

风电项目中的土木工程问题及 有关研究的思考和发展展望

王东元¹, 王思敬²

(1. 天津城建学院土木工程系, 天津 300384; 2. 清华大学土木水利学院, 北京 100084)

[摘要] 从配套工程建设、风况数据的搜集、整理及分析、预测等角度, 探讨了促进我国风电事业的发展方式; 指出关注风电建设中的土木工程问题, 编制有关规范或指导手册等文件, 做好风资源的普查、评估和风电场发电量预测, 并在这些技术领域做到专业化、规范化, 形成可靠的、成熟的、具有自主知识产权的技术体系对我国的风电发展至关重要。最后探讨了需要进行研究的方向, 并结合中国国情对风电的发展做了展望。

[关键词] 风能; 风电建设; 风力资源普查; 风力图

[中图分类号] TK81 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)09-0031-07

1 前言

能源、环境成为当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题, 以清洁、可再生能源为主的能源结构将成为未来发展的必然。水电和风电均属可再生能源。水利发电的历史已经很长, 技术已经非常成熟, 但出于环保考虑, 一些发达国家正在探讨水电带来的效益和拦河筑坝带来的对生态环境影响的风险平衡问题。风能作为一种清洁的可再生能源, 越来越受到世界各国的重视。风能蕴量巨大, 全球的风能约为 2.74×10^9 MW, 其中可利用的风能为 2×10^7 MW, 比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。从某种意义上来说, 风力发电将成为 21 世纪最具规模开发前景的新能源之一, 而且亚洲将在 2014 年成为世界最大的风力发电场。

利用风力来发电的尝试始于 20 世纪 30 年代, 丹麦、瑞典、苏联和美国应用航空工业的旋翼技术, 成功地研制了一些小型风力发电装置。这种超小型的风力发电装置虽然能提供电力, 但还远远没有达

到工业化的程度。20 世纪 80 至 90 年代, 丹麦、美国等发达国家尝试安装了单机容量能工业化的风车, 拉开了大规模开发、利用风能发电的序幕。风力发电对环境没有任何副作用, 目前全世界的装机容量已经超过 160 000 MW, 并且正以每年约 20% 的速度递增; 许多专家预计, 到 2020 年风力发电量将达到全球电力的 12%^[1]。作为走出金融危机阴影、重振美国经济的手段, 美国奥巴马政府决定斥巨资发展可再生能源, 其中很大一部分是风力发电^[2]。中国近 20 年来经济高速发展的同时付出了环境污染的沉重代价, 能源的短缺也成为中国经济发展的瓶颈, 因此中国政府把开发可再生能源定位为能源战略的重要组成部分。

现代风力发电技术属于可再生能源利用领域新兴的一个多学科交叉领域, 涉及范围包括空气动力学、结构力学、岩土力学、材料科学、声学、机械工程、动力工程、电气工程、控制技术、气象学、环境科学等, 是世界上近 20 年才兴起并得到蓬勃发展的边缘学科之一。风力发电在中国方兴未艾, 国家和企业

[收稿日期] 2011-05-23

[作者简介] 王东元(1967—), 男, 河北南宫市人, 天津城建学院教授, 长期从事岩土工程和风电工程的研究、设计、咨询工作;

E-mail: dongyuan_wang@163.com;

王思敬(1934—), 男, 上海市人, 中国工程院院士, 长期从事水电、矿山和环境工程等方面的科研工作;

E-mail: wangsijing@hotmail.com

在研发上投注巨资,重点放在了机、电、并网等技术上,但要成功地建成一座风力发电厂,配套工程必不可少,而且在很多时候成为建设风电项目的关键。作为对机、电、并网技术等的补充,笔者等讨论了风力发电项目中与土木工程相关的几个问题,比较了风电项目中有关土木工程的规范情况,着重探讨了风力量测、评估和风速预测的研究方法,结合中国国情对风电的发展做出了展望并提出了建议。

