

# 大型近海水平轴风力机转轮的空气动力学性能优化判据\*

程兆雪<sup>1</sup>, 李仁年<sup>1</sup>, 杨从新<sup>1</sup>, 胡文瑞<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学, 甘肃省风力机工程技术研究中心, 兰州 730050;  
2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

(本刊编委胡文瑞来稿)

**摘要:** 以近海风能工程为研究目标,对具有不同特性参数(设计风速、叶尖线速度和转轮实度)的大容量(1~10 MW)风力机转轮的气动性能与几何特性进行分析与研究。首先提出大型机组转轮气动性能优化判据:在其直径最小的前提下具有尽可能高的年可用风能特性因数以及与之相关的风能利用系数,因而可捕获最多风能,使年发电量最大。接着给出影响它的几个主要气动参数,如转轮设计风速、叶尖线速度以及转轮实度,并分析风力机在近海气象条件下运转时上述两个气动指标随这些参数变化的规律。提供的气动分析方法及结果可作为大型近海风力机转轮气动性能的评价基础。

**关键词:** 近海风能工程; 水平轴风力机; 转轮气动设计; 可用风能特性因数; 风能利用系数; 风力机转轮; 风力机叶片

**中图分类号:** TK83      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2010.01.002

## 引 言

近海风电技术是当前全球风电技术的前沿。从上世纪90年代起西欧国家就已开始在近海安装风力发电机<sup>[1-3]</sup>,以探讨陆上未曾涉及的技术问题。由于海上风力资源丰富,风速风向较陆地上稳定以及海上的环境要求不苛刻,就导致西欧各国在本世纪初相继制定了规模宏大的海上风能开发计划<sup>[1-2]</sup>(在2020年前计划建成总装机容量为150 000 MW的大型风电机组)。与欧洲不尽相同,美国与加拿大还有很大潜力在内陆开发风能利用<sup>[3]</sup>,却也相继欧洲之后计划在近海建造总容量超过1 000 MW的风电场<sup>[1]</sup>。我国根据引进吸收和自主化方针已在内陆(内蒙、新疆、甘肃、宁夏)建成装有单机容量为1.5 MW机组的大型风电场。可能由于我国内陆还有尚未利用的荒原可供风能开发,加之已初步掌握了1 MW级机组的制造和陆上架设技术,就未急于去研究与开发海上的风能。尽管如此,我国已有人先行考虑近海风能利用的课题<sup>[1]</sup>,对我国近海风力资源进行初步考察与分析,对海上风电工程中可能出现的技术与经济问题进行科学探讨,并指出我国极待开发近海风力资源,建造海上风电工程。

\* 收稿日期: 2009-09-10; 修订日期: 2009-11-12

基金项目: 国家“973重点基础研究发展计划”资助项目(2007CB714605)

作者简介: 程兆雪(1935—),男,黑龙江人,教授;

李仁年(1963—),男,教授,博士生导师(联系人: +86-931-2756250; E-mail: lirn@lut.cn)。

近海风力发电开发中亟待解决的问题是海上风力资源调查,获取可作海上发电场址的海域的较精确的年风频特性和风切特性。由于海上风电的大容量特点,它所带来的主要技术问题目前是其支撑结构与基础结构形式,以及与之相关的力学分析与研究<sup>[4]</sup>。风力机转轮的气动计算和分析当然是海上风电工程关注的技术问题之一。就风力机的空气动力学原理与方法而论,它与陆上的基本相同。由于近海区域的风速与风向较稳定,且湍流度较低,其气动计算可能更准确。然而大风、飓风、风浪耦合作用,以及塔架摇摆(在用漂浮基础时)等工况肯定会对转轮气动计算带来影响。现在已在技术上成熟的容量较小的风力机当然应先在海上作试验,探索人们感兴趣的上述技术问题。

