

城市燃气管网的风险识别*

刘俊娥**

贾增科

(北京物资学院信息学院) (河北工程大学经济管理学院)

郭章林

张宇兰

(华北科技学院土木系) (邯郸市煤气公司)

刘俊娥 贾增科等:城市燃气管网的风险识别,油气储运,2008,27(7) 11~14,59。

摘 要 鉴于风险识别的方法大多以定性为主而缺乏客观评价的状况,提出了一种基于故障树分析和粗集理论的风险识别方法。利用故障树分析可以全面系统地找出影响燃气管道安全的各种因素,借助粗集理论中的属性约简算法对这些因素进行属性约简,最终识别出影响城市燃气管网的风险因素,可以为风险分析评价提供必要的依据。

主题词 城市燃气管网 风险识别 故障树分析 粗集理论 属性约简

一、前 言

风险识别^[1]又称风险辨识,是指在收集资料的基础上,对尚未发生的、潜在的及客观存在的各种风险根据直接或间接的症状进行判断、归类 and 鉴定的

过程,是进行风险评价的基础。其主要任务是找出风险之所在及其引起风险的主要因素,并对后果做出定性分析。风险识别是风险分析中最基本、最重要的阶段。城市燃气管网系统是一个复杂的系统,很多风险隐藏在系统某个层次中或被某种假象所掩盖,如果不能全面、系统地识别出影响整个管网系统

定,但是各州制定的管道安全标准不得低于联邦政府标准,各州的管道安全标准实际上高于联邦标准,或是对联邦标准的补充。

目前的我国的油气资源分布和利用不平衡,油气管道设施在各地区的分布也是不一样的,因此,在经济发达地区可以采用更高一些的安全标准,发挥地方主动性。

6、重视在联邦机构、管道运营商和居民之间的信息沟通

联邦机构重视与管道工业的对话,同时也敦促管道工业向居民履行告知义务,并投入资金加强管道的安全教育。

致谢:本文在 Louisiana Tech University 的 Trenchless Technology Center 访问期间完成。感谢该中心主任 Ray Sterling 博士为本文的写作提供条件,并与作者进行了有益的讨论。

参 考 文 献

- 1, AGA : Congress Pass Pipeline Safety Bill , American Gas , 2007,89(1).
- 2, 陈福来 狄彦帅 健:压力管道的法规标准体系研究,焊管,2007,30(2)。
- 3, 王弢 帅 健:管道完整性管理标准及其支持体系,天然气工业,2006,26(11)。
- 4, Alphsbet Soup: Pipeline Safety Trust, American Gas, 2007, 89(1).
- 5, 中华人民共和国主席令第 70 号《中华人民共和国安全生产法》, 2002。
- 6, 中华人民共和国主席令第 373 号《特种设备安全监察条例》, 2003。

(收稿日期:2007-07-17)

编辑:刘春阳

* 河北省科技厅资助项目(05547009D-3)。

** 056038,河北省邯郸市光明南大街 199 号;电话:13483016504。

的风险因素,就不能有效地实现风险管理的目标。目前,风险识别的主要方法有检查表法、头脑风暴法、德尔斐法、情景分析法等,但这些方法过多地依据专家的主观判断,可能会遗漏一些严重的风险因素,造成识别结果偏差,最终影响风险管理目标的实现。故障树分析法在工程领域已得到广泛地应用,也有学者已经运用此方法进行风险识别^[2]。

二、故障树分析理论

故障树分析^[3~5](FTA)属一种图形演绎法,是故障事件在一定条件下的逻辑推理方法。它将系统不希望出现的事件作为故障树的顶事件,用规定的逻辑符号自上而下地分析导致顶事件发生的所有可能的直接因素,及其相互间的逻辑关系,并由此逐步深入分析,直到找出事故的基本原因,即故障树的基本事件为止。

1、故障树定性分析

故障树定性分析主要包括最小割集、最小径集的分析。

(1)最小割集 割集是导致顶上事件发生的基本事件的集合。最小割集就是引起顶上事件发生必需的最低限度的割集。最小割集的求取方法有行列式法、布尔代数法等。目前,已经有求取最小割集和最小径集的计算机软件。

