

# 基于关联熵与复合物元的地下管网健康度评估

杨秋侠, 刘 天

(西安建筑科技大学土木工程学院西安 710055)

**摘要:** 本文利用物元分析理论和信息熵理论对地下管网的健康度进行了定量的研究。首先在分析影响地下管网安全因素的基础上, 建立了地下管网安全度评价体系。其次, 通过第三方破坏因素和管网运营时间筛选出较易发生事故管段。再次, 利用关联熵结合复合物元的方法, 确定出了评价指标的权重, 并在此基础上计算复合物元, 针对地下管网健康度评价建立了综合评价模型。对地下管网健康度进行了量化分析。最后应实例验证了模型的有效性。结果表明复合物元模型计算过程简单、实用性强, 能够简明确切地反映出地下管网的健康程度。

**关键词:** 地下管网; 健康度; 评价模型; 关联熵; 复合物元

**中图分类号:** TU990.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2016)04-0522-07

## Evaluate of urban underground pipe network health based on relational entropy and complex matter element

YANG Qiuxia, LIU Tian

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In this paper, the health condition of underground pipeline system was researched quantitatively, using the matter element analysis theory and the information entropy theory. Firstly, an evaluating index system was established to assess the health condition of underground pipeline system, based on the analysis results of the factors which can hurt the underground pipeline system. Secondly, the complex matter element model can be built to assess the health condition of the underground pipeline system, by combining information entropy, correlation functions and complex matter element. Then, complex matter elements were calculated with the weight coefficients of factors which were given by the correlation entropy. At last, the validity of the model was tested by an example. The result shows that the model is both simple and practicable to reflect the health condition of underground pipe network.

**Key words:** underground pipe system; health degree; evaluation model; relational entropy; complex matter element

城市地下管网是城市基础设施的重要组成部分, 它担负着供水、排污、能量输送、信息传输等各类与居民生活、工业生产息息相关的任务, 是现代城市生产、居民生活的生命线。然而, 近年来由于城市大量工程建设、各部门自行其事, 地下管线缺乏统一规划及管理部门监管不严等原因而导致地下管网发生事故频频发生<sup>[1]</sup>。地下管网一旦发生事故便会造成道路的反复开挖, 管线的维修不仅会造成较大的经济损失, 还会影响到居民的生活和道路交通。所以地下管网的安全问题已经成为城市安全研究的热点话题。本文首先通过利用第三方破坏因素和管线的运营时间对管网进行简单筛选, 选出较易发生事故管段, 再利用关联熵与复合物元的数学方法对这些管段进行健康度评价得到评价结果排序。所谓健康度是指地下管道在规定的条件和条件下, 管道稳定、持续地完成预定功能的能力,

且不对社会、经济、环境造成负面影响, 是表述管道综合状况好坏的指标<sup>[2]</sup>。

为准确的描述地下管网健康度的特点和性质可借助物元的可拓性<sup>[3]</sup>, 可拓设计评价方法是建立在可拓集合论基础上的评价方法<sup>[4]</sup>, 该方法以物元理论为基础, 通过关联函数与指标函数的计算, 量化的描述评价目标, 得出推荐方案。由于在评价中涉及信息量多, 可以利用信息熵值理论, 作为方案评价的一个理想尺度<sup>[5]</sup>。针对地下管网的特点, 建立了影响地下管线健康度的复合物元。通过对相应指标的信息熵的计算得出指标权重值, 根据最后评价数据, 可以对后期的管线安全排查提供决策参考。

## 1 评价指标的确定

### 1.1 影响地下管网的主要因素

#### (1) 设计因素

收稿日期: 2015-08-08 修改稿日期: 2016-08-04

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划基金资助-面上项目 (2016JM5096); 陕西省教育厅专项科研基金资助 (16JK1445)

