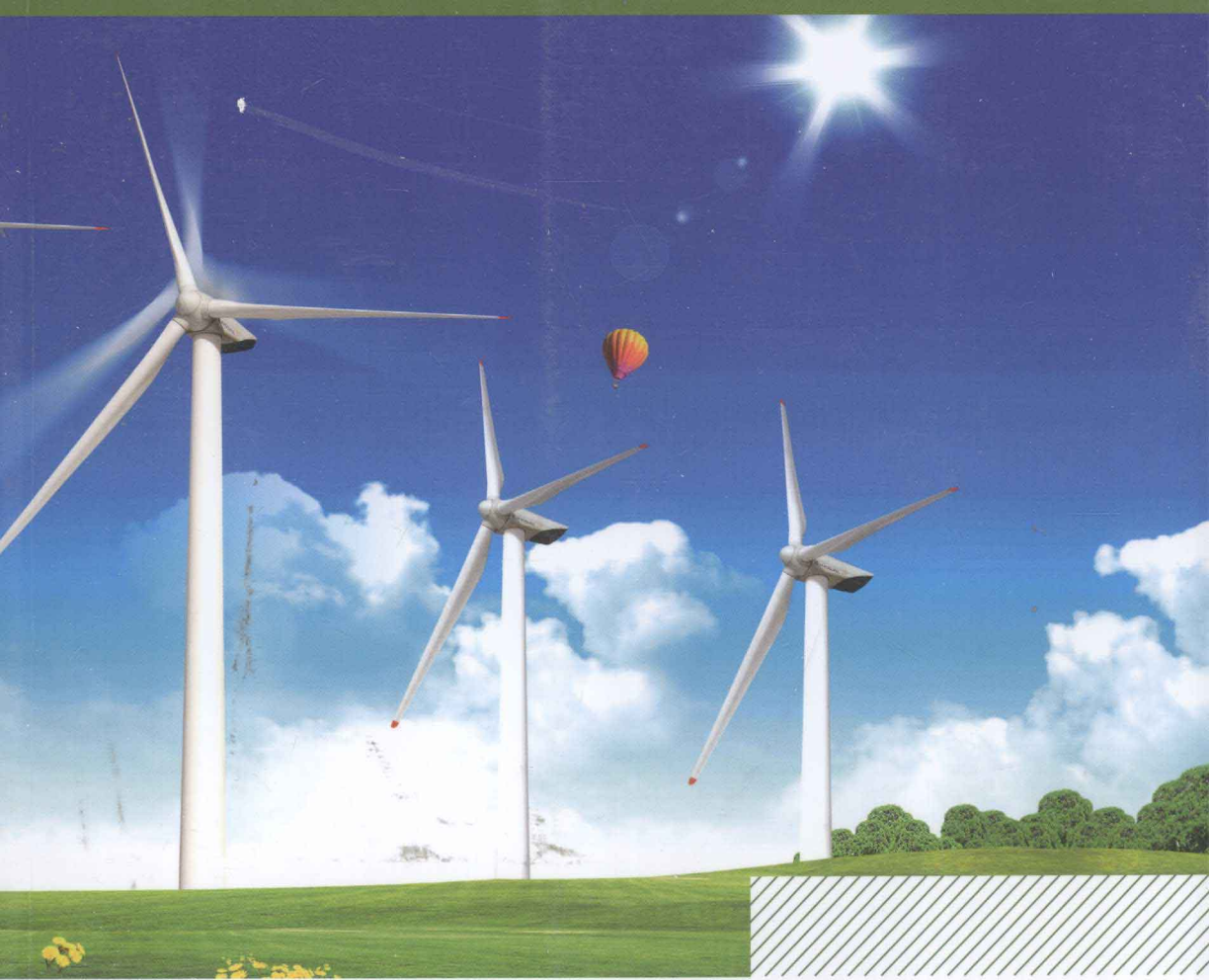




风力机翼型及叶片 优化设计理论

陈进 汪泉 著



科学出版社

风力机翼型及叶片优化设计理论

陈 进 汪 泉 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了风力机专用翼型、叶片气动外形及其内部结构的设计理论与方法,主要包括五部分内容:风力机专用翼型族的设计理论与方法,新翼型族的风洞试验,叶片气动外形设计与优化,复合材料风力机新型叶片结构优化设计以及叶片二元翼段气动弹性稳定性分析。除了阐述风力机叶片设计相关基本概念和基本理论外,书中重点介绍了目前风力机专用翼型设计中先进的理念与方法、叶片气动性能优化设计方法以及气动载荷条件下的复合材料风力机叶片结构优化设计方法,并给出了结果评价。

