

风能资源开发利用的气象技术应用和发展

宋丽莉, 周荣卫, 杨振斌, 朱 蓉

(中国气象局风能太阳能资源中心, 北京 100081)

[摘要] 基于要实现科学高效地开发利用风能资源, 促进我国从风能大国向风能强国发展, 针对风能资源开发利用过程中的气象技术应用, 依据过去大量的项目实践、数据分析和相关测试试验结果, 归纳总结了气象技术在我国风能资源开发利用各环节的应用现状、存在问题及其对项目效益可能产生的影响; 在分析大气科学的相关原理和风电产业发展对气象技术应用的特殊需求基础上, 提出了风能资源测量、分析评估、数值模拟和数值预报技术应用时应注意的几个关键技术问题及其发展方向。

[关键词] 风能资源; 气象技术; 测量和评估; 模拟和预报

[中图分类号] TK89 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)09-0096-06

1 前言

经济的发展需要足够的能源供应作为支撑, 社会和经济的发展以及提高人类福祉和健康需要能源和相关服务的不断增长。提供能源服务, 特别是各类化石燃料的消耗引起的温室气体排放是历史上大气温室气体浓度增加的主要因素。可再生能源具有很大的减缓气候变化的潜力, 因此可再生能源的使用可为社会和经济的发展、能源获取、安全的能源供应以及减少对环境 and 人类健康的负面影响做出贡献^[1]。

中国能源消费总量在未来相当长的时期内仍将保持一定的增长速度。预计到 2020、2030 和 2050 年, 中国能源消费需求将分别达到 45 亿 ~ 50 亿 t 标准煤、55 亿 ~ 60 亿 t 标准煤、65 亿 t 标准煤。2009 年 9 月, 中国政府向世界承诺“争取到 2020 年非化石能源占一次能源消费的比重达到 15% 左右”。综合考虑经济、社会、环境的可持续发展、节能减排和减缓气候变化等因素, 以较低的化石能源增长率和大规模开发清洁能源来支撑较高的经济增长速度应该成为国家能源战略的必须选择^[2]。国

际上, 我国人均能源资源拥有量处于较低水平, 煤炭、石油、天然气等化石能源资源量有限, 且分布不均衡。为了切实推动能源生产和消费形式的转变, 我国政府正在大力倡导低碳能源战略, 而风能资源开发利用已经开始并将继续成为实现低碳能源战略的主力之一。

在综合分析我国近期以及未来一段时间风能资源开发利用技术实际和可预期的发展趋势前提下, 以 70 m 高度层年平均风功率密度大于 300 W/m² 为基本指标, 中国气象局 2011 年完成并发布了全国风能资源详查和评估成果。成果显示, 我国陆地 (不包括青藏高原) 的风能资源技术开发量约为 26 亿 kW, 近海水深 5 ~ 50 m 的水深线以内的风能资源技术开发量为 5 亿 kW。从我国可开发的风能资源规模和资源总量、开发技术成熟程度和经济性等指标来看, 各项指标均符合我国可再生能源发展领域的基本原则^[3], 从而使得风能资源成为我国可再生能源发展的重点领域。根据国家能源局发布的国家可再生能源发展目标, 至 2050 年左右, 风电总装机将达到 4 亿 ~ 5 亿 kW, 届时风电在国家总体电源结构中所占的比例将达到 1/5 左右, 风电将成为

[收稿日期] 2012-06-25

[基金项目] 科技部公益性行业科研专项“复杂地形风能资源预报技术研究”(GYHY201006035); “气象灾害对重大工程影响评估的关键技术研究”(GYHY200806012); “北方大规模风电场风电功率预测技术研究及其应用”(GYHY201206026); 中国清洁发展机制基金赠款项目“抗台风型风电机组的台风模型分析技术与应用标准研究”(1212014)

[作者简介] 宋丽莉(1963—), 女, 山东乳山市人, 研究员, 研究方向为气候资源、工程气象; E-mail: songll@cma.gov.cn

我国电力供应中的主力电源之一^[3]。气象技术作为支撑风电开发利用的主要专业技术之一,其发展水平及其在风能资源开发利用领域的应用水平将是我国从风能大国向风能强国提升发展的重要指标。

