

风能技术

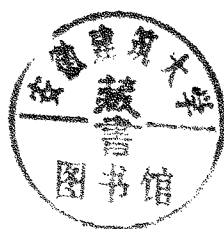
〔美〕 Tony Burton 等 著
武 鑫 等 译



科学出版社
www.sciencep.com

风能技术

〔美〕Tony Burton 等 著
武 鑫 等 译



科学出版社
北 京

图字: 01-2006-7058 号

内 容 简 介

能源与环境问题已成为可持续发展面临的主要问题,日益引起国际社会的广泛关注。风能作为一种重要的可再生能源,其具有清洁、无污染、安全、储量丰富的特点,受到世界各国的普遍重视。本书全面详细地讲解了水平轴风力机空气动力学、设计载荷、概念设计、零部件设计、风力机安装和风电场规划等内容。此外,还介绍了风资源、风力机特性、风电场电气系统等内容。本书内容详实,图文并茂,重点突出,应用性强。

本书可供风力发电技术领域的工程技术人员、研发人员以及管理人员阅读,也可作为大专院校相关专业师生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

风能技术/(美)Tony Burton 等著.武鑫等译—北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019709-2

I. 风… II. ①T… ②武… III. 风能能源 IV. TK81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 129129 号

责任编辑:赵方青 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:戴海燕

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 9 月第一次印刷 印张:33 3/4

印数:1—4 000 字数:653 000

定 价:64.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序

风能是可再生能源中发展最快的清洁能源,也是最具有大规模开发和商业化发展前景的可再生能源。积极发展可再生能源,对增加能源供应,调整能源结构,缓解环境污染,保障能源安全,促进经济发展,建设和谐社会都起到重要的作用。

近年来,全球风能发展迅速。从 1995—2006 年全球风电总装机容量平均增长 28.4%,至 2006 年底全球风力发电总装机容量达到 74.2GW,其中 2006 年新增装机容量达到 15GW。2005 年 2 月,《中华人民共和国可再生能源法》颁布后,我国风能发展进入了一个新的时期。到 2006 年底,全国除台湾地区以外建成了 91 个风电场,风力发电总装机容量达到了 2599MW,其中 2006 年新增 1337MW。

风能利用是一个系统工程,其中风能技术的进步是风能持续健康发展的重要保障。风能技术涉及气象学、流体力学、固体力学、电子技术、机械工程、电气工程、海洋工程、材料科学、环境科学等多种学科和专业。因此风能技术的进步不仅需要基础理论的指导,而且还需要实践经验的积累。

风力发电是风能利用的主要方式。近年来,我国在风电技术和风电产业方面都取得了长足进步。但是在大型风力发电机组的设计技术和制造技术方面都还处于起步阶段,自主创新能力和实践能力还很薄弱,实践经验积累不足。因此,为了加快发展我国风能,除了政府在政策上给予支持外,还必须加大风能科研投入和人才培养,建立风能公共技术服务平台和完善的风能产业体系。

《风能技术》是一本全面介绍风力发电技术的专著,内容翔实,图文并茂,条理清晰,应用性强,是近年来国际上较有影响的一本风能著作。中国科学院电工研究所武鑫等翻译出版此书,将国外风力发电技术和经验介绍给我国从事风力发电技术工作的工程技术人员、管理人员和教师学生,对提高我国风电技术水平,促进风电产业发展,培养风能专业人才会起到积极的作用。

賀德馨

二零零七年七月

译者序

本书是由美国的 Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins Ervin Bossanyi 四位工程师合作的一部内容翔实的风力发电技术的著作。我国的风力发电行业正处于快速发展时期,翻译此书旨在将国外先进的风力发电技术介绍给国内读者,为在风力发电技术领域工作的工程技术人员、科研人员、大专院校师生以及管理人员等提供一本有价值的参考书。

参加本书翻译的主要人员有:武鑫、谷海涛、李海东、邵桂萍、林资旭、王宇龙、胡春松、潘磊、李建林、鄂春良、李亚西。

此外,硕士研究生梁亮、张雷、付勋波、李梅、林少华、高志刚、李政敏、毛怀宇、范博,博士研究生张宪平、胡书举、温春雪、郭金东、杨子龙、王一波等也参与了部分翻译工作。全书最后由武鑫进行统稿。

在此,要感谢中国科学院电工研究所对译著的支持,感谢贺德馨研究员、许洪华研究员、赵斌副研究员、陈振斌副研究员、齐同庆研究员、沈礼敏研究员对译著的校审工作,感谢曹志刚、马鸿兵、叶杭冶、田野提出了许多宝贵意见。最后,感谢科学出版社的大力支持,对责任编辑赵方青、崔炳哲的辛勤工作表示最诚挚的谢意!

