

基于竞争博弈决策方法的风力机叶片气动与结构优化设计

孟瑞^{1,2},陈晓宇³,谢能刚¹

(1. 安徽工业大学机械工程学院,安徽马鞍山243032;2. 河海大学力学与材料学院,江苏南京210098;
3. 安徽江淮汽车股份有限公司技术中心,安徽合肥230001)

摘要:建立风力机叶片气动模型、结构模型和有限元模型,以7个标准翼型的弦长、扭角、铺层数、铺层位置、腹板位置、主梁帽宽度等27个参数作为设计变量,综合考虑风力机叶片的气动与结构性能,以风力机叶片年发电量和质量为目标函数,考虑叶片强度、刚度、振动性等约束条件,建立风力机叶片多目标优化设计模型。运用竞争博弈决策方法对实际叶片算例进行求解,将叶片气动目标与结构目标作为两个博弈方,并通过模糊聚类将设计变量集合分割为各博弈方拥有的策略子空间,各博弈方以自身博弈得益函数为目标,在各自的策略子空间中进行优化,通过多轮博弈并根据收敛准则获得最终的博弈方案。结果表明,通过竞争博弈得到的叶片参数更为合理,不但减轻了叶片质量,而且增加了其年发电量,显示了方法的有效性。

关键词:风力机叶片;气动与结构优化;竞争博弈决策方法

中图分类号:O 342 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-7872.2017.02.010

Aerodynamic and Structural Optimization Design of Wind Turbine Blade Based on Decision Method of Competition Game

MENG Rui^{1,2}, CHEN Xiaoyu³, XIE Nenggang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Technical Center, Anhui Jianghuai Automobile Co. Ltd., Hefei 230001, China)

Abstract: Aerodynamic model, structural model and finite element model of wind turbine blade were established. Taking 27 design parameters, including chord length and torsion angle of seven standard airfoils, layer number, layer location, location of shear web and width of spar cap etc, as design variables, and considering the aerodynamic and structural performance of wind turbine blade, a multi-objective optimization model of the wind turbine blade was built by taking annual energy production and mass of the blade as the objective functions, and taking strength, stiffness and stability constraints of the blade into account. Decision method of competition game was employed to solve the case of the actual blade example, where aerodynamic objective and structure objective were regarded as two game players, and fuzzy clustering was used to split the design variables set to the strategy subspace of each game player. Each player took its own profit function as mono-objective, and optimized it in each strategy subspace. According to convergence criterion, the final game equilibrium solution was obtained through multi-round game. The results show that the blade parameters obtained by competition game are more reasonable, not only the blade mass is reduced, but also the annual energy production is increased, which demonstrates the effectiveness of this method.

收稿日期:2017-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51605005,61375068)

作者简介:孟瑞(1982—),男,山东莱芜人,实验师,博士生,主要从事现代设计方法及理论研究。

Key words: wind turbine blade; aerodynamic and structural optimization; decision method of competition game

风力机叶片气动优化设计是通过优化叶片外表面的几何形状使其具有更优的气动性能,风力机叶片结构优化设计是通过优化叶片截面的几何形式使其具有更优的结构性能。一定条件下,叶片气动性能和结构性能相互制约,一方面叶片气动性能的改变会影响其结构性能,另一方面叶片结构性能的改变使其气动性能有所变化。所以在实际的叶片设计中,应综合考虑气动与结构两方面的因素,其关键在于如何妥善处理两者之间的关系。博弈论可解决冲突对抗条件下的最优决策问题,其调和冲突与矛盾的内在本质与工程领域中的多目标优化问题有很大的相似性,因此将博弈方法引申到工程领域可为其提供一种调和冲突的思路。通过赋予设计目标“竞争或合作”行为,并构建特定的博弈模式,各博弈方(被赋予行为方式的目标函数)在这个博弈模式下,通过彼此之间的谈判与妥协,最终生成各方均满意的均衡解,这就是博弈方法最基本的求解思想^[1]。

已有学者运用博弈方法在飞行器气动力设计^[2-3]、汽车悬架结构^[4]及拱坝体型^[5-6]等方面开展了相关研究,文献结果表明:博弈方法可以降低工程优化问题的求解难度,并获得了更优良的飞行器气动性能、更佳的悬架结构和拱坝体型。其方法的共同点是把多个目标函数看作多个博弈方,通过博弈方之间的相互博弈获得最终的优化解。但在运用博弈理论对风力机叶片进行设计方面的研究未有相关报道。为此,文中运用竞争博弈决策方法对风力机叶片的气动与结构性能进行优化设计,其结果证明了方法的有效性。

