



“十二五” “十三五” 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 规划与设计

(第2版)

Wind Farm  
Planning and Designing  
(Edition 2)

许昌 钟淋涓 等 编著

淮外借



中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)



2019-1-096



“十二五” “十三五” 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

# 规划与设计

(第2版)

Wind Farm  
Planning and Designing  
(Edition 2)

许昌 钟淋涓 等 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书系统而全面地介绍风电场规划与设计相关的基础知识,内容包括风能资源、风电场和风力发电概况,风电场的宏观选址,风能资源测量与评估,风力发电技术与设备选型,风电场的微观选址,大气动力学与风电场选址,风电场的电气设计,风电场的运行方式,风电场的经济计算与评价,风电场的环境评价及水土保持,风电场预可行性研究报告和可行性研究报告等。

本书适合作为高等院校相关专业的教学参考用书,也适合从事风电场规划与设计的工程技术人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

风电场规划与设计 / 许昌等编著. — 2版. — 北京:  
中国水利水电出版社, 2021.6  
(风力发电工程技术丛书)  
ISBN 978-7-5170-9694-8

I. ①风… II. ①许… III. ①风力发电—发电厂—规划②风力发电—发电厂—设计 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第123896号

审图号: GS(2013)151号

书 名	风力发电工程技术丛书 <b>风电场规划与设计 (第2版)</b>
作 者	FENGDIANCHANG GUIHUA YU SHEJI 许 昌 钟淋涓 等 编著
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、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	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 22.25印张 541千字
版 次	2014年1月第1版第1次印刷 2021年6月第2版 2021年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	<b>78.00元</b>

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

丛书总策划 李 莉

## 主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学

中国长江三峡集团有限公司

中国水利水电出版社有限公司

水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心

水电水利规划设计总院

水利部水利水电规划设计总院

中国能源建设股份有限公司

上海勘测设计研究院有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

长江设计集团有限公司

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(集团)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

华北电力大学

同济大学

华南理工大学

中国三峡新能源(集团)股份有限公司

华东海上风电省级高新技术企业研究开发中心

浙江运达风电股份有限公司

## 本书编委会

主 编 许 昌 钟淋涓

参编人员 Wenzhong Shen 张佳丽 胡小峰 刘 玮 张云杰

周 川 黄春芳 彭秀芳 赵生校 齐志诚 刘建平

牛国智 黎发贵 李良县

### 本书主要参编单位

河海大学

水电水利规划设计总院

丹麦科技大学 (Technical University of Denmark)

中国三峡新能源 (集团) 股份有限公司

国家电力投资集团五凌电力有限公司

中国能建集团广东省电力设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司

中国能源建设集团江苏省电力设计研究院有限公司

扬州大学



## 第二版前言

2020年联合国气候雄心峰会议指出：我国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施控制二氧化碳排放，力争于2030年前达到峰值，争取在2060年前实现碳中和，同时到2030年，我国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右，森林蓄积量将比2005年增加60亿 $\text{m}^3$ ，风能、太阳能发电总装机容量将达到12亿kW以上。这一宏伟而又广受好评的目标必将进一步加快推动风能从补充能源加快转变成替代能源的步伐，促进风电产业更加快速的发展。

我国风电产业经历了早期示范、产业化探索、产业化发展、大规模发展等几个阶段，2011年我国的风电装机容量已达到世界首位，此后十多年，我国风电每年的装机容量也均位于世界首位。我国风电场规划与设计技术随着风电产业的发展而不断进步，从早期的消化吸收，发展到不断的积累创新，目前在解决工程问题方面积累了一定的经验，并时有创新，但是仍缺少系统性的教材或参考资料，特别是对于初期进入该行业的工程技术人员和大专院校的学生，相关资料甚少。

本书的编写组于2014年在河海大学风能与动力工程专业（现新能源科学与工程）“风电场规划与设计”课程的基础上，同时结合广大勘测设计单位的工程规划与设计经验，合作编写了由国家出版基金资助的《风电场规划与设计》。该书出版后，承蒙广大大专院校师生和工程技术人员的厚爱，目前具有一定的影响力，据不完全统计已经被20余所大专院校选作教学参考用书，同时在广大勘测设计和制造单位领域也有一定的使用量和影响力。

