

风电混塔吊装过程中的安全与效率优化

吕文健

中电投东北新能源发展有限公司, 辽宁 沈阳 110623

DOI:10.61369/ETQM.2025060028

摘要：近年来，风力发电产业迅速发展，风电混塔是一种新的风力发电系统，在风力发电领域的应用日益增多。但其吊装过程中存在较大的安全隐患，不利于提高其运行效率对降低生产成本和促进产业发展。本文从人员操作、设备故障、环境因素和施工技术四个角度，对风电混塔式起重机的安全风险进行深入分析，并提出综合的安全管理对策，希望本项目的研究成果将为我国风电混塔吊装技术的发展提供理论依据和技术支撑。

关键词：风电混塔；吊装；安全风险；安全管理；效率优化

Safety and Efficiency Optimization of Wind Power Hybrid Tower Lifting Process

Lv Wenjian

China Power Investment Northeast New Energy Development Co., LTD. Shenyang, Liaoning 110623

Abstract： In recent years, the wind power industry has developed rapidly, and hybrid wind turbines are a new type of wind power system that is increasingly being applied in the field of wind power generation. However, there are significant safety hazards during their installation, which hinders improvements in operational efficiency, production cost reduction, and industrial development. This paper provides an in-depth analysis of the safety risks associated with hybrid wind turbine cranes from four perspectives: personnel operations, equipment failures, environmental factors, and construction techniques. It also proposes comprehensive safety management strategies, aiming to provide theoretical support and technical guidance for the development of hybrid wind turbine installation technology in China.

Keywords： wind power hybrid tower; hoisting; safety risk; safety management; efficiency optimization

引言

随着世界各国都在大力提倡清洁能源，风能作为一种可持续、无污染的新能源，受到越来越多的关注。近几年来，我国的风力发电装机一直处于高速发展阶段，风力发电技术也在不断地革新和发展。风电混塔是一种集混凝土与钢的优点于一身的新型塔筒结构，具有经济性好、结构稳定、适应复杂地形等优点，在风力发电领域得到越来越多的应用。但是风电混塔的提升是一个复杂的、高风险的工程，因为混凝土塔体积大、质量重，所以必须在高空和复杂的环境中进行吊装，这对施工人员的专业技能、设备的可靠性以及施工工艺的合理性都提出极高的要求。因此如何在风电混塔吊装过程中实现安全与效率的优化，成为了当前风电行业亟待解决的关键问题。

一、风电混塔吊装概述

（一）混塔结构特点

目前风电混塔的下部为混凝土结构，而其上部为普通的钢结构，该结构将混凝土的高强度、低成本和高的抗拉强度和良好的韧性结合起来，与完全钢结构塔比较，在塔底采用钢筋混凝土结构，可减少钢筋用量、节约造价。同时由于其体积大，地基的稳定性能也得到提高，从而提高塔架抗大风等严酷环境的能力。此外，考虑到不同的地形、风场等因素，可对其进行优化，如在风

荷载较大的区域可适当增大砼节段的高度与厚度，从而提升塔架的整体强度与稳定性。

（二）吊装工艺流程

施工阶段	具体内容
施工准备阶段	1. 勘察施工现场，保证场地平整、坚实，满足设备停放和运行要求 2. 全面检查和调试吊装设备，确保设备性能良好 3. 准备混塔各部件运输车辆、堆放场地及施工所需工具、安全防护设备

施工阶段	具体内容
基础施工阶段	按设计要求浇筑混凝土基础，控制钢筋布置和混凝土浇筑质量，预留地脚螺栓等连接件，保证基础强度和尺寸符合标准
混塔部件运输与堆放	将预制的混凝土段和钢塔部件运至施工现场，按吊装顺序合理堆放，采取防护措施防止部件受损
吊装作业阶段	1. 用起重机吊起混凝土底段并准确安装在基础上，紧固地脚螺栓，调整垂直度 2. 依次吊装其他混凝土段和钢塔段，严格测量校正，保证塔架整体垂直度和连接质量 3. 塔架安装完成后，吊装机舱、叶片等部件
电气系统安装与调试	完成塔架和机组设备安装后，进行电气系统布线和调试，确保风电机组正常运行

（三）常见吊装设备及选型要点

起重机类型	优点	适用场景	选型考虑因素
履带起重机	起重能力较强，越野性能良好，可在复杂地形作业；起吊高度和工作半径较大	适用于大型风电混塔的吊装	混塔部件的最大重量、吊装高度、施工现场的地形条件等
汽车起重机	机动性强，转移方便，能快速到达施工现场	适用于一些小型风电混塔或辅助性的吊装作业	行驶速度、转弯半径、不同工况下的起重性能
塔式起重机	起升高度较高，工作幅度较大，稳定性好	当施工现场空间有限且需要进行长时间、重复性的吊装作业的风电项目	起升速度、起重量曲线、附着装置的要求

