

基于尾流试验的风电场装机容量估算方法*

邓院昌, 余志, 刘沙
(中山大学工学院, 广东广州 510275)

摘要: 结合对我国风电场装机容量的现状分析, 指出风电场装机容量的确定受政策及主观因素影响较大, 缺乏有效的技术手段支持。提出了一种装机容量估算的思路, 即: 以控制风电场平均尾流损失为目标, 由风能资源决定风机排布, 继而由风机排布来估算装机容量。为此, 基于风机风能利用效率相近的特点, 通过引入参考风机并进行尾流试验, 给出了在不同风速下风电场风机的推荐排布方式, 根据风机额定功率与直径平方的关系, 得出了一定技术安装高度上单位面积区域内装机容量的估算方法。结合我国风能资源评估国家标准, 给出了对应不同风功率密度等级的场址区域, 其 50 m 高度上单位面积可装机容量的推荐值。提出的估算方法可为风电场建设前期进行装机规模的确定提供参考。

关键词: 风电场; 装机容量; 参考风机; 风机排布; 尾流损失

中图分类号: TK89 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)06-0053-05

Estimation of Wind Farm Capacity Based on Wake Experiment

DENG Yuanchang, YU Zhi, LIU Sha

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

Abstract: Based on the statistic analysis of the installed capacity of built wind farm in China, it is pointed out that the determination of wind farm capacity is mainly affected by political and subjective factors because of lacking technical support. A way of estimating wind farm capacity, i. e. considering wake loss, first determining the array of wind turbine generators under the given wind energy resource is presented, then estimating the capacity is determined when the array of wind turbine generators. To do this, the power efficiency of different wind turbines is analyzed, while the concept of reference wind turbine and carries out wake loss experiments using reference wind turbine is introduced. By controlling the average wake loss of wind farm, the array of wind turbines under difference wind velocities is recommended. Using the relationship between the rated power and square of diameter of wind turbine generator, it gives the recommend installation capacity at 50 m height for areas with different wind power density level. The method can provide a reference for determining the installation capacity of wind farm during the early stage of wind farm construction.

Key words: wind farm; installed capacity; reference wind turbine generator; array of wind turbine generator; wake loss

作为目前最具规模化开发和商业化发展前景的新能源, 风电近年来在世界范围内得到了飞速发展。2006年以来, 我国(除香港、澳门、台湾地区外, 下同)累计风电装机容量每年均以超过

100%的速度增长。截至2008年底, 我国累计安装风电机组11600余台, 累计装机容量约12152 MW^[1]。

合理的装机容量是风电项目取得预期经济效益的重要前提。在一定技术可利用高度和可利用面积

* 收稿日期: 2010-03-23

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2008AA05Z414)

作者简介: 邓院昌(1972年生), 男, 博士, 讲师; 通讯作者: 余志; E-mail: dengyc@mail.sysu.edu.cn

上, 装机容量过大, 会导致风电项目投资成本增加、风电机组尾流损失增大, 从而影响风电项目的投资收益; 同样, 装机容量过小, 一方面未能很好地利用风能资源, 另一方面也可能造成土地资源的浪费。

在工程实践中, 由于缺乏可行的技术方法, 风电项目装机容量的确定具有很大的主观性。同时, 由于受风电审批政策和特许权招标政策的影响^[2], 我国风电项目装机容量表现出明显的分布特征^[3]。

一般来说, 决定风电项目合理装机容量时, 除了要考虑风电投资企业的资金状况外, 还要综合考虑候选场址的风能资源、地形条件及电网条件等各种因素^[4]。于午铭^[5]基于风电机组 (wind turbine generator, WTG) 的排列、风机功率与风轮直径平方的统计关系, 指出在给定风机排布的情况下, 单位面积区域内可装机容量的估算方法, 但该方法中未给出风机排布方式的确定方法。

本文根据风机风能利用效率相近的特点^[6], 提出了参考风机的概念。通过引入参考风机, 进行了不同风速情况下风电场尾流试验, 推荐了风机的排布方式, 继而利用参考风机额定功率与直径平方的关系, 得出了一定可利用面积区域内装机容量的估算值。结合我国对风能资源区域的等级划分^[7], 给出了不同风功率密度等级区域内, 50 m 高度上单位面积的推荐装机容量。该方法在不考虑电网约束的前提下, 可用于风电场建设前期候选场址区域内装机容量的初步估算。

