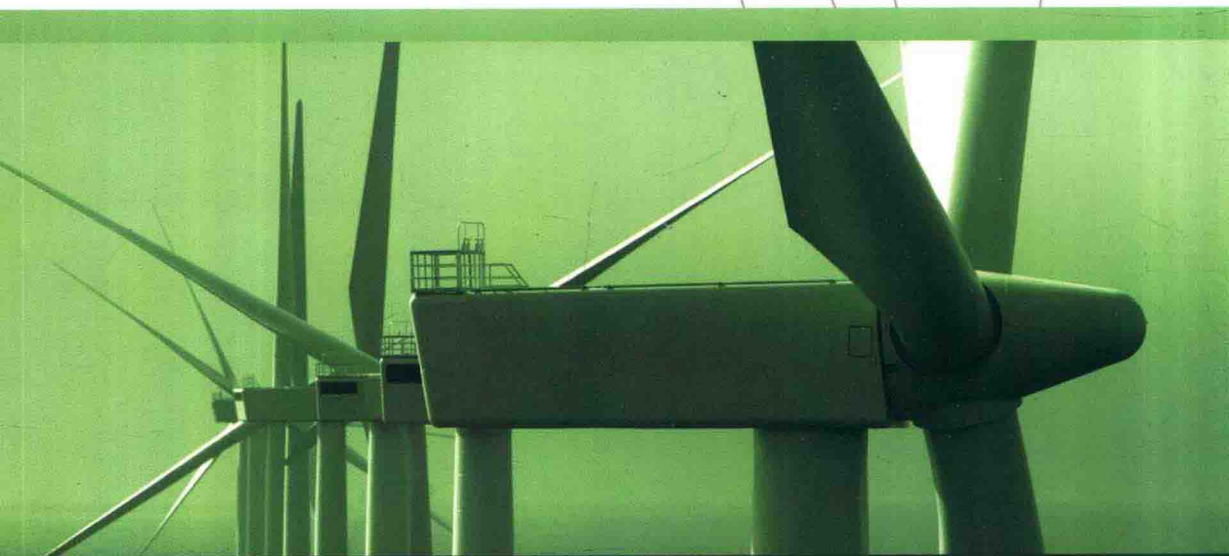

Wind Turbine Design and Simulation Examples



风力机设计与仿真实例

单丽君/著

 科学出版社

风力机设计与仿真实例

单丽君 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以实例分析的方法详细地介绍风力机专用翼型优化设计的方法和性能仿真过程。通过多种优化设计的方法确定最优风力机翼型, 仿真模拟风力机在风场中的气动特性和动力学特性。全书共 15 章, 内容包括风力机叶片设计基本理论及主要参数、风力机翼型的优化设计(采用多参数组合优化设计和正交试验两种优化设计方法)、基于遗传算法风力机叶片的优化设计、风力机叶片气动特性分析、材质对风力机叶片力学性能的影响、叶片多体动力学模型的建立、风力机叶片动力学仿真分析、风力机风轮模态分析、风力机刚柔耦合多体动力学模型的建立、风力机时域仿真分析和风力机主传动链动力学分析。

本书可以作为机械工程专业研究生的教学参考书, 也可以为从事风力机叶片设计的专业人员提供可借鉴的实践经验和方法。

图书在版编目(CIP)数据

风力机设计与仿真实例/单丽君著. —北京: 科学出版社, 2017.12
ISBN 978-7-03-054248-9

I. ①风… II. ①单… III. ①风力发电机-仿真设计 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 211467 号

责任编辑: 张 震 杨慎欣 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 14

字数: 282 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着近年来全球工业技术的不断发展,以煤炭、石油为主的世界能源结构导致了化石燃料能源日趋枯竭和环境问题,因此,寻求新型能源来替代常规能源已迫在眉睫。风能作为一种清洁可再生能源,储量丰富,据估计,地球上可利用的风能总量约 200 亿 kW,其中仅中国风能储量就超过 30 亿 kW。风能利用的主要方式是通过风力机将其转换为电能。叶片是风力机能量转换的主要部件,由叶片和轮毂组成的风轮是能量捕获机构,能将风能转变为机械能。叶片的性能决定风力机效率、载荷特性和噪声水平。而作为叶片剖面的翼型是构成叶片外形的基本要素,整机的运行效率和可靠性与翼型气动性能密切相关,因此,叶片翼型的研究对中国发展风电事业具有重要的意义。

