

大型风力机气动设计 及流动控制研究

**Aerodynamic Design
of Larger Horizontal Axis Wind Turbine
and Research on Technology of Flow Control**

赵万里 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



013067002

TM315

29

大型风力机气动设计 及流动控制研究

赵万里 著



TM315
29



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

由于国内外风场的差异,国内风力机叶片公司引入的国外整机技术,在实际运行中出现“水土不服”的现象。本书对我国自主知识产权的现代大型风力机气动设计及性能进行了评估,深入阐述了叶片设计中的空气动力学原理,并对采取相应的流动控制技术来提高风力机在特定条件下的气动性能作了探讨。全书共分7章,主要内容包括风力机叶片设计发展概况,气动设计及性能评估的计算模型,大型风力机叶片翼型的选择及性能分析,提高风力机性能的流动控制数值模拟及风洞实验等。

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,也可作为相关科研院所、风电行业等研究人员的技术参考与培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

大型风力机气动设计及流动控制研究 / 赵万里著
— 北京:中国水利水电出版社,2013.8
ISBN 978-7-5170-1160-6

I. ①大… II. ①赵… III. ①风力发电机—空气动力学—设计—研究②风力发电机—空气流动—控制系统—研究 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第187207号

书 名	大型风力机气动设计及流动控制研究
作 者	赵万里 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×230mm 16开本 9.5印张 176千字
版 次	2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	25.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

大型风力机气动设计问题涉及空气动力学、机械工程、材料科学、传感器技术等多个学科。本研究还不完善、不全面，但由于本研究发现流动控制具有较大的潜力和发展前景，拟通过本书的出版公之于众，以引起注意，使更多的学者了解、研究和应用。

本书是在河南省科技攻关重点项目的支持下完成的，在此表示感谢。

本书的试验工作在北京航空航天大学进行的，刘杰硕士、朱健勇硕士、王亚平博士均参与了试验和应用研究，在此对他们的辛勤工作表示感谢。

本书的编写得到作者所在单位华北水利水电大学电力学院高传昌教授和王玲花教授的鼓励，并对研究给予了大力支持和指导，在此表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，书中错误在所难免。本书的目的在于抛砖引玉，对于相关的研究，期待有更加成熟的见解，对于书中的错误，敬请读者批评指正。

作者

2013年4月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 本课题研究背景	1
1.2 国内外研究概况	3
1.3 尚存在的主要问题	10
1.4 本书的主要内容	11
第2章 大型风力机叶片的气动设计和性能计算模型	13
2.1 引言	13
2.2 基本概念	13
2.3 叶片工程的设计方法	14
2.4 风轮理想风况下的叶片气动性能评估	21
2.5 风轮真实风况下的气动性能修正	25
2.6 小结	31
第3章 大型风力机叶片翼型的选择及性能分析	32
3.1 大型风力机对翼型气动性能的特殊要求	32
3.2 大型风力机翼型的空气动力特性分析	33
3.3 影响大型风力机翼型动力性能的主要因素	33
3.4 大型风力机的常用翼型	35
3.5 大型风力机翼型的选取	40
3.6 大型风力机专用翼型的气动性能	41
3.7 本章小结	45
第4章 某1WM叶片气动外形的优化设计及性能评估	46
4.1 风力机叶片外形设计	46

4.2	风力机稳态气动性能计算	64
4.3	稳态运转载荷计算	83
4.4	本章小结	86
第5章	风力机流动控制数值的计算方法	87
5.1	流体力学基本方程	87
5.2	湍流数值模拟方法	88
5.3	质量加权平均方程	89
5.4	湍流模型	90
5.5	初边值条件	95
5.6	网格生成	96
5.7	控制方程的离散方法	97
5.8	代数方程组的解法	103
第6章	Gurney 襟翼提高风力机性能的流动控制数值研究	105
6.1	引言	105
6.2	物理模型及数值方法	105
6.3	计算结果分析	107
6.4	Gurney 襟翼控制流动的机理探讨	128
6.5	本章小结	128
第7章	Gurney 襟翼提高风力机性能的流动控制实验研究	129
7.1	引言	129
7.2	实验模型及设备	129
7.3	实验结果分析	132
7.4	本章小结	134
结论	135
参考文献	137
后记	144

