



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

先进制造技术与应用前沿

XIANDAI LUHAI FENGLIJI
JISUAN YU FANGZHEN

现代陆海风力机 计算与仿真

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
先进制造技术与应用前沿

湖北工业大学图书馆



01288390

现代陆海风力机 计算与仿真

李春 叶舟 高伟 蒋志 编著



上海科学技术出版社

TR 83
6

C

图书在版编目(CIP)数据

现代陆海风力机计算与仿真 / 李春等编著. — 上海:
上海科学技术出版社, 2012. 1
(先进制造技术与应用前沿)
ISBN 978-7-5478-1081-1

I. ①现… II. ①李… III. ①风力机械 IV. ①TK83

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 275754 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

常熟市兴达印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张: 39.5 插页: 4

字数 650 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1081-1/TK·2

定价: 130.00 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

Synopsis

内容提要

本书主要内容包括翼型空气动力学、风力机空气动力学与数值计算、气动弹性与结构动力学,以及陆上、近海和深海风力机整机动力学设计与仿真,较为详实地论述了该领域中的热点技术与前沿理论。

全书十二章由五部分内容组成。一是风资源描述与统计方法、风电场选址及其相关软件;二是与风力机气动特性和结构特性密切相关的翼型空气动力学,包括理论计算、翼型数据库以及应用软件;三是风力机空气动力学理论及流场特性数值计算,较为全面地论述了水平轴与垂直轴风力机的气动基础理论,以及流场结构与气动特性数值计算的基本功能和关键技术;四是风力机结构动力学理论基础,主要论述风力机结构动力学和气动弹性问题;五是风力机整机动力学仿真技术,全面阐述动力学仿真的相关技术、陆上整机动力学仿真、海上风力机与海洋工程环境、近海桩基式风力机计算与整机动力学仿真、深海漂浮式风力机平台水动力学计算、全耦合气动-弹性-水动整机动力学仿真,并给出了具体实例和仿真结果分析。

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

编撰委员会

先进制造技术与应用前沿

主 任 路甬祥

副 主 任 李蓓智 曹自强

委 员 (按姓氏笔画排序)

王庆林 石来德 包起帆 严仰光

杜宝江 李 明 李 春 李希明

何 宁 何亚飞 陈 明 闾耀保

葛江华 董丽华 舒志兵

学术专家 艾 兴 汪 耕 周勤之



reface

前 言

人类风能利用史戏剧般地走过了一个轮回。所不同的是风能再次被重视与利用,其背景迥然不同,目的也产生了本质变化。日益严重的环境污染、能源匮乏与安全等问题,使得风能以全新角色再次登上历史舞台,备受关注。同时,资源储量大、来源丰富、安全可靠、清洁可再生以及温室气体零排放等特点,亦使风电被广泛认为有可能取代传统化石燃料,成为未来新增电力供给的主力军。不仅如此,风电已成为新能源领域中除核电外,技术最成熟、最具开发条件和最有发展前景的发电方式。2011年3月,因地震引发的日本福岛第一核电站事故导致世人震惊的灾难性后果,更加突显了风电除清洁、环保和可再生外的安全性优势。

风电发展对中国具有特别意义,与德国、丹麦和美国等西方风电发展大国有着本质区别。西方风电发展大国对可再生能源大规模的开发利用,基于电力供求总体平衡甚至供大于求的现实背景,其发展风电最主要目的是,逐步采用可再生能源置换化石燃料等常规能源,以解决环境污染等问题。而中国则面临着资源与环境的双重瓶颈制约,突出表现在缺煤、缺电、缺油,同时环境污染问题日趋严重。近年来,中国风电发展迅速,2010年底风电装机容量达3131万kW,超过美国跃居世界第一;预计2011年底风电装机容量将达4500万kW。此外,国家发改委能源研究所新近发布的《中国风电发展路线图2050》报告显示,到2020年、2030年和2050年,风电装机容量将分别达到2亿、4亿和10亿kW,成为中国五大电源之一;到2050年,风电将满足国内17%的电力需求。

现代风力机正日益呈现大型化与智能化趋势,这既是市场需求也是技术发展的必然结果。随着陆上可开发资源的逐步减少,由陆向海、由浅到

深、由固定基础向漂浮式平台的转变与拓展,必将成为风电发展的又一新趋势。事实上,海上风电开发已逐渐成为风能利用的主要形式与研究方向。然而,由小到大、由陆上到浅海、再到深海的发展方向,使得风力机设计面临诸多新的理论和技术问题,已成为该领域的前沿热点与难点。目前中国国内对于此方面的研究工作尚处于起步阶段,海上风力机研究的文献资料尤为鲜见。为此,结合作者的科研积累,将现代大型陆海风力机设计的最新进展与相关技术理论进行较为系统的整理,形成目前的《现代陆海风力机计算与仿真》一书。

