

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

BACHELOR' S THESIS



论文题目：垂直轴风力机及支撑结构的风致响应与疲劳分析

学生姓名：况利民

学生学号：515021910169

专 业：土木工程

指导教师：周岱

学院(系)：船舶海洋与建筑工程学院

上海交通大学

本科生毕业设计（论文）任务书

课题名称：垂直轴风力机及支撑结构的风致响应与疲劳分析

执行时间：2019年3 月至 2019年6 月

教师姓名：周岱 职称：教授

学生姓名：况利民 学号：515021910169

专业名称：土木工程

学院(系)：船舶海洋与建筑工程学院

毕业设计（论文）基本内容和要求：

课题概况：

该毕业论文选题基于已立项的第 33 期本科生科研项目，参与此项目的学生将在已取得的科研成果的基础上进行更深入地研究。项目紧扣结构风工程领域前沿问题，以 H 型垂直轴风力机为研究对象，紧密结合流体和固体力学理论及计算机应用技术，对其支撑塔架在风荷载作用下的动力响应、周边流场特性、屈曲稳定性及疲劳性能进行探索分析。

研究内容：

(1) 依据实测风速数据，分析主流风速功率谱特性，选取理想的目标谱。采用数值模拟方法绘制风速时程曲线，将风速谱与目标谱对比，验证模拟结果的可靠性。

(2) 建立 H 型垂直轴风力机研究模型，对其进行模态分析，计算支撑塔架在风荷载作用下的动力响应，并对风力机表面风压与周边流场特性进行描述和说明。

(3) 对 H 型垂直轴风力机支撑塔架在风荷载作用下的屈曲稳定性和疲劳损伤效应进行分析，为今后进一步的结构优化奠定基础。

工作要求：

- (1) 流体力学、材料力学、结构力学等理论基础扎实。
- (2) 具有计算流体力学和有限元模拟的研究经验。
- (3) 能够熟练操作 STAR-CCM+、ABAQUS、MATLAB 等应用软件。

成果要求：

- (1) 全面深入地了解主流风速功率谱及脉动风数值模拟方法。
- (2) H 型垂直轴风力机支撑塔架风振响应和流场特性的分析。
- (3) H 型垂直轴风力机支撑塔架屈曲稳定性和疲劳性能的分析。
- (4) 高质量完成毕业论文，投稿并录用 SCI 论文。

毕业设计（论文）进度安排：

序号	毕业设计（论文）各阶段内容	时间安排	备注
1	阅读相关文献，确定研究方案	2019年3月	
2	建立有限元模型，进行数值计算	2019年3月-4月	
3	分析计算结果	2019年4月-5月	
4	总结成果，撰写毕业论文	2019年5月-6月	
5	完成毕业论文	2019年6月	

课题信息：

课题性质：设计 论文

课题来源*：国家级 省部级 校级 横向 预研

项目编号 51679139, 51879160

其他_____

指导教师签名：_____周岱_____

2019年3月1日

学院（系）意见：

院长（系主任）签名：_____程斌_____

2019年3月9日

学生签名：_____况利民_____

2019年3月1日

上海交通大学

毕业设计（论文）学术诚信声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学

毕业设计（论文）版权使用授权书

本毕业设计（论文）作者同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本毕业设计（论文）的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本毕业设计（论文）。

保密 ，在 ___ 年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密 。

（请在以上方框内打“√”）

作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

垂直轴风力机及支撑结构的风致响应与疲劳分析

摘要

随着城市化的发展和可再生能源的应用,垂直轴风力机逐渐成为风能储存和利用的重要工具,但结构安全性不足、工作效能较低等问题限制了其进一步发展。本文针对直线翼垂直轴风力机,综合运用计算流体力学方法、有限元分析技术和结构疲劳分析方法,开展风力机风致响应与疲劳分析及非定常气动特性数值模拟研究,研究停机状态下风力机表面风压分布和流场特性,计算风力机及支撑结构风致响应,分析风力机疲劳损伤并评估其疲劳寿命。同时,探究垂直轴风力机运行过程中各项气动参数的变动规律,揭示风力机风轮速度分布和涡旋结构特性,阐明风力机工作机理。研究表明:不同风荷载作用下垂直轴风力机迎风面表面风压分布情况相似,风力机变形会导致支撑塔架风压分布的改变;随风速增加,风力机湍流特性和尾流扰动效应愈发明显;垂直轴风力机叶片和支撑臂应得到加固,不同停机状态对风力机风致响应影响较小;垂直轴风力机疲劳寿命满足设计要求;随叶尖速比增大,垂直轴风力机功率系数先增后减,叶片攻角变化幅度减小;垂直轴风力机叶片承受的气动推力,产生的转矩以及表面力系数随时间呈周期性变化;风轮速度分布和涡旋结构具有一定的规律性。本文采用的研究方法和数值模拟结果可为垂直轴风力机的科学设计与运行提供参考。

关键词: 垂直轴风力机, 风致响应, 疲劳分析, 非定常气动特性

WIND-INDUCED RESPONSES AND FATIGUE ANALYSIS OF THE VERTICAL AXIS WIND TURBINE

ABSTRACT

With the development of urbanization and the utilization of reproducible energy, vertical axis wind turbine (VAWT) is becoming an important approach for wind energy reservation and utilization, however, the lack of structural safety and relatively low work efficiency have limited its further development. In this study, the straight-bladed VAWT is taken as the research object. The computational fluid dynamics (CFD) method, finite element analysis (FEA) technique and structural fatigue analysis method are adopted to carry out the wind-induced responses, fatigue analysis and unsteady aerodynamic characteristic of the VAWT. The surface pressure distribution and flow characteristics of the VAWT are studied in the parked condition, the wind-induced responses of its structural components are calculated and its fatigue life is evaluated. Meanwhile, the variations of various aerodynamic parameters during the operation of the VAWT are explored, and the velocity distribution and vortex structures of the wind wheel are revealed to clarify the working mechanism of the VAWT. The results show that the contours of the pressure distribution on the windward surface of the VAWT are similar subjected to different wind actions, and the deformation of the VAWT can lead to changes in surface pressure; the turbulent flow characteristics and the wake effect become more obvious as the wind velocity increases; the blades and support arms of the VAWT need to be reinforced and the effect of the parked condition on the wind-induced responses of the VAWT can be neglected; the fatigue life of the VAWT meets the design requirement; with the increase of the tip speed ratio, the power coefficient of the VAWT increases first and then decreases, and the variation range of the attack angle of the blade decreases; the aerodynamic thrust, generative torque and surface force coefficients of the blade have obvious variation rules; the velocity distribution and vortex structures of the wind wheel have certain regularity. The research methods as well as the numerical simulation results are expected to provide references for the scientific design and operation of VAWTs.

Key words: vertical axis wind turbine, wind-induced responses, fatigue analysis, unsteady aerodynamic characteristics

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 垂直轴风力机简介	2
1.2.1 垂直轴风力机的分类	2
1.2.2 垂直轴风力机的优势	4
1.3 国内外研究综述	4
1.3.1 垂直轴风力机结构安全性研究综述	4
1.3.2 垂直轴风力机空气动力学性能研究综述	5
1.4 课题主要研究内容	6
1.5 本文整体框架	6
1.6 本章小结	7
第二章 数值模拟方法	8
2.1 引言	8
2.2 流体力学控制方程	8
2.3 湍流模型	9
2.4 风致响应计算方法	10
2.5 双向耦合算法	10
2.6 结构疲劳分析方法	11
2.6.1 线性疲劳累积损伤准则	11
2.6.2 雨流计数法	12
2.6.3 平均应力修正	12
2.7 本章小结	12
第三章 直线翼垂直轴风力机风致响应与疲劳分析	13
3.1 引言	13
3.2 数值模型	13
3.2.1 风力机模型	13
3.2.2 计算流体力学模型	14
3.2.3 有限元模型	15
3.2.4 网格独立性测试	16
3.2.5 时间步长测试	17
3.2.6 双向耦合模拟设置	17
3.2.7 求解器设置	17
3.3 双向耦合算法有效性验证	18
3.4 垂直轴风力机风致响应分析	19
3.4.1 垂直轴风力机表面风压分布	19

3.4.2 垂直轴风力机周边流场特性.....	20
3.4.3 垂直轴风力机风致响应.....	22
3.5 垂直轴风力机疲劳损伤分析.....	29
3.6 本章小结.....	32
第四章 直线翼垂直轴风力机非定常气动特性研究.....	34
4.1 引言.....	34
4.2 数值模型.....	34
4.2.1 风力机模型.....	34
4.2.2 计算流体力学模型.....	34
4.2.3 时间步长测试.....	35
4.2.4 求解器设置.....	36
4.3 数值模拟与结果分析.....	36
4.3.1 垂直轴风力机功率系数分析.....	36
4.3.2 垂直轴风力机叶片攻角分析.....	37
4.3.3 垂直轴风力机叶片推力与转矩分析.....	38
4.3.4 垂直轴风力机叶片表面力系数分析.....	40
4.3.5 垂直轴风力机风轮速度分布分析.....	42
4.3.6 垂直轴风力机风轮涡旋结构分析.....	44
4.4 本章小结.....	50
第五章 总结与展望.....	52
5.1 主要工作和结论.....	52
5.2 研究展望.....	52
参考文献.....	54
致谢.....	58
攻读学士学位期间已发表或录用的论文和专利.....	59
攻读学士学位期间参加的科研科创项目.....	60

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

随着石油等化石资源的不断枯竭，能源问题成为一个国家能否持续发展的关键因素^[1]。因此世界各国纷纷把开发新能源作为重要的战略目标。目前国内外学者主要关注的新能源有太阳能、潮汐能、核能、风能等^[2]，它们各具优势，相关技术日益成熟。其中，风能具有清洁环保、分布范围广等优点，已逐渐成为各个国家发展利用新能源的首选^[3]。中国幅员辽阔，风能储量大，有着巨大的风能开发潜力。图 1-1 和图 1-2 分别给出了中国陆上各地区风能密度分布图^[4]和沿海地区潜在风电装机容量分布图^[5]。从图中可见，中国北方和东部台湾海峡及吕宋海峡地区可利用的风能资源丰富，是风能发展的重要区域。随着社会对环境保护的日益重视和大型风电设备的国产化，再加上政府各项优惠政策的大力支持，中国的风电产业布局持续得到优化。根据国家可再生能源中心报告，2018 年全国风电装机容量增幅达 10.1%，继续保持良好的发展态势，国家重点发展的华北、华东和海上地区风电装机占比均有较大提升^[6]。这表明风电技术在中国有广阔的发展前景，具有重要的经济与环境意义。

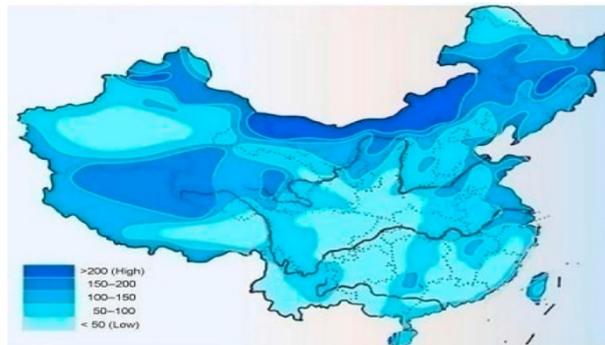


图 1-1 中国陆上风能密度分布图^[4]

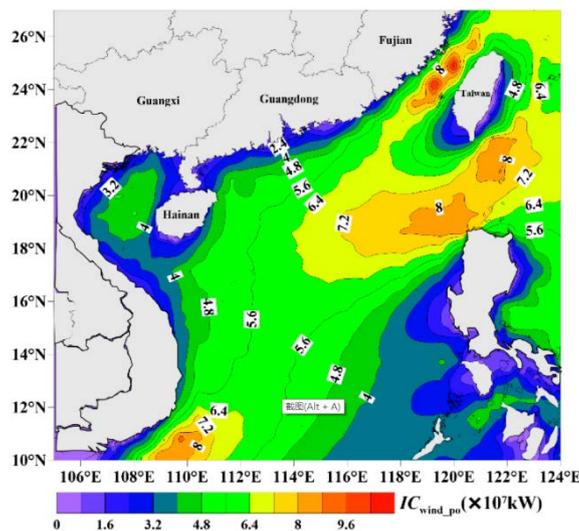


图 1-2 中国沿海地区潜在风电装机容量分布图^[5]

作为风能转化的重要工具，风力机是目前风电技术发展的热点问题。如图 1-3 所示，根据旋转轴的位置，风力机分为水平轴风力机和垂直轴风力机^{[7],[8]}。两者各具优势，都曾长期占据风电产业主导地位，但由于水平轴风力机具有更高的风能转化效率，数十年来得到重点关注，在全球得到大规模应用^{[9],[10]}。然而，随着城市化的快速发展，近年来垂直轴风力机凭借其独特的优势获得越来越多的青睐。与水平轴风力机相比，垂直轴风力机的安装、维护成本低，结构简单而便于制造，能够万向受风且无需偏航装置，同时在湍流风场中有更好的表现，这些特性使得垂直轴风力机更适合应用于风环境不稳定且阵风较多的城市区域，成为目前主流的研究方向^{[2],[11],[12],[13],[14]}。



(a) (b)
图 1-3 两类风力机: (a) 水平轴风力机; (b) 垂直轴风力机

与混凝土结构、钢结构等土木传统研究方向不同，关于垂直轴风力机的研究打破了学科间的知识壁垒，横跨土木建筑、机械动力、电子电气、材料能源等多个学科，涉及多方面基础理论，具有显著的杂糅性与挑战性，吸引着国内外众多学者进行跨学科研究。虽然近年来垂直轴风力机持续地得到改进和应用，但由于其被研究的时间相对较短，仍有大量问题亟待解决，如结构安全性不足、气动特性分析困难等，给垂直轴风力机的设计与运行带来困难。因此，鉴于垂直轴风力机良好的性能和广阔的应用前景，本课题对其动态特性与空气动力学性能进行研究分析，对推动我国风能开发和风力发电技术进步具有重要的科学价值和战略意义。

1.2 垂直轴风力机简介

1.2.1 垂直轴风力机的分类

现代垂直轴风力机由风车发展而来，根据叶片形状的特点可分为萨沃纽斯风力机和达里厄风力机^[15]，如图 1-4 所示。萨沃纽斯风力机依靠叶片凸面和凹面间的压力差异驱动叶片，属于阻力型风力机，相比于利用气动升力驱动的达里厄风力机，该类风力机风能转化效率较低，逐渐远离人们的视野。达里厄风力机自发明以来，距今已有 90 余年的历史，由于优美的造型和相对较高的工作效能，一直受到国内外学者的广泛关注，演化出许多独特的结构体系，如图 1-5 所示^[16]。从传统的 Φ 型达里厄风力机发展而来的直线翼垂直轴风力机（见图 1-4 (b)）具有简单的叶片形状和风轮结构，便于设计和安装，是目前主流的垂直轴风力机之一。此外，对于数值建模，其规则的叶片形状有助于减少模拟过程中的工作量和计算成本。因此，本文将直线翼垂直轴风力机作为主要的研究对象。

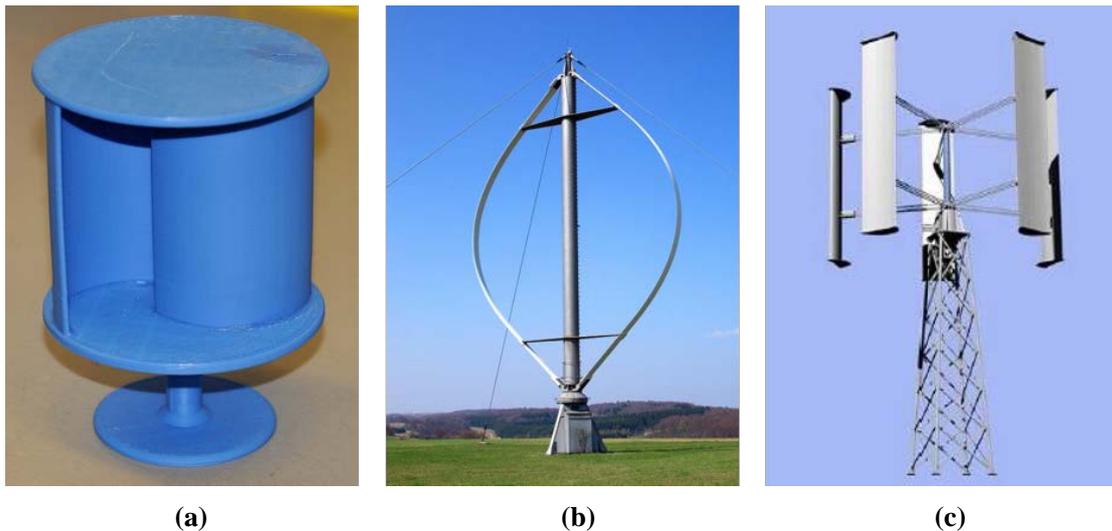


图 1-4 不同类型的垂直轴风力机: (a) 萨沃纽斯风力机; (b) Φ 型达里厄风力机; (c) 直线翼达里厄风力机

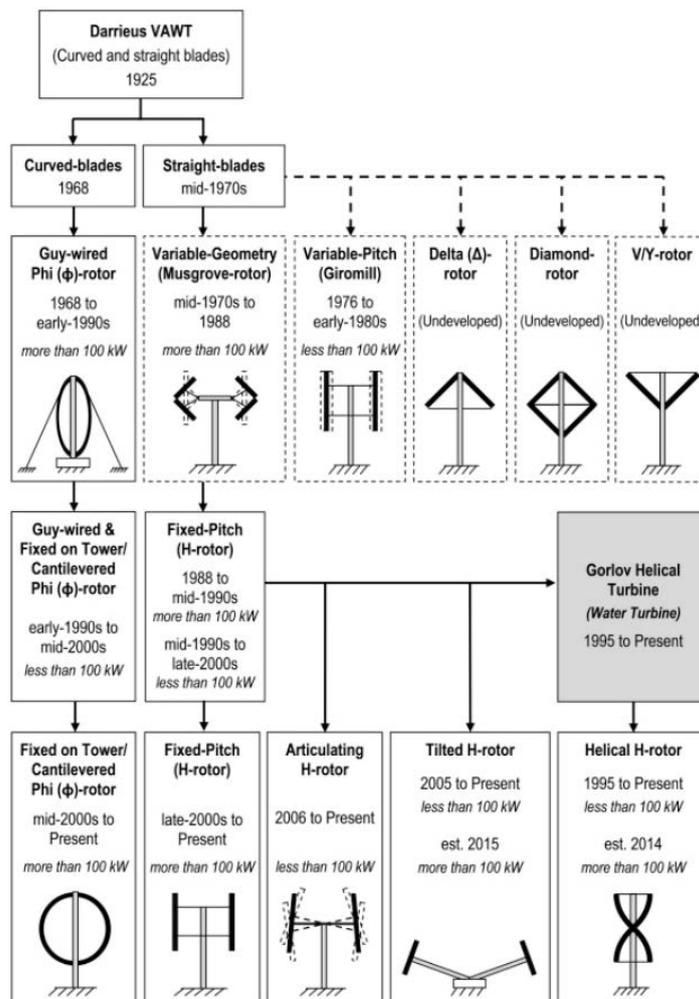


图 1-5 达里厄风力机的演化历程^[16]

1.2.2 垂直轴风力机的优势

已有研究认为,垂直轴风力机在城市区域具有广阔的应用前景,主要体现在以下几点优势^[17]:

(1) 受风多向性,结构简单。垂直轴风力机可捕获任意方向的来流风,不需要复杂的偏航装置,简化了结构设计,降低了经济成本。这一特性也有助于垂直轴风力机安装于风向变化频繁的城市区域,与各类建筑融为一体,推进城市应用商业化。

(2) 安装、控制和维修成本低。与水平轴风力机不同,垂直轴风力机的发电机、齿轮箱等关键设备均可安置于支撑结构底部或地面。这一特性不仅减轻了风力机支撑结构的重量,延长了结构的使用寿命,也极大地降低了安装、控制和维修的人力、物力成本。

(3) 受力恒定,疲劳损伤小。在垂直轴风力机运行过程中,其惯性力方向基本保持不变,承受的荷载相对恒定,有利于降低结构的疲劳损伤,也有助于垂直轴风力机的大型化。

(4) 对环境和生态友好,应用范围广。垂直轴风力机的叶尖速比一般低于水平轴风力机,在运行过程中产生的气动噪声也更低。同时,垂直轴风力机的发电设备通常安装在支撑结构底部或地面,其产生的噪声传播途径受阻,进一步降低了对环境和生态的干扰,扩大了在城市和重点环境保护区的应用范围。

尽管垂直轴风力机有着许多水平轴风力机无可比拟的优势,但由于自身存在一定的缺陷,导致其研究相对滞后,在风力机市场占有率较低。这些缺陷包括:(1) 自启动性能差,对启动风速要求高;(2) 结构部件细长,安全性和稳定性不足;(3) 风能利用率相比水平轴风力机较低。因此,垂直轴风力机仍有着广阔的研究空间和巨大的开发潜力,值得深入探究。

1.3 国内外研究综述

目前,有关垂直轴风力机的研究主要集中于以下两大方面:(1) 结构安全性研究,包括垂直轴风力机在外部荷载激励下的动力响应和材料疲劳特性分析,以提高风力机结构体系的稳定性和耐久性;(2) 空气动力学性能研究,包括垂直轴风力机叶片翼型优化、结构体系创新和气动特性基础研究,目的是改善风力机的工作效能。国内外学者针对以上两方面内容开展了许多的工作,启发了本课题的研究思路。

1.3.1 垂直轴风力机结构安全性研究综述

虽然垂直轴风力机在城市区域有着广阔的应用前景,但结构安全性阻碍了其进一步的发展。垂直轴风力机的支撑塔架、支撑臂等结构部件细长,对风荷载作用较为敏感,特别是在强风区域。这种特性为风力机系统的正常工作带来了巨大挑战。在交通密集的城市区域,受损的风力机也会对行人造成安全隐患。因此,风荷载作用下垂直轴风力机及其支撑结构的风致响应愈发受到关注,实验和数值模拟研究广泛开展。

数个室内外振动测试对垂直轴风力机的动态行为进行了研究。Wang 等^[18]现场测试了安装在房屋顶部垂直轴风力机的风致响应,发现风向对其振幅影响较小。Mclaren 等^[19]通过实验手段得出垂直轴风力机支撑结构的振动受风力机运行影响较小的结论。随着数值研究的不断发展,有限元方法被广泛应用于垂直轴风力机的风致响应数值计算。Rebelo 等^[20]利用有限元分析技术对风力机支撑结构进行分析,并通过与实验数据对比验证了其可行性。Avila 等^[21]求解了风力机支撑塔架的振动方程并得到了有价值的结果。Li 等^[22]运用 ANSYS 分析了风力机支撑塔架的动态特性,发现旋转过程中回转力矩对塔架风致响应的影响可以忽略。Hu 等^[23]研究了壁厚对风力机支撑塔架风致响应的影响。Feliciano 等^[24]通过有限元分析论证了由于叶片旋转效应引起的质量不平衡对风力机支撑塔架变形的影响很小。然而,到目前为止,仍有许多问题需要进一步分析和解决。比如在 Avila 等^[21]的研究中,将风荷载简化为集中荷载,影响了计算结果的可信度;在 Li 等^[22]的研究中,没有考虑不同风荷载作用下风力机风致响应可能存在的变化。此外,大部分学者主要关注风力机支撑塔架的动态特性,而缺

少对其他关键结构部件如叶片、支撑臂的研究。实际上,在风力机事故当中,叶片和支撑臂的破坏概率远高于支撑塔架,值得更多的关注^[25]。另一方面,在上述研究中没有描述风力机周边的流场特性,变化的流场可能对风力机结构体系的动态特性有重要影响。

计算流体力学 CFD 方法可以更准确地描述风荷载作用于结构的过程,并克服风洞试验的一些局限性,如高成本和复杂的实验环境^[26]。CFD 方法常用于风力机的气动特性研究,而很少用于风致响应分析^[27]。因此,为了得到风力机的周边流场并更好地模拟风荷载,本课题提出了结合 CFD 方法与有限元分析技术的双向耦合算法 (Two-way coupling method)。

风力机因其工作环境的需要,在服役期间将会受到风荷载的长期作用,导致结构的反复振动和变形,引发材料表面和内部的裂纹开展,最终造成不可逆的疲劳破坏^[28]。因此,在对垂直轴风力机及其支撑结构进行风致响应分析外,还要重点关注材料的疲劳损伤问题,保证风力机的使用寿命。国内学者在风力机结构疲劳方面开展了大量有价值的研究。余智等^[29]对风力机支撑塔架进行疲劳可靠性研究,评估了其疲劳寿命。李明等^[30]对风力机进行风致响应数值分析,计算得到支撑塔架的疲劳损伤。樊惠燕^[28]比较分析了风力机基础在不同荷载工况下的疲劳损伤,验证了风力机设计的合理性。但以上研究主要关注的是风力机单一结构部件的疲劳问题,如支撑塔架、基础等,没有考虑风力机的整体疲劳损伤,并且未针对垂直轴风力机进行分析。针对以上问题,本课题在垂直轴风力机风致响应计算的基础上,对其疲劳性能进行综合分析。

1.3.2 垂直轴风力机空气动力学性能研究综述

风力机的主要功能是转化和储存风能。相比于水平轴风力机,垂直轴风力机的风能利用率较低,限制了其进一步的发展。考虑到垂直轴风力机所具有的独特优势,对其空气动力学性能进行研究以改善其工作效能势在必行。目前,叶片翼型优化和结构体系创新是提高垂直轴风力机风能利用率的主要途径。但不论采用何种新翼型或结构体系,风力机的气动特性研究始终是基础和关键的一环。

由于垂直轴风力机风轮内部流动复杂导致对其气动特性分析较为困难^[31],同时风洞试验周期长、耗费大,数值模拟研究应运而生,而 CFD 方法是其中重要的手段之一。相比于传统的流管模型和涡流模型,CFD 方法可以更精确地捕捉流场的分布特性,许多国内外学者利用它对垂直轴风力机气动特性进行了探索^[32]。起初,二维数值模拟因其设置简便、计算成本低等优势备受青睐,Danao 等^[33]和 Almohammadi 等^[34]分别研究了垂直轴风力机在二维非定常流场中的空气动力学性能和动态失速现象。但 Gharali 等^[35]指出三维数值模拟可以更准确地描述流场情况,并能更好地阐明风力机工作机理,于是三维数值研究逐渐成为主流选择。Guo 等^[36]在三维流场中利用 Fluent 研究了叶片安装角对垂直轴风力机气动特性的影响,发现合适的安装角可以显著提高其工作效能。Yang 等^[37]研究了叶尖涡对垂直轴风力机周边流场的影响,指出在低叶尖速比下叶尖涡对风力机性能的不利影响增大。Bangga 等^[38]对垂直轴风力机的动态失速现象进行了分析,观察到叶片涡流的相互作用急剧削弱了风力机的动力。徐林等^[39]研究了不同叶尖速比下叶片数与叶片弦长对垂直轴风力机气动特性的影响。朱海天等^[40]研究了风轮实度对垂直轴风力机气动特性的影响规律,发现随着实度的增加,风力机工作效能先增大后减小。张松等^[41]也为垂直轴风力机气动特性研究作出了贡献。但以上研究未对垂直轴风力机的气动特性进行全方位分析,风力机各项气动参数及风轮速度、涡旋变化情况尚不明确。此外,一系列关键技术问题有待解决,尤其是风力机的非定常气动效应会导致叶片疲劳损伤,减少风力机的使用寿命^{[42],[43]}。为此,本课题将对垂直轴风力机的非定常气动特性进行深入分析。

1.4 课题主要研究内容

本课题在结构安全性和气动特性两方面对直线翼垂直轴风力机开展研究。在结构安全性研究方面，运用结合 CFD 方法与有限元分析技术的双向耦合算法，分析在不同风荷载作用下风力机的表面风压分布与周边流场特性，计算风力机及其支撑结构的风致响应，并针对风力机关键点的应力值，综合分析其疲劳性能，为垂直轴风力机的安全运行提供技术支持。与水平轴风力机相比，由于来流风向和旋转效应对直线翼垂直轴风力机振动的影响相对较小^{[18], [23], [39]}，同时为了减少数值模拟的工作量，此部分将风力机设置为具有不同旋转角的停机状态，并针对不同停机状态对风力机表面风压分布，周边流场特性以及风致响应的影响进行分析。

在气动特性研究方面，采用 CFD 方法开展直线翼垂直轴风力机非定常气动特性研究，进行数值模拟结果与风洞实测数据的比较分析，研究运行状态下叶尖速比对风力机功率系数和叶片攻角的影响，分析叶片承受的气动推力和转矩以及叶片表面力系数的变动规律，探究风力机的尾流场特性，同时阐明风轮速度分布与涡旋结构运动的变化，为垂直轴风力机的科学设计提供理论参考。

与已有研究相比，本课题的亮点在于：(1) 运用了双向耦合算法，可以准确模拟风荷载在结构上的加载过程；(2) 计算了包括叶片和支撑臂在内的垂直轴风力机整体结构体系的风致响应；(3) 研究了不同风荷载作用下风力机周边流场的变化情况；(4) 分析了不同停机状态对风力机表面风压分布、流场特性和风致响应的影响；(5) 系统分析了风力机的非定常气动特性，阐明典型现象的内在机理。