2 风电中的岩土和工程地质问题

在风场选址及风力发电厂建设的过程中,场地的工程地质和岩土工程条件与风力发电厂的输出功率、建设成本、运营及维护等要素密切相关,需要对其加以考虑。

2.1 地貌和土壤的反照率

地貌会影响到风向和风速;土壤反照率本来是天体物理学的一项研究内容,主要研究土壤和阳光辐射的关系,在风电中其内容主要包括土壤的含水率、地表的粗糙度以及地表植被等,在天体物理学中这些参数和气候、陆地的模型应用相关^[3],在风电有关模型中作为输入参数来模拟风速及其中长期的发展趋势^[4]。

2.2 风场场地的工程地质勘察和评价

基于风资源的有限性、可建设风电场的场地局限性,任何一个风电场均是在一个特定的区域内或指定的范围内工作;为避免风机尾流效应以及优化风力电场的投资成本和运行维护费用,大型风力电场风机一般布置成几排,每排绵延数千米,因此风力电场的工程地质评价非常重要。在山区和比较湿润的地区,要考虑滑坡和泥石流等;在沿海滩涂、湖畔等地区,要考虑下卧软土层、松沙层等不良工程地质条件。风机的基础埋在岩土介质里,因此比上部结构有利于抗震,但按照美国混凝土协会的规范^[5],在设计时要将地震荷载和风荷载进行对比以确定最不利荷载组合。地基变形也需引起足够的重视,设计中应该进行检验并控制形变;若在特殊区域性土如湿陷性黄土、膨胀土广泛存在的地区建设风力电场,对场地道路和风机基础要采取具有针对性的设计。

风机间距比较大,因此工程地质的勘察基本按每机一孔布孔,变电站、运营维护建筑一般也需要布孔。国外工程实践没有硬性规定勘察的深度和其他试验指标,一般按场地的地质条件、风机制造商的要求以及工程经验进行。需要指出的是,风机基础要求地基的转动刚度比较严格,并把基础变形控制在

25 mm 以内,通常要进行旁压试验或者物探确定地基的刚度模量以验算地基的转动刚度^[6-8]。如果采用地下电缆,土壤(包括垫层和电缆沟回填土)的热阻和电阻试验非常重要,这是电缆设计的重要根据。如果是近岸风场,地质勘察工作就更加复杂。

2.3 场内道路

风力电场内要建设场内道路。场内道路有两个作用:一是在建设时期运输风机设备、建筑材料、施工人员等,二是便于对建成的风力电场进行运营维护。风机制造商一般会对场内道路的纵段和横断面坡度、路面宽度、路肩宽度、转弯半径以及道路半刚性垫层的承载力等提出明确要求,以利风机的运输安装。设计单位应根据地质勘察报告和场地的工程地质情况,结合风机制造商提出的要求进行相关设计。美国 AASHTO 规范^[9]规定,对运输重型设备的场区内道路,级配良好的回填砂石料至少要保持 10 cm 厚度,并碾压到至少 95 % (ASTM D 1557/AASHTO T180, 重型击实试验) 或 98 % 的密实度 (ASTM D 698/AASHTO T99, 一般击实试验)。修建在软弱天然地基上的场内道路要增加回填砂石料垫层的厚度,必要时采用土工织物手段进行改良,防止风机运输车辆运输过程中出现事故。

2.4 风机基础

风机叶片在风的带动下转动,承受风荷载,并以弯矩和扭矩的形式通过连结塔架法兰和基础立柱的地脚螺栓传到基础,同时基础还承受上部结构传下来的重量和水平剪力;传到基础的弯矩荷载因单机容量、塔架高度以及风速等的不同而不同,弯矩大约 50 000 ~ 60 000 kN·m,重量 2 500 ~ 2 900 kN,水平剪力 600 ~ 800 kN,扭矩 1 000 ~ 1 500 kN·m 的量级^[6]。对一个单独基础来说,这样的荷载量级和组合是相当大和复杂的。

风场风机基础的设计非常重要,而且设计水平对风力电场项目的土木工程造价比较敏感。文献[7,8]和文献[7,9]总结了目前国内外陆地和近岸风场风机基础的结构形式。其中,重力式基础是目前陆地风场项目使用最多的一种基础结构形式,其靠自身的质量使风机竖立在地面上。图 1 是陆上重力式基础的示意图,图 2 是重力基础的施工现场。另外,锚杆式基础也得到应用。锚杆式基础是通过桩帽连结塔架法兰和锚杆,并通过锚杆将基础牢固锚固在岩土介质的基础结构形式,图 3 是锚杆式风机基础的示意图。

