

基于安全检查表和事故树途径的安全性评价

——以四川宜宾锂电池铁路专运项目为例

刘永芳¹, 刘元法², 蒋林繁³

(1. 四川交铁安全技术有限公司, 成都 610031; 2. 厚普清洁能源集团能源装备有限公司, 成都 611730;
3. 北京邮电大学国际学院, 北京 100876)

摘要: 安全评价是铁路危险货物运输作业开展的重要前提和保障。以四川宜宾某专用铁路锂电池运输项目为例, 将项目区划分8个评价单元, 采用安全检查表法和事故树法进行安全性评价, 探讨主要控灾因素及安全工作要点。结果表明: 安全检查表法适用于规范条文明确规定的检查事件, 事故树法通过最小割集和重要度计算能有效分析事件成因及要素权重; 运输及装卸作业的安全保障应注重人员规范操作、劳动防护和作业区安全位置。

关键词: 安全性评价; 铁路危险货物运输; 安全检查表; 事故树

中图分类号: X951; U116 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)14-0048-07

铁路危险货物运输过程中, 泄露对公众健康和铁路系统安全的影响是致命的^[1-3]。铁路危险货物运输安全性评价应兼顾企业基础设施、组织人员、不确定性环境等因素^[4]。Frank等^[5]开发了 Hazmat Path 工作空间决策支持系统, 用于评价危险货物运输安全性。Carotenut等^[6]针对危险货物运输线路和调度进行研究, 提出一种拓扑算法供运输线路安全选择参照。李继兵和李军^[7]采用 Gaussian 模型将危险货物泄露概率与人员受灾风险相结合, 研究了危险货物运输线路的安全优选。于影霞等^[8]通过事故树模型研究了驾驶人操作对货物运输安全事故的影响, 采用最小径集获取控制事故发生的方案, 采用结构重要度分析确定基本事件的权重顺序。Ronza等^[9]针对港口氢化物装载机械故障和水箱破损造成的泄露场景进行概率评价, 并提出采用拓扑算法估计遇难者、受伤者和逃生者人数比率。

安全检查表法在高校实验室危险化学品评估^[10]、煤矿突水危险性评估^[11]、企业生产安全评价^[12]等领域有广泛应用。相对而言, 事故树的重要度系数计算可以明确基本事件的重要程度, 战友和张峰硕^[13]采用这一方法开展了石墨园区尾库溃坝的风险评价; 邵良杉和杨金辉^[14]采用事故树与层次分析法预测煤矿瓦斯爆炸事件, 并提出预防措施。

锂电池是高能量存储模块, 具有一定的安全隐

患, 由于产品本身的潜在缺陷或者使用、操作不当, 锂电池可能发生热失控, 产生大量有毒气体, 甚至有可能引发锂电池起火、爆炸。评价锂电池的运输安全是产品运输安全的重要环节。

鉴于此, 以四川宜宾某专用铁路中锂电池运输为典型案例, 通过安全检查表和事故树分析, 针对多个评价单元进行安全性评价。研究方法和所得结论可供相近工程的安全评价做参照。

1 安全性评价方法

1.1 安全检查表法

安全检查表(safety checklist analysis, SCA)是依据相关的标准、规范, 对工程、系统中已知的危险类别、设计缺陷以及与一般工艺设备、操作、管理有关的潜在危险性和有害性进行判别检查^[15]。为了避免检查项目遗漏, 事先把检查对象分割成若干系统, 以提问或打分的形式, 将检查项目列表, 这种表就称为安全检查表。它是系统安全工程的一种最基础、最简便、广泛应用的系统危险性评价方法。目前, 安全检查表不仅用于查找系统中各种潜在的事故隐患, 还对各检查项目给予量化, 用于进行系统安全评价。如图1所示。