大容量机组在海上是最合适的:不必考虑占地、噪声污染、机组运输等在陆上难克服的困难。一般认为大容量必然导致风力机转轮及其结构件尺寸的增加,这在逻辑上没错。但事实是否一定如此?转轮直径及与之相关的机组尺寸取决于风场空气密度、机组出力、设计风速和转轮气动性能。后两者可人为优化确定(尤为后者)。按理,机组运行风速范围内的任何一个风速皆可被选作设计风速,只要它能使机组年发电量最大。因此,通常将年风频密度最大的风速或比它稍大的年平均风速作为设计风速,以期获得最大的年发电量。当风速大于该值时机组将通过桨距调节被限速,使机组出力恒定。因而高风速所具有的风能不能被全部吸收。反之,当风速小于设计风速时,如果桨距调节不当或根本不调(据文献[5]中8.2.1节所述),转轮气动性能将下降很多,同样使低风速风能也不能被充分吸收。假如按下述方式选取机组的设计风速,即选年风频密度并非最高的较高风速作为设计风速,并且通过合理的桨距调节使低风速时的气动性能(风能利用系数)尽可能保持最优,则很有可能使该设计风速下的机组有更高的年发电量。本文将引用一个年“可用风能特性因数”的参数<sup>[5]</sup>来判别选择哪个风速作设计风速时该因数最大,即年发电量最多。由下文可知,该特性因数与风场风频特性和转轮在各运行工况下的风能利用系数密切相关。另外,转轮实度和叶尖线速度可明显地影响转轮的风能利用系数,因而影响与之相关的年可用风能特性因数。本文即拟针对几种大容量(1~10 MW)风力发电机组探讨其几个关键气动与几何参数(设计风速、叶尖线速度和转轮实度)如何影响风力机转轮的气动性能和几何特性,以使机组在机构尺寸尽量小的条件下获取最大的年发电量。期望本文所论述与所获得结果能为近海风能工程的研究与开发提供有益的参考。

## 1 风力机年可用风能特性因数

由于海洋风能转换装置的大容量特点,首先其风能转换效率的微小改善都会产生大量电力。其次,由于其尺寸颇大,将使各种载荷随之增加<sup>[1-2]</sup>,因而导致其结构及造价都相应增加。于是,提高其风能吸收能力与进而改善其单位产能与结构尺寸之比,将带来可观的经济效益。目前,水平轴风力发电机组是近海风能转换装置的首选方案。针对上述两观点,机组转轮的气动参数宜根据下面几个原则来选取,即使其年可用风能特性因数<sup>[4]</sup> $K_u$ 与风能利用系数 $C_p$ 最优,使其直径 $D$ 尽量小,转轮转速 $n$ 尽量高,以及转轮实度 $\sigma$ 适中。显然,这和转轮设计风速 $V_0$ ,叶片各断面的翼型选用,叶尖圆周速度 $U_0$ 的大小,转轮之叶片数目 $z$ 等直接相关。

分析风力机的年可用风能特性因数所需的中国近海气象参数及风速年频特性给定如下:

1) 年平均气温 $T_{ave} = 15\text{ }^\circ\text{C}$ ,大气压 $p_{atm} = 101.325\text{ kPa}$ ,空气密度 $\rho = 1.225\text{ kg/m}^3$ ,运动粘性系数 $\nu = 0.000\ 014\ 6\text{ m}^2/\text{s}$ 。

2) 风频特性:采用韦布(Weibull)的风速概率分布<sup>[5]</sup>作为中国近海风频特性,选其比例因子 $c = 7.9$ (相当于10 m高测风时的7 m/s年平均风速),形状参数 $k = 2.0$ 。其特性曲线如图1所示。

