

垂直轴风力发电机力学性能研究综述

张涵, 唐清春*, 黄健友

广西科技大学机械与汽车工程学院, 广西 柳州

收稿日期: 2024年3月20日; 录用日期: 2024年4月12日; 发布日期: 2024年4月19日

摘要

海上风电作为我国“十四五”规划的重要目标之一, 垂直轴风力机(VAWT)在近海风场上有很大的优势。在目前众多学者的研究之中, 为拉近VAWT与HAWT的差距, 提升VAWT的性能, 对VAWT的空气动力学研究很充分, 但大型化VAWT的安全性和可靠性也成为备受关注的问题。本文从VAWT空气动力学和结构动力学两方面展开对VAWT力学性能研究的阐述, 针对VAWT叶片结构动力学研究的不足提出了相应的观点。

关键词

垂直轴风力发电机, 空气动力学, 结构动力学

A Review of Research on the Mechanical Performance of Vertical Axis Wind Turbines

Han Zhang, Qingchun Tang*, Jianyou Huang

School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi

Received: Mar. 20th, 2024; accepted: Apr. 12th, 2024; published: Apr. 19th, 2024

Abstract

Offshore wind power is one of the important goals of China's 14th Five Year Plan, and vertical axis wind turbines (VAWT) have great advantages in offshore wind farms. In the current research of many scholars, in order to narrow the gap between VAWT and HAWT and improve the performance of VAWT, there is sufficient research on the aerodynamics of VAWT. However, the safety and reliability of large-scale VAWT have also become a highly concerned issue. This article elaborates on the mechanical performance research of VAWT from two aspects: aerodynamics and

*通讯作者。

structural dynamics, and proposes corresponding views on the shortcomings of VAWT blade structural dynamics research.

Keywords

Vertical Axis Wind Turbine, Aerodynamics, Structural Dynamics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为了实现节能减排,遏制环境破坏,落实应对气候变化国家自主贡献目标,在我国“十四五”规划中制定了2030年前碳排放达峰行动方案,并争取在2060年前实现碳中和。推进碳达峰碳中和,彰显了大国责任与担当,也为可再生能源行业的发展指明了方向。使用可再生能源替代化石能源是改善能源匮乏与环境保护的重要手段之一,对实现人类社会的可持续发展具有重要意义。因此,可再生能源的开发和利用成为当今社会的主题。作为可再生能源的一种,风能拥有无污染、储量大等诸多优点,风能也是不受政治安全和经济安全影响的可再生能源[1],风力发电也逐渐发展为全球新兴的战略性新兴产业之一[2]。

特别地,随着具有风速高、对人类影响小和分布广等优点的海上风场的开发,海上风电将成为下一个巨大而富有吸引力的可再生能源资源[3]。海上风电将可为应对气候变化、减少碳排放和能源安全等方面承担更多责任,其发展前景广阔。因此,海上风电是推进能源向清洁低碳转型的重要战略方向,其产业带动和辐射能力强,可高质量推进我国海上风电规模化集中连片开发,将是培育海上风电全产业链国产化 and 产业集群化的重大机遇[4]。

垂直轴风力机(VAWT)是应用绿色能源——风能的关键设备之一。从结构上,它们主要分为垂直轴风力机(VAWT)和水平轴风力机(HAWT)。长期以来,得益于专项资金的投入[5]和航空技术的发展,HAWT的发展远远领先于VAWT,在应用上处于主导地位。虽然,目前商用的风力机几乎是HAWT,但是在靠近地面的强风区域或在海上风场中,与HAWT相比,VAWT具有重心低和对方向不敏感的优点,特别能适应海上复杂多变的环境[6]。

随着叶片材料、制造技术和直接驱动发电机系统的发展,大功率多兆瓦级(即十兆瓦级以上)大型VAWT是未来的主要发展方向之一,风力机叶片尺寸大型化也成为了风力机的重要发展方向。世界上最先进的大型多兆瓦级风力机的功率水平已经由1.5 MW [7] (2010年以前)发展到10-MW级以上[8] [9],并且这些10-MW级大型风力机大多都是水平轴结构的。例如,在2019年我国的东方电气集团东方电机有限公司率先研制出国内首台10-MW级的海上风力机;在2021年,中车永济电机公司率先研制出13 MW的海上风力机。虽然大型多兆瓦级HAWT的发展很快,但是由转子尺寸升级带来的安全问题却让许多大型多兆瓦级风力机的风电专家感到忧心[3]。其主要原因之一是兆瓦级HAWT叶片的结构强度几乎已经达到了极限,限制了叶片进一步变得更长。并且,在叶片的整个寿命周期内,将会承受超过 10^8 次由重力引起的循环载荷。在很多正在服役的复合材料叶片中,通过肉眼观察便能发现它们的损坏[10]。由于结构上的差异,在VAWT叶片上,却是不存在这种由重力引起的循环载荷。因此,在2009年的汉堡海上风电会议上,有学者认为当多兆瓦级HAWT的叶片接近生存极限(即长度极限)时,VAWT可为叶片的设计制造提供经济高效的解决方案[11]。其中,英国的Wind Power Ltd.在2014年提出了10-MW级的VAWT