每个最小割集都是顶上事件发生的一种可能性,有几个最小割集,顶上事件的发生就有几种可能性,最小割集越多,系统越危险。从最小割集能直观、概略地看出哪些事件最危险,哪些稍次,哪些可以忽略,以及如何采取措施,使事故发生概率下降。

(2)最小径集 如果故障树中某些基本事件不发生,则顶上事件就不发生,这些基本事件的集合称为径集。最小径集就是顶上事件不发生所需的最低限度的径集。最小径集的求法是利用它与最小割集的对偶性,首先做出与故障树对偶的成功树,即将原来故障树的与门换成或门,而或门换成与门,各类事件发生换成不发生,利用上述方法求出成功树的最小割集,再转化为故障树的最小径集。一个最小径集中的基本事件都不发生,就可使顶上事件不发生。故障树中最小径集越多,系统就越安全。从用最小径集表示的故障树等效图可以看出,只要控制一个最小径集不发生,顶上事件就不发生,所以可以选择

控制事故的最佳方案,一般地,对少事件最小径集加以控制较为有利。

(3)结构重要度分析 结构重要度分析是从事故树结构上分析各基本事件的重要程度,即在不考虑各基本事件的发生概率,或者假定各基本事件的发生概率都相等的情况下,分析各基本事件的发生对顶上事件所发生的影响程度,基本事件结构重要度越大,它对顶上事件的影响程度也就越大,反之亦然。

2、故障树定量分析

(1)顶上事件发生概率计算 计算方法有逐级向上推算法、直接用故障树结构函数式计算、利用最小割集或最小径集计算,另外还有几种近似计算方法。针对数据收集情况,可以选择采用不同的计算方法。

当故障树的各最小割集中有重复事件时,若设已求得故障树的所有最小割集 K_1, K_2, \dots, K_n , 其中 n 为系统最小割集总数,且已知基本事件 X_i 的发生概率 $Q_i = P(X_i), i = 1, 2, \dots, n$, 则故障树顶事件 T 的发生概率计算公式为:

$$Q(T) = P\left(\bigcup_{j=1}^n K_j\right) = \sum_{i=1}^n P(K_i) - \sum_{i < j=1}^n (K_i K_j) + \dots + (-1)^{n-1} P(K_1 K_2 \dots K_n)$$

即:

$$P(K_j) = \prod_{i \in K_j} Q_i \tag{1}$$

式中 $Q(T)$ ——顶上事件的发生概率。

(2)概率重要度 基本事件概率重要度是指顶上事件发生概率对该基本事件发生概率的变化率,即:

$$I_g(i) = \frac{\partial Q(T)}{\partial q_i} \tag{2}$$

式中 $I_g(i)$ ——第 i 个基本事件的概率重要度;

q_i ——第 i 个基本事件的发生概率。

通过对基本事件概率重要度的分析,就可定量评价各基本事件发生概率对顶事件发生概率的影响程度,因为人力物力有限,应优先考虑从概率重要度大的基本事件入手。

(3)临界重要度 结构重要度是从事故树图的结构来分析基本事件的重要性,并不能全面地说明各个基本事件的危险重要程度。而概率重要度是反映各基本事件概率的增减对顶上事件发生概率影响的敏感度。临界重要度是从概率和结构双重角度来

衡量各基本事件重要性的一个评价标准。临界重要度也称危险重要度,它是利用基本事件发生概率的变化率对顶上事件发生概率变化率的比,来确定基本事件重要度,即:

$$I_c(i) = I_g(i) \cdot \frac{q_i}{Q(T)} \quad (3)$$

式中 $I_c(i)$ ——第 i 个基本事件的临界重要度。

三、粗集理论

粗集理论^[6,7]是波兰学者 Z. Pawlak 提出的一种数据推理方法。粗集理论的特点是不需要预先给定某些特征或属性的数量描述,例如统计学中的概率分布、模糊集理论中的隶属度或隶属函数等,而是直接从给定问题的描述集合出发,通过不可分辨关系和不可分辨类确定给定问题的近似域,从而找出该问题中的内在规律。它的主要思想是,在保持知识库分类能力不变的前提下,通过知识(属性)约简,导出问题的决策或分类规则。它目前已成为人工智能领域的一个新的学术热点,现已被广泛应用于人工智能、模式识别、决策支持与分析、机器学习及智能控制等领域。