2 影响风能资源开发利用的主要气象技术

气象技术的应用贯穿了风能资源开发利用的整个过程,从风电发展规划、风电场选址、项目可行性研究,到项目建成后的运行管理、风电并网等,无不涉及到气象技术的应用。

风能资源开发利用涉及的主要气象技术包括:气象观测(测量)技术、气象统计分析技术、大气数值模拟评估技术和数值天气预报技术。目前,我国风能资源开发利用领域的气象技术应用还没有得到充分重视,还处于比较初步和粗略的水平,主要表现在气象观测设置、操作以及观测数据质量控制不够规范和严谨,气象统计分析、数值模拟和数值预报技术的专业化应用程度较低。

3 风能资源测量

3.1 风能资源测量技术应用现状和存在问题

3.1.1 风能资源测量技术应用现状

在风电发展规划、风电场项目设计、建设和风电功率预报中均需要相应的、有针对性的现场气象观测。

20世纪90年代后期,我国逐渐步入风能大规模开发时期,风电开发企业先后自发建立了4000多座风能观测塔(但大部分塔在项目建设后被拆除),测风仪主要采用进口的杯式风速计。2008年启动的全国(陆地)风能资源详查和评估项目采用规范、统一的建设标准建立的400座测风塔,安装了国产风速计,形成了全国(陆地)风能资源专业观测网(见图1),综合考虑了我国(陆地)风能资源开发利用区域规划和大规模风电场选址需求。已获取的近3年的测风塔观测数据为全国(陆地)风能资源详查和评估成果提供了较为可靠的数据基础。同时,风能观测数据已用于全国风能数值天气预报的检验、订正和模式资料同化,效果良好。若该专业观测网能够长期持续进行观测,可为我国风能数值天气预报的公共服务提供稳定的基础数据支持。

3.1.2 影响风能资源测量数据质量的因素

目前我国应用最广泛的风电场项目前期工程场地气象观测技术的应用水平已有了一定程度的提高,

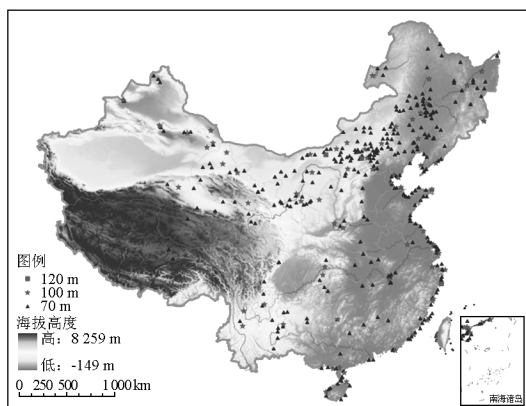


图1 全国(陆地)风能资源专业观测网分布

Fig. 1 Wind energy resources professional observation network in Chinese mainland area

但仍存在操作不够规范、严谨,专业化程度较低等问题。风电项目工程场地气象观测主要为了获取科学、准确、有代表性的资源总量、资源等级、风机选型、工程安全设计等参数,这是风电项目开发投资决策的关键影响因素。影响气象测量数据准确性的因素主要包括:观测仪器的性能、仪器是否进行了严格的标校、是否根据风电场的地形地貌和风气候特征合理布设测风塔、测风塔和观测仪器的安装质量以及有效的观测运行管理等。以风速计准确性影响为例,目前风电开发企业普遍采用的进口风速计的仪器原始偏差大多在1.6%~5%,若不进行风洞检验校准,则即使2%的风速仪器误差,也可导致风功率密度8%的偏差^[4];此外,测风塔对风电场(尤其是复杂地形)风况的代表性、测风仪安装的方位误差(主导风向参考)、观测数据有效完整率低和观测数据质量控制不当等问题,均可导致风能资源测量评估产生较大误差。我国早期建成的部分风电场的实际运行效益与项目的预期效益相比误差达20%~30%,工程场地风测量误差是重要因素之一。