概念机[3]。针对 VAWT 的力学性能研究主要从空气动力学和结构动力学两方面展开。

2. VAWT 的空气动力学研究

虽然, VAWT 具有许多 HAWT 无可比拟的优点, 在大型化(多兆瓦级)发展上更具有得天独厚的先天优势; 但是, VAWT 自身也存在许多不足的地方, 其中最主要的是 VAWT 的气动性能(包括功率系数和启动特性)普遍不如 HAWT [12]和风电功率随机波动较大[13]等。为了促进 VAWT 的健康快速发展, 实现其商业化应用, 许多学者致力于 VAWT 空气动力学方面的研究, 寻求 VAWT 气动性能的改善。他们的研究主要是从尾流特性、动态失速、功率系数和启动特性等方面进行展开。

在尾流特性方面, 主要有 Lam [14]通过使用计算流体力学(CFD)对低实度的直线叶片 VAWT 的尾迹进行研究, 研究结果表明: 在近尾迹区域内, 速度亏损高达 85%; 然而, 在远尾迹区域中, 主速度能恢复到平均流向速度的 75%; 此外, 尾迹的非对称性还将随着下游距离的增加而增大。Rolin [15]和 Kadum [16]通过风洞试验对 VAWT 尾流的影响因素进行分析。Rolin 的研究结果表明侧风流对尾迹动量存的再分布在重要影响。Kadum 的实验结果则发现了 VAWT 的旋转会引起尾迹动量的不平衡, 会引起尾迹倾斜的现象。他们的这些研究, 可为后续的风场设计(风力机的布置)提供研究基础。

在动态失速方面, Almohammadi [17]、Wang [18]和 Jain [19]对动态失速的成因进行研究, 研究结果表明攻角的快速变化导致叶片前缘和后缘产生强烈的漩涡脱落, 从而导致叶片上产生高度不平稳的升力波动和疲劳载荷, 这种现象被定义为动态失速。VAWT 的动态失速受很多因素影响, 如雷诺数[20]、湍流强度[21] [22]、叶片几何参数[19] [23]、转速[24]和折合频率[25] [26]等。Hau [25]认为上述因素中的折合频率、转速和俯仰角的变化会影响无量纲的俯仰率和雷诺数, 从而导致叶片在不同方位发生动态失速。由于动态失速对风力机气动性能具有消极作用, 因此 Yen [27]、Zhu [28]和 Tavernier [29]分别使用合成射流技术、导流间隙叶片和涡流发生器来抑制风力机的动态失速, 显著改善了叶片的气动特性。

在功率系数方面, Howell [30]和 Danao [31]通过风洞实验分别验证了叶片的表面光洁度和风速会改变风力机的功率系数。Lee [32]和 Subramanian [33]研究了实度、TSR 和功率系数三者的关系, 他们的研究结果均表明了低实度的 VAWT 需要在高 TSR 的运行条件中功率系数才会达到更佳的水平。此外, 还有 Elkhoury [34]系统性地评估了风速、湍流强度、翼型形状、变俯仰角和不变俯仰角的支撑结构对功率系数的影响; 和 Rezaeiha [35]讨论了俯仰角跟功率系数的关系。通过这些研究, 不难发现对功率系数具有显著影响的因素主要有俯仰角、TSR、翼型形状和叶片尺寸等。

在启动特性方面, 主要有 Li [36]讨论了 NACA0018、NACA 2418 和 NACA 4418 三种翼型叶片的静扭矩系数, 发现 NACA 4418 的静态扭矩最佳(即启动性能最好)。Cao [37]进一步对比研究了 S 系列和 NACA 系列四位数翼型叶片的静扭矩系数, 发现 S 1046 的静扭矩系数最高, 但是它的功率系数最低; NACA 0015 的功率系数最高, 但是静扭矩系数却比 S 1016 和 S 1046 的都要低。Cao 的研究表明了, 对于给定的翼型叶片, 若不动态改变其他参数(例如俯仰角), 是难以同时获得最佳的启动特性和功率系数的。

上述研究的主要目的是探明影响 VAWT 气动性能的主要因素及其作用机理, 从而寻找改善 VAWT 气动性能行之有效的措施。以上普遍存在的问题是将叶片当作刚体处理, 未考虑叶片的弹性变形带来的影响。忽视叶片的弹性变形, 将会对降低 VAWT 气动性能研究结果的可靠性, 其根本原因在于弹性变形将会通过线速度来影响攻角, 从而影响叶片的气动性能[38]。

在众多显著影响 VAWT 气动性能的参数中, 通过改变俯仰角来提高功率系数是最行之有效的方法之一, 并且俯仰角的改变还能改善风力机的启动性能[39] [40]。风力机处于最佳性能时俯仰角总是非零的, 固定的俯仰角不能保证 VAWT 每一个叶片的升力在任意位置(方位角)都能达到最大值[40], 如图 1 所示。如果能够实时调节俯仰角, 使风力在不同的环境中总能处于一个最佳的状态, 那么风力机的功率系数必会得到进一步的提升, 而且对电网系统的稳定性也有重要的影响。