知识表示可通过知识表达系统来完成。知识表达系统的基本成分是被研究对象的集合,关于这些对象的知识是通过指定对象的属性和它们的属性值来描述的。一个数据表知识表达系统 S 可表示为 $S = (U, A, V, F)$; 其中的 U 表示论域, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 是全部有限个样本的集合; $A = C \cup D$ 是属性集合, 子集 C 和 D 分别称为条件属性和决策属性; $V = V_{a_1} \times V_{a_2} \times V_{a_3} \times \dots \times V_{a_m}$ 表示属性 A 的值域, V_A 表示原子属性 A 的值域; F 为 $U \times A \rightarrow V$, 表示从 $U \times A$ 到 V 的信息映射。

假设给定一个感兴趣的对象的论域 U , 对于任何子集 $X \subseteq U$ 可称为 U 中的概念或范畴, 并且 U 中的任何概念族称为关于 U 的知识。这些概念也构成了特定论域 U 的分类。一个 U 上的分类族定义为一个 U 上的知识库, 这样, 知识库表达了一个或一组智能机构的各种基本分类方式。通常情况下, 用等价关系来代替分类的概念。

令 $X \subseteq U$, 且 R 为一等价关系, 当 X 为某些 R 基本范畴的并时, 称 X 是 R 可定义的, 否则 X 为 R 不可定义的。 R 的可定义集称为 R 精确集, 而 R 的

不可定义集称为 R 粗集。粗集可以近似地定义为, 为达到这一目的, 采用两个精确集(粗集的上近似和下近似)和边界来描述。

X 关于 R 的下近似:

$$R_-(X) = \cup Y \{Y \in U/R \text{ and } Y \subseteq X\} \quad (4)$$

X 关于 R 的上近似:

$$R^-(X) = \cup Y \{Y \in U/R \text{ and } Y \cap X \neq \emptyset\} \quad (5)$$

X 关于 R 的边界:

$$bn_R = R^-(X) - R_-(X) \quad (6)$$

$POS_R(X) = R_-(X)$ 称为 X 的 R 正域。简单地, 正域 $POS_R(X)$ 或 X 的下近似就是那些对于知识 R 能完全确定地归入集合 X 的对象的集合。 X 的上近似是由那些对于知识 R 不能排除它们属于 X 的可能性的对象构成, 从形式上, 上近似就是正域和边界域的并集。边界域是从某种意义上论域的不确定域, 对于知识 R , 属于边界域的对象不能确定地划分是属于 X 或 X 的补集。

定义 C 对 D 近似分类的质量为:

$$\gamma_C(D) = \frac{\sum_{X \in U/D} |C_-(X)|}{|U|} \quad (7)$$

式中 $| \cdot |$ ——集合的基数, 表示应用条件属性 C 对 D 进行分类时, 能确定决策对象在论域中所占的比例。

定义属性子集 c 在属性集 C 中的重要性的:

$$SCF(c, \{C - \{c\}, D) = \gamma_C(D) - \gamma_{C - \{c\}}(D) \quad (8)$$

式(8)表示从属性集 C 中去掉属性子集 c 对 D 近似分类质量的影响。

设有两集合族 G, R , 其中 r 是 R 中的某一等价关系, 例如 $POS_{(R-r)}(G) = POS_R(G)$, 则称 r 是关于 G 可省略的, 否则为 G 不可省略的。如果 R 中的任意元素是不可省略的, 则称 R 是独立的。

设 $H \subseteq R$, 且 H 是独立的, 若 $POS_H(G) = POS_R(G)$, 则称 H 为 R 的 G 约简, 记为 $red(R)$ 。从定义可知, G 关于 H 和 R 的下近似是相同的, 即维持了与 R 相同的分类能力。 R 中所有约简的交集称为 R 的核, 记为 $core(R)$, 即 $core(R) = \cap red(R)$ 。核是唯一的, 核中的属性是影响分类的重要属性。一般情况下, 一个知识表达系统的约简不止一种, 这些简化都维持了与原有条件属性相同的分类能力。区分矩阵和区分函数就是为了更有效地计算约简而引入的。

