

# 城市燃气管网的定量风险分析模型研究

高俊波, 郭越, 王晓峰

(上海海事大学信息工程学院, 上海 200135)

**摘要:**针对城市燃气管网的特点,本文对肯特分析法进行了改进,修正了肯特分析法影响因素的确定方法和影响权重的分配方法,然后利用改进后的肯特评分法对引起管网失效的各类因素进行分析;在此基础上,针对引起管网失效的部分因素具有不确定性,不能量化和模型化的不足,本文利用模糊综合评判法对其进行分析量化,建立了城市燃气管网的风险定量分析模型,为城市燃气管网的风险管理奠定了一定的基础。

**关键词:**燃气管线;肯特分析法;风险;模糊综合评判法;定量分析模型

随着经济和社会的高速发展,城市燃气越来越普及,国内外城市发生的由燃气管道系统、燃气燃具或工业可燃燃气系统引发的重大火灾爆炸事故愈加频繁,由此造成的人员伤亡和财产损失也越来越大。城市燃气管道多为中压和低压输送管道,一旦发生泄漏,由于燃气本身的易燃易爆特性,所形成的燃气-空气混合气在燃烧下限的范围内若遇到火源可能发生火灾或爆炸,由于城市的人员密集,会导致人员伤亡和财产损失。因此,需要对燃气事故后果进行预测,即伤害破坏半径的确定,为制定安全防范和应急救援措施提供依据。燃气管道风险管理是指对燃气管道经营所面临的风险进行评估,将管道运营风险程度控制在可接受的范围内,达到降低管道事故发生的概率,确保燃气管道经济、安全运行的目的。和发达国家相比,我国已建成的燃气管网大多运行时间较长,操作自动化程度较低,安全事故呈不断上升的趋势。因此,为了确保城市燃气管网的安全运行,有必要对燃气管网的风险评价方法进行研究,为加强城市燃气管网的安全管理打下基础。近年来,燃气管网的安全性评价技术发展很快<sup>[1-3]</sup>,很多专家学者在这方面做了很多的研究,但目前国内城市燃气管网的安全性评价往往局限于某一类或几类影响因素,不能全面系统地反映城市埋地燃气管网安全性。近年来,油气管道完整性管理成为国外油气管道工业中迅速发展的重要领域。美国于2000年通过立法强制油气管道企业在管道泄漏可能产生重大影响的区域制订完整性管理程序。油气管道完整性管理是以风险评价为核心的安全管理,风险的分析、评价和控制是管道完整性管理的重要内容,风险管理技术将在管道完整性管理中得到应用和发展。

收稿日期:2007-06-10;修订日期:2008-01-22

基金项目:上海市重点学科建设项目资助(T0602),上海市教委科研项目资助(06FZ006)

作者简介:高俊波(1972—),男,博士,讲师。

W Kent Muhlbauer 所提出的指数评分法即肯特法是能够较完整进行长输管道风险分析的方法. 但由于城市燃气管道与长输管道的建设与运行管理有明显差别, 所以本论文对肯特法进行了部分改进, 将其用于城市燃气管道的风险分析. 考虑到引起管网失效的各类因素并不都能数量化和模型化, 大多具有各种主客观不确定性, 用常规方法反而不能精确地描述客观实际; 另一方面, 对于失效可能性和失效后果的描述大量采用人为评分方式, 不同专家的经验不尽相同, 在一些个别问题上还会相互抵触. 引入模糊数学思想和方法, 会使评价和决策结果会更详细更精确. 本文以肯特评分法为基础, 利用肯特评分法对引起管网失效的各类因素进行分析, 并对其打分, 结合泄漏冲击指数得到管网的风险值. 在分析燃气管网失效因素的基础上, 利用模糊综合评判法及模糊事故树对燃气管网进行风险定量分析. 这几种方法的结合能使复杂问题清晰化, 从而找出问题的关键.

## 1 城市燃气管线风险分析方法

### 1.1 肯特分析法的改进和应用

在管网方面, 肯特评分法<sup>[49]</sup>是一种比较完整和系统的管道相对风险分析方法, 它将造成燃气管道失效的主要原因分为 4 类: 第三方破坏、腐蚀、设计和操作. 这是一种主观性分类记分技术, 通过赋予各风险因素的相对权重, 组成一个总的风险评分表, 它的优点是直观, 但是该方法在应用的开始阶段, 需要借助主观性和直观性. 指数评分法的核心是建立指标体系, 而要建立指标体系, 首先要确定系统的危险因素. 由于城市燃气管道与长输管道的建设与运行管理有明显差别, 肯特的指数评分法并不完全适用于城市燃气管道的风险分析, 指标体系是一个多级体系, 各级体系的因素项应力求符合客观实际, 从实际情况出发提炼因素项及其相对重要度, 在风险评价工作中接受检验, 不断完善, 使风险评价结果能真实反映风险状况, 提供合理信息, 促进安全水平的不断提高.