标准的气象测风塔要求塔体形状、结构和安装等尽量减少对环境风的影响,因此,测风塔多采用桁架结构的桅杆式设置。由于海洋施工安装条件的限制,用于海上风能资源测量的多为自立式测风塔。与桅杆式拉线塔相比,自立塔塔体庞大,安装观测仪器的伸臂长度难以按规范要求(塔体直径的3倍以上长度)^[5]设置,从而影响测风数据的代表性。考虑到我国处于季风气候区的特点,自立塔测风仪设置应考虑不同季候风主风向影响,应参考冬、夏季风不同的主导风向来设置测风仪;由于自立塔摆动幅

度较大(尤其在台风等强风条件下),需考虑塔摆动对测风数据的影响,建议加设塔体摆动测量,并依此对观测数据进行必要的修正,这对观测三维方向的脉动风尤为重要。

3.2 风能资源测量技术的发展

3.2.1 测量仪器的发展

随着风电机组向大型化发展,复杂地形的风电场建设、项目设计更精细化和项目后评估以及海上风能资源开发的新需要,使气象测量技术应用呈现向多元化和高端化发展的趋势。如,为了探测更高层的风况,研究风机尾流影响和复杂地形风场分布等需求,遥感式测风设备(包括以超声波、声波和激光等为介质的多种测风雷达)应用越来越受到重视;为探测导致风机疲劳、致损以及影响其发电效率的三维风况及其脉动风谱特征等,超声测风仪以其能精确测量自然界三维风况数据而被广泛应用。

3.2.2 新型探测数据的处理

遥感和超声波等测风仪器设备在提高风能资源探测高度、扩大探测范围、获取更精细的三维风况数据的同时,对测量操作和数据分析提出了更高的技术要求。如:遥感式测风设备(测风雷达)的数据采样方式与常规的轴式(杯式)测风仪不同,遥感仪器测量的风况数据通常是某一定厚度层(几米或几十米)内的整体平均值,而不是仪器传感器接触点上的测量数据;遥感式测风仪往往在近地面层存在一定高度的“盲区”(即无数据或数据不可靠)。此外,遥感式测风仪往往在晴好天气和清洁大气中使用效果比较好,但在降水、多雾、沙尘等条件下的测量数据的可靠性会不同程度地降低,声波式遥感设备还受环境噪声影响,因此,遥感测风数据应用必须对数据进行质量检验和必要的修正。超声测风仪是最准确的测风设备之一,它能精准地捕捉三维空间上气流的细微波动,但由于超声测风仪是利用超声波传播路径上的时间差来确定气流速度,其数据采样频率越高,对环境的敏感度也越高,气流中的雨滴、尘埃、飞虫等都会干扰声波对风速的响应,同时,仪器部件在响应和传输过程中的短暂故障也会导致信号错误而产生野点数据。研究表明,即使风速样本数据中只有2%~5%的野点数据,对风谱参数计算精度的影响也很显著^[6]。以风工程脉动风参数分析为目的的气象测量推荐采用具备有效数据自动识别功能的超声测风仪,以协助判别由于降水、尘埃等影响而产生的无效数据,但这还不够,仍需采取进一

步的野点数据判别、剔除措施以确保样本数据的可靠性,工程计算操作一般采取多倍截断方差法对原始数据进行更细致的处理^[7]。

4 风能资源评估

4.1 风能资源点评估技术应用

风能资源点评估是指利用测风塔(站)观测数据,采用数理统计方法对风能资源各项参数进行直接计算评估,包括:工程场地风机轮毂各高度附近的空气密度、风功率密度、风速频率分布、湍流强度、风向频率和风能方位分布、风速垂直切变等参数。按照国家相关规范要求,风电场项目可行性研究的关键依据是工程场地连续1年以上的风能资源观测数据,以及据此计算分析得到的各项风能资源参数评估成果。因而,风能资源的点评估技术水平可直接影响风电场风能资源利用效率和项目运行效益。

