

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202310012



采用 WSR 方法论的塔吊坍塌 事故安全评价方法

祁神军, 汪丫, 陈晶晶, 张子晨

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为提高塔吊安全管理效率,采用物理-事理-人理(WSR)方法论构建塔吊坍塌事故安全评价体系。从物理层面基于塔吊的结构组成视角分析塔吊坍塌的主要风险致因;从事理层面梳理塔吊坍塌事故发生的内在机理,并建立塔吊坍塌事故树模型;从人理层面提出塔吊坍塌关键风险因素的应对措施;通过实例论证安全评价模型的可行性。研究表明:保护装置失效是塔吊坍塌事故树模型中最关键的风险因素,其关键重要度为 51.14%,加强塔吊设备安全隐患巡查、规范塔吊作业人员行为和优化塔吊运行安全监管能有效降低人不良思想和行为造成的物理风险。

关键词: 物理-事理-人理(WSR)方法论;塔吊坍塌;事故树;安全评价;基本事件

中图分类号: X 947

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0721-09

Safety Evaluation Method for Tower Crane Collapse Accidents Using WSR Methodology

QI Shenjun, WANG Ya, CHEN Jingjing, ZHANG Zichen

(School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of tower crane safety management, a safety evaluation system for tower crane collapse accidents is constructed based on the Wuli-Shili-Renli (WSR) methodology. From Wuli level, the main risk causes of tower crane collapse are analysed based on the structural composition of the tower crane. From Shili level, the internal mechanism of tower crane collapse is sorted out, and the fault accident tree model of tower crane collapse is established. From Renli level, the countermeasures of key risk factors of tower crane collapse are proposed; and the feasibility of the safety evaluation model is demonstrated by examples. The research results show that the failure of protective devices is the most critical risk factor in the tower crane collapse accident tree model, with a critical importance degree of 51.14%, strengthening the inspection of hidden safety hazards of tower crane equipment, regulating the behaviour of tower crane operators and optimising the safety supervision of tower crane operation can effectively reduce Wuli risks caused by bad person thoughts and behaviours.

Keywords: Wuli-Shili-Renli (WSR) methodology; tower crane collapse; fault accident tree; safety evaluation; basic event

近年来,塔吊安全事故频繁发生,据 2012—2022 年的不完全统计,我国共发生 335 起塔吊事故^[1]

收稿日期: 2023-10-16

通信作者: 祁神军(1982-),男,副教授,博士,主要从事建筑安全的研究。E-mail:qisj972@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(71303082);福建省创新战略研究项目(2020R0055)

(其中 2019—2022 年的统计数据来源于网站 <https://www.safahoo.com/>),造成了 340 多人的伤亡和巨大的经济损失。其中,塔吊坍塌事故发生最为频繁、破坏性最大^[2]。为了保障塔吊安全运行、预防安全事故发生、识别关键风险致因,对塔吊进行安全评价至关重要。

在塔吊风险因素方面,学者们从塔吊作业人员职业安全与健康^[3]、机械故障^[4]和塔吊工作原理^[5]等视角分析塔吊在装、使用、维护全过程中的主要风险因素,但上述研究没有从塔吊的物理结构组成及安全事故风险发生机理的角度分析塔吊坍塌事故。塔吊物理结构不安全状态是导致塔吊坍塌的风险因素^[6],塔吊结构失效往往是因局部结构失效而最终引发塔吊体系整体的坍塌事故。事故树分析法可以通过梳理各事故原因间的逻辑关系,识别引发事故的关键风险因素^[7]。在塔吊安全评价方面,Li 等^[8]结合熵和累积前景理论,精确、合理地评价塔吊的安全状况;吴占稳等^[9]通过采用改进熵权法和综合模糊法,建立塔吊安全评价模型,从而减少人的主观因素对安全评价的影响;Zhou 等^[10]基于风险管理理论,应用 AcciMap 技术定性分析,建立通用的塔吊安全系统模型。然而,上述安全评价方法的系统性不够,对相关影响因素的考虑还不够全面。塔吊坍塌事故是由两个或多个基本事件同时作用的系统问题,需要对处于“临界状态”的系统采取措施,从而阻止潜在风险,避免塔吊安全事故的发生。物理-事理-人理(WSR)方法论是用于解决复杂系统问题的方法和工具^[11],主要应用于供应链管理^[12]、安全生产管理^[13]和企业管理^[14]等领域。

因此,本文采用 WSR 方法论和安全评价,从塔吊的物理结构组成角度,建立塔吊坍塌事故安全评价的 WSR 理论框架,进一步从物理、事理和人理 3 个方面构建系统化的塔吊事故安全评价体系。

1 基于 WSR 方法论的塔吊坍塌安全评价机理

WSR 方法论是一种能够处理现实中复杂社会经济系统问题的方法论,具有普适性,是综合定性和定量分析方法的东方系统思想^[11]。应用 WSR 方法论解决复杂系统问题的哲学思路是整体认识-分层研究-综合解决。塔吊坍塌事故是跨系统层面的多种因素共同作用的结果,而不是单独因素导致的。因此,采用 WSR 方法论构建塔吊坍塌事故安全评价模型,如图 1 所示。

