

台风灾后塔机拆除动态风险评估与智能控制技术研究

朱鑫龙

上海市中核华兴达丰机械工程有限公司, 上海 200331

DOI:10.61369/ME.2024080040

摘要： 台风灾害频发对高层建筑塔式起重机结构安全构成严重威胁，其灾后拆除作业因面临结构潜在损伤、环境不确定性增大以及作业空间受限等特殊挑战，风险远超常规拆除，传统风险管理手段已难满足安全保障需求，进行针对性研究具有重要的现实意义。本研究聚焦于台风灾后高层建筑塔式起重机拆除作业的复杂风险控制难题，结合某沿海城市灾后塔吊拆除项目实例，构建了一种基于模糊层次分析法（FAHP）与熵权法相结合的动态风险评估模型。该模型深入分析了灾后特有的环境风险（如残余大风、场地条件恶化）、结构风险（如承载力衰减、连接点松动或断裂）和操作风险（如吊装路径受阻、人员与设备状态变化）三个维度的关键影响因素。研究通过 FAHP 融入专家经验判断，利用熵权法客观反映实测数据的离散性，综合确定风险指标权重，并融合物联网（IoT）实时监测技术，实现了对拆除过程的动态风险感知、精准评估与分级预警，模型评估精度较高。

关键词： 台风灾后；塔式起重机拆除；动态风险评估；智能控制；建筑安全

Research on Dynamic Risk Assessment and Intelligent Control Technology of Tower Crane Demolition after Typhoon Disaster

Zhu Xinlong

Shanghai Zhonghe Huaxingdafeng Mechanical Engineering Co., LTD. Shanghai 200331

Abstract： Frequent typhoon disasters pose a significant threat to the structural safety of tower cranes in high-rise buildings. Post-disaster dismantling operations face unique challenges, including potential structural damage, increased environmental uncertainty, and limited working space, making the risks far greater than those of routine dismantling. Traditional risk management methods are no longer sufficient to meet the safety requirements, making targeted research crucial. This study focuses on the complex risk control challenges of dismantling tower cranes in high-rise buildings after typhoons. Using a post-disaster tower crane dismantling project in a coastal city as a case study, the study develops a dynamic risk assessment model that combines the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) and the Entropy Weighting Method. The model thoroughly analyzes three key dimensions of risk: environmental risks (such as residual strong winds and deteriorating site conditions), structural risks (such as load-bearing capacity degradation and loosening or breaking of connection points), and operational risks (such as obstructed lifting paths and changes in personnel and equipment conditions). By integrating expert judgment into FAHP and using the Entropy Weighting Method to objectively reflect the dispersion of actual data, the model comprehensively determines the weight of risk indicators. It also incorporates real-time monitoring technology from the Internet of Things (IoT) to achieve dynamic risk perception, precise assessment, and graded early warning during the dismantling process, with a high level of evaluation accuracy.

Keywords： typhoon disaster; tower crane demolition; dynamic risk assessment; intelligent control; building safety

引言

台风等极端自然灾害频发，对在役的高层建筑塔式起重机结构安全构成严峻挑战，其灾后拆除工作不仅是保障区域安全、加速恢复重建的关键步骤，更因结构可能存在潜在损伤、作业环境恶劣（如残余强风、场地湿软沉降）以及高空作业固有危险性，成为一项风险极高的特殊工程活动，研究其安全拆除策略具有重要的现实意义。当前，国内外关于塔式起重机拆除风险的研究多集中于常规工况下的

安全管理，常用方法如安全检查表法、LEC 评价法或基于专家经验的定性评估，虽有部分研究开始引入 BIM、物联网等技术提升管理水平，但针对灾后设备拆除这一特定场景，尤其是系统性的动态风险评估与控制策略研究尚显不足。传统风险评估方法主要存在以下局限性：一是静态评估为主，难以实时反映台风冲击后结构性能的劣化程度和动态变化的环境风险；二是主观性较强，评估结果易受专家经验偏差影响；三是缺乏对多源风险信息（环境、结构、操作）的有效融合与动态响应机制。为克服上述不足，本研究聚焦台风灾后塔机拆除作业的特殊风险挑战，提出了一种融合模糊层次分析法（FAHP）与熵权法的动态风险评估模型，并结合物联网（IoT）实时监测与建筑信息模型（BIM）技术，旨在实现拆除风险的精准量化、动态预警与智能化控制，为该类高风险作业提供更科学、可靠的安全保障方案。