相关规范^[8]对风能资源各项参数的计算给出了明确的方法和公式,在工程实践中,产生不确定因素的主要原因是基础数据的质量,包括观测数据的可靠性。由于进行现场观测的仪器总是会因雷击、故障等原因导致观测数据缺失,缺失的数据就需要进行科学的插补订正。需要指出的是,即使在满足规范要求的观测数据有效数据完整率前提下,对用于插补订正的“参照数据”选择不当时,仍会对评估结果的准确性产生较大的影响。试验研究表明,若以夏季(或冬季)的“参照数据”建立的订正关系去订正冬季(夏季)一个月的缺漏数据,可导致被订正时段的平均风功率密度误差达20%以上,在季风气候明显区域的复杂地形上,这一误差可达50%以上^[4]。因此2007年发布的《风电场气象观测及资料审核、订正技术规范》QX/T 74—2007中规定“选取与缺测时段内主导风向相同的相关显著的测点观测数据,作为插补订正的参照数据”^[9],但实际操作中这一技术要点往往被忽略了。

4.2 风能资源区域评估技术应用

风电项目工程场地测风塔观测只能代表与测风塔所在位置的地形、地貌类似的区域的风况,而风电场设计需要掌握每台风机位置的风况特性,因此,区域风场评估技术被广泛应用于风能资源规划和风电机组微观选址等。

风能资源区域评估主要依赖大气数值模拟技术,即基于大气动力学和热力学基本原理来描述近地层大气的运动过程以及地形、地貌对大气运动的

影响作用。目前,我国风电场项目选址和风电机组微观选址使用的多种商业计算评估软件,从理论框架和计算模型上可分为两大类:一是基于线性理论模型,二是基于流体力学模型。

基于线性理论模型的软件有 WAsP、WindPro、WindFarm 等,其中 WindPro 和 WindFarm 均仍采用 WAsP 作为风场分布求解器。从 WAsP 软件在国内外大量的应用实例来看,其对平坦、均匀地形的风场计算结果较为理想,但对于相对复杂的地形,其风速计算结果往往偏大;虽然目前采用该种求解器的商业软件已推出针对复杂地形下的应用方法,但仍不能从根本上解决复杂地形风速模拟误差偏大的问题。基于流体力学模型软件有 WindSim、Meteodyn/WT 等,可以在一定程度上提高对复杂地形风场的模拟准确度和分辨率,同时可给出湍流参量,为微观选址提供更多风场特征信息,但在应用时需要仔细进行模拟区域和分辨率设置,还应考虑复杂地形的风廓线、大气稳定度等参数的合理性。除了地形的动力作用外,影响局地风场分布特征的因素还来自更大区域范围上不同下垫面的热力效应、随时间变化的大气稳定特性和不同物理结构的天气类型等;上述商业软件只针对模拟区域内观测数据计算得到大气稳定度,再通过改变风廓线幂指数来实现各类大气稳定度的初边界条件进行求解计算,而热力效应的其他作用均没有被考虑;此外,采用幂指数或对数率分布来描述风速垂直分布的前提是平坦下垫面和中性大气层结,而在复杂地形或其他大气层结条件下,风廓线并不满足幂指数率。可见,大气热力效应考虑不全、边界层参数化的不当描述等是复杂地形和复杂风气候地区风能资源区域评估的主要误差来源。

中国气象局风能太阳能资源中心在大气边界层动力学和热力学基础上建立的风能资源数值模拟评估系统(WERAS/CMA),综合考虑了近地层风速分布是天气系统与局地地形作用的综合结果,风速分布及其变化是由天气系统运动及其演变引起,大气边界层存在着明显的日变化,日最大混合层厚度与天气系统的性质有关。由此,依据不受局地地形摩擦影响高度上(850 hPa 或 700 hPa)的风向、风速和每日最大混合层高度,以及评估区历史观测资料,将评估区历史上出现过的天气系统进行分类,并从各天气类型中随机抽取 5% 的样本作为数值模拟的典型日,再分别对每个典型日进行数值模拟,并输出逐