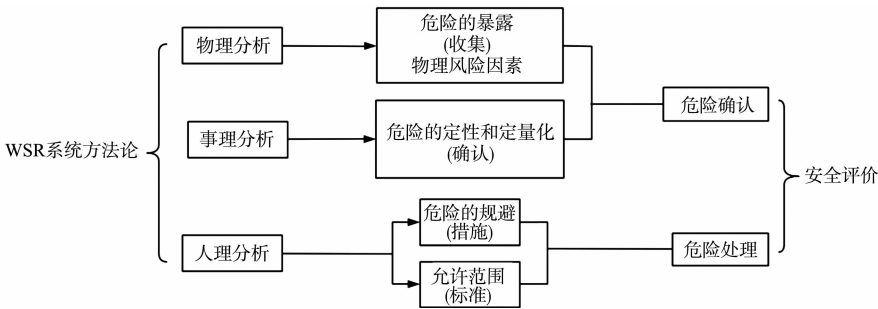


图 1 塔吊坍塌事故安全评价模型

Fig. 1 Safety evaluation model for tower crane collapse accidents

物理(W)是指客观规律世界的法则和规则,在塔吊安全评价体系中是指组织所拥有的塔吊设备及塔吊结构的组成规则^[15],可通过文献和事故案例分析塔吊的结构组成和塔吊坍塌的物理风险因素。事理(S)是指事物的机理,在塔吊安全评价体系中是指塔吊坍塌事故的内在逻辑,通过梳理塔吊坍塌事故的发生机理并建立塔吊坍塌的事故树模型,定性分析塔吊安全体系失效的潜在模式,定量识别塔吊坍塌的关键风险致因,实现对塔吊坍塌事故的综合安全评价。人理(R)是指组织协调社会关系,在塔吊安全评价体系中是指分析作业人员个体思想、行为安全,协调人之间的复杂关系,可依据安全评价结果,从人理维度对关键风险致因采取针对性应对措施。

通过物理、事理和人理三维度层层深入开展动态分析,识别塔吊坍塌事故系统中贡献度较大的关键风险因素,从而对关键风险因素采取针对性的预防措施,并在实际安全管理中给出关键性建议,以减少塔吊坍塌安全事故的发生。

2 塔吊坍塌事故的物理分析

通过收集塔吊事故发生的客观数据,发现塔吊坍塌是塔吊安全事故中最常见的类型。因此,基于塔吊上部结构-塔身-塔基的物理结构组成角度,分析塔吊坍塌事故的物理风险致因。

2.1 塔吊坍塌事故统计

通过收集和分析学者及网站整理 2012—2022 年我国发生塔吊安全事故类型的数据,得到统计图如图 2 所示。由图 2(a)可知:在塔吊安全事故中,塔吊坍塌事故发生最频繁,尤其是 2020 年和 2021 年发生的塔吊坍塌事故剧增。由图 2(b)可知:塔吊坍塌事故发生最频繁,概率为 60%;其次是构件脱落、吊物伤人和高处坠落事故,三者发生概率占总事故类型的 34%;发生频率相对较少的塔吊安全事故类型是塔吊碰撞和其他塔吊安全事故,仅占 6%。由此可知,塔吊坍塌事故约占总塔吊安全事故的 2/3,因此,重点关注和研究塔吊坍塌安全事故尤为重要。

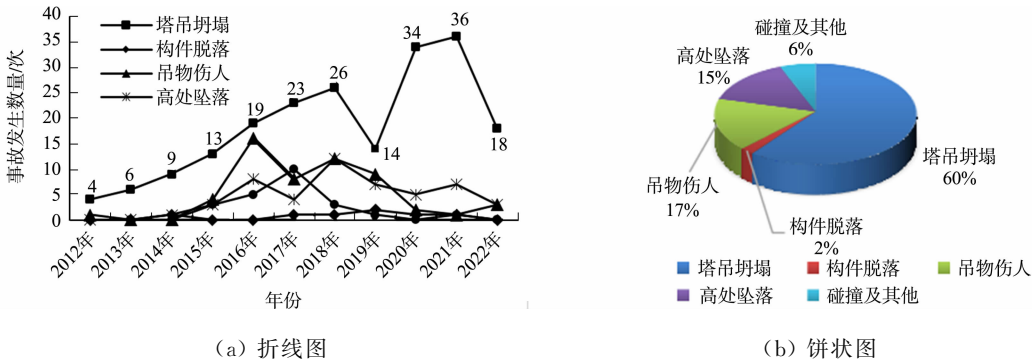


图 2 2012—2022 年塔吊安全事故统计图
Fig. 2 Statistical charts of tower crane safety accidents during 2012-2022

