

风力发电工程

施工与验收

《风力发电工程施工与验收》编委会 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

风力发电工程

施工与验收

《风力发电工程施工与验收》编委会 编



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是为了适应我国风力发电工程快速发展的新形势,提高风力发电工程施工与验收的技术和管理水平精心编写而成的。

全书共分12章,从世界和我国风力发电建设的新形势入手,介绍了风力发电机组和风电场的基本结构、特点,并重点介绍了风力发电工程施工管理、技术管理、风力发电机组吊装、各项建构筑物、升压站、架空及电缆集电线路施工、质量管理、工程质量验收、工程监理及施工技术档案编制等全部施工内容和管理环节,体现了风力发电工程施工的全过程。

本书可供从事风力发电工程施工、监理、验收的工程技术人员和管理人员查阅、使用,也可供投资商和建设管理单位的人员参考,还可作为相关技术和管理人员的培训教材,并且可供大专院校能源及电力类相关专业师生学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电工程施工与验收/《风力发电工程施工与验收》编委会编. —北京:中国水利水电出版社,2009
ISBN 978-7-5084-6285-1

I. 风… II. 风… III. ①风力发电-工程施工②风力发电-工程验收 IV. TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第020985号

书 名	风力发电工程施工与验收
作 者	《风力发电工程施工与验收》编委会 编
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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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 22.5印张 534千字
版 次	2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《风力发电工程施工与验收》

编 委 会

主 任 张永江 赵秀华

副主任 杨静东 郭 伟 刘恩江 朱育才

委 员 鹿 伟 蔡国军 张 永 夏 莲 张兆月
吕玉善 李建军 李 玉 陈西义 李 军
罗 旭 赵克良 岳剑波 许启斌 吕大海

主 编 赵秀华 杨静东

副主编 郭 伟 刘恩江 朱育才

参 编 鹿 伟 蔡国军 张 永 夏 莲 张兆月
吕玉善 李建军 李 玉 陈西义 李 军
罗 旭 赵克良 岳剑波 许启斌 吕大海

前 言

能源是经济社会发展的重要物质基础，要实现 2020 年我国 GDP 翻两番的宏伟目标和国民经济的持续增长，仅靠常规能源难以解决能源和电力短缺的瓶颈问题。占电力供应 70% 的煤电燃料——煤炭，探明的剩余开采储量为 1390 亿 t，按 2003 年开采速度 16.67 亿 t/a，仅能维持 83 年，还将带来严重的环境污染。我国的石油资源不足，天然气资源也不够丰富，天然铀资源短缺。我国水能资源可开发量为 4.02 亿 kW，年发电量为 1.7 万亿 kW·h，再经过 20~30 年的开发，基本被开发完，仅靠水能也解决不了我国的电力短缺问题。

风能是取之不尽、用之不竭、不污染环境、不破坏生态的可再生能源之一，风力发电是目前可再生能源中各种技术发展最快、技术最为成熟、具有大规模开发和商业化前景的能源。发展风力发电可促进优化能源结构，保障能源安全，缓解能源利用造成的环境污染；促进节能减排；促进能源与经济、能源与环境保护的协调发展；是建设资源节约型、环境优良型社会和实现可持续发展的重要途径；是一项推动国家能源经济变革的重要选择；将为电力工业技术创新和电力工业技术调整发挥重要作用。

我国风能资源丰富，储量 32 亿 kW，可开发的容量 2.53 亿 kW，居世界首位。国家十分重视风力发电事业，大力扶持发展风力发电。近年来风电规划、设计、施工能力逐步加强，风电设备制造国产化的步伐逐步加快，推动了我国风电事业的大发展。2007 年累计风电装机容量已达 6050MW，较 2006 年增长 133MW，增速居世界之冠，成为世界第五大风力发电国。

在国家风力发电迅速发展，一支支风电建设的施工队伍也异军突起，成为电力建设的生力军。其中有的队伍有丰富的火电、核电施工经验，近年来，他们又抓住中国能源电力转型，进入风电时代的机遇，组织力量进入了风力发电的施工领域，创出了新的业绩。

为了促进风力发电建设更好更快的发展，培养施工队伍，提高风力发电机组安装质量，规范施工工艺，推进技术创新，本书编委会根据国内有关风力发电场工程的施工实际、有关设计及设备资料，结合传统的电力建设、施工、监理、验收等通用经验，并参考了出版的有关文献、报告，编写了此书。