3) 风切特性: 风速的铅垂方向变化规律取为指数函数形式<sup>[4-5]</sup>, 风切指数  $a = 0.115$ 。其特性曲线如图 2 所示。

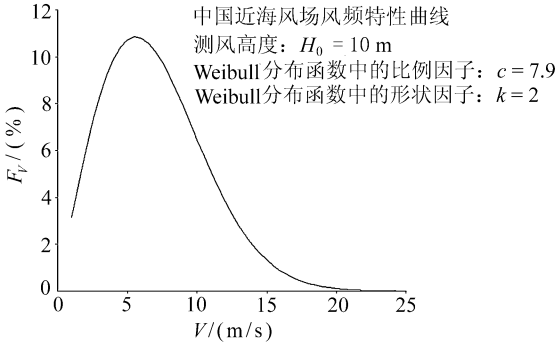


图 1 近海年风频特性曲线

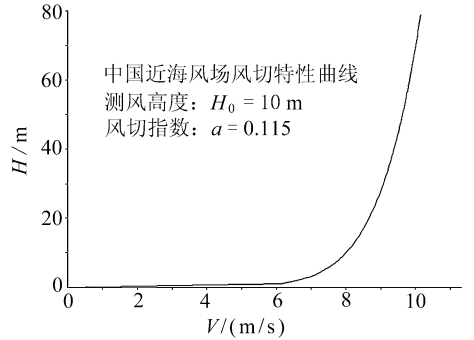


图 2 近海风切特性曲线

风力机的年可用风能特性因数  $K_u$ <sup>[4]</sup> 为

$$K_u = \frac{C_{p0} V_0^3 (T_0 - T_{\text{off}}) + \int_{T_{T_0}}^{T_{st}} C_p V^3 dt}{V_{\text{ave}}^3 T_{\text{yr}}}, \quad (1)$$

式中  $C_{p0}$  为设计工况下转轮的风能利用系数,  $V_0$  为设计风速,  $T_0$  为场风速大于设计风速的年小时数,  $T_{\text{off}}$  为场风速大于关机风速的年小时数。故等式右端分子之前项为高风速区间转轮所吸收的风能因子。分子后项中的  $C_p$  为风速小于设计风速时 ( $V < V_0$ ) 转轮的风能利用系数,  $T_{st}$  为风场风速大于启动风速的年小时数。因而该积分项代表低风速区间所吸收的风能。分母项中的  $V_{\text{ave}}$  为风电场年平均风速,  $T_{\text{yr}}$  为全年小时数。故分母可代表该风场所具有的全年风能参考因子。一个气动性能好的风力机转轮应在整个运行风速区间  $V_{st} < V < V_{\text{off}}$  上有最大的年可用风能特性因子  $K_u$ 。

当机组在给定的机组运行风速区间  $V_{st} < V < V_{\text{off}}$  运转时, 为使低风速下 ( $V < V_0$ ) 仍有较高的风能利用系数  $C_p$ , 而在高风速下能把功率输出限制在额定水平  $P_0$ , 机组的转轮就必须是调桨式的。在以机组功率输出作反馈量的调桨方式中, 无法作低风速调桨, 结果导致  $C_p$  过低。而以风速作为设定值进行调桨计算后则可作到全风速区间的调桨, 不单可进行高风速时的输出限制, 而且可使低风速时有尽可能高的风能利用系数 ( $C_{p,\text{max}}$ )。将式(1)写成离散形式(2)如下:

$$K_u = \frac{C_{p0} V_0^3 (T_0 - T_{\text{off}}) + \sum_{k=1}^N C_{p,\text{max}}(k) \times V(k)^3 \times F_{V(k)} \times T_{\text{yr}}}{V_{\text{ave}}^3 T_{\text{yr}}}, \quad (2)$$

式中  $N$  为机组运行风速区间内风速的离散数目,  $F_{V(k)}$  为  $V(k)$  的年概率密度, 它可由风场年风频特性推导得到。按理, 风速区间内的任何一风速皆可用来作为设计风速。但以该  $K_u$  为优化目标所优选出的风速是设计机组时应选用的设计风速。用它来设计的转轮可获得最大的年电能产量。

式(2)中的各时间变量  $T$  可根据风场年风频特性来确定。风能利用系数 ( $C_{p0}, C_{p,\text{max}}$ ) 则需根据所用的设计风速及桨距调节方式按下文中的式(3)给定。设计风速的优选及转轮气动设计实际上是同时进行与完成的。

