#### PLATEAU METEOROLOGY

张双益, 胡非. 2017. 大气边界层与风力发电的相互作用研究综述[J]. 高原气象, 36(4): 1127-1137. Zhang Shuangyi, Hu Fei. 2017. Review on study of atmospheric boundary layer and wind power generation interaction[J]. Plateau Meteorology, 36(4): 1127-1137. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2016. 00095.

## 大气边界层与风力发电的相互作用研究综述

张双益1,2,3,胡 非1

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室,北京 100029; 2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 中国三峡新能源有限公司,北京 100053)

摘要:大气边界层与风力发电的相互作用是近年来的新兴研究热点,具有重要科学意义和高度应用价值。一方面,大气边界层的风切变现象可导致风电机组的输出功率减小、机械载荷增大;湍流现象在低(高)风速段导致机组的输出功率增大(减小),但对机械载荷具有单调增大的影响;大气边界层具有显著的日变化规律,层结状态的改变影响着地面风场的结构和特性,并导致风电机组的输出功率和机械载荷随之发生变化。另一方面,风电机组的叶轮旋转施加了扰动效应,导致下风向的风速减小、湍流增大,并且具有复杂空间分布特征;而大型风电场或风电基地产生的巨大扰动效应可影响和改变边界层的整体结构和特性,并影响局地甚至全球气候环境。

关键词: 大气边界层; 风力发电; 输出功率; 机械载荷; 尾流效应

文章编号: 1000-0534(2017)04-1127-11 中图分类号: P49 文献标志码: A

DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2016. 00095

## 1 引言

近年来随着风电科技的发展进步、风电场投资运营的逐步成熟,全球风能行业开始进入蓬勃发展时期。从2011年开始,中国新增风电装机容量已位列世界第一(罗承先,2012)。在各国风电场数量快速增长、装机区域不断扩大的同时,风力发电相关的能源、环境、可持续发展等问题也逐步开始得到工业界和学术界的共同关注。当前的新兴研究热点之一即为"大气边界层与风力发电的相互作用"(Fitch et al, 2012; Lu et al, 2010)。

大气边界层是靠近地面的底层大气层(胡非等,2003),其典型厚度1~2km(李岩瑛等,2016),风电机组安装在边界层的底部,主要吸收利用30~200m高度的风能资源(Petersen et al,2013)。大气边界层中广泛存在的风切变(Tennekes et al,1972)、湍流(Wyngaard,1990)等现象以及显著的日变化规律,还有温度、气压、空气密度等各类气象要素,都直接或间接地影响风电机组在实

际运行中的性能和表现;除此之外,大气层中各种不同尺度的物理现象,如从毫米量级的湍流耗散到百公里尺度的长波运动(杨玉华等,2016),都通过大气边界层作用于微观的叶片附面层(blade boundary layer)到宏观的风电场等各个方面(Larsen,2015)。

风电机组通过叶轮旋转吸收风能的同时,也对气流施加了复杂的扰动效应,导致下风向的风速减小、湍流增大,改变地面风场的结构和特性(Barthelmie et al, 2010),并影响和改变局地气象要素(Roy et al, 2004)、天气过程(Barrie et al, 2009)等;大型风电场或风电基地(肖创英等, 2010)的覆盖区域可达数十甚至上百平方公里,排列着成百上千台风电机组,其产生的巨大扰动效应可持续抬升、充分扩散,从而改变边界层的整体结构和特性(Frandsen et al, 2006),甚至可对局地和全球气候、环境(Keith et al, 2004)产生影响。

大气边界层与风力发电的相互作用研究具有重要科学意义和高度应用价值,精确模拟预测边界层

中的风和湍流过程(辛渝等,2014),对于改进和提高风电机组的性能和表现、优化风电场的选址布局(张双益等,2015)、提升风能资源的利用效率等至关重要;而研究和探讨风力发电对内、外部风场的扰动效应、物质能量的交换传输过程等,则有助于理解和认识可再生能源发展与人类社会、气候变化、环境保护等的深层次辩证关系。

由于大气边界层与风力发电的相互作用被提出的时间较晚,涉及多学科交叉复杂性,因此相关研究较为稀少、学术成果并不丰富。本文从风力发电的基本原理出发,对大气边界层与风力发电的相互作用的机理机制进行了阐述和探讨,并对国内外的相关成果进行了总结和归纳,期望为大气科学和风能行业提供参考,从而推动我国风电科技的发展与进步。

## 2 风力发电的基本原理

#### 2.1 动量理论与输出功率

风电机组通过叶轮吸收风能、转化为电能。应 用动量方程可推导出机组输出功率如下:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad , \tag{1}$$

式中: P 是风电机组的输出功率;  $\rho$  是空气密度; R 是风电机组的叶轮半径; V 是风速;  $\lambda$  是叶轮尖端线速度与风速 V 之比(叶尖速比);  $\beta$  是风机叶片与叶轮平面的夹角(桨距角);  $C_p$  是风能利用效率,为叶尖速比  $\lambda$  和叶片桨距角  $\beta$  的函数。

根据公式(1),风电机组的输出功率由叶轮面的风能通量和机组自身的风能利用效率这两项共同决定。其中风能利用效率的理论最大值为 0. 593,即贝兹极限(Burton et al, 2011),实际风电机组的  $C_p$  最高值在 0. 45~0. 50 之间。

《风力发电机组功率特性测试》(简称《功率测试》)(中国机械工业联合会,2012a)要求构建风电机组的10 min 平均输出功率与轮毂高度处10 min 平均风速的变化关系(即功率曲线)。功率曲线是表征风电机组发电性能的主要依据。对于目前主流的变桨型风电机组,当风速小于切入风速(3 m·s<sup>-1</sup>)或大于切出风速(25 m·s<sup>-1</sup>)时,机组处于停机状态不发电;当风速处于切入风速到额定风速(10 m·s<sup>-1</sup>)区间,机组的输出功率随风速的增大而增大;当风速处于额定风速到切出风速区间,机组达到满发状态,输出功率保持不变。

风电场的设计阶段主要依据风电机组的功率曲

线,结合长期风速频率分布状况,即可计算出风电场的年发电量水平:

$$AEP = \sum_{i=\text{in}}^{\text{out}} P(V_i) \times f(V_i) \times T \quad , \tag{2}$$

式中: AEP 是年发电量;  $P(V_i)$  是机组的输出功率,关于风速  $V_i$  的函数(即功率曲线);  $f(V_i)$  是风频分布函数;  $V_{in}$  和  $V_{out}$  分别是切入风速和切出风速; T 是全年的总时间,常取 8760 h。

