

多元回归法在复杂地形风资源 微尺度模拟中的应用

黄浩辉 宋丽莉 植石群 毛慧琴 郝全成 刘爱君

(广东省气候中心,广州 510080)

提 要: 随着风电事业的发展,复杂地形下的风资源模拟成为一项重要的课题。利用广东沿海某海岛南部 9 个测风塔共 22 个测风高度的完整一年的测风资料及该海岛高分辨率的数字地形资料,采用地理空间因子的多元回归法进行风资源的微尺度模拟并与 WASP 软件的计算结果进行了比较。结果表明:(1)年平均风速与地理空间因子存在显著的相关关系;(2)模拟的年平均风速平均相对误差为 3.2%,年平均风功率密度的平均相对误差为 3.5%;(3)经假设检验,对无测站的地点的年平均风速模拟效果良好;(4)该方法和 WASP 软件计算的风资源大值区分布基本一致。

关键词: 多元回归 复杂地形 风资源 微尺度模拟

Application of Multiple Regression to Wind Resource Micro-scale Simulation over Complex Terrain

Huang Haohui Song Lili Zhi Shiqun Mao Huiqin Hao Quancheng Liu Aijun

(Climate Center of Guangdong Province, Guangzhou, 510080)

Abstract: With the development of wind electricity, wind resource simulation over complex terrain is becoming an important question for discussion. On the basis of wind observational data of one year of 9 observation towers at 22 levels in the southern zone of a certain coastal island of Guangdong Province, and the digital terrain data with high resolution of the island, wind resource micro-scale simulation by multiple regression was done. In addition, the simulated result was compared with that obtained by WASP program. It was found that:(1) There is a significant correlation between annual mean wind speed and geographical spatial factors;(2) The mean relative errors of simulated annual mean wind speed and wind power density are 3.2% and 3.5%, respectively;(3) The assumption test shows that there is a good effect in annual mean wind speed

simulation at those sites without observational data; (4) The distribution of the wind resource is basically consistent with that obtained by WASP program.

Key Words: multiple regression complex terrain wind resource micro-scale simulation

引 言

风电开发的关键问题是要清楚地了解拟选风电场的风资源状况,一般采用现场建测风塔观测的手段实地测量风况,但由于测风仪器设备投入较高,风场观测只是有限测风,而风机排布则需要了解风场面上的风资源分布,通常采用数值模拟达到由点到面的目的。目前,为满足风电场微观选址的要求,使用丹麦 Risø 国家实验室开发的 WASP 软件进行微尺度风资源模拟是一个常用的解决方案,尽管 WASP 软件对地形相对简单的地区比较适用,对较复杂地形,不很适合采用^{[1]38}。本文采用地理空间因子的多元回归法进行复杂地形下风资源的微尺度模拟,该方法较多地应用在基于 GIS 的农业气候区划中^[2-4],但用于风资源的模拟却未见有报道,采用该方法在广东沿海某拟建海岛风电场进行了试验,取得了良好的效果,并与 WASP 软件的计算结果进行了比较。

1 复杂地形风资源实测

1.1 现场测风资料的获取

广东沿海某拟建海岛风电场地处珠江入

海口的西侧,属亚热带海洋性季风气候,该岛以山地为主,地形复杂。考虑季风特点和地形起伏特征,在该岛南部面积为 19km² 的地区设置了 9 个测风塔,其中 3 梯度测风塔 5 个,4 梯度测风塔 1 个,单层测风塔 3 个。测风仪器采用美国 Second Wind 公司的 NOMAD2 型测风仪。测风仪安装高度主要考虑该地风切变指数的计算以及目前主流风机的轮毂高度。各测风塔的经度、纬度及其地面海拔高度由高精度 GPS 测出。经过实地观测,取得了 9 个测风塔共 22 个测风高度的完整一年(2005 年 5 月 1 日至 2006 年 4 月 30 日)的测风资料,包括 10 分钟平均风速、风向,10 分钟最大风速及风速标准差等。测风塔设置见表 1 和图 1。