1 我国风电项目装机容量分析

根据文献 [1] 的统计, 截止到 2008 年底, 我国已建成 239 个风电场, 并有 199 个新核准的拟建风电项目。本文利用风电场项目信息进行统计分析, 表 1 为我国已建和拟建风电场的装机容量统计情况。

表 1 风电场装机容量分布
Table 1 Distribution of wind farm capacity

装机容量 C / MW	已建风电场		拟建风电场	
	数量	比例 / %	数量	比例 / %
$C < 50$	171	71.5	182	91.5
其中: $49 \leq C < 50$	46	19.2	149	74.9
$50 \leq C < 100$	41	17.2	1	0.5
$100 \leq C < 200$	24	10.0	10	5.0
$C \geq 200$	3	1.3	6	3.0

由上表可知, 我国风电场的装机容量绝大部分都小于 50 MW, 这其中又有很大部分集中在 49 ~ 50 MW 之间, 在已核准的拟建风电项目中, 这一比例更是分别高达 91.5% 和 74.9%。这一现象与国家对于风电项目的核准政策 (小于 50 MW 的风电项目由省发改委核准, 其它由国家发改委核准) 有关, 是风电投资企业在寻求最大装机容量与最方便快捷的项目核准之间进行权衡的结果。

此外, 我国风电项目装机容量达到 200 MW 及以上的大型风电项目所占比例呈上升趋势, 由表 1 可知, 2008 年新核准项目中有 3% 是此类大型风电项目, 这跟我国风电特许权项目及国家建设大型风电基地政策有直接的关系。

2 风机的风能利用效率

风功率曲线是表征风机在不同风速时的输出功率^[8], 根据该曲线, 可以算出风机的风能利用效率。其中, 风机的风能利用效率 c_p 定义为: 在标准空气密度下, 风机输出功率与单位时间内流经风机扫风面积的空气所具有的动能之比, 即:

$$c_p = p / \left[\left(\frac{1}{2} \rho_0 v^3 \right) \times \left(\frac{1}{4} \pi D^2 \right) \right] = 8p / (\rho_0 \pi D^2 v^3) \quad (1)$$

式中, c_p 为风机的风能利用效率, 无量纲参数; p 为风机的输出功率, W; v 为风速, m/s; D 为风机的叶轮直径, m; ρ_0 为标准空气密度, 取值 1.225 kg/m^3 。

本文选取了 5 种国外主流风机以及 8 种国内主流风机进行分析, 考察在不同风速下各种机型的风能利用效率, 其结果分别如图 1 和图 2 所示。

由图 1 和图 2 可知, 尽管风机的生产厂家、型号各异, 但风机的风能利用效率曲线非常相近, 数值范围也基本相同, 尤其是在风能比较集中、利用效率比较高的峰值区域 (风速在 5 ~ 12 m/s)。为

