

风力机叶片优化设计目标

吴江海¹ 王同光¹ 赵新华²

(1. 南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 南京, 210016;

2. 无锡风电设计研究院有限公司, 无锡, 214174)

摘要:研究了变桨型风力机叶片的气动性能计算、叶片设计载荷评估、叶片结构设计、风力机组成本评估及风电场运营模型,并将这些模块进行了整合,得到了度电成本的计算方法,同时提出了风场运营收益最大这一叶片设计目标。基于有针对性的叶片参数化描述,采用自适应模拟退火算法,分别以不同的目标优化设计了1.5 MW变桨型的叶片。分析比较了度电成本及风场收益两个指标在平衡发电量和成本上的区别,认为在可以确定上网电价的情况下,以风场收益最大为目标设计叶片能为风电运营商带来更多的收益。

关键词:风力机叶片;风场收益;优化设计

中图分类号:TM614

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2011)05-0661-06

Design Targets for Wind Turbine Blade Optimization

Wu Jianghai¹, Wang Tongguang¹, Zhao Xinhua²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design,

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Wuxi Wind Power Institute Co. Ltd., Wuxi, 214174, China)

Abstract: Blade aerodynamic performance calculation, blade design load evaluation, blade structure design, system cost evaluation and wind farm operation model for variable-pitch wind turbines are investigated and then integrated. As a result, the analysis method for the cost of energy (COE) is derived, and a new target of wind farm profit (WFP) for wind turbine blade design is developed. Based on the shape parameterization, a 1.5 MW blade for pitch regulated wind turbine is designed with different objectives using the adaptive simulated annealing algorithm (ASAA). The difference between the COE and WFP is analyzed. Results show that with grid rate, blade design with the target of the maximum WFP it is more reasonable than that with COE.

Key words: wind turbine blade; wind farm profit; optimization design

大型风力机的叶片设计是一个复杂的多学科问题,也是风力机产品设计的基础,影响着整个风力机系统的运行,因而在叶片气动外形设计的时候就需要提出一些系统的指标来综合考察叶片的性能,这样最终设计出的风力机才能在发电量和成本之间做出最好的平衡。

国外大型风力机叶片气动设计技术已经比较成熟,Fuglsang在1999年就已经实现了以度电成本最小为目标的优化工作^[1-2],除此之外,国内外还有许多其他的机构在进行着这方面的研究^[3-5]。

本文将叶片气动性能分析、叶片输出载荷评估、叶片结构设计、风力机组成本评估和风电场运

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB714600)资助项目;江苏省创新学者攀登(BK2008004)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2011-04-29;**修订日期:**2011-07-25

通讯作者:王同光,男,教授,博士生导师,1962年3月生,E-mail:tgwang@nuaa.edu.cn。

营模型进行了整合,推导了度电成本的计算方法,并在此基础上提出了风场运营收益最大化这一新的叶片设计目标。采用自适应模拟退火算法(Adaptive simulated annealing algorithm, ASAA)分别以不同的目标进行叶片优化设计,系统研究和分析了不同设计目标和结果之间的联系与区别。

1 设计变量及叶片参数化

为指定风场设计某种规格叶片的时候,通常会在概念设计阶段确定采用的基本翼型、叶片长度、额定转速以及叶片选用材料、结构铺层形式等总体性的参数。考虑到叶根设计的特殊性,这里对叶片外形的优化设计暂不涉及叶根,将叶根形状预先设定并在优化过程中保持不变,那么设计变量就是除去叶根形状之外叶片的弦长、扭角和相对厚度沿展向的分布。

叶片的气动外形可以用多个离散点来表示,也可以将形状描述为通过有限个控制点的样条、贝塞尔、NURBS曲线等。重庆大学张石强还提出了用 n 阶多项式描述叶片气动布局^[5];为了更好地描述结构和工艺对叶片外形的约束,保证生成形状平顺无鼓包出现,这里参考了许多成熟叶片的气动布局,结合结构和工艺对叶片形状的要求作了总结分析,对叶片的弦长、扭角及相对厚度都作了有针对性的参数化描述。

