

# 大件设备吊装作业安全风险评估与管控策略研究

顾 丰

中原油田采油气工程服务中心文南作业区 河南 濮阳 457001

**摘 要:** 本文首先深入剖析了大件设备吊装作业的典型特征与主要风险源,构建了一个基于“人-机-料-法-环”(5M1E)模型的多维度风险识别框架。在此基础上,综合运用工作安全分析(JSA)、故障树分析(FTA)和风险矩阵法(RiskMatrix),提出了一套定性定量相结合的风险评估流程。针对评估出的高风险项,本文从组织管理、技术措施、人员素质和应急响应四个层面,系统性地提出了涵盖全过程、全要素的管控策略。最后,通过引入BIM(建筑信息模型)与物联网(IoT)等数字化技术,探讨了智能化风险管控的未来发展方向。研究表明,只有将科学的风险评估方法与精细化、系统化的管控措施深度融合,并辅以先进的技术手段,才能从根本上提升大件设备吊装作业的本质安全水平。

**关键词:** 大件设备; 吊装作业; 安全风险; 风险评估; 风险管控; 5M1E模型

## 引言

随着我国工业化发展,核电站、大型石化装置等重大工程密集建设,超重等大件设备应用愈发广泛。此类设备单体重量可达数百吨甚至上千吨,几何尺寸大、结构复杂,对吊装工艺等提出极高挑战。大件设备吊装是连接制造与安装的关键工序,关乎项目工期、成本与安全,但因其高风险,吊装事故频发。在工程建设起重伤害事故中,大件设备吊装相关事故比例高,事故类型多样,多由多重因素耦合导致,暴露出风险识别、评估、管控等方面的系统性缺陷。传统安全管理模式侧重事后处理,缺乏前瞻性与系统性,难以应对复杂作业场景。因此,亟需建立科学、严谨、可操作的安全风险评估与管控体系。本研究将理论分析与实践结合,探究安全风险形成机理,构建评估方法,提出管控策略,为行业安全生产提供指导。

## 1 大件设备吊装作业的特征与风险源分析

### 1.1 作业特征

大件设备吊装作业区别于常规吊装,其核心特征体现在以下几个方面:(1)高价值与高后果性:被吊设备通常造价高昂,且多为核心工艺设备。一旦损坏,修复或更换成本巨大,且会导致整个项目长期停工。(2)技术集成度高:往往需要多台大型起重机协同作业(如双机抬吊、多机抬吊),或采用特殊的吊装工艺(如液压提升、滑移、旋转等),对方案设计、计算分析和过程控制要求极高<sup>[1]</sup>。(3)作业环境复杂:施工现场空间受限,地下管线、既有构筑物、高压线等障碍物众多,气象条件(风、雨、雪)对作业安全影响显著。(4)动态性强:吊装过程是一个连续的、非线性的动态过程,设备的姿态、受力状态时刻变化,微小的偏差都可能被放大,导致失

控。(5)参与方众多:涉及业主、总包、分包、监理、设备制造商、运输单位、吊装专业公司等多个利益相关方,协调管理难度大。

### 1.2 主要风险源识别(基于5M1E模型)

为了系统性地识别风险,本文采用经典的“人-机-料-法-环”(5M1E)模型进行梳理。

#### 1.2.1 人(Man)

一是人员资质与技能不足:指挥人员、司索工、起重机司机等关键岗位人员无证上岗或技能生疏,对吊装方案理解不透彻。二是违章指挥与违规操作:不按方案执行,盲目蛮干,如斜拉歪吊、超载作业、信号不清强行起吊等。三是沟通协调不畅:多工种、多单位交叉作业时,信息传递错误或延迟,导致误操作。四是安全意识淡薄:存在侥幸心理,忽视安全警示,未按规定佩戴个人防护用品(PPE)。

#### 1.2.2 机(Machine)

一是起重性能缺陷:起重机本身存在结构疲劳、金属裂纹、液压系统泄漏、制动器失效、安全限位装置失灵等隐患。二是吊索具失效:钢丝绳磨损、断丝、腐蚀超标;卸扣、吊钩出现塑性变形或裂纹;专用吊具设计不合理或强度不足。三是辅助设备故障:如揽风绳地锚松动、液压提升系统同步失灵、监测仪器(如风速仪、倾角仪)失准。

#### 1.2.3 料(Material)

一是设备重心不明或偏移:设备内部结构复杂,实际重心与设计重心不符,或在运输、存放过程中发生位移。二是吊点设计不合理:吊耳位置、数量、结构强度未经过严格计算验证,存在应力集中或局部失稳风险。三是设备本体强度不足:在吊装受力状态下,设备壳体

