



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

Modern Large-scale Wind Turbine Design Principle



《新能源出版工程》丛书共 23 分册，分别论述太阳能、风能、生物质能、海洋能、核能、新能源汽车、智能电网和煤制油等新能源相关领域的理论研究和关键技术

现代大型风力机 设计原理

李春 叶舟 高伟 蒋志 编著

上海科学技术出版社



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



现代大型风力机设计原理

Modern Large-scale Wind Turbine Design Principle

李春叶舟高伟蒋志编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代大型风力机设计原理/李春等编著. —上海:
上海科学技术出版社. 2013. 1

(新能源出版工程)

ISBN 978-7-5478-1548-9

I. ①现… II. ①李… III. ①风力发电机—设计
IV. ①TM315.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 270080 号

上海世纪出版股份有限公司
上海科学技术出版社 出版、发行

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

浙江新华印刷技术有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张: 30.25 插页: 4

字数: 760 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1548-9/TK·8

定价: 138.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内容提要

本书主要内容由五部分构成：绪论、风力机空气动力学、风力机结构动力学、风力机控制与故障诊断，以及海上风力机及其海洋水动力学基础。全书较为系统地论述了现代大型风力机设计的基本原理与前沿热点。

全书共 11 章。第 1 章介绍了风能利用历史、现状及未来趋势，现代风力机研究领域发展状况与趋势，以及风力机行业有关情况；第 2 章论述了风资源特性与评估方法，台风风场计算方法，以及风场建模方法；第 3 章论述了风力机翼型绕流升阻效应，翼型气动特性，以及风力机可变翼型设计；第 4 章论述了风力机气动设计原理与方法，包括叶素动量理论、风轮相似特性以及尾迹涡流模型；第 5 章论述了风力机载荷类型与计算方法，风力机叶片结构设计原理，以及风力机结构分析的有限元计算；第 6 章论述了多体动力学理论，风力机整机动力学建模方法与仿真技术，以及商用多体动力学软件的整机仿真；第 7 章论述了风力机气动弹性与流固耦合原理，以及流固耦合算例分析；第 8 章论述了风电机组控制原理，风电机组特性及控制，以及控制系统执行结构特性分析；第 9 章论述了风电机组的状态监测、故障诊断技术及运行维护检测方法；第 10 章介绍了海洋工程环境波浪载荷模型与海工结构水动力学载荷分析；第 11 章介绍了浅海桩柱式与深海漂浮式风力机的设计与计算。

本书内容系统、全面、新颖、实用，可作为高等院校能源动力类专业教学科研参考书，以及相关科研院所、风电行业等研究人员的技术参考与培训用书。

《新能源出版工程》

学术顾问 (以姓氏笔画为序)

阮可强	中国工程院院士
严陆光	中国科学院院士
杨裕生	中国工程院院士
林宗虎	中国工程院院士
倪维斗	中国工程院院士
徐大懋	中国工程院院士
翁史烈	中国工程院院士
黄其励	中国工程院院士
潘 垣	中国工程院院士

《新能源出版工程》

编委会

主 任

倪维斗

委 员(以姓氏笔画为序)

毛宗强 朱 军 贡 俊 李 春

张家倍 张德祥 周凤翔 徐洪杰

殷承良 闫耀保 喜文华 董长青

董亲翔 鲍 杰 戴松元

前 言

作为人类最早利用的能源之一,风能利用的历史戏剧般地走过一个轮回。较之早期风能利用,现代风能利用的背景及目的均发生了本质变化,即日益严重的环境污染、能源匮乏和能源安全。风能利用形式多样,如早期的风力提水(灌溉)、谷物研磨、制盐、风帆等,到后期的风力制冷(热)、制氢(氧)、海水淡化、曝气等。现代风能利用最具价值和广泛的形式当属风力发电,其作为一种温室气体零排放的替代能源,已被广泛认为有可能取代传统化石燃料,是新能源领域中除核能外,技术最成熟、最具开发条件和最有发展前景的发电方式。此外,国际上核电事故所造成的令世人震惊的灾难性后果,更加突出了风电除清洁、环保和可再生等优势外的安全性优势,正日益成为新增电力供应的主力军。大力开发和利用风能,对于国家能源安全、改善能源结构和实现环境可持续发展等均具有重要意义。