随着风电产业快速发展，目前风电场规划设计面临的问题和新的技术与方

法不断推陈出新，如大规模风电基地、低风速风电场、海上风电场、复杂地形风电场等工程所面临的问题与早期单个规模不大、地形平坦的风电场所面临的问题有较大差异，另外在风资源测量、风资源计算、评估方法、风电场微观选址优化方法以及风电场接入电网的运行方式等方面均有较大的革新。

在江苏省重点教材项目资助下，本书编写组在第一版的基础上，针对读者反映的问题，风电发展过程状况，风电产业出现的新情况、新方法、新技术和海上风电场的规划设计等方面均进行了全面更新和补充，部分章节内容进行了细化和完善，以期望书籍能够更具有时代性和系统性，同时也弥补作者的遗憾。

本书在编写和修订过程中，得到广大兄弟单位和河海大学许昌教授课题组各届博士生、硕士生的帮助，而在此次修订过程中特别对硕士生焦志雄、张虎等的帮助，以及各个合作单位的不吝指教和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，书中定有不足之处，希望广大读者批评指正。

编者

2021年1月



## 第一版前言

风力发电是目前最接近市场化操作的可再生能源利用形式，风能也是最有希望的一种常规能源替代能源。我国的风力发电经过早期示范阶段（1986—1993年）、产业化探索阶段（1994—2003年）、产业化发展阶段（2004—2007年）以及大规模发展阶段（2008年至今）的发展，截至2013年年底，全国拥有建成和在建风电场超过1000个，稳步保持全球风电装机容量第一的地位。

我国的风电场规划与设计也和风力发电技术一样，从早期的技术引进与消化吸收到逐渐积累经验和创新，形成了一些在风电场规划与设计方面的理论和技术，相关文献不断推陈出新，但是仍然欠缺一些完整而令人满意的关于风电场规划与设计方面的参考书籍，本书在风电专业理论的基础上，结合我国几个大型风力发电规划设计单位的经验，整理成一本供相关专业人员参考和本科学士生培养的书籍。

全书共分为11章。其中第1章至第6章由河海大学许昌编写；第7章至第11章由河海大学钟淋涓编写。其中第1章由中国水电工程顾问集团有限公司校核；第2章和第10章由中水东北勘测设计研究有限责任公司校核；第3章由上海勘测设计研究院校核；第4章由中国水电顾问集团北京勘测设计研究院有限公司校核；第5章由中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司校核；第6章由中水珠江规划勘测设计有限公司校核；第7章和第8章由内蒙古电力勘测设计院校核；第9章由中国水电顾问集团西北勘测设计研究院有限公司校核；第11章由中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院有限公司校核。全书由河海大学刘德有教授、丹麦科技大学 Wenzhong Shen 教授和中国科学院工程热物理研究所张明明研究员负责总体审阅与校核。

本书编写过程中，还得到了严彦、田蔷蔷、李旻、李辰奇、杨建川、王欣等的帮助，对他们的辛勤劳动表示感谢。

由于编著者水平有限，书中难免有不足之处，希望广大读者批评指正。

编者

2013年11月



# 目 录

第二版前言

第一版前言

<b>第 1 章 风能资源、风电场和风力发电概况</b> .....	1
1.1 风电场 .....	1
1.2 风力发电的意义及特点 .....	3
1.3 风的形成和分类 .....	4
1.4 我国的风能资源与分布 .....	13
1.5 世界范围的风能资源及分布 .....	18
1.6 我国风力发电展望 .....	21
1.7 全球风力发电展望 .....	25
1.8 风电场的建设与规划设计 .....	27
1.9 风电场规划与设计的主要内容 .....	31
<b>第 2 章 风电场的宏观选址</b> .....	33
2.1 宏观选址的基本原则 .....	33
2.2 宏观选址的技术标准 .....	34
2.3 海上风电场的宏观选址 .....	38
2.4 大型风电基地的宏观选址 .....	40
2.5 宏观选址存在的问题与后评估 .....	43
<b>第 3 章 风能资源测量与评估</b> .....	45
3.1 测风步骤 .....	45
3.2 测风塔 .....	46
3.3 测风系统 .....	49
3.4 测风数据处理 .....	66
3.5 风能资源统计计算 .....	71
3.6 风能资源评价 .....	90