燃气管道风险评分方法框图见图 1. 在进行风险评价时, 假定影响燃气管道风险的各个因素是独立的、不相关的, 总风险是各个独立因素的总和. 同时在风险评价时应对各因素考虑到最坏的情况. 在评分时, 分数越高代表其越危险, 为了避免评分过程中人为主观性, 因此建议更多人参与, 制定出评定规范, 以保证评定的准确性.

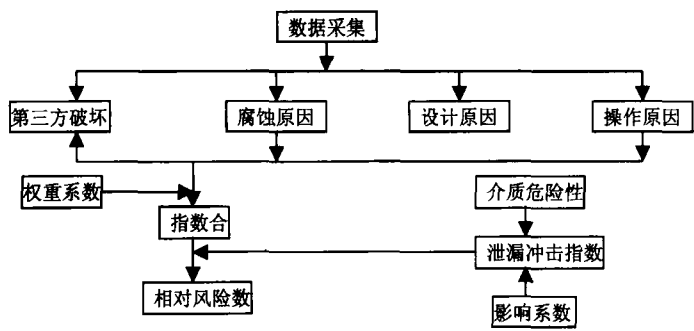


图 1 肯特评分法简图

Fig. 1 Kent analysis method

与其它方法相比, 作为一种半定量评价法, 肯特评分法具有以下一些优点: 它是目前

较为完整,较为系统的一种方法;并且比较容易掌握,易于工程应用与推广;此外,肯特评分法可由专家、工程技术人员、管理人员、操作人员共同评分,从而集中各个方面的意见,提高风险评价的准确性。

然而,由于城市燃气管道与长输管道的建设与运行管理有明显差别,肯特的指数评分法并不完全适用于城市燃气管道的风险分析,本文对用于评价长输管线风险的评分法,按照城市燃气管道的特点,进行了部分修改;并针对城市燃气管网的特点,对其影响因素的不同及其影响权重的分配如电流腐蚀等进行重新考虑,并将之运用于燃气管网的失效影响因素辨识及评分,进而计算其相对风险值。本文改进的肯特评分法如下。

**1.1.1 介质危险性评定** 介质的危险可以分为当前危险和长期危险。当前危险指管道失效后引起的爆炸、火灾、剧毒泄漏等,当前危险根据其可燃性、活化性和毒性分别评分,其评分范围为0—12分;长期危险指的是危险持续较长的时间,如水源的污染等,长期危险的评分范围为0—10分。分数越高代表危险性越大。

**1.1.2 影响系数的确定** 影响系数主要是根据泄漏与人口状况由式(1)来计算:

$$\text{影响系数} = \text{泄漏分} / \text{人口状况分} \quad (1)$$

#### (1) 泄漏分的评定

气体介质泄漏后,天然气若立即着火即产生燃烧热辐射;在危险距离内的人会受到热辐射伤害;天然气未立即着火可形成爆炸气体云团,遇火就会发生爆炸,在危险距离以内,人会受到爆炸冲击波的伤害,建筑物会受到损坏;若天然气中含硫化氢超过300PPm(约429mg/m<sup>3</sup>)时可能会导致漏点附近人员中毒。气体泄漏评分范围为1—6分,其分值越小表明越危险;

#### (2) 人口状况分的评定

人口状况分的评定是根据规定面积内人口的密度来评分的,人口状况分的范围为1—4分。人口越密集,分值越高,表明越危险;

#### (3) 影响系数

影响系数越小,泄漏冲击指数越大,风险越大。因此,由泄漏分与人口状况分可知,最坏情况下:泄漏分为1,人口状况分为4,影响系数为0.25;最好情况下:泄漏分为6,人口状况分为1,影响系数为6,即影响系数的变化范围为0.25—6。