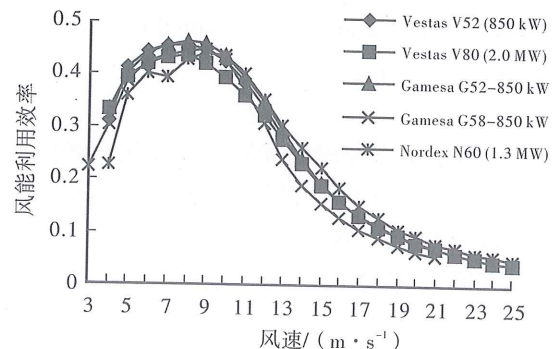


图 1 国外风机风能利用效率

Fig. 1 Power coefficient of foreign WTG

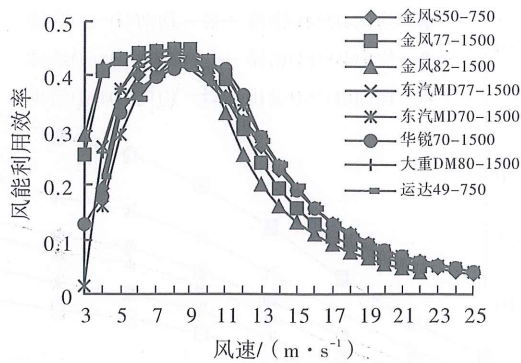


图 2 国产风机风能利用效率

Fig. 2 Power coefficient of domestic WTG

此，引入一种参考风机，该风机风能利用效率为所考察的所有主流风机风能利用效率的平均值。图 3 为根据国内外 13 种主流机型计算出的参考风机的风能利用效率曲线。

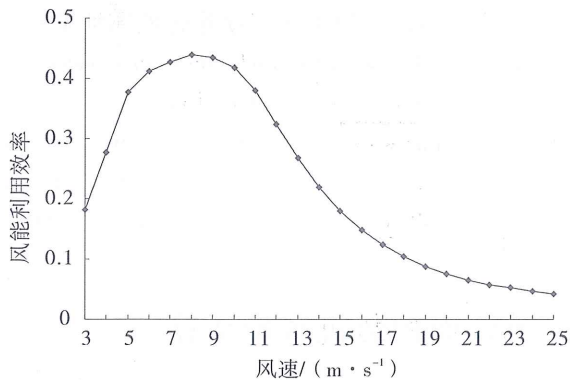


图 3 参考风机风能利用效率

Fig. 3 Power coefficient of reference WTG

由参考风机的风能利用效率曲线，通过公式 (1) 可算出在不同风轮直径、不同风速下，该风机的输出功率。对于 50 m 直径的风机，可得如图 4 所示的功率曲线。

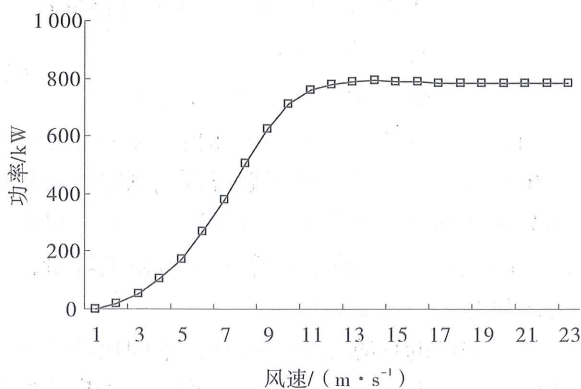


图 4 直径为 50 m 的参考风机功率曲线

Fig. 4 Power curve of reference WTG with 50 m diameter

根据该功率曲线，可以算出参考风机额定功率 p_r 与风机直径 D 平方之比为 0.32 kW/m^2 ，而且，对于不同的直径，这一比值 p_r/D^2 保持不变。文献 [5] 统计了多种风机后指出 p_r/D^2 的值介于 $0.3 \sim 0.35$ 之间，其均值为 0.32 。可见，基于参考风机的这一结果，与该文献中的结果相同。

3 风电场尾流损失试验

风电场的尾流损失是进行风机排布时考虑的重要因素^[9]。尾流损失的大小与风机排布、风电场地形及风能资源条件有关。显然，风机布置越密、风速越小、主导风向越不稳定，则风电场的尾流损失就越大。尾流损失与地形的关系相对复杂，两者之间不具有明确的影响关系。为此，本文基于平坦地形，利用广泛使用的风电场资源评估软件 WAsP 来初步考察尾流损失与风机排布、风能资源之间的关系^[10]，以得出一种相对合理的风机排布方案。

考察在一个 $2000 \text{ m} \times 2000 \text{ m}$ 的简单地形区域内（该区域具有同一高程 10 m ，具有均匀粗糙度长度 0.03 m ），如图 5 所示，沿正北方向（主导风向）分别以正排（左图）和错排（右图）方式进行 9 台参考风机的排布，风机的轮毂高度 50 m ，叶轮直径为 50 m 。同时，测风点位于风机排布的中心点（图中测风点与最中央的风机重合在一起）。

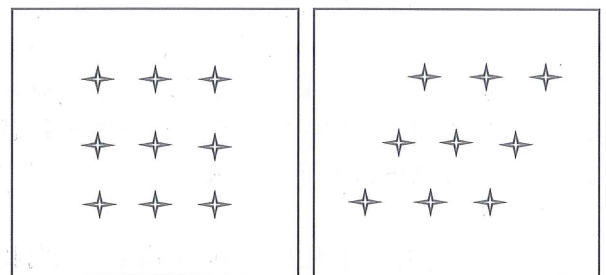


图 5 风机排布示意图

Fig. 5 Demonstration of WTG Array

本文以 $6 \sim 13 \text{ m/s}$ 不同的风速、在单一风向和 16 扇区均匀风向、10 种不同列距和行距组合下，进行风电场的尾流分析，结果如下：