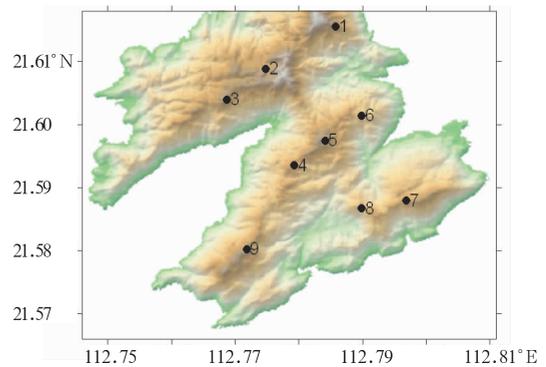


图 1 拟建风电场测风塔设置平面图

表 1 拟建风电场测风塔设置一览表

测风塔编号	测风塔地面海拔高度/m	风速观测层次/m	风向观测层次/m	测风塔附近地面环境
1	240	10	10	山坡、有低于 1 米的灌木
2	226	10、30、40	10、40	山坡、有低于 1 米的灌木
3	266	10	10	山顶、无植被
4	233	10、30、40	10、40	山脊、有低于 1 米的灌木
5	275	10、40、60	10、60	山顶、草地
6	190	10、30、40	10、40	山脊、有低于 1 米的灌木
7	241	10、40、50、60	10、60	山顶、无植被
8	195	15	15	山顶、有 3 米高的树木
9	258	10、40、60	10、60	山脊、草地

1.2 测风数据检验

全部测风仪在现场安装之前均经过广东省气象计量检定所检定合格。根据国家标准 GB/T18709-2002“风电场风能资源评估方法”^[5]的要求,对数据进行了完整性检验和合理性检验,得出测风有效数据的完整率为 94%,符合国标要求。

1.3 风资源参数计算

根据文献[5],年平均风速和年平均风功率密度是两个最主要的风资源参数,是评价风场风资源优劣的主要指标。年平均风速如下式计算:

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (1)$$

式中, \bar{V} 为年平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), n 为一年中逐时风速的个数, V_i 为逐时风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

风功率密度是指与风向垂直的单位面积中风所具有的功率,年平均风功率密度如下式计算:

$$\bar{P} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho V_i^3 \quad (2)$$

式中, \bar{P} 为年平均风功率密度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), ρ 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), n 和 V_i 的含义同式(1)。

2 GIS 资料说明

本文采用的 GIS 数据由 1:10000 的地图经数字化生成,地形等高线的高程(海拔高度)间隔为 5m,转换为数字高程栅格数据的水平分辨率为 10m,精度为 1m,该海岛南部的最大高程为 320m。

3 风资源多元回归模拟

3.1 方法

以年平均风速 Y 为因变量,考虑以下地

理空间因子为自变量:地理纬度 X_1 (度),地理经度 X_2 (度),测风塔地面海拔高度 X_3 (m),风速仪距离地面高度(m)的自然对数 X_4 ,进行逐步回归分析,得到回归方程如下:

$$Y = 280.742 - 12.91X_1 + 0.0169X_3 + 0.448X_4 \quad (3)$$

以 X_g 为局地环境因子(坡度、坡向)所产生的效应,可视为 X_1 、 X_3 、 X_4 所拟合的回归方程的残差部分,即:

$$X_g = Y(\text{实测值}) - Y(X_1, X_3, X_4) \quad (4)$$

式(3)的复相关系数 $R=0.90$, $F=24.9$, 剩余标准差 $s=0.34\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 $\alpha=0.01$ 的水平上回归效果显著。对 22 个测风高度的数据进行计算,年平均风速的平均残差为 $0.24\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均相对误差为 3.2%。年平均风速的计算值和实测值的比较见图 2。

