风机基础结构选型与优化策略研究

孙艳坤

中国华电科工集团有限公司 北京 100160

摘要: 本文聚焦风机基础结构选型与优化策略研究,系统阐述基础结构类型及设计原则,深入剖析地质、风机参数等因素对选型的影响,对比传统与现代选型方法并构建选型流程。提出从结构形式、材料选择、施工工艺及监测数据等方面进行优化。研究表明,科学选型与优化策略可提升风机基础安全性、适用性和经济性,为风能发电工程中风机基础设计与建设提供理论支撑与实践指导。

关键词: 风机基础结构; 选型; 优化策略; 风能发电

1 风机基础结构概述

1.1 风机基础结构类型

风机基础作为风力发电机组稳定运行的根基,其结构类型丰富多样,每种类型都有独特的适用场景与技术特点。重力式基础凭借自身巨大的质量来抵抗风机运行时产生的各种荷载,是较为常见的类型。它通常采用钢筋混凝土浇筑而成,形状类似一个大的圆柱体或棱台体。这种基础结构简单,对地质条件的适应性较强,在地质条件相对较好、地基承载力较高的区域应用广泛。桩基础则是通过将桩体打入或压入地基中,利用桩与土体之间的摩擦力和端承力来承载风机荷载。根据桩的材料不同,可分为混凝土桩、钢桩等;按照施工方法,又可分为预制桩和灌注桩。在沿海地区,由于地质条件复杂,软土地基较多,桩基础就成为了首选。像我国东南沿海的海上风电场,通过打入数十米甚至上百米的钢桩,将风机稳稳地矗立在海面之上,成功克服了软土地基承载力不足的难题。还有一些特殊类型的基础,如爆扩桩基础、岩石锚杆基础等^[1]。爆扩桩基础是先成孔,然后在孔底用炸药爆炸扩大桩头,以增加基础的承载能力,适用于粘性土等特定地质条件。岩石锚杆基础则是利用锚杆将基础与稳定的岩石相连,主要应用于山区岩石地基上的风机基础建设,能够充分发挥岩石的高强度特性,保证风机基础的稳固。

1.2 风机基础结构设计原则

风机基础结构设计需遵循一系列严谨的原则,以确保风机在全生命周期内安全、稳定运行。安全性原则是首要准则,设计过程中,要充分考虑风机运行时产生的各种荷载,包括竖向荷载、水平荷载、弯矩和扭矩等,同时还要考虑极端天气条件下,如强风、地震等因素对基础的影响。通过精确的力学计算和分析,确保基础结构在各种工况下都能保持稳定,不会发生倾覆、滑移或

破坏。适用性原则要求风机基础能够满足风机正常运行的功能需求,基础的尺寸、形状和位置要与风机的型号、尺寸相匹配,保证风机塔筒能够顺利安装和运行。同时基础的设计还要考虑到后期的维护和检修,预留必要的通道和空间。经济性原则强调在保证安全性和适用性的前提下,尽可能降低基础建设成本,这需要在设计过程中对不同的结构类型、材料和施工方案进行综合比较和优化。比如在选择基础材料时,要根据当地的材料供应情况和价格,合理选用混凝土、钢材等材料;在施工方案选择上,要结合现场的施工条件,选择最经济高效的施工方法,避免不必要的成本浪费。

2 风机基础结构选型影响因素分析

2.1 地质条件因素

地质条件是影响风机基础结构选型的关键因素之一。不同的地质类型对基础的承载能力和稳定性有着直接影响。在软土地基地区,由于土体的强度低、压缩性大,采用重力式基础往往难以满足承载要求,此时桩基础就成为了更合适的选择。通过将桩体穿透软土层,使基础荷载传递到下部较硬的土层或岩层上,从而保证基础的稳定性。而在岩石地基上,岩石锚杆基础具有独特的优势。岩石的高强度和稳定性使得锚杆能够与岩石紧密结合,提供强大的锚固力。在山区风电场建设中,当遇到岩石地基时,采用岩石锚杆基础可以充分利用岩石的特性,减少基础的开挖量和混凝土用量,降低建设成本。地质条件中的地下水情况也不容忽视,如果地下水位较高,在基础设计时需要考虑防水和抗浮措施。对于重力式基础,可能需要增加基础的重量或采取排水措施来防止基础上浮;对于桩基础,则要考虑地下水对桩体的腐蚀作用,采取相应的防腐措施,如采用防腐涂层等。