由于译者的水平有限,全书翻译工作量较大,不当之处在所难免,恳请读者不吝赐正。

武 鑫

二零零七年七月

致 谢

在本书的准备阶段,许多人以不同的方式给予作者大量的帮助。特别需要感谢:David Infield 为本书的第 4 章提供了大量的素材,David Quarton 审阅了本书第 5 章;Mark Hancock, Martin Ansell, Colin Anderson 为第 7 章叶片材料部分的写作提供了素材和指导;Ray Hick 审阅了齿轮箱的设计部分。同时也要感谢 Roger Haines 和 Steve Gilke,他们分别阐明了偏航驱动设计和制动原理的有关问题,另外还要感谢 James Shawler 针对第 3 章的内容提出了宝贵的意见。

我们广泛参考了 ERSU 和 Riso 的出版书籍,对于这些出版社能尽可能提供适宜的文件和资料以及同意使用众多内部材料的,我们在此表示真诚的谢意。

再次对以上相关团体和个人提供给我们的帮助表示感谢。书中难免有疏漏错误之处,欢迎批评和指正。

英国标准的摘录是经过英国标准化委员会的许可,许可号为 2001/SK0281。全部标准都是允许使用的,且来自于英国标准化委员会客户服务部(电话: +44(0) 20 8996 9001)。

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 发展历程	2
1.2 现代风力机	6
1.3 本书的概要	7
第 2 章 风资源	11
2.1 风特性	12
2.2 风资源的地理变化	13
2.3 长期风速变化	14
2.4 年度和季度性变化	14
2.5 天气差异和昼夜差异	16
2.6 湍 流	17
2.6.1 湍流的特性	17
2.6.2 边界层	18
2.6.3 湍流强度	20
2.6.4 湍流谱	21
2.6.5 长度尺度及其他参数	22
2.6.6 交叉谱和相干方程	25
2.7 阵风速度	27
2.8 极端风速	28
2.8.1 极端风况的标准	29
2.9 风速预测	30
2.9.1 统计方法	30
2.9.2 气象分析方法	31
2.10 风电场和尾流中的湍流	32
2.11 复杂地形的湍流	34
第 3 章 水平轴风力机的空气动力学	37
3.1 引 言	38
3.2 致动盘概念	39

3.2.1	动量定理	40
3.2.2	风能利用系数	41
3.2.3	贝兹极限	41
3.2.4	推力系数	41
3.3	风轮圆盘理论	42
3.3.1	旋转尾流	42
3.3.2	角动量定理	43
3.3.3	最大功率	44
3.3.4	尾流结构	45
3.4	致动盘的涡流柱模型	46
3.4.1	引 言	46
3.4.2	涡流柱理论	47
3.4.3	附着涡环量和诱导速度的关系	47
3.4.4	根旋涡	48
3.4.5	转矩和功率	49
3.4.6	轴向流场	49
3.4.7	切向流场	50
3.4.8	径向流场	51
3.4.9	结 论	52
3.5	风轮叶片理论	52
3.5.1	引 言	52
3.5.2	叶素理论	52
3.5.3	叶素-动量(BEM)定理	53
3.5.4	风轮转矩和功率的确定	55
3.6	气体分离的动量定理	57
3.6.1	自由流/混合尾流	57
3.6.2	气流分离引起的风轮推力的修正	57
3.6.3	推力系数的经验确定	58
3.7	叶片几何特性	59
3.7.1	引 言	59
3.7.2	变速运行时的优化设计	59
3.7.3	实际叶片设计	63
3.7.4	阻力对最佳叶片设计的影响	65
3.7.5	恒速运行时的最佳叶片设计	67
3.8	叶片数的影响	67
3.8.1	引 言	67
3.8.2	叶尖损失	68