## 2 转轮的气动性能与分析

文献[8]所给的转轮气动优化设计方法被用来设计 3 叶片 5 种容量 (1 ~ 10 MW) 风力机转轮。该方法是根据转轮的有限叶片数线性旋涡气动模型建立的, 根据这个旋涡模型求解叶片

处的诱导速度和转轮所受的气动力,进而推导出转轮的风能利用系数和轴向力系数.两者由下列两式给定:

$$C_p = 8z\lambda_0^3 \int_{r_0}^1 \bar{\Gamma} [1/\lambda_0 - \bar{r}(\mu + \Delta\beta)] \bar{r} d\bar{r}, \quad (3)$$

$$C_F = 8z\lambda_0^2 \int_{r_0}^1 \bar{\Gamma} [\bar{r} + (\mu + \Delta\beta)/\lambda_0] d\bar{r}, \quad (4)$$

式中的环量  $\Gamma$  与半径  $r_0, r$  皆为它们的无因次量.转轮的几何与气动特性参数即通过  $C_p$  及与之相关的  $K_u$  的优化而获得.

叶片所用断面为目前公认的气动性能较优的风力机专用 S-系列翼型.为获得尽可能高的年可用风能特性因子  $K_u$ ,叶尖圆周速度  $U_0$  特取为 100 m/s (Mach 数为 3.0).内陆风力机转轮常取 85 m/s 或更小的叶尖线速度,以避免空气压缩性带来的不利影响.转轮实度  $\sigma$  取为 0.08 量级的.年可用风能特性因数  $K_u$  最优的 5 种容量风力机的主要气动与几何特性参数如表 1 所示.为分析设计风速对  $K_u$  的影响,任给了其 9 种数值,并针对 2 MW 转轮进行性能计算.表 2 和图 3 为计算结果.为分析叶尖线速度对  $K_u$  的影响,任给了其 6 种数值,并针对 10 MW 转轮进行性能计算,计算结果如表 3 和图 4 所示.为分析转轮实度对  $K_u$  的影响,也任给了其 6 种数值,并针对 4 MW 转轮进行性能计算,其结果如表 4 和图 5 所示.

根据图表所列计算结果来分析本文所给的 3 个参数(设计风速、叶尖线速度和转轮实度)对转轮两个主要气动性能参数  $K_u$  与  $C_p$  的影响.在此之前,首先来分析 5 种出力的转轮在叶尖线速度为 100 m/s,转轮实度为 0.08 数量级时,转轮的年可用风能特性因数和风能利用系数随转轮出力大小的变化.由表 1 和图 3 可知,前者随出力的增大而递增,增幅达 20%,而后者几乎不变.这是因为优选出的设计风速几乎是一样的,因而叶尖速比相同,于是有相同的风能利用系数.可见机组容量越大,它就有更高的能力来吸收风能,从而使其年发电量相对增加.

表 1 5 种容量风力机转轮的主要气动与几何参数

功率, $P/\text{kW}$	1 000	2 000	4 000	7 000	10 000
直径, $D/\text{m}$	28.80	40.76	57.60	76.10	91.10
设计风速, $V/(\text{m/s})$	19.20	19.16	19.20	19.20	19.20
转速, $n/\text{min}$	66.25	46.85	33.13	25.11	20.95
风能利用系数, $C_p$	0.374 1	0.374 1	0.374 1	0.376 1	0.374 2
年可用风能因数, $K_u$	0.964 9	1.044 7	1.092 2	1.128 7	1.156 2
叶片扭角, $\Delta\phi/(\circ)$	32.92	32.92	32.92	32.92	32.92
转轮实度, $\sigma$	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
叶片体积, $v/\text{m}^3$	11.7	33.1	93.5	214.8	369.5
叶根径向位置, $R_r/(\text{m})$	2.88	4.08	5.77	7.61	9.11
叶根弦长, $B_r/\text{m}$	2.43	3.43	4.86	6.41	7.68
叶根安放角, $\phi_r/(\circ)$	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33
叶尖径向位置, $R_t/\text{m}$	14.41	20.38	28.83	38.03	45.57
叶尖弦长, $B_t/\text{m}$	0.74	1.04	1.47	1.94	2.32
叶尖安放角, $\phi_t/(\circ)$	-2.59	-2.59	-2.59	-2.59	-2.59

