



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

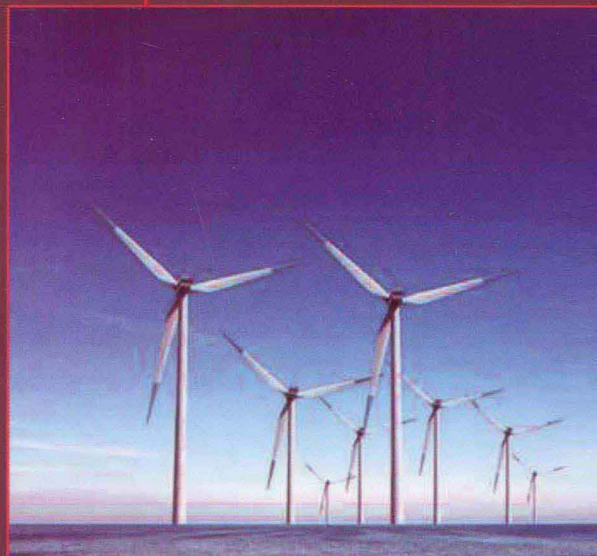
风力机技术

Wind Turbine Technology

(美) A.R. Jha 著

岳大为 李洁 等译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

风力机技术

(美) A. R. Jha 著
岳大为 李洁 等译



机械工业出版社

本书主要包括风力机技术发展概述、风力机设计方面和性能要求、风力机风轮的性能和设计方案、风力机叶片设计要求、变风速条件下动态稳定及性能的提高所需的传感器和控制设备、离网型风电系统、建筑物环境中的风能转换技术和影响风力机安装的环境问题与经济因素等内容。

本书理论与实践紧密结合,数学表达式和较重要的推导公式有利于深入学习风电机组技术的知识。本书结构清晰,并且涵盖了风力机设计方面的诸多尖端技术。

本书可供风力发电技术领域的工程技术人员、研发人员、管理等相关人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

Wind Turbine Technology/by A. R. Jha /ISBN: 978-1-4398-1506-9

Copyright© 2011 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

本书中文简体翻译版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字01-2012-0578号。

图书在版编目(CIP)数据

风力机技术/(美)杰哈(Jha, A. R.)著;岳大为等译. —北京:机械工业出版社, 2013. 6

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Wind turbine technology

ISBN 978-7-111-43261-6

I. ①风… II. ①杰…②岳… III. ①风力发电机-技术
IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第156286号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘星宁 责任编辑:郑彤

版式设计:常天培 责任校对:张玉琴

封面设计:赵颖喆 责任印制:杨曦

北京双青印刷厂印刷

2013年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·13印张·256千字

0 001-3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-43261-6

定价:68.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

开发利用可再生能源、实现能源的可持续发展已经成为世界各国能源发展战略的重大举措。风能作为最重要和最成熟的可再生能源，具有蕴藏量丰富、分布广、无污染等特点，因此成为可再生能源发展的重要方向。

中国风能资源丰富，大力发展风力发电对调整能源结构、保障能源安全、应对气候变化、促进经济社会可持续发展具有重要意义。近年来，在《可再生能源法》以及国家一系列政策法规的推动下，中国风电装机容量迅速增长，风电装备制造业快速发展，产业体系也已基本形成。但快速发展的风电行业也同时迎来了成长的烦恼，风电专业人才短缺和风电理论书籍匮乏等问题凸显。风力发电技术已经成为国内高校、科研院所的重点研发方向。多所高校相继开设风能与动力工程本科专业，但缺乏具有丰富的工程实践及深入理论分析的教学参考书籍。本书的引进和翻译出版正是填补了这一空白。

本书第1章由李洁翻译，第2章由岳大为翻译，第3章由杨聪聪翻译，第4章由徐超林翻译，第5章由高国旺翻译，第6章由王铁举翻译，第7章由刘海锋翻译，第8章由石康珍、邓晨晖翻译。另外，吕金桥、李亚楠、周玥、孟心怡、崔晓志也参与了修改整理与部分翻译工作。全书最后由岳大为统一校对、统稿。河北工业大学王华君教授、李练兵教授在本书的翻译中给予了大力支持。在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，翻译中错误之处在所难免，希望读者批评指正。

