

区域风能规划中的风资源参数及 等效风速序列求解方法

吉平, 周孝信, 武守远

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Wind Resource Parameters and Equivalent Wind Speed Sequence Solution in Regional Wind Energy Planning

JI Ping, ZHOU Xiaoxin, WU Shouyuan

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: In regional wind energy planning multiple wind speed observing stations, it is absent of that wind speed data and its solving approach, which can describe regional equivalent wind resource condition well. It is important but is difficult to solve regional equivalent wind speed sequence and wind speed distribution characteristic parameters. For this, it was summarized that important wind resource parameters, which describe wind speed distribution and wind resource situation, in commonly used wind energy planning models. Then, the impact of these parameters on energy planning was analyzed. Solution approaches for these parameters were proposed based on multidimensional regression model. Besides, an approach synthesizing wind speed sequence was presented, using only the monthly average wind speed on the platform of Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER). Validating analysis was carried out on a region owning several wind observation stations. The results show that the proposed methods achieve reasonable wind speed data; and the synthesizing wind speed method can gain wind speed sequence referenced and is applied to energy planning to some extent.

KEY WORDS: wind energy planning; multidimensional autoregressive model; hybrid optimization model for electric renewables (HOMER); regional equivalent wind speed; resultant wind speed

摘要: 在面积较广阔、建有多个风速观测站的区域风能规划中, 缺乏能够描述区域等效风资源状况的风速数据以及相应的求解方法。针对区域等效风速序列及风速分布特性参数难于求解的问题, 调查总结了常用风能规划模型中用于描述风速变化特性及风资源分布的重要参数, 分析了参数选择对风能规划的影响, 提出基于多维自回归模型的区域等效参数及

区域等效风速序列求解方法, 给出一种仅利用月平均风速合成风速数据的方法。以可再生能源混合优化模型为计算平台, 以建有多个风速观测站的某区域为算例, 参数求解方法及合成风速方法的合理性进行了验证分析。结果表明, 2种方法都能够求得合理的区域等效风速数据; 利用月平均风速合成风速数据的方法, 能够合成具有一定可参考性的、适用于区域风能规划的风速数据。

关键词: 风能规划; 多维自回归模型; 可再生能源混合优化模型; 区域等效风速; 合成风速

0 引言

目前, 常用的混合能源规划模型有能源-经济-环境模型 IIASA-WEC E3^[1]、中国能源环境综合评价模型系统 IPAC^[2-4]、能源系统长期前景规划模型 POLES^[5]、国家能源模型 NEMS^[6]、RETScreen^[7]以及可再生能源混合优化模型(hybrid optimization model for electric renewables, HOMER)^[8-10]等。以这些能源规划模型为工具, 含风力发电的可再生能源规划得到较多的关注和研究^[11-22]。

文献[11]利用 IIASA-WEC E3 模型研究了中国和印度等亚洲国家的可再生能源发展潜力及污染物排放成本, 制定了相应的污染物减排策略。文献[12-13]应用 POLES 分别在实行碳排放交易的经济潜力、世界能源需求预测方面做了分析。文献[14]结合场景分析方法, 将 NEMS 模型应用于美国电力发展的政策制定与选择中, 分析了温室气体及其它大气污染物对环境的影响。文献[15]以中国电力工业的发展及其污染物排放控制现状为蓝本, 以 IPAC 模型为基础构建了电力温室气体减排评价模型, 对

电力行业 2010—2050 年最优技术路线进行计算和预测,给研究电力行业温室气体排放控制的机构提供了参考方案。文献[16-22]在 HOMER 模型的基础上,对城市、海岛、村庄、社区、住宅等不同规模下的可再生能源规划及电网优化设计进行了研究,确定发电形式、规模以及相应的经济和环境效益。

但是,在上述研究中都以一个风速观测站的数据描述整个区域的风资源状况。地形地貌对风速变化有显著作用,显然对面积较广阔、建有多个风速观测站的区域进行风能规划时,仅用一个观测站的风资源状况来描述整个区域的风资源分布情况具有一定的局限性。同样的问题对于地形复杂的风电场也存在。因此,有必要研究能够综合考虑区域内所有观测站风速数据的方法,求得描述区域等效风资源状况的等效风速序列,进而在区域风能能源规划中得到更有参考价值的规划结果。但面临风速历史数据匮乏或不完整、测量基准不同等问题。本文对这些问题的解决方法进行了初步研究。

本文总结了风能规划中用于描述风速变化特性及风资源分布的常用参数,分析了参数选择对风能规划的影响;提出了基于多维自回归模型自回归系数的区域等效参数及区域等效风速序列求解方法,给出了一种仅利用月平均风速合成风速数据的方法;以可再生电力混合优化模型为计算平台,以建有多个风速观测站的某区域为算例,对参数求解方法、区域等效风速求解方法及合成风速方法进行了验证分析。

1 风能规划模型中的风资源相关输入参数

在应用上述集成结构的能源规划模型进行含风力发电的能源规划时,除了需要输入 1 年风速历史数据外,其它风资源相关参数主要包括 2 类:第 1 类是不能由风速历史数据计算的参数,海拔、测风仪高度、年平均气温、年平均大气压力、风切变指数;第 2 类是能利用风速历史数据计算的参数,年平均风速、月平均风速、风速威布尔分布形状参数、风速 1 h 自相关系数、风速曲线日形状强度和最大风速时刻等。第 1 类参数需要根据规划研究对象的地理位置情况输入,其中风切变指数也可根据 2 组不同高度处的风速数据计算得到其近似值。当有完整的 1 年风速历史数据时,第 2 类参数由模型自动生成,否则,则需要人工输入这些参数以合成风速数据。在确定的能源模型中,往往不会同时要

求输入上述所有参数。

当各观测站风速数据完整时,利用这些数据求出的区域等效风速数据、第 1 类参数的区域等效值就是风能规划的输入;当各观测站有部分风速数据时,第 1 类、第 2 类参数的区域等效值就作为输入量;仅有月平均风速时,第 1 类、第 2 类参数经验值的综合处理结果是风能规划的输入量。

2 多维自回归模型的自回归系数

工程上认为,风速可以分解为平均风速和脉动风速 2 部分^[23]:

$$\mathbf{v}(t) = \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{w}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{v}(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_N(t)]^T$ 为各风速观测站 t 时刻风速构成的列向量; $\bar{\mathbf{v}} = [\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_N]^T$ 和 $\mathbf{w}(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_N(t)]^T$ 分别为 N 个观测站平均风速、脉动风速构成的矩阵。

