

海上风电机组单桩基座结构设计

张 利

(江苏航运职业技术学院 船舶与海洋工程学院, 江苏 南通 226010)

摘 要:海上风电具有清洁、安全、可持续的特点,且相对于陆地风电场来说,具有安装受地形影响小、无须占用土地资源、输电成本低等优点。根据海上风电机组基座所处的环境特点,结合江苏某海上风电机组单桩基座的设计实例,从设计高程、振动频率、入桩深度、屈曲计算及疲劳损伤计算等方面分析讨论了单桩基座的设计关键点,为海上风电机组单桩基座的设计提供参考。

关键词:单桩基座;设计高程;振动频率;入桩深度;屈曲计算;疲劳损伤

中图分类号:TU476

文献标志码:A

文章编号:2097-0358(2022)3-0023-05

0 引言

近年来,国家对可再生能源的开发力度呈上升趋势。加快发展可再生能源,实施化石能源清洁替代,是推进能源革命和构建现代能源体系的重大举措^[1],尤其是能源和环境战略要求“2030 碳达峰,2060 碳中和”提出后,风电、光伏等清洁能源的建设速度越来越快。目前,在各类清洁能源中,风电占有的容量比例和市场份额最大。截至 2021 年年底,全国风电装机容量约 3.3 亿 kW,同比增长 16.6%。^{[2][186]}

风电场根据建设处所可以分为陆地风电场和海上风电场。陆地风电场的优点是安装、检修方便,缺点是土地占用面积大、静风期时间长等^{[2][186]}。而海上风电场的优点则体现在以下几个方面:风能清洁、安全、可持续,安装受地形地貌影响小,无须占用土地资源,有利于建设大型海上风电场,高负荷区域和风电场位置距离不远,输电线路短,可减少电力损失和输电成本,避免弃风限电问题,海上风资源更丰富,可建造兆瓦级风机。但是,海上风电开发成本高,技术难度大,是风电行业不得不面对的问题。在进行海上风机及其支撑基座结构设计时,不仅要考虑作用在风机上的气动载荷,还需考虑海床地基承载能力和作用在支撑基座结构上的波浪和海水腐蚀等因素,从而使得开发海上风机的难度和成本大幅提高。风机基座是海上风力发电机组的重要组成部分,成本占整个海上风电机组造价的 20%~35%。基座结构的合理选型和科学设计是减少基座结构造价从而降低整个海上风电机组成本的重要途径。本文以江苏某海上风电场 4 MW 风电机组建设为研究对象,讨论海上风电机组基座结构设计过程中的关键技术。

1 海上风电机组基座结构形式介绍

海上风电机组固定式基座主要有单桩基座、导管架基座、重力式基座和桶式基座。

(1)单桩基座。单桩基座是海上风电固定式基座结构中形式构造最简单、应用最为广泛的一种基座形式^{[3][125]},如图 1(a)所示。单桩基座在近海浅水水域尤为适用,具有构造简单、施工方便等优点,但它的“自由段”较长,整体刚度较小,在较大载荷作用下动力响应和变形较大。

(2)导管架基座。导管架基座的概念源自海上油气开发,如图 1(b)所示,是一种格构式结构,空间整体性好,通过整体的受力抵抗倾覆弯矩,能最大程度发挥各构件的承载能力,刚度大,变形易控制,适用于水深较深、载荷较大的情况,但它的构造、建造工艺比单桩基座复杂。^[4]

(3)重力式基座。重力式基座是一种依靠基座自重来抵抗风电机组荷载和各种环境荷载作用,从而维持

收稿日期:2022-07-29

基金项目:江苏航运职业技术学院科技项目(HYKY/2019B01)

作者简介:张利(1984—),女,湖北荆州人,江苏航运职业技术学院船舶与海洋工程学院讲师,硕士。

基座的抗倾覆、抗滑移稳定的基座^{[3]131} ,如图 1(c)所示。重力式基座结构制造工艺简单 ,但对地基要求高 ,仅适用于天然地基好、水深较浅的情况 ,不适合软土地基及冲刷海床区域 ,目前没有得到广泛的应用。