1 风力机叶片气动与结构优化设计模型

1.1 叶片气动模型的建立

影响叶片气动性能的参数主要包括叶片的翼型、弦长、扭角及其相对厚度等。文中选取7个标准的翼型^[7],叶根设定为圆形截面,每隔0.5 m对相近两个标准翼型的厚度进行3次样条插值得到一个翼型截面。插值方法为:设某标准翼型 s 的坐标为 (x_s, y_s) ,其相对厚度为 T_s ,则可得到相对厚度为 T 的翼型截面的坐标 (x, y) 。

$$(x, y) = \left(x_s, \frac{T_s - T}{T_s - T_{s+1}} y_{s+1} + \frac{T - T_{s+1}}{T_s - T_{s+1}} y_s \right), \quad (s = 1, 2, \dots, 7) \quad (1)$$

根据式(1)求得各截面的坐标,再通过平移、旋转、缩放等操作即可求得各翼型截面的实际坐标,最终生成的各叶片翼型截面如图1所示。

1.2 叶片结构模型的建立

空心薄壁的复合结构在大中型风力机叶片中的应用广泛^[8-10]。该结构主要由蒙皮、主梁帽、腹板、前缘、后缘组成,如图2。其中:蒙皮主要用来保持叶片当前的气动外形;主梁帽主要起承载作用,承担绝大部分挥舞与摆振方向的弯曲载荷;腹板对主梁帽起支撑作用,并承担剪切载荷。此外,叶片前、后缘空腔还需采用夹芯结构以提高叶片的整体刚度及空腔的抗屈曲失稳能力。主梁帽主要由单向玻璃纤维层合板组成,前、后缘由双向与三向玻璃纤维层合板结合的Balsa木与PVC泡沫等夹芯材料构成,腹板由双向玻璃纤维层合板与PVC泡沫构成。所选铺层材料的性能参数如表1。

1.3 叶片有限元模型的建立

选用ANSYS中的SHELL99和SHELL91两种3D壳体单元模拟叶片结构。网格划分是有限元模型建立的关键,网格的尺寸大小和划分质量直接影响最终计算结果的精确度。文中选用四边形网格,采用映射网

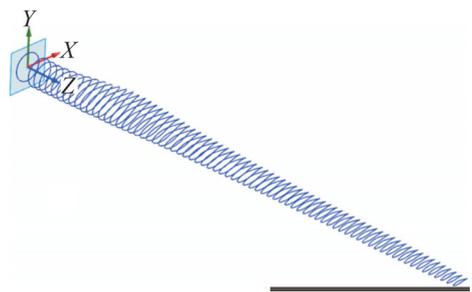


图1 叶片各翼型截面

Fig. 1 Airfoils sections of blade



图2 空心薄壁复合结构叶片截面

Fig. 2 Blade section of hollow thin-walled composite structure

格划分的方式对网格精度进行控制^[7]。叶片有限元模型的建立通过 ANSYS APDL 编程实现,模型共有 26 406 个单元,77 916 个节点,如图 3 所示,图中 6 个截面为沿叶片展向不同位置处的截面模型。

表 1 铺层材料的性能参数

Tab. 1 Property parameters of layer materials

材料	弹性模量 E_1 /GPa	弹性模量 E_2 /GPa	剪切模量 G_{12} /GPa	泊松比 ν_{12}	密度 ρ /(kg·m ⁻³)
单向层合板	42.20	12.50	3.50	0.24	1 910
双向层合板	11.50	11.50	11.80	0.61	1 910
三向层合板 1	26.90	13.40	7.50	0.47	1 910
三向层合板 2	31.80	11.40	6.50	0.49	1 910
Balsa 木	3.50	0.80	0.16	0.30	151
PVC 泡沫	0.05	0.05	0.02	0.09	60