鉴于风力发电场工程施工建设是一门专业科学，有它自己的完整体系。在编写中力求从世界和我国风力发电建设的新形势入手，介绍了风力发电机组和风电场的基本结构、特点，并重点介绍了风力发电工程施工管理、技术管理、风力发电机组吊装、各项建构筑物、升压站、架空及电缆集电线路施工、质量管理、工程质量验收、工程监理及施工技术档案编制等全部施工内容和管理环节，体现了风力发电工程施工的全过程。

本书在编写过程中，山东电力集团公司、山东电力建设第二工程公司、山东电力工程咨询院、山东诚信监理公司等单位的领导、专家给予了大力支持，山东电力建设第二工程公司风电分公司的施工技术人员提供了宝贵的资料，并参加了编写工作，在此一并谨表谢意！

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中内容的疏漏或不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2009年1月

目 录

前言

第一章 风力发电发展的新形势	1
第一节 风及风能.....	1
第二节 世界风电的快速增长.....	2
第三节 我国风电发展状况及展望.....	8
第二章 风力发电机组与风力发电场	18
第一节 风力发电机组的结构	18
第二节 我国国产化兆瓦级风电机组的结构	21
第三节 风力发电机组的运行调节和控制	27
第四节 风力发电机组的基础	31
第五节 风力发电场	32
第三章 风力发电场的工程施工管理	45
第一节 华电国际莱州 40.5MW 风电场简介	45
第二节 施工准备工作	47
第三节 施工组织机构设置和人力资源计划	49
第四节 施工计划管理及进度计划编制	51
第五节 施工总平面布置与施工力能供应	59
第六节 现场文明施工管理	63
第七节 工程材料设备与施工机械的管理	65
第四章 风力发电场工程的施工技术管理	71
第一节 风电工程施工技术管理的基本内容	71
第二节 施工组织设计的编制	72
第三节 作业指导书及施工方案和措施的编制	77
第四节 各单位工程主要施工方案	81
第五节 图纸会检技术交底和设计变更管理.....	100
第六节 编写工程技术总结.....	108

第五章 风力发电场工程施工质量管理	111
第一节 质量体系.....	111
第二节 施工质量管理.....	115
第六章 风力发电场工程施工职业安全健康管理和环境管理体系	129
第一节 职业安全健康管理体系.....	129
第二节 环境管理体系.....	144
第七章 风力发电场土建工程施工	149
第一节 大体积混凝土施工.....	149
第二节 风机塔架基础施工.....	153
第三节 35kV 箱式变压器基础施工	163
第四节 建筑工程冬季施工.....	171
第五节 生产综合楼现浇钢筋混凝土框架结构施工.....	178
第六节 生产综合楼装饰装修施工.....	179
第八章 风力发电场发电机组安装	182
第一节 施工准备.....	182
第二节 风电机组的吊装工艺.....	184
第三节 风电机组冬季施工措施.....	207
第九章 风力发电场电气工程安装	210
第一节 箱式变电站安装和试验.....	210
第二节 电缆的敷设与试验.....	218
第三节 35kV 集电线路和配电装置安装及保护装置调试	223
第四节 主变压器安装、试验及主变压器保护调试.....	231
第五节 110kV 升压站配电装置安装试验及保护装置调试	241
第六节 盘柜安装二次接线及蓄电池安装.....	250
第七节 全场防雷接地施工.....	257
第八节 风力发电场电气工程冬季施工.....	259
第十章 风力发电场工程建设监理	262
第一节 监理服务范围和内容.....	262
第二节 工程项目监理目标和措施.....	265
第三节 施工阶段的质量进度与安全控制.....	269
第四节 施工阶段的投资控制及合同信息管理.....	277
第十一章 风力发电场项目建设工程验收	285
第一节 风力发电场工程 4 个阶段验收、验收组织与依据.....	285
第二节 单位工程完工验收.....	287
第三节 工程启动试运验收.....	304
第四节 工程移交生产验收.....	308

