



“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

风电场 技术经济分析

FENGDIANCHANG
JISHU JINGJI FENXI

顾圣平 李晓英 王社亮 主编



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

风电场 技术经济分析

顾圣平 李晓英 王社亮 主编



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，全面介绍了风电场技术经济分析的基本理论和方法，内容包括绪论、技术经济分析的经济要素、资金等值计算、技术经济分析的基本方法、不确定性分析、风电场财务评价、风电场国民经济评价与社会效果分析、风电场建设资金与融资分析、风电场设备更新技术经济分析、风电场后评价中的技术经济分析等。

本书适合作为高等学校相关专业的教材或教学参考用书，也可供从事风电场规划与设计的工程技术人员和有关管理人员阅读参考。

图书在版编目（C I P）数据

风电场技术经济分析 / 顾圣平, 李晓英, 王社亮主
编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2015. 6
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-3328-8

I. ①风… II. ①顾… ②李… ③王… III. ①风力发电—发电厂—技术经济分析 IV. ①F407.613.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第130850号

书 名	风力发电工程技术丛书 风电场技术经济分析
作 者	顾圣平 李晓英 王社亮 主编
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 (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 14.75印张 350千字
版 次	2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	46.00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 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 澜

陈党慧 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

丛书总策划 李 莉

编委会办公室

主 任 胡昌支 陈东明

副 主 任 王春学 李 莉

成 员 殷海军 丁 琪 高丽霄 王 梅 邹 昱

张秀娟 白 杨 汤何美子

本书编委会

主 编 顾圣平 李晓英 王社亮

参编人员 (按姓氏笔画排序)

朱三华 朱碧泓 刘 舜 刘小松 李承志
吴来群 宋 强 张 箭 胡立伟 栗素容
谢宏文 戴文新 糜又晚



风能资源是一种清洁的可再生能源。我国的风力发电始于 20 世纪 50 年代后期。1986 年,我国第一座风电场——马兰风力发电场在山东荣成并网发电,是我国风力发电史上的里程碑。此后,我国风电真正进入快速发展时期。截至 2013 年末,全国发电装机总容量达 12.47 亿 kW,其中,水电 2.8 亿 kW,火电 8.6 亿 kW,核电 1461 万 kW,并网风电 7548 万 kW,并网太阳能发电 1479 万 kW。目前,我国有 29 个省、市、自治区(不含港、澳、台地区)建有风电场,风电已成为我国除火电、水电等常规能源外最重要的发电方式。

风电场项目既属于基础设施建设,又是经营性的工程建设项目。为了提高风电场设计、建设和运营水平,促进风力发电的健康持续发展,必须做好风电场的技术经济分析。这就要求将来要从事风电场规划与设计工作的风电专业大学生应当具备这方面的知识。作为《风力发电工程技术丛书》之一,本书既能满足风电专业“风电场技术经济分析”或类似课程的实际教学需要,也可供从事风电场规划与设计的工程技术人员和有关管理人员阅读参考。

风电场技术经济分析涉及的内容非常广泛。本书首先介绍了技术经济分析的基本理论和方法,包括技术经济分析的经济要素、资金等值计算、技术经济分析的基本方法、不确定性分析等,在此基础上,着重介绍了风电场技术经济分析实际应用方面的基本知识,包括风电场财务评价、风电场国民经济评价与社会效果分析、风电场建设资金与融资分析、风电场设备更新技术经济分析、风电场后评价中的技术经济分析等。

全书共分为 10 章,其中,第 1 章至第 5 章由河海大学顾圣平编写;第 6 章由河海大学李晓英和中国水电顾问集团西北勘测设计研究院王社亮编写;第 7 章至第 10 章由河海大学李晓英编写;全书由顾圣平统稿。本书的编写大纲

广泛征询了本书编委会成员意见。在编写、出版过程中得到了本书编委会成员以及有关领导、同行专家和编辑同志的关心和支持，相关工程设计单位也热情相助，为本书提供了案例分析所需的素材。作者在此一并表示诚挚的谢意。