2.2 塔吊坍塌事故物理风险因素

基于所收集到的塔吊安全事故类型统计,从塔吊组成结构角度分析可总结为以下 3 种常见的塔吊坍塌事故致因。

- 1) 塔吊上部结构破坏。塔吊的上部结构主要包括塔帽、起重臂、平衡臂、和回转总成 4 个部分,结构破坏的主要原因为起重臂、平衡臂架折断,塔吊塔帽和回转标准节变形,顶升套架和塔顶标准节与下支座未连接。当力矩限制器失效、起重限制器失效、制动器设计缺陷、起升限位器开关损坏或违章超载使用时,会导致塔吊的起重臂和平衡臂失稳而发生折断,塔吊力矩失衡。
- 2) 塔吊塔身结构破坏。塔吊塔身主要是由标准节拼装而成,结构破坏的主要原因为标准节结构部件连接失效和塔身失稳。塔身标准节连接部位失效,塔身松脱散架,从而无法作为整体构件参与受力,导致塔身折断,引发塔吊倒塌。当塔身垂直度超标时,未及时校正塔身垂直度,容易导致塔身失稳而发生塔吊坍塌;另外,在大风天气条件下,风力会对塔臂施加力的效果,产生不利于塔身的力矩,此时若标准节在安装时未严格测量控制使得塔身垂直度超标,就会导致塔体的平衡力矩在逆风段处于危险状态。
- 3) 塔吊基础破坏。塔吊基础的稳固是影响整体稳定性的重要因素,塔吊基础破坏的主要原因为塔吊基础高强度地脚螺栓连接失效,塔吊基础混凝土强度不达标,塔吊基础沉降不均匀。塔基附近土壤出现扰动,塔吊螺栓出现锈蚀发生断裂,以及违规调整地脚螺栓位置,都会导致塔吊坍塌。雨季雨水长期冲刷塔吊基础,会导致塔吊基础不均匀沉降,最终发生塔吊坍塌事故。塔吊基础混凝土强度不达标,也会导致塔吊基础的承载力不足,造成塔吊坍塌事故。

3 塔吊坍塌事故的事理分析

以物理分析为基础,选择事故树分析法,在事理层面上对塔吊坍塌事故进行系统性安全综合评价,通过评价结果识别出系统中潜在的失效模式和关键风险致因,为塔吊安全管理提供理论依据。

3.1 塔吊坍塌事故树的构建

通过事故树分析法对塔吊坍塌事故进行安全分析和评价^[16]。一般塔吊在安装后必须验收合格才能投入使用,因此,建立塔吊坍塌事故树模型的前提条件是施工单位不得使用质量不合格或受损未检修合格的塔吊。以塔吊坍塌事故为顶上事件,从塔吊的物理结构部位视角对塔吊坍塌事故进行分析,发现

塔吊坍塌事故主要致因分别为塔吊上部结构破坏、塔身结构破坏和塔吊基础破坏。结合事件之间的逻辑关系推理出可能导致顶上事件发生的基本事件,绘制相应的塔吊坍塌事故树,如图 3 所示。图 3 中基本事件的含义,如表 1 所示。

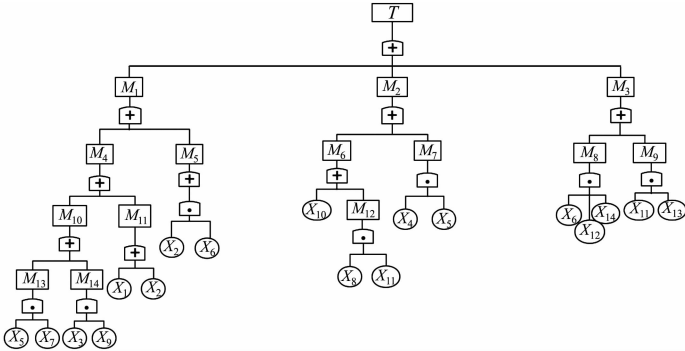


图 3 塔吊坍塌事故树模型

Fig. 3 Fault accident tree model of tower crane collapse

表 1 基本事件的含义

Tab. 1 Meaning of basic events

基本事件	含义	基本事件	含义	基本事件	含义
T	塔吊坍塌	M_{10}	平衡臂失稳	X_6	材料选用不合理
M_1	塔吊上部结构破坏	M_{11}	起重臂失稳	X_7	销轴安装不当
M_2	塔身结构破坏	M_{12}	塔吊垂直度偏差	X_8	采取的塔吊校直措施无效
M_3	塔吊基础破坏	M_{13}	塔臂连接失效	X_9	吊件滑脱冲击
M_4	上部结构局部失稳	M_{14}	荷载突变	X_{10}	强风
M_5	上部结构强度失效	X_1	保护装置失效	X_{11}	地基不平整
M_6	塔身失稳	X_2	违章超载	X_{12}	混凝土基础强度不足
M_7	标准节断裂	X_3	突然卸载	X_{13}	基础沉降不均匀
M_8	塔吊基础强度失效	X_4	螺栓型号选用不当	X_{14}	地脚螺栓松动
M_9	塔吊基础刚度失效	X_5	连接不牢固		