第五节	工程竣工验收	309
第十二章	风力发电场工程文件管理与竣工移交资料编制	312
第一节	风电工程文件资料管理	312
第二节	风电工程竣工移交资料的编制	314
附录一	风力等级表	347
附录二	风力发电装置国家和国际标准	348
参考文献		350

第一章 风力发电发展的新形势

第一节 风 及 风 能

一、风

(一) 风的形成

风是人类最熟悉的一种自然现象，风无处不在。地球被一个数公里厚的空气层包围着，地球上的气候变化是由大气对流引起的。大气对流层的厚度约可达 12km，由于太阳辐射造成地球表面大气层受热不均，引起大气密度不同，压力分布不均。在不均压力作用下，造成空气对流运动，空气沿水平方向运动就是风。风的形成是空气流动的结果。

空气运动主要是由于地球上各纬度所接受的太阳辐射强度不同造成的。赤道和低纬度地区，太阳辐射强度大，地面和大气接受的热量多，温度较高；高纬度地区，日照时间短，地面和大气接受的热量少，温度低。这种高纬度与低纬度之间的温度差异，形成南北之间的气压梯度，使空气做水平运动，风沿着垂直于等压线方向从高压向低压吹。地球自转使空气水平运动产生地转偏向力，也影响空气的运动。风除了受上述两种力的支配外，还受海洋、地形的影响，使风速增大或减小。

(二) 风向与风速

风向和风速是描述风特性的两个重要参数。风向是指风吹来的方向，如果风从北方吹来，就称为北风；从东方吹来，就称为东风。风速是表示风移动的速度，即单位时间空气流动所经过的距离，用 m/s 代表，即每秒钟多少米（风力等级见附录一）。

地球上风的方向和速度的时空分布随时都在变，非常复杂。

二、风能

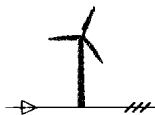
(一) 21 世纪的最主要能源

地球上可供人类使用的化石燃料资源是极有限和不可再生的。根据联合国能源署报告，按可开采储量预计，煤炭资源可供人类用 200 年，天然气资源可用 50 年，石油资源可用 30 年。科学家预计，21 世纪的最主要能源将是核能、太阳能、风能、地热能、海洋能、氢能和可燃冰。

(二) 风能是最具活力的可再生能源

空气流动形成的动能称为风能，风能是太阳能的一种转化形式。

风能是一种无污染的可再生能源，它取之不尽，用之不竭，分布广泛。随着人类对生态环境的要求和能源的需要，风能的开发日益受到重视，风力发电将成为 21 世纪大规模开发的一种可再生清洁能源。风能的利用将可能改变人类长期依赖化石燃料和核燃料的局面。



世界风能总量为 200 亿 kW，大约是世界总能耗的 3 倍。如果风能的 1% 被利用，则可以减少世界 3% 的能源消耗。风能用于发电，可产生世界总电量的 8%~9%。

(三) 风能密度

风的动能与风速的平方成正比。当一个物体使流动的空气速度变慢时，流动的空气动能部分转变成物体向上的压力能，这个物体上的压力就是作用在这个物体上的力。功率是力和速度的乘积，这也可以用于风能的功率计算，风能可用“风能密度”来描述。空气在 1s 时间里以速度 v 流过单位面积产生的动能称为风能密度，单位为 W/m^2 。因为风力与速度的平方成正比，所以风能密度与风速的 3 次方成正比。风轮从风中吸收的功率可以用下列公式来表示：

$$E = 1/2 C_p A \rho u^3$$

式中 E ——风轮输出的功率（即风能密度）（ W/m^2 ）；

C_p ——风轮的功率系数；

A ——风轮扫掠面积， $A = \pi R^2$ （ R 为风轮半径）；

ρ ——空气密度；

u ——风速。

根据计算，平均风速为 10m/s 时，风能密度为 $600 W/m^2$ ，平均风速为 15m/s 时，风能密度为 $2025 W/m^2$ 。

第二节 世界风电的快速增长

一、风力发电的兴起和发展

(一) 人类利用风能历史悠久

早在公元前数世纪，我国人民就开始利用风力提水、灌溉、汲取海水晒盐和驱动帆船。公元前 200 年，波斯人也开始利用垂直轴风车碾米。10 世纪，伊斯兰人利用风车提水，到了 11 世纪风车广泛应用在中东地区，13 世纪风车传到欧洲，14 世纪风车成为欧洲不可缺少的原动机。风力磨坊是当时利用风能最具代表性的风力机械。德国人发明了可以随风向转动的磨房，1745 年荷兰人发明了旋转机头，应用于荷兰风力磨房。19 世纪的欧洲有数十万台风力提水机，风轮直径 3~5m，功率 500~1000W，可以驱动恒定转矩的水泵。历史上这些风力机械的广泛应用，人们对风的特性有了进一步的认识，从而为利用风能发电奠定了一定的理论基础。