或内部构件发生屈曲、变形甚至破裂。

#### 1.2.4 法 (Method)

一是吊装方案缺陷：方案未经充分论证，计算模型简化过度，未考虑最不利工况（如最大风载、动态冲击系数），应急预案缺失或流于形式。二是技术交底不清：方案未能有效传达给所有作业人员，导致执行层面出现偏差<sup>[2]</sup>。三是过程监控缺失：缺乏对关键参数（如起重机载荷率、支腿沉降、设备姿态）的实时监测与预警。

#### 1.2.5 环 (Environment)

一是场地条件不良：地基承载力不足，未进行硬化处理或处理不当，导致起重机支腿下沉、倾斜。二是恶劣天气：超过规定风速（通常6级风以上禁止吊装）、雷雨、大雾等严重影响视线和设备稳定性。三是周边障碍物：与邻近建筑物、管线、架空线路的安全距离不足，存在碰撞或触电风险。四是交叉作业干扰：与其他施工活动相互干扰，增加意外碰撞或人员误入吊装区域的风险。

### 2 安全风险评估方法与流程

风险评估的目标是量化风险等级，为后续的管控决策提供依据。单一的评估方法往往存在局限性，因此本文主张采用组合式评估方法。

#### 2.1 风险评估框架

本文提出的评估流程分为三个阶段：（1）风险识别：利用5M1E模型进行全面、系统的风险源排查，形成初步风险清单。（2）风险分析：对识别出的风险事件，分析其发生的可能性（L）和后果的严重程度（S）。（3）风险评价：根据L和S的乘积（即风险值 $R=L \times S$ ），对照风险矩阵确定风险等级（如低、中、高、极高），并据此确定优先管控顺序。

#### 2.2 组合式评估方法应用

##### 2.2.1 第一阶段：定性分析——工作安全分析 (JSA)

JSA是一种将作业任务分解为若干步骤，并逐一识别每个步骤中潜在危害的方法。对于复杂的吊装作业，可将其分解为：场地准备→起重机进场与组装→设备就位与绑扎→试吊→正式起吊→空中平移/旋转→就位安装→摘钩→起重机拆解退场等步骤<sup>[3]</sup>。对每个步骤，组织有经验的工程师、安全员和操作人员共同讨论，识别该步骤下的具体风险，例如在“设备绑扎”步骤中，风险可能包括“吊点选择错误”、“钢丝绳夹角过大”、“棱角未加衬垫导致割伤”等。JSA确保了风险识别的全面性和细致性。

##### 2.2.2 第二阶段：半定量/定量分析——故障树分析 (FTA)

对于JSA识别出的关键高风险事件（如“起重机倾覆”），采用FTA进行深入分析。FTA是一种自上而下的

演绎分析法，以不希望发生的顶事件（如倾覆）为起点，逐层分析导致该事件发生的所有可能原因（中间事件和基本事件），直至找到无法再分解的基本原因（如地基沉降、超载、强风等）。通过构建故障树，可以清晰地揭示各风险因素之间的逻辑关系（与门、或门），并利用专家打分或历史数据，估算顶事件发生的概率。这为风险的可能性（L）赋值提供了更科学的依据。

##### 2.2.3 第三阶段：风险等级判定——风险矩阵法 (RiskMatrix)

在完成JSA和FTA后，即可对每个风险事件进行L和S的赋值。可能性（L）可划分为5个等级，如“几乎不可能（1）”、“不太可能（2）”、“可能（3）”、“很可能（4）”、“几乎肯定（5）”。严重度（S）同样划分为5个等级，如“轻微伤害/微小损失（1）”、“一般伤害/局部损失（2）”、“重伤/重大设备损失（3）”、“死亡/灾难性损失（4）”、“多人死亡/项目毁灭性损失（5）”。构建一个 $5 \times 5$ 的风险矩阵，将L和S的数值相乘得到风险值R。通常， $R \geq 15$ 为极高风险（红色）， $9 \leq R < 15$ 为高风险（橙色）， $4 \leq R < 9$ 为中风险（黄色）， $R < 4$ 为低风险（绿色）。极高风险和高风险必须立即采取措施予以消除或降低，中风险需制定计划进行管控，低风险可接受但需保持关注。

### 3 安全风险管控策略体系

#### 3.1 组织与管理层面的管控

（1）健全责任体系：明确业主、总包、专业分包等各方的安全管理职责，建立以项目经理为第一责任人的吊装安全责任制。实行“一岗双责”，将安全绩效纳入考核。（2）强化方案管理：严格执行“方案先行”原则。吊装方案必须由具备相应资质的设计或施工单位编制，并组织专家论证。方案内容应详尽，包括计算书、平面布置图、应急预案等。坚决杜绝无方案或方案未经审批的吊装作业。（3）深化安全交底：改变形式主义的交底模式，采用可视化交底（如BIM动画演示、VR模拟），确保每一位参与人员都能清晰理解自己的任务、风险点和应急措施。交底后需签字确认。（4）实施许可制度：推行吊装作业许可证（PTW）制度。在每次吊装前，由安全、技术、设备等部门联合进行现场检查，确认所有安全措施（如地基处理、警戒区域、人员资质、天气条件）均已落实到位，方可签发作业票。