式(1)中脉动风速向量可用多维自回归模型表示:

$$\mathbf{w}(t) = \sum_{j=1}^p \Psi_j \mathbf{w}(t-j) + \boldsymbol{\varepsilon}(t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{w}(t-j) = [w_1(t-j), w_2(t-j), \dots, w_N(t-j)]^T$, 为与 t 时刻相关的前 p 个时刻的脉动风速列向量; $j = 1, 2, \dots, p$, p 为自回归模型的阶数, $i = 1, 2, \dots, N$, 表示观测站编号; $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = [\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \dots, \varepsilon_N(t)]^T$, 为白噪声序列构成的 N 维列向量; Ψ_j 为 $N \times N$ 阶自回归系数矩阵, 如式(3)所示, 其元素 $\psi_{j(i,m)}$ 的大小代表了第 m 个观测站 $(t-j)$ 时刻风速对第 i 个观测站 t 时刻风速的影响。

$$\Psi_j = \begin{bmatrix} \psi_{j(1,1)} & \psi_{j(1,2)} & \cdots & \psi_{j(1,N)} \\ \psi_{j(2,1)} & \psi_{j(2,2)} & \cdots & \psi_{j(2,N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{j(N,1)} & \psi_{j(N,2)} & \cdots & \psi_{j(N,N)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

在计及了各风速序列在时间和空间上的相互影响时,第 i 个风速观测站等效风速 v_i^* 如式(4)所示,区域等效风速 v_Σ^* 如式(5)所示。

$$v_i^* = \sum_{m=1}^N \sum_{j=1}^p \psi_{j(i,m)} v_m \quad (4)$$

式中 v_m 为第 m 个观测站风速。

$$v_\Sigma^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^N \psi_{j(i,m)} v_m \quad (5)$$

3 风资源相关输入参数对能源规划的影响及其区域等效值求解

3.1 海拔、气温与大气压力

在能源规划的风资源相关分析中,海拔、气温与大气压力的影响主要体现在空气密度方面,从而影响风资源指标值^[24]。在本文分析中,取各观测站海拔的平均值作为区域海拔的等效值,相对应的气温及大气压力作为区域等效值。

3.2 测风仪高度

能源规划中,测风仪高度表示了可获得的风速数据对应的高度,是将该风速序列转换为风机预装轮毂高度处风速序列的基础参数。

从不同观测站获得的风速数据,可能是不同高度处的测量值。在计算中,需要将它们转换到统一的测风高度上,并尽量减少转换次数以减小误差。

3.3 风切变指数

一般情况下,近地层风速廓线可用幂次律表示^[25]:

$$v_{h1} = v_{h0} \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中: v_{h1} 为 h_1 高度的平均风速值; v_{h0} 为 h_0 高度的平均风速值; α 为风切变指数。

风切变指数是能源规划中与风资源相关的重要参数,它描述了风速随着距离地面高度变化的特性,也是描述不同地面情况、地形地貌对风速影响的参数。由式(6)可以利用已知的某测风仪高度的风速序列计算出风机预装轮毂高度处的风速序列,从而预估能源规划中可利用的风能总量。

在地面境界层, α 选为地面粗糙度,不同地面情况下的 α 值可参考文献^[26]。

本文选择地面粗糙度作为风切变指数。按照如下步骤计算区域等效风切变指数:

1) 分别将第 m 个观测站处的地面粗糙度 α_m 、 h_0 高度的平均风速 v_{0m} 代入式(6),可计算第 m 个观测站 h_1 高度的平均风速 v_{1m} , $m=1,2,\dots,N$;

2) 将 v_{0m} 、 v_{1m} 分别代替式(4)中的 v_m , 可求得 h_0 高度和 h_1 高度的区域等效风速,此处记为 v_{h0}^* 和 v_{h1}^* ;

3) 用 v_0^* 和 v_1^* 分别代替式(6)中的 v_{0m} 和 v_{1m} , 可得区域等效风切变指数 α^* , 即

$$\alpha^* = \frac{\ln v_1^* - \ln v_0^*}{\ln h_1 - \ln h_0} \quad (7)$$

3.4 威布尔分布参数

3.4.1 gamma 函数单调性分析

用于拟合风速概率分布的模型中,2 参数威布尔分布模型应用最为广泛,其形状参数 k 和分布参数 c 是能源规划中计算风资源评价指标、描述风速概率分布特性的重要变量。

能源规划中风资源评价指标的计算与 gamma 函数(记为 $\Gamma(\cdot)$)的取值密切相关。

$\Gamma(\cdot)$ 在其定义域 $(0, \infty)$ 上不具单调递增或单调递减特性。当自变量 $x \in [1.0, 4.0]$ 时, $\Gamma(\cdot)$ 的函数值变化如图 1 所示,并给出了 $x \in [1.0, 2.0]$ 的局部放大图。显然,当 $x \in [1.43, 1.49]$ 时, $\Gamma(\cdot)$ 的函数值最小,约等于 0.886。 $x \in [1.0, 2.0]$ 时, $\Gamma(\cdot)$ 缓慢减小后缓慢增大;当 $x \geq 2$ 时, gamma 函数值迅速增大。 $k \geq 1$ 时, $\Gamma(1/k+1) \in [0.886, 1]$, 即可知 $c/\bar{v} \in [1, 1.129]$ 。

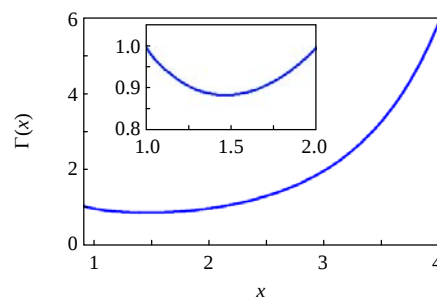


图 1 gamma 函数在区间 $[1.0, 4.0]$ 上取值

Fig. 1 gamma function value in the interval $[1.0, 4.0]$

3.4.2 风资源评价指标一阶导数单调性分析

平均风速、平均风能密度、风能可利用时间等风能特征指标,是评估风能资源状况的重要参数。式(8)—(13)给出了各指标对威布尔分布参数一阶导数的表达式:

$$\frac{d\bar{v}}{dk} = -\frac{c}{k^2} \text{Psi}\left(\frac{1}{k}+1\right) \Gamma\left(\frac{1}{k}+1\right) \quad (8)$$

$$\frac{d\bar{v}}{dc} = \Gamma\left(\frac{1}{k}+1\right) \quad (9)$$

$$\frac{d\bar{w}}{dk} = -\frac{3}{2} \rho \frac{c^3}{k^2} \text{Psi}\left(\frac{3}{k}+1\right) \Gamma\left(\frac{3}{k}+1\right) \quad (10)$$

$$\frac{d\bar{w}}{dc} = \frac{3}{2} \rho c^2 \Gamma\left(\frac{3}{k}+1\right) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dt}{dk} = & -8760 \left(\frac{v_1}{c}\right)^k \ln\left(\frac{v_1}{c}\right) \exp\left[-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k\right] + \\ & 8760 \left(\frac{v_2}{c}\right)^k \ln\left(\frac{v_2}{c}\right) \exp\left[-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k\right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{dt}{dc} = 8760 \left(\frac{v_1}{c}\right)^k \left(\frac{k}{c}\right) \exp\left[-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k\right] - 8760 \left(\frac{v_2}{c}\right)^k \left(\frac{k}{c}\right) \exp\left[-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k\right] \quad (13)$$