1.1 弦长分布函数

$$C(\bar{r}) = a\bar{r}^3 + b\bar{r}^2 + c\bar{r} + d \quad (1)$$

式中 \bar{r} 为量纲一叶片长度。各项系数可以用如下几个具有物理意义的变量来确定: k_1 为最大弦长, $k_1=C(\bar{r}_m)$, \bar{r}_m 为预先确定的最大弦长所在位置; k_2 为叶尖处的弦长, $k_2=C(1)$; k_3 为弦长分布函数曲率为零点的位置 $C''(\bar{r})|_{\bar{r}=k_3}=0$; k_4 为 $\bar{r}=0.3$ 处弦长分布函数的斜率, $k_4=C'(0.3)$ 。

1.2 扭角分布函数

将叶根以后的扭角描述为量纲一叶片长度的指数函数

$$T(\bar{r}) = k_5 \cdot \bar{r}^{k_6} + k_7 \quad (2)$$

1.3 相对厚度分布函数

叶根以后的相对厚度可以描述为

$$Th\%(\bar{r}) = k_8 \cdot \bar{r}^{k_9} \quad (3)$$

这样叶片的气动外形就可以由 $k_1 \sim k_9$ 这9个

参数来确定,也就是本文优化设计中的9个变量。

2 设计目标

2.1 年发电量

叶片的气动性能用动量叶素理论来计算,根据大风速下变桨距恒功率的控制策略可以得到叶片在切入风速和切出风速之间运行的功率曲线,与设计风场的风频分布相结合,就能计算出理想的年发电量^[6]。在此基础上考虑控制效率、风场可用率、密度折减等因素带来的综合效率 η 后,得到实际的年发电量。

2.2 设计载荷

叶片结构设计需要预先确定各截面的设计载荷,另外叶片的输出载荷也会对机组部件的设计成本产生影响。为了减小载荷评估的计算量,本文根据IEC61400-1^[7]等设计规范的要求,在若干组风力机载荷计算工作的基础上,制定了叶片设计简化载荷工况(Simplified load case, SLC)。

表1 IEC A类风场叶片挥舞方向极限载荷简化工况表

SLC	来流风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	风轮转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	偏航角/ ($^\circ$)	桨距角/ ($^\circ$)
1.1	V_r+8	$1.1\omega_0$	8	1,2,3,4,5
1.2	V_r+10	$1.1\omega_0$	8	5,6,7,8
1.3	$\text{ETMV}_{\text{out}}-V_{\text{max}}$	ω_0	8	10,15,20
2.1	V_{e1}	0	90,270	90
2.2	V_{e50}	0	30,330	90

注: ω_0 为风轮额定转速; V_r 为额定风速; $\text{ETMV}_{\text{out}}-V_{\text{max}}$ 为平均风速为切出风速的极限湍流风所能达到的最大瞬时风速; V_{e1} 为一年一遇极限风速; V_{e50} 为50年一遇极限风速。

计算所有简化载荷工况下的准稳态气动力并作加权平均,得到叶片的特征载荷,再乘以安全系数 γ_f 作为叶片的设计极限载荷。经在多组不同型号的叶片上验证, $\gamma_f=2$ 时简化计算的结果与最终详细计算出的设计极限载荷都很接近,说明这种简化方法可以非常迅速且能较准确地模拟叶片的输出载荷。

2.3 整机成本

为了得到叶片气动外形的改变给机组成本带来的影响,本文研究了目前主流风力机组的成本构成情况,给出了简单评估各主要部件成本的评估方法,其中详细描述了叶片的成本构成及计算方法,其他部件建立了成本与叶片输出载荷的关系。