1.4 设计变量、目标函数与约束条件的建立

设计变量 \bar{X} 表示为

$$\bar{X}=(x_1, x_2, \dots, x_{27}) \quad (2)$$

其中: $x_1 \sim x_7$ 为 7 个标准翼型处弦长; $x_8 \sim x_{14}$ 为 7 个标准翼型处的叶片扭角; $x_{15} \sim x_{21}$ 为主梁帽铺层数; $x_{22} \sim x_{25}$ 为主梁帽铺层位置; x_{26} 为腹板位置; x_{27} 为主梁帽宽度。文中以叶片年发电量的相反数 $f_1(\bar{X})$ 作为衡量叶片气动性能的指标,其值越小,则年发电量越大。计算公式为^[7]

$$f_1(\bar{X})=-\sum_{k=1}^N \frac{1}{2}[P(v_{k+1})+P(v_k)] g(v_k < v_0 < v_{k+1}) \times 8\ 760 \quad (3)$$

式中: P 为输出功率; N 为分段数; v 为风速; $g(v_k < v_0 < v_{k+1})$ 为 Weibull 风速分布模型中风速位于 v_k 和 v_{k+1} 之间的概率。考虑叶尖和轮毂气流损失以及葛劳渥特失速特性^[11],采用修正的叶素动量理论对其求解,方法如下。

当 $a \leq a_0$ 时

$$dM = \frac{\frac{1}{2} \rho B v_0^2 \left(1 - \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\xi C_n} + 1} \right) \omega r \left(1 + \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi \cos \phi}{\xi C_t} - 1} \right) c C_t r dr}{\sin^2 \phi \cos \phi} \quad (4)$$

当 $a > a_0$ 时

$$dM = \frac{1}{2} \rho B v_0^2 \left(1 - \left(\frac{1}{2} \left(2 + \frac{4F \sin^2 \phi}{\xi C_n} (1 - 2a_0) - \sqrt{\left(\frac{4F \sin^2 \phi}{\xi C_n} (1 - 2a_0) + 2 \right)^2 + 4 \left(\frac{4F \sin^2 \phi}{\xi C_n} a_0^2 - 1 \right)} \right) \right) \right) \omega r \left(1 + \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi \cos \phi}{\xi C_t} - 1} \right) c C_t r dr / \sin^2 \phi \cos \phi \quad (5)$$

式中: a 为轴向诱导因子; a_0 为轴向诱导因子修正阈值; B 为叶片数; ρ 为空气密度; v_0 为来流风速; c 为叶片弦长; ω 为叶轮旋转角速度; θ 为弦长与风轮旋转平面的局部夹角; ϕ 为风轮旋转平面和来流相对速度的夹角; r 为叶素所在半径; R 为叶片总半径; ξ 为叶片实度; C_t 为切向力系数; C_n 为法向力系数; a_w 取值 0.38; F 为修正系数,

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi}} \right) \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2} \frac{r-R_{hub}}{r \sin \phi}} \right) \quad (6)$$

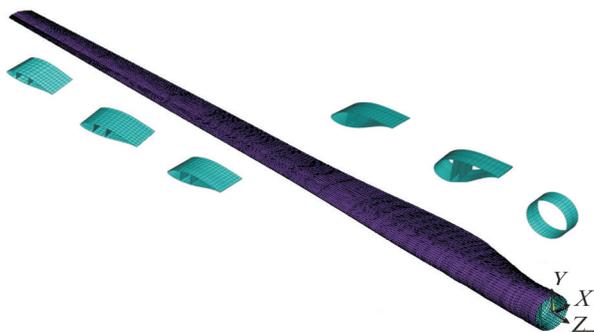


图 3 叶片有限元模型

Fig. 3 Finite element model of blade

式中 R_{hub} 为轮毂半径。

随着风电机组功率的增大,叶片质量增大,其成本也会增加,因此在叶片设计时要求质量尽可能小。文中以叶片质量 $f_2(\bar{X})$ 作为衡量叶片结构性能的指标^[7]