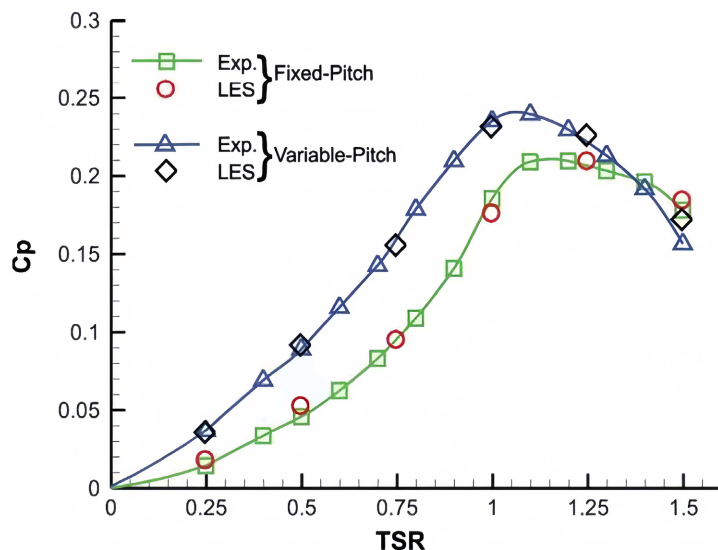


Figure 1. Relationship between Average Power Coefficient and Tip Speed Ratio (TSR) of Fixed and Variable Pitch Angles NACA0021 [34]
图 1. 固定和可变俯角 NACA0021 的平均功率系数和叶尖速度比 (TSR)的关系[34]

3. VAWT 的结构动力学研究

在 VAWT 发展的几十年中, 对于 VAWT 的空气动力学研究已经很充分, VAWT 性能与 HAWT 性能之间的差距日益减少。然而, VAWT 的安全性和可靠性问题也是不容小觑的。EOLE (4 MW) [41] 便是因为结构共振的问题不得不停运。尽管与 HAWT 相比, VAWT 叶片结构刚度更高, 但当其叶片长度随功率的增加而增加时, VAWT 叶片结构的刚度会被削弱。VAWT 的侧向是承受风力载荷的主要方向, 也是结构刚度最脆弱、最容易发生振动和最容易破裂的方向。随着梁跨度的逐渐增大, 叶片的变形从小变形转变为大变形, 其动态特性的非线性效应也逐渐显著, 对其结构安全和性能有着重要的影响。因此, 对 VAWT 叶片进行结构动力学研究, 能更好地分析旋转平行梁弹性运动平衡和稳定性的作用机理, 有利于提高叶片的结构动力学性能, 促进 VAWT 行业健康发展。近年来, 各国学者对 VAWT 结构动力学展开了研究, 通过建立数学模型和仿真分析, 主要研究了 VAWT 叶片固有频率对动态特性的影响。

黄健友[38] [42] [43] [44]首次通过 Hamilton 原理与欧拉梁模型, 构建了 VAWT 叶片四维度完全变形耦合线性模型, 推导了平衡态位移、固有频率、振型函数的精确解和解析解。系统研究了离心力、科式力、耦合变形、材料阻尼和俯仰角等对 VAWT 叶片结构振动的重要作用和机理, 完整地分析了叶片的结构振动特性。同时在线性模型的基础上, 推导了保留至三阶项的非线性模型。在黄的研究中, 发现固有频率的变化与外载荷的变化区间相交, 会发生共振, 如图 2 所示。田海娇[45] [46]将巨型垂直轴风力发电机简化为高耸桅杆结构, 利用 ANSYS 计算各阶模态, 用坎贝尔图将整个转速范围内转子振动的全部分量的变化特征表示出来, 发现叶片固有频率曲线与激振力频率曲线存在共振点。蒋周伟[47]选取垂直轴发电机的主轴、叶臂、叶片等关键部件进行分析, 校核其是否满足要求并避开共振点。利用 ANSYS 对垂直轴风力机的叶片进行模态分析, 发现应禁止叶片的固有频率接近转速频率的数倍。

Hyung *et al.* [48]通过考虑轴弯曲、轴扭转、轴张力、转子张力和转子弯曲之间的耦合效应, 建立了垂直轴风电机组动力学模型。利用动力学模型得到了垂直轴风电机组的模态特性。同时研究了轴长、轴径和转子截面积等关键设计参数对风电机组模态特性的影响, 如表 1 所示。