2.3.1 叶片成本

叶片的实际成本构成相对复杂,不过在叶片优化设计过程中可以将叶片的成本简单归纳为3个部分

$$C_b = \sum_{i=1}^3 C_{bi} \quad (4)$$

(1) 与叶片质量成正比的部分

用来描述叶片消耗的材料费用,该部分的成本可描述为

$$C_{b1} = B_1 \cdot M$$

其中: M 为叶片总质量; B_1 为单位质量的平均材料费用。

(2) 与叶片面积成正比的部分

考虑到模具成本、场地建设成本及其他成本中应有随叶片投影面积增大而增大的部分^[8],这里在叶片成本中设置了与叶片面积成正比的部分

$$C_{b2} = B_2 \cdot A$$

其中: A 为叶片投影面积,可由弦长沿展向的积分得到; B_2 为单位面积成本。

(3) 固定成本

将人工、管理、检测设备费用视为固定成本 C_{b3} ,不随叶片的气动外形而变化,不同型号的叶片固定成本不同。

2.3.2 叶片结构

叶片质量由叶片结构设计确定,同时与叶片选用的材料性能密切相关。本文中暂未对叶片材料进行优化,选用了目前行业内主流的玻璃钢材料来进行叶片的结构设计。在优化设计阶段只需对叶片结构进行初步设计,因此本文只考虑了强度和刚度的设计准则,同时将叶片的铺层形式简化为外蒙皮、主梁、尾缘加强层、内蒙皮和腹板几个部分,主要设计变量为主梁的厚度^[4]。在给定设计载荷、截面形状、安全系数、材料属性和允许的叶尖最大挠度以后,迭代求解,得到使各截面均满足安全系数同时叶尖满足挠度要求的主梁铺层信息,依此确定叶片的质量。

2.3.3 其他部件成本

风力机组构成复杂,为了考察机组的成本构成及叶片载荷对机组造价的影响,这里把部件成本评估的工作分为以下几步:

(1) 确定各主要部件参考成本。对目前主流的变桨有齿型风力机组的成本分布作了大量统计,总

结出了各主要部件成本占整机成本的比例 S_i ,各部件的参考成本

$$C_{i_ref} = S_i \cdot C_{ref} \quad (5)$$

式中: C_{i_ref} 为各主要部件的参考造价; $\sum_{i=1}^N S_i = 100\%$, N 为主要部件数量; C_{ref} 为机组参考造价,可结合目前风力机市场情况,预估机组的千瓦造价,进行确定。

(2) 根据叶片输出的特征载荷确定各主要部件的设计成本。将每个部件的成本分解为与叶片输出载荷相关的部分以及在叶片优化设计中固定不变的部分

$$C_i = C_{i_ref} \cdot \left(m_i \cdot \frac{L_1}{L_{1_ref}} + n_i \cdot \frac{L_2}{L_{2_ref}} + p_i \right) \quad (6)$$

式中: C_i 为各部件的设计成本; $L_{1,2}$ 为不同叶片外形带来的特征载荷,分别代表轮毂中心极限载荷 M_x 和 F_x ; $L_{1,2_ref}$ 为特征载荷的参考值; m_i, n_i 为各部件成本中随特征载荷 $L_{1,2}$ 线性变化部分所占比例, p_i 为部件固定成本所占比例, $m_i + n_i + p_i = 1$ 。

表2为本文设计所针对的1.5 MW机组成本构成各部分比例的总结。

(3) 得到对应某个叶片气动外形的机组设计造价

$$C_t = \sum_{i=1}^N C_i$$

表2 陆上1.5 MW机组成本构成

部件名称	$S_i/\%$	m_i	n_i	p_i
叶片	22			
轮毂和导流罩	2.5	0.15	0.15	0.7
变桨系统	3			1
主轴组合	4			1
齿轮箱系统	16	0.2	0.1	0.7
液压和环控系统	2			1
发电机和变流器	10			1
机舱罩	1.5			1
底架	3.5	0.2	0.2	0.6
偏航系统	2.5			1
塔架	23	0.1	0.3	0.6
地基	4	0.05	0.2	0.75
控制系统	5			1
其他	1			1

2.4 风场运营情况

风场平均到每台风力机上的初投资

$$C_{ic} = C_t + C_{bs} \quad (7)$$

式中: C_{bs} 为初期附加投资, 包括运输、并网、风场建设费用平摊等。

在风力机的整个生命周期(设计值 20 年)内, 平均到每台风力机上的总成本折现值

$$C_{td} = C_{ic} + \sum_{n=1}^{20} E_{ao} \cdot R_d^n \quad (8)$$

式中: E_{ao} 为年运营支出; R_d 为折现率。

每台风力机的总折现电量

$$E_{td} = \sum_{n=1}^{20} E_a \cdot R_d^n \quad (9)$$

式中 E_a 为年发电量。

度电成本

$$C_{OE} = \frac{C_{td}}{E_{td}} \quad (10)$$

风场总收益

$$W_{FP} = E_{td} \cdot G_r - C_{td} \quad (11)$$

式中 G_r 为上网电价。

2.5 设计目标

早期的叶片气动设计与结构设计分别进行, 在气动外形设计时往往以功率系数最大或年发电量最大为目标, 这时候无法设计叶片的厚度, 因为厚度越薄对应气动效率越高; 目前行业内普遍采用度电成本最小这一目标来进行叶片气动和结构的综合设计; 本文在这两种目标的基础上, 着眼于叶片设计的最下游, 又提出了风场收益最大这一新的叶片设计目标。