第1章 绪 论

1.1 本课题研究背景

能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题。常规能源以煤炭、石油、天然气为主，它不仅资源有限，而且造成了严重的大气污染。因此，对可再生能源的开发和利用，特别是风能的开发利用，已经受到世界各国的高度重视。近20年，发达国家在风力机发电技术领域上已取得巨大的成就。并网运行的风力机单机容量从最初的数十千瓦已发展到兆瓦级；控制方式从单一的定桨失速控制向全桨叶变距和恒频变速发展。运行可靠性从20世纪80年代50%，提高到98%以上，并在风电场运行的风力发电机组可以全部实现集中控制和远程控制。目前随着陆上风电的逐步开发，大尺寸、高功率的风力机已经从陆地移到风能资源丰富的海上，具有更加广阔的发展空间。

目前全球的风能约为 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大10倍。根据不完整的资源估算，近海（水深10m），离海面10m高的地区，风能储量约为陆地的3倍多，即7.5亿kW。随着全球经济的发展，风能市场也迅速发展起来。自2004年以来，全球风力发电能力翻了一番，2006年至2007年间，全球风能发电装机容量扩大27%。2007年已有9万MW，2010年是16万MW。预计未来20~25年内，世界风能市场每年将递增25%。随着技术进步和环保事业的发展，风能发电在商业上将完全可以与燃煤发电竞争。

我国风能储量很大、分布面广，20世纪90年代中国气象科学研究所的科学家根据全国900多座气象台站实测资料做出的多年平均风能密度分布图，首次完整细致地估算出各省及全国离地面高度10m上的风能资源量，我国陆地上的风能资源总量为3.23亿kW，仅陆地上的风能储量就有约2.53亿kW。

“十五”期间，中国风电并网技术得到了迅速的发展。2006年，中国风电累计装机容量已经达到260万kW，成为继欧洲、美国和印度之后发展风力发电的主要市场之一。2007年我国风电产业规模延续暴发式增长态势，截至2007年底全国累计装机约605万kW，占中国发电总装机容量的1%，位居世界第五^[1]，这也意味着中国已进入可再生能源大国行列。



2008 年以来, 由于中国政府对可再生能源的重视程度加深, 国内风电建设的热潮达到了白热化的程度。截至 2008 年 12 月 31 日, 除台湾省外, 新增风电机组 5130 多台, 装机容量 624.6 万 kW。与 2007 年当年新增装机 330.4 万 kW 相比, 2008 年当年新增装机增长率为 89%。2008 年中国除台湾省外累计风电机组 11600 台, 装机容量 1215.3 万 kW。分布在 24 个省(自治区、直辖市), 比 2007 年的累计装机容量增长率为 106%。2010 年累计装机容量已经超过 2000 万 kW。刚刚结束的十七届五中全会, 明确指出在“十二五发展规划”, 要把新能源(风电、核电和太阳能发电)所占发电比例提高到总发电比例的 30% 以上, 传统能源(煤炭、石油、天然气等)所占发电降低至 70% 以下。中国风力等新能源发电行业的发展前景十分广阔, 预计未来很长一段时间都将保持高速发展^[1-5]。

由文献[6-8]可知: 风力发电涉及的问题很多, 如风能资源评估, 风能利用系统, 风电并网等问题。风资源评估工作是风电场建设重要的前期工作, 对风场资源正确的评估是风力机正常运行的保证。风能利用系统(风轮)是风力发电的基础, 它实现了风能向电能的转换, 关系到风能利用的效率以及整个风电投资。由于水平轴风力机的设计和运转较垂直轴风力机发展得更为成熟, 目前已建成的大型风电机组基本上均为三叶片的水平轴风力机组。

现代风力机多为高速, 这类风力机的风轮叶片一般为 2~4 片, 以 3 叶片居多, 直径可达百米以上, 其风轮重量相对较轻, 结构简单, 效率较高, 适用于大规模风电场, 但其启动力矩较小, 而且由于风轮直径较大, 风轮效率和叶片的结构强度对叶片上气动载荷的分布比较敏感。因此现代风力机在概念和设计方法上, 与传统的风力机有很大的区别, 需要考虑的因素较多。风力机气动设计的任务就是提供更有效的风轮气动计算方法以配置较为合理的叶片参数(如翼型的选择、弦长和扭角的分布), 从而达到提高风能利用系数、减小轴向推力以及提高启动力矩的目的。

目前水平轴风力机可分为定桨距失速调节型风力发电机和变速(定速)变桨距风力机。定桨距失速调节型风力发电机的桨叶和轮毂连接是固定的, 当风速变化时, 桨叶安装角不能改变。当来流风速增大时, 叶片利用翼型的失速特性, 发生失速后, 部分翼型的升力减小, 阻力增加, 从而限制了功率的增加。这种风力机充分利用了翼型的自动失速性能来控制功率的额定输出。由于其构造简单, 目前一些风力机常采用该设计方案。从气动性能来考虑, 通过调节桨叶的桨距角可以有效地改变风力机的气动转矩, 所以从优化叶片气动性能的角度来看, 发展变桨距叶片风力机是一种必然的选择。这种技术利用现代控制手段, 随着来流风速的变化, 不断对风力机的桨距角进行调整, 达到风力机风能