(4)桶式基座。桶式基座又称负压筒基座 ,实际上是传统桩基和重力式基座的结合^{[3]132} ,如图 1(d)所示。桶式基座为纯钢或混凝土制成的开口圆桶 ,施工时通过排尽桶内气体使桶内外产生压力差 ,从而通过压力差产生的吸力锚固于地基中 ,但因其同样对地基要求较高 ,仅适用于软土地区 ,并且相关的建造工艺并不成熟 ,目前仅处于示范阶段 ,也没有得到广泛的应用。

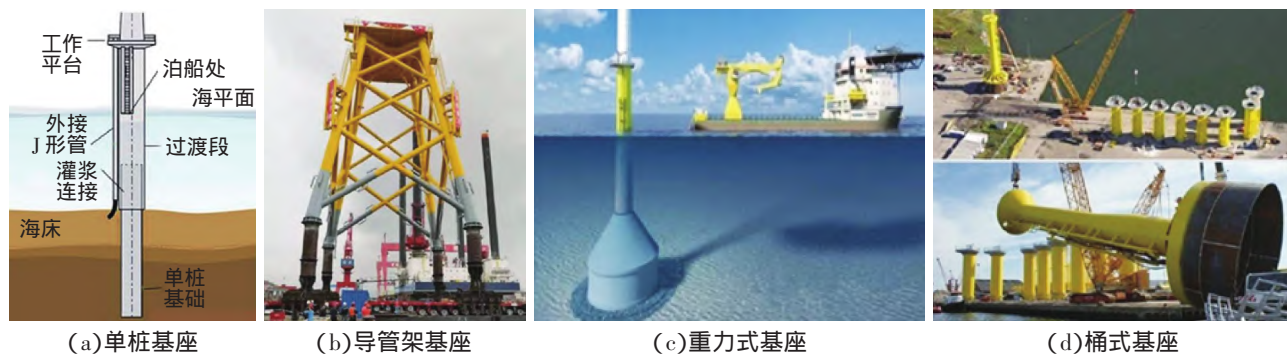


图 1 固定式基座结构示意图

综上所述 ,单桩基座具有结构相对简单、所需海床面积较小、沉降量较小以及承载力较高等特点 ,适用于相对复杂的工程地质条件 ,因此应用最为广泛。

2 单桩基座结构设计流程

如图 1(a)所示 ,单桩基座由过渡段、单桩、平台、爬梯等组成。通常 ,单桩是直径为 4~8 m 的钢管桩 ,其大小由各工况下的载荷、振动频率决定。单桩与平台通过过渡段连接 ,贯穿至海床一定深度 ,其插入海床的深度与工程所处的土壤强度有关 ,为保证其稳定 ,由工程船中的液压锤或震动锤实现安装。^{[5]76} 单桩基座的结构设计通常遵循图 2 所示流程 ,首先确定桩的外径、壁厚、长度等基本参数 ,然后根据风电机组的结构及受力情况分析其振动情况、屈曲强度和疲劳强度。

