

基于粗糙集的城市燃气管道破坏灾害演化 诱发机制分析^{*}

陈长坤¹, 李 建¹, 孙云凤¹, 朱 伟²

(1. 中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075; 2. 北京城市系统工程
研究中心, 北京 100089)

摘 要: 利用粗糙集理论, 在分析大量事故案例的基础上, 构建城市燃气管道破坏事故的灾害演化网络模型, 找出网络中各灾害事件的诱发因素, 在此基础上, 对诱发因素进行分级, 并将分级的诱发因素作为条件属性, 将各灾害事件是否发生作为决策属性; 根据条件属性和决策属性, 建立相应的数据信息表; 对数据信息表中信息进行处理与计算, 得到各个条件属性的上近似、下近似、正域, 进而比较和计算分析得出可约简的条件属性, 在此基础上, 给出危机事件基于粗糙集的信息提取与不同条件下危机事件的预测分析。以交通封锁和交通堵塞两个危机事件的诱发过程为例来阐述上述方法, 给出了在不同演化条件下交通封锁和交通堵塞是否发生以及发生概率。

关键词: 粗糙集; 燃气管道破坏; 诱发机制; 信息提取; 预测分析

中图分类号: TU996.9; X4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)03-0092-05

0 引言

随着城市燃气化率的上升, 地下燃气管网系统的规模也在迅速膨胀, 以北京市为例, 北京市市内燃气管网超过 7 000 km, 另外还有近 6 000 个闸井、2 000 多个调压站、3 200 多个调压箱和 6 座大型输配站。管网的安全运营不仅关乎百姓的日常生活, 也关系社会的稳定。

早在 1970 年代, 欧美发达国家就开始了燃气管道的风险理论及实践的研究, 而我国在这方面的研究相对较晚, 最早将国外管道风险评价技术介绍到国内的是潘家华教授, 他在 1990 年代中期向国内读者介绍了美国著名管道风险管理专家 W. Kent Muhlbauer 先生提出的管道风险专家评分法^[1], 之后国内许多学者根据国情, 运用管道风险专家评分法, 在实际中取得了较好的效果^[2-4]。目前, 常用的油气管道风险评价方法主要有专家评分法、评分指标体系法、故障树分析法、模糊分析法、层次分析法、神经网络分析法等^[5-6]。

近年来, 一些学者开始采用粗糙集理论对燃

气管网各种事故灾害风险进行评估。运用粗糙集理论能够很好地避免一般评价方法权重分配受主观因素影响的问题, 可大幅度提高预测精确度和可靠性。文献[7]运用粗糙集理论对国内现役管道失效可能性进行了评价; 文献[8]运用粗糙集理论和事故树分析的方法对城市燃气管道失效后蒸气云爆炸和喷射火灾等事故风险进行了分析。

本文将运用粗糙集理论与灾害演化网络分析的方法^[9-10], 对城市燃气管道破坏事故风险进行分析。找到城市燃气管网破坏事故灾害演化一般过程, 构建灾害网络演化拓扑结构, 对灾害演化诱发机制进行分析, 得到城市燃气管网破坏事故诱发机制的分析预测结果。

1 城市燃气管道破坏灾害演化过程分析

近年来, 随着城市天然气入户工程的实施, 天然气管网破坏事故也频频发生。燃气管道破坏, 一方面可能造成燃气的泄露, 造成财产损失和人员伤亡; 另一方面, 还可能诱发火灾、爆炸等此

^{*} 收稿日期: 2010-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(50706059); 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题(HZ2009-KF05)

作者简介: 陈长坤(1977-), 男, 福建福安人, 博士, 教授, 从事重大突发公共事件演化与控制研究。

E-mail: cckchen@mail.csu.edu.cn

生灾害,造成更多的财产损失和人员伤亡。总结近年来燃气管网破坏事故造成的后果,得到城市燃气管道破坏事故灾害演化链,其拓扑结构如图1所示。可以看出,城市燃气管网破坏事故灾害演化过程中,危机事件主要有:燃气中断、市民生活困难、燃气泄露、供气压力过低、毒气扩散、人员伤亡、火灾、爆炸、地面塌陷、交通堵塞、交通封锁、破坏其他生命线管网。