1.2 事故树法

事故树分析又称故障树分析, 是一种演绎的系统安全分析方法^[16-17]。从待分析事故或故障开始,

收稿日期: 2025-03-05

作者简介: 刘永芳(1985—), 女, 湖北黄石人, 工程师, 研究方向为铁路危险货物运输安全; 通信作者刘元法(1986—), 男, 湖北黄石人, 工程师, 研究方向为清洁能源安全; 蒋林繁(2002—), 男, 四川成都人, 研究方向为电信工程与管理。

逐层分析其发生原因,直到不能再分解为止;将特定的事故和各层原因(危险因素)之间用逻辑门符号连接起来,得到形象、简洁地表达其逻辑关系(因果关系)的逻辑树图形,即事故树。通过对事故树简化、计算,达到分析、评价的目的。工作流程如图2所示。

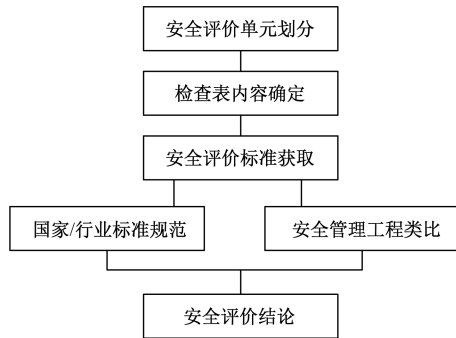


图1 安全检查表评价法工作流程

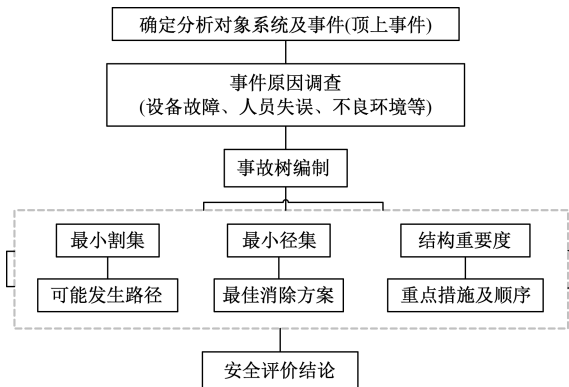


图2 事故树评价法工作流程

其中,最小割集指导致顶上事件发生的最低限度的基本事件集合,集合中任一基本事件中,则顶上事件不可发生。最小割集求解通过化简后的事故树函数式展开求解。

最小径集指事故树中所有不能导致顶上事件发生的基本事件集合,表达研究系统的安全性。集合中任一基本事件中,则顶上事件可能发生。显然,将事故树转化为对偶的成功树,则成功树的最小割集即为事故树的最小径集。

结构重要度的求解通过式(1)实现。

$$I(i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n \frac{1}{n_j}, j \in k_j \quad (1)$$

式中: I 为第 i 个事件的重要度; k 为最小割集总数; k_j 为第 j 个最小割集; n_j 为第 j 个最小割集的基本事件数。

2 工程案例概况

四川宜宾某专用铁路新增铁路集装箱锂电池发送业务,项目位于四川盆地南部,属构造剥蚀低

山、丘陵和长江冲积阶地地貌,线路所在位置地形平缓,局部有土丘;沿线分布长江水系为主的常年地表径流,地下水主要为第四系松散岩类孔隙潜水、基岩裂隙水等。气候条件以中亚带湿润季风气候为主,年平均无霜期长达321日历天,年平均风速为1.23 m/s。根据《中国地震动参数区划图》(DB18306—2015)规定,地震动峰值加速度为0.10g(g 为重力加速度),动反应谱特征周期为0.40 s,抗震设防周期为VII度^[18-19]。

依托项目专用铁路集装箱锂电池装卸作业区位于宜宾港志城作业区内,周边100 m范围内均为宜宾港建(构)筑物和设备设施,无居民区、公共福利设施、村庄。作业区南侧为长江,周边环境鸟瞰如图3所示。