世界各国的电力发展史表明,处在工业化加速阶段的国家和地区,电力消费增长率超过经济增长率是普遍现象。2011年,中国电力总装机量已达10.5亿kW;预计“十二五”期间电力消费弹性系数将保持在1左右,并于2020年达到14亿~16亿kW,即人均1kW,达到中等发达国家水平。由此可见,为保证国家经济的平稳发展与增长,中国在今后较长时期的电力需求增长已成必然;同时为保证经济发展中的生态协调性,风电也必然会在其中扮演重要角色。事实上,截至2011年,中国风电累计装机容量累计已达4700万kW,年发电量800亿kW·h,同比增长60%以上,风电市场增速居全球之首。

作为风力发电的最关键组成部分,风力机日益大型化的发展趋势,主要目的是为降低风电单位成本。而结合具体风能资源,在大型化的同时,中国风电机组设计还面临着一系列特殊问题。例如,全球年均发生台风62起,主要分布于北半球的北太平洋西部和东部、北大西洋西部、孟加拉湾和阿拉伯海等5个海区,以及南半球的南太平洋西部、南印度洋西部和东部等3个海区。因此,结合处于台风多发地带的地理特点,中国风电技术的国产化绝不仅仅是发展民族产业、知识产权和创新等问题,还面临着实实在在的风力机运行时的特殊环境问题。此外,虽然目前已成为世界第一风电大国,但核心

技术和并网问题仍是制约中国风电技术快速发展的主要瓶颈,由风电大国走向风电强国尚有许多需要解决的理论和和技术问题。

随着风电技术的不断完善与发展,陆上风电装机容量渐趋饱和,海上风电已成为近年来国际风电产业发展的新领域,并必将成为未来的发展重点,是“方向中的方向”。中国国家能源局《国家能源科技“十二五”规划》与科技部《风力发电科技发展“十二五”专项规划》均明确提出了风电机组大型化的发展方向,要求突破 10 MW 级海上风电机组整机和零部件设计关键技术,实现海上超大型风电机组的样机运行。2010 年 8 月 31 日,第一个国家级海上风电示范项目(除欧洲以外全球首个海上风电场)——上海东海大桥海上风电场工程一期 34 台 3 MW 海上风电机组成功并网发电;2011 年 10 月 12 日,5 MW 海上机组并网发电,成为中国最大容量的海上风电机组。2011 年底,美国 Deepwater Wind 公司宣布,将在美国海岸建造世界最大风电场,发电量拟达 1 000 MW(单机容量 5 MW 级),风力机组将移入更深水域,以便可利用更强,更持久的风力资源。

目前,风力机已成为人类建造的最大旋转动力机械,亦是最大的机械设备,4.5 MW 风力机叶轮直径已超过空客 A380,5 MW 风力机转子直径约 120 m。近年来,中国国内企业 3 MW 以下机组已经实现量产,5 MW 机组已成功并网运行,6 MW 机组也已成功吊装。华锐风电已申请到国家能源局中央预算内投资项目“10 MW 级超大型海上风电机组研制及示范”,该项目将建造全球首台功率等级最大的 10 MW 级超大型海上风电机组,并于江苏沿海装机示范。根据欧盟资助项目 UpWind 最新报告,开发 20 MW 风力机可行,预计 2020 年风轮直径达 200 m 的 20 MW 风力机将投入使用。

风力机朝着大型化以及由陆地向海洋发展,然而,10 MW、20 MW 风电机组并非是对目前 5 MW 的简单倍增,这种由量到质的变化,必然带来其在设计与运行维护中的流固耦合、柔性设计、智能叶片、新型材料、桨距智能化、风电场布局、海洋环境适应、控制与调节等新问题,反映到学科和理论技术层面,也已从单纯的气动设计发展到控制、材料、结构和风工程等学科领域及其相互交叉,必然涉及多学科领域的关键技术创新与突破。因此,现代大型风力机设计实际上已成为多学科交叉、多技术集成的一种综合设计。

为此,尽量阐述现代大型风力机发展及设计中的一些新理论、新技术问题成为本书主要出发点。但因作者能力和水平有限,疏漏与不当之处在所难免,恳请读者与同行批评指正。对于书中涉及的关键论点,作者力求尽可能全面地给出文献出处,方便读者了解更多的有关信息,在此向文献作者表示深深谢意!

