

CRC Press
Taylor & Francis Group

新能源开发与利用丛书

风力机 技术及其设计

Wind Turbine Technology:
Principles and Design

[挪] 穆易瓦·安达拉莫拉 (Muyiwa Adaramola) 主编
薛建彬 张振华 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

关于作者

Muyiwa Adaramola博士分别在尼日利亚Obafemi Awolowo大学和尼日利亚Ibadan大学获得机械工程学士学位和硕士学位。他在加拿大萨斯喀彻温省Saskatoon大学获得了环境工程博士学位。他曾在挪威科技大学担任研究员，专注于风能、风力机性能和风力机尾流的研究。目前，Adaramola博士在挪威生命科学大学的可再生能源系担任教授。

新能源开发与利用丛书

风力机技术及其设计

[挪] 穆易瓦·安达拉莫拉 (Muyiwa Adaramola) 主编
薛建彬 张振华 等译



机械工业出版社

本书的主编在风电领域有多年的研究与教学经验,他在阅读了大量文献后,精心选择了12篇论文编纂成书,这12篇论文构成了本书的12章。这些章按其内容被分为了5个部分:第1部分介绍了与风力发电相关的空气动力学的知识和最新研究成果;第2部分讨论了发电机和齿轮系统的相关问题和设计方法;第3部分研究了风力机塔架及其基础在应用中出现的问题和应对方法;第4部分讲述了风力机中的控制系统,这里讨论了一些新的控制方法,使用这些控制方法可以使风力机的各种性能得以提升;第5部分探讨了风力机对环境的影响,这里主要讨论的是风力机产生的噪声污染,书中提供了噪声的分析方法和减小噪声的解决方案。

风力发电涵盖技术面广。本书所选取的论文,论述了风力发电中较为主要的问题,同时这些论文也基本代表其学科的最新研究成果与动向。所以通过本书可以较全面地了解风电行业发展的最新动向与成果。

本书适合于风电行业的工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生、研究所风电研发人员的参考资料。

译者序

风是自然界对人类最初的宝贵馈赠，也是人类最早学会利用的自然资源之一。在现代科学体系形成之前，人类对自然科学的掌握极为有限。但那时，人们就已经学会了让风鼓满船帆，借助自身之外的自然力量在水域中航行。正是由风力驱动的帆船，这看似简单的发明，将人力或畜力难以负担的沉重货物运至远方，使得城邦得以兴起，促进了早期的商品经济发展，推动了社会变革。也正是风力驱动的帆船，载着水手的雄心与好奇跨越广袤的大海，让我们知道地球并非是平的，海洋并非是世界的尽头，并在随后开创了地理大发现时代。除了帆船，人们还发明了风力驱动的风车，这是人类第一次将自然界的能量转化为可以方便使用的机械能。人们利用风车碾磨谷物、排干沼泽或灌溉农田，使生产力发生了一次跨越式的发展。

在世界进入第一次工业革命后，人类的知识开始了几何式的快速增长。从第一次工业革命到今天这 200 多年的时间里，人类的科技发展超过了以往数千年的积累。我们可以利用的自然资源种类迅速增长，特别是化石能源成为了工业的命脉。渐渐地，我们将自然界最初的礼物——风，弃之高阁。人类在感慨培根的那句名言——“知识就是力量”的同时也开始变得狂妄，产生了一种错觉，误认为自己是自然的主宰，可以将它征服。然而，今天，我们开始为人类的自负付出代价。工业化带来的环境污染、温室效应、生态失衡、化石能源的枯竭等，无不威胁着我们的生存。这时我们再次想起了自然界的那件礼物——风。

在今天看来，相较于我们使用最多的化石能源，风能可再生、获取方便、清洁、安全。对它加以有效利用可以使上述很多问题得以缓解。但今天对风能的利用不会再像数百年前那样让风推动风车碾磨谷物或吹着帆船航行。今天对它的利用主要是将风能转化为电能，从而提供生产生活中最基础的动力。