3 优化算法及流程

本文选用 Isight 软件作为优化工具来处理叶片优化设计的问题, 采用其中的 ASAA^[9], 该方法是基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的一种随机寻优算法, 其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性。模拟退火算法从某一较高初温出发, 伴随温度参数的不断下降, 结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解, 即在局部最优解能概率性地跳出并最终趋于全局最优, 具有高效、通用、灵活的特点,

被广泛应用于解决各种工程优化问题。

图 1 为叶片优化设计流程图。

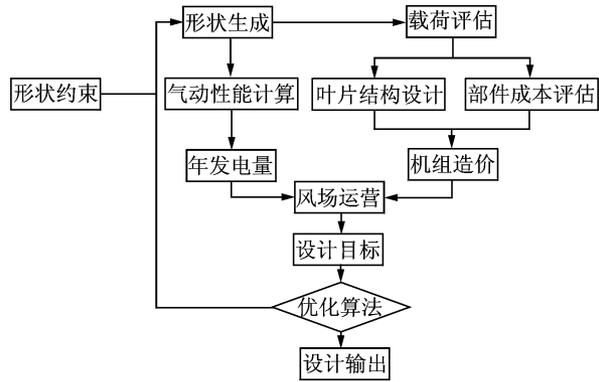


图 1 叶片优化设计流程图

算法首先随机生成叶片, Isight 将叶片外形输出给气动性能评估程序进行年发电量计算, 同时给载荷评估程序计算设计载荷, 设计载荷再用于叶片的设计以及部件成本的评估, 综合得到机组造价; 经过风场运营模型的计算后得到度电成本或风场收益的设计目标, Isight 再将设计目标的值返回给优化算法, 优化算法根据目标结果对控制变量进行调整, 生成新的叶片, 这样不断迭代寻优, 最终给出一个全局最优解。

4 设计结果与分析

以针对 IEC 2A 风场, 1.5 MW 机型的叶片设计为例, 概念设计时确定其长度 37.5 m, 额定转速 18 r/min, 选用玻纤环氧复合材料, 基本翼型为 NACA63 和 DU 系列的改型, 分别以不同目标对其气动外形进行优化设计, 表 3 和图 2 分别为设计叶片的性能结果和形状结果, 其中参考叶片是目前市场上广泛使用的 1.5 MW, 37.5 m 成熟叶片。

以年发电量最大为目标设计叶片时, 由于没有考虑叶片的要求, 无法设计叶片的厚度分布, 设计变量只是叶片的弦长和扭角, 因而在设计时将叶片的绝对厚度保持为参考叶片的绝对厚度分布, 以此来保证叶片的结构特性。

表 3 叶片优化设计性能比较

叶片型号	最大功率系数	年发电量/ (kW·h)	叶片质量/ kg	机组造价/ 万元	度电成本/ (元·kW·h ⁻¹)	风场收益/ 万元
参考叶片	0.479	4.26×10 ⁶	5 755	603	0.327	978
年发电量最大	0.483	4.30×10 ⁶	6 243	631	0.331	966
度电成本最小	0.472	4.20×10 ⁶	5 276	585	0.324	973
场收益最大	0.479	4.27×10 ⁶	5 713	601	0.326	982