此外，本书在编写过程中参阅了大量参考文献，书后已经列出主要参考文献，未能详尽之处，谨向各位作者致以歉意和敬意。

由于作者的水平有限，书中疏漏和不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2015 年 4 月



目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风能资源及风电发展概况	1
1.2 风电场技术经济分析的目的与意义	7
1.3 风电场技术经济分析的要求和主要内容	8
第 2 章 技术经济分析的经济要素	11
2.1 价值和价格	11
2.2 总投资	14
2.3 总成本费用	22
2.4 营业收入	32
2.5 税金	34
2.6 利润	39
第 3 章 资金等值计算	42
3.1 资金的时间价值	42
3.2 利息与利率	43
3.3 资金等值计算方法	48
第 4 章 技术经济分析的基本方法	62
4.1 概述	62
4.2 经济效果评价指标与方法	62
4.3 决策结构及其分析方法	78
第 5 章 不确定性分析	96
5.1 概述	96
5.2 盈亏平衡分析	99
5.3 敏感性分析	103
5.4 风险分析	109

第 6 章 风电场财务评价 119

6.1 概述 119

6.2 陆上风电场财务评价实例分析 124

6.3 海上风电场财务评价实例分析 144

第 7 章 风电场国民经济评价与社会效果分析 166

7.1 概述 166

7.2 经济效益和费用的识别与估算 169

7.3 经济费用效益分析指标 174

7.4 区域经济与宏观经济影响分析 175

7.5 风电场的社会环境效果分析 180

第 8 章 风电场建设资金与融资分析 183

8.1 资金来源与筹措方式 183

8.2 资金成本分析 194

8.3 资金结构分析 198

8.4 融资风险分析 201

第 9 章 风电场设备更新技术经济分析 203

9.1 设备磨损及其经济寿命 203

9.2 设备大修及其技术经济分析 208

9.3 设备更新及其技术经济分析 211

9.4 设备现代化改装及其技术经济分析 215

第 10 章 风电场后评价中的技术经济分析 218

10.1 概述 218

10.2 风电场后评价中的经济效益分析 219

10.3 风电场经济效益优化 223

参考文献 225

第 1 章 绪 论

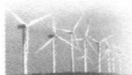
1.1 风能资源及风电发展概况

1.1.1 我国的风能资源及其分布

风是自然界中的空气流动现象，一般是指空气相对于地面的水平运动。风能是空气流动所产生的动能。风能资源是一种储量极为丰富的自然资源，也是一种清洁的可再生能源。早在 1948 年，普特南姆 (Putnam) 曾对全球风能储量进行了估算，他认为大气总能量约为 10^{14} MW。这个数量得到世界气象组织的认可，并在其 1954 年出版的技术报告《来自于风的能量》中进一步假定上述数量的 $1/10^7$ 是可为人们所利用的，即 10^7 MW 为可利用的风能。然而，1974 年，冯·阿尔克斯 (W. S. Von Arx) 指出，上述数值过大，只能作为一个储藏量。他认为，风能这样的可再生能源必须跟太阳能的流入量对它的补充相平衡，据此，他提出地球上可以利用的风能为 10^6 MW。即便如此，全球可利用风能的数量仍为可利用水能的 10 倍。1979 年，古斯塔夫逊 (M. R. Gustavson) 从另一个角度推算了风能利用的极限。他根据风能来源于太阳能这一理论，认为可以通过估计到达地球表面的太阳辐射流中能够转变为风能的数量，来推算可利用的风能的数量。根据他的推算，到达地球表面的太阳辐射流是 1.8×10^{17} W，经折算后是 350 W/m^2 ，其中，转变为风能的转化率 $\eta = 2\%$ ，因此可以获得的风能为 3.6×10^{15} W，即 7 W/m^2 。在整个大气层中边界层约占 35%，于是，边界层中能获得的风能为 1.3×10^{15} W，即 2.5 W/m^2 。作为一种稳妥的估计，在近地面层中，风能提取极限按 $1/10$ (即 0.25 W/m^2) 计，则全球风能资源的可利用量为 1.3×10^{14} W。以上介绍的情况表明，不论采用哪一种估算结果，风能资源都是一种数量极为可观、开发利用潜力巨大的能源。

一方面，与煤炭、石油、天然气等矿物燃料能源不同，风能资源不会随着其本身的转化和利用而减少，因此也可以说是一种取之不尽、用之不竭的能源。另一方面，矿物燃料的利用过程往往会带来严重的环境污染问题。例如，利用矿物燃料会导致空气中 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、CO 等气体排放量的增加，进而导致温室效应、酸雨等现象的产生，而大规模利用风能资源，大力发展风电，被认为是缓解能源短缺状况、减少空气污染、减少有害气体 (CO_2 等) 排放的有效措施之一。自 20 世纪 70 年代以来，世界范围内的风力发电技术取得了长足的进步，在此基础上，许多国家建立了众多的中型及大型风力发电场，风力发电的装机规模发展迅速。根据全球风能理事会 (Global Wind Energy Council, GWEC) 的统计，到 2011 年，全球 75 个国家有商业运营的风电装机，其中 22 个国家的风电装机容量超过 1GW，而全球累计风电装机容量达到 238GW。

