

本书曾获中国石油和化学工业优秀科技图书奖“一等奖”

风能与 风力发电技术

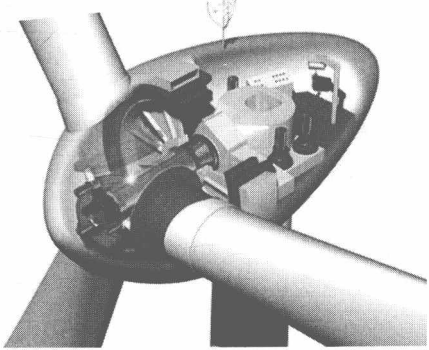
第三版

王建录 赵 萍 林志民 刘万琨 编著

WIND ENERGY
AND WIND TURBINE
POWER TECHNOLOGY

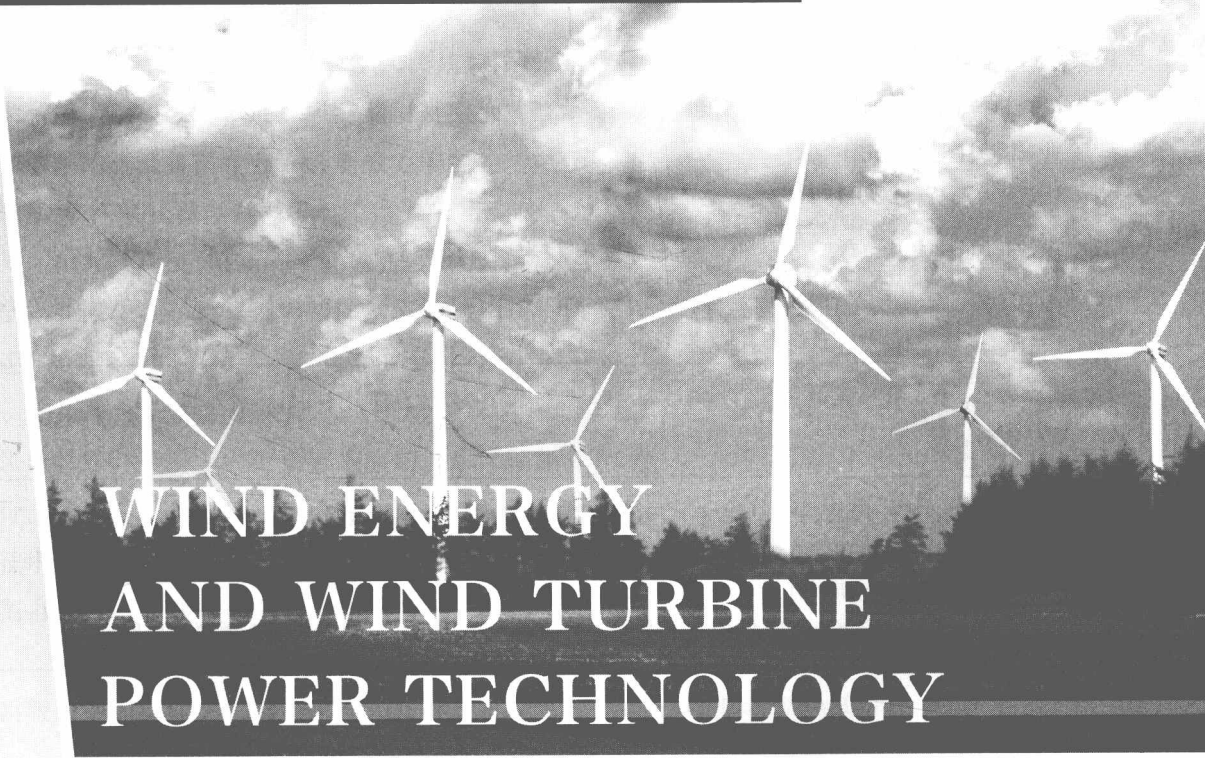


化学工业出版社



风能与 风力发电技术 第三版

王建录 赵 萍 林志民 刘万琨 编著



WIND ENERGY
AND WIND TURBINE
POWER TECHNOLOGY



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍了有关风力发电的基本知识和技术,通俗地分析了风的形成、风的分类和风能定量评估。详细阐述了风轮机的基本工作原理、工程设计方法和风轮机优化设计;对风轮机的结构、空气动力学特性、安全运行、风力机发电系统及风轮机材料等,进行了说明和分析;同时论述了风力机设计要求、大型风力机设计和特殊用途用风力机(海上风力机、低温风力机、高原风力机和直接驱动式风力机)等。还对风轮机的一些特殊问题,例如变速/恒频技术、迎风调节、风轮叶片材料和制造、风电场优化分析、风资源对性能的影响等搜集了大量的数据资料供参考查询。