3.8.3	叶尖损失因数的 Prandtl 渐近法	72
3.8.4	叶根损失	75
3.8.5	叶尖损失对最佳叶片设计和功率的影响	76
3.8.6	计及叶尖损失的非最优运行	79
3.9	实际风力机的计算结果	81
3.10	稳定偏航的风力机的空气动力	84
3.10.1	风力机在固定偏航时的动量定理	84
3.10.2	风轮偏航的 Glauert 动量定理	86
3.10.3	偏航致动盘的涡流柱面模型	90
3.10.4	气流膨胀	93
3.10.5	相关理论	98
3.10.6	风力机风轮在固定偏航时的旋转尾流	98
3.10.7	风力机在固定偏航时的叶素理论	99
3.10.8	风力机在固定偏航时的叶素-动量定理	100
3.10.9	诱导速度的计算值	103
3.10.10	风轮固定偏航时的叶片力	105
3.10.11	固定偏航时的偏航力矩和倾斜力矩	105
3.11	加速势方法	108
3.11.1	引 言	108
3.11.2	Kinner 的通用压力分布理论	109
3.11.3	压力的轴对称分布	111
3.11.4	压力的反对称分布	114
3.11.5	Pitt 和 Peters 模型	116
3.11.6	通用加速势方法	117
3.11.7	各种方法的比较	118
3.12	失速延迟	119
3.13	非定常定流——动态入流	121
3.13.1	引 言	121
3.13.2	非定常流中加速势方法的调整	122
3.13.3	非定常的偏航力矩和倾斜力矩	124
3.13.5	准定常翼型的空气动力学	127
3.13.6	翼型加速度引起的气动力	127
3.13.7	非定常流中尾流对翼型空气动力的影响	128
3.14	附录 翼型的升力和阻力	131
3.14.1	阻力定义	132
3.14.2	阻力系数	134
3.14.3	边界层	135

3.14.4	边界层的分离	135
3.14.5	层流和湍流边界层	136
3.14.6	升力定义及其与环流的关系	138
3.14.7	失速型翼型	140
3.14.8	升力系数	141
3.14.9	翼型阻力特性	142
3.14.10	翼型特性随雷诺数的变化	143
3.14.11	有弯度的翼型	144

第4章 风力机特性 149

4.1	特性曲线	150
4.1.1	C_p - λ 功率特性曲线	150
4.1.2	叶片实度对功率特性的影响	151
4.1.3	C_Q - λ 力矩曲线	152
4.1.4	C_T - λ 推力曲线	153
4.2	恒速的运行情况	153
4.2.1	K_p - $1/\lambda$ 特性曲线	154
4.2.2	失速调节	154
4.2.3	转速变化的影响	155
4.2.4	叶片桨距角变化的影响	156
4.2.5	桨距角的调节	157
4.2.6	调桨到失速	157
4.2.7	顺桨调节	157
4.3	测量的特性曲线与理论的特性曲线的比较	158
4.4	变速运行	160
4.5	捕获能量的估计	160
4.6	风力机现场测试	164
4.6.1	引 言	164
4.6.2	风力机现场测试的信息源	165
4.7	风力机的性能测试	166
4.7.1	现场测试的方法论	166
4.7.2	风速的测量	167
4.7.3	风向的测量	168
4.7.4	空气温度和压力的测量	168
4.7.5	功率的测量	169
4.7.6	风力机的状态	169

4.7.7	数据采集系统	170
4.7.8	数据采样率	170
4.8	测试数据的分析	170
4.9	湍流的影响	172
4.10	空气动力特性的评估	173
4.11	误差与不确定度	176
4.11.1	误差的估计	177
4.11.2	敏感因素	177
4.11.3	评估误差	178
4.11.4	联合误差	179
第5章 水平轴风力机设计载荷		181
5.1	国家和国际标准	182
5.1.1	发展背景	182
5.1.2	IEC 61400-1	182
5.1.3	Germanischer Lloyd 认证标准	183
5.1.4	丹麦标准 DS 472	183
5.2	载荷设计基础	184
5.2.1	载荷源	184
5.2.2	极限载荷	184
5.2.3	疲劳载荷	184
5.2.4	载荷的局部安全系数	185
5.2.5	控制和安全系统的功能	185
5.3	湍流与尾流	186
5.4	极限载荷	186
5.4.1	非运行载荷情况——正常机组状态	186
5.4.2	非运行载荷情况——机组故障状态	187
5.4.3	运行时载荷情况——正常机组状态	187
5.4.4	运行时的载荷情况——空载	189
5.4.5	运行时的载荷情况——机组故障状态	189
5.4.6	启动和停机情况	189
5.4.7	叶片和塔架间距	189
5.5	疲劳载荷	190
5.5.1	疲劳载荷综合谱	190
5.6	叶片的静态载荷	190
5.6.1	升力与阻力系数	190

