_y) , 通过剪切中心 (x_{sc}, y_{sc}) 来计算扭矩 (Φ_z) 。方程(1)是悬臂梁的平衡的线性微分方程。

$$\begin{cases} \frac{dF_x}{dz} = -(p_{xa} + g_{xw} + p_{xc}) \\ \frac{dF_y}{dz} = -(p_{ya} + g_{yw} + p_{yc}) \\ \frac{dF_z}{dz} = -(p_{za} + p_{zc}) \\ \frac{dM_x}{dz} = F_y - (g_{zw} + p_{zc})(y_{cm} - y_{tc}) \\ \frac{dM_y}{dz} = -F_x + (g_{zw} + p_{zc})(x_{cm} - x_{tc}) \\ \frac{dM_z}{dz} = -q_{za} - p_{ya}(x_{ac} - x_{sc}) - (g_{yw} + p_{yc})(y_{cm} - y_{sc}) + \\ p_{xa}(y_{ac} - y_{sc}) - (g_{xw} + p_{xc})(y_{cm} - y_{sc}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, F ——剪切力, N; p_a ——空气动力, N/m; g_w ——自重, N/m; p_c 为离心力, N/m; M ——弯矩, Nm; q_a ——单位距离空气动力学力矩, N。

如图 1 所示, 每个截面由多层纤维复合材料组合而成, 每个层具有不同性质, 用 CLT 计算一组有效机械性能, 把多层层合板视为单一结构元件处理^[7]。使用 CLT 计算每个横截面的复合层合板的机械性能。对于非均匀复合梁, 用式(2)对截面进行加权处理, 得到等效截面性质。

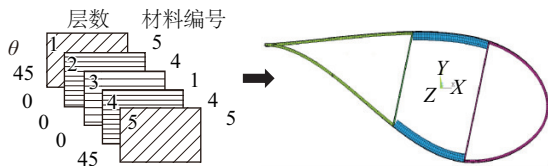


图 1 叶片横截面离散为复合材料层合板的连接

Fig. 1 Blade cross sections are discretized as a connection of composite laminated plates

$$\begin{cases} \bar{A} = \int_A \frac{E}{\bar{E}} dA = \frac{1}{\bar{E}} \sum_{i=1}^n E_i A_i \\ \bar{x}_c = \frac{1}{\bar{A}} \int_A \frac{E}{\bar{E}} x dA = \frac{1}{\bar{E}\bar{A}} \sum_{i=1}^n E_i A_i x_{ci} \\ \bar{y}_c = \frac{1}{\bar{A}} \int_A \frac{E}{\bar{E}} y dA = \frac{1}{\bar{E}\bar{A}} \sum_{i=1}^n E_i A_i y_{ci} \\ \bar{I}_x = \int_A \frac{E}{\bar{E}} y^2 dA = \frac{1}{\bar{E}} \sum_{i=1}^n E_i (I_{u0,i} + A_i y_{ci}^2) \\ \bar{I}_y = \int_A \frac{E}{\bar{E}} x^2 dA = \frac{1}{\bar{E}} \sum_{i=1}^n E_i (I_{v0,i} + A_i x_{ci}^2) \\ \bar{I}_{xy} = \int_A \frac{E}{\bar{E}} xy dA = \frac{1}{\bar{E}} \sum_{i=1}^n E_i (I_{uv0,i} + A_i x_{ci} y_{ci}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, E_i ——杨氏模量; \bar{E} ——参考模量; (x_{ci}, y_{ci}) ——横截面的每个离散段的几何形心; (u_{0i}, v_{0i}) ——每个离散段的主轴。

悬臂梁形心轴原点张力中心的横向位移、轴向位移和扭转的解耦的方程组如式(3)所示, 求解式(3)可求得梁形心轴的原点张力中心。

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_o}{dz^2} = \frac{M_y I_x + M_x I_{xy}}{\bar{E}(I_x I_y - I_{xy}^2)} \zeta \\ \frac{d^2 v_o}{dz^2} = \frac{-(M_x I_y + M_y I_{xy})}{\bar{E}(I_x I_y - I_{xy}^2)} \zeta \\ \frac{dw_o}{dz} = \frac{V_z}{S} \\ \frac{d^2 \Phi_z}{dz^2} = \frac{1}{\bar{E} I_z} \frac{dM_z}{dz} \end{cases} \quad (3)$$