#### 2.2 叶素动量理论与机械载荷

作用在叶轮上的空气动力也是风电机组各零部件承受载荷的主要来源。叶素动量理论(Glauert, 1922)将风电机组的叶片沿径向分解成许多叶素, 进而求出叶素上的空气动力载荷:

$$dF_{n} = \frac{1}{2} \rho W^{2} c \left[ C_{L}(\alpha) \cos\phi + C_{D}(\alpha) \sin\phi \right] dr$$

$$dF_{t} = \frac{1}{2} \rho W^{2} c \left[ C_{L}(\alpha) \sin\phi - C_{D}(\alpha) \cos\phi \right] dr$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho W^{2} c \left[ C_{L}(\alpha) \sin\phi - C_{D}(\alpha) \cos\phi \right] r dr$$

$$W = \sqrt{\left[ V(1 - a_{1}) \right]^{2} + \left[ \Omega r(1 + a_{2}) \right]^{2}}$$
(3)

式中:  $F_n$ 、 $F_t$  分别是作用在叶素上的法向力和切向力; Q 是作用在叶素上的转矩; W 是相对合速度;  $\rho$  是空气密度; c 是几何弦长;  $C_L(\alpha)$ 、 $C_d(\alpha)$ 分别是升力系数和阻力系数,均为攻角  $\alpha$  的函数;  $\phi$  是叶轮面与相对合速度 W 的夹角; r 是叶素到叶根的长度; V 是风速;  $a_1$ 、 $a_2$ 分别是轴向气流诱导因子和周向气流诱导因子;  $\Omega$  是叶轮旋转的角速度。

除了空气动力载荷,作用在叶片上的载荷还包括重力载荷、惯性载荷以及由于控制操作而引起的运行载荷等(刘德顺等,2013)。这些载荷通过轮毂传递到风电机组的其他零部件。《风力发电机组机械载荷测量》(简称《载荷测量》)(中国机械工业联合会,2010)要求给出恒定湍流与偏航误差条件下,叶根、叶轮、塔底等关键部件的10 min等效载荷随轮毂高度处10 min平均风速的变化关系(即等效载荷曲线)。如公式(3),总体上机组各零部件的载荷是随风速增大而单调增加的。

风电机组在边界层的地面风场中全天候运行,各零部件受到长时间交变循环载荷作用(陈雪峰等,2011),材料损伤会不断累积,最终可能导致破坏发生。为保证风电机组的结构完整性,防止各种危险造成的破坏,必须对各零部件的载荷特性进行分析和评估。风电场的设计阶段依据等效载荷曲线,结合长期风速频率分布,即可计算出长期累积

的等效载荷(疲劳载荷):

$$D_{eq,c} = \sum_{i=\text{in}}^{\text{out}} D_{eq}(V_i) \times f(V_i) \times T \quad , \tag{4}$$

式中:  $D_{eq}(V_i)$ 是等效载荷, 关于风速  $V_i$  的函数(即等效载荷曲线),  $D_{eq,c}$ 是疲劳载荷; T 是全年的总时间, 常取 8760 h。

风电机组的输出功率和机械载荷是对立统一的 矛盾体。当风速增大时,一方面可带来机组输出功 率提高、发电量增加;另一方面也可导致作用在各 零部件的载荷上升,结构和安全风险增大。因此在 风电场的设计阶段,应根据风电场的风能资源状况,科学开展风电机组的选型工作(吴义纯等, 2007)。在保障风电机组结构完整性的前提下,追 求风电场整体发电量的最大化,提升风能资源的利 用效率。

### 3 大气边界层对风力发电的作用

#### 3.1 边界层地面风场模拟与经验模型

大气边界层对风力发电的作用主要关注两个方面:输出功率和机械载荷。在风电机组的初步概念设计中,确定机组的总体设计方案后,首先需要开展边界层地面风场模拟(刘磊等,2013;田东霞等,2015),然后对风电机组的气动响应状况进行仿真,进一步获得输出功率和机械载荷等数据,用于对机组的发电性能和结构完整性等进行评估。地面风场模拟的精细度和准确度直接影响风电机组仿真的输出功率和机械载荷等数据的真实性和可靠性(何伟等,2013)。

由于叶片附面层的尺度仍在毫米量级(杜朝辉,1999),即使采用雷诺平均(王福军,2004)的CFD方法进行湍流风场模拟与风电机组的气动响应计算,所耗费的计算量也十分惊人,难以大规模应用。目前风能行业主流采用描述边界层地面风场特性的经验模型(黎作武等,2013),并结合一定的技术手段进行湍流风场模拟。

边界层地面风场经验模型应包括风切变和湍流 这两个基本特征:由于边界层的气压梯度力、地表 摩擦作用、科氏力等因素,导致边界层的风速风向 具有明显的垂直梯度(即风切变);而受风切变的动 力机制、温度层结和热力作用等因素的影响,边界 层中的湍流也发展和变化(盛裴轩,2013)。风切变 和湍流现象直接影响了边界层地面风场的结构和特 性,从而对风电机组的输出功率和机械载荷产生作 用和影响。

#### 3.2 风切变和湍流对输出功率的影响

国标《功率测试》在构建风电机组的功率曲线时,假定轮毂高度处的风速可以代表叶轮面的风速(Wagner et al, 2011),且不考虑湍流,即采用的是均匀定常风模型,无风切变、无湍流,与边界层地面风场特征存在较大差异。

目前大型多兆瓦级风电机组的叶轮直径已超过150 m,垂直高度的风速廓线变化十分明显,因此必须考虑风切变对机组输出功率的影响。Rozenn et al(2010)的仿真案例中,风速切变导致风电机组的输出功率减小;并且当风切变增大时,输出功率也会逐步降低;当风速切变指数从 0 增加到 0.5 时,输出功率的最高降幅达 6% 左右。其原因有两个:一是风切变引起叶轮面的风能通量减小,二是风切变导致叶尖速比 λ 发生变化,风能利用效率 C。偏离了最优值,从而导致机组的输出功率下降。