5.6.2	不同机组类型的关键设置	191
5.6.3	动态响应	191
5.7	运行中的叶片载荷	198
5.7.1	确定和随机载荷	198
5.7.2	确定的气动载荷	198
5.7.3	重力载荷	205
5.7.4	确定的惯性载荷	205
5.7.5	随机气动载荷——频域分析	207
5.7.6	随机气动载荷——时域分析	215
5.7.7	极限载荷	217
5.8	叶片动态响应	220
5.8.1	模态分析	220
5.8.2	振形及频率	222
5.8.3	离心刚化作用	223
5.8.4	气动及结构阻尼	225
5.8.5	确定性载荷的响应——逐步的动态分析	226
5.8.6	随机载荷响应	230
5.8.7	对模拟载荷的响应分析	232
5.8.8	摇摆运动	232
5.8.9	塔架的耦合	236
5.8.10	风力发电机组动态分析规则	241
5.8.11	空气弹性变形的稳定性	244
5.9	叶片的疲劳应力	245
5.9.1	叶片疲劳设计的方法	245
5.9.2	确定性分量和随机性分量的组合	247
5.9.3	频域内的疲劳估计	247
5.9.4	风力机仿真	249
5.9.5	疲劳循环计数	250
5.10	轮毂与低速轴载荷	250
5.10.1	引 言	250
5.10.2	确定的气动载荷	252
5.10.3	随机气动载荷	253
5.10.4	重力载荷	253
5.11	机舱载荷	254
5.11.1	来自叶轮的载荷	254
5.11.2	包层载荷	255
5.12	塔架载荷	256

5.12.1	极限载荷	256
5.12.2	极限载荷下的动态响应	256
5.12.3	稳定风速下的运行载荷(确定性分量)	259
5.12.4	湍流下的运行载荷(随机分量)	260
5.12.5	运行载荷的动态响应	263
5.12.6	疲劳载荷及其应力	264
5.13	附录 湍流风速下静止叶片的动态响应	265
5.13.1	引 言	265
5.13.2	频域响应函数	265
5.13.3	忽略风速沿叶片变化的共振位移响应	267
5.13.4	湍流风速横向分布对共振位移响应的影响	268
5.13.5	叶片根部弯曲力矩的共振	271
5.13.6	叶片根部弯曲力矩的背景效应	273
5.13.7	峰值效应	274
5.13.8	叶片中部的弯曲力矩	276
第6章 水平轴风力机的概念设计		279
6.1	概 述	280
6.2	风轮直径	280
6.2.1	成本模型	280
6.2.2	风力机大小最优化的简化成本模型实例	281
6.3	风力机的容量	283
6.3.1	相对风轮直径优化风力机容量的简化成本模型	283
6.3.2	最佳额定风速与年平均风速的关系	285
6.3.3	风力机的比功率	287
6.4	风轮转速	287
6.4.1	风轮转速和实度的理想关系	287
6.4.2	转速对于叶片重量的影响	288
6.4.3	最佳风轮转速	288
6.4.4	噪声限制对风轮转速的影响	288
6.4.5	视觉考虑	288
6.5	叶片数量	289
6.5.1	引 言	289
6.5.2	叶片数量、转速和实度的理想关系	289
6.5.3	某些性能和成本比较	289
6.5.4	叶片数量对载荷的影响	293

6.5.5	噪声限制对风轮转速的影响	293
6.5.6	视觉效果	293
6.5.7	单叶片风力机	294
6.6	摆动的结构	294
6.6.1	具有减小载荷的优点	294
6.6.2	大摆幅限制	295
6.6.3	变桨距和摆动耦合	296
6.6.4	失速调节型风力机的摆动稳定性	297
6.7	功率控制	297
6.7.1	被动失速控制	297
6.7.2	主动变桨距控制	297
6.7.3	被动变桨距控制	301
6.7.4	主动失速控制	301
6.7.5	偏航控制	302
6.8	制动系统	302
6.8.1	独立制动系统——标准要求	303
6.8.2	空气动力学制动方案	303
6.8.3	机械制动方案	304
6.8.4	停机和空转比较	305
6.9	恒速、双速或变速方案	305
6.9.1	双速方案	305
6.9.2	变速方案	306
6.9.3	变滑差方案	307
6.9.4	变速方案的其他途径	307
6.10	发电机的类型	308
6.10.1	同步发电机的应用	309
6.10.2	直驱发电机	309
6.11	传动链装配方案	310
6.11.1	低速轴装配	310
6.11.2	高速轴和发电机的装配	313
6.12	传动链的要求	314
6.13	风轮相对于塔架的位置	315
6.13.1	上风向布置	315
6.13.2	下风向布置	316
6.14	塔架的刚度	316
6.15	人员安全和通道问题	317

