

# 基于 VB 的风力机叶片外形优化设计

徐宝清<sup>1,2</sup>, 田 德<sup>1,3</sup>, 王海宽<sup>1</sup>, 赵丹平<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 机电工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古工业大学 信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010050;

3. 华北电力大学 可再生能源学院, 北京 102206)

**摘 要:**为了实现风力发电机风轮叶片外形的优化设计,以风场风速分布为基础提出了综合优化目标;以片条理论为基础提出了以展弦比为关键参数的修形约束条件的气动优化目标,建立了叶片外形优化设计的数学模型。采用枚举法和循环结构,选用 Access 数据库,应用 Visual Basic 编制程序实现叶片外形的优化设计。针对内蒙古某地区设计了 1.5MW 风力机叶片,与国外同功率某通用叶片进行了对比分析。结果表明,两种叶片外形基本吻合,而且文中设计的叶片在性能上有明显优势,同时也验证了文中提出数学模型的可靠性和程序的实用性。

**关键词:**风力机;修形约束;优化设计;程序设计

**中图分类号:**TP311;TK83

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2010)05-0211-04

## Optimal Design of the Wind Turbine Blade Shape with VB

XU Bao-qing<sup>1,2</sup>, TIAN De<sup>1,3</sup>, WANG Hai-kuan<sup>1</sup>, ZHAO Dan-ping<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China;

2. School of Information and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010050, China;

3. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In order to design the optimal shape of blades of the wind generator turbine, synthesis optimization object is presented based on the wind speed distribution in the wind farm; while the aerodynamic optimization object is presented based on the strip theory, in which the aspect ratio is taken as the key parameter of the shape modification constraints. And then the optimization design model of blade external shape is established. Using enumeration method and the loop structure, selecting the Access as database, programming with Visual Basic, blades optimal design can be completed. Aimed at a place in Inner Mongolia, 1.5MW wind turbine blades are designed with this program, compared and analyzed with a kind of foreign general-purpose blades with the same rated power. Results show that they are basically consistent with their shapes. What's more, the blades designed with this program show the obvious advantages in terms of performance. So that, the reliability of design models and the practicability of the program put forward in this paper are verified.

**Key words:** wind turbine; shape modification constraints; optimal design; programming design

## 0 引 言

叶片设计是风力发电技术中的一项关键技术<sup>[1~3]</sup>,叶片的优劣直接关系到风力发电机组的效率和成本<sup>[4]</sup>,也影响到整个机组的安全性、可靠性及噪声等其他性能。

风力发电机叶片设计和性能计算等相关软件在国外比较成熟,其中比较有代表性的是英国 Garrad Has-

san 公司开发的 Bladed 软件,其功能比较完善,性能计算也比较可靠<sup>[5]</sup>。国内也有关于叶片设计、结构设计、性能计算、载荷分析等方面的相关软件和方法<sup>[6,7]</sup>。各种软件都各有优势,侧重点也各不相同。但叶片设计的核心部分出于商业机密不便公开,即便是公开的部分也在不断修正和改进。这就使得叶片设计成为当前各国专业人员致力于改进的技术。

展弦比是叶片类机械设计中常用的重要参数<sup>[8]</sup>。文中提出以展弦比修正弦长,同时给出包括扭角和厚度在内的修形约束条件,建立了叶片外形设计的数学模型。针对片条理论和数学模型的特点,采用枚举法和循环结构,以 Access 关系型数据库建立后台数据,

收稿日期:2009-10-30;修回日期:2010-01-06

基金项目:国家自然科学基金(59776033)

作者简介:徐宝清(1970-),女,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,研究方向为风力发电与可再生能源利用;田 德,教授,博士生导师,研究方向为可再生能源开发与利用。

用 Visual Basic 编制程序对此优化问题进行求解。

## 1 优化数学模型

### 1.1 综合优化

#### 1.1.1 目标函数

风力发电机的任务就是要把风场风能按照设计要求转化为电能。国标“GB/T 20319—2006 风力发电机组验收规范”中规定了风力发电机安装调试后验收的统一规范,其中电能就是一项重要技术指标。

