

文章编号:1009-6094(2024)12-4591-07

## 油库火灾爆炸事故致因与 网络演化研究\*

龚晓凤<sup>1</sup>,宋长洋<sup>2</sup>,付明福<sup>1</sup>,张杰<sup>1</sup>

(1 国家管网集团西部管道公司,乌鲁木齐 830011;

2 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院,北京 102249)

**摘要:**当前油气储运行业面临隐患排查未成体系、风险管控缺乏量化手段等突出问题,在此背景下,基于复杂网络相关理论与方法,以油气储运行业中较为典型的油库火灾爆炸历史事故案例为研究对象,对其事故致因与网络演化过程进行研究。在建立事故致因网络的基础上,以油库火灾爆炸历史事故中导致事故发生的风险因素及最终后果作为该网络模型的节点,从中分析并提取事故链,同时将事故发生次数作为节点之间连边的权重,以此建立事故有向加权致因网络模型。最后,选取部分重要的拓扑特性指标结合熵值法对该网络进行量化分析,找出事故演化的关键风险点。同时通过平均最短路径长度与网络直径的分析,发现该网络具有较小的平均最短路径长度,各个风险因素关联紧密,具有小世界特性。通过研究油库火灾爆炸事故网络重要节点与风险传播速度,可以更好地理解油库火灾爆炸事故发生的机理和规律,为风险管理提供参考。

**关键词:**安全工程;油库火灾爆炸;复杂网络;事故演化;网络拓扑

中图分类号:X928 文献标志码:A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2024.0922

### 0 引言

近几年来,随着国民经济的迅速发展,对石油的需求日益增加,石油已经成为人们日常生活中不可缺少的一种能源,油库的数量也逐渐变多。油库中大部分储存着易燃、易爆、易挥发的石油,在生产运输和储存过程中,极易发生火灾、爆炸等事故,给企业造成巨大经济损失的同时极大影响周边环境,影响石油储运体系的稳定,严重者还会导致人员伤亡。因此,对油库常见较大事故成因进行分析,找出企业中存在的问题,对行业内隐患排查及风险管控有重要意义。

复杂网络理论在多学科交叉中的应用日益广泛,1998年,Watts等<sup>[1]</sup>首次提出了小世界网络概

念,突破了单纯的规则网络和随机网络模型的局限。1999年,Barabási等<sup>[2]</sup>发现了小世界网络的无标度网络特性,揭示了复杂网络中各种动态性质与其结构特性的内在关系,为其实际应用研究提供了科学依据。如今,越来越多的研究人员将复杂网络理论应用在风险分析领域,并建立事故的致因网络,对事故的致因机理及传播路径进行分析,探寻影响各领域安全的主要致因因素。利用复杂网络模型分析可有效刻画各影响因素间的因果关系,并揭示其复杂特性。Ma等<sup>[3]</sup>根据风险管理框架,运用人因分类及分析系统等事故致因分类模型确定了与高铁事故发生有关的6个相关类别,并对高铁事故进行网络模型的构建,从而分析各致因因素的性质。Liu等<sup>[4]</sup>运用复杂网络理论对管道事故的时间序列进行研究,揭示了重大管道事故与其前兆之间的联系。Guo等<sup>[5]</sup>针对多种建筑类事故进行事故链提取分析,建立建筑行业事故风险有向网络,以确定关键风险因素,揭示了建筑行业事故发生的重要规律。陈文瑛等<sup>[6]</sup>利用复杂网络理论构建了事故致因有向网络模型,以此对某城区生产安全事故中的风险因素进行分析,了解其中的耦合关系和传播特性。秦华礼等<sup>[7]</sup>选取50起化工企业火灾爆炸事故案例,提取事故致因链,构建事故致因有向复杂网络模型,研究了化工企业火灾爆炸事故的关键致因因素及因素之间的关联性。付玉平等<sup>[8]</sup>以“弓弦箭”致因模型为基础,借助蚁群聚类及Ucinet-netdraw方法,分别对100起典型煤矿安全事故进行分析,研究了其重要致因因素及关键致因路径。