本书第三版除全部订正了和时间相关的数据外,又增加了风力机设计规范、5MW 以上的超大型风力机典型设计数据和垂直轴风力机等内容。使本书更全面、更具工程参考价值,对风电业各类从业人员更加适用。

本书适合于从事风电领域工作的工程师和设计技术人员阅读参考,也适合作为高等院校热动力专业的教学参考书。对想了解风能发电的读者也是一本极好的科普读物。

图书在版编目(CIP)数据



风能 & 风力发电技术 / 王建录等编著. — 3 版. — 北京: 化学工业出版社, 2015.12

ISBN 978-7-122-24904-3

I. ①风… II. ①王… III. ①风力发电 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 187879 号

责任编辑: 戴燕红 郑宇印

装帧设计: 张 辉

责任校对: 蒋 宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 23 字数 555 千字 20015 年 10 月北京第 3 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究



第三版序

国家高度重视新能源的开发，在“十二五风电发展规划”中，制订了快速推进风电，较大规模持续发展风电的总方针。到2020年，风电总装机容量将超过2.5亿千瓦，力争风电发电量在全国发电量中的比重超过5%。

截止到2014年，全球开发的风电装机容量为3.7亿千瓦。其中，中国1.15亿千瓦，位居世界第一；美国6590万千瓦，位居第二；德国3920万千瓦，位居第三；西班牙2300万千瓦，位居第四；第五至第十位依次是印度、英国、加拿大、法国、意大利和巴西。

到2020年，中国计划在新疆、甘肃、内蒙古、吉林、河北、江苏6省（自治区），建立7个千万千瓦等级的风电基地。分别是新疆2000万千瓦；甘肃3570万千瓦；内蒙古5000万千瓦；吉林2300万千瓦；河北1000万千瓦，江苏1000万千瓦。

自2006年1月1日《中华人民共和国可再生能源法》正式实施以来，可再生能源的开发利用得到很大的发展。风能是可再生能源的重要发展方向。东方汽轮机厂是我国发电设备制造业的重点骨干企业，长期致力于各种发电设备的研制。开发了各型汽轮发电机组；F级燃气-蒸汽联合循环发电机组；百万千瓦等级全转速、半转速核电机组。

东方汽轮机厂2004年开始研制风力发电机组，已成功研制出正常风况风电机，及低温型、高原型、耐盐雾型等特殊型风电机。截止到2014年，已累计制造各类风机6000台，投运5200台。

2006年，为加快大型风电机组的研制，在收集大量资料的基础上，结合工厂1.5MW风电机研制经验，刘万琨等专家编著了《风能与风力发电技术》，由化学工业出版社出版发行。该书的出版加快了工厂的自主研发能力，对我国风电产业的发展起到了一定作用。本书技术性强，文字通畅，便于读者学习参考。在2009年第十届中国石油和化学工业优秀科技图书评比中，获得一等奖。

该书出版后承蒙读者厚爱，供不应求，两年内五次重印。2009年，中国台湾五南图书出版股份公司对本书深感兴趣，购买版权，在中国台湾用繁体字出版发行。

应广大读者的需求，2010年，化工出版社出版发行了该书的第二版，内容增加了约1/3。

2015年3月，为满足广大读者的愿望，化学工业出版社征得编著者的同意，决定出版

发行本书的第三版。第三版内容又增加了约 1/4，使本书更全面、更新颖，收集的设计资料也更先进，还包括了正在发展的垂直轴风力发电机的相关内容。

在此，我再一次感谢化学工业出版社和参与本书第三版修订的编著者。希望广大业内人士互相学习、加强交流，共同推进我国风电产业的快速发展。

四川省经信委主任

(原东方汽轮机厂厂长)