岳大为 李洁
河北工业大学

原 书 序

本书是在国家工业化发展前景十分光明的背景下出版的，21 世纪经济全球化的工业化国家都是紧紧依赖于可利用且价格合理的石油和天然气来进行发电的。风力机技术的发展不仅为发电行业提供了一种经济可靠的途径，同时也消除了对国外石油的依赖。此外，风力机能够以较低的成本发出大量电能，并且不会产生有害气体。

追溯历史，从公元前 5000 年开始，人们就开始利用风能；最初只是用于推动船只的行进。在公元前 300 年，斯里兰卡的僧伽罗人曾利用季风作为航船的动力。到了公元前 200 年，中国人利用风能进行灌溉，波斯人使用风力机设备研磨谷物。欧洲风力机技术的发展始于 12 世纪早期。第一台用于发电的风车出现在 1887 年的苏格兰，随后大型的发电风车也于 1890 年在荷兰发展起来。在 20 世纪上半叶，美国制造了更大、更高效的风力机。发展替代能源的积极程度取决于化石燃料的成本，二战后随着化石燃料价格的下跌，人们在风力发电方面的投资也在减少。然而 1973 年石油禁运后，在美国联邦风能计划的扶植下，人们对投资发展风力机的热情重新燃起。

20 世纪下半叶，中国、印度、巴西等发展中国家人口的增长和工业化进程的加速，导致全世界范围内能源需求和消耗的增长。值得注意的是，由于化石燃料是最经济的燃料，因此一直被广泛使用。然而化石燃料的使用却是导致环境污染和全球气候变化的主要原因。同样值得注意的是化石燃料并不是取之不尽用之不竭的。目前正在使用的能源主要包括核能、水能、太阳能和风能。其中，核能是一个极具吸引力的替代能源，但它初始投资成本较高而且有危险的辐射效应。同样，太阳能也是一个很有吸引力的替代能源，它可以无限地输出电能，但是在夜间或多云天气时不能使用。而风力发电技术可以提供最具有吸引力的可再生能源，因为它可以利用无限的风能并且以较低的成本产生大量电能，同时不会对环境造成不良影响。

风力机通过利用自然界的动能产生电能。根据其发电能力的不同，风力机也有大小型号之分。功率输出低于 25kW 的离网型小型风力机最适合用于通信、抽水灌溉以及偏远的住宅区。一个小型或 50W 的风力机足以应用到小型船只上。额定功率范围为 100kW~5MW 的大型风力机足以同时为 100~500 户家庭提供用电。近年来许多发电成本低并且提供免费维护的公用事业公司的风电场如雨后春笋般出现在农村和海边。特别需要提及的是，丹麦 40% 的用电来自于风电，同时丹麦还制定了风力发电机组装机容量超过 4200MW 的计划。

风力机主要可以划分为水平轴风力机（HAWT）和垂直轴风力机（VAWT）两大类。水平轴风力机的优势是它具有较大的发电量、较高的工作效率和叶片变桨功能，同时较高的塔基结构有助于捕获更多的风能。无论哪一种风力机，其工作原理都是将风的动能转化为机械能，然后带动发电机发电。风力机翼型选择的原则是使风能的捕获量达到最大。安装在陆地或近海区域的风力机塔架高度适中时，风力机的性能最优。

该书包括 8 个章节，每章都着重介绍风力机的某一特定设计方面。它的内容安排合理，突出强调了风力机的理论和实践应用。因此，我强烈推荐这本书给广大读者，包括学生、设计工程师、科研人员、项目经理、环境科学家和可再生能源规划师。总之，风能资源必定会在 21 世纪的经济发展中发挥重要作用，而且美国政府也在积极鼓励快速发展可再生能源。本书作者 A. R. Jha 博士，在风力发电机组技术和风力机设计等应用方面提出了全面的指导。

Shobha Singh 博士

杰出的技术员（退休）

新泽西州，默里希尔，贝尔实验室研究员，实验室主任（退休）

宝丽来公司，剑桥，马萨诸塞州

前 言

人们对可再生能源高涨的兴趣和国外石油成本的显著增加迫使很多国家去寻找低成本的能源技术，如太阳能电池、风力机、潮汐涡轮机、生物燃料、地热技术、核反应堆等，以降低发电成本。在 21 世纪的经济全球化中，西方工业国家的前途和福利也越来越多地依赖于有质量和深度的技术创新，而且这种创新也将快速地被商业化。快速发展低成本能源，不仅可以迅速降低度电成本，同时也可以消除对石油生产国的依赖。