利用系数的最优值。变桨技术可以通过改变桨距角获得更小的启动风速和更好的大风制动性能,使额定点具有更高的风能利用系数,确保高风速段达到额定功率而不过载;具有功率输出平稳等优点。因此,目前大型兆瓦级风力机多采用变速变桨技术普遍采用这一技术。

在水平轴风力机的研制和开发过程中,仍然有许多基本理论问题没有很好的解决,就气动方面而言,关键问题就有两个:一是风轮叶片的气动设计;二是风力机的控制策略、气动弹性与气动外形设计的耦合。风轮叶片的气动设计是风力机设计的基础,关系到其效率和机械寿命,同时气动参数又作为控制系统必须输入的原始数据。叶片的设计和运行时遇到的各种气动问题都对风力机的功率输出和风能利用率有很大影响。因此对风力机叶片的气动研究是风力机发展中的重要课题。由于风力机运行环境的多变复杂性,使得叶片的气动问题异常复杂,存在很多还未解决的问题。因此,深入展开风力机叶片的设计和性能研究是叶片气动设计工作者一个长期的命题。

风力机在野外运行时,风是瞬时变化的,风力机叶片在随机阵风 and 突发的不稳定来流条件下,风力机气动性能明显下降;同时变桨等控制系统,对外界环境因素(如大脉动来流和随机阵风)动态响应低,不能瞬时感受环境的变化,进行相应的调节。瞬时阵风和脉动风引起的风力机载荷增加、叶片振动,增加了风力机部件的疲劳载荷,严重时的会导致风力机的破坏,降低风力机寿命。这些问题在工程的设计和运行中,都是值得注意的问题。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 风力机叶片工程设计

风力机叶片的工程设计目前主要采用的方法分为求解正问题和求解反问题两类。所谓求解正问题,是指首先根据某种规则设计出一个叶片,然后根据该叶片的气动性能不断对叶片进行修改和优化,最终使叶片的气动性能达到设计者满意的要求;而反问题设计是指根据设计者期望的叶片气动参数,通过一系列假设和经验,通过计算得到叶片的外形参数。常见的反问题设计方法,基本都是根据贝兹理论得到的简化设计方法,包括 Wilson 理论、Glauert 理论、Schmitz 理论、Sabinin 理论、Stefaniak 理论、Hutter 理论等,各种理论各有其优缺点。Schmitz 理论考虑了叶片周向涡损失;Glauert 理论考虑了风轮后涡流流动,但忽略了叶片翼型阻力和叶梢损失的影响,其对叶片外形设计影响较小,而对风轮效率影响较大;Wilson 理论是在 Glauert 法的基础上作了改进,考虑了梢部损失和升阻比对叶片最佳性能的影响,并且研究了风轮在非设



计工况下的性能^[9]。目前,工程上风力机叶片设计过程中,普遍采用正反问题相结合的方法,即首先采用反问题设计方法,得到一个相对较优的叶片外形,然后通过对叶片实际气动性能的评估,设计者根据经验对叶片进行进一步改进以达到相对满意的设计结果。这种叶片设计与改进的方法需要设计者具有丰富的叶片气动设计经验,而且其对三维效应的考虑是基于经验或者半经验公式,无法把握三维流动细节,工作量大,因此很难达到叶片的最佳设计。

在风轮叶片的优化设计方面,动量叶素理论过于简单,升力线理论和 Euler 方程解的计算工作量很大,而且优化变量数目又受到限制。北航潘杰元^[10]教授提出片条理论结合混合罚函数数值寻优的方法,更适合于工程运用。

风力机叶片的设计中还需要解决叶片高性能翼型的设计,以捕获更多的风能。由于传统的航空翼型的设计出发点不同,其作为风力机翼型并不能很好地满足使用要求。风能技术发达国家从 80 年代中期就开始了风力机专用新翼型的研究,并发展了各自的翼型系列,其中具有代表性的优秀风力机翼形包括:美国的 SERI 翼型系列以及 NREL 翼型系列、丹麦的 RISΦ-A1、RISΦ-B1 系列翼型和瑞典的 FFA-W3 系列翼型族。这些风力机专用翼型的设计考虑了叶片在低雷诺数下运行时的边界层特性变化、大攻角下运行时翼型的深失速特性、翼型的动态失速特性及叶片表面的粗糙度增加对翼型空气动力特性的影响^[11-15]。国内在近些年开始关注翼型,在开发新翼型的同时,也关注翼型大攻角失速特性的气动性能研究,并获得一些研究成果^[16-29]。