我国的风能资源非常丰富。1980 年，我国进行了第一次风能资源普查。当时在全国



29 个省（自治区、直辖市）选择了 300 个气象站点，从每个站点 30 年的气象资料中选出了 3 组年数据（即风速大值年、小值年、平均年），通过计算分析，得出我国风能资源储量约为 1.6 亿 kW 的结论。1984 年 9 月至 1987 年 7 月，我国又开展了第二次风能资源详查。这次详查对风能资源丰富和较丰富的 19 个省（自治区、直辖市）的 748 个气象站连续 10 年的风能资料进行了收集、统计和计算，1995 年中国气象局对外公布了详查结果，我国陆地 10m 高度处风能资源理论储量为 32.26 亿 kW，技术可开发量按理论储量的 10% 推算，并考虑风轮扫掠面积，为 2.53 亿 kW，见表 1-1。此外，当时对我国近海风能资源只做了粗略估计，认为我国近海（水深小于 15m）风能资源为陆上的 3 倍，即 7.50 亿 kW。据此，得到我国风能资源技术可开发总量约为 10 亿 kW 的结论。

表 1-1 我国陆上风能资源量及其地区分布情况表

省、自治区	理论储量/ 10^{10} W	技术可开发量/ 10^{10} W	平均单位面积储量/ $(W \cdot m^{-2})$
内蒙古	78.6940	6.1775	695.48
辽宁	7.7166	0.6058	514.44
黑龙江	21.9467	1.7228	477.10
吉林	8.1215	0.6375	451.19
青海	30.8455	2.4214	428.41
西藏	50.8661	3.9930	423.88
甘肃	14.5607	1.1430	373.35
台湾	1.3350	0.1048	370.83
河北	7.7943	0.6119	357.87
山东	5.0139	0.3936	334.26
山西	4.9308	0.3871	328.73
河南	4.6821	0.3675	292.63
宁夏	1.8902	0.1484	286.39
江苏	3.0264	0.2376	286.05
新疆	43.7329	3.4330	273.33
安徽	3.1914	0.2505	245.49
海南	0.8154	0.0640	239.82
江西	3.7313	0.2929	233.21
浙江	2.0828	0.1635	208.28
陕西	2.9840	0.2342	157.05
湖南	3.1403	0.2465	149.54
福建	1.7474	0.1372	145.62
广东	2.4845	0.1950	138.23
湖北	2.4550	0.1927	136.39
云南	4.6705	0.3666	122.91
四川	5.5514	0.4358	99.13
广西	2.1415	0.1681	93.11
贵州	1.2814	0.1006	75.38
全国	322.600	25.3000	



2004—2006年,中国气象局组织开展了第三次全国风能资源调查,利用全国2000多个气象台站近30年的观测资料,对原有的计算结果进行修正和重新计算,结果表明:我国陆上风能资源总储量为43.5亿kW,其中技术可开发量为2.97亿kW。2008年,中国气象局又牵头组织实施了“全国风能详查和评价”项目。2009年,中国气象局公布了这次风能资源详查和评价结果:我国风能开发潜力逾25亿kW。我国陆上离地面50m高度达到3级以上风能资源的潜在开发量约23.8亿kW;我国5~25m水深线以内近海区域,海平面以上50m高度处可装机2亿kW。

以上情况表明,我国风能资源丰富,可开发的风能潜力巨大,具有成为未来能源结构中重要组成部分的资源基础。

我国幅员辽阔,各地自然条件不同,风能资源呈现出地区分布不均的特点。一般说来,平均风速越大,风功率密度越大,风能可利用小时数就越多,风能资源越丰富。我国风能区域等级划分的标准如下:

(1) 风能资源丰富区。年有效风功率密度大于 $200\text{W}/\text{m}^2$, $3\sim 20\text{m}/\text{s}$ 风速的年累积小时数大于5000h,年平均风速大于 $6\text{m}/\text{s}$ 。

