



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风电功率 预测技术与实例分析

FENGDIAN GONGLV
YUCE JISHU YU SHILI FENXI

主 编 王 桓 徐龙博
副主编 周 冰 张治频



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风电功率 预测技术与实例分析

主 编 王 桓 徐龙博
副主编 周 冰 张治频



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一,较为全面系统地介绍了风电功率预测技术及其应用情况。其内容主要包括:风电产业与风电功率预测技术的发展沿革;风电功率预测技术的原理和预测方法,包括物理模型以及统计模型;风电功率预测系统硬件部分的技术细节,包括总体设计、主机与通信系统、测风塔的组成、防雷与选址、安防系统;风电功率预测系统软件,包括软件架构及开发工具、核心算法及开发工具、数据库等;简单介绍了国内外风电功率预测系统;并对风电功率预测系统进行实例分析。本书力求传播风电功率预测的相关知识,并试图为风电功率预测系统的设计和制造提供技术路线图。

本书可作为高等院校相关专业学生的学习、参考书,也可供风电从业人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

风电功率预测技术与实例分析 / 王桓, 徐龙博主编

— 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 1

(风力发电工程技术丛书)

ISBN 978-7-5170-4212-9

I. ①风… II. ①王… ②徐… III. ①风力发电—功率—预测 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第063616号

书 名	风力发电工程技术丛书 风电功率预测技术与实例分析
作 者	主编 王桓 徐龙博 副主编 周冰 张治频
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.25印张 196千字
版 次	2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《风力发电工程技术丛书》

编委会

顾问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主任 徐辉 毕亚雄

副主任 汤鑫华 陈星莺 李靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 尹廷伟 申宽育 冯树荣

刘丰 刘玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙强

孙志禹 李炜 李莉 李同春 李承志 李健英

李睿元 杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈刚

陈党慧 陈澜 林毅峰 易跃春 周建平 郑源

赵生校 赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施蓓

洪树蒙 祝立群 袁越 黄春芳 崔新维 彭丹霖

董德兰 游赞培 蔡新 糜又晚

丛书主编 郑源 张燎军

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学
中国长江三峡集团公司
中国水利水电出版社
水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心
华北电力大学
水电水利规划设计总院
水利部水利水电规划设计总院
中国能源建设集团有限公司
上海勘测设计研究院
中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司
中国水电顾问集团西北勘测设计研究院有限公司
中国水电顾问集团中南勘测设计研究院有限公司
中国水电顾问集团北京勘测设计研究院有限公司
中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院有限公司
长江勘测规划设计研究院
中水珠江规划勘测设计有限公司
内蒙古电力勘测设计院
新疆金风科技股份有限公司
华锐风电科技股份有限公司
中国水利水电第七工程局有限公司
中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司
中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司
中国三峡新能源有限公司

丛书总策划 李 莉

编委会办公室

主 任 胡昌支
副 主 任 王春学 李 莉
成 员 殷海军 丁 琪 高丽霄 王 梅 单 芳
白 杨 汤何美子

本书编委会名单

主 编：王 桓 徐龙博

副主编：周 冰 张治频

参 编：李煜东 周 伟 谭茂强 汪少勇

杨 莉 高 斌



前言

随着传统能源储量日益枯竭,传统能源的使用造成的环境问题日益严重,可大规模开发利用又清洁环保的可再生能源的发展成为了世界各国关注的焦点。在各种可再生能源中,风能是在现有技术条件下最有潜力成为新能源支柱的能源,但风能也存在着不稳定性特点,这是风电大规模接入电网的最大障碍。当前,风电功率预测是解决以上问题的有效手段,准确地预测风电功率有助于电力管理部门提前制定调度计划,同时提高电网的安全性和风电的经济性。

风电功率预测系统是一个复杂的综合性工业系统,其中包含了信息采集、通信、数据挖掘、计算机软硬件等多方面的技术。为了让读者了解风电功率预测系统的全貌,本书全面系统地介绍了风能发展前景及存在的问题、风电功率预测的必要性、风电功率预测的物理模型、风电功率预测的统计模型、风电功率预测系统的功能与结构,并结合实例分析了风电功率预测各种模型的适用性,力图为风电行业从业者提供建构风电功率预测系统的完整技术路线,同时也可作为大专院校学生的技术参考资料。