本书由上海理工大学李春教授策划、统稿,李春、叶舟、高伟和蒋志完成了本书的编著工作。作者的研究生聂佳斌、武玉龙、高月文、赵海洋、吴攀、魏远、李志敏、陈余、陈晖等协助参与了本书的成稿工作,在此对他们的付出表示感谢!

国家出版基金资助了本书的出版,特此致谢!感谢国家自然科学基金项目(51176129/E060703)对本书研究内容的资助。

目 录

第 1 章 绪论 / 1

- 1.1 风能利用历史、现状与未来趋势 / 1
 - 1.1.1 风车及风电早期历史 / 1
 - 1.1.2 风力发电与风能的其他领域利用 / 4
 - 1.1.3 风能利用未来趋势 / 7
- 1.2 风力机设备及设计过程 / 9
 - 1.2.1 风力机主要组成部分 / 9
 - 1.2.2 风力机分类 / 12
 - 1.2.3 风力机设计过程 / 16
- 1.3 现代风力机研究领域 / 19
 - 1.3.1 现代风力机主要研究领域 / 19
 - 1.3.2 风力机整机动力学问题及相关研究 / 21
- 1.4 风力机国内外研究机构及相关书籍与期刊 / 24
 - 1.4.1 风力机国内外研究机构 / 24
 - 1.4.2 风力机著作与研究期刊 / 28
- 1.5 风力机行业相关规范与标准 / 32
 - 1.5.1 风力机行业常用标准与规范 / 32
 - 1.5.2 风力机著名行业 / 36

参考文献 / 38

第 2 章 风资源评估方法与风场建模 / 39

- 2.1 风与风资源特性 / 39
 - 2.1.1 风的时空分布 / 39
 - 2.1.2 风资源特性 / 41
 - 2.1.3 风资源评估与数值模拟 / 42
- 2.2 风资源统计学评估方法 / 43
 - 2.2.1 风速统计分布 / 43
 - 2.2.2 风向统计分布 / 47

- 2.3 风资源动力-统计综合评估方法 / 48
 - 2.3.1 风能资源数值模拟系统 / 49
 - 2.3.2 中尺度数值 MC2 模式 / 50
 - 2.4 数值模式台风风场模拟 / 52
 - 2.4.1 台风危害 / 52
 - 2.4.2 台风数值模拟研究 / 53
 - 2.4.3 MM5 模式 / 54
 - 2.5 风力机风场建模 / 55
 - 2.5.1 模型分类 / 55
 - 2.5.2 模型描述 / 56
 - 2.5.3 稳态风场及风速修正 / 58
 - 2.5.4 紊流风场 / 59
 - 2.6 随机过程风场模型 / 61
 - 2.6.1 随机过程基本原理 / 61
 - 2.6.2 固定部件湍流风场特征 / 63
 - 2.6.3 旋转叶片湍流风场特征 / 70
 - 2.6.4 湍流风场阵风模型 / 73
- 参考文献 / 76

第3章 翼型气动设计原理 / 78

- 3.1 翼型绕流及其升阻效应 / 78
 - 3.1.1 翼型几何参数 / 78
 - 3.1.2 升力效应和阻力效应 / 79
- 3.2 翼型气动特性 / 82
 - 3.2.1 表面压强分布及压力中心 / 82
 - 3.2.2 升力特性与阻力特性 / 84
- 3.3 翼型气动特性影响因素 / 87
 - 3.3.1 雷诺数影响 / 87
 - 3.3.2 相对厚度影响 / 90
 - 3.3.3 相对弯度影响 / 92
- 3.4 可变翼型 / 94
 - 3.4.1 叶片变形效应 / 94
 - 3.4.2 智能叶片技术 / 95
 - 3.4.3 刚性襟翼 / 96
 - 3.4.4 柔性襟翼 / 100