为此,参考国标“GB/T 18451.2—2003/IEC 61400—12:1998”和“JB/T 10300—2001”的相关规定,确立如下综合优化目标函数:

$$\max AEP = H_h \sum_{i=1}^n [F(v_i) - F(v_{i-1})] \cdot \left( \frac{P(v_{i-1}) + P(v_i)}{2} \right) \quad (1)$$

式中, AEP—年平均发电量, kWh;  $N_h$ —一年内的小时数, h;  $F(v)$ —Weibull 分布函数;  $P(v)$ —风力发电机组输出功率, W;  $v_i$ —第  $i$  个风速值,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

可以看出,风力发电机组的发电量由风场特点和机组输出功率特性决定。

#### 1.1.2 约束条件

风场风况是由自然环境决定的,准确地描述风场风速分布是计算和评价风电机组发电量的基础和前提条件。

对于目标函数式(1)中的风速分布函数,常用的有 Rayleigh 分布和 Weibull 分布,而实际中主要采用 Weibull 分布。

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad v > 0 \quad (2)$$

式中,  $c$ —尺度参数, m/s;  $k$ —形状参数。

明确了风速分布以后,针对这种分布规律设计满足额定功率要求的风力发电机组。对于变桨距风力机而言,当风速达到额定风速后,由于控制系统的作用,使机组以额定功率输出,当风速小于额定风速时,利用叶片理论,得到每个叶素处功率:

$$dP = 4\pi\rho v\Omega^2(1-a)bFr^3dr \quad (3)$$

式中,  $\rho$ —风场空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $v$ —实际风速, m/s;  $\Omega$ —风轮旋转角速度, rad/s;  $a$ —轴向诱导因子;  $b$ —周向诱导因子;  $F$ —损失系数, 即:

$$F = F_t \cdot F_h \quad (4)$$

$$F_t = \frac{2\arccos\left[e^{-\frac{B(R-r)}{2R\sin\theta}}\right]}{\pi} \quad (5)$$

$$F_h = \frac{2\arccos\left[e^{-\frac{B(r-r_{hub})}{2r_{hub}\sin\theta}}\right]}{\pi} \quad (6)$$

式中,  $F_t$ —叶尖损失系数;  $F_h$ —轮毂损失系数;  $r$ —叶素所处半径, m;  $\theta$ —叶素处风向角, °;  $B$ —叶片数;  $r_{hub}$ —轮毂半径, m;  $R$ —风轮半径, m。

对式(3)沿叶片展向求积分就得到风速  $v$  小于额定风速时的功率,从而得到整个生存风速范围内功率的计算表达式:

$$P(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{in} \\ \int_{r_{hub}}^R dP, & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_{out} \\ 0, & v > v_{out} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $v$ —风速, m/s;  $v_{in}$ ,  $v_{out}$ ,  $v_r$ —切入、切出、额定风速, m/s。

与此对应的风能利用系数为:

$$C_p = \begin{cases} \int dC_p, & v_{in} \leq v \leq v_r \\ \frac{P}{\frac{1}{2}\rho_0 A v^3}, & v_r \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $dC_p$ —叶素处风能利用系数;  $\rho_0$ —标准状态下空气密度, 1.225 kg/m<sup>3</sup>;  $A$ —风轮扫掠面积, m<sup>2</sup>。

上述式(2)到式(7)就构成了综合优化的约束条件。

### 1.2 气动优化

#### 1.2.1 目标函数

综合优化目标是整个机组所要实现的目标。对于叶片设计而言,主要是从叶片的气动性能来评价其优劣。由动量叶素理论和叶片条理论<sup>[9]</sup>,当每个叶素的风能利用系数最高时,就使得整个风轮的  $C_p$  值最高。由此得到气动优化的目标函数:

$$\max dC_p = \frac{8}{\lambda^2} b(1-a)F\lambda^3 d\lambda \quad (9)$$

#### 1.2.2 约束条件

从两个方面考虑上述目标函数:一方面,通过气动关系的约束,求得目标函数达到最大值时外形参数的最优取值;另一方面,在成本、重量、强度等要求下,在一定外形参数的约束下,求得达到目标函数值时各项参数的取值。因此在实现上述气动优化目标时,需要满足如下两项约束:

气动约束条件:

$$b(1+b)\lambda^2 = a(1-a) \quad (10)$$

修形约束条件:

$$Spr_{min} \leq Spr \leq Spr_{max} \quad (11)$$

$$\beta_{root} = \beta_1 \geq \beta_2 \geq \dots \geq \beta_n = \beta_{tip} \quad (12)$$

$$\begin{cases} h_{tip} = h_{tn} \leq h_{tn-1} \leq \dots \leq h_{tbl} = h_{throot} = D_{yb} \\ h_{tbl} \geq h_{ti} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $Spr_{min}, Spr_{max}$ —指定的最小和最大展弦比;  $\beta_{root}, \beta_{tip}, \beta_i$ —分别为叶根、叶尖和截面  $i$  处扭角;  $h_{troot}, h_{tip}, h_{ti}$ —分别为叶根、叶尖和截面  $i$  处厚度;  $D_{yb}$ —叶根处叶柄直径;  $h_{ri}$ —第  $i$  个截面处满足许用应力要求的最小厚度。

其中,展弦比  $Spr$  在风力发电机叶片设计技术中定义为风轮半径与平均弦长的比值。

$$Spr = \frac{R}{\bar{C}} \quad (14)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (15)$$

式中,  $\bar{C}$ —平均弦长,  $m$ ;  $c_i$ —第  $i$  个截面处弦长,  $m$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$ —叶片沿展向分成的截面数。

## 2 程序设计方法

### 2.1 设计思路

上述提出的数学模型,作为约束优化问题,可以用 DSFD 复合形算法、罚函数、ECGA 遗传算法等方法实现<sup>[10]</sup>。但是对于这种以片条理论为基础,针对每个叶素进行的优化问题,更适合用离散数学的观点进行求解。设计中采用枚举法对每个截面的可行解进行计算,同时也是性能分析的理论依据。

### 2.2 数据库设计

Access 作为 Visual Basic 的默认数据库,属于一种关系型数据库,用来处理叶片各项数据方便灵活。程序中设计了一个存放叶片各项参数的数据库 blade.mdb,其中包含 5 个数据表:在气动约束下得到的初始参数表;在修形约束和气动约束下得到的外形优化参数表;在基准翼型参数表基础上得到的截面翼型表;在风频分布和气动关系下得到的性能参数表。

### 2.3 程序设计流程图

以 blade.mdb 数据库为后台数据,以 ADO 为数据访问接口,用 Visual Basic 编程序求解数学模型。具体流程图如图 1 所示。

## 3 实例

参照国外某公司 1.5MW 风机的基本参数<sup>[11]</sup>,应用文中给出的优化设计方法,结合内蒙古某地区的风况<sup>[12,13]</sup>,设计了变桨距 1.5MW 风力发电机叶片程序。

## 4 结果与分析

### 4.1 外形

把文中设计的叶片和国外某公司 1.5MW 风机叶片分别记为 SJ1.5 和 NR1.5,得到如下结果。

图 2 表明设计叶片的外形和对比叶片基本吻合。

其中 SJ1.5 的展弦比为 20.94,比 NR1.5 大 2.51%; SJ1.5 的扭角平均值比 NR1.5 小 6.57%,相对厚度的平均值比 NR1.5 大 2.39%。