时风场,最后根据各类天气类型出现的频率,统计分析得到风能资源的气候平均态。WERAS/CMA 系统具有明显的本地适用性特征,已实现了百米分辨率风能资源精细化评估,模式应对复杂地形的能力大为提高。

4.3 我国风能资源详查评估结果

2011 年完成的全国风能资源详查和评估,给出了我国陆地风能资源评估的最新成果。该成果利用中国气象局风能太阳能资源中心建立的风能资源数值模拟评估系统(WERAS/CMA),以 400 个测风塔连续两年的实测数据对数值模拟结果进行检验订正,得出我国陆地上近地面层 150 m 高度范围内水平空间分辨率为 1 km、垂直分辨率为 10 m 的各高度层上风能资源参数和资源分布立体图谱。

根据目前我国风能资源开发的技术水平和主要技术经济指标,综合考虑自然、地理和政策等对风电开发的制约因素,结合大型风电场建设对连片风能资源分布的要求,以年平均风功率密度 $\geq 300 \text{ W/m}^2$ 、装机容量系数大于 1.5 MW/km^2 为基本指标,计算得出我国陆地离地面 50 m、70 m 和 100 m 等高度层上的风能资源技术开发量分别为 20 亿 kW、26 亿 kW 和 34 亿 kW。

图 2 是我国陆地离地面 70 m 高度层风能资源、装机密度达到上述技术开发指标的风能资源丰富区分布(灰度图例为装机容量系数,单位: MW/km^2)。图 2 显示了我国东北、华北和西北地区风能资源丰富、资源总量大,具备规划建设大型风电基地的资源条件;云贵高原、东部和南部沿海为风能资源较丰富地区,适宜建设大中型风电场;中部和内陆地区的山脊、台地、江湖河岸等特殊地形也具有较好的风能资源,适宜建设中小型风电场,或进行分散式风电开发。

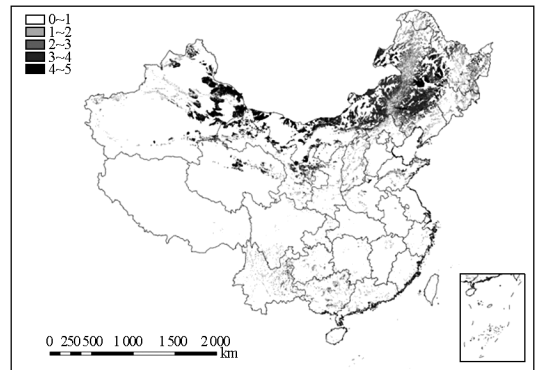


图 2 中国陆地 70 m 高度可技术开发的风能资源分布

Fig. 2 Technical development distribution of wind energy resource at 70 m height in Chinese mainland area

此外,利用 400 个测风塔观测资料,评估得出我国陆地主要风能资源开发区内风电机组选型的主要参数:我国风能资源主要开发区内,约 75 % 的区域可采用抗风标准为Ⅲ类的风电机组,约 10 % 的区域为Ⅱ类,约 15 % 的区域为Ⅰ类;我国风能资源主要开发区内 80 % 的区域可采用低湍强的 C 级机型,10 % 的区域属于中等湍强,可采用 B 级风机,只有 4 % 左右的区域为高湍强地区,需要采用 A 级风机,高湍强区主要分布在山地丘陵和台风影响地区。

4.4 风能资源评估技术发展

最新风能资源详查得出我国陆地 50 m 高度层上年平均风功率密度 $\geq 300 \text{ W/m}^2$ 的风能资源理论储量约 73 亿 kW,与国土面积相当的美国相近(1991 年发布的全美 50 m 高度的风能资源理论储量约 80 亿 kW)。但由于我国地形远比美国复杂,美国海拔在 3 000 m 以上的地区仅占其国土面积不足 2 %,而我国海拔在 3 000 m 以上的高原和山地占国土面积的 25.6 %,再加上我国气候类型多样(南北纵跨 9 个气候带),影响我国风能资源开发的台风、雷电、极端低温、覆冰等灾害性天气频发,导致我国风能资源开发利用难度和成本要比美国、欧洲等国家大得多。因此,开展我国因风气候特点和自然条件而产生的风电利用成本的定量评估,确切掌握这一因素带来的影响,对我国制定长远可再生能源发展线路图,应对国际气候变化谈判具有重要的现实意义。