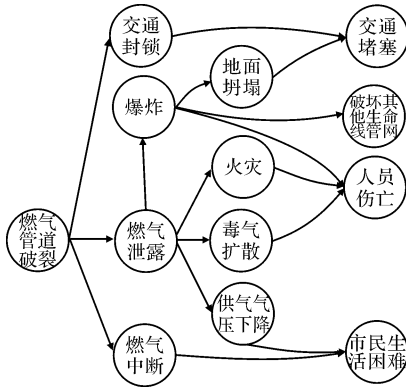


图1 城市燃气管道破坏灾害演化拓扑结构

但要对以上灾害演化系统有充分的认识,达到基于整体灾害网络的风险辨识与分析的目的,则必须获得各危机事件间的诱发机制与诱发条件,进而达到对图1中各连接边的量化描述。为此,笔者提出了一种基于粗糙集的灾害演化诱发机制分析方法。

2 基于粗糙集的燃气管道破坏灾害演化诱发机制分析方法

2.1 粗糙集理论基本知识

粗糙集理论是波兰科学院 Z. Pawlak 院士于1982年提出的一种用于不完整、不精确数据分析和推理的理论^[11]。

(1) 知识

从认知科学的观点来理解知识,知识是基于对象的分类能力,知识直接与真实或抽象世界有关模式联系在一起,称为论域 U 。设给定一个感兴趣的对象论域 U ,对于任何子集 $X \subseteq U$ 可称为一个 U 中的概念或范畴, U 的任何概念族称为 U 的抽象知识,简称知识^[11]。

(2) 上近似、下近似、正域

设 $K=(U, R)$ 是 Pawlak 近似空间, R 是 U 上的等价关系,对于任意 $X \subseteq U$,称

$$\overline{R}(x) = \{x \in U \mid [x]_R \cap X \neq \emptyset\} = \cup \{[x]_R \mid$$

$$[x]_R \cap X \neq \emptyset\}, \quad (1)$$

与

$$\underline{R}(x) = \{x \in U \mid [x]_R \subseteq X\} = \cup \{[x]_R \mid [x]_R \subseteq X\}, \quad (2)$$

分别为 X 关于近似空间 (U, R) 的 R 上近似集与 R 下近似集。其中,下近似 \underline{R} 称为 X 的 R 正域,记作 $\text{POS}_R(X)$ 。

(3) 条件属性与决策属性

粗糙集理论中,一个信息系统 $S=(U, A)$,其中 U 表示非空有限集合,称为全域。 $A=C \cup D$, $C \cap D = \emptyset$, C 表示条件属性集, D 表示决策属性集,一般来说 D 只有一个属性^[10]。

2.2 燃气管道破坏灾害演化诱发机制分析方法

图2给出了燃气管道破坏灾害演化诱发机制的分析方法。

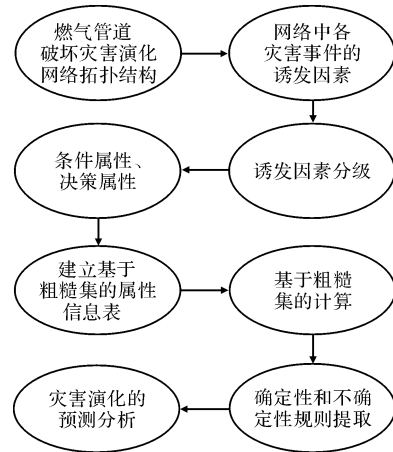


图2 基于粗糙集的燃气管道破坏灾害演化诱发机制分析过程

燃气管道破坏灾害演化过程的拓扑结构可以看作一个复杂网络。灾害的演化是一个极为复杂的过程,网络中每一条连接边的形成都是各种诱发因素共同作用的结果,为了能够找到燃气管道灾害演化的诱发机制,需要找到各灾害事件的诱发因素。诱发因素通常不止一个,可用 Q_1, Q_2, Q_3, \dots 表示,同一诱发因素 Q_i ,会有不同的水平,本文将诱发因素分为四级,并对其赋值,如果为一级,则赋值1,如果为二级,则赋值2,依次类推。

根据粗糙集理论,把燃气管道破坏灾害演化诱发机制中的诱发因素进行处理,建立相应的数据信息表,如表1所示,其中 U 为全域,即所研究案例的总体,包括 X_1, X_2, \dots ; X_i 表示第 i 个案例;条件属性 Q_i 为诱发因素,条件属性的值即