风电行业发展前景广阔，同时融合了大量不同学科的知识，技术涵盖面大。想用一两本书的篇幅将此行业所有技术囊括其中是不现实的。本书是一本论文集，它是 Muiyiwa Adaramola 博士在从事多年相关科研和阅读大量文献后，筛选编纂而成。本书篇幅虽不大，但包含风电行业中多个主要方面的内容，如叶片空气动力学的研究和设计、发电机和传动系统的研究、风力机对环境的影响等。同时由于书里的文章来源于论文，所以书中所涉及的内容较为新颖，基本代表了该行业的最新发展动态。阅读本书后可以使我们风电行业的整体发展概况得以了解，同时也能了解行业中技术的最新发展动态和研究方法。

因风电技术跨越多个学科，涉及知识面广（本书中的内容也涉及了多个学科），

因此在翻译的过程中遇到了很多困难。虽然查阅了许多相关文献，但对书中大量的跨领域的内容与论述仍可能翻译得不够准确。特别是书中的论文往往是对行业中最新技术的说明，所以很多词汇不能找到统一的中文翻译。译文中的种种不足也望读者多给予批评指正。

在本书翻译的过程中要感谢郑波先生给予的大力帮助，他现任职于施耐德公司，担任项目经理，他也曾在 Vestas 集团有过多年的风电研发与工程经历，他为本书的翻译提供了许多宝贵的基于实际经验的建议。同时也要感谢机械工业出版社的策划编辑顾谦为本书出版所付出的努力。参加本书翻译的有薛建彬、张振华、陈谱滢、陈一鸣、姬雨、廖晓明、张龙、李俞虹、朱恒、梁艳慧、苏文昌、丁霞梅、谢宸伊、宗嘉财、张康宁、夏立超、曹安宁、马永安、李朝辉、房亮、刘晨荣、冯作全、庄登峰、李侃。

张振华

原书前言

本书旨在介绍一些关于风力机设计的基本原理。在不同的章分别讨论了风力机性能的分析方法、风力机的改善途径、故障诊断以及如何调整风力机在使用中出现的不利因素。本书的内容被分为5个部分：第1部分主要介绍风力机叶片的设计，第2部分对发电机和齿轮系统进行了详细的介绍，第3部分关注于风力机塔架及其基础的问题，第4部分讲述其控制系统，最后一部分讨论了一些风力机在环境方面的问题。

在第1章中，详细介绍了风力机叶片设计技术的最新进展。这包括理论上的最大效率、推动力、实际效率、水平轴风力机（HAWT）叶片设计和叶片载荷等。Schubel和Crossley提供了一张风力机叶片的完整设计图，并显示出了水平风轮的优势，而这种风轮几乎为现代风力机所专用。关于现代风力机叶片的空气动力学设计理论已经非常详尽。它包括叶片表面形状/数量、翼面选择和最佳攻角。本章对风力机叶片的负载设计进行了详细的讨论，描述了其在空气动力、重力、陀螺作用和运行等条件下的情况。

Ohya和Karasudani已经开发出了一种新的风力机系统。这种系统是由一个在气流出口外围使用了宽的环形边缘的扩散器护罩和设于其中的风力机所构成（见第2章）。这种使用了将扩散器延伸至边缘的带护罩的风力机，已被证明在给定了风力机的直径和风速的条件下，其功率可被扩大到裸露风力机功率的2~5倍。这是因为在一个低压区域，由于在宽阔边缘的后面会形成一个很强的涡流，这使得扩散器内的风力机可吸入更多的质量流。

根据生态设计的考虑和绿色制造业的要求，对于生产由复合材料制造的风力机叶片，其成型工艺的选择必须存在一个公共的区域。这个区域是由质量、健康和环境几个方面同时作用、交叉产生的。这个公共区域可通过生态替代使其最大化，以便能最小化对环境和人类健康产生的不利影响。让我们记住这一点，第3章（由Attaf所著）关注于使用树脂转换模塑法（RTM）的封闭式模具制作过程。之所以要选择树脂转换模塑法，是因为这种方法有助于减少像苯乙烯蒸气这类挥发性有机化合物（VOC）的排放。并且我们希望风力机叶片产品能同时达到高质量，有良好的机械性能，低成本和完全避免半壳结合操作，而树脂转换模塑法为此提供了工业解决方案。除了这些优点外，可持续发展问题和生态设计要求依然是要被解决的主要问题。而这是在分析了新规范和环境标准的可接受程度后得到的。这些规范和标准促成了复合材料的风力机叶片的绿色设计方法。