陈新有

2015 年 6 月



第二版序

国家对新能源开发高度重视，在“新能源中长期规划”之后，又重新制定了“新能源振兴发展规划”。振兴规划规定，到 2020 年，新能源总投资将达 4.5 万亿元人民币，对风电发展也做了大幅度调整。到 2020 年，风电总装机规模从中长期规划的 2000 万千瓦提高至 1.5 亿千瓦，比中长期规划目标提高了 7.5 倍。

2008 年全球开发的风电总装机为 1.21 亿千瓦，美国总装机容量达到 2517 万千瓦，位居世界第一。德国总装机容量为 2390 万千瓦，位居世界第二。西班牙总装机容量为 1674 万千瓦，位居世界第三。中国总装机容量为 1221 万千瓦，位居世界第四。第五~十位顺次是印度、意大利、法国、英国、丹麦、葡萄牙。加拿大位居第十一位，日本位居第十三位。至 2010 年，中国风电总装机将达 3000 万千瓦，总装机容量将跃居世界第二位。

到 2010 年，在江苏、河北、内蒙古、甘肃和吉林将建立多个百万千瓦级的风电基地。到 2020 年，将在甘肃、内蒙古、河北、东北以及江苏沿海等地建立千万千瓦级的风电基地。

自 2006 年 1 月 1 日《中华人民共和国可再生能源法》实施以来，可再生能源的开发利用得到了很大的发展。风能是可再生能源的最重要组成部分，国家已把风力发电作为可再生能源的重要发展方向。东方汽轮机厂作为我国发电设备制造业的重点骨干企业，长期以来致力于发电设备的研究和制造，在成功研制大功率、高参数、各种冷却方式的火力发电机组，F 级燃气-蒸汽联合循环机组，百万千瓦等级全转速、半转速核电机组的基础上，又进入了大型风力发电设备的引进消化、研究和批量生产阶段。

为加快东汽大型风电机组的研制，以张志英、刘万琨同志为代表的一批专家，在收集大量资料的基础上，结合工厂 1500kW 风电机组技术的消化吸收，编辑出版了《风能与风力发电技术》。本书的出版，不仅加快了工厂的自主研发和技术进步，对我国风电产业的健康发展也起到一定的推动作用。本书技术性强，文字通畅，便于读者学习参考，在 2009 年第十届中国石油和化学工业优秀科技图书评比中荣获部级一等奖。

本书自 2007 年 1 月出版以来，蒙广大读者的厚爱，已多次重印。中国台湾出版商也深感兴趣，买去版权，已在中国台湾出版发行。鉴于风电装机和风力发电技术突飞猛进的发展，原版已不能满足广大读者的要求，为此决定修订的再版发行。

在此，我再一次感谢化学工业出版社和张志英、刘万琨等一批专家，希望大家共同推进我国风电产业快速发展。

陈新有

四川省德阳市市长

2010年1月



第三版前言

太阳向宇宙空间辐射的总能量约 $3.75 \times 10^{23} \text{ kW}$ (3750 万万万亿千瓦), 其中 20 亿分之一的能量到达地球的大气层。经大气层反射、吸收, 最后有 $1.7 \times 10^{14} \text{ kW}$ (170 万亿千瓦) 太阳能到达地球表面。到达地球表面的太阳辐射能量, 只有约 2% 转化为风能。估计的全球风能总量约 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$ (2.74 万亿千瓦), 其中可利用的风能为 $2 \times 10^{10} \text{ kW}$ (200 亿千瓦), 比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。按目前太阳质量消耗率计, 太阳能还可供地球使用约 50 亿年。可见, 太阳能和风能是一种取之不尽、用之不竭的能源, 又是可再生能源。

我国风能资源丰富。平均风功率密度为 100 W/m^2 , 风能资源总储量约 32 亿千瓦。可开发利用的陆上风能储量 2.53 亿千瓦, 加上近海可开发利用的风能储量 7.5 亿千瓦, 共计约 10 亿千瓦。截至 2014 年, 我国风电新增装机 2340 万千瓦, 累计装机达到 1.15 亿千瓦。约占全国电力总装机的 10%。

风力机是将风能转换为机械功的一种动力机械, 广义地说, 风力机是以太阳为热源、以大气为工质的热能转换的叶片式热力发动机。风车是最早的一种风力机械, 公元前 2 世纪在波斯, 人们利用垂直轴风车碾米。

风力机用于发电的设想, 最早始于 19 世纪末。1887 年, 美国人 Brush 建造了第一台发电用风力机。到 1918 年, 丹麦已拥有风力发电机 120 台, 额定功率为 5~25kW 不等。