### 1) 设计风速对转轮性能的影响

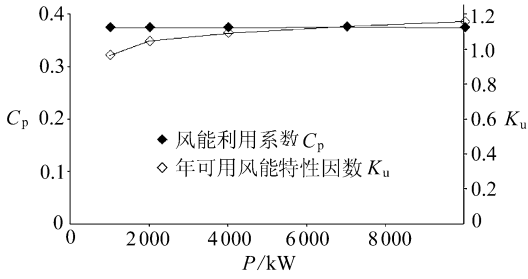


图3 5种出力转轮的气动性能曲线

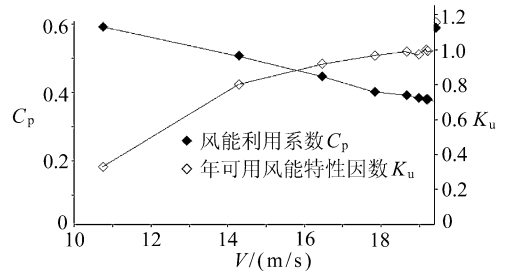


图4 2 MW 转轮的气动性能曲线

从表2与图4可知,设计风速的合理选定是影响转轮气动与几何特性最重要的因素。乍想时,似乎应取年风频最高的风速或比它略高的年平均风速作为风力机设计风速才合理,但事实并非如此。表2的数据是2 MW转轮的,其设计风速从小到大有9种,都比年平均风速高。其年可用风能特性因数随设计风速的变化规律呈递增后平稳,最大增幅为300% ( $K_u = 0.3425 \rightarrow 1.0447$ ),尽管其风能利用系数反而是递减的,减幅达37% ( $C_p = 0.592 \rightarrow 0.374$ )。可见,提高转轮的设计风速可使转轮吸收风能的能力获得巨大改善。这种结果的根本来源是低风速时的合理桨距调节,在此不赘述。除此之外,转轮直径和叶片体积还大为减小 ( $D = 77.35 \text{ m} \rightarrow 40.76 \text{ m}$ ,  $v = 225.8 \text{ m}^3 \rightarrow 33.1 \text{ m}^3$ ),因而使整个机组的结构尺寸减小,这也是最为有利的效果。

表2 2 MW 转轮的气动与几何特性参数 ( $U_0 = 100 \text{ m/s}$ ,  $\sigma = 0.077$ )

设计风速, $V/(m/s)$	10.73	14.27	16.45	17.81	18.64	18.96	19.16	19.2	19.48
风能利用系数, $C_p$	0.592 0	0.505 0	0.443 4	0.397 2	0.386 5	0.378 8	0.374 1	0.374 0	0.366 7
年可用风能因数, $K_u$	0.342 5	0.834 9	0.957 9	1.008 1	0.031 6	1.015 0	1.044 7	1.034 9	1.036 8
转轮直径, $D/m$	77.35	54.60	47.04	44.15	41.78	41.14	40.76	40.79	40.16
叶片体积, $v/m^3$	225.8	79.4	50.8	42.0	35.6	34.0	33.1	33.0	31.6

## 2) 叶尖线速度对转轮性能的影响

这里取10 MW转轮来讨论,其叶尖线速度有6种 ( $U_0 = 60 \text{ m/s} \rightarrow 120 \text{ m/s}$ )。由表3和图5可知,其年可用风能特性因数先递增后递减,风能利用系数几乎是线性递增的。具有高叶尖线速度的转轮其直径比低者的小29.3% ( $D = 91.1 \text{ m} \rightarrow 128.8 \text{ m}$ ),而其风能吸收能力却大20.8% ( $K_u = 1.156 \rightarrow 0.916$ ),风能利用系数大一倍 ( $C_p = 0.374 \rightarrow 0.187$ )。