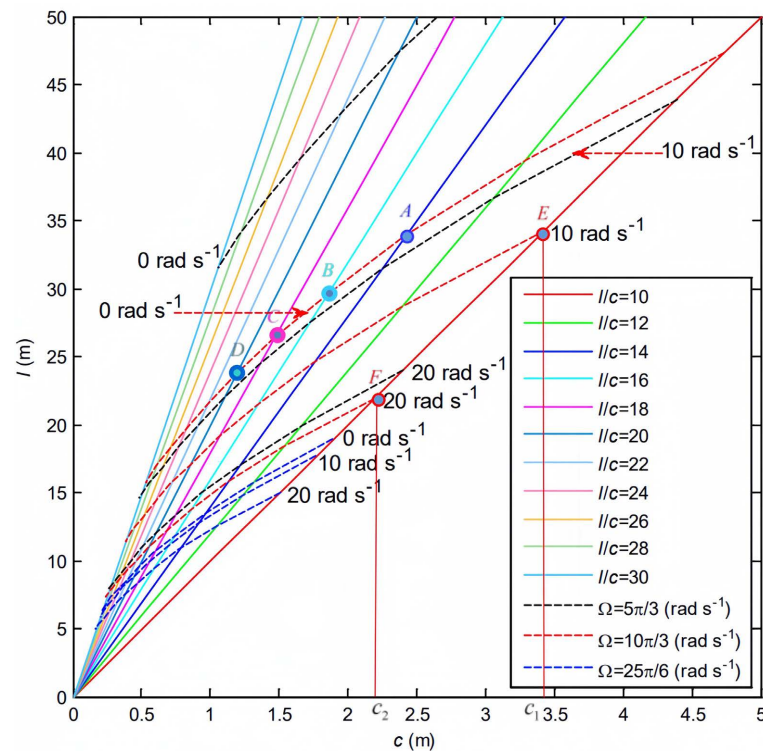


Figure 2. Resonance diagram of natural frequency ω [43]

图 2. 固有频率 ω 的共振图[43]

Table 1. Research progress on the natural frequency and external load frequency of VAWT blades

表 1. VAWT 叶片固有频率与外载荷频率的研究进展

| 作者 | 研究方法 | 结论 |
|-------------------|---|---|
| 黄健友[38] [43] [44] | 推导动态方程精确解, 考虑风载荷 10~20 rad/s, 研究 NACA0015 翼型不同长弦比下固有频率的变化 | 固有频率随着转速增加而减小, VAWT 叶片工作时要避免固有频率的变化发生在外载荷变化的区间内 |
| 田海娇[46] | 利用 ANSYS 研究巨型达里厄型风力发电机叶片的固有频率和转速的关系 | 固有频率的变化曲线与激振力变化曲线存在交点——共振点, 避免共振的方法应使共振点不在风力机的主要运行区 |
| 蒋周伟[47] | 利用 ANSYS 研究 NACA0018 翼型的前六阶振型 | 应禁止叶片的固有频率接近转速频率或转速频率的整数倍, 尤其是其转速频率的三倍 |
| Hyung et al. [48] | 利用 ANSYS 研究 VAWT 叶片的四阶固有频率 | 应禁止 VAWT 叶片第一阶模态固有频率接近主轴的转速, 最好的办法是减小轴长。 |

由此可见作为垂直轴风力机采集风能的关键零部件, 叶片的可靠性是影响 VAWT 安全运营的重要因素。当外载荷频率与结构固有频率相近时, 会产生共振现象。共振会降低结构疲劳寿命, 导致叶片失效 [41] [49] [50], 对叶片的颤振极限产生一定的影响, 使 VAWT 叶片失去气弹性稳定性, 导致叶片的疲劳、损伤、甚至破裂, 严重影响 VAWT 的安全稳定运行[51] [52] [53]。因此在设计 VAWT 叶片时, 应进行详细的模态分析, 确定叶片的固有频率和振型, 这有助于识别潜在的共振点, 避免共振的发生。同时进行优化叶片设计, 如改变叶片的截面形状、调整叶片的刚度和质量分布, 可以降低共振的风险。

当前, 风力机叶片的结构动力学研究主要是关于 HAWT 的, 关于 VAWT 叶片结构动力学研究的公开文献很少。在对 VAWT 叶片进行建模和仿真分析中, 通常都将其类比为梁模型。例如, Deng *et al.* [54] 将 5 兆瓦海上浮式 VAWT 的主轴和叶片的连接方式类比为悬臂梁模型, 通过对其进行动态响应分析, 得到了 VAWT 旋转叶片固有频率和转速之间的变化规律。因而, 从对类比梁的结构振动研究中, 对研究 VAWT 叶片的结构动力学研究中能受到启发。

Hodges 和 Dowell [55] 曾在 1974 年将叶片简化为悬臂梁模型, 并考虑了各方向挠曲、扭转以及翘曲, 应用哈密顿原理和牛顿第二定律, 推导了二阶非线性振动模型。Wu [56] 建立了考虑具有耦合效应的矩形截面旋转悬臂梁的动力学模型, 并采用瑞利 - 里兹法得到了不同参数下旋转径向悬臂梁的固有频率及模态振型; Li *et al.* [57] 通过构建悬臂梁四维度耦合模型, 分析了模态耦合、离心效应和转速对固有频率和振型的影响; Wu *et al.* [58] 建立弯曲 - 弯曲 - 扭转耦合的三维旋转预扭梁的模型进行自由振动研究, 利用模态分析法研究梁的振动问题; Farokhi *et al.* [59] 利用 Euler-Bernoulli 梁理论与 Kelvin-Voigt 材料阻尼, 建立了悬臂梁的三维几何精确模型, 利用 Hamilton 原理推导三个旋转运动的运动方程, 同时保持所有项的几何精确, 对三个偏微分运动方程进行 Galerkin 离散化; Zhou *et al.* [60] 基于 Euler-Bernoulli 梁理论和 Hamilton 原理, 建立了梁的耦合三维运动的非线性模型, 并用 Galerkin 方法对运动方程进行了离散, 得到了梁的动态响应; Han [61] 针对铁木辛柯梁构建了旋转悬臂梁模型, 建立了三个具有任意边界条件的偏微分非齐次振动控制方程, 利用叠加原理, 直接得到了梁在各种谐波载荷下的响应的显式表达式。Jokar *et al.* [62] 通过哈密顿原理获得并用于推导水平轴风力机新的耦合动力学方程, 并采用瑞利 - 里兹法 (RRM) 提取降阶模型 (ROM) 进行叶片振动分析, 开发的非线性 ROM 围绕稳态解进行线性化, 并获得叶片的动态特性, 重点研究了不同叶片自由度之间的预扭、转动刚体运动和耦合作用。