本书可作为高等院校风电相关专业的研究生以及风电相关行业科研院所的工作人员的参考书,也可供机械工业部门和其他工业部门气动与结构设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力机翼型及叶片优化设计理论 / 陈进,汪泉著. —北京:科学出版社,2013. 11

ISBN 978-7-03-039108-7

I. ①风… II. ①陈…②汪… III. ①风力机械-翼型-最优设计
IV. ①TK83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 271035 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 / 责任校对:宣 慧

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2013 年 11 月第一次印刷 印张:23

字数:446 000

定价:96.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

风能是一种清洁的可再生能源,其发展潜力巨大,越来越受到世界各国的重视。在广泛使用的风力机中,叶片是其最为关键的部件之一,其价值达到整机价值的 20%左右。叶片良好的设计、可靠的质量和优越的性能是保证风力发电机组正常稳定运行的决定性因素。然而,我国风力机发电核心技术(如风力机专用翼型的开发及叶片的气动外形设计等)大多源于欧美,以引进为主,并没有掌握其核心技术,这严重制约着我国风电装备的自主研发水平。因此,开展风力机翼型及叶片优化设计理论研究对提高我国风电装备的自主研发水平、积极发展可再生能源以及培养风电人才队伍具有重要的指导作用。

目前专门针对风力机翼型及叶片设计方面的书籍尚不多见,以往相关专著研究的重点在于风力机空气动力学方面,包括计算流体力学、叶素动量理论、风洞试验等。而本书将全面系统地介绍风力机翼型及叶片现代设计方法,以及与之相关的翼型气动性能、叶片气动外形特性及气动弹性结构特性等内容。

全书共 11 章,第 1 章介绍风力机翼型及叶片相关研究现状;第 2 章介绍风力机翼型空气动力理论基础及翼型气动性能预测方法;第 3 章详细介绍了风力机翼型型线集成理论;第 4 章阐述了风力机翼型型线参数优化设计理论;第 5 章介绍新型风力机翼型模型试制及风洞试验分析;第 6 章介绍风力机空气动力学以及风轮叶尖修正理论;第 7 章介绍风力机叶片三维曲面形状集成表达;第 8 章介绍风力机叶片的形状优化设计;第 9 章阐述了复合材料风力机新型叶片结构优化设计;第 10 章介绍风力机叶片气动弹性耦合分析;第 11 章介绍风力机叶片二元翼段气动弹性稳定性分析。

本书的主要内容以风力机翼型及叶片空气动力学理论为基础,开创性地引入保角变换理论,结合泛函分析方法,提出一系列风力机翼型参数优化设计方法,并设计出了最大相对厚度在 12%~40%的翼型系列;对风力机新型翼型进行了模型试制及风洞试验对比分析,验证了新设计的翼型具有较好的气动性能;基于修正的叶素动量理论,提出以风力机单位输出能量成本为优化目标的数学模型,并给出优化后评价结果。并且,在整个叶片全部功率产生区域内,采用本书设计的新翼型族,提出基于性能及轻量化的叶片优化数学模型,并对比了优化前后性能结果;基于复合材料弹性力学理论基础,对 2MW 风力机新型叶片进行了初始铺层设计,结合粒子群算法及有限元法,在气动载荷作用下对风力机叶片进行了内部结构铺层设计;最后探讨了风力机叶片振动与气动力耦合机理,包括叶片振动速度对来流风

速和叶片载荷的影响、叶片二元翼段载荷重新分布、叶片二元翼段颤振分析以及风力机叶片动力失速气动弹性等问题。

本书的完成首先要感谢国家自然科学基金项目(51175526, 50775227)、863 计划项目(2012AA051301)、重庆市自然科学基金重点项目(CSTC, 2008BC3029)等的资助, 如果没有这些项目的资助, 作者将无法开展风力机翼型及叶片优化设计理论研究。同时也得感谢丹麦技术大学的 Wen Zhong Shen 教授、荷兰国家能源研究中心的 Peter Eecen 研究员和英国谢菲尔德大学的 Ning Qin 教授, 正是他们提供的科研平台及数据资源, 使得研究工作得以顺利进行。此外, 还要感谢在作者研究团队里工作过的王旭东博士、张石强博士、程江涛博士和陆群峰博士, 他们多年来在团队里辛勤工作取得的研究成果, 也对本书的完成作出了重要贡献。对庞晓平博士在本书编排出版过程中所做的大量工作也一并表示感谢。