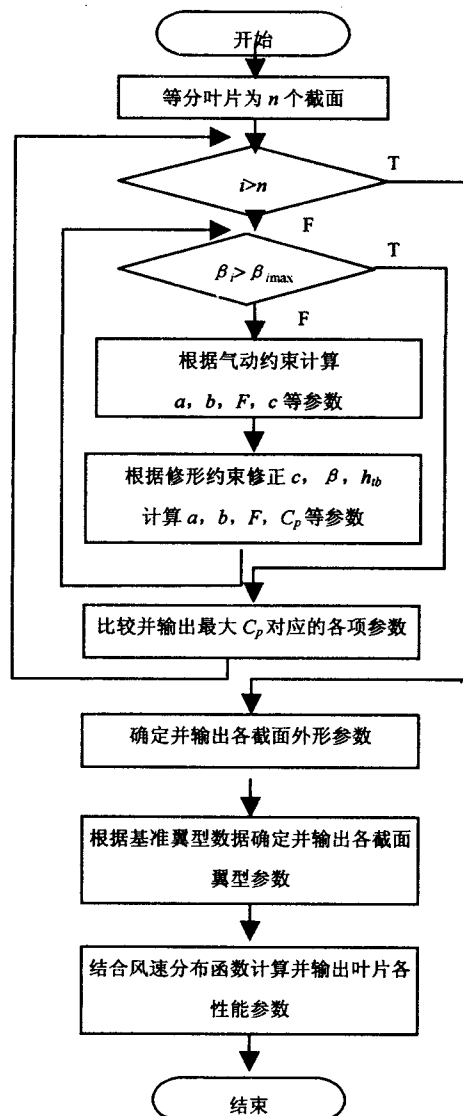


图1 优化设计程序流程图

### 4.2 性能

按照文中给出相应算法得到 SJ1.5 的输出功率和风能利用系数与 NR1.5 的实测值对比如图 3 所示。

可以看到,从切入风速 4m/s 到 13m/s 内 SJ1.5 的平均功率比 NR1.5 大 10.22%,这也使得前者的风能利用系数  $C_p$  在此风速段内达到了 0.457 的平均值,比后者高 25.54%。用内蒙古新巴尔虎旗风况计算,风机正常运行时 SJ1.5 的年发电量为  $11.614 \times 10^5 \text{kWh}$ ,比 NR1.5 的年发电量高 20.85%。

## 5 结束语

1) 从综合优化和气动优化两个相关方面进行叶片的优化设计,并以实例验证了针对风场特点设计的

叶片性能优于通用叶片性能。

2) 以气动约束和修形约束为条件建立的叶片气动优化数学模型能够设计出合理的叶片外形参数,与实际叶片外形的结果吻合良好,证明这种模型可以为设计水平轴风力发电机风轮叶片外形提供参考。

3) 用枚举法和循环结构编制程序实现叶片的设计和性能计算既符合数学模型的特点,又简便可靠。

#### 参考文献:

- [1] Afje A A, Kieth T G. A Vortex Lift Line method for the analysis of horizontal axis wind turbines[J]. Journal of solar energy engineering, 1986, 108: 303-309.
- [2] Benini E, Toffolo A. Optimal design of horizontal Axis wind turbines using blade element theory and evolutionary computation[J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124: 357-363.
- [3] Jureczko M, Pawlak M. Optimization of wind turbine blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167: 463-471.
- [4] 邢作霞, 姚兴佳, 陈雷, 等. 基于成本模型法的 1MW 变速风电机组的参数优化设计分析[J]. 太阳能学报, 2007, 28(5): 538-544.
- [5] Garrad Hassan & Partners. Bladed[EB/OL]. 2009-10-20. <http://www.garradhassan.com/bladed/bladed.htm>.
- [6] 芮晓明, 马志勇, 康传明. 大型风电机组叶片翼型的设计方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 192-194.
- [7] 杨瑞, 李仁年, 韩伟. 一种风力机风轮设计和优化方法研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2008, 27(4): 46-49.
- [8] 邓扬展, 秦政琪, 徐庆华, 等. 基于仿生的大展弦比机翼结构布局形式研究[J]. 飞机设计, 2006, 3(3): 1-6.
- [9] 陈严, 胡士山, 叶枝全. 定桨距风力机气动优化设计优化方向分析[J]. 太阳能学报, 1997, 18(3): 290-296.
- [10] 刘雄, 陈严, 叶枝全. 遗传算法在风力机风轮叶片优化设计中的应用[J]. 太阳能学报, 2006, 27(2): 180-185.
- [11] 吴正泳. 低风速条件风力发电机组的初步研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008: 25-50.
- [12] 徐宝清, 田德, 吴骅, 等. 风速的 Weibull 分布参数确定方法研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 31-34.
- [13] 徐宝清, 田德, 李全虎, 等. 用 Gauss-Laguerre 积分算法确定风速数学期望[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2008, 39(3): 337-341.