3.2 塔吊坍塌事故定性分析

利用布尔代数化简塔吊坍塌事故树模型,即

$$T = M_1 + M_2 + M_3 = M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8 + M_9 =$$
$$(M_{13} + M_{14}) + M_{11} + X_2 X_6 + X_{10} + M_{12} + X_4 X_5 + X_6 X_{12} X_{14} + X_{11} X_{13} =$$
$$X_1 + X_2 + X_{10} + X_2 X_6 + X_4 X_5 + X_5 X_7 + X_3 X_9 + X_8 X_{11} + X_{11} X_{13} + X_6 X_{12} X_{14}。$$

根据布尔代数化简后的事故树可知,塔吊坍塌事故发生的最小割集为

$$K_1 = \{X_1\}, \quad K_2 = \{X_2\}, \quad K_3 = \{X_{10}\}, \quad K_4 = \{X_2, X_6\},$$
$$K_5 = \{X_4, X_5\}, \quad K_6 = \{X_5, X_7\}, \quad K_7 = \{X_3, X_9\},$$
$$K_8 = \{X_8, X_{11}\}, \quad K_9 = \{X_{11}, X_{13}\}, \quad K_{10} = \{X_6, X_{12}, X_{14}\}。$$

建立的塔吊坍塌事故树有 10 个最小割集,即存在 10 种潜在的塔吊坍塌失效机制。例如,最小割集 $\{X_2, X_6\}$ 表示当违章超载、材料选用不合理这两个基本事件同时发生时,可能会使塔吊上部结构失效,造成塔吊上部结构破坏,最终导致塔吊坍塌事故。

3.3 塔吊坍塌事故的定量分析

3.3.1 专家意见权重 调查邀请了 15 位来自施工总承包单位和塔吊租赁单位的专家对塔吊坍塌事故的致因进行评价,采用权重赋值法,尽量确保塔吊坍塌基本事件发生概率的准确性。专家均对塔吊较熟悉,学历均在本科及以上;工龄在 7 a 及以上的专家有 10 人,且 30 岁及以上的专家有 12 人。

在确定专家权重时分别选取塔吊熟悉度、工龄、年龄、学历 4 项因素,并将各因素细分为 3~4 个等级,采用强制比较法计算各专家权重^[13],计算公式为

$$A_{i,j}^l = \sum_{j=1}^4 W_{i,j} B_{i,l}, \tag{1}$$

$$r_l = \sum_{i=1}^4 A_{i,j}^l W_i,$$

(2)

$$R_l = r_l / \sum_{l=1}^{15} r_l。$$

(3)

式(1)~(3)中: $A_{i,j}^l$ 为专家 l 在第 i 项指标第 j 级上的得分; $W_{i,j}$ 为项目划分后的级别权重; W_i 为项目权重; $B_{i,l}$ 为指示函数, $B_{i,l}=1$ 表示第 l 位专家在第 i 项中属于第 j 级, $B_{i,l}=0$ 则表示第 l 位专家在第 i 项中不属于第 j 级; r_l 为专家得分; R_l 为分值归一化后得到的专家权重。

各指标权值赋予结果,如表 2 所示。利用强制比较法所得的专家权重,如表 3 所示。

表 2 指标赋权表

Tab. 2 Indicator weighting table

指标		指标级别		专家 构成/人	指标		指标级别		专家 构成/人
项目	项目权重	级别	权重		项目	项目权重	级别	权重	
塔吊 熟悉度	4	非常熟悉	3	2	年龄	2	50 岁以上	4	3
		较熟悉	2	9			40~50 岁	3	3
		一般	1	4			30~40 岁	2	7
工龄	3	10 a 以上	4	9			30 岁以下	1	2
		7~10 a	3	1	学历	1	博士及以上	3	1
		5~7 a	2	3			硕士	2	3
		5 a 以下	1	2			本科	1	11

表 3 专家权重

Tab. 3 Weight of experts

专家编号	权重	专家编号	权重	专家编号	权重	专家编号	权重
1	0.076 7	5	0.065 3	9	0.076 7	13	0.048 3
2	0.093 8	6	0.076 7	10	0.045 5	14	0.051 1
3	0.093 8	7	0.079 5	11	0.039 8	15	0.056 8
4	0.082 4	8	0.042 0	12	0.071 0		

3.3.2 基本事件发生概率 塔吊坍塌事故的基本事件发生概率的估算步骤如下。

1) 量化问卷。参照文献[17]将基本事件发生的可能性及严重程度对应关系用概率值划分为 6 个等级,分别得到 15 位专家对各基本事件发生概率的评价结果。

2) 赋权专家评价。对 15 位专家的评价意见进行权重赋值,将步骤 1)中获得的基本事件发生概率乘以专家权重后,得到赋权后的各基本事件的发生概率。经过专家权重赋值筛选后的数据更有参考价值。各基本事件的发生概率,如表 4 所示。