1.5 本文整体框架

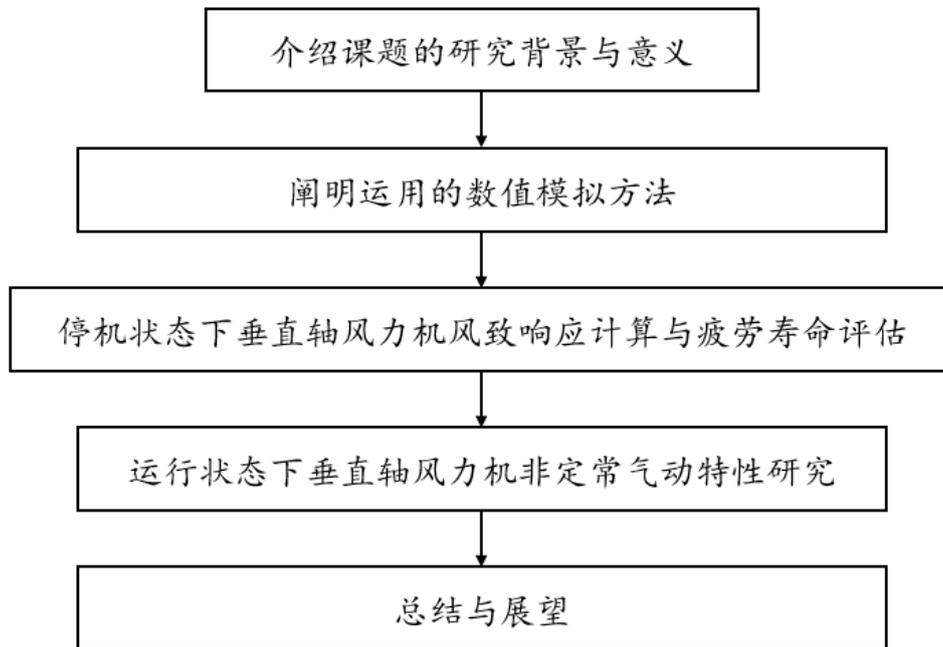


图 1-6 本文的整体框架

1.6 本章小结

本章对本课题的研究背景和意义、垂直轴风力机的分类和优势、国内外研究现状以及本文主要研究内容和框架作了概述。首先通过对风能和风电行业进行介绍引入风力机这一重要风能转化工具，同时以垂直轴风力机为切入点，结合其优势和不足突出本课题的研究意义。之后从垂直轴风力机结构安全性和空气动力学性能出发，对国内外研究进展进行探讨，阐述本课题的主要工作内容和创新点，最后点明本文整体框架。

第二章 数值模拟方法

2.1 引言

本文综合运用计算流体力学方法,有限元分析技术和结构疲劳分析方法对直线翼垂直轴风力机风致响应,疲劳损伤以及非定常气动特性进行数值模拟研究。本章旨在对上述方法的基本理论进行简要概述,涵盖以下几个方面:(1)流体力学控制方程和湍流模型;(2)风致响应计算方法;(3)双向耦合算法;(4)结构疲劳分析方法。具体内容见后续章节。

2.2 流体力学控制方程

由于直线翼垂直轴风力机工作区域周边的马赫数总是低于 0.3,因此在本文中,空气被当作不可压缩流体处理^[45]。根据 Li 等^[46]的研究,不可压缩流的无量纲 N-S 方程可表述为:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\frac{1}{Re_{eff}} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \right] + \mathbf{S} \quad (2-2)$$

在上两式中, \mathbf{u} , t , p , Re_{eff} 和 \mathbf{S} 分别代表速度,时间,无量纲压力,有效雷诺数和源项。在本文中,源项 \mathbf{S} 设为 0,有效雷诺数 Re_{eff} 和 无量纲压力 p 被定义为:

$$Re_{eff} = \frac{VL}{\mu + \mu_t} \quad (2-3)$$

$$p = \frac{p_{abs}}{\rho V^2} + \frac{2}{3}k \quad (2-4)$$

在上两式中, V , L , μ , μ_t , p_{abs} , ρ 和 k 分别为来流速度,湍流长度尺度,分子粘性,湍流粘度,绝对压力,空气密度和湍流动能。确定流体力学控制方程后,利用有限体积法对其进行离散化处理,再结合流场数值模拟方法即可获得离散方程的数值解,从而实现三维流场的求解,具体求解过程如图 2-1 所示。

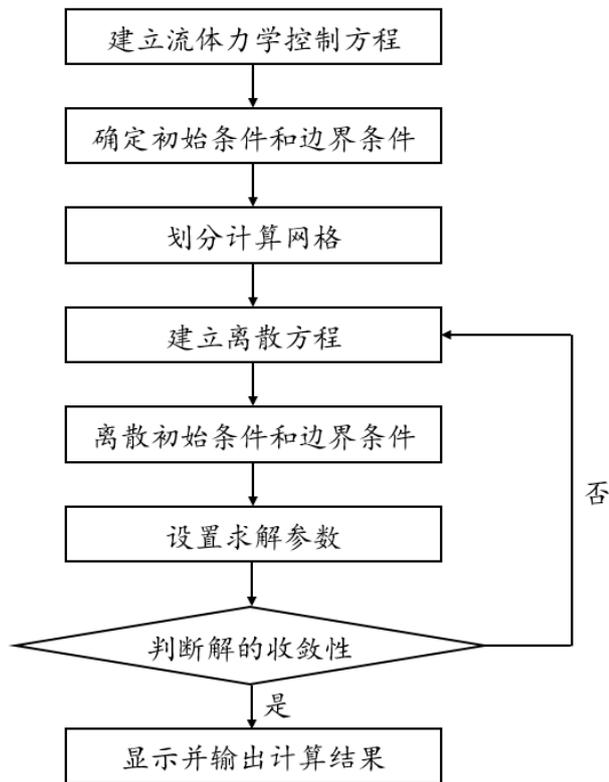


图 2-1 三维流场求解流程图

2.3 湍流模型

考虑到式 (2-1)、(2-2) 中 N-S 方程求解的复杂性与困难性, 为简化流体力学控制方程, 基于 CFD 的流场数值模拟方法应运而生。目前国内外主流的数值方法包括直接数值模拟 (DNS)、大涡模拟 (LES)、分离涡模拟 (DES) 和雷诺平均法 (RANS) 等^[9]。根据已有研究, 基于雷诺平均法的数值模拟精度满足设计分析需要, 且与其他两种方法相比, 计算效率显著提升。对直线翼垂直轴风力机周边流场和非定常气动特性的模拟分析, Menter^[47]提出的 RANS SST $k-\omega$ 湍流模型可达到理想的模拟效果^[9]。因此本文在计算流体力学部分采用 SST $k-\omega$ 湍流模型, 其控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2-6)$$

在上两式中, ρ , k , ω , u_i (u_j) 和 t 分别是空气密度, 湍流动能, 湍流耗散率, 速度和时间。 Γ_k , G_k , Y_k 和 S_k 分别是湍流动能 k 的对流项, 生成项, 有效扩散项和源项。 Γ_ω , G_ω , Y_ω , D_ω 和 S_ω 分别是湍流耗散率 ω 的对流项, 生成项, 有效扩散项, 交叉对流项和源项。在本文中, 源项 S_k 和 S_ω 均设为 0。

2.4 风致响应计算方法

直线翼垂直轴风力机如同竖直的悬臂结构,在计算风致响应时,其动力学方程可简化为:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (2-7)$$

在上式中, $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$ 和 $\{x(t)\}$ 分别是加速度矢量, 速度矢量和位移矢量。 $[M]$, $[C]$ 和 $[K]$ 分别代表风力机结构的质量矩阵, 阻尼矩阵和刚度矩阵。 $\{F(t)\}$ 是作用于结构表面的风荷载。本文运用有限元分析技术, 采用结合 Newmark 方法^[49]的隐式动力学算法 (Implicit dynamic algorithm) 对垂直轴风力机的动力学方程进行求解。

在计算中将阻尼矩阵设置为瑞利阻尼, 由质量矩阵和刚度矩阵按比例线性叠加组成, 可表达为:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2-8)$$

上式中, α 和 β 分别为质量比例项和刚度比例项。根据 Ma 等^[48]的研究, 两者可通过以下方程求解:

$$\varepsilon_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (2-9)$$

其中, ε_i 和 ω_i 分别为结构各模态阻尼比和各模态频率。

2.5 双向耦合算法

本文采用的双向耦合算法是基于商业 CFD 平台 STAR-CCM+和有限元分析软件 ABAQUS, 通过一系列迭代过程完成流体-结构面的结果信息交换, 最终实现双向流固耦合问题完全求解的强耦合技术。图 2-2 给出描述 STAR-CCM+和 ABAQUS 之间双向耦合过程的算法框架。

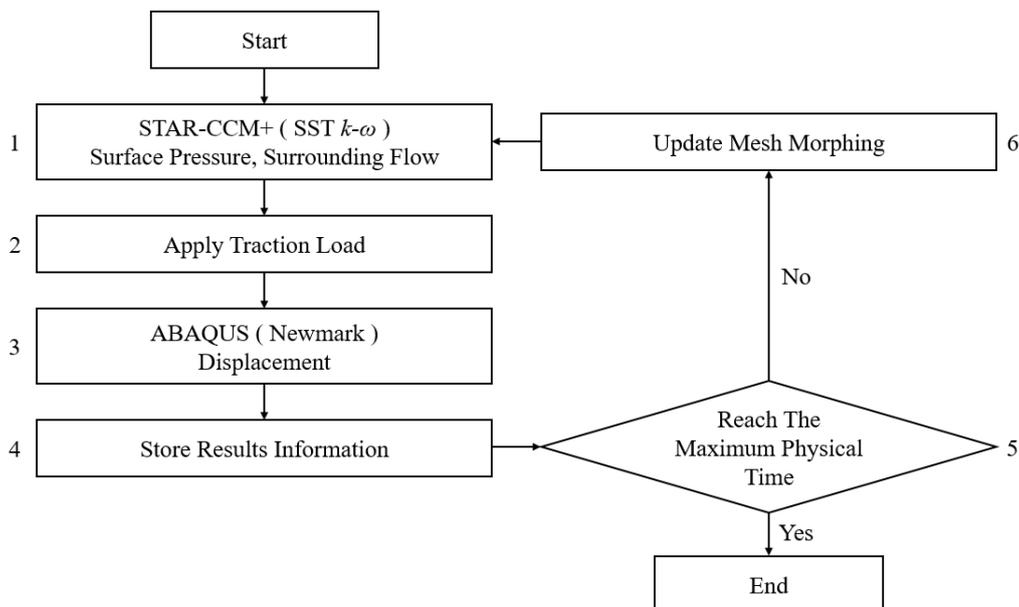


图 2-2 STAR-CCM+与 ABAQUS 双向耦合流程图

首先，在 STAR-CCM+ 中引入 SST $k-\omega$ 湍流模型，通过数值模拟获得垂直轴风力机的表面风压和周边流场（步骤 1）。然后将表面风压转化为风荷载并施加于 ABAQUS 中的风力机有限元模型，运用 Newmark 方法以迭代方式计算风力机的风致响应（步骤 2 和 3）。随后，将位移响应信息返回至 STAR-CCM+ 以更新流体计算域网格（步骤 6）。在 STAR-CCM+ 和 ABAQUS 间以恒定耦合时间步交换结果信息，直至达到最大物理时间（步骤 5）。对于每次循环模拟，结果信息都在步骤 4 中存储以进行后续分析。

2.6 结构疲劳分析方法

本文基于线性疲劳累积损伤准则，结合雨流计数法和平均应力修正，开展垂直轴风力机结构疲劳分析。图 2-3 给出疲劳分析的研究框架。

首先，从 STAR-CCM+ 中导出固定时间内垂直轴风力机的表面风压时程，作为输入文件导入 ABAQUS 并转化为风荷载时程，运用隐式动力学算法获得风力机关键部位的 Mises 应力时程（步骤 1）。随后采用自编雨流计数法程序统计各应力幅实际循环次数，并根据 Goodman 理论对平均应力进行修正（步骤 2）。在步骤 3 中，利用风力机材料的 S-N 曲线计算各应力幅对应的疲劳破坏循环次数，之后基于线性疲劳累积损伤准则得到风力机关键部位在固定时间内的疲劳损伤量（步骤 4），最后对风力机的疲劳寿命进行评估（步骤 5）。

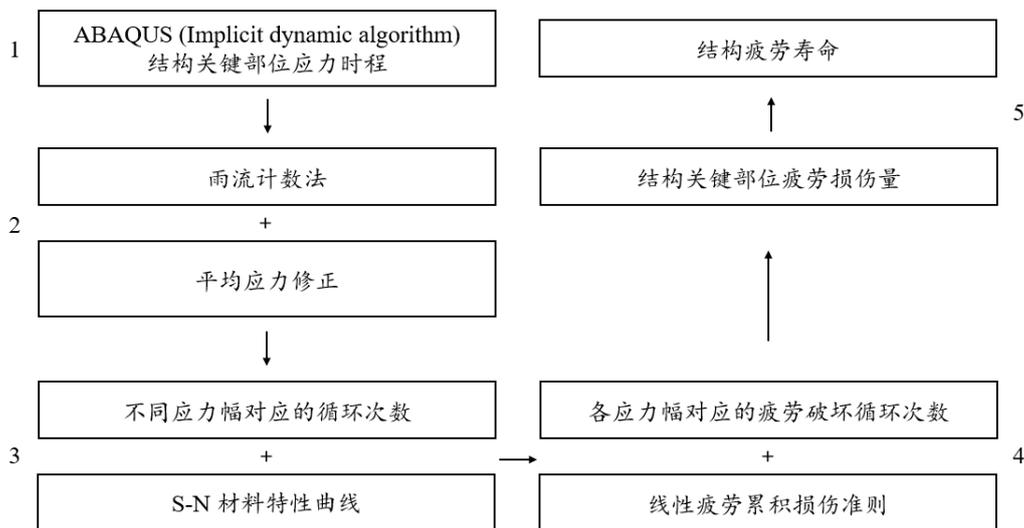


图 2-3 结构疲劳分析流程图

2.6.1 线性疲劳累积损伤准则

目前关于结构的疲劳损伤有多种计算方式。线性疲劳累积损伤准则是由 Palmgren 提出，并由 Miner 完成理论推导，该准则假设结构在不同应力幅循环作用下的疲劳损伤相互独立，可以通过线性叠加得到结构的总疲劳损伤，其理论表达式为^[50]：

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + \cdots + D_n = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \cdots + \frac{n_n}{N_n} = \sum_i^n \frac{n_i}{N_i} \quad (2-10)$$

在上式中， D ， D_i ， n_i 和 N_i 分别为结构疲劳总损伤量，各应力幅单独作用下结构疲劳损伤分量，各应力幅实际循环次数和各应力幅疲劳破坏循环次数。根据挪威船级社制定的《海上风力机结构设计规范》^[51]规定，当 D 大于或等于 1 时，风力机结构就已达疲劳寿命，面临疲劳破坏的风险。

2.6.2 雨流计数法

雨流计数法由 Matsuiski 和 Endo 共同提出，被广泛应用于结构的疲劳损伤分析，其基本思想是将应力时程转化为雨滴从塔顶滑落的过程^[52]。本文采用基于三峰谷计数原则的雨流计数法，图 2-4 给出雨流计数法的原理图。

首先，从一段随机分布的应力时程中依次提取应力的峰值和谷值并线性拼接为峰谷序列，随后找到该序列中的最高（低）峰（谷），以此为序列初始点（即塔顶）重新调整峰谷序列，如图 2-4 (a) 所示。假设雨滴从塔顶开始滑落并最终停止流动，在雨滴流经各峰谷的过程中寻找如图 2-4 (b), (c) 所示的典型峰谷，记录这两类典型峰谷的循环次数和对应的应力幅，最终实现雨流计数法的统计功能。

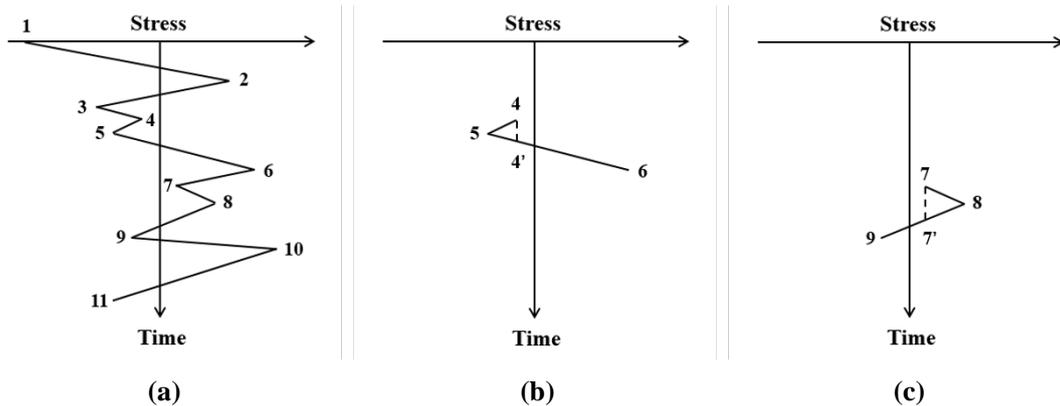


图 2-4 雨流计数法模型原理图: (a) 峰谷序列; (b) 典型峰谷 1; (c) 典型峰谷 2

2.6.3 平均应力修正

在对垂直轴风力机进行疲劳损伤分析时，通过雨流计数法可以统计得到应力幅的循环次数，但由于平均应力的不同，风力机结构在受到相同应力幅循环作用下产生的疲劳损伤存在一定的差异。平均应力修正旨在消除平均应力给结构疲劳分析带来的误差影响，其中以 Goodman 理论为基础的修正方法最为适用，其表达式为^[53]：

$$\Delta\sigma' = \frac{\Delta\sigma}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_t}} \quad (2-11)$$

在上式中， $\Delta\sigma'$ ， $\Delta\sigma$ ， σ_m 和 σ_t 分别为经过修正的应力幅值，未经修正的应力幅值，应力幅对应的平均应力和钢材极限抗拉强度。经过平均应力修正后的应力幅值可以更准确地描述荷载对结构的作用。

2.7 本章小结

本章对本文所运用的计算流体力学方法，有限元分析技术和结构疲劳分析方法进行了介绍，为后续开展实质性研究奠定了理论基础。对于计算流体力学方法，针对直线翼垂直轴风力机特殊的工作环境，在总结前人研究的基础上，重点阐述了不可压缩流的流体力学控制方程和适用于当前研究对象的数值模拟湍流模型。在有限元分析技术上，以直线翼垂直轴风力机的动力学方程为切入点，简要说明了本文运用的风致响应计算方法。同时，基于计算流体力学方法和有限元分析技术，对结合 STAR-CCM+和 ABAQUS 的双向耦合算法的基本理念和运行框架进行了诠释。此外，详细介绍了结构疲劳分析的研究流程，对线性疲劳累积损伤准则，雨流计数法以及平均应力修正方法的基本思想作了概述。

第三章 直线翼垂直轴风力机风致响应与疲劳分析

3.1 引言

直线翼垂直轴风力机在城市区域有着广阔的应用前景和极大的开发潜力,但结构安全性限制了其进一步的发展。此外,风力机结构在荷载的长期反复作用下,疲劳损伤问题也尤为突出,值得深入探究。为此,本章以直线翼垂直轴风力机为研究对象,运用结合计算流体力学方法和有限元分析技术的双向耦合算法,研究不同风荷载作用下和不同停机状态下风力机的表面风压分布和周边流场特性,计算风力机及其支撑结构的风致响应。同时,基于线性疲劳累积损伤准则,针对风力机关键部位开展疲劳分析并评估其疲劳寿命,为直线翼垂直轴风力机的安全设计与运行提供技术支撑。

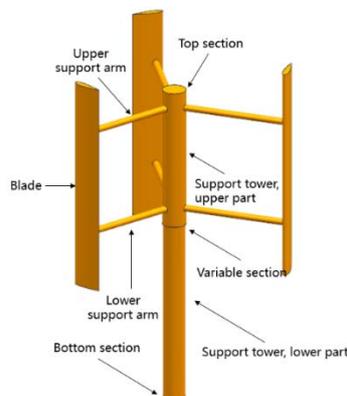
3.2 数值模型

在进行双向耦合模拟之前,需要分别在 STAR-CCM+和 ABAQUS 中建立数值模型。物理模型和边界条件在 STAR-CCM+中定义,材料特性则在 ABAQUS 中设置。具体的数值模型在下文中阐述。

3.2.1 风力机模型

本文以某三叶片直线翼垂直轴风力机为研究对象,在结构设计软件 Unigraphics NX 中建立其三维模型,之后导入 STAR-CCM+和 ABAQUS 中进行数值模拟。图 3-1 (a)为风力机的几何模型示意图,模型的主要结构部件包括叶片、支撑臂和支撑塔架。风力机的具体参数表示见图 3-1 (b)。叶片采用弦长为 $c = 925.6 \text{ mm}$ 的 NACA0021 翼型,叶片高度为 $h = 6300 \text{ mm}$,安装角为 $\beta = 8^\circ$ 。支撑塔架由两段不同直径的圆柱组成,下半部分直径 $d_1 = 650 \text{ mm}$,高度 $H_1 = 5400 \text{ mm}$,上半部分直径 $d_2 = 700 \text{ mm}$,高度 $H_2 = 4200 \text{ mm}$ 。两部分的交接处被定义为变截面处,具体位置见图 3-1 (a)。支撑臂直径为 $d_3 = 200 \text{ mm}$,风力机的风轮直径达到 $D = 7000 \text{ mm}$ 。

本文考察了垂直轴风力机在三种不同旋转角下的停机状态,图 3-1 (b), (c), (d) 呈现了这三种停机状态的俯视图。根据叶片和支撑塔架的相对位置,结合三叶片风力机体系旋转过程的周期性,将叶片 1 与 y 轴夹角为 $\theta = 0^\circ$ 时作为第一种停机状态,分别将 $\theta = 90^\circ$ 和 135° 的情况设置为第二种和第三章停机状态。



(a)

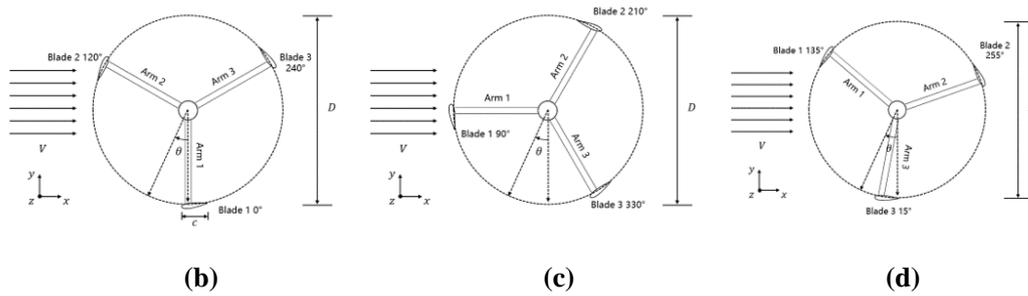
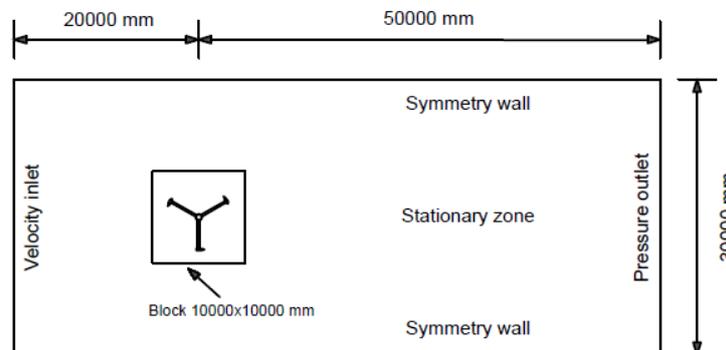
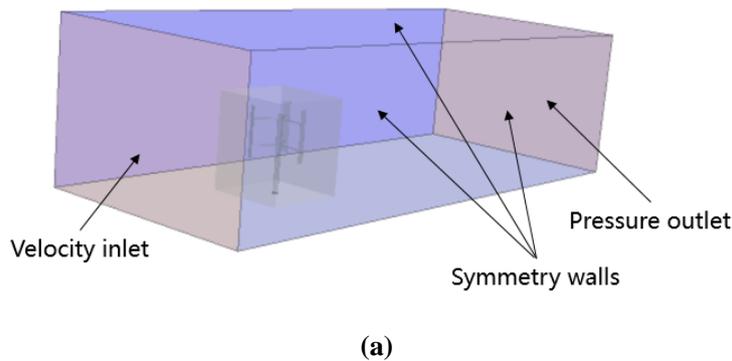
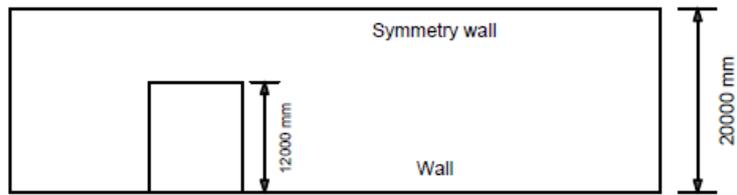


图 3-1 直线翼垂直轴风力机模型: (a) 三维视图; (b) 俯视图 (第一种停机状态, $\theta = 0^\circ$); (c) 俯视图 (第二种停机状态, $\theta = 90^\circ$); (d) 俯视图 (第三种停机状态, $\theta = 135^\circ$)

3.2.2 计算流体力学模型

在 STAR-CCM+ 中建立了合适的三维流场计算域, 如图 3-2 所示。垂直轴风力机的第一种停机状态被用于说明具体情况。由于本文研究的是风力机的停机状态, 流场计算域仅由固定域组成, 同时在风力机周围设置加密网以提高数值模拟的精确度。考虑到尾流发展和流场阻塞率的要求^[54], 将流场计算域的长度、宽度和高度分别设置为 70000 mm, 30000 mm 和 20000 mm, 如图 3-2 (b), (c) 所示。流场计算域的入口和出口分别设置为速度进口 ($V_1 = 5$ m/s, $V_2 = 10$ m/s and $V_3 = 20$ m/s) 和压力出口 ($P = 0.0$ Pa), 入口处来流的湍流强度设置为 1%。垂直轴风力机的表面和固定域的底部设置为无滑移壁面, 固定域的其他三个面被设置为对称面。

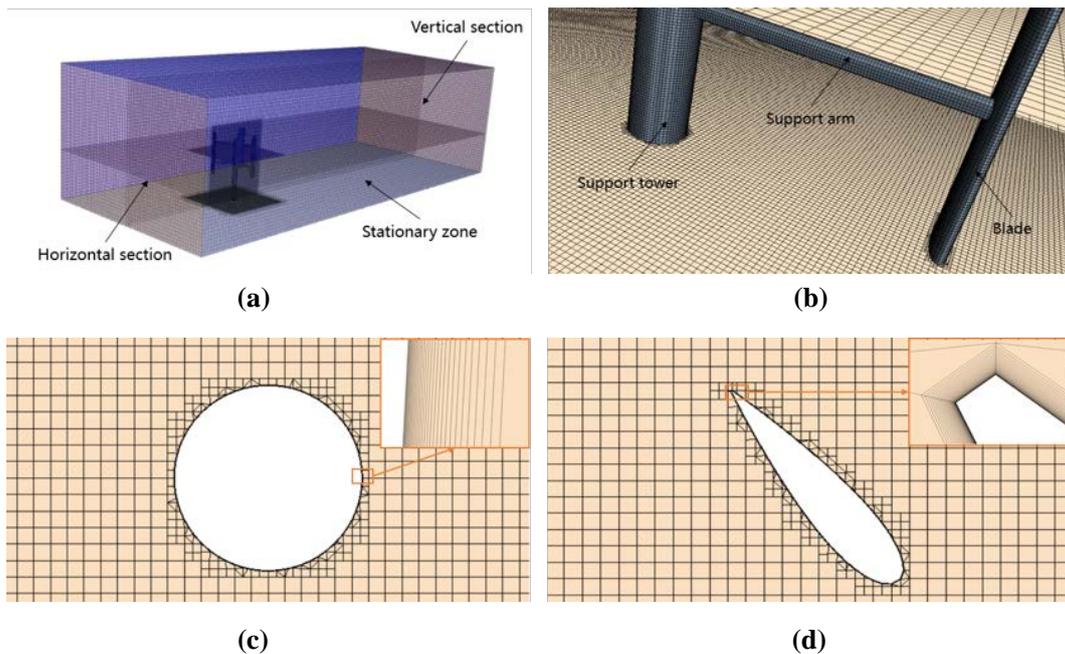




(c)

图 3-2 三维流场计算域和边界条件: (a) 三维视图; (b) 俯视图; (c) 正视图

三维流场计算域的网格拓扑也在 STAR-CCM+ 中利用自动网格划分技术完成, 整体采用非结构化切割体网格, 如图 3-3 (a) 所示。为了更好地考察垂直轴风力机的流场特性, 将垂直轴风力机表面和周边的网格加密, 具体情况如图 3-3 (b) 所示。图 3-3 (c), (d) 分别是支撑塔架和叶片的边界层网格划分情况, 即在支撑塔架和叶片的表面沿法线方向设置棱柱层网格。边界层共有 30 层, 层间增长率为 1.1, 总厚度为 0.00294 m。基于计算域的入口来流速度 (5 m/s, 10 m/s and 20 m/s) 和叶片翼型弦长 (0.9256 m), 当前研究的雷诺数 Re 在 $3.09e5 - 1.23e6$ 的范围内, 为满足 SST $k-\omega$ 湍流模型的要求, 将第一层棱柱层的厚度设置为 $1.79e-5$ m, 保证了第一层棱柱层网格质心到支撑塔架和叶片表面的无量纲距离 $y^+ < 1$ 。



(a)

(b)

(c)

(d)

图 3-3 三维流场计算域的网格拓扑: (a) 整体网格划分情况; (b) 风力机表面和周边的网格拓扑; (c) 支撑塔架的边界层网格; (d) 叶片的边界层网格

3.2.3 有限元模型

在 ABAQUS 中建立双向耦合模拟的垂直轴风力机有限元模型, 如图 3-4 所示。支撑塔架的底部固支。由于风力机叶片后缘及其与支撑塔架交接处的网格较难划分, 本文采用四面体 Tet 单元对风力机模型进行网格划分, 网格的数量与 CFD 模型基本保持一致。支撑塔架和支撑臂采用钢材, 密度和弹性模量分别为 7850 kg/m^3 和 $2.06e11 \text{ N/m}^2$ 。叶片由铝合金制作而成, 密度和弹性模量分别为 2700 kg/m^3 和 $7e10 \text{ N/m}^2$ 。两种材料的泊松比均设置为 0.3。