由于风力机叶片轴向尺寸比其它两个维度的尺寸大很多, 通常将它视为细长梁 [63]。根据叶片和其转子的链接方式的不同, 通常简化为垂直于旋转轴的旋转悬臂梁模型 [64] 或者两端固定在叶臂上的两端固定梁模型, 通过建立控制方程去分析其动态响应。在悬臂梁模型的研究中, 其离心力主要沿叶片的长度方向分布, 梁的轴线方向不是振动的敏感方向, 因此在悬臂梁的振动特性分析中常常忽略轴向振动 [65]。旋转运动产生的离心惯性力引起的旋转结构的振动特性往往变化较大, 拉伸引起结构弯曲刚度的增加, 导致结构固有频率和振型的变化, 旋转悬臂梁在各个方向会产生耦合作用, 非线性效应会更加明显。对于旋转两端固定梁模型而言, 由于旋转方式和支承方式 (即边界条件) 的不同, 旋转悬臂梁和旋转两端固定梁的结构振动特性分析会有很大的差异。旋转两端固定梁的离心力主要沿着叶片的厚度方向, 离心力施加在叶片横向上, 是会削弱叶片的抗弯刚度。故两者之间有很大不同, 无论选用哪种模型, 在仿真分析中, 要充分考虑 VAWT 的实际结构和边界条件, 也要对仿真模型进行验证和修正, 以确保仿真结果的准确性和可靠性。

4. 结论

海上风力发电是我国“十四五”规划的重要目标之一, 用风能资源取代化石能源有利于实现我国能源自主与安全和人类社会的可持续发展。高性能大型多兆瓦级垂直轴风力机 (VAWT) 是海上风能发电的关键设备, 对于近海等强风速地区, VAWT 的结构安全性能是重中之重, 叶片作为其关键的零部件, 对 VAWT 叶片建立数学模型和仿真分析, 不能不考虑强迫振动特性和非线性振动特性。研究发现, 叶片的侧向是抗弯刚度最小的方向, 从而在该方向上最容易发生振动、最脆弱和最易受到破坏 [42] [44]。VAWT 在实际工作中, 需要依靠足够的刚度才能维持正常的工作状态。面对强风条件, VAWT 叶片受到的气动载荷增加, VAWT 叶片的固有频率会随着转速的增加而减小, 当固有频率与外载荷频率相等时, 容易发生共振现象, 对结构安全性能造成威胁。同时, 随着风力机功率的提升, 叶片的尺寸就应随之调整, 当

叶片的尺寸大到一定的程度，其非线性效应也就越来越明显。在非线性和动力学系统的研究中，由于其系统本身具有比较丰富且相当复杂的特性，而线性的系统中没有这样的特性，忽略非线性效应造成的影响，所构建的模型就会失效。因而，随着叶片跨度的逐渐增加，其非线性效应是不能不考虑的。

综上所述，VAWT 叶片的空气动力学研究较为充分，而结构动力学问题研究进展较少且较为复杂，因而可以采用以下手段进行 VAWT 叶片的结构动力学研究以提升 VAWT 叶片的结构动力学性能。

1) 随着材料科学的不断进步，新型轻质、高强度的复合材料将成为 VAWT 叶片的首选材料。这些材料不仅能有效减轻叶片的重量，降低风力发电机的运行成本，还能提高叶片的刚度和强度，从而增强其抗风能力和运行稳定性。例如：可以将叶片镂空或者使用碳纤维、玻璃纤维等复合材料；

2) 对叶片的几何形状、截面尺寸和布局方式进行优化，可以进一步提高风力发电机的发电效率。研究叶片在不同风速、风向下的动力学响应特性，以及叶片与风力发电机其他部件之间的相互作用关系，也是未来研究的重点方向；

3) 在分析叶片的结构振动特性时，要结合叶片的气动载荷来分析叶片的结构响应，也要分析叶片结构响应对气动特性的影响，这就需要在建立 VAWT 叶片数学模型时，充分考虑流固耦合效应；

4) 结构控制是降低叶片结构响应，提高结构安全的重要手段。可以在风力机叶片中嵌入记忆合金，其原理是根据叶片响应的变化或者气动载荷的变化，对形状记忆合金进行温度控制，改变形状记忆合金的组织构成，从而改变形状记忆合金的杨氏模量，达到增强叶片的抗弯能力，降低叶片的结构响应，提高叶片的安全性。

