

专题—海上风电环境技术

基于WRF模式的广东海上风资源评估

陈楠¹, 杨苹^{2,4}, 邹澍^{3,4}, 许志荣^{2,4}

(1. 广东省电力设计研究院, 广州 510663;

2. 风电控制与并网技术国家地方联合工程实验室, 广州 511458;

3. 广东省绿色能源技术重点实验室, 广州 511458; 4. 华南理工大学 电力学院, 广州 510640)

摘要: 在概述风资源评估传统方法的基础上, 通过以下两个方面对基于WRF模式的海上风资源评估方法进行探讨。首先, 详细分析了基于WRF模式的海上风资源评估的过程; 其次使用珠江口某设计中的海上风场作为算例, 进行了风资源量化估计, 并对结果进行了对比。得出的主要结论为, 鉴于我国缺乏长期和大面积的海上测风网, 使用数值天气预报对海上风资源进行评估是必须的; 风切变指数的变化剧烈, 不应视作常数; 数值预报数据应根据测风塔数据进行校正; 对于选定了位置的风场, 根据现场测风塔和根据数值天气预报给出的评估结果无显著差别。

关键词: 海上风资源评估; 数值天气预报; WRF模式

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.05.001

中图分类号: X820.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)05-0001-06

Offshore Wind Resource Assessment Based on WRF Model

CHEN Nan¹, YANG Ping^{2,4}, ZOU Shu^{3,4}, XU Zhi-rong^{2,4}

(1. Guangdong Electric Power Design Institute, China Energy Engineering Group Co., Ltd, Guangzhou 510663, China;

2. National-Local Joint Engineering Laboratory for Wind Power Control and Integration Technology, Guangzhou 511458, China)

3. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou 511458, China;

4. School of Electricity Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Traditional wind resource assessment methods were summarized. The WRF model based offshore wind resource assessment method was discussed from two aspects. First, marine wind resource assessment based on WRF model was analyzed in detail; secondly, the wind resource was quantitatively estimated with examples of Pearl River offshore wind farms, and the results were compared. It was concluded that use of numerical weather prediction for offshore wind resource assessment is necessary for lack of long-term and large-scale offshore wind measurement network; wind shear exponent changes dramatically and should not be treated as a constant; NWP data should be corrected based on the data of anemometer tower; for wind farms with designated location, there is no significant difference between assessment of anemometer tower and NWP.

Key words: offshore-wind resource assessment; numerical weather prediction; WRF model

收稿日期: 2013-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273172)

作者简介: 陈楠(1986—), 男, 硕士, 研究方向为新能源电力系统。

近年来,我国风电事业飞速发展,而陆上风力资源分布的不均衡性^[1]导致风电资源得不到较充分的利用^[2-3],同时大规模风电高渗透率并网带来了电网安全稳定运行^[3]的问题,促使国家开始着手发展海上风力资源。

广东省发展海上风电场资源的一系列规划已经率先被批准。海上风电技术在国外发达国家起步较早^[4-8],在我国却刚刚开始,投入运行的有江苏响水200 MW风场^[5]。对海上风电的各项技术包括海上风能资源评估技术的研究方兴未艾。

目前我国传统的风资源评估技术,是针对陆地风电场发展起来的^[9-11],对海上风资源的评估呈现出一定的局限性。笔者首先简要说明了其不足之处,然后阐述了对海上风电场资源评估所使用的方法,最后使用我国常见且精度较高的WRF数值预报模式数据对风电场资源进行评估,并结合当地的测风塔数据进行验证,以说明其有效性。

1 风资源评估的传统方法及其不足分析

传统的风资源评估方法是针对陆上风电场的,步骤如下。

1) 取得实测轮毂高度的风速序列数据。包括测风塔多个垂直层风速/风向测值,以及地表的温度、湿度、气压等测值,若没有轮毂高度则用公式转化^[12-15]。

2) 估计风速的概率分布参数。一旦测风塔位置上风机轮毂高度的风速测值序列确定,便可以得到该处风速的概率分布^[10,15]。

3) 估计风能密度和年发电量。可以通过定义或者指定风速概率密度下风能密度的理论公式计算,或根据风机厂家的出力曲线计算^[10]。

这个方法应用到广东的海上风场时,有如下问题:

- 1) 目前缺少海上的直接测风数值^[6,16-17,21];
- 2) 对风垂直切变模型在热带季风气候区海面的准确程度并不明确;
- 3) 海面存在复杂的海陆效应^[18],可能对风速产生影响^[6]。

为此,使用数值天气模拟数据被认为是准确评估我国海上风资源的必要手段之一。

2 对广东海上风资源评估的方法

通过WRF数据建立对海上区域风资源评估的方法。

2.1 WRF 数值预报模式

文中使用的WRF数据来自数值天气预报,其空间分辨率为27 km,时间分辨率为15 min。该模式在中央气象台发布的T639等中尺度模式结果的基础上进一步细化。

2.2 风垂直切变模型

根据文献[15—16],使用幂律来估计其他高度上的风速值。

风垂直切变幂律公式如下:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: α 为风切变指数; v_2 为高度 z_2 的风速; v_1 为高度 z_1 的风速。

对WRF数据和测风塔数据,存在多个高度的测风数据。对应高度的风垂直切变指数 α ,可用最小二乘估计计算。

2.3 用测风塔数据对WRF数据进行校正

在国内外的绝大部分文献中,数值天气模拟数据与测风数据相符合,但文献[7]发现WRF模式的风速均值存在偏差,经过均值校正后,精度大大提高。据此,文中也采用均值校正WRF数据。

2.4 风速概率模型

一般风速分布符合双参数Weibull分布,其概率分布密度的表达式为:

$$p(v; c, k) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (2)$$

式中: p 为概率密度; v 为风速, m/s; k 为形状参数; c 为尺度参数^[10]。

也可近似地认为风速分布满足Rayleigh分布, Rayleigh分布是Weibull分布在形状参数 $k=2$ 时的特殊情况^[18]。文献[9]发现在热带、亚热带地区,风速Weibull分布的形状参数小于2, Rayleigh分布不再

适用。

对于Weibull分布的参数估计,一般有最小二乘法^[19]和最大似然估计两种。

笔者准备采用最大似然估计方式来估计 k 和 c 值,以直接保证对概率密度函数的最佳逼近。

设各个风速采样值独立分布,构造似然函数:

$$L(k, c) = \ln \prod_i p(v_i) \quad (3)$$

令似然函数对 k 和 c 的偏导数等于0,求解 k, c 的最佳值,得到迭代公式:

$$k = \left(\frac{\sum_i v_i^k \ln v_i}{\sum_i v_i^k} - \frac{\sum_i \ln v_i}{n} \right)^{-1}$$

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_i v_i^k \right)^{1/k} \quad (4)$$

可以用Newton-Raphson方法求解 k 和 c 的值。迭代的初始值可以用最小二乘法求得。

2.5 空气密度计算

从气体状态方程出发,考虑水汽的影响,估算空气密度^[10,19]:

$$\rho = \frac{1.276}{1 + 0.00366t} \left(\frac{p - 0.378e}{1000} \right) \quad (5)$$

式中: e 为水汽压,hPa; t 为气温,℃; p 为大气压,hPa。

2.6 全年发电量计算

1) 风功率密度

设定时段内的平均风功率密度表达式^[17]为:

$$D_{wp} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\rho) (v_i^3) \quad (\text{W/m}^2) \quad (6)$$

式中: n 为在设定时段内的记录数; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; v_i 为第 i 记录的风速, m/s ;

根据 v 随Weibull分布的假设,风功率密度和有效风功率密度也可推导后写为:

$$\bar{w} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (7)$$

如果 ρ 随风速或时间变化,则需要原始的积分公式来求取风能密度。

2) 年发电量

(1) 在 ρ 恒定和 v 满足Weibull分布假设下,年发电量 P_a 可以通过下式^[17]计算:

$$P_a = \sum_{i=1}^{8760} p(v_i) F(v_i) \quad (8)$$

式中: $p(v_i)$ 为风速 v_i 的出现概率; $F(v_i)$ 为风速 v_i 下,风力机的输出功率。如果 ρ 不近似恒定,则 P_a 的计算通过原始的时间积分完成。