**1.1.3 泄漏冲击指数的确定** 泄漏冲击指数是根据介质危险性影响系数由式(2)确定的:

$$\text{泄漏冲击指数} = \text{介质危险分} / \text{影响系数} \quad (2)$$

由前所述可见介质危险分的范围是1—22分,而影响系数的变化范围为0.25—6.0,可得泄漏冲击指数的变化范围为0.17—88,表示失效后果由轻微到严重。如果失效原因的评分值相同,由于失效后果相差很大,其相对风险值会相差88/0.17=518倍。因此,对于后果严重者,必须要求事故概率很低。

**1.1.4 相对风险数的计算** 相对风险数可按式(3)计算:

$$\text{相对风险数} = \text{失效总评分值} \times \text{泄漏冲击指数} \quad (3)$$

式中,失效总评分值等于第三方破坏评分值、腐蚀评分值、设计评分值和操作评分值与各自的权重系数相乘后的总和。这4个方面的失效因素又可以分解为若干子因素,如表1

所示.

由于第三方破坏因素、腐蚀因素、设计因素和操作因素的评分值均设定为 0 到 100 分之间,且四类因素的权重系数之和等于 4. 所以被评估管道最好的情况,即失效概率最低的情况为 0 分;而被评估管道最坏的情况,即失效概率最高的情况为 400 分. 前面计算得到泄漏冲击指数的范围为 0. 17—88,相对风险数为 0—35200,0 与 35200 都是不可能出现的极端情况,对于某一管道,其相对风险数是 0—35200 之间的某一个数值,数值越低,说明相对风险越小,即管道越安全;数值越高,说明风险越大,管道越危险.

表 1 城市燃气管网失效因素  
Table 1 Failure factors of urban gas fuel network

因素	子因素
第三方破坏	覆盖层最小埋深,活动水平,地面设施,公众教育,巡线,社会关系,报警系统
腐蚀	内腐蚀,外腐蚀,应力腐蚀,其它因素
设计	钢管安全因素,疲劳因素,水压实验情况,土壤移动状况,设计人员技术水平
操作	安全措施,材料选择,设计软件的可靠性,人员因素,设计验收

1. 2 模糊综合评判法的应用

虽然运用肯特分析法对各个破坏因素进行评分,可以求得城市燃气管道失效总评分值以及管道的相对风险数,然而,肯特管道风险评价法只是一种半定量风险评价法,不能有效地处理评分中存在的主观性和不确定性因素;而且在管网风险分析过程中,引起管网失效的各类因素并不都能数量化和模型化,对于失效可能性和失效后果的描述大量采用人为评分方式,存在模糊性,因此引入模糊数学思想和方法,将会使评价和决策结果会更详细、更精确. 模糊综合评判<sup>[10-12]</sup>可分为一级模型和多级模型两类,一级综合评判的模型只适合比较简单的系统,当评判需要考虑的因素较多时,由于每一个因素取得的权重分配值将很小,综合评判将得不到令人满意的结果,因此对燃气管网本文采取多级的模糊综合评判方法.

利用模糊综合评判的方法进行决策的关键包括以下几个方面:

- 1. 2. 1 评价因素的选择 根据管道风险赋值法中对管道风险的划分可以确定进行模糊综合评判的评价因素. 主要分为四部分,分别是第三方破坏、腐蚀、设计缺陷、不正确操作(表 1).
- 1. 2. 2 评价等级的确定 评价等级是评价者对评价对象变化区间的划分. 由于多数评价因素是很难直接用量化指标划分等级的,所以更多是使用一些如好、中、差或优、良、一般、差等模糊的定性形容词来划分等级.
- 1. 2. 3 权重系数的分配 在进行综合评价时,不同评价因素的影响作用程度是各不相同的,模糊综合评价是因素权重和单因素评价的复合作用. 权重系数的作用就是对不同的评价因素,根据其重要程度,赋予不同的权重系数,以调整其各自在综合评价和决策中的影响度. 权重系数的确定方法有许多,如排队法、分级导出法、平均值法和比较判断法.
- 1. 2. 4 多级模糊综合评判模型的建立 在建立了城市天然气管网运行风险模糊集合后,要进行模糊综合评价,就必须确定评价因素集中各因素与权重系数集中各权重系数的模糊隶属关系,也就是各因素对应于各权重系数的隶属度. 这种隶属度可以用以下方法

得出:

(1)首先,用已确定的评价因素集与权重系数集构造成评价表,并且尽可能给出每个等级的说明;

(2)请参加评价的每位成员分别根据等级说明和自己的判断,确定每个评价因素所属的等级,并填入评价表中;

(3)在同一因素中,把选择相同等级的人数相加,再除以参加评价的总人数,则可得出各因素隶属于各等级的隶属度.并可组成如下各因素与各等级之间的模糊关系矩阵:

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} V_1 & V_2 & \cdots & V_m \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & & r_{nm} \end{bmatrix} & \begin{matrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{matrix} \end{matrix} \quad (4)$$

式中,  $r_{ij} = x_{ij}/n$ ;  $x_{ij}$  是把第  $i$  个评价因素评价为第  $j$  个等级的人数;  $n$  是参加评价的人员总数.