1.2.2 风力机的气动性能计算

风力机叶片气动性能的计算,主要是应用空气动力学基本理论,特别是直升机空气动力学的基本理论,建立风力机的空气动力模型,研究风力机的空气动力特性。目前,主要方法是叶素动量方法,另外还包括涡尾迹方法和 CFD 方法。

动量-叶素理论基于绕旋转风力机叶片的流动是二维、定常流的假设,可以推导出桨叶微元上的推力系数、扭矩系数和功率系数的表达式,其形式比较简单,计算量小,结果相对比较准确。但实际上旋转风轮叶片的流动是十分复杂的三维非定常流动,存在着失速延迟现象。Himmelskamp^[30]在 1947 年首次提出了旋转造成的三维效应并提出了失速延迟现象。Eggers 和 Digamath 指出,风力机叶片由于三维影响造成的失速延迟大部分是由于旋转造成的^[31]。Himmelskamp 对螺旋桨做的实验表明,旋转延迟了失速的发生,而且升力系数比二维条件时大。Banks 和 Gadd 推导了一系列的方程^[32],通过哥氏力项耦合,并假设了线性压力梯度的分布,得到的解表明层流分离点的位置延迟



了,而且在近轮毂处边界层完全稳定。Snel、Houwink 和 Bosschers^[33]针对旋转叶片的二维分离和三维分离的不同,从本质上做了如下解释:只有叶片的分离区内才能形成明显的径向流,叶片低压侧形成流向端部并引起主流方向的哥氏力形成正压力梯度,这会使分离区边界层的厚度减少,同时使升力系数增加。Pitt 和 Peters 以及 Wang 对风力机翼型进行的动态失速实测结果表明:翼型随折算频率、初始攻角和攻角变化幅度的增大动态失速效应增强;当雷诺数增大时,动态失速效应有所减弱。Rumsey^[34]采用二维不可压非定常 $N-S$ 方程对 NACA0012 翼型进行了动态失速的模拟。Gormont^[35]由翼型和马赫数决定的经验函数推出了一种动态失速模型,ONERA 发展了直升机桨叶的动态失速预测方法,并且该方法可用于水平轴风力机^[36-37]。Leishman 和 Beddoes^[38-39]提出了半经验的动态失速非定常模型。在目前所使用的经验和半经验非定常空气动力与动态失速模型中, $L-B$ 模型可能是最具有特色的一种半经验方法,该方法更多地考虑了动态翼型的绕流物理特性,并辅以风洞实验得到的数据,能较好的模拟翼型非定常气动特性与动态失速特性。

根据赫姆霍兹定理,风轮叶片静止时可以由风轮叶片上的附着涡和从风轮叶片后缘拖出的尾涡组成的马蹄涡系来代替。尾涡模型是用附着涡、尾涡和附着涡量变化引起的脱落涡来建立气动力计算模型。已有多种尾涡模型包括:Gohard JC 的自由尾涡模型、Miller RH 快速自由涡方法、Rosen A 非线性自由尾涡模型、Gotb MA 刚性尾涡模型、Humes TM 半刚性尾涡模型、Afjeh AA 简化自由尾涡模型、Jeng DR 螺旋尾涡模型等^[17]。其中自由尾涡模型最能再现风轮涡尾迹结构,因而适合于模拟风力机的复杂流场,并能给出叶片载荷的详细分布。

1.2.3 风力机流动控制研究

流动控制技术是目前流体力学研究的一个重要的方向,流动控制分为:主动控制和被动控制、主动控制以定常吹吸气、微电子控制等为代表,被动控制是以尾缘襟翼技术、涡流发生器等为代表,并且这些技术在大型飞机的流动控制中得到很大的发展和应用^[40]。

1.2.3.1 定常吹吸气技术

通过传统翼型头部不同位置加入不同特征的振荡射流,在不同的来流速度、不同攻角、振荡射流加入位置、振荡射流频率、振荡射流动量系数下的效果进行了试验研究,已有研究表明在叶片头部加入合适的振荡射流可以很有效地提高翼型地最大升力系数,推迟失速攻角附近叶片表面流动分离,提高叶片的气动性能。