式中: $\bar{v}$ 为平均风速, m/s; $\bar{w}$ 为平均风能密度; ρ 为空气质量密度; t 为风能可利用时间; v_1 为风机启动风速; v_2 为风机切除风速; k 为威布尔分布形状参数; c 为威布尔分布尺度参数, m/s; $\Psi(\cdot) = \Gamma'(\cdot)/\Gamma(\cdot)$ 为 gamma 函数的对数导数, 也称为 digamma 函数。

1) 平均风速一阶导数单调性分析。

式(8)的单调性是由 5 个函数的单调性复合决定的, 即 $f_1=c$, $f_2=-k^{-2}$, $f_3=\Psi(x)$, $f_4=\Gamma(x)$, $f_5=x=1/k+1$ 。考虑风速概率分布的实际情况, 仅讨论 $k \geq 1$ 时复合函数的单调性。 $\Gamma(\cdot)$ 在 $x \in [1.0, 2.0]$ 上的特性, 决定了式(8)将先以较大速率增大, 增速减缓, 之后会以较小的速率逐渐减小。 c 值的大小仅能对 $d\bar{v}/dk$ 取值产生影响, 并不能改变其变化趋势。图 2(a)给出了 $c=1$ 、 $k \in [1, 10]$ 变化时的一阶导数值, 呈现出先快速增大、后缓慢减小的特性。

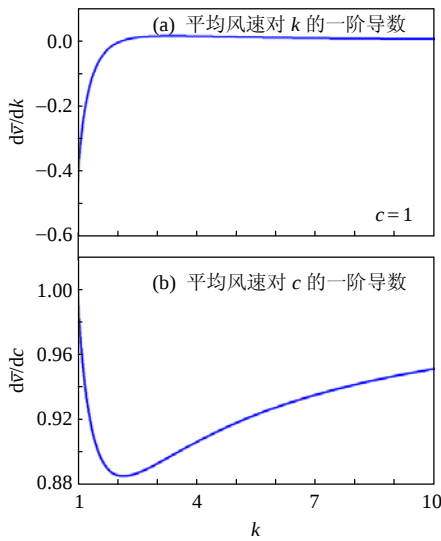


图2 平均风速对威布尔分布参数的一阶导数

Fig. 2 First-order derivations of average wind speed to Weibull distribution parameters

式(9)与 c 值大小无关, 仅随 k 变化呈 $\Gamma(\cdot)$ 变化特性, 如图 2(b)所示。

2) 平均风能密度一阶导数单调性分析。

式(10)与式(8)相比, 函数值增大阶段, 前者速率更大; 函数值衰减阶段, 前者速率更缓。另外, 由于式(10)与 c^3 成正比, c 值增大会加大各阶段变化速率, 但并不改变其变化趋势。图 3(a)给出了

$c=1$ 、空气密度 $\rho=1$ 、 $k \in [1, 10]$ 变化时的一阶导数值, 呈现出先快速增大、后缓慢减小的特性。在 $k=1$ 时, $d\bar{w}/dk = -14.13$ 为最小值; $k \geq 4.85$ 时, $d\bar{w}/dk \geq -0.01$, 并以 0 为渐近线。

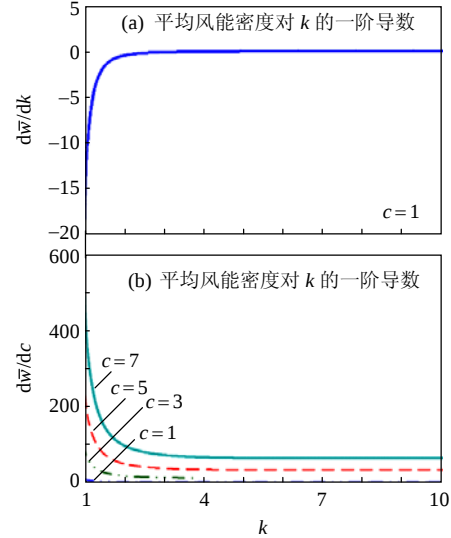


图3 平均风能密度对威布尔分布参数的一阶导数

Fig. 3 First-order derivations of average wind power density to Weibull distribution parameters

当 $c=1$ 、 $\rho=1$ 时, 式(11)的单调性以 $d\bar{w}/dc = 1.5\rho c^2$ 为渐近线。 c 值的大小会影响变化速率, 也决定了式(11)的渐近线取值。图 3(b)给出了 $c=1$ 、 $c=3$ 、 $c=5$ 和 $c=7$ 的条件下平均风能密度对 c 的一阶导数的变化特性。

3) 风能可利用时间一阶导数单调性分析。

分析式(12)和(13)可知, 在 $k \geq 1$ 时二者的单调性与启动风速、切除风速和尺度参数的比值相关。若 $v_1/c < 1$, 则函数 $f_1=(v_1/c)^k$ 呈单调递减特性; 若 $v_1/c > 1$, 则函数 f_1 单调递增。同理, $f_2=(v_2/c)^k$ 在 $v_2/c < 1$ 时单调递减, 在 $v_2/c > 1$ 时单调递增。文中, 风机启动风速 $v_1=3$ m/s, 切除风速 $v_2=20$ m/s, 故 c 值等于 3 和 20 成为式(12)和(13)单调性变化的转折点。显然, 对 $c < 3$ 的地区进行风资源评价是没有实际意义的。

图 4(a)是 c 从 3 到 6 变化时 dt/dk 的变化图, $c \geq 3$ 时单调递减。图 4(b)是在区间 $k \in [1, 10]$ 上 dt/dc 的变化图。对于确定的 k , dt/dc 的变化曲线与图 1 相似, k 越大, 曲线分布范围越窄, 峰值越大, 峰值对应的 c 值越接近 3.0。经过计算发现, 随 k 值增大, dt/dc 峰值对应的 c 无限接近于 3.0, dt/dc 曲线的最终变化趋势为冲击函数。

综上所述, 可以得出如下结论:

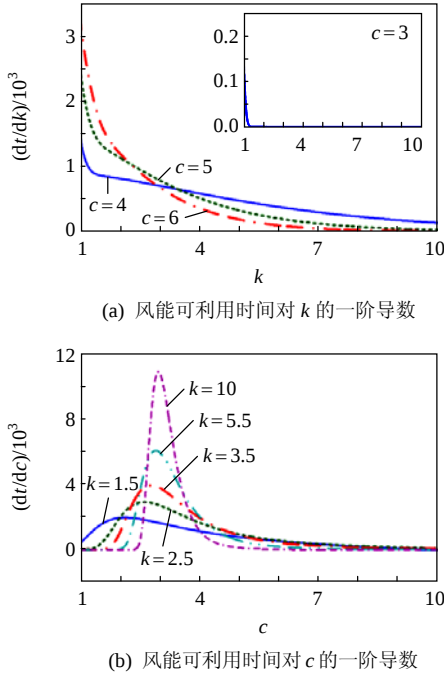


图 4 风能可利用时间对威布尔分布参数的一阶导数

Fig. 4 First-order derivations of wind energy available time to Weibull distribution parameters

1) 平均风速越大的地区, k 的估计误差导致的平均风速误差值越大;

2) 平均风速越大的地区, k 和 c 的估计误差带来的平均风能密度误差越大; 对于平均风速已确定的地区, k 越小时, 它的估计误差对平均风能密度误差的影响越大;

3) 平均风速越大的地区, k 越小时, 它的估计误差对风能可利用时间误差的影响越大; 对于平均风速已确定的地区, k 越大, 风速分布范围越小, k 的估计误差对风能可利用时间误差的影响越大。

3.4.3 风速威布尔分布形状参数区域等效值

由 3.4.2 分析知, 尺度参数 c 与平均风速有近似的关系 $c/\bar{v} \in [1, 1.129]$ 。因此, 在能源规划模型中, c 不作为输入参数。

如 3.4.2 中分析, 形状参数 k 对风速概率密度函数、风资源评价指标都有显著影响, 其区域等效值 k^* 的求解则直接影响着区域能源规划中可利用风资源的评估结果及规划结果的可参考性。

本文按照如下步骤计算 k^* :

1) 利用第 m 个观测站的历史风速数据, 求取威布尔分布形状参数 k_m , $m=1, 2, \dots, N$;

2) 按照下式计算 k^* :

$$k^* = \sum_{m=1}^N p_{k_m}^* k_m \quad (14)$$

式中: $p_{k_m}^* = p_{k_m} / \sqrt{\sum_{m=1}^N p_{k_m}^2}$; $p_{k_m} = \sum_{i=1}^N (\partial \bar{v}_i^* / \partial k_m)$ 。

3.5 风速 1 小时自相关系数

风速分布自相关系数 r 表示某时刻风速与前一时刻风速的相关程度。地势越平坦, 某时刻风速与前一时刻风速的相关程度越强, r 值越大, 风速曲线越平滑。

考虑风速序列相互影响后, 与第 m 个风速序列测量间隔时间 μ (单位为 min) 对应的自相关系数值 r_m 可根据式(15)求得:

$$r_m = \sum_{i=1}^N \psi_{1(i,m)} \quad (15)$$

则, 风速一小时自相关系数的区域等效值 $r^*[9-10]$:

$$r^* = \sqrt[60]{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N r_m} \quad (16)$$

3.6 最大风速时刻

最大风速时刻是 1 天中最大风速出现的时刻。在不同地域、不同季节、不同气象条件下, 该值均不相同。对于确定的风电场, 可分析其观测站风速数据来得出 ϕ 值。在建有多个观测站的区域能源规划中, 对各站可获得的风速数据分别统计, 然后求其平均值作为区域等效的最大风速时刻 ϕ^* 。

3.7 风速曲线日形状强度

如果每日风速总是在某一时刻附近达到最大, 或者每日风速分布图形状相似, 则认为日形状强度很强, 相应的日形状强度 δ 值较大, 其最大值为 1。文献[9-10]给出了曲线拟合的方法求解 δ , 图 5 是该方法示意图, 其中矩形图为小时风速平均值, 实线为拟合曲线。在求区域风速曲线等效日形状强度 δ^* 时, 考虑风速观测站间风速序列的相互影响, 则相应的曲线拟合公式为

$$v_i^* = \bar{v}^* \{1 + \delta^* \cos[\frac{2\pi}{24}(t - \phi^*)]\} \quad (17)$$

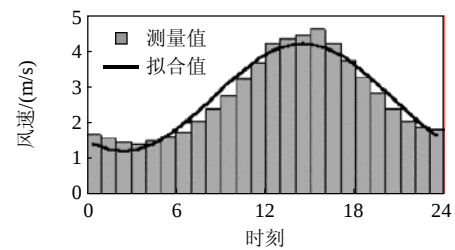


图 5 风速曲线日形状强度参数拟合

Fig. 5 Parameter fitting of wind speed curve diurnal pattern strength

式中: v_l^* 为 l 时刻区域风速的平均值; $l=1,2,\dots,24$, 代表 1 天 24 小时; $\bar{v}^*$ 为区域年平均风速; ϕ^* 为区域最大风速时刻的等效值。

4 区域等效风速数据的求解

4.1 完整风速数据综合处理

含风力发电的可再生能源能源规划中, 全年小时平均风速数据是一项重要输入, 是规划模型进行风资源评估、电力供应潜力及电力供需平衡分析的基础。对面积较大、测风站数量较多的区域进行可再生能源能源规划时, 有如下的困难: 1) 仅有各观测站的完整风速数据, 但没有描述整个区域风速变化规律、特性的风速序列; 2) 各观测站风速测量数据不完整; 3) 观测站风速数据缺失, 仅能提供平均风速数据。

假设需要进行区域风能能源规划的地区设有 N 个风速观测站, 分 2 种情况进行讨论:

1) 若各观测站相互之间距离较远, 则无需考虑风速序列之间的相互影响。此时最为简单直接的方法就是将各站风速数据转换为相同测风仪高度上的风速后, 取各站数据的平均值作为区域等效风速序列 v_Σ^* 。

2) 若部分观测站距离较近, 需要考虑风速序列之间的相互影响时, 则按照图 6 所示流程计算区域等效风速序列 v_Σ^* , 进而作为能源规划的输入量。

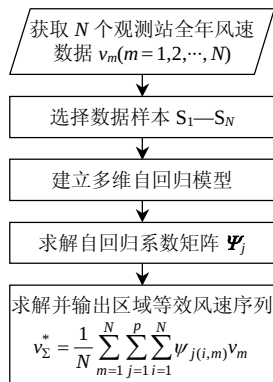


图 6 完整风速数据综合处理流程图

Fig. 6 Processing flow chart of complete wind speed data

4.2 部分风速数据综合处理

当各观测站风速数据不完整、有部分历史数据时, 先从中选取样本, 再按照第 2 节建立的自回归模型, 将样本进行延拓, 从而获得完整的风速数据, 进而求解区域的等效风速数据。

如果已有历史数据量很少而不能保证自回归模型预测结果的精度时, 则需要对样本进行综合分

析, 求出区域等效的月平均风速、威布尔分布形状参数、风速小时自相关系数、风速曲线日形状强度和最大风速时刻, 然后采用 4.3 中针对仅有平均风速而讨论的合成风速数据方法求取区域的等效风速数据。