(2) 风能资源次丰富区。年有效风功率密度为 $150\sim 200\text{W}/\text{m}^2$, $3\sim 20\text{m}/\text{s}$ 风速的年累积小时数为5000~4000h,年平均风速在 $5.5\text{m}/\text{s}$ 左右。

(3) 风能资源可利用区。年有效风功率密度为 $100\sim 150\text{W}/\text{m}^2$, $3\sim 20\text{m}/\text{s}$ 风速的年累积小时数为4000~2000h,年平均风速在 $5\text{m}/\text{s}$ 左右。

(4) 风能资源贫乏区。年有效风功率密度小于 $100\text{W}/\text{m}^2$, $3\sim 20\text{m}/\text{s}$ 风速的年累积小时数小于2000h,年平均风速小于 $4.5\text{m}/\text{s}$ 。

具体地,根据有效风功率密度和一年中风速不小于 $3\text{m}/\text{s}$ 的累积小时数,我国风能资源的地理分区情况如下:

(1) 东南沿海及其岛屿为风能资源丰富区。有效风功率密度不小于 $200\text{W}/\text{m}^2$ 的等值线平行于海岸线,沿海岛屿的风功率密度在 $300\text{W}/\text{m}^2$ 以上,一年中风速不小于 $3\text{m}/\text{s}$ 的累积小时数为7000~8000h。但是,当从这一地区延伸向内陆,地形呈丘陵连绵,冬半年强大冷空气南下,很难长驱直入;夏半年台风在离海岸50km时,风速便减小到68%。因此,东南沿海仅在由海岸向内陆几十公里的范围内有较多风能资源,再向内陆风能资源锐减,在离海岸不到100km的地带,有效风功率密度降至 $50\text{W}/\text{m}^2$ 以下,反而成为全国风能资源贫乏区。而在沿海岛屿上(如福建省的台山、平潭等,浙江省的南麂、大陈、嵊泗等,广东省的南澳等)风能资源都很多。其中,台山有效风功率密度为 $534.4\text{W}/\text{m}^2$,一年中风速不小于 $3\text{m}/\text{s}$ 的累积小时数为7905h,平均每天出现风速大于等于 $3\text{m}/\text{s}$ 的时间可达21h20min,是我国平地上有记录的风能资源最多的地方之一。

(2) 内蒙古和甘肃北部以北广大地带亦为风能资源丰富区。这一带终年在高空西风带控制之下,又是冷空气入侵首当其冲的地方,有效风功率密度在 $200\sim 300\text{W}/\text{m}^2$,一年中风速不小于 $3\text{m}/\text{s}$ 的累积小时数为5000h以上,最大的虎勒盖地区达到7659h,并呈现自北向南逐渐减少的特点,但其梯度比东南沿海小。该区域虽比东南沿海岛屿上的风功率密度略小,但其分布范围较广,是我国连成一片的最大风能资源区,适于大规模开发利用。



(3) 黑龙江和吉林东部及辽东半岛沿海也属于风能资源丰富区,有效风功率密度在 $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上,一年中风速不小于 3m/s 的累积小时数为 $5000\sim 7000\text{h}$ 。

(4) 青藏高原北部也应属于风能资源丰富区。其有效风功率密度在 $150\sim 200\text{W}/\text{m}^2$ 之间,一年中风速不小于 3m/s 的累积小时数达 6500h 。但由于该地区海拔高,空气密度较小,所以有效风功率密度也相对较小。因此,若仅从一年中风速不小于 3m/s 的累积小时数考虑,青藏高原应属风能资源丰富区,而实际上这里的风能资源储量远比东南沿海小。

(5) 云南、贵州、四川、甘肃、陕西南部,河南、湖南西部以及福建、广东、广西的山区,西藏雅鲁藏布江以及新疆塔里木盆地属于风能资源贫乏区,其有效风功率密度在 $50\text{W}/\text{m}^2$ 以下,一年中风速不小于 3m/s 的累积小时数在 2000h 以下,尤以四川盆地和西双版纳地区风能资源储量最小。这些地区除高山顶和峡谷等特殊地形外,风力潜能很低,无利用价值。

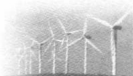
(6) 在以上(4)、(5)两类地区以外的广大地区为风能资源可利用区,有的地区风能资源在冬、春季可以利用,有的地区在夏、秋季可以利用。这些地区有效风功率密度在 $50\sim 150\text{W}/\text{m}^2$ 之间,一年中风速不小于 3m/s 的累积小时数为 $2000\sim 4000\text{h}$ 。