值得一提的是，当前很多国家已经规划了风力发电技术，并以较低的度电成本满足电能需求。

风力机的迅速研发必须在低成本高效率的微型水力涡轮机和大容量风力机的领域中进行。一些欧洲国家和发展中国家正在建设风电场，以降低发电成本并且消除对国外原油的依赖。国际能源专家预测，到 2015 年电能批发价格将上涨 35% ~ 65%。在这种情况下，一些国家开始致力于开发替代能源，这些替代能源就包括那些在合适地点部署的中小型风力发电机组。作者对中小型风力发电机组的研究表明，中小型风力发电机组最适合于为陆基国防设施、学校、居民住宅、购物中心和大型商业楼宇提供用电。同时本研究还提出，微型风力发电机组能够满足个人用电，如电灯、电扇、空调、计算机、传真机、饮水机、微波炉和其他电气设备和配件。

本书将理论和实际应用很好地结合起来。书中的数学表达式和较重要的推导公式十分有利于学生深入学习风力机技术知识。本书结构清晰，并且涵盖了风力机设计方面的诸多尖端技术。本书的语言风格很适合致力于在风电领域拓展视野的本科生和研究生。

本书特地为从事风电行业设计研发的工作人员所作，包括工程师、科研人员、教授、项目经理、教师和程序员。与此同时，本书还有助于人们了解可再生能源。作者为此付出了很大努力，采用良好的组织材料，使用传统的术语、符号和代码以方便初学者快速理解风力发电技术的知识。书中介绍的风力机最新性能参数和实验数据都源于权威作者和出版物，很多重要参考资料也在其中。本书的每个章节都将特别介绍风力机的家用和商用情况。

第 1 章介绍了风力发电技术的发展历程以及它可以在低成本和无温室效应的前提下产生电能。与燃煤热电站和核反应堆发电站相比，风力发电成本更低。简而言之，风力机可提供具有低成本高效益的可再生能源。有意思的是，风力机与电风扇

的工作原理相反：风力机是将风的动能转换成电能。风力机有不同的型号和容量。通常情况下，小型或微型风力机的额定功率低于 10kW，其适用于个人住宅、偏远场所、电信系统和灌溉等方面的应用。中等容量风力机的额定功率通常在 10 ~ 100kW 之间。大型风力机的额定输出功率从 100kW ~ 2.5MW 不等，适用于区域性供电。由多台风力机构成的风电场，其发电成本会接近燃煤核电站和核反应堆发电站。

由于风能资源对于偏远地区或人口稀疏区的小商户最具有经济效益，因此一些发达国家和发展中国家更倾向于发展微型风力机。沿海的欧洲国家为了向机械工厂、灌溉工程和管井供电，已经安装了一批中等容量风力机。安装在年平均风速超过 15mile/h (1mile = 1609.344m) 的丹麦沿海地区的风力机能满足全国至少 40% 的电能需求。中国也已经在平均风速连续超过 30mile/h 的戈壁沙漠安装了几百台大容量风力发电机组。

第 2 章重点介绍了不同类型风力机的设计、安装成本和性能。有意思的是，从热力学的角度，风力机产生的能量是有用的。风力机驱动发电机，其输出电能可以储存在蓄电池中或者并入商业电网。风力机可以用以生产由氢和氧组成的清洁燃料，或者为其他应用的燃料电池充电。此外，由风力机产生的动能可以转换为电能、化学能、热能或者其他形式的潜在能源。值得注意的是，安装在恰当位置的风力机有较高的效率和可靠性，并且全年的运行和维护成本可以达到最低。

20 世纪 50 年代初以来，像美国通用电气公司和日本三菱公司等很多大型企业已经生产出多种类型的大容量风力发电机组。从最早的型号到现代的风力机，不同类型风力机如图 2-1 所示。风车抽水在灌溉中起到了关键作用。目前，世界各地，尤其是偏远地区的抽水风车数量已超过 100 万。风力机分为水平轴风力机 (HAWT) 和垂直轴风力机 (VAWT) 两种类型，分别如图 2-2 和 2-3 所示。目前多数大容量风力机是水平轴的，主要由于其设计简单，具有较高的结构完整性以及在强风下有较高的动态稳定性。无论哪种类型的风力机，根据其可靠性、恶劣条件下的动态稳定性以及功率因数和输出功率的不同，风力机的叶尖速比在 2 ~ 8 之间可以使机组达到最佳性能。