式中, ζ ——校正因子^[8], 该校正因子扩展了原始梁理论, 为锥形悬臂梁提供更精确的位移。

1.2 欧拉-伯努利理论和剪切流动理论

在欧拉-伯努利梁模型平面截面的简化假设下, 只有 3 个不可忽略的应力分量, 即轴向应力 σ_x 和剪切应力 τ_{xz} 、 τ_{xy} 。剪切流理论假设在壁厚方向上剪切应力是均匀的, 且唯一的非零剪切应力分量变为 τ_s , 作用在 S 方向上 (其中 S 是曲线坐标, 沿着全截面周边的壁厚曲线的切线)。使用 CLT 和杨氏模量加权性质的方法计算梁的总体横截面性质, 在欧拉-伯努利梁的假设下通过等式(3)计算梁的形心轴偏转, 有效梁轴向应力和有效梁剪切应力分别用式(4)和式(5)求得。

$$\sigma_x(x, y) = \frac{E}{\bar{E}} \left[\frac{V_z}{\bar{A}} - \frac{M_y \bar{I}_u + M_x \bar{I}_{uv}}{\bar{I}_u \bar{I}_v - \bar{I}_{uv}^2} (x - \bar{x}_c) + \frac{M_x \bar{I}_v + M_y \bar{I}_{uv}}{\bar{I}_u \bar{I}_v - \bar{I}_{uv}^2} (y - \bar{y}_c) \right] \quad (4)$$

$$\begin{cases} \tau_{zs}(s) = \frac{f}{t} \\ \frac{df_o}{ds}(s) = -t \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \end{cases} \quad (5)$$

如图 2 所示,通过将分布的有效梁应力 σ_z 和 τ_{zs} 转换成平板层合板上的等效平面内分布载荷,对横截面周边进行离散,使用 CLT 求得主纤维方向上的叶片各层合板上局部应变和应力 ($\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \gamma_{12}, \sigma_{11}, \sigma_{22}$ 和 τ_{12}),得到层合板等效的拉伸,剪切和弯曲载荷。

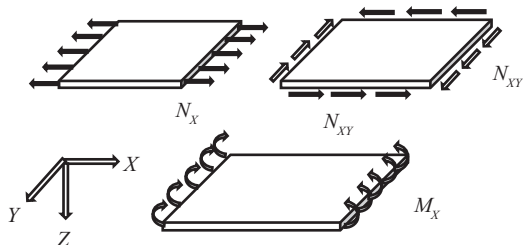


图2 复合材料层压板上的等效拉伸,剪切和弯曲载荷
Fig. 2 Equivalent extensional, shear, and bending loads on a composite laminated plate

2 叶片建模

借助 Co-Blade 对某 10 MW 海上风电机组叶片结构进行参数化建模,该叶片叶根段由圆形,叶中段由 DU 系列翼型,叶尖段由 NACA 系列翼型构成,各段间平滑过渡;Co-Blade 是华盛顿州立大学西北国家海洋可再生能源中心开发的一个工程软件,用于风电机组和流体动力涡轮机的复合材料叶片

叶片长度 100 m,轮毂半径 2.5 m。如图 3 所示,将叶片沿叶片展向分为 34 个截面,每个横截面分为上表面和下表面,上下表面各分为 3 个扇形区域(即前缘面板、主梁和尾缘面板),扇形区域交界处放置剪切腹板。假定剪切腹板沿着连接腹板端部的垂直线定位,且在每个横截面处垂直于弦线。

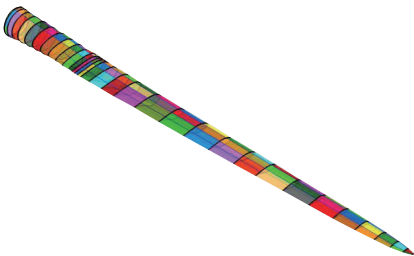


图3 叶片截面分布图
Fig. 3 The blade cross sections distribution

叶根部分的厚度从叶根处开始,沿叶片展向线性减小,而前缘面板(LEP),尾缘面板(TEP)和主梁材料厚度开始线性增加。在叶片最大弦长截面附近,叶根部分的厚度逐渐变为零,而 LEP、TEP 和主梁材料厚度到最大值。