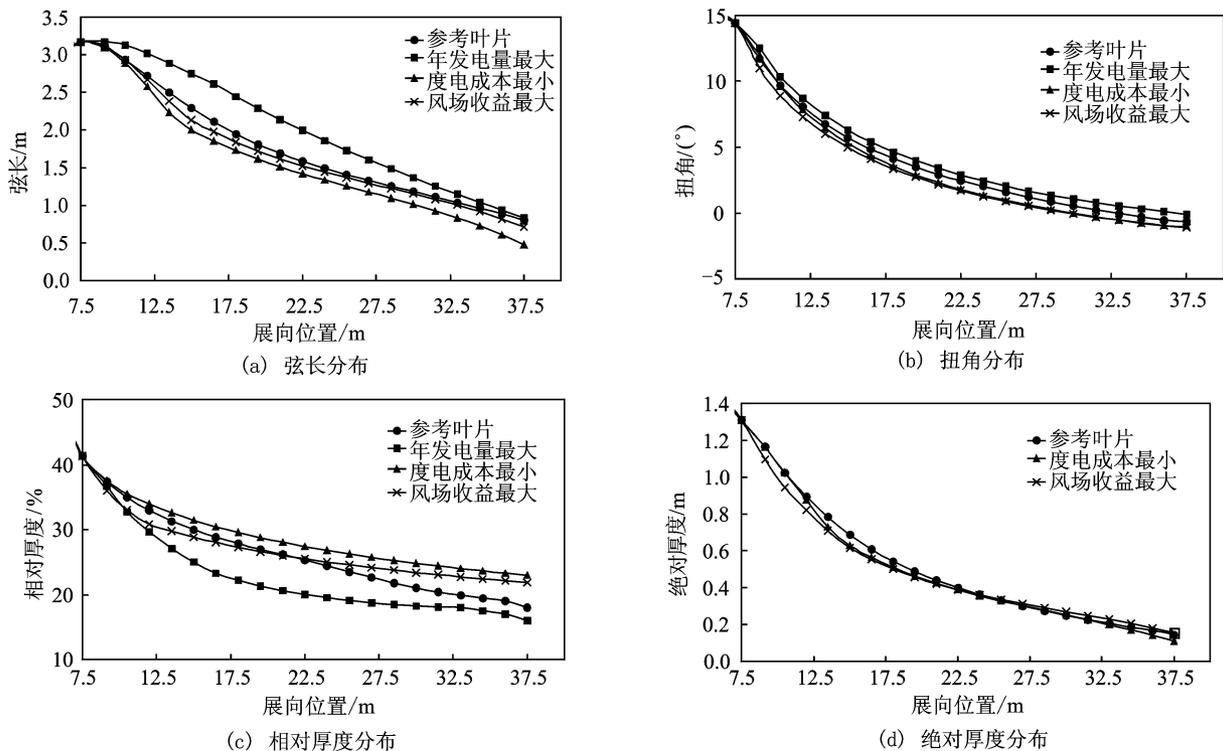


图2 叶片优化设计形状比较

从表3和图2给出的设计结果可以看出:

(1)在选定的基本翼型下,不管以何种目标进行设计,与参考叶片相比该目标值都改善有限,可见参考叶片的气动外形很好。

(2)以年发电量最大为目标,设计出的叶片与参考叶片相比发电量提高了0.88%,是这几组叶片中最高的,不过设计叶片的质量却增加了8.5%、机组造价增加了4.5%,反而使得度电成本增加、风场收益减小了。由图2可以看出,为了追求高的发电量,截面翼型趋向于较小相对厚度,因为薄翼型的升阻比较高,能够给叶片带来更好的气动效率,因而此时的最大功率系数也是所有结果中最高的(表3)。但是,高升阻比的同时往往伴随着高的升力系数,因而叶片的设计载荷也会增大;设计的叶片弦长也较大,一定程度上也增加了叶片的设计载荷,造成机组成本的上升。

(3)以度电成本最小为目标设计的叶片发电量有所降低,然而质量是所有叶片中最轻的,机组的设计造价与参考叶片机组造价相比也降低了3%,最终使得度电成本减小了0.8%,而风场收益降低了0.5%。

与发电量最大的叶片正好相反,此时输出的叶片偏于修长同时截面相对厚度较大(图2),这使得叶片受到的载荷较小,降低了机组成本。另外,较大

的相对厚度有利于增大叶片截面的惯性矩,对减轻叶片质量也有帮助。

(4)在设计出的几组叶片中,以风场收益最大为目标得到结果是唯一各项性能都能同时有所改善的,与参考叶片相比发电量增大了0.2%,机组造价降低了0.3%,最终风场收益增大了0.42%。叶片的形状与参考叶片相比弦长略小而相对厚度分布有所区别,不过仍然是这几组结果中与参考叶片最为接近的。