(二) 风力发电的起步和发展

1891 年丹麦人设计制造了世界上第一座风力发电实验站，采用蓄电池充放电方式供电，获得成功，并得到推广应用。到 1910 年丹麦已建成 100 座 5~25kW 风力发电站，风力发电量占全国总发电量的 1/4。从 1891~1930 年小容量的风力发电机组技术基本成熟。

20 世纪 30 年代初开始，美国、丹麦、英国、德国等开始对技术较复杂的大中型风力发电机组进行研制，渴望探索到廉价的能源。至 1973 年石油危机之前，虽然美国、丹麦、法国、英国等国试验性的研制成功 200kW、800kW 甚至 1MW 的风力发电机组，但由于



风轮的制造材料问题、刹车系统问题、发电价格太高等问题，始终处于科学研究阶段，主要在高校、科研单位开发研究，政府从技术储备的角度提供少量科研费。1973 年以后，风力发电作为能源多样化措施之一，列入能源规划，一些国家对风力发电以工业化试点给予政策扶持，以减税、抵税和价格补贴等经济手段给予激励，推进了风力发电工业的发展。进入 20 世纪 90 年代，风力发电技术日趋成熟，风电场规模建设；另一方面全球环境严重恶化，发达国家开始征收能源税和炭税，环保对常规发电提出新的、严格的要求。情况变化缩短了风力发电与常规发电价格竞争的差距，风力发电开始进入商业化发展的阶段。

二、2006 年全球风电市场的发展状况

全球气候变化的严峻形势，让许多国家政府开始认识到清洁、无污染、环保能源的重要性。最近几年，包括中国政府在内的许多国家政府制定政策、颁布法律，以政策支持、税收减免、费用补贴等形式鼓励可再生能源的发展。风能作为一种取之不尽的、清洁环保的可再生能源得到很大的扶持。金融业和传统能源部门的投资者也认识到风能广阔的发展前景，积极地投入到其中。

2006 年，全球风电市场的发展已经超过其他任何种类的可再生能源资源。世界风电市场发展迅猛，总装机容量从 1995 年的 4800MW 飞速发展到 2006 年底的 74223MW，预计将在未来继续保持良好的发展势头。2006 年，欧洲市场迎来了有史以来第二个发展高峰年，美国风能市场的成长首次超过欧盟国家，成为全球发展最快的国家。中国由于新能源法的颁布也迎来了一个高速发展的年份。按照全球风能委员会（GWEC）的年度报告，甚至在非洲，风电也取得了可喜的发展。可以说，单纯从成长率而言，风电已经成为能源部门仅次于燃气发电的第二大热门领域。

近 10 多年来，全球风电产业一直处于持续增长态势，1995~2006 年，全球累计装机容量平均增长 28.3%，2006 年新增装机容量 1519.7 万 kW。其中，美国、德国、印度、西班牙和中国是新增装机容量前五位的国家，分别达到 245.4 万 kW、219.4 万 kW、184.0 万 kW、158.7 万 kW 和 133.7 万 kW。在全球风电产业持续快速发展过程中，欧洲风电一直处于领跑地位。按照欧洲几年前制定的发展规划，风电装机容量在前 5 年实现了 2010 年装机目标。根据欧洲风能协会预测，世界风电装机 2010 年为 2 亿 kW，2020 年为 12 亿 kW，2030 年为 27 亿 kW。届时风电将分别占世界总量的 2.26%、12% 和 21%，风电将逐渐成为主要的替代能源。

按照总装机容量排序，2006 年排在前列的国家依次是：德国（20621MW）、西班牙（11615MW）、美国（11603MW）、印度（6270MW）和丹麦（3136MW）。世界上有 13 个国家风能发电能力超过 1000MW，其中法国和加拿大在 2006 年超过这一标杆值。