由于湍流现象导致瞬时风速围绕平均风速上下波动,因而风电机组的输出功率随之发生变化。Rozenn et al(2010)的仿真案例中,当轮毂高度处的湍流强度从 0 增加到 20% 时,机组输出功率的变化幅度为 10%~20%。当轮毂高度处的风速在切入风速附近时(3~5 m·s<sup>-1</sup>),湍流强度增加会导致输出功率增加;而当轮毂高度处的风速在额定风速附近时(10~12 m·s<sup>-1</sup>),湍流强度增加则会导致输出功率减小。Rozenn et al(2010)认为,在平均风动能上叠加湍流动能后实质上增加了叶轮面的风能通量,因而机组的输出功率有所增加;但在额定风速附近时,风速波动向上增加时,机组的输出功率保持恒定,风速向下减少时,输出功率也随之减少,造成了单向"截断效应",因而机组的输出功率也随着下降。

#### 3.3 风切变和湍流对机械载荷的影响

国标《载荷测量》在测量风电机组各部件的载荷时,假定轮毂高度处的风速和湍流可以代表整个叶轮面的风速和湍流,即采用均匀风模型。该模型无风切变、有湍流,与均匀定常风模型相比则有所进步。

湍流是影响风电机组各零部件载荷的主要因素之一,在风能行业已成为共识(Frandsen, 2007;付德义等, 2015)。与湍流相比,普遍认为风切变对机组各零部件载荷的影响相对较小。Dimitrov et al (2014)的仿真结果中,当湍流强度从 12% 增大到14%和16%时,叶根和塔底的等效载荷均依次升高约10%;当风速切变指数从 0 增大到 0.1 和 0.2

时,叶根的等效载荷分别升高了3%和10%,但塔底的等效载荷没有明显变化。总体上,风切变对各零部件载荷的影响要低于湍流的影响,处于次要地位,但并不可忽略。

#### 3.4 大气层结状态的影响

值得注意的是,大气层中的各种物理过程、现象及演变规律并不是孤立存在的,而是紧密联系和内在统一的,风切变和湍流也是如此。对于白天出现不稳定边界层,地面辐射加热触发的对流增强了湍流能量,垂直混合作用强烈,气象要素的梯度都很小,风速风向随高度的变化(风切变)很小;而夜间出现稳定边界层,湍流能量较弱,垂直混合作用减小,气象要素梯度增大,也存在较强的风切变。边界层的结构和特性具有显著日变化规律(董保举等,2016),并对其中运行的风电机组产生交替影响和作用(图1)。

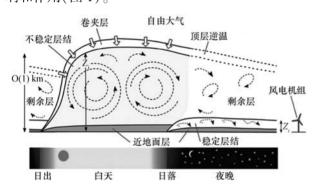


图 1 边界层日变化及其对风电机组的影响示意图  $Z_i$  为边界层高度

Fig. 1 Sketch of boundary layer diurnal variation and its influence on the wind turbine.  $Z_i$  denotes boundary layer height

根据莫宁-奥布霍夫相似性理论(Monin et al, 1954),有近地面层的风速廓线关系:

$$V(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \Psi \left( \frac{z}{L} \right) \right] \quad , \tag{5}$$

式中: V(z) 是高度 z 处的风速;  $u_*$  是摩擦速度;  $\kappa$  是卡曼常数, 一般近似取 0. 4;  $z_0$  是地表粗糙度; L 是奥布霍夫长度;  $\Psi(z/L)$  是大气层结稳定度 z/L 的普适函数, 当 z/L 或 L 为正值时表示稳定层结; 当 z/L 或 L 为负值时表示不稳定层结; 当 z/L 为 0 或 L 为无穷大时,表示中性层结,此时  $\Psi(z/L)=0$ ,公式(5)可简化为:

$$V(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad , \tag{6}$$

利用局地相似性关系, 归一化风速标准差的普适函数为(梁捷宁, 2014):

$$\frac{\sigma_i}{u_*} = \phi_i \left(\frac{z}{L}\right) \quad , \tag{7}$$

式中:  $\sigma_i$  是不同方向的风速标准差, i=1 表示水平平均风方向, i=2 为水平垂直于平均风方向, i=3 为垂直方向;  $u_*$  是摩擦速度;  $\phi_i$  是大气层结稳定度 z/L 的普适函数, 中性层结下  $\phi_i$  简化为常数( $\phi_1$  约为 2. 5); 稳定层结下的研究较少; 不稳定层结下  $\phi_i$  随着不稳定度的增加而增大, 公式如下:

$$\frac{\sigma_i}{u_*} = C_1 \left( 1 - C_2 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{3}} , \qquad (8)$$

式中:  $C_1$ 、 $C_2$  是拟合系数。

由公式(5)、(7)可知,当边界层的稳定度 z/L 发生变化时,地面风场的风切变 V(z)、湍流  $\sigma_i$  等特性也随之改变,进而对风电机组的输出功率和机械载荷等特性产生作用和影响(Hansen et al, 2012; Peña et al, 2014)。Wharton et al (2012)对风电场的观测结果显示,轮毂高度的风速大小相同时,稳定层结下风电机组的输出功率要显著高于不稳定层结时的输出功率,两者相差可达 15% ~ 20% (图 2)。

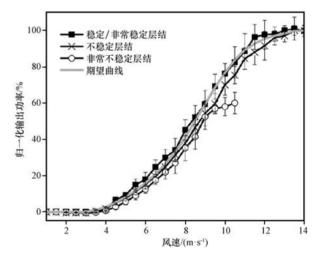


图 2 大气层结状态对风电机组输出功率的影响 (Wharton et al, 2012)

Fig. 2 Atmospheric stratification stability's influence on the wind turbine's output power (from Wharton et al, 2012)

Sathe et al (2013)通过仿真发现,风电机组不同零部件的载荷对大气层结状态的敏感性并不相同。当非常稳定层结变化为非常不稳定层结时,叶根的等效载荷仅减小了3%,叶轮的等效载荷减小了13%,而塔底的等效载荷则增加了17%(图3)。

大气边界层具有显著的日变化规律,层结状态的改变影响着地面风场的结构和特性(如风切变、湍流等),从而对风电机组产生复杂的作用,影响

机组在运行中的性能和表现(如输出功率和机械载荷等)。不仅如此,气温、湿度、气压、空气密度等气象要素,以及降水、覆冰、沙尘、盐雾等天气现

象,都会通过大气边界层直接或间接影响风电机组 的性能和表现。其作用的机理机制的研究,以及数 学物理模型的建立是未来的重点工作之一。

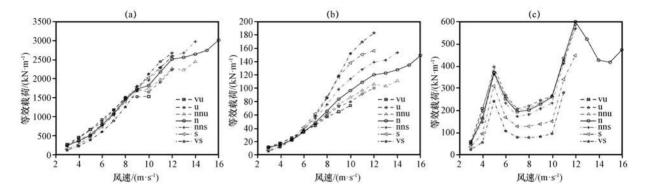


图 3 大气层结状态分别对风电机组的叶根(a)、叶轮(b)和塔底(c)等效载荷的影响(Sathe et al, 2013) vu、u、nnu、n、nns、s 和 vs 分别是非常不稳定、不稳定、不稳定偏中性、中性、稳定偏中性、稳定和非常稳定层结