表3 10 MW 转轮的气动与几何特性参数 ( $\sigma = 0.077$ )

叶尖线速度, $U_0/(m/s)$	60	70	80	90	100	120
风能利用系数, $C_p$	0.187	0.222	0.281	0.32	0.374	0.469
年可用风能因数, $K_u$	0.916 0	1.045 0	1.123 0	1.156 0	1.561 0	0.971 4
转轮直径, $D/m$	128.80	113.80	105.20	98.50	91.10	84.82
叶片体积, $v/m^3$	1 043.3	719.2	568.6	466.3	369.5	297.7

## 3) 转轮实度对转轮性能的影响

针对有6种实度的4 MW转轮来讨论其性能变化。转轮实度由0.03数量级到0.08,叶尖线速度为100 m/s。此时,其年可用风能因数与风能利用系数皆为递增的 ( $K_u = 0.63 \rightarrow 1.092$ ,  $C_p = 0.144 \rightarrow 0.374$ )。前者的增幅达73.3%,后者的达160%,前者的直径却比后者的大72.4% ( $D = 99.3 \text{ m} \rightarrow 57.6 \text{ m}$ )。前者的叶片体积比后者的大9%。

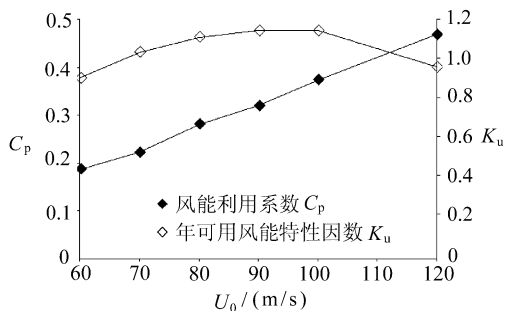


图5 10 MW 转轮的特性曲线

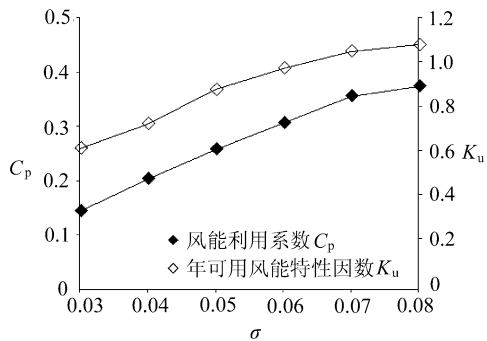


图6 4 MW 转轮的特性曲线

表4

4 MW 转轮的气动与几何特性参数 ( $U_0 = 100 \text{ m/s}$ )

转轮实度, $\sigma$	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08
风能利用系数, $C_p$	0.144	0.203	0.258	0.306	0.355	0.374
年可用风能因数, $K_u$	0.63	0.737	0.891	0.985	1.061	1.092
转轮直径, $D/\text{m}$	99.3	78.3	69.4	63.7	61.7	57.6
叶片体积, $v/\text{m}^3$	102.8	73.9	72.3	75.9	89.9	93.5

### 3 结 论

由计算结果的分析可得结论如下:

1) 采用比年平均风速或年风频最高的风速更高的风速作为风力机设计风速,是增大风力机年发电量和减小转轮直径及与之相关的机组结构尺寸的关键技术手段,尽管此时转轮的风能利用系数并非最高,但其前提是在低风速时作合理的桨距调节,以使该风速下转轮有尽量高的风能利用系数。

2) 根据近海的环境特点,近海风力机转轮可用较高的叶尖速比(高叶尖线速度)。尽管此时会带来空气被压缩而产生的啸叫后果,它却使年电能产量增大,使转轮直径(因而使机组结构重量)有可观的减小。