叶片由 5 部分构成(过渡段部分的归类见表 1 下注释),总共 8 种复合材料,由于叶片表面胶衣材料不承受载荷,所以建模时忽略。叶片各部分的复合材料铺层顺序的描述如表 1 所示。将各材料用字母表示:单轴向玻璃布材料为 A;双轴向玻璃布材料 1 为 B;三轴向玻璃布材料为 C;双轴向玻璃布材料 2 为 D;LEP-夹芯材料为 E;主梁-夹芯材料为 F;TEP-夹芯材料为 G;腹板-夹芯材料为 H。

表1 铺层材料
Table 1 Lamination material

位置	第1层	第2层	第3层	第4层	第5层	第6层	第7层
叶根部分	B	C	B	—	—	—	—
过渡段 LEP	B	C	E	C	B	—	—
过渡段主梁	B	C	A	F	A	C	B
过渡段 TEP	B	C	G	C	B	—	—
LEP	B	E	B	—	—	—	—
主梁	B	A	F	A	B	—	—
TEP	B	G	B	—	—	—	—
剪切腹板	D	H	D	—	—	—	—

注:为便于分析,将过渡段 LEP、过渡段主梁和过渡段 TEP 中的 C 归为叶根部分,而其他材料归为相应的 LEP、主梁和 TEP,下文据此计算铺层厚度并作图。

初始叶片铺层完之后,按照结构分为叶根、主梁、前缘面板、尾缘面板和剪切腹板 5 部分,叶片质量为 125360 kg,各个部位的厚度分布如图 4 所示,除叶根厚度沿叶展递减、剪切腹板厚度基本不变外,其余 3 部分的厚度沿叶展方向先增加后递减。

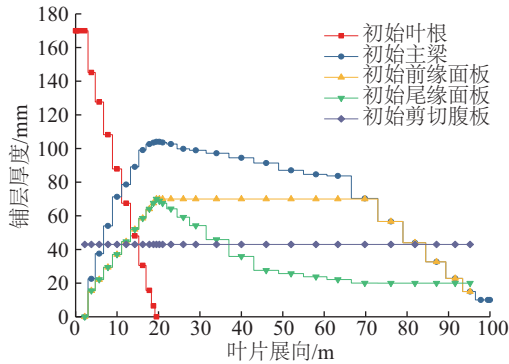


图4 初始叶片铺层厚度分布

Fig. 4 Initial blade material thicknesses distribution

初始叶片主梁沿弦长方向的位置分布(主梁弦向位置分布即弦长百分比位置)如图 5 所示,从最大弦长处开始,主梁所占弦长比沿叶片展向逐渐增大。

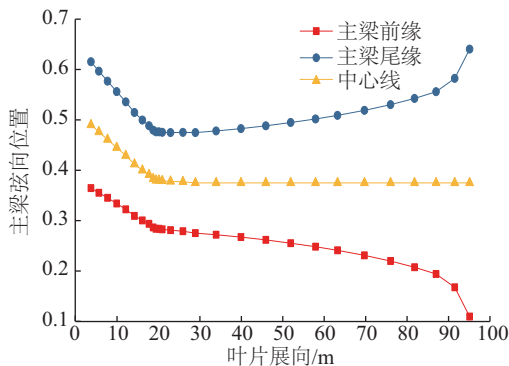


图5 初始叶片主梁弦向位置分布

Fig. 5 Initial blade spar caps chordwise locations distribution

3 叶片结构优化设计

3.1 结构优化

基于额定载荷,最小化风电机组叶片质量,同时满足结构、物理和设计要求。通过粒子群优化算法(PSO)对叶片的复合铺层厚度、主梁宽度和弦向位置分布进行结构优化。

设计变量:主梁铺层宽度和弦向位置,叶根、主梁、前缘面板、尾缘面板和剪切腹板的厚度。

设计约束:复合材料层合板最大许用应力、叶片最大允许挠度和固有频率的允许范围。

目标函数:改变主梁的铺层宽度和弦向位置、改变各铺层材料的铺层厚度,最小化所提出的适应度函数 $f(x)$ 。求得层合板主纤维方向的应变和应力 $(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \gamma_{12}, \sigma_{11}, \sigma_{22}$ 和 $\tau_{12})$,代入目标函数 $f(x)$,当叶片质量 m_{blade} 最小并且所有损伤因子 $p_1 \sim p_8$ 小于 1 时,目标函数 $f(x)$ 最小化,以此来优化叶片铺层厚度、主梁铺层宽度和弦向位置。