<b>第 4 章 风力发电技术与设备选型</b>	92
4.1 风电机组分类	92
4.2 风电机组气动与工作原理	93
4.3 典型风电机组结构	102
4.4 发电机及风力发电系统	106
4.5 风力发电技术发展趋势	113
4.6 风电机组设备选型	116
<b>第 5 章 风电场的微观选址</b>	132
5.1 微观选址的意义	132
5.2 微观选址的影响因素	133
5.3 风电机组尾流	142
5.4 风电场微观布置方法	156
5.5 风电场微观布置的典型软件包	160
5.6 风电场微观布置新方法	171
5.7 风电场单机微观布置与容量选择	172
<b>第 6 章 大气动力学与风电场选址</b>	177
6.1 计算流体力学与风电场选址	177
6.2 大气动力学相关理论	180
6.3 大气的地转运动和非地转运动	183
6.4 大气分层和结构	185
6.5 基于数值模拟的风能资源评价	191
<b>第 7 章 风电场的电气设计</b>	199
7.1 风电场电气设备构成	199
7.2 电气一次	201
7.3 电气二次	217
7.4 电气主接线	223
7.5 通信系统	227
<b>第 8 章 风电场的运行方式</b>	229
8.1 电力系统负荷曲线	229
8.2 电力系统中各类电源的运行特性	233
8.3 风电场接入电力系统	241
8.4 风电场的运行方式	243
<b>第 9 章 风电场的经济计算与评价</b>	257
9.1 风电场经济计算与评价的任务和内容	257
9.2 风电场经济计算指标	258
9.3 风电场经济计算与评价	262

9.4 风电场经济效益和社会效益 .....	297
<b>第 10 章 风电场的环境评价及水土保持 .....</b>	<b>300</b>
10.1 风电场环境评价 .....	300
10.2 风电场水土保持 .....	310
<b>第 11 章 风电场预可行性研究报告和可行性研究报告 .....</b>	<b>315</b>
11.1 风电场预可行性研究报告的作用和特点 .....	315
11.2 风电场预可行性研究报告的编制和报批 .....	316
11.3 风电场可行性研究的意义、作用和程序 .....	323
11.4 风电场可行性研究报告的编制和报批 .....	326
<b>参考文献 .....</b>	<b>331</b>

# 第 1 章 风能资源、风电场和风力发电概况

## 1.1 风 电 场

以风能为动力的发电设备，称为风电机组。装有两台或多台并网型风电机组的发电站称为风力发电场，通常称风电场。风电场的风电机组产生的电能，通过电缆经箱式变电站将其电压由 0.4kV 或 0.69kV 升至 10kV 后，再经架空线路或电缆输送到风电场的变电站，在变电站将电压升高至 35kV、110kV 或更高电压等级后，经高压架空线路输入公共电网，并网型风电场构成如图 1-1 所示。



