

风电基础建设风险管理及应对措施

张翰林

国华能源投资有限公司 北京 100028

摘要：在“双碳”战略目标的引领下，风电产业已成为推动我国能源结构转型的关键支柱。风电基础作为风机的核心承载结构，其建设质量直接关系到项目全生命周期的安全、可靠性与经济效益。然而，风电基础建设过程技术复杂度高、专业交叉密集、易受外部环境干扰，成为各类风险高度集中的关键环节，且风险呈现出明显的系统性与传导性。本文从系统整体性视角出发，将风电基础建设视为一个风险耦合系统，构建了“风险识别—传导分析—综合应对”的分析框架，围绕自然环境、技术决策、管理协同与经济目标四类关键因子，系统阐释其不同阶段的耦合关系与传导模式，重点揭示了“环境—技术—经济”与“管理—技术—安全”两条典型风险传导路径。在此基础上，从事前预防、事中控制与事后处理三个层面，提出覆盖项目全周期的综合性风险管理与应对策略体系。

关键词：风电基础建设；风险耦合；风险管理策略；风险应对措施

引言

随着我国“碳达峰、碳中和”战略的深入推进，以风电为代表的新能源产业迎来重大发展机遇。风电基础作为传递风机荷载至地基的关键结构，其建设质量直接决定了风机的长期安全稳定运行与整体经济效益。然而，风电基础建设常面临复杂的地质条件、多变的气象环境以及多参与方之间的组织协同难题，使其成为整个风电产业链中不确定性最高、风险最为集中的薄弱环节。

目前，学术界与工程界已对风电基础建设风险开展了广泛研究，识别出诸多潜在风险并提出了相应对策，但多数研究仍停留在对风险现象的静态描述与简单列举层面，未能深入揭示各类风险之间相互关联、动态转化的内在机制。在工程实践中，局部风险事件往往引发连锁反应，导致返工、工期延误、成本超支等问题，甚至在运行阶段演变为严重质量或安全事故，造成难以挽回的损失。风险的系统性与传导性要求风电基础建设的风险管理必须从整体性与动态性视角出发，构建更为科学、系统的管理架构。

基于此，本文运用系统思维，将风电基础建设视为一个复杂的风险耦合系统，深入剖析风险生成与演化的全过程，并在此基础上构建覆盖项目全周期的整合性风险应对策略体系，推动风险管理模式从“被动应对”向“主动防控”转变，从而有效保障项目的顺利实施与长效运行。

1 风电基础建设的风险特征

风电基础建设作为一项跨专业、跨阶段、跨组织的复杂系统工程，其风险并非孤立事件的简单叠加，而是以相互关联的系统形式存在。相较于常规建筑工程，其

风险特征更为突出，具体表现在以下四个方面。

1.1 多维要素的高度耦合与复杂性

风电基础建设风险具有显著的系统性，源于地质、结构、环境、管理等多维要素之间的高度耦合。

技术链条紧密耦合：从地质勘察、结构设计到施工工艺，构成环环相扣的技术流程^[1]。前期勘察数据的任何偏差均可能导致设计参数失真，进而影响施工方案的适用性，最终埋下结构安全隐患。

环境条件极端性与动态性：风电场多选址于偏远山区、沿海滩涂或远海等环境恶劣区域，基础结构需长期承受循环荷载与极端气候的双重考验。此类复杂多变的外部环境导致风险分析的边界条件高度不确定，显著增加了技术方案的挑战性。

组织协同复杂性：基础工程建设涉及多方主体，各方在目标、信息与激励机制方面存在不对称，易在接口管理与工序衔接等环节形成“管理真空”，使原本可控的技术风险因协同不畅而被放大。

1.2 风险的链式传导与放大效应

风电基础建设中的风险具有明显的传导性，可沿项目时间轴与责任链迁移，并产生“放大效应”。

时序迁移与潜伏特性：风险具有时序性与潜伏期。例如，勘察阶段因投入不足未能识别软弱下卧层（潜伏风险），在设计阶段可能未被发现，而在施工阶段基坑开挖时被触发，引发边坡失稳（施工风险）；若处置不当，最终在运行阶段表现为不均匀沉降，影响机组长期安全（运行风险）。

链条逐级放大机制：微小初始偏差可能在传导过程中被逐级放大。例如，设计阶段的错误可能导致施工中

钢筋绑扎偏差,进而削弱基础承载能力。此类质量问题在竣工验收时或难以察觉,但在机组运行数年后,可能在疲劳荷载作用下发展为结构裂缝,最终产生高昂的停机修复成本,使初始技术风险演变为重大经济损失。