$$f_2(\bar{X}) = \sum_q \rho_q V_q \quad (7)$$

式中: ρ_q 为第 q 种材料的密度; V_q 为第 q 种材料的体积。

为保证叶片正常工作,根据文献[7],叶片在实际工作时产生的最大等效应变与应力及叶尖最大位移应小于设计值,据此建立强度约束条件: $\varepsilon_{\max} \leq \varepsilon$, $\sigma_{\max} \leq \sigma$; 刚度约束条件: $d_{\max} \leq d$ 。其中: ε_{\max} , σ_{\max} , d_{\max} 分别为叶片实际工作时产生的最大等效应变、最大等效应力和叶尖最大位移; ε 为叶片的设计应变,取值为 0.005; σ 为叶片的设计应力,取值为 750 MPa; d 为叶片的设计位移,取值为 5.5 m。叶片的固有频率应与风轮的旋转频率错开,避免产生共振,设计中,一般要求叶片的一阶自振频率避开风轮的 3 倍旋转频率,从而建立振动性能约束条件: $|f_{blade-1} - 3f_{rot}| \geq \Delta$ 。其中: $f_{blade-1}$ 为叶片一阶自振频率; f_{rot} 为风轮旋转频率; Δ 为容差,取值为 0.03 Hz。

2 竞争博弈决策方法

2.1 竞争博弈得益函数构造

竞争行为方式的特点是利己主义,对应的竞争博弈得益函数 u_i 构造如下

$$u_i = \frac{f_i(\bar{X})}{f'_i(\bar{X})} \quad (i = 1, 2) \quad (8)$$

其中, $f'_1(\bar{X})$, $f'_2(\bar{X})$ 分别为初始方案下叶片年发电量的相反数和叶片质量。

2.2 方法流程

划分各博弈方的策略子空间是运用竞争博弈决策方法的关键,合理的空间分割方法对博弈方法的计算效率、精度以及收敛性至关重要,经典的方法有模糊聚类方法^[12]、直接分割法^[13]等,其中直接分割法只适用不复杂的工程优化问题,本文采用模糊聚类方法,具体方法流程如下。

- 1) 采用模糊聚类方法,得隶属于 u_1 和 u_2 的策略子空间 S_1, S_2 。
- 2) 取初始方案在策略子空间 S_1, S_2 中的对应值作为初始可行策略 $s_1^{(0)}, s_2^{(0)}$, 形成策略组合 $s^{(0)} = s_1^{(0)} \cup s_2^{(0)}$ 。
- 3) 进行以下 2 个单目标优化计算。

(1) 求最优策略 $s_1^* \in S_1$, 使竞争博弈得益 $u_1(s_1^*, s_2^{(0)}) \rightarrow \min$;

(2) 求最优策略 $s_2^* \in S_2$, 使竞争博弈得益 $u_2(s_1^{(0)}, s_2^*) \rightarrow \min$ 。

其中,竞争博弈得益函数 u_1 和 u_2 根据式(8)建立。

- 4) 令策略组合 $s^{(1)} = s_1^* \cup s_2^*$, 检验 $s^{(1)}$ 是否满足约束条件,若不满足,则在策略子空间 S_1, S_2 中重新生成初始

可行策略 $s_1^{(0)}, s_2^{(0)}$ 后,转步骤 3)。若满足,则计算是否满足收敛精度 $\sqrt{\sum_{j=1}^{27} \frac{\left(\frac{x_j^{(1)} - x_j^{(0)}}{x_j^{(0)}}\right)^2}{27}} \leq 0.0001$, 若满足,则博弈结束;若不满足,则令 $s^{(0)} = s^{(1)}$, 转步骤 3) 进行迭代循环。

3 算例分析

3.1 计算说明

风力机叶片 7 个标准翼型参数及其初始弦长 ($x_1 \sim x_7$)、扭角 ($x_8 \sim x_{14}$) 和相对厚度如表 2 所示;此外,初始主梁帽铺层数 $x_{15} \sim x_{21}$ 分别为 33, 43, 53, 62, 53, 43; 主梁帽铺层位置 $x_{22} \sim x_{25}$ 分别为 7.8, 11.0, 18.0, 21.4 m; 腹板位置 x_{26} 为 0.188 m; 主梁帽宽度 x_{27} 为 0.62 m。上述 27 个参数取值由某风力机叶片生产厂提供,文中称此参数下的方

表2 标准翼型及其初始弦长、扭角和相对厚度

Tab. 2 Standard airfoil and original chord length, torsion angle and relative thickness