本书共分5章,第1章主要介绍风能的背景知识,包括当前世界与我国的能源结构及存在的问题,风能的前景及面临的问题,风电功率预测系统的必要性和发展现状,风的形成原理及风在各种地形影响下的场域特点;第2章介绍风电功率预测的物理模型,首先介绍物理模型的基本思想,然后依据基本思想展开介绍数值天气预报的基本知识,以及物理模型的建模流程;第3章介绍风电功率预测的统计模型,依据分类分别介绍神经网络、支持向量机和混沌模型的具体建模方法,并依据实际风电场数据分别使用以上三种模型进行

了建模预测；第4章介绍风电功率预测系统的功能与结构，首先介绍风电功率预测系统的基本功能要求，然后围绕基本功能介绍系统软硬件的构成，最后介绍国内外比较典型的风电功率预测系统；第5章是典型风电场风电功率预测系统实例分析，分别选择沿海、山地和平原的典型风电场，介绍其气候特征，并分析各种风电功率预测模型的地形适应性。

在本书写作的过程中，相关风电场和设备厂商提供了大量资料，在此表示感谢。此外本书也参考了大量的论文专著，在此特向这些论文专著的作者表示感谢。

限于作者的水平，书中难免存在瑕疵，请各位读者谅解并批评指正。

作者

2016年1月



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风电产业发展概况	1
1.1.1 世界能源产业现状及发展趋势	1
1.1.2 中国能源产业现状及发展趋势	2
1.1.3 风电产业发展现状及展望	3
1.1.4 我国风力发电产业发展现状及展望	5
1.2 我国风电产业快速发展中的问题	6
1.2.1 电网消纳能力不足	6
1.2.2 政策支持前景不确定	6
1.2.3 技术水平制约	7
1.3 风电功率预测的价值和意义	7
1.4 风电功率预测技术发展现状	8
1.5 风电功率预测技术原理及发展前景	8
1.5.1 风电功率预测技术原理	8
1.5.2 风电功率预测技术发展前景	9
1.6 风的形成与地形对风的影响	9
1.6.1 风的形成	10
1.6.2 大气边界层风场的形成	10
1.6.3 山区的近地风场	12
1.6.4 沿海地区的海陆风	13
1.7 小结	14
第 2 章 风电功率预测的物理模型	15
2.1 基本思想	15
2.2 数值天气预报	16
2.2.1 中小尺度的 MM5 模式	19

2.2.2 WRF 模式	22
2.3 风电场的局地建模方法	24
2.3.1 粗糙度估算	24
2.3.2 尾流模型	26
2.3.3 基于地形的风电场建模	28
2.4 风电功率映射算法	29
2.5 小结	31
第 3 章 风电功率预测的统计模型	32
3.1 基本思想	32
3.2 神经网络模型	33
3.2.1 神经网络基本原理	33
3.2.2 BP 神经网络	35
3.2.3 实例分析	36
3.3 支持向量机模型	39
3.3.1 支持向量机原理	40
3.3.2 基于 SVM 的风电功率预报建模	43
3.4 混沌模型	45
3.4.1 混沌预报基础理论	45
3.4.2 混沌风电功率预报实例分析	53
3.5 小结	55
第 4 章 风电功率预测系统的功能与结构	56
4.1 风电功率预测系统的基本功能	56
4.1.1 建模基础数据要求	56
4.1.2 数据采集与处理	56
4.1.3 预测功能要求	58
4.1.4 数据的统计分析要求	59
4.1.5 软件界面要求	59
4.1.6 安全防护要求	60
4.1.7 数据上报要求	60
4.1.8 性能要求	60
4.2 风电功率预测系统的硬件设计	61
4.2.1 典型硬件设计方案	61
4.2.2 主机和通信系统	61
4.2.3 测风塔系统	62
4.2.4 安全防护系统	72
4.3 风电功率预测系统的软件设计	74
4.3.1 基本功能	75