第一次世界大战后, 飞机螺旋桨技术和近代气体动力学理论, 为风轮叶片的设计创造了条件, 出现了现代高速风力机。第二次世界大战前后, 欧洲国家和美国相继建造了一批大型的风力发电机。1941 年, 美国建造了一台双叶片、风轮直径达 53.3m 的风力发电机, 风速 13.4m/s 时, 输出功率达 1250kW。

1957 年, Juul 建造的风机, 已初具现代风机雏形, 风机由一个发电机和三个旋转叶片组成。

20 世纪 80 年代美国成功开发了 100kW、200kW、2000kW、2500kW、6200kW、7200kW 6 种系列风力发电机组。

截至 2014 年, 全球风电整机制造商按市场份额排名前十名中, 第一是丹麦维斯塔斯, 其次是德国西门子、美国通用电气 (GE)、中国金风科技、德国 Enercon、印度 Suzlon、中国国电联合动力、西班牙歌美飒、中国明阳和中国远景能源。德国西门子在海上风电市场中处于绝对领先地位。

风力机的最主要部件——风轮机与汽轮机有很多相似点: 例如都是叶片式机械、都基于机翼升力理论; 影响性能的主要参数都是速度比, 风力机叶尖速度比 λ , 是叶尖圆周速度与

风速之比，是风能机风能利用系数最重要的参数。汽轮机是速度比 $X\left(\frac{u}{c_0}\right)$ ，是叶片中径圆周速度 u 与级理想速度 c_0 之比，是决定级轮周效率最重要的参数；两种机械的特性都与叶型来流角度强相关，有正攻角工况、负攻角工况和失速工况、颤振工况等；还有动态共振特性等。正是这些共通点，由汽轮机制造厂来自主开发风力机是非常合适的。

然而，风力机由于是低能头转换机械，它又有很多与汽轮机不同的特点。例如风力机都是单级、叶片数目特别少，比如只有两片、三片、四片等，而汽轮机是多级（30~40级）多叶片（每级100~200片）；风力机是低转速机械，转速只有10~30 r/min，而汽轮机是高速回转机械，有半转速机1500r/min、1800r/min，和全转速机3000r/min、3600r/min。因此，风力机一般有高速比的齿轮箱（最近又开发了一种免齿轮箱直接驱动式风力机），而大型汽轮机一般都不用齿轮箱。

还有，风力机的叶片特别长，最长的已达到50~80m，而汽轮机的叶片最短的25mm，最长的也不过1~2m；其他与汽轮机不同的有：风力机叶片用的是非金属材料，在露天运行，运行工况恶劣，宜远程遥控，不消耗燃料，不用锅炉等化学能转换设备等。因此，汽轮机厂要自主开发风力机，就首先要弄清这些不同点，专门立项研究。正是在这样的思考下，我们编著了此书，希望对自主开发风力机有所帮助。

本书共分10章，第1章是有关风与风能的基本知识；第2~3章是风力发电技术，重点是阐述与汽轮机发电技术不同的特点；第4章风力机设计规范，对风力机设计人员有特别的设计参考价值；第5~6章专门讲风轮机的工程设计方法和数值计算，是全书的重点；第7章分析典型大型风力机的设计技术，可供风力机设计人员参考，也是本书的重点，本章还增加了5MW以上超大型风力机设计部分；第8章介绍了风力机的发电系统，重点在于系统，介绍了它们与化石燃料汽轮机发电系统的不同。第9章简要介绍几种特殊用途的风力机，例如海上风力机、低温地区风力机、高原地区风力机和免齿轮箱直接驱动式风力机等。它们与一般风力机大同小异，只是根据使用地点环境不同，加入了一些特殊措施。本章就是在分析这些不同点的基础上，着重介绍这些措施。第10章介绍了垂直轴风力机的基本知识和设计原理，给出了垂直轴风力机的典型设计数据。

风轮机的优化设计和设计风速的确定问题放在第5章。本章抛砖引玉，希望得到专家们的指正。一些有关风力机的基础资料，例如风力等级、风力机技术标准等放在附录，供大家参考。