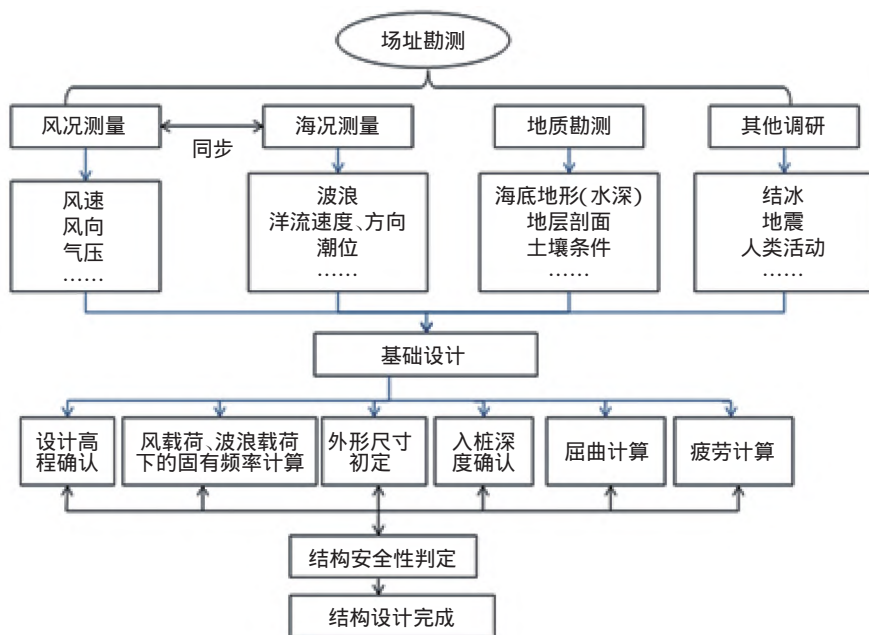


图 2 单桩基座结构设计流程图

3 单桩基座结构设计的关键问题

3.1 设计高程

单桩基座的设计高程包含工作平台高程、单桩顶部高程和过渡段底部高程^{[5]77},与水位密切相关。

工作平台是对人员在海上风电机组寿命周期内进行检修维护的主要处所,其高度需保证不会被极限波浪打到,因此在确定工作平台高程时会在极限浪高上增加一定的高度冗余。计算工作平台高程通常采用以下公式计算:

$$Z_{platform} = LAT + \Delta Z_{tide} + \Delta Z_{surge} + \Delta Z_{air} + \xi^* \quad (1)$$

式中 $Z_{platform}$ 为工作平台高程; LAT 为最低潮位; ΔZ_{tide} 为潮汐变化范围; ΔZ_{surge} 为涌浪变化范围; ΔZ_{air} 为工作平台底部与极限浪高之间的距离; ξ^* 为极限浪高。

单桩顶部高程设计一般考虑使其处于海平面以上,方便过渡段的定位及过渡段与单桩的连接,通常会以统计数据中的最低潮位为基础,再增加不小于 1 m 的冗余作为单桩顶部高程。过渡段底部高程一般取值为单桩顶部高程以下 1.5 倍单桩外径,因此单桩外径与单桩顶部高程确定后,过渡段底部高程即可确定。

3.2 固有频率

对于结构工程项目,当激励源接近结构工程的固有频率数值时,就会产生共振现象,出现较大的局部应力,使结构的安全性遭到破坏。海上风电机组单桩基座的主要激励源为风和波浪。因此在结构设计时,固有频率要避开风载荷下的两个频率(叶轮旋转正常发电频率 1P;由 3 个叶片构成的风电机组扫掠频率 3P)以及主要疲劳波浪载荷的频率。

由于风机叶片是变截面结构,且截面形状不具有对称性,因此叶片上的风场载荷比较复杂,同时考虑风轮旋转对气流的影响,致使叶片上的风场载荷计算更加困难。鉴于此,设计时常用以下简化算法进行计算。

风机运行时,作用在风轮扫风面积上的轴向推力 F_a 可由下式计算:

$$F_a = C_p V^2 S \quad (2)$$

式中 C_p 为风能利用系数,一般取 0.4; V 为风速; S 为风轮扫风面积。

风力机停机时,作用在其上的轴向力 F_h 为:

$$F_h = C_{DD} \rho V^2 A \quad (3)$$

式中 C_{DD} 为阻力系数,一般取 1.1; ρ 为空气密度; V 为风速; A 为风机迎风面积。^{[6]113-114}

波浪是指在洋面生成的不规则波动现象。

目前,对于波浪的模拟主要有基于纳维-斯托克斯方程的流体力学模拟方法和基于海浪谱的模拟方法。前一种方法可结合斯托克斯的波浪理论采用 Morison 公式计算作用在独立桩上的波浪力 F 。

$$F = F_M + F_D = \int_{-d}^{\eta(t)} C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \ddot{x} dz + \int_{-d}^{\eta(t)} C_D \rho \frac{D}{4} \dot{x} |\dot{x}| dz \quad (4)$$

式中 F_M 为惯性力; F_D 为拖曳力; C_M 为惯性力系数; C_D 为拖曳力系数; ρ 为海水密度,取 1.025 kg/m^3 ; \dot{x} 为波浪水质点运动轨迹速度的水平分量; \ddot{x} 为波浪水质点运动轨迹加速度的水平分量; D 为桩径。^{[6]114}

海浪谱法描述了随机波浪在频域上的分布,它将海浪考虑为无数周期与幅值不同的波动,进而抽象出具有具体表达式的数学模型,然后基于傅里叶变换模拟出随机波浪。相对来说,基于海浪谱的模拟方法在满足一定精度的情况下可以高效地获得波面运动,是国内外学者的研究重点。目前,应用比较广泛的海浪谱为 Pierson-Moskowitz 谱(又称“P-M 谱”)^[7]。