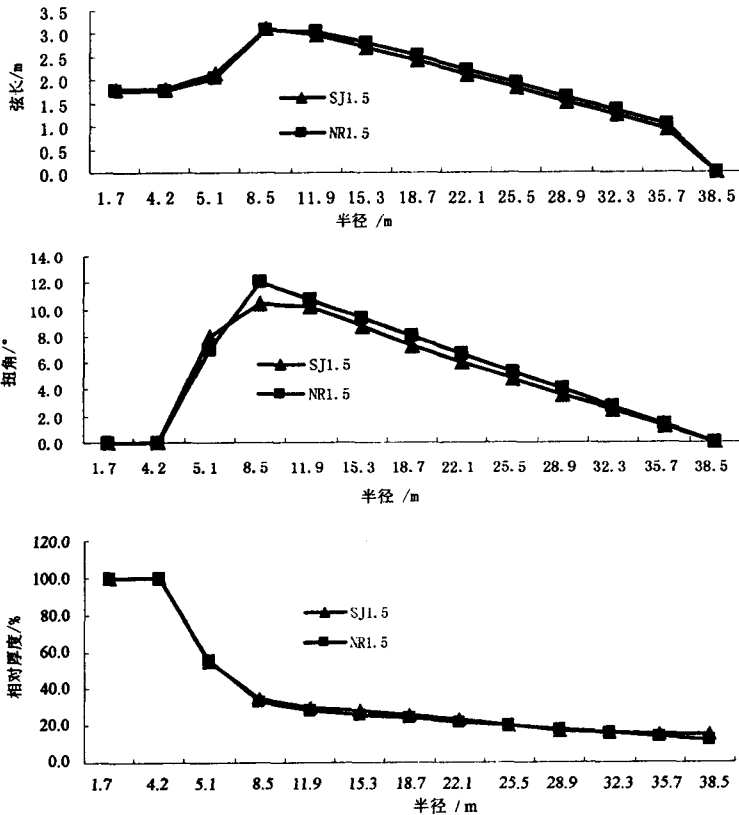


图 2 叶片弦长、扭角和相对厚度的比较

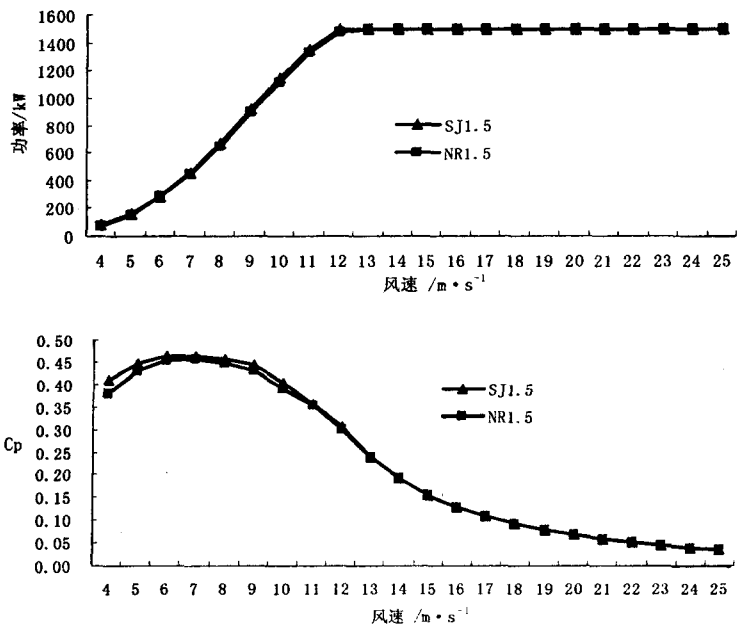


图 3 功率和风能利用系数的比较