4.3 仅有月平均风速时合成风速数据方法

在风速数据缺失时, 将不能进行含风力发电的可再生能源规划。HOMER 平台中提供了 1 种合成风速数据的方法, 能提供具有一定精度的、可用的、有效的风速数据。利用 HOMER 合成风速数据时需要输入月平均风速、海拔、测风仪高度、风切变指数、威布尔分布形状参数 k 、风速小时自相关系数 r 、风速曲线日形状强度 δ 和最大风速时刻 ϕ 。其中, 海拔的选择与 3.1 中一致, 月平均风速由统计资料提供, 测风仪高度选为所给平均风速对应的高度。

1) 威布尔分布形状参数选择。

由 3.4.2 中对 gamma 函数单调性分析知, $c/\bar{v} \in [1, 1.129]$ 。在仅有平均风速值时, 可利用式(18)倒推威布尔分布形状参数 k 。

$$\bar{v} = c\Gamma(1+1/k) \quad (18)$$

当 $c/\bar{v}=1$ 时, 有 k 最小值 $k_{\min}=1$; $c/\bar{v}=1.129$ 时, 有 k 最大值 $k_{\max}$, 此时 $k \in [2.027, 2.328]$ 。

风速未知时, 可认为 k 在 $[k_{\min}, k_{\max}]$ 上取值的概率是相等的。因为 k 的平均值可以作为其本身的无偏估计值 $\hat{k}$, 则有 $\hat{k} \in [1.513, 1.664]$ 。在实际应用时, 可用 $\hat{k}$ 作为 k 的输入值。

2) 仅有平均风速时合成风速数据方法。

假设进行风能能源规划的区域设有 N 个风速观测站, 利用 HOMER 合成风速数据的计算步骤如下:

①依据统计资料输入第 i 个观测站的平均风速、海拔、测风仪高度;

②依据 4.3.1 中结论, 选择该站威布尔分布形状参数;

③依据观测站 i 的地形地貌, 参考文献[24]选择对应的风切变指数, 参考 HOMER 中的经验值选择风速一小时相关系数和风速曲线日形状强度值; 参考 HOMER 经验值选择最大风速时刻;

④利用 HOMER 软件合成风速数据的功能, 生成第 i 个观测站完整风速序列;

⑤对 $i=1,2,\dots,N$, 重复上述步骤, 生成 N 个观测站完整风速序列;

⑥按照 4.1 中完整风速处理方法求出区域等效风速序列 v_Σ^* , 作为能源规划的输入量。

5 算例分析

5.1 等效风速求解方法合理性验证

以设有 3 个风速观测站的区域为算例，进行等效风速求解方法合理性验证分析。将 3 个观测站已知的 10 m 高风速数据分别按照第 4 节中完整风速数据、部分风速数据的综合处理方法求解区域等效风速序列，并与实测风速的统计结果进行比较。图 7 是区域等效风速序列和实测风速的威布尔分布概率密度函数曲线。表 1 给出了 2 种等效风速求解方法求得的威布尔分布参数及区域风能特征指标的计算结果，并与实测数据的统计结果进行了比较。

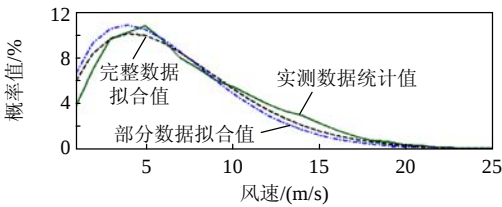


图 7 10 m 高区域等效风速序列和实测风速的威布尔分布概率密度函数曲线

Fig. 7 Weibull distribution probability density function curves of 10 m high regional equivalent wind speed sequence and the measured speed

表 1 10 m 高区域等效风速威布尔分布参数及风能特征指标

Tab. 1 Weibull distribution parameters of 10 m high regional equivalent wind speed and wind resource index			
参数	完整风速拟合	部分风速拟合	实测值统计
k^*	1.615	1.615	—
c^*	7.595 5	7.067 2	—
$\bar{v}/(\text{m/s})$	6.804 2	6.330 9	6.942 7
$\Delta v/\%$	-2.00	-8.81	—
$\bar{\omega}/W$	482.249 5	388.455	532.060 3
$\Delta \omega/\%$	-9.36	-26.98	—
t/h	6 999.2	6 714.1	6 917.5
$\Delta t/\%$	1.18	-2.94	—

从图 7 可以看出，采用本文所提的利用完整风速、部分风速求解区域等效风速的方法，所得的等效风速概率分布与实测风速的概率分布比较接近，表明区域等效风速能够较好地反应整个区域的风速变化特性。表 1 中，区域等效风速和实测风速统计值相比，平均风速与风能可利用时间指标的误差值较小；而在平均风能密度的估计上，利用部分风速数据求得的结果则过于保守，但仍在预可行性研究允许的误差范围内。

5.2 输入参数区域等效值求解方法合理性验证

按照第 3 节中所提风资源相关输入参数的区域等效值求解方法，计算得到各参数的等效值列于表 2 中。利用区域输入参数等效值合成 70 m 高等效风速、利用完整风速的区域等效风速序列和区域等效风切变指数计算 70 m 高风速、依据各观测站地形将已知 10 m 高风速转换为 70 m 高风速，将这 3 种方法得到的 70 m 高风速的威布尔分布概率密度函数曲线绘于图 8 中。表 3 是相应的威布尔分布参数和风资源指标值。

表 2 风资源相关输入参数的区域等效值

Tab. 2 Regional equivalent input parameters related to wind resource

区域名称	海拔/m	测风仪高度/m	α	k	r	δ	ϕ
测风站 1	203.0	10	0.100	1.600	0.898	0.081 3	13.0
测风站 2	246.0	10	0.140	1.570	0.910	0.060 0	7.0
测风站 3	195.0	10	0.100	1.530	0.917	0.075 1	5.0
区域等效值	214.7	10	0.114	1.561	0.910	0.071 4	7.8

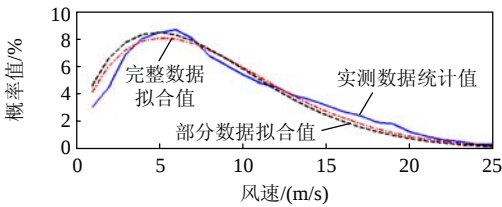


图 8 70 m 高区域等效风速序列和实测风速的威布尔分布概率密度函数曲线

Fig. 8 Weibull distribution probability density function curves of 70 m high regional equivalent wind speed sequence and the measured speed

表 3 70 m 高区域等效风速威布尔分布参数及风能特征指标

Tab. 3 Weibull distribution parameters of 70 m high regional equivalent wind speed and wind resource index