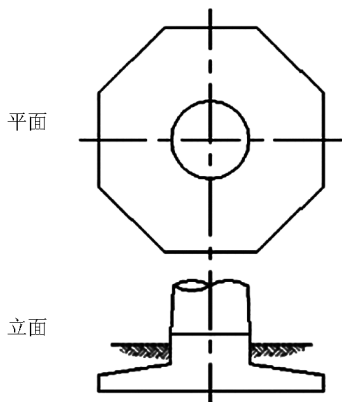


图1 陆地风场重力式基础
Fig.1 Onshore gravity foundation



图2 重力式基础施工
Fig.2 Construction of gravity foundation
注: 源自 RES Americas

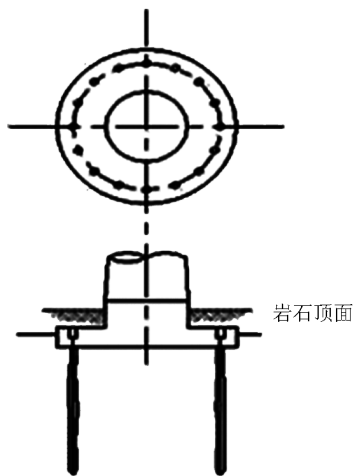
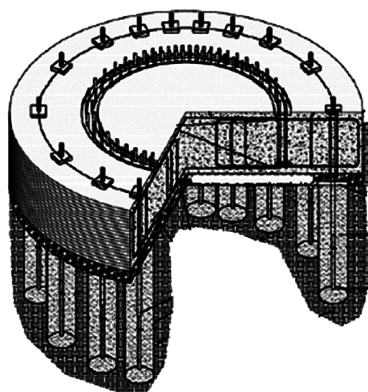


图3 陆地风场锚杆基础

Fig.3 Onshore rock/soil anchor foundation



除了这两种经典的基础结构形式外, 还有一些工程咨询公司推出了获得专利的风机基础结构。图4是获得美国专利的P-H基础正在施工的照片。



图4 在施工的P-H基础
Fig.4 Construction of P-H foundation
注: 源自 RES - Americas

该基础用双层同心的镀锌板构成混凝土结构的永久外壳, 并埋进岩土介质。双层镀锌板内设置配筋, 地脚螺栓也预埋进混凝土内。该基础结构施工简单,

混凝土和钢筋用量较少, 经济效益较好。

风机基础是风力电场项目中比较大的土木工程项目。如果设计保守, 造价会放大猛增; 如果设计欠缺, 问题会在运营中出现, 导致不可挽回的损失。因此, 开发经济实用、可靠的基础结构非常有利于风力电场的建设。

3 荷载、设计荷载系数和荷载组合问题

长期的风速均值和分布以及风切变都是对风能产量至关重要的考虑因素, 风速荷载预测一般通过现场量测并把量测结果、历史记录以及其他地形、土壤粗糙度、植被情况等输入软件进行各种风力数据的分析和模拟^[4]。风机制造商会风机运转和待机两种情况下对10 min的速度均值做大量的荷载模拟, 并考虑不同规范、不同安全系数下用数理统计手段决定设计荷载。因此, 对土木工程, 尤其是风机基础工程设计, 最好直接采用风机制造商提供的数据。

模拟的风荷载一般分为 Abnormal, Extreme 以及 Operating 荷载。Abnormal 荷载指不太可能遇到的非正常荷载,如大飓风等。Extreme 荷载指风机设计寿命期 50 年内可能遇到的唯一一次荷载,因此他们比一天、一周、一个月反复遇到的荷载(一般指运行荷载)一般要大很多^[11]。文献[8] 模拟结果显示月平均荷载可能是 Extreme 荷载的 16% ~ 60%。但同时也指出,运行荷载有时也大于 Extreme 荷载,特别是在大陆气候的待机状态下。因此选用设计荷载要根据风机制造商提供的荷载情况、设计规范以及风电项目具体的工程情况决定。

表 1 总结了国内外规范对风荷载荷载系数的规定。风机制造商不提供荷载组合模式,因此应根据土木类相关规范进行。

表 1 国内外规范中风荷载的荷载系数取值^[12-16]