第 3 章将重点介绍风力机风轮的设计及其性能。首先讨论风轮的类型，然后讲述注重可靠性和动态稳定性的风轮性能及其重要设计要求。随后描述现代风力机中不同类型的风轮及其输出性能和简化设计。同时分析了在功率系数和推力系数作用下风力机风轮的一维、二维、三维的空气动力学分解量。最后说明临界循环控制流参数和它们对轴向速度分量的影响。值得注意的是，轴向速度分量对于在不同风况下运行的风轮的性能及其动态稳定性有着重要影响。推荐使用伯努利方程来计算在风轮前后的风的特性。利用某些假设可以达到轴向动量平衡。风轮转速是与轴向诱导因子和轴向风速相关的函数。最终得到了风轮达到最佳性能时的叶尖速比。

上风向和下风向型风轮广泛应用于大容量水平轴风力机，而萨窝纽斯型风轮和达里厄风轮最适合用于垂直轴风力机。通常，当叶尖速比为 $1 \sim 2.5$ 时，萨窝纽斯型风轮的效率较低；当叶尖速比超过 3 时，风力机效率会提高；当叶尖速比接近 3 和 4 时，风力机效率将分别进一步提高到 53% 和 57% ；一般情况下，当叶尖速比为 $5 \sim 7$ 时，达里厄风轮的效率较低，仅为 $28\% \sim 32\%$ ；当叶尖速比为 6 时，该风轮达到最高效率，其值为 33% 。由于达里厄风轮的效率较低，因此仅限于小容量风力机使用。作者对风轮空气动力学性能的研究表明，上风向和下风向风轮具有较高的效率，因此被广泛应用于大容量水平轴风力机。理论上此类风轮的效率是叶尖速比分别为 2 、 4 、 6 时对应的 51.2% 、 57.3% 和 58.3% 。

第4章的主要内容是介绍叶片理论中基本参数的应用，然后指出对于给定的风力机叶片的设计要求。风力机的性能取决于风轮叶片的数目。叶片理论指出，叶片外轮廓的设计必须考虑到空气动力学因素，而且叶片制造过程中使用的材料必须具备足够高的结构强度和刚度。利用实际流量决定翼型特点模型很值得深入研究。扭矩和功率因数是由叶尖速比、升阻系数比和叶片半径决定的。可以参考空气动力学修改叶片轮廓，以保证风力机在恶劣条件下有更高的结构稳定性。同时，也会得到沿叶片长度方向特定点处挠度和弯矩的表达式。地球引力场、惯性载荷和作用在叶片上的机械气动载荷对风力机风轮的影响，将产生作用于叶片前缘和后缘的拉伸应力、压应力和挠度。本章还将讨论不同风轮叶片的关键性能参数。

第5章介绍在不同风况条件下维持风力机动态稳定性和提升性能的传感器和设备。其中描述了失速调节、变桨控制和偏航控制机制并强调了风力机的可靠性、安全运行问题以及提高工作性能的方法。控制机制采用响应速度快、检测精度高的微机电系统(MEMS)和纳米技术传感器来监测风力机的重要参数。叶片风轮和轮毂之间的连接必须十分牢固，以保障风力机在恶劣风况下安全运行。摇摆型轮毂的设计降低了风力机的载荷，因此无论电气负载有多大，风力机的动态稳定性都有很大程度的提高。本章详细讨论了负责系统可靠性、安全性和动态稳定性的相关组件，如风轮、发电机和传输系统等。齿轮箱可以用来降低风轮的旋转速度，保证风力机在更高叶尖速度下的动态稳定性。如前所述，大多数监测传感器和安全装置都位于塔架顶部。

第6章讨论了离网型风力发电系统的性能和局限性。其中结构设计在很大程度上决定了离网型风力发电系统的性能和局限性。离网型风力发电系统最适合于远程站点的供电。在冬季和夏季，人们可以通过使用小容量或中等容量风力发电机组与蓄电池组相结合来提供家庭用电。作者研究表明离网型风力发电系统的缺点主要表现在初始安装成本高，发电能力相对较低和维护频繁方面。然而新的离网型风力发电系统技术可以解决偏远地区不能接入公共电网的用电问题，并且被广泛接受。太平洋天然气和电气公司统计的数据表明，离网型风力发电系统的规模以每年 29%