Fig. 3 Atmospheric stratification stability's influence on the wind turbine's equivalent load of blade root (a), rotor (b), and tower base (c) (from Sathe et al, 2013). vu, u, nnu, n, nns, s and vs denote very unstable, unstable, near-neutral unstable, neutral, near-neutral stable, stable and very stable stratification, respectively

## 4 风力发电对大气边界层的作用

#### 4.1 风电机组的尾流效应

风电机组通过叶轮旋转吸收风能,也对气流施 加了扰动效应,造成下风向的风速减小、湍流增 大。这种现象在风能行业被称为"尾流效应"。风 电工程实际多采用经验模型描述尾流效应对地面风 场结构和特征的影响, 现有的两种经典尾流模型如 下: (1) Park 尾流模型(张镇等, 2012)。该模型应 用于风能行业权威的风能资源评估及发电量测算软 件 WAsP(代元军等, 2011)中。该模型不考虑湍 流,认为尾流影响区的风速分布是均匀的,并且随 着下风向距离的增加, 尾流中风速线性恢复, 直 至初始状态。(2)涡漩粘性(Eddy Viscosity)模型 (Ainslie, 1988)。该模型应用于风能行业权威的风 电机组设计与仿真软件 GH Bladed (周鹏展等, 2010)中。该模型采用涡漩粘性湍流闭合等假设, 来求解雷诺平均的 N-S 方程, 求得流场的各相关 参数。模型假定尾流影响区的风速和湍流均沿轮毂 高度的轴对称分布。

无论是 Park 尾流模型还是涡漩粘性模型均是在理想风洞实验结果的基础上总结和简化而来的。大量观测结果(Barthelmie et al, 2006)表明,尾流影响区中轮毂高度处的实测风速和湍流大小与模型预测的结果较为接近,但空间上的分布状况则较为复杂。

Porté-Agel et al (2011)结合现场观测与大涡模拟得到,尾流影响区的风速廓线出现了向右倾斜的"S"形状分布,表现为风电机组的轮毂高度(80 m)以上部分的风速大,而轮毂高度以下部分的风速小(图 4a)。与理想风洞不同,边界层中存在风切变现象(Chamorro et al, 2010),垂直风速廓线中上部风速大,而下部风速小,导致尾流影响区中的风速垂直分布也非均匀分布或轴对称分布。同样的,尾流影响区的湍流强度廓线同样表现轮毂高度以上部分的湍流强度大,而轮毂高度以下部分的湍流强度小(图 4b),并且在接近叶轮底和叶轮顶位置,流流强度出现极大值。原因可能是叶轮底和叶轮顶位置存在的较大风切变(图 4a)通过动力机制增强了以上位置的湍流强度。

风电机组尾流影响区中的风速减小、湍流增大,并且具有复杂空间分布特征,这些因素一方面直接关系着风电场内部各台风电机组的输出功率(Barthelmie et al, 2009)和机载荷(Larsen et al, 2013),对风力发电的实际业务至关重要;另一方面风电机组产生的尾流是否会对局地气象要素和区域天气过程等产生作用和影响,也开始逐步引起研究者的关注。Roy(2011)认为,由于尾流影响区的湍流和垂直混合增强,会导致大气层结和地表气温发生变化;Rajewski et al(2006)通过观测发现,尾流影响区的潜热通量增加、感热通量减小,从而影响地气系统的物质能量交换输送过程;Jacobson et

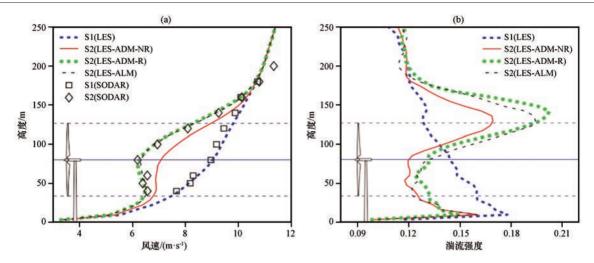


图 4 风电机组的尾流影响区中的风速(a)和湍流强度(b)廓线(Porté-Agel et al, 2011) S1、S2 是分别风电机组的上风向和下风向; LES 是大涡模拟结果, ADM-NR、ADM 和 ALM 是风电机组不同的参数化方案; SODAR 是声雷达观测结果; 左边灰色阴影表示风电机组; 紫色实横线是风电机组的轮毂高度(80 m), 上下两条紫色虚横线分别是风电机组的叶轮顶部高度(127 m)和底部高度(33 m)

Fig. 4 Profiles of wind speed (a) and turbulence intensity (b) in the wind turbine's wake area (from Porté-Agel et al, 2011). S1 and S2 denote upwind and downwind of the wind turbine; LES denotes Large Eddy Simulation result, ADM-NR, ADM and ALM denote various parameter schemes of the wind turbine; SODAR denotes SODAR equipment observation result; Left gray shadow represents the wind turbine; Purple solid line denotes the wind turbine's hub height (80 m), up and down purple dotted lines denote the wind turbine's rotor top height (127 m) and bottom height (33 m) respectively

al(2006)通过数值模拟得到结论,尾流影响引起地 表蒸发减少、空气变干,从而改变云和降水过程。 然而总体来说,现有的研究工作较少,结论也尚不 够清晰明确,有待于进一步的深入研究。

#### 4.2 大型风电场的扰动影响

单台风电机组的尾流影响一般可传播到下风向的 15~20 倍叶轮直径距离 (1~2 km) (Meyers et al, 2012)。此后地面风场结构和特性恢复到接近上风向的自然状态。然而对于大型风电场或多个风电场组成的百万(千万)千瓦级风电基地,其中排列的风电机组可达数百上千台,覆盖范围可达数十公里,运行过程中产生的扰动效应十分巨大,风电场作为"下垫面"的强制作用可以持续充分扩散到边界层中,从而影响和改变边界层的整体结构和特性。近年来,世界范围内的风力发电飞速发展和大规模持续开发扩张,一方面为人类提供了大量清洁可再生能源,另一方面风力发电的扰动也通过大气边界层或对局地甚至全球的气候、环境产生影响。