规范	设计方法			
	承载能力极限状态		正常使用极限状态	
	风荷种类	风荷种类	风荷种类	风荷种类
IEC 61400 - 01	1.35	Extreme load	1.1	Abnormal load
European concrete code	1.5	Extreme load	1.0	Extreme load
British standard 8110	1.4	Extreme load	1.05	Extreme load
BAEL 91	1.5	Extreme load	1.0	Extreme load
ACI 318	1.30/	Extreme load	—	—
	1.61 *		0.6/	Extreme
GB - 50009	1.4	Extreme load	0.4/	load **
			0.0	

注: * 当不考虑风向系数时取 1.3,考虑风向系数取 1.6,规范没有明确说明但隐含是极限应力状态; ** 文中表述为五十年一遇的风荷载,因此属于 Extreme load,正常使用极限状态时的不同系数取决于不同的荷载组合

4 有关风电中土木类的设计规范讨论

根据笔者对国内外风电项目相关文献的了解,与风电中土木工程问题有直接关系的比较流行的规范和指导手册目前有两个,文献[7] 和文献[12],但也仅仅是其中的几个章节有所涉及。文献[7] 是丹麦罗素国家实验室就风力发电颁布的一部指导手册,内容涉及到了风机制造和安装等内容。文献[12] 则是国际电力委员会就风电颁布的一部标准,为保证风电设施的安全运行,在其中对土木工程问题做了一些规定和要求。在风电建设中,从设计到施工各个环节的土木工程往往需要参照、结合国际或者当地的有关规范,比如除了上面的有关讨论外,连结塔架法兰和基础结构的地脚螺栓抗拔验算一般按美国混凝土协会针对核电建设的混凝土结构规范执行,而风荷载导致的地脚螺栓的受力分析借用美国土木工程学会颁布的针对石油化工工业的风荷载和地脚螺栓设计指导手册。

从上文讨论可看出有关规范、标准、指导文件众多不一,世界各地使用规范的工程师水平也参差不齐,在荷载、材料强度系数等选取上常常发生一些歧义,会导致设计过于保守或造成工程事故。欧洲和美国风电项目中的部分工程事故见图 5。截至目前,我国还没有一部专门的规范或者指导手册,因此在借鉴国外规范、指导手册的基础上,针对我国风电中的土木工程编制有关规范或者指导手册类的文件将对我国的风电事业有比较重大和现实的意义。



图 5 风电项目中的工程事故

Fig. 5 Mis design caused accidents in wind projects

5 对风电项目中一些研究问题的思考

风力发电技术涉及的学科广,而且发展迅速,需实时关注、跟踪本学科的准确动态。根据笔者等对

文献和行业动态的了解,目前引起业界重视的基础性和应用性的关键技术问题包括:风能资源普查和评估技术,风电场发电量预测技术(实质是风速预测技术)、风力发电全系统仿真技术、风机、叶片的

制造技术和新材料的应用、风电系统的结构动力分析、风电并网及稳定性技术,海上风电技术包括陆地风场工程设计和施工等^[17~19]。针对前两个地方特色明显的问题,做了如下思考和讨论:

5.1 风资源量测、风资源评估和风速预测问题

风资源量测和评估技术早就有之,问题的关键是量测和评估的精度。影响风资源量测和评估精度的因素包括设备偏差、量测时间、高度以及数据处理问题。风速测量设备包括风速计、风向标和数据记录器等。目前国内外均有制造,但精度不一,因此对设备应进行测试、评估,在量测中尽量用高精度的设备。为建设一个风力发电场,国外要现场持续量测风速3年,积累大量资料,并在分析软件中输入40年的历史测风数据和具体场地的数据,测风塔的高度一般不低于50 m。近年来随着技术引进,我国在风资源量测技术方面进步很快,但国内在风况数据的积累,特别是风况历史资料的积累方面与国外还有一定的差距。