尽管作者慎之又慎, 但由于水平有限, 书中难免存在不妥之处, 恳请读者批评指正。

陈 进

2013 年 10 月于重庆大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 风力机翼型设计理论研究	3
1.2.2 风力机叶片气动外形设计理论研究	3
1.2.3 复合材料风力机叶片结构设计理论研究	4
1.2.4 风力机叶片气动弹性理论研究	5
第 2 章 风力机翼型空气动力特性	8
2.1 概述	8
2.2 风力机翼型基本理论	8
2.2.1 翼型几何参数	8
2.2.2 雷诺数	9
2.2.3 马赫数	10
2.2.4 边界层	10
2.2.5 任意翼型位流求解法	14
2.3 翼型空气动力特性	16
2.3.1 翼面压力系数	16
2.3.2 升力系数	17
2.3.3 阻力系数	17
2.3.4 俯仰力矩系数	19
2.4 翼型的失速	20
2.5 翼型表面粗糙度	22
2.6 翼型几何参数对翼型气动特性的影响	22
2.6.1 翼型前缘半径的影响	22
2.6.2 最大相对厚度及其位置的影响	22
2.6.3 最大弯度及其位置的影响	23
2.7 雷诺数对翼型气动特性的影响	23
2.8 翼型气动性能预测方法	23
2.8.1 XFOIL 及 RFOIL 介绍	24

2.8.2 翼型气动性能计算分析	24
2.9 本章小结	27
第3章 风力机翼型型线集成理论	28
3.1 引言	28
3.2 翼型变换理论	28
3.2.1 保角变换	28
3.2.2 儒可夫斯基翼型变换	29
3.2.3 西奥道生法	31
3.3 通用翼型的集成表达理论	32
3.3.1 三角函数表征翼型形状函数	33
3.3.2 泰勒级数表征翼型形状函数	33
3.4 集成典型型线分析	35
3.4.1 I型型线	35
3.4.2 II型型线	36
3.4.3 III型型线	36
3.5 翼型集成型线通用性	37
3.5.1 一阶拟合	38
3.5.2 二阶拟合	39
3.5.3 三阶拟合	40
3.6 形状函数控制方程	41
3.6.1 翼型尖后缘特性	41
3.6.2 横坐标偏置特性	41
3.6.3 纵坐标偏置特性	42
3.6.4 设计空间	42
3.7 翼型参数化集成收敛性	43
3.7.1 几何收敛特性	44
3.7.2 气动收敛特性	50
3.8 本章小结	53
第4章 风力机翼型型线参数优化设计理论	54
4.1 引言	54
4.2 风力机翼型设计要求	54
4.2.1 结构和几何兼容性	55
4.2.2 最大升力系数对前缘粗糙度不敏感性	55
4.2.3 设计升力系数	56
4.2.4 最大升力系数及深失速特性	56

4.2.5 低噪声	56
4.3 风力机翼型单目标优化设计	57
4.3.1 优化设计目标函数	57
4.3.2 优化设计变量	57
4.3.3 优化设计约束条件	57
4.3.4 MATLAB 及其优化设计方法	58
4.3.5 优化设计结果	58
4.3.6 优化翼型的粗糙敏感度	60
4.3.7 优化翼型性能的比较分析	65
4.4 风力机翼型多目标优化设计	67
4.4.1 设计变量	67
4.4.2 目标函数	69
4.4.3 约束条件	71
4.4.4 多目标遗传算法思路	72
4.4.5 WT 高性能风力机翼型	73
4.4.6 WTH 高升阻比翼型	87
4.4.7 WTI 低敏感性翼型	89
4.5 中等厚度风力机专用翼型设计	91
4.5.1 中等厚度翼型几何特性	91
4.5.2 中等厚度翼型气动特性	92
4.5.3 中等厚度新翼型设计	95
4.5.4 雷诺数、紊流条件及三维旋转效应影响	98
4.6 基于噪声的风力机翼型设计	102
4.6.1 风力机气动噪声理论	102
4.6.2 噪声的度量	103
4.6.3 翼型噪声计算模型	105
4.6.4 噪声计算对比分析	114
4.6.5 翼型几何参数对翼型噪声的影响	116
4.6.6 高效噪比风力机翼型设计	118
4.7 基于二维风能利用系数的翼型设计	122
4.7.1 翼型族优化模型	124
4.7.2 计算工况及流程	127
4.7.3 CQU-DTU-B 翼型族	128
4.7.4 翼型尾缘对翼型性能的影响	137
4.8 基于曲率光滑连续性的风力机翼型改进设计	139