在对油库事故致因的研究上,Abdolhamidzadeh等<sup>[9]</sup>通过对200多起油库火灾事故的分析,归纳了油库火灾事故的发生机理及二次事故的发生原因。Rajakarunakaran等<sup>[10]</sup>基于油库的历史事故数据,将模糊逻辑应用于油库安全生产过程中,对油库中的安全隐患进行了准确的识别。赵宁刚等<sup>[11]</sup>应用三类危险源理论对油库火灾爆炸危险源进行辨识分析,研究三类危险源之间的关系及其事故致因机理,建立油库火灾爆炸事故的层次分析法模型,从而确定了相关因素的重要程度及其权重。上述文献多以定性的方法分析油库事故致因机理,缺乏量的手段进行更为直观的分析。

本文基于复杂网络理论构建油库火灾爆炸事故致因网络模型,通过对油库火灾爆炸的历史事故案例进行分析与提取,在研究构建的网络拓扑特性的基础上,对油库事故致因进行定量分析,更为直观地

\* 收稿日期:2024-06-13

作者简介:龚晓凤,高级工程师,从事风险评估及安全管  
理研究,gongxf@pipechina.com.cn。

研究事故致因因素的内在联系及它们之间的逻辑关系。

## 1 油库火灾爆炸事故致因网络模型构建

构建油库火灾爆炸事故致因的网络模型并研究该事故网络模型的主要拓扑特性,本节在对油库火灾爆炸事件的历史案例进行分析的基础上,提取事故链,建立油库火灾爆炸事故致因网络模型。

### 1.1 历史事故案例分析

收集整理1964—2023年国内外油库的事故调查报告,其中部分事故险情得到及时控制,未造成事故后果,从而不能形成完整的事故链,选取68起较为严重且具有一定的代表性的火灾爆炸事故。通过对68起油库火灾爆炸事故调查报告进行文本分析,发现不同事故报告在描述事故发生过程的详细程度上存在差异。为了降低这种差异可能对确定风险因素的影响,在判断油库发生火灾爆炸的事故致因时,可根据事故调查报告中所列的直接原因来确定其风险因子。

通过68例油库火灾爆炸事故的直接原因归纳了36种风险因子、2种事故后果,并进行了编码以实现对事故链的提取。用 $F$ 表示油库火灾爆炸事故的风险因子, $R$ 表示事故结果,可得如表1和2所示的基本事件。

### 1.2 事故有向加权网络构建

#### 1.2.1 事故链的分析与提取

对表1和2中38个节点导致事故发生的经过提取事故案例的有向事故链,在事故发生的过程中可能存在多个风险因素,各种风险因素的介入次序也不尽一致。事故链作为辅助可以有效地看清事故发生的演化路径及每个风险因素之间存在的联系。以案例“3·8”黄岛区储罐火灾事故和“6·5”美国

表2 事故后果节点

Table 2 Accident consequence nodes

序号	结果节点	节点符号
1	火灾	$R_1$
2	爆炸	$R_2$

表1 油库火灾爆炸事故提取的事故因素节点

Table 1 Nodes of accident factors extracted from oil depot fire and explosion accidents

序号	因素节点	节点符号	序号	因素节点	节点符号
1	自然灾害	$F_1$	19	通风不足	$F_{19}$
2	储罐结构受损	$F_2$	20	罐内负压	$F_{20}$
3	明火或火花	$F_3$	21	储罐的转移软管使入孔盖不能完全密闭	$F_{21}$
4	人员操作不当	$F_4$	22	储罐没有安装足够的应急排气系统	$F_{22}$
5	油品挥发与其他气体混合	$F_5$	23	浮盘与罐壁之间出现了间隙	$F_{23}$
6	设备不防爆	$F_6$	24	浮盘密封圈为静电非导体	$F_{24}$
7	动火作业条件确认不充分	$F_7$	25	螺栓松动或断裂	$F_{25}$
8	油品泄漏	$F_8$	26	油罐设计缺陷	$F_{26}$
9	罐顶密封不严	$F_9$	27	油罐底油排放不净	$F_{27}$
10	油库本身设计存在缺陷	$F_{10}$	28	入孔法兰盘密封不严	$F_{28}$
11	油罐渗漏未及时处理	$F_{11}$	29	静电积聚	$F_{29}$
12	液位计失灵	$F_{12}$	30	呼吸阀失灵	$F_{30}$
13	油罐内油品表面存在不接地的导电性漂浮物	$F_{13}$	31	油罐清洗作业不到位	$F_{31}$
14	现场存在易燃物料	$F_{14}$	32	油罐进出油管阀门未关闭	$F_{32}$
15	输油时流速过快	$F_{15}$	33	储罐的计量系统故障	$F_{33}$
16	电线短路	$F_{16}$	34	电线老化破损	$F_{34}$
17	人员违反安全作业规定	$F_{17}$	35	储罐密封间存在油气空间	$F_{35}$
18	油罐超出安全容量装油	$F_{18}$	36	浮盘破损	$F_{36}$