本书内容较为新颖,许多研究方向在中国国内乃至风电发达国家尚处于起步阶段。为方便读者就相关问题作深入研究,对书中所涉及的重点和难点,均给出了具体参考文献,为此作者进行了大量繁杂而细致的工作。

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。研究生聂佳斌、吴攀、周正、陈晖、陈余、赵海洋、高月文、李志敏、魏远等协助参与了部分绘图与文字录入工作。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!同时感谢国家自然科学基金项目(51176129/E060703)对本书研究内容的资助。

限于作者水平,疏漏与不当之处在所难免,恳请读者与同行批评指正。

作者



目 录

第一章 风能利用与风力机设计软件 1

| | |
|------------------------|----|
| 第一节 风能利用及海上风力机 | 1 |
| 一、海上风力机发展近况 | 1 |
| 二、中国风能利用历史与现状 | 6 |
| 第二节 风电机组技术趋势 | 10 |
| 一、风力机发电技术趋势 | 10 |
| 二、风电机组设计与仿真技术 | 14 |
| 第三节 陆上与海上风力机设计软件 | 16 |
| 一、风力机的设计软件介绍 | 16 |
| 二、海洋工程水动力学计算软件 | 18 |
| 三、海上风力机设计与仿真软件 | 20 |

第二章 风资源与风电场选址 22

| | |
|-------------------|----|
| 第一节 风资源概述 | 22 |
| 一、风能优点 | 22 |
| 二、风能缺点 | 23 |
| 第二节 风的形成与分类 | 24 |
| 一、风的形成 | 24 |
| 二、风的分类 | 27 |
| 第三节 风的描述及测量 | 31 |
| 一、大气稳定度 | 31 |
| 二、大气边界层 | 32 |

| | |
|-----------------------|----|
| 三、风速 | 34 |
| 四、风向 | 39 |
| 五、风测量 | 40 |
| 第四节 风资源统计方法 | 42 |
| 一、风速统计分布 | 42 |
| 二、风向统计分布 | 47 |
| 三、风能公式 | 49 |
| 四、风能密度 | 50 |
| 五、风能可利用时间 | 52 |
| 六、脉动风统计特性 | 53 |
| 七、极端风统计特性 | 58 |
| 第五节 风资源分布和风电场选址 | 61 |
| 一、中国风能资源特点及分布 | 61 |
| 二、风电场宏观选址 | 66 |
| 三、风电场微观选址 | 68 |
| 四、风电场选址软件介绍 | 70 |

第三章 翼型空气动力学

74

| | |
|--------------------------------|-----|
| 第一节 空气动力学及其发展 | 74 |
| 一、远古时期到 17 世纪:空气动力学早期萌芽 | 75 |
| 二、18 世纪到 19 世纪:现代空气动力学开端 | 77 |
| 三、20 世纪初期:飞行梦想真正实现 | 83 |
| 四、20 世纪后期:突破声障进入超声速时代 | 87 |
| 第二节 空气动力学研究主要阶段性成果 | 90 |
| 第三节 空气动力学发展现状及面临问题 | 92 |
| 一、现状与地位 | 93 |
| 二、面临问题 | 93 |
| 第四节 空气动力学研究领域、分类及研究方法 | 96 |
| 一、问题类别 | 96 |
| 二、研究方法 | 102 |
| 第五节 翼型 | 108 |
| 一、翼型概念 | 108 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 二、翼型研发概况 | 111 |
| 三、翼型几何参数 | 136 |
| 四、翼型气动参数与受力 | 140 |
| 五、常用翼型及资源 | 162 |
| 六、常用翼型气动设计与分析软件 | 180 |
| 第六节 翼型气动理论与设计 | 197 |
| 一、翼型设计 | 197 |
| 二、有限厚度翼型气动计算 | 205 |
| 三、薄翼理论 | 223 |
| 四、Hess - Smith 面元法 | 232 |