Wu et al (2012)对大型风电场的风洞实验和大 涡模拟结果显示,从第一排(Y方向)风电机组开 始,依次经过下风向的各排风电机组后,尾流影响 区的高度逐步向上抬升,覆盖范围持续扩大(图 5a)。风电场上空可显著划分为上、下两部分,分 别是非尾流影响区和尾流影响区。非尾流影响区的 地面风场结构和特征,包括归一化风速廓线(图 5b)和湍流强度廓线(图 5c)等,均与尾流影响区具 有显著的区别。丹麦 Riso 国家可再生能源实验室 的 Frandsen(1992)认为这种效果类似于在风电场上 空形成了一种新生的"内边界层"。随着气流通过 风电场的各排风电机组,"内边界层"不断抬升扩 散,并最终达到边界层顶部,取代原有的自然边界 层。由此,Frandsen(1992)提出了"无限大"风电场 的内边界层模型,把大型风电场视为下垫面粗糙度 的增大处理,并采用地转曳力定律(Jensen, 1978) 来计算风电场内外部的风速和湍流(图 6)。具体如 下:(1)风速垂直廓线分为轮毂高度以上和轮毂高 度以下两部分,遵从公式(6)中性层结条件下的近 地面层的风速廓线关系:

$$\begin{cases} V(z) = \frac{u_{*0}}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_{00}}\right) &, \quad z \ge z_{\text{hub}} \\ V(z) = \frac{u_{*}}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_{0}}\right) &, \quad z \le z_{\text{hub}} \end{cases}$$
(9)

式中: V(z)是高度 z 处的风速;  $\kappa$  是卡曼常数, 一般近似取 0. 4;  $u_{*0}$  和  $u_{*}$  分别是轮毂高度以上和以下部分的摩擦速度;  $z_{00}$  和  $z_{0}$  分别是轮毂高度以上和以下部分的粗糙度;  $z_{hub}$  是风电机组的轮毂高度。

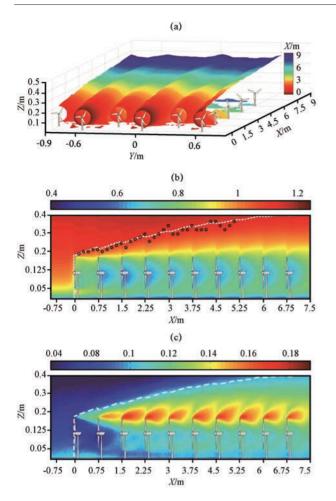


图 5 大型风电场的大涡模拟结果:尾流影响区边界(a)归一化风速廓线(b)和湍流强度廓线(c)(Wu et al, 2012) X、Y和Z分别是X轴、Y轴和Z轴方向的距离;风电机组的轮毂高度是0.125 m,叶轮直径是0.15 m;白色虚线和黑色散点分别是大涡模拟和风洞观测的尾流影响区边界

Fig. 5 Large eddy simulation results of large scale wind farm; edge of wake area (a), normalized wind speed profile (b) and turbulence intensity profile (c) (from Wu et al, 2012). *X*, *Y* and *Z* denote distance in *X* axis, *Y* axis and *Z* axis direction; The wind turbine's hub height is 0. 125 m, and rotor diameter is 0. 15 m; White dashed lines and black scatters denote edge of wake area from large eddy simulation and wind tunnel measurement

(2)湍流垂直廓线分叶轮以上,叶轮以下,叶轮之间共三个部分,根据公式(6)、(7)可推导出中性层结条件下的近地面层的湍流计算公式:

$$\begin{cases} \sigma_{00} = \frac{u_{*0}}{\kappa}, & z \ge z_{\text{hub}} + \frac{D}{2} \\ \sigma_{0} = \frac{u_{*}}{\kappa}, & z \le z_{\text{hub}} - \frac{D}{2} \\ \sigma_{\text{hub}} = \frac{1}{2} (\sigma_{00} + \sigma_{0}), & z_{\text{hub}} - \frac{D}{2} \le z \le z_{\text{hub}} + \frac{D}{2} \end{cases}$$
(10)

式中:  $\sigma_{00}$ 和  $\sigma_{0}$  分别是叶轮以上和以下部分的湍流;  $\sigma_{\text{hub}}$ 是轮毂高度处的湍流;  $\kappa$  是卡曼常数,一般近似取 0.4;  $u_{*0}$ 和  $u_{*}$ 分别是轮毂高度以上和以下部分的摩擦速度;  $z_{\text{hub}}$ 是风电机组的轮毂高度; D 是风电机组的叶轮直径。其中  $\sigma_{00}$ 是地转风速、科氏力、粗糙度  $z_{0}$ 、湍流  $\sigma_{0}$ 、风电场排布的行列距、风电机组的推力系数、轮毂高度  $z_{\text{hub}}$ 、叶轮直径 D 的函数。

由于实际风电场并不严格满足"无限大"假设。 考虑到边界层的特征厚度在 1~2 km,当风电场的 水平尺度超过边界层厚度约一个数量级,即 10~ 20 km时,下垫面的强制作用可充分扩散到整个边 界层,近似满足"无限大"风电场假设。

近年来,风电场实际业务中也逐步尝试应用内边界层模型。根据丹麦 Høvsøre 海上风电场的观测结果(Brower et al, 2012),采用内边界层模型对经典尾流模型改进后,可更加准确地评估风电场内部风速衰减和发电量损失;《风力发电机组设计要求》(中国机械工业联合会,2012b)要求考虑大型风电场改变边界层的影响,并采用公式(10)计算风电场内部湍流增加的值,进而评估对场内各台风电机组机械载荷的影响程度。

对于大气科学领域,内边界层模型为风电场的参数化方案提供了参考和建议,研究者可以利用气候模式等工具,进行预测、评估大规模开发风电场对风速、气温、降水等气候、环境要素的影响(刘磊等,2012;赵宗慈等,2011)。然而值得注意的是,该模型作为假说被提出后,尚未见到对大型风电场的边界层观测结果的有效验证和有力支持,加之数值模式本身存在不确定性,因此风电场的气候效应尚具有较大争议,有待深入研究。

## 5 结论与讨论

本文对大气边界层与风力发电的相互作用的研 究成果进行了总结和归纳,具体如下:

- (1) 大气边界层对风力发电的作用主要关注 风电机组的输出功率和机械载荷两个方面。大气边 界层具有显著的日变化规律,层结状态的改变影响 着地面风场的结构和特性(如风切变、湍流等),从 而对风电机组产生复杂的作用,影响机组的输出功 率和机械载荷,并导致风电机组在运行中的性能和 表现发生变化。
- (2) 风力发电对大气边界层的作用主要集中 于风电机组的扰动效应。风电机组的叶轮旋转产生

