

基于 MM5 的轮毂高度风场数据获取方法*

曾雪兰, 余志, 邓院昌
(中山大学工学院, 广东 广州 510275)

摘要: 从 MM5 模式垂直坐标定义出发, 将大气静力学方程应用于整个大气, 并在相邻层之间进行等温大气假设, 进行求解层的高度, 从而可由 MM5 的模拟结果中得到不同轮毂高度风场数据。对比验证表明该方法可靠, 为从 MM5 结果获取轮毂高度的风场数据提供了另一种简便而准确计算的方法。

关键词: MM5; 地形追随坐标; 轮毂高度; 风场

中图分类号: TK81 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 05-0130-03

近年来陆续有国内外的研究机构或学者将中尺度大气模式 MM5 应用到风资源评估中^[1-4], 研究表明利用中尺度大气模式 MM5 进行大范围的区域风资源评估是可行的。由于 MM5 模式在垂直方向采用地形追随坐标, 而不是风资源评估中常用的离地坐标, 且从 MM5 模式结果当中仅能直接提取 10m 高度的风场数据, 无法直接得到风资源评估所需要的不同轮毂高度的风场数据。

获取轮毂高度的风场数据, 一般利用大气静力学方程积分, 进行垂直方向上坐标与几何高度的转换, 得到各层的离地高度及对应的风场, 再通过插值计算不同离地高度上的风场数据。由此可见, 获取风场数据的关键在于求解大气静力学方程。但由于真实大气的气温和密度分布比较复杂, 只能利用一定的假设条件, 才能求解大气静力学方程。目前常见的处理方法是 MM5 用户手册 (文献 [5]) 中介绍的方法, 即根据 MM5 中的参考大气满足静力平衡和理想温度廓线的假设, 但是这种方法需要确定多个参数, 包括温度随对数压力的递减率 A 和海平面气压处的参考温度 T_0 等, 而 T_0 与模拟区域和季节都有关^[5]。当这种方法应用在工程上时, 常常给参数 T_0 的取一个粗略值, 并设地面压力为常数, 等于海平面气压, 以求得 σ 层的粗略高度^[6]。

本文提出一种简化的轮毂高度风场数据的获取方法, 该方法从 MM5 模式垂直坐标定义出发, 将大气静力学方程应用于整个大气, 并在相邻 σ 层之间进行等温大气假设, 来求解层的高度, 从而可由 MM5 的模拟结果中得到不同轮毂高度风场数据。最后本文通过文献 [5] 的方法对本文所述的方法

进行对比分析。

1 方法介绍

本文通过利用 MM5 模式的垂直结构特性, 并考虑模式中大气的实际状态, 进行垂直方向上坐标与几何高度的转换, 得出各半层的对应高度, 再通过插值计算不同离地高度上的风速、风向。

1.1 MM5 的垂直结构 MM5 的模式主体采用坐标系, 垂直方向采用地形追随坐标, 表示的层数 (自上而下递增), 如图 1 所示。水平面速度纬向分量、经向分量、温度、比湿、扰动气压等物理量均定义在半层 (虚线), 垂直速度等定义在全层 (实线) 上^[8]。

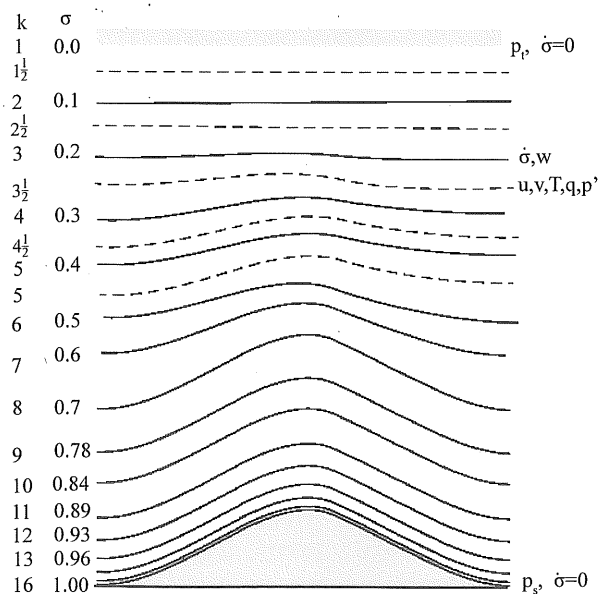


图 1 MM5 模式垂直结构示意图

Fig. 1 The sketch map of vertical structure for MM5

* 收稿日期: 2008-02-01

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2003AA512040); 广东省科技计划资助项目 (2005B10501002)