3.3.3 顶上事件概率 在研究大量实际工程资料的基础上,依据 15 位具有丰富工程经验专家的评分计算基本事件的发生概率,从而计算顶上事件的发生概率,即

表 4 基本事件的发生概率

Tab. 4 Probability of occurrence
of basic events

基本事件	概率	基本事件	概率
X_1	0.49	X_8	0.36
X_2	0.52	X_9	0.38
X_3	0.36	X_{10}	0.40
X_4	0.44	X_{11}	0.30
X_5	0.63	X_{12}	0.36
X_6	0.47	X_{13}	0.46
X_7	0.53	X_{14}	0.53

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i)。$$

(4)

式(4)中: $P(T)$ 为顶上事件 T 的概率值; q_i 为第 i 个基本事件的发生概率。

将所得基本事件的发生概率代入式(4),可得该塔吊坍塌事故发生的概率 $P(T)=0.967\ 6$,即当所有基本事件同时发生时,塔吊坍塌事故树模型中顶上事件的发生概率为 0.967 6。这说明在各基本事件排列组合发生时,顶上事件发生是一个极大必然事件,因此,需高度重视安全管理以降低基本事件的发生概率,从而减少塔吊坍塌事故的发生。

3.3.4 概率重要度和关键重要度 在求得顶上事件的发生概率后,依据基本事件的概率重要度 $I_g(i)$ 和关键重要度 $I_c(i)$,分析得到危险性最大的基本事件,其计算式为

$$I_g(i)=\frac{\partial P(T)}{\partial q_i},$$

(5)

$$I_c(i)=\frac{\partial P(T)}{\partial q_i}\frac{q_i}{P(T)}。$$

(6)

根据式(5),(6)计算出基本事件的概率重要度和关键重要度,结果如表 5 所示。由表 5 可知:概率重要度排序结果为 $I_g(1)=I_g(10)>I_g(5)>I_g(2)>I_g(4)=I_g(7)>I_g(11)>I_g(3)>I_g(9)>I_g(6)>I_g(8)=I_g(13)>I_g(12)=I_g(14)$;关键重要度排序结果为 $I_c(5)>I_c(1)>I_c(10)>I_c(2)>I_g(7)>I_c(4)>I_c(6)>I_c(11)=I_c(13)>I_c(9)=I_c(3)>I_c(8)>I_c(12)>I_c(14)$ 。

表 5 概率重要度和关键重要度计算结果

Tab. 5 Calculation results of probability importance and critical importance

基本事件	$I_g(i)/\%$	$I_c(i)/\%$	基本事件	$I_g(i)/\%$	$I_c(i)/\%$
X_1	100.00	51.14	X_8	30.00	11.16
X_2	67.00	36.01	X_9	36.00	14.14
X_3	38.00	14.14	X_{10}	100.00	41.34
X_4	63.00	28.65	X_{11}	46.00	14.26
X_5	97.00	62.67	X_{12}	25.00	9.30
X_6	33.00	16.03	X_{13}	30.00	14.26
X_7	63.00	34.62	X_{14}	17.00	9.31

根据概率重要度的性质^[18],由上述排序结果可知:采取措施降低突然卸载、吊件滑脱冲击和强风等基本事件的发生,能有效降低塔吊坍塌事故的发生概率。然而,基本事件的概率重要度并未考虑基本事件自身的发生概率是否容易改变,因此,采用关键重要度从基本事件发生概率和敏感度两个方面共同反映基本事件的重要程度。

由概率重要度和关键重要度的排序结果可知,基本事件的概率重要度和关键重要度的排序基本一致,但基本事件中的突然卸载(X_5)、销轴安装不当(X_7)、地基不平整(X_{11})的重要性下降了。这说明虽然突然卸载(X_3)、销轴安装不当(X_7)、地基不平整(X_{11})这 3 个基本事件可以有效降低塔吊坍塌事故的发生概率,但要从实际上采取措施降低这 3 个基本事件自身的发生概率比较困难。而基本事件连接不牢固(X_5)、材料选用不合理(X_6)、基础沉降不均匀(X_{13})的重要性上升了,说明在塔吊坍塌的事故树体系中连接不牢固(X_5)、材料选用不合理(X_6)、基础沉降不均匀(X_{13})是敏感度较高且比较容易采取措施实现降低塔吊坍塌事故发生的风险因素。由上述分析可知,相比于概率重要度,关键重要度更能反映事故树的本质,更有实际意义。因此,主要采用关键重要度来分析基本事件的重要程度。除此之外,考虑概率重要度和关键重要度均比较大的基本事件也十分必要。

因此,根据关键重要度排序结果及概率重要度和关键重要度排名前 6 基本事件的交叉事件可知:保护装置失效(X_1)、违章超载(X_2)、螺栓型号选用不当(X_4)、连接不牢固(X_5)、销轴安装不当(X_7)、强风(X_{10})是塔吊坍塌事故树中的关键基本事件。其中,基本事件中的保护装置失效(X_1)既极易引发塔吊坍塌事故发生,又容易通过采取措施减小其发生概率,其关键重要度为 51.14%,因此,应重点预防保护装置失效(X_1)的发生。