作者简介: 杨秋侠(1970-), 女, 博士, 副教授, 主要从事工业运输与总图布置的研究。E-mail: 1071277061@qq.com

满足相关设计规范是地下管网后期能够安全运营的基本要求,地下管网的管径、覆土厚度、接口形式、管材都关系着管网后期的运行状态。

## (2) 第三方破坏因素

据调查,引发城市地下管道的事故中,第三方破坏占很大一部分比例。其中主要是由于施工破坏和车辆荷载碾压破坏所造成的。施工破坏主要是由于一些建筑工地开挖基槽时不顾周围有无地下管线,就用机器进行开挖,从而造成地下管线的断裂。而汽车荷载碾压破坏主要是因为埋在机动车道下的地下管线长时间处在汽车荷载的压力作用的环境下,一些埋深较浅的管线就会因为长时间的压力作用发生破裂。

## (3) 腐蚀因素

我国城镇现役的大部分地下管线都已超过了使用年限,这些管线都存在着很大的安全隐患。经过调研发现超过使用年限的管网很多都出现了管材老化、腐蚀严重的情况,严重的还出现了断裂和泄漏。另外在一些杂散电流较多的地区,管道缺乏必要的保护措施,腐蚀严重。

## (4) 管理因素

相关部门的管理也是关系着地下管网安全的不可缺少的因素之一。首先,相关管理部门应严格按照规章制度对地下管网进行定期检查,特别是存在较大安全隐患的管网,更应该增加检查的频率,一旦检查出危险隐患及时作出处理。其次,定期对员工进行安全培训并对周围居民进行宣传教育,提高员工和居民的基本素质和安全意识。

### 1.2 地下管网健康度评价体系的建立

地下管网健康度评价需要考虑的因素很多,通过搜集国内外城市地下管网管理、建设及评估等相关研究,共搜集评价指标30余项。因此选择指标时应根据科学性、全面性、可行性、可比性、稳定性等原则来建立合理的评价指标体系<sup>[6]</sup>。本文基于以上观点和评价体系原则,将地下管网健康度评价因素划分为设计因素、第三方破坏因素、腐蚀因素、管理因素四大部分,选取管径、覆土厚度、压力、接口形式、管材、施工破坏、车辆和在碾压破坏、运营时间、外防腐层状况、定期检查制度、对检查出的危险隐患整改情况、安全培训及宣传教育等建立指标体系<sup>[7-10]</sup>,如图1所示。

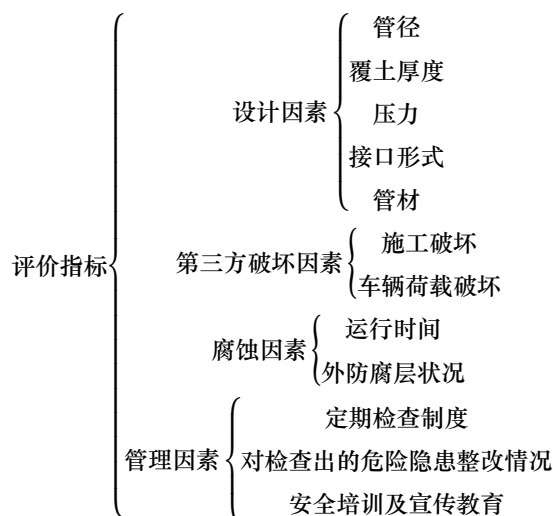


图1 地下管网健康度评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system for underground pipe network health

## 2 基于复合物元于关联熵分析的地下管网健康度评价模型

### 2.1 建立复合物元

地下管网健康度评价体系是一个整体,其各项指标组成一个系统,各项指标之间相互影响的方式较为复杂:如车辆荷载对地下管网的影响就与覆土

厚度和管材有关,覆土厚度较浅,车辆就容易对地下管网造成破坏。根据可拓学的基本理论,利用物元的可拓性可以解决上述问题,故选用复合物元来描述参选管段,可集中表示各管段的指标特性。

设某次评价共有 $m$ 个管段参加评价,每个管段由 $n$ 项指标来描述,由各指标建立用于管段评价的复合物元,记为 $R_{mn}$ 即:

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & \cdots & N_m \\ c_1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} & \cdots & x_{m1} \\ c_2 & x_{12} & x_{22} & x_{32} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_n & x_{1n} & x_{2n} & x_{3n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:  $N_i$  表示第  $i$  个参评管段;  $C_j$  表示管网健康度评价的第  $j$  项评价指标,  $x_{ij}$  为第  $i$  个评价管段对应于第  $j$  项指标的量值。

