

风力发电工程的组塔架线安全施工技术研究

王鑫鑫 柳勇鹏

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：为了更好地保障风力发电工程组塔架线的安全施工，提升施工安全管控水平，本文围绕组塔架线安全施工技术展开系统性研究。文章首先剖析了风电组塔架线施工全流程，明确基础处理、塔架吊装、导线展放等关键环节的技术要点，重点强调螺栓力矩控制、塔架垂直度校准、导线防磨损等核心技术要求。并在此基础上运用故障树分析法识别高处坠落、机械伤害、触电等典型风险，构建“可能性-影响程度”二维风险评估模型。进而从制度建设、人员培训、现场管控三个维度提出安全保障体系，旨在为风电工程组塔架线安全施工提供了技术支撑与实践参考。

【关键词】：风力发电工程；组塔架线；施工技术；风险识别；安全管控

DOI:10.12417/2811-0528.25.23.052

引言

作为清洁能源开发的核心领域，风力发电工程建设规模在“双碳”目标驱动下持续扩大。风电工程组塔架线作业环境多涉及山地、高空，且需协调吊装机械、高压设备等多重要素，安全风险贯穿施工全过程。近年来，国内风电工程因技术操作不规范、安全管控不到位引发的高处坠落、物体打击事故频发，不仅造成人员伤亡与经济损失，更制约了工程建设效率。基于此，本文以组塔架线安全施工为核心，深入解析施工流程与技术要点，精准识别并评估安全风险，构建全链条安全保障措施。以期能为风电工程施工安全管理提供理论依据与实操方案，助力风电产业安全高效发展。

1 风力发电工程组塔架线关键施工技术要点

1.1 基础施工技术要点

基础施工质量与风力发电工程塔架承载能力密切相关，具体施工中需严格把控地质适配性与结构稳定性。一方面，开挖前需通过地质勘察明确土层分布，采用分层开挖法避免原状土扰动，对松软土层需采取钢板桩支护或换填级配砂石处理。另一方面，基础承载力试验必须符合设计要求，采用静载试验法检测，确保承载力不低于 250kPa。预埋件安装是关键环节，基础环水平度误差需控制在 2% 以内，施工人员可借助水准仪多点监测校准；电缆埋管需预留 1.5% 坡度，接口采用热熔焊接密封，防止后期进水。垫层浇筑采用 C15 混凝土，厚度不小于 10cm，浇筑后覆盖土工布洒水养护 7 天，养护期间强度未达 70% 前禁止后续作业。此外，基坑回填需分层夯实，每层厚度不超过 30cm，压实度需达到 95% 以上，避免基础沉降。

1.2 塔架吊装技术要点

塔架吊装作业的实施需做好机械适配性与安装精度控制两方面的工作，当然开始吊装前还应完成基础环清理、地脚螺

栓校验及电气柜预装等准备工作。之后根据塔架高度选用合适吨位的起重机，30m 以下塔架可采用汽车吊，超过 50m 则需配置履带吊，并对吊装场地进行硬化处理，承载力满足起重机作业要求。需要注意的是，连接塔筒的时候，螺栓需涂抹二硫化钼润滑剂，采用对称拧紧法分三次紧固，力矩值严格按设计参数控制，M30 螺栓力矩通常不低于 1800N·m，紧固后需用扭矩扳手复检^[1]。此外，塔架垂直度控制采用双经纬仪双向监测，第一节塔筒垂直度误差 $\leq 1.5\%$ ，整塔安装完成后误差需控制在 1% 以内。并且整个吊装过程中需实时监测风速，当风速超过 12m/s 时立即停止作业，同时安排专人指挥，避免与周边障碍物发生碰撞。

1.3 架线施工技术要点

架线施工中最为关键的就是控制导线质量与架设精度，导线展放前需进行外观检查与拉力试验，确保无断股、磨损等缺陷。通常情况下，风力发电工程组塔架线采用张力放线法时，张力机张力值需按导线型号调整，钢芯铝绞线张力通常控制在其拉断力的 20%-25%，避免张力过大导致导线变形。同时，展放过程中每隔 50m 设置一个放线滑车，滑车槽径需与导线匹配，并安排人员监护，防止导线与地面、树木摩擦造成损伤^[2]。此外，紧线作业需采用经纬仪观测弧垂，按设计要求调整导线张力，弧垂误差不超过 $\pm 2.5\%$ ，同一档距内导线弧垂需保持一致。附件安装前需清理导线表面污垢，绝缘子安装需保证串型垂直，金具连接螺栓需紧固到位并加装防松垫圈，耐张线夹压接后需进行拉力试验，确保压接质量合格。