史迪格服务公司储罐动火爆炸事故为例,说明提取事故链的方法与过程,见表 3。

### 1.2.2 网络的构建

从选取的 68 个油库火灾爆炸事故案例中提取出 68 条事故链,其中网络节点之间存在多个重复连边,这说明在不同的油库火灾爆炸历史事故案例中出现了类似的事故演化过程和相同的事故后果,这会导致提取的事故链重复,从而使节点之间多次连接。由此可定义油库火灾爆炸事故网络两个节点之间的有向边权重为网络中风险因素节点之间存在的连接边总数。

在构造复杂网络模型时,通常采用两种方式描述网络,即用图表示法和矩阵表示法,其中在研究的是有向加权网络时常用到矩阵表示法。

定义一个网络为  $G$ , 构建网络的邻接矩阵  $A$ , 以此判断网络中两个节点之间是否存在连接边。 $A$  的定义公式为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 邻接} \\ 0 & \text{若节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 不邻接} \end{cases} \quad (1)$$

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据式(1)及节点之间的相互关系构建邻接矩阵,从而建立事故致因有向加权网络,共 38 个节点和 97 条边,如图 1 所示,其中  $F$  表示事故风险因素节点, $R$  表示事故后果节点。

## 2 油库火灾爆炸事故网络拓扑特性分析

### 2.1 事故网络节点重要度分析

#### 2.1.1 度与累计度分布

节点  $i$  的度  $k_i$  是指该节点的连边条数或相互连接的节点总数,节点度大在网络中的影响力就大,计算公式为

$$k_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n a_{ji} \quad (3)$$

其中有向网络还包含入度和出度,二值之和即度,计算公式分别为

$$k_i^{in} = \sum_{j=1}^n a_{ji} \quad (4)$$

$$k_i^{out} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (5)$$

$$k_i = k_i^{in} + k_i^{out} \quad (6)$$

分布函数  $P(k)$  用来表示度为  $k$  节点的数量  $n_k$  在整个网络中所占的比例,计算公式为

$$P(k) = \frac{n_k}{n} \quad (7)$$

由于油库火灾爆炸事故致因网络具备有向加权的性质,根据式(4)~(6)对该网络的入度、出度和总度进行计算,网络中各节点的度见图 2。

计算结果表明,构建的油库火灾爆炸事故致因网络的风险因素节点的平均度为 15.84。从图 2 可以看出,在众多风险因素节点中, $F_3$  (明火或火花)、 $F_5$  (油品挥发与其他气体混合)、 $F_{29}$  (静电积聚)、 $F_8$  (油品泄漏)、 $F_{17}$  (人员违反安全作业规定)、 $F_1$  (自然灾害)、 $F_7$  (动火作业条件确认不充分)为总度最