第7章 零部件设计 319

7.1 叶 片	320
7.1.1 引 言	320
7.1.2 空气动力设计	320
7.1.3 优化设计的修正	321
7.1.4 叶片结构的形成	321
7.1.5 叶片材料和属性	323
7.1.6 玻璃/聚酯和玻璃/环氧复合材料的性能	325
7.1.7 木材层压板的性能	329
7.1.8 主导载荷情况	331
7.1.9 叶片谐振	344
7.1.10 抗屈曲设计	348
7.1.11 叶片根部的固定	352
7.2 调桨轴承	353
7.3 风轮轮毂	355
7.4 齿轮箱	358
7.4.1 引 言	358
7.4.2 运行中的载荷的变化	358
7.4.3 传动链动力学特性	360
7.4.4 制动载荷	360
7.4.5 轮齿的疲劳设计中变载荷的影响	361
7.4.6 变载荷对轴承和转轴疲劳设计的影响	364
7.4.7 齿轮布置	364
7.4.8 齿轮箱噪音	367
7.4.9 齿轮箱的装配	368
7.4.10 润滑和冷却	368
7.4.11 齿轮箱效率	369
7.5 发电机	369
7.5.1 感应发电机	369
7.5.2 变速发电机	371
7.6 机械制动	373
7.6.1 制动任务	373
7.6.2 制动设计的主导因素	373
7.6.3 制动盘温升的计算	375
7.6.4 高速轴制动设计	377
7.6.5 两级制动	378

7.6.6	低速轴制动设计	378
7.7	机舱底盘	378
7.8	偏航驱动	379
7.9	塔 架	381
7.9.1	引 言	381
7.9.2	一阶模态固有频率的约束	382
7.9.3	钢制管状塔架	383
7.9.4	桁架式塔架	389
7.10	基 础	390
7.10.1	板状基础	390
7.10.2	多桩基础	391
7.10.3	混凝土单桩基础	392
7.10.4	桁架式塔架基础	392

第8章 控制器 397

8.1	风力机控制器的功能	398
8.1.1	整机运行状态控制	398
8.1.2	闭环控制	399
8.1.3	安全链	399
8.2	闭环控制:问题和目标	401
8.2.1	变桨距控制	401
8.2.2	失速控制	402
8.2.3	发电机转矩控制	402
8.2.4	偏航控制	403
8.2.5	控制器对载荷的影响	403
8.2.6	定义控制器的目标	404
8.2.7	PI 和 PID 控制器	404
8.3	闭环控制:通用技术	405
8.3.1	恒速变桨距风力发电机组的控制	405
8.3.2	变速变桨距风力发电机组的控制	406
8.3.3	变速风力发电机组的变桨距控制	408
8.3.4	转矩控制和变桨距控制间的切换	408
8.3.5	塔架振动控制	410
8.3.6	传动系统的扭转振动控制	411
8.3.7	变速-失速调节	412
8.3.8	可变滑差风力发电机组的控制	413

8.3.9	独立桨距控制	415
8.4	闭环控制:分析设计方法	416
8.4.1	经典设计方法	416
8.4.2	变桨距控制器的增益规则	420
8.4.3	在控制器中加入更多的项	420
8.4.4	经典控制器的其他扩展	421
8.4.5	最优化反馈方法	422
8.4.6	其他方法	425
8.5	变桨距执行机构	426
8.6	控制系统的实现	427
8.6.1	离散化	428
8.6.2	抗积分饱和	429
第9章	风力机安装和风电场	431
9.1	项目开发	432
9.1.1	初始选址	433
9.1.2	项目可行性评估	434
9.1.3	测量-关联-预测技术	434
9.1.4	微观选址	435
9.1.5	场址调研	436
9.1.6	公众咨询	436
9.1.7	计划申请的准备和提交	436
9.2	视觉和地形评估	438
9.2.1	地形特性评估	440
9.2.2	设计与改进/优化	441
9.2.3	效果评估	442
9.2.4	光影闪烁	444
9.2.5	社会学方面的考虑	444
9.3	噪 声	444
9.3.1	术语和基本概念	445
9.3.2	风力机的噪声	447
9.3.3	风电场噪声的测量、预测和评估	449
9.4	电磁干扰	453
9.4.1	对风力发电机组 EMI 的建模和预测	455
9.5	生态评估	458
9.5.1	对鸟类的影响	459