作者简介: 曾雪兰 (1978 年生), 女, 博士生; E-mail: xuelan_zeng@tom.com

在非静力平衡方案中, 气压、温度和空气密度定义为定常的参考项 (p_r 、 T_r 和 ρ_r) 和扰动项 (p' 、 T' 和 ρ') 两部分:

$$p = p_r + p', T = T_r + T', \rho = \rho_r + \rho' \quad (1)$$

MM5 非静力平衡方案的垂直坐标由参考大气定义为^[7]:

$$\sigma = \frac{p_r - p_i}{p_s - p_i} = \frac{p_r - p_i}{p^*} \quad (2)$$

其中, p_i 为模式大气顶层的气压, p^* 为常数; 等于地面气压 p_s 与 p_i 的差, 其数值可以从 MM5 模拟结果中直接读取, 且随经纬度变化, 但不随高度变化。

1.2 推导过程 从 MM5 结果中提取轮毂高度上的风场数据, 可以通过求解出每个 σ 层的离地高度, 并读取层风场数据, 利用轮毂高度相邻两个 σ 层上的结果插值求出。大气静力学方程 (3) 式虽然是在假设大气处于相对静止的条件下求得的, 但实践证明, 除了有强烈对流运动的山区或强对流天气系统以外, 静力学的规律可以相当准确地应用于实际大气^[8]。因而可通过联立 (2) 式和 (3) 式来推导得到每个 σ 层的离地高度。

$$\frac{dp}{dz} = -\rho \cdot g \quad (3)$$

式中, z 为高度, g 为重力加速度。

由于 MM5 模式中, 所模拟的大气实际是含水汽的, 所以推导过程中, 应利用湿空气状态方程 (见 (4) 式), 将 (4) 式代入 (3) 式, 得 (5) 式。

$$p = \rho \cdot R \cdot T_v \quad (4)$$

$$\frac{1}{p} dp = -\frac{g}{R \cdot T_v} dz \quad (5)$$

式中, R 为干空气的比气体常数, 虚温 $T_v = (1.0 + 0.618Q) \cdot T$, 其中 Q 为比湿, T 为温度, Q 和 T 的取值可从 MM5 结果文件中读取。

由于真实大气的虚温分布比较复杂, 不能直接积分 (5) 式, 所以假设两个相邻层之间的大气是等温大气, 且温度等于两相邻 σ 层的虚温的平均值, 对 (5) 式积分, 得本文所采用的相邻两个高度之间的等温大气压公式:

$$z_k - z_{k+1} = \frac{R \cdot (T_{v_k} + T_{v_{k+1}})}{2 \cdot g} \ln \frac{p_{k+1}}{p_k} \quad (6)$$

式中 z_k 为 k 层的高度, p_k 为 k 层气压, T_{v_k} 是 k 层的虚温, 下标 $k+1$ 是 k 的下一层 (见图 1)。

将 (1) 式和 (2) 式代入 (6) 式中, 得最后的计算公式如 (7) 式所示:

$$z_k = z_{k+1} -$$

$$\frac{R \cdot \ln \left[\frac{(p^* \sigma_k + p_i + p'_{k+1})}{(p^* \sigma_{k+1} + p_i)} \right] \cdot (T_{v_k} + T_{v_{k+1}})}{2 \cdot g} \quad (7)$$

式中, σ_k 是 k 层的 σ 取值, 其数值从 1 开始递减至 0; p'_{k+1} 为 k 层的压力扰动项。

(7) 式中的变量 p^* 、 T_{v_k} 、 σ_k 和 p'_{k+1} 的数值可直接从 MM5 结果中读取, 所以获得模拟区域内 R 、 g 、 p_i 常数的取值后, 即可从模式各计算网格点的底层开始, 逐层计算各 σ 层的高度, 直到 σ 层的高度大于或等于所需轮毂高度为止。

2 方法验证

现利用一个试验案例的模拟结果验证本文方法。

本文的 MM5 试验案例, 在李晓燕^[3]所做的数值试验的方案设置基础上, 模拟了包括广东省及其海域在内的 2006 年 12 月 1 日至 2006 年 12 月 30 日的逐时风场。试验设置了两层嵌套区域来进行模拟: 大区分辨率为 27 km, 网格点设置为 41×49 ; 小区分辨率为 9 km, 网格点设置为 79×100 。垂直方向分 26 层, 从最底层到顶层 σ 的设置 1.0, 0.997 5, 0.995, 0.99, 0.98, 0.96, 0.93, 0.89, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40, 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.05, 0.00, 模式大气顶层大气压为 100 hPa。