知识表达系统 S 的区分矩阵定义为:

$$M_D(i, j) = \begin{cases} \{a \in C \mid x_i(a) \neq x_j(a)\} & (9) \\ 0 \end{cases}$$

$i, j = 1, 2, 3, \dots, n$

根据区分矩阵的定义可知,当两个样本的决策属性取值相同时($D(x_i) = D(x_j)$),它们所对应的区分矩阵元素的取值为零;当两个样本的决策属性不同时($D(x_i) \neq D(x_j)$),它们所对应的区分矩阵元素的取值为这两个样本属性值不同的条件属性集合,即可以区分这两个样本的条件属性集合。显然,区分矩阵是一个依主对角线对称的 $|U| \times |U|$ 矩阵,只需要考虑其上三角或下三角部分就可以了。

区分函数是从区分矩阵中构造的,方法是将区分矩阵中的所有取值为非空集合的元素,建立相应的析取逻辑表达式,然后进行合取运算,在使用吸收律化简区分函数成标准式后,所有的质蕴含式包含的属性就确定了知识表达系统的所有约简集合。

四、城市燃气管网风险识别

1、城市燃气管网失效故障树的建立

文献[8]中孙永庆根据欧洲输气管道事故数据组织(EGIG)对于管道事故的分类,将引起城市燃气管网失效的直接原因选定为管道穿孔、管道破裂与附件泄漏,建立了城市燃气管网失效故障树,共列举了 116 个基本事件。采用布尔代数法对故障树进行

简化,可知城市燃气管网失效故障树共存在 287 个最小割集,其中一阶最小割集 83 个,二阶最小割集 168 个,三阶最小割集 36 个。现以文献[8]城市管网失效故障树为研究依据,将 116 个基本事件作为初步风险识别的结果。

2、属性约简

采用故障树分析可以全面、系统地得出影响管网系统的风险因素,但往往故障树分析得到的基本事件较多,若以所有的基本事件作为风险源进行风险分析,虽然满足了全面、不遗漏地识别风险的条件,但数据处理工作量大,增加了风险分析的复杂程度。故障树分析中将基本事件和顶事件明确为发生和不发生两种状态,但实际工程问题并非确定的二值问题,在“发生”和“不发生”两种状态之间存在模糊过渡状态,所以简单地将故障树分析基本事件作为风险识别的最终结果是不科学的。粗集理论适合于发现数据中隐藏的、潜在的有用规律,其属性约简算法可以剔除数据中的冗余成分,达到有效识别风险的目的。

(1)建立信息表。如果故障树结构较复杂,在建立信息表时可从故障树分支入手。针对文献[8]中的故障树,可以选择中间事件作为分析对象,分别建立信息表。以“内防腐失效”故障树分支为例建立信息表并进行属性约简。针对某市某处管段选择 5 个观察点,根据表 1 各属性值域赋予各属性的属性值,建立信息表 2。

表 1 条件属性值域

风险因素	条件属性值域						
	f_{29}	f_{30}	f_{31}	f_{32}	f_{33}	f_{34}	D_3
0 定期检测	施工质量合格	缓蚀剂未失效	内衬完好	内涂层完好	清管效果好	内防腐完好	
1 未定期检测	施工质量存在很小问题	轻微失效	内衬轻微脱落	轻微破损	清管效果较好	轻微失效	
2	施工质量存在较小问题	失效程度较轻	内衬脱落较轻	老化破损程度较轻	清管效果一般	较少部分失效	
3	施工质量存在一般问题	失效程度适中	内衬脱落适中	老化破损程度适中	清管效果较差	失效程度一般	
4	施工质量存在较大问题	失效程度较重	内衬脱落较多	老化破损程度较重	清管效果差	较多部分失效	
5	施工质量存在很大问题	失效程度重	内衬脱落多	老化破损程度重	清管效果很差	失效严重	

同类产品相比尚存在一定差距,尤其是屈服比,这将影响到组对焊接工艺的适应性及强度试验时应力水平的确定。

综上所述,如果仅仅考虑到试压方案的科学性和严格性,而不顾国内目前的实际情况,人为地采用较高压力进行试压,其结果往往会适得其反,造成比较严重的后果。

五、结 论

尽管基于材质屈服极限较高压力条件下的压力试验标准更严格更科学,更有利于保证管道系统在

运行过程中的安全,但就目前国内的冶金工艺水平而言,部分或者全部采用国产板材制成的钢管建设的管道在进行压力试验时,采用现行的基于设计压力的压力标准来试压是更加适合的方案。