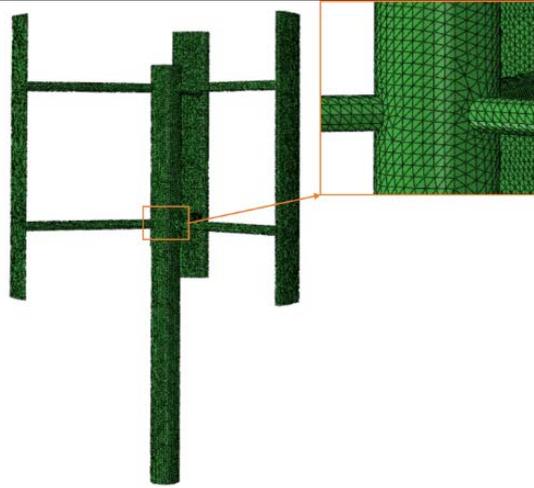


图 3-4 垂直轴风力机有限元模型三维视图

3.2.4 网格独立性测试

网格的数量和质量对数值模拟的计算精确度和计算效率有重要的影响。因此，在正式计算之前，需要对数值模型的网格独立性进行测试。在本节中，生成和比较了三种网格拓扑，分别是粗糙网格、中等精细网格和高精细网格。由于垂直轴风力机流场特性和风致响应主要受风力机表面和周边网格数量的影响，三种网格拓扑之间的区别在于叶片和支撑结构表面网格的密度不同。在三种网格拓扑中，风力机叶片和支撑结构的网格尺寸分别设为 0.1 m, 0.04 m 和 0.02 m。针对垂直轴风力机的第一种停机状态，将风力机在 10 m/s 稳态风作用下支撑塔架顶部截面 ($z = 9.6$ m) 和变截面处 ($z = 5.4$ m) 的代表性风致响应数据作为比较对象，包括最大位移、平均位移和最大速度。两个截面的具体位置在图 3-1 (a) 中给出。由于缺少实验实测数据，高精细网格下的计算结果被用于误差计算的参考值。

表 3-1 和表 3-2 给出了计算结果，从表中可以发现粗糙网格下的计算结果有最大的相对误差，约为 20%，因此其结果不可信。中等精细网格和高精细网格的计算结果较为接近，然而更多的网格数量并不总是意味着更精确的结果。在 Lei 等^[14]和 Su 等^[55]的研究中指出，高密度的网格可能会降低网格质量，从而影响计算结果的精确度。因此，综合考虑计算成本和精确度，本文选取中等精细的网格拓扑进行正式数值模拟。

表 3-1 基于风力机支撑塔架顶部截面风致响应相对误差的网格独立性测试

网格种类	网格数量	最大位移 (mm)	相对误差	平均位移 (mm)	相对误差	最大速度 (mm/s)	相对误差
粗糙	6236743	0.9012	-6.90%	0.2803	11.81%	8.926	-20.37%
中等精细	7871364	0.9627	-0.55%	0.2348	-6.34%	11.600	3.48%
高精细	10712312	0.9680	--	0.2507	--	11.210	--

表 3-2 基于风力机支撑塔架变截面处风致响应相对误差的网格独立性测试

网格种类	网格数量	最大位移 (mm)	相对误差	平均位移 (mm)	相对误差	最大速度 (mm/s)	相对误差
粗糙	6236743	0.4054	-5.06%	0.1227	13.40%	4.031	-18.93%

网格种类	网格数量	最大位移(mm)	相对误差	平均位移(mm)	相对误差	最大速度(mm/s)	相对误差
中等精细	7871364	0.4267	-0.07%	0.1017	-6.01%	4.875	-1.95%
高精细	10712312	0.4270	--	0.1082	--	4.972	--

3.2.5 时间步长测试

时间步长测试同样是保证数值模拟结果可靠性的重要组成部分。因此，本文选取三种不同的时间步长进行比较，以评估计算成本和精确度，分别是 0.05 s，0.01 s 和 0.005 s。与网格独立性测试一样，将垂直轴风力机在 10 m/s 稳态风作用下支撑塔架典型截面处的代表性风致响应数据作为比较对象。

表 3-3 和表 3-4 给出了计算结果，从表中不难看出当时间步长为 0.05 s 时计算结果有最大的相对误差，峰值达到了 30%，而时间步长为 0.01 s 和 0.005 s 时的计算结果比较接近。因此，综合考量计算成本与精确度，0.01 s 被选作后续研究的时间步长。

表 3-3 基于风力机支撑塔架顶部截面风致响应相对误差的时间步长测试

时间步长	最大位移(mm)	相对误差	平均位移(mm)	相对误差	最大速度(mm/s)	相对误差
0.05 s	0.8998	-12.98%	0.2992	16.51%	8.401	-23.83%
0.01 s	0.9627	-6.90%	0.2348	-8.57%	11.600	5.17%
0.005 s	1.0340	--	0.2568	--	11.030	--

表 3-4 基于风力机支撑塔架顶部截面风致响应相对误差的时间步长测试

时间步长	最大位移(mm)	相对误差	平均位移(mm)	相对误差	最大速度(mm/s)	相对误差
0.05 s	0.3832	-14.02%	0.1269	14.12%	3.609	-28.59%
0.01 s	0.4267	-4.26%	0.1017	-8.54%	4.875	-3.54%
0.005 s	0.4457	--	0.1112	--	5.054	--

3.2.6 双向耦合模拟设置

对于计算流体力学模型和有限元模型，分别需要设置一系列双向耦合模拟参数。在 STAR-CCM+ 中，垂直轴风力机设置为流固耦合交接面，固体应力压力和壁面剪切应力以恒定的耦合时间步长传递至 ABAQUS。在 ABAQUS 中，将节点位移信息返回至 STAR-CCM+，为保证双向耦合模拟的顺利进行，隐式动力求解的增量步长与恒定耦合时间步长保持一致。

3.2.7 求解器设置

对于 STAR-CCM+ 的模拟，二阶迎风格式和二阶中心差分格式分别用于 SST $k-\omega$ 湍流模型中对流项和扩散项的离散。采用隐式非定常分离流法 (Implicit unsteady segregated flow method) 求解离散方程，并应用结合高斯-赛德尔迭代方法 (Gauss-Seidel iterative method) 的 AMG (Algebraic multi-grid) 技术。同时，运用基于 SIMPLE 算法的压力-修正方法实现连续性方程和动量方程的耦合，并通过迭代方式获得压力方程和速度方程的数值解。在 ABAQUS 的计算中，基于 Newmark 方法的隐式求解算法用于求解垂直轴风力机的动力学方程。

耦合时间步长设为 0.01 s，在一个时间步长中设置 10 次迭代，以保证在较低计算成本的基础上达到数值模拟的收敛。基于在上述网格独立性测试和时间步长测试中良好的收敛表现，亚松弛因子与 STAR-CCM+ 的默认设置保持一致，取为 0.8。所有的数值模拟均在一台小型服务器 (Intel (R) Xeon (R) CPUs (E5-2630 v3)) 上并行完成，完成一个时间步的计算大约需要 260 s。

3.3 双向耦合算法有效性验证

本文利用 Glück M 等^[56]论文中的振荡板模型验证双向耦合算法的有效性。在 Glück M 等^[56]的研究中，作者运用 CFD-CSD 方法分析了竖直平板在稳态流激励下的动态特性。表 3-5 给出了平板的尺寸和力学特性参数，平板的底部固支。流体的密度和动力粘度分别为 1 kg/m^3 和 $0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。图 3-5 呈现了在 STAR-CCM+ 和 ABAQUS 中建立的计算模型。计算域的长度、宽度和高度分别为 6000 mm，6000 mm 和 2000 mm。为了与垂直轴风力机的数值模拟环境保持一致，在此次验证中同样采用了不同尺寸的非结构化切割体网格，如图 3-5 (b), (c) 所示，整个流体域网格数约为 60 万。在 ABAQUS 中，C3D8R 单元被用于平板有限元模型的网格划分，总网格数约为 3.2 万，见图 3-5 (d)。速度进口处的来流速度和压力出口处的压力分别设置为 10 m/s 和 0.0 Pa 。总模拟时间为 2.5 s，恒定耦合时间步设为 0.01 s。将平板自由端在 x 方向上的位移作为比较对象，具体位移监测位置在图 3-5 (a) 中用红点标出。

双向耦合算法有效性验证的结果在图 3-6 中给出，从图中可以发现双向耦合算法数值模拟结果与文献数据吻合较好。在两种计算工况下，平板的振幅和振动频率基本保持一致。因此，双向耦合算法能精确地预测振荡板的动态特性，可以用于垂直轴风力机的后续研究。

表 3-5 振荡板几何参数

参数	Value
长度	400 mm
宽度	10 mm
高度	1000 mm
弹性模量	$3.5\text{e}9 \text{ N/m}^2$
泊松比	0.32
密度	1200 kg/m^3

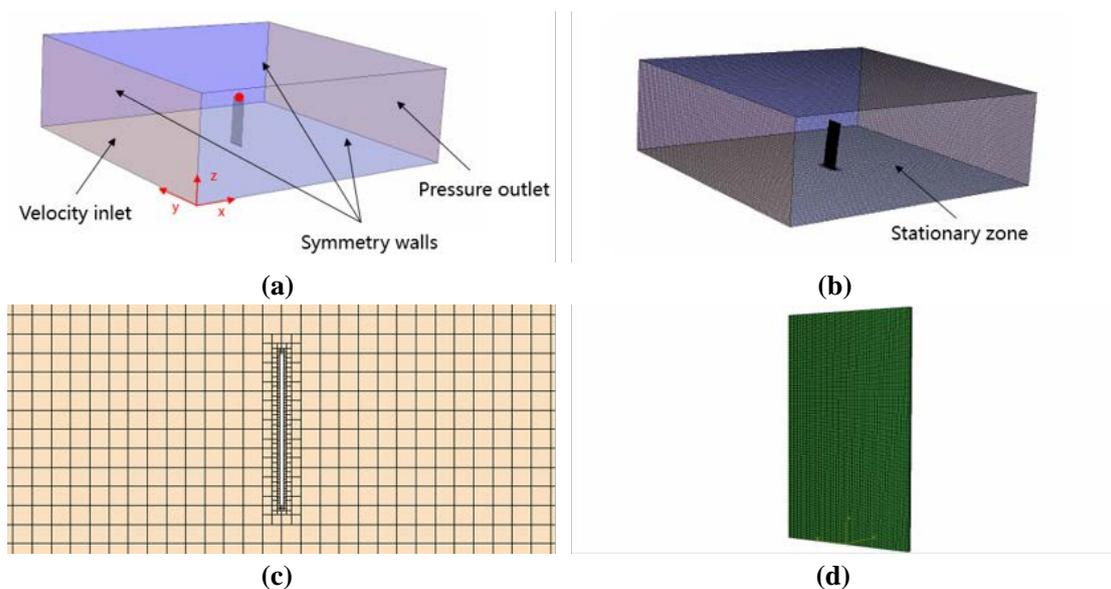


图 3-5 计算模型: (a) 计算域; (b) 计算域整体网格划分情况; (c) 平板周边网格划分情况; (d) 平板有限元模型三维视图

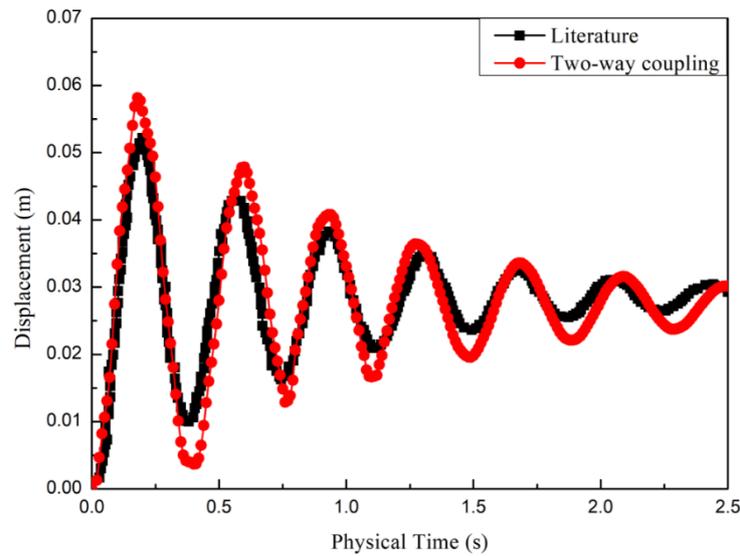


图 3-6 双向耦合算法数值模拟结果与文献数据^[56]的比较

3.4 垂直轴风力机风致响应分析

由于基于 STAR-CCM+和 ABAQUS 的双向耦合模拟计算成本较高，在能够清楚阐明垂直轴风力机周边流场特性和风致响应的前提下，本节仅给出 20 s 时间内的数值模拟结果。本章主要围绕垂直轴风力机第一种停机状态分析其表面风压分布、周边流场特性和风致响应，将第二种和第三种停机状态下的结果作为比较对象。

3.4.1 垂直轴风力机表面风压分布

表面风压对风力机结构的风致响应有着重要影响，本节在此讨论垂直轴风力机在风速分别为 $V_1 = 5 \text{ m/s}$ 、 $V_2 = 10 \text{ m/s}$ 和 $V_3 = 20 \text{ m/s}$ 的三种稳态风作用下的表面风压，并分析不同停机状态对结构表面风压分布的影响。图 3-7 给出了第一种停机状态下垂直轴风力机迎风面在 20 s 时的风压分布。结果表明在三种风荷载作用下风力机表面风压分布情况类似，随着风速的增长，表面风压显著增大。从图中可以发现，支撑塔架的风压分布基本沿 z 轴对称，逐渐由正压区向负压区转换。对于叶片 2，较大的正压力出现在靠近叶片后缘的中跨部分，之后逐渐向顶部、底部和前缘递减至 0.000 Pa 或负值。对于叶片 3，在叶片后缘的顶部和底部出现较大的正压力，而中部的压力较小。对于叶片 1，在三种情况下最大的负压力均出现在叶片右端，分别是 -38.888 Pa、-175.390 Pa 和 -729.210 Pa。从图 3-7 中还可以看出叶片 2 的表面风压分布较为规则，而叶片 3 较为混乱。这是因为叶片 2 首先与来流风发生相互作用，在扰乱流场的同时也影响了作用于后续结构的表面风压。

同时，在三种风荷载作用下垂直轴风力机表面风压分布也存在一定差异。如图 3-7 (a), (b) 所示，当风速为 $V_1 = 5 \text{ m/s}$ 和 $V_2 = 10 \text{ m/s}$ 时，风力机支撑塔架的上下两部分均出现最大正压力，分别是 16.891 Pa 和 61.121 Pa。然而，当风速达到 $V_3 = 20 \text{ m/s}$ 时，最大正压力 269.47 Pa 仅出现在支撑塔架的下半部分，如图 3-7 (c) 所示。此外，在三种荷载工况之间，当风速为 $V_2 = 10 \text{ m/s}$ 时，叶片 2 的较大正压力区域面积最大，而叶片 3 最小。原因可能是垂直轴风力机的变形逐渐引起表面风压的变化。

图 3-8 给出 10 m/s 风速时垂直轴风力机三种停机状态下表面风压分布的比较。从图中可以看出，三种停机工况下，风力机表面风压的最大值和最小值差异较小。对于第三种停机状态下叶片 2 的表面风压分布，相同的情况在第一种停机状态下叶片 3 上出现，如图 3-8 (a), (c) 所示。然而，不同停机状态下叶片的风压分布还是有着细微的差别。如图 3-8 (a), (b) 所示，

对于叶片 1，在第二种停机状态下，较大的正压力出现在靠近叶片前缘的中跨部分，而不是靠近叶片后缘，这与第一种停机状态下叶片 2 的表面风压分布情况不同。

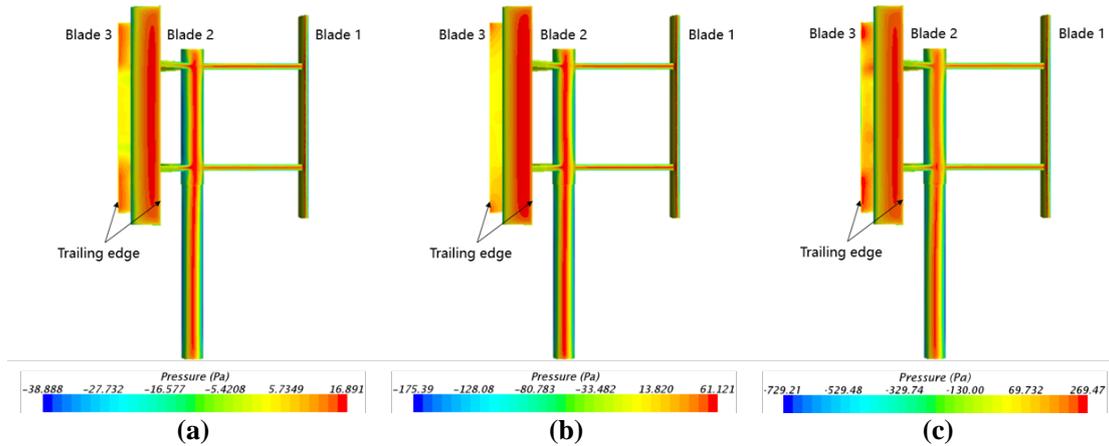


图 3-7 第一种停机状态下垂直轴风力机迎风面表面风压分布: (a) $V_1 = 5 \text{ m/s}$; (b) $V_2 = 10 \text{ m/s}$; (c) $V_3 = 20 \text{ m/s}$

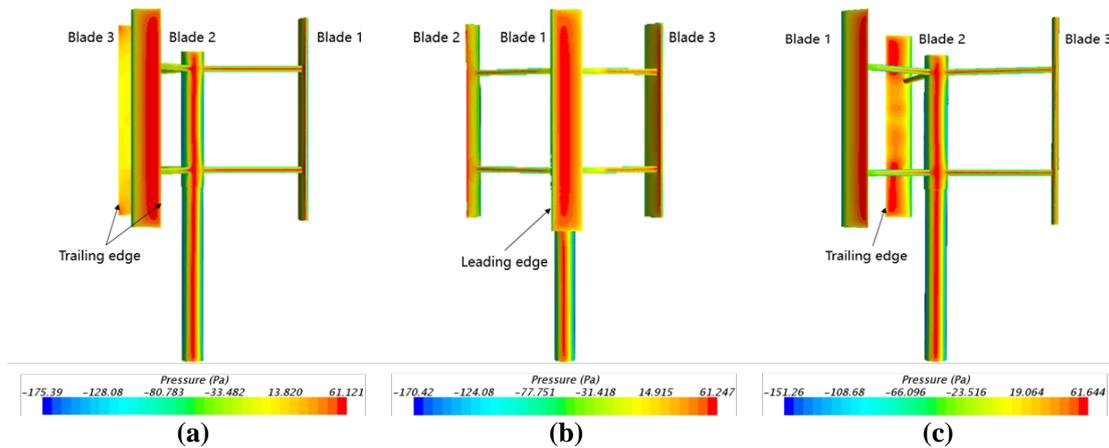


图 3-8 10 m/s 风速时三种停机状态下垂直轴风力机迎风面表面风压分布: (a) 第一种停机状态, $\theta = 0^\circ$; (b) 第二种停机状态, $\theta = 90^\circ$; (c) 第三种停机状态, $\theta = 135^\circ$

3.4.2 垂直轴风力机周边流场特性

对流场特性进行研究，有助于认识风荷载对风力机结构的作用机理。本节讨论垂直轴风力机在风速分别为 $V_1 = 5 \text{ m/s}$, $V_2 = 10 \text{ m/s}$ 和 $V_3 = 20 \text{ m/s}$ 的三种稳态风作用下的流场特性，并分析不同停机状态下风力机周边流场的差异。图 3-9 给出了第一种停机状态下垂直轴风力机水平截面 ($z = 7.5 \text{ m}$) 和竖直截面在 20 s 时的瞬时涡量图。两个截面的具体位置见图 3-3 (a)。如图 3-9 (a), (c), (f) 所示，随着支撑塔架高度的增加，涡量强度显著增大，湍流的三维运动特性愈发明显。从图中还可以看出，随着风速的增加，垂直轴风力机尾流的扰动范围持续扩大，相同的现象也可以从图 3-9 (b), (e), (g) 中发现。同时，支撑塔架近壁面的涡量强度显著增大，然而流场其他区域的涡量强度变化不明显，流场末端的涡旋结构以不对称的形式不断生成。

从图 3-9 (b), (e), (g) 可以看出，叶片 1 周围没有出现较大的涡旋，涡流附着在它的表面并且没有出现流动分离的现象。还可以清楚地看到，当风速增加时，叶片 2 和叶片 3 周围的涡旋结构发生显著的变化，涡旋基本消失，仅在叶片翼型截面的前缘和后缘形成两条带状涡流结构。这是因为流场的流速迅速增加，叶片周围的涡旋结构一旦发展就被带走，具体过程如图 3-9 (e), (f) 所示。当流场尚未完全发展时，在叶片翼型截面周围可以观察到一系列不同

强度的涡旋，支撑塔架后部出现明显的卡门涡街现象，其产生的脱落涡与叶片 3 发生相互作用。然而，当流场完全发展后，以上现象不再存在。

图 3-10 给出 10 m/s 风速时垂直轴风力机在三种停机状态下的水平截面和竖直截面的瞬时涡量图。从图 3-10 (a), (c) 可以看出第一种和第三种停机状态下的流场情况几乎没有差异。在第二种停机状态下，由于叶片和支撑臂与来流风的相互作用，风力机支撑塔架上半部分近壁面的涡量强度显著减弱。如图 3-10 (e) 所示，由于受到叶片 1 充分发展的尾流场的影响，支撑塔架后部的卡门涡街现象基本消失。此外，在第二种和第三种停机状态下叶片翼型截面周围的涡旋结构比第一种停机状态更丰富，说明叶片相对来流细微的位置变化也会导致流场的巨大改变。

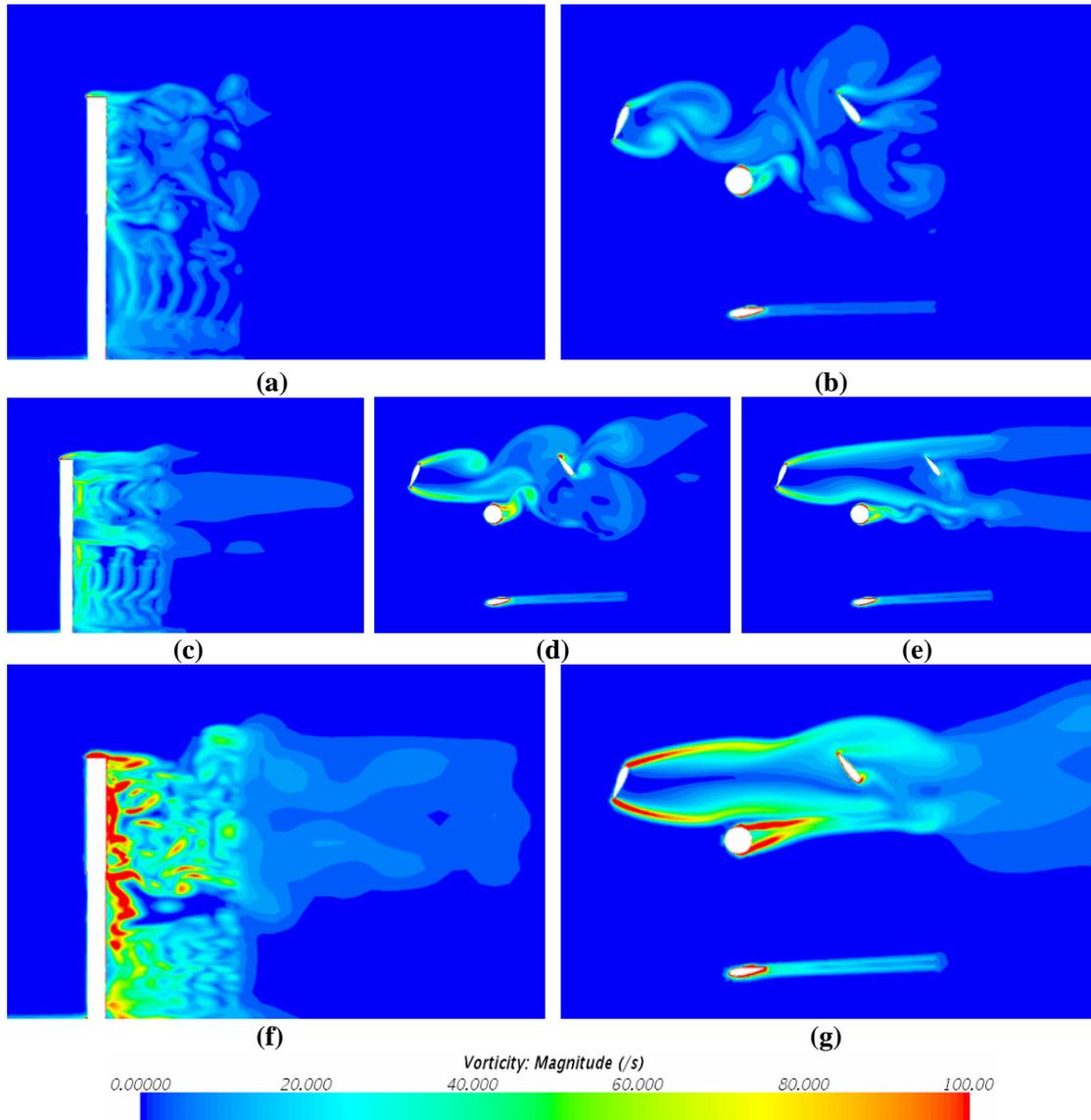


图 3-9 不同风速时垂直轴风力机瞬时涡量图: (a), (b) $V_1 = 5 \text{ m/s}$; (c), (d), (e) $V_2 = 10 \text{ m/s}$; (f), (g) $V_3 = 20 \text{ m/s}$

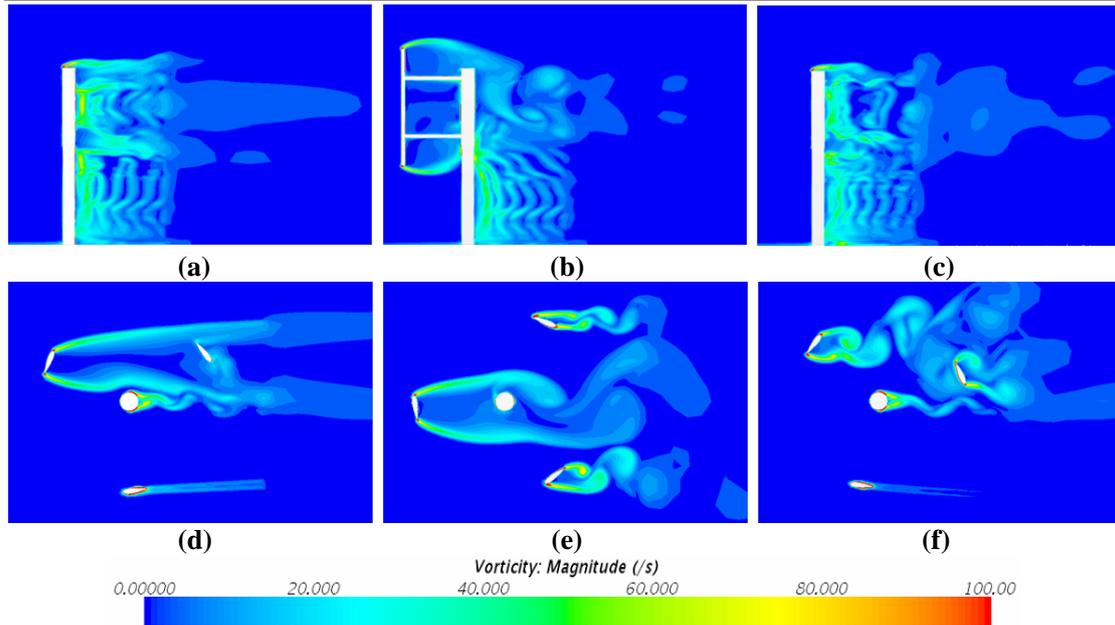
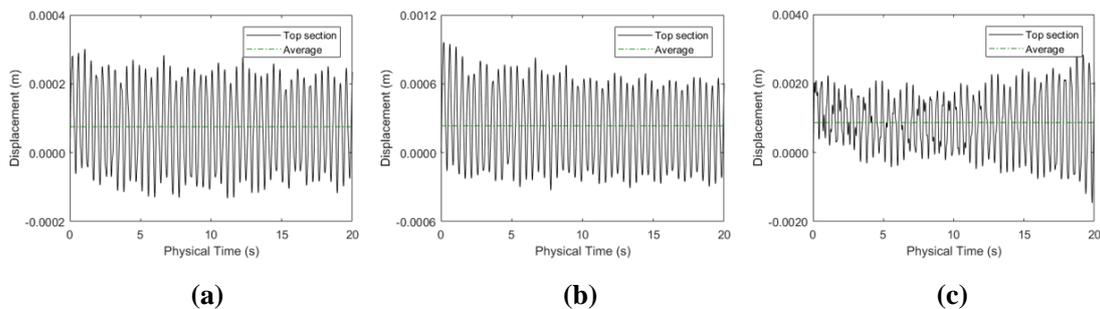


图 3-10 10 m/s 风速时三种停机状态下垂直轴风力机瞬时涡量图: (a), (d) 第一种停机状态, $\theta = 0^\circ$; (b), (e) 第二种停机状态, $\theta = 90^\circ$; (c), (f) 第三种停机状态, $\theta = 135^\circ$

3.4.3 垂直轴风力机风致响应

风致响应计算是评估风力机结构安全性的关键组成部分,本节讨论垂直轴风力机在三种稳态风作用下的风致响应,并分析不同停机状态对结构风致响应的影响。此外,对风力机支撑塔架、叶片和支撑臂典型截面的风致响应进行了比较。支撑塔架的顶部截面 ($z = 9.6 \text{ m}$) 和变截面处 ($z = 5.4 \text{ m}$),叶片的顶部截面 ($z = 10.65 \text{ m}$) 和底部截面 ($z = 4.35 \text{ m}$) 以及支撑臂的中跨部分 ($z = 5.925 \text{ m}, 9.075 \text{ m}$) 被选取为研究对象。这些典型截面的具体位置如图 3-1 (a) 所示。在不同风速下,计算三种停机状态下上述结构部件在 x 方向上的时程位移和速度响应,其中风速分别为 $V_1 = 5 \text{ m/s}$, $V_2 = 10 \text{ m/s}$ 和 $V_3 = 20 \text{ m/s}$ 。