4.8.1	翼型函数表面曲率连续性	140
4.8.2	翼型型线光滑连续性	143
4.8.3	翼型改进与优化	146
4.8.4	优化结果	147
4.9	高性能风力机翼型族的设计	149
4.9.1	薄翼型族优化结果及对比分析	150
4.9.2	中等厚度及大厚度翼型设计新方法	161
4.9.3	较厚翼型优化模型的建立	162
4.9.4	优化结果及性能对比分析	163
4.10	本章小结	171
第5章	新型风力机翼型模型试制及风洞试验分析	173
5.1	引言	173
5.2	翼型模型设计与制作	173
5.3	试验装置、方法及数据处理	177
5.3.1	风洞	177
5.3.2	模型安装	177
5.3.3	测试仪器	178
5.3.4	试验内容及数据处理	182
5.4	试验结果	183
5.4.1	自由转捩工况	184
5.4.2	固定转捩工况	186
5.4.3	试验结果与理论计算对比分析	189
5.4.4	不同翼型风洞试验结果对比	195
5.5	本章小结	196
第6章	风力机空气动力学以及风轮叶尖修正理论	198
6.1	引言	198
6.2	风力机叶片空气动力学	198
6.2.1	动量理论	198
6.2.2	叶素理论	200
6.2.3	叶素动量理论	201
6.3	风轮叶尖损失修正模型	201
6.3.1	Glauert 修正模型	202
6.3.2	Wilson 和 Lissaman 修正模型	202
6.3.3	de Vries 修正模型	202
6.3.4	Shen 修正模型	202

6.4	基于 Shen 叶尖损失修正模型的风轮空气动力学模型	203
6.5	实验验证	204
6.6	本章小结	208
第 7 章	风力机叶片三维曲面形状集成表达	209
7.1	引言	209
7.2	三维叶片通用集成方法研究	209
7.2.1	三维平直叶片集成	210
7.2.2	三维变弦长叶片集成	211
7.2.3	三维变弦长/变扭角叶片集成	212
7.3	ART-2B 叶片集成	214
7.4	本章小结	217
第 8 章	风力机叶片的形状优化设计	219
8.1	引言	219
8.2	风轮关键参数对风力机性能影响分析	220
8.2.1	三种不同功率的风力机叶片	220
8.2.2	两种同一功率的风力机叶片	224
8.3	基于风力机总成本的优化模型	226
8.3.1	优化设计目标函数	226
8.3.2	优化设计变量及其约束	227
8.3.3	优化设计程序和方法	228
8.3.4	优化结果	228
8.3.5	优化前后风轮性能比较	232
8.4	2MW 新型风力机叶片优化设计	238
8.4.1	新型风力机叶片设计	238
8.4.2	叶片多目标模型的建立	239
8.4.3	优化结果	242
8.5	本章小结	246
第 9 章	复合材料风力机新型叶片结构优化设计	248
9.1	引言	248
9.2	复合材料力学基础	248
9.2.1	纤维增强复合材料的分类	248
9.2.2	复合材料的特性	249
9.2.3	复合材料的基本构造形式及分析方法	250
9.2.4	复合材料各向异性力学理论	252
9.2.5	单向板的强度准则	254

9.2.6 层合板的强度分析	258
9.2.7 复合材料结构设计原则	258
9.3 复合材料新型风力机叶片结构设计	260
9.3.1 新型叶片几何造型	260
9.3.2 叶片内部结构设计	264
9.4 基于参数化的复合材料风力机叶片有限元建模方法研究	272
9.4.1 三维叶片形状集成表达	272
9.4.2 风力机叶片参数集成	273
9.4.3 风力机叶片有限元参数建模	274
9.5 一种复合材料风力机叶片流固耦合新方法	281
9.5.1 风力机运行工况	281
9.5.2 局部攻角及压力分布	281
9.5.3 气动力插值	283
9.6 复合材料风力机新型叶片结构优化设计研究	289
9.6.1 优化数学模型的建立	289
9.6.2 粒子群算法与有限元方法结合的优化方法	291
9.6.3 优化结果	291
9.7 本章小结	297
第 10 章 风力机叶片气动弹性耦合分析	299
10.1 引言	299
10.2 风力机叶片结构动力学模型	299
10.3 坐标转换	301
10.4 风载荷模型	302
10.4.1 正常风	302
10.4.2 极端风	303
10.5 结果验证	303
10.6 算例分析	304
10.7 本章小结	306
第 11 章 风力机叶片二元翼段气动弹性稳定性分析	308
11.1 引言	308
11.2 叶片二元翼段静气动弹性稳定性分析	309
11.2.1 风力机翼型静气动弹性模型	309
11.2.2 典型翼型气动弹性反馈系统分析	311
11.3 经典的颤振问题	316
11.3.1 结构动力模型	316