数学上,这个优化问题阐述如式(6)所示:

$$f(x) = m_{blade} \cdot \prod_{n=1}^8 \max(1, p_n)^2 \quad (6)$$

式中, $p_1 \sim p_5$ ——损失因子,表示层间应力比上对应最大拉压许用应力; $p_6 = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{buckle}} \right)^\alpha + \left(\frac{\tau}{\tau_{buckle}} \right)^\beta$,用来判断压缩和剪切的组合效应下屈曲, σ_{buckle} 、 τ_{buckle} 为临界弯曲应力(MPa)指数 α 和 β 取 1.5; p_7 ——叶尖位移和叶尖许用位移的比值,叶尖许用位移为 12 m; p_8 ——叶片固有频率 ω_m 和风轮旋转频率 ω_{rotor} 之间的差值与频率许用差值的比值,频率许用差值为 1 Hz。

3.2 结果分析

通过 PSO 对叶片进行优化,叶片质量减少至 113250 kg,质量下降 9.66%。优化后叶片铺层厚度如图 6 所示,对比图 4 可知叶片各部分铺层厚度均有所调整。

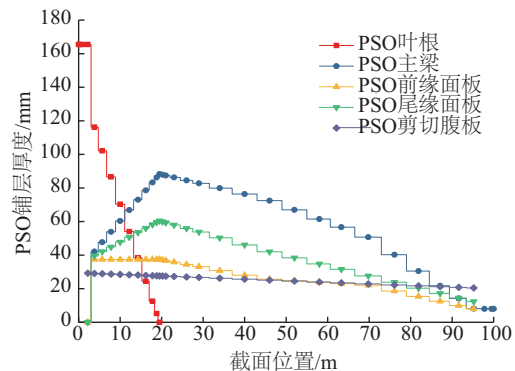


图6 PSO优化后铺层厚度分布

Fig. 6 PSO optimized laminate material thicknesses distribution

铺层厚度对比分析如图 7 所示,根据图 7a 可知,除靠近叶根位置外,主梁整体厚度均有所减小,17.6~76.1 m 段厚度减少较多,叶片展向 63.3 m

处减小值达最大 27.07 mm;从图 7b 可知,前缘面板厚度减小较多,叶展最大厚度 18 m 处,从 70.00 mm 下降到 37.46 mm,叶展位置 69.8 m 处厚度减少最多,从 70.00 mm 降至 22.09 mm;根据图 7c 可知,叶片尾缘面板整体厚度有所增加,由于尾缘面板面积较大,增加一定厚度能有效减少曲屈失效^[10];据图

7d 可知,初始叶片剪切腹板沿着叶片展向厚度不变,而经铺层优化设计后的叶片剪切腹板沿着叶片展向厚度逐渐降低,优化后剪切腹板厚度减少较多;叶根厚度对比如图 7e 所示,优化后,叶根厚度有所下降,3.8 m 处下降最多,从 145.20 mm 下降至 116.20 mm。