的速度增长，而且其市场范围在非商业供电区域继续扩大。

太阳能电池技术在离网型风力发电系统中的应用，使得生活在偏远地区和交通不便的非商业供电区域的用户有了经济实用的选择。此外，必须充分考虑离网型风力发电系统中配置的安装成本、运行和维护成本、可靠性以及可持续性的问题。

第7章讨论了在建筑环境中风力机的电能转换技术。很重要的一点是在建筑环境中风力机的安装存在很多复杂问题，而在开放的环境中却很少出现。在建筑环境中，所有将风能转换为电能的技术必须经济实用，而且应使运行和维护成本降到最低。所选用的风能转换技术需要充分协调好风力机与环境结构之间的关系，以使更多的风能资源被风力机所捕获。第7章中提出了三个基本原则，可以使处在不同建筑环境中的风力资源集中于风力机上。建筑环境的设计决定了风能集中的4种最佳位置：

- 1) 风力机安装在相邻建筑物间的风管处；
- 2) 风力机安装在建筑物的顶部；
- 3) 风力机安装在建筑物的侧面；
- 4) 风力机安装在两个机翼形建筑之间。

4种风力机的安装方案需要和风力机进行适当整合，使发电量达到最大值。这里将使用数学模型来模拟空气流，并通过计算机分析得到相关参数。在一个开放式的风洞中可以测得实时数据。同时，可以通过流体动力学（CFD）代码进行计算机模拟实验。

第8章将重点介绍影响风力机安装的环境问题和经济因素。在选择风力机的安装地点之前，必须认真考虑环境问题，如自然条件的限制、噪声等级、塔架设计约束、对当地生态环境的影响、对无线电和电视信号的干扰以及对鸟类种群的影响。需要考虑的经济因素包括初始投资成本分析、设计、制造、封装测试、运输、交付测试、风力机和塔架的安装以及运行和维护。最后必须在风力机安装之前估算每千瓦的发电成本。因此，经济可行性是在初步估算电能成本和价格的基础上确定的。

最后，我要感谢 Ashok Sinha 博士（已退休的应用材料公司高级副总裁，美国加利福尼亚州圣克拉拉市）的严格复查以及最后对文本保持一致性的补充和修改。同时，他的建议有助于作者的稿件具有显著的一致性。同样，我要感谢我的妻子 Urmila Jha、我的女儿 Sarita 和 Vineeta、我的女婿 Anu 和我的儿子 Lt. Sanjay Jha，是他们激励我在紧迫的时间内完成这本书。此外，我非常感谢我妻子在筹备本书中给予我的耐心帮助和支持。

目 录

译者序	
原书序	
前言	
第1章 风力机技术发展概述	1
1.1 引言	1
1.2 可替代性能源的主要优点和缺点	2
1.3 风力发电技术的优点和缺点	3
1.3.1 优点	3
1.3.2 缺点	4
1.3.3 风力机安装要求	4
1.3.4 旧风电场的改造以提高现存风力机的输出功率	5
1.4 世界风力机安装情况	5
1.4.1 丹麦	5
1.4.2 德国	6
1.4.3 中国	6
1.4.4 美国	6
1.4.5 加拿大	7
1.4.6 比利时和荷兰	7
1.4.7 英国	8
1.4.8 法国	8
1.4.9 俄罗斯	8
1.4.10 意大利	8
1.4.11 早期的风力机发展小结	9
1.5 风力机运行原理	9
1.6 风力机的分类	12
1.6.1 公用电网风力机	12
1.6.2 公用电网风力机和风电场的成本回收期	12
1.6.3 小规模风力机	13
1.6.4 小型风力机部件的成本估算	14
1.6.5 2009年5kW风力机的安装成本	15

1.6.6	风力机及塔架安装公司	15
1.6.7	小型风力机的潜在应用	15
1.6.8	中等规模风力机	16
1.7	风电场开发商	16
1.7.1	风电场经销商	16
1.7.2	可再生能源专业人员	16
1.8	设计配置	17
1.8.1	离网功能的家用设计配置	17
1.8.2	并网和储能功能的家用风力机配置	17
1.8.3	并网和无电池运行的家用风力机配置	18
1.8.4	风光互补的风力发电机组设计	18
1.8.5	双重用途的紧凑型风力机和能源系统	18
1.8.6	关键的电气部件	19
1.9	独具特色的新一代风力机	19
1.9.1	螺旋风力机	20
1.9.2	海上风力机的运行	20
1.9.3	基于喷气发动机的风力机	20
1.9.4	垂直轴风力机	20
1.9.5	漂浮式海上风力机	21
1.10	美国典型的风力估价	21
1.11	小结	21
	参考文献	22
第2章	风力机设计方面和性能要求	23
2.1	引言	23
2.2	风力机类型	23
2.2.1	风车型风力机	25
2.2.2	农场型与荷兰型风力机	25
2.3	现代风力机	25
2.3.1	水平轴风力机 (HAWT)	26
2.3.2	垂直轴风力机 (VAWT)	27
2.3.3	垂直轴风力机的工作要求	27
2.3.4	垂直轴风力机的优缺点	28
2.3.5	垂直轴风力机的运行难题	28
2.3.6	预测达里厄风力机性能的简化程序	28
2.3.7	理解垂直轴风力机的流动现象	29