第四章

风力机空气动力学理论

254

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第一节 叶素动量理论 | 254 |
| 第二节 叶尖损失与轮毂损失模型 | 258 |
| 一、叶尖损失模型 | 258 |
| 二、轮毂损失模型 | 260 |
| 第三节 葛劳渥特修正模型 | 260 |
| 第四节 偏斜尾迹修正模型 | 262 |
| 第五节 基于修正模型的叶素动量理论迭代过程 | 263 |
| 第六节 广义动态尾迹理论 | 265 |
| 一、基本推导 | 267 |
| 二、压力分布 | 269 |
| 三、诱导速度分布 | 272 |
| 四、控制方程扩展 | 273 |
| 五、流动参数 | 275 |
| 六、压力系数 | 276 |
| 七、控制方程的最终表达式 | 277 |
| 八、广义动态尾迹模型的计算过程 | 277 |
| 第七节 动态失速模型 | 279 |
| 一、静态翼型特性扩展 | 281 |
| 二、Beddoes-Leishman 动态失速模型 | 283 |
| 三、模型修正 | 290 |

| | |
|-------------------------|-----|
| 第八节 塔影效应 | 293 |
| 第九节 垂直轴风力机空气动力学理论 | 295 |
| 一、叶片型线 | 296 |
| 二、叶片运动及受力分析 | 297 |
| 三、多流管模型 | 302 |
| 四、流管模型的动态失速修正 | 310 |

第五章 风力机流场结构与气动特性数值模拟 323

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第一节 数值模拟基本概念及其实现载体 | 323 |
| 一、基本概念 | 323 |
| 二、实现载体 | 325 |
| 第二节 几何模型与流场网格划分 | 326 |
| 一、几何模型 | 326 |
| 二、流场网格划分 | 327 |
| 第三节 基本控制方程及其数值求解技术 | 332 |
| 一、基本控制方程 | 332 |
| 二、数值离散方法 | 335 |
| 三、数值计算方法 | 341 |
| 第四节 湍流模型及其定解条件 | 342 |
| 一、湍流模型 | 342 |
| 二、定解条件 | 348 |
| 三、运动或变形区域的流动模拟方法 | 351 |
| 第五节 湍流模型应用与比较 | 353 |
| 一、美国可再生能源实验室 Phase VI 风力机 | 354 |
| 二、NACA 6 系列翼型 | 358 |
| 三、DU-91-W2-250 翼型 | 363 |
| 四、二维升力型垂直轴风力机转子 | 367 |
| 第六节 水平轴与垂直轴风轮流场数值模拟 | 371 |
| 一、三维水平轴风轮流场数值模拟 | 371 |
| 二、二维垂直轴风轮流场数值模拟 | 380 |

第六章 风力机结构动力学 **398**

- 第一节 风力机结构动力学研究现状 398
 - 一、风力机结构动力学主要研究方法 398
 - 二、风力机结构动力学研究简述 399
- 第二节 风力机载荷 402
 - 一、重力载荷 403
 - 二、惯性载荷 403
 - 三、气动载荷 405
- 第三节 风力机的结构动态模型 410
 - 一、虚功原理及假设模态法 411
 - 二、单自由度系统 414
 - 三、气动阻尼 414
 - 四、风力机结构动态模型 416
 - 五、有限元模型 422
- 第四节 风力机疲劳计算 422
 - 一、应力循环及其计算 422
 - 二、累积损伤的 Palmgren-Miner 准则 424
 - 三、当量载荷 425

第七章 风力机气动弹性 **429**

- 第一节 风力机气动弹性现象 429
 - 一、风力机叶片气动弹性 429
 - 二、风力机叶片气动弹性稳定性 431
 - 三、风力机系统振动和稳定性 434
- 第二节 风力机气动弹性分析 435
 - 一、风力机气动弹性模型 436
 - 二、风力机动力学方程 438
 - 三、风力机气动弹性动力响应分析 442
- 第三节 风力机气动弹性稳定性分析 443

第八章 概念设计、数字样机与建模仿真技术**448**

| | |
|----------------------------|-----|
| 第一节 产品概念设计思想 | 448 |
| 一、概念设计定义 | 449 |
| 二、概念设计分类 | 450 |
| 第二节 计算机辅助概念设计与虚拟样机技术 | 452 |
| 一、计算机辅助概念设计的产生 | 453 |
| 二、虚拟样机技术 | 454 |
| 三、虚拟样机及其相关技术 | 456 |
| 第三节 建模与仿真技术 | 458 |
| 一、建模与仿真技术概念 | 458 |
| 二、多体系统建模仿真技术 | 461 |
| 三、计算多体系统动力学研究进展 | 461 |
| 第四节 深海漂浮式风力机概念设计实例 | 463 |
| 一、深海漂浮式风力机概念设计实例分析 | 463 |
| 二、组成部件功能分解与设计评价 | 465 |