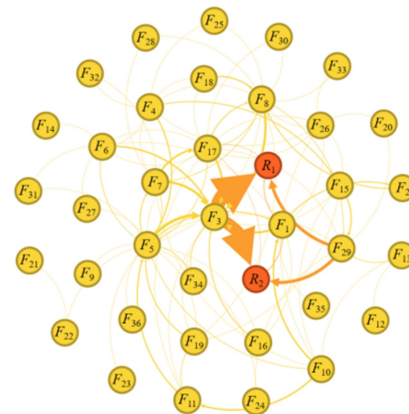


图 1 油库火灾爆炸事故有向加权网络模型

Fig.1 Directed weighted network model of oil depot fire and explosion accident

表 3 部分事故链提取过程

Table 3 Part of the accident chain extraction process

事故案例名称	事故链	事故链编码
“3·8”黄岛区储罐火灾事故	储罐的浮盘密封破损→汽油挥发与空气混合形成爆炸性气体环境→未按规定对罐内进行可燃气体浓度检测→工具或设备非防爆→点火能量→火灾爆炸	$F_{36} \rightarrow F_5 \rightarrow F_{17} \rightarrow F_6 \rightarrow F_3 \rightarrow R_1 R_2$
“6·5”美国史迪格服务公司储罐动火爆炸事故	油罐清洗作业不到位→人员操作不当→动火作业条件确认不充分→油品泄漏→点火能量→火灾爆炸	$F_{31} \rightarrow F_4 \rightarrow F_7 \rightarrow F_8 \rightarrow F_3 \rightarrow R_1 R_2$

高的7个风险因素节点,而总度最高的事故后果节点为  $R_1$ (火灾),见表4。

从表4可以看出:在这些风险因素的节点中,  $F_3$ (明火或火花)与  $F_7$ (动火作业条件确认不充分)等节点的出度与入度相差较大,表明这类风险因素的出现在油库火灾爆炸事故过程中极易单向传播,其风险管控更容易落实,风险传播与事故演化路径较为清晰;而  $F_5$ (油品挥发与其他气体混合)与  $F_8$ (油品泄漏)等节点的入度与出度相近,表明在事故演化过程中这类风险因素节点的出现会引发更多其他风险因素的发生,同时事故中大多数风险因素也会通过这类风险节点进行进一步的传播,从而导致事故的发生。

根据式(7),计算出油库火灾爆炸事故致因网络中各节点累计度分布,并使用幂律函数进行拟合,见图3(a)。该网络各节点累计度分布服从  $P(k) \approx 1.417k^{-0.3434} - 0.2658$ , 决定系数  $R^2 = 0.9674$ , 同时

表4 风险因素节点与结果节点的度

Table 4 Degree of risk factor node and result node

风险因素节点与结果节点	入度	出度	总度
明火或火花	52	93	145
油品挥发与其他气体混合	24	25	49
静电积聚	12	22	34
油品泄漏	16	16	32
人员违反安全作业规定	12	18	30
自然灾害	11	15	26
动火作业条件确认不充分	7	18	25
火灾	64	0	64
爆炸	57	0	57

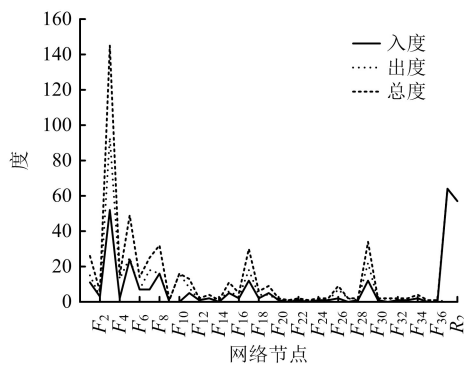


图2 事故致因网络中各节点的度

Fig. 2 Degree of each node in the accident-causing network

节点的累计度分布在双对数坐标系中的拟合结果也呈线性关系,见图3(b)。由此可以看出,该油库火灾爆炸事故致因网络属于无标度网络,大多数网络节点具有较小的度,这表明具有扩散、传播风险等关键影响因子的节点数量很少,想要有效地减少此类事故的发生,就要对这类风险因素进行有效的控制。