由前面的模糊集合和模糊矩阵,我们可以建立如下的模糊综合评价模型:

$$B = A \odot R = (b_1, b_2, \cdots, b_m) \quad (5)$$

式中,  $(\odot)$  代表运算符,我们取乘和加运算,则式(5)可写成矩阵形式:

$$B = [A]_{1 \times n} \cdot [R]_{n \times m} = [b_1, b_2, \cdots, b_m] \quad (6)$$

式中,  $b_1, b_2, \cdots, b_m$  即为对评价因素的综合评价结果,反映了该层次所有评价因素总体对应于各评价等级的隶属情况.

**1.2.5 对评价结果的处理** 有了天然气管网安全运行模糊评价过程中某阶段的评价因素集、评价等级集和权重系数集,利用已建立的模糊综合评价模型,经过三个层次的模糊综合评价计算,可以最终得出该阶段与评价等级相对应的如下形式的一组数据结果:

$$B = (b_1, b_2, \cdots, b_m) \quad (7)$$

式中,  $b_1, b_2, \cdots, b_m$  即为对该阶段各评价因素等级的综合评判结果.

我们可以对式(7)进行如下处理:

(1)用 100% 分别乘以式中的每个数字,则可以得到一组百分数,其含义可以认为是赞成评价为  $V_1, V_2, \cdots, V_m$  等级的人各有百分之几;

(2)可以给每个等级  $V_1, V_2, \cdots, V_m$  从高到低,确定一个百分制分数.例如:如果等级分为优、良、一般、差、很差五等,则可以分别确定为优:85—100;良:70—85;一般:55—70;差:40—55;很差:40 以下.然后用式(8)计算其总得分:

$$BQ = \sum (b_i \cdot Q_i) \quad i = 1, 2, \cdots, m \quad (8)$$

式中,  $BQ$  实际上可以理解为是被评价对象经过评判所得到的平均等级分.  $Q_i$  相应评价等级分数范围的中间值.

如果以数理统计的观点来看,则此平均等级得分  $BQ$  就是抽样检测的结果,我们可以假设当参加评判的人数很大时,抽样结果的分布属正态分布,这时,就可以对式(8)的结果,用下式进行置信度估计:

$$ta(n-1) > (BQ - \mu) \sqrt{n/s} \quad (9)$$

式中,  $\mu$  取可立项分数的下限值,  $BQ$  为前述的平均等级分, 其它符号的含义见有关数理统计的书籍.

由  $ta(n-1)$  就可以根据  $t$  分布表查得评判结果的置信度.

用此方法进行处理时, 等级划分不宜太粗, 每一等级的分值的跨度应尽可能接近, 以减少计算误差.

## 2 结论

本文的研究主题为城市燃气管道定量风险分析模型的研究, 研究的目的是建立适合工程实际应用的管道失效概率、失效后果的评估方法, 为城市燃气管道的风险减缓和管理的研究打下基础. 通过上文的分析, 本文可以得出以下结论: 在城市燃气管网的风险分析中, 运用肯特评分法指标因素体系对燃气管网的失效影响因素进行辨识, 并对传统的风险分析模型进行修正和改进; 针对城市燃气管网的特点, 对其影响因素的不同及其影响权重的分配如电流腐蚀等进行重新考虑, 并将之运用于燃气管网的失效影响因素辨识及评分. 另外针对肯特管道风险评价法只是一种半定量风险评价法, 不能有效地处理评分中存在的主观性和不确定性因素的不足, 本文采用多极模糊综合评判方法对燃气管道的风险进行分析, 对燃气管网失效可能性和失效后果的描述进行数量化和模型化, 建立了城市燃气管网的风险定量分析模型.