陆上风电场  
和海上风  
电场介绍

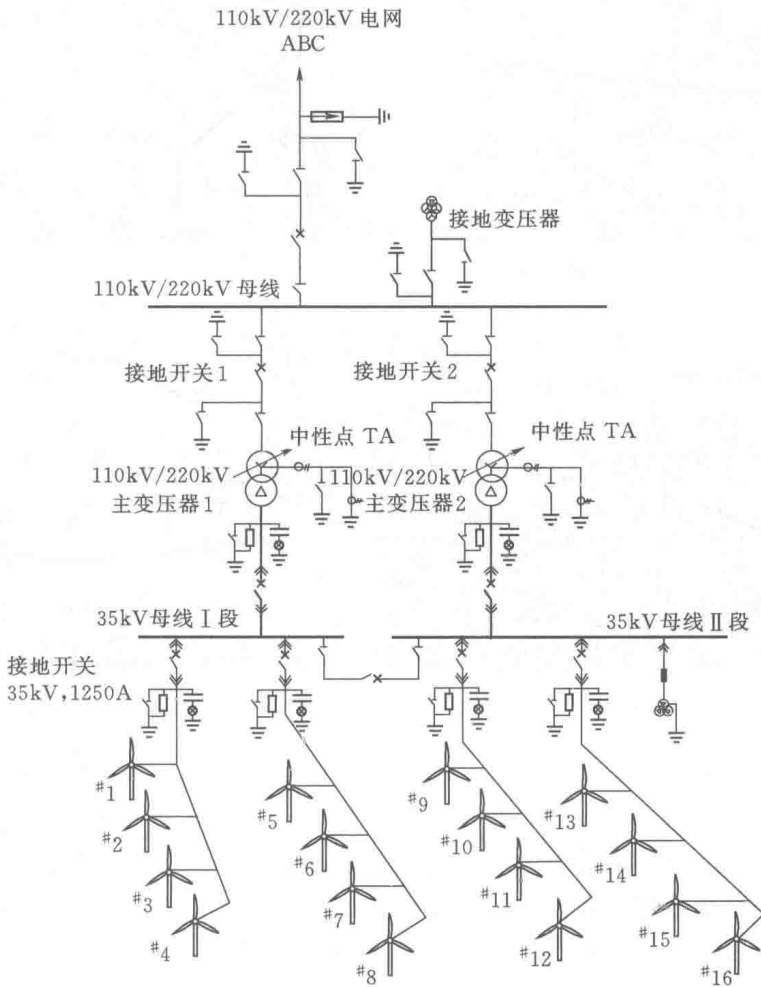


图 1-1 并网型风电场



风电场（风力发电场）通常是在风能资源较好且范围较大区域，将多台大容量风力发电机组按照一定的阵列布局方式，规模从几十兆瓦到几百兆瓦甚至更大容量，并向电网供电的风力发电系统。风电场是大规模风能利用的有效形式。

风电场按照地理位置通常可分为陆上风电场和海上风电场。陆上风电场指在陆地和沿海多年平均大潮高潮线以上滩涂地区开发建设的风电场，按照地形可以分为平坦地形风电场、复杂地形风电场、高原风电场等；按照规模可以分为分散式风电场、一般规模风电场和大规模风电基地等，如图1-2所示。海上风电场按照风电机组所处水深可分为潮间带风电场和潮下带滩涂风电场、近海风电场、深远海风电场等，如图1-3和图1-4所示。



图1-2 陆上风电场

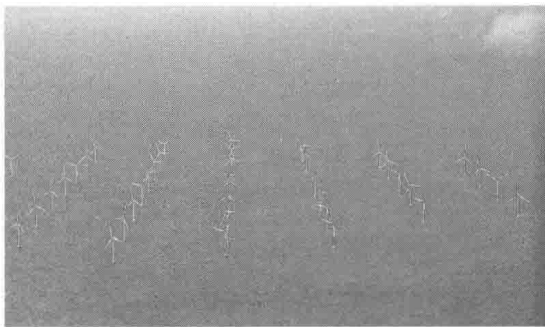


图1-3 近海风电场



图1-4 潮间带风电场

平坦地形风电场的特点是风电场受地形影响小，不会因地势起伏引起复杂绕流。这类风电场年平均风速和年利用小时数高，主要分布在我国“三北”地区；复杂地形风电场，陡峭山体在给施工和运行带来困难的同时会产生流动分离，引起流动方向改变和湍流增加，从而直接影响下游风电机组的出力和疲劳载荷；高原风电场，由于海拔高，空气密度低，风功率密度低，绝缘要求高，另外在低温、冰冻、雷雨、湿度大等自然条件的影响下，高原风电场风电机组的要求比一般风电场的更高。



分散式风电是风电产业可持续发展的重要补充，一般位于负荷中心附近，所产生的电能就近并入当地电网进行消纳。

相对于陆上风电场，海上风电场的主要优点有：①风场风况优于陆地，而海面粗糙度小，离岸 10km 的海上风速通常比沿岸陆上高约 25%；②海上风湍流强度小，具有稳定的主导风向，风电机组承受的疲劳负荷较低，使得风电机组寿命更长；③在海上开发利用风能，受噪声、景观影响以及鸟类、电磁波等干扰问题的限制较少；④海上风电场不占陆上用地，不涉及土地征用等问题，对于人口比较集中，陆地面积相对较小、濒临海洋的国家或地区较适合发展海上风电。基于海上风力发电的独特优势，世界各国正在纷纷发展海上风电产业。目前海上风力发电的开发主要集中在欧洲，我国也在近年开始开发和利用近海风能资源，特别是江苏、山东、浙江和福建等沿海省份。我国近海风电场的特点见表 1-1。

表 1-1 我国近海风电场的特点

项 目	海 上 风 电 场 特 点
发电指标	海面平坦，利用时数高，大部分达到 7000~8000h
装机容量指标	适用 3MW 以上的大型风电机组
土地指标	不占用土地资源，海滩、海涂面积为 1.27 万 km <sup>2</sup>
电网指标	接近用电负荷中心，东部 12 个省、自治区、直辖市用电量约占 55%
成本指标	基础施工、设备安装等成本高
技术障碍	台风、盐雾、海浪、潮流等自然因素