翼型	半径/m	弦长/m	扭角/rad	相对厚度/%
Circle	0	1.880 0	0.174 5	100
Circle	1	1.880 0	0.174 5	100
DU400EU	7	3.033 6	0.124 0	40
DU350EU	12	2.666 1	0.084 9	35
DU300EU	17	2.267 5	0.032 7	30
DU91_W2_250	22	1.991 1	0.018 0	25
DU98_W_210	27	1.784 3	0.002 9	21
NACA_64_618	32	1.623 5	-0.017 1	18
NACA_64_618	36.5	1.210 7	-0.032 4	18

案为初始方案。采用竞争博弈决策方法对此风力机叶片进行气动与结构设计,风速分布模型采用Weibull概率分布,风力机轮毂高度77 m,叶片数3片,额定风速12 m/s,切入风速4 m/s,切出风速25 m/s。设计变量 $x_1 \sim x_{27}$ 、位移、应变与应力取值上下限见表3,考虑到叶片的振动性能,设定 $f_{blade-1} \notin 0.92 \sim 0.98$ Hz。

表3 设计变量、位移、应变与应力取值上下限

Tab. 3 Upper and lower limit of design variables, displacement, strain and stress

范围	$x_1 \sim x_7/m$	$x_8 \sim x_{14}/rad$	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}
下限	1.1	-0.04	28	28	33	35	33	28	28
上限	3.3	0.21	38	48	58	65	55	47	40
范围	x_{22}/m	x_{23}/m	x_{24}/m	x_{25}/m	x_{26}/m	x_{27}/m	d/m	$\varepsilon/10^{-6}$	σ/MPa
下限	7.0	10.0	16.0	20.5	0.13	0.5	-	-	-
上限	9.0	13.0	19.0	22.0	0.25	0.8	5.5	5 000	750

3.2 计算结果及分析

采用竞争博弈决策方法按2.2节所述流程,对风力机叶片进行气动与结构设计,得到竞争博弈优化方案。初始方案与竞争博弈优化方案下叶片年发电量与质量如表4。由表4可知:优化后的叶片更为合理,叶片年发电量增加了0.08 GWh,叶片质量减轻了790 kg。

初始方案与竞争博弈优化方案优化的叶片弦长、扭角、铺层等主要参数如图4~6。由图4可以看出,竞争博弈优化方案对应的叶片弦长沿翼展方向均有减小,其中叶片弦长较大区域以及叶尖区域减小更为明显,而叶片弦长的减小会减少复合材料的使用,从而减轻叶片质量、降低成本。由图5可以看出:竞争博弈优化方案对应的叶片在靠近叶根至叶片中下部区域扭角变化很小,而在叶片中部区域至叶尖区域扭角的变化较大,且竞争博弈优化方案对应的扭角大于初始设计扭角,该区域扭角的增大有助于风力机叶片获得最佳的升力与阻力比,从而提高叶片的气动性能。此外,扭角的增加还可在一定程度上弥补弦长减小带来的功率损失,从而保证叶片的输出功率。由此可见,基于竞争博弈优化方案,叶片弦长及扭角的变化有利于风力机获得更好的目标值,符合实际的叶片设计要求。由图6可知:采用竞争博弈优化方案,主梁复合材料铺层数在接近叶根与叶尖的区域变化较小,在主梁帽中段变化较大,铺层数减少最多,这利于减轻叶片质量。

表4 初始方案与竞争博弈优化方案的叶片年发电量与质量
Tab. 4 Annual energy production and mass of blade of original and game optimization design