## 参考文献

- [1] 王 蕾, 李 帆. 城市燃气输配管网的可靠性评价[J]. 煤气与热力, 2005, 25(4): 5-8  
Wang Lei, Li Fan. Reliability assessment of gas transmission and distribution systems in city[J]. Gas & Heat, 2005, 25(4): 5-8.
- [2] 何淑静, 周伟国, 严铭卿, 等. 燃气输配管网可靠性的故障树分析[J]. 煤气与热力, 2003, 23(8): 459-461  
He Shujing, Zhou Weiguo, Yan Mingqing, et al. Fault tree analysis for reliability of gas transmission and distribution network[J]. Gas & Heat, 2003, 23(8): 459-461.
- [3] 张 扬, 李 帆, 管延文. 埋地燃气管土质腐蚀性模糊综合评价[J]. 煤气与热力, 2006, 26(4): 12-14  
Zhang Yang, Li Fan, Guan Yanwen. Fuzzy comprehensive assessment of soil corrosivity for buried gas steel pipeline[J]. Gas & Heat, 2006, 26(4): 12-14
- [4] Kent W. Pipeline risk management manual(2nd Edition)[M]. Gulf Publishing Company, 2001
- [5] 李长俊. 天然气管道输送[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000  
Li Changjun. Transportation of natural gas pipelines[M]. Beijing, Petroleum industry press, 2000
- [6] 丁明江, 吴长春. 专家评分法在油气管道风险分析中的应用[J]. 油气田地面工程, 2004, 23(1): 14-15  
Ding Mingjiang, Wu Changchun. The analysis method used in oil and gas pipeline risk analysis[J]. Oil-gas field Surface Engineering, 2004, 23(1): 4-15
- [7] 汪定怡, 吕学珍. 城市燃气输配管道风险评价指数体系的建立[J]. 城市公用事业, 2005, 19(6): 36-39  
Wang Dingyi, Lv Xunzhen. The Establishment of Risk Evaluation Indicator System for Urban Gas Transmission and Distribution Pipeline[J]. Public Utilities, 2005, 19(6): 36-39
- [8] 陈学锋, 于倩秀. 油气长输管道安全评价方法——肯特法简介[J]. 安全、健康和环境, 2006, 6(3): 27-29  
Chen Xuefeng, Yu Qianxiu. Safety assessment method of oil/gas long pipeline—kent method's introduction[J]. Safety Health & Environment, 2006, 6(3): 27-29

- [9] 于倩秀,郑云萍.肯特危险指数分析法在油气长输管道安全评价中的应用[J].石油库与加油站,2005,14(5):27-30  
Yu Qianxiu,Zheng Yunping,Chen Xuefeng. Application of KENT danger index in appraisal on security of long distance pipelines[J]. Oil Depot and Gas Station,2005,14(5):27-30
- [10] 汪涛,叶健,张鹏.城市天然气管网的模糊风险评价方法[J].油气储运,2004,239(12):3-7  
Wang Tao,Ye Jian,Zhang Peng. The application of fuzzy collocation assessment method in the risk assessment of city gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2004,239(12):3-7
- [11] 田玉敏,刘茂.高层建筑火灾风险的概率模糊综合评价法[J].中国安全科学学报,2004(9):99-103  
Tian Yumin,Liu Mao. Comprehensive probability fuzzy evaluation of fire risk for high-rise buildings[J]. China Safety Science Journal,2004,(9):99-103
- [12] 严宇,张鹏,李江,等.城市燃气管网风险评价方法[J].油气储运,2006,25(9):16-19  
Yan Yu,Zhang Peng,Li Jiang,et al. Risk assessment method on city gas pipeline networks[J]. Oil & Gas storage and transportation,2006,25(9):16-19

## Research of Quantitative Risk Analysis Model for Urban Gas Pipeline Network

GAO Junbo, GUO Yue, WANG Xiaofeng

(Department of Computer Science,Shanghai Maritime University,Shanghai 200135, China)

### Abstract

According to the characters of gas fuel pipeline network in urban ,the determination method of the influential factors and the assignment method of weight of influence in Kent analysis method were all modified. In the modified Kent analysis method,those factors which caused pipeline failure were discussed. Besides, some factors of the gas-fuel pipelines have the disadvantage of uncertainty and could not be quantified and modelized. So,Fuzzy comprehensive evaluation method is applied to quantitative analysis and then the quantitative risk analysis model for urban gas pipeline network is developed. It may be useful for risk management and pipeline planning.

**Keywords:** gas fuel pipeline; kent analysis method; risk; fuzzy comprehensive evaluation method; quantitative analysis model