## 1.2 风力发电的意义及特点

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趋匮乏。据专家预测，煤炭大约还可开采 220 年、石油大约 40 年、天然气只能用 60 年。实现能源持续发展的唯一出路就是有计划地利用常规能源、节约能源、开发和利用新能源和可再生能源。目前电能产生主要靠火力发电，但火力发电产生大量的污染物。为减少对大气的污染，实现能源的持续发展，开发和利用以风能为代表的可再生能源成为必经的途径之一。因此，作为主要绿色能源之一的风能，其巨大潜力越来越受到世界各国的重视。

风力发电是利用风能来发电的，与其他常规能源发电相比，风力发电的特点如下：

(1) 风力发电是可再生的洁净能源。风力发电不消耗资源，不污染环境，这是其他常规能源（如煤电、油电）及核电等所无法实现的。

(2) 建设周期短。风电场建设工期短，单台机组安装仅需几周，从土建、安装到投产，1 万 kW 级的风电场建设期只需 0.5~1 年时间，是煤电、核电无可比拟的。

(3) 装机容量灵活。投资规模灵活，可根据资金情况，决定一次装机容量，有



了一台资金就可加装一台，投产一台。

(4) 可靠性高。把现代高科技应用于风电机组，使风力发电可靠性大大提高，目前风电机组可靠性已达98%，寿命可达20年。

(5) 造价低。与常规能源相比风力发电具有竞争力，中型风电机组单位装机容量的造价和单位发电量的电价已接近火力发电的，低于油电与核电，若计及煤电的环境保护与交通运输的间接投资，则风电经济性将优于煤电。

(6) 运行维护简单。风电机组自动化水平很高，完全可以无人值守，维修维护方便、简单。

(7) 实际占地面积小。监控、变电等建筑仅占整个风电场范围1%的土地，其余场地仍可以供农、牧、渔业使用。

(8) 发电方式多样化。风力发电既可并网运行，也可与其他能源（如柴油发电、太阳能发电、水力发电）组成互补系统，还可独立运行，如建在孤岛、海滩或边远沙漠等荒凉地带，对于解决远离电网的老、少、边地区用电发挥重大作用。

## 1.3 风的形成和分类

### 1.3.1 风的形成

空气流动现象称为风，一般指空气相对地面的水平运动。尽管大气运动很复杂，但始终遵循大气动力学和热力学变化的规律。

#### 1.3.1.1 大气环流

风的形成是空气流动的结果，空气流动的原因是地球绕太阳运转，由于日地距离和方位不同，地球上各纬度所接受的太阳辐射强度也就各异。在赤道和低纬地区比极地和高纬地区太阳辐射强度强，地面和大气接受的热量多，因而温度高。这种温差形成了南北间的气压梯度，在北半球等压面向北倾斜，空气向北流动。

地球自转形成的地转偏向力称为科里奥利力，简称偏向力或科氏力。在此力的作用下，在北半球使气流向右偏转，在南半球使气流向左偏转。所以，地球大气的运动，除受到气压梯度力的作用外，还受地转偏向力的影响。地转偏向力在赤道为零，随着纬度的增高而增大，在极地达到最大。当空气由赤道两侧上升向极地流动时，开始因地转偏向力很小，空气基本受气压梯度力影响，在北半球，由南向北流动，随着纬度的增加，地转偏向力逐渐加大，空气运动也就逐渐地向右偏转，也就是逐渐转向东方，在纬度 $30^\circ$ 附近，偏角到达 $90^\circ$ ，地转偏向力与气压梯度力相当，空气运动方向与纬圈平行，所以在纬度 $30^\circ$ 附近上空，赤道来的气流受到阻塞而聚积，气流下沉，使这一地区地面气压升高，就是所谓的副热带高压。

副热带高压下沉气流分为两支，一支从副热带高压向南流动，指向赤道。在地转偏向力的作用下，北半球吹东北风，南半球吹东南风，风速稳定且不大，为3~4级，这是所谓的信风，所以在南北纬 $30^\circ$ 之间的地带称为信风带。这一支气流补充了赤道上升气流，构成了一个闭合的环流圈，称为哈德来（Hadley）环流，也称正