方案	年发电量/GWh	叶片质量/ 10^3 kg
初始方案	3.68	6.52
竞争博弈优化方案	3.76	5.73

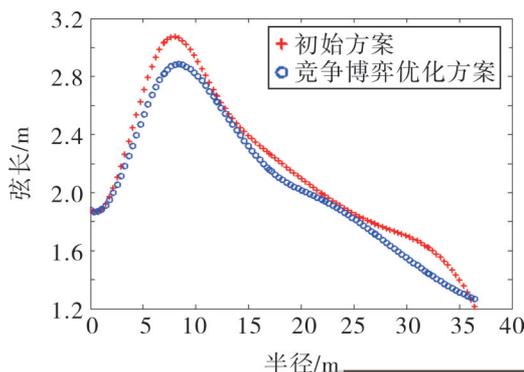


图4 弦长分布对比

Fig. 4 Comparison of chord distribution

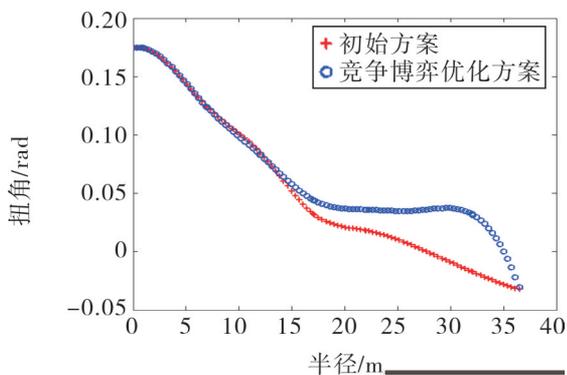


图5 扭角分布对比

Fig. 5 Comparison of twist angle distribution

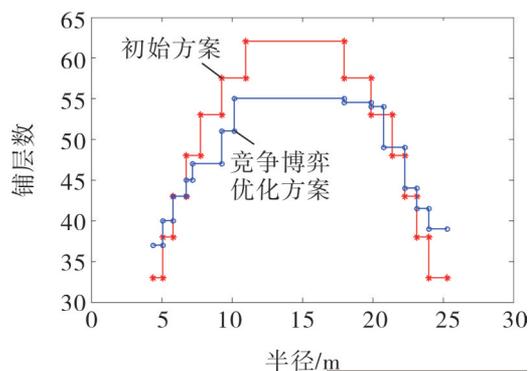
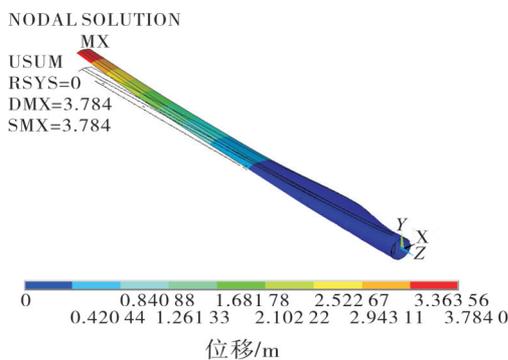


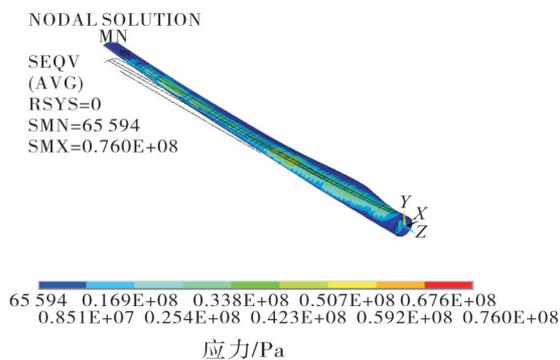
图6 铺层对比

Fig. 6 Comparison of laminating

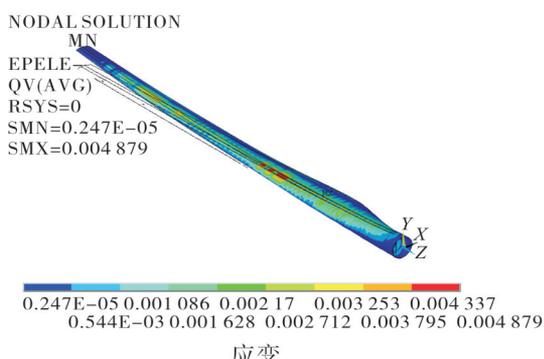
竞争博弈优化方案对应的叶片位移、应力、应变以及一阶模态如图7。由图7可看出:叶片最大位移发生在叶尖部位,为3.784 m,小于设计值5.5 m,说明叶片在正常工作状况下不会与塔架发生碰撞;主梁帽的应力与应变值高于其他部位,而前缘、后缘以及腹板的应力与应变值相对较低,说明主梁帽是叶片的主要承载部件,而前缘、后缘以及腹板主要起维持叶片结构稳定性的作用;叶片最大等效应力为76 MPa,远小于材料的设计强度750 MPa,最大等效应变为0.004 879,接近材料的设计应变0.005,表明该叶片的强度校核应以应变验证为主;叶片一阶振动形式以挥舞为主,一阶振动频率为0.740 903 Hz,远离共振区。