参考文献 / 107

第4章 风力机气动设计原理 / 110

- 4.1 叶素动量理论 / 110
 - 4.1.1 风能利用系数与贝兹极限 / 110
 - 4.1.2 作用在叶素上的气动力 / 117
 - 4.1.3 叶素理论与动量定理的耦合 / 118
- 4.2 气动设计方法 / 119
 - 4.2.1 风轮参数预估 / 120
 - 4.2.2 叶素参数计算 / 121
- 4.3 风轮相似特性 / 125
 - 4.3.1 几何相似特性 / 126
 - 4.3.2 运动相似特性 / 126
 - 4.3.3 动力相似特性 / 127
- 4.4 尾迹涡流理论 / 132
 - 4.4.1 毕奥-萨伐尔定律 / 132
 - 4.4.2 叶尖涡、叶根涡以及涡面模型 / 133
- 4.5 固定尾迹涡模型 / 134
- 4.6 预定尾迹涡模型 / 136
 - 4.6.1 叶片模型 / 136
 - 4.6.2 尾迹模型 / 137
- 4.7 自由尾迹涡模型 / 140
 - 4.7.1 尾迹涡线控制方程 / 140
 - 4.7.2 诱导速度及其修正 / 141
- 参考文献 / 144

第5章 风力机结构动力学 / 148

- 5.1 风力机载荷 / 148
 - 5.1.1 风力机结构设计的重要性 / 148
 - 5.1.2 载荷类型与分析 / 152
 - 5.1.3 载荷分析坐标系 / 155
 - 5.1.4 叶片载荷计算 / 157
 - 5.1.5 风力机整体受力 / 160
- 5.2 风力机叶片结构设计 / 161
 - 5.2.1 叶片结构设计方法概述 / 163
 - 5.2.2 叶片优化设计理论与方法 / 165
 - 5.2.3 风力机叶片结构 / 166
 - 5.2.4 风力机叶片材料与铺层设计 / 172

- 5.3 叶片结构计算与分析 / 191
 - 5.3.1 叶片翼型几何特性计算 / 191
 - 5.3.2 叶片强度和刚度计算 / 192
- 5.4 有限元方法在风力机结构分析中的应用 / 194
 - 5.4.1 有限元方法及其应用 / 194
 - 5.4.2 风力机叶片结构特性计算与分析 / 195
- 参考文献 / 202

第6章 风力机整机多体动力学 / 206

- 6.1 风力机建模与仿真 / 206
 - 6.1.1 建模与仿真技术 / 206
 - 6.1.2 风力机建模与仿真技术 / 208
- 6.2 多体动力学技术 / 210
 - 6.2.1 计算多体系统动力学研究进展 / 210
 - 6.2.2 刚体凯恩动力学方程 / 212
 - 6.2.3 广义凯恩动力学方程 / 213
 - 6.2.4 动力学模型求解实现 / 216
- 6.3 风力机柔性部件假设模态法 / 218
 - 6.3.1 叶片和塔架假设模态计算 / 219
 - 6.3.2 塔架广义质量与广义刚度计算 / 220
 - 6.3.3 叶片广义质量和广义刚度计算 / 221
 - 6.3.4 基于假设模态法的叶片和塔架变形 / 223
- 6.4 风力机整机动力学建模 / 223
 - 6.4.1 风力发电机组几何拓扑结构及其自由度 / 223
 - 6.4.2 风力发电机组坐标系及其转换 / 225
 - 6.4.3 风力发电机组系统运动学分析 / 229
 - 6.4.4 风力发电机组系统动力学分析 / 229
- 6.5 ADAMS 软件与架构 / 232
 - 6.5.1 ADAMS 软件功能与基本组成 / 232
 - 6.5.2 ADAMS 软件基本模块 / 233
 - 6.5.3 ADAMS 模型语言格式 / 235
- 6.6 风力机仿真环境与仿真实现 / 237
 - 6.6.1 风力机仿真环境 / 237
 - 6.6.2 ADAMS 的输入输出文件 / 241
 - 6.6.3 仿真计算实现 / 242
- 6.7 变桨变速风力机模型不同风况下仿真结果分析 / 245