2.3.8	早期欧洲的风力机	29
2.4	非设计工况性能	29
2.4.1	关键设计问题	29
2.4.2	设计与运行参数偏差的影响	30
2.4.3	升力和阻力系数对最大功率系数的影响	30
2.4.4	性能提升方案	30
2.5	最大风能捕获技术	31
2.5.1	叶片与角度参数对性能的影响	32
2.5.2	获得高功率系数的技术	34
2.5.3	最佳性能对安装地点的要求	34
2.5.4	风能基本特性	36
2.5.5	全球大型风力机的装机容量	41
2.6	特定风力机安装地点的年风能捕获量	42
2.6.1	长期捕获风能的要求	42
2.6.2	风速对风能密度的影响	43
2.6.3	每年、每小时的风力机的能量捕获	43
2.6.4	S形风轮垂直轴风力机的能量积分	43
2.6.5	运用高风速的涡流	44
2.6.6	最大功率系数与出口压力系数和扰动系数的函数关系	45
2.6.7	功率系数的计算	45
2.7	可利用风能的年小时数评估	46
2.7.1	使用经验法评估年小时数	46
2.7.2	使用叶素动量法评估年发电量	50
2.7.3	影响性能的因素	52
2.7.4	风轮叶尖速比和升阻比对功率系数的影响	54
2.8	小结	55
	参考文献	56
第3章	风力机风轮的性能和设计方案	57
3.1	引言	57
3.2	理想风轮的一维理论	58
3.2.1	积分形式的轴向动量方程	59
3.2.2	运用交变控制体的一维动量理论	60
3.2.3	理想一维风力机的功率系数	61
3.2.4	理想一维风力机的推力系数	61
3.2.5	旋转效应	63

3.2.6 风轮的叶尖速比	65
3.3 二维气动模型	68
3.4 有限翼长的三维气动模型	69
3.4.1 受流过翼型气流影响的参数	69
3.4.2 科里奥利力和离心力	70
3.4.3 现代风力机涡系	70
3.5 在风电场应用中风轮的设计要求	71
3.5.1 风轮的性能	72
3.5.2 风轮叶片材料的要求	72
3.5.3 翼型特征对风轮性能的影响	72
3.6 风轮绕流的流体力学分析	73
3.6.1 二维球体的绕流分析	73
3.6.2 二维柱体的绕流分析	73
3.6.3 气流的发电量	74
3.7 小结	75
参考文献	76
第4章 风力机叶片设计要求	77
4.1 引言	77
4.2 螺旋桨叶片的性能分析	77
4.2.1 叶素的空气动力学性能分析	78
4.2.2 作用在叶片上的转矩和功率	79
4.2.3 最大功率输出的条件	79
4.3 叶片的性能	80
4.3.1 功率系数	80
4.3.2 轴向诱导因子	80
4.3.3 转矩系数	81
4.3.4 叶片的载荷系数	82
4.3.5 入流角作为切向速度比和升阻系数比函数的变化	83
4.3.6 叶尖速比和升阻系数比对风力机功率因数的影响	84
4.3.7 作为半径函数的桨距角变化	84
4.3.8 作用在叶片上的力	85
4.3.9 机械完整性	87
4.4 梁理论在各种风力机叶片中的应用	90
4.5 叶片材料的要求	90
4.6 叶片的关键性能	90

