

Complex Network Analysis on Fire Risk Evolution of Hazardous Chemical Tanks

Jingjing Li, Xiaoyuan Xu, Xuanya Liu

Tianjin Fire Research Institute of MPS, Tianjin 300381, China

危险化学品储罐火灾风险演化复杂网络分析

李晶晶, 许晓元, 刘晔亚

公安部天津消防研究所, 天津 300381, 中国

Abstract

In order to control fire chain risk of hazardous chemical tanks, a method of risk analysis and control on fire evolution of hazardous chemicals is proposed based on the complex networks theory. Firstly, fire risk factors of hazardous chemical tanks were analyzed and screen initial risk events, transitive risk events and terminate risk events. A network model of risk evolution was made based on the logical relationship of risk events. Then the out-in degrees and the clustering coefficients were discussed for risk analysis and the key events of risk evolution were presented. Finally, considering the probability of events occurrence and transformation, the model was converted into a directed network with weight of events. And the shortest paths of risk evolution were calculated by using the Dijkstra algorithm. The risk control measures on disconnecting chains were presented. The results showed that the clustering coefficient of the model was 0.0424, the network aggregation degree was relatively low. The weights of all the shortest paths were no more than 15. The research can provide the theoretical foundation for the inhibition of risk transfer and control of accident evolution, which has practical significance for guarding the continuous safety operation.

key words: fire accidents; risk evolution; complex network; disconnect chains

摘要

为控制危险化学品储罐火灾连锁风险,基于复杂网络理论提出一种针对储罐火灾风险演化的分析与控制思路。辨识危险化学品储罐区火灾风险因素,筛选初始风险事件、风险传递事件和末端风险事件,将风险事件之间的逻辑关系转化为风险演化网络结构模型。通过网络节点的出入度分析、聚类系数分析,确定风险演化的关键事件。考虑风险事件的发生和传递概率,通过赋予边值权重构建加权有向网络模型,采用 Dijkstra 算法求解风险初始事件的演化最短路径,并提出断链控制方案。结果表明:危险化学品储罐火灾风险演化网络的综合聚类系数 0.0424,聚集程度偏低;各初始风险事件的最短演化路径权重不超过 15。风险演化规律和最短演化路径研究可为切断事故传递链条、防止事故升级提供理论依据和借鉴,对于保障危险化学品储罐持续安全运行具有现实意义。

关键词: 火灾事故; 风险演化; 复杂网络; 断链控制

1. 引言

危险化学品罐区常储存易燃、易爆、有毒物质,由于人的不安全行为或物的不安全状态易导致罐内易燃、易爆、有毒物质泄漏,遇到点火源发生火灾、爆炸等事故,造成大

量人员伤亡、财产损失和恶劣社会影响。危险化学品储罐火灾事故屡见不鲜，如 2016 年 4 月 22 日江苏德桥仓储有限公司储罐区交换站发生火灾事故并引燃 2 个汽油储罐，现场火焰高达二三十米，直接经济损失 2532.14 万元；2010 年 7 月 16 日大连中石油国际储运有限公司原油罐区输油管道因作业不当发生爆炸，造成原油大量泄漏并引发火灾和环境污染，直接经济损失 22330.19 万元。因此开展危险化学品储罐区火灾事故影响因素分析及其演化过程研究对于事故预防具有现实意义。

目前国内外学者针对危险化学品罐区火灾事故主要集中在数值模拟[1-2]、风险分析[3-5]、风险预测模型[6]等方面。风险分析主要应用事故树、事件树、HAZOP、鱼骨法、道化学、模糊综合等传统安全分析方法，可定性判定火灾风险等级、分析事故发生的根本因素，但较少从系统角度分析事故演化过程中因素逻辑关联与内在机理。复杂网络模型可为分析因素内在逻辑关系提供有效的理论支持，且相关研究已在台风灾害演化[7]、电力系统[8]风险演化、海底管道泄漏风险[9]防控等方面进行应用。鉴于此，本文在现有研究基础上，应用复杂网络模型对于危险化学品储罐火灾事故风险演化过程进行分析，以期事故预防提供参考。