(5)叶片设计最终需要在发电量和成本之间作出一个平衡,度电成本、风场收益的提出都是为了描述这个平衡点,但是两者有一定的联系也有区别。这里分析各次优化设计过程中所有叶片的年发电量和机组造价的对应关系,如图3所示。可以看到,搜索结果的覆盖域很广,同一发电量下机组造价有高有底,同一造价下机组的发电量也千差万别,不过覆盖域一定存在一个使得机组造价随着年发电量单调上升的边缘,形成了一个类似于多目标优化中的Pareto前沿^[6],不同的设计目标在这前沿上选取了不同的位置。

比较上述两种平衡指标,从式(9,10)可以看出,在度电成本中,发电量与成本有着相同的重要性,而在风场收益中根据上网电价[本文设计时采用国内二类地区的上网电价0.54元/(kW·h)]的

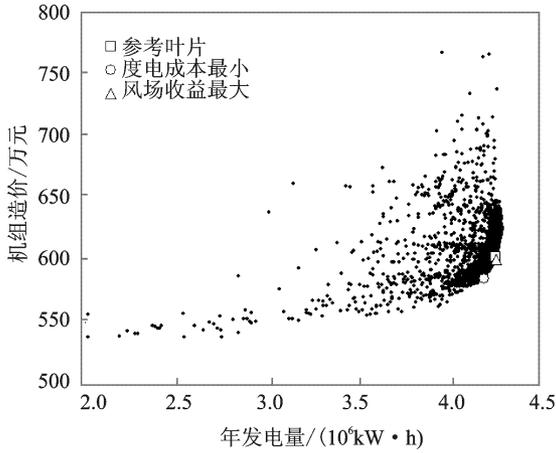


图3 年发电量与机组造价对应关系

不同,两者之间的权重不一样:上网电价较高,那么增加发电量更加有益;上网电价较低,则更趋向于控制成本。参考叶片所处的位置已经几乎处于最优前沿上,且各项性能与风场收益最大的叶片设计非常接近,当然本文并不能确定参考叶片就是以风场收益最大这一目标来进行设计,或者这只是一个巧合,参考叶片有着其他的设计目标和方法。因此,还需要进行更多的设计工作进行检验。

5 结 论

本文对变桨型风力机叶片气动外形做了有针对性的参数化描述,新的参数化方法能够很好地表达结构和工艺对叶片形状的约束;发展了一种简化的叶片设计载荷计算方法,该方法能够迅速对叶片设计载荷进行评估,满足优化设计要求的同时极大地减少了计算量;总结了风力机组成本构成形式,描述了叶片输出载荷对机组主要部件成本的影响;对风场运营情况进行了建模,推导了度电成本的计算方法,并从风场运营商的角度出发,提出了风场收益最大的设计目标,为叶片设计提供了新的思路。

采用自适应模拟退火算法分别以年发电量最大、度电成本最小和风场收益最大为目标进行了优化设计,结果显示年发电量最大为目标设计的叶片实度偏大,度电成本最小为目标得到的叶片略显修长。与国外成熟叶片相比,这两组结果在性能上都各有得失,只有以风场收益最大为目标设计的叶片其各项性能都能同时得到提高。

参考文献:

- [1] Fuglsang P, Madsen H A. Optimization method for wind turbine rotors[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80(1/2): 191-206.
- [2] Fuglsang P, Bak C, Schepers J G, et al. Site-specific design optimization of wind turbines[J]. Wind Energy, 2002, 5(4): 261-279.
- [3] 陈进,王旭东,沈文忠,等. 风力机叶片的形状优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3):131-134.
- [4] Wang L, Wang T, Luo Y. Improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA)-II in multi-objective optimization studies of wind turbine blades [J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2011, 32(6):739-748.
- [5] 张石强. 风力机专用翼型及叶片关键设计理论研究[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院,2010.
- [6] Hansen M O L. Aerodynamics of wind turbines [M]. London: James & James, 2008.
- [7] International Electrotechnical Commission. IEC 61400-1 wind turbines —Part 1: Design requirements[S]. [S.l.]:IEC, 2005.
- [8] Griffin D A. WindPACT turbine design scaling studies technical area 1—composite blades for 80 to 120 meter rotor [R]. NREL/SR-500-29492. Golden, CO;National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [9] 康立山,谢云,尤矢勇,等. 非数值并行算法——模拟退火算法[M]. 北京:科学出版社,2000.