第九章 陆上风力机整机动力学仿真**473**

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第一节 风力机整机动力学仿真技术 | 473 |
| 一、风力机整机仿真模型与假设模态法 | 473 |
| 二、风载荷条件 | 475 |
| 三、气动-结构计算系统模块结构及组成 | 478 |
| 第二节 MSC. ADAMS 软件与架构 | 483 |
| 一、ADAMS 软件介绍 | 483 |
| 二、ADAMS 软件基本架构 | 483 |
| 三、ADAMS 软件基本模块 | 484 |
| 四、ADAMS 输入输出文件 | 486 |
| 五、ADAMS 模型语言格式 | 487 |
| 第三节 陆上水平轴风力机仿真 | 490 |
| 一、风力机仿真环境 | 490 |
| 二、仿真计算步骤 | 492 |
| 第四节 变桨变速风力机模型塔架特性仿真分析 | 496 |

| | |
|-----------------|-----|
| 一、塔架坐标系选取 | 496 |
| 二、风载荷条件设定 | 497 |
| 三、塔架位移特性 | 497 |

第十章 海上风力机与海洋工程环境 509

| | |
|---------------------------|-----|
| 第一节 海上风电优势与发展现状 | 509 |
| 一、海上风电优势 | 509 |
| 二、海上风电现状 | 510 |
| 第二节 海上风力机与陆上风力机主要区别 | 512 |
| 一、外部特征明显区别 | 512 |
| 二、载荷条件与结构设计显著区别 | 513 |
| 第三节 海洋水动力理论基础 | 518 |
| 一、海洋环境波浪载荷 | 518 |
| 二、海洋水动力理论基础 | 520 |
| 三、直立与截断柱体绕射速度势 | 524 |
| 第四节 Spar 平台与系泊系统计算 | 528 |
| 一、Spar 平台静水恢复力计算 | 528 |
| 二、Spar 平台恢复力计算简化 | 530 |
| 三、平台系泊系统计算 | 531 |

第十一章 近海桩基式风力机设计与仿真 536

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第一节 近海桩基式风力机环境载荷 | 536 |
| 一、风力机载荷 | 536 |
| 二、波浪载荷 | 537 |
| 三、海流载荷 | 542 |
| 四、地震载荷 | 542 |
| 第二节 近海风机结构-土动力学模型 | 545 |
| 一、桩-土相互作用 | 545 |
| 二、桩-土相互作用计算 | 546 |
| 第三节 风与波浪联合作用下近海桩基式风力机 | 551 |
| 一、近海风力机组系统载荷模型 | 551 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 二、规则波浪仿真 | 553 |
| 第四节 海上桩基式风力机仿真模型 | 557 |
| 一、海上桩基式风力机 | 557 |
| 二、海上风力机环境条件与载荷 | 561 |
| 第五节 海上变桨变速风力机模型叶片特性仿真 | 564 |
| 一、叶片坐标系选取 | 564 |
| 二、不考虑波浪和海流载荷的叶片位移特性 | 565 |
| 三、考虑波浪和海流特性的位移特性 | 576 |

第十二章 深海漂浮式风力机计算与仿真

578

| | |
|-------------------------------|-----|
| 第一节 深海漂浮式风力机研究及最新进展 | 579 |
| 一、深海漂浮式风力机早期历史 | 579 |
| 二、深海漂浮式风力机现状 | 580 |
| 三、深海漂浮式风力机研究进展 | 582 |
| 第二节 深海漂浮式风力机整机理论模型与静态分析 | 585 |
| 一、深海漂浮式风力机整机理论模型 | 585 |
| 二、水动力学修正理论模型 | 586 |
| 三、浮体平台系统水动力分析 | 589 |
| 第三节 平台的线性水动力模型系数 | 594 |
| 一、耦合纵荡和纵摇分析 | 594 |
| 二、垂荡分析 | 596 |
| 三、纵荡运动 | 597 |
| 第四节 深海漂浮式风力机的全耦合仿真模型 | 598 |
| 一、深海漂浮式风力机全耦合仿真模型 | 598 |
| 二、深海漂浮式风力机水动力学特性计算流程 | 599 |
| 三、深海漂浮式风力机水动力学特性计算 | 600 |
| 第五节 深海漂浮式风力机全耦合仿真分析 | 605 |
| 一、风力机和支撑平台模型描述 | 605 |
| 二、仿真分析工况说明 | 607 |
| 三、仿真结果分析 | 608 |