笔者通过大量的水文信息的调查,收集了 5 至 100 年一遇的波浪,发现波浪周期区间为 5.7~10.2 s,波浪波动频率区间为 0.098~0.175 Hz。极端工况下,本风电机组的转速为 15.7 r/min,等效的 1P 为 0.263 Hz,3P 为 0.786 Hz,计算模型采用机舱(含叶片)+塔筒+桩基+地基整体结构来分析计算风电机组整体结构的各阶频率,结论如表 1 所示,均能避开共振频率。

表 1 单桩基座结构自振频率和周期

阶数	自振频率/Hz	自振周期/s
1	0.328	3.049
2	0.328	3.049
3	2.903	0.478
4	2.905	0.477
5	3.652	0.274
6	3.662	0.273

3.3 外形尺寸

设计初始阶段,笔者调查国内外相当功率下风电机组的单桩外径发现,柱径基本在 4~6 m,长细比约 5~15,建议结合具体项目的加工、施工等因素假设单桩外径,采用经验公式,取壁厚为外径的 1/100。外形尺寸初步决定后,进行海上风电机组系统的固有频率计算,根据计算结果调整单桩的外径和壁厚,在不增加较大成本的前提下,尽量避开共振区。笔者结合本文研究对象的实际情况,确定桩外径为 4.8 m,壁厚为 50 mm。

3.4 入桩深度

基座入桩深度需要综合考虑水深、水位变动幅度、土层条件、海床坡率与稳定性等因素。单桩基座承受横向和轴向载荷的作用,但入土深度一般根据横向载荷确定。不同的土质、岩石结构对桩基的反作用载荷不同,因此需对所处海域的土质进行调查。本文研究对象设置在沿海侵蚀丘陵,水深 5~18 m,地层岩主要是砂、淤泥、粉质黏土等,结合目前工程中最常用的桩-土相互作用模拟时的 p-y 曲线,入桩深度为 9.5 m。

3.5 屈曲计算

单桩基座结构细长且壁薄,极易发生屈曲破坏。行业中一般在设计阶段采用工程算法来检查整体屈曲。单桩基座整体屈曲的计算方法如下式:

$$\frac{N_d}{\kappa N_p} + \frac{\beta_m M_d}{M_p} + \Delta n \leq 1.0 \quad (5)$$

式中: N_d 为设计轴向压缩载荷; M_d 为设计弯矩; κ 为屈曲缩减因子; β_m 为力矩系数; N_p 为塑性压缩抗力; M_p 为塑性力矩抗力。

本项目采用 50 年一遇极端风浪条件(平均风速取为 30 m/s,有效波高取为 6 m)对应的载荷作用在单桩风机上,对支撑基座结构进行静力分析和屈曲模态分析,并提取出前五阶屈曲模态,如图 3 所示为结构第一阶、第二阶以及第五阶屈曲模态。由图可知,风机产生大变形的位置主要集中在桩底。这是由于桩底除了承受整桩波浪载荷之外,还需要承受风轮以及塔筒传递下来的重力和侧向力,由此造成更容易发生破坏。