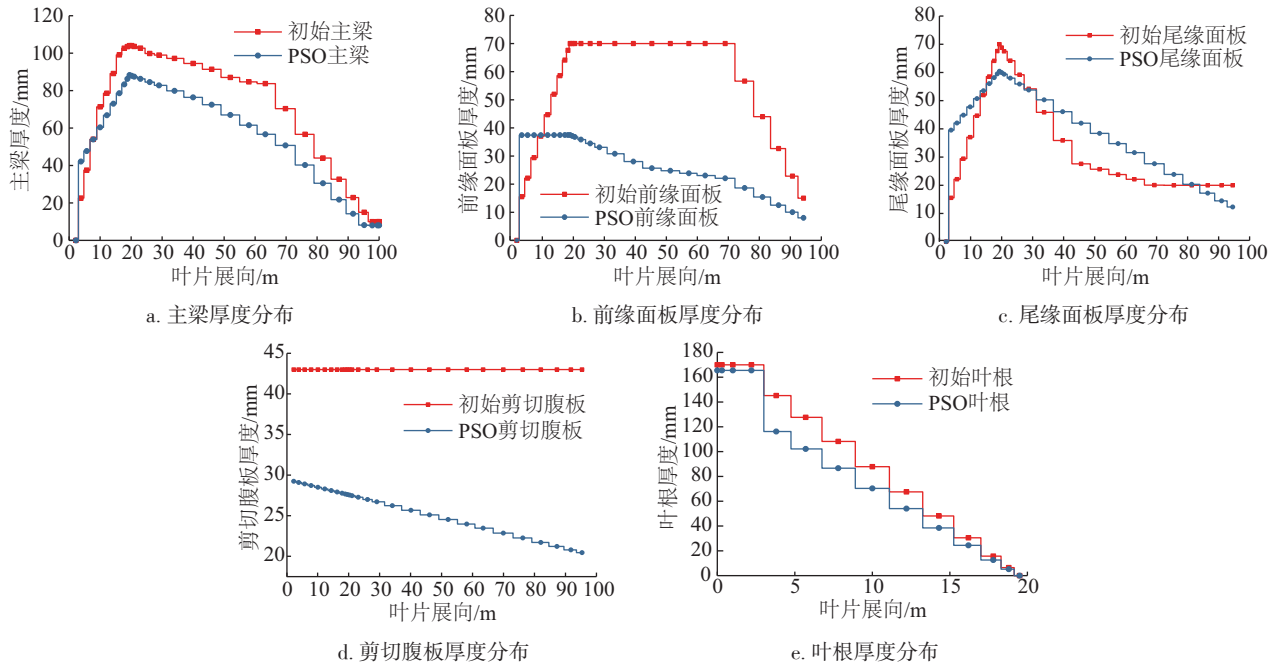
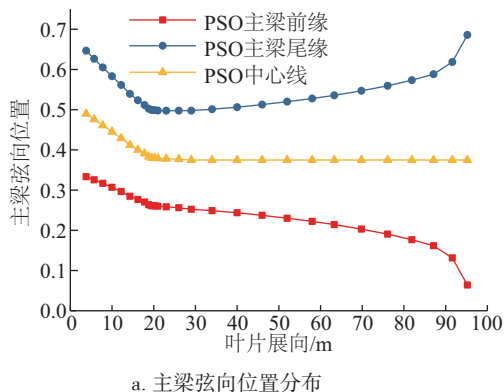


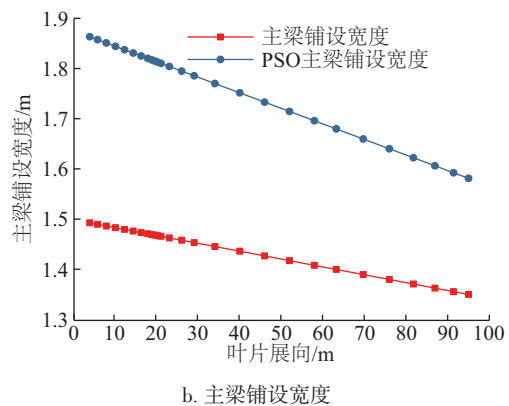
图7 铺层厚度对比

Fig. 7 Laminate material thicknesses comparison

结构优化得到的主梁弦向位置分布如图 8a 所示,与图 5 初始主梁弦向位置分布相比,主梁弦向位置分布整体趋势不变,中心线位置不变,但优化后叶片主梁沿叶片展向铺设宽度有所增加。如图 8b 所示,优化后的叶片主梁所占弦长比有所增加。具体对比如下:初始叶片叶根端主梁所占弦长比为 25.09%,而优化后为 31.32%;初始叶片叶尖为 53.10%,而优化后为 62.20%;最大弦长处主梁弦长比最小,初始



a. 主梁弦向位置分布



b. 主梁铺设宽度

图8 PSO优化后叶片主梁弦向位置分布

Fig. 8 PSO optimized chordwise locations distribution of the blade spar caps

叶片主为 19.25%,而优化后为 23.81%。

通过铺层优化,叶片主梁铺设厚度减小,主梁宽度增加,叶片前缘面板厚度增加,尾缘面板、剪切腹板和叶根厚度有所减小。主要通过降低主梁、前

缘面板、剪切腹板和叶根厚度减小叶片重量。

4 分析论证

4.1 刚度分析

在风电机组运行时,为避免叶尖与塔架发生干涉,确保机组安全可靠运行,需对风电叶片进行刚度分析。图9是初始叶片和优化后叶片的轴向刚度、扭转刚度、挥舞刚度和摆振刚度对比。降低叶片重量后,叶片轴向刚度、扭转刚度、挥舞刚度和摆振刚度整体不变,但在最大弦长位置附近,轴向刚度、扭转刚度和挥舞刚度均有所提升。分析可知,轴向刚度增加是由于主梁宽度增加,而这主要是增