国外学者做了大量的研究^[41-55]采用风洞试验和数值模拟,在飞行器翼型头部加装振荡射流进行试验研究,得到一些试验数据和结果;而针对风力机方面的可行性研究较少。国内学者还从功率谱分析角度,研究了翼型大攻角下升力的功率谱,发现通过一定频率的射流来控制流场中涡的脱落,通过流动控制,增强了前缘涡的强度,同时有效地控制尾涡的产生和发展,加速涡的脱落速度^[56]。振荡射流技术实质上是研究非定常流动分离的问题,国内在基础研究领域对非定常流的研究取得很大进展^[57],对非定常分离和流动控制方面进行了深入的研究^[58],并对利用非定常外部手段进行流动控制的原理和作用机制等进行了研究,还有对钝体等典型分离流动的试验研究和分析^[59]。清华大学唐进,霍福鹏^[60-63]分别对翼型头部施加定常吸气和震荡型射流,得到定常吹气和震荡型射流对翼型气动性能的影响,研究发现定常吹气和震荡射流能有效提高翼型的升阻比。大量试验研究表明,加入振荡射流提高升力的最有效位置为在头部5%~10%弦长位置。利用振荡射流可以在一定程度上提高翼型的最大升力系数,但是这也必然在翼型某些结构上做出调整,因此就增加了结构的复杂性,所以,利用振荡射流来提高翼型的最大升力系数这一途径真正应用到实际当中还需一段时间。

1.2.3.2 微电机机械板技术

D. T. Yen Nakafuji, C. P. van Dam^[64-66], 2002年提出的针对非稳定流动控制技术,在风力机叶片内部布置一个伺服电机以及铰链系统,微机械移动板可以在翼型的上、下表面的孔槽中上下移动,微板不动作时,微板的顶部与翼型表面齐平,可以为光滑的。应力传感器(切向应力和法向应力)布置在叶片上,当应力达到一定程度后,系统能够瞬时作用,通过铰链系统使得微电移动机械板向上或向下伸出,用于增加阻力、增加升力。

微电机机械移动板的主要原理是,微板伸出风力机表面时,由于翼型的分离点发生重要的变化,尾缘向微板下游转变,正是这个流动分离点的变化,有效地改变了叶片截面的弯度,即在没有改变翼型本质结构的基础上改变了其周围的流场。

微电机机械移动板对翼型升力的作用与传统的副翼控制一样,但是副翼系统尺寸较大,驱动力高,动态响应低,不利于实际风力机的操作。而微电机机械移动板能够电子触发,频率响应要比一般的水力部件快得多,将这套系统与现有的风轮电子系统与高速反馈一起使用,能够减少传统的变桨系统重量、体积以及操作复杂性,降低投入成本。

1.2.3.3 涡流发生器

涡流发生器涡流发生器的作用:一方面是通过小平板产生的尾涡搅动分离



区内的气流,使边界层上部的高能气流得以与近壁的低能气流混合而增加近壁流体的动量和能量,从而延缓分离;另一方面是利用涡流发生器产生的尾涡阻隔向外翼的流动,防止低能气流在外翼上堆积,从而进一步增加升力和减少阻力。JD Nickerson Jr. 用实验的方法研究了低雷诺数下, VGs (涡流发生器) 对大型风力机叶片厚翼型 NACA0024 升阻特性的影响^[67], 得到了 VGs 能通过提高翼型的升力系数提升阻比的结论。J Johansen 等人对安装有 VGs 的风轮叶片进行了详细的数值计算^[68], 其中对二维叶段模拟时截取了半对 VGs, 并在 VGs 两侧设置对称及周期性边界条件, 由于下游展向未必能够满足这种周期性及对称性, 所以此种假设对于模拟 VGs 下游较远的区域就显得不足了。

刘刚、刘伟、牟斌等^[69]利用 RANS 方程和 SA 湍流模型解算器, 采用多重网格法和预处理技术, 对叶片式涡流发生器进行了数值模拟研究, 初步探讨了涡流发生器的安装方式、剖面形状、几何尺度等因素在机翼分离流动控制中的影响规律和设计原则, 并初步研究了安装涡流发生器对超临界机翼气动性能的影响。叶叶沛^[70]综述了 VGs 的原理与设计方法。中科院热物理所张磊、杨科、徐建中^[71]在风力机翼型上安装涡流发生器, 探讨涡流发生器对翼型气动性能的影响规律, 研究发现: 在大攻角下, 涡流发生器能够推迟流动分离, 极大地减少翼型的阻力, 增加了翼型最大升力系数, 升阻比增大。