(2) 可通过容量系数(Capacity Factor, CF)来计算年发电量:

$$P_a = CF \times 8760 \times \text{风力机额定功率} \quad (9)$$

国外相当部分文献使用了如下经验公式^[18]计算容量系数:

$$CF^* = 0.087 \cdot \bar{v} - \frac{P_R}{D^2} \quad (10)$$

式中: CF^* 是 CF 的估计值(无量纲); $\bar{v}$ 是全年平均风速, m/s ; P_R 是风场额定功率, kW ; D 是叶轮直径, m 。

研究针对一大片区域,尾流效应考虑较少,也有人简单地使用了尾流损失倍率0.1计算尾流损失^[21]。文中暂使用0.1作为尾流损失因子。

国内外的海上风力资源评估研究中,一般不考虑检修停机造成的发电损失。文中也不考虑故障损失模型。

3 算例实验

为了论述上述方法的可用性,文中选择了广东某海上风场作为验证算例。算例同时基于数值天气模拟数据和现场测风塔数据,并对其结果进行了比较。

3.1 数据准备

假定风场选定的风机为广东明阳SCD型风机,其额定功率为3 MW,轮毂高度为90 m,启动风速为3 m/s,额定风速为12.5 m/s,叶轮直径为115 m,其他参数详见文献[20]。风机为66台。

算例使用WRF格式的待建风场附近的数值预报数据(从2011年12月到2013年1月)。在该数据中选取WRF网格点、测风塔和风机位置的相对关系,如图1所示。

12个WRF网格点从左上角到右下角依次编号为1到12。每个WRF网格点至少包括地表10 m内的风速、风向,第1,2,3个sigma层的风速、风向、地表高度,及其各层的温度、湿度和气压。本算例中,风机、

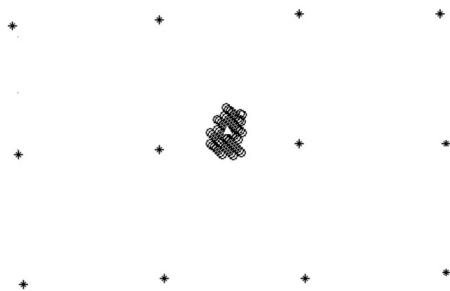


图1 12个WRF网格点(*号)、测风塔(三角形)和风机(圆圈)的相对位置

Fig. 1 The relative position of WRF points, anemometer tower, and fan

轮毂高度主要介于第1个和第2个sigma面之间。

为验证和校正数值预报,算例还使用了测风塔数据。该测风塔位于风场中心地点,其数据的时间跨度为2011年12月到2012年11月底,每小时一条记录,主要包括:风速(10, 50, 80, 90, 100 m),风向(50 m),暂未取得温度、气压和湿度测量数据。数据已经通过完整性和相关性测试。

3.2 风力场概况

使用测风塔数据衡量风场概况。全年平均风速见表1。

表1 各高度全年风速均值和标准差

Table 1 Annual average wind speed and standard deviation at various heights

塔高度/m	10	50	80	90	100
平均风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	6.42	7.52	7.72	7.84	7.97
风速标准差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.41	3.39	3.44	3.55	3.53