了扰动效应,导致下风向的风速减小、湍流增大, 且具有空间上的复杂分布特征,并进一步影响下风 向的风电机组的输出功率和机械载荷特性;大型风 电场或风电基地产生的巨大扰动效应类似于形成了 "内边界层",可影响和改变边界层的整体结构和 特性。

(3) "大气边界层与风力发电的相互作用"作为近年来新兴的研究热点,被提出的时间较晚,学界对它的理解和认识尚不全面,有待于进一步的研究和探索。未来期望开展多学科的交叉融合与理论研究,精细化的数值模拟与系统仿真,以及大型风电场的专项观测与实验等。

总而言之,风力发电是 21 世纪蓬勃发展的新生事物,大气边界层与风力发电相互作用研究具有重要科学意义和高度应用价值。成果不仅可以指导并应用于风电机组的设计与选型、风电场的选址布局、风电功率预报、机组载荷监测等各项具体业务,而且有助于揭示能源、气候和环境的深层次相互关系,帮助决策者科学制定激励政策,引导可再生能源健康发展。期望本文为大气科学和风能行业提供参考,促进我国风电科技的发展和进步。

#### 参考文献:

- Ainslie J F. 1988. Calculating the flowfield in the wake of wind turbines [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 27 (1/2/3): 213-224.
- Barrie D B, Kirk-Davidoff D B. 2009. Weather response to management of a large wind turbine array [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 9(1): 2917-2931.
- Barthelmie R J, Folkerts L, Larsen G C, et al. 2006. Comparison of wake model simulations with offshore wind turbine wake profiles measured by sodar [J]. J Atmos Ocean Technol, 23(7): 888-901.
- Barthelmie R J, Hansen K, Rados K, et al. 2009. Modelling the impact of wakes on power output at Nysted and Horns Rev [ C ]//Marseille, France: European Wind Energy Conference.
- Barthelmie R J, Pryor S C, Frandsen S T, et al. 2010. Quantifying the impact of wind turbine wakes on power output at offshore wind farms [J]. J Atmos Ocean Technol, 27(8): 1302-1317.
- Brower M, Robinson N, Alonge C. 2012. Overview of six commercial and research wake models for large offshore wind farms [C]//Copenhagen, Denmark: Proceedings of the European Wind Energy Associate, European Wind Energy Conference.
- Burton T, Jenkins N, Sharpe D, etal. 2011. Wind energy handbook [M]. 2nd Edition. Chichester: John Wiley, 43-45.
- Chamorro L P, Porté-Agel F. 2010. Effects of thermal stability and incoming boundary-layer flow characteristics on wind-turbine wakes: a wind-tunnel study[J]. Bound-layer Meteor, 136(3): 515-533.

- Dimitrov N, Natarajan A, Kelly M 2014. Model of wind shear conditional on turbulence and its impact on wind turbine loads [J]. Wind Energy, 18(11): 1917–1931.
- Fitch A C, Olson J B, Lundquist J K, et al. 2012. Local and mesoscale impacts of wind farms as parameterized in a mesoscale NWP model [J]. Mon Wea Rev, 140(9): 3017–3038.
- Frandsen S. 1992. On the wind speed reduction in the center of large clusters of wind turbines [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 39(suppl 1/2/3): 251-265.
- Frandsen S, Barthelmie R, Rathmann O, et al. 2006. Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind forms [J]. Wind Energy, 9(1/2): 39-53.
- Frandsen S T. 2007. Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters [R]. Technical University of Denmark, Wind Energy Report, 37.
- Glauert H. 1922. An aerodynamic theory of the airscrew [M]. 1st Edition. London; HM Stationery office, 87–89.
- Hansen K S, Barthelmie R J, Jensen L E, et al. 2012. The impact of turbulence intensity and atmospheric stability on power deficits due to wind turbine wakes at Horns Rev wind farm [J]. Wind Energy, 15(1): 183-196.
- Jacobson M Z, Kaufman Y J. 2006. Wind reduction by aerosol particles [J]. Geophysical Research Letters, 33(24): 194-199.
- Jensen N O. 1978. Change of surface roughness and the planetary boundary layer [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 104(440): 351-356.
- Keith D W, Schneider S H. 2004. The influence of large-scale wind power on global climate[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101 (46): 16115– 16120.
- Larsen S E. 2015. Lectures in Micro Meteorology [R]. Denmark Technical University Wind Energy Report, 278.
- Larsen T J, Madsen H A, Larsen G C, et al. 2013. Validation of the dynamic wake meander model for loads and power production in the Egmond aan Zee wind farm[J]. Wind Energy, 16(4): 605-624.
- Lu H, Porté-Agel F. 2010. Large-eddy simulation of a very large wind farm in a stable atmospheric boundary layer [J]. Physics of Fluids, 23(23): 2656-2657.
- Meyers J, Meneveau C. 2012. Optimal turbine spacing in fully developed wind farm boundary layers [J]. Wind Energy, 15(15): 305 –317.
- Monin A S, Obukhov A M, Monin A S, et al. 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere [J]. Contrib Geophys inst acad sci ussr, 24(151): 163-187.
- Peña A, Réthoré P E, Rathmann O. 2014. Modeling large offshore wind farms under different atmospheric stability regimes with the Park wake model [J]. Renewable Energy, 70(5): 164-171.
- Petersen E L, Madsen P H. 2013. Meteorology and Wind Power[M]. 1st Edition. New York: Springer, 1249–1270.
- Porté-Agel F, Wu Y T, Lu H, et al. 2011. Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind

- farms [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99(4): 154-168.
- Rajewski D A, Takle E S, Lundquist J K, et al. 2012. Crop Wind Energy Experiment (CWEX): Observations of Surface-Layer, Boundary Layer, and Mesoscale Interactions with awind farm[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 94(5): 655-672.
- Roy S B, Pacala S W, Walko R L. 2004. Can large wind farms affect local meteorology [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 109(D19): 4099-4107.
- Roy S B. 2011. Simulating impacts of wind farms on local hydrometeorology [J]. Journal of Wind Engineeringand Industrial Aerodynamics, 99(4): 491–498.
- Rozenn W, Michael C S, Torben L J, et al. 2010. Simulation of shear and turbulence impact on wind turbine power performance [R]. Denmark Technical University Wind Energy Report, 55.
- Sathe A, Mann J, Barlas T, et al. 2013. Influence of atmospheric stability on wind turbine loads [J]. Wind Engineering, 16(7): 1013-1032.
- Tennekes H, Lumley J. 1972. A first course in turbulence [M]. 1st Edition. Cambridge: MIT Press, 1153-1176.
- Wagner R, Courtney M S, Gottschall J, et al. 2011. Accounting for the shear in power performance measurement [ J ]. Wind Energy, 14 (8): 993-1004.
- Wharton S, Lundquist J K. 2012. Atmospheric stability affects wind turbine power collection [J]. Environmental Research Letters, 7(1): 17–35.
- Wu Y T, Porté-Agel F. 2012. Simulation of turbulent flow inside and above wind farms: model validation and layout effects[J]. Boundary-Layer Meteorology, 146(2): 181-205.
- Wyngaard J C. 1990. Scalar fluxes in the planetary boundary layer theory, modeling, and measurement[J]. Boundary-Layer Meteorology, 50: 49-75.
- 陈雪峰, 李继猛, 程航, 等. 2011. 风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究与进展[J]. 机械工程学报, 47(9): 45-52. Chen Xuefeng, Li Jimeng, Cheng Hang, et al. 2011. Research and application of condition monitoring and fault diagnosis technology in wind turbines[J]. Journal of Mechanical Engineering, 47(9): 45-52.
- 董保举,李建,孙绩华,等. 2016. 青藏高原东南缘低层风场垂直结构与变化特征[J]. 高原气象,35(3): 597-607. Dong Baoju, Li Jian, Sun Jihua, et al. 2016. Vertical structure and variation characteristics of wind field in low-level atmosphere in the southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteor, 35(3): 597-607. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2015. 00041.
- 代元军, 汪建文, 温彩凤, 等. 2011. 利用 WAsP 软件对风力机发电量的预测[J]. 可再生能源, 29(1): 103-106. Dai yuanjun, Wang Jianwen, Wen Caifeng, et al. 2011. The forecast of engergy production of wind turbine based on WAsP[J]. Renewable Energy Resource, 29(1): 103-106.
- 杜朝辉. 1999. 水平轴风力涡轮设计与性能预估方法的三维失速延迟模型- I. 理论基础[J]. 太阳能学报, 20(4): 392-397. Du

- Zhaohui. 1999. A 3D stall delay model for horizontal axis wind turbine performance prediction: I. theoretic and analysis [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 20(4): 392–397.
- 付德义, 薛扬, 焦渤, 等. 2015. 湍流强度对风电机组疲劳等效载荷的影响[J]. 华北电力大学学报, 42(1): 45-50. Fu Deyi, Xue Yang, Jiao Bo, et al. 2015. Effects on the turbulence intensity to wind turbine fatigue equivalent load[J]. Journal of North China Electric Power University, 42(1): 45-50.
- 何伟, 田德, 邓英, 等. 2013. 风力发电机组旋转湍流风场数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 33(11): 82-87. He Wei, Tian De, Deng Ying, et al. 2013. Turbulent wind field simulation of wind turbines with rotational effects[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 33(11): 82-87.
- 胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展[J]. 大气科学, 27(4): 712-728. Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. 2003. Progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP[J]. Chinese J Atmos Sci, 27(4): 712-728.
- 李岩瑛, 张强, 张爱萍, 等. 2016. 干旱半干旱区边界层变化特征及 其影响因子分析[J]. 高原气象, 35(2): 385-396. Li Yanying, Zhang Qiang, Zhang Aiping, et al. 2016. Analysis on atmosphere boundary layer variation characteristics and their impact factors in arid region and semi-arid region over northwest China[J]. Plateau Meteor, 35(2): 385-396. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2014. 00153.
- 黎作武, 贺德馨. 2013. 风能工程中流体力学问题的研究现状与进展 [J]. 力学进展, 43(5): 472-525. Li Zuowu, He Dexin. 2013. Reviews of fliuid dynamics researches in wind energy engineering [J]. Advances in Mechanics, 43(5): 472-525.
- 梁捷宁. 2014. 黄土高原半干旱区复杂地形上大气边界层湍流特征 [D]. 兰州; 兰州大学. 1-4. Liang Jiening. 2014. Atmospheric boundary layer turbulence characteristics over complex terrain of semiarid region in the Loess Plateau [D]. Lanzhou; Lanzhou University. 1-4.
- 刘德顺, 戴巨川, 胡燕平, 等. 2013. 现代大型风电机组现状与发展趋势[J]. 中国机械工程, 24(1): 125-135. Liu Deshun, Dai Juchuan, Hu Yanping, et al. 2013. Status and development trends of modern large-scale wind turbines[J]. China Mechanical Engineering, 24(1): 125-135.
- 刘磊, 高晓清, 陈伯龙, 等. 2012. 大规模风电场建成后对风能资源影响的研究[J]. 高原气象, 31(4): 1139-1144. Liu Lei, gao Xiaoqing, Chen Bolong, et al. 2012. Preliminary estimates of wind energy resources deficit in large wind farm[J]. Plateau Meteor, 31(4): 1139-1144.
- 刘磊, 胡非, 李军, 等. 2013. 基于 Weierstrass-Mandelbrot 函数的分形风速脉动仿真[J]. 气候与环境研究, 18(1): 43-50. Liu Lei, Hu Fei, Li Jun, et al. 2013. On the use of Weierstrass-Mandelbrot funtion to simulate fractal wind fluctuations[J]. Climatic Environ Res, 18(1): 43-50.
- 罗承先. 2012. 世界风力发电现状与前景预测[J]. 中外能源, 17 (3): 24-31. Luo Chengxian. 2012. Wind power generation today in the world and prospect forecast[J]. Sino-global Energy, 17