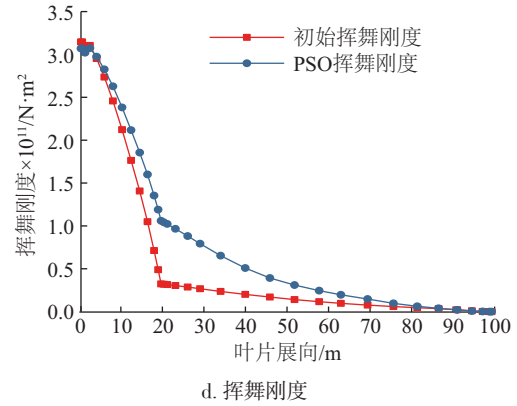
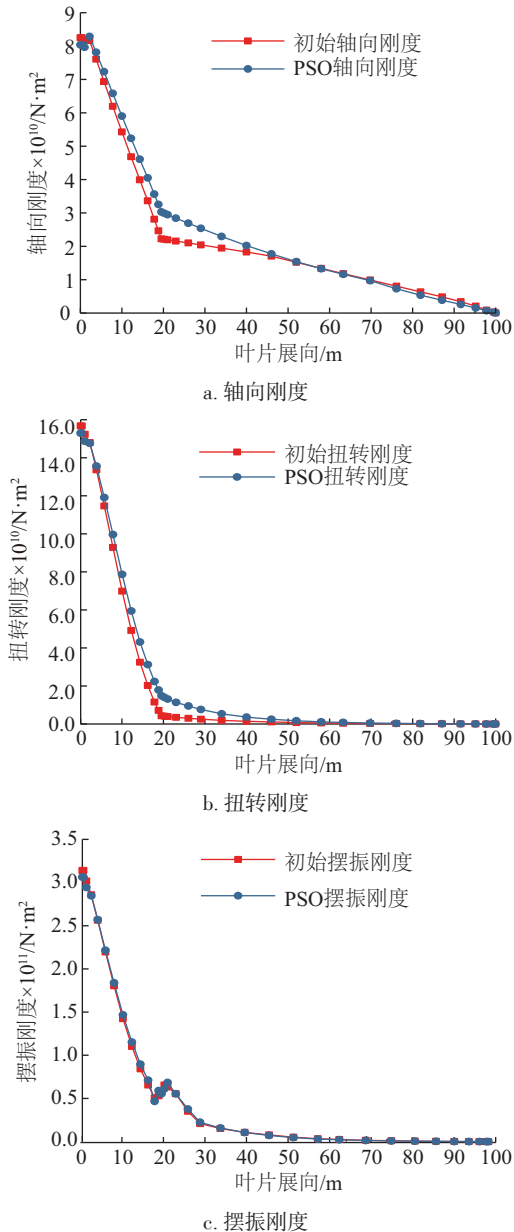


图9 叶片刚度分布对比

Fig. 9 Blade stiffness distribution comparison

加了主梁中的单轴向玻璃布层;扭转刚度增加是因为剪切腹板铺设位置的优化,挥舞刚度是由于主梁的优化和尾缘面板整体厚度增加所致,而摆振刚度不变也验证了在增加主梁宽度的同时适当降低其厚度不会影响叶片可靠性。

4.2 强度分析

由于复合材料各层纤维铺设角度不同,在载荷作用下不同铺层的变形不同,实际层合结构中各铺层粘结成为一体,会产生变形协调,铺层之间存在相互制约的作用力,这便是层间应力。层间应力使得复合材料层合板结构试验所得失效载荷有时明显小于经典层合板理论预测值,所以需用复合材料强度失效准则来对优化铺层进行验证。