1.3 风险在项目全周期的动态演化

在项目不同阶段,风险的主要矛盾与表现形式呈现动态变化。前期勘测设计阶段,主要风险源于信息不充分与认知局限,如对地质条件误判、极端气象条件低估等,可能导致基础选型或设计方案的根本性错误。施工阶段,风险焦点转向现场执行与过程控制,如混凝土浇筑质量、钢筋工程精度、关键工序衔接及现场安全管理等。运维阶段,前期未被发现的设计或施工缺陷将在持续动载荷与环境侵蚀下逐渐暴露,最终以结构疲劳、耐久性下降或安全事故等形式显现。

1.4 后果的不可逆性与高昂的纠错成本

与风机叶片、齿轮箱等可更换的模块化部件不同,风电基础一旦浇筑成型,其缺陷修复与加固极具挑战性,后果往往不可逆转。基础作为深埋地下的巨型钢筋混凝土结构,若出现主体结构问题,彻底修复在技术上几乎不可行,经济上也难以承受。这决定了其“一次性成型、零容错”的严苛要求。即使是局部缺陷修复,也常需大型机械进场、长时间停机,导致巨额发电损失与修复费用,其纠错成本远高于前期为保障质量所增加的投入。因此,风电基础风险管理必须重心前置,遵循“源头预防优于事后补救”的核心原则。

2 风电基础建设风险因子的构成、分类与传导机理

2.1 风险系统的构成维度

风电基础建设风险系统由自然环境、技术、管理与经济四个维度构成。这些维度并非孤立存在,而是呈现复杂的相互依赖与动态交互关系,共同决定项目的整体风险水平。

自然环境风险:项目面临的最直接、最不可控的外部挑战,具有高度随机性、隐蔽性与潜在极端性。风电基础的安全性高度依赖对场址地质条件的准确掌握,而风电场址常涉及岩溶、软土等复杂地质,其空间上具有显著非均质性^[2]。受勘察技术局限与成本约束,地质信息的获取必然存在不完备性,这种信息不对称是引致后续技术决策偏差的根本原因。

技术风险:源于工程技术体系在应对复杂环境、实现工程目标过程中存在的认知局限、模型偏差与执行误差。技术方案是项目消解外部不确定性的主要手段,同时也是风险在系统内部传导的关键媒介。在设计阶段,风险主要表现为理想模型与实际物理过程的差异,如对

风-机-基础-土体相互作用效应的简化处理及设计参数取值的不确定性。施工阶段的风险则集中于将设计转化为工程实体的过程,材料控制、工艺执行或质量检验的任何偏差均可能导致结构初始缺陷,降低长期可靠性。

管理风险:源于项目组织内部决策、协调与控制过程的内生性风险,作为一种调节因子,影响其他风险的发生概率、传播路径与最终影响程度。其根源在于项目多重目标(成本、进度、质量、安全)之间的权衡与决策,不合理的工期压力或过度成本控制可能系统性地导致牺牲工程质量。

经济风险:作为上述三类风险相互作用、传导与演化的最终累积后果,直接反映在项目的财务收益与经济价值上。其综合表现为:建设期因工程变更、返工、索赔及工期延误导致的直接成本超支;因延期投产引发的发电收入损失及融资成本上升;以及前期质量缺陷导致的运营期高昂成本。

2.2 风险因子的层次

从风险在系统中的作用机制看,上述风险因子可进一步划分为根源性风险与过程性风险两个层次。

根源性风险构成风险系统的初始输入与边界条件,是后续所有风险的来源。该层次主要包括两类因子:一是外部自然环境的不确定性,作为项目必须接受的客观条件;二是内部经济目标的刚性约束(如严格的投资上限与工期要求),作为项目必须达成的内在要求。环境的内在不确定性与项目目标的刚性要求之间存在固有冲突,这种冲突构成了风险产生的基本前提。

过程性风险是在项目推进过程中,为应对根源性风险、实现刚性目标而采取的一系列决策与行动的产物,在风险传导链中起关键媒介作用。该层次主要包括技术风险与管理风险。技术体系是项目应对环境不确定性的主要手段,其方案合理性与实施可靠性直接决定根源性风险能否被有效化解。管理体系则对风险演化过程具有显著调节作用,有效的管理能够识别、评估并阻断风险传导路径,起到抑制作用;反之,低效管理可能因决策失误或控制不力加剧风险扩散与升级。

2.3 风险的传导机理

基于以上分析,风险在系统内的传导主要呈现出两条典型的路径。

环境—技术—经济的成本放大路径:该路径是工程项目中最常见的风险演化模式。当前期地质勘察深度不足,导致不良地质识别不到位时,设计参数与地基假定可能偏离实际,引致基础型式或尺寸配置不合理。施工阶段一旦通过监测发现异常,往往需要进行设计变更与