第4章,由Carrigan和他的同事所著,旨在介绍和论证一种优化垂直轴风力机(VAWT)翼型截面的全自动化过程。这是为了当实施标准的风力机设计而受限于叶尖速度比、风轮实度和叶片轮廓时,能最大化转矩。在固定风力机的叶尖速度比的情况下,存在一个翼型截面和一个风轮实度,可使转矩最大,这需要开发一种迭代设计系统。最大转矩所需的设计系统融合了快速几何形状生成和自动化混合网格生成工具,其具有黏性的、不稳定的计算流体动力学(CFD)仿真软件。模块化设计和仿真系统的灵活性及自动化特点,可以使它很容易与并行微分进化算法相结合,这种算法可用于获得优化的叶片设计。而这种设计可以最大化风力机效能。

在第5章中,Habash和他的同事对使用感应发电机以增强小型风能变换器(SWEC)的效果,进行了理论和实验评估。使用这种发电机后,小型风能变换器的工作更加有效,因此在风力机所占的单位面积内能产生更多的能量。为证明小型风能变换器的性能,建立了一种模型,在一定的运行条件下进行仿真和实验测试。若感应发电机具有辅助绕组,它和定子主绕组间只有磁耦合,其结果证明在使用了这种感应发电机后可以显著增加输出功率。它同时也显示出,在使用了这种新技术后,感应发电机的性能得到显著提高。这主要表现在抑制信号畸变、谐波、严重的电阻损耗、过热,改善功率因数和开始时的电流涌入等。

齿轮箱是风力机系统中一个非常昂贵的组件。为了能完善设计并增加长期的稳定性,需关注利用时域进行仿真,以预测齿轮箱的负载设计。第6章,由Dong和其同事所完成。在这一章中,有三个时间域上的问题是在动态条件下,基于齿轮接触的疲劳分析来讨论的:①在低风速条件下,转矩反向问题;②统计不确定性效应归因于时域仿真;③简化了在动态条件下齿轮的接触疲劳分析。这里提出了一些应对这些问题的建议。而这些建议是基于美国国家可再生能源实验室(NREL)的750kW陆基“齿轮箱可靠性综合项目”(GRC)[⊖]风力机所提出的。

利用恰当的振动系统模型和分析,像塔架、传动系统、大型风力机的风轮这样的关键组件的初发故障是可以被发现的。在第7章中,Guo和Infield将非线性状态估计技术(NSET)应用于建模塔架振动中得到了很好的效果。这有助于理解塔架振动的动态特性以及主要的影响因素。成熟的塔架包括两个不同的部分:一个是用于低于额定风速的子系统,另一个是用于高于额定风速的子系统。一组数据采集和监控系统(SCADA)的数据被用于建模,而这组数据是从2006年的3月到8月在一个单独的风力机上采集到的。模型的校验在随后被提出和实施。这个研究证明了非线性状态估计技术处理塔架振动时的效果;特别是,它概念简单,物理解释清晰并且准确性高。随后一种成熟的、经过验证的塔架振动模型被成功地用于检测叶片角的非对称性。而叶片角非对称是一种常见的缺陷,为了改善风力机性能和限制疲

⊖ GRC为美国国家可再生能源实验室(NREL)的一个有关风电的实验项目(<http://www.nrel.gov/wind/grc-research.html>)。——译者注

劳性损坏,就需要马上弥补这种缺陷。振动信号可通过分析其他相关的 SCADA 数据(例如功率系数、风速和风轮负荷)来加以完善。这个工作也表明,若信息是来自上述这样的振动信号,则监控状态可以得到显著的改善。