全书共 15 章,第 1 章,绪论;第 2 章,风力机叶片设计基本理论及主要参数;第 3 章,风力机翼型几何参数取值范围的优化;第 4 章,风力机翼型多参数组合优化设计;第 5 章,风力机翼型正交试验优化设计;第 6 章,3MW 风力机叶片常规设计和三维建模;第 7 章,基于遗传算法风力机叶片的优化设计;第 8 章,风力机叶片气动特性分析;第 9 章,材质对风力机叶片力学性能的影响;第 10 章,叶片多体动力学模型的建立;第 11 章,风力机叶片动力学仿真分析;第 12 章,风力机风轮模态分析;第 13 章,风力机刚柔耦合多体动力学模型的建立;第 14 章,风力机时域仿真分析;第 15 章,风力机主传动链动力学分析。

虽然风洞实验是研究风力机气动性能的有效方法之一,风洞实验能综合考虑影响风流动的多种因素,结果比较可靠,但对于兆瓦级风力机的风洞实验受到实验条件与技术水平的限制,建立全尺寸的风洞实验室几乎是不可能的。只能采用相似理论及相对原理,对叶片模型按比例缩放近似分析。而且,受实验室配套设施的水平限制,实验人员对空气密度及实验室压力的精确控制还不够成熟,制约了实验过程中施加真实的边界条件,故风洞实验的研究方法不仅实施难度大,也存在一定的近似性和不确定性。

本书从实用的角度出发,以 3MW 风力机为例,采用仿真方法模拟风场的实际工况,分析风力机叶片和整机在风场中的气动特性和动力学特性。具体如下:采用多种优化设计方法设计风力机的翼型,分析翼型及叶片流场的分布,根据流场特性修改翼型和叶片参数,流场性能达到最优时,确定最优的翼型数据,根据优化后的翼型数据设计风力机叶片;采用仿真的方法模拟分析风力机叶片的动力学性能;分析复合叶片材料的铺层设计及载荷特性;分析风力机整机的动力学性能。

本书有以下特点。

(1) 以实例分析的方法详细地介绍风力机专用翼型优化设计的方法和性能仿真过程,为从事风力机叶片设计的本科生、硕士生和专业人员提供可借鉴的实践经验和方法。

(2) 产品的设计是一个循环往复的过程,本书翼型及叶片的设计正是遵循这样的规律,以优化设计的方法设计翼型,并采用仿真分析的方法检测新翼型的流场特性、动力学特性、载荷特性及整机的动力学特性,直至性能达到最优。

(3) 本书几乎包含了风力机设计的全过程,包括风力机叶片设计采用的基本理论、翼型参数的优化、叶片三维模型的创建、叶片气动性能和动力学特性的分析、叶片材质及力学性能分析、风轮模态分析、风力机整机刚柔耦合多体动力学模型的建立、整机的时域仿真分析、风力机主传动链动力学分析。

本书是作者多年来在风力机叶片及整机方面研究工作的总结。本书的完成要感谢作者指导的研究生刘远、李慧、刘晴、叶炯、张荣聪等,他们承担了实例分析的部分具体工作及本书部分资料的整理以及公式、图表的编辑工作。

本书在编写的过程中得到了大连交通大学何卫东教授、李宝良教授、阎长罡教授、雷蕾副教授、施晓春副教授的热情支持和帮助,在此表示衷心的感谢。本书能够出版得益于大连交通大学机械工程学院的大力支持和学院学科建设经费的资助,在此向大连交通大学机械工程学院领导表示衷心的感谢。