本书自2007年1月第一版第一次印刷以来，承蒙广大读者的厚爱，很快销售一空，5次重印仍不能满足读者的要求。中国台湾出版商和读者也深感兴趣，购买了版权，已在中国台湾出版发行。2010年，第二版出版发行。第二版的章节和内容都做了大的改动，删除了原书的第8、第9两章；增加了第6章和第8章内容；增加的“4.2 风力机设计要求”一节，放在第4章（均是第二版序号）。第二版书承蒙读者厚爱，很快又销售一空。

根据风电市场需求，2015年初，化学工业出版社决定再次修订本书，出版第三版。第三版增加了第4章：风力机设计规范；第7章增加了第7.8节、7.9节和第10章：垂直轴风力机。全书内容增加约1/4。特别是第4章：风力机设计规范，是风力机设计人员最好的设计参考资料。第10章：垂直轴风力机是有一定技术性的科普资料，为广大读者了解垂直轴风力机，提供了最基本的知识，也为想研究设计垂直轴风力机的读者，提供了一些必要的技术支持。第三版书将以最新的面目与读者见面，希望使读者对风力发电和风力机设计的最新

新技术有更加全面的了解。

东方电气风电有限公司研发生产风电机 10 余年，有自主研发叶片、发电机、控制系统及设备配套能力。有从 1MW 到 5.5MW 等多个序列的风电产品，运行的近 6000 余台风力发电机组分布国内陆地与近海。目前正在进行 10MW 海上风机的概念设计。2014 年东方风电与瑞典 SKAB 公司合作，成套出口欧洲市场 40 台 2.5MW 直驱式风力机发电机。东方风电还拥有世界上实验功率最大的全功率试验台，能实现 6MW 整机全功率拖动试验、电网模拟试验、零部件试验等。本书的很多设计理念、科研成果和资料等，都是编著者在东方风电供职时总结成文的。

编著者刘万琨是第三版的总策划，并编写了第 4 章、第 7.8、第 7.9 两节，以及第 10 章的部分内容。

本书的第三版又查阅了大量参考文献和网上资料，订正和更新了与时间相关的数据资料，并增加了许多最新资料。在此再次对文献作者致谢！

再次感谢参加第一版、第二版的编著者张志英、李银凤和帮助过本书编著的同事、朋友们。特别要感谢东方汽轮机有限公司档案馆原馆长、高级工程师侯春芳，是他提供了大量资料，并给予了诸多帮助，对编辑出版提供了很多具体指导。没有他们的帮助也就没有本书。

编著者

2015 年 6 月 30 日



第二版 前言

太阳的辐射总能量约 $3.75 \times 10^{26} \text{ W}$ (3750 万万万亿千瓦), 它不断向宇宙空间传播, 其中 20 亿分之一的能量到达地球的大气层。经大气层反射、吸收, 最后有 8×10^{13} 千瓦 (80 万亿千瓦) 太阳能到达地球表面。到达地球表面的太阳辐射能量约有 2% 转化为风能。估计全球风能总量约 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$ (2.74 万亿千瓦), 其中可利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{ MW}$ (200 亿千瓦), 比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。按目前太阳质量消耗率计, 太阳能可供地球用 6×10^{10} (600 亿) 年。可见, 太阳能和风能可以说是取之不尽、用之不竭的能量。

我国风能资源丰富, 总储量为 32 亿千瓦。陆地上可开发利用的风能资源为 2.53 亿千瓦, 加上近海的风能资源, 全国可开发利用的总风能资源约 10 亿千瓦以上, 居世界首位。

风力机是将风能转换为机械能的一种动力机械, 广义地说, 风力机是以太阳为热源、以大气为工质的热能转换的叶片式发动机。风车就是最早的一种风力机械, 最早出现在波斯。

人类利用风能的历史可以追溯到公元前。公元前 2 世纪, 古波斯人就利用垂直轴风车碾米。公元前数世纪, 中国人就开始利用风力来提水灌溉、磨面、舂米, 用风帆推动船舶等。欧洲第一台风力机出现在公元 1100 年左右, 用于磨面和抽水。18 世纪末期, 随着工业技术的发展, 风车的结构和性能都有了很大提高, 已能采用手控和机械式自控机构改变叶片桨距来调节风轮转速。

风力机用于发电的设想最早始于 19 世纪末。1887 年, 美国人 Brush 建造了第一台发电用风力机, 可为 350 盏白炽灯和 3 个发动机提供电力。到 1918 年, 丹麦已拥有风力发电机 120 台, 额定功率为 5~25kW 不等。