图3 项目区周边环境鸟瞰

C宜宾沿江铁路管理有限公司专用铁路9线为集装箱锂电池装卸作业线,装卸作业线呈东西走向,为尽头式平直线路,集装箱锂电池装卸作业段北侧为8线(机车走行线)、保税区普通货物集装箱堆场,西侧为普通货物集装箱作业场地,南侧为锂电池集装箱场地、普通货物集装箱作业场地,东侧为道路、空地。集装箱锂电池装卸作业区四周设有栅栏与外界隔离,为封闭区域。依托项目区总平面布置如图4所示。

集装箱锂电池装卸的工艺流程为集装箱锂电池→汽车→门式起重机→集装箱堆场→门式起重机→集装箱专用平车→超偏载检测装置。

3 铁路专运安全性评价

3.1 评价单元划分及方法选择

在危险、有害因素等辨识分析的基础上,根据评价对象的生产工艺、工艺装置、主要危险和有害因素特点以及分布等,将评价单元划分为相对独立、相互联系的若干子系统。

本项目评价单元划分及安全评价方法如表1所示。

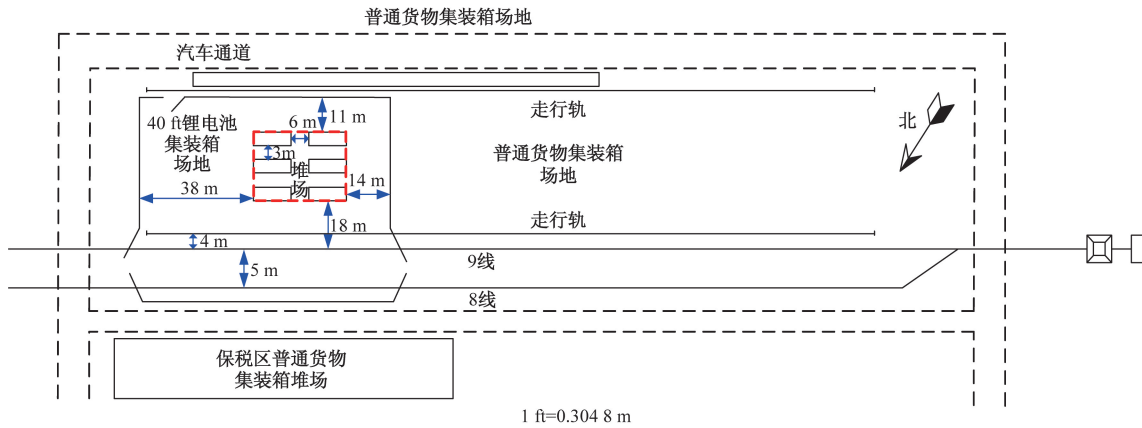


图 4 项目区总体平面布置

表 1 安全评价单元划分及评价方法

序号	评价单元划分	评价方法
1	经营与运输资质单元	安全检查表
2	周边环境评价单元	安全检查表
3	总平面布置评价单元	安全检查表
4	装卸设备设施评价单元	安全检查表
5	公用工程及辅助设施评价单元	安全检查表
6	安全管理评价单元	安全检查表
7	重大生产安全事故隐患单元	安全检查表
8	运输及装卸作业评价单元	事故树

3.2 安全性评价及建议

3.2.1 安全检查表法评价

以周边环境单元和总平面布置单元为例进行安全检查表法评价。

依据《铁路危险货物办理站、专用线(专用铁路)货运安全设备设施暂行技术条件》(铁运〔2010〕105号),结合集装箱锂电池装卸作业区周边环境的实际情况采用安全检查表法对周边环境进行逐项检查,检查结果如表 2 所示。项目区周边环境单元均符合规范要求。

依据《铁路危险货物运输技术要求》(TB/T30008—2023)、《铁路危险货物办理站、专用线(专用铁路)货运安全设备设施暂行技术条件》(铁运〔2010〕105号)等标准、规范,用安全检查表法对集装箱锂电池装卸作业区总平面布置及设备设施、建(构)筑物之间的安全距离进行检查,检查结果如表 3 所示,本项目总平面布置符合规范要求。