风能利用与风力机设计软件

风能主要应用之一是风力发电,根据风电场开发位置,可将风力发电机(风力机)分为陆上风力机和海上(或离岸)风力机(offshore wind turbine, OWT)两大类,而海上风力机又可以进一步分为浅海(或近海)桩基风力机和深海(或远海)漂浮式风力机(floating offshore wind turbine, FOWT)。

由于海洋环境与桩基结构复杂的相互作用,海上风力机与传统的陆上风力机相比表现出高度的动态运行特性。此外,海上风力机风轮、塔架、机舱和风力机海洋工程基础(包括浅海桩基及深海漂浮式平台)的相互作用导致了设计过程的复杂性和特殊性,这就要求必须在细节设计阶段对负荷和性能进行模拟。如果忽略存在某些相互作用,使模型简化或采用传统设计方法,将导致载荷和其他设计参数的高估或低估。因此,对海上风力机的设计计算和优化,要求应用更复杂的设计和仿真程序。此意味着,不论在理论上还是实践中海上风力机与陆上风力机在设计上有很大差异,其研究更复杂,考虑的因素更多,甚至许多问题无法沿用陆上风力机的做法(如海上风力机必须考虑水动力学、土动力学等),需要新的理论和技术支持,正因为此,本书专门将海上风力机单独组成章节论述。

本章第一节首先介绍风能利用的历史与现状,及最新的海上风力机的发展;第二节介绍风力机的技术趋势和设计仿真;第三节则进一步介绍陆上和海上风力机的各种设计软件。

第一节 风能利用及海上风力机

一、海上风力机发展近况

蒸汽机发明前,以风力和水力为代表的机械能源是除人力和畜力以外的

人类唯一可以利用的能源形式。直到 19 世纪工业革命后,煤炭、油气等矿物能源才逐渐在人类生产生活中占据中心位置,然而随着化石燃料的价格高涨和对环境负面效应日益加剧,在聚变核能及更高级能源时代尚未实现和发明之前,转向寻找更为廉价、环保的替代能源无疑是现今的唯一选择,风能利用再度被重视起来。

一般认为,风能是一种清洁的永续能源,与传统能源相比,风力发电不依赖外部能源,无燃料价格风险,发电成本稳定,也无碳排放等环境成本。此外,可利用的风能在全世界范围内分布都很广泛。正是因为独具这些优势,风力发电逐渐成为许多国家可持续发展战略的重要组成部分,发展迅猛。另一方面,就现有的各种可再生能源中,风能是除核能外,技术最成熟、最具开发条件和最有发展前景的发电方式。并且风力发电与核电相比,投资周期短、不会发生重大安全事故。2011 年 3 月 11 日伴随大地震后日本福岛第一核电站事故所造成的灾难性后果令人震惊,鉴于此许多国家重新调整了核电发展规划。风能与其他新能源相比,其优势更加明显。如,与太阳能相比具有成本优势,更接近火电与水电的成本;与生物质能和潮汐能相比,具备大规模开发条件。

风能资源蕴藏量也特别巨大,据世界气象组织和中国气象局气象科学研究所分析^[1],地球上可利用的风能资源为 200 亿 kW,是地球上可利用水能的 20 倍。中国陆地 10 m 高度层可利用的风能为 2.53 亿 kW,海上可利用的风能是陆地上的 3 倍,50 m 高度层可利用的风能是 10 m 高度层的 2 倍,中国近海可开发和利用的风能储量约为 7.25 亿 kW,远海风能储量则更多。目前技术条件,风能是除了火电、核电和水电以外的第四大电力来源,是近几十年内实现电力清洁化、满足电力消费的主要发展方向。

值得注意的是,中国发展可再生能源的背景与美国、德国和丹麦等西方发达国家有着特别的不同之处:西方发达国家对可再生能源大规模的开发利用,是在电力供求总体平衡甚至供大于求的背景下开展的,他们发展可再生能源的最主要目的是逐步用可再生能源置换化石燃料等常规能源、解决环境污染等问题。而中国则面临着比西方发达国家严峻得多的资源与环境的双重瓶颈制约,突出表现在“缺煤、缺电、缺油”现象的同时环境污染问题日益严重。所以寻找到储量巨大且价格低廉的可再生替代能源,对于解决中国的能源供应紧张局面、保障国家能源安全、降低环境污染、实现经济和社会的可持续发展等具有非常重要和深远的意义。

自从 1991 年世界上第一座海上风电场建立以来^[2],到 2009 年底,全球已