作者的水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者提出宝贵意见与建议。

作者

2017年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 风力机国内外发展现状	3
1.2.1 风力机翼型研究	3
1.2.2 风力机的空气动力特性研究	5
1.2.3 风电机组动力学研究	8
1.3 本书的主要内容	9
参考文献	10
第 2 章 风力机叶片设计基本理论及主要参数	14
2.1 动量理论	14
2.1.1 Betz 理论	14
2.1.2 旋转尾流动量理论	16
2.2 叶素理论	18
2.3 动量叶素理论	20
2.4 涡流理论	22
2.4.1 风轮的涡流系统	22
2.4.2 诱导速度的确定	22
2.4.3 轴向推力和转矩的表达式	23
2.4.4 风轮环形部位可得到的风能功率及理想风轮风能利用系数的最大值	24
2.4.5 最佳倾角和参数 $C_p Bc/r$ 的最佳值	26
2.4.6 存在阻力的非理想风轮环状区达到的风能利用系数、最佳攻角	26
2.5 风力机叶片的主要参数	26
2.5.1 翼型几何参数	27
2.5.2 翼型空气动力学系数	28
本章小结	31
参考文献	31

第3章 风力机翼型几何参数取值范围的优化	32
3.1 翼型设计软件的选择	32
3.2 翼型气动特性分析软件的选择	33
3.3 翼型几何参数对气动特性的影响及取值范围	34
3.3.1 翼型相对厚度的影响	35
3.3.2 翼型最大厚度的弦长位置的影响	38
3.3.3 翼型相对弯度的影响	41
3.3.4 翼型最大弯度的相对位置的影响	44
3.3.5 翼型的前缘半径的影响	47
本章小结	50
参考文献	50
第4章 风力机翼型多参数组合优化设计	51
4.1 多参数组合优化设计的基本思路	51
4.1.1 最优参数组合的准则	51
4.1.2 最优参数组合设计	53
4.2 多参数组合优化设计结果	58
本章小结	61
参考文献	61
第5章 风力机翼型正交试验优化设计	62
5.1 正交试验优化设计的基本思路	62
5.2 翼型正交试验设计	62
5.2.1 试验指标的构成	63
5.2.2 确定试验的因素和水平	63
5.2.3 正交表的选择	64
5.2.4 正交试验的极差分析方法	64
5.2.5 正交试验设计及数据分析	65
5.3 风力机翼型的设计结果	68
本章小结	78
参考文献	79
第6章 3MW 风力机叶片常规设计和三维建模	80
6.1 叶片的气动外形设计	80
6.1.1 设计风速 v	80

6.1.2	风轮直径 D	81
6.1.3	叶尖速比 λ_0	81
6.1.4	叶片数 B	82
6.1.5	翼型分布	82
6.1.6	弦长和扭角的计算	84
6.1.7	弦长和扭角的修正	87
6.1.8	确定气动中心	88
6.2	叶片的三维建模	89
6.2.1	求解叶片各截面空间实际坐标	89
6.2.2	建立实体模型	90
	本章小结	91
	参考文献	91
第 7 章	基于遗传算法风力机叶片的优化设计	92
7.1	遗传算法概述	92
7.1.1	应用遗传算法设计风力机叶片的优势	92
7.1.2	多目标遗传算法基本定义	93
7.2	以年发电量最高为目标的叶片遗传算法优化设计	94
7.2.1	适应度函数	94
7.2.2	边界条件	95
7.2.3	优化设计程序及计算结果	95
7.3	以风能利用率最高为目标的叶片遗传算法优化设计	100
7.3.1	适应度函数	101
7.3.2	边界条件	101
7.3.3	优化设计程序及计算结果	101
7.4	多目标遗传算法优化	104
7.4.1	多目标遗传算法	104
7.4.2	优化结果	105
	本章小结	106
	参考文献	107
第 8 章	风力机叶片气动特性分析	108
8.1	风力机叶片的三维建模	108
8.2	风力机叶片气动特性仿真分析	109
8.2.1	某 3MW 风力机参数介绍	109