三、世界风力发电的迅速扩张

（一）风能产业将保持每年 20% 的增速

德意志银行最新发布的研究报告预计，全球风电发展正在进入一个迅速扩张的阶段，风能产业将保持每年 20% 的增速，到 2015 年时，该行业总产值将增至目前水平的 5 倍。

报告称，在各类可再生能源中，从目前的技术成熟度和经济可行性来看，风能最具竞



争力。从长期来看,全球风能产业的前景相当乐观,各国政府不断出台的可再生能源鼓励政策,将为该产业未来几年的迅速发展提供巨大动力。

根据预计,未来几年亚洲和美洲将成为最具增长潜力的地区。中国的风电装机容量将实现每年 30% 的高速增长,印度风能也将保持每年 23% 的增长速度。而在美国,随着新能源政策的出台,风能产业每年将实现 25% 的超常发展。

而一直以来在风能领域处于领先地位的欧洲国家增长速度将放慢,预计在 2015 年前将保持每年 15% 的增长速度。其中最早发展风能的国家如德国、丹麦等陆上风电场建设基本趋于饱和,下一步主要发展方向是海上风电场和设备更新。英国、法国等国仍有较大潜力,增长速度将高于 15% 的平均水平。

目前,德国仍然是全球风电技术最为先进的国家。德国风电装机容量占全球的 28%,而德国风电设备生产总额占到全球市场的 37%。在国内市场逐渐饱和的情况下,出口已成为德国风电设备公司的主要增长点。德国政府将通过价格补贴等手段支持该行业通过技术创新保持领头羊地位。2008 年,德国将再次修订《可再生资源法》,将海上风电场上网补贴价格从 9.1 欧分/(kW·h) 提高到 14 欧分/(kW·h)。

美国美林公司日前出台报告称,全球风能产量有望在 2011 年达到 3.35 万 MW,比目前增长 1 倍。报告预测,这一增长将由美国和亚洲市场对风能需求的强劲增长支撑。欧洲目前仍然是全球最大的风能市场,消费全球风能总产量的 65%,不过美国将赶超欧洲成为头号风能市场。美林公司预测,亚洲市场、特别是印度和中国市场将有望加快对风能的利用。美林公司报告称,2010 年以后,新建的电站将称为风电场,因为煤和石油价格的走高,正导致电力公司放弃建设以此类物质为燃烧原料的发电站。报告还说,风能也是大规模生产可再生能源的上乘之选。目前全球最大太阳能发电厂的发电能力为 40MW,而最大风力发电厂的发电能力达到 780MW,几乎是前者的 20 倍。

墨西哥 13 家能源公司将在未来 3 年内投入 30 亿美元发展风力发电,预计这些公司的项目投产后将为墨西哥提供近 2000MW 电力。墨西哥全国电力委员会与 4 家公司签署协议。这些公司将在墨西哥特万特佩克地峡发展风力发电项目,投产后向该委员会所属全国电网提供 163MW 电力。墨西哥全国电力委员会近期还与其他 7 家公司签署了类似协议。这 7 家公司的风力发电项目预计在 2010 年上半年投入运营,并将为墨西哥提供 1492MW 电力。该委员会还将与墨西哥水泥公司一家下属公司以及西班牙的一家企业分别签署协议,两个项目将保障 330MW 电力供应。

瑞典媒体报道,瑞典最大电力企业——国有瓦腾法尔电力公司决定与瑞典森林公司合作,在瑞典南部兴建 550 座风力发电站。这将是该国迄今最大规模的风能开发项目。瓦腾法尔电力公司决定,根据两家公司达成的协议,瓦腾法尔电力公司将在今后 10 年内投资 205 亿瑞典克朗(约合 32 亿美元),在归属森林公司所有、风力资源丰富的土地上兴建风力发电站。到 2016 年风力发电站全部建成时,其发电总量可达 4TW·h (1TW·h 等于 100 万 kW·h),能满足瑞典 80 万户家庭的电力需求。瓦腾法尔电力公司还表示,将在今后 10 年另外投资 205 亿瑞典克朗,用于开发海上风能。到 2016 年,该公司的风能总发电量可达 8TW·h,可供给本国 160 万户家庭的用电需求。瑞典目前的风能发电量为 1.4TW·h,仅占全国总发电量的 1%。根据瑞典议会确定的目标,到 2016 年,瑞典的风