4 塔吊坍塌事故的人理分析

物的不安全状态最终可归结为人的不足,人理分析主要通过组织或人协调人与社会、人与人之间的关系,避免因人或社会因素干扰引发安全事故^[19]。由上述塔吊坍塌事故树模型安全评价结果分析可知:保护装置失效(X_1)、违章超载(X_2)、螺栓型号选用不当(X_4)、连接不牢固(X_5)、销轴安装不当(X_7)、强风(X_{10})这 6 个风险因素是塔吊坍塌事故的主要致因,研究结果与赵挺生等^[20]、Raviv 等^[21]、李凯等^[22]的部分研究结论一致,但在研究视角和方法上存在一定的差异。

从塔吊结构组成视角识别影响其物理安全状态的风险因素,进而从物理的不安全状态中分析出人的管理或行为上的不足。赵挺生等^[20]从环境与设备、人员、管理、塔吊参与单位、监管机构等 5 个层面定性研究,得出塔吊管理人员安全隐患巡查不到位、塔吊维修保养责任人未按要求保养设备,以及塔吊

的安装和拆卸相关人员的资质不合格导致了保护装置失效(X_1)、螺栓型号选用不当(X_4)、连接不牢固(X_5)、销轴安装不当(X_7);Raviv 等^[21]从人为因素和环境因素的视角研究,得出塔吊操作人员在进行塔吊生产作业时存在违章超载(X_2)操作,容易引发塔吊坍塌事故;李凯等^[22]基于案例推理,得出在大风环境下相关管理人员安全监管疏忽,未能及时制止塔吊作业人员在强风(X_{10})条件下进行塔吊吊装作业等因素会造成塔吊坍塌事故。由上述分析可知,塔吊的安全运行与塔吊管理人员、塔吊维修保养责任人、塔吊安装拆卸人员和塔吊操作人员的行为均存在一定关联。因此,从塔吊相关人员的视角提出 3 个塔吊坍塌预防措施:1) 加强塔吊设备安全隐患巡查(X_1, X_4, X_5, X_7);2) 规范塔吊作业人员的行为(X_2);3) 优化塔吊运行安全管控(X_{10})。

4.1 加强塔吊设备安全隐患巡查

塔吊由于其本身的危险性质,对其进行日常的运行检查和安全检查风险大,若要将各个连接件部位细致地检查一遍,需要检查人员冒很大的安全风险,且人工的检测效率很低。这样很容易忽略难以被检查到的连接件部位,从而埋下极大的安全隐患。

建筑施工企业可以考虑运用感应系统对塔吊的保护装置进行实时监测,以便作业人员在作业前了解塔吊保护装置系统是否处于正常状态,实现高效管理塔吊的保护装置。对于连接件部位,需要认真地检查各种连接螺栓,实时更新各关键连接节点的安全状态,并及时向上级汇报塔吊运行过程中存在的隐患,从而采取有效措施解决问题。除此之外,维修保养责任人还可以采用无人机巡查系统对连接螺栓的各连接件部位进行巡查,可视化管理巡查结果,预警潜在问题,这样不仅大大提高了巡查效率,还保障了巡查安全。

4.2 规范塔吊作业人员的行为

由于大部分塔吊事故与人的不安全行为相关^[23],因此,从改变人的思想和行为方面,针对性地采取塔吊坍塌事故预防措施,能避免人的过失所导致的塔吊坍塌事故,进而有效减少塔吊坍塌事故的发生。

在安全意识和个人素质方面,加强操作员的思想教育,积极开展岗位安全知识教育、岗位操作规程教育和安全技术规程教育等,在思想上引导塔吊操作人员重视塔吊的安全生产,从而做到安全地进行塔吊相关的生产活动。在工作行为方面,严格管控,加强对塔吊相关工作人员的考核与检查工作,时刻关注工作人员工作时的情绪反应,及时纠正不安全行为操作和违规的不良习惯。严格执行各项规范制度,要求特种工持证上岗。

4.3 优化塔吊运行安全管控

建筑施工的特点是人员多、工作环境复杂,塔吊一旦发生坍塌事故,极易造成人群体伤亡。塔吊安全管理与塔吊的安全生产作业密切相关,因此,进一步加强安全管理措施,可以有效地降低塔吊坍塌事故发生的风险。

塔吊的安全评价结果表明,应加强对强风天气下塔吊运行状态的安全监管。强风天气条件下,施工条件更加严苛,安全管理人员应考虑运用信息采集系统实时监控风速,通过 APP 终端显示器,设定有助于塔吊安全作业的相关参数,实时查看塔吊运行状态。当塔吊作业环境的风速值超出设定的参数值时,感应系统会自动报警并发出指令使塔吊停止运行,从源头上避免塔吊安全事故的发生。