11.3.2 空气动力模型	317
11.3.3 气动力结构耦合计算模型	319
11.3.4 风力机叶片二元翼段气动弹性分析	321
11.4 风力机叶片动力失速气动弹性问题	330
11.4.1 结构运动方程模型	330
11.4.2 气动力模型	331
11.4.3 气动弹性耦合系统	332
11.4.4 数值计算结果	335
11.5 本章小结	341
参考文献	343

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

风能作为一种清洁的可再生能源,取之不尽,用之不竭,越来越受到世界各国的重视。其蕴含量巨大,全球的风能储量约为 2.74×10^9 MW,其中可利用的风能为 2×10^7 MW,比地球上可开发利用的水能总量还要多 10 倍。中国风能资源丰富,仅陆地上的风能储量就达 2.53×10^5 MW^[1]。

随着风力机理论及方法的创新、新型材料的应用及生产制造等相关技术水平的发展,风力发电技术得到不断的提高,单机容量从最初的数十千瓦级提高到最近进入市场的兆瓦级。20 年来,风力机平均单机容量提高近 20 倍。2008 年之前,在大型风力机制造方面只有德国 REpower 在 2004 年制造出第一台 5MW 样机,Enercon 则在最近开发出第二代直驱式 6MW 风力机,将风轮直径从 4.5MW 的 112m 提高到 127m。而近几年来,其他企业也开始逐步跟进对大型风力机的研发与设计。丹麦 Vestas 正在研发 Micon 机型 4MW 海上风力机;西班牙 Gamesa 则开发 4.5~5MW 机型;德国 BARD 已开发完成 5MW 风力机系列,目前已有 3 台安装在陆上和近海区域,2009 年又宣称开始研制 6.5MW 机组;Siemens 已完成对其 3.6MW 直驱概念机组的测试;荷兰 Darwind 正在研发直驱 5MW 机组;美国 Clipper 计划与英国合作开发 7.5MW 与 10MW 机组;美国超导公司则与美国能源部达成协议,计划采用超导发电机,制造 10MW 规模的机组。由此可见,风力机的大型化是未来市场发展和应用的主流。与此同时,受国际风电发展大型化趋势的驱使,我国大型风电企业也开始进入风电装备大型化的竞争,2009 年我国在 2MW 级及以上风电机组研制方面取得新的成果。例如,由沈阳工业大学研制的 3MW 风电机组已经成功下线;金风科技研制的 2.5MW 和 3MW 风电机组已在风电场投入试运行^[2,3];2011 年华锐风电研制的 6MW 海上风电机组成功下线;国电联合动力研制的 6MW 海上风电机组也已下线。此外,金风、东汽、海装、湘电等都在研制或者已经研发出单机容量超过 5MW 的风电机组,这标志着我国风电机组大型化研制已经迈上了一个新的台阶。

近两年来,尽管经济持续低迷,全球风电也受到一定的影响,但新增装机容量总体还在增加。据全球风能理事会(GWEC)统计数据,2011 年全球新增风电装机容量达 40564MW,在经历 2010 年增长放缓后,全球累计装机容量实现了超过

20%的年增长^[2]。2011年我国全年新增风电装机容量为 17.63GW,与 2010 年的 18.93GW 相比,2011 年新增装机容量减少 6.9%。我国风电市场在经历多年的快速增长后正步入稳健发展期。截至 2011 年年底,我国累计安装风电机组 45894 台,累计装机容量为 62.36GW,继续保持全球第一风电市场的地位。2001 年以来,我国各年风电装机数据如图 1.1 所示。