8.2.2	叶片流场计算域规划	109
8.2.3	网格划分	110
8.2.4	边界条件选取	111
8.2.5	翼型优化前五种工况叶片表面气动流场分析	111
8.2.6	叶片截面气动流场分析	112
8.2.7	叶片压力云图	116
8.2.8	叶片截面翼型压力云图	116
8.3	风力机叶片气动力学特性分析	117
8.3.1	风力机整机模型建立	117
8.3.2	气动力学特性分析	118
8.4	优化 DJU-WA 翼型叶片气动特性分析	121
8.4.1	DJU-WA 翼型叶片表面气动流场分析	122
8.4.2	DJU-WA 翼型叶片截面气动流场分析	122
8.4.3	DJU-WA 翼型风力机输出功率	125
	本章小结	126
	参考文献	127
第 9 章	材质对风力机叶片力学性能的影响	128
9.1	风力机叶片结构及材料	128
9.1.1	叶片结构	128
9.1.2	叶片材料	129
9.2	铺层对叶片力学性能的影响	130
9.2.1	叶片几何模型建立	130
9.2.2	叶片铺层设计	131
9.2.3	叶片有限元模型建立	135
9.2.4	风力机叶片有限元分析	136
9.3	复合材料对叶片力学性能的影响	139
	本章小结	142
	参考文献	142
第 10 章	叶片多体动力学模型的建立	143
10.1	多体系统动力学建模研究	143
10.2	建立风力机叶片动力学模型	145
10.2.1	建立风力机叶片模型	145
10.2.2	风力机叶片的简化与假设	145

10.2.3	建立风力机叶片数学模型	146
10.2.4	建立 y 轴方向振动数学模型	146
10.2.5	建立 z 轴方向振动数学模型	148
10.2.6	建立 x 轴方向振动数学模型	151
10.2.7	建立绕 x 轴扭转振动数学模型	152
10.3	确定单元的弹簧系数	154
10.4	计算固有频率及振型	156
	本章小结	157
	参考文献	157
第 11 章	风力机叶片动力学仿真分析	158
11.1	振动对风力机叶片的影响	158
11.2	叶片的载荷类型	159
11.2.1	空气动力载荷	159
11.2.2	重力载荷	160
11.2.3	惯性力载荷	160
11.3	ADAMS 与 Pro/E 联合仿真	161
11.3.1	ADAMS 软件简介	161
11.3.2	ADAMS/Vibration 振动模块	161
11.3.3	ADAMS 和 Pro/E 联合仿真简介	162
11.4	风力机叶片几何模型建立	162
11.4.1	Pro/E 软件介绍	162
11.4.2	风力机叶片实体建模	162
11.5	叶片振动仿真计算	163
11.5.1	模型导入 ADAMS	163
11.5.2	ADAMS 工作环境设置	164
11.5.3	添加约束	165
11.5.4	添加载荷	166
11.5.5	振动仿真	166
11.5.6	易变形位置研究	167
	本章小结	169
	参考文献	169
第 12 章	风力机风轮模态分析	170
12.1	风轮模型建立	170

12.2	风轮模态分析	171
12.3	GH Bladed 建模研究	173
12.3.1	风力机叶片建模	173
12.3.2	建立风轮模型	174
12.3.3	风场加载	174
12.3.4	模态分析	175
12.3.5	ADAMS 与 GH Bladed 仿真结果对比	178
	本章小结	178
	参考文献	178
第 13 章	风力机刚柔耦合多体动力学模型的建立	179
13.1	SIMPACK 中建立风力机分段柔性体叶片动力学模型	179
13.1.1	气动节点的选择	180
13.1.2	翼型失速特性的计算	181
13.1.3	叶片的建模和模态分析	181
13.2	风力机刚柔耦合模型的建立	183
13.2.1	增速器等刚性部件的建模	183
13.2.2	整机动力学模型的建立	183
	本章小结	186
	参考文献	186
第 14 章	风力机时域仿真分析	187
14.1	风力机载荷情况	187
14.2	风电场风速统计模型	187
14.2.1	威布尔分布	187
14.2.2	瑞利分布	188
14.3	风力机切入、额定及切出风场的计算及模拟	188
14.3.1	三种工况的选择	188
14.3.2	风场的模拟	188
14.3.3	载荷的加载	189
14.4	GH Bladed 风力机建模和风力机模型的验证	190
14.4.1	GH Bladed 中建模	191
14.4.2	验证模型的正确性	192
14.5	载荷对风力机动力学特性的影响	193
	本章小结	197
	参考文献	198