2.2 风机参数因素

风机自身的参数对基础结构选型有着重要影响。风

机的容量、叶片直径、塔筒高度等参数决定了基础所承受的荷载大小和特性。随着风机技术的不断发展,风机容量越来越大,叶片直径和塔筒高度也不断增加。大型风机在运行过程中会产生更大的竖向荷载、水平推力和弯矩,这就要求基础具有更高的承载能力和抗倾覆能力。对于大容量风机,可能需要采用更大尺寸的重力式基础或更深、更粗的桩基础来满足承载需求^[2]。风机的转速和振动特性也会影响基础选型,高转速的风机可能会产生较大的振动,为了避免基础与风机发生共振,需要根据风机的振动频率对基础进行动力学分析,选择合适的基础刚度和阻尼特性。

2.3 环境荷载因素

环境荷载是风机基础选型不可忽视的因素,包括风荷载、地震荷载、温度变化等。风荷载是风机基础设计中最主要的环境荷载之一。不同地区的风况差异很大,沿海地区风速大、风况复杂,内陆地区风速相对较小但风向变化频繁。在设计风机基础时,需要根据当地的风玫瑰图 and 风速统计数据,准确计算风荷载的大小和方向。对于强风地区的风机基础,要加强基础的抗风能力设计,如增加基础的重量、优化基础的形状以减小风阻等。地震荷载对风机基础的影响也至关重要,在地震活动频繁的地区,基础设计必须满足抗震要求。需要根据当地的地震动参数,如地震烈度、地震加速度等,进行抗震计算和设计。采用合适的基础结构形式和抗震构造措施,如设置防震缝、增加钢筋配筋率等,提高基础的抗震性能,确保风机在地震作用下能够保持稳定。温度变化会引起基础材料的热胀冷缩,在温差较大的地区,这种效应可能会导致基础产生裂缝。

2.4 施工条件因素

施工条件对风机基础结构选型有着实际的限制和影响。施工现场的地形地貌、交通条件、施工设备和技术水平等都会影响基础的施工方案和选型。在地形复杂的山区,大型施工设备难以进入,施工难度大,此时就需要选择施工相对简便的基础类型。例如,采用小型机械或人工施工的爆扩桩基础或岩石锚杆基础可能更为合适。而在地势平坦、交通便利的地区,可以选择大型机械设备进行施工,重力式基础或大型桩基础的施工就更为方便快捷。施工技术水平也是一个重要因素。如果当地缺乏先进的施工技术和经验丰富的施工队伍,一些复杂的基础施工方法可能难以实施。此时,应选择技术成熟、施工难度较低的基础类型,以保证施工质量和进度。施工季节和气候条件也会影响基础施工。在雨季施工时,需要考虑基础的排水和防雨措施;在冬季施工

时,要采取保温措施,确保混凝土等材料的施工质量。

3 风机基础结构选型方法与流程

3.1 传统选型方法

传统的风机基础结构选型方法主要基于经验和简单的力学计算。工程师们根据以往类似工程的经验,结合现场的地质条件、风机参数等因素,初步选择几种可能的基础类型。然后通过手算或使用简单的计算软件,对基础进行力学分析,如计算基础的承载力、稳定性等,以确定最终的基础选型。例如,在早期的小型风电场建设中,工程师们根据当地常见的地质条件和风机容量,大多采用重力式基础。通过经验公式估算基础的尺寸和配筋,再进行简单的抗倾覆、抗滑移计算,只要满足相关规范要求,就认为基础选型可行。这种方法虽然简单易行,但存在一定的局限性。由于过度依赖经验,对于复杂地质条件和新型风机,可能无法准确选择最合适的基础类型,导致基础设计不合理,增加工程风险和成本。

3.2 现代选型方法

随着计算机技术和数值分析方法的不断发展,现代风机基础结构选型方法更加科学、精确。有限元分析方法是现代选型中常用的手段之一。通过建立风机基础的三维有限元模型,将地质条件、风机荷载、环境因素等进行精确模拟,能够全面分析基础在各种工况下的应力、应变分布情况,准确评估基础的承载能力和稳定性。例如,利用有限元软件可以模拟风机在强风作用下基础的受力变形情况,分析基础不同部位的应力集中现象,为基础优化设计提供依据^[3]。此外,多目标优化算法也逐渐应用于风机基础选型中。该算法可以综合考虑安全性、经济性、施工便利性等多个目标,通过对不同基础类型和设计方案进行优化计算,找到最优的选型方案。现代选型方法大大提高了风机基础选型的准确性和可靠性,但对工程师的技术水平和计算资源要求较高。

3.3 选型流程构建

风机基础结构选型是一个系统的过程,需要遵循一定的流程。首先,要进行详细的前期调研,收集项目所在地的地质勘察资料、气象数据、风机技术参数等信息。这些信息是基础选型的基础,只有准确掌握这些资料,才能做出合理的选型决策。然后,根据收集到的信息,结合各种基础类型的特点和适用范围,初步筛选出几种可能的基础类型。接着,运用合适的计算方法,如传统的力学计算或现代的有限元分析等,对初步筛选的基础类型进行详细的力学分析和性能评估,计算基础的承载能力、稳定性、变形等指标,判断其是否满足设计要求。在评估过程中,如果发现某种基础类型不满足要