3.2.2 事故树法评价

由表 1 可知,运输及装卸作业评价单元采用事故树法进行安全评价。将运输与装卸拆分为撞车和起重机重伤害 2 个次级单元作为顶上事件,按图 2 流程分别进行事故树安全评价。

1) 撞车事故

经调查,运输撞车事故原因主要体现为车辆溜逸、操作失误、违章作业等,将事故成因作为事故树中间事件,将中间事件的成因作为基本事件,编制事故树如图 5 所示。

(1)最小割集计算如式(2)所示。

$$T = M_1 + M_2 + M_3 = M_1 X_3 + (X_4 + M_5) + X_7 + X_8 = (X_1 + X_2) X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 = X_1 X_3 + X_2 X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 \quad (2)$$

式中: T 、 M 、 X_5 表示事件如图 5 所示。通过事故树模型的构建和运用布尔代数的运算法则计算,得到最小割集 7 组,即表明导致顶上事件(专用铁路货车撞车事故)的发生,(原因)渠道有 7 组,每一组(原因)渠道均能引起专用铁路货车车辆在调车和停留车进行作业时发生撞车。最小割集的数目越多,系统发生事故的危险性越大。

(2)结构重要度。根据事故树的结构重要度分析,每一基本事件的重要顺序可以排列为

$$I(3) = I(4) = I(5) = I(6) = I(7) = I(8) > I(1) = I(2) \quad (3)$$

由上述所得事故树的结构重要度大小顺序可分析,引发专用铁路货车撞车事故发生的(原因)渠道的危险概率大小的排列情况。

(3)事故预防对策。专用铁路装卸作业线应设在平直道上;停留车一定要采取防溜措施,否则,一旦车辆溜逸,将造成严重损失;联挂车辆时,车速一定要控制在安全联挂速度内,高速联挂会冲撞车辆造成车辆损坏,特别车辆为装运硫酸或磷酸溶液的车辆时,还可能引发灼伤、环境污染等事故;扳道员要经铁路有关部门培训,按计划开通、关闭股道;道岔定位后要加锁,以免闲杂人员随意扳动造成事故;停留车辆进行接卸作业时,必

须在作业车的两端的来车方向或尽头线来车方向 20 m 以外安设带有脱轨器的红色防护信号,避免再进车冲撞作业车和伤害正在作业的人员;推进车辆一定要试拉,避免假连接,否则在机车制动停车时,未连接车辆会脱开溜逸;停留车要停在警冲标以内,不得压标,以免邻线进车发生冲撞;尽头式线路末端应设置挡车器和挡车器表示器,取送车作业时,挡车器与最后车位车钩中心线的距离不应小于 20 m。

2) 起重机起重伤害事故

依托项目采用门式起重机进行装卸,起重机作业时易因为挤、撞、打击对人员造成伤害,现以起重机起重事故为模型进行分析。通过对事故树的分析,掌握事故发生的各种可能,并提出有效预防事故发生的防范措施。事故树如图 6 所示。

(1) 最小割集计算: $T=M_1M_2=(M_3+M_4+M_5) \times$

$$M_2=[(X_1+X_2+X_3+X_4+X_5)+(X_6+X_7+X_8+X_9)+(X_{10}+X_{11}+X_{12}+X_{13}+X_{14}+X_{15}+X_{16})] \times (X_{17}+X_{18}+X_{19})。$$