加固处理，随之引发材料、机械与人力的重复投入及工期损失，并叠加索赔与融资成本上升，最终表现为显著的总成本超支^[3]。该路径清晰地说明，初始信息的缺失（环境风险）会通过技术决策的偏差，沿着时间轴不断累积，最终形成“迟发现、高代价”的经济后果。

管理—技术—安全的质量劣变路径：在进度压力与资源约束下，若管理层将工期目标置于工序质量之上（管理风险），可能诱发施工单位压缩关键工序时间（如混凝土浇筑间隔与养护周期）、弱化过程验收，从而导致早期强度不足、蜂窝麻面等质量缺陷（技术风险）。这些初始缺陷在运行阶段，将在动、静荷载的耦合作用下加速结构的疲劳劣化，极端情况下甚至可能触发结构失稳等严重的安全事故。该路径表明，管理执行上的“软失效”会通过技术实施上的“硬缺陷”，在项目后期集中爆发为不可逆转的安全问题。

此外，合规性手续与供应链等间接因素也通过“时间—资源—组织”通道重塑风险格局，例如审批延迟会压缩有效施工窗口期，关键设备交付延误则可能引发现场工序调整，这些都可能成为上述两条主要风险路径的触发点。

3 全周期一体化风险应对策略

针对上述风险系统特征与传导路径，需建立从事前、事中到事后覆盖项目全周期的整合性应对策略，并以组织能力、合同金融工具与信息化手段提供横向支撑。

3.1 事前预防：强化源头管控，筑牢第一道防线

此阶段控制核心在于通过前置性投入主动降低系统初始不确定性，从源头规避风险生成条件。具体措施包括：开展远超常规要求的高精度地质勘察与长周期气象水文观测，为设计提供精确可靠依据，最大限度减少根源性风险；在技术方案选择上严格遵循成熟可靠原则，对新技术、新材料进行充分验证，确保技术方案本身不成为新风险源；建立严格的合作方准入与履约能力评估体系，将风险预先分配给具备相应技术与管理能力的责任主体，有效规避因执行能力不足引发的潜在风险。

3.2 事中控制：实施动态监控，及时阻断风险传导

此阶段控制核心在于建立实时反馈与控制机制，及时识别风险信号并阻断其传导路径。应建立基于关键性能指标（如基础沉降、结构应力）的动态监测与预警系统，实现风险量化预警与超前管理；推行覆盖所有关键

工序的标准化作业规程与质量验收程序，通过严格过程控制最大限度减少施工质量缺陷，阻断风险从管理不足向工程实体缺陷转化；构建高效的接口管理与协同工作机制，通过定期协调与信息共享主动解决因组织与专业壁垒引发的协同问题，防止其演变为工期延误与质量冲突。

3.3 事后处理：做好应急预案，增强系统韧性

事后风险应对核心在于通过财务与组织预备措施有效减轻突发事件冲击，确保项目具备从扰动中恢复的能力。具体包括：科学配置保险产品组合与设计严谨的合同条款，将特定风险的财务后果在法律框架内进行转移与分配；针对潜在高影响事件制定可操作的应急响应预案，并在项目预算中预留专项管理风险准备金^[4]。应急预案提供应对危机的程序保障，风险准备金提供财务保障，二者结合确保项目在遭遇冲击时能够快速响应、有序恢复。

结束语

风电基础建设风险管理是一项系统性工程，须超越对单一风险点的孤立应对，转向对整个风险系统的整体把控。有效的风险管理核心在于深入理解各类风险因子之间的传导机理。本文研究表明，风电基础建设风险生成机制可从“根源性—过程性”层次解释：外部不确定性与内部刚性目标共同构成初始不利因素，技术与管理作为中介决定风险是被化解还是被放大。风险传导主要呈现两条典型路径：其一，信息不足与技术偏差沿时间轴传导为成本超支的“环境—技术—经济”路径；其二，管理执行失控经由工序质量劣化转化为运行安全隐患的“管理—技术—安全”路径。同时，合规性手续与供应链因素通过对窗口期与资源配置的重塑产生间接效应。针对上述机理，构建“事前—事中—事后”全周期风险控制体系是降低项目风险的关键途径。

参考文献

- [1]李备,蔡铁华.风电项目施工安全风险及应对措施[J].湖南安全与防灾,2021(10):50-51.
- [2]王文强.风电基础建设的风险管理与应对措施[J].科海故事博览,2024(23):76-78.
- [3]赵山华.新能源风电工程建设施工的管理要点分析[J].低碳世界,2025,15(4):112-114.
- [4]杨浩.风电项目招标过程管理与优化策略探讨[J].企业改革与管理,2024(12):163-165.