图 3-11 和图 3-12 分别给出了垂直轴风力机支撑塔架在第一种停机状态下的位移和速度响应。具有代表性的风致响应数据在表 3-6 中给出。从图中可以发现在三种风荷载作用下,支撑塔架的位移响应表现出一定的周期性,在不同的平均值附近上下幅动,速度响应曲线也在 0.000 m/s 附近稳定地波动。在 Wang 等^[57]的研究中也获得了类似的结果。这表明在风荷载作用下,支撑塔架从自由振动平衡状态达到新的受迫振动平衡状态。在表 3-6 中还发现,支撑塔架顶部截面的位移和速度响应是变截面处的 2.5 倍,这与结构力学理论一致。同时,随着风速的增加,支撑塔架的风致响应显著增大,影响着垂直轴风力机的结构安全性。



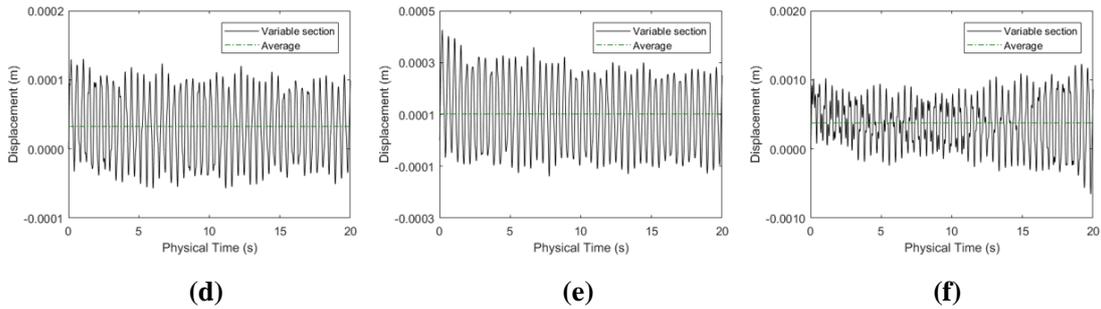


图 3-11 第一种停机状态下垂直轴风力机支撑塔架典型截面在 x 方向上的位移响应: (a), (d) $V_1 = 5 \text{ m/s}$; (b), (e) $V_2 = 10 \text{ m/s}$; (c), (f) $V_3 = 20 \text{ m/s}$

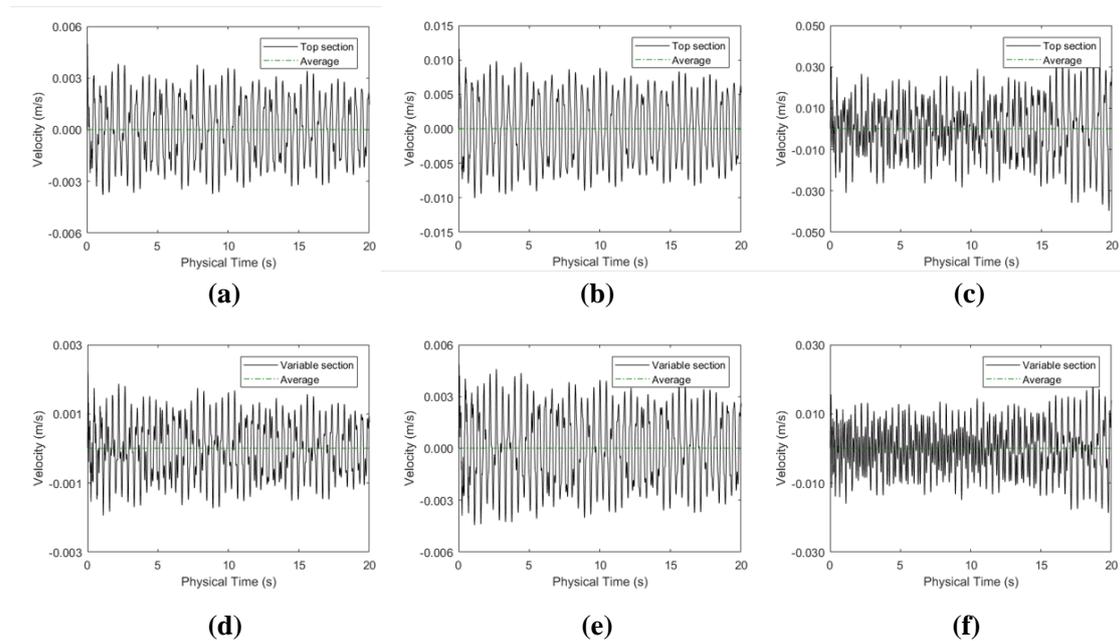


图 3-12 第一种停机状态下垂直轴风力机支撑塔架典型截面在 x 方向上的速度响应: (a), (d) $V_1 = 5 \text{ m/s}$; (b), (e) $V_2 = 10 \text{ m/s}$; (c), (f) $V_3 = 20 \text{ m/s}$

表 3-6 第一种停机状态下垂直轴风力机支撑塔架代表性风致响应数据

风速	5 m/s		10 m/s		20 m/s	
位置	顶部截面	变截面处	顶部截面	变截面处	顶部截面	变截面处
最大位移 (mm)	0.3009	0.1304	0.9627	0.4267	2.8610	1.2290
平均位移 (mm)	0.07558	0.03270	0.23480	0.10170	0.86640	0.37620
最大速度 (mm/s)	4.976	2.203	11.600	4.875	39.770	18.890

图 3-13 至图 3-18 分别给出了 $V_1 = 5 \text{ m/s}$, $V_2 = 10 \text{ m/s}$ 和 $V_3 = 20 \text{ m/s}$ 三种风速下垂直轴风力机叶片和支撑臂在第一种停机状态下的风致响应, 对应的代表性风致响应数据如表 3-7 所示。从图中和表中可以看出, 随着风速的增加, 风力机叶片与支撑臂的风致响应呈指数增长, 与支撑塔架风致响应情况相似。以 10 m/s 和 20 m/s 风速为例, 叶片 1 顶部截面在 10 m/s 风速下平均位移响应为 0.29350 mm , 而在 20 m/s 风速下达到 1.11300 mm , 两者间约

有 4 倍差距。与图 3-12 和图 3-13 对比可知，在相同风速下，风力机叶片和支撑臂的位移和速度响应均明显大于支撑塔架。对于叶片，原因可能是叶片由铝合金铸造，其密度和弹性模量都远低于钢材。对于支撑臂，较小的直径导致其刚度较低。此外，叶片与支撑臂之间的接触面积较小，导致连接节点处的力学特性不理想。这说明叶片和支撑臂应当受到更多的关注，在设计时要注意它们的变形是否满足垂直轴风力机正常使用的基本要求。

图 3-13，图 3-15 和图 3-17 表明风力机叶片顶部截面的风致响应比底部截面更大，同时叶片 1 的振动最剧烈，叶片 3 的振幅最小。在图 3-14，图 3-16 和图 3-18 中还发现，风力机上支撑臂的变形约为下支撑臂的 2 倍，支撑臂 1 变形最大，而支撑臂 3 形变最不明显。结合垂直轴风力机在第一种停放状态下的周边流场特性和表面风压分布情况，原因可能是叶片 2 和支撑臂 2 首先与来流风发生相互作用并扰乱流场，使叶片 3 和支撑臂 3 的表面风压降低，进而导致其风致响应减小。

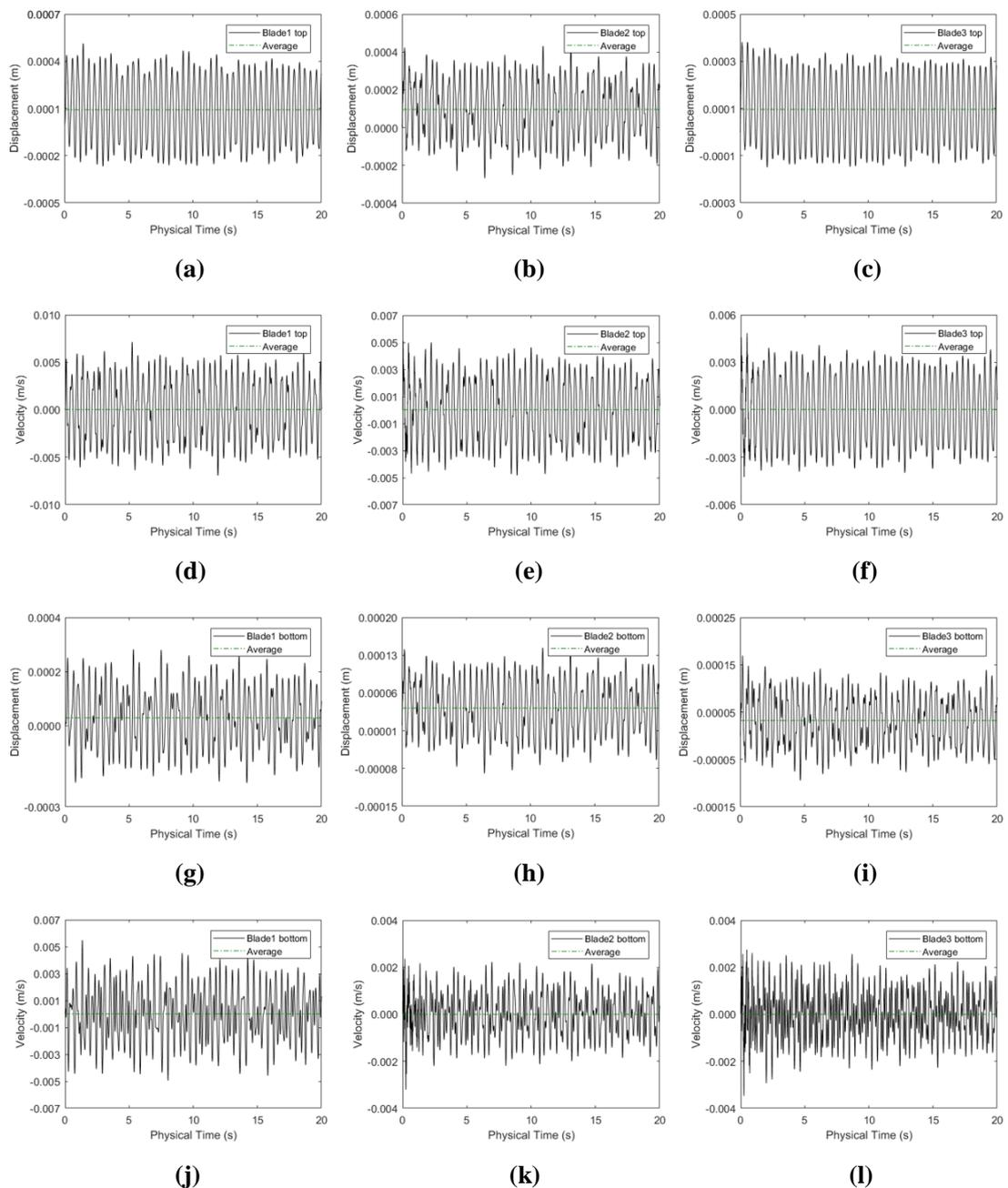


图 3-13 5 m/s 风速时第一种停机状态下垂直轴风力机叶片典型截面在 x 方向上的位移和速度响应: (a), (b), (c) 叶片顶部截面位移响应; (d), (e), (f) 叶片顶部截面速度响应; (g), (h), (i) 叶片底部截面位移响应; (j), (k), (l) 叶片底部截面速度响应

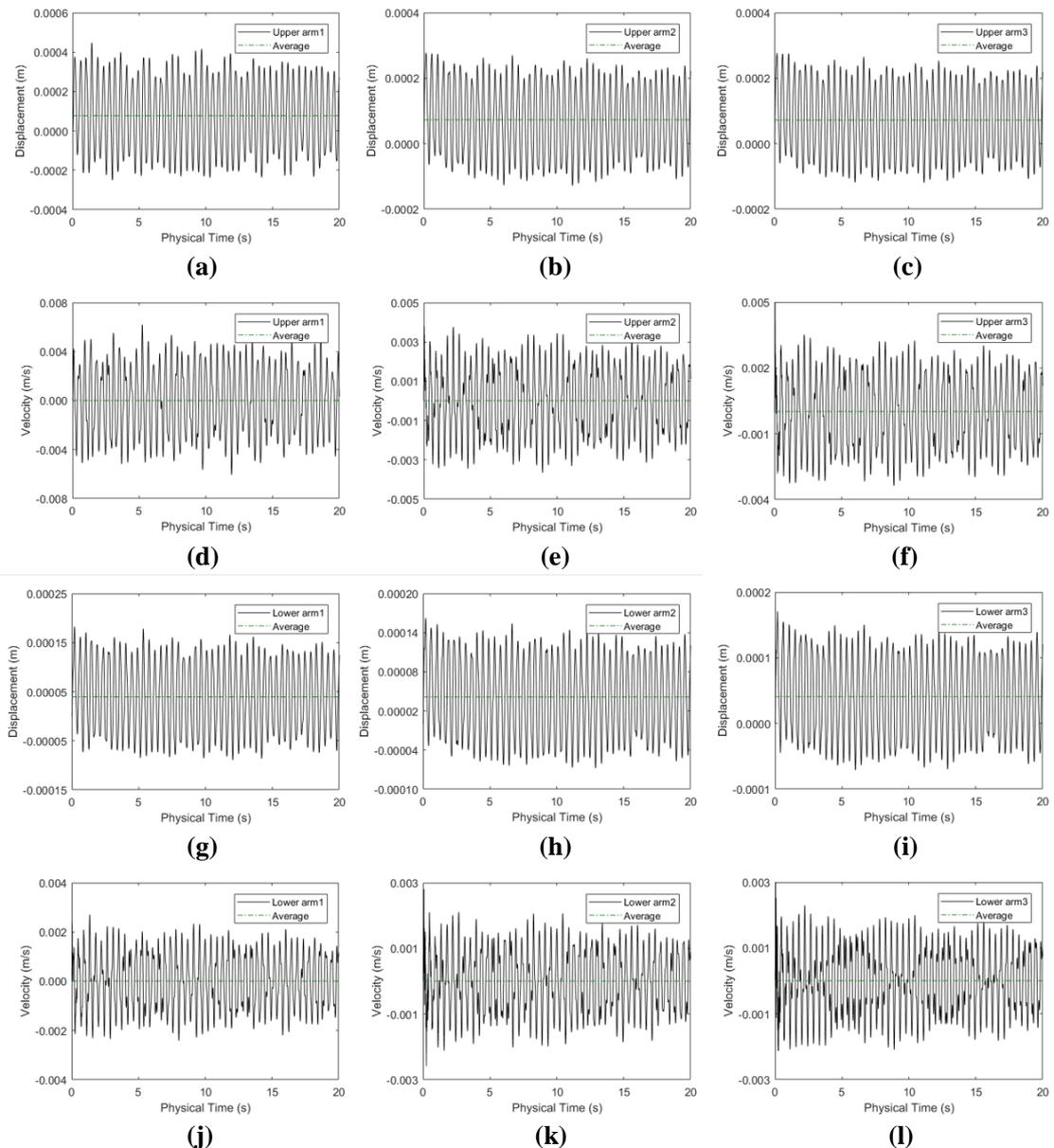
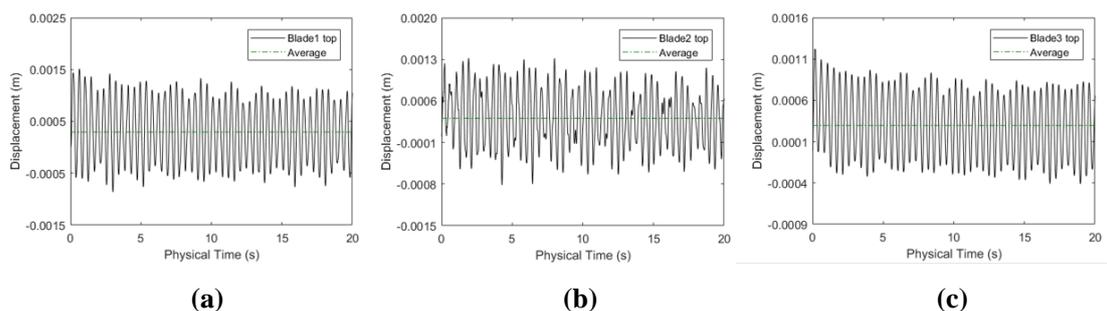


图 3-14 5 m/s 风速时第一种停机状态下垂直轴风力机支撑臂中跨部分在 x 方向上的位移和速度响应: (a), (b), (c) 上支撑臂位移响应; (d), (e), (f) 上支撑臂速度响应; (g), (h), (i) 下支撑臂位移响应; (j), (k), (l) 下支撑臂速度响应



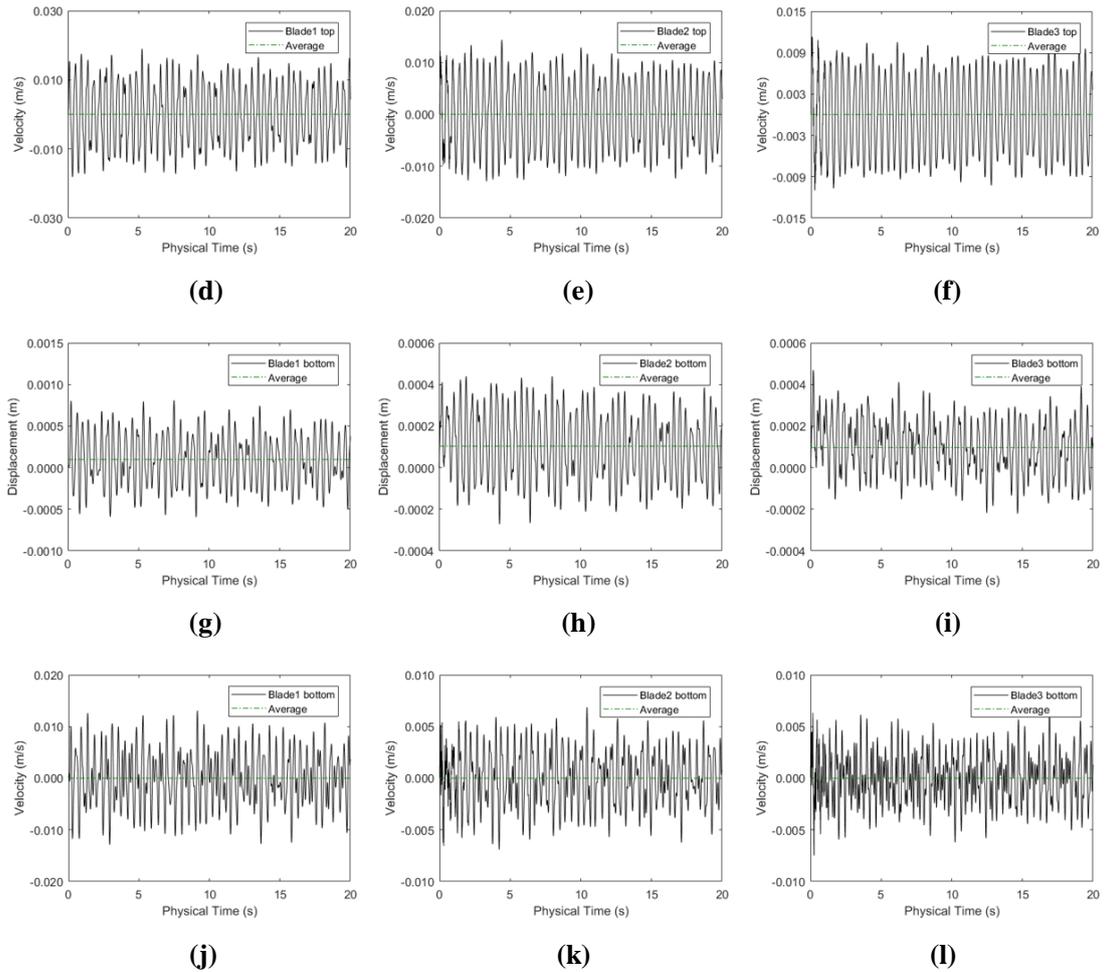
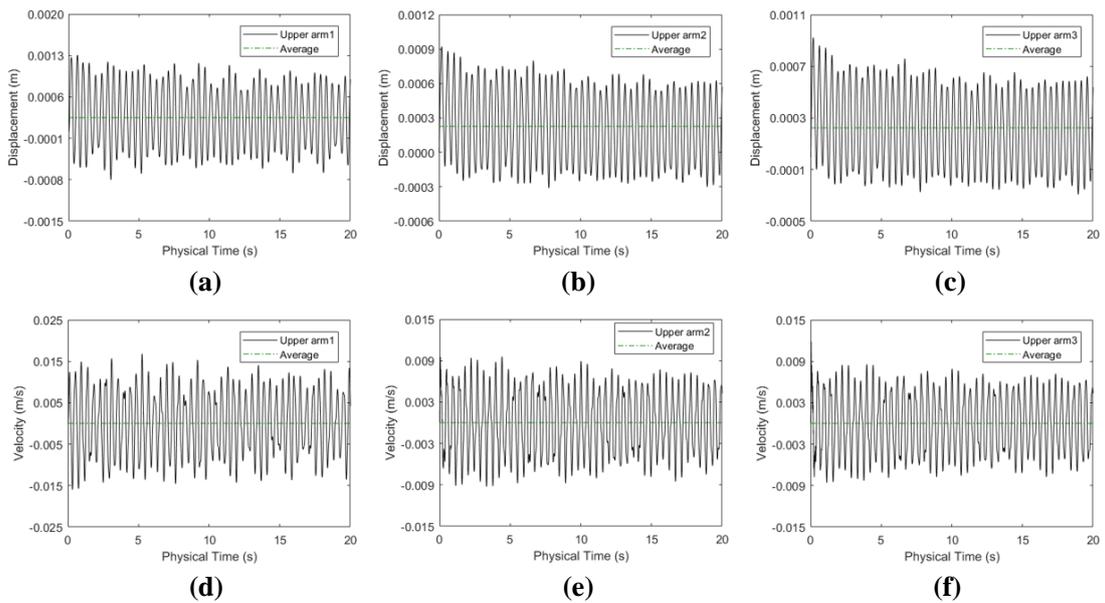


图 3-15 10 m/s 风速时第一种停机状态下垂直轴风力机叶片典型截面在 x 方向上的位移和速度响应: (a), (b), (c) 叶片顶部截面位移响应; (d), (e), (f) 叶片顶部截面速度响应; (g), (h), (i) 叶片底部截面位移响应; (j), (k), (l) 叶片底部截面速度响应



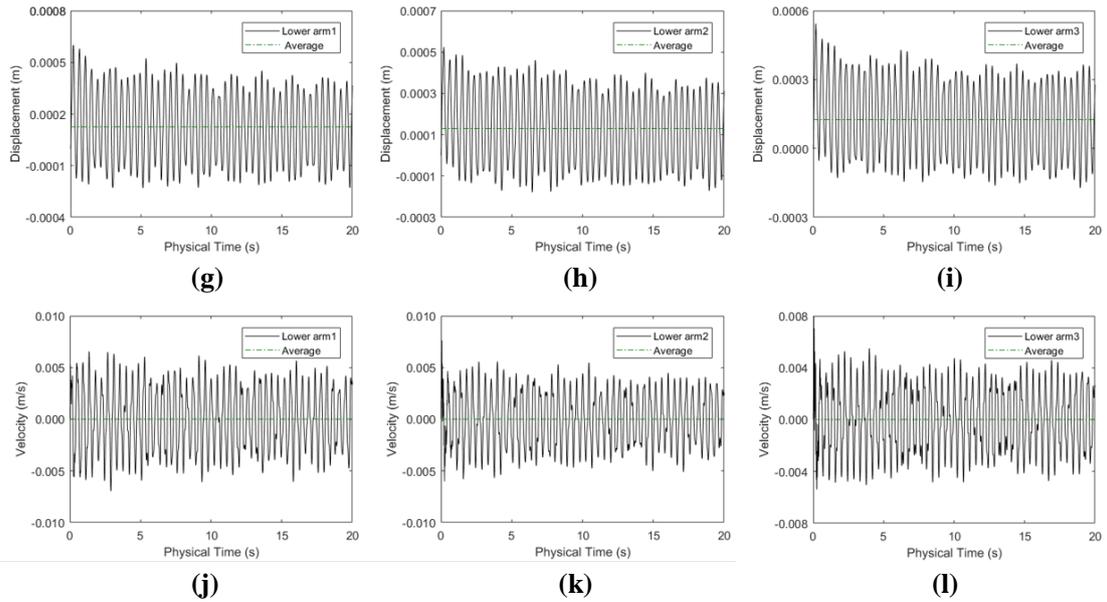
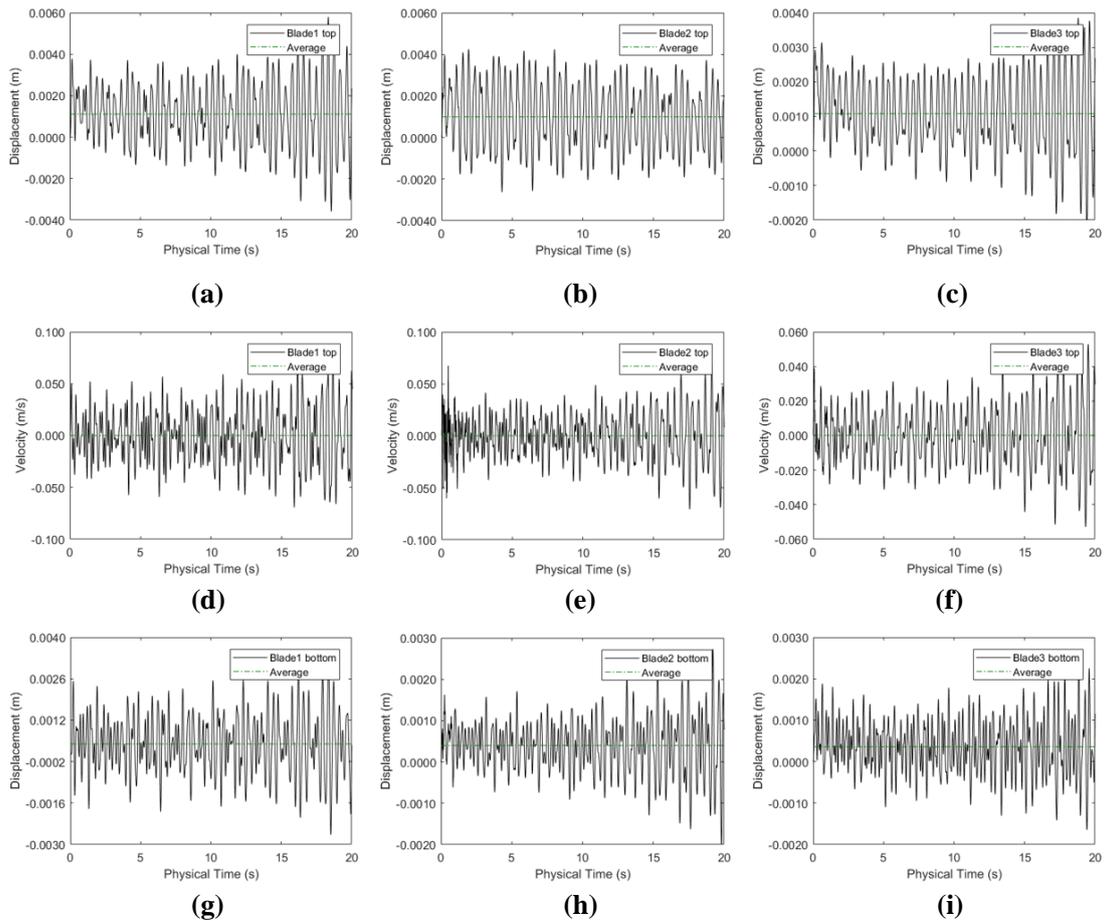


图 3-16 10 m/s 风速时第一种停机状态下垂直轴风力机支撑臂中跨部分在 x 方向上的位移和速度响应: (a), (b), (c) 上支撑臂位移响应; (d), (e), (f) 上支撑臂速度响应; (g), (h), (i) 下支撑臂位移响应; (j), (k), (l) 下支撑臂速度响应



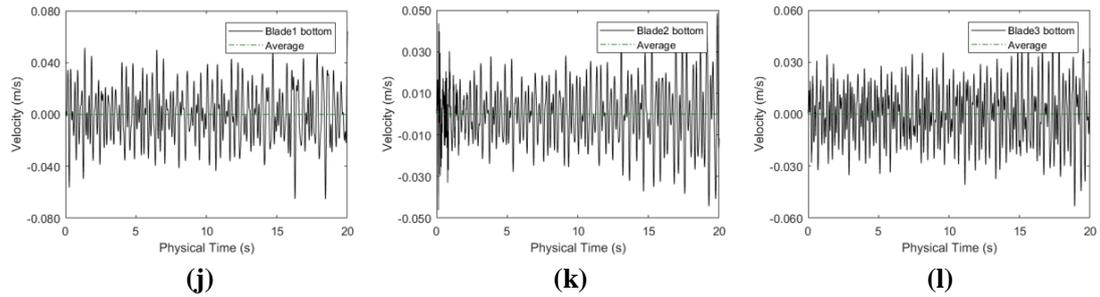


图 3-17 20 m/s 风速时第一种停机状态下垂直轴风力机叶片典型截面在 x 方向上的位移和速度响应: (a), (b), (c) 叶片顶部截面位移响应; (d), (e), (f) 叶片顶部截面速度响应; (g), (h), (i) 叶片底部截面位移响应; (j), (k), (l) 叶片底部截面速度响应