5 实例分析

5.1 工程概述

2019 年 1 月 23 日,某建设工程项目 10 号楼塔式起重机在进行拆卸作业时发生一起坍塌事故,事故造成 5 人死亡,造成经济损失 580 余万元^[24]。专家团队判定事故的结果是塔吊在拆除作业时顶升过程中未使用顶升防脱装置、横梁销栓未可靠落入踏步圆槽、未配平塔臂就移动小车变幅等直接原因造成了塔吊坍塌。

5.2 塔吊坍塌事故安全评价结果

基于专家团队的事由原因判定结果,物理分析得出该案例中塔吊坍塌事的物理风险致因包括未使用顶升防脱装置(X_1)、横梁销栓未可靠落入踏步圆槽(X_5, X_7)。结合图 1 的塔吊坍塌事故树模型,事

理分析得到案例中塔吊坍塌事故的发生机制,如图 4 所示。

利用塔吊坍塌事故树模型分析本案例可知:最小割集 $\{X_1\}$ 和 $\{X_5, X_7\}$ 是塔吊坍塌事故致因的两种基本组合方式。若仅最小割集 $\{X_1\}$ 发生,求得 $P(T)=0.49$;当仅最小割集 $\{X_5, X_7\}$ 发生,求得 $P(T)=0.55$;当最小割集 $\{X_1\}$ 和 $\{X_5, X_7\}$ 同时发生,可求得 $P(T)=0.77$ 。计算本案例中基本事件的概率重要度和关键重要度,结果如表 6 所示,得到概率重要度和关键重要度的排序结果分别为 $I_g(1)=I_g(5)>I_g(7), I_c(5)>I_c(7)>I_c(1)$ 。

由上述分析可知,该塔吊坍塌事故案例的发生机理与建立的塔吊事故树模型发生机理基本吻合,证明了所建立的塔吊事故树模型的可靠性和科学性。

根据事理分析评价结果可知,保护装置失效(X_1)、连接不牢固(X_5)、销轴安装不当(X_7)是导致本案例塔吊发生坍塌事故的主要物理风险致因,且当这 3 个基本事件同时发生时,塔吊坍塌事故的发生概率达到 0.77,其中,连接不牢固(X_5)是最关键的风险致因,关键重要度达到 64.60%。

根据人理分析可知,案例中的塔吊坍塌事故是由安全管理不当、安全检查不到位和人的操作失误共同造成的。调查报告中指出,施工和监理单位安全生产监管不到位、无特种作业证人员进行塔吊拆卸作业,以及卫队塔吊拆卸人员进行安全教育和技术交底等原因引发了塔吊坍塌事故,与文中得到的安全评价结果基本一致。为避免此类塔吊坍塌事故再次发生,管理人员应加强安全管理,重点检查塔吊连接部位的连接情况,避免施工现场的安全管理失控行为;提高施工人员的安全生产意识,杜绝无证上岗行为。

6 结论

基于 WSR 方法论提出塔吊坍塌事故安全评价体系,建立塔吊坍塌事故风险评价模型,从塔吊结构组成视角综合定性和定量方法,系统、全面地识别塔吊坍塌事故的关键风险因素,并提出针对性的应对措施。由上述分析得出以下 4 个主要结论。

- 1) 塔吊坍塌安全风险评价模型中存在 10 种导致塔吊坍塌事故发生的潜在失效机制。
- 2) 塔吊的保护装置失效(X_1)、违章超载(X_2)、螺栓型号选用不当(X_4)、连接不牢固(X_5)、销轴安装不当(X_7)、强风(X_{10})是导致塔吊坍塌的关键风险因素,其中,保护装置失效(X_1)是塔吊坍塌事故体系中贡献度最大的风险致因。
- 3) 通过塔吊坍塌风险评价模型对某建设项目塔吊坍塌事故进行安全评估,研究结果显示,塔吊的保护装置失效(X_1)、连接不牢固(X_5)、销轴安装不当(X_7)是导致该案例塔吊坍塌事故发生的關鍵风险因素,其中,连接不牢固(X_5)是最关键的风险因素,关键重要度达到 64.60%。
- 4) 加强塔吊设备安全隐患巡查、规范塔吊作业人员的行为和优化塔吊运行安全管控等风险应对措施是有效的。

文中研究仅确定了塔吊坍塌事故的关键影响因素,对于次要因素的分析有待在后续研究中进一步开展,并结合工程实际案例更加系统全面地提出更有针对性的塔吊坍塌预防措施。

参考文献:

[1] 况宇琦. 基于数据挖掘的塔吊事故案例分析研究[D]. 武汉:华中科技大学,2021.

[2] 唐凯,陈陆,张洲境,等. 我国建筑施工行业生产安全事故统计分析对策[J]. 建筑安全,2020,35(9):40-43. DOI: 10.3969/j.issn.1004-552X.2020.09.014.

[3] BALAN E D A,HASMORI M F B. A study of tower crane accidents and its mitigation measures from tower crane operator perspectives[J]. Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment,2022,1(3):1484-1891.