第一次世界大战后, 飞机螺旋桨技术和近代气体动力学理论为风轮叶片的设计创造了条件, 出现了现代高速风力机。第二次世界大战前后, 欧洲国家和美国相继建造了一批大型的风力发电机。1941 年, 美国建造了一台双叶片、风轮直径达 53.3m 的风力发电机, 风速为 13.4m/s 时, 输出功率达 1250kW。

1957 年, Juul 建造的风力机已初具现代风力机雏形, 风力机由 1 个发电机和 3 个旋转叶片组成。

20 世纪 80 年代, 美国成功开发了 100kW、200kW、2000kW、2500kW、6200kW、7200kW 6 种风力发电机组。

目前世界最知名的风力机设备制造商有: 丹麦 Vestas 风力系统公司、美国 GE 风能公司、德国 Enercon 公司、西班牙 Gamesa 公司、德国 Siemens 公司、印度 Suzlon 公司、丹麦 Bonus 公司、德国 Repower 公司、德国 Nordex 公司、日本 MHI 公司、西班牙 Made 公司、丹麦 NEG Micon 公司等。

本书共分 8 章, 第 1 章是有关风与风能的基本知识; 第 2~3 章是风力发电技术;

第4~5章专门讲风轮机的工程设计方法和数值计算；第6章分析典型大型风力机的设计技术，可供风力机设计参考；第7章介绍了风力机的发电系统，重点是系统，介绍它们与化石燃料汽轮机发电系统的不同；第8章简要介绍了几种特殊用途的风力机，例如海上风力机、低温地区风力机、高原地区风力机和免齿轮箱直接驱动式风力机等。它们与一般风力机大同小异，只是根据使用地点环境不同，加入一些特殊措施。本章就是在分析这些不同点的基础上着重介绍这些措施。

风轮机的优化设计和设计风速的确定问题放在第4章。抛砖引玉，希望得到专家们的指正。一些有关风力机的基础资料，例如风力等级、风力机技术标准等放在附录，供大家参考。

本书自2007年1月出版以来，承蒙广大读者的厚爱，很快销售一空，五次印刷还不能满足读者的要求。我国台湾出版商和读者也深感兴趣，买去了版权，已在中国台湾地区出版发行。本书修订版章节和内容都做了大的改动，将以最新的面目与读者见面，帮助读者对风力发电和风力机设计的最新技术有较全面地认识。

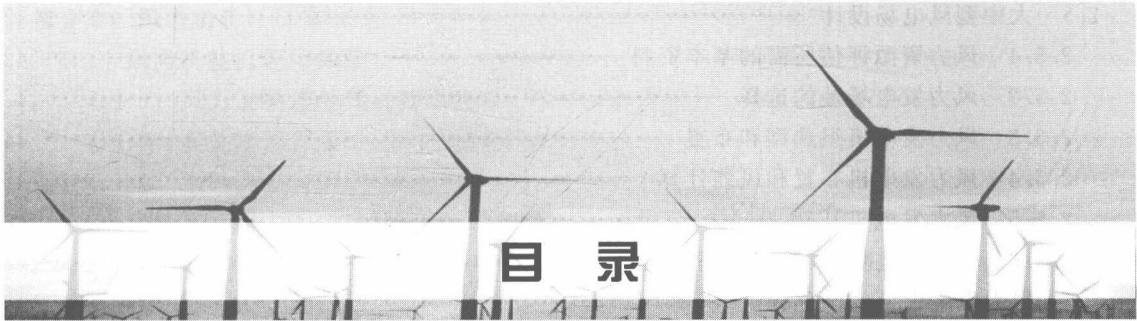
东方汽轮机厂是目前国内最大的风力机制造商之一，已完成1500kW风力机引进批量生产和投运，以及1000kW、2000kW、2500kW、5000kW等风力机设计，1000kW已经树起样机，2500kW风力机正在试制。2008年产出813台1500kW风力机，2009年产出1500kW风力机1400台。2008年东汽的风力机产量位居全国前三。