一、拆除作业风险识别与评价模型

（一）风险因素多维度识别

1. 环境风险因素识别

环境因素是台风灾后拆除作业面临的首要外部挑战，主要包括：（1）残余台风影响：台风过后仍可能存在突发性强风，威胁高空作业安全。实测数据显示，灾后24小时内瞬时风速仍可达15.3–18.9m/s（对应7–8级风力），这已超出《建筑结构荷载规范》（GB 50009–2012）规定的塔机工作状态抗风设计阈值（12.5m/s）。（2）场地条件恶化：强降雨可能导致作业场地土壤浸泡、松软，引发塔机基础发生不均匀沉降。当沉降量超过10mm时，基础稳定性将显著下降，增加倾覆风险。（3）周边环境干扰：高层建筑周边环境通常较为复杂，尤其在密集城区，邻近建筑物、构筑物或临时设施可能限制塔机的回转和拆卸空间，增加吊装过程中的碰撞风险^[1]。

2. 结构风险因素识别

台风的巨大风荷载可能对塔式起重机结构造成损伤，导致其安全性能下降，主要结构风险包括：（1）剩余承载力降低：台风可能导致塔身标准节连接螺栓松动、焊缝开裂或关键钢结构构件（如塔身、臂架）产生塑性变形。例如，当螺栓预紧力损失超过20%或主要受力焊缝开裂长度超过10cm时，结构的剩余承载能力将显著降低。（2）局部或整体失稳风险增加：结构损伤会降低塔机的整体刚度。当结构刚度下降超过15%时，其在拆除作业载荷作用下的失稳概率将显著上升。关键节点的位移是重要监测指标，如吊臂根部铰接点位移量超过L/250（L为吊臂长度），或关键构件应力监测显示应力比（实际应力/许用应力）大于0.85时，可判定为接近临界失稳状态。

（二）基于FAHP–熵权法的动态风险评估模型

1. 构建FAHP风险指标体系与主观权重确定

模型构建首先基于模糊层次分析法（FAHP）建立风险评价指标体系^[2]。该体系共分三级：一级指标（目标层）为拆除作业总风险，下设环境风险（U1）、结构风险（U2）、操作风险（U3）三个二级指标（准则层）；二级指标进一步细化为9个具体风险要素（如U11残余台风、U12场地沉降、U21剩余承载力等）；三级指标（指标层）则延伸至21个可量化或可评估的具体风险参数（如U111风速超标值、U212螺栓预紧力损失率、U311吊装路径碰撞概率等）。为处理评价中的模糊性，采用三角模糊数（例如，

标度范围从(1/2,1,2)到(2,3,4)）构建专家判断矩阵。通过对模糊判断矩阵进行解模糊化处理（如几何平均法），计算得到各层级指标相对于上一层级目标的初始（主观）权重向量。计算结果显示，在一级指标层面，环境、结构、操作三个维度的初始主观权重分别为0.382、0.293、0.325。

2. 引入熵权法进行客观修正与综合权重计算

为克服FAHP主观赋权的潜在偏差，引入信息熵理论为基础的熵权法对权重进行客观修正。首先，收集整理了近五年我国沿海地区发生的28起台风灾后塔机拆除相关事故或险情数据，构建了以三级指标为列、事故案例为行的原始决策矩阵。对该矩阵进行极差标准化处理，以消除量纲影响。然后，依据信息熵定义计算各三级指标的信息熵值（E）和差异性系数（即客观权重）。

3. 模型动态更新机制与风险预警

模型的关键在于其动态性。利用物联网（IoT）技术，在拆除现场布设传感器，实时采集关键风险参数数据，包括风速（精度±0.5m/s）、塔基倾斜度（分辨率0.01°）、关键结构应变、液压系统压力（采样频率10Hz）等共12类参数。这些数据通过无线传输汇聚至云平台或本地服务器，模型设定每小时自动更新一次风险指标数据库，并重新计算综合风险值R。根据计算得到的综合风险值R，建立三级风险预警体系：

低风险（蓝色预警）： $R < 0.35$

中风险（黄色预警）： $0.35 \leq R < 0.65$

高风险（红色预警）： $R \geq 0.65$

此外，为应对突发状况，模型内嵌了突变响应模块。当监测系统捕捉到关键参数（如结构应力比瞬时值>0.8，或风速突变率>15%/min）达到预设的突变阈值时，系统将立即触发一次实时的风险评估计算，其响应时间被优化至2分钟以内，确保及时发出高危警报并启动应急预案。

风险评估的核心算法采用改进的模糊综合评价（Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE）方法，计算公式如下：

$$R = \sum(\omega_i \times \mu_i) + \alpha \times \max(\mu_i) \quad (1)$$

式中： ω_i 为组合权重， μ_i 为隶属度函数输出值， α 为风险放大系数（取0.2）。隶属度函数采用梯形分布设计，以风速指标为例，当实测风速v满足 $v \leq 12.5\text{m/s}$ 时 $\mu = 0$ ； $12.5 < v \leq 15\text{m/s}$ 时 $\mu = (v - 12.5) / 2.5$ ； $15 < v \leq 18\text{m/s}$ 时 $\mu = 1$ ； $v > 18\text{m/s}$ 时 $\mu = 1 + 0.2 \times (v - 18) / 3$ 。该模型通过MATLAB/Simulink搭建数字