二、安全风险分析

（一）人员操作风险

风电混塔吊装对技术熟练、经验丰富的建筑工人提出更高的要求，若工人不熟悉起重机械，不熟悉起重技术，就有可能在工作中误操作并且造成安全事故。比如起重机的升降、升降、回转等动作如果控制不好，就有可能发生与其它物体相撞的事故，从而导致设备的损坏和人身伤害。

由于吊装过程中往往是持续的，工人在长期的高强度工作中极易发生疲劳，疲劳会使建筑工人注意力分散，反应迟钝，误操作几率增大。比如在晚上的起重作业中，工人容易因疲劳而忽略某些安全警告，导致事故的发生^[1]。

（二）设备故障风险

起重机作为风力发电混输铁塔的关键设备，其各部分的失效将直接影响到整个吊装过程的安全性。比如起重机的刹车系统失效会造成失控，从高处掉下；提升装置的钢索折断会导致吊件突然脱落；旋转机械的失效会使起重机在旋转时出现卡滞和倾翻现象。

在吊装过程中，除起重机以外，还需用到其它设备，如运输车、焊接设备以及测试仪器等。这些设备的失效还会对起重机械的安全产生间接的影响。例如在输送混塔件时，如果有一辆货车的制动系统失效，则会造成交通意外；焊接装置的失效会对塔筒

构件的连接质量产生不利影响，进而影响塔筒的整体稳定。

（三）环境因素风险

风力发电工程多位于风能资源丰富的区域，而风载是其最大的环境风险，大风会引起起重设备的摆动，加大起重设备的负荷并且引起起重机的不稳定。同时由于风力的不确定，使得起重作业面临着极大的挑战，如起重过程中突然出现的风速突变，会导致起重设备发生偏转，撞击其它物体等。此外，工程场地的地形环境较为复杂，包括山地、丘陵和沼泽等，在这样的地质环境中，设备的停泊、运转都会受到一定的制约，从而增大设备发生倾倒的危险。如在山区建设中，起重机必须在山坡上工作，若基础处理不好极易造成车辆的侧翻。

（四）施工工艺风险

混凝土塔中段间的连接质量，对整个塔体的强度与稳定性有很大影响，在施工中，若接头处理不当，如焊接质量差、螺栓紧固不严，则有可能使塔体在使用中产生裂纹，严重时还会造成塔身坍塌。在混凝土结构中，预应力混凝土结构是一项非常重要的工作，若预应力作用不够充分或分布不均，则会对混凝土截面的受力性能产生不利影响，从而影响铁塔的安全。而且在施工中，若操作不当也会造成张拉装置的失效，甚至危及人身安全^[2]。

三、安全管理措施

（一）人员培训与资质管理

定期对建筑工人进行业务培训，并邀请业内专家、资深工程师为其授课，培训的主要内容有包括起重机械的操作技术、起重工艺的程序及要点、安全作业，在此过程中，需要采用理论与实践并重的方法，全面提升建筑工人的业务素质。在建筑工地上，要加强对建筑工人的安全意识教育，通过举办安全知识讲座，观看安全事故案例录像，让他们明白安全工作的重要性，从而提高施工人员的自我防护意识和安全防护意识。也需要对起重机械工人进行资格审核，保证起重机械操作人员具有相应的资质，定期对建筑工人进行资格复审，发现有资格过期或不合格的禁止其参与吊装作业。

（二）设备维护与检查制度

制定设备的例行维修管理体系，并规定运行人员每天在运行前、运行中、运行后都要进行检修，主要内容有外观有无破损、零件连接有无松动、润滑情况良好以及电气系统有无故障。及时发现和解决生产中出现的的问题，保证生产设备的正常运转。制订设备的周期检修计划，并对设备进行经常性的检修。主要检测设备的性能，检测关键零部件的磨损情况、检测安全保护装置的可靠性，根据检测结果，及时修理或更换零件，以保证产品在使用过程中的安全性能。

环境应对措施	具体操作	关键点
气象监测	在施工现场设置气象监测站，实时监测风速、风向、气温、湿度等气象参数	当风速超吊装允许最大值，立即停工并采取防风措施，如加固设备、固定吊物

环境应对措施	具体操作	关键点
地形与地质勘察	项目前期详细勘察施工现场的地形和地质；施工中处理地基，确保场地平整坚实；在地形复杂区域设置警示标志	依据勘察结果制定合理施工方案
应急预案制定	针对恶劣天气、地质灾害等突发情况，制定含应急组织机构、响应程序、救援措施等内容的应急预案，并定期组织应急演练	提升施工人员应对突发事件的能力