本书的再版又查阅了大量参考文献，订正更新了与时间相关的数据资料，并增加了许多最新资料。在此再次对文献作者致谢！

再次感谢帮助过本书编著的同事、朋友们，没有他们的帮助也就没有本书。

编著者

2010年1月15日



第 1 章 风与风能	1
1.1 风	1
1.1.1 风的形成	1
1.1.2 风向与风速	2
1.2 风能	5
1.2.1 21 世纪的最主要能源	5
1.2.2 风能密度	7
1.2.3 风能密度计算方法	7
1.2.4 地球上风能资源分布	7
1.2.5 我国风能资源分区	9
1.2.6 风能的三级区划指标体系	11
1.2.7 风资源描述的基本理论	12
1.3 风电场选址	22
1.3.1 风电场选址的技术原则	22
1.3.2 风电场现场位置选择对策	23
1.4 风电场风能资源评估	25
1.4.1 风电场风能资源测量方法	25
1.4.2 风电场风能资源评估方法	27
第 2 章 风能发电	31
2.1 风力机的型式	31
2.1.1 水平轴式风力发电装置	32
2.1.2 垂直轴式风力机	33
2.2 风能发电	34
2.3 并网风力发电的价值分析	36
2.3.1 并网风力发电的价值分析	36
2.3.2 风电项目可行性研究	38
2.4 风力发电装置	38
2.4.1 风轮	38
2.4.2 调速器和限速装置	39
2.4.3 调向装置	41
2.4.4 传动机构	41
2.4.5 塔架	42

2.5	大中型风电场设计	42
2.5.1	风力资源评估所需的基本资料	42
2.5.2	风力发电场址的选择	42
2.5.3	风力发电机组选型和布置	44
2.5.4	风力发电机布置和风能计算	45
2.5.5	风力发电机基础	46
2.5.6	风力发电场的经济效益和社会效益评价	47
2.6	风力发电设备的优化分析	48
2.6.1	优化选型因素分析	48
2.6.2	财务预测结果	49
2.7	风力机安全运行	50
2.7.1	风力机运行流程	50
2.7.2	正常运行过程	51
2.7.3	运行安全性	53
2.7.4	安全性方针	53
2.7.5	风力机载荷设计	54
2.7.6	风轮机与航空安全问题	55
第3章	风力发电技术	56
3.1	功率调节	56
3.1.1	定桨距失速调节	56
3.1.2	变桨距角调节	56
3.1.3	混合调节	58
3.2	变转速运行	58
3.2.1	影响风力机功率的因素	58
3.2.2	变转速运行的特点	59
3.3	发电机变转速/恒频技术	59
3.3.1	并网运行风力机频率恒定问题	59
3.3.2	变转速/恒频风力机用发电机	61
3.4	风轮机迎风技术	61
3.4.1	风轮机风向跟踪原理	61
3.4.2	风轮机风向跟踪方法	62
3.5	风电品质	62
3.5.1	风力机改善风电品质的方法	62
3.5.2	发电机和电网接口功能	62
3.6	风力机结构和空气动力学	63
3.6.1	风力机结构设计	63
3.6.2	风力机气动力学设计	63
3.7	风力机控制技术	63
3.7.1	风力发电系统模型描述	63
3.7.2	风力发电系统自适应控制器	64
3.7.3	风力发电系统模糊控制	64

第4章 风力机设计规范	65
4.1 风力机整机设计规范	65
4.1.1 风力发电机组整机技术要求	65
4.1.2 其他环境条件	66
4.1.3 电网条件	67
4.2 风轮机叶片、轮毂设计规范	67
4.2.1 叶片设计要求	67
4.2.2 叶片设计规范	67
4.2.3 轮毂设计	68
4.3 风轮机叶片设计	69
4.3.1 设计要求	69
4.3.2 环境适应性	70
4.3.3 安全和环保	71
4.3.4 叶片材料要求	71
4.4 风轮机叶片试验、验收规范	73
4.4.1 试验方法	73
4.4.2 检验规则及验收	77
4.4.3 叶片的标志和使用维护说明书	78
4.4.4 叶片包装、贮存、运输	78
第5章 风轮机设计	79
5.1 风轮机的基本理论	79
5.1.1 风性能描述	79
5.1.2 风能和风的能量密度	80
5.1.3 风能利用系数	81
5.1.4 风轮机的桨叶设计	82
5.1.5 风轮机的空气动力特性	84
5.2 风力机设计要求	85
5.2.1 风力机设计安全等级	85
5.2.2 一般等级风力机的安全系数和强度分析	86
5.2.3 风力机设计要求	88
5.2.4 风力机整机技术要求	106
5.2.5 齿轮箱技术要求	107
5.2.6 塔架技术要求	107
5.2.7 风轮叶片技术要求	108
5.3 风轮机工程设计	112
5.3.1 风轮机工程设计方法	112
5.3.2 风力机的各种设计方案	116
5.4 风轮机优化设计	117
5.4.1 风轮机优化设计原理	117
5.4.2 风轮机优化设计举例	118
5.5 风轮机模化设计	121