2. 危险化学品储罐火灾风险演化模型

2.1 火灾风险因素分析

以外浮顶储罐为例，储罐火灾可分为密封圈火灾、浮顶溢油火灾、防火堤火灾、浮筒爆炸、局部或全液面火灾[9]等类型。储罐在服役过程中通常会面临自然风险、设备设施故障风险、人因组织风险、工艺故障风险、点火源风险等。

1) 自然风险

储罐罐区多为露天设置，直接经受过烈日、暴雨、严寒的考验。自然条件的严峻性和复杂性表现为雷击、暴雨、台风等气象能量过载和地震、地基软弱等自然灾害能量过载。储罐在雷击天气因防雷系统缺陷容易发生密封圈起爆炸事故、暴雨导致浮盘过载下沉等，如 1989 年 8 月 12 日黄岛油库发生特

大火爆炸事故，因非金属油罐自身缺陷而遭受对地雷击、产生感应火花引爆油气。地质地基条件软弱等可能造成储罐和附属管道塌陷、移位、沉降，发生疲劳断裂而发生泄漏。

2) 设备设施风险

储罐设备设施风险包括腐蚀、机械设备故障、控制系统失效等。涉及易燃、易爆、剧毒危险化学品的储罐区，相关规范要求设置 DCS、紧急切断阀、可燃（有毒）气体泄漏检测报警系统等自动控制设施，保证危险源暴露时可及时应急响应，将事故后果控制在可接受范围内。2005 年 12 月 11 日，英国邦斯菲尔德汽油罐区因仪器仪表失效导致油料持续向储罐输送，汽油罐顶溢出。设备设施机械故障或腐蚀的常见形式有浮盘支架故障，罐底或罐壁腐蚀，管道腐蚀，与管道、泵、储罐相连接的阀门、法兰、垫片泄漏，罐体或管道焊缝应力腐蚀、材质失效等。

3) 人因与组织风险

人因与组织风险包括操作人员责任心不强、专业技能缺乏和组织管理不完善等，可能导致罐区内动火等特殊作业安全管理不严格、人员误操作、日常设施缺乏保养、事故应急响应不及时等风险因素出现。

4) 工艺故障风险

工艺故障风险表现为工艺生产参数偏移，如输送管道油气浓度过高、蒸汽压过高、油温过高等。

5) 点火源风险

点火源是火灾发生的关键因素。相关研究成果表明，雷击、静电、外界火源（如明火、烟头、爆炸碎片）、电火花、金属硫化物自燃、摩擦与撞击火花等是引发储罐火灾事故的典型点火源，其中雷击是最主要的点火源、静电是引发储罐火灾的常见诱因。

综合上述风险因素分析，以浮顶罐火灾事故为例，将影响危险化学品罐区火灾事故风险因素划分为 26 个主要风险事件，如表 1 所示。

2.2 风险演化网络模型

根据各风险事件之间的内在逻辑关联，建立火灾风险演化网络结构模型，如图 1 所

表 1 主要风险事件列表

编号	事件	编号	事件
V1	组织管理不善	V2	人因可靠性降低
V3	人员误操作	V4	维护管理不善
V5	设计不合理	V6	生产过程故障
V7	机械设备故障	V8	腐蚀失效
V9	材质疲劳失效	V10	气象能量过载
V11	自然灾害过载	V12	管道水击
V13	管道破裂	V14	储罐罐体破裂
V15	浮顶沉盘、倾斜	V16	密封圈失效
V17	储罐泄漏	V18	储罐可燃蒸汽暴露
V19	管道泄漏	V20	泵、阀等附属设施泄漏
V21	雷击火花	V22	静电火花
V23	电气故障火花	V24	摩擦或撞击火花
V25	外界明火	V26	储罐火灾

示。该模型为无权有向网络图，共包含 26 个节点和 55 条边，分别表示 26 个风险事件和 55 条演化路径。风险事件中组织管理不善、气象能量过载、自然灾害过载等节点为初始风险事件，储罐火灾为末端风险事件，其余节点为风险传递事件。由初始风险事件、风险演化路径、风险传递事件、末端风险事件共同构成相应的风险演化传递链条。