从表1可知,依照文献[14],根据50 m处平均风速(7.52 m/s),风能恰好达到4级。

全年各月份的平均风速如图2所示。轮毂高度风速在冬季达到最大(8.5 m/s以上),在最小的8月,平均风速在轮毂高度处仍不低于5.5 m/s。

使用Google Earth,得到风场位置的水深均小于10 m,可以安装风机。

3.3 风速的高度分布规律

根据全年测风数据,拟合出的风切变指数的平

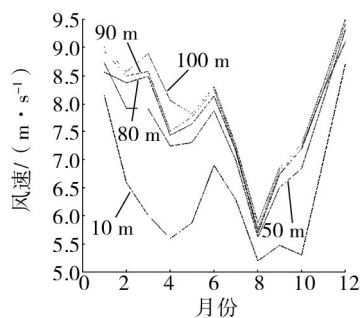


图2 各高度下的月平均风速

Fig. 2 Monthly average wind speed of different height

均值为0.106,该值与陆上风场常用的参考值(1/7=0.143)有显著差距。

图3显示了全年各月的风切变指数的变化。

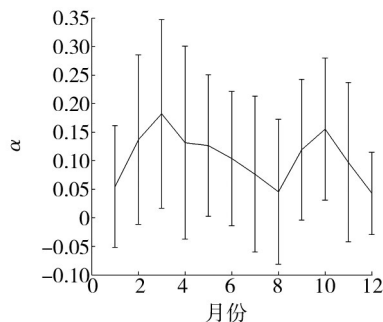


图3 全年风切变指数的月均值和标准差

Fig. 3 Monthly average and standard deviation of annual wind shear exponent

从图3可见,春秋两季的切变指数较高。各月份风切变指数的标准差都比较大。图4显示了24 h内的风切变指数的变化。

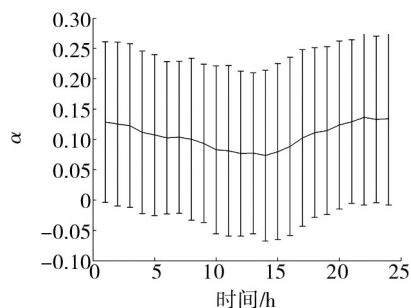


图4 风切变指数在同一时刻的均值和标准差

Fig. 4 Average and standard deviation of wind shear index in 24 hours

风切变指数在白天下午的时候最低,晚上近24

点时最高。图3和4均表明风切变指数的季节变化和日变化都较大。故对数值预报数据进行高度插值时,风切变指数不作为常数使用。

3.4 风速的概率分布

根据测风塔实测数据,绘制各高度下的风速直方图(归一化后),用最大似然估计法估计Weibull分布的参数,绘制Weibull概率密度分布曲线。

图5显示的是轮毂高度处的风速直方图以及拟合后的Weibull概率密度曲线。

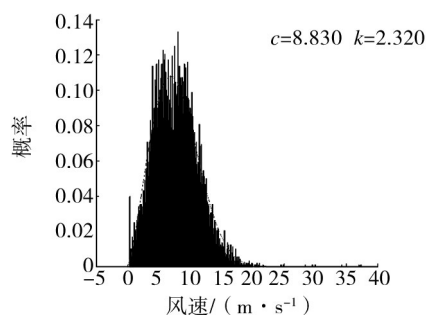


图5 轮毂高度(90 m)下的风速直方图和拟合后的Weibull概率密度分布

Fig. 5 Wind speed histogram in hub height (90 m) and the fitted Weibull probability density distribution

从图5可见,风速概率分布较好地满足了Weibull分布。

3.5 用测风塔数据对WRF数据进行验证

选择与测风塔位置相对较近的第7个WRF网格点在轮毂高度上的数值进行对比。对比结果如图6所示。

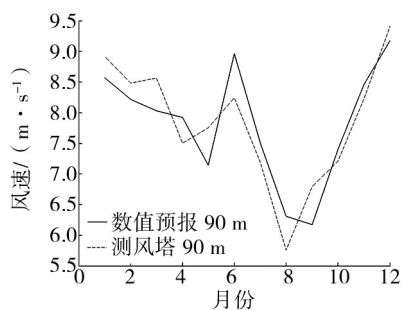


图6 测风塔与第7个WRF网格点上轮毂高度(90 m)处的月平均风速对比

Fig. 6 Monthly average wind speed comparison between anemometer tower and the 7th WRF grid points at hub height (90 m)

由图6可见,两条曲线比较接近,说明数值预报WRF模式的风速数据比较接近实际测值。计算表明数值预报模式的风速(轮毂高度)均值比测风塔的小0.148 m/s,故对数值预报模式的风速数据进行均值校正。

3.6 风力场的空间一致性

项目比较了sigma面上,12个WRF网格点的风速的相关性。相关性使用风速序列的相关系数来表示。

离风场最近的是第2,3,6,7,10,11点,如图7所示。这几个点之间的相关系数都在0.9以上,显示这6个WRF点上,无论是第1个还是第2个sigma层,数值模拟出来的风速序列可以认为是强相关的,这表示风场所在的风力场中各地点的风速一致性较好。

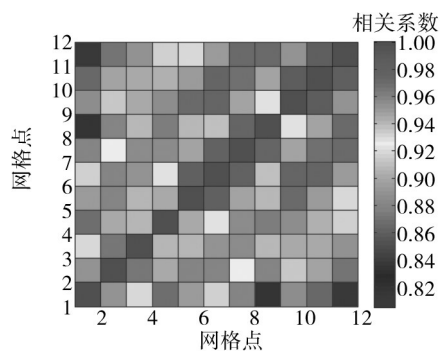


图7 第一个sigma层中,12个WRF网格点的风速的相关性矩阵

Fig. 7 Wind speed correlation matrix of 12 WRF grid points in the first sigma layer