在近岸风资源的量测技术上,文献[20]指出1990年前用于近海风能的现场测风资料是很少的,多数风资料是从气象观测、船只观测以及海洋石油平台上的观测资料获得。文献[21]评述说用海洋测风塔或者气象塔搜集的海洋风速数据比较零散,互不关联,因此用海洋测风塔收集到的风况资料是否适合用来建设海洋风场是个疑问。文献[9]报道中国长江三峡集团公司利用建设在江苏响水附近的海洋测风塔收集测风速数据和海洋数据;而在国外,近几年来卫星遥感技术(satellite borne remotesensing)已被用来导出、评价临近海平面的风速资料和风资源^[22],这其中包括安装在美国NASA的Quick-SCAT卫星上的海洋测风器(sea wind scatterometer),欧洲空间署ERS1/2卫星上的合成孔径雷达(synthetic aperture radars, SAR),以及安装在ESA Envisat卫星上的改进合成孔径雷达(advanced synthetic aperture radars, ASAR),文献[20~29]对这些技术的应用和精度做了详细的评估,结论是这些技术的突出优点是观测范围广,局限是需要截取大量的数据和图像以保证精度,用SAR方法量测海平面10 m以上风速偏差可以控制在0.35 m/s,均方差2 m/s,和现场观测数据的相关度达到90%,但近岸风机的高度一般在海平面100 m左右,在竖向上怎么外推风速仍具有挑战性。

风资源的评估主要有应用现场风速的量测和数

值模拟两种技术。现场风速量测包括气象站的资料和风场测风塔的监测资料^[30,31]。风力发电量是和风速呈立方关系,风速和高度又呈指数相关关系^[32,33],因此风场中风速的些许变化会引起输出风电的较大波动。文献[30]指出由于国内现有的气象观测站的观测高度,地域分布密度和分布间距,以及多数处在城市边缘位置等原因,基于气象站观测资料的风能资源评估还不能满足中国制定风电发展规划对风能资源评估的需求。国外一般建立不同高度的测风塔(如印度一般用20~25 m的测风塔,欧洲、美国一般用50 m以上的测风塔)进行监测,然后用专门数值分析和模拟软件结合现场测风数据、历史数据(气象资料)以及场地的地貌、气候等进行风资源的评估^[33]。在数值模拟方面,又分为中尺度(mesoscale,大于5 km间距)和微尺度(风力电场尺度,1 km或者小于1 km尺度),有关软件在国际上有丹麦的WAsP微尺度风场数值模拟软件,美国的中尺度MesoMap和微尺度的SiteWind数值模拟和分析软件;文献[32]报道加拿大气象局将中尺度模式MC2与小尺度模式Ms2micro相结合建立了WEST(wind energy simulation toolkit)数值模式系统,制作了加拿大5 km × 5 km分辨率的风能资源图谱,并对部分地区进行了1 km × 1 km的风能资源数值模拟。在国内,中山大学在科技部“863”计划的支持下开发了基于中尺度数值分析模式和地理信息系统的风电场风能资源评估软件系统;2005年中国气象局风能太阳能资源评估中心引进了加拿大气象局风能资源数值模拟系统,在此基础上经过本地化的改进后,建立了中国气象局风能资源数值模式系统,并用来模拟分析了江苏省和青海省的风力资源^[32]。

上述工作的目的是为了较准确地预测风速,从而预测风力发电量。文献[28,31]指出冯卡门反应谱对风洞中的湍流描述比较好,实际上冯卡门湍流理论正是微尺度风力数值模拟的基础,而中尺度主要采用气象模型。但风资源最大的一个特点是变化性,风速会随时间、气候和地理因素的变化而变化,量测的手段、设备和软件的分析水平也对风资源的量测、评估以致预测误差有重要的影响。因此,在冯卡门基本理论的基础上,这些数值模拟分析技术采用了一些数学手段来降低预测的不定性和误差。这些数学技术包括:a. 算术平均。b. 基于时间序列分析的ARMA模型。c. 基于时间序列分析的ARX模

型和递归最小二乘法的耦合方法等^[30,34~36]。国内文献鲜有数学处理方法上的报道。

从以上分析来看,我国的风资源量测和评估在设备和数据处理技术上与国外相比存在差距,尤其是在风况历史数据的积累方面,差距较大。风力发电在中国会有一个相当长的发展期,因此笔者等建议认真做好国内的风资源的量测和评估,尽可能多地设立测风塔,做好风况数据的积累和分析工作。在有关数据处理的理论方法上,除了在数值模拟分析中提及的数学方法外,应用贝叶斯方法处理不定性并做出风力预测,并结合其他数学手段开发国产风力模拟分析软件可能会是一个比较合适的方向。