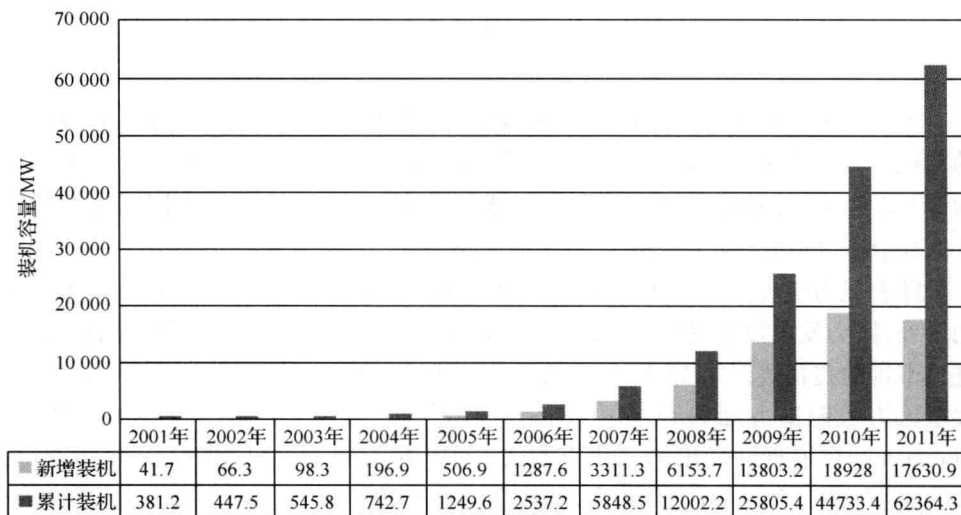


图 1.1 我国风电发展状况

2005~2010 年,国外很多有实力的企业来华寻求有发展潜力的合作伙伴。美国 GE 公司和丹麦 Vestas 公司等纷纷在国内设厂或与国内企业合作。这种引进吸收国外先进技术,根据国内风电环境不断改进技术,生产出自己的风电产品的模式,在国内许多企业已经初见成效。然而,国内风力发电核心技术大多源自欧美,以引进为主,并没有掌握其核心技术,这严重制约着我国风电装备的自主研发水平。而叶片是风力机中最为关键的部件之一,其价值达到整机价值的 20%左右。叶片良好的设计、可靠的质量和优越的性能是保证风力发电机组正常稳定运行的决定性因素。

1.2 国内外研究现状

风力机翼型及叶片气动外形的设计理论是决定风力机功率特性和气动载荷特性的根本因素;而复合材料叶片的结构设计理论研究是决定风力机叶片刚度特性的关键因素;叶片气动弹性多学科复杂耦合与协同方法则是揭示叶片气动性能与结构刚度特性的内在机制。目前,叶片形状及结构的研究都是基于特定的几何轮