对 VAWT 进行结构动力学分析，能够提高 VAWT 的结构安全性和可靠性，提高风力机的能量效率，改善风力机的性能，从而促使 VAWT 乃至整个风电行业的发展。

参考文献

- [1] Jiu, W., Marnoto, T., Mat, S., *et al.* (2015) Darrieus Vertical Axis Wind Turbine for Power Generation I: Assessment of Darrieus VAWT Configurations. *Renewable Energy*, **75**, 50-67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.038>
- [2] 许国东, 叶杭治, 解鸿斌. 风电机组技术现状及发展方向[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 44-50.
- [3] Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., *et al.* (2015) Darrieus Vertical Axis Wind Turbine for Power Generation II: Challenges in HAWT and the Opportunity of Multi-Megawatt Darrieus VAWT Development. *Renewable Energy*, **75**, 560-571. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.039>
- [4] 徐辉. 海上风电推动能源转型的战略选择与实践思考[J]. 能源, 2020(12): 78-82.
- [5] Trevo, J.P. (2005) Edward Golding's Influence on Wind Power. *Wind Engineering*, **29**, 513-530. <https://doi.org/10.1260/030952405776234553>
- [6] Michael, B., Andrew, S. and Maurizio, C. (2014) Offshore Floating Vertical Axis Wind Turbines, Dynamics Modelling State of the Art. Part I: Aerodynamics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **39**, 1214-1225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.096>
- [7] REN (2011) Renewables 2011: Global Status Report. Environmental Policy Collection.
- [8] Global Wind Energy Council (2019) Global Wind Report 2018 Annual Market Update. <https://www.energy.gov/eere/wind/2018-wind-market-reports>
- [9] Global Wind Energy Council (2020) Global Wind Report 2019 Annual Market Update. <https://gwec.net/?s=Global+Wind+Report+2019+Annual+Market+Update>
- [10] Sayer, F., Buerkner, F., Buchholz, B., *et al.* (2013) Influence of a Wind Turbine Service Life on the Mechanical Properties of the Material and the Blade. *Wind Energy*, **16**, 163-174. <https://doi.org/10.1002/we.536>
- [11] Hunter, P.C. (2009) Multi-Megawatt Vertical Axis Wind Turbine. Hamburg Offshore Wind Conference, Hamburg,
- [12] 姚英学, 汤志鹏. 垂直轴风力机应用概况及其展望[J]. 现代制造工程, 2010(3): 136-139, 144.
- [13] 杨益飞, 潘伟, 朱焜秋. 垂直轴风力发电机技术综述及研究进展[J]. 中国机械工程, 2013, 24(5): 703-709.
- [14] Lam, H.F. and Peng, H.Y. (2016) Study of Wake Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbine by Two- and Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulations. *Renewable Energy*, **90**, 386-398.