- (3): 24-31.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2013. 大气物理学[M]. 第二版. 北京: 北京大学出版社, 243-277. Pei Shengxuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2013. Atmospheric Physcis[M]. 2nd Edition. Beijing: Peking University Press, 243-277.
- 田东霞, 郭建侠, 关彦华, 等. 2015. 风观测对障碍物距离要求的定量评估[J]. 高原气象, 34(3): 870-880. Tian Dongxia, Guo Jianxia, Guan Yanhua, et al. 2015. Quantitative evaluation on requirement of obstacle distance for wind observation [J]. Plateau Meteor, 34(3): 870-880. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2014. 00052.
- 王福军. 2004. 计算流体动力学分析[M]. 第一版. 北京: 清华大学 出版社, 118-119. Wang Fujun. 2004. Computational fluid dynamics analy [M]. 1st Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 118-119.
- 吴义纯, 丁明. 2007. 风电场风力发电机组优化选型[J]. 太阳能学报, 28(10): 1163-1167. Wu Yichun, Ding Ming. 2007. Optimal choice of wind power generation unit in wind farms[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 28(10): 1163-1167.
- 肖创英, 汪宁渤, 陟晶, 等. 2010. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化, 34(17): 64-67. Xiao Chuangying, Wang Ningbo, Zhi Jing, et al. 2010. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 34(17): 64-67.
- 辛渝, 陈洪武. 2014. XJRUC/CALMET 及 CALMET 不同参数调整对达坂城—小草湖区风场预报影响[J]. 高原气象, 33(6): 1674-1686. Xin Yu, Chen Hongwu. 2014. Inflence of CALMET parameter adjustment in the XJRUC coupling of CALMET over Dabanchen-Xiaocaohu Wind Area[J]. Plateau Meteor, 33(6): 1674-1686. DOI: 10.7522/j. issn. 1000-0534. 2013. 00191.
- 杨玉华, 刘长海, Jimy Dudhia, 等. 2016. 基于大涡模拟对两类典型 边界层参数化方案的评估分析[J]. 高原气象, 33(1): 172-180. Yang Yuhua, Liu Changhai, Jimy Dudhia, et al. 2016. Evaluation of two typical PBL parameterization schemes based on large-eddy simulation result [J]. Plateau Meteor, 33(1): 172-180. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2014. 00138.

- 张双益,王益群,吕宙安,等. 2015. 山地风电项目的装机容量优化方法研究[J]. 风能, 2015(1):58-62. Zhang Shuangyi, Wang Yiqun, Lü Zhou'an, et al. 2015. A study on mountain wind power power project's installed capacity optimization method[J]. Wind energy, 2015(1):58-62.
- 张镇, 张晓东. 2012. 基于半经验公式的风力机尾流模型研究[J]. 现代电力, 29(2): 64-67. Zhang Zhen, Zhang Xiaodong. 2012. Reserarch on the wake model of wind turbines based on semi-empirical formula[J]. Modern Electric Power, 29(2): 64-67.
- 赵宗慈, 罗勇, 江滢. 2011. 风电场对气候变化影响研究进展[J]. 气 候变化研究进展, 7(6): 400-406. Zhao Zongci, Luo Yong, Jiang Ying. 2011. Advances in assessment on impacts of wind farms upon climate change[J]. Advances in Climate Change Research, 7(6): 400-406.
- 周鹏展, 曾竟成, 肖加余, 等. 2010. 基于 BLADED 软件的大型风力机叶片气动分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 41(5); 2022-2027. Zhou Pengzhan, Zeng Jingcheng, Xiao Jiayu, et al. 2010. Aerodynamic analysis of a large-scale wind turbine bladed based on BLADED software[J]. Journal of Cental South University (Science and Technology). 41(5); 2022-2027.
- 中国机械工业联合会. 2010. GB/Z 25426-2010 风力发电机组机械载荷测量[S]. 北京: 中国电力出版社, 17-19. China Machinery Industry Federation. 2010. GB/Z 25426-2010 Wind turbine generator systems measurement of mechanical loads[S]. Beijing: China Electric Power Press, 17-19.
- 中国机械工业联合会。2012a. GB/T 18451. 2-2012 风力发电机组功率特性测试[S]. 北京:中国电力出版社,14-16. China Machinery Industry Federation. 2012a. GB/T 18451. 2-2012/IEC 61400-12-1: 2005 Power performance measurements of electricity producing wind turbines[S]. Beijing: China Electric Power Press, 14-16.
- 中国机械工业联合会. 2012b. GB/T 18451. 1-2012 风力发电机组设计要求[S]. 北京:中国电力出版社, 50-51. China Machinery Industry Federation. 2012b. GB/T 18451. 1-2012/IEC 61400-1: 2005 Wind turbine generator systems-Design requirements [S]. Beijing: China Electric Power Press, 50-51.

# Review on Study of Atmospheric Boundary Layer and Wind Power Generation Interaction

ZHANG Shuangyi<sup>1, 2, 3</sup>, HU Fei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

- 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
- 3. China Three Gorges New Energy Company Limited, Beijing 100053, China)

Abstract: Atmospheric boundary layer (ABL) and wind power generation (WPG) interaction has become one of the hottest research subjects in recent years, and its study has both important scientific significance and high industrial value. Beginning with introduction of WPG's fundamentals and theories, this paper describes and discusses principles and mechanisms of ABL and WPG interaction, and also summarizes and concludes the latest study progresses in the field. The influence of ABL on WPG is mainly concerned with two aspects: The wind turbine's output power and mechanical load, which play key roles in the wind turbine's energy production and structural integrity. The Wind turbine's output power and mechanical load generally increase with wind speed, and they also were found to be affected by structure and characteristic of ABL's ground wind field in recent studies. Due to wildly existence of wind shear phenomena in ABL, the wind turbine's output power is decreased and mechanical load is increased. Turbulence phenomena have both positive influence on the wind turbine's output power in low wind speed section, and negative influence in high wind speed section. However, the wind turbine's mechanical load monotonically increases with turbulence intensity increasing. ABL's stratification stability has significant diurnal variation, along with changing ground wind field's structure and characteristic (such as wind shear and turbulence), and accordingly affects wind turbines' output power and mechanical load characteristics. The mechanisms of ABL's influence on WPG need to be further investigated, and the mathematic-physical models for practical engineering need to be established. The wind turbine absorbs wind energy by blades and rotor rotating, which accordingly exerts perturbation effect on the air flow. As a consequence, the downwind area's wind speed is decreased and turbulence is increased, and both of them were found having complex space distributions in latest studies. The so-called "wake effect" not only has negative influences on the wind turbine's output power and mechanical load, but also can change local meteorological elements and weather processes. Large scale wind farms or wind power bases, which extend tens of kilometers and planting hundreds of wind turbines, can produce huge perturbation effect and then change the whole structure and characteristic of ABL. The inner boundary layer model of "infinite" wind farm was developed to estimate ground wind field's wind speed and turbulence properties in large scale wind farms' affection scenario. The model was applied not only in wind energy industry for calculation of wind turbines' output power and mechanical load, but also in atmospheric science study for assessment impact of today's world-wide rapid growth of WPG on local and global climate-environment change.

**Key words:** Atmospheric boundary layer; Wind power generation; Output power; Mechanical load; Wake effect