4.3.2 软件架构与开发工具 75

4.3.3 核心算法与开发工具 79

4.3.4 数据库系统的设计 82

4.4 典型风电功率预测系统简介 85

4.4.1 国外系统简介 85

4.4.2 国内系统简介 88

4.5 小结 98

第5章 典型风电场风电功率预测系统实例分析 99

5.1 分析对象、方法和工具 99

5.1.1 分析对象 99

5.1.2 分析方法 99

5.1.3 分析工具 99

5.2 沿海风电场实例分析 100

5.2.1 基本情况 100

5.2.2 系统运行分析 101

5.3 山地风电场实例分析 105

5.3.1 基本情况 105

5.3.2 系统运行分析 106

5.4 平原风电场实例分析 110

5.4.1 基本情况 110

5.4.2 系统运行分析 111

5.4.3 风电功率的时变特征 112

5.5 小结 114

附录 测风塔技术参数 115

参考文献 118

第 1 章 绪 论

1.1 风电产业发展概况

能源是人类社会存在和发展的基础，随着经济的不断快速发展，人类对能源的需求更加迫切，导致能源的供给日趋紧张；巨量一次能源的使用也造成了越来越严重的环境污染，这也是人类在可持续发展过程中亟须解决的问题。

1.1.1 世界能源产业现状及发展趋势

当前世界能源消费以煤炭、石油、天然气等化石能源为主，根据英国石油公司（BP）发布的 2014 年世界能源统计报告，2013 年世界能源消费结构统计数据见表 1-1。

表 1-1 2013 年世界能源消费结构表

能源种类	石油	天然气	煤炭	核能	水电	其他	总量
消费量（油当量）/Mt	4185.1	3020.4	3826.7	563.2	855.8	279.3	12730.5
比例/%	32.87	23.73	30.06	4.42	6.72	2.20	100.00

从表 1-1 中数据可见，煤炭、石油、天然气等化石能源仍是世界能源消费中的主要支柱，三项能源总占比为 86.66%。石油仍然是世界主导性能源，2013 年占一次能源消费的 32.87%，但其占比已连续 14 年下降。2013 年，全球石油消费为 140 万桶/日，增速为 1.4%，略高于历史平均水平，探明储量为 16879 亿桶（2382 亿 t），可以满足全球 53.3 年的需求。作为重要的一次能源，2013 年天然气占一次能源消费的 23.73%，天然气消费量增长 1.1%，远低于 2.6% 的历史平均水平，探明可采储量为 185.7 万亿 m³，按目前开采速度可供全球开采 54.8 年。2013 年，煤炭占一次能源消费的 30.06%，全球煤炭消费 38.3 亿 t 油当量，增长 3%，全球煤炭探明储量为 8915 亿 t，可以保证全球 113 年的生产需求。值得一提的是，本世纪第二个十年兴起的“页岩气革命”对现有能源消费结构造成了一定的冲击。据美国能源信息署（EIA）的估算，全球页岩气可采储量达 187.51 万亿 m³，相当于已探明常规天然气的储量。如果将包括页岩气在内的非常规天然气都计算在内，全球可采储量更是高达 921 万亿 m³，接近常规天然气储量的 5 倍。这种新变化一方面在短期内有效地缓解了世界能源的供需矛盾，是 2014 年年底石油价格暴跌的重要推手；另一方面，大量非常规天然气的开采预示着天然气有可能在未来取代石油成为世界的主导性能源。

核能本被认为可能取代化石能源成为世界能源版图中新的支柱，但 2011 年福岛核电站泄漏事故使世界核能发展普遍陷入低迷。2013 年，核能产量占全球能源消费的 4.4%，为自 1984 年以来的最小份额。许多国家，包括我国都暂停了核能发展计划，德国甚至在

福岛事故后关停了国内 17 座反应堆。核裂变原料铀矿石的储量理论上极其丰富,但其分布很不均衡,且各产地矿石品质和开采成本相差极大。最新调查显示,地球已知常规天然铀储量,其开采成本低于每千克 130 美元的铀矿储量仅有 459 万 t,仅可供全世界现有规模核电站使用 60~70 年。2013 年,水力发电占全球能源消费量的 6.72%,全球水力发电量 8.558 亿 t 油当量,增长了 2.9%,其中以中国和印度为首的亚太地区占了全球 78% 的增长量。2013 年,可再生能源的增速持续提高,达到了创纪录的 2.7%,从全球范围来看,风能增加了 20.7%,占可再生能源发电增长的一半以上,太阳能光伏发电增长更为迅速,增加了 33%,但这是由于原有基数就处于较低水平。