孪生系统，可实现5种典型拆除场景的实时仿真，计算误差控制在 $\pm 8\%$ 以内。

二、台风灾后塔式起重机拆除控制策略

（一）预防性控制技术

1. 预防性控制技术概述

在台风灾后塔式起重机拆除这一高风险作业中，实施有效的预防性控制技术是保障安全的基础。这些技术旨在通过预先的结构强化、周密的应急准备以及实时的状态监控，最大限度地降低潜在风险，确保拆除过程的安全性和可靠性^[3]。主要措施包括结构加固、应急预案制定与优化、以及智能监测系统的部署与应用。

2. 结构加固措施

针对台风可能造成的结构损伤，拆除前必须进行细致的检查和必要的加固修复：

临时支撑系统设置：对于塔身稳定性存在疑虑或需要增强抗倾覆能力的情况，应设置临时支撑体系。该体系通常采用高强度钢材，其关键材料性能与设计参数。支撑应合理布置，确保有效分担荷载并控制结构位移。

关键连接点修复与加固：对检查发现松动的标准节连接螺栓，必须使用液压扭矩扳手进行复紧，恢复其预紧力至规定要求，并通过无损检测技术确认连接质量。对于检查发现的受力焊缝开裂，需采用合适的焊接材料和工艺进行修复，确保修复后的焊缝强度和满足安全要求，并进行严格的无损检测。

3. 应急预案制定与优化

针对拆除过程中可能遭遇的突发强风、结构失稳等极端情况，必须制定详尽且具备可操作性的多场景应急预案：（1）预案触发条件与响应：明确规定应急状态的启动阈值。例如：当监测系统显示瞬时风速超过15 m/s时，应急制动系统应在 ≤ 2 秒内自动或手动启动；当结构关键部位应力比监测值 >0.8 时，应立即停止作业，并视情况启动预设的应急支撑系统（其承载能力设计通常需达到设计荷载的2倍以上）。（2）预案优化与演练：利用蒙特卡洛模拟等方法（模拟次数建议 ≥ 1000 次）对预案的有效性和响应时间进行评估和优化，确保其可靠性。同时，定期组织人员进行应急演练，提高应急响应能力。（3）与设备管理的结合：应急预案的有效性高度依赖于相关设备（如应急制动器、备用电源、通讯设备等）的完好性。因此，应急预案必须与塔机的日常检查、维护保养和设备管理规范紧密结合，确保应急设备随时处于良好待命状态，并通过定期测试验证其功能。操作人员的应急处置技能培训也是设备管理的重要组成部分。

4. 智能监测系统与风险预警机制

基于物联网（IoT）的智能监测系统是实现预防性控制的关键技术支撑：（1）实时数据采集：系统集成风速传感器（精度 ± 0.5 m/s）、基础倾斜传感器（分辨率 0.01° ）、结构应变传感器、液压压力传感器（采样频率10 Hz）等12类关键传感器，实时、连续地采集塔机状态和环境参数。（2）数据处理与风险评估：

采集的数据通过无线传输模块上传至云端平台或本地服务器（平台数据处理能力要求 ≥ 10 万条/秒），结合1.2节所述的风险评估模型进行实时计算与分析。（3）三级风险预警：系统根据实时评估的综合风险值R，自动触发相应的预警等级（蓝色 $R < 0.35$ ，黄色 $0.35 \leq R < 0.65$ ，红色 $R \geq 0.65$ ）。达到红色预警时，系统除发出警报外，还可联动自动启动部分应急响应措施（如制动）。

通过上述结构加固、应急预案和智能监测等预防性技术的综合应用，可以显著降低台风灾后塔式起重机拆除作业的固有风险，为安全、顺利地完成拆除任务提供坚实的技术保障。

（二）拆除过程动态优化

在台风灾后塔式起重机拆除作业中，拆除过程的动态优化是确保作业安全性和效率的关键环节。通过BIM模型（精度 ± 2 mm）对塔式起重机及周边环境进行三维建模，结合实时点云扫描数据（扫描精度 ± 1 mm，扫描频率 ≥ 50 Hz），系统能够自动生成最优吊装路径，并实时检测潜在碰撞风险^[4]。吊装路径规划中，最小安全距离设置为3 m，吊装角度控制在 $\pm 5^\circ$ 以内，以确保起重机与周边建筑物或设备的间隙满足安全要求。碰撞检测算法采用轴向包围盒（Axis-Aligned Bounding Box, AABB）和定向包围盒（Oriented Bounding Box, OBB）混合模型，结合R-tree空间索引技术，检测响应时间 ≤ 0.5 s，显著降低了碰撞风险。此外，系统还集成了动态障碍物识别功能，通过激光雷达（探测距离 ≥ 100 m，精度 ± 1 cm）实时监测周边环境变化，确保路径规划的实时性和准确性。