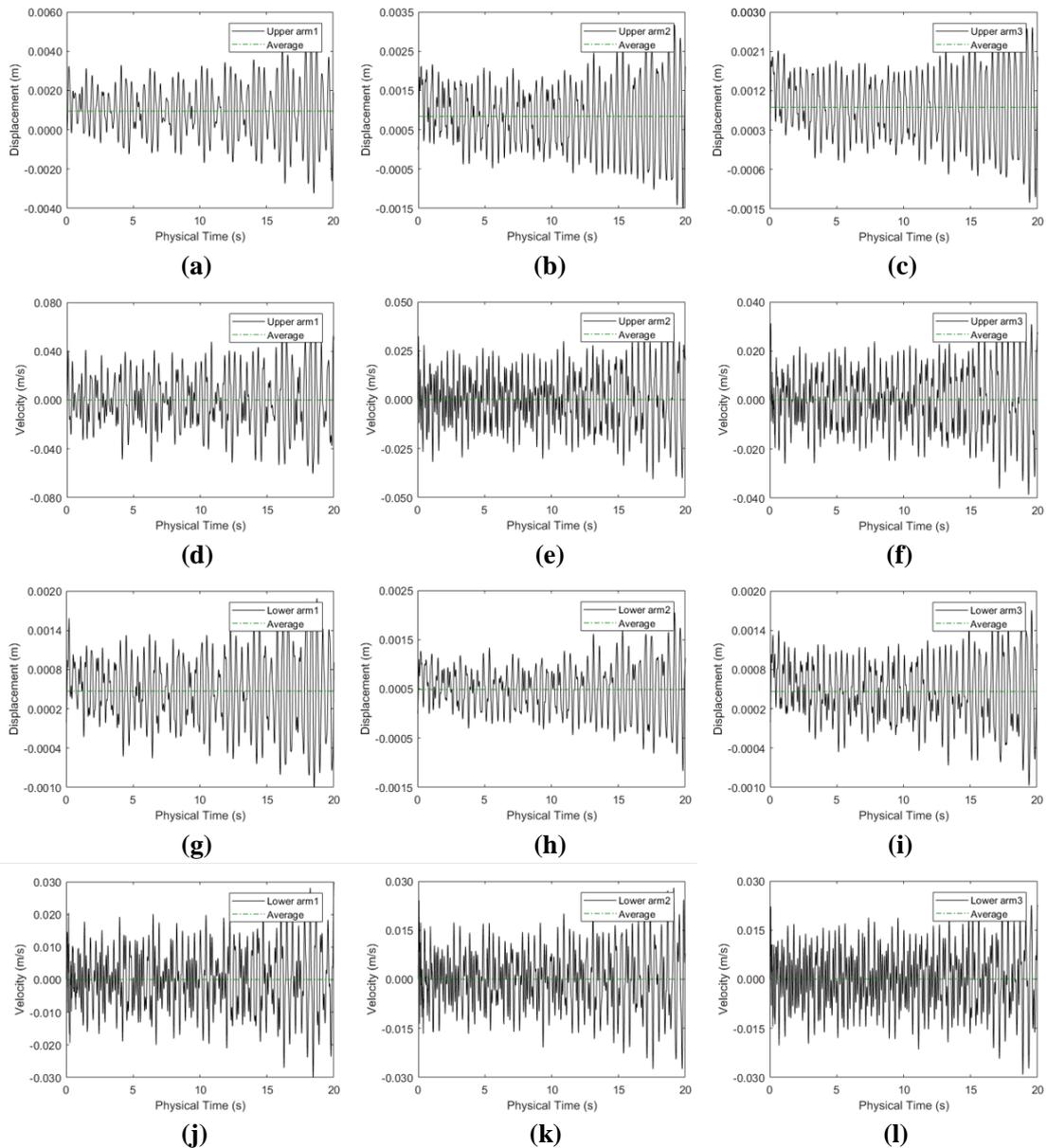


图 3-18 20 m/s 风速时第一种停机状态下垂直轴风力机支撑臂中跨部分在 x 方向上的位移和速度响应: (a), (b), (c) 上支撑臂位移响应; (d), (e), (f) 上支撑臂速度响应; (g), (h), (i) 下支撑臂位移响应; (j), (k), (l) 下支撑臂速度响应

表 3-7 第一种停机状态下垂直风力机叶片和支撑臂代表性风致响应数据

风速	5 m/s		10 m/s		20 m/s	
	叶片 1 顶部截面	上支撑臂 1 中跨部分	叶片 1 顶部截面	上支撑臂 1 中跨部分	叶片 1 顶部截面	上支撑臂 1 中跨部分
最大位移 (mm)	0.5131	0.4476	1.5130	1.3080	5.7930	5.1480
平均位移 (mm)	0.09147	0.07708	0.29350	0.24880	1.11300	0.94850
最大速度 (mm/s)	7.131	6.203	18.990	16.800	80.500	69.170

停机状态的改变可能会对垂直轴风力机结构安全性造成不利影响。表 3-8 给出了 10 m/s 风速时垂直轴风力机在三种停机状态下支撑塔架风致响应的比较。从表中可以看出，第一种停机状态下风力机支撑塔架的平均位移和最大速度相对最小，第三种停机状态下支撑塔架的平均位移显著大于第一种和第二种停机状态。然而，考虑到三种状态下风力机支撑塔架的变形均远低于正常使用下的极限值，可以忽略不同停机状态对垂直轴风力机风致响应的影响。

表 3-8 10 m/s 风速时三种停机状态下垂直轴风力机支撑塔架代表性风致响应数据的比较

风速	10 m/s					
	第一种		第二种		第三种	
位置	顶部截面	变截面处	顶部截面	变截面处	顶部截面	变截面处
最大位移 (mm)	0.9627	0.4267	0.9290	0.4028	0.9759	0.4225
平均位移 (mm)	0.23480	0.10170	0.26100	0.11170	0.28160	0.12190
最大速度 (mm/s)	11.600	4.875	11.910	6.328	11.870	5.393

3.5 垂直轴风力机疲劳损伤分析

研究疲劳问题对提高风力机结构的安全性和耐久性有重要意义，本节选取 10 m/s 稳态风作为垂直轴风力机疲劳损伤分析的荷载工况，在保证研究结果具有普适性的基础上，针对第一种停机状态下的风力机结构开展疲劳损伤分析。从 STAR-CCM+ 中导出风力机在 10 m/s 稳态风作用下的表面风压时程，并作为风荷载施加于 ABAQUS 中的风力机有限元模型，运用结合 Newmark 方法的隐式动力学算法计算风力机结构应力时程响应。图 3-19 给出第一种停机状态下垂直轴风力机迎风面在 20 s 时的应力云图。从图中可见，垂直轴风力机支撑臂与支撑塔架连接节点处的应力最大，这意味着当风力机承受荷载长期反复作用时，该连接节点处的疲劳损伤最大，是决定风力机结构疲劳寿命的关键部位。

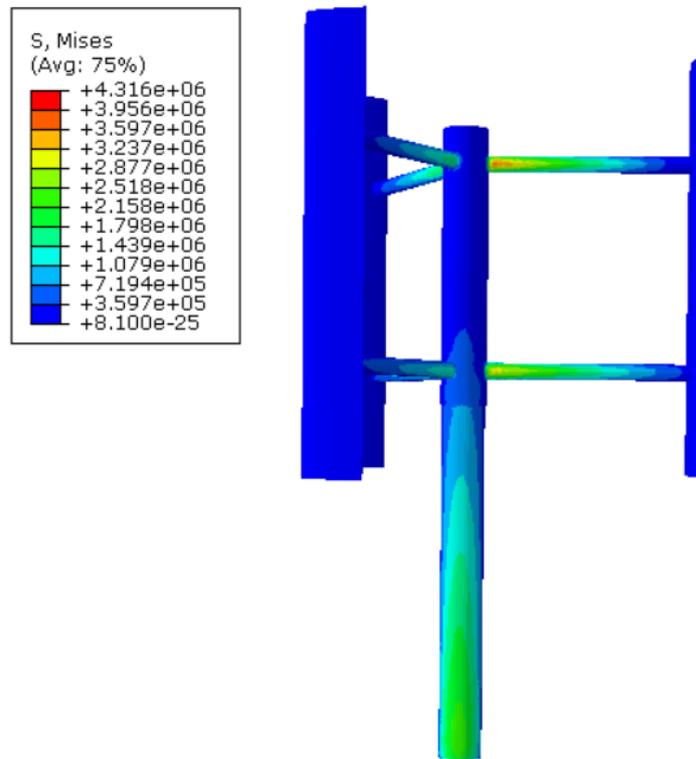


图 3-19 10 m/s 风速时第一种停机状态下垂直轴风力机迎风面应力云图

图 3-20 给出垂直轴风力机关键部位的应力时程曲线。利用数学分析软件 MATLAB 编制基于三峰谷计数原则的雨流计数法程序，见图 3-21。经过雨流计数法和平均应力修正的处理，得到风力机关键部位各应力幅实际循环次数的统计结果，如图 3-22 和表 3-9 所示。从中可见，风力机关键部位的应力幅值集中在 3 MPa-4 MPa 之间，分布较为密集。

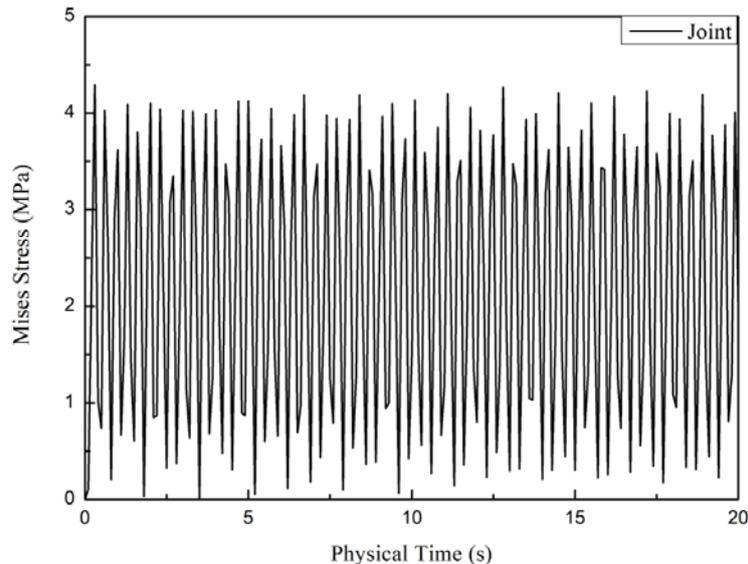


图 3-20 垂直轴风力机关键部位应力时程曲线

```

clc;
clear;
C=xlsread('stress'); %读取应力时程
B=C;
A=C;
q=length(A);
%对应力时程进行处理,只保留峰值
for i=2:1:q-1
    if A(i-1)<A(i)&&A(i)<A(i+1)
        B(i)=NaN;
    elseif A(i-1)>A(i)&&A(i)>A(i+1)
        B(i)=NaN;
    end
end
B(isnan(B))=[]; %删去NaN
%对应力时程改造,使从最大值拆开,前后拼接,使从最大值开始最值结束
[a,b]=max(B);
n=length(B);
B1=B(b:n);
B2=B(1:b);
B=[B1;B2];

%雨流计数法参数,应力幅值F,平均应力J
F=[];J=[];
while n>=1
    if n==1
        break
    elseif n>1
        for j=1:1:n-2
            s1=abs(B(j)-B(j+1));
            s2=abs(B(j+1)-B(j+2));
            e=(B(j)+B(j+1))/2;
            if s1<=s2
                F=[F;s1];
                J=[J;e];
            else
                break;
            end
        end
    end
end
end
continue
end

```

图 3-21 雨流计数法 MATLAB 程序

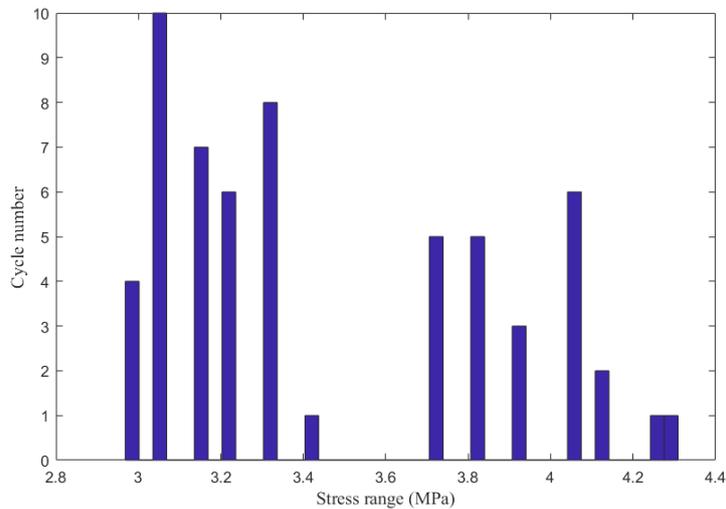


图 3-22 垂直轴风力机关键部位应力幅实际循环次数统计柱状图

表 3-9 不同应力幅实际循环次数

应力幅值 (MPa)	循环次数	应力幅值 (MPa)	循环次数	应力幅值 (MPa)	循环次数
2.968	4	3.049	10	3.164	7
3.228	6	3.332	8	3.418	1
3.727	5	3.834	5	3.922	3
4.057	6	4.122	2	4.272	1
4.309	1	-	-	-	-

垂直轴风力机的支撑臂与支撑塔架由钢材建造,根据挪威船级社制定的《海上风力机结构设计规范》^[51]要求,考虑钢结构的自由腐蚀,风力机关键部位的 S-N 材料特性曲线为:

$$\log_{10}N = 11.687 - 3\log_{10}(1.581\Delta\sigma) \quad (3-1)$$

式中, N 和 $\Delta\sigma$ 分别为应力幅疲劳破坏循环次数和应力幅值。将表 3-9 中各应力幅值带入上式,计算得到不同应力幅对应的疲劳破坏循环次数,如表 3-10 所示。从表中可见,垂直轴风力机结构在各应力幅循环作用下发生疲劳破坏的概率较为接近。根据线性疲劳累积

损伤准则 (式 (2-8)), 计算得到各应力幅在 20 s 时间内对风力机关键部位造成的疲劳损伤分量, 如表 3-11 所示。通过上述计算, 风力机关键部位在 20 s 时间内承受的疲劳损伤总量为 $2.086e-8$, 由此评估该直线翼垂直轴风力机在 10 m/s 稳态风作用下的疲劳寿命为 30.397 年, 满足规范中对风力机疲劳寿命的基本要求。

表 3-10 不同应力幅疲劳破坏循环次数

应力幅值 (MPa)	循环次数	应力幅值 (MPa)	循环次数	应力幅值 (MPa)	循环次数
2.968	4.708e9	3.049	4.342e9	3.164	3.886e9
3.228	3.659e9	3.332	3.327e9	3.418	3.082e9
3.727	2.377e9	3.834	2.184e9	3.922	2.040e9
4.057	1.843e9	4.122	1.757e9	4.272	1.579e9
4.309	1.538e9	-	-	-	-

表 3-11 不同应力幅疲劳损伤分量

应力幅值 (MPa)	疲劳损伤	应力幅值 (MPa)	疲劳损伤	应力幅值 (MPa)	疲劳损伤
2.968	8.496e-10	3.049	2.303e-9	3.164	1.801e-9
3.228	1.640e-9	3.332	2.405e-9	3.418	3.245e-10
3.727	2.103e-9	3.834	2.289e-9	3.922	1.471e-9
4.057	3.256e-9	4.122	1.138e-9	4.272	6.333e-10
4.309	6.502e-10	-	-	-	-

3.6 本章小结

本章综合运用计算流体力学方法, 有限元分析技术和结构疲劳分析方法, 开展直线翼垂直轴风力机风致响应和疲劳分析。在验证双向耦合算法有效性的基础上, 研究不同风荷载作用下垂直轴风力机的表面风压分布, 周边流场特性, 计算风力机及其支撑结构的风致响应, 同时分析不同停机状态对风力机以上特性的影响。然后本章针对 10 m/s 稳态风荷载工况, 基于线性疲劳累积损伤准则, 运用雨流计数法和平均应力修正法, 对直线翼垂直轴风力机的疲劳问题进行深入探究并评估其疲劳寿命。主要结论如下:

(1) 基于 STAR-CCM+和 ABAQUS 的双向耦合算法可以有效模拟结构的动态特性, 在计算结构风致响应的同时能够捕捉结构周边的流场情况。

(2) 直线翼垂直轴风力机迎风面的表面风压分布在部分工况下相似, 随着风速的增加, 表面风压显著增大。风力机叶片表面的压力分布呈现一定的规律性, 叶片与来流的相互作用会影响后部结构的表面风压分布。垂直轴风力机的变形会影响最大正压在支撑塔架上的分布情况。在不同停机状态下, 风力机表面风压的极值差异较小。

(3) 随着风速的增加, 直线翼垂直轴风力机周边湍流的三维特性和尾流扰动效应愈发明显。同时, 叶片翼型截面附近的涡旋结构发生显著变化, 可能会对垂直轴风力机的风致响应造成影响。叶片与来流相对位置的细微变化会导致垂直轴风力机周边流场的巨大改变。

(4) 在风荷载作用下, 直线翼垂直轴风力机在固定位置正常工作, 并伴随着轻微振动。由于较大的位移和速度响应, 在垂直轴风力机的设计过程中, 应重点关注叶片和支撑臂以保证风力机的结构安全性。不同停机状态对垂直轴风力机风致响应的影响可以忽略。

(5) 该直线翼垂直轴风力机的疲劳寿命为 30.397 年, 满足设计的要求。

根据本章主要研究内容以第一作者身份投稿国际 SCI 期刊《Energy Science & Engineering》，现已录用。

Limin Kuang, Jie Su, Yaoran Chen, Zhaolong Han, Dai Zhou, Yongsheng Zhao, Zhiyu Jiang, Yan Bao. Flow characteristics and dynamic responses of a parked straight-bladed vertical axis wind turbine[J]. Energy Science & Engineering, accepted. **SCI Cited, IF=3.553**.

第四章 直线翼垂直轴风力机非定常气动特性研究

4.1 引言

垂直轴风力机在运行状态下周边流场流速变化频繁，处于不稳定状态。长期经受这类非定常气动效应，会导致叶片疲劳损伤，减少风力机使用寿命，同时对风力机工作效能造成不利影响，因此有必要对风力机在非定常流作用下的空气动力学性能进行深入研究。本章针对三叶片直线翼垂直轴风力机，运用计算流体力学软件 STAR-CCM+ 并引入 SST $k-\omega$ 湍流模型，开展风力机非定常气动特性研究，基于数值模拟方法的可靠性，分析风力机运行过程中各项气动参数的变动规律，以风轮速度分布和涡旋结构为切入点揭示风力机工作机理，以期对直线翼垂直轴风力机科学设计和运行提供参考。

4.2 数值模型

4.2.1 风力机模型

基于对相关文献分析，根据 Li 等^[15]的风洞实测选取垂直轴风力机模型。在结构设计软件 Unigraphics NX 中建立其几何模型，之后导入 STAR-CCM+ 中进行三维旋转数值模拟。图 4-1 为风力机的几何模型示意图，叶片采用弦长为 $c = 265 \text{ mm}$ 的 NACA0021 翼型，叶片高度为 $h = 1200 \text{ mm}$ ，安装角为 $\beta = 8^\circ$ 。风力机支撑塔架直径 $d_1 = 60 \text{ mm}$ ，高度 $H = 1650 \text{ mm}$ ，支撑臂直径为 $d_2 = 30 \text{ mm}$ ，风轮直径为 $D = 2000 \text{ mm}$ 。在此模型中，垂直轴风力机在 8 m/s 稳态风工况下运行，为探索风力机最优工作效能，并保证结果的普适性，在合理范围内设置叶尖速比为 $0.84\text{-}2.20$ ，相应旋转角速度为 $6.72\text{-}17.6 \text{ rad/s}$ 。此外，已有研究显示支撑臂对垂直轴风力机工作效能和各项气动参数的影响较小，同时为减小计算成本和提高计算效率，在数值模拟中忽略垂直轴风力机的支撑臂，如图 4-1 (b) 所示^[58]。垂直轴风力机三个叶片以 120° 方位角间隔布置，以叶片 1 方位角为 $\theta = 0^\circ$ 时作为风力机运行的初始位置，将 $\theta = 0^\circ\text{-}180^\circ$ 的区域划分为上游区段， $\theta = 180^\circ\text{-}360^\circ$ 的区域划分为下游区段，如图 4-1 (c) 所示。

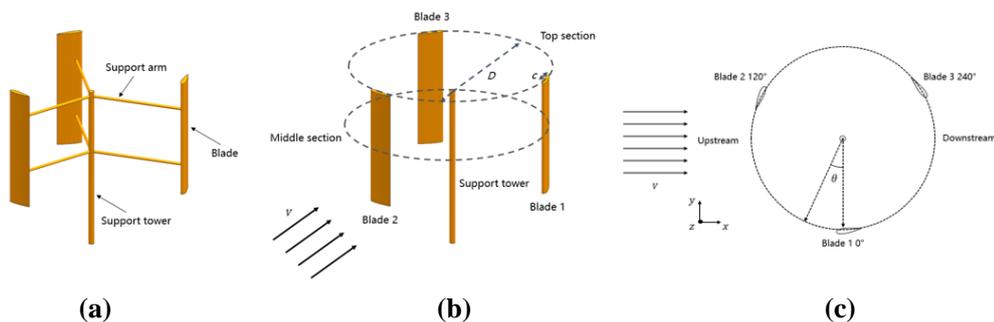


图 4-1 垂直轴风力机几何模型: (a) 三维视图; (b) 三维视图 (不含支撑臂); (c) 俯视图

4.2.2 计算流体力学模型

利用 STAR-CCM+ 软件环境构建三维流场计算域模型，如图 4-2 所示。由于垂直轴风力机处于运行状态，流场计算域包含外部固定域和内部旋转域。固定域的长、宽和高分别设置为 40000 mm ($20D$)， 20000 mm ($10D$) 和 5000 mm ($2.5D$)，旋转域的直径和高度分别设置为 4000 mm ($2D$) 和 2500 mm ($1.25D$)，以上尺寸的设定是基于 Lei 等^[7]，Ma 等^[9]，Elkhoury 等^[59]，Bedon 等^[60]和 Rezaeiha 等^[61, 62]的研究。对于固定域，入口和出口分别设置为速度进口 (V

= 8 m/s) 和压力出口 ($P = 0.0 \text{ Pa}$), 其他边界均设置为滑移壁面, 入口处来流的湍流强度设置为 1%。对于旋转域, 垂直轴风力机的表面设置为无滑移壁面。固定域与旋转域之间的重合面设置为交界面, 用于传递数值模拟过程中产生的质量、动量、压力等数据信息。风力机的运行运用重合面滑移网格技术实现。

三维流场计算域的网格拓扑也在 STAR-CCM+ 中利用自动网格划分技术完成, 整体采用非结构化切割体网格, 如图 4-2 (b) 所示。在旋转域周围与固定域尾流区设置加密网格, 在提高数值模拟精确度的同时获得风力机的尾流特性^[63], 流场计算域网格总数量约为 540 万。图 4-2 (c), (d) 分别显示了风力机叶片表面和边界层网格的划分情况, 叶片和支撑塔架表面棱柱层共 30 层, 层间增长率为 1.1, 总厚度为 0.006 m, 保证了第一层棱柱层网格质心到叶片和支撑塔架表面的无量纲距离 $y^+ < 1$ 。

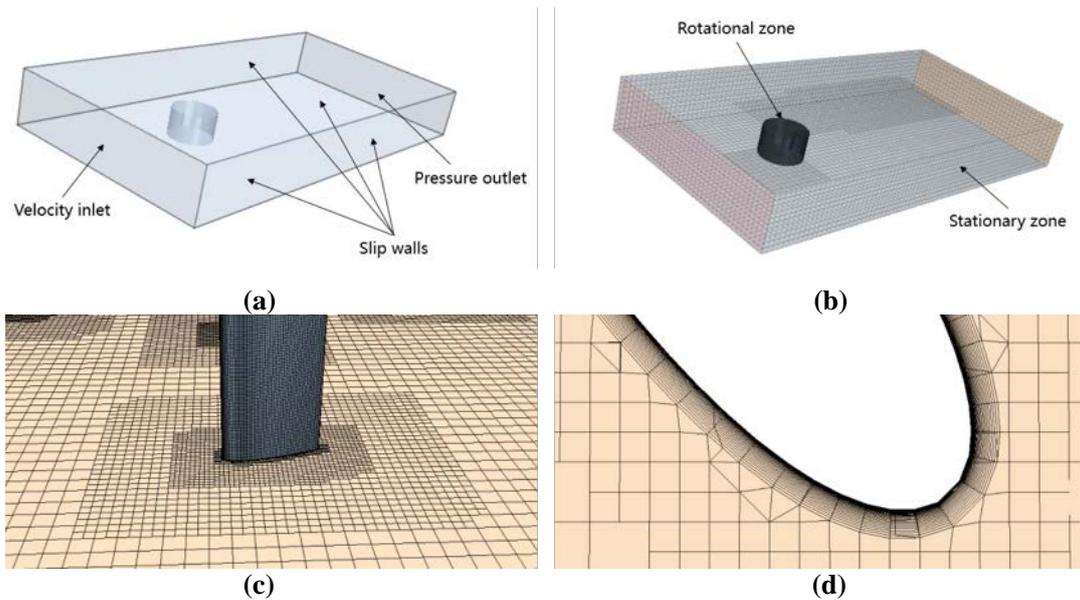


图 4-2 三维流场计算域模型: (a) 流场计算域模型; (b) 非结构化网格整体划分情况; (c) 风力机叶片周围网格划分情况; (d) 叶片边界层网格划分情况

4.2.3 时间步长测试

时间步长设置是数值模拟过程中的关键部分, 它对计算成本和精确度有重要的影响。因此, 在正式计算之前需要对计算流体力学模型进行时间步长测试。本节选取了三种不同的时间步长进行比较, 分别对应着垂直轴风力机旋转 1° , 2° 和 4° 所耗费的时间, 即 $T/360$, $T/180$ 和 $T/90$, T 是风力机旋转一周所需要的时间。

根据 Lei 等^[7]的研究, 定义直线翼垂直轴风力机的叶尖速比为:

$$\lambda = \frac{\omega D}{2V} \quad (4-1)$$

在 Posa 等^[27]的研究基础上, 定义直线翼垂直轴风力机的功率系数 C_p 为:

$$C_p = \frac{Q\omega}{\rho V^3 h D / 2} \quad (4-2)$$

上两式中, ω , D , V , Q , ρ 和 h 分别为风力机旋转角速度, 风轮直径, 入口来流速度, 风力机总转矩, 空气密度和叶片高度。

表 4-1 是在风力机叶尖速比 $\lambda = 1.82$ 下的时间步长测试对比情况, 即基于 SST $k-\omega$ 湍流模型的数值模拟结果与风洞实测^[15]的功率系数 C_p 值的比较。从表中看出, 当时间步长

为 T/360 和 T/180 时，数值模拟结果与风洞实测数据相契合，相对误差均在可接受范围内，分别为-7.37%和-7.89%，而在 T/90 情况下，数值模拟结果与风洞实测数据相比偏差较大，相对误差达到了-22.63%。因此，综合考虑计算成本和精确度，本文选取 T/180 的时间步长。

表 4-1 风力机叶尖速比 $\lambda = 1.82$ 下的时间步长测试

时间步长	数值模拟	风洞实测	相对误差
T/360	0.176	0.190	-7.37%
T/180	0.175	0.190	-7.89%
T/90	0.147	0.190	-22.63%

4.2.4 求解器设置

在 STAR-CCM+ 中，二阶迎风格式和二阶中心差分格式分别用于 SST $k-\omega$ 湍流模型中对流项和扩散项的离散。采用隐式非定常分离流法求解离散方程，并应用结合高斯-赛德尔迭代方法的 AMG 技术。同时，运用基于 SIMPLE 算法的压力-修正方法实现连续性方程和动量方程的耦合，并通过迭代方式获得压力方程和速度方程的数值解。

为保证三维非定常流场的充分发展，将垂直轴风力机旋转 8 周所需的时间设为数值模拟总时间，时间步长设为 T/180，在一个时间步长中设置 20 次迭代，以便在较低计算成本的基础上达到数值模拟的收敛。基于在上述时间步长测试中良好的收敛表现，亚松弛因子与 STAR-CCM+ 的默认设置保持一致，取为 0.8。所有的数值模拟均在一台小型服务器 (Intel (R) Xeon (R) CPUs (E5-2630 v3)) 上并行完成，完成一个时间步的计算大约需要 180 s。

4.3 数值模拟与结果分析

4.3.1 垂直轴风力机功率系数分析

功率系数 C_p 能够直接反映垂直轴风力机的工作效能。基于前述数值模拟方法和 SST $k-\omega$ 湍流模型，计算得到风力机在不同叶尖速比下的功率系数 C_p 。图 4-3 给出数值模拟所得结果与风洞实测数据^[15]的比较。从图中可见，数值模拟下的功率系数 C_p 与风洞实测所得的变动规律契合良好，均呈“山峰”状分布。随着叶尖速比逐渐提高，风力机功率系数先升高后降低，在风力机叶尖速比 $\lambda = 1.82$ 时，风能利用率最大，达到 0.175。因此，若在风力机运行中注意调节控制叶片转速，可有效提高其工作效能。

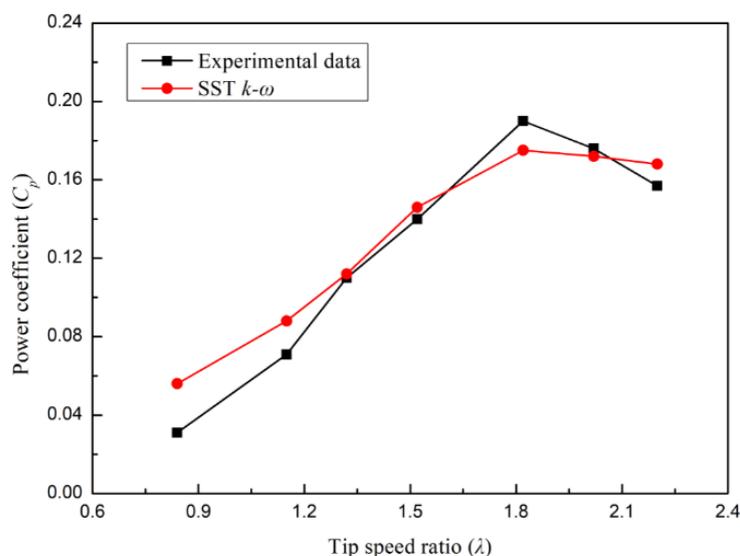


图 4-3 数值模拟结果和风洞实测数据的比较^[15]