需要指出,我国东部沿海水深 $5\sim 20\text{m}$ 的海域面积辽阔,但受到航线、港口、养殖等海洋功能区划的限制,近海实际的技术可开发风能资源量远远小于陆上。不过在江苏、福建、山东和广东等地,近海风能资源丰富,距离电力负荷中心很近,近海风电可以成为这些地区未来发展的一项重要清洁能源。

1.1.2 风力发电概况

人类对风能资源的利用已有数千年的历史。早期阶段,风能作为重要的动力,被广泛用于船舶航行、提水饮用和灌溉、排水造田、磨面和锯木等。在蒸汽机出现之前,风力机械是动力机械的一大支柱。随着煤、石油、天然气的大规模开采和廉价电力的获得,曾经被广泛使用的各种风力机械,由于成本高、效率低、使用不方便等原因无法与蒸汽机、内燃机和电动机等相竞争,渐渐被淘汰。

19世纪末,丹麦首先开始利用风力发电,并研制出风力发电机组。但是,20世纪70年代以前,只有小型充电用风力发电机组达到实用阶段。20世纪30年代,在美国很多电网未通达的地区,独立运行的小型风力发电机组在实现农村电气化方面起到了很大作用。对于如何将风力发电机组发出的电送入常规电网,人们曾做过许多尝试来研制并网风力发电机组,其中对后来风力发电机组技术发展产生过重要影响的是丹麦的 Gedser 200kW 风力发电机组,设计者采用异步发电机,定桨距风轮和叶片端部带有制动翼片,这种结构方式后来成为丹麦风力发电机组的主流,在市场上获得巨大成功。该机组从1957年运行到1966年,平均年发电量为 $45\text{万 kW}\cdot\text{h}$ 。1973年石油危机发生以后,在常规能源告急和全球生态环境恶化的双重压力下,作为新能源的一部分,风能资源的开发利用有了长足的发展。特别是风力发电在解决发展中国家无电农牧区居民的用电方面发挥了重要的作用。即使在发达国家,风能作为一种高效清洁的新能源也日益受到重视。例如,美国于1974年开始实行联邦风能计划,其内容主要是:评估国家的风能资源;研究风能开发中的社会和环境问题;改进风力发电机组的性能,降低造价;研究为农业和其他用户用的小于 100kW 的风力发电机组;为电力公司



及工业用户设计兆瓦级风力发电机组。近年来，随着全球应对气候变化呼声的日益高涨以及能源短缺和能源供应安全形势的日趋严峻，风能作为可再生能源中成本较低、技术较成熟、可靠性较高的新能源，已开始在世界能源供应中发挥更加重要的作用，风力发电的普及程度迅速提高。截至2010年年底，已有100多个国家开始发展风力发电，其中风电装机容量超过100万kW的国家有20个，全球风电总装机容量已达到2亿kW。预计到21世纪中叶，风能将成为世界能源供应的支柱之一，成为人类社会可持续发展的主要动力源。

我国是世界上最早利用风能的国家之一。早在公元前数世纪，我国人民就利用风力提水、灌溉、磨面、舂米，用风帆推动船舶前进。到了宋代，我国进入风车应用的全盛时代，当时应用广泛的垂直轴风车一直沿用至今。而沿海沿江地区的风帆船，以及利用风力提水灌溉或制盐的做法，则一直延续到20世纪50年代，仅在江苏沿海地区，利用风力提水的设备就曾达到20万台。

我国的风力发电始于20世纪50年代后期，初期主要是为了解决海岛和偏远农村牧区的用电问题，重点在于离网小型风力发电机组的建设。20世纪70年代末，我国开始进行并网风电的示范研究，并引进国外风机建设示范风电场。1986年，我国第一座风电场——马兰风电场在山东荣成并网发电，成为我国风力发电史上的里程碑。此后，我国风电真正进入快速发展时期。随着风力发电技术的进步和国家产业政策持续支持，风电装机规模迅速扩大。2005年底，全国风力发电总装机容量达到1.25GW，到“十一五”期末，我国累计风电装机容量迅速增加到44.73GW（图1-1）。按风电装机规模计算，我国在2005年位居世界第八位，到2010年已跃居世界第一位。目前，我国有29个省、自治区、直辖市（不含港、澳、台地区）建设了风电场，其中，风电累计装机容量超过2GW的省份有7个（表1-2）。风力发电为我国能源供应和减少温室气体排放做出了重要贡献，2010年，全国风电年发电量490亿kW·h，按照发电标煤煤耗320g/（kW·h）计算，可

