

# 大型风电机组吊装施工的安全风险评估与防控策略

常飞飞 张源

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

**【摘要】**：为精准识别和有效防范大型风电机组吊装施工中的安全风险，本文提出一种基于层次分析法（AHP）的安全风险评估模型，该模型通过构建目标层、准则层和指标层三层风险模型，从设备、人员、环境和管理等方面精准识别各类风险因素，为安全风险防控策略的制定提供准确参考。经工程验证，该模型具有良好的适用性和科学性，能够精准识别各类吊装施工风险，提升施工安全风险防控策略的针对性和有效性。

**【关键词】**：大型风电机组；吊装施工；安全风险评估；层次分析法；防控策略

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.049

## 引言

大型风电机组吊装施工作为风电项目建设的核心环节，该环节施工具有作业高度高、设备重量大、技术要求严、作业环境复杂等特点，同时施工也涉及高空、起重、动火等多项危险作业环节，具有极高的安全风险。传统风机吊装施工安全风险评估多依赖经验判断，所以其存在定量分析不足、风险权重模糊等问题，难以精准识别其中的关键风险点。层次分析法（AHP）作为一种多准则决策方法，能将复杂问题分解为层级结构，通过主观判断与客观计算结合确定因素权重，非常适用于大型风电机组吊装的多因素和多层次评估场景<sup>[1]</sup>。因此，本文围绕AHP构建了大型风电机组吊装施工安全风险评估模型，并结合实例进行验证分析，以供类似工程参考。

## 1 基于AHP的风电机组吊装施工安全风险评估模型构建

### 1.1 风险因素识别

通过文献研究、现场调研、专家访谈等方式，对大型风电机组吊装施工中的安全风险因素进行识别分析，最终识别出四类准则层风险和16项指标层风险，具体风险如表1所示。

表1 大型风电机组吊装施工安全风险因素体系

准则层	指标层	风险描述
设备风险 (B1)	起重机能缺陷 (C1)	起重机额定起重重量不足、制动系统故障、液压系统泄漏
	辅助设备故障 (C2)	钢丝绳磨损、吊钩变形、滑轮损坏、索具断裂
	构件质量缺陷 (C3)	塔架焊缝不达标、机舱部件损坏、叶片裂纹
	设备协同故障 (C4)	起重机与运输车辆配合失误、辅助设备信号异常
人员风险 (B2)	操作技能不足 (C5)	操作人员未掌握大型设备吊装技巧、对机组特性不熟悉
	安全意识薄弱 (C6)	施工人员违规操作、未佩戴安全防护用品、冒险作业

	疲劳作业 (C7)	作业人员连续作业，精力不足导致失误
	应急处置不当 (C8)	施工人员在面对突发情况时，反应迟缓或者处置方法错误
环境风险 (B3)	恶劣天气 (C9)	大风、暴雨、雷电、低温、高温等极端天气影响
	地形复杂 (C10)	场地不平、地基承载力不足
	现场干扰 (C11)	周边障碍物、交叉作业、交通干扰等
	照明通风不足 (C12)	夜间施工照明条件差、密闭空间通风不良
管理风险 (B4)	管理制度不完善 (C13)	缺乏专项吊装方案、安全责任未落实、操作规程不明确
	组织协调不力 (C14)	施工班组沟通不畅、多工序衔接混乱、资源调配不合理
	安全培训不足 (C15)	未开展针对性安全培训、培训内容不贴合实际需求
	应急准备不足 (C16)	应急预案不完善、应急物资储备不足、未定期开展应急演练

### 1.2 评估模型层级结构

基于识别的风险因素，构建“目标层—准则层—指标层”三级风险评估模型，具体结构如下：

(1) 目标层 (A)：大型风电机组吊装施工安全风险评估，即综合评价吊装施工整体安全风险水平，识别关键风险点。

(2) 准则层 (B)：包括设备风险 (B1)、人员风险 (B2)、环境风险 (B3)、管理风险 (B4)，是目标层的核心分解维度，反映风险的主要来源。

(3) 指标层 (C)：16项具体风险因素，是准则层的进一步细化，直接对应吊装施工中的具体安全隐患。

### 1.3 判断矩阵构建与权重计算

邀请10名专家按照1-9标度法对各层级风险因素进行两两比较，确定相对重要性程度，构建判断矩阵。以准则层为例，专家通过两两比较设备风险 (B1)、人员风险 (B2)、环境风