表 4-2 给出垂直轴风力机功率系数 C_p 数值模拟结果与风洞实测数据的误差分析。从中易见，在一般叶尖速比 ($\lambda = 1.32-2.20$) 下，即叶片目标转速范围内，风力机功率系数数值模拟结果和风洞实测数据误差均小于 10%，数值模拟吻合度良好，可见运用 SST $k-\omega$ 湍流模型模拟三叶片直线翼垂直轴风力机功率系数 C_p 效果理想。但在风力机叶尖速比 $\lambda = 0.84$ 和 1.15 的工况下，功率系数偏差较大，各自达到 80.65% 和 23.94%。一方面是因为当风力机叶尖速比较低时，叶片攻角变动范围较大，叶片表面发生大规模非定常分离流动，进而产生动态失速现象，而 SST $k-\omega$ 湍流模型对分离流动模拟的精度不足，从而导致功率系数数值模拟结果不理想^[64]；另一方面是因为当风力机旋转角速度较低时，由于部件间摩擦导致的机械能损耗未在数值模拟中得以体现，降低了计算结果的准确性。此外，低叶尖速比下垂直轴风力机周边流场不稳定，也在一定程度上影响了计算结果的可信度。

表 4-2 垂直轴风力机功率系数数值模拟结果与风洞实测数据误差分析

	$\lambda = 0.84$	$\lambda = 1.15$	$\lambda = 1.32$	$\lambda = 1.52$	$\lambda = 1.82$	$\lambda = 2.02$	$\lambda = 2.20$
数值模拟	0.056	0.088	0.112	0.146	0.175	0.172	0.168
风洞实测	0.031	0.071	0.110	0.140	0.190	0.176	0.157
相对误差	80.65%	23.94%	1.82%	4.28%	-7.89%	-2.27%	7.01%

4.3.2 垂直轴风力机叶片攻角分析

叶片攻角 α 是来流合速度和叶片翼型弦线间的夹角，如图 4-4 所示，它是影响垂直轴风力机工作效能的重要因素。风力机叶片攻角过大易引发叶片动态失速，从而降低风力机风能利用率。图 4-4 中， W 为来流合速度， V_t 为叶片线速度。兹观察垂直轴风力机叶片攻角在不同叶尖速比 λ 下的变化情况，分析两者之间的关系。根据 Lei 等^[7]的研究以及风力机运行过程中叶片与方位角 θ 的几何关系，并忽略叶片安装角 β 的影响，叶片攻角 α 可表示为：

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\sin\theta}{\sqrt{(\lambda + \cos\theta)^2 + \sin^2\theta}}\right) \quad (4-3)$$

图 4-5 给出垂直轴风力机叶片攻角随方位角的变化曲线。从中发现，在一个完整运行周期内，叶片攻角呈对称抛物线分布，且低叶尖速比下叶片攻角的变动范围明显大于高叶尖速比下的情况，会对风力机的工作效能造成不利影响。因此，在垂直轴风力机运行过程中，可通过控制叶尖速比减小叶片攻角变动范围，提高风能利用率。

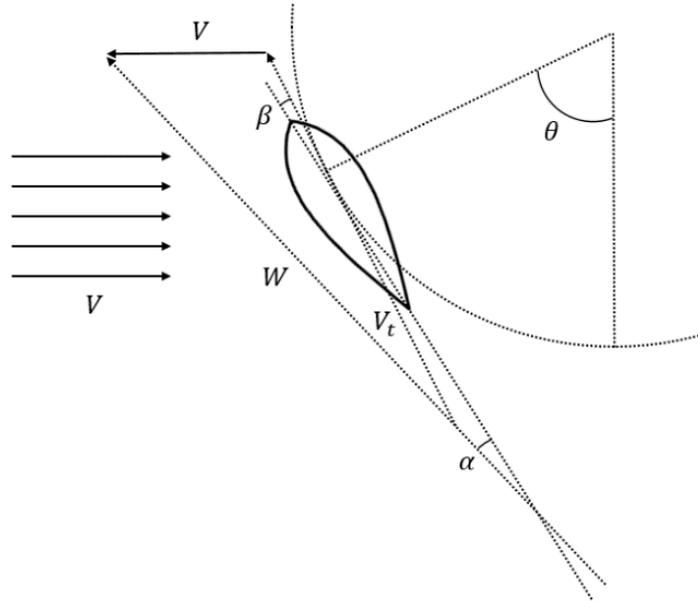


图 4-4 垂直轴风力机叶片攻角示意图

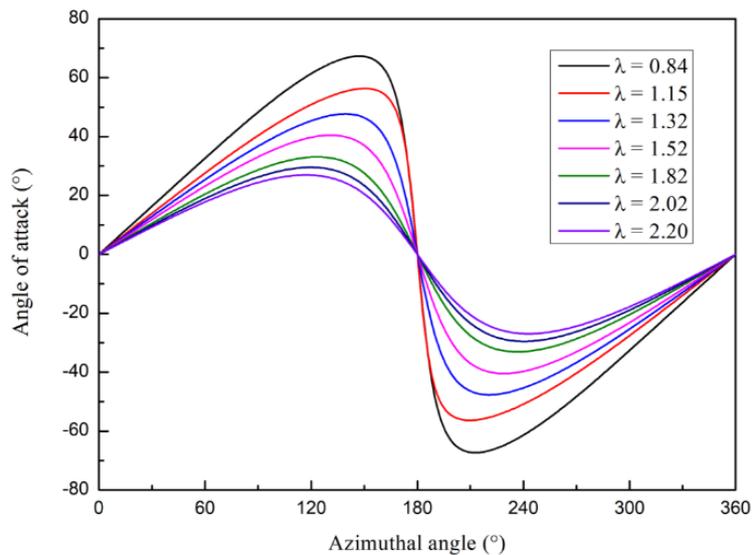


图 4-5 垂直轴风力机叶片攻角随方位角变化曲线

4.3.3 垂直轴风力机叶片推力与转矩分析

叶片推力和转矩是评估垂直轴风力机工作效能的关键参数，两者共同为风力机提供旋转驱动力^[65]。本文将叶片推力方向设为指向风力机轴心，转矩方向则设为与风力机旋转轴平行，式 (4-2) 是垂直轴风力机总转矩与功率系数之间的关系式。在此仅分析达到最大功率系数时风力机叶片所承受的推力与转矩。

从 4.3.1 节中可知，当叶尖速比 $\lambda = 1.82$ 时，垂直轴风力机功率系数达到峰值 0.175，风力机叶片此时所受气动推力在图 4-6 中给出。从图中可见，对于叶片 1，在一个运行周期的初始位置 ($\theta = 0^\circ$)，叶片翼型弦线与来流风向基本平行，所受气动推力几乎为 0。随着风力机开始运行，叶片 1 翼型弦线与来流风向间的夹角逐渐增大，所受气动推力也不断提高。在 90° 方位角处，来流风沿叶片 1 表面法线方向流经风力机风轮，此时叶片 1 在上游区段承受的气动推力达到峰值，为 74.71 N，当其转至下游区段时，承受的最大气动推力显著降低，

仅为 31.26 N，发生于 246°方位角处。相同的现象在叶片 2 上出现，其在上游区段承受的气动推力峰值为 76.59 N，在下游区段承受的气动推力峰值仅为 28.47 N，分别发生于 $\theta = 94^\circ$ 和 244°位置处。对于叶片 3，在上游区承受的气动推力峰值为 74.12 N，在下游区承受的气动推力峰值仅为 30.00 N，分别发生于 $\theta = 92^\circ$ 和 244°位置处。可以看出，垂直轴风力机三个叶片所承受气动推力时程的变化趋势大致相同，但相互之间有 120°的相位差，这是因为三者的安装位置相差 120°。风力机的瞬时峰值总气动推力为 104.19 N，分别发生在上游区段 92°、下游区段 212°和 336°位置处，也分别对应着风力机三个叶片承受峰值气动推力时所处的位置。

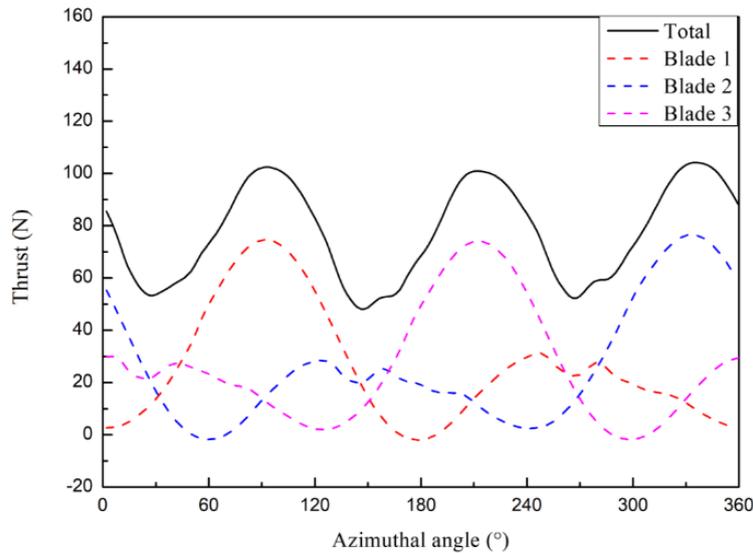


图 4-6 垂直轴风力机叶片推力随方位角变化曲线 ($\lambda = 1.82$)

图 4-7 给出 $\lambda = 1.82$ 时风力机及其叶片承受的转矩。从图中看出，对于叶片 1，在一个运行周期的初始位置承受负转矩，之后随风力机运行所受转矩迅速提高，在其上游区段的峰值转矩为 22.63 N·m，发生于 96°方位角处，之后叶片 1 承受的转矩逐渐降低，直至进入下游区段。在下游区段叶片 1 所受转矩整体处于较低水平并伴随着波动，与图 24 中其在下游区段承受波动频繁的气动推力的现象相对应。叶片 2 在上游区段的峰值转矩为 23.35 N·m，发生于 $\theta = 98^\circ$ 位置处。叶片 3 在上游区段的峰值转矩为 22.29 N·m，发生于 $\theta = 98^\circ$ 位置处。由于叶片间安装位置的差异，虽然叶片 2 与叶片 3 所承受转矩时程的变化趋势与叶片大致相同，但三者间同样有 120°的相位差。垂直轴风力机的瞬时峰值总转矩为 20.34 N·m，分别发生在上游区段 96°、下游区段 214°和 334°位置处。

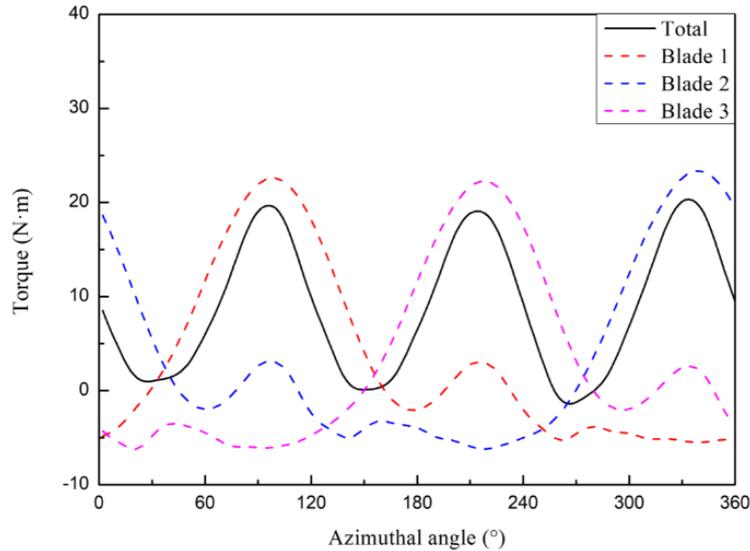


图 4-7 垂直轴风力机叶片转矩随方位角变化曲线 ($\lambda = 1.82$)

4.3.4 垂直轴风力机叶片表面力系数分析

叶片表面力系数可用于确定风力机的升阻比，是反映风力机工作效能的重要参数。兹对垂直轴风力机在不同叶尖速比下的叶片表面法向力系数和切向力系数进行研究，结合风力机运行规律，阐明其变化机理。

根据 Orlandi 等^[66]的研究，定义垂直轴风力机叶片表面法向力系数为：

$$C_N = \frac{F_N}{0.5\rho cV^2} \quad (4-4)$$

定义垂直轴风力机叶片表面切向力系数为：

$$C_T = \frac{F_T}{0.5\rho cV^2} \quad (4-5)$$

上两式中 c , ρ , F_N 和 F_T 分别为风力机叶片翼型弦长，叶片表面法向力和表面切向力。其中 F_N 方向设为指向风力机轴心， F_T 方向设为与风力机叶片线速度方向相同。

直线翼垂直轴风力机三个叶片相同，在此仅以叶片 1 为例进行分析，图 4-8 给出其在不同叶尖速比下表面法向力系数 C_N 的变化曲线。从图中可见，不同叶尖速比下叶片 1 表面法向力系数变化趋势基本相同。在上游区段，叶片 1 表面法向力系数先升高后降低，达到负值后再反向升高。虽然叶片 1 表面法向力系数在不同叶尖速比工况下的最大值不同，但都集中于 70° - 80° 方位角的范围内出现，且随着叶尖速比增大逐渐提高。以叶尖速比 $\lambda = 1.82$ 和 $\lambda = 1.32$ 为例，叶片 1 在上游区段最大表面法向力系数分别为 7.88 和 7.20，分别发生于 80° 和 78° 方位角处。在下游区段，叶片 1 表面法向力系数明显低于上游区的情况，并且伴随着不规则的波动。这是因为空气在流经垂直轴风力机上游区段时，能量被大量吸收，致使下游区段风速较低，叶片 1 受到的气动推力较小，同时叶片 2、叶片 3 以及支撑塔架产生的脱落涡对叶片 1 周围的流场造成干扰，影响了叶片 1 表面法向力系数的大小和变化趋势。

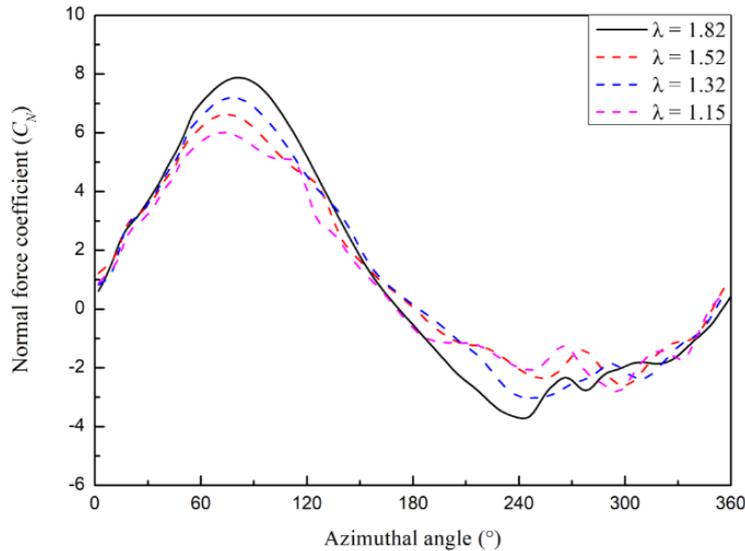


图 4-8 垂直轴风力机叶片 1 表面法向力系数随方位角变化曲线

图 4-9 给出叶片 1 表面切向力系数 C_T 的变化曲线。结合图 4-7 可以发现，由于叶片转矩由自身表面切向力产生，故叶片表面切向力系数的变动规律与转矩保持一致。在上游区段，叶片 1 的表面切向力系数随风力机运行先由负值逐渐升高至正值，达到峰值后再次降低至 0 附近。虽然叶片 1 表面切向力系数在不同叶尖速比工况下的最大值不同，但都集中于 90° - 100° 方位角的范围内出现。以叶尖速比 $\lambda = 1.82$ 和 $\lambda = 1.32$ 为例，叶片 1 在上游区段最大表面切向力系数分别为 1.37 和 1.64，分别发生于 98° 和 92° 方位角处。随着叶尖速比减小，叶片 1 表面切向力系数最大值逐渐提高，且曲线整体向左偏移。在下游区段，叶片 1 表面切向力系数整体处于较低水平，在 -0.5-1 范围内变动。这是由于叶片 1 表面发生显著的流动分离，涡旋结构还未发展完全便从叶片表面脱离，从而引发剧烈的动态失速现象。同时，由于上游区段叶片和支撑塔架的尾流干扰，叶片 1 表面切向力系数波动频繁，随着叶尖速比的增大，表面切向力系数波动愈发剧烈，这是风轮外部高速稳定流场和内部低速紊乱流场共同作用而导致的。

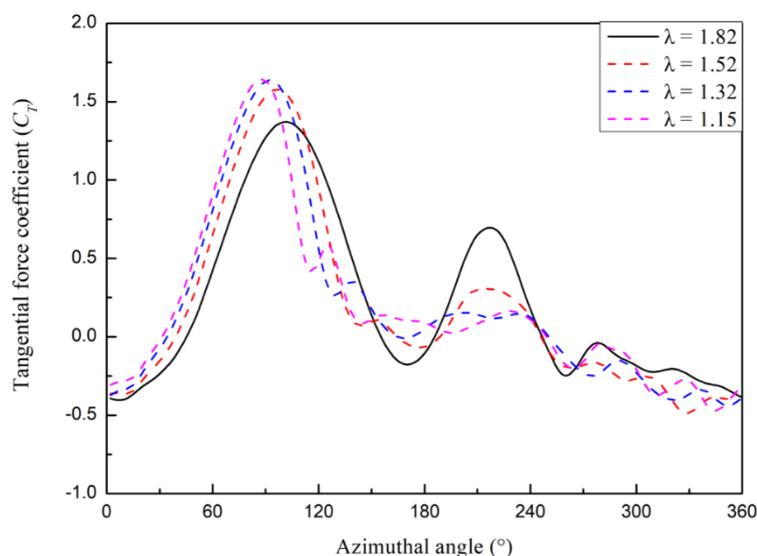


图 4-9 垂直轴风力机叶片 1 表面切向力系数随方位角变化曲线

4.3.5 垂直轴风力机风轮速度分布分析

风轮速度分布反映了垂直轴风力机周边流场情况,对深入探究风力机工作机理有重要意义。兹对不同高度处风轮水平截面的速度分布进行研究,阐明风力机运行时的流场变化。首先,选取图 4-1 (b) 所示沿叶片高度的中部截面,图 4-10 给出一个完整运行周期内垂直轴风力机风轮周边速度分布图,为与前述气动参数数值模拟研究相呼应,此处叶尖速比 λ 设为 1.82。从图中可见,以叶片 1 为例,当其在初始位置开始在上游区段顺时针运动时,叶片翼型截面后缘出现带状低速尾流 (1/12 T),随着垂直轴风力机转动,低速尾流逐渐消失 (2/12 T),风轮内部空气流速显著降低,这表明风力机正在吸收利用风能。当叶片 1 逐渐运动至下游区段,其翼型截面后缘出现扩散状高速尾流 (8/12 T),这是由于随着风力机的旋转,风轮外侧空气被带动,高速气流逐渐附着在叶片 1 的表面,进而发展为扩散状尾流。

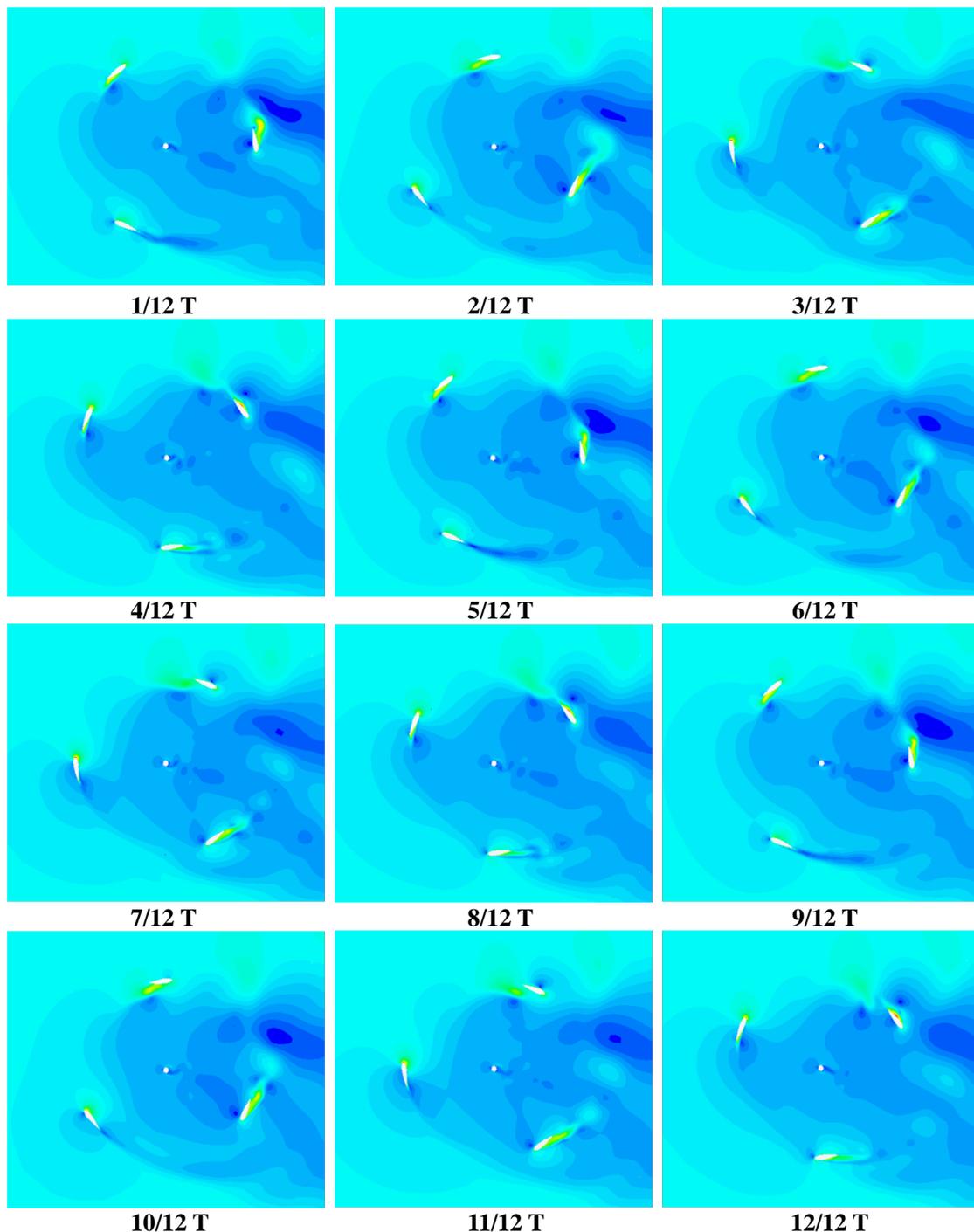




图 4-10 垂直轴风力机叶片中部截面高度处风轮速度分布图 ($\lambda = 1.82$)

其次，选取垂直轴风力机叶片顶部截面，图 4-11 给出一个完整运行周期内垂直轴风力机风轮周边速度分布图，叶尖速比同样设为 $\lambda = 1.82$ 。相比于叶片中部截面高度处的风轮速度分布图，顶部截面高度处的风轮内部空气流速明显增大，来流风的能量被大量耗散，可供风力机利用的风能减少。这是因为在叶片顶部截面高度处，旋转的叶片尖部产生大量叶尖涡，逐渐向下游区段发展扩散，在带走风能的同时对风力机的气动特性造成不利影响^[67]。此外，图 4-12 给出垂直轴风力机旋转至 360° 方位角时 (12/12 T) 叶片顶部截面高度处的尾流场速度分布图，可以发现低速尾流区主要集中在尾流场的下方，这与风力机沿顺时针方向旋转有关，被吸收能量的来流风沿风力机运行轨迹不断从风轮右下方释出。

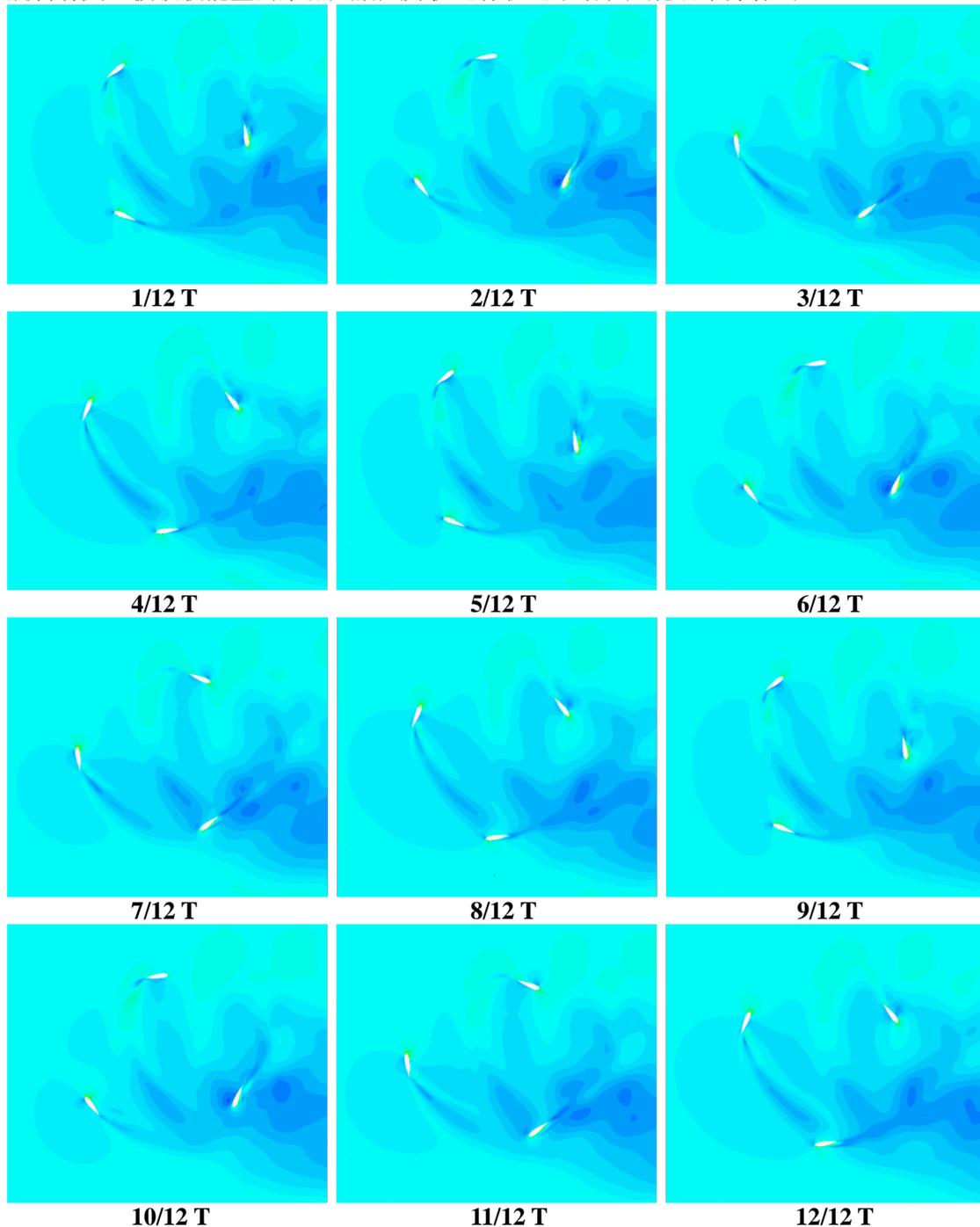




图 4-11 垂直轴风力机叶片顶部截面高度处风轮速度分布图 ($\lambda = 1.82$)

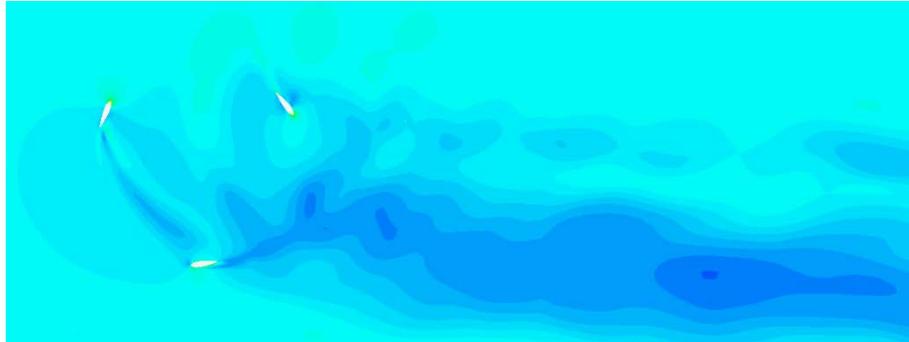
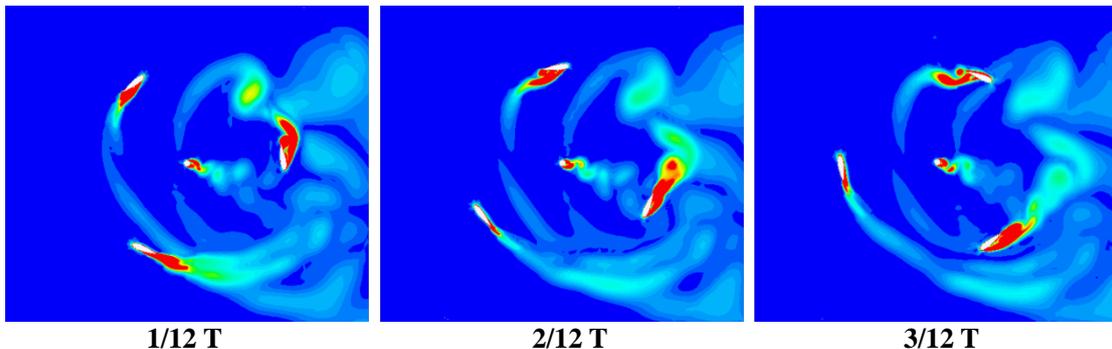


图 4-12 垂直轴风力机叶片顶部截面高度处尾流场速度分布图 ($\lambda = 1.82$)

4.3.6 垂直轴风力机风轮涡旋结构分析

认识风轮涡旋结构，有助于阐明垂直轴风力机气动特性参数变化机理，在此分析风轮在不同截面高度处的涡旋结构。兹选取图 4-1 (b) 所示的叶片中部截面，图 4-13 和图 4-14 分别给出垂直轴风力机在一个完整运行周期内风轮的涡旋结构图和法向涡旋结构图，其中叶尖速比设为 $\lambda = 1.82$ 。