1) 当风向单一时，风机错排可以大大减小尾流损失，尤其是当列距和行距相差不大时，效果更明显。如图 6 所示。

2) 列距和行距不变时，单一风向下的风机正排尾流损失最大、错排尾流损失最小，如图 7 所示。

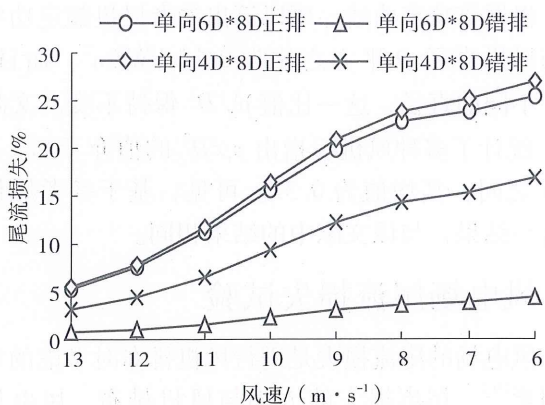


图 6 单一风向时尾流试验

Fig. 6 Wake loss experiments under one wind direction

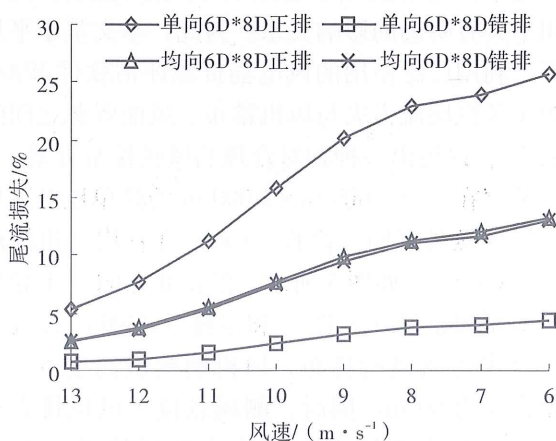


图 7 行距列距不变时的尾流试验

Fig. 7 Wake loss experiments with row and column distance unchanged

3) 均匀风向时, 风机错排可以减小尾流损失, 但效果不明显; 同时, 列距与行距的乘积越大, 也即单台风机占的面积越大, 尾流损失就越小。如图 8 所示。

以上试验采用简单地形, 风向采用单一风向和均匀风向两种极端条件, 而在工程项目中, 由于地形条件不同, 风机之间不同的高程可以减小部分尾流损失, 加上主导风向所占的频率与试验设置不同, 可以认为其尾流损失会比本试验中均匀风向错排情况下要稍微小一点。

根据风电场平均尾流不超过 8% 的工程经验, 考虑以上试验设置的影响, 本文以均匀风向错排情况下, 平均尾流不超过 10% 为原则, 考察在不同的平均风速下, 推荐的风机排布方式, 如表 2 所示。

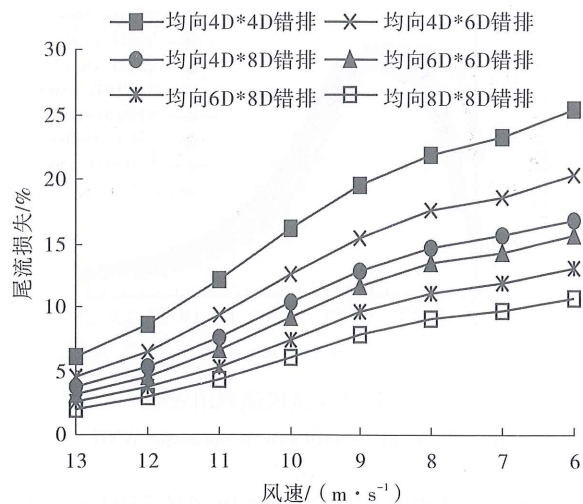


图 8 均匀风向错排时的尾流试验

Fig. 8 Wake loss experiments with uniform wind direction and stagger wind turbine array

表 2 不同平均风速下推荐的风机排布
Table 2 Recommended wind turbine array under different mean wind velocity

平均风速 $v / (m \cdot s^{-1})$	$6 \leq v < 8$	$8 \leq v < 10$	$v \geq 10$
推荐排布	$8D * 8D$	$6D * 8D$	$4D * 6D$
单机占地面积/ m^2	$64D^2$	$48D^2$	$24D^2$