综上所述,化石能源仍将是未来一段时间内能源消费版图中的支柱,其他能源短期内难以取代。但随着人类能源消费的不断增长,化石能源储量日益枯竭;同时巨量化石能源燃烧造成的环境污染是另一个亟须解决的问题。工业革命以来,各种化石能源的大量使用推动了世界经济发展和社会进步,同时也极大地影响了全球二氧化碳排放量和全球气候。据气象学家估算,陆地植物每年经光合作用固定吸收的二氧化碳为 200 亿~300 亿 t。而仅化石能源人为燃烧就产生二氧化碳 370 亿 t,加上生命呼吸、生物体腐败及火灾等产生的二氧化碳,严重超过植物光合作用吸收转化二氧化碳的量,破坏了自然界的二氧化碳循环平衡,已经开始造成保护地球的臭氧层破坏和其他一些反常现象。除了二氧化碳,燃烧中产生的二氧化硫和二氧化氮等有害气体同样造成了严重的污染。当前对化石能源需求最旺盛的是中国和印度,两国大城市的严重雾霾与快速增长的化石燃料消耗密切相关。核能发电在正常运行时所产生的环境污染微乎其微,但核废料的处理一直是个棘手的问题,而且在世界范围内,几乎每隔 10 余年总会发生一次大规模的核泄漏事故,如苏联的切尔诺贝利核电站事故、美国三里岛核电站事故、日本福岛核电站事故等,这些事件都给当地的生态造成了毁灭性的打击。

当前世界能源结构及其造成的问题迫使人类寻找新的能源解决方案,于是太阳能、风能、生物质能和潮汐能等可再生能源逐步进入人类视野。这些新能源都有各自局限性,综合而言,只有风能有潜力在短期内有效替代化石能源,成为人类能源版图中的另一个支柱。

1.1.2 中国能源产业现状及发展趋势

根据英国石油公司(BP)发布的 2014 年世界能源统计报告,2013 年中国能源消费结构统计数据见表 1-2。

表 1-2 2013 年中国能源消费结构表

能源种类	石油	天然气	煤炭	核能	水电	其他	总量
消费量(油当量)/Mt	525.2	147.9	1933.1	25.0	206.3	42.9	2880.4
比例/%	18.23	5.14	67.11	0.87	7.16	1.49	100.00

由于经济多年快速增长和巨大的人口基数,我国能源消费已连续数年保持世界第一,2013 年我国耗能共计 2880.4Mt 油当量,占世界总消费量的 22.6%。在我国能源消费结构中,化石能源同样占据统治地位,三项总占比为 90.48%,与世界水平相当,但我国能源结构也有自身的特点。在我国能源消费的版图中,煤炭占比虽然逐年下降,但仍居于绝



对主导地位,2013年煤炭消费量仍占总消费量的三分之二。2013年年底,我国煤炭探明储量为1145亿t,占世界煤炭探明储量的12.8%,储采比为31。由于我国煤炭储量相对丰富,且成本较为低廉,因此煤炭的主导地位在未来的20年内不会发生根本的变化。近年来,我国石油消费快速增长,2013年,我国石油消费增速略有放缓,在总消费量中占比18.23%,仅次于美国,居世界第二位。截至2013年年底,中国石油探明储量为181亿桶(25亿t),占世界石油探明储量的1.1%,储采比为11.9。由于国内石油产量远不能满足需求,因此我国进口石油比例逐年提高。我国天然气消费量在总体上较低,但近年来增长迅猛,前几年年增幅均超过20%,2013年增速为10.8%,虽有所放缓,但仍在世界范围内一枝独秀。截至2013年年底,中国天然气探明储量为3.3万亿 m^3 ,占世界天然气探明储量的1.8%,储采比为28。但如果考虑页岩气,我国天然气储量应有更大的潜力。