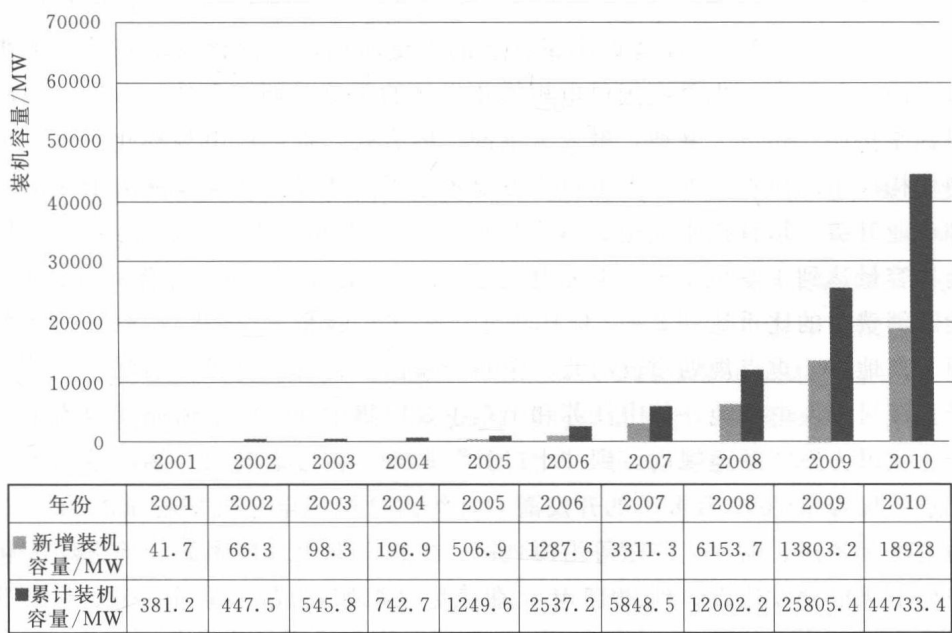


图1-1 中国新增及累计风电装机容量（2001—2010年）

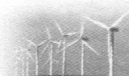


节省标煤 1568 万 t，减少 CO₂ 排放 4829 万 t，减少 SO₂ 排放 24.6 万 t，风力发电已经成为我国除火电、水电等常规能源外最重要的发电方式。

表 1-2 2010 年各省（自治区、直辖市）风电装机容量情况

序号	省（自治区、直辖市）	2010 年累计装机容量/MW	序号	省（自治区、直辖市）	2010 年累计装机容量/MW
1	内蒙古	13858.0	18	陕西	177.0
2	甘肃	4944.0	19	北京	152.5
3	河北	4794.0	20	安徽	148.5
4	辽宁	4066.9	21	河南	121.0
5	吉林	2940.9	22	天津	102.5
6	山东	2637.8	23	湖南	97.3
7	黑龙江	2370.1	24	江西	84.0
8	江苏	1595.3	25	湖北	69.8
9	新疆	1363.6	26	重庆	46.8
10	宁夏	1182.7	27	贵州	42.0
11	山西	947.5	28	青海	11.0
12	广东	888.8	29	广西	2.5
13	福建	833.7	30	香港	0.8
14	云南	430.5	31	四川	0
15	浙江	298.2	32	台湾	519.0
16	上海	269.4		总计	45252.8
17	海南	256.7			