计算得“起重机起重伤害”事故树的最小割集有 48 个,其事件组合为 (X_1, X_{17}) 、 (X_1, X_{18}) 、 (X_1, X_{19}) 、 (X_{10}, X_{17}) 、 (X_{10}, X_{18}) 、 (X_{10}, X_{19}) 、 (X_{11}, X_{17}) 、 (X_{11}, X_{18}) 、 (X_{11}, X_{19}) 、 (X_{12}, X_{17}) 、 (X_{12}, X_{18}) 、 (X_{12}, X_{19}) 、 (X_{13}, X_{17}) 、 (X_{13}, X_{18}) 、 (X_{13}, X_{19}) 、 (X_{14}, X_{17}) 、 (X_{14}, X_{18}) 、 (X_{14}, X_{19}) 、 (X_{15}, X_{17}) 、 (X_{15}, X_{18}) 、 (X_{15}, X_{19}) 、 (X_{16}, X_{17}) 、 (X_{16}, X_{18}) 、 (X_{16}, X_{19}) 、 (X_2, X_{17}) 、 (X_2, X_{18}) 、 (X_2, X_{19}) 、 (X_3, X_{17}) 、 (X_3, X_{18}) 、 (X_3, X_{19}) 、 (X_4, X_{17}) 、 (X_4, X_{18}) 、 (X_4, X_{19}) 、 (X_5, X_{17}) 、 (X_5, X_{18}) 、 (X_5, X_{19}) 、 (X_6, X_{17}) 、 (X_6, X_{18}) 、 (X_6, X_{19}) 、 (X_7, X_{17}) 、 (X_7, X_{18}) 、 (X_7, X_{19}) 、 (X_8, X_{17}) 、 (X_8, X_{18}) 、 (X_8, X_{19}) 、 (X_9, X_{17}) 、 (X_9, X_{18}) 、 (X_9, X_{19}) 。

表 2 周边环境单元安全评价

序号	方位	周边单位	实际距离/m	规范要求/m	依据规范	结论	
1	9 线	北	宜宾港路南段	290	15	铁运[2010]105 号第 8.8.3-1 条	符合
2		南	长江	174	15		符合
3		东	架空电力线路	89	1.5 倍塔杆高度		符合

表 3 周边环境单元安全评价

序号	方位	周边情况	实际距离/m	规范要求/m	依据规范	结论	
1	9 线终端车位车钩中心线	西	挡车器	>200	20	铁运[2010]105 号第 8.1 条	符合
2	9 线(集装箱锂电池装卸作业段)	西北	综合楼	>200	37.5	铁运[2010]105 号第 8.8.3-2 条	符合
3		南	围墙	151	22.5		符合
4	锂电池集装箱场地	西北	综合楼	>200	37.5	铁运[2010]105 号第 7.2.1 条	符合
5		南	围墙	104	22.5		符合