我国核能发展起步较晚,且对核能发展态度较为谨慎,因此核能发电占比一直很低。针对化石能源,特别是煤炭占主导地位的情况,我国原本制定的核电发展规划,但由于福岛核事故的影响,内陆已规划的核电一度搁置,核电建设计划的推进更加谨慎,短期内我国核电仍将是能源消费结构中的绝对配角。2013年,我国水力发电量2.063亿t油当量,增长了5.9%。同时我国将在西南的怒江和雅鲁藏布江流域兴建一系列的梯级水电站,水电占比仍将继续提高。但此处水电站离负荷中心较远,且其对流域生态环境的影响也是公众关注的焦点。其他可再生能源,特别是风力发电,虽暂时占比不高,但近年来却发展极快,2010年和2011年增速都达到了40%以上,基本上2年就翻了一番。2013年,我国新增安装风电机组9356台,新增装机容量16088MW,同比增长24.1%;累计安装风电机组63120台,装机容量91413MW,同比增长21.4%。新增装机容量和累计装机容量两项数据均居世界第一。预计到2020年,我国风电装机总容量将达到200GW。

综上所述,我国能源消费结构具有的特点如下:

(1) 总能耗巨大,而且还在快速增长,在化石能源之外,我国迫切需要寻找新的能源增长点。

(2) 能源结构存在较大问题。我国是世界上少数几个以煤炭为主要能源的国家之一。虽然煤炭储量丰富,但地理上主要分布在山西、内蒙古地区,使煤炭的运输成为一个难题;且煤炭燃烧产生大量的二氧化碳和二氧化硫,使我国承担着越来越大的环保和碳减排压力;对比美国,其煤炭储量较我国更加丰富,但为了避免环境污染,美国更倾向于进口相对清洁的石油和开采天然气,其煤炭耗能占比一直较低。近年来随着汽车业的快速发展,我国对原油的需求也随之快速增长,由于国内产油量难以快速提升,因此石油对外依存度不断提高,至2013年,我国石油对外依存度为58.1%,2013年10月我国石油进口总量首次超过美国,成为全球最大石油净进口国。相对清洁的天然气消费增长很快,但原有基数不大。核电建设几近搁浅,水电发展潜力有限,要实现能源破局就需要在新能源领域,特别是风电领域有所作为。

1.1.3 风电产业发展现状及展望

风能利用的历史悠久,但大规模风力发电真正起步于20世纪70年代。西方发达国家



迫于石油危机的压力,不得不寻求新能源以降低对石油的依赖,因此投入大量人力物力用于研发风力发电相关技术,并于80年代建立示范风场。80年代中期以后,风电技术迅速成熟,并快速进入商用阶段。特别是欧洲,如丹麦、德国、法国等,为实现减排温室气体的目标,对风电执行较高收购电价的激励政策,促进了风电技术的研发和产业的发展,风电成本得以迅速下降。

欧洲是风电产业的先行者,数十年的努力已结出累累硕果。2013年,丹麦新增风电装机容量657MW,累计装机容量4772MW,风力发电量在全国电力消费中占比高达33%。近年来,德国非常重视新能源的发展,在关闭核电和限制火电的同时,大力发展风电产业。2013年,德国装机容量稳步增长,新增装机容量3238MW,累计装机容量达34.25GW,占世界装机总量的10.8%。由于国内政策相对稳定,产业链齐整,德国风电未来的发展前景依然将保持稳健态势。根据2014年德国政府修订的可再生能源法,到2025年可再生能源在总能源结构中的比例将达到40%~45%,到2035年目标占比为55%~60%。另一个表现突出的国家是英国,该国已成为海上风电的第一大国。2013年新增装机容量1883MW,其中39%为海上风电。海上风电累计装机容量3681MW,占整个欧洲海上风电装机容量的一半。风电在国家能源结构中也日益重要,2013年风电产生的电力占英国全国电力生产的7.7%。截至2013年年底,欧洲累计风电装机容量达到121.4GW。虽然受到经济危机的冲击,意大利、法国和西班牙减弱了对风电的政策支持,但风电在欧洲电力供应的比例仍逐年稳步提高,其中2011—2013年分别为6.3%、7%和8%。