6.7.1 来流风况设定 / 245

6.7.2 塔架位移特性 / 246

6.7.3 叶片位移特性 / 250

参考文献 / 258

第7章 风力机气动弹性与流固耦合 / 261

7.1 气弹特性与流固耦合原理 / 261

7.1.1 叶片气动弹性 / 261

7.1.2 整机动力学特性 / 263

7.1.3 流固耦合原理 / 264

7.2 气动弹性模型及稳定性分析 / 266

7.2.1 气动弹性模型 / 266

7.2.2 动力学方程 / 268

7.2.3 稳定性模型与分析 / 271

7.3 流固耦合计算方法 / 281

7.3.1 求解方式 / 281

7.3.2 界面处理 / 282

7.3.3 软件选择 / 289

7.4 风力机流固耦合算例分析 / 290

7.4.1 控制方程 / 290

7.4.2 动静交界面及湍流模型 / 292

7.4.3 流场计算域划分 / 292

7.4.4 网格生成及边界条件 / 293

7.4.5 结构计算 / 293

参考文献 / 298

第8章 风力发电机组控制原理 / 300

8.1 风电机组控制系统概述 / 300

8.1.1 控制技术发展历程 / 300

8.1.2 控制技术的发展趋势 / 303

8.1.3 控制系统基本组成 / 304

8.1.4 控制系统主要功能 / 306

8.2 风电机组控制设计基础 / 307

8.2.1 控制设计基本要求 / 307

8.2.2 风力机特性曲线 / 309

8.2.3 气动功率控制 / 313

- 8.2.4 最大功率点跟踪控制 / 316
- 8.3 典型风电机组特性及控制 / 320
 - 8.3.1 风电机组分类及特点 / 320
 - 8.3.2 定桨距风力发电机组 / 322
 - 8.3.3 变桨距风力发电机组 / 329
 - 8.3.4 变速恒频风力发电机组 / 333
- 8.4 控制系统执行机构 / 341
 - 8.4.1 液压系统 / 341
 - 8.4.2 变桨系统 / 343
 - 8.4.3 偏航系统 / 344
 - 8.4.4 制动系统 / 345
- 参考文献 / 347

第 9 章 风电机组状态监测与故障诊断 / 349

- 9.1 风电机组状态监测与故障诊断概述 / 349
 - 9.1.1 风电机组状态监测与故障诊断概念 / 349
 - 9.1.2 风电机组状态监测与故障诊断功能 / 350
 - 9.1.3 风电机组状态监测与故障诊断意义 / 351
- 9.2 风电机组运行维护与状态监测 / 352
 - 9.2.1 风电机组常规维护 / 352
 - 9.2.2 状态监测技术 / 357
 - 9.2.3 状态参数监测 / 358
 - 9.2.4 典型风电机组监测系统 / 361
 - 9.2.5 传感器类型 / 362
- 9.3 风电机组故障诊断 / 365
 - 9.3.1 故障诊断概述 / 365
 - 9.3.2 故障诊断技术 / 368
 - 9.3.3 故障诊断方法 / 371
 - 9.3.4 常见故障及诊断 / 373