廓曲面,分别研究其气动性能与结构特性,并进行相应的参数设计与优化。

1.2.1 风力机翼型设计理论研究

风力机翼型的发展在某种程度上来说是建立在低速翼型应用的基础上的,如滑翔机翼型、FX-77 翼型以及 NASA LS 翼型等。为了适应风力机运行工况的要求,20 世纪 80 年代中期国外开始研制风力机专用翼型,目前已经开发了多个系列的翼型,主要有美国的 NREL-S 系列翼型、丹麦的 Risø 系列翼型、荷兰的 DU 系列翼型和瑞典的 FFA-W 系列翼型。美国国家可再生能源实验室的 Tangler 和 Somers^[3] 基于 Eppler 理论及反设计方法^[4] 设计出了 35 种用于各种工况条件下的 NREL-S 系列翼型,该系列翼型具有良好的升阻比特性。荷兰 Delft 大学联合荷兰国家能源研究中心(Energy Research Centre of the Netherlands, ECN)和荷兰航空实验室(National Aerospace Laboratory of the Netherlands, NLR)基于混合设计方法设计出了相对厚度 15%~40% 的 DU 系列风力机专用翼型,该系列翼型考虑了翼型之间的几何兼容性和深失速特性,通过限制翼型上表面厚度以及在翼型尾部加载“S”形尾缘^[5,6],提高了翼型的升力系数,与传统的航空翼型相比,翼型具有更加优良的气动特性。丹麦 Risø 国家实验室基于直接设计法耦合 XFOIL 软件对风力机翼型进行研发,至今已设计出了适用于不同运行工况和不同控制方式的风力机翼型^[7,8]。Risø 系列翼型的设计方法不同于传统的反设计方法,而是基于 CFD 技术和数值优化方法,应用 B 样条曲线来控制翼型的轮廓,以最大升阻比为优化目标对翼型进行优化设计,该方法很好地解决了反设计方法过程中难以给定恰当的目标压力和速率分布的问题,并且使多学科交叉设计问题成为可能。此外, Sobieczky^[9] 和 Hájek^[10] 先后提出一种 PARSEC 翼型设计方法及改进的 PARSEC 法,通过控制翼型几何尺寸参数,这些方法主要对翼型外形表达方式进行了研究。另外, Bjork^[11]、Soemarwoto 等^[12]、Habali 等^[13]、Nielsen 等^[14]、Baker 等^[15] 和 Bermudez 等^[16] 也在风力机翼型设计方面做了很多有意义的工作。在国内,翼型设计研究方面的工作起步比较晚。中国空气动力研究与发展中心的贺德馨等^[17] 在翼型上表面的恢复区内应用修改后的 Stratford 理想压力分布,采用 Weber 已知压力分布求解翼型外形的理论设计出一套在低雷诺数时的新翼型,并对雷诺数为 $Re = 5.6 \times 10^5$ 的情况进行了实验研究。西北工业大学的乔志德等^[18] 针对兆瓦级大型风力机,研究发展了以具有更优良高雷诺数和高升力气动性能为特点的 NPU-WA 翼型系列,并进行了风洞试验对比研究,表明该翼型系列具有高的气动性能。此外,国内还有一些学者对此进行了很多有价值的研究,都值得参考与借鉴^[19~23]。

1.2.2 风力机叶片气动外形设计理论研究

对于风力机叶片气动形状优化设计方面的研究,目前国内外大多针对特定的

风力机翼型所构造的叶片外形参数进行局部改良和修型,以获得较高的性能。丹麦 Risø 国家实验室的 Fuglsang 等^[24]以风力机单位发电量的成本为目标函数,考虑叶片的年发电量、极端载荷以及疲劳强度,对某 1.5MW 风力机叶片进行了优化设计,优化结果表明单位发电量的成本降低了 3.5%。土耳其学者 Varola 等^[25]提出在叶片上安置转向风板以提高叶片的转动速度,从而提高风力机的输出功率。突尼斯学者 Badreddinne 等^[26]以风力机的输出功率为目标函数,进一步对叶片进行了优化设计。Rajakumar 等^[27]提出了一种迭代的方法用于优化翼型攻角、叶片扭角及弦长,从而提高风轮的功率系数。Liu 等^[28]证明了一种新的优化方法,用来优化叶片的弦长及扭角的斜率,该方法将叶片弦长及扭角线性化,不仅使风轮性能得到提高,而且也便于叶片的制造加工。2012 年 Maki 等^[29]综合考虑能量成本、年发电量等,运用多目标优化方法对风轮进行了系统优化与设计,并分析讨论了优化结果。在国内,汕头大学的刘雄等^[30]考虑了风力机叶片实际风场的概率分布,以年均能量输出最大化为目标函数,采用遗传算法结合已开发的优化设计软件,设计出了 1.3MW 风力机叶片。华北电力大学韩中合等^[31]提出了多次迭代优化设定诱导因子初始值的方法,以功率输出和年发电量最大作为优化目标,对 1.5MW 风力机叶片进行了优化设计。南京航空航天大学的王同光等^[32]采用改进的遗传算法对某 5MW 风力机进行了多目标优化,并给出了 Pareto 最优解集。