为诱发因素分级并赋值的结果；决策属性 S 就是该危机事件在燃气管道破坏灾害演化诱发机制下是否发生，发生则值为 1，否则值为 0。

表 1 基于粗糙集的信息处理

全域 U	条件属性 Q_i			决策属性 S
	Q_1	Q_2	Q_3	
X_1	1	2	1	1
X_2	2	4	3	0
.....
X_i	1	1	1	1

对燃气管网破坏系统的条件属性和决策属性进行分析，通过计算得出各条件属性的上近似、下近似、正域，在此基础上比较和计算分析得出可约简的条件属性以及演化机制的粗糙集规则（图 3）。

下文将以燃气管道破坏事故案例中，交通封锁和交通堵塞两个灾害诱发过程为例，以粗糙集理论为基础，来分析灾害演化的诱发机制。

表 2 交通封锁和交通堵塞危机事件诱发因素分级

危机事件	诱发事件	一级(1)	二级(2)	三级(3)	四级(4)
交通封锁	燃气泄露位置	快速路	主干路	次干路	支路
	泄露持续时间	>1 d	1 h ~ 1 d	10 min ~ 1 h	<10 min
	燃气扩散面积/ m^2	>10 000	1 000 ~ 10 000	100 ~ 1 000	<100
交通堵塞	交通封锁位置	快速路	主干路	次干路	支路
	交通封锁时间段	07:00 ~ 09:00, 17:00 ~ 19:00	09:00 ~ 12:00, 19:00 ~ 23:00	12:00 ~ 13:00, 13:00 ~ 17:00	23:00 ~ 07:00
	地面塌陷范围/ m^2	>100	10 ~ 100	1 ~ 10	<1

根据粗糙集理论，对燃气管道破坏灾害演化诱发机制的具体诱发因素进行处理，将相关案例数据整合，建立相应的数据信息表。表 3 和表 4 分别为交通封锁危机事件和交通堵塞危机事件粗糙集信息处理部分结果。

表 3 交通封锁危机事件粗糙集信息处理表

全域 U	条件属性			决策属性 S
	Q_1 (燃气泄露位置)	Q_2 (泄露持续时间)	Q_3 (燃气扩散面积)	
X_1	1	1	1	1
X_2	1	1	2	1
X_3	4	3	3	0
X_4	2	4	3	0
.....

通过计算，可以得到每个危机事件的演化机制的粗糙集分析及规则提取。

(1) 交通封锁危机事件的粗糙集确定性规则提取如下：

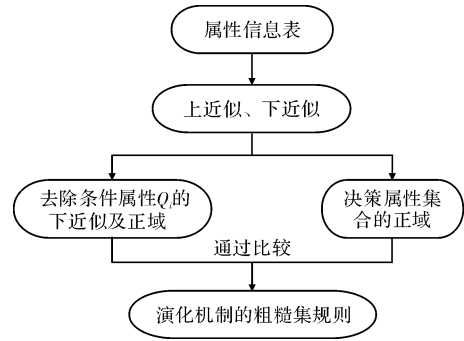


图 3 燃气管网破坏事故灾害危机事件粗糙集分析流程图

3 城市燃气管道破坏灾害演化诱发机制实证分析

通过对大量燃气管网破坏事故案例的分析，总结交通封锁危机事件发生的条件属性主要有：燃气泄露位置、燃气泄露持续时间、燃气扩散面积。交通堵塞危机事件发生的条件属性有：交通封锁位置、交通封锁时间段、地面塌陷范围。对条件属性进行分级，结果如表 2 所示。

表 4 交通堵塞危机事件粗糙集信息处理表

全域 U	条件属性			决策属性 S
	Q_1 (交通封锁位置)	Q_2 (交通封锁时间段)	Q_3 (地面塌陷范围)	
X_1	1	2	1	1
X_2	2	3	4	0
X_3	2	4	4	0
X_4	1	2	2	1
.....

如果属性 $Q_1 = 1, Q_2 = 1, Q_3 = 1$ ，那么决策属性为 $S = 1$ （交通封锁发生）；

如果属性 $Q_1 = 2, Q_2 = 1, Q_3 = 1$ ，那么决策属性为 $S = 1$ （交通封锁发生）；

如果属性 $Q_1 = 3, Q_2 = 4, Q_3 = 4$ ，那么决策属性为 $S = 0$ （交通封锁不发生）；

如果属性 $Q_1 = 4, Q_2 = 4, Q_3 = 4$ ，那么决策属性为 $S = 0$ （交通封锁不发生）；

.....。

交通封锁危机事件的粗糙集不确定性规则提取如下:

如果属性 $Q_1=2, Q_2=2, Q_3=1$, 那么决策属性为 $S=1$ (交通封锁发生)的概率为 71.4%;