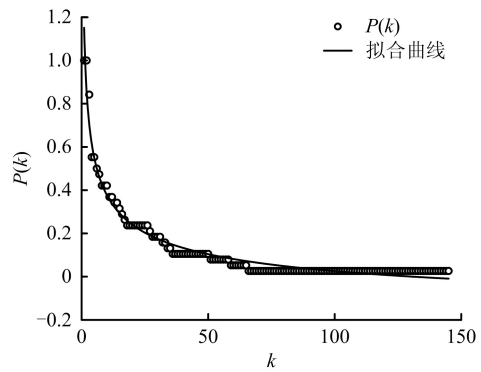
2.1.2 聚类系数

聚类特性是指彼此相互连接的两个节点很可能均与另一个节点  $i$  连接。聚类系数  $C_i$  的计算公式为

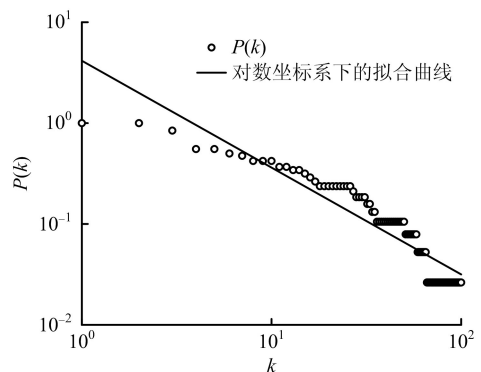
$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (8)$$

式中  $E_i$  表示节点  $i$  的邻居节点之间实际存在的连边数。

复杂网络中节点的聚类系数表示为与某个节点直接连接的邻居节点之间实际存在的连接与理想中存在的连接之间的比例。节点聚类系数较大,表明与该节点相关联的风险节点之间存在的传递与级联关系较多。使用根据式(8)计算出网络中各个节点的聚类系数,可以看到整个网络的聚类系数平均值为0.07,有11个网络节点的聚类系数为0,对比相同节点数的随机网络,该网络整体有着较高的离散



(a) 累计度分布拟合



(b) 对数坐标系下的累计度分布拟合

图3 事故致因网络累计度分布

Fig. 3 Cumulative degree distribution of accident-causing network

程度。其中该网络中节点聚类系数高于平均值的节点见图 4。

从图 4 可以看出,在事故致因网络中,风险因素节点  $F_3$ (明火或火花)、 $F_5$ (油品挥发与其他气体混合)、 $F_8$ (油品泄漏)、 $F_{17}$ (人员违反安全作业规定)的聚类系数较大。这表明在油库火灾爆炸事故中,当这些风险因素发生时,与之相关联的相邻节点也有可能发生风险传播,控制这种风险因素节点能够有效地减小事故中局部发生风险而导致的级联效应。

### 2.1.3 介数

节点的介数  $B_i$  常被视为衡量其重要性的指标,具体定义为

$$B_i = \sum_{i,j \in n, i \neq j} \frac{n_{ij}(i)}{n_{ij}} \quad (9)$$

式中  $n_{ij}(i)$  表示通过节点  $i$  的最短路径的数量; $n_{ij}$  表示网络中所有节点之间的最短路径数量。

在复杂网络中,节点的介数表示该节点与其他节点之间相连接的路径中出现最短路径的次数。在网络中,某一节点的介数大,表明这一节点在事故风险传导过程中起到了一个重要的媒介作用。根据式(9)计算出油库火灾爆炸事故致因网络中各节点的介数,计算得出整个网络的介数平均值为 0.027,其中该网络中介数高于平均值的节点见图 5。

从图 5 可以看出,在油库火灾爆炸事故致因网络中,风险因素节点  $F_4$ (人员操作不当)、 $F_5$ (油品挥发与其他气体混合)、 $F_7$ (动火作业条件确认不充分)、 $F_8$ (油品泄漏)、 $F_{17}$ (人员违反安全作业规定)、 $F_{26}$ (油罐设计缺陷)的介数较高,表明在油库火灾爆炸事故中,此类风险因素节点是连接其他节点的关键媒介,对网络中节点间的级联行为起到了促进作用。

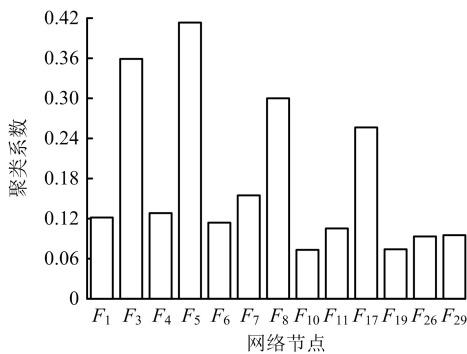


图 4 网络中聚类系数高于平均值的节点

Fig. 4 Nodes with clustering coefficient higher than the average value in the network