1.2.3.4 Gurney 襟翼技术

Gurney 襟翼是一块 $1\% \sim 2\%$ 弦长高度的平板, 在翼型下表面沿垂直翼型弦线的方向置于翼型尾缘或接近尾缘的地方, 用以提高翼型的升力和气动特性。它最初由赛车手 Dan Gurney 用于赛车头部的倒置翼型上, 增加向下的气动力, 以保证赛车在转弯时有足够的侧向摩擦力^[72]。由于它在改善翼型气动特性方面有很大的作用, 近 20 年来, 许多研究人员对它进行了大量的研究。典型的 Gurney 襟翼如图 1-1 所示。

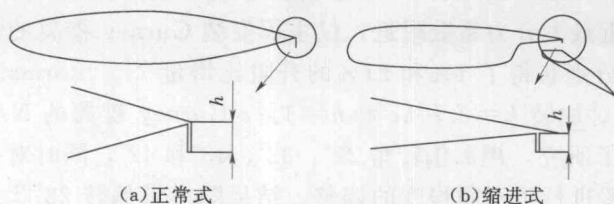


图 1-1 Gurney 襟翼典型形式

最早开展 Gurney 襟翼研究的是麦道航空公司的 Liebeck^[72]。他对安装了



高度 h 为 $1.25\%c$ (c 为翼型弦长) 的 Gurney 襟翼的 New-man 翼型进行了风洞实验, 结果与不带 Gurney 襟翼的翼型相比, 升力增加, 最大升力系数提高, 零升攻角减小, 并且相同升力系数下, 阻力有所减小。这一结果出乎意料, 也引起了人们对 Gurney 襟翼极大的兴趣。Newhart 和 Pendergraft^[73] 在水洞中采用流态显示的方法对 NACA0012 翼型进行了研究, 相对翼型弦长的当地雷诺数 $Rec=8588$, $h=(1.5\% \sim 5.5\%)c$ 。显示结果表明, 随着 h 的增加, 上翼面分离点后移。通过对各种不同高度时结果的对比, $h=4.2\%c$ 时翼型上表面分离最迟, 尤其是在攻角 $< 3.5^\circ$ 时增升效果更为明显。Storms 和 Jang^[74] 在风洞中对 $h=(0.5\% \sim 2\%)c$ 的 NACA4412 翼型进行的研究表明, 所有高度的 Gurney 襟翼均会导致升力系数的增加, 但较高的 Gurney 襟翼会使阻力同时增加。在高升力系数下, $h=0.5\%c$ 的 Gurney 襟翼可获得较大的升阻比。Jang 等^[75] 还利用不可压 Navier-Stokes 方程对 $h=(0.5\% \sim 3\%)c$ 的 Gurney 襟翼进行了数值计算, 得到了与 Storms 和 Jang^[7] 的实验类似的结果。Myose 等^[7] 在 $Rec=2.2 \times 10^6$ 时对加装 $(1\% \sim 4\%)c$ Gurney 襟翼的 NACA0011 翼型进行了风洞实验, 其中 $2\%c$ Gurney 襟翼在 $Cl > 1.4$ 时获得了增大的升阻比, 而在中小攻角下升阻比减小。

对二元翼型安装 Gurney 襟翼的研究, 主要集中在 GA(W)-2 和 NACA632-215B 两种翼型, 其中, GA(W)-2 带有 25% 弦长的单后缘襟翼, NACA632-215B 带有 30% 弦长的单后缘襟翼。Gurney 襟翼的安装形式也有 2 种: GA(W)-2 翼型采用正常式, NACA632-215B 翼型多数采用缩进式。组合形式有: 襟翼安装在襟翼、主翼或两者全部安装。Myose 等^[76-79] 在 $Rec=2.3 \times 10^6$ 时对加装 $h=1\%c$ Gurney 襟翼的 GA(W)-2 翼型进行了研究, 襟翼偏转角为 0° (无襟翼缝隙)、 10° 、 20° 和 30° 。Myose 等^[8] 的实验结果显示, 主翼和襟翼全部安装 Gurney 襟翼时的升力系数要大于任何单一部件安装 Gurney 襟翼的情形, 但相应地阻力系数也较后者为大。当襟翼偏转 20° 且在高升力系数的情况下, 仅在主翼上安装 Gurney 襟翼获得了较无 Gurney 襟翼时偏大的升阻比。在靠近最大升力系数附近, 仅主翼安装 Gurney 襟翼的情况下, 襟翼偏转 10° 和 30° 分别获得了 1% 和 21% 的升阻比增量^[76]。Storms 等^[80,81] 在 $Rec=3.7 \times 10^6$ 时对加装 $h=0.5\%c$ 和 $h=1\%c$ Gurney 襟翼的 NACA632-215(B) 翼型进行了研究, 襟翼偏转角 22° 、 32° 、 43° 和 42° , 同时对襟翼与主翼之间的间隙和位置进行了不同程度的调整。结果除襟翼偏转 22° 状态以外, 均获得了较无 Gurney 襟翼时增大的升力系数、最大升力系数、升阻比和减小的零升攻角, 其中最为有效的状态也是仅主翼安装 Gurney 襟翼。当襟翼偏转 42° 时, 它使最大升力系数增加了 10.3% 。Carrannanto 等^[82] 用不可压 Navier-