我国风能资源开发利用趋势是向更高层空间、风能密度较低、地形更为复杂以及海上等区域发展,风电开发难度和成本逐步加大,因此,应发展更科学、可靠和精细的风能资源数值模拟技术,重视开展台风、雷电、极端低温、覆冰等极端天气对风能资源开发利用的风险评估以及风能资源的质量^[10]评估技术研究,为全面、准确评估风能资源开发利用的效益,降低利用成本提供更可靠的技术支持。

5 风能数值天气预报

5.1 风能数值天气预报的现状

由于风速存在很强的间歇性、波动性,导致风电的不稳定性。风电大规模接入电网会增加电力系统运行的不确定性风险,给电网调度带来压力和挑战,风能预报技术的应用是解决这一问题的有效措施之一。欧美等风电技术发达国家,很早就利用先进的

风能数值天气预报技术进行持续、稳定、多元化的风电功率预报服务,有效地提高了风电并网能力,从而成为风电参与电力交易的重要环节。

用于提高风电在电网中可调度性的风能预报主要包括两个部分,一是风能数值天气预报,二是风电场电功率预报。后者利用前者提供的背景风场数据,为电网调度做出未来 24 h 或 72 h 逐 15 min 的风电功率预报。目前,风电功率预报服务商大多采用国外网站免费下载或付费购买国外数值天气预报数据来制作风电功率预报,常会因网络不稳定或因国际形势和突发事件等不确定因素影响而难以满足“不可间断”的电网调度业务运行需要;此外,国外的预报数据很少同化我国的实时气象观测资料,尤其影响其对转折天气的预报准确性,也在很大程度上限制了我国在该领域的自主创新和服务水平的提高。

为满足国家可再生能源发展新需求,中国气象局已在北京奥运精细化数值预报业务系统(BJ-RUC)基础上,建立我国的风能(太阳能)数值天气预报业务系统,可根据不同需求,提供涵盖全国的水平分辨率 9 km(或 3 km)、时效 72 h 逐 15 min 的气象要素预报场。该系统(技术框架见图 3)是基于天气预报(weather research and forecasting, WRF)模式三维变分同化和高分辨率快速更新循环同化预报系统,以全球预报背景场 AVN/NCEP 资料作为模式边界条件,同化了全球及我国国家和区域气象站、卫星、雷达等观测资料^[11],可使全国背景风场的预报准确性得到基本保障;同时还建立了风电功率预报专业服务业务流程(见图 4)。