当风力机的尺寸增加并且它们的机械部件被造得更轻时,结构载荷的减小就变成了风力机控制以及最大化捕获风能所要面对的最大任务。在第 8 章中, Park 和 Nam 提出了一套独立集合算法和独立变桨距控制算法。两种变桨距控制算法都使用了 LQR 控制技术。这种技术使用了积分作用(LQRI),并利用卡尔曼滤波器来估计系统状态和风速。在这一领域相较于以前的工作,作者的变桨距控制算法可以在同一时刻控制风轮转速和叶片转矩。当可以同时分别进行单独变桨距控制和统一变桨距控制时,这种算法可以改善风轮转速管理和负载减小间的平衡问题。仿真结果显示这种推荐的统一和独立变桨距控制器达到了非常好的风轮转速管理效果,并且显著地减小了叶片弯矩。

第 9 章由 Vidal 和其同事所完成。在这一章中,考虑了在高风速环境下,变速、变桨距、水平轴风力机的发电控制。提出了一种动态颤振转矩控制和一种比例积分(PI)变桨距控制策略,并且验证使用了美国国家可再生能源实验室的风力机仿真 FAST(疲劳、空气动力学、结构和湍流)代码。验证结果显示所提出的控制器在功率调节方面有效。并且它在湍流风况下对于所有其他的状态变量(风力机和发电机转速;控制变量平稳和充分的演变)展示出了较高的性能。为强调所提出方法对问题的改善,将这种控制器与以前发表的相关研究进行了比较。

第 10 章由 Diaz de Corcuera 和其同事完成,认证了一种多变量和多目标控制器的设计策略。这种控制器是基于 H_{∞} 标准在风力机中的简化应用。风力机模型在风力机设计软件 GH Blade 中已很成熟,并且它是以“迎风欧洲”(Upwind European)工程中所定义的 5MW 风力机为基础的。所设计的控制策略工作于高于额定发电区域,并且可以进行发电机转速控制以及可以在驱动机构和塔架上减小负载。为达到上述目标,发展出了两种鲁棒性 H_{∞} 多输入单输出(MISO)控制器。这些控制器产生总体桨距角和产生转矩设定点变量以达到强制控制的目标。所使用的线性模型生成于 GH Bladed 4.0,但是控制设计方法与任何获得于其他的模块化程序包的线性模型可以一起使用。控制器通过设定混合灵敏度问题进行设计,在这里一些陷波滤波器也被包含到控制器特性中。所得到的 H_{∞} 控制器在 GH Bladed 中已经过了验证并且对其进行了详尽的分析,以便能计算出在风力机组件上疲劳负载的减小,同时也分析了在一些极端情况下负载的减小。在分析中,将本章提出的基于 H_{∞} 控制器的控制策略与一种基本控制策略进行了比较。这种基本控制策略设计用于典型控制方法,并实施于以往的风力机中。

电磁干扰(EMI)既可以影响兆瓦级风力机,同时也可被其发射。在第 11 章中, Krug 和 Lewke 给出了在兆瓦级风力机上有关电磁干扰的概述。指出了测量所有类型电磁干扰的可能性。这里对安装在兆瓦级风力机上的发射器所产生的电磁场进

行了详细的分析。这种蜂窝系统是作为实时通信链路在工作的。矩量法被用于分析描述电磁场。利用一种商业仿真工具，电磁干扰将在给定的边界条件下进行分析。以辐射方向图为基础，对不同的发射器的设置位置进行了评判。本章描述并考虑了主要的电磁干扰机制。

随着全球对可持续化发展的推动，使得相较于煤及化石燃料，人们对可再生能源有了更大的兴趣。其中一种可持续的能量来源就是通过风力机从风中获取能量。然而一个使风力机不能广泛应用的重要障碍就是风力机自身产生的噪声。由 Jianu 和其同事所著的第 12 章，回顾了风力机产生的噪声领域近年来所取得的进展。迄今为止，有了很多不同的噪声控制研究。然而噪声源多有不同，其中主要的一个来源是气动噪声。气动噪声最大的提供者是风力机叶片后缘。当前对于减小风力机噪声，以及针对于减小风力机叶片后缘产生的噪声有着一些不同的方法和研究。本章的目的是批判性地分析和比较这些方法及研究。