3. 风险演化复杂网络分析

3.1 基于节点出入度的风险分析

节点度为与该节点相连接的其他节点数量，节点 V_i 的度数 k_i 计算方法为：

$$k_i = \sum_j a_{ij}$$

式中： a_{ij} 为与节点 V_j 之间连接边的数目。节点作为终点的边数目为节点入度，表示导致该风险事件发生的路径个数。节点入度越大表示风险事件发生的可能性越高、途径越多、控制难度增加。节点作为起点的边数目为节点出度，表示风险事件对后续风险传递事件的影响程度。节点出度越大表示风险事件对后续风险演化的综合影响程度越大。节点出度和入度是基于风险演化网络结构模型确定。节点出入度分析结果如图 2 所示。

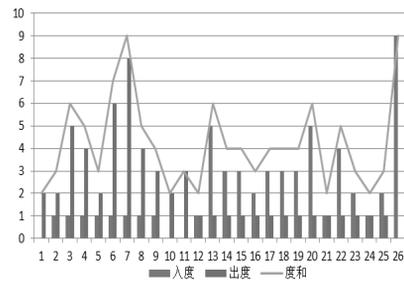


图 2 节点出入度风险分析结果

经计算节点平均度数为 4.23，其中机械设备故障、人因失误、管道破裂、附属设施泄漏等风险事件度数均超过 6，可视为风险演化网络中关键因素，表明节点间相互连接数目较多，风险事件相互之间联系密切。风险传递事件中管道破裂、泵阀等附属设施泄漏、静电火花、储罐罐体破裂、浮盘沉盘或倾斜、储罐可燃蒸汽暴露等入度相对较大，导致该风险事件发生的途径较多、风险诱因比较复杂，其风险防控难度较高。机械设备故障、生产过程故障、人员误操作、维护管理不善、腐蚀失效等风险传递事件的节点出度较大，表明风险事件的影响范围较广。度数较高的风险传递事件在危险化学品储罐火灾风险防控全生命周期中应重点关注。

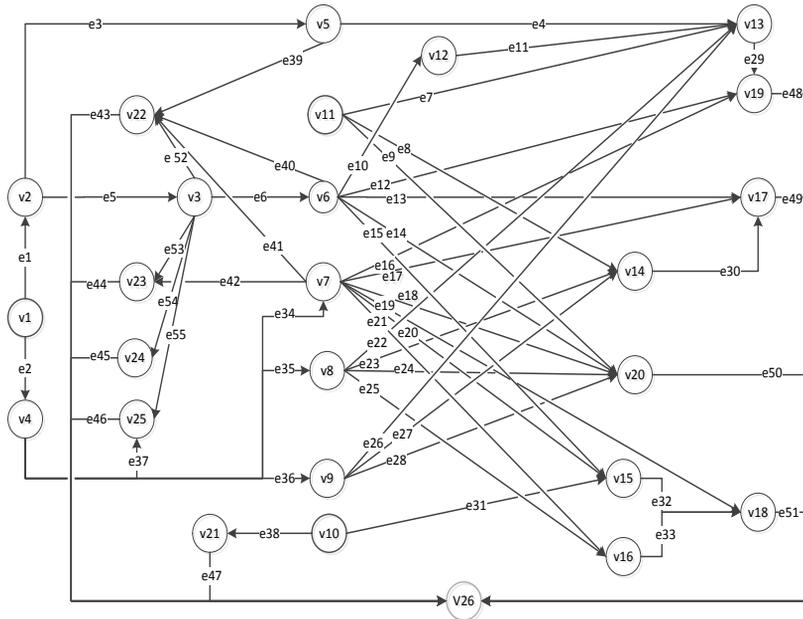


图1 危险化学品储罐火灾风险演化网络模型

3.2 基于聚类系数的风险分析

复杂网络因各节点间相互关联，常具有明显的聚类效应。系统结构的聚类系数反应演化网络节点联系的密切性。节点 V_i 的聚类系数 C_i 计算方法为：

$$C_i = \frac{2L_i}{n(n-1)}$$

系统网络整体聚类系数 C 计算方法为：

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$$

式中： n 为与节点 V_i 相连接的节点总数； L_i 为 n 个相连接节点实际连接边数目； N 为网络的节点总数。

经计算，该风险演化网络的综合聚类系数为 0.0424，聚集程度偏低。表明风险演化网络中，虽然节点和路径较多、事故成因较为复杂，但各风险事件之间相互影响并不明显，各演化路径存在明显的上下级传递关系。针对各条演化路径，制定相适应的断链控制措施，可有效达到切断风险路径、降低事故发生概率的目的。