2 风力发电工程组塔架线施工安全风险分析

2.1 常见的安全风险识别

2.1.1 高处坠落风险

由于组塔架线施工均为高空作业，所以坠落事故主要发生

于塔架吊装、杆塔作业等高空场景。此类风险的成因包括防护措施缺失与操作不规范,施工人员未系安全带、安全带老化断裂或挂钩未挂牢;塔架爬梯护栏损坏、作业平台护栏缺失,也会降低安全防护能力。此外,高空作业时突发阵风导致身体失衡,或因疲劳、注意力不集中误踩空,均可能诱发事故。一旦发生高空坠落事故后果非常严重,多造成人员重伤甚至死亡,是组塔架线施工的首要安全隐患。

2.1.2 物体打击风险

物体打击风险的源头多集中在高空物体坠落与地面物料堆放混乱。如,高空作业时工具未固定、材料放置不稳,易因碰撞或风力作用掉落;或者塔架连接螺栓、紧固扳手等小型构件若随手丢弃,坠落时会产生较大冲击力。此外,地面作业区未设置硬质隔离防护,或警示标志不清晰,导致人员误入危险区域。另外,物料吊装时捆绑不牢固发生散落,也会对下方人员造成打击伤害,此类风险发生突然,易引发群体性安全事故[3]。

2.1.3 机械伤害风险

根据以往经验,风力发电机组塔架线施工中绝大多数机械伤害事故都是由设备操作与管理不当导致的。如,起重机吊装时支腿未垫实、力矩限制器失效引发倾覆,或钢丝绳磨损断裂造成重物坠落;绞磨机、张力机等设备未定期检修,出现齿轮卡滞、制动失灵等故障,易夹伤操作人员。此外,施工人员未按规程佩戴防护用品,在设备运行时违规靠近旋转部件,或交叉作业时设备协调不当,均会增加机械伤害风险,此类风险易造成设备损毁与人员肢体损伤。

2.1.4 触电风险

架线施工若与现有高压线路距离不足就非常容易产生感应电,且未采取接地、绝缘防护措施;施工用电设备接线混乱、电缆破损漏电,未安装漏电保护器或保护器失效。此外,雷雨天气未停止高空作业,塔架成为接闪器引发触电;人员误触未断电的电气柜、接线盒,或在带电设备附近使用金属工具,均可能导致触电事故,严重时危及生命。

2.2 风险评估方法与等级划分

2.2.1 风险评估方法

基于故障树分析法与层次分析法可较为精准地评估组塔架线施工风险。故障树分析法以“发生安全事故”为顶事件,自上而下逐层拆解,通过逻辑门连接高处坠落、设备故障等中间事件与基本事件,绘制故障树并计算最小割集,明确各风险因素的影响权重,如通过该方法可定位“安全带失效”是高处坠落的关键诱因。层次分析法则将风险分解为目标层(施工安

全风险)、准则层(风险发生可能性、影响程度)与指标层(具体风险因素),构建判断矩阵并进行一致性检验,量化各风险的优先级[4]。此外,现场可结合LEC评价法,通过计算危险性分值($D=L \times E \times C$)快速评估单因素风险,其中L为发生概率、E为暴露频率、C为后果严重度,为现场即时风险管控提供依据。

2.2.2 风险等级划分标准

依据“发生可能性(P)-影响程度(I)”二维矩阵划分,风险等级共分为高、中、低三个等级,如下表1所示。发生可能性按频率分为5级:P1(极罕见, <0.01次/年)、P2(罕见, 0.01-0.1次/年)、P3(偶尔, 0.1-1次/年)、P4(较频繁, 1-5次/年)、P5(频繁, >5次/年)。影响程度按损失分为5级:I1(轻微, 无伤亡、经济损失<10万元)、I2(一般, 轻伤、经济损失10-50万元)、I3(较大, 重伤、经济损失50-200万元)、I4(重大, 1-2人死亡、经济损失200-1000万元)、I5(特别重大, 3人以上死亡、经济损失>1000万元)。高风险对应P4-I4、P5-I3及以上组合,需立即停工整改;中风险对应P3-I3、P4-I2等组合,需限期采取防控措施;低风险对应P1-I1、P2-I2等组合,可通过日常管控监控。例如,未系安全带进行高空作业属于P3-I4组合,判定为高风险。