Stokes 方程对仅主翼加装 $h = (0.25\% \sim 1.25\%)c$ Gurney 襟翼的 NACA632-215 (B) 翼型进行了数值计算, 得到了与 Storms 等^[80-81]类似的结果。Katz 和 Largman^[83]的研究表明, 当 $h = 5\%c$ 时不会有减阻效果产生。

国内的学者王晋军、李亚臣^[84-88]通过风洞测力、测压, 水洞流动显示、PIV 测速等手段针对二元翼、三维机翼等针对 Gurney 高度、形状、安装角等参数进行分析, 初步探讨了其对翼型增升机理的研究。沈遐龄, 万周迎, 高歌^[89]对 NACA0012 翼型加装锯齿形格尼襟翼进行气动性能的实验研究。周铮, 孙正中, 申振华等^[90-92]采用数值模拟对 NACA23012、NACA4424 翼型进行研究, 获得不同来流马赫数、气流攻角条件下的气动性能。周瑞兴、惠增宏等^[93], 对 OA212MK 旋翼翼型加装 Gurney 襟翼进行了静、动态的测压实验, 研究了不同高度的 Gurney 襟翼在翼型后缘有、无平板 (TAB) 状态时的增升效果。

关于 Gurney 襟翼在风力机中的应用, 国外从 20 世纪末开始研究, 并取得一定的成果。Kentfield J A C^[94-97], 他在对 NACA0015、NACA0020、NREL S809 等翼型上加装不同高度的 Gurney 襟翼并进行试验, 证实 Gurney 对提高风机效率的效用。Bloy 等^[98-99], 也分别对风机 Gurney 襟翼增升研究, 证明增加 Gurney 襟翼能够提高风机性能。D. T. Nakafuji^[64-66]采用数值模拟和风洞实验分别在原型机翼以及 S809 风力发电机组翼型加装微板, 研究发现微板可以提供宏观尺度载荷的变化, 对于减轻载荷, 控制升力和阻力的主动控制的能力。David G. Wilson^[100]通过数值研究在风力机尾缘加装襟翼来控制叶片的载荷。

国内的研究也是近几年才开始, 江学忠等^[101-103]通过试验和计算方法发现, 风机叶片加装 Gurney 襟翼能提高输出功率。包能胜等^[104]采用江学忠的模型在不同风洞进行相同的试验, 得到类似的结果。叶枝全^[105]等通过风洞试验, 研究了在 NACA632-215 翼型上增加襟翼来提供桨叶的气动效率, 主要关注翼型升、阻力系数, 研究发现采用 Gurney 能有效地增加翼型的升力。朱文祥, 于国亮等^[106], 在 2 叶片的模型风力机尾缘安装高度为 $4\%c$ 的 Gurney 襟翼, 在风洞中进行吹风实验, 风力机转子连接发电机可以直接得到风力机输出功率, 研究发现: 在攻角 12° 时, Gurney 使风力机输出功率提高 38% 以上。

从上面的风力机流动控制的方法可以看出, 相对于其他控制方法, Gurney 襟翼具有结构简单、方便安装、投资成本低等优点, 本书将针对风力机专用翼型上加装 Gurney 襟翼进行数值研究, 为实际风力机的流动控制提供理论指导和技术支撑。



1.3 尚存在的主要问题

从上面的阐述中可以发现,在风力机气动设计和性能计算中,仍然有很多问题需要解决,总结起来主要有以下几点。

(1) 在风力机叶片的设计中,各种设计模型是基于简化和各种假设的条件下获得,还需要根据设计者的经验对叶片进行进一步改进。这种叶片设计与改进的方法需要设计者具有较丰富的叶片气动设计经验,而且其对三维效应的考虑也是基于经验或者半经验公式,无法把握三维流动细节,不但工作量大,因此很难达到叶片的最佳设计。

(2) 现有研究的主要着眼点是提高风力机性能,对加装 Gurney 襟翼后风力机的流动特性关注较少:

1) 在大攻角下不同襟翼高度对翼型上翼面的分离泡以及边界层厚度的影响规律研究较少。

2) Gurney 襟翼在不同襟翼高度下,襟翼后漩涡结构与翼型上翼面分离泡在大攻角下相互作用以及对翼型气动特性的影响规律不明确。

3) Gurney 襟翼对风力机性能增加的机理不明。

4) 对于实际叶片沿展向布置襟翼的位置不明确。

(3) 目前针对 Gurney 襟翼的研究,传统风力机翼型——高雷诺数运行下的 NACA 系列对称翼型居多,然而大型风力机多采用的是专用翼型(如: FFA-W 系列、NREL 系列等)。这些专用风力机翼型多是在低雷诺数下运行,这时翼型边界层的特性发生变化。同时叶片在大攻角下运行,翼型的深失速特性显得十分重要。叶片表面的粗糙度增加,影响翼型空气动力特性。从制造技术考虑,风力机叶片的后缘是钝的,作了加厚处理,需考虑局部加厚对翼型性能的影响。从结构强度和刚度考虑,风力机翼型的相对厚度较大,在叶片根部处一般可达 30% 左右。

大型风力机专用翼型的上述特点,使得加装 Gurney 襟翼后大厚度、低雷诺数专用风力机翼型在气动性能上与传统风力机翼型明显不同。比如在相同的攻角下,风力机叶片相对厚度较大的地方布置一定厚度的 Gurney 襟翼能够提高风力机性能,而在叶片相对厚度小的地方加装 Gurney 襟翼则有可能使风力机性能降低。这也就决定了在实际风力机叶片尾缘加装 Gurney 襟翼并不是从叶片根部一直加到叶片尖部。

因此,基于风力机叶片设计理论对叶片进行气动外形设计,并用工程经验对叶片进行进一步改进,以达到最佳气动外形。针对大型水平轴专用风力机的



大厚度、低雷诺数专用翼型开展加装 Gurney 襟翼的流动控制研究，获得最佳襟翼高度，揭示 Gurney 襟翼对风力机流动控制的机理，以解决风力机低速启动条件，即具有理论意义又具有工程应用价值。

1.4 本书的主要内容

本书的研究内容基于“大型风力机叶片气动外形的设计和性能评估”项目，针对叶片设计的各个环节开展研究，形成一个较完整的叶片气动设计流程。采取流动控制技术——加装 Gurney 襟翼方法，对风力机进行流动控制，揭示 Gurney 襟翼提高风力机性能的机理，主要的研究内容包括以下几点。

(1) 分析大型水平轴风力机叶片的设计原理，推导工程优化设计方法。

(2) 对大型水平轴风力机风轮的性能和载荷估算方法。

(3) 完成某 1 MW 风力机叶片的气动外形设计和叶片气动性能评估。

(4) 对风力机专用翼型 FFA-W3-241 以及加装 Gurney 襟翼的翼型进行数值模拟研究，探讨襟翼高度和位置对翼型的升阻比、俯仰力矩、表面压力分布、尾流速度型等的影响规律，给出最佳襟翼高度和位置。

(5) 探讨 Gurney 对风力机流动控制的机理，为实际流动控制的工程应用提供理论指导和技术支撑。

本书共分为 7 章，各章的内容安排如下。

第 2 章介绍了大型风力机叶片的工程设计和性能计算模型，包括：基本概念的定义、叶片工程气动设计和性能评估方程推导，以及各种真实的复杂来流（风剪切、湍流风、塔影、偏航等）对叶片气动性能的影响研究。

第 3 章对大型风力机的叶片翼型性能进行了深入的分析，包括：大型风力机对翼型气动性能的特殊要求、影响大型风力机翼型空气动力特性的主要因素、传统的风力机翼型和现代大型风力机翼形的比较、不同径向位置的翼型选取及风力机专用翼型的气动性能研究。

第 4 章在大型风力机工程设计理论的基础上，开展某 1MW 风力机的叶片气动外形的具体设计和性能评估，包括设计技术指标要求、设计步骤、翼型的选取、叶剖面弦长和扭角的确定、叶片外形几何参数的修正、风轮稳态气动性能计算、稳态功率输出计算和稳态运转载荷的计算。

第 5 章给出风力机流动控制数值模拟的计算方法。

第 6 章对大型风力机（水平轴、垂直轴）专用翼型 FFA-W3-241 以及加装 Gurney 襟翼的翼型进行数值模拟研究，研究襟翼高度和位置对翼型的升阻比、俯仰力矩、表面压力分布、尾流速度型等的影响规律，给出最佳襟翼高