各节点聚类系数分析结果如图 3 所示。风险初始事件 V_1 、 V_{10} 、 V_{11} 的聚类系数均为 0，表明作为风险演化事故链条的初始节点，其引发的风险传递事件相互之间相对独立，存在多条演化路径交叉的概率较低。风险传递事件 V_{16} 、 V_{18} 、 V_{22} 、 V_7 、 V_6 、 V_3 的聚类系数非 0，表明这些风险传递事件与其周围相连接的节点之间存在一定的密集联系，控制聚类系数较高的风险传递事件可较为有效抑制风险传递。风险末端事件 V_{26} 的聚类系数为 0，表明风险后果的直接原因事件相对独立，不存在较为紧密的联系。

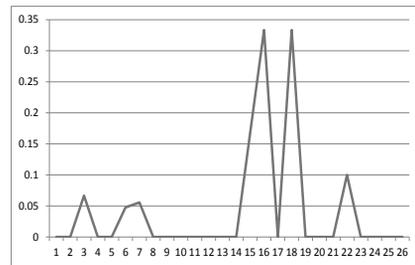


图3 聚类系数节点风险分析结果

4. 系统风险演化路径分析与断链控制

4.1 最短演化路径分析

在实际运营过程中，由于各风险因素发生概率并不完全相同，可通过权重大小等效替代发生概率等级，将复杂网络图转化为加权有向网络。基于不同演化路径的发生概率，参照层次分析因素重要度赋值方法，按照一定发生、极可能发生、可能发生、不易发生、不可能发生 5 个层次，通过专家打分，分别对于演化路径赋予 1、3、5、7、9 的边权重。权重值越小表明演化路径发生的概率越高。采用 Dijkstra 算法进行加权有向网络的最短演化路径求解。

图 4 中分别用橙色和紫色粗线条突出显示最短路径。各初始风险事件引发油气泄漏的最短路径和产生点火源的最短路线如表 2 所示。以雷电恶劣天气为代表的气象能量过载的初始风险事件其演化路径最短，其次为以地震等地质灾害为代表的自然能量过载作为起点的演化路径，组织管理不善的演化路径最长。气象能量过载等因素直接作用于储罐本体，故雷电被视为引发浮顶储罐火灾的主要原因。而组织管理因素属于间接原因，通过人的不安全行为、物的不安全状态进行风险传递后再作用于储罐本体，故其最短演化路径相对较长。

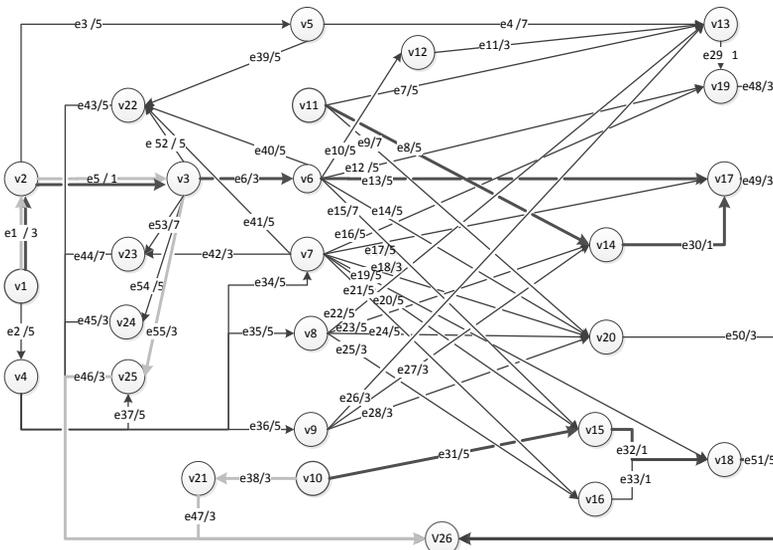


图 4 危险化学品储罐火灾风险演化最短路径

表 2 初始风险事件最短演化路径

初始风险事件	油气泄漏最短路径 D	权重 w (D)	权重 w (DD)
V1	V1-V2-V3-V6-V17-V26	15	10
V10	V10-V15-V18-V26	11	6
V11	V11-V14-V17-v26	9	10