1.2.3 复合材料风力机叶片结构设计理论研究

风力机叶片结构设计及优化研究包括对叶片内部结构参数(蒙皮厚度、腹板厚度、宽度、位置等)进行设计与分析、叶片动力特性的分析、稳定性分析、叶片强度、刚度及疲劳分析等;在叶片结构特性分析基础上进行叶片及翼型形状的修型、改良以及叶片结构参数的优化设计等。丹麦 Roskilde 实验室的 Fuglsang 等^[33,34]采用 XFOIL 软件和数值分析方法分别对 Risø-A1、Risø-P 及 Risø-B1 系列翼型进行了优化设计。对于主要应用于失速型风力机的 Risø-A1 翼型,通过提高翼型厚度和弦长比,翼型的重量可以减轻 4%,从而减少叶片的疲劳载荷,进而将风力机的年发电量提高了 15%。Risø-P 翼型主要应用于变桨距风力机,其优化主要从叶片的前端边缘入手。他们还对各翼型的性能进行了实验,验证了理论优化计算的有效性。波兰 Jureczko 等^[35]从叶片的结构和材料出发,通过改变叶片的结构参数和材料属性研究了风力机叶片固有频率的变化趋势,从而对叶片的动力学性能进行了优化分析。Kong 等^[36]考虑某典型的 750kW 复合材料风力机叶片在各种载荷及疲劳寿命条件下的结构分析,并将计算数据与实验测量的数据对比,得到较好的性能结果。以色列学者 Shokrieh^[37]研究了某 23m 长风力机叶片的疲劳失效,模拟了失效的过程,并由此预测叶片铺层破坏的先后顺序。英国学者 Maheri 等^[38,39]针对叶片的壳体结构,研究了叶片沿弦向和展向的函数分布,通过结构载荷的分析,

实现了叶片的优化。Jensen 等^[40]针对某 34m 复合材料风力机叶片进行结构测试和数值模拟,得出导致最终失效的叶片的准确位置。Paluch 等^[41]结合有限元技术与遗传算法来优化复合材料结构,并应用于简化的风力机叶片模型上,减轻了其质量。Johansen 等^[42]研究了几何线性/非线性复合材料结构失效优化,对风力机叶片进行有限元分析与实验对比,验证了风力机叶片的非线性特性。Barroso 等^[43]研究了某 300kW 风力机叶片的失效机理,包括初始位置、分层情况以及最终失效情况等。Ping 等^[44]运用 CFD 方法分析水平轴风力机在冰负载等极端条件下的运行情况。丹麦奥尔堡大学的 Lund^[45]研究了复合材料壳结构的屈曲拓扑优化,并对简化的风力机叶片模型进行了拓扑结构优化,以最大屈曲载荷为目标,对叶片铺层进行优化。奥尔堡大学的 Overgaard 等^[46,47]研究了风力机叶片的结构失效情况,分别研究了单层铺层结构模型、多层结构模型的静力测试与模拟分析,并对失效结果进行评估。埃及学者 Maalawia 等^[48]将叶片沿展向分成几段,然后把每段距离当做优化参数来研究计算叶片各段的振动特性,从而更深入地理解整个叶片的振动特性。同时采用这种方法,计算比较了不同类型叶片在不同载荷条件下的模态和受迫响应,从动力学角度对叶片进行了优化设计。在国内,汕头大学的李德源等^[49]进行了考虑风力机叶片旋转情况下叶片的振动模态分析。上海玻璃钢研究院的陈余岳^[50]就大型风力机玻璃钢叶片设计中若干问题进行了讨论,包括气动设计、叶片剖面 and 根端设计、荷载工况、强度和疲劳分析、空腹叶片屈曲分析、叶片动态特性评价等。中国科学院的 Liao 等^[51]采用 FAST 软件与改进的粒子群算法对风力机叶片截面铺层进行了优化,并利用 FOCUS5 软件对优化结果进行评估,从而验证该方法的有效性;另外,国内外还有一些专家学者对此也做了许多有意义的工作,都值得学习与借鉴^[52~72]。

1.2.4 风力机叶片气动弹性理论研究

对于风力机叶片气动弹性方面的研究借鉴了飞机机翼气动弹性分析的理论和方法。1999 年,希腊学者 Chaviaropoulos^[73]研究了风力机叶片截面的挥舞/拍打耦合气动弹性稳定性问题,并应用特征值法分析了风力机叶片二元翼段的稳定性;2003 年,Chaviaropoulos 等^[74]研究了基于非线性的风力机叶片二元翼段的稳定性,分别就经典的颤振问题、动力失速颤振问题应用求解 N-S 方程对其进行了稳定性分析;2004 年,丹麦 Risø 国家实验室的 Hansen^[75]结合有限元法与叶素动量理论编制了风力机叶片气动弹性稳定性分析软件 HAWCSTAB,对某 600kW 风力机叶片进行了特征值分析,气动阻尼预测与实验结果吻合得很好。2006 年, Hansen 等^[76]对风力机气动力与气动弹性方面的研究进行了总结并提出未来风力机气动弹性研究的方向。此后, Hoogedoorn 等^[77]对风力机翼型在变风速工况下的气动弹性机理进行了分析,研究了翼型的弹性刚度对翼型厚度、弯度以及桨距角