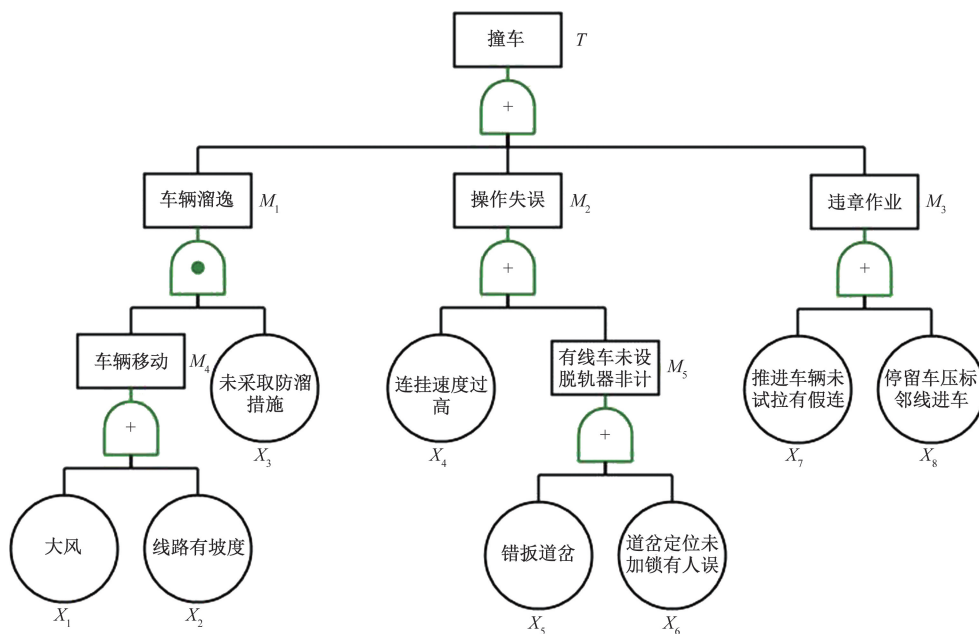


图 5 运输撞车安全评价事故树

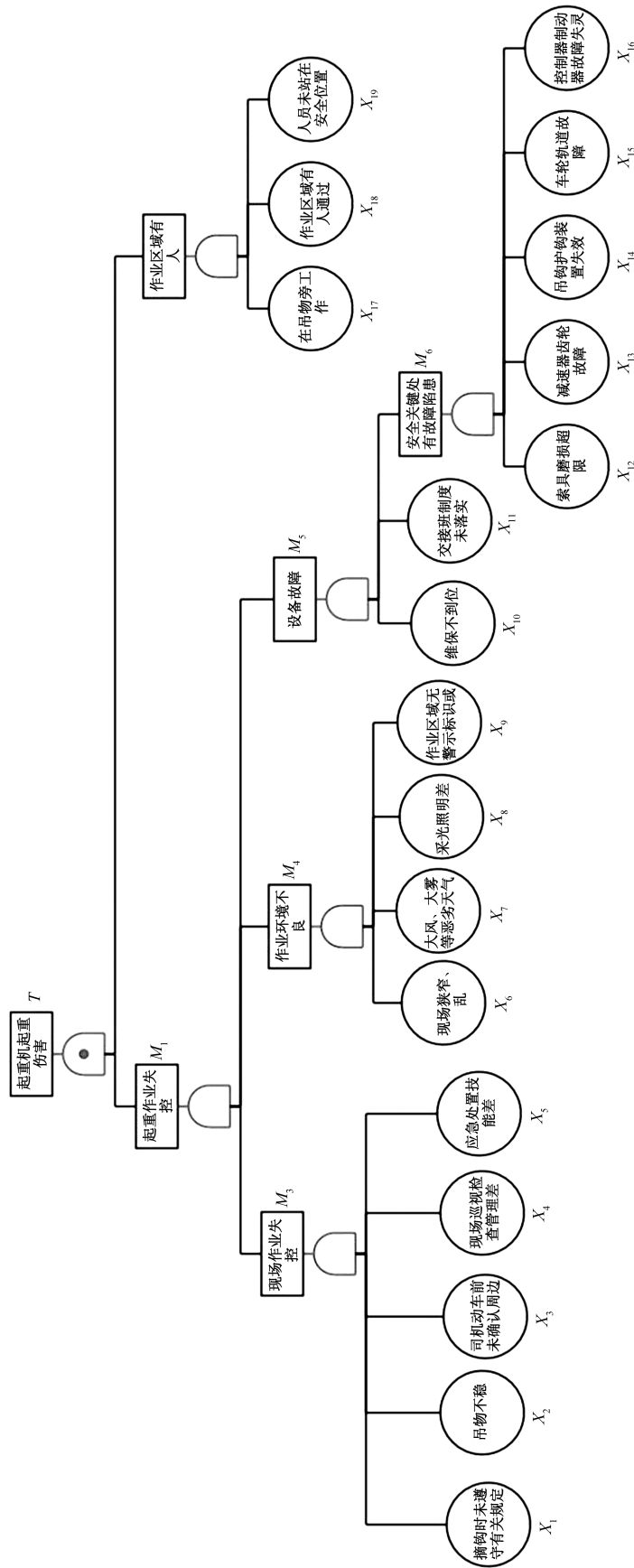


图6 起重机起重伤害安全评价事故树

(2)结构重要度。根据事故树的结构重要度分析,每一基本事件的重要顺序可以排列为 $I(X_{19}) = I(X_{18}) = I(X_{17}) > I(X_{16}) = I(X_{15}) = I(X_{14}) = I(X_{13}) = I(X_{12}) = I(X_{11}) = I(X_{10}) = I(X_9) = I(X_8) = I(X_7) = I(X_6) = I(X_5) = I(X_4) = I(X_3) = I(X_2) = I(X_1)$ 。