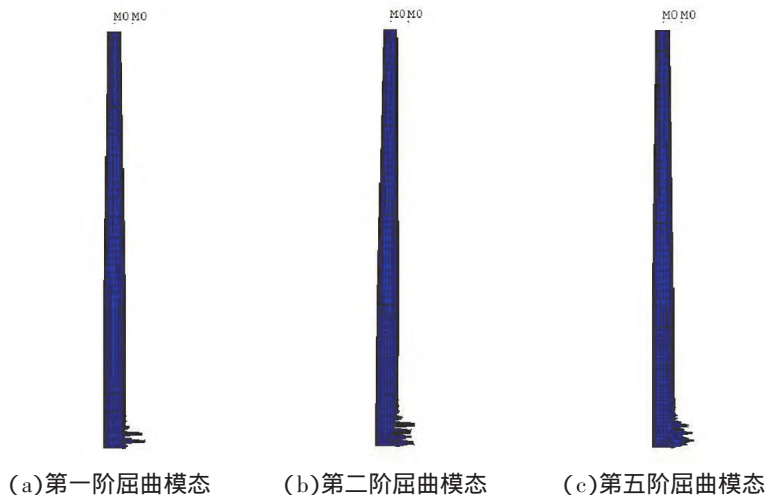


图 3 单桩基座结构在风浪载荷作用下的屈曲模态

3.6 疲劳损伤

海上风机长期处于复杂的海洋环境中,受到风、浪、流等循环往复的动力载荷作用,极易出现疲劳破坏,需进行疲劳强度验算。目前,行业中通用的疲劳载荷计算方法是雨流计数法,先将载荷时间历程分为若干个载荷循环,再结合材料 S-N 曲线对每个载荷循环进行疲劳损伤计算,最后将各个循环的疲劳损伤叠加,计算出结构总疲劳损伤。单个载荷和总载荷的计算方法如公式(6)和(7):

$$D_j = \frac{\alpha_{(j)} N_D}{k_2} \frac{\Delta \sigma_{FS(j)}^m}{(\ln N_R)^{\frac{m}{\xi}}} \mu_{(j)} \Gamma(1 + \frac{m}{\xi}) \quad (6)$$

其中 N_D 为在设计疲劳寿命期间所经历的波浪周期总数; $\alpha_{(j)}$ 为每个载荷情况的时间因素; $\Delta \sigma_{FS(j)}^m$ 为参考概率水平的疲劳应力范围; N_R 为超越参考概率的周期数; ξ 为威布尔形状参数; $\Gamma(x)$ 为完整的伽马函数; k_2 为 S-N 曲线的常数; $\mu_{(j)}$ 为考虑 S-N 曲线反斜率变化的系数。

$$D = \sum_{j=1}^{n_{LC}} D_{(j)} \quad (7)$$

经计算可知,最大疲劳应力出现在过渡段位置,数值为 32.5 MPa。根据规范,风电机组在循环次数 1.83×10^8 次的要求下,其容许应力值为 46.6 MPa,最大疲劳应力小于规范要求的容许应力值,满足设计要求。

4 结束语

海上风电是我国未来可再生能源领域重要的发展方向。随着国家对海上风能开发投入的逐年上升,单桩基座结构将被广泛使用,但其涵盖专业领域多,设计难度大,因此如何安全、经济地设计单桩结构成为重点关注的问题。本文所研究的单桩基座结构设计仅为初步设计结果,可作为项目可行性研究阶段及设计初期阶段的设计依据,未来研究可通过扩充水文、气象、海床等数据库使研究计算的结果更加精细、准确。

参考文献:

- [1]冯泽深,赵增海,郭雁珩,等.2021 年中国风电发展现状与展望[J].水力发电,2022(10):1-3,8.
- [2]李铮,郭小江,申旭辉,等.我国海上风电发展关键技术综述[J].发电技术,2022(2):186-197.
- [3]毕亚雄,赵生校,孙强,等.海上风电发展研究[M].北京:中国水利水电出版社,2017.
- [4]刘啸波,胡颖.海上风机基础选择策略[J].中国船检,2010(9):56-58.
- [5]张星波,刘勋学.海上风电单桩基础结构设计关键问题探讨[J].风能,2014(2):76-79.
- [6]杜子荣,于常宝,黄维平.海上单桩风力发电平台简化设计[J].中国造船,2007(11):112-121.
- [7]杨怀平,孙家广.基于海浪谱的波浪模拟[J].系统仿真学报,2002(9):1175-1178.

(责任编辑:范可旭)

Design of Structure of Monopile Base for Offshore Wind Turbine

ZHANG Li

(School of Ship and Ocean Engineering, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China)

Abstract: Offshore wind power is of clean, safe and sustainable characteristics, and has the advantages of less influence by terrain, without the need of occupying land resources and low power transmission cost compared with onshore wind power fields. Based on the characteristics of the environment in which the offshore wind turbine base is located and in combination with the practical example of designing the offshore wind turbine monopile base in Jiangsu, the key points of the design of the monopile base are analyzed and discussed in terms of design elevation, vibration frequency, depth of pile entry, buckling calculation and fatigue damage calculation, which provides reference for the design of the offshore wind turbine monopile base.

Key words: monopile base; design elevation; vibration frequency; depth of pile entry; buckling calculation; fatigue damage