4.2 风险演化路径断链控制

根据节点度分析结果，采取控制措施针对关键因素进行重点防控。从降低火灾风险

发生概率和风险演化的角度来看，在运营期间定期开展安全培训教育、提高专业技能和风险防范意识、完善操作规程和管理制度是降低人员失误的有效手段；对于储罐关键设

备设施开展定期巡查、检测、维护、保养以提高安全服役周期，并通过物联网等信息化手段实现风险特征状态参数的动态监测与报警，以及时采取应急响应措施；管道破裂、附属设施泄漏等可通过在设计、施工、运营等全生命周期内采取技术、管理等手段，构建全生命周期防控体系进行风险早期干预。

根据最短演化路径结果，提出风险演化断链方案，即采取控制措施降低构成最短演化路径的传递事件发生概率。点火源控制方面，提高人员安全意识并加强罐区内动火等特殊作业安全管理，禁止罐区出现明火、电火花等。对于雷电等恶劣天气，加强罐体雷电防护本质安全设计、强化各金属附件等电位连接、消除潜在产生放电的空气间隙，保证防雷设施的完好性和可靠性。泄漏源控制方面，避免生产过程操作失误导致冒罐等事故发生。

5. 结论

(1) 构建以风险事件为节点、事件逻辑关系为边的危险化学品储罐火灾风险演化网络模型，应用复杂网络理论通过节点出入度分析、聚类系数分析、演化路径分析等可确定导致物质泄漏和形成点火源的关键因素与最短演化路径。

(2) 危险化学品储罐火灾风险演化网络分析结果表明，网络模型的综合聚类系数0.0424，聚集程度偏低。各初始风险事件的最短演化路径权重不超过15。基于断链思想针对最短演化路径，降低风险传递事件出现概率并切断风险演化路径是防止事故升级的重要措施。

(3) 基于事件概率的风险演化分析，开展关键因素和风险传递过程的定量研究是进一步深入研究的重点。

Acknowledgements

This study was supported by Technology Research Program of MPS (No 2016JSYJD04), Tianjin Technology Research Program (No 16ZXCXSF00080) and Technology Research Program of MPS (No.2016JSYJB32).

致谢

本研究得到了公安部技术研究计划竞争性遴选项目(2016JSYJD04)、安全天津、科技惠民与可持续发展实验区建设科技专项(16ZXCXSF00080)、公安部技术研究计划(2016JSYJB32)的资助。

参考文献

- [1] 赵金龙, 黄弘, 屈克思, 等. 基于数值模拟的大型原油储罐热辐射响应研究. 中南大学学报(自然科学版), 48(6):1651-1658, 2017.
- [2] 李庆功, 宋文华, 陈阵, 等. 基于 FDS 的大型原油储罐防火堤内池火灾的数值模拟. 南开大学学报(自然科学版), 45(1): 77-82, 2012.
- [3] Roberto B. Efficient applications of risk analysis in the chemical industry and emergency response. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 1(2):92-101, 2011.
- [4] 陈福真, 张明广, 王妍, 等. 油气储罐区多米诺事故耦合效应风险分析. *中国安全科学学报*, 27(10):111-116, 2017.
- [5] 刘昕亮, 谢飞, 董影超, 等. 液化石油气储罐区火灾爆炸危险性分析与安全措施. *中国安全生产科学技术*, 7(9):178-182, 2011.
- [6] 刘晖亚, 张清林, 秘义行, 等. 大型石油储罐区火灾风险预测预警技术研究. *消防科学与技术*, 31(2):192-196, 2012.
- [7] 陈长坤, 纪道溪. 基于复杂网络的台风灾害演化系统风险分析与控制研究. *灾害学*, 27(1):1-4, 2012.
- [8] 夏麟颀, 肖凯鑫, 刘恩豪. 基于复杂网络和风险理论的电力系统脆弱性评估. *电子世界*, (9):46-47, 2014.
- [9] 孟祥坤, 陈国明, 朱红卫. 海底管道泄漏风险演化复杂网络分析. *中国安全生产科学技术*, 13(4):26-31, 2017.
- [10] 任常兴. 基于火灾场景的大型浮顶储罐区全过程风险防范体系研究. *中国安全生产科学技术*, 9(1):68-74, 2014.