北美是另一个风电发展的热点地区。截至2013年年底,美国风电累计装机容量达61GW,占世界总装机容量的19.2%,仅次于我国居世界第二位。但由于PTC(生产税收减免)政策的反复,2013年新增装机容量仅为1GW,相比于2012年的12GW,呈现断崖式下降,但这不能代表美国风电的发展趋势。由于在技术储备、社会需求和资本供给等方面的优势,美国风电仍蕴藏着巨大的潜力。相比而言,加拿大2013年在2012年938MW新增装机容量的基础上实现了70%的增幅,达到1599MW,使加拿大成为2013年全球第五大风电装机大国,而2014年加拿大的风电新增装机容量达到1700MW,再创新高。墨西哥2013年新增装机容量380.4MW,累计装机容量1917MW。墨西哥的可再生能源发展目标为到2024年有35%的电力来自可再生能源。

亚洲是当前风电发展的发动机,2013年更是以18.2GW的年新增装机容量蝉联榜首。除中国外,印度是亚洲风电发展的第二大国。虽然风电政策出现反复,然而2013年1729MW的新增装机容量依然确保了印度进入全球装机容量前五的行列。截至2014年1月,印度风电已占整个电力系统生产的8.6%。尽管近两年来,风电发展受挫,但是长期来看印度的电力需求巨大,对可再生能源的需求也很大,风电发展依然利好。日本、韩国、巴基斯坦和我国台湾,风电装机总量虽然不大,但发展也保持了较为积极的态势。

2013年,受各种因素影响,全球风电市场没能保持近20年来的持续增长势头。但促进风电发展的诸多驱动因素依然存在,而全球依然需要一个清洁、可靠、不依赖进口并且易于实现的能源,而风电正是能满足这些条件的不二选择。因此,在可预见的将来,风力



发电仍将是全球能源领域的热点。

1.1.4 我国风力发电产业发展现状及展望

我国风力发电起步很早，早在 20 世纪五六十年代就已经开始了风电技术的探索。但长期以来，我国风电主要致力于满足电网无法覆盖的边远地区的渔牧民用电需求，没有并入电网，因此也没有建立规模化的风电产业。20 世纪 90 年代，随着对清洁能源的逐渐重视，我国风电产业逐步建立并发展；特别进入 2000 年之后，我国风电产业加速发展。据统计，2001—2013 年我国风电累计装机容量的年复合增长率为 57.12%，位居全球第一；2013 年，我国新增风电装机容量 16088MW，占当年全球新增装机容量的 45.6%，位居全球第一；截至 2013 年，我国风电装机总容量 91.4GW，占世界总容量的 28.7%，位居全球第一。2013 年，我国累计风力发电量 134.9TWh，占全国总发电量的 2.5%，成为继火电和水电之后的第三大能源。

虽然风电开发已取得了突出的成绩，但我国风电发展仍然蕴含着巨大的潜力。2008 年开展了“全国风能资源详查和评价”项目，该项目最终得出的结论是，在年平均风功率密度达到 $300\text{W}/\text{m}^2$ 的风能资源覆盖区域内，考虑各种制约因素，得出我国陆上 50m、70m、100m 高度层年平均风功率密度不小于 $300\text{W}/\text{m}^2$ 的风能资源技术开发量分别为 20 亿 kW、26 亿 kW 和 34 亿 kW。此外，低风速型风电机组的推出，使得我国风能可开发区域大幅增加，技术可开发储量也高于现有的评估数据。总体上，我国风能资源技术开发量满足国家大规模开发风电的需要。在风能储备丰富的同时，我国对于风电的需求同样十分旺盛。我国经济仍处于较快发展的通道中，对电力的需求仍然相当迫切。在哥本哈根气候变化大会前夕，我国向世界做出了负责任的承诺：争取到 2020 年非化石能源占一次能源消费比重达到 15%，到 2020 年单位国内生产总值（GDP）温室气体排放量比 2005 年减少 40%~45%。在碳排放的压力下，火电发展受到抑制，而核电又由于对安全性的顾虑而举步维艰，同时其他新能源如光伏发电、潮汐能发电在技术和经济性方面又不成熟。在此情况下，大力发展风电似乎是我国能源建设的唯一出路。