险(B3)、管理风险(B4)的相对重要性,构建准则层判断矩阵A-B,同理针对每个准则层因素,构建指标层判断矩阵。然后再采用和积法计算各因素权重<sup>[2]</sup>,具体步骤如下:

$$(1) \text{ 归一化处理 } \bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

$$(2) \text{ 归一化后的矩阵行求和 } \bar{w}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} (i = 1, 2, \dots, n)$$

(3) 对行和向量的归一化处理,得到权重向量:

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{k=1}^n \bar{w}_k} (i = 1, 2, \dots, n)$$

在完成权重计算后,还需要进行一致性验证,将判断矩阵的最大特征值代入下述公式中进行计算一致性指标CI<sup>[3]</sup>。

$$\text{一致性指标 CI: } CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

然后再进行一致性比例CR的计算,计算公式为  $CR = \frac{CI}{RI}$ ,其中RI为平均随机一致性指标,该指标由矩阵阶数n确定,n值对应的RI值可通过查阅对应的AHP标准表格来获取。当  $CR < 0.1$  时,判断矩阵满足一致性要求,专家判断合理;若  $CR \geq 0.1$ ,需重新构建判断矩阵。

#### 1.4 风险等级划分

根据各风险因素的权重值,结合实际施工风险发生概率与损失程度,划分风险等级。将权重  $\geq 0.15$  的指标列为一级风险(关键风险),  $0.08 \leq \text{权重} < 0.15$  的列为二级风险(重要风险),权重  $< 0.08$  的列为三级风险(一般风险),为后续防控策略制定提供优先级依据<sup>[4]</sup>。

## 2 实例分析

### 2.1 项目概况

某山地风电场项目,共需要安装20台2.5MW风电机组,单机塔架高度105米,机舱重量85吨,叶片长度72米,单台机组吊装总重量约150吨。该区域地形复杂,场地狭窄且坡度较大,施工中需要对部分区域进行平整和地基加固。同时该区域夏季多暴雨、雷暴,春秋季节也存在大风天气,气候因素对吊装施工的影响较为明显。

### 2.2 风险评估实施

通过前文构建的风险评估模型对本项目的各级风险权重进行计算,详细结果如表2和表3所示。

表2 准则层风险权重表

准则层因素	权重值	排序	风险等级
设备风险(B1)	0.406	1	一级风险
管理风险(B4)	0.240	2	二级风险

准则层因素	权重值	排序	风险等级
人员风险(B2)	0.229	3	
环境风险(B3)	0.125	4	三级风险

表3 指标层风险权重及排序表

指标层因素	权重值	总排序	风险等级
起重机性能缺陷(C1)	0.185	1	一级风险
安全意识薄弱(C6)	0.098	2	二级风险
管理制度不完善(C13)	0.092	3	
恶劣天气(C9)	0.075	4	
辅助设备故障(C2)	0.072	5	三级风险
组织协调不力(C14)	0.068	6	
操作技能不足(C5)	0.065	7	
构件质量缺陷(C3)	0.058	8	
地形复杂(C10)	0.032	9	
应急处置不当(C8)	0.031	10	
设备协同故障(C4)	0.030	11	
疲劳作业(C7)	0.025	12	
现场干扰(C11)	0.015	13	
安全培训不足(C15)	0.013	14	
应急准备不足(C16)	0.012	15	
照明通风不足(C12)	0.003	16	

### 2.3 评估结果分析

从评估结果可以看出,该项目大型风电机组吊装施工安全风险中,设备风险是最核心的风险来源,权重占比达40.6%,其中起重机性能缺陷(C1)权重最高(0.185)列为一级风险,这是由于施工区域地形复杂,起重机需在受限空间内完成大重量、高精度吊装作业,若起重机额定起重量不足、制动系统故障或液压系统泄漏,极易引发倾覆事故。

管理风险与人员风险权重分别为24.0%和22.9%,属于二级风险,其中管理制度不完善(C13)和安全意识薄弱(C6)是主要风险点。因为本项目涉及多班组、多工序协同作业,若缺乏完善的专项吊装方案和明确的安全责任分工,易导致操作混乱;部分施工人员存在侥幸心理,违规操作、未佩戴安全防护用品等行为,大幅增加高空坠落、构件碰撞等事故风险。