5.2 全国和地区级的风资源数据库和风资源分布图

国外风资源的量测数据和评估结果都存进数据库并输出到基于 GIS 的图形上。文献[30]指出美国可再生能源实验室对中国的东南地区风力资源做了分析并形成了分布图,丹麦 Risø 新能源实验室也用卫星 SAR 方法对中国广东、福建两省风资源进行了量测和评估^[37]。国内不少人士也呼吁建立基于 GIS 系统的风资源数据和评估系统^[38]。根据网上调查,国内已有风资源分布图但版本不同,颁布单位不同,地域范围不同,精确度也广受怀疑。根据美国的经验^[39],笔者等认为建立全国性、多层次、多级别的风资源数据库和资源分布图非常必要,具体工作宜由国家专职部门牵头,研究单位和私人咨询公司联合参加,并将有关测风数据用国内开发和国外通用的数值模拟系统进行验证,以保证工作的质量和数据、图像的可靠性。

6 结语

中国的风电建设给开发具有自主知识产权的制造技术、仿真技术、模拟分析和预测技术、工程设计、施工技术提供了机遇和挑战。在研究攻关的同时,应投入人力、物力做好风力资源的量测和评估,建立永久的数据库,储备相关图形文件,在这些技术领域做到专业、规范,并形成可靠的、成熟的、具有自主知识产权的技术体系,以便我国更好地利用风力资源。风力电场的建设在考虑风资源和电量输出的同时,也应考虑土地的综合利用,充分利用沿海滩涂、湖泊坡地等。目前陆上风场的建设比较多,但同时也应跟踪研究近岸风场的一系列技术。

参考文献

- [1] Global wind energy council. A blueprint to achieve world's 12 % electricity from wind power by 2020 [R] . Washington D. C. : Global Wind Energy Council, 2005.
- [2] 111th United States Congress. American Recovery and Reinvestment Act of 2009[M] . Washington D. C. : Global Wind Energy Council, 2009.
- [3] Fontes A F. Soil albedo in relation to soil color, moisture and roughness[D] . USA: the University of Arizona, 1996.
- [4] Renewable energy system Americas[R] . USA: Internal Document, 2006.
- [5] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318 - 05) and commentary (ACI 318R - 05) [S] . USA, 2005.
- [6] Wang D. Ground modulus measurement and interpretation for wind turbine foundations[C] //Proc. 17th International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Egypt, 2009.
- [7] Risø national laboratory. Guidelines for design of wind turbines [S] . Denmark, 2003.
- [8] Bonnet D. Wind turbine foundations - loading, dynamics and design, presented to evening meeting[C] //17 February 2005 at IStructE. London: 11 Upper Belgrave Street, 2005.
- [9] 张超然,李婧,刘星.海上风电场建设重大问题探讨[J] .中国工程科学,2010,12(11):10-15.
- [10] National Cooperative Highway Research Program. Design of pavement structures[S] . USA: AASHTO, 1993.
- [11] Peterka J, Shihad S. Design gust wind speeds in the United States [J] . Journal of Structural Engineering, 1998, 124(2): 207-214.
- [12] International Electrotechnical Commission. Wind turbine generator systems - part 1: safety requirements[S] .
- [13] Eurocode 2: design of concrete structures[S] . DD ENV 1992 - 1 - 1: 1992.
- [14] British standard 8110 - 1997 and 1985 [S] .
- [15] Règles BAEL 91 révisées 99, février 2000 [S] . DTU P 18 - 702.
- [16] 中华人民共和国建设部. 建筑结构荷载规范, GB50009 - 2001[S] .北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [17] 王晓蓉, 王伟胜, 戴慧珠. 我国风力发电现状和展望[J] .中国电力, 2004, 37(1): 81-84.
- [18] 于建辉, 周浩. 我国风力发电现状及展望[J] . 风电技术, 2006, 6: 46-50.
- [19] 张新房, 徐大平, 吕跃刚, 等. 风力发电技术的发展及若干问题[J] . 现代电力, 2003, 20(5): 29-34.
- [20] Sempreviva A M, Barthelmie R J, Pryor S C. Review of methodologies for offshore wind resource assessment in european seas [J] . Surveys in Geophysics, 2008, 29(6): 471-497.
- [21] Yan D, Kozai K. Literature review on evaluation methods of offshore wind energy resources in China[R] . Japan: Kobe University, 2011.
- [22] Pimenta F, Kempton W, Garvine R. Combining meteorological stations and satellite data to evaluate offshore wind power resources