目前复合材料强度失效准则主要有最大应变失效准则、最大应力失效准则、Tsai-Wu 强度失效准则和 Hill-Puck 强度失效准则等。Tsai-Wu 强度失效准则耦合性地考虑了各种应力分量及材料抗拉、抗压强度的不等性,且已实验验证其能对多种应力状态的复合材料强度失效进行预测^[11],因此采用 Tsai-Wu 强度失效准则作为判断标准, Tsai-Wu 强度失效准则如式(7)所示:

$$F_T = |A + B| \quad (7)$$

$$\text{其中, } A = -\frac{(\sigma_{11}^f)^2}{\sigma_{11}^{ft}\sigma_{11}^{fc}} - \frac{(\sigma_{22}^f)^2}{\sigma_{22}^f\sigma_{22}^f} - \frac{(\sigma_{33}^f)^2}{\sigma_{33}^{ft}\sigma_{33}^{fc}} + \frac{(\tau_{12}^f)^2}{(\tau_{12}^f)^2} + \frac{(\tau_{23}^f)^2}{(\tau_{23}^f)^2} + \frac{(\tau_{13}^f)^2}{(\tau_{13}^f)^2} + \frac{C_{12}\sigma_{11}\sigma_{22}}{\sqrt{\sigma_{11}^{ft}\sigma_{11}^{fc}\sigma_{22}^{ft}\sigma_{22}^{fc}}} + \frac{C_{23}\sigma_{22}\sigma_{33}}{\sqrt{\sigma_{22}^{ft}\sigma_{22}^{fc}\sigma_{33}^{ft}\sigma_{33}^{fc}}} + \frac{C_{13}\sigma_{11}\sigma_{33}}{\sqrt{\sigma_{11}^{ft}\sigma_{11}^{fc}\sigma_{33}^{ft}\sigma_{33}^{fc}}}$$

$$B = \left(\frac{1}{\sigma_{11}^t} + \frac{1}{\sigma_{11}^c} \right) \sigma_{11} + \left(\frac{1}{\sigma_{22}^t} + \frac{1}{\sigma_{22}^c} \right) \sigma_{22} + \left(\frac{1}{\sigma_{33}^t} + \frac{1}{\sigma_{33}^c} \right) \sigma_{33}$$

式中, σ_{11}^t ——沿复合材料纤维方向的抗拉强度, Pa; σ_{11}^c ——沿复合材料纤维方向的抗压强度, Pa; τ_{12}^t ——复合材料面内抗剪强度, Pa; C_{12} 、 C_{23} 、 C_{13} ——Tsai-Wu 强度理论耦合系数, 设为-1, 其余符号含义可类推获得。

作为强度失效与否的判据, 当强度指标值 $F_T > 1$ 时, 就认为结构不满足强度要求。图 10a 是经 PSO 优化后的叶片第 2 层铺层, 最大强度因子为 0.57249, 图 10b 是 PSO 优化后的主梁, 最大强度因子为 0.32586, 均远小于临界值 1, 所以 PSO 优化结果可靠。

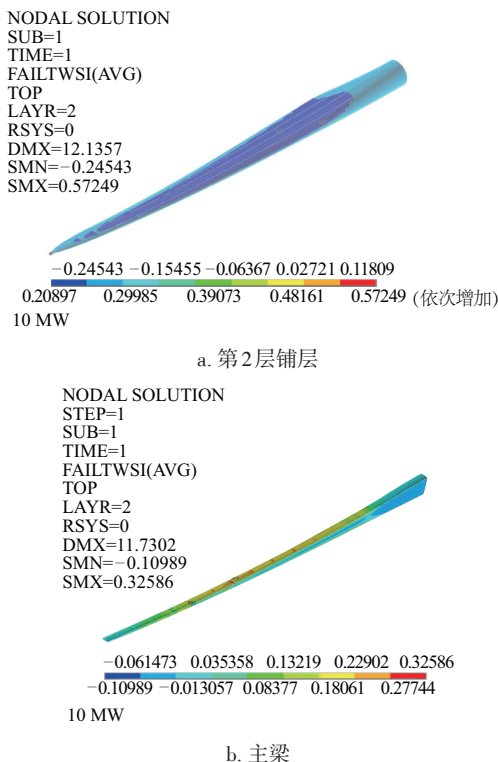


图 10 Tsai-Wu 强度因子云图

Fig. 10 Tsai-Wu intensity factors vectors

5 结 论

建立某 10 MW 海上风电机组叶片参数化模型, 在额定载荷下进行结构铺层优化仿真研究, 可得以下结论:

1) 通过粒子群算法对叶片铺层厚度、主梁位置和主梁铺层宽度进行优化, 叶片重量下降 9.66%, Tsai-Wu 强度因子远小于 1, 满足强度要求;