环境风险权重相对较低(12.5%),但恶劣天气(C9)在

环境风险中占比达60.0%，该区域频繁的大风、暴雨、雷暴天气，可能导致吊装过程中构件晃动、视线受阻，甚至引发设备失稳，仍是需重点防控的风险因素。

### 3 基于安全风险评估结果的大型风电机组吊装施工防控策略

结合上述安全风险评估识别结果，围绕设备、人员、环境和管理4个方面制定相对应的防控策略。

#### 3.1 设备风险防控策略

设备风险作为首要风险，施工前需开展全面设备检测，起重机具需进行空载、满载、超载试吊试验，检测制动系统、液压系统、变幅机构等关键部件性能，试吊过程中安排专人监测设备运行参数，确保无异常后方可投入使用；辅助设备需检查钢丝绳磨损程度、吊钩变形情况、滑轮转动灵活性，发现磨损超标、变形等问题立即更换。而在施工过程中，则需要全面落实设备维护制度，每日作业前、作业后对设备进行检查保养，重点检查起重机支腿受力情况、液压油液位、制动系统灵敏度，钢丝绳需每日涂抹润滑油，防止锈蚀磨损。同时在设备协同作业时也必须提前制定协同方案，明确主吊、辅吊的操作流程与信号传递规范，配备专职信号员与指挥员，确保多设备动作协调一致，避免碰撞事故<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 人员风险防控策略

针对上述人员风险问题，施工前所有关键岗位人员必须做好持证上岗，且需接受风电吊装专项培训，在培训后经理论和实践考核合格后方可上岗。施工期间需要定期对所有人员展开安全警示教育，同时做好排班休息，避免连续作业，防止疲劳作业导致判断失误。同时，所有施工人员在作业中必须佩戴安全帽、安全带、防滑鞋等防护用品，尤其对于各种高空作业或者动火作业，更必须全面落实安全防护要求。此外，施工期间定期组织应急演练，切实提升施工人员的应急处置能力。

#### 3.3 环境风险防控策略

环境风险可以通过精准的预判和防范方案进行规避。首先，施工期间需及时获取与工程现场相关的气象数据，当风速过大或者出现暴雨、雷暴等天气时，应立即停止吊装作业，将

设备与构件移至安全位置，人员撤离至室内避险。其次，在复杂地形上施工时，必须提前进行地形勘测和地基承载力测试，并做好施工现场各区域的规范，避免因为地基承载力较差，或者施工现场布置混乱而引起作业事故。或者遗留安全隐患。最后，施工期间必须提前根据气候特点，做好施工时段的优化安排，尽可能选择天气稳定和风速较小的时段进行吊装作业；而在夜间施工时则必须确保施工现场照明亮度符合施工要求，密闭空间作业则必须先检测作业空间的通风情况和空气质量，切实保证施工人员作业安全。

#### 3.4 管理风险防控策略

针对风机吊装，大型风机吊装施工中的各类安全风险，必须从制度、组织和应急三方面形成完善的管理体系。一是制定完善的专项吊装方案，明确施工流程、技术要求、安全措施、人员职责等内容，方案需经专家评审通过后方可实施；建立健全安全管理制度，落实安全生产责任制，将安全责任分解至每个班组、每个岗位，签订安全责任书，明确奖惩机制，对违规操作行为严肃追责<sup>[6]</sup>。二是强化组织协调管理，成立专门的吊装施工管理小组，统筹协调施工进度、资源调配、工序衔接等工作，建立每日班前会、班后会制度，明确当日施工任务与安全注意事项，总结当日施工存在的问题；加强各班组、各工序之间的沟通协作，配备专职协调员，及时解决施工过程中的衔接矛盾，避免因沟通不畅导致操作失误。三是建立应急管理体系，制定针对性应急预案，储备充足的应急物资，包括救援绳索、急救药品、灭火器、备用设备等，定期组织应急演练，确保突发事故发生时能快速响应、有效处置，最大限度降低事故损失。

### 4 结语

基于AHP构建的三级风险评估模型能够有效实现对大型风机吊装施工中各类风险的精准评估，明确各类风险点的影响权重，为安全防控策略的制定，提供准确依据。该方法在具体应用过程中，应系统分析工程的实际情况，结合专业理论和大量经验，精准进行各类风险因素的识别和量化评估，从而发挥AHP定量分析优势，为大型风电工程建设提供安全管理保障。

### 参考文献：

- [1] 韦雨松,魏凡词,沈鑫,等.关于层次分析法在施工安全管理中的应用[J].中国储运,2025,(08):145.
- [2] 农骥,李甜.基于层次分析法的高压旋喷桩施工安全风险评估[J].企业科技与发展,2025,(04):84-88.
- [3] 王松岩,刘文杰,焦红.基于模糊层次分析法的高层建筑工程施工安全风险评价[J].建筑技术,2023,54(20):2529-2534.
- [4] 李孟开,何新生.基于三标度模糊层次分析模型的施工安全风险评价[J].建筑安全,2022,37(08):78-82.
- [5] 何晓春,汤宁,秦汉华.陆上风电场风机吊装施工组织与管理[J].安装,2024,(S2):1-3.