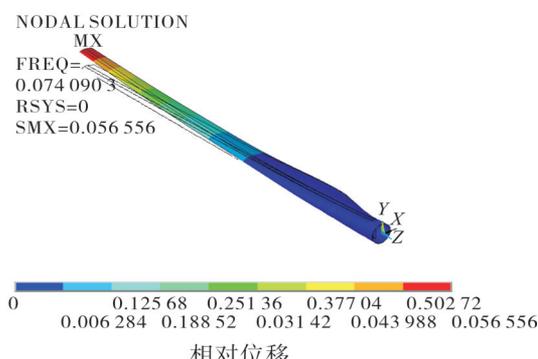
(a) 位移云图



(b) 应力云图



(c) 应变云图



(d) 一阶模态图

图7 竞争博弈优化方案的位移、应力、应变与一阶模态图

Fig. 7 Displacement, stress and strain and first-order modal of game optimization design

上述分析表明,与初始方案相比,竞争博弈优化方案能满足叶片位移、应力、应变以及振动性等约束条件,其对应的叶片弦长与扭角、铺层数、铺层位置等主要参数的设置更为合理,其气动性能(叶片年发电量)和结构性能(叶片质量)均有较大改进,说明了竞争博弈决策方法的有效性。

- [14] 葛显龙,许茂增,王伟鑫. 多车型车辆路径问题的量子遗传算法研究[J]. 中国管理科学, 2010, 32(8):1801-1807.
- [15] 丁秋雷,胡祥培,李永先. 求解有时间窗的车辆路径问题的混合蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(10):98-104.
- [16] 王付宇,叶春明,王涛. 城市突发事件下的应急物资配送路径寻优[J]. 安徽工业大学学报(自科版), 2016, 33(2):177-184.
- [17] 张涛,张玥杰,王梦光. 不确定车辆数的车辆路径问题模型和混合算法[J]. 系统工程理论方法应用, 2002(6):121-130.

责任编辑:丁吉海

(上接第156页)

4 结 语

在建立风力机叶片气动模型、结构模型和有限元模型的基础上,选取7个标准翼型处的弦长、扭角、铺层数、铺层位置、腹板位置、主梁帽宽度等参数作为设计变量,在一定约束下综合考虑其气动与结构性能,建立风力机叶片气动与结构多目标优化设计模型。运用竞争博弈决策方法对一实际风力机叶片进行竞争博弈优化设计,结果表明:优化后的叶片满足全部约束条件,不但减轻了叶片质量,而且增加了叶片年发电量。研究结果可为博弈论在叶片气动与结构设计方面的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 包家汉,裴令明,谢能刚,等. 机构多目标优化与博弈决策设计[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2005, 22(2):108-111.
- [2] WANG J F, WU Y Z, PERIAUX J. Decentralized multi-point optimization algorithms for multi-airfoil design in aerodynamics[J]. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(1):71-77.
- [3] TANG Z L, DONG J. Couplings in multi-criterion aerodynamic optimization problems using adjoint methods and game strategies[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(1):1-8.
- [4] WANG L, XIE N G, SONG C Z, et al. Multi-objective bionics design method of passive suspension parameters based on hybrid behavior game[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, 42(3):371-386.
- [5] 谢能刚,孙林松,包家汉,等. 基于无私合作博弈模型的拱坝体型多目标优化设计[J]. 水利学报, 2007, 38(9):1109-1114.
- [6] 谢能刚,岑豫皖,孙林松,等. 基于混合行为博弈的多目标仿生设计方法[J]. 力学学报, 2008, 40(2):229-237.
- [7] 蔡新,潘盼,朱杰,等. 风力发电机叶片[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014:175-188.
- [8] 汪泉,陈进,王君,游颖,等. 气动载荷作用下复合材料风力机叶片结构优化设计[J]. 机械工程学报, 2014(9):114-121.
- [9] 任腊春. 风力机风轮叶片结构设计与分析[D]. 成都:西华大学, 2008:26-37.
- [10] 王珑. 大型风力机叶片多目标优化设计方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014:19-21.
- [11] MARTIN O L H. 风力机空气动力学[M]. 肖劲松,等译.北京:中国电力出版社, 2009:39-53.
- [12] 谢能刚,岑豫皖,方浩,等. 被动悬架参数的多目标博弈设计[J]. 机械强度, 2010, 32(1):79-85.

责任编辑:何莉