参 考 文 献

- 1, 赵熹华:焊接检验,机械工业出版社(北京),2005。
- 2, 曾 乐:现代焊接技术手册,上海科学技术出版社(北京),1993。
- 3, 田锡唐:焊接结构,机械工业出版社(北京),1989。
- 4, 潘家华:油气管道断裂力学分析,石油工业出版社(北京),1989。

(收稿日期:2007-06-21)

编辑:杜 娟

(上接第 14 页)

表 2 内防腐失效信息

管道 观察点	各风险因素下的属性值域						D ₃
	f ₂₉	f ₃₀	f ₃₁	f ₃₂	f ₃₃	f ₃₄	
O ₁	1	1	0	2	1	1	0
O ₂	1	1	1	2	1	1	0
O ₃	1	1	0	2	2	1	1
O ₄	1	2	1	2	1	1	0
O ₅	1	2	0	2	1	1	1

(2)属性约简。按照粗集理论属性约简区分矩阵算法,针对表 2 中被调查管段数据进行约简^[9]。

区分函数 $f = f_{33} \wedge f_{30} \wedge (f_{31} \vee f_{33}) \wedge (f_{30} \vee f_{31}) \wedge (f_{30} \vee f_{31} \vee f_{33}) \wedge f_{31}$, 所以表 2 的条件属性约简为 $\{f_{30}, f_{31}, f_{33}\}$, 由此可得到影响内防腐的风险因素, 即 f_{30} 为内防腐层施工质量差; f_{31} 为缓蚀剂失效; f_{33} 为内涂层老化破损。据此, 对文献[8]中故障树其它分支分别按实地观察值建立信息表, 然后进行属性约简, 最终从 116 个基本事件中约简后得到影响某城市燃气管网安全的风险因素 85 个, 约简掉冗余因素 31 个, 即 $f_2, f_7, f_{10}, f_{13}, f_{16}, f_{22}, f_{24}, f_{29}, f_{32}, f_{34}, f_{39}, f_{41}, f_{45}, f_{46}, f_{52}, f_{56}, f_{58}, f_{63}, f_{64}, f_{70}, f_{73}, f_{76}, f_{83}, f_{85}, f_{90}, f_{91}, f_{95}, f_{98}, f_{102}, f_{107}, f_{115}$, 也即通过故障树分析和属性约简识别出影响城市燃气管网安全的风险因素 85 个。

故障树分析法能对城市燃气管网进行风险识别, 但由于系统的复杂性, 识别的结果往往不能满足

决策者的要求。本研究利用粗集理论中属性约简算法, 对故障树分析的结果进行了约简, 约简掉冗余因素后得到影响某城市燃气管网安全的风险因素 85 个, 达到了有效识别风险的目的, 可以为城市燃气管网的风险分析与评价提供重要依据。

参 考 文 献

- 1, 任 宏 邓中美:建筑策划中的风险识别与风险评价,重庆大学学报(自然科学版),2005,28(9)。
- 2, 韩传峰 何 臻等:基于故障树分析的建设工程风险识别系统,自然灾害学报,2006,15(5)。
- 3, 何淑静 周伟国等:燃气输配管网可靠性的故障树分析,煤气与热力,2003,23(8)。
- 4, 廖柯熹 姚安林等:天然气管线失效故障树分析,天然气工业,2001,21(2)。
- 5, 董玉华 余大涛等:油气管道的故障树分析,油气储运,2002,29(6)。
- 6, 王 珏 苗夺谦等:关于 Rough set 理论与应用综述,模式识别与人工智能,1996,9(4)。
- 7, 胡可云 陆玉昌等:粗糙集理论及其应用进展,清华大学学报(自然科学版),2001,41(1)。
- 8, 孙永庆 李又绿等:城市埋地燃气管网失效树的研究,天然气工业,2004,24(1)。
- 9, 熊建秋 李祚泳等:基于粗集理论的地下水水质指标属性约简,水科学进展,2005,16(4)。

(收稿日期:2007-07-17)

编辑:刘春阳