表1 风险等级划分标准

发生可能性(P)	影响程度(I)	I1(轻微)	I2(一般)	I3(较大)	I4(重大)	I5(特别重大)
P5(频繁)	风险等级	中风险	高风险	高风险	高风险	高风险
P4(较频繁)	风险等级	低风险	中风险	高风险	高风险	高风险
P3(偶尔)	风险等级	低风险	低风险	中风险	高风险	高风险
P2(罕见)	风险等级	低风险	低风险	中风险	中风险	高风险
P1(极罕见)	风险等级	低风险	低风险	中风险	中风险	中风险

3 风力发电工程组塔架线安全施工管理措施

3.1 完善安全管理制度

施工企业应持续完善各项安全管理制度,构建“体系化+专项化”的制度框架。如,体系层面建立以项目经理为第一责任人的安全责任体系,明确从管理层到作业层的岗位职责,签订安全责任书并将考核结果与绩效挂钩,实现“人人有责、层

层落实”。同时制定安全目标管理办法,将“零死亡、零重伤”等核心目标分解至各施工阶段,定期开展目标达成率评估。专项制度需聚焦组塔架线关键环节,编制《高空作业安全管理规定》《吊装作业许可制度》《临时用电安全规程》等文件,明确作业审批流程、风险管控标准与应急处置要求^[5]。此外,建立安全隐患排查治理闭环机制,实行“日巡查、周通报、月考核”制度,对排查出的隐患标注风险等级,明确整改责任人、措施与时限,确保隐患100%整改到位。

3.2 提升施工人员安全技能

人员是安全管理的核心要素,施工人员自身安全技能与意识的提升需实施“全周期、分层级”的培训教育体系。首先,岗前培训需覆盖所有进场人员,内容包括安全管理制度、风险辨识方法、防护用品使用等,经理论考试与实操考核合格后方可上岗,考核通过率需达到100%。其次,特种作业人员(如起重机司机、高空作业人员)需开展专项培训,除持证上岗要求外,每季度进行一次技能复核与风险警示教育,通过事故案例复盘强化安全意识^[6]。日常培训采用“线上+线下”结合模式,线上通过安全知识小程序推送微课程,线下每月组织一次现场实操演练,重点培训应急救援、设备操作规范等内容。此外,建立人员安全档案,记录培训考核、违章记录等信息,实行“红黄牌”预警制度,对多次违章人员暂停作业并进行强制再培训。

3.3 加强施工现场安全管理措施

为了保障风力发电机组塔架线全流程安全施工,现场需构建“全方位、精细化”的安全管控体系。一方面,高空作业人员必须设置双层安全网,佩戴全身式安全带并实行“双挂钩”制度;塔架底部设置硬质隔离区,高度不低于1.8m,周边悬挂“禁止入内”警示标志。另一方面,设备执行“全生命周期”管控模式,起重机、张力机等设备进场前进行安全性能检测,合格后方可使用;并建立设备台账,定期开展维护保养并记录,对老化、故障设备立即停用更换^[7]。此外,密切关注气象与地质条件,安排专人每日监测风速、雨量,当风速超过10m/s时停止高空作业与吊装作业;山地施工需排查边坡稳定性,设置截水沟与防滑桩防止坍塌。同时实行作业票许可制度,高空、动火等危险作业必须办理审批手续,安排专人现场监护方可施工。

4 结语

总而言之,本文系统梳理了风力发电工程组塔架线的基础、塔架吊装、架线施工关键技术要点,精准识别并评估了四类核心安全风险,从制度、人员、现场三维度构建了全链条管理体系。研究表明,技术规范与安全管理的深度融合是防控风险的关键。未来还可进一步探索智能化监测技术在现场管控中的应用,通过数字化手段提升风险预警与处置效率,为风电工程安全高效建设提供更有力的技术支撑,助力清洁能源产业高质量发展。

参考文献:

- [1] 张文文,韩文星,赵星军,等.吊装技术在风力发电机组施工中的应用[J].工程建设与设计,2025,(12):208-210.
- [2] 方恒超.风力发电基础工程专项施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(12):124-126.
- [3] 张元海,杨鸿云,李锴.浅谈风力发电工程项目建设安全管理思路及措施[J].中国设备工程,2025,(08):59-60.
- [4] 李巽.基于标准化的光伏和风力发电系统性能和可靠性分析[J].大众标准化,2024,(14):10-12.
- [5] 张瀚文.山地风力发电设备安全安装技术要点分析[J].电气技术与经济,2024,(03):129-131.
- [6] 何水娥.风力发电机组塔筒垂直度检测方法研究[J].中国金属通报,2020,(05):285-286.
- [7] 于海超.电力施工中风力发电机组安装与调试技术研究[J].中国高新科技,2024,(18):82-84.