### 2.1.4 节点重要度排序计算

以上通过度与累计度分布、聚类系数及介数三种单一拓扑特性指标来进行事故致因网络中的重要节点的识别具有一定的局限性,因此,基于复杂网络理论,选取以上三种指标——总度( $w_1$ )、聚类系数( $w_2$ )、介数( $w_3$ ),通过熵值法计算各指标权重,从而对油库火灾爆炸事故致因网络的节点重要度进行排序。

运用熵值法对指标进行赋权,具体步骤如下。

(1) 定义原始数据矩阵  $X = (x_{ij})_{n \times m}$ ,  $1 \leq i \leq n$ ,  $1 \leq j \leq m$ ,  $x_{ij}$  表示第  $i$  个节点第  $j$  项评价指标的原始数据, $n$  表示节点数量, $m$  表示评价指标数量。

(2) 对数据进行标准化处理。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j,\min}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}} \quad (10)$$

(3) 计算第  $j$  项评价指标下第  $i$  个节点的比重。

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad (11)$$

(4) 计算第  $j$  项评价指标的熵值,当  $y_{ij}$  为 0 时其信息熵为 0。

$$e_j = - \frac{\sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}}{\ln n} \quad (12)$$

(5) 计算第  $j$  项评价指标的权重,其中  $0 \leq w_j \leq 1$ ,  $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m 1 - e_j} \quad (13)$$

由上式计算可得,总度( $w_1$ )、聚类系数( $w_2$ )、介数( $w_3$ )的权重分别为 0.278 2、0.220 2、0.501 6,之后对网络节点重要度综合得分进行排序,部分排序见表 5。

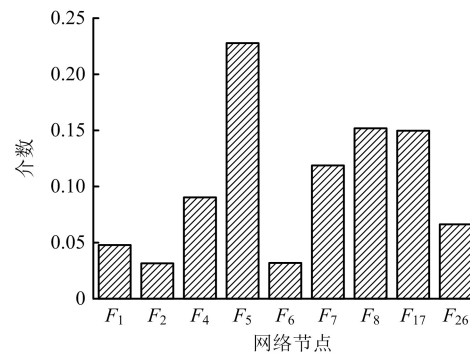


图 5 网络中介数高于平均值的节点

Fig. 5 Nodes with network betweenness higher than the average value

根据表5可知,风险因素节点 $F_5$ (油品挥发与其他气体混合)重要度得分排名第一且分值远高于第二,表明在油库发生火灾爆炸事故的事故演化过程中,该风险因素的出现起到极其重要的级联作用,企业在风险管控中需要重点关注。而风险因素节点 $F_8$ (油品泄漏)、 $F_{17}$ (人员违反安全作业规定)、 $F_3$ (明火或火花)重要度得分较为接近,在管控中也需格外注重。此外,风险因素节点 $F_3$ (明火或火花)的总度极高但重要度排名相对较后,表明仅靠单一网络拓扑指标的大小来评判风险因素的重要性是不可靠的。针对这些关键风险因素节点,建议油库相关企业采取以下几点措施:

(1) 定期进行安全检查和风险评估,发现潜在风险并及时采取措施加以控制,确保设备的完好性和安全性;

(2) 定期进行员工安全培训和教育,建立严格的安全操作规程和操作流程,确保所有员工都理解和遵守相关的安全操作规程,以及正确处理油品相关设备、识别危险信号、正确使用个人防护装备和采取应对紧急情况措施;

(3) 严格使用防爆设备和工具,确保所有操作使用的工具和设备符合防爆标准,减少火花或静电积聚的可能性;

(4) 加强现场监控和报警系统,安装监控摄像头、气体检测仪器等设备,及时监测油库内的环境变化和异常情况,并设立报警系统;

(5) 定期进行安全演练和案例分析,组织油库内部和外部的安全演练,提高员工应对紧急情况的能力,并通过案例分析学习他人的经验教训。

## 2.2 事故网络风险传播速度分析

平均最短路径长度可以反映该网络中的风险节点之间信息传递的快慢,即事故的演化速度。最短路径长度定义为 $d_{ij}$ ,网络直径 $D$ 的计算公式为

$$D = \max_{1 \leq i < j \leq n} d_{ij} \quad (14)$$

网络的平均最短路径长度 $L$ 表示为网络中节点之间最短路径 $d_{ij}$ 的平均值,其计算公式为

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}n(n-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq n} d_{ij} \quad (15)$$