2) 主梁、前缘面板和剪切腹板调整较多, 沿着叶片展向适当增加主梁宽度, 降低主梁、前缘面板和剪切腹板厚度, 在满足可靠性情况下能显著降低叶片重量;

3) 加厚叶片尾缘面板、增大剪切腹板间距, 能增强扭转刚度; 增加主梁宽度, 同时降低主梁厚度、加厚尾缘面板, 能在不降低摆振刚度的情况下增强挥舞刚度和轴向刚度。

[参考文献]

- [1] Lin Ching-Chieh, Lee Ya-Jung. Stacking sequence optimization of laminated composite structures using genetic algorithm with local improvement [J]. Computer Structures, 2004, 63(3-4): 339—345.
- [2] Chehouri A, Younes R, Ilinca A, et al. Optimal design for a composite wind turbine blade with fatigue and failure constraints [J]. Transactions-Canadian Society for Mechanical Engineering, 2015, 39(2): 171—186.
- [3] 张兰挺, 邓海龙, 郜佳佳, 等. 铺层参数对风力机叶片静态结构性能的影响分析 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(6): 1059—1064.
- [3] Zhang Lanting, Deng Hailong, Gao Jiajia, et al. Influence of lamination parameters on static structure performance of wind turbine blade [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(6): 1059—1064.
- [4] 廖猜猜, 赵晓路, 王建礼, 等. 基于风力机叶片铺层的频率优化设计 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(8): 1311—1314.
- [4] Liao Caicai, Zhao Xiaolu, Wang Jianli, et al. Optimization design of the frequency based on wind turbine blade layers [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(8): 1311—1314.
- [5] 刘 博, 黄争鸣. 复合材料风机叶片结构分析与铺层优化 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2012, (1): 3—7.
- [5] Liu Bo, Huang Zhengming. Structure analysis and lay-up optimization of a composite wind turbine blade [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2012, (1): 3—7.
- [6] 孙鹏文, 邢哲健, 王慧敏, 等. 复合纤维风力机叶片结构铺层优化设计研究 [J]. 太阳能学报, 2015, 36(6): 1410—1417.
- [6] Sun Pengwen, Xing Zhejian, Wang Huimin, et al. Study on optimization design of wind turbine blade with

- composite fiber lamination structure [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2015, 36(6): 1410—1417.
- [7] Tuttle M. Structural analysis of polymetric composite materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 2004
- [8] Trudeau M G. Structural and hydrodynamic design optimization enhancements with application to marine hydrokinetic turbine blades [D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2011.
- [9] Sale D. User's guide to Co-Blade: Software for structural analysis of composite blades [R]. Washington: Northwest National Marine Renewable Energy Center, United States, 2012: 1—49.
- [10] Chen Xiao, Qin Zhiwen, Yang Ke, et al. Numerical analysis and experimental investigation of wind turbine blades with innovative features: Structural response and characteristics [J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(1): 1—8.
- [11] Soden P D, Kaddour A S, Hinton M J. Recommendations for designers and researchers resulting from the world-wide failure exercise [J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64 (3-4): 589—604.

OPTIMIZATION DESIGN OF COMPOSITE LAMINATE MATERIAL LAYERS FOR 10 MW OFFSHORE WIND TURBINE BLADE BASED ON RATED LOAD

Tian De¹, Luo Tao¹, Lin Junjie¹, Wang Yuxiang¹, Deng Ying¹, Liao Caicai²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. CAS Key Laboratory of Wind Energy Utilization, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A 10 MW offshore wind turbine blade is taken as the model, based upon a combination of classical lamination theory (CLT) with an Euler-Bernoulli and shear flow theory applied to composite beams. The particle swarm optimization algorithm is used to simulate and optimize blade structure layering under rated load. The objective is to minimize the blade's mass, determine the thickness of optimal composite layer and chordwise locations of the blade spar caps while satisfying constraints on maximum allowable stress, blade tip deflection, buckling, and placement of blade natural frequencies. Optimization result: blade quality decreased by 9.66%, axial stiffness, flapwise stiffness and torsional stiffness have all improved, Tsai-Wu intensity factors is far less than 1, which will not cause static failure and fatigue damage.

Keywords: wind turbines; structural optimization; particle swarm optimization; finite element analysis; load characteristics