- in Southeastern Brazil[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(11): 2375 – 2387.
- [23] Christensen M B, Koch W, Horstman J, et al. Wind resources assessment from C – band SAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(1): 15.
- [24] Quilfen Y, Chapron B. The ERS scatterometer wind measurement accuracy: evidence of seasonal and regional biases[J]. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 2001, 18(10): 1684 – 1697.
- [25] Sempreviva A M, Barthelmie R, Giebel G, et al. Offshore wind resource assessment in european seas[J]. *Surveys in Geophysics*, 2007, 29(6): 471 – 497.
- [26] Christophe A, Stefano Z, Alfredo L, et al. Comparison of 10 – M wind forecasts from a regional area model and quikscatscatterometer wind observations over the mediterranean sea [J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(5): 1945 – 1959.
- [27] Lehner S, Horstmann J, Koch W, et al. Mesoscale wind measurements using recalibrated ERS SAR Images [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C4): 7847 – 7856.
- [28] Petersen E L, Mortensen N G, Landberg L, et al. Wind power meteorology, part I: climate and turbulence [J]. *Wind Energy*, 1998, 1(1): 2 – 22.
- [29] Petersen E L, Mortensen N G, Landberg L, et al. Wind power meteorology. part II: siting and models [J]. *Wind Energy*, 1998, 1(1): 55 – 72.
- [30] 李泽椿, 朱 蓉, 何晓凤, 等. 风能资源评估技术方法研究 [J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 708 – 717.
- [31] Shikha Singh, Bhatti T S, Kothari, et al. A review of wind resource assessment technology[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2006, 132(1): 8 – 14.
- [32] Justus C G, Mikhail A. Height variation of wind speed and wind distributions statistics[J]. *Geophysical Research Letters*, 1976, 3(5): 261 – 264.
- [33] Johnson G L. *Wind Energy System* [M]. USA: Electronic Version, 2006.
- [34] Bossanyi E A. Short term stochastic wind prediction and possible control applications [C]// *Proceedings Delphi Workshop on Wind Energy Applications*. USA: Pacific Northwest Labs, 1985.
- [35] Kariniotakis G, Nogaret E, Stavrakakis G. Advanced short term forecasting of wind power production[J]. Ireland: *Proceedings European Wind Energy Conference*, 1997.
- [36] Nielsen T L, Madsen H. Experiences with statistical methods for wind power prediction [R]. France: *European Wind Energy Conference*, 1999.
- [37] Badger M. Satellite SAR wind resource mapping in China[S]. Roskilde: Risø National Laboratory for Sustainable Energy Technical University of Denmark, 2009.
- [38] 余 志, 李晓燕, 邓院昌. 建立基于 Web GIS 的风资源分析与评估系统[C]//第十四届水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2004.
- [39] Elliott D, Schwartz M, Scott G, et al. Wind resources assessment and mapping [S]. American: NREL/NWTC, 2007.

Civil engineering issues and researches in wind projects

Wang Dongyuan¹, Wang Sijing²

(1. Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384; 2. Tsinghua University, School of Civil Engineering, Beijing 100084)

[Abstract] This paper discusses the fundamental issues for wind energy focusing on civil engineering, including reducing construction cost, establishing relevant standards and codes, measuring wind speed and forecasting energy output and mapping wind resources. This paper concludes that as China will have a long period for wind energy development and project construction, it is important to establish guidelines of civil engineering for wind projects, to develop wind measuring and forecasting technique with proprietary intellectual property rights of China, and to survey wind resources and to map the results in nation scale and province scale. This paper also prospects researches and land usage for wind projects in accordance with conditions of China and characteristics of wind projects which are beneficial for wind energy development in China.

[Key words] wind energy; wind project construction; wind measurement; mapping