第 15 章 风力机主传动链动力学分析	199
15.1 三种工况下的激励频率	199
15.2 整机的模态分析	200
15.3 风力机传动链的共振分析	200
15.3.1 低频段分析	201
15.3.2 中频段分析	203
15.3.3 高频段分析	205
15.4 潜在危险共振部件角加速度的 FFT	208
本章小结	212
参考文献	212

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着全球经济高效快速发展,能源和环境问题是伴随经济发展而衍生出来的亟须解决的两大难题。地球上可供人类使用的石油、天然气、煤炭等化石燃料资源极其有限且不可再生,其排放物造成了环境的污染和温室效应。于是开发风能、核能、太阳能和地热能等各种新型能源成为当今世界各国关注的热点问题。风能比核能、太阳能和地热能这三种清洁能源更安全,并且储量丰富。全球的风能储量约为 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$,其中可利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{ MW}$,比地球上可开发利用的总水能多出 10 倍以上。我国风能资源丰富,仅陆地上的风能储量就达 $2.53 \times 10^5 \text{ MW}^{[1]}$ 。

1888年,美国人布拉什建造了一台 12kW 自动运行的风力机,直径 17m 的风轮用了 114 片雪松木叶片。1941年,帕麦尔和史密斯公司联合设计出了一台 1.25MW 风力机,由不锈钢两叶片构成的风轮直径 53.3 m。1973年石油危机后,欧美等发达国家为寻求替代化石燃料的能源,开始推动现代风力机批量化,促进了世界风电产业发展,到 2012年,全球风电总装机容量约 2.7 亿 kW。中国在 20 世纪 80 年代开始风电项目的探索和示范工作。

2011年,中华人民共和国国家发展和改革委员会发布《中国风电发展路线图 2050》,预期到 2020年、2030年和 2050年,中国风电装机容量分别达到 2 亿 kW、4 亿 kW 和 10 亿 kW,到 2050年能满足国内 17%的电力需求。

2011年,欧洲风能协会发布未来 40 年风能发展阶段目标,预期到 2020年欧盟国家风电总装机容量达到 2.3 亿 kW,2030年达到 4 亿 kW。欧盟委员会发布的《2050 能源路线图》显示到 2050年,欧盟可再生能源占能源需求的比例将达 55% 以上。这些都表明风电叶片制造业有着巨大的发展空间。

宏观经济以及国内外风电叶片制造业爆发式发展一定程度影响了风电产业的发展,但是仍然阻碍不了新增装机容量的增加趋势。全球风能理事会发布 2016 年全球风电发展统计数据:2016年,全球市场新增容量超过 54.6GW,全球累计容量达到 486.7GW。2016年的风电市场由中国、美国、德国和印度引领,法国、土耳其和荷兰等国的表现超过预期,尽管在年新增装机上,2016年未能超过创纪录的 2015年,但仍然达到了令人相当满意的水平。

2016年,中国继续大幅领先风电新增装机和累计装机量,新增装机容量已达到2337万kW,累计装机容量达到1.69亿kW,名列全球第一。中国累计装机量约是第二名美国的两倍,新增装机量约是美国的四倍。全球累计装机容量如图1.1所示,中国的装机容量如图1.2所示^[2]。