目 录

译者序	
原书前言	
第1部分 空气动力学	1
第1章 风力机叶片设计	2
1.1 简介	2
1.2 理论最大效率	3
1.3 推动力	3
1.4 实际效率	5
1.5 水平轴风力机的叶片设计	6
1.5.1 叶尖速度比	6
1.5.2 叶片的平面形状和数量	7
1.5.3 配置	9
1.5.4 空气动力学	12
1.5.5 扭转角	14
1.5.6 非设计工况和功率调节	14
1.5.7 智能叶片设计	15
1.5.8 叶片形状综述	17
1.6 叶片负载	17
1.6.1 气动负载	18
1.6.2 重力和离心力负载	19
1.6.3 结构负载分析	19
1.6.4 挥舞弯曲	20
1.6.5 摆振弯曲	21
1.6.6 疲劳负载	22
1.6.7 叶片结构区域	22
1.7 总结	23
参考文献	24

第2章 使用聚风环技术的高功率输出风力机	27
2.1 简介	27
2.2 风力收集加速装置的开发（具有边缘的扩散器护罩，被称为“聚风环”）	28
2.2.1 选择扩散器型结构作为基本形式	28
2.2.2 形成涡流的环形板（被称为“边缘”）的思想	29
2.2.3 一种具有边缘扩散器护罩的风力机的特性	31
2.3 覆盖风力机具有边缘的紧凑型扩散器的开发	32
2.3.1 紧凑型聚风环风力机输出性能测试的试验方法	33
2.3.2 作为聚风环的紧凑型边缘扩散器形状的选择	33
2.3.3 具有紧凑型扩散器聚风环的风力机的输出功率	35
2.3.4 现场试验	36
2.4 在中国应用5kW风力机为农业灌溉提供稳定的电力	37
2.5 有效利用城市海滨的风能	38
2.6 总结	40
参考文献	41
第3章 应用树脂成型工艺对使用复合材料的风力机叶片的生态模制	42
3.1 简介	42
3.2 生态模制方法	43
3.2.1 生态模制的概念	43
3.2.2 概率方法的应用	44
3.3 叶片结构、材料和机械特性	45
3.3.1 三明治结构	45
3.3.2 机械特性	45
3.3.3 几何结构和尺寸	46
3.4 RTM成型工艺	47
3.5 渗透性的公式化（达西定律）	48
3.5.1 测量渗透率原理（一维流1D）	48
3.5.2 纵向渗透率与横向渗透率（三维流3D）	48
3.6 结果与讨论	51
3.6.1 一个单向层情况下树脂流动行为的仿真	51
3.6.2 两个单向层情况下树脂流动行为的仿真	52
3.7 总结	54
参考文献	54
第4章 利用微分进化算法对垂直轴风力机气动外形的优化	56
4.1 简介	56
4.1.1 可替代能源	56
4.1.2 风力机类型	56
4.1.3 计算模型	57

4.1.4 目标	58
4.2 垂直轴风力机的性能	58
4.2.1 风速和叶尖速度比	58
4.2.2 几何形状确定	59
4.2.3 性能预测	59
4.3 方法论	60
4.3.1 要求	60
4.3.2 针对性模块化设计	61
4.4 工具箱	61
4.4.1 几何外形生成	61
4.4.2 网格生成	63
4.4.3 求解器	65
4.4.4 后处理	65
4.4.5 优化	66
4.5 结果	68
4.5.1 网格依赖性研究	68
4.5.2 基线几何形状	70
4.5.3 实例 1: 3 参数优化	72
4.5.4 实例 2: 4 参数优化	77
4.6 总结	81
参考文献	81
第 2 部分 发电机与齿轮系统	83
第 5 章 风力发电机中具有辅助绕组的感应电机的性能评估	84
5.1 简介	84
5.2 风力发电机	85
5.3 提出的技术	86
5.4 实验结果	89
5.5 探讨与总结	91
参考文献	92
第 6 章 在风力机齿轮箱中有关疲劳度评估的动态齿轮接触力的时域建模 与分析	94
6.1 简介	94
6.2 风力机的时域分析	95
6.3 齿轮的转矩反向问题	98
6.4 时域仿真的统计学不确定性影响	102
6.5 简化的齿轮接触疲劳分析	106
6.6 总结	110
参考文献	111