参考文献 / 377

第 10 章 海洋工程载荷环境与水动力理论基础 / 379

- 10.1 海洋环境波浪载荷及其波谱模型 / 379
 - 10.1.1 海洋工程载荷环境介绍 / 379
 - 10.1.2 海风载荷 / 380

- 10.1.3 海流载荷 / 381
- 10.1.4 海冰载荷 / 383
- 10.1.5 海洋环境波浪载荷 / 387
- 10.1.6 波浪频谱模型 / 390
- 10.2 小直径海洋工程结构波浪载荷计算 / 392
 - 10.2.1 无黏流体与惯性力 / 392
 - 10.2.2 黏性流拖曳力 / 393
 - 10.2.3 黏性流体绕流泄涡和垂直升力 / 394
 - 10.2.4 水流和风效应 / 394
- 10.3 大直径海洋工程结构的波浪载荷计算 / 395
 - 10.3.1 直立圆柱的绕射速度势 / 395
 - 10.3.2 截断圆柱的绕射速度势 / 397
- 10.4 海洋工程结构与海底相互作用分析 / 399
 - 10.4.1 海洋工程构筑物的着底子结构 / 399
 - 10.4.2 桩-土相互作用 / 400
 - 10.4.3 地震作用及其载荷计算 / 405
- 10.5 漂浮式海洋平台系泊系统及其载荷计算 / 409
 - 10.5.1 海洋平台各种系泊结构 / 409
 - 10.5.2 悬链线系泊系统载荷计算 / 411
- 10.6 海洋平台静水恢复力计算 / 413
- 参考文献 / 416

第 11 章 海上风力机及其动力学特性分析 / 418

- 11.1 海上风电场建设 / 418
- 11.2 漂浮式风力机及相关研究 / 420
 - 11.2.1 漂浮式风力机及相关研究项目介绍 / 420
 - 11.2.2 漂浮式风力机研究历史及现状 / 425
 - 11.2.3 海上风力机的水池实验与数值研究 / 430
- 11.3 海上风力机耦合问题 / 433
 - 11.3.1 动力学耦合问题 / 433
 - 11.3.2 漂浮式风力机耦合问题 / 435
- 11.4 浅海桩柱风力机整机动力学特性 / 437
 - 11.4.1 规则波浪仿真 / 438
 - 11.4.2 桩柱式结构基础类型 / 444
 - 11.4.3 桩柱式结构水动力特性计算 / 448

- 11.5 深海漂浮式风力机整机动态特性建模 / 456
 - 11.5.1 深海漂浮式风力机整机动力学仿真系统 / 457
 - 11.5.2 气动、结构与多体动力学模型 / 458
 - 11.5.3 漂浮式平台水动力学模型 / 459
- 参考文献 / 460

第 1 章

绪 论

一般说来,凡在气流中能产生不对称力的几何构形都能成为风能接收或者利用装置,它以旋转、平移或摆动运动而产生机械功。目前,最主要的应用是并网型的水平轴或垂直轴风力发电机(以下简称风力机)。风力机研究可以归为不同的学科领域。首先作为一种重要的发电设备或动力驱动机械,它可以归入动力机械的研究领域;作为典型的叶片式旋转机械,叶片与周围空气相互作用,它又可以归入流体机械的研究领域;此外,风力机可以作为一种热源无穷远的单级无蜗壳动力机械,其流场与叶片的相互作用规律很多本质上与工程热物理学学科相关。本章旨在对风力机、风力机研究及风力机行业有一个全面而初步的概貌描述,以便于对后续章节的把握与理解。对后面章节的学习是一个纲要性的指导。

1.1 风能利用历史、现状与未来趋势

1.1.1 风车及风电早期历史

风车是早期风能利用的主要装置,可视为一种将风能转变为机械能的动力机,其采用可调节叶片或梯级横木轮收集风能。简单的风车由带有风篷的风轮、支架及传动装置等构成。风轮的转速和功率根据风力的大小,通过适当改变风篷的数目或受风面积调整,但当风向改变时,则必须搬动前支架使风轮面向风。完备的风车一般带有自动调速和迎风装置等。进入近代以后,随着电力技术的出现,一般把具备发电用途的风车称为风力发电机,简称风力机。为了较系统、全面地对风力机技术作以理解,下面简要介绍风车的早期历史。

1.1.1.1 风车在国外的早期历史

在 19 世纪蒸汽机发明以前,以风力和水力为代表的最为传统的机械能源成为除人力和畜力以外的人类唯一可以利用的能源形式。据史书记载,古巴比伦皇帝汉莫拉比(Hammurabi)早在公元前 17 世纪就将风车作为一种重要的灌溉工具,在两河流域广泛使用。随后,波斯发明家发明了较巴比伦先进很多的立轴翼板式风车。公元 7 世纪阿拉伯