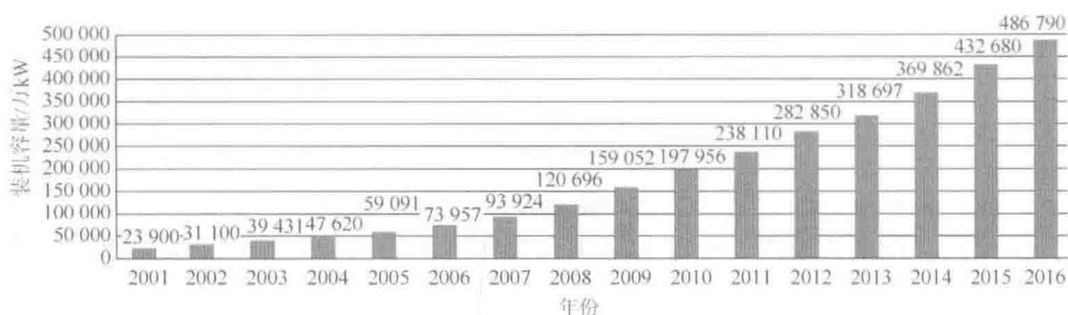


图 1.1 全球风力机装机数据

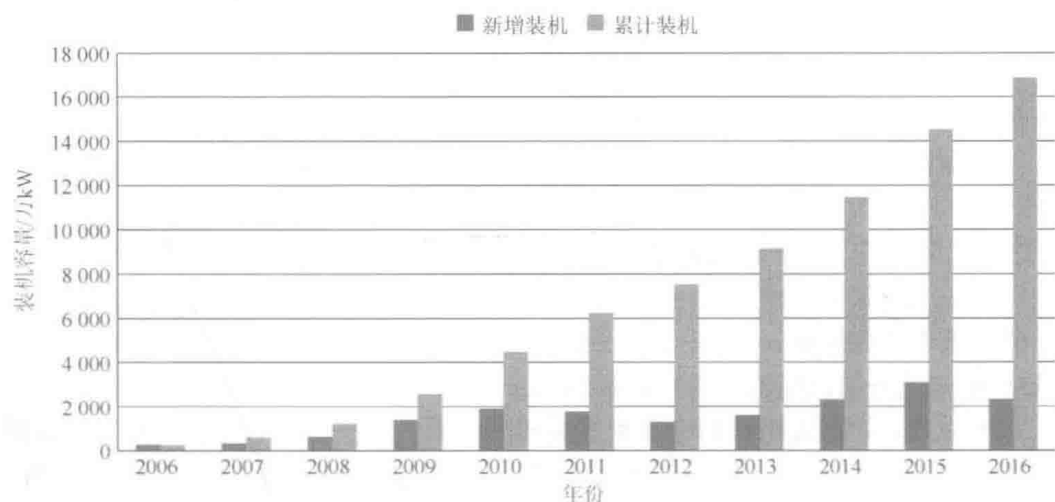


图 1.2 中国风力机装机数据

随着风力机技术的发展,风力机单机容量迅速增加,尤其是对于兆瓦级风电机组,由于机组整体尺寸增加,风轮直径的加大,风轮及其他部件具有更大的质量及转动惯量,进而导致风轮及整机传动链振动增大^[3]。共振现象是兆瓦级风力机发生故障的主要原因,强烈的共振可以造成风电机组的损坏,严重时可直接导致风力机的损坏以至于脱网。

近年来风电事故频发,中国平均每年出现70多起风电机组脱网事故,2010年1月至8月,风电机组脱网事故尤为严重,高达193起。中国风电事业的发展还需更进一步的提升与完善^[4]。因此,在追求更大的风电机组装机容量的同时,也需要对风力机运行时的动力学特性进行研究,找到兆瓦级风力机发生故障乃至

脱网的原因。共振现象是风电机组脱网事故频发的主要原因,有必要对风力机主传动链进行动力学仿真分析,研究风力机在不同运行工况条件下的动态特性,从源头上找到风力机发生故障的原因,并找到解决问题的办法,提高风力机运行的平稳性,使风能成为一种稳定可行的绿色能源。

风能利用的主要方式是通过风力机将其转换为电能。现代主流大型水平轴式风力机一般由叶片、轮毂、机舱、发电机和塔架等部件组成。叶片是风力机能量转换的主要部件,由叶片和轮毂组成的风轮是能量捕获机构,用来将风能转变为机械能。叶片的性能决定风力机效率、载荷特性和噪声水平。同时,叶片又是风力机力源、主要承载部件,对整个风力机的安全运行起着关键作用。