第 3 部分 塔架和基础	113
第 7 章 基于非线性状态估计技术 (NSET) 的风力机塔架振动建模与监测	114
7.1 简介	114
7.2 塔架振动建模方法: 非线性状态估计技术 (NSET)	115
7.3 风力机的 SCADA 数据准备和塔架的振动分析	118
7.3.1 低于额定风速时的塔架振动分析	118
7.3.2 高于额定风速时的塔架振动分析	120
7.4 利用非线性状态估计技术 (NSET) 的塔架振动建模	121
7.4.1 塔架振动模型与 NSET 方法	121
7.4.2 NSET 塔架振动模型的验证	122
7.5 塔架振动模型用于风轮状态的监测	124
7.5.1 叶片角度的不对称检测	125
7.6 讨论与总结	126
参考文献	127
第 4 部分 控制系统	129
第 8 章 两种基于 LQRI 的风力机叶片变桨距控制	130
8.1 简介	130
8.2 风力机模型	131
8.3 变桨距控制设计	134
8.3.1 统一变桨距控制	135
8.3.2 独立变桨距控制器	136
8.4 仿真	138
8.5 总结	145
参考文献	145
第 9 章 变速风力机的功率控制设计	147
9.1 简介	147
9.2 系统建模	148
9.3 模拟器简要说明 (FAST)	148
9.4 控制策略	149
9.4.1 转矩控制器	149
9.4.2 变桨距控制器	151
9.5 仿真结果	152
9.5.1 转矩和变桨距控制	153
9.5.2 带有噪声信号的转矩和变桨距控制	158
9.6 总结	161
参考文献	161

第 10 章 基于 H_{∞} 的降低风力机负载的控制	163
10.1 简介	163
10.2 风力机模型	164
10.2.1 非线性模型	164
10.2.2 线性模型	164
10.3 基线传统控制策略 (C1)	166
10.4 设计新控制器策略的目标	168
10.5 基于 H_{∞} 范数约简 (C2) 新提出的控制策略	169
10.5.1 基于 H_{∞} 范数约简的控制策略的设计	169
10.5.2 发电机转矩控制器 (H_{∞} 转矩控制器)	170
10.5.3 总体桨距角控制器 (H_{∞} 变桨距控制器)	173
10.5.4 H_{∞} 控制算法的分析	175
10.6 GH Bladed 的结果	180
10.6.1 GH Bladed 中的 External Controller	180
10.6.2 疲劳分析 (IEC61400-1 第 2 版中的 DLC1.2)	180
10.6.3 极端负载分析 (IEC61400-1 第 2 版中的 DLC1.6)	185
10.7 总结	186
参考文献	187
第 5 部分 环境问题	189
第 11 章 大型风力机的电磁干扰	190
11.1 简介	190
11.2 干扰的分类	190
11.3 风力机控制系统的 EMI 和屏蔽	191
11.4 风力机中电磁干扰的测量	192
11.4.1 电磁干扰测量的一般方面	192
11.4.2 在风力机上测量雷电产生的电磁干扰	192
11.5 使用矩量法来定义风力机的电磁干扰源的例子	194
11.5.1 风力机通信系统	194
11.5.2 FEKO 模型	194
11.5.3 电磁负载中的铸铁材料	194
11.6 仿真结果	196
11.6.1 轮毂内部天线	196
11.6.2 轮毂外部天线	197
11.7 总结	199
参考文献	199
第 12 章 风力机中的噪声污染防治：现状和近期发展	201
12.1 简介	201
12.2 噪声源	201

12.2.1 机械噪声	202
12.2.2 气动噪声	202
12.3 噪声减小策略	206
12.3.1 机械噪声的减小	206
12.3.2 气动噪声的减小	206
12.3.3 烟方法的使用	209
12.4 总结	210
参考文献	211

第1部分

空气动力学