利用以上 MM5 案例的逐时风场模拟结果, 采用本文轮毂高度风场数据的获取方法求得轮毂高度 (如 10、70、150 m 等高度) 的风速值。并将提取的嵌套大区所有的计算网格点自 2006 年 12 月 01 日 01 时至 12 月 07 日 01 时的 10、70 和 150 m 高度的 u 、 v 值, 与用文献 [5] 的方法提取的同时刻同高度的 u 、 v 值进行比较, 共有 41 (行) $\times$ 49 (列) $\times$ 6 (d) $\times$ 24 (h) 对数据进行一一对比。为方便比较, 将、值转化成风速和风向值, 表 1 是逐点逐时的风场误差的统计值。

表 1 误差的统计值

Tab. 1 The statistical errors

离地 高度/m	误差平均值		标准差	
	风速 /m $\cdot$ s ⁻¹	风向 /(°)	风速 /m $\cdot$ s ⁻¹	风向 /(°)
10	0.0007	0.0017	0.0005	0.0191
70	0.0098	0.374	0.009	0.0813
150	0.0489	0.2378	0.0303	0.4536

从表 1 中可以发现, 离地高度 150 m 以下的风

速平均误差小于 0.05 m/s, 标准差小于 0.04 m/s, 风向平均误差小于 0.3°, 标准差也小于 0.5°, 说明本文方法提取的轮毂高度的风场数据与文献 [5] 提取的风场数据吻合良好, 表明该方法可靠。

3 总结

本文针对风资源评估的需求, 研究了一种无需确定温度随对数压力的递减率和海平面气压处的参考温度这两个参数的情况下, 仍能准确获取轮毂高度风场数据的方法。该方法从 MM5 模式垂直坐标定义出发, 将大气静力学方程应用于整个大气, 并进行等温大气假设下的积分, 综合考虑大气的实际状态, 推导了与的函数关系, 进而推算了不同离地高度上每个计算时刻的风速、风向。最后通过用文献 [5] 方法与本文方法获取的对应高度的风速值进行比较检验, 风场吻合良好, 表明该方法可靠, 为从 MM5 结果获取轮毂高度的风场数据提供了另一种简便而准确的计算方法。

参考文献:

- [1] SEMPREVIVA A M, BARTHELMIE R J, LANDBERG L, et al. WindEng-research activity in an european training network[J]. Wind Engineering, 2004, 28(3): 325 - 337.
- [2] FEITOSA E, PEREIRA A, VELEDA D. Brazilian wind atlas project [C] // EWEC 2001. Proceedings European Wind Energy Conference and Exhibition. Copenhagen Denmark. 2 - 6 July, 2001, WIP-renewable energies.
- [3] 李晓燕, 余志. 基于 MM5 的沿海风资源数值模拟方法研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(1): 400 - 408.
LI X Y, YU Z. Wind resource modeling for the coast of China using MM5 [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2005, 26(1): 400 - 408.
- [4] 龚强, 袁国恩, 张云秋, 等. MM5 模式在风能资源普查中的应用试验[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 145 - 150.
GONG Q, YUAN G E, ZHANG Y Q, et al. Application of MM5 Model in Wind Energy Resources Survey [J]. RESOURCES SCIENCE, 2006, 28(1): 145 - 150.
- [5] JIMY DUDHIA, DAVE GILL, YONG-RUN GUO, et al. PSU/NCAR mesoscale modeling system tutorial class notes and user's guide: MM5 modeling system version 3 [M]. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, 2003.
- [6] JOHNSON M T. Meteorological model performance evaluation of an annual 2002 MM5 (version 3. 6. 3) simulation [R/OL]. Iowa Department of Natural Resources. (2007) [2007 - 06 - 02]. <http://www.iowadnr.gov/air/prof/progdev/files/IDNR.2002mm5v363.evaluation.v203.pdf>.
- [7] GRELL G A, DUDHIA J, STAUFFER D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR/TN - 398 + STR, NCAR Technical Note [M]. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research, 1995.
- [8] 李爱贞, 刘厚凤. 气象学与气候学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 2001: 110.

Wind Field Data-Acquisition Method at Hub-Height Based on MM5

ZENG Xue-lan, YU Zhi, DENG Yuan-chang

(School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: According to the vertical coordinate theory in MM5 model, the atmospheric static equation was applied to the whole atmosphere. With the isothermal atmosphere assumption, i. e., the atmospheric temperature between two neighboring σ layers is isothermal, the height of σ layer was solved. And wind field data at different hub-heights (height-above-ground) were acquired based on MM5. The results were proved to be reliable by comparing with the results of common method. It provided an alternative, simple, convenient method for obtaining wind field data at hub-height from MM5 results.

Key words: MM5; σ coordinate; hub-height; wind field