基于油库火灾爆炸事故致因网络,建立其邻接矩阵,并根据式(14)和(15)计算该网络的网络直径及其中全部节点之间的最短路径长度,结果表明:网络的直径为7,平均最短路径长度为3.05。最短路径分布见图6。

如图6所示,该网络平均最短路径长度较小,在油库火灾爆炸事故致因网络中各个风险因素节点之间相互关联紧密,其中在传播中约有90.89%的最短路径不超过4,表明在油库火灾爆炸事故致因网络中,任意两个风险因素的节点之间信息传递的平均路径长度最多不会超过4,信息传递速度很快。当某一风险因素发生时,会迅速在网络中传播蔓延。

## 3 结论

本文基于复杂网络理论,对油库火灾爆炸事故致因网络的重要度及传播速度进行研究,从整体和局部两个方面,研究网络中若干重要的拓扑特性,结论如下。

(1) 该网络节点的累计度分布服从 $P(k) \approx 1.417k^{-0.3434} - 0.2658$ ,呈现明显的幂律分布,属于无标度网络,大部分网络节点的度都很小;通过对节点的聚类系数的分析,可以看到整个网络的聚类系数平均值为0.07,整体有着较高的离散程度,可以确定在网络局部区域中影响风险传递的关键节点;通过对节点的介数分析,发现整个网络的介数平均值为0.027,部分节点远超平均值,可以确定在网络中存在着更强的级联节点和促使它们发生的节点。

(2) 将单一网络拓扑指标与熵值法结合,对油库火灾爆炸事故致因网络的节点重要度进行排序。三种拓扑指标——总度、聚类系数、介数的权重分别是0.278 2、

表5 风险因素节点重要度排序(部分)

Table 5 Ranking of risk factor node importance (part)

序号	风险因素节点	节点符号	熵值法得分
1	油品挥发与其他气体混合	$F_5$	0.814 7
2	油品泄漏	$F_8$	0.554 2
3	人员违反安全作业规定	$F_{17}$	0.522 5
4	明火或火花	$F_3$	0.504 0
5	动火作业条件确认不充分	$F_7$	0.390 4
6	人员操作不当	$F_4$	0.294 3
7	自然灾害	$F_1$	0.218 6
8	静电积聚	$F_{26}$	0.211 3
9	设备不防爆	$F_6$	0.156 1

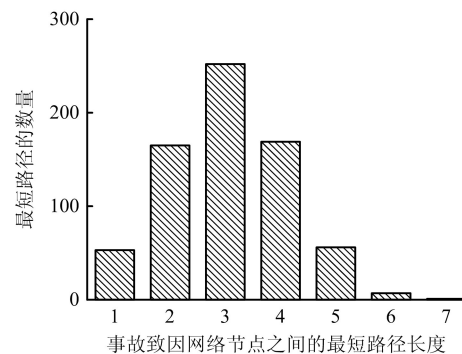


图6 事故致因网络节点之间的最短路径分布  
Fig. 6 Shortest path distribution between nodes in accident-causing network

0.220 2, 0.501 6, 风险因素节点重要度前五为:油品挥发与其他气体混合、油品泄漏、人员违反安全作业规定、明火或火花、动火作业条件确认不充分。针对这些关键风险因素对油库企业提出相应管控建议。

(3)通过平均最短路径长度与网络直径的分析,得出在整个网络中平均最短路径长度为 3.05,网络的直径为 7,表明该网络具有较小的平均最短路径长度,各个风险因素关联紧密,具有小世界特性,当某个风险因素发生时,在网络中具有更快的传播速度。