#### 3.2 技术与工程层面的管控

（1）精准的地基处理：根据地质勘察报告和起重机接地比压要求，进行专项地基处理设计。通常采用换填、压实、铺设路基箱或浇筑混凝土承台等方式，并设置沉降观

测点进行实时监测。(2) 先进的吊装工艺与装备: 优先选用技术成熟、安全系数高的吊装工艺。对于超大型设备, 可考虑采用计算机同步控制的液压提升/顶推技术, 实现毫米级的精准控制, 大幅降低动态冲击和失稳风险<sup>[1]</sup>。(3) 全过程实时监测: 在关键部位部署传感器网络。例如, 在起重机主臂和吊钩处安装载荷传感器和角度传感器; 在设备本体安装倾角仪和加速度计; 在支腿下方安装沉降监测仪。所有数据汇聚至中央监控平台, 一旦参数超限, 立即声光报警并联动停止作业。(4) 三维模拟与预演: 利用BIM技术建立吊装全过程的4D(3D+时间)模拟。通过虚拟仿真, 可以提前发现空间冲突、碰撞干涉、操作盲区等问题, 优化吊装路径和站位, 实现“先试后吊”, 极大提升方案的可行性和安全性。

### 3.3 人员与行为层面的管控

(1) 严格的准入与培训: 所有特种作业人员必须持有效证件上岗。定期组织针对性的安全技能培训和应急演练, 特别是针对多机协同、恶劣天气应对等复杂场景的模拟训练。(2) 标准化作业程序(SOP): 制定详细的吊装作业SOP, 规范每一个操作步骤、手势信号和沟通用语, 减少人为失误。(3) 有效的现场监督: 配备专职安全监督员, 全程旁站监督。利用智能安全帽、移动终端等工具, 实现对人员行为的实时记录和追溯, 及时纠正违章行为。

### 3.4 应急响应层面的管控

(1) 专项应急预案: 针对吊装作业可能发生的各类事故(倾覆、坠落、触电等), 制定专项、可操作的应急预案。预案应明确应急组织、响应流程、救援资源和疏散路线。(2) 应急资源保障: 在现场配备必要的应急救援器材, 如急救箱、消防器材、切割工具等, 并与附近的专业救援机构建立联动机制。(3) 常态化应急演练: 定期组织桌面推演和实战演练, 检验预案的有效性, 提升全体人员的应急处置能力和协同作战水平。

## 4 智能化风险管控的未来展望

随着数字技术的发展, 大件设备吊装的安全管理正迈向智能化新阶段。(1) BIM+IoT融合: 将BIM模型作为信息集成平台, 接入来自现场IoT传感器的实时数据, 构建一个虚实映射的“数字孪生”吊装场景。管理者可以在办公室内直观地看到设备的实时状态、受力情况和潜在风险, 实现远程、智能、前瞻性的安全管理<sup>[4]</sup>。(2) AI风险预测: 利用机器学习算法, 对历史事故数据、实时监测数据和环境数据进行深度挖掘, 建立风险预测模型。系统可以提前数小时甚至数天预警潜在的高风险状态, 变被动响应为主动预防。(3) 无人机巡检: 利用无人机对高空吊点、起重机关键结构件进行自动巡检, 替代高危的人工检查, 提高检查效率和覆盖面。

## 5 结语

大件设备吊装作业的安全风险管控是一项复杂的系统工程。本文通过构建基于5M1E模型的风险识别框架, 并综合运用JSA、FTA和风险矩阵法, 形成了一套科学的风险评估流程。在此基础上, 从组织管理、工程技术、人员行为和应急响应四个维度, 提出了系统化、全过程的管控策略。研究表明, 有效的风险管控不能依赖单一手段, 而必须是“管理+技术+人员”三位一体的综合治理。未来, 随着BIM、物联网、人工智能等数字化技术的深度融合, 大件吊装作业的安全管理将更加精准、高效和智能, 从而为国家重大工程的顺利建设和高质量发展筑牢坚实的安全基石。

## 参考文献

- [1] 谢宽泽, 张洲, 陈羿豪, 等. 大型设备吊装安全措施及应急预案[J]. 中国建筑装饰装修, 2023, (20): 173-175.
- [2] 孙兴. 石油化工项目大型设备吊装安全管理[J]. 工程建设与设计, 2023, (06): 237-239.
- [3] 贾桂军. 起重机负荷率与大型设备吊装作业的可靠性探讨[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2025, (05): 40-43+58.
- [4] 邝小娟, 贾金廷, 苗锡庆, 等. 大型设备吊装数字化智能监测技术研究与应用[J]. 起重运输机械, 2024, (15): 69-73.