5.5.1	风轮机模型及特性	121
5.5.2	风轮机模化设计方法	121
5.6	风轮机工程设计图例	122
5.7	风轮机的设计与制造	123
5.7.1	功率设计	124
5.7.2	风轮设计	129
5.7.3	齿轮箱和刹车机构	135
5.7.4	电器系统和发电系统设计	137
5.7.5	机舱和对风控制	140
5.7.6	塔架设计	143
5.7.7	弹性体系统动态振动设计	145
5.7.8	功率和转速调节	147
5.7.9	风力机成本分析	154
5.8	风轮机材料	155
5.8.1	风轮机用材料	155
5.8.2	各种风轮机材料	157
5.9	风力机设计风速问题	159
5.9.1	设计风速问题	159
5.9.2	风电场优化	161
第6章	风轮机和风电场数值计算	164
6.1	风电场数值模型	164
6.1.1	流体力学的控制方程	164
6.1.2	守恒形式的控制方程组	164
6.1.3	补充方程	166
6.1.4	边界条件	166
6.1.5	控制方程离散-有限差分法	166
6.2	风轮机设计软件	168
6.2.1	软件计算举例	168
6.2.2	计算结果及分析	169
6.3	风电场数值计算软件包	171
6.3.1	典型风电场数值计算软件包	171
6.3.2	Bladed 软件包计算功能	171
6.4	风力机设计软件包的开发	174
6.4.1	风力发电机设计软件包	174
6.4.2	软件包模块和数据库	174
6.4.3	风力机空气动力学研究	175
6.4.4	风力机动态测试方法的研究	176
6.4.5	储能方法的研究	176
6.4.6	小型风电场规划方法的研究	177
6.5	风力机可靠性数值研究	177
6.5.1	风力机在恶劣环境下的可靠性研究	177

6.5.2 风力机抗台风设计	181
第7章 大型风力机设计	184
7.1 250~1200kW 风力机系列	184
7.1.1 S系列风力机技术参数	184
7.1.2 NA系列风力机技术参数	185
7.2 1000kW 级风力机设计	186
7.2.1 FD60A型风力机设计	186
7.2.2 V52-850kW 风力机设计	200
7.2.3 1200kW 级风力机设计	201
7.3 1500kW 级风力机设计	202
7.3.1 FD70A/ FD77A 风力机设计	202
7.3.2 S70/S77 风力机设计	209
7.3.3 V82-1650kW 风力机设计	212
7.4 2000kW 级风力机设计	214
7.4.1 R82/2000kW 风力机设计	214
7.4.2 V90-1800/2000kW 风力机设计	215
7.4.3 V80-2000kW 风力机设计	217
7.5 2500kW 级风力机设计	219
7.5.1 FD90/2500kW 型风力机设计	219
7.5.2 N80、N90 风力机设计	223
7.6 3000kW 级风力机设计	226
7.6.1 W90/3000kW 风力机设计	226
7.6.2 V90-1-3000kW 风力机设计	226
7.6.3 V112-1- 3000kW 风力机设计	228
7.7 5000kW 级风力机设计	229
7.7.1 FC/5000/126-136 风力机设计	229
7.7.2 R-5M 风力机设计	232
7.7.3 R系列大型风力机	233
7.8 超大型风力发电机设计	235
7.8.1 西门子 6.0MW 海上风力发电机	235
7.8.2 三菱重工 7 MW 海上风力发电机	236
7.8.3 美国超导 10MW 海上风力发电机	236
7.8.4 超大型风力发电机概念设计	237
7.9 我国大型风力发电机组发展趋势	239
第8章 风力机发电系统	242
8.1 风力机对发电系统的一般要求	242
8.1.1 风力机发电系统的特殊性	242
8.1.2 一般要求	242
8.2 恒速/恒频发电系统	242
8.2.1 同步发电机	243
8.2.2 感应发电机	243