根据英国凯斯内斯风电场信息论坛(Caithness Windfarm Information Forum, CWIF)的统计,2000年,叶片断裂导致的事故有4起,2011年有19起,2012年有28起^[5]。由于叶片沉重且处于高空不便维护和更换,所以现代大型风力机的快速发展对叶片设计理论、材料与制造工艺以及叶片动态监控等领域提出了更为严峻的挑战^[6]。

1.2 风力机国内外发展现状

1.2.1 风力机翼型研究

风力机叶片气动外形决定了风能的捕获效率,通常叶片气动外形是通过航空翼型或专业翼型来设计的。

在国外,早期风力机叶片设计选的是发展比较成熟、升阻特性较好的航空翼型,但实践表明这些翼型并不能很好地满足设计和使用要求。国外研究者从1980年开始研发新翼型,经历了复杂而漫长的系统工程,发明了多个系列的风力机专用翼型,如美国的NREL-S系列翼型、荷兰代尔夫特理工大学的DU系列翼型、丹麦的RISØ系列翼型和瑞典的FFA-W系列翼型。专用翼型不仅提高了风能利用效率,而且减轻了结构重量,降低了疲劳载荷,成为研制大型、高效、低成本风力机的重要技术。

美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)的萨默斯研究员根据失速型、变桨距和变速不同形式风力机叶片的要求,基于Eppler的理论和反设计方法^[7]设计出了35种用于不同工况条件下、具有良好升阻比特性的NREL-S系列翼型^[8,9]。20世纪90年代,该实验室又设计出了9种满足气动要求和结构特性的NREL-S系列翼型。该系列翼型不仅具有良好的气动特性,而且也满足了翼型设计的强度要求。这类新设计出来的翼型提高了风能的输出功

率,增加了风力机的能量输出,使年发电量增加了10%~35%,为风力机翼型的发展打下坚实的基础。荷兰代尔夫特理工大学、荷兰国家航空航天实验室和荷兰国家能源中心基于混合设计理论方法设计出了综合考虑翼型的几何兼容性和深度失速特性的DU系列的风力机翼型。此翼型的设计有其独特的创新点,它的上表面厚度及尾缘均在设计调整范围内,提高了翼型的升力系数及升阻比,具有更优良的气动特性。叶片展向的中部翼型重点考虑了结构特性和气动特性^[10]。丹麦RISØ国家实验室采用直接设计方法结合翼型的设计和分析软件XFOIL,对风力机RISØ-A1、RISØ-B1和RISØ-P三种翼型进行了优化设计^[11-13],RISØ翼型族的设计方法与以往的反设计方法有所不同,它是基于数值优化的方法和CFD软件,采用了B样条曲线来控制翼型的几何轮廓,以最大升阻比和最小的阻力系数作为优化的最终目标,从而设计出气动特性优良的翼型。瑞典航空研究院采用翼型设计分析软件XFOIL开发了FFA-W1、FFA-W2、FFA-W3等系列翼型族^[14],这三个系列的翼型的前缘粗糙敏感度较低,比普通翼型更能满足低风速风力机的需求,因此这类翼型现在大范围应用于各种功率的风力机叶片上。

中国在风力机专用翼型方面的研究起步比较晚,20世纪80年代末期,风力机翼型的研究工作仍停留在普通航空翼型阶段,风力机桨叶主要采用NACA44××系列和NACA64-4××系列等航空翼型在低雷诺数、大攻角下的气动性能进行风洞实验研究^[15]。而当时,国外已有成熟的专用翼型,但对专用翼型的数据严格保密,许多风力机叶片研发单位采取测绘进口叶片的办法得到专用翼型的数据,但仅能获得几何数据,得不到相应的气动数据。为开发出具有自主知识产权的大型风力机叶片的先进翼型族和叶片设计技术,建立翼型和叶片的自主开发体系,中国越来越重视对风力机翼型的研究,同时也投入了大量的资金在风力机翼型的研究上。汕头大学是较早开始研究风力机专用翼型设计的单位,汕头大学的能源研究所对瑞典的FFA-W系列风力机专用新翼型进行了风洞实验和数值计算,得到了不同翼型不同雷诺数下的气动特性以及较大攻角下的失速特性,获得了大量的新翼型的气动特性数据,同时建立了较为完备的数据库^[16]。