“十二五”时期是我国全面建设小康社会的关键时期，是深化改革开放、加快转变经济发展方式的攻坚时期，也是我国风电规模化发展的重要时期。在这一时期，我国风电发展的总目标是按照“建设大基地、融入大电网”的方式，推进风电规模化发展，增加风电在能源消费构成中的比重；加强海上风力发电示范工程建设，积极发展海上风电；加快风电技术和产业升级，培育技术先进、具有国际竞争力的风电产业。预计到 2015 年，我国风电总装机容量达到 1.0 亿 kW，年发电量达到 2000 亿 kW·h，折合标煤约 6000 万 t，风电在能源消费中的比重达到 2%。依托华北、东北、西北（“三北”）地区以及东部沿海风能资源丰富地区，重点规划建设河北、蒙东、蒙西、吉林、甘肃、新疆、江苏、山东八大千万千瓦级风力发电基地，其中江苏和山东主要以集中开发海上风能资源为重点。根据各千万千瓦级风力发电基地规划，到“十二五”期末，在考虑电力市场消纳的情况下，各基地具备总装机容量 7000 万 kW 的开发潜力，约占全国风电总规划容量的 70%。在经济较发达的上海、福建、浙江、广东等沿海地区，发挥其海上风能资源、地区经济和市场优势，加快海上风电开发建设，到 2015 年，在该地区海域建成 10 余个 10 万千瓦级的大型海上风力发电场。在其他具有可利用风能资源开发价值的内陆省（自治区、直辖市），因地制宜发展中小型风电场。同时，不断提高风电场设计、建设和运营水平，在风力发电机



组整机设计和轴承、控制系统等核心部件制造的关键技术方面取得新突破,使我国风电设备制造技术水平和装备能力基本达到国际先进水平。根据国家发展和改革委员会能源研究所发布的《中国风电发展路线图 2050》报告,到 2020 年、2030 年和 2050 年,我国风电装机容量将分别达到 2 亿 kW、4 亿 kW 和 10 亿 kW,成为中国五大能源之一。到 2050 年,风电将满足全国 17% 的电力需求。

1.2 风电场技术经济分析的目的与意义

从我国经济社会发展对电力能源的需求和风能资源条件出发,同时考虑我国节能减排和生态文明建设目标的要求,大力发展风力发电,积极推进风电场建设,有着十分重要的意义。为了不断提高风电场设计、建设和运营水平,促进风力发电的健康持续发展,必须做好风电场的技术经济分析。

在风电场建设的过程中,必然涉及到一系列技术经济因素。例如,要建设一座风电场,就需要对该工程项目进行勘测、规划、设计、施工、科研、运行和管理等一系列工程技术活动。所有这些工程技术活动,都直接涉及人力、物力、财力等各类资源的投入,而该工程项目的建成并投入生产运营,又直接为社会提供电能产品或服务,产生一定的工程效用。在现实社会条件下,任何一座风电场工程项目建设可以利用的资源数量是有限的,因此,人们自然会关心这样的问题:相对于其工程效用而言,风电场的资源投入是否值得?如何使风电场以尽可能少的资源投入,去实现尽可能大的工程效用?要回答这样的问题,就要对风电场工程建设所涉及的资源投入、工程效用以及两者之间的关系进行全面的技术经济分析。通常,资源投入是通过风电场的投资和发电成本体现的,工程效用则是以发电效益体现的。根据相关资料,目前我国陆上风电开发的单位千瓦投资一般为 8000~9000 元/kW,其中,风力发电机组投资约占 50%,风电场运行维护成本约为 0.1 元/(kW·h),单位风电电能成本为 0.5~0.6 元/(kW·h);近海风电的单位千瓦投资约为陆上风电的 1.5~2 倍,一般为 14000~19000 元/kW,风电场运行维护成本约为 0.15 元/(kW·h),单位风电电能成本为 0.6~0.9 元/(kW·h)。在工程效益方面,风电场的效益应包括经济效益、环境效益和社会效益,而经济效益又具体体现为发电收入、清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM)收入及其他收入等,且通常发电收入是其中主要部分。目前我国陆上风电的电价水平为 0.51~0.61 元/(kW·h),近海风电的电价水平为 0.77~0.98 元/(kW·h)。在现有电价定价机制下,若不考虑煤电的资源、环境成本,不考虑风电的环境效益,风电成本和电价水平高于煤电成本和电价水平。如果考虑风电替代煤电的资源、环境效益,风电成本将与煤电相当。随着我国风电开发规模的不断扩大和风电技术的不断进步,风力发电机组价格、风电场投资和运行维护成本将逐渐降低,进而拉低风力发电成本。与此同时,由于煤炭开采成本和价格的攀升,我国煤电价格上涨将难以避免。预计到 2020 年,即使不考虑化石能源资源税(或环境税、碳税等)等政策出台的可能性,风电的成本和价格也将达到与煤电成本和价格持平的水平;到 2020 年后,在不考虑风电消纳和远距离输送的情况下,风电价格将会低于煤电价格,风电开发的资源、环境效益将得到进一步彰显。