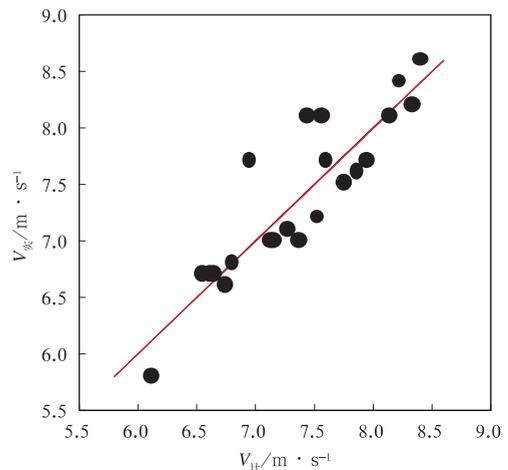


图 2 年平均风速计算值和实测值的比较

在年平均风速模拟的基础上,对年平均风功率密度建立如下回归方程:

$$Y = 36.313 + 0.809X \quad (5)$$

式中 Y 为年平均风功率密度, X 为年平均风速的立方,由于 X 已包含地理因子的信息,因此,即使把地理因子一同加入,进行逐步回归分析时,这些因子也会被剔除掉。

同样地,以 X_g 为局地环境因子(坡度、

坡向)所产生的效应,可视为 X 所拟合的回归方程的残差部分,即:

$$X_g = Y(\text{实测值}) - Y(X) \quad (6)$$

式(5)的复相关系数 $R=0.99, F=831.2$, 剩余标准差 $s=14.8W \cdot m^{-2}$, 在 $\alpha=0.01$ 的水平上回归效果极为显著。经计算,年平均风功率密度的平均残差为 $12.4W \cdot m^{-2}$, 平均相对误差为 3.5% 。年平均风功率密度的计算值和实测值的比较见图 3。

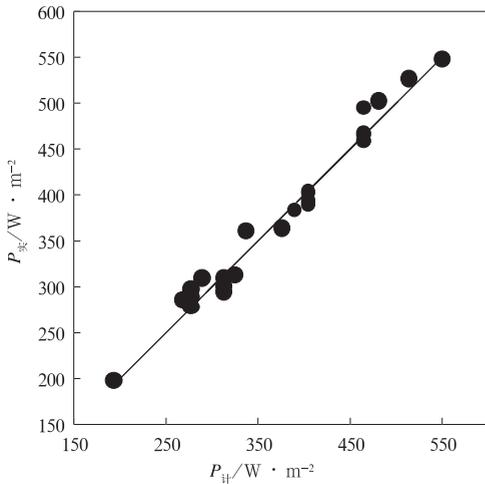


图 3 年平均风功率密度计算值($P_{计}$)和实测值($P_{实}$)的比较

回归方程建立之后,即可以制作风资源分布图。设拟选风机的轮毂高度为 60m, 首先制作该地区距离地面 60m 高度的年平均风速分布图,该地区数字高程栅格数据的水平分辨率为 10m,取网格点水平分辨率与之一致,根据式(3),可计算得到每个网格点上距离地面 60m 高度的年平均风速。

由于回归模式的计算值和实测值存在一定的误差,需要进行残差订正,对距离地面 60m 高度而言,每个测风塔的残差为实测值减去回归模式计算值,若某测风塔没有该层实测值,则可用其 10m 高度的实测值根据其风切变指数计算出来,对于单层测风塔,可根据与之邻近、地形相似的梯度塔的风切变指

数计算出来。用 SURFER8.0 软件采用克里格(Kriging)插值方法将各测风塔的残差 X_g 插值为栅格数据,网格大小与上述高程栅格数据一致,将每个网格点上的回归模式计算值与残差相加,即可实现残差订正。克里格(Kriging)插值方法是根据地质统计学原理发展出来的,其本质是最佳线性无偏估计,其物理含义明确,不但能估计测定值空间变异分布,而且还可以估计测定值的方差分布,是一种较优的空间插值方法^[6]。

利用订正后的年平均风速栅格数据,根据式(5)即可计算得到每个网格点上距离地面 60m 高度的年平均风功率密度,以同样的方法进行残差订正。这样得到的栅格数据经过 GIS 的处理,即可得到年平均风速和年平均风功率密度的分布图。