- <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.011>
- [15] Rolin, V.F. and Porté-Agel, F. (2018) Experimental Investigation of Vertical-Axis Wind-Turbine Wakes in Boundary Layer Flow. *Renewable Energy*, **118**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.105>
- [16] Kadum, H., Friedman, S., Camp, E.H. and Cal, R.B. (2018) Development and Scaling of a Vertical Axis Wind Turbine Wake. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **174**, 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.004>
- [17] Almohammadi, K.M., Ingham, D.B., Ma, L. and Pourkashanian, M. (2015) Modeling Dynamic Stall of a Straight Blade Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Fluids & Structures*, **57**, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.003>
- [18] Wang, Q. and Zhao, Q. (2018) Rotor Airfoil Profile Optimization for Alleviating Dynamic Stall Characteristics. *Aerospace Science and Technology*, **72**, 502-515. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.11.033>
- [19] Jain, S. and Saha, U.K. (2020) On the Influence of Blade Thickness-to-Chord Ratio on Dynamic Stall Phenomenon in H-Type Darrieus Wind Rotors. *Energy Conversion and Management*, **218**, Article ID: 113024. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113024>
- [20] Sangwan, J. and Sengupta, T.K. (2017) Investigation of Compressibility Effects on Dynamic Stall of Pitching Airfoil. *Physics of Fluids*, **29**, Article ID: 076104. <https://doi.org/10.1063/1.4995457>
- [21] Rezaeiha, A., Montazeri, H. and Blocken, B. (2018) Characterization of Aerodynamic Performance of Vertical Axis Wind Turbines: Impact of Operational Parameters. *Energy Conversion and Management*, **169**, 45-77. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.042>
- [22] Xh, A., Ma, A., Psm, A., et al. (2020) Analysis of the Effect of Freestream Turbulence on Dynamic Stall of Wind Turbine Blades. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **85**, Article ID: 108668.
- [23] Pablo, O., Thorsten, S. and Luis, R. (2018) Effect of Blade Cambering on Dynamic Stall in View of Designing Vertical Axis Turbines. *Journal of Fluids Engineering*, **140**, Article ID: 061104. <https://doi.org/10.1115/1.4039235>
- [24] Leknys, R.R., Arjomandi, M., Kelso, R.M., et al. (2019) Dynamic Stall Flow Structure and Forces on Symmetrical Airfoils at High Angles of Attack and Rotation Rates. *Journal of Fluids Engineering*, **141**, Article ID: 051104. <https://doi.org/10.1115/1.4041523>
- [25] Hau, N.R., Lin, M., Ingham, D., et al. (2020) A Critical Analysis of the Stall Onset in Vertical Axis Wind Turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **204**, Article ID: 104264. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104264>
- [26] Brianhand Kelly, G. and Cashman, A. (2017) Numerical Simulation of a Vertical Axis Wind Turbine Airfoil Experiencing Dynamic Stall at High Reynolds Numbers. *Computers & Fluids*, **149**, 12-30. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.02.021>
- [27] Yen, J. and Ahmed, N.A. (2013) Enhancing Vertical Axis Wind Turbine by Dynamic Stall Control Using Synthetic Jets. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **114**, 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.12.015>
- [28] Zhu, H., Hao, W., Li, C., et al. (2020) Effect of Flow-Deflecting-Gap Blade on Aerodynamic Characteristic of Vertical Axis Wind Turbines. *Renewable Energy*, **158**, 370-387. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.092>
- [29] Tavernier, D.D., Ferreira, C., Viré, A., et al. (2021) Controlling Dynamic Stall Using Vortex Generators on a Wind Turbine Airfoil. *Renewable Energy*, **172**, 1194-1211.
- [30] Howell, R., Qin, N., Edwards, J. and Durrani, N. (2010) Wind Tunnel and Numerical Study of a Small Vertical Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*, **35**, 412-422. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.025>
- [31] Danao, L.A., Eboibi, O. and Howell, R. (2013) An Experimental Investigation into the Influence of Unsteady Wind on the Performance of a Vertical Axis Wind Turbine. *Applied Energy*, **107**, 403-411. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.012>
- [32] Lee, Y.T. and Lim, H.C. (2015) Numerical Study of the Aerodynamic Performance of a 500W Darrieus-Type Vertical-Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*, **83**, 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.043>
- [33] Subramanian, A., Arun, S., et al. (2017) Effect of Airfoil and Solidity on Performance of Small Scale Vertical Axis Wind Turbine Using Three Dimensional CFD Model. *Energy*, **133**, 179-190. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.118>
- [34] Elkhoury, M., Kiwata, T. and Aoun, E. (2015) Experimental and Numerical Investigation of a Three-Dimensional Vertical-Axis Wind Turbine with Variable-Pitch. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **139**, 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.004>
- [35] Rezaeiha, A., Kalkman, I. and Blocken, B. (2017) Effect of Pitch Angle on Power Performance and Aerodynamics of a Vertical Axis Wind Turbine. *Applied Energy*, **197**, 132-150. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.128>