能发电量将达 $10\text{TW} \cdot \text{h}$ 。

(二) 风电机组单机容量持续增大

安装大容量机组能够降低风电场运行维护成本,降低整个风力发电成本,从而提高风电的市场竞争力。同时,随着现代风电技术的日趋成熟,风力发电机组技术朝着提高单机容量,减轻单位 kW 重量,提高转换效率的方向发展。例如,在 20 世纪 90 年代,600kW 风电机组占据风机市场的主流。到 2001 年,新装机的风电场,基本上以 MW 级以上的风电机组为主。2000 年新装单机容量平均为 800kW,2002 年平均单机容量达到 1400kW,2004 年增大到 1715kW。在 2005 年,兆瓦级以上单机装机容量约占当年整个装机容量的 75%,其中包括 2MW 级和 3MW 级的风电机组。2004 年 9 月,在德国安装了当时为世界上最大单机容量的风电机组,这就是由德国 Repower 公司生产的 5MW 风电机组。其叶轮直径 124m,安装在高度为 120m 的塔架上,额定风速为 13m/s。预计到 2010 年,还将开发出 10MW 的风电机组。

(三) 变桨距功率可调节型机组发展迅速

由于变桨距功率调节方式具有载荷控制平稳、安全、高效等优点,近年来在风电机组特别是大型风电机组上得到了广泛应用。大多数风电机组开发制造厂商,包括传统失速型风电机组制造厂商,都开发制造了变桨距风电机组。在德国 2004 年上半年所安装的风电机组中,就有 91.2% 的风电机组采用的是变桨距调节方式。2MW 以上的风电机组大多采用 3 个独立的电控调桨机构,通过 3 组变速电机和减速箱对桨叶分别进行闭环控制。

(四) 无齿轮箱风电机组的市场份额迅速扩大

无齿轮箱的直驱方式能有效减少由于齿轮箱问题而造成的机组故障,可有效提高系统运行的可靠性和寿命,可大大减少维护成本,受到了市场的推崇。德国 2004 年上半年安装的风电机组中,采用无齿轮箱系统的机组占了 40.9%。

(五) 变速恒频技术得到快速推广

随着风电技术以及电力电子技术的进步,大多风电机组开发制造厂商开始使用变速恒频技术,并结合变桨距技术的应用,开发出了变桨变速风电机组,并在市场上快速推广和应用。2004 年和 2005 年,全球所安装的风电机组中,有 92% 的风电机组采用了变速恒频技术,而且这个比例还在逐渐提高。

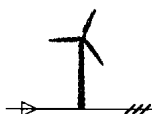
(六) 全功率变流技术兴起

近年来,欧洲 Enercon、Winwind 等公司都发展和应用了全功率变流的并网技术,使风轮和发电机的调速范围可从 0%~150% 的额定转速,提高了风能的利用范围,改善了向电网供电的电能质量。Enercon 公司还将原来对每个风电机组功率因数的分散控制加以集中,由并网变电站来统一调控,实现了电网的有源功率因素校正和谐波补偿。全功率变流技术成为今后大型风电场建设的一种新模式。

四、全球风电迅猛发展的原因

(一) 风力发电技术比较成熟

近 20 年来,美国、丹麦等国家投入了大量的人力、物力和财力研究可以投入商业运



营的风力机,取得了突破性的进展,可利用率从原来的 50% 提高到 98%,风能利用系数超过 40%。由于采用微机技术,实现了风机自诊断功能,安装保护措施更加完善,并且实现了单机独立控制、多机群控和遥控,完全可以无人值守。现代风力机技术可以说是与高科技的完善组合,主要零部件都是国际上最有实力的企业生产的,设计寿命可达 20 年,基本上不需维修,只要定期维护就可以了。目前,百千瓦级风电机和 2MW 以下的兆瓦级机组,已经商品化,投入了批量生产。