4 单位面积装机容量估算

根据风机的尾流试验可知, 受到风能资源的约束, 为了将风电场的平均尾流损失控制在一定的范围内, 需要采用不同的风机排布方式。根据我国相关标准 (文献 [7]), 风功率密度达到或超过 3 级的风电场才具有开发价值。对于风功率密度等级为 3 级的风电场, 其 50 m 高度上平均风速的参考值为 7 m/s, 参照表 2, 其单机占地面积为 $64 D^2$, 因此, 在 $1 km^2$ 面积内, 可装机的台数为 $10^6 / (64 D^2)$, 也即 $1 km^2$ 面积内可装机容量 c_i 为

$$c_i = p_r \times 10^6 / (64 \times D^2) = 0.32 \times 10^6 / 64 = 0.5 \text{ 万 kW} \quad (2)$$

国家发展和改革委员会颁布的技术规定中^[11], 也提出在进行风电场工程规划报告编制时, 对场址平坦、地形简单的风电场, 可采用每平方公里装机 0.5 万 kW 这一经验值来估算风电场装机容量, 本文的结果与这一规定相吻合。

根据同样的计算方法, 可算出不同风功率密度等级情况下, 50 m 高度上单位面积的推荐装机规模, 其结果如表 3 所示。

表3 不同风功率密度等级推荐装机规模
Table 3 Recommended capacity for different level of
wind power density

风功率 密度等级	50m 高年平均风速 参考值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	单位面积推荐装机 规模/ (万 kW)
3	7.0	0.5
5	8.0	0.67
7	11.9	1.3

当风机的轮毂高度升高时, 一般来说, 此时的风速值会变大^[12], 此时风机可采用更加密的方式进行排布, 相应的单位面积的装机容量就可以增大。

当候选场址为复杂的山地风电场时, 风场分布更复杂^[13], 此时风机的排布大多是沿与主导风向接近垂直的山脊方向呈单行线状排列。此时可装机容量主要由可安装风机的线状长度、风能资源的分布、建设的难易程度等因素决定。

5 讨论与结论

装机容量估算是风电场建设前期工作的重要内容之一。本文提出了一种装机容量估算的思路, 通过风机尾流试验及相应的简化, 给出了不同资源条件下, 风电场装机容量的估算值, 该方法可用于风电场建设前期装机容量的初步估算。

1) 为了不受风机机型的影响, 根据风机风能利用效率的特点, 提出了利用参考风机的概念, 得出了参考风机额定功率与风机直径平方之间的关系。

2) 进行了平坦地形条件下, 不同风速和风机排布情况下的尾流试验, 从控制风电场平均尾流损失出发, 根据试验结果推荐了在一定的风能资源条件下, 风电场风机的排布方式。

3) 该方法估算的装机容量没有考虑电网约束、节约土地资源等问题, 所得出装机容量仅能作为风电场前期工作的参考, 实际工程中应综合考

虑。

4) 下一步可考虑在典型的复杂地形下进行风机尾流试验, 从而为山地风电场的装机容量估算提供技术支持。

参考文献:

- [1] 施鹏飞. 2008年中国风电装机容量统计[EB/OL]. (2009-03-17) [2009-08-06]. <http://www.cwea.org.cn/upload/20090305.pdf>.
- [2] 戴慧珠, 陈默子, 王伟胜, 等. 中国风电发展现状及有关技术服务[J]. 中国电力, 2005, 38(1): 81-84.
- [3] 杨旭亮. 中国风电行业的“4.95”之谜[J]. 中国风能, 2009, 4: 41-42.
- [4] 许晓艳, 石文辉, 李岩春, 等. 风电场集中接入对区域电网的影响分析[J]. 中国电力, 2009, 42(1): 93-97.
- [5] 于午铭. 如何解开中国陆上风能资源之谜[J]. 中国风能, 2006, 4: 19-23.
- [6] 池钊伟, 王小明, 黄静. 风电场机型选择中的技术经济评价指标[J]. 上海电力, 2007(1): 36-38.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [8] 马平, 刘昌华. 风力发电机组功率曲线的验证[J]. 可再生能源, 2008, 26(6): 82-84.
- [9] 周沈杰. 内陆风力发电场风机布置方法探讨[J]. 华东电力, 2007, 35(10): 96-98.
- [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(3): 54-57.
- [11] 国家发展和改革委员会. 风电场工程规划报告编制办法[R]. 2005.
- [12] 曾雪兰, 余志, 邓院昌. 基于MM5的轮毂高度风场数据获取方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(5): 130-132.
- [13] 高阳华, 王堰, 邱新法, 等. 基于GIS的复杂地形风能资源模拟研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(2): 163-169.