求,则重新进行筛选和计算。经过多轮分析和比较,综合考虑安全性、经济性、施工便利性等因素,最终确定最优的基础选型方案。最后,还需要对选型方案进行审核和验证,确保选型的合理性和可靠性。

4 风机基础结构优化策略

4.1 结构形式优化

对风机基础的结构形式进行优化可以有效提高基础的性能。在重力式基础优化方面,可以通过改变基础形状来改善其受力性能。例如,将传统的圆柱体基础改为阶梯状或锥台状,能够降低基础的重心,增加基础的抗倾覆能力。同时,合理设置基础的倒角和圆角,减少应力集中现象,提高基础的耐久性。对于桩基础,可以优化桩的布置形式和数量,采用群桩基础时,合理调整桩间距和桩的排列方式,能够提高群桩的承载效率。开发新型的桩基础形式,如变直径桩、扩底桩等,也可以增强桩基础的承载能力和稳定性。例如,扩底桩通过扩大桩底的直径,增加了桩端的承载面积,适用于持力层较浅的地质条件,能够有效提高基础的承载能力。

4.2 材料选择优化

材料选择对风机基础的性能和成本有着重要影响。在混凝土材料方面,选择高性能混凝土可以提高基础的强度和耐久性。高性能混凝土具有高强度、高抗渗性、高抗冻性等特点,能够更好地适应恶劣的环境条件。例如,在沿海地区的风机基础中使用抗氯离子渗透性能好的高性能混凝土,可以有效防止混凝土被海水腐蚀,延长基础的使用寿命。钢材也是风机基础的重要材料之一,选用高强度钢材可以减少钢材的用量,降低基础的重量和成本。同时采用新型的防腐钢材或防腐涂层技术,可以提高钢材的防腐性能,减少钢材在使用过程中的维护成本。此外,还可以探索使用新型复合材料,如纤维增强复合材料等,将其应用于风机基础的某些部位,发挥其轻质、高强、耐腐蚀的优点,进一步优化基础的性能。

4.3 施工工艺优化

优化施工工艺可以提高风机基础的施工质量和效率。在混凝土施工方面,采用先进的浇筑技术,如滑模施工、泵送混凝土施工等,可以提高混凝土的浇筑速度和质量。滑模施工能够连续浇筑混凝土,减少施工缝,提高基础的整体性;泵送混凝土施工则可以实现远距

离、高高度的混凝土输送,适用于大型风机基础的施工^[4]。对于桩基础施工,采用新型的成桩工艺,如旋挖成孔工艺、长螺旋钻孔压灌桩工艺等,相比传统的成桩工艺,具有施工速度快、成孔质量好、对环境影响小等优点。加强施工过程中的质量控制和监测,如对混凝土的强度、桩的垂直度和承载力等进行实时监测,及时发现和解决施工中出现的問題,确保基础施工质量符合设计要求。

4.4 基于监测数据的优化

利用监测数据对风机基础进行优化是一种动态的优化策略。通过在风机基础上安装各种传感器,如应变传感器、位移传感器、加速度传感器等,实时监测基础在运行过程中的应力、应变、位移和振动等参数。根据监测数据,可以及时发现基础存在的问题,如基础的不均匀沉降、局部应力过大等。然后,运用数据分析和数值模拟等方法,对基础的性能进行评估和预测,分析问题产生的原因。基于分析结果,采取相应的优化措施,如对基础进行加固、调整风机的运行参数等,以保证基础的安全稳定运行。同时长期的监测数据还可以为后续风机基础的设计和选型提供参考,不断改进和完善风机基础的设计和施工技术。

结束语

本研究系统梳理了风机基础结构选型与优化策略,明确了各因素对选型的影响机制,提出多种优化途径。然而,随着风机大型化与应用场景复杂化,仍需进一步探索新型基础结构与优化技术。未来研究可结合智能监测与人工智能技术,深入挖掘数据价值,实现风机基础全生命周期精准优化,推动风能产业向高效、安全方向持续发展。

参考文献

- [1]刘祺.海上风电风机基础结构型式分析研究[J].中国水运,2025(2):54-55,95.
- [2]苏惠杰.海上风电风机基础结构形式及安装技术[J].珠江水运,2024(5):111-113.
- [3]赵恩明,乔晓国,胡海峰,等.漂浮式风机基础结构强度算法对比[J].中国海上油气,2025,37(2):279-286.
- [4]张济,何海华,张兆德.海上风机基础结构的研究现状与发展前景[J].船舶与海洋工程,2023,39(3):1-6.