如果属性 $Q_1=3, Q_2=2, Q_3=1$, 那么决策属性为 $S=1$ (交通封锁发生)的概率为 42.9%;

如果属性 $Q_1=3, Q_2=3, Q_3=3$, 那么决策属性为 $S=1$ (交通封锁发生)的概率为 16.7%;

如果属性 $Q_1=4, Q_2=3, Q_3=3$, 那么决策属性为 $S=1$ (交通封锁发生)的概率为 12.5%;

.....。

(2) 交通堵塞危机事件的粗糙集确定性规则提取如下:

如果属性 $Q_1=1, Q_2=1, Q_3=1$, 那么决策属性为 $S=1$ (交通堵塞发生);

如果属性 $Q_1=1, Q_2=2, Q_3=1$, 那么决策属性为 $S=1$ (交通堵塞发生);

如果属性 $Q_1=4, Q_2=3, Q_3=4$, 那么决策属性为 $S=0$ (交通堵塞不发生);

如果属性 $Q_1=4, Q_2=4, Q_3=3$, 那么决策属性为 $S=0$ (交通堵塞不发生);

.....。

交通堵塞危机事件的粗糙集不确定性规则提取如下:

如果属性 $Q_1=2, Q_2=2, Q_3=1$, 那么决策属性为 $S=1$ (交通堵塞发生)的概率为 60%;

如果属性 $Q_1=2, Q_2=2, Q_3=2$, 那么决策属性为 $S=1$ (交通堵塞发生)的概率为 33.3%;

如果属性 $Q_1=3, Q_2=2, Q_3=2$, 那么决策属性为 $S=1$ (交通堵塞发生)的概率为 18.2%;

如果属性 $Q_1=4, Q_2=4, Q_3=2$, 那么决策属性为 $S=1$ (交通堵塞发生)的概率为 12.5%;

.....。

运用粗糙集对燃气管网破坏事故灾害演化诱发机制进行分析, 得出了燃气管网事故灾害演化诱发机制的粗糙集的提取规则, 根据粗糙集的提取规则结合已有燃气管网破坏事故灾害演化的诱发因素条件则可以预测出燃气管网破坏事故灾害演化。

根据燃气管网破坏事故灾害演化诱发因素的粗糙集分析结果, 结合具体的实际条件, 判断燃气管网破坏事故灾害是否发生或者发生的概率。

表 5 和表 6 分别给出了基于粗糙集的交通封锁和交通堵塞危机事件预测分析, 由于篇幅有限, 只是给出了部分结果。

表 5 基于粗糙集的交通封锁危机事件发生概率预测结果(“燃气管道破坏→交通封锁”)

编号	燃气泄露位置	泄露持续时间	燃气扩散面积/ m^2	交通封锁发生概率/%
1	快速路	>1 d	>10 000	100
2	主干路	1 h ~ 1 d	>10 000	71.4
3	次干路	10 min ~ 1 h	>10 000	42.9
4	次干路	10 min ~ 1 h	100 ~ 1 000	16.7
5	支路	10 min ~ 1 h	100 ~ 1 000	12.5
6	支路	<10 min	<100	0

表 6 基于粗糙集的交通堵塞危机事件发生概率预测结果(“交通封锁→交通堵塞”与“地面塌陷→交通堵塞”)

编号	交通封锁位置	交通封锁时间段	地面塌陷范围/ m^2	交通堵塞发生概率/%
1	快速路	07:00 ~ 09:00, 17:00 ~ 19:00	>100	100
2	主干路	09:00 ~ 12:00, 19:00 ~ 23:00	>100	60.0
3	主干路	09:00 ~ 12:00, 19:00 ~ 23:00	10 ~ 100	33.3
4	次干路	09:00 ~ 12:00, 19:00 ~ 23:00	10 ~ 100	18.2
5	支路	23:00 ~ 07:00	10 ~ 100	12.5
6	支路	23:00 ~ 07:00	<1	0