3.2 精度(效果)检验

分别假设 2、7、9 号点没有设置测风塔,它们分别代表山坡、山顶和山脊,分别进行多元回归分析,得到 3 个回归关系式:

(1) 假设 2 号点没有设置测风塔:

$$Y = 198.701 - 9.113X_1 + 0.0168X_3 + 0.478X_4$$

($R = 0.89, F = 19.8, s = 0.36m \cdot s^{-1}$)

(2) 假设 7 号点没有设置测风塔:

$$Y_v = 370.325 - 17.062X_1 + 0.0168X_3 + 0.495X_4$$

($R = 0.90, F = 23.0, s = 0.35m \cdot s^{-1}$)

(3) 假设 9 号点没有设置测风塔:

$$Y_v = 472.562 - 21.794X_1 + 0.0177X_3 + 0.407X_4$$

($R = 0.90, F = 20.3, s = 0.35m \cdot s^{-1}$)

分别用 3 个回归关系式计算对应的测风塔各层的年平均风速,与实测数据进行比较,以考察没有设置测风塔的地点的误差情况,结果见表 2。

表 2 假设 2、7、9 号点没有设置测风塔时的误差情况

假设没有设置测风塔的地点	测风高度/m	年平均风速实测值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	年平均风速计算值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	残差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差/%
2 号点	10	6.7	6.7	0.0	0.0
	30	7.0	7.2	-0.2	2.9
	40	7.1	7.4	-0.3	4.2
7 号点	10	7.0	7.2	-0.2	2.9
	40	7.5	7.9	-0.4	5.3
	50	7.6	8.0	-0.4	5.3
	60	7.7	8.1	-0.4	5.2
9 号点	10	7.2	7.7	-0.5	6.9
	40	8.1	8.3	-0.2	2.5
	60	8.2	8.5	-0.3	3.7

从表 2 看到,假设 2 号点没有设置测风塔时,3 个测风层次的最大相对误差为 4.2%,平均为 2.4%;假设 7 号点没有设置测风塔时,4 个测风层次的最大相对误差为 5.3%,平均为 4.7%;假设 9 号点没有设置测风塔时,3 个测风层次的最大相对误差为 6.9%,平均为 4.4%。可见误差并不大,本方法的模拟效果良好。

3.3 模拟结果

应用 3.1 所述的方法,得到该海岛南部距离地面 60m 高度的年平均风速分布图和年平均风功率密度的分布图,如图 4、5 所示。从图中看出,年平均风速在 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的区域基本在海拔 200m 以上,年平均风功率

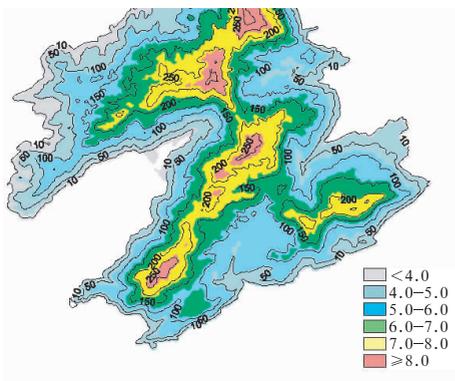


图 4 距地面 60m 高度的年平均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 分布图(图中等值线为等高线)

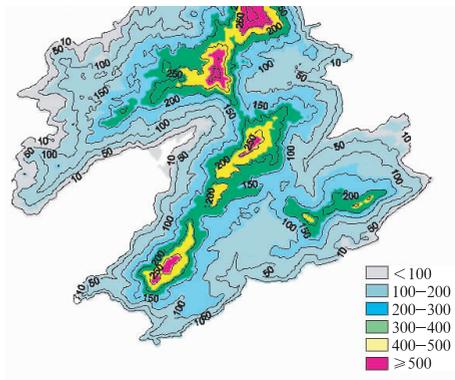


图 5 距地面 60m 高度的年平均风功率密度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 分布图(图中等值线为等高线)