4.6.1	叶片的弯矩和不稳定性对叶片性能的影响	91
4.6.2	风速三角形的作用	91
4.7	小结	92
	参考文献	94
第5章	变风速条件下动态稳定及性能的提高所需的传感器和控制设备	95
5.1	引言	95
5.2	调节控制系统	97
5.2.1	变桨距调节控制	97
5.2.2	变桨距调节控制系统的说明	98
5.2.3	偏航控制系统	99
5.3	风参数监测传感器	99
5.4	传输系统	100
5.5	发电机	100
5.5.1	感应发电机	100
5.5.2	感应发电机的转子结构	101
5.6	同步发电机的性能和局限性	101
5.7	风轮的关键性能参数	102
5.7.1	风轮的分类	102
5.7.2	动态稳定性和结构完整性	103
5.7.3	应力参数的监测	104
5.7.4	失速控制的风轮	104
5.7.5	风能捕获及风力机性能的影响因素	104
5.8	叶片的翼型特性对风力机性能的影响	105
5.9	自动停机功能	106
5.10	水平轴风力机和垂直轴风力机风轮的关键设计	107
5.10.1	风力机的可靠性及性能提高技术	107
5.10.2	使效率、动态稳定性及结构完整性得到良好保障的传感器	108
5.10.3	叶片扭转角的调整	109
5.11	提高效率的低谐波量发电机	109
5.12	风力机结构载荷的影响	109
5.12.1	重力载荷的影响	110
5.12.2	惯性载荷的影响	111
5.12.3	空气动力载荷的影响	111
5.13	小结	112
	参考文献	113

第 6 章 离网型风电系统	114
6.1 引言	114
6.2 历史背景：应用于偏远地区	115
6.3 离网型风电系统的结构	116
6.3.1 带有备用电池的混合系统	117
6.3.2 微型风力机	117
6.3.3 微型风力机的应用	117
6.3.4 微型风力机应用于农村电气化	118
6.3.5 发电容量	118
6.3.6 偏远地区的通信应用	119
6.3.7 降低成本的技术	119
6.3.8 减少电力的需求	120
6.3.9 典型电气设备的能量损耗	120
6.3.10 减少能量损耗的技术	121
6.4 偏远地区的离网型电力系统	122
6.4.1 制冷设备	122
6.4.2 空调机组	122
6.4.3 交流和直流系统的选择	123
6.4.4 发电系统的参数	123
6.5 系统组件的规格	124
6.5.1 太阳能电池阵列的规模和性能	124
6.5.2 逆变器的容量和性能	125
6.5.3 蓄电池的大小和性能	126
6.5.4 太阳能面板的大小和性能参数	127
6.6 带有备用公共电网的离网型风电系统	127
6.6.1 离网系统的经济因素	127
6.6.2 离网风光互补系统的成本分析	129
6.6.3 从现有设施延长输电线的成本估算	129
6.7 离网型风电系统的多种应用	130
6.7.1 通信	130
6.7.2 HR 3 混合型系统的性能	131
6.7.3 运用混合风电系统节省石油燃料	131
6.8 农村电气化中的混合风电系统	131
6.8.1 成功案例	132
6.8.2 在农村电气化的应用：抽水系统	132

6.8.3	估算农场风车的抽水能力	134
6.8.4	混合风电的经济性	134
6.9	多任务风力机	134
6.9.1	小功率风力机的应用	135
6.9.2	灌溉的设计要求	135
6.9.3	风力机的年发电量	136
6.10	小结	137
	参考文献	139
第7章	建筑物环境中的风能转换技术	140
7.1	引言	140
7.2	集中配置的要求	141
7.2.1	球形配置	141
7.2.2	在两个建筑物之间的管道中安装风力机的配置	141
7.2.3	邻近建筑物的集中模式	141
7.2.4	各种集中模式下集中器的风能集中能力小结	141
7.3	节能建筑设计	141
7.3.1	有建筑物的环境的要求	142
7.3.2	粗糙度对风速参数的影响	143
7.3.3	有建筑物地区的风能潜力	145
7.4	建筑环境当地风能的特性	149
7.4.1	建筑特征	150
7.4.2	有风力边缘的建筑物周围的空气流线	150
7.4.3	阻力部分	150
7.4.4	空气的流动性	150
7.5	建筑环境对 BWAT 性能的影响	155
7.5.1	气动噪声水平	155
7.5.2	安装现场总空气噪声的计算	155
7.5.3	附近风力机产生的噪声	156
7.5.4	风力机叶片引起的振动	157
7.5.5	风力机叶片的影子闪烁	157
7.5.6	湍流结构	158
7.5.7	流管长度对风能转化的影响	158
7.5.8	有建筑物环境下的偏航要求	159
7.6	小结	163
	参考文献	164