根据表 5 和表 6, 当燃气泄露位于快速路、泄露持续时间大于 1 d、燃气扩散面积大于 10 000 m^2 时, 交通封锁一定发生; 当燃气泄露发生于主干路、泄露持续时间为 1 h ~ 1 d、燃气泄露面积大于 10 000 m^2 时, 交通封锁发生的概率为 71.4%; 当交通封锁位于快速路、交通封锁发生于 07:00 - 09:00 或者 17:00 - 19:00、地面塌陷范围超过 100 m^2 , 交通堵塞一定发生; 当交通封锁位于主干路、交通封锁发生于 09:00 - 12:00 或者 19:00 - 23:00、地面塌陷范围超过 100 m^2 , 交通堵塞发生概率为 60%, 表中其他数据, 不再赘述。实际中, 可以将实际情况与基于粗糙集的燃气管道破坏灾害演化预测分析结果进行对比, 可以找到危机事件发生的对应概率, 进而可以采取相应的措施来遏制危机事件的发生。

4 结论

(1) 构建了城市燃气管道破坏事故灾害演化网络拓扑结构, 找到燃气管道破坏事故次生灾害的诱发因素; 在分析大量案例和文献的基础上, 对灾害的诱发因素进行分级, 并将灾害的诱发因素作为粗糙集理论中的条件属性, 将灾害是否发生

作为决策属性, 建立基于粗糙集的信息处理表;

(2) 运用粗糙集理论, 通过整理和计算得出各个条件属性的上近似、下近似、正域, 找到灾害发生可约简的条件属性, 提取基于粗糙集的确定性规则和不确定性规则, 并对燃气管道破坏事故诱发机制进行预测分析, 给出不同诱发条件下危机事件发生的概率;

(3) 运用粗糙集理论能够很好地避免一般评价方法权重分配受主观因素影响的问题, 可大幅度提高预测精确度和可靠性。

由于篇幅有限, 本文只给出了燃气管道破坏灾害演化过程中交通封锁和交通堵塞两个危机事件诱发机制分析, 网络中其它危机事件诱发机制也可用相同的方法进行分析, 而在此基础上, 基于整个灾害演化网络的风险评估应是进一步研究的重点。

参考文献:

[1] Kent Muhlauer W. Pipeline risk management manual [M].

Berlin: Gulf Publishing Company, 1996: 56-64.

- [2] 皱亮, 朱玲湘. 基于数据挖掘的地下燃气管道风险指标体系设计[J]. 鞍山科技大学学报, 2007, 30(4): 429-432.
- [3] 赵俊茹, 戴光, 刘冬妹, 等. 基于灰色理论的管道风险评分法的研究及应用[J]. 压力容器, 2010, 27(5): 51-53.
- [4] 冯斌, 李大全, 廖国威. 改进的油气管道风险专家评分方法[J]. 油气储运, 2008, 27(11): 4-8.
- [5] Dziubifiski, Fratezak M, Markowski A S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(5): 399-408.
- [6] 骆正山, 王小完. 基于天然气泄漏的危害性分析及应用[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 97-100.
- [7] 张志霞, 邵必林, 王伟. 基于粗糙集的现役管道失效可能性评价[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(2): 210-213.
- [8] 贾增科. 城市燃气管道风险评价研究[D]. 邯郸: 河北工程大学. 2008.
- [9] 陈长坤, 李智, 孙云凤. 基于复杂网络的灾害信息传播特征研究[J]. 灾害学, 2008, 23(4): 126-129.
- [10] 陈长坤, 孙云凤, 李智. 冰雪灾害危机事件演化及衍生链特征分析[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 18-21.
- [11] 王彪, 段禅伦, 吴昊, 等. 粗糙集与模糊集的研究及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

Analysis on the Inducing Mechanism of Disaster Evolution for the Urban Gas Pipeline Accidents Based on Rough Set Theory

Chen Changkun¹, Li Jian¹, Sun Yunfeng¹ and Zhu Wei²

(1. Disaster Prevention Science and Safety Technology Institute, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Beijing Research Center of Urban Systems Engineering, Beijing 100089, China)

Abstract: The evolution network for urban gas pipeline accidents is established by analyzing a large number of accident cases and using rough set theory. Then inducing factors of different types of disasters in the network are sort out, based on which, the inducing factors are graded. The graded inducing factors are regarded as condition attributes, while whether the different types of disasters occurred are treated as decision attributes. The information tables are built on the basis of the condition attributes and decision attributes. The upper approximation set, lower approximation set and positive region are obtained by calculating and analyzing the information tables, based on which reduced condition attributes are achieved. Also, the rules of crisis events are extracted based on rough sets theory, so does the prediction and analysis of crisis events. Traffic blocking and jams are selected as two examples to describe the mentioned method. The probabilities of the above crisis events in different conditions of traffic jams in the network are presented.

Key words: rough set; accidents of gas pipeline; causative mechanism; information extraction; prediction and analysis