- [36] Li, Y., Feng, F., Tian, W.Q., *et al.* (2011) Numerical Simulation on the Static Torque Performance of Vertical Axis Wind Turbine with Different Blade Airfoils. *Applied Mechanics and Materials*, **84-85**, 702-705. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.84-85.702>
- [37] Cao, H., Wu, X., Ye, H., *et al.* (2018) Optimization Research on Lift-Type Vertical Axis Wind Turbine Airfoil by CFD. *Journal of Physics: Conference Series*, **1064**, Article ID: 012072. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1064/1/012072>
- [38] Jianyou, H., Chia-Ou, C. and Chien-Cheng, C. (2021) Analysis of Structural Vibrations of Vertical Axis Wind Turbine Blades via Hamilton's Principle—Part 3: Pitch Angle and Equilibrium State. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **21**, Article ID: 2150070. <https://doi.org/10.1142/S021945542150070X>
- [39] Saeid, B., Amin, S. and Nader, J. (2008) Forced Vibration Analysis of Flexible Euler-Bernoulli Beams with Geometrical Discontinuities. *2008 American Control Conference*, Seattle, 11-13 June 2008, 4029-4034.
- [40] Sun, X.J., Zhu, J.Y., Li, Z.J. and Sun, G.X. (2020) Rotation Improvement of Vertical Axis Wind Turbine by Offsetting Pitching Angles and Changing Blade Numbers. *Energy*, **215**, Article ID: 119177. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119177>
- [41] Carne, T.G., Lauffer, J.P., Gomez, A.J., *et al.* (1987) Modal Testing the EOLE. SAND-87-1506.
- [42] Huang, J.Y., Zhang, H., Zhou, C., Tang, Q.C. and Lin, J.X. (2023) Nonlinear Structural Vibration of Multi-Megawatt Vertical Axis Wind Turbine Blades-Part 1: Derivation of Motion Equations. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. <https://doi.org/10.1142/S0219455424501359>
- [43] Huang, J.Y., Chang, C.O. and Chang, C.C. (2020) Analysis of Structural Vibrations of Vertical Axis Wind Turbine Blades via Hamilton's Principle—Part 2: Exact and Approximate Solutions. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **20**, Article ID: 2050099. <https://doi.org/10.1142/S0219455420500996>
- [44] Huang, J.Y., Chang, C.O. and Chang, C.C. (2020) Analysis of Structural Vibrations of Vertical Axis Wind Turbine Blades via Hamilton's Principle—Part 1: General Formulation. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **20**, Article ID: 2050098. <https://doi.org/10.1142/S0219455420500984>
- [45] 田海姣, 王铁龙, 王颖. 垂直轴风力发电机发展概述[J]. 应用能源技术, 2006(11): 22-27.
- [46] 田海姣, 高日, 王铁龙. 巨型垂直轴风力发电机组结构的动力特性分析[J]. 钢结构, 2007, 22(6): 38-41.
- [47] 蒋周伟. H型垂直轴风力发电机风振特性与结构优化研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [48] Kim, H.H., Oh, Y. and Yoo, H.H. (2020) Simple Vibration Model for the Design of a Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **34**, 511-520. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0101-z>
- [49] Luk, K.F., So, R.M.C., Leung, R.C, K., *et al.* (2004) Aerodynamic and Structural Resonance of an Elastic Airfoil Due to Oncoming Vortices. *AIAA Journal*, **42**, 899-907. <https://doi.org/10.2514/1.2246>
- [50] Blevins, R.D. and Saunders, H. (1977) Flow-Induced Vibration. Van Nostrand Reinhold, New York.
- [51] Sina, S. (2021) Aeroelastic Stability of Horizontal Axis Wind Turbine Blades. *7th Iran Wind Energy Conference (IWEC2021)*, Shahrood, 17-18 May 2021, 1-4.
- [52] Kallesøe, B.S. and Hansen, M.H. (2009) Some Effects of Large Blade Deflections on Aeroelastic Stability. *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, 5-8 January 2009. <https://doi.org/10.2514/6.2009-839>
- [53] Touraj, F. and Altan, K. (2016) Classical Aeroelastic Stability Analysis of Large Composite Wind Turbine Blades. *57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, San Diego, 4-8 January 2016. <https://doi.org/10.2514/6.2016-1959>
- [54] Wanru, D., Yang, Y., Liqin, L., *et al.* (2020) Research on the Dynamical Responses of H-Type Floating VAWT Considering the Rigid-Flexible Coupling Effect. *Journal of Sound and Vibration*, **469**, Article ID: 115162. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115162>
- [55] Hodges, D.H. and Dowell, E.H. (1974) Nonlinear Equations of Motion for the Elastic Bending and Torsion of Twisted Nonuniform Rotor Blades. NASA TN D-7818.
- [56] Wu, X.L., Jiao, Y.H. and Chen, Z.B. (2022) An Analytical Model of a Rotating Radial Cantilever Beam Considering the Coupling between Bending, Stretching, and Torsion. *Journal of Vibration and Acoustics*, **144**, Article ID: 021004. <https://doi.org/10.1115/1.4051494>
- [57] Li, L., Zhang, X. and Li, Y. (2016) Analysis of Coupled Vibration Characteristics of Wind Turbine Blade Based on Green's Functions. *Acta Mechanica Solida Sinica*, **29**, 620-630. [https://doi.org/10.1016/S0894-9166\(16\)30332-9](https://doi.org/10.1016/S0894-9166(16)30332-9)
- [58] Jun, W. and Branislav, T. (2021) Modal Analysis of a Rotating Pre-Twisted Beam Axially Loaded by an Internally Guided Tendon. *Journal of Sound and Vibration*, **498**, Article ID: 115980. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.115980>
- [59] Hamed, F. and Alper, E. (2021) Three-Dimensional Nonlinear Extreme Vibrations of Cantilevers Based on a Geome-

-
- trically Exact Model. *Journal of Sound and Vibration*, **510**, Article ID: 116295. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116295>
- [60] Zhou, Y.X., Zhang, Y.M. and Yao, G. (2020) Nonlinear Forced Vibration Analysis of a Rotating Three-Dimensional Tapered Cantilever Beam. *Journal of Vibration and Control*, **27**. <https://doi.org/10.1177/1077546320949716>
- [61] Han, H.S., Liu, L. and Cao, D.Q. (2019) Dynamic Modeling for Rotating Composite Timoshenko Beam and Analysis on Its Bending-Torsion Coupled Vibration. *Applied Mathematical Modelling*, **78**, 773-791.
- [62] Jokar, H., Mahzoon, M. and Vatankehah, R. (2022) Nonlinear Dynamic Characteristics of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades Including Pre-Twist. *Ocean Engineering*, **256**, Article ID: 111441. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111441>
- [63] Nayfeh, A.H. and Pai, P.F. (2004) *Linear and Nonlinear Structural Mechanics*. John Wiley and Sons, New Jersey. <https://doi.org/10.1002/9783527617562>
- [64] Li, L., Li, Y.H., Liu, Q.K. and Lv, H.W. (2014) A Mathematical Model for Horizontal Axis Wind Turbine Blades. *Applied Mathematical Modelling*, **38**, 2695-2715. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.10.068>
- [65] Pai, P.F. and Nayfeh, A.H. (1990) Three-Dimensional Nonlinear Vibrations of Composite Beams—I. Equations of Motion. *Nonlinear Dynamics*, **1**, 477-502. <https://doi.org/10.1007/BF01856950>