冗余安全防护装置的设计为拆除作业提供了多重保障^[5]。防坠器采用机械式锁定机构（锁定时间 ≤ 0.1 s，承载能力 ≥ 10 t），当监测到吊钩下降速度超过0.5 m/s时自动锁定，防止重物坠落。应急制动系统基于液压控制技术（压力范围0–40 MPa，响应时间 ≤ 1 s），当监测到风速超过15 m/s或结构应力比 >0.8 时，系统自动启动制动，制动扭矩为额定值的1.5倍（通常为15–20 kN·m）。除此之外，系统还配备了备用电源（续航时间 ≥ 4 h）和双回路控制系统，确保在主电源或主控制系统失效时仍能正常运行。

三、模型应用与效果分析

（一）风险评估模型应用与效果

在项目实施过程中，基于FAHP-熵权法的动态风险评估模型得到了有效应用：（1）实时监测与评估：系统通过布置的12类传感器，实时采集了风速、基础倾斜度、结构应变、液压系统压力等关键参数，并按设定频率（如每小时）更新风险数据库，动态计算综合风险值R。（2）风险预警与响应：模型成功捕捉到实际作业中的高风险情境。例如，在某日作业期间，现场实测瞬时风速达到17.5 m/s，已超过塔机正常工作的抗风设计阈值（12.5 m/s，《建筑结构荷载规范》GB 50009–2012）。模型据此迅速计算出综合风险值 $R=0.72$ ，达到红色预警级别（ $R \geq 0.65$ ）。系统及时发出高风险警报，并联动应急控制程序，启动了应急制动系统，整个响应过程（从监测到超限到制动生效）时间仅为1.8秒，

有效避免了可能因突发强风导致的失稳或倾覆事故。

（二）拆除过程动态优化与控制策略应用效果

通过本次工程实践验证：（1）可靠性与实用性：本研究提出的风险评价模型和拆除控制策略在复杂的台风灾后环境下表现出较高的可靠性和实用性。模型的风险评估结果与现场实际风险状况吻合度高。（2）安全性提升：整个拆除作业过程中，成功预警并处置了多次潜在高风险事件，未发生任何大小安全生产事故，达到了预期的安全目标。（3）效率与成本效益：相较于依赖传统经验和静态方案的拆除作业，本研究方法的应用使得拆除决策更科学、响应更及时，作业流程得到优化，从而有效缩短了项目工期，并相应降低了由于工期延长、风险事件处理等产生的额外成本。

四、结论

本研究聚焦于台风灾后高层建筑塔式起重机拆除这一高风险作业场景，成功构建并验证了一种基于 FAHP-熵权法的动态风

险评估模型，并提出了一系列结合物联网（IoT）、建筑信息模型（BIM）及智能化技术的综合控制策略。研究涵盖了风险因素多维度识别、主客观权重融合的动态评估机制以及预防性与过程性风险控制措施。关键结论表明：①所构建的动态风险评估模型能够实时、准确地捕捉并评估台风灾后拆除作业中的复杂风险因素（如残余风力突变、结构潜在损伤演化），显著提升了风险预警的精准性和时效性；②集成 BIM、智能吊装及冗余防护的控制策略，有效降低了操作风险和不确定性带来的威胁，成功规避了潜在碰撞、失稳等严重事故，保障了项目零安全事故的目标，同时在提升作业效率和控制成本方面展现出积极效果。

参考文献

- [1] 王芳, 李宁, 张正涛, 等. 台风灾害间接损失评估模型中劳动力参数研究 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2020(006): 052.
- [2] 刘志武, 罗培焱, 成广生. 基于自然灾害下的输电杆塔失稳智能感知技术研究应用 [J]. 东北电力技术, 2021, 42(5): 4.
- [3] 朱连伟. 扣索调整拱肋线形, 拱内受力的优化控制研究 [D]. 广西大学, 2020.
- [4] 李鑫. 基于荷载试验的桥梁检测技术应用分析 [D]. 重庆交通大学, 2021.
- [5] 潘文栋, 孙作轩, 徐惠彬, 等. 桥梁拆除施工安全总体风险评估指标体系研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40(S2): 174-180.