起重伤害主要是因为存在人机交叉作业,当危险区有人或有人经过及人躲闪不及,易造成起重伤害;当起重机械起吊时出现歪拉斜吊、吊物不稳,起重机械中的索具断裂、控制器失灵时,也极易引发事故,造成人员发生起重伤害。

(3)事故预防对策:起重作业人员须经有资格的培训单位培训并考试合格,持证上岗;起重机械必须设有安全装置,如起重量限制器、行程限制器、过卷扬限制器、电气防护性接零装置、端部止挡、缓冲器、连锁装置、夹轨钳、信号装置等;严格检验和修理起重机械件,如钢丝绳、链条、吊钩、吊环和滚筒等,报废的应立即更换,确保机械不带病作业;建立健全维护保养、定期检验、交接班制度和操作规程;起重机运行时,禁止任何人上下,也不能在运行中检修;起重机轨道区域内不得站人;吊运物品时,不得从有人的区域上空经过,吊物上不准站人,不能对吊挂着的物品进行加工;起吊的物品不能在空中长时间停留,特殊情况下应采取安全保护措施;起重机驾驶人员接班时,应对制动器、吊钩、钢丝绳和安全装置进行检查,发现异常时,应在操作前将故障排除;开车前注意观察周边环境,必须先打铃或报警;严格执行“十不吊”规定;加强作业区域管理,设置醒目清楚的安全警示标志,闲杂人等禁止进入作业区域,保证作业场地清洁,无影响安全的障碍物;加强巡视检查,及时发现和制止违章作业、违章指挥,重点检查区域有无闲杂人员,作业人员是否站立在安全位置,有无野蛮操作,有无违章作业、交叉作业、简化作业程序,挂绳取钩操作是否违章,吊起的货物是否从人员或物品上方通过等;大风、大雾等极端天气禁止起重作业。

4 结论

本文总结了铁路危险货物运输安全评价的技术手段,针对铁路危险货物运输进行评价单元划分,分别采用安全检查表和事故树评价了项目周边环境、运输及装卸作业 2 个单元中的 4 个次级单元。所得结论主要如下。

(1)安全检查表评价法主要适用于评价标准明确,有规范条文依据的强制性因素检查。项目区周

边环境符合相关条文要求。

(2)事故树分析法将顶上事件逐级分解,化简后以基本事件表达事故控制性成因,通过最小割集计算结果评价事故危险性,通过重要度分析评价各成因的权重排序。

(3)撞车事故安全评价表明,人为操作($I_3 \sim I_8$)对事故发生的贡献高于自然因素($I_1 \sim I_2$);起重机起重伤害事故安全评价表明,作业区域人员活动($I_{17} \sim I_{19}$)对事故发生的贡献高于起重机械设备失控($I_1 \sim I_{16}$)。