3.7 风功率密度和年发电量评估结果

由于测风塔数据中无温度、气压和湿度,无法据此估计空气密度,所以计算时空气密度使用通常值,即20℃和一个大气压下的空气密度值:1.205 kg/m³。采用轮毂高度(90 m)处的Weibull分布参数计算。

测风塔处在10,50,90 m高的风功率密度见表2。

表2 测风塔处的风功率密度

Table 2 Wind power density at anemometer tower

高度/m	10	50	90
风功率密度/(W·m⁻³)	308.26	424.89	482.02
有效风功率密度/(W·m⁻³)	307.19	424.26	481.32

计算结果显示,50 m风落在第4级,该风场的风功率密度判为落在第4级。

使用数值预报数据计算出来的风场风功率密度地图如图8所示。

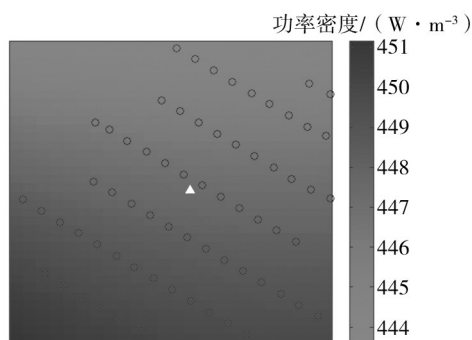


图8 使用WRF数据给出的风场轮毂高度处风功率密度分布地图

Fig. 8 Wind power density distribution map at the hub height according to WRF data

图8中:横向是经度;纵向是纬度;圆圈是设定的风机位置;三角形是测风塔实际位置。图8中的风能密度在444~451 W/m³之间,比测风塔给出的数值偏小。

另从图8中可见,虽然风场处于热带季风区域,风能密度在整个风场范围内的差别仍然是微小的,这和风速空间一致性分析相符合。

采用3种方法比较年发电量:第1种使用测风塔数据和厂家给出的风机出力曲线;第2种使用测风塔数据,根据容量因素估算;第3种使用校正后的WRF数据,计算每台风机的全年发电量并加总,尾流损耗因子设为0.1。结果见表3。

表3 风场的年发电量估计

Table 3 Estimation of wind farm annual energy production

	MW·h
第1种方法	7.201×10^5
第2种方法	7.101×10^5
第3种方法	7.121×10^5
第3种方法(未进行风速均值校正)	6.875×10^5

3种方法估计的风场年发电量都比较接近,数值预报模拟数据给出的数值稍偏小,但由于数值预报并不假定风场风力处处相等,所以给出的数值更准确。

表3中最后未对数值预报数据进行风速均值校正,计算的年发电量数值明显偏小,可见虽然数值预报数据与实际数据符合较好,但用测风塔实际数据对数值预报数据进行校正仍然有助于提高精度。

4 结论

探讨了海上风场风资源评估的过程,并对WRF模式用于海上风场评估的适用性进行了较详细的分析。得出主要结论如下:

1) 若缺少海上气象站或者测风塔测风数据,在对大面积海域进行风资源评估时,使用数值预报数据是必须的;

2) 陆上风场资源评估中常用的定律、公式,由于复杂的水汽过程,在海上风场资源评估时需要进行全面检验;

3) WRF数值预报数据的风速序列,虽然与实际风速相差不大,但用均值校正可提高精度;

4) 使用校正后的WRF数据可以较好地用于评估海上风资源评估;

5) 在数值天气预报数据不足的情况下,使用测风塔轮毂高度的测风数据,可以直接用于计算年发电量。

参考文献:

- [1] 薛桁,朱瑞兆,杨振斌,等. 中国风能资源贮量估算[J]. 太阳能学报,2001,22(2):167—170.
- [2] 李锋,陆一川. 大规模风力发电对电力系统的影响[J]. 中国电力,2006,39(11):80—84.
- [3] 张运洲,白建华,辛颂旭. 我国风电开发及消纳相关问题研究[J]. 能源技术经济,2010,22(1):1—6.
- [4] WIKIPEDIA. List of Offshore Wind Farms[DB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_offshore_wind_farms.
- [5] DVORAK M J, ARCHER C L, JACOBSON M Z. California Offshore Wind Energy Potential[J]. Renewable Energy, 2010,35(6):1244—1254.
- [6] SHIMADA S, OHSAWA T. Accuracy and Characteristics of Offshore Wind Speeds Simulated by WRF[J]. Sola, 2011(7):21—24.
- [7] OH K Y, KIM J Y, LEE J K, et al. An Assessment of Wind Energy Potential at the Demonstration Offshore Wind Farm in Korea[J]. Energy, 2012,46(1):555—563.