3) 为提高机组年电能产量与减小风力机转轮直径和叶片体积,适度增大转轮实度也是可取的技术方案之一。

4) 为准确地确定风力发电机组的年可用风能特性因数,有两个必需的前提:一是风电场区域的年风频特性应是通过准确实测而确定的;另外一个合理的低风速桨距调节方式,以保证低风速工况时转轮仍有尽可能高的风能利用系数。

### 参考文献:

- [1] 程昌钧. 海洋环境条件下风力机结构的气动力学性能与安全性问题[C]//胡文瑞. 全国风力机空气动力学学术会议论文集. 兰州:甘肃科学技术出版社,2007:12-19.
- [2] Valpy Bruce. UK offshore wind—next steps in technology development[C]//Global Wind Power. Paper Collection. Beijing, 2008:109-114.
- [3] Camp T R, Johnston M J, Nichols J, et al. Advances in modelling techniques for offshore wind turbines[C]//Global Wind Power. Paper Collection. Beijing, 2008:115-118.
- [4] Gourieres Desire Le. Wind Power Plants—Theory and Design[M]. Oxford:Pergamon Press, 1982.

- [5] Burton Tony, Sharpe David, Jenkins Nick, *et al.* *Wind Energy Handbook*[M]. Chichester: Wiley & Sons, Ltd, 2001;475-476.
- [6] CHENG Zhao-xue, YE Zhi-quan, CHEN Jing-yi, *et al.* Aerodynamic optimization for the rotor of horizontal-axis wind turbine [C]//ZHU Ya-jie. *Proceedings of International Conference New and Renewable Energy*. Beijing: International Academic Publishers, 1990;306-312.
- [7] YE Zhi-quan, CHENG Zhao-xue, CHEN Jing-yi, *et al.* Aerodynamic optimum design procedure and program for the rotor of a horizontal—axis wind turbine[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, **39**: 179-186.
- [8] 程兆雪,杨从新,李仁年. 风力机转轮气动计算中的一种数值解法[J]. *力学与实践*, 2007,**29**(6): 44-47.
- [9] Hillmer B, Borstelmann T, Schaffarczyk P A, *et al.* Aerodynamic and structural design of multi MW wind turbine blades beyond 5 MW[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, **75**, 2007;1-8. 012002.
- [10] Knauer Andreas, Hanson Tor David. High tip speed operation for offshore wind turbines[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2007,**75**:5. 012002.

## Criterion of Aerodynamic Performance of Large-Scale Offshore Horizontal-Axis Wind Turbines

CHENG Zhao-xue<sup>1</sup>, LI Ren-nian<sup>1</sup>, YANG Cong-xin<sup>1</sup>, HU Wen-rui<sup>1,2</sup>

(1. *Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. Chian;*

2. *Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P. R. Chian)*

**Abstract:** Taking offshore wind energy project as investigation object, the aerodynamic performance and geometric characteristics of wind turbine rotors with large capacity (1 MW to 10 MW) were analyzed in connection with their main characteristic parameters (e. g. rated wind speed, blade tip speed, and rotor solidity). First, it was pointed out that an essential criterion of high-performance wind turbine is its annual usable energy pattern factor, which should be as high as possible with its dimension possibly minimum as well, so that a maximum wind energy would be captured and maximal annual power output obtained. Then the influence of above-mentioned three parameters on the pattern factor and rotor geometry of wind turbine operated in Chinese offshore meteorological environment was investigated. The variation pattern of aerodynamic and geometric parameters were obtained, analyzed, and compared with each other. Finally, it was pointed out that the method for aerodynamic analysis and its result could be taken as a basis for evaluation of aerodynamic performance of large-scale offshore wind turbine rotors.

**Key words:** offshore wind energy project; horizontal-axis wind turbine; rotor aerodynamic design; usable energy pattern factor; power coefficient; wind turbine rotor; wind turbine blade