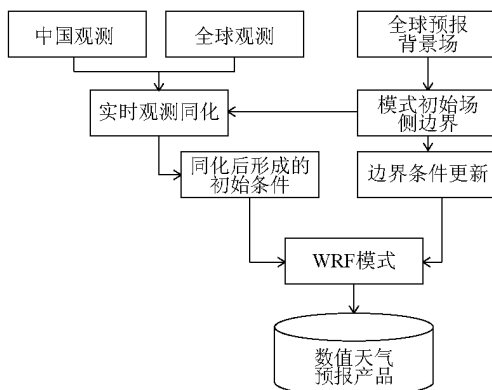


图 3 BJ-RUC 系统技术框架

Fig. 3 BJ-RUC systems technology framework

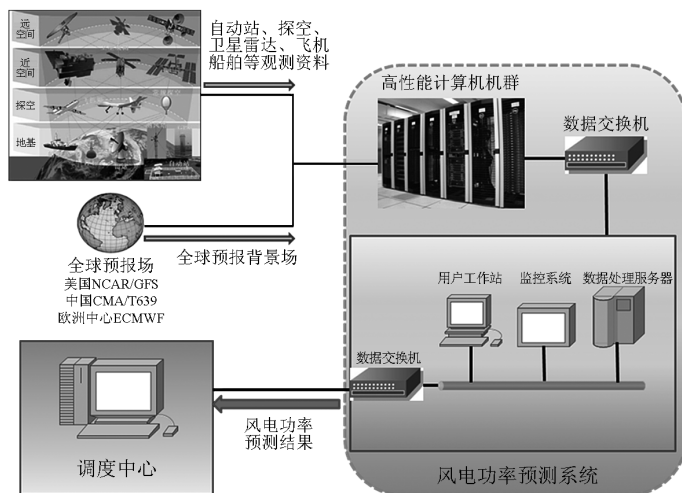


图4 风电功率预测专业服务流程

Fig 4 Professional services process of wind power forecasting

5.2 风电场电功率预报

风电场电功率预报包括超短期预报和短期预报。超短期预报为未来4 h内逐15 min的风电功率预测,短期预报为次日0时至未来24 h、72 h逐15 min的风电功率预测。目前,超短期风电功率预测一般采用统计外推方法来实现,中国气象局风能太阳能资源中心采用均生函数法进行统计外推,比传统的自回归滑动平均(auto-regressive and moving average, ARMA)模型的准确度提高了3%~10%。国外短期风电功率预测则多采用数值天气预报模式和理论、统计风电功率预报模型相结合的方法来实现,如丹麦Zephyr系统、德国Previento系统,美国eWind系统等^[12]。中国气象局风能太阳能资源中心采用自适应偏最小二乘回归法的风电功率预报模型,其均方根误差介于2.76%~12.89%。

5.3 风能数值天气预报技术的发展

从风特性和电网安全运营的关键需求来看,转折性天气引起的风速突变可导致并网风电对局部电网运行产生较大的冲击,因而对转折性天气的预报能力的提高将是今后风能数值预报技术发展的重点;进一步发展观测资料同化、集合预报和统计订正技术是提高预报准确率的有效手段。此外,风能预报专业观测网的完善和数据共享机制,是逐步提升我国风能数值预报能力和准确度的重要基础。

6 结语

气象技术已广泛应用于我国风电发展规划、风电场资源勘测和评估、风电项目设计建设以及风电

并网等诸多重要环节。随着我国风能资源开发利用向更科学、精细化方向发展,对气象技术提出了更高的要求。特别是对风能气象技术基础能力提升起关键作用的专业探测技术和精细化数值模式技术的科学应用和发展等方面,应给予足够重视,为保障我国风能资源开发利用提供更为有效和可靠的支持。

参考文献

- [1] Ottmar E., Ramon P M., Youba S., et al. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [2] 王仲颖,时璟丽,赵勇强. 中国风电发展路线图 2050[R]. 北京:国家发展和改革委员会能源研究所,2011.
- [3] 杜祥琬,黄其励,李俊峰,等. 我国可再生能源战略地位和发展路线图研究[J]. 中国工程科学,2009,11(8):4-9.
- [4] 宋丽莉,黄浩辉,植石群,等. 风电场风能资源测量与计算的精度控制[J]. 气象,2009,35(3):73-80.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18709—2002 风电场风能资源测量方法[S]. 2002.
- [6] 宋丽莉,陈雯超,黄浩辉. 工程抗台风研究中风观测数据的可靠性和代表性判别[J]. 气象科技进展,2011,1(1):33-37.
- [7] 陈红岩,胡非,曾庆存. 处理时间序列提高计算湍流通量的精度[J]. 气候与环境研究,2000,5(3):304-311.
- [8] 中华人民共和国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]. 2002.
- [9] 中国气象局. QX/T 74—2007 风电场气象观测及资料审核、订正技术规范[S]. 2007.
- [10] 陈欣,宋丽莉,黄浩辉,等. 中国典型地区风能资源特性研究[J]. 太阳能学报,2011,32(3):331-337.
- [11] 范水勇,陈敏,仲跻芹,等. 北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估[J]. 暴雨灾害,2009,28(2):119-125.
- [12] 范高锋. 风电功率预测技术及其应用研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2008.

(下转 112 页)