从近几年的发展来看，2011 年、2012 年我国风电装机速度有所放缓，没有达到事先规划每年装机容量 18GW 的目标，但是 2013 年已明显回暖。2014 年，中国风电产业发展势头良好，新增风电装机量刷新历史纪录。据统计，2014 年全国（除台湾地区外）新增安装风电机组 13121 台，新增装机容量 19.81GW，创历史新高；累计安装风电机组 76241 台，累计装机容量 96.37GW。2014 年风电上网电量 1534 亿 kWh，占全部发电量的 2.78%。而截至 2015 年一季度，全国风电新增并网容量 4.7GW。展望未来，若在未来五年内保持当前的发展速度，以每年新增装机容量 18~20GW 的平衡速度发展，则到 2020 年可以完成总装机容量 200GW 的规划目标。我国经济在不断发展，但也伴生了严重的雾霾现象。以煤炭为主的能源消费结构造成雾霾的重要原因之一，因此有必要加快调整能源结构。若“十三五”期间在有条件的省市大力发展风电，以取代一次能源，到 2020 年我国风电装机总容量将可望达到 250GW。而如果要实现我国在世界气候大会上的承诺，调动国内一切积极因素发展风电为代表的清洁能源，乐观估计到 2020 年我国风电装机总容量甚至可能达到 320GW。

1.2 我国风电产业快速发展中的问题

我国风电产业发展很快,较短时间内无论是总装机容量还是年新增装机容量都位列世界第一,相关机械制造水平也逐年提高。但是一个产业的发展需要内外因素配合,因此也不可避免存在一些发展中的问题。

1.2.1 电网消纳能力不足

当前风电发展遇到的最大问题是电网对风电的消纳能力不足,当然这也是一个世界性的难题。2012年,由“弃风”造成的损失高达20TWh,占全年风力发电量的20%;2013年有所好转,损失达16.2TWh,全年占比12%。其中蒙东地区2013年“弃风”电量3400GWh,甘肃地区3100GWh,蒙西地区2990GWh,河北地区2800GWh,吉林地区1572GWh,黑龙江地区1151GWh,辽宁地区528GWh,新疆地区431GWh。造成这一问题的主要原因如下:

(1) 由于我国风资源集中、规模大,远离负荷中心,蒙西、蒙东、甘肃、河北4个地区风电装机总规模占全国的50%,用电量仅占全国的10%,难以就地消纳。

(2) 风电建设速度超出本地区电力消纳能力的增长速度,风电并网规模超出电网外送能力。“十二五”以来,东北地区全社会用电量年均增长5.6%,但并网风电年均增长25.3%,风电并网的增速远远高于当地电力需求的增长。据中电联电力供需预测显示:在送受电力参与平衡后,东北区域电力供应富余仍达到20GW,加之外送能力的不足,是造成电力富余的根本原因。

(3) 我国风电集中的“三北”地区电源结构单一,抽水蓄能、燃气电站等灵活调节电源比重不足2%,特别是冬季由于供热机组比重大,调峰能力十分有限。在发展清洁能源的大背景下,我国未来风电发展仍将保持较高的速度,因此风电的电网消纳仍将是一个严峻的问题。要缓解这个问题,需要加快配套电网建设,保障风电项目及时并网;同时优化调度,提高风电消纳水平。

1.2.2 政策支持前景不确定

风电产业发展的第二个问题是政策支持的前景不确定。风电相对于火电等传统能源而言仍只是新兴产业,设备制造的规模和成本相对都缺乏优势,因此当前风电成本仍然偏高,需要国家相应的政策扶持。政策扶持的力度对于风电发展是极其关键的,在过去两年里,由于欧债危机的影响,一些欧洲国家取消或减少了对于风电的支持力度,造成了新增风电装机容量的锐减,西班牙、意大利和法国2013年新增装机容量同比下降了84%、65%和24%,而美国也因为PTC政策的反复,新增装机容量降幅达到92%。我国近年来风电蓬勃发展得益于国家政策的有力扶持,但随着陆上风机设备价格的持续下降,降低风电补贴、实现风火同价的呼声日高。然而在风电机组价格连年下降的现象背后,限电问题日益凸显、CDM(Clean Development Mechanism,清洁发展机制)收益大幅缩水等因素均严重影响了风电项目的盈利能力,同时产业链中上游设备和零部件制造企业过度牺牲盈