(二) 风力发电具有经济性

目前,风力发电机组单位造价已降为 1000 美元/kW,单位发电成本为 5 美分/(kW·h),而火力发电单位千瓦造价为 700~800 美元,单位发电成本为 5~6 美分/(kW·h),因此,风力发电可以和火力发电相竞争。由于地球上煤炭储量日趋减少,开采日益困难,煤炭价格上涨,火力发电污染环境,脱硫、脱氮处理费用较高,从而使火力发电价格上涨。风力发电随着技术的提高,容量的增大,风力机的大规模生产,造价在未来 10 年内,成本将降到 800 美元/kW 以下,发电成本为 4 美分/(kW·h),甚至更低,成为最廉价的电源之一。和其他新能源相比,风力发电成本也是比较低的,而且随着单机容量的提高,发电成本会进一步降低。因此,风力发电将更具有经济性。

(三) 全球有丰富的风能资源

据统计,全球风能潜力约为目前全球用电量的 5 倍。美国 0.6% 的陆地面积安装风力发电机,便可以满足美国目前电力需求的 20%。风能足以满足全部或大部分电力的国家有:阿根廷、加拿大、智利、中国、俄罗斯、英国、埃及、印度、墨西哥和突尼斯,它们的 20% 或更多的电力可以由风电提供。

(四) 政府的优惠政策

美国政府为风力机行业提供 40% 的信贷,德国政府也给风力机投资者提供资助,资助金额最高达单台风力机投资的 60%。丹麦政府对风力机投资者提供资助,20 世纪 80 年代初期为 30%,以后逐年减少,到 1990 年资助完全取消。这些优惠的政策促进了风力商品化进程,这也是以上 3 个国家能成为世界上风电生产大国的一个主要原因。

(五) 解决人类能源供给,实现可持续发展的需要

随着现代工业的飞速发展,人类对能源的需求明显增加,而地球上可利用的常规能源日益匮乏。据专家预测,煤炭还可开采 200 年,石油 39 年,天然气只能用 60 年。如何实现能源的持续发展,从而保证经济的可持续发展和社会的可持续发展,已经是各国政府必须解决的大问题,即能源战略问题。唯一的出路就是有计划地利用常规能源、节约能源、开发新能源和可再生能源。今天风力发电异军突起,以其造价低、无污染、可再生等优点而备受青睐,也是风力资源丰富的国家争先发展的可再生资源。

五、国外知名风力机供应商介绍

(一) 全球前 10 位风电机组供应商

据欧洲风能协会统计,在 2004 年全球风电机组供应商市场份额统计中,处于前 10 位的见表 1-1。



表 1-1

2004 年市场上前 10 位的全球风电机组供应商

排 名	公司名称	市场份额	排 名	公司名称	市场份额
1	Vestas/丹麦	34.10%	6	Suzlon/印度	3.90%
2	Enercon/德国	18.10%	7	Repower/德国	3.40%
3	Gamesa/西班牙	15.80%	8	MHI/日本	2.60%
4	GE/美国	11.30%	9	Econtecnia/西班牙	2.60%
5	Siemens/德国	6.20%	10	Nordex/德国	2.30%

(二) 知名风力机供应商简介

1. 丹麦 Vestas 集团

丹麦 Vestas 集团是一个跨国公司，在 13 个国家有子公司及合资公司。主要业务是风电开发、制造、销售、市场开拓和维修。产品的单机容量范围从 660kW 到 2MW，即将推出 3MW 产品。该公司是世界风力发电工业中技术发展的领导者。1979 年开始制造风力发电机，并且自此在动力工业界起到了积极作用，至 2004 年底安装量为 17538MW。

2. 美国 GE 公司

GE Wind Energy 公司作为世界主要的风力发电机供应商之一，风力机的设计和生产位于德国、西班牙和美国佛罗里达州，并且制造高质量的风力机叶片，提供先进的机组制造、维修方案等服务。目前的产品容量为 1.5~3.6MW，都具有变速变桨距运行的特征，且配置了独特的“WindVAR”电子控制装置，可用于海上风电场或内陆风电场。

3. 德国 Enercon 公司

Enercon 公司是德国最大的风电机组制造商。成立于 1984 年，被誉为风能产业研究和发展的助推先锋力量。它作为全球研制兆瓦级风力发电机的领先企业，至 2004 年已安装了超过 7300 个风力发电机。售出的风力机具有高产能、运行维护低的特点，并且质量保证 10 年。目前的单机容量为 0.33~4.5MW，机型有 E-33、E-48、E-70、E-112 等。