参数	完整风速拟合	部分风速拟合	实测值统计
k^*	1.615	1.604	—
c^*	9.481 9	8.996 6	—
$\bar{v}/(\text{m/s})$	8.494 1	8.064 3	8.570 5
$\Delta v/\%$	-2.03	-5.91	—
$\bar{\omega}/W$	938.213 5	810.305 2	988.224 7
$\Delta \omega/\%$	-5.1	-18.0	—
t/h	7 422.3	7 326.7	7 427.1
$\Delta t/\%$	-0.07	-1.35	—

从图 8 和表 3 可以看出，采用本文所提的区域等效参数求解方法所得的区域输入参数等效值合

成 70 m 高等效风速、利用完整风速的区域等效风速序列和区域等效风切变指数计算 70 m 高风速与依据各观测站地形将已知 10 m 高风速转换为 70 m 高风速相比, 3 者的概率分布比较接近, 风能特征指标的误差在预可行性研究和可行性研究的允许误差范围内, 表明考虑了区域中各观测站风速之间的相互影响的区域等效参数求解方法是有效的, 适宜于进行区域能源规划。

5.3 仅有平均风速时合成风速与实测风速的比较

5.3.1 威布尔形状参数对合成风速的影响

本文在 HOMER 平台上利用平均风速来合成全年风速。将某地全年风速数据导入 HOMER 程序中, 则会自动生成威布尔分布形状参数 k_0 、风速小时自相关系数 r_0 、风速曲线日形状强度 δ_0 和最大风速时刻 ϕ_0 和每月平均风速值 $\bar{v}_0$ 。为了比较 HOMER 合成风速与实测风速的区别, 以及对后续能源规划的影响, 将前述 k_0 、 r_0 、 δ_0 、 ϕ_0 和 $\bar{v}_0$ 输入程序以合成风速。图 9 是这 2 种情况下风速概率密度函数图。

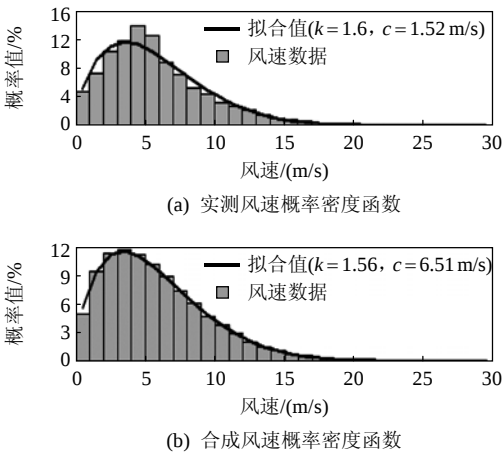


图 9 风速概率密度函数

Fig. 9 Probability-density function of wind speed

图 9 中的柱形图是风速概率密度函数图, 实线图是其拟合函数图。比较发现, 风速在 4~6 m/s 间, 实测风速与合成风速的分布概率有明显区别。HOMER 对实际风速分布拟合所得参数为 $k=1.60$, $c=6.51$ 。而将该 k 值作为输入量合成风速时, HOMER 对所合成风速的拟合值为 $k=1.56$, $c=6.52$, 这使得合成风速小于 3 m/s 的分布概率略高与实测风速, 但整体分布影响很小。将这 2 组数代入风资源评价指标计算公式, 结果列于表 4 中, 可见对风资源评价指标值的影响也很小。

另外, 按照 4.3 中 k 估计值的选择区间 $\hat{k} \in [1.513, 1.664]$ 对本算例进行分析, 结果与上述结论

一致。为排除算例的 k 值本身就在估计值选择区间上的影响, 设定 $k=1.95$ 进行比较, 此时合成风速的相关分布如图 10 所示。

表 4 实测风速与合成风速的风资源评价指标值

Tab. 4 Wind resource index of measured & resultant wind speed

参数	实测风速	合成风速	相对误差/%
$\bar{v}/(\text{m/s})$	5.837	5.860	0.40
$\bar{w}/\text{W}$	308.262	323.101	4.80
t/h	6 556.4	6 500.6	0.85

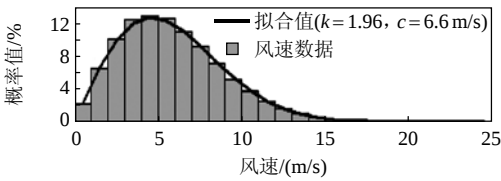


图 10 $k=1.95$ 时合成风速概率密度函数

Fig. 10 Resultant wind speed with $k=1.95$

分析图 10, 风速在 4~9 m/s 范围间的分布概率增大; HOMER 拟合的风速分布参数为 $k=1.96$, $c=6.60$, 这使得风速小于 3 m/s 的分布概率有所降低。此时, 计算得到的平均风速值为 5.853 m/s、平均风能密度为 269.862 W、风能可利用时间为 6 855.3 h, 与 $k=1.56$ 时的计算结果的相对误差分别为 -0.12%、-16.48%和 5.45%, 这与图 2—4 的结果是一致的。即说明, 对于实测风速平均值为 5.853 m/s、 $k=1.95$ 的地区, 按照 4.3 中选择 $k=1.56$ 作为 HOMER 输入量进行风速合成时, 平均风速相对误差为 0.12%、平均风能密度的相对误差为 19.73%, 风能可利用时间相对误差为 -5.17%, 表明平均风能密度评估结果过于乐观, 而风能可利用时间的评估会略显保守。

5.3.2 风速一小时相关系数对合成风速的影响

5.3.1 算例实测风速的风速一小时相关系数 $r=0.898$ 。在仅有平均风速时, 不能求出该参数值, 则通过地形是否平坦在 HOMER 给出的典型值范围 $r \in [0.80, 0.95]$ 中选择参数是一种较为简便可行的方法。为分析 r 值对合成风速的影响, 对 $r=0.80$ 和 $r=0.95$ 时进行计算。结果表明: 不同 r 值下, 风速月分布情况、概率密度函数、分布函数与实测风速结果相比没有明显变化; 每月的典型日风速曲线则变化明显。图 11 是不同 r 值下 7 月份典型日风速曲线的比较图, 其它月份变化类似。