（三）环境监测与应对策略

（四）施工工艺质量控制

建立一套完善的搅拌塔拼焊工艺及质量验收规范，在拼焊过程中强化接头质量检验，应用先进的焊接工艺及检测仪器，保证接头的焊接质量，对各螺栓接头，应按规定力矩拧紧，拧紧力矩检查，保证接头牢固。

在预压施工之前，校正、调试张拉装置，保证张拉精度、可靠，并严格按设计要求施加预应力，并对张拉速率及张拉力进行控制。在预应力施工期间，要加强对砼的变形监控，对预应力进行适当地调整，保证预应力施加的均匀性和准确性^[3]。

（五）安全管理制度与监督机制

建立健全安全生产责任制并且落实安全生产责任制，建立安全检查和安全教育培训制度，事故报告和处理制度。在此基础上，对各级管理者及建筑工人的安全责任进行界定，保证安全生产的规章制度。建立安全督导团队，定期巡查工地。，主要内容有施工工人的作业行为、设备运行状态、安全防护设施的设置以及施工过程的实施等。对存在的安全隐患立即下发整改通知，责令责任单位在规定时间内进行整改，对整改不力的内容要严肃处理。

四、效率优化策略

（一）吊装方案优化

在项目前期，组织专业技术人员制定多种吊装方案，并对各方案进行详细的对比分析。从吊装设备的选择、吊装顺序的安排、施工场地的布置等方面进行综合评估，选择最优化的吊装方案。由此利用计算机模拟仿真技术，对吊装过程进行模拟分析。通过模拟，可以提前发现吊装方案中存在的问题，并进行优化调整。同时模拟仿真技术还可以为施工人员提供直观的操作培训，

提高施工人员的操作熟练程度。

（二）设备性能提升与技术创新

通过对已有提升装备的改造，提升装备的性能与效能，比如提升提升装置的起升机构、回转机构等，以提升装备的起升速度与旋转效率。并在此基础上，采取先进的节能措施减少装置的能源消耗。也需要采用智能吊装系统、无人机辅助吊装等新技术，利用传感器对吊装过程进行实时监控，实现吊装过程的自动控制，提升吊装精度与安全，该方法可应用于现场勘测，巡视设备，并对起重设备进行定位，从而大大提高工作效率^[4]。

（三）施工组织与协调优化

制定科学合理的施工进度计划，根据工程实际情况，并结合项目的具体条件对各个阶段的工期、任务进行合理的分配。在确保工程安全与质量的同时，尽可能地减少工期，应充分考虑天气、设备故障等对工程进度的影响，并给予适当的弹性工期。由此要加强与业主、监理、设计等方面的联系和配合，及时处理好建设中遇到的各种问题，保证工程的正常运行。比如在设备的进场时间和材料的供应上，双方要紧密合作，以免出现沟通不畅影响工程的进程。

（四）信息化管理在吊装中的应用

运用信息化技术，构建一个风电混塔吊装信息化管理平台，对施工进度、质量、安全、设备等信息进行实时监测与管理，使管理者能够通过手机、计算机等终端设备，随时掌握施工现场的状况并作出相应的决策^[5]。

通过在工地上设置各种传感器，对设备的操作、环境、人员的操作等进行实时的数据采集。在此基础上，对工程建设中出现的问题与隐患进行分析，进而提出相应的优化与预防措施，为以后的工程建设提供借鉴。

五、结语

风电混塔吊装的安全性和有效性是一项系统工程，涉及多方面的问题，本文在此基础上，提出一套行之有效的安全管理对策，使安全事故的发生率降到最低，保证建筑工人的生命安全和项目的成功实施。在今后的风力发电项目建设中，需要继续强化技术创新与管理创新，持续优化风力发电系统的安全性和有效性，将风力发电产业推向一个新的高度。

参考文献

[1] 张宇豪,吴香国,陈发桥,等.环段吊装方案对风电混塔管片变形的影响分析[J].混凝土与水泥制品,2024,(10):68-72.
[2] 吴学松.风电机组大型化发展及风机吊装设备选择[J].建筑机械化,2023,44(11):7-10.
[3] 彭国祥,王涵鑫,朱坤奇.160m风电机组钢混塔架施工技术研究[J].电力设备管理,2024,(19):197-199.
[4] 赵景战,贺素芳.机电安全系统在沥青拌和站中的集成与优化[J].交通建设与管理,2024,(06):192-195.
[5] 平煜.高层建筑施工中的脚手架安全管理与优化[J].河南建材,2024,(11):117-119.