由中国空气动力研究与发展中心(China Aerodynamics Research and Development Center, CARDC)牵头,联合西北工业大学、中材科技风电叶片股份有限公司、中国科学院工程热物理研究所的科研力量,开展风力机专用翼型族设计技术的研究,希望为我国风电设备技术进步及相关产业发展提供有力的技术支撑。

中国科学院工程热物理研究所在国家863计划项目的支持下,搜集数据建立了翼型数据库,总结了风力机的设计方法,在此基础上用正设计方法设计开发了适用于兆瓦级风电机组的风力机专用翼型族CAS-W1-×××,与国外同等厚度的翼型相比,具有良好的前缘粗糙不敏感性,较高的升力系数和良好的失速特性^[17,18]。中国空气动力研究与发展中心对30种常用的风力机翼型进行了大量的风洞实验,

获得了翼型在 $-10^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 攻角范围内的气动数据。西北工业大学翼型、叶栅空气动力学国家级科技重点实验室针对变桨或变转速型风力机,在提高风能捕获能力的同时,为减小叶片重量和载荷,开发了具有优良高雷诺数和高升力气动性能的NPU-WA翼型族^[19]。重庆大学机械传动国家重点实验室提出一种新的翼型参数化表征形式——“形函数”以及通用三维叶片曲面集成表达方法——“形函数/分布函数”,结合泛函分析思想设计得到一系列性能优良的风力机专用翼型和叶片,形成了风力机专用翼型廓线及高性能风力机叶片自主设计新的理论和方法^[20,21]。此外,北京航空航天大学^[22,23]、南京航空航天大学^[24-26]和哈尔滨工业大学^[27]等多家单位都有类似的工作在开展。

1.2.2 风力机的空气动力特性研究

1. 流场分布分析

风力机的空气动力特性的研究方法主要有理论分析和试验测试两种。目前理论分析又分成两个方面:基于动量叶素理论的计算模型和基于计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)计算方法的理论^[28,29]。目前动量叶素理论是对叶片截面二维翼型优化最常用的方法,其基本指导思想是在沿叶片展向方向上,将其分成无数个微小单元,通常称这些微小单元为叶素。假定叶素与叶素之间气流相互独立互不干涉,即可把这些足够小的叶素简化成叶片二维翼型。通过分析作用在各叶素上的载荷并沿叶片展向方向进行积分求和,从而可以求得作用在整个风轮上叶片的气动载荷^[30]。汕头大学能源研究所的刘雄等利用动量叶素理论思想建立了风力机计算模型,考虑了包括叶尖损失、轮毂损失的因素,研究风力机的失效形式,同时研究了风剪切、风机偏航、风轮的结构数据及风力机安装参数对计算模型的影响^[31]。南京航空航天大学的伍艳和王同光进一步考虑到风轮三维旋转效应,考虑了动量叶素理论、非定常空气动力学及动态失速模型来计算风力机的二维非定常气动特性^[32]。美国的Jameson等则采用B-L零方程湍流流动进行了模拟,并与试验数据进行了比较,验证此方法可以预测风力机截面翼型前缘的失速程度的大小^[33]。其应用动量叶素理论对风力机叶片进行气动性能研究,做了一些假设及简化分析,但终究耗力费时精度不高。随着计算机性能的提高,使应用CFD方法对叶片进行虚拟仿真、较精确快速地研究其气动特性成为可能。

CFD技术是计算机技术和数值计算技术交叉融合而形成的一种模拟仿真方法,用于模拟仿真实际流体的流动情况。18世纪初,英国的Thom第一个尝试用手摇计算机,数值求解了二维黏性流体偏微分方程,CFD应运而生^[34]。其基本思想是利用数值求解控制流体流动的微分方程,得出流体流动的流场在连续区域上