从图中知, 风速一小时相关系数在 HOMER 典型值范围内变化时, 典型日风速曲线变化趋势不会发生太大变化, 只是在风速数值上有减小的趋势。

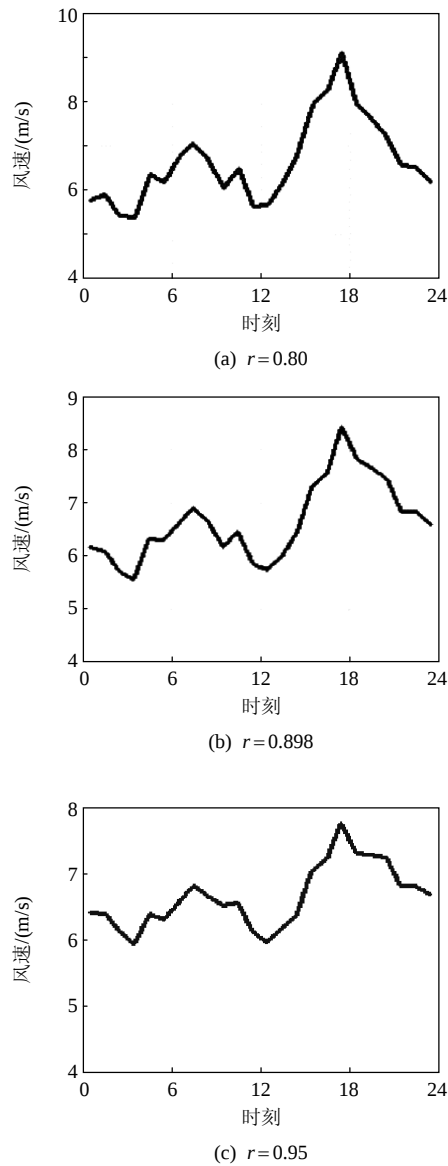


图 11 不同 r 值下 7 月份典型日风速曲线的比较图

Fig. 11 Comparison of typical daily wind speed with different r in July

5.3.3 日形状强度对合成风速的影响

5.3.1 算例实测风速的日形状强度 $\delta=0.0813$ 。在没有历史数据时，不能统计出该参数值，则通过 HOMER 给出的典型值范围 $\delta \in [0, 0.4]$ 中选择参数较为可行。为分析 δ 值对合成风速的影响，对 $\delta=0.25$ 和 $\delta=0.4$ 分别进行计算。结果表明：不同 δ 值下，风速月分布情况、概率密度函数、分布函数与实测风速结果相比没有明显变化；每月的典型日风速曲线则变化明显。图 12 是不同 δ 值下 5 月份典型日风速曲线的比较图，其它月份变化类似。

从图中易知，风速的日形状强度在 HOMER 典型值范围内由小到大变化时，典型日风速曲线变得平滑，但变化趋势不会发生太大变化。

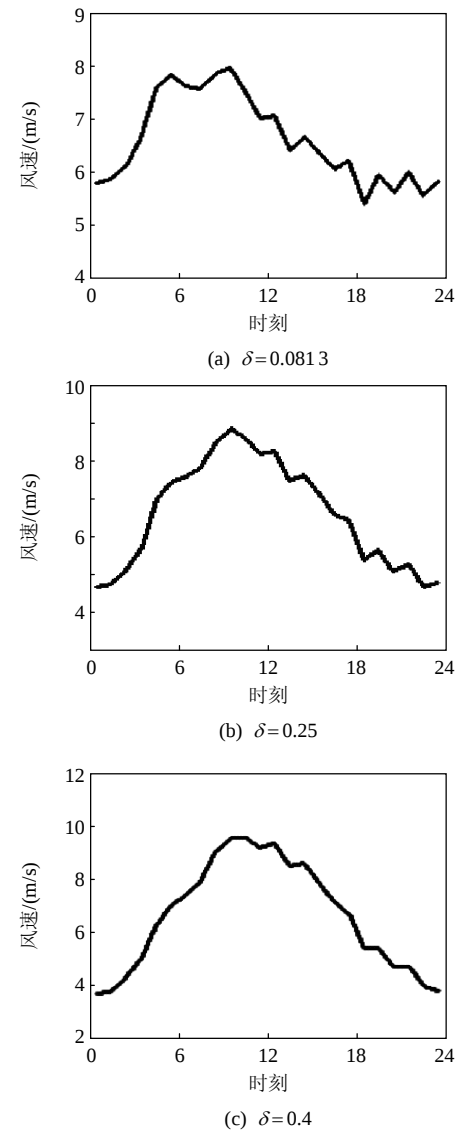


图 12 不同 δ 值下 5 月份典型日风速曲线的比较图

Fig. 12 Comparison of typical daily wind speed with different δ in May

5.3.4 最大风速时刻对合成风速的影响

5.3.1 算例实测风速的最大风速时刻 $\phi=13$ 。在没有历史数据时，不能统计出该参数值，则通过 HOMER 给出的典型值范围 $\phi \in [14, 16]$ 中选择参数较为可行。为分析 ϕ 值对合成风速的影响，对 $\phi=14$ 和 $\phi=16$ 分别进行计算。另外，由式(17)可知，若最大风速时刻的估计值与实际值相差 12h 时，所估计的风速相差最大。对 5.3.1 算例而言，误差最大的时刻为 $\phi=1$ 。对上述几种情况进行分析，结果表明：不同 ϕ 值下，风速月分布情况、概率密度函数、分布函数与实测风速结果相比没有明显变化；每月的典型日风速曲线产生变化。图 13 是不同 ϕ 值下 5 月份典型日风速曲线比较图，其它月份变化类似。

图 13(a)也表示了 $\phi=13$ 时 5 月份典型日风速曲

线。从图中易知，风速的最大风速时刻在 HOMER 典型值范围内由小到大变化时，典型日风速曲线变化趋势没有发生太大变化，即使是在能产生最大风速估计差值的 $\phi=1$ 时刻，也未产生很大差别。

综合上述分析，在合成风速数据时，威布尔分布形状参数的取值影响到合成风速的概率密度函数、分布函数，从而影响风资源的评估和能源规划。风速小时自相关系数 r 、风速曲线日形状强度 δ 和最大风速时刻 ϕ 则只会对风速典型日曲线的平滑程度和数值产生小幅度影响，而不会改变风速的变化趋势，故对风资源的评估和能源规划不会产生明显作用。

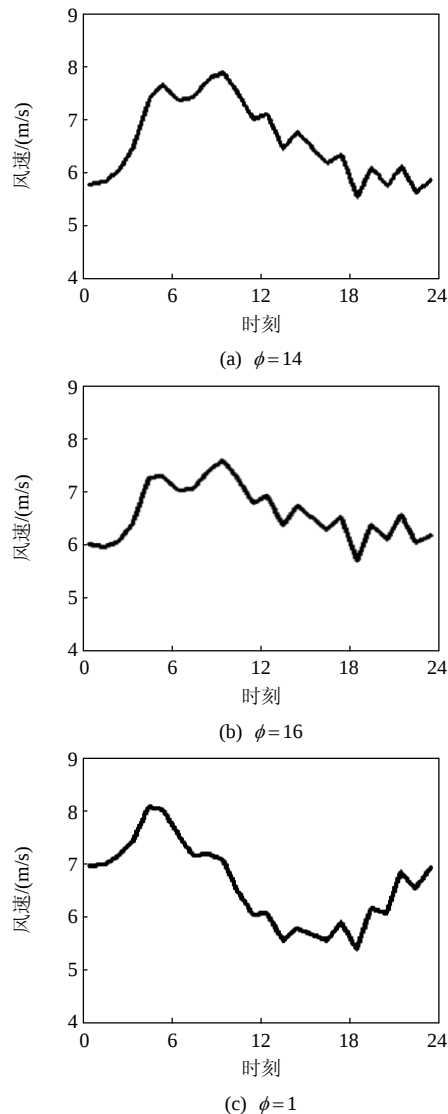


图 13 不同 ϕ 值下 5 月份典型日风速曲线的比较图
Fig. 13 Comparison of typical daily wind speed with different ϕ in May