显然,危险货物运输的安全性保障应以设备安全为基础,人员安全意识和规范操作为核心进行。

参考文献

- [1] WENDY E, MAUREEN F, WENDY A, et al. Surveillance of hazardous substance emergency events identifying areas for public health prevention[J]. International Journal of Hygiene and Environmental, 2005, 208(1): 37-44.
- [2] FABIANO B, CUM E, REVERBERI P, et al. Dangerous good transportation by road, from risk analysis to emergency planning[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2005, 18(4): 403-413.
- [3] ZOGRAFOS K G, VASILAKIS G M, GIANNOULI I M. Methodological framework for developing decision support systems (DSS) for hazardous materials emergency response operations[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 71(1): 503-521.
- [4] 晏远春, 刘浩学, 张永, 等. 基于模糊 TOPSIS 的道路危险货物运输企业安全评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(9): 32-37.
- [5] FRANK W C, THILL J, BATT A R. Spatial decision support system for hazardous material truck routing[J]. Transportation Research Part C, 2000 8(1): 337-359.
- [6] CAROTENUTO P, GIORDANI S, RICCIARDELLI S, et al. A Tabu search approach for scheduling hazmat shipments [J]. Computers and Operations Research, 2007, 34(5): 1328-1350.
- [7] 李继兵, 李军. 基于风险的有害物品运输的线路选择分析[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(9): 84-88.
- [8] 于影霞, 曾致桓, 龙丹. 基于事故树分析的货运驾驶员失误研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(1): 55-62.
- [9] RONZA A, CARL S, ESPEJO V, et al. A quantitative risk analysis approach to port hydrocarbon logistics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 128(1): 10-24.
- [10] 战永佳, 颜忠诚, 蓝叶芬, 等. 高校实验室危险化学品安全检查表的设计[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(7): 268-271.
- [11] 王长申, 孙亚军, 杭远. 安全检查表法评价中小煤矿潜在突水危险性[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(3): 297-303.

- [12] 耿志超, 鞠澎, 张大伦, 等. 生产企业安全檢查的探討[J]. 遼寧工程技術大學學報, 2007(S2): 22-24.
- [13] 战友, 張峰碩. 基於事故樹法的石墨園區尾礦庫潰壩風險評價研究[J]. 環境工程, 2023, 41(S2): 779-782.
- [14] 邵良杉, 楊金輝. 基於事故表征和案例推理的煤礦瓦斯爆炸預測研究[J]. 安全與環境學報, 2024, 24(1): 221-228.
- [15] NICOLE R, LUCA G, FEDERICA B, et al. A retrospective analysis of the factors associated with surgical checklist compliance using data from a local health unit in Italy, 2018-2021[J]. Journal of Evaluation in Clinical Practice, 2023, 29(8): 1372-1379.
- [16] 康瑞, 李凌海, 牟睿聆, 等. 因天氣影響的航空器繞飛管制安全評估及策略分析[J]. 科學技術與工程, 2024, 24(6): 2590-2600.
- [17] 陳善江. 事故樹-層次分析法在預防公路爆破飛石中的應用[J]. 科技和產業, 2021, 21(3): 269-273.
- [18] 張樂, 鄒凱, 向波, 等. 四川盆地紅層高填路堤沉降及穩定特性分析[J]. 科學技術與工程, 2023, 23(3): 1238-1247.
- [19] 何雲勇, 郭成超, 張樂, 等. 名山組泥岩順層邊坡原位直剪試驗及開挖模擬[J]. 科學技術與工程, 2023, 23(36): 15634-15641.

Safety Evaluation Based on the Way of Safety Checklist and Fault Tree: Taking a Special Railway Lithium Battery Transportation Project in Yibin, Sichuan as an Example

LIU Yongfang¹, LIU Yuanfa², JIANG Linfan³

(1. Sichuan Railway Safety Technology Co. Ltd., Chengdu 610031, China; 2. Thick and Clean Energy Group Energy Equipment Co. Ltd., Chengdu 611730, China; 3. International School Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Safety evaluation is an important prerequisite and guarantee for the development of railway dangerous goods transportation. Taking a special railway lithium battery transportation project in Yibinm Sichuan as an example, the project area was divided into 8 evaluation units, and the safety check list method and fault tree method were used to evaluate the safety, and the main disaster control factors and safety work points were discussed. The results show that the safety checklist method is suitable for the inspection events specified in the specification provisions, and the fault tree method can effectively analyze the cause of the event and the weight of the elements through the minimum cut set and the importance calculation. The safety guarantee of transportation and loading and unloading operation should pay attention to personnel standard operation, labor protection and safe location of operation area.

Keywords: safety evaluation; transport of railway dangerous goods; safety checklist; fault tree