密度在 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上的区域,北部基本在海拔 200m 以上,中南部基本在海拔 150m 以上。

4 与 WASP 计算结果的比较

风图谱分析及应用程序 WASP (Wind Atlas Analysis and Application Programs) 是由丹麦 Risø 国家实验室开发出来的风资源分析处理软件,其主要功能是对某地风资源进行评估,是目前国际上应用最广的风资源分析软件^{[1]35}。

WASP 通过输入地形、地表粗糙度和障碍物等数字化信息,利用一个点的测风资料推算出一定区域的风资源分布。WASP 对

地形相对简单、地势较平坦的地区较为适用,但对较复杂地形,由于受许多边界条件等的限制,不很适合采用^{[1]38},本文仅为对比分析,进行了计算试验。这里,我们对该海岛南部的区域,使用 WAsP7.0 软件计算距地面 60m 高度的年平均风速和年平均风功率密度。该区域包含了 1~9 号共 9 个测风塔,由于 WAsP 只能输入某个点一个层次的风

数据,为了选择最有代表性的测风资料进行计算,逐次把每个测风塔的最高一层测风数据作为 WAsP 的测风资料输入进行计算,9 个塔的 60m 高度的实测数据作为参考值,选择误差最小的测风塔进行最终的计算。表 3 是不同的测风资料作为 WAsP 输入时年平均风速的计算值与实测值的比较。表中绝对误差为计算值减去实测值。

表 3 不同的测风资料作为 WAsP 输入时距地面 60m 高度年平均风速的计算值与实测值的比较

测风塔 编号	实测值 /m·s ⁻¹	不同的测风资料作为 WAsP 输入时的计算值的绝对误差/m·s ⁻¹								
		1 号塔 10m	2 号塔 40m	3 号塔 10m	4 号塔 40m	5 号塔 60m	6 号塔 40m	7 号塔 60m	8 号塔 15m	9 号塔 60m
1	8.1	-0.4	2.7	1.6	2.2	1.0	-0.2	0.0	-0.5	1.6
2	7.1	-1.1	0.9	0.2	0.3	-0.3	-1.2	-1.1	-1.4	0.0
3	7.5	-0.6	1.7	0.8	0.9	0.3	-0.7	-0.6	-0.9	0.6
4	8.3	-1.2	1.1	0.3	0.3	-0.5	-1.3	-1.2	-1.3	0.0
5	8.6	-0.8	1.9	1.0	1.2	0.1	-0.8	-0.6	-0.8	0.8
6	6.9	0.0	2.6	1.6	2.0	1.2	0.0	0.2	-0.3	1.6
7	7.7	-0.1	2.8	1.6	2.2	1.4	0.0	0.1	-0.6	1.7
8	7.3	0.2	3.4	2.1	2.9	1.9	0.5	0.7	0.0	2.3
9	8.2	-1.2	1.6	0.7	0.6	0.0	-1.0	-0.8	-0.9	0.3
平均相对误差/%		7.8	27.2	14.5	18.3	9.9	8.2	7.6	9.4	13.2
最大相对误差/%		15.9	46.4	29.3	39.5	25.9	16.9	15.2	19.6	31.5

从表 2 看到,以 7 号塔 60m 高度的测风数据作为 WAsP 的测风资料输入时,9 个塔的 60m 高度年平均风速的平均相对误差为 7.6%,最大相对误差为 15.2%,均为最小,因此选择 7 号塔 60m 高度的测风数据作为

WAsP 的测风资料输入进行风资源的计算,从表 3 看到,此时,靠近东面的 1、6、7、8 号塔的计算值稍微偏高,其余 5 个塔的计算值偏低。计算时网格点的水平分辨率设为 20m,结果如图 6、7 所示。