从两图中可见，风力机支撑塔架后部出现明显的卡门涡街现象。以叶片 1 为例，当其在上游区段开始运动时，叶片表面没有涡旋结构附着，仅在翼型截面后缘处出现沿叶片运动路径的带状涡旋 (1/12 T)。经过 3/12 T 周期，当叶片 1 运动至 90° 方位角附近时，涡旋结构开始在叶片内侧面出现，并逐渐由翼型截面后缘往前缘移动，此时尚未发生明显的流动分离现象。从图 4-6，图 4-7，图 4-8 和图 4-9 中可见，此时叶片 1 所承受的气动推力和转矩以及叶片表面法向力和切向力系数均达到峰值。当叶片 1 进入下游区段时 (6/12 T)，大规模的流动分离开始出现，叶片内侧面的涡旋不断脱落，新的涡旋结构在叶片外侧面出现并紧密附着。此时，垂直轴风力机各项气动参数都迅速减小。随着叶片 1 继续运动，在叶片外侧面附着的涡旋尺度不断增大，但仅有少量的尾涡脱落，并未发生明显的流动分离。此时 (10/12 T)，由于受到垂直轴风力机支撑塔架脱落涡的影响，叶片 1 的表面法向力和切向力系数波动频繁，与图 4-8 和图 4-9 中叶片转动至 300° 方位角附近时情况相同。



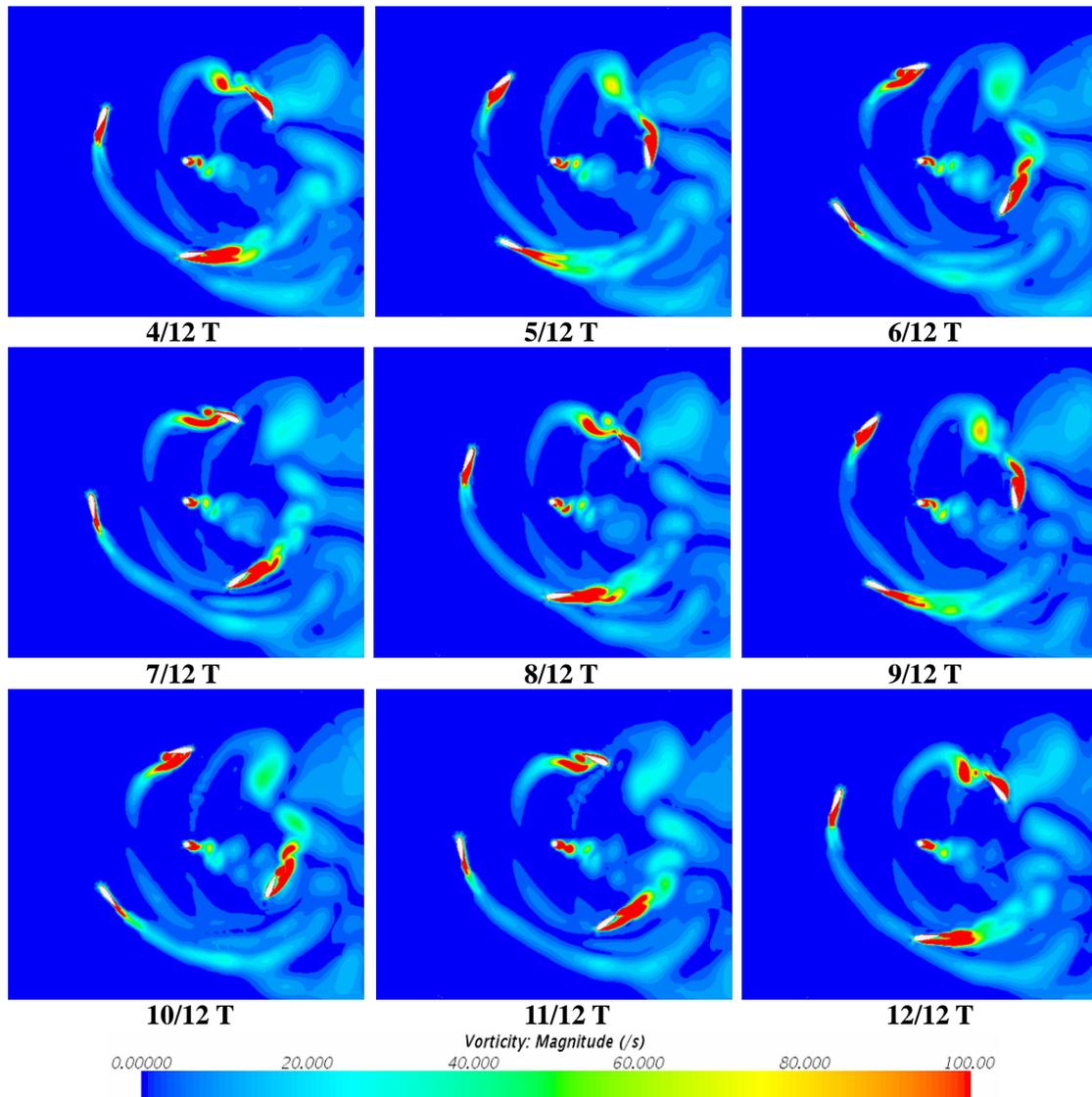
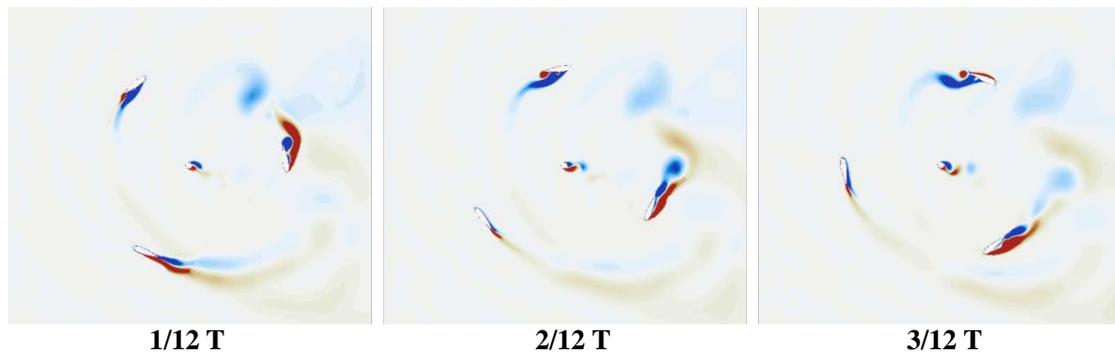


图 4-13 垂直轴风力机叶片中部截面高度处风轮涡旋结构图 ($\lambda = 1.82$)



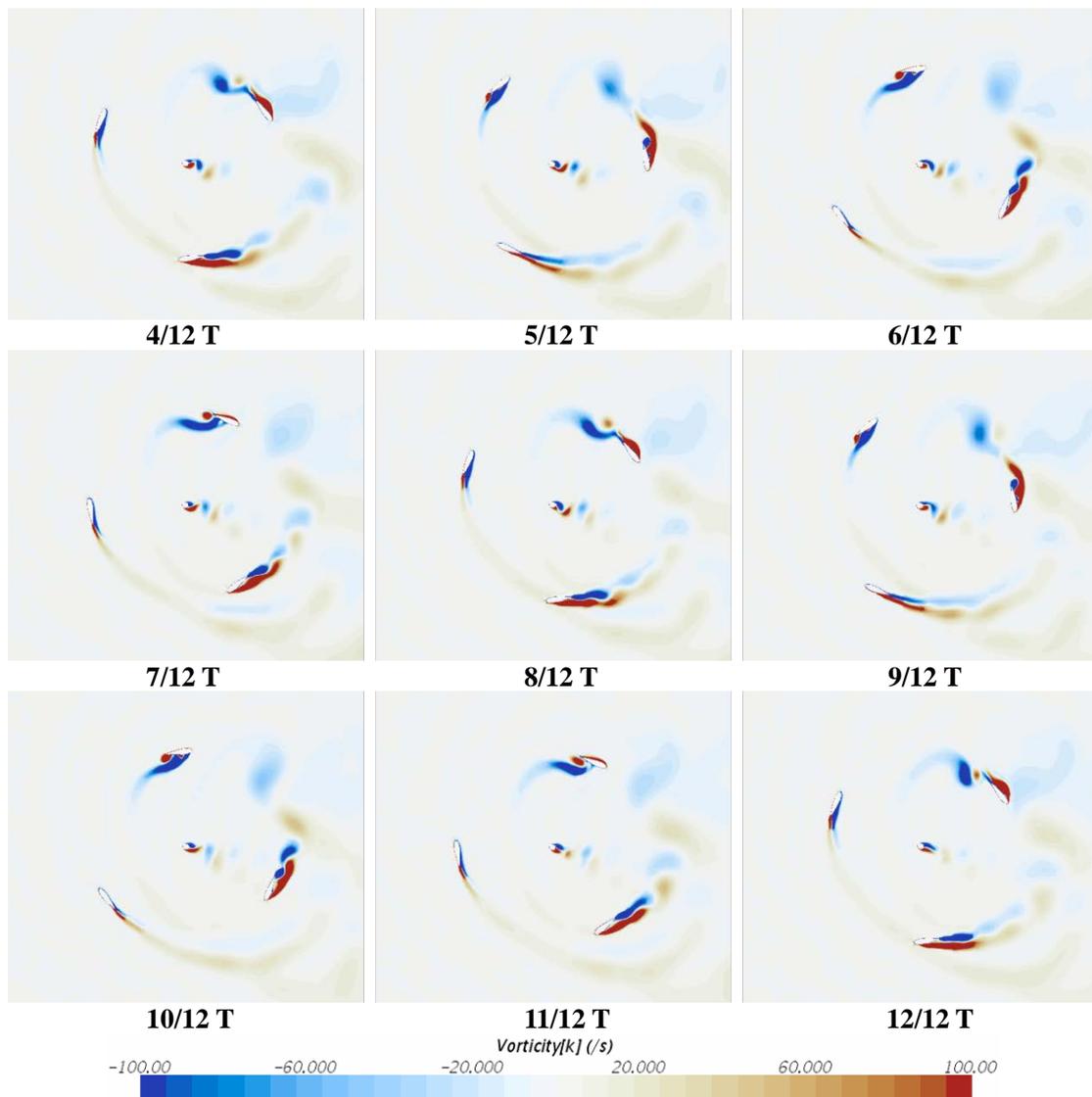


图 4-14 垂直轴风力机叶片中部截面高度处风轮法向涡旋结构图 ($\lambda = 1.82$)

图 4-15 和图 4-16 分别给出垂直轴风力机在一个完整运行周期内风轮于叶片顶部截面高度处的涡旋结构图和法向涡旋结构图。从两图中可以看出，叶片顶部截面高度处风轮内部涡量强度显著提高，与速度分布情况相对应。以叶片 1 为例，由于在叶片顶部截面高度处风轮内部空气流速较高，当叶片 1 在上游区段运动时，翼型截面后缘的尾涡强度和尺度显著增大，涡旋结构始终未在叶片内侧面出现 (1/12 T-6/12 T)。当垂直轴风力机旋转至 8/12 T 时，即叶片 1 进入下游区段不久 (120°方位角附近)，翼型截面后缘的带状涡旋完全脱落，少量涡旋结构在叶片外表面出现并附着。随着叶片 1 继续运动，叶片外侧面涡旋结构的尺度迅速增大 (9/12 T)，但很快便脱落消散。这是因为在叶片顶部截面高度处，大量风能未被垂直轴风力机吸收，风轮外部的空气流速较高，将叶片 1 外侧面的涡旋迅速带走。

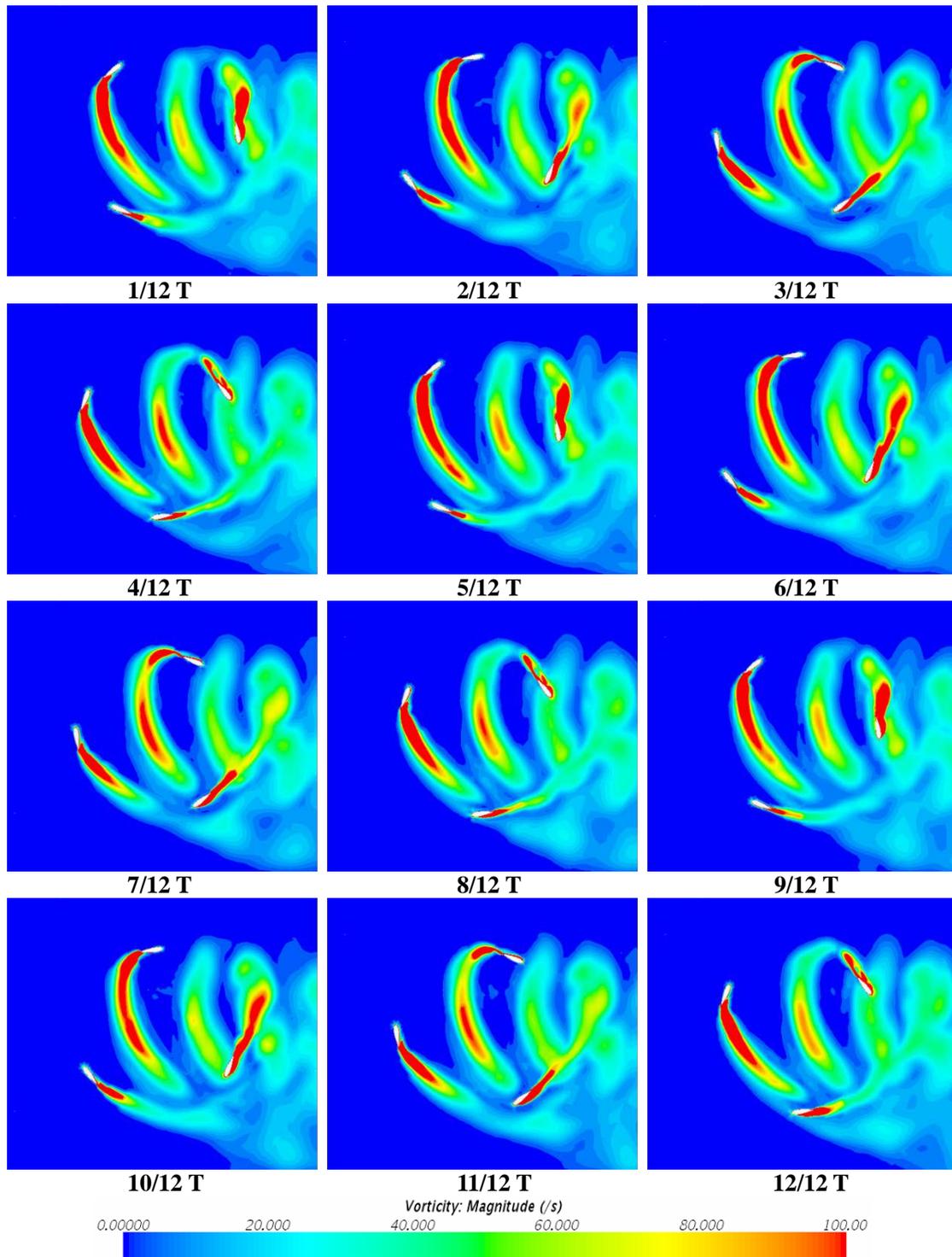


图 4-15 垂直轴风力机叶片顶部截面高度处风轮涡旋结构图 ($\lambda = 1.82$)

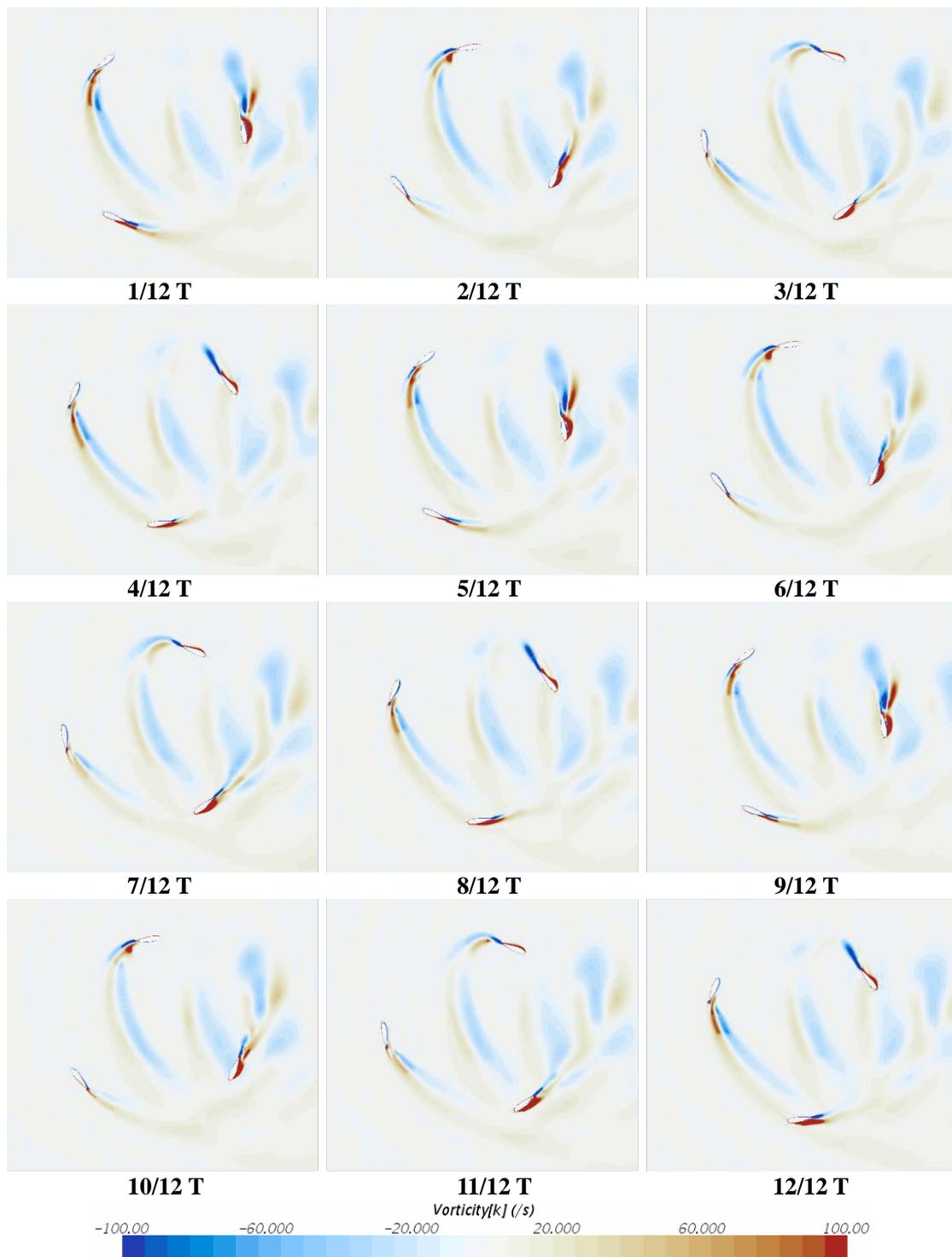


图 4-16 垂直轴风力机叶片顶部截面高度处风轮法向涡旋结构图 ($\lambda = 1.82$)

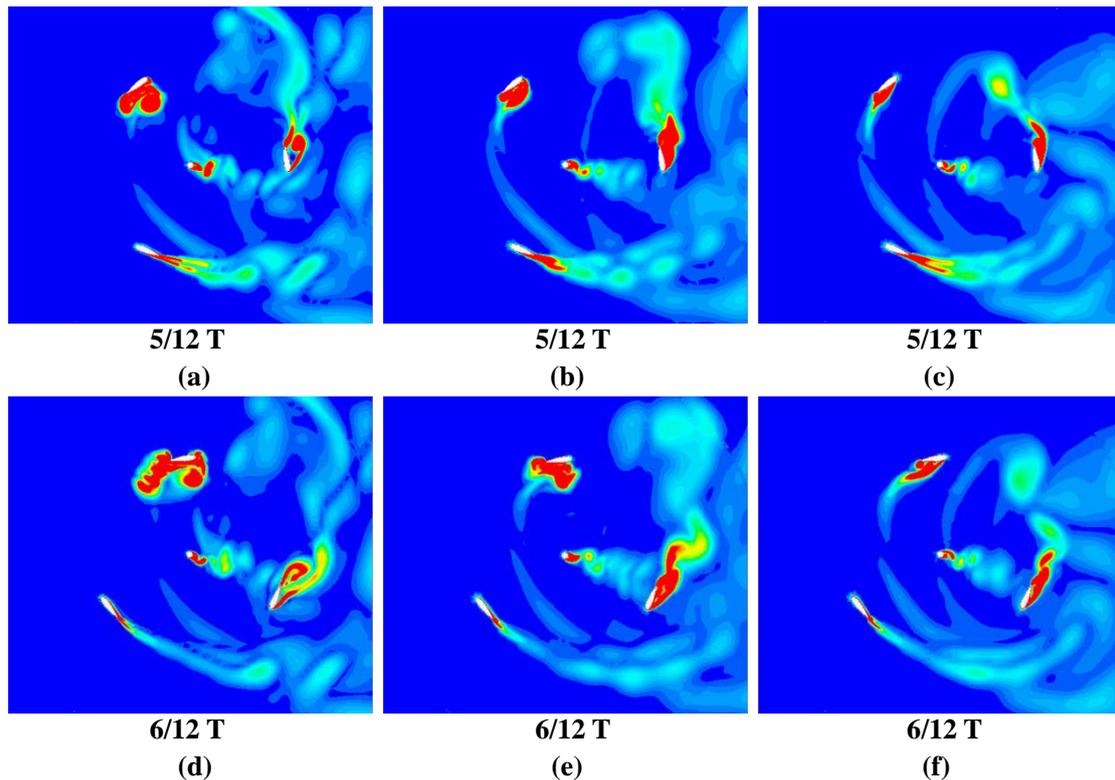
根据 4.3.2 节中的研究，低叶尖速比下垂直轴风力机叶片攻角变动范围明显增大，可能引发强烈的动态失速现象，因此有必要对不同叶尖速比下风轮的涡旋结构进行比较，探究个中机理。此外，垂直轴风力机的尾流特性也值得关注，因为它从侧面反映出风力机的工作状态，并对风电场的空间布局有重要影响。图 4-17 给出三种叶尖速比下垂直轴风力机在六分之一运行周期内 (5/12 T-7/12 T) 风轮于叶片中部截面高度处的涡旋结构图。图 4-18 给出三

种叶尖速比下垂直轴风力机尾流场涡旋结构和速度分布图。为保证结果的普适性，选取叶尖速比分别为 $\lambda = 1.32$ ， $\lambda = 1.52$ 和 $\lambda = 1.82$ 。

从图 4-17 中可见，随着叶尖速比降低，风力机叶片周边涡旋结构发生显著的变化，逐渐由稳定向紊乱过渡。以叶片 1 为例，在 150° 方位角处 (5/12 T)，涡旋紧密附着在叶片内表面，此时可以看到，叶尖速比 $\lambda = 1.32$ 时的涡旋尺度最大，且有即将脱落的趋势。当垂直轴风力机旋转至 6/12 T 时，从图 4-17 (d) 中发现，叶片 1 内表面的涡旋结构发生大规模的流动分离，不规则的锯齿状涡旋在叶片后缘处聚集，并有部分涡旋移动至叶片前缘和外表面，但以上现象未在叶尖速比较高的情况下出现，如图 4-17 (e), (f) 所示。随着叶片 1 继续运动 (7/12 T)，高叶尖速比下叶片内表面及后缘处的涡旋稳定脱落，而低叶尖速比下涡旋在叶片前缘就发生脱落，并逐渐向叶片外表面汇集，如图 4-17 (g) 所示。

从图 4-18 中可见，在低叶尖速比下垂直轴风力机尾流场扰动范围增大，尾涡呈破碎不稳定状态 (图 4-18 (a))，而在高叶尖速比下尾流场分布规则，向下游稳定扩散 (图 4-18 (b), (c))。这是因为当叶尖速比较低时，风力机功率系数减小，风能利用率降低，不能有效吸收来流风能，致使下游区流速较高 (图 4-18 (d))，从而扰乱了尾涡的形成和扩散轨迹。

以上现象表明，随着叶尖速比降低，垂直轴风力机叶片周边涡旋尺度增大，表面流动分离提前开展，动态失速现象愈发明显，同时尾流场流速提高并向不稳定状态转变。结合垂直轴风力机功率系数和叶片承受气动力的变动规律，较低的叶尖速比会对风力机的工作效能造成不利影响，应引起足够的重视，在风力机设计与运行中予以控制。



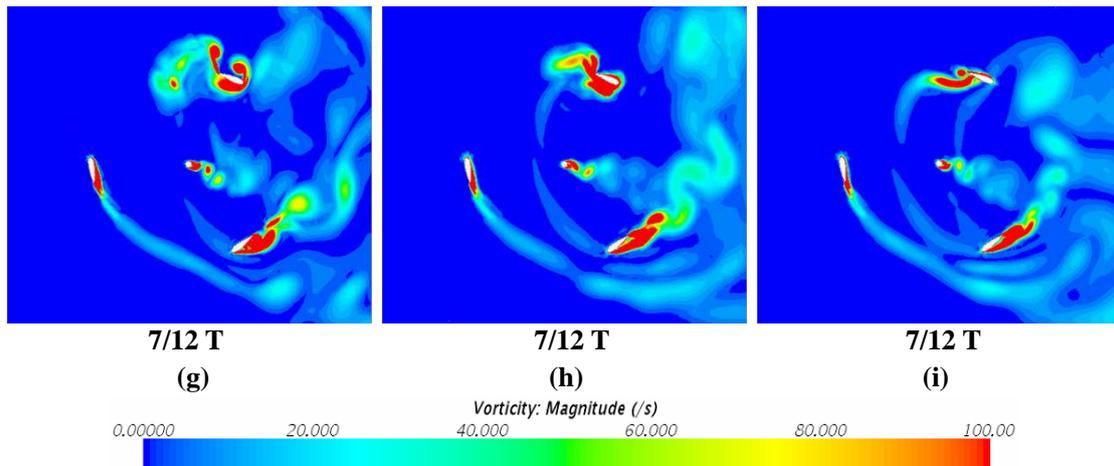


图 4-17 不同叶尖速比下垂直轴风力机叶片中部截面高度处风轮涡旋结构图: (a), (d), (g) $\lambda = 1.32$; (b), (e), (h) $\lambda = 1.52$; (c), (f), (i) $\lambda = 1.82$

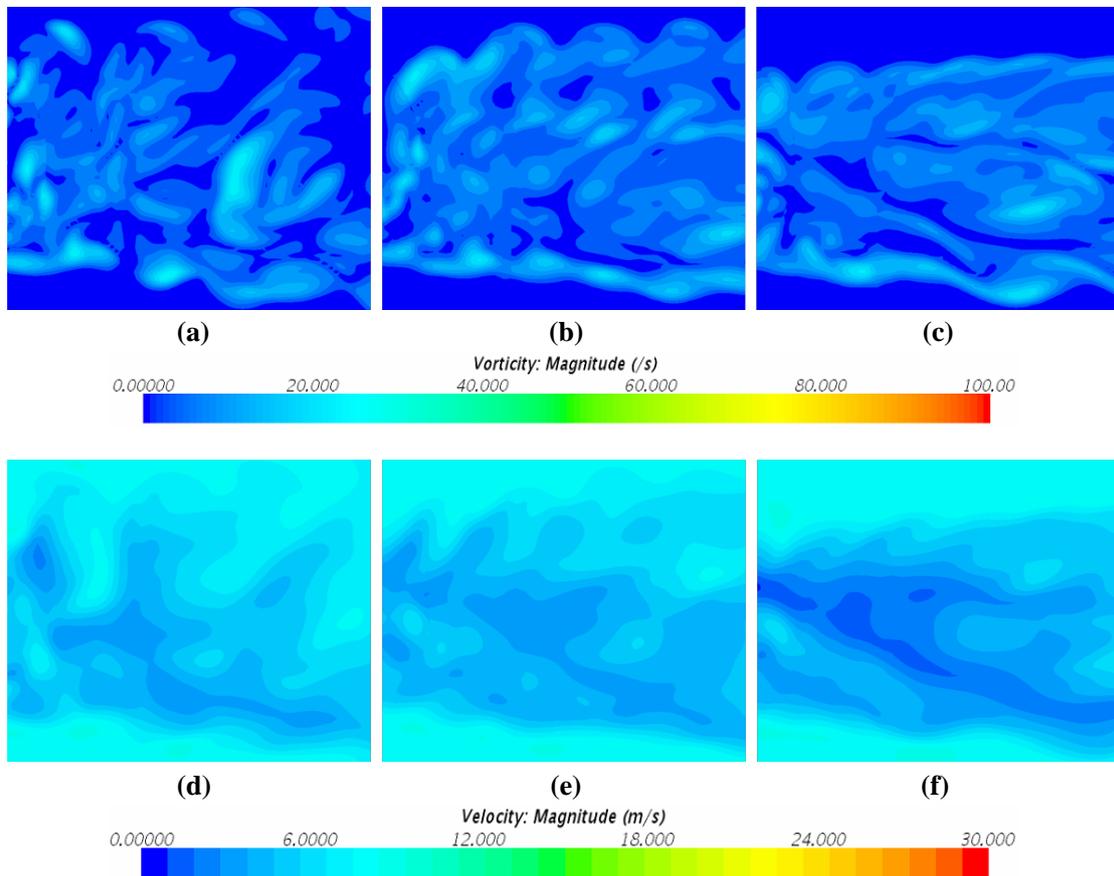


图 4-18 三种叶尖速比下垂直轴风力机尾流场涡旋结构和速度分布图: (a), (d) $\lambda = 1.32$; (b), (e) $\lambda = 1.52$; (c), (f) $\lambda = 1.82$

4.4 本章小结

本章对三叶片直线翼垂直轴风力机的非定常气动特性进行研究,在验证数值模型可靠性的基础上,研究叶尖速比对风力机功率系数和叶片攻角的影响,分析叶片承受气动推力和转矩以及表面力系数的变动规律,探究风力机的尾流场特性,并对不同截面高度处风轮的速度分布和涡旋结构进行深入剖析,主要结论如下:

(1) 基于 CFD 数值方法并引入 SST $k-\omega$ 湍流模型, 模拟直线翼垂直轴风力机功率系数 C_p 效果理想。随着叶尖速比逐渐提高, 风力机功率系数先升高后降低, 呈“山峰”状分布。在风力机叶尖速比 $\lambda = 1.82$ 时, 风能利用率达到峰值。在直线翼垂直轴风力机运行中, 通过调节风轮转速并将叶尖速比控制在 1.82 附近, 可最大限度地利用风能。

(2) 直线翼垂直轴风力机叶尖速比较低时, 叶片攻角的变动范围明显大于高叶尖速比下的情况, 对风力机工作效能造成不利影响, 在实际操作过程中应避免风力机长时间在低叶尖速比区域运行。

(3) 直线翼垂直轴风力机叶片所承受的气动推力和转矩周期性变化较为明显。对于叶片承受的气动推力, 在上游区段, 当叶片运动至 90° 方位角附近时达到最大值; 在下游区段, 当叶片旋转至 240° 方位角附近时达到最大值。对于转矩, 在上游区段, 当叶片运动至 90° 方位角时达到峰值, 在下游区段有所波动。三个叶片所承受气动推力和转矩的时程存在 120° 相位差。

(4) 直线翼垂直轴风力机叶片表面力系数在一个运行周期内随风力机运行有序变化。对于叶片表面法向力系数, 在上游区段先升高后降低, 达到负值后再反向升高; 在下游区段, 叶片表面法向力系数变动幅度较小, 并且伴随着不规则的波动。对于叶片表面切向力系数, 在上游区段, 随着叶尖速比增大, 曲线整体向左上方偏移; 在下游区段, 叶片表面切向力系数整体处于较低水平, 在 -0.5-1 范围内变动。

(5) 直线翼垂直轴风力机风轮的速度分布和涡旋结构具有一定的规律性, 且不同截面高度处的情况有明显差异。由于叶尖涡的存在, 风力机在叶片顶部截面高度处的风能利用率显著降低, 在设计时应考虑减小其影响。同时, 在低叶尖速比下叶片表面涡旋大规模流动分离引起的动态失速现象使得风力机各项气动参数减小, 并极大程度地扰乱尾流场, 应予控制。

根据本章主要研究内容以第一作者身份投稿国内 EI 期刊《振动与冲击》, 现已录用。

况利民, 苏捷, 周岱, 韩兆龙, 赵永生, 包艳. 直线翼垂直轴风力机非定常气动特性数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 已录用. **EI 收录**

第五章 总结与展望

5.1 主要工作和结论

垂直轴风力机安装、维护成本低,结构简单而便于制造,能够万向受风且无需偏航装置,同时在湍流风场中有良好的表现,在城市区域有着广阔的应用前景,但结构安全性不足和工作效能较低等缺陷限制了其进一步的发展。为此,本文以直线翼垂直轴风力机为研究对象,在结构安全性和气动特性两方面对其开展研究,主要工作和结论如下。

在结构安全性研究方面,本文综合运用计算流体力学方法,有限元分析技术和结构疲劳分析方法,开展直线翼垂直轴风力机风致响应和疲劳分析。在验证双向耦合算法有效性的基础上,研究不同风荷载作用下垂直轴风力机的表面风压分布,周边流场特性,计算风力机及其支撑结构的风致响应,同时分析不同停机状态对风力机上述特性的影响。然后基于线性疲劳累积损伤准则,对直线翼垂直轴风力机的疲劳损伤问题进行深入探究。研究结果显示:(1) 直线翼垂直轴风力机迎风面的表面风压分布在部分工况下相似,随着风速的增加,表面风压显著增大。风力机叶片表面的压力分布呈现一定的规律性,叶片与来流的相互作用会影响后部结构的表面风压分布。垂直轴风力机的变形会影响最大正压在支撑塔架上的分布情况。在不同停机状态下,风力机表面风压的极值差异较小。(2) 随着风速的增加,直线翼垂直轴风力机周边湍流的三维特性和尾流扰动效应愈发明显。同时,叶片翼型截面附近的涡旋结构发生显著变化,可能会对垂直轴风力机的风致响应造成影响。叶片与来流相对位置的细微变化会导致垂直轴风力机周边流场的巨大改变。(3) 在风荷载作用下,直线翼垂直轴风力机在固定位置正常工作,并伴随着振动。由于较大的位移和速度响应,在垂直轴风力机的设计过程中,应重点关注叶片和支撑臂以保证风力机的结构安全性。不同停机状态对垂直轴风力机风致响应的影响可以忽略。(4) 该直线翼垂直轴风力机的疲劳寿命为 30.397 年,满足设计的要求。

在气动特性研究方面,本文在验证数值模型可靠性的基础上,研究叶尖速比对直线翼垂直轴风力机功率系数和叶片攻角的影响,对叶片承受气动推力和转矩以及表面力系数的变动规律进行分析,探究风力机的尾流场特性,并对不同截面高度处风轮的速度分布和涡旋结构进行剖析,结果显示:(1) 随叶尖速比 λ 增大,风力机功率系数先升高后降低,在 $\lambda = 1.82$ 时达到最大值。在直线翼垂直轴风力机运行中,通过调节风轮转速并将叶尖速比控制在 1.82 附近,可最大限度地利用风能。(2) 直线翼垂直轴风力机叶片攻角 α 随方位角呈对称抛物线分布。当叶尖速比较低时,叶片攻角的变动范围明显大于高叶尖速比下的情况,对风力机工作效能造成不利影响,在实际操作中应避免风力机长时间在低叶尖速比区域运行。(3) 直线翼垂直轴风力机叶片所承受气动推力和转矩的变动规律明显,叶片间安装方位角的差异导致受力时程存在相位差。(4) 直线翼垂直轴风力机叶片表面力系数随风力机运行呈周期性变化。(5) 直线翼垂直轴风力机风轮的速度分布和涡旋结构具有一定的规律性,且不同截面高度处的情况有明显差异。在风力机设计与运行过程中应对叶尖涡和动态失速现象予以控制。

5.2 研究展望

对于科学的追求永无止境。本文对直线翼垂直轴风力机结构安全性和气动特性进行了初步探索,为风力机结构风致响应计算和空气动力学性能模拟提供了有效途径,但未来仍有大量可以拓展研究的空间:

(1) 本文运用基于 STAR-CCM+和 ABAQUS 的双向耦合算法开展研究,能够在计算垂直轴风力机风致响应的同时捕捉其周边流场情况,但计算成本较高。后续研究可致力于开发计算精度高且不失效率的新算法,为双向耦合领域提供更好的选择。

(2) 本文选择 SST $k-\omega$ 湍流模型模拟垂直轴风力机周边流场和气动特性,在低叶尖速比下精确度有所欠缺,未来可以选用 IDDES 等修正湍流模型进行数值模拟研究,更精准地阐明风力机的工作机理。

(3) 本文在结构安全性研究方面将垂直轴风力机设置为停机状态,后续可以对运行状态下的垂直轴风力机进行风致响应分析,探索旋转效应和动态失速等现象对风力机动态特性的影响。

(4) 本文基于稳态风环境开展垂直轴风力机的一系列研究,与风力机实际工作环境有所差异。未来可以设置脉动风环境,并添加雨雪等外部荷载,探究垂直轴风力机在复杂荷载工况下的动态特性和空气动力学性能。

(5) 未来可在数值模拟研究的基础上进一步开展风洞试验研究,更好更快地推动垂直轴风力机科学设计与关键技术开发。

参考文献

- [1] Tummala A, Velamati RK, Sinha DK, et al. A review on small scale wind turbines[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016(56):1351-1371.
- [2] Bhutta MMA, Hayat N, Farooq AU, et al. Vertical axis wind turbine-A review of various configurations and design techniques[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012(16):1926-1939.
- [3] 左薇,李惠民,苒晓明,等.NERL 5 MW 风力机气动特性的数值模拟研究[J].*太阳能学报*,2018,39(09):2446-2452.
- [4] Sahu BK. Wind energy developments and policies in China: A short review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017(81):1393-1405.
- [5] Wan Y, Fan C, Dai Y, et al. Assessment of the joint development potential of wave and wind energy in the South China Sea[J]. *Energies*, 2018, 11(2), 398.
- [6] 国家可再生能源中心. 2018 年中国风电装机容量统计简报[R]. 2019.
- [7] Lei H, Zhou D, Bao Y, et al. Three-dimensional improved delayed detached eddy simulation of a two-bladed vertical axis wind turbine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017(133): 235-248.
- [8] Ismail MF, Vijayaraghavan K. The effects of aerofoil profile modification on a vertical axis wind turbine performance[J]. *Energy*, 2015(80):20-31.
- [9] Ma N, Lei H, Han Z, et al. Airfoil optimization to improve power performance of a high-solidity vertical axis wind turbine at a moderate tip speed ratio[J]. *Energy*, 2018(150): 236-252.
- [10] Jacob J, Chatterjee D. Design methodology of hybrid turbine towards better extraction of wind energy[J]. *Renewable Energy*, 2019(131):625-643.
- [11] Lin J, Leung L, Xu Y, et al. Field measurement, model updating, and response prediction of a large-scale straight-bladed vertical axis wind turbine structure[J]. *Measurement*, 2018(130):57-70.
- [12] Nguyen L, Metzger M. Optimization of a vertical axis wind turbine for application in an urban/suburban area[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2017, 9(4).
- [13] Tjiu W, Marnoto T, Mat S, et al. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II : Challenges in HAWT and the opportunity of multi-megawatt Darrieus VAWT development[J]. *Renewable Energy*, 2015(75):50-67.
- [14] Lei H, Zhou D, Bao Y, et al. Numerical simulations of the unsteady aerodynamics of a floating vertical axis wind turbine in surge motion[J]. *Energy*, 2017(127):1-17.
- [15] Li Q, Maeda T, Kamada Y, et al. Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine[J]. *Energy*, 2015(75):784-795.
- [16] Tjiu W, Marnoto T, Mat S, et al. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I : Assessment of Darrieus VAWT configurations[J]. *Renewable Energy*, 2015(75):560-571.
- [17] Paraschivoiu I. Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept[M]. Canada:Polytechnic International Press, 2002.

- [18] Wang Y, Lu W, Dai K, et al. Dynamic study of a rooftop vertical axis wind turbine tower based on an automated vibration data processing algorithm. *Energies*, 2018,11(11), 3135.
- [19] McLaren K, Tullis S, Ziada S. Measurement of high solidity vertical axis wind turbine aerodynamic loads under high vibration response conditions. *Journal of Fluids and Structures*, 2012(32):12-26.
- [20] Rebelo C, Veljkovic M, da Silva LS, et al. Structural monitoring of a wind turbine steel tower-Part I: system description and calibration[J]. *Wind and Structures*, 2012(15):285-299.
- [21] Avila SM, Shzu MAM, Pereira WM, et al. Numerical modeling of the dynamic behavior of a wind turbine tower[J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2016,4(3):249-257.
- [22] Li C, Yu A, Li J, et al. Dynamic analysis of vertical-axis wind turbines under the rotation[C]. *Power and Energy Engineering Conference*, 2010:634-638.
- [23] Hu Y, Baniotopoulos C, Yang J. Effect of internal stiffening rings and wall thickness on the structural response of steel wind turbine towers[J]. *Engineering Structures*, 2014(81):148-161.
- [24] Feliciano J, Cortina G, Spear A. Generalized analytical displacement model for wind turbine towers under aerodynamic loading[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018(176):120-130.
- [25] Shi F, Wang Z, Zhang J, et al. Influences of wind and rotating speed on the fluid-structure interaction vibration for the offshore wind turbine blade[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2019, 21(2):483-497.
- [26] Sorensen JN. Aerodynamic aspects of wind energy conversion[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2011(43):427-448.
- [27] Posa A, Parker CM, Leftwich MC, et al. Wake structure of a single vertical axis wind turbine[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2016(61):75-84.
- [28] 樊惠燕.风浪作用下海上风机单桩基础动力学与疲劳分析[D].哈尔滨工业大学,2016.
- [29] 余智,张凤亮,熊海贝.基于线性累计损伤理论的预应力混凝土风电塔架疲劳可靠性及剩余寿命研究[J].*武汉大学学报(工学版)*,2016,49(05):756-762.
- [30] 李明,王奎民,许维军.海上风力发电塔架结构风载涡激振动及疲劳分析[J].*中国水运*,2018,18(12):99-101.
- [31] 李岩,郑玉芳,赵守阳,等.直线翼垂直轴风力机气动特性研究综述[J].*空气动力学学报*,2017,35(03):368-382+398.
- [32] Lei H, Zhou D, Lu J, et al. The impact of pitch motion of a platform on the aerodynamic performance of a floating vertical axis wind turbine[J]. *Energy*, 2017(119):369-383.
- [33] Danao LA, Edwards J, Eboibi O, et al. A numerical investigation into the influence of unsteady wind on the performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine[J]. *Applied Energy*, 2014(116):111-124.
- [34] Almohammadi KM, Ingham DB, Ma L, et al. Modeling dynamic stall of a straight blade vertical axis wind turbine[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2015(57):144-158.
- [35] Gharali K, Johnson DA. Dynamic stall simulation of a pitching airfoil under unsteady freestream velocity[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013(42):228-244.
- [36] Guo Y, Li X, Sun L, et al. Aerodynamic analysis of a step adjustment method for blade pitch of a VAWT[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019(188):90-101.
- [37] Yang Y, Guo Z, Zhang Y, et al. Numerical investigation of the tip vortex of a straight-bladed vertical axis wind turbine with double-blades[J]. *Energies*, 2017, 10(11), 1721.

- [38] Bangga G, Hutomo G, Wiranegra R, et al. Numerical study on a single bladed vertical axis wind turbine under dynamic stall[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(1):261-267.
- [39] 徐林,李学敏,区家隽.叶片数及弦长对升力型垂直轴风力机的影响[J].*可再生能源*,2016,34(12):1834-1840.
- [40] 朱海天,郝文星,李春,等.建筑增强型垂直轴风力机气动特性数值研究[J].*哈尔滨工业大学学报*,2019,51(01):87-93.
- [41] 张松,莫亦寒,张声雨,等.垂直轴风力机翼型动态气动特性研究[J].*工程热物理学报*,2016,37(07):1377-1382.
- [42] 季剑.考虑旋转效应的风力机三维非定常空气动力学特性研究[D].华北电力大学,2012.
- [43] 李德源,汪显能,莫文威,等.非定常条件下风力机柔性叶片气弹耦合分析[J].*太阳能学报*,2017,38(04):966-975.
- [44] Bazilevs Y, Korobenko A, Deng X, et al. Fluid-structure interaction modeling of vertical-axis wind turbines[J]. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 2014, 81(8), 081006.
- [45] Larose GL, D'Auteuil. Effect of local air compressibility on the aerodynamics of rectangular prisms at Mach number below 0.3[A]. 6th International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications[C]. Milano, 2008.
- [46] Li Y, Pail KJ, Xing T, et al. Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics[J]. *Renewable Energy*, 2012(37):285-298.
- [47] Menter FR. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994(32): 1598-1605.
- [48] Ma J, Zhou D, Han Z, et al. Numerical simulation of fluctuating wind effects on an offshore deck structure[J]. *Shock and Vibration*, 2017, Article ID 3210271, 17 pages.
- [49] Newmark NM. A method of computation for structural dynamics[J]. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 1959(85):67-94.
- [50] 赵艳.风机结构振动监测及动力响应研究[D].浙江大学,2018.
- [51] DNV-OS-J101. Design of offshore wind turbine structures[S]. Norway: Det Norske Veritas, 2013.
- [52] Miner MA. Cumulative damage in fatigue[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, 12(3):159-164.
- [53] Smith KN, Watson P, Topper TH. A stress-strain function for the fatigue of metals[J]. *Journal of Materials*, 1970, 5(4):767-778.
- [54] 李乐.水平轴风力机塔架静动态特性和流场分析[D].兰州理工大学,2016.
- [55] Su J, Lei H, Zhou D, et al. Aerodynamic noise assessment for a vertical axis wind turbine using Improved Delayed Detached Eddy Simulation[J]. *Renewable Energy*, 2019(141):559-569.
- [56] Glück M, Breuer M, Durst F, et al. Computation of fluid-structure interaction on lightweight structures[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001(89):1351-1368.
- [57] Wang Z, Zhao Y, Li F, et al. Extreme dynamic responses of MW-level wind turbine tower in the strong typhoon considering wind-rain loads[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, Article ID 512530, 13 pages.

- [58] 柯世堂,余玮,王同光.停机状态叶片位置对风力机体系气动性能影响[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(07):1230-1238+1283.
- [59] Elkhoury M, Kiwata T, Aoun E. Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015(139):111-123.
- [60] Bedon G, De Betta S, Benini E. Performance-optimized airfoil for Darrieus wind turbines[J]. Renewable Energy, 2016(94):328-340.
- [61] Rezaeiha A, Kalkman I, Blocken Bert. CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment[J]. Renewable Energy, 2017(107): 373-385.
- [62] Rezaeiha A, Kalkman I, Blocken Bert. Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence[J]. Energy Conversion and Management, 2018(156): 301-316.
- [63] 朱翀,王同光,钟伟.风力机尾流流场的数值分析和尾流边界建模[J].南京航空航天大学学报,2011,43(05):688-692.
- [64] 康庄,倪问池,孙丽萍.改进 SST 湍流模型在分离流中的应用[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(09):1359-1364.
- [65] 吴祥辉,刘立群,赵晓博,刘晓,董雅睿.H 型垂直轴风力发电机变桨控制策略研究[J].太原科技大学学报,2015,36(06):441-445.
- [66] Orlandi A, Collu M, Zanforlin S, et al. 3D URANS analysis of a vertical axis wind turbine in skewed flows[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015(147):77-84.
- [67] 钟伟,王同光.风力机叶尖涡的数值模拟[J].南京航空航天大学学报,2011,43(05):640-644.

致谢

随着毕业论文的落笔，本科的学习与生活也即将告一段落。在交大的四年是我人生中最宝贵的一段经历，在这期间我经历过失败的低谷，也享受过成功的喜悦。值此毕业之际，有太多需要我感谢的人和铭记的事。

我首先要感谢我的论文指导老师周岱教授。我在大三的《建筑结构抗震》课程上初识周老师，便被他和风细雨的讲授和浓厚的学者气质所吸引。当我进入周老师的课题组进行科学研究后，更是被周老师渊博的学识、高瞻远瞩的科学眼光和宽广的胸怀所折服。周老师在我撰写毕业论文的过程中给予了大力支持，与我讨论研究计划，为我调配计算资源，帮助我规划论文结构，他严谨的科学态度和高尚的品质让我受益匪浅。非常感激自己能在周老师的课题组完成这次毕业论文，也十分期待未来在周老师的带领下继续攀登科学高峰！

其次，真诚感谢课题组的韩兆龙老师。是韩老师将我领进了科学的大门，让我领略到高水平的学术风范并得到充足的锻炼机会。韩老师在我的毕业论文上付出了大量心血，当我在研究中遇到困难时为我指明道路，在百忙之中抽空为我修改论文，在我失落时用诙谐幽默的语言鼓励我。没有韩老师的帮助，我就无法顺利地完成毕业论文，您的教导将会一直激励我前进。

同时，非常感谢课题组的包艳老师，雷航、朱宏博、苏捷、张宇航、曹宇、李煜学长和毛璐璐学姐，感谢你们在科研中给了我很多宝贵的建议和支持。特别是苏捷学长，在我刚进入课题组时教我如何使用计算流体力学软件，带我熟悉算例，在研究停滞时为我排忧解难，可以说他就是我科研道路上的领路人。在此，我衷心祝愿各位老师事业顺心，生活美满，各位学长学姐前途似锦，鹏程万里！

接着要感谢我的室友们在四年朝夕相处里对我的帮助和关心。博学多才的陈立，乐观开朗的周禹帆和成熟稳重的冯孝鑫，你们既是我的好玩伴，也是我学习的榜样，让我的生活丰富多彩，充满乐趣。还有我最好的朋友刘义杰，我们一起学习玩耍，共同进步，度过了很多快乐的时光。我希望你们在将来的人生道路上一帆风顺，活出自己的精彩！

之后我要感谢各位答辩评委老师对毕业论文的指导，这为我今后的研究提供了新的方向。我还要感谢学院和相关负责老师对毕业论文工作的安排和支持。

最后我要把所有的赞美都献给我的家人，在你们的支持和理解下，我得以顺利地完成学业。感谢父母二十余年的养育之恩，你们塑造我的品性，教会我为人处世之道。感谢爷爷奶奶和外公外婆对我一直以来的宠爱。感谢伯伯、伯母、舅舅、舅妈对我无私的帮助。我会继续努力，回报你们对我的爱。

况利民
2019年5月
于上海交通大学

攻读学士学位期间已发表或录用的论文和专利

- [1] **Limin Kuang**, Jie Su, Yaoran Chen, Zhaolong Han, Dai Zhou, Yongsheng Zhao, Zhiyu Jiang, Yan Bao. Flow characteristics and dynamic responses of a parked straight-bladed vertical axis wind turbine[J]. Energy Science & Engineering, accepted. **SCI Cited, IF=3.553**
- [2] **况利民**, 苏捷, 周岱, 韩兆龙, 赵永生, 包艳. 直线翼垂直轴风力机非定常气动特性数值模拟分析[J]. 振动与冲击, 已录用. **EI 收录**
- [3] Yijie Liu, Minsheng Zhao, **Limin Kuang**, Decheng Wan. Research on energy saving mechanism of propeller with endplates at blade tips based on OpenFoam[C]. The 10th International Conference on Computational Methods, accepted.
- [4] 万德成, 刘义杰, **况利民**, 许璐荣. 一种组合型叶梢端板船体螺旋桨[P]. 上海市: CN208306965U, 2019-01-01, 已授权. **实用新型**

攻读学士学位期间参加的科研科创项目

- [1] 上海大学生创新活动计划: 基于减压分压组合型叶梢端板的节能螺旋桨设计, 参与, 结题合格. 指导教师: 万德成教授.
- [2] 上海交通大学本科生科研项目 (PRP): 风力发电机支撑塔架的风荷载响应分析, 负责人, 结题优秀. 指导教师: 韩兆龙副教授.
- [3] 上海交通大学课程设计项目: 基于 MIDAS/GEN 的高层建筑抗震性能研究, 最高分. 指导教师: 王春江副教授.
- [4] 上海交通大学课程设计项目: 星海街地铁站基坑围护结构设计, 最高分. 指导教师: 陈锦剑教授.
- [5] 上海交通大学课程设计项目: 地铁区间隧道结构设计. 指导教师: 杜守继教授

WIND-INDUCED RESPONSES AND FATIGUE ANALYSIS OF THE VERTICAL AXIS WIND TURBINE

With the depletion of fossil fuel resources, the energy issue has become a key factor affecting the sustainable development of a country. Therefore, countries around the world have made the development of renewable energy as an important strategic target. Among the renewable energy sources that researchers mainly concerned, wind energy has the advantages of clean and pollution-free, wide distribution range and large reserves, hence has gradually becoming one of the most important choices for countries to develop and utilize renewable energy. As a wind energy conversion equipment, wind turbines have been continuously improved and widely used.

According to the position of the rotating shaft, wind turbines can be classified into horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT). Due to the higher wind energy conversion efficiency of HAWTs, they have been the focus of researchers for the past few decades. However, with the rapid development of urbanization and relying on unique advantages, VAWTs have obtained increasing attention recently. Compared with HAWTs, VAWTs with lower cost are able to receive wind from any direction without yaw mechanisms and produce less noise, and have better performance in turbulent wind conditions. These characteristics are found to be more suitable for urban areas where winds are unsteady and gusty.

VAWTs can mainly be divided into Savonius-type and Darrieus-type. The Darrieus-type wind turbines can convert the highest amount of energy due to a higher tip-speed ratio. The straight-bladed VAWT which is developed from traditional Darrieus-type wind turbines have simple blade shapes and wind wheel structures which are convenient to design and install. Besides, for numerical modelling, the regular blade shapes can reduce the workload and computational cost during the simulation process.

Although VAWTs have broad application prospects in urban areas, structural safety and work efficiency still restricts their further development. The structural components of VAWTs are usually slender and are susceptible to wind loads. Such a characteristic poses great challenges to the normal operation of wind turbine systems, resulting in deformation and fatigue problems. In addition, the internal flows of the VAWT wind wheel are complicated, the aerodynamic characteristics are difficult to analyze, and a series of key technologies need to be solved, especially the unsteady effect which will cause damage to the VAWT. Thus, the structural safety and unsteady aerodynamic characteristics of the VAWT are investigated in this paper.

In this paper, several research methods are adopted to carry out the wind-induced responses, fatigue analysis and unsteady aerodynamic characteristic of the straight-bladed VAWT. For the research of structural safety, the surface pressure distribution and flow characteristics of the VAWT are studied, the wind-induced responses of its structural components are calculated and its fatigue life is evaluated. Since the wind direction and operating state have relatively small influence on the vibration of straight-bladed VAWTs, and in order to reduce the workload of the numerical simulation, only the parked conditions of the VAWT are considered in this part. To

increase the impact of this study, the different steady wind conditions with $V_1 = 5$ m/s, $V_2 = 10$ m/s and $V_3 = 20$ m/s, and different parked conditions are compared to illustrate their effects on the dynamic behaviors of the VAWT. Taking into account the limitations of previous research methods, a two-way coupling algorithm combining the computational fluid dynamics (CFD) method and finite element analysis (FEA) technique are proposed in this paper to simulate the flow around the wind turbine and better reflect the wind conditions. The oscillating plate model from the research of Glück M et al. is used to verify the feasibility and accuracy of the two-way coupling algorithm and the results shows that it can be used in subsequent computations of the VAWT. The three-dimensional geometry model of the VAWT is built in the structural design software Unigraphics NX, and then import into the commercial CFD platform STAR-CCM+ and finite element software ABAQUS to construct appropriate numerical models, respectively. The SST $k-\omega$ turbulence model with the implicit unsteady segregated flow method is used to obtain the surface pressure and surrounding flow of the VAWT in STAR-CCM+. The time-domain wind-induced displacement and velocity responses of the whole structural system of the VAWT including the blades, support arms and support tower are calculated by ABAQUS with the implicit dynamic algorithm of Newmark method, using the traction loads extracted from STAR-CCM+. Before the formal calculation, the mesh independence test and time step test are performed to specify initial parameters of the two-way coupling simulation. After the wind-induced responses calculation, the fatigue damage of the VAWT subjected to coming wind action of 10 m/s is analyzed. The surface pressure distribution of the VAWT under the steady wind condition is derived from STAR-CCM+ and applied as the wind load to the finite element model in ABAQUS, and the implicit dynamic algorithm is utilized to obtain the time-domain stress responses of the VAWT. Based on the linear fatigue damage accumulation proposed by Miner, combined with the rain-flow counting method and mean stress correction method, the fatigue damage of the VAWT is calculated and its fatigue life is estimated. The main conclusions of this part are as follows:

(1) The contours of the pressure distribution on the windward surface of the VAWT are similar under a few different conditions and the pressure increases significantly as the wind velocity increases. The distribution of the surface pressure on blades shows a certain regularity. The interaction between the blade and flows affects the pressure distribution of the subsequent structure. The deformation of the VAWT leads to changes in the maximum positive pressure distribution on the support tower. The maximum and minimum values of the surface wind pressure are not much different in different parked conditions.

(2) The three-dimensional motion characteristics of the turbulent flow and the turbulent effect of the wake flow become more obvious as the wind velocity increases. Meanwhile, the vortex structures of the airfoils change significantly which may have an impact on the wind-induced responses of the VAWT. The slight difference in the position of the blade relative to the incoming flow will result in a large change in the flow field.

(3) The VAWT works normally at a certain position under wind action, accompanied by the vibration. Due to the large displacement and velocity, the blades and support arms deserve more attention during the design to ensure the structural safety of the VAWT. The effect of the parked condition on the wind-induced responses of the VAWT can be neglected.

(4) The fatigue life of the VAWT is 30.397 years, which meets the design requirements.

For the research of unsteady aerodynamic characteristics, the straight-bladed VAWT from the wind tunnel experiment constructed by Li et al. is taken as the research object, and the CFD

method with SST $k-\omega$ turbulence model is utilized. By comparing with the experimental data, it can be found that the numerical model based on the slip mesh technique adopted in this paper can accurately predict the power coefficient of the VAWT. Then the variations of the VAWT power coefficient, surface normal force and tangential force coefficients of the blades under different tip speed ratios during the operation are studied, and the aerodynamic thrust and generative torque of the blades are analyzed at the highest power coefficient. Meanwhile, the velocity distribution and vortex structures of the VAWT wind wheel at different heights are illustrated. All simulations are performed in a three-dimensional computational fluid domain established in STAR-CCM+. The results are shown as follows: (1) The SST $k-\omega$ model can be effectively used to calculate the aerodynamic characteristics of the VAWT. With the increase of the tip speed ratio, the power coefficient of the VAWT increases first and then decreases. By adjusting the rotor speed and controlling the tip speed ratio around 1.82, the VAWT can maximize the conversion of wind energy. (2) The angle of attack of the blade changes approximately sinusoidally with time. The variation range of the angle of attack is significantly increased when the tip speed ratio is reduced, which adversely affects the work efficiency of the VAWT. (3) The aerodynamic thrust and generative torque of the blades change periodically with the azimuth angle, and the time-domain aerodynamic forces of the three blades have a phase difference of 120° . As the tip speed ratio increases, the surface force coefficients of the blades fluctuate more frequently. (4) The velocity distribution and vortex structures of the VAWT wind wheel have certain regularity, and there are obvious divergence between the different tip speed ratios and different heights. The tip vortices and dynamic stall phenomenon should be controlled during the design and operation of the VAWT.

In general, this paper combines the CFD method, FEA technique and structural fatigue analysis to numerically simulate the wind-induced responses, fatigue damage and unsteady aerodynamic characteristics of the straight-bladed VAWT. By analyzing the dynamic behaviors and various aerodynamic parameters, the structural safety and work efficiency of the VAWT are deeply explored, and its operation mechanism is clarified. The research methods as well as the numerical simulation results are expected to provide references for the scientific design and operation of VAWTs.