(下转第10页)

剥离性。笔者所在单位目前已与风电企业及部分涂料生产企业合作开展湿热海上风电涂装体系的实验室性能测试方法改进研究。改进后的单因素环境试验组合见表3。后续将开展与暴露试验的相关性研究以及ISO 20340测试方法的严酷度进行对比。

4 结语

我国湿热海洋环境条件具有更为严重的腐蚀性,湿热海上风电塔筒的防护涂装体系及其性能评价方法均应进行针对性改进,并在实践中不断完善,以服务于我国风电产业的发展。

参考文献:

- [1] 严晓建. 丹麦海上风电发展及其经验借鉴[J]. 中国市场, 2010(13):82—84.
- [2] 姚兴佳,隋红霞,刘颖明,等. 海上风电技术的发展与现状[J]. 上海电力,2007(2):111—118.
- [3] 高坤,李春,高伟,等. 新型海上风力发电及其关键技术研究[J]. 能源研究与信息,2010,26(2):110—116.
- [4] 侯健,郭为民,邓春龙. 深海环境因素对碳钢腐蚀行为的影响[J]. 装备环境工程,2006,5(6):82—84.
- [5] 陈翔峰,穆振军,许春生. 碳钢及低合金钢在厦门海域实景暴露腐蚀规律研究[J]. 装备环境工程,2012,9(6):21—24.
- [6] ISO 12944-2, Paints and Varnishes—corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems—Part 2: Classification of Environments[S].
- [7] ISO 12944-5, Paints and Varnishes—corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems—Part 5: Protective Paint Systems[S].
- [8] ISO 12944-6, Paints and Varnishes—corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems—Part 6: Laboratory Performance Test Methods[S].
- [9] ISO 20340, Paints and Varnishes—performance Requirements for Protective Paint System for Offshore And Related Structures[S].
- [10] 杨振斌,薛桁,袁春红,等. 用于风电场选址的风能资源评估软件[J]. 气象科技,2001,29(3):54—57.
- [11] 陕华平,肖登明,薛爱东. 大型风电场的风资源评估[J]. 华东电力,2006,34(2):15—18.
- [12] 连捷. 风电场风能资源评估及微观选址[J]. 电力勘测设计,2007,4(1):71—73.
- [13] ARCHEr C L, JACOBSON M Z. Spatial and Temporal Distributions of US Winds and Wind Power at 80 m Derived from Measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D9):4289.
- [14] 靳全,苏春. 基于幂律过程和改进参数估计方法的风电场风能评估[J]. 中国电机工程学报,2010,30(35):107—111.
- [15] MASTERS G M. Renewable and Efficient Electric Power Systems[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005: 367—369.
- [16] SHERIDAN B, BAKER S D, Pearre N S, et al. Calculating the Offshore Wind Power Resource: Robust Assessment Methods Applied to the US Atlantic Coast[J]. Renewable Energy, 2012, 43: 224—233.
- [17] S RENSEN B. A New Method for Estimating Off-shore Wind Potentials[J]. International Journal of Green Energy, 2008, 5(3):139—147.
- [18] 经志友,齐义泉,华祖林. 南海北部陆架区夏季上升流数值研究[J]. 热带海洋学报,2008,27(3):1—8.
- [19] 白绍桐,胡晓春,陈显扬,等. 风电场微观选址工作的探讨[J]. 华电技术,2008,30(3):73—76.
- [20] 广东明阳风电[DB/OL]. <http://www.mywind.com.cn/upfile/File/2012/3.0%E5%85%86%E7%93%A6SCD%E9%A3%8E%E5%8A%9B%E5%8F%91%E7%94%B5%E6%9C%BA%E7%BB%84.pdf>.