4. 西班牙 Gamesa 公司

西班牙 Gamesa wind gmbh 公司风力机容量范围为 0.85~2MW，2005 年 6 月与山东省、福建省各签订了建造 40 套及 8 套风力发电机组，总容量逾 34MW，价值 2000 万欧元的合同。已在中国完成了 21.7 万 kW 的风力发电机组的安装工作。

5. 丹麦 NEG Micon 公司

丹麦 NEG Micon 公司是世界领先的风电机组制造商之一，它在国际风力发电市场占有一席之地。该公司提供的风力机容量范围为 0.6~2MW，每个机组都确保操作简易、使用效率高、性能最优化。提供完整的方案，帮助客户完成整个工程的安装、使用。该公司现正致力于研发 3~5MW 的海上风电场大型发电机组。

6. 丹麦 Bonus 公司

从 1979 年起，Bonus 公司持续不断地开发风电机组技术，一直是丹麦的主要风电机组制造商，也是世界著名的供应商之一。1997 年制造了首台 1MW 的风力机，次年未制造了 1.3MW 和 2MW 的陆上风力机，2002 年着手制造 72 台 BONUS2.3MW 风力机，构成的海上风电场。该公司目前销售的风力机为 0.6MW、1MW、1.3MW 和 2MW 等级。



7. 德国 Repower 公司

Repower 成立于 2001 年 1 月, 是德国一家领先的风力机制造商, 其风力机容量范围为 1.5~5MW, 叶轮直径为 70~126m。不论地处强风区或弱风区、平原或山脉、陆上或海上, 该公司一样提供对应的高收益、高可靠性、成本经济的机组方案。

8. 西班牙 Made 公司

西班牙 Made 公司成立于 1940 年, 在可再生能源领域积累了 20 多年的经验, 是西班牙业内的领头企业, 在西班牙和中国西北地区多处建造了风力发电机组。主要型号有 AE—32, AE—46, AE—52 和 AE—61, 容量为 0.3~1.3MW。

9. 德国 Nordex 公司

德国 Nordex 公司是一个全球范围风能系统的制造商, 大体上致力于兆瓦级风力机的制造。基于创新的技术, 制造的风机可安装于陆上或海上、风大处或风小处等多种地理位置, 最大容量达 5MW, 服务范围涉及全球各个角落。

10. 日本三菱重工 MHI

MHI 于 1980 年起致力于风力发电机组的研发, 较成熟的机组为容量 0.25~1MW 的感应式或变速机型, 主要出口到美国市场, 并在墨西哥建立叶片生产设施。在全世界范围内制造安装了逾 1700 套机组, 其研制的 2.4MW 样机, 已在 2006 年投入运行。

第三节 我国风电发展状况及展望

一、我国的风能资源

(一) 我国的风能资源储量

我国的风能资源丰富, 储量居世界首位。可开发利用的风能储量约 10 亿 kW, 其中陆地上风能储量约 2.53 亿 kW (陆地上离地 10m 高度资料计算), 海上可开发和利用的风能储量约 7.5 亿 kW。如果扩展到 50~60m 以上的高度, 风力资源将有望增加到 20 亿~25 亿 kW。

十几年来, 国家对风能资源状况做了深入的勘测调查, 风能资源分布很广, 在东南沿海、山东省、辽宁省沿海及其岛屿年平均风速达到 6~9m/s, 内陆地区, 如内蒙古自治区北部、甘肃省、新疆维吾尔自治区北部及松花江下游也属于风能资源较丰富的地区, 风速达到 6.3m/s, 在这些地区均有很好的开发利用条件。

(二) 我国风能储量分布情况

我国风能储量分布见表 1-2。

二、我国风力发电的起源与发展

(一) 我国风力发电场的建设始于 20 世纪 80 年代后期

在改革开放以来, 作为电力行业一个新型门类, 风电建设一开始就以外向型的方式开发建设。积极引进国外设备, 积极利用外资是这个时期的典型特征。到 1999 年底, 全国已建成 24 个风电场, 总装机容量达 26 万 kW, 其中绝大多数机组是从丹麦、德国、美国、比利时、瑞典引进的, 最大单机容量 600kW。新疆维吾尔自治区达坂城二风场总装