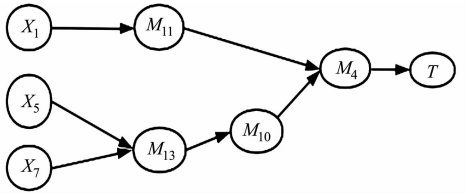


图 4 塔吊坍塌事故的发生机制
Fig. 4 Mechanism of tower crane collapse accidents

表 6 案例中基本事件的概率重要度和关键重要度

Tab. 6 Probabilistic importance and critical importance of basic events in cases

基本事件	$I_g(i)/\%$	$I_c(i)/\%$
X_1	100.00	51.14
X_5	100.00	64.60
X_7	63.00	34.35

- [4] RADLOV K, IVANOV G. Analysis of accidents with tower cranes on construction sites and recommendations for their prevention[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 951(1): 12-25. DOI: 10.1088/1757-899X/951/1/012025.
- [5] 王金辉,郝伟,陶泽,等.基于模糊贝叶斯网络的塔吊作业安全风险评估[J].安全与环境工程,2021,28(4):15-20. DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20200828.
- [6] 孔留全,李海涛,纪健强,等.塔式起重机事故案例分析及预防措施[J].建筑安全,2020,35(12):32-34. DOI:10.3969/j.issn.1004-552X.2020.12.010.
- [7] 赵挺生,周炜,徐凯,等.建筑工程塔吊安全影响因素分析[J].工业安全与环保,2019,45(2):17-22. DOI:10.3969/j.issn.1001-425X.2019.02.005.
- [8] LI Aihua, ZHAO Zhangyan. Crane safety assessment method based on entropy and cumulative prospect theory[J]. Entropy, 2017, 19(1): 44-45. DOI:10.3390/e19010044.
- [9] 吴占稳,张文.改进熵权法及其在起重机安全评价中的应用[J].机械设计与研究,2022,38(1):207-210. DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2022.0071.
- [10] ZHOU Wei, ZHAO Tingsheng, LIU Wen, *et al.* Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective[J]. Safety Science, 2018, 109: 95-108. DOI:10.1016/j.ssci.2018.05.001.
- [11] 寇晓东,顾基发.物理-事理-人理系统方法论25周年回顾:溯源、释义、比较与前瞻[J].管理评论,2021,33(5):3-14. DOI:10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.20201231.004.
- [12] 刘家国,孔玉丹,周欢,等.供应链风险管理的物理-事理-人理方法研究[J].系统工程学报,2018,33(3):298-307. DOI:10.13383/j.cnki.jse.2018.03.002.
- [13] 刘春登.水利工程安全评价及安全管理系统分析[J].治淮,2022(11):63-64. DOI:10.3969/j.issn.1001-9243.2022.11.032.
- [14] 柳长森,郭建华,金浩,等.基于WSR方法论的企业安全风险管控模式研究:“11·22”中石化管道泄漏爆炸事故案例分析[J].管理评论,2017,29(1):265-272. DOI:10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.2017.01.026.
- [15] 陈涛,赵金先,蒋克洁.基于WSR与C-OWA的地铁盾构施工安全管理模糊评价研究[J].工程管理学报,2019,33(5):68-73. DOI:10.13991/j.cnki.jem.2019.05.013.
- [16] 刘家亮,郭翠静,汪奂伶.基于火灾事故树模型的储能锂离子电池安全性检测方法 with 验证[J].储能科学与技术,2023,12(5):1-10. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0039.
- [17] 胡平.多标段建筑群施工塔吊的选型和平面布置要点[J].建筑安全,2022,37(6):46-49. DOI:10.3969/j.issn.1004-552X.2022.06.013.
- [18] 何立华,魏琪,李奕睿.基于故障树和贝叶斯网络的建筑施工火灾风险评价[J].工程管理学报,2017,31(5):107-111. DOI:10.13991/j.cnki.jem.2017.05.020.
- [19] 周欢,刘家国.港口危化品物流风险管理的WSR模型研究[J].管理评论,2021,33(5):142-151. DOI:10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.20201231.008.
- [20] 赵挺生,周炜,徐凯,等.复杂社会技术系统下的塔吊安全思考[J].中国安全科学学报,2018,28(6):153-159. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.06.026.
- [21] RAVIV G, FISHBAIN B, SHAPIRA A. Analyzing risk factors in crane-related near-miss and accident reports[J]. Safety Science, 2017, 91: 192-205. DOI:10.1016/j.ssci.2016.08.022.
- [22] 李凯,谈秉峰.大风环境下主塔安全防范措施[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(5):94-97. DOI:10.3969/j.issn.1000-033X.2018.05.016.
- [23] 况宇琦,赵挺生,蒋灵,等.塔式起重机事故案例关联规则挖掘与分析[J].中国安全科学学报,2021,31(7):137-142. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.07.019.
- [24] 岳阳市市应急管理局.华容县华容明珠三期工程项目“1·23”较大塔式起重机坍塌事故调查报告[EB/OL]. (2019-07-23)[2023-09-25]. https://www.yueyang.gov.cn/ztxx/62333/62439/62442/content_1583121.html.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)