#### 参考文献 (References):

- [1] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440 - 442.
- [2] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509 - 512.
- [3] MA X, LI K P, LUO Z Y, et al. Analyzing the causation of a railway accident based on a complex network[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(2): 644 - 650.
- [4] LIU S L, LIANG Y T. Exploring the temporal structure of time series data for hazardous liquid pipeline incidents based on complex network theory [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2019, 26: 100308.
- [5] GUO S Y, TANG B, LIANG K Z, et al. Comparative analysis of the patterns of unsafe behaviors in accidents between building construction and urban railway construction[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2021, 147(5): 4021027.
- [6] 陈文瑛, 李泳墩, 宋志光. 基于复杂网络的生产安全事故致因研究: 以北京市某城区为例[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(7): 7 - 12.  
CHEN W Y, LI Y T, SONG Z G. Research on causes of work safety accidents based on complex network theory: a case study of a district in Beijing [J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(7): 7 - 12.
- [7] 秦华礼, 王馨琪. 化工火灾爆炸事故复杂致因网络分析[J]. *化工管理*, 2023(30): 113 - 118.  
QIN H L, WANG X Q. Network analysis of key causes of fire and explosion accidents in chemical enterprises[J]. *Chemical Management*, 2023(30): 113 - 118.
- [8] 付玉平, 陈兆波, 赵振保, 等. 煤矿安全事故的综合致因模型[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(7): 2731 - 2740.  
FU Y P, CHEN Z B, ZHAO Z B, et al. Research on comprehensive causative model of coal mine safety accidents[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(7): 2731 - 2740.
- [9] ABDOLHAMIDZADEH B, RASHTCHIAN D, ASHURI E. A new methodology for frequency estimation of second or higher level domino accidents in chemical and petrochemical plants using Monte Carlo simulation[J]. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering (International English Edition)*, 2009, 28(4): 21 - 28.
- [10] RAJAKARUNAKARAN S, KUMAR A M, PRABHU V A. Applications of fuzzy faulty tree analysis and expert elicitation for evaluation of risks in LPG refuelling station

[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 33: 109 - 123.

- [11] 赵宁刚, 燕秋华, 苗立新, 等. 基于三类危险源理论的油库火灾爆炸事故致因[J]. *油气储运*, 2018, 37(1): 24 - 28.

ZHAO N G, YAN Q H, MIAO L X, et al. The cause of fire and explosion accidents in oil depots based on three types of hazard sources [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2018, 37(1): 24 - 28.

## Investigation into the causes and network evolution of fire and explosion accidents in oil depots

GONG Xiaofeng<sup>1</sup>, SONG Changyang<sup>2</sup>, FU Mingfu<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>

(1 National Pipeline Network Group Western Pipeline Company, Urumqi 830011, China; 2 College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

**Abstract:** To address significant issues such as the insufficient systematic investigation of hidden dangers and the lack of quantitative risk management and control methods in the current oil and gas storage and transportation industry, this paper employs complex network theory and methodology. It focuses on a typical historical case of a fire and explosion accident at an oil depot, analyzing the causes of the accident and the evolution of the network involved. Based on the establishment of the accident-causing network, the risk factors and final consequences of the historical fire and explosion accident at the oil depot are treated as the nodes of the network model. The accident chain is then analyzed and extracted. Additionally, the number of accidents is used as the weight for the edges between the nodes, allowing for the creation of a directed weighted accident-causing network model. Finally, important topological characteristics—such as degree and cumulative degree distribution, clustering coefficient, and betweenness centrality—are selected to quantitatively analyze the network from both overall and local perspectives. To avoid bias in assessing the importance of network nodes based solely on a single topological index, we combine the total degree value, clustering coefficient, betweenness centrality, and entropy method of the three topological indices to calculate the weights. This approach enables us to derive and rank the importance scores of the risk factor nodes. Key risk points in the accident evolution process have been identified, and corresponding risk control measures are provided for oil depot enterprises. Simultaneously, based on complex network theory, an analysis of the average shortest path length and network diameter reveals that the network exhibits a smaller average shortest path length, indicating that each risk factor is closely interconnected and demonstrates small-world characteristics. When a risk factor occurs, it propagates more rapidly within the network. The establishment of the accident-causing network model enhances our understanding of the mechanisms and dynamics underlying accidents, providing valuable insights for effective risk management.

**Key words:** safety engineering; oil depot fire explosion; complex network; accident evolution; network topology