6 结论

以建有 3 个风速观测站的某区域为算例，在

HOMER 平台上，对所提方法的合理性进行了验证分析。结果表明，所提区域等效参数及区域等效风速序列求解方法，能够求得合理描述区域等效风资源状况的风速数据，从而保证区域能源规划结果的可参考性及指导性；所提利用月平均风速合成风速数据的方法，能够合成具有一定可参考性的、适用于区域能源规划的风速数据，为风速历史资料不完整的地区的区域风能规划提供了一种参考途径。

参考文献

[1] Schrattenholzer L, Criqui P. A longer-term outlook on future energy systems[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2000, 14(1): 348-373.

[2] 杨宏伟. 应用 AIM/Local 中国模型定量分析减排技术协同效应对气候变化政策的影响[J]. 能源环境保护, 2004, 18(2): 1-4.
Yang Hongwei, Quantitative analysis of impacts on China's climate change policy from co-benefits of mitigation technologies by applying AIM/Local China model[J]. Energy Environmental Protection, 2004, 18(2): 1-4(in Chinese).

[3] 邱立勋, 陈愚, 赵黛青, 等. 广州市至 2020 年城市客运交通发展情景分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(增刊): 114-118.
Qiu Lixun, Chen Yu, Zhao Daiqing, et al. Scenario analysis of passenger traffic development in Guangzhou until 2020[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(S): 114-118(in Chinese).

[4] 中国社会科学院城市与环境研究所新能源与可再生能源经济研究中心. 关于构建区域能源需求预测模型系统的初步思考[EB/OL]. http://www.nere.org.cn/nere/ShowNews.asp?News_Id=1201. [2012-1-13].

[5] Capros P, Mantzos L, Petrellis D, et al. European Union, energy outlook to 2020[R]. Luxembourg: European Commission- Directorate general for energy, office for official publications of the European Community, 1999.

[6] Energy Information Administration(EIA). Annual energy outlook 2003 with projections to 2025, Energy Information Administration[R]. Washington DC: Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, 2003.

[7] RETScreen International. Empowering Cleaner Energy Decisions[EB/OL]. <http://www.etscreen.net/ang/home.php>. [2012-01-12].

[8] 武亚非, 包毅, 杨丽徙. 含双馈风电机组的配电网运行模拟[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2011, 32(4): 64-67(in Chinese).
Wu Yafei, Bao Yi, Yang Lixi. Operation simulation of distribution network containing double-fed induction wind

- generators[J]. Journal of Zhengzhou University : Engineering Science, 2011, 32(4): 64-67.
- [9] Homer Energy. Software[EB/OL]. <http://homerenergy.com/software.html>. [2012-2-1].
- [10] Homer Energy. Energy modeling software for hybrid renewable energy systems[EB/OL]. <http://homerenergy.com/index.html>. [2012-2-1].
- [11] Boudri J C, Hordijk L. The potential contribution of renewable energy in air pollution abatement in China and India[J]. Energy Policy, 2002, 30(5): 409-424.
- [12] Criqui P, Mima S, Viguier L. Marginal abatement costs of CO₂ emission reductions, geographical flexibility and concrete ceiling: an assessment using the POLES model[J]. Energy Policy, 1999, 27(10): 585-601.
- [13] Criqui P. World energy projections to 2030[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2000, 14(1-4): 116-136.
- [14] Hadley S W, Short W. Electricity sector analysis in the clean energy futures study[J]. Energy Policy, 2001, 29(14): 1285-1298.
- [15] 朱然. 基于 TIMES 模型的电力行业控制 CO₂ 方案优选[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- Zhu Ran. Technical optimization for CO₂ control in power industry: an analysis with the world-TIMES model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [16] Dalton G J, Lockington D A, Baldock T E. Case study feasibility analysis of renewable energy supply options for small to medium-sized tourist accommodations[J]. Renewable Energy, 2009(34): 1134-1144.
- [17] Dalton G J, Lockington D A, Baldock T E. Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel[J]. Renewable Energy, 2009(34): 955-964.
- [18] Giatrakos G P, Tsoutsos T D, Mouchtaropoulos P G, et al. Sustainable energy planning based on a stand-alone hybrid renewable energy/hydrogen power system: Application in Karpathos island, Greece[J]. Renewable Energy, 2009(34): 2562-2570.
- [19] Weis T M, Llinca A. Assessing the potential for a wind power incentive for remote villages in Canada[J]. Energy Policy, 2010(38): 5504-5511.
- [20] Nfah E M, Ngundam J M. Feasibility of pico-hydro and photovoltaic hybrid power systems for remote villages in Cameroon[J]. Renewable Energy, 2009(34): 1445-1450.
- [21] Wies R W, Johnson R A, Agrawal A N, et al. Simulink model for economic analysis and environmental impacts of a PV with diesel-battery system for remote village[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 692-700.
- [22] Kanase-Patil A B, Saini R P, Sharma M P. Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area[J]. Renewable Energy, 2010(35): 1342-1349.
- [23] 温鹏, 沈炯, 李益国, 等. 基于自回归法的风电场脉动风速模拟[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 75-79.
- Wen Peng, Sheng Jiong, Li Yiguo, et al. Simulation of turbulent wind speed in wind farm based on autoregression method[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 75-79(in Chinese).
- [24] 大气压和海拔的换算. <http://wenku.baidu.com/view/d9aa704e2b160b4e767fcffc.html>[2011-11-6].
- [25] 杜燕军, 冯长青. 风切变指数在风电场风资源评估中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(5): 62-66.
- Du Yanjun, Feng Changqing. Application of wind shear index in the assessment of wind resources of wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(5): 62-66(in Chinese).
- [26] 胡毅, 张健. 风资源评估中风速分布方法研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2010(21): 76-78.
- Hu Yi, Zhang Jian. Research on Wind Speed Distribution[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2010(21): 76-78.



吉平

收稿日期: 2012-05-30。

作者简介:

吉平(1983), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制, jiping@epri.sgcc.com.cn;

周孝信(1940), 男, 教授级高级工程师, 院士, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统仿真与分析, 电力系统稳定与控制, 柔性交流输电技术;

武守远(1964), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制, 柔性交流输电技术。

(责任编辑 王剑乔)