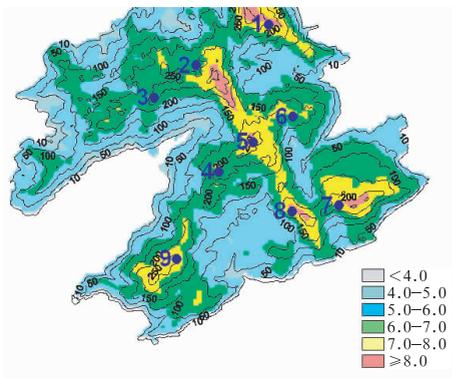


图 6 WAsP 计算的年平均风速 (m·s⁻¹) 分布图(图中等值线为等高线)

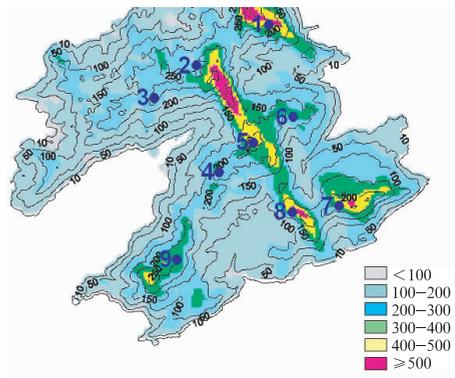


图 7 WAsP 计算的年平均风功率密度 (W·m⁻²) 分布图(图中等值线为等高线)

比较图 4 和图 6 以及图 5 和图 7,可以看出,两种方法计算的风资源大值区(年平均风速在 $7.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上或年平均风功率密度在 $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上)的位置基本一致,均是在岛中海拔较高的地方,在海拔较低的地方,风资源分布的形态也较为一致。总体而言,本文方法得到的风资源大值区面积要大于 WASP 的结果。从图中还看出,靠近东面的 1、6、7、8 号塔附近,风资源大值区的面积, WASP 的结果略大于本文方法的结果,而其余地方均是本文方法的结果大,原因是 WASP 方法在 1、6、7、8 号塔的计算值相对实测值稍微偏高,其余 5 个塔的计算值偏低,由于本文方法采用了残差订正,基本保证在测风塔附近能正确反映实际情况,而在这个面积较小的地区,测风塔布设的密度较大且分布较均匀,因此,有理由认为本文方法的结果可信度更大。

5 讨 论

(1) 本文提出的地理空间因子的多元回归法在复杂地形风资源微尺度模拟中的应用,有一定的条件限制:一是需要布设较多的测风塔;二是布设的测风塔要有代表性。测风塔布设可参考如下几点:①在该风场风资源可能最好的地点和风资源可利用的下限区域,均设置测风塔,以便较全面地掌握该风场的全貌;②对于山脉或海岸线走向相似或山

体高度、形状、下垫面性质较一致的地形,选取具有类型代表性的测站;③在可能具备利用价值的季节性的迎、背风坡设置观测站,以测量迎、背风向的季节性差异。只有这样才能全面客观地反映整个复杂地形地区风资源的状况。

(2) 回归方程要通过较高置信水平的统计检验,这样才能保证计算值的误差较小,若误差较大,残差订正会对风资源的分布形态产生较大影响,将会失去实际意义。我们用本文方法对广东省沿海另外两个拟建海岛风电场进行了同样的模拟计算,结果表明回归方程都通过 $\alpha=0.01$ 的统计检验,特别是复相关系数均达到 0.8 以上,表明复杂地形下风速确实与地理空间因子有着很好的相关。

参考文献

- [1] 宫靖远. 风电场工程技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 袁爱民,王建源. 气候要素栅格化技术方法研究[J]. 气象,2006,32(6):111-115.
- [3] 彭国照,田宏,范雄,等. 基于 GIS 的广安市脐橙气候适应性区划[J]. 气象,2004,30(7):52-55.
- [4] 冯晓云,王建源. 基于 GIS 的山东农业气候资源及区划研究[J]. 中国农业资源与区划,2005,26(2):60-62.
- [5] GB/T18710-2002,中华人民共和国国家标准《风电场风能资源评估方法》[S].
- [6] 秦耀东,李保国. 应用析取克里格方法估计区域地下水埋深分布[J]. 水利学报,1998,(8):19-23.