## 2.2 地下管网评价复合物的标准化处理

为了以下公式使用的方便, 需要对评价指标进行标准化处理。评价指标中管径、覆土厚度、接口形式、管材、定期检查制度、检查出危险隐患的整改情况、安全培训与宣传教育、外防腐层状况为效益性指标, 记为  $J^+$ , 采用式 (2) 进行标准化处理。压力、施工破坏、人为破坏、车辆荷载碾压破坏、运行时间, 记为  $J^-$ , 采用式 (3) 进行标准化处理。

$$\delta_{ij} = \frac{(X_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} X_{ij})}{(\max_{1 \leq i \leq n} X_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} X_{ij})}, (i=1, 2, \dots, n; j \in J^+); \quad (2)$$

$$\varepsilon_{i,j} = (\min_i \min_j |\delta_{i,j} - \delta_{0,j}| + 0.5 \max_i \max_j |\delta_{i,j} - \delta_{0,j}|) / (|\delta_{i,j} - \delta_{0,j}| + 0.5 \max_i \max_j |\delta_{i,j} - \delta_{0,j}|) \quad (5)$$

根据信息论中最大离散熵定理, 当各个符号出现概率相等时熵最大, 值为  $H_{\max} = \ln n$ 。则地下管段第  $j$  项指标  $C_j$  对应的信息熵如下:

$$F_j = K \sum_{i=1}^m f_{i,j} \ln f_{i,j} \quad (6)$$

其中:  $K = -(H_{\max})^{-1}$ ,  $f_{i,j} = \varepsilon_{i,j} / \sum_{i=1}^m \varepsilon_{i,j}$ ,

$j=1, 2, \dots, n$ ;  $i=1, 2, \dots, m$ ; 偏差度为  $k_j = 1 - F_j$ ; 指标  $C_j$  的权重系数如下:

$$\left\{ \begin{aligned} R_{mn} &= \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_i & \cdots & M_m \\ H_i & H_1 & H_2 & \cdots & H_i & \cdots & H_m \end{bmatrix} \\ &= \left[ \begin{array}{cccccc} M_1 & & & & & M_m \\ H_i & -\sum_{j=1}^n P(\varpi_j, \delta_{1j}) \ln P(\varpi_j, \delta_{1j}) & \cdots & -\sum_{j=1}^n P(\varpi_j, \delta_{ij}) \ln P(\varpi_j, \delta_{ij}) & \cdots & -\sum_{j=1}^n P(\varpi_j, \delta_{mj}) \ln P(\varpi_j, \delta_{mj}) \end{array} \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中:  $P(\varpi_j, \delta_{ij}) = \varpi_j \delta_{ij} \cdot \left[ \sum_{j=1}^n \varpi_j \delta_{ij} \right]^{-1}$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ ;  $j=1, 2, \dots, n$ 。

由熵值定义可知, 熵值越大表示管道的健康度越好。故以熵值大小对参评管段进行排序, 熵值越小的管段越要注意日常的检查和相关维护。

$$\delta_{ij} = \frac{(\max_{1 \leq i \leq n} X_{ij} - X_{ij})}{(\max_{1 \leq i \leq n} X_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} X_{ij})}, (i=1, 2, \dots, n; j \in J^-); \quad (3)$$

经过标准化处理后的  $m$  个立体交叉的  $n$  维复合物元为

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ C_1 & \delta_{11} & \delta_{21} & \cdots & \delta_{m1} \\ C_2 & \delta_{12} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{m2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_n & \delta_{1n} & \delta_{2n} & \cdots & \delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2.3 地下管网健康度评价指标关联函数及权重系数的确定

在评价因素体系中, 每个因素对实现系统评价目标和功能的重要程度各不相同。权重表示各因素的相对重要程度, 或表示一种效益替换另一种效益的比例系数。本文采用关联熵法来确定各指标的权重系数。首先确定关联函数  $\delta_{0,j} = \max_{1 \leq i \leq n} \delta_{i,j}$ ,

$j=1, 2, \dots, n$ , 则复合物元的第  $j$  项指标  $C_j$  具有的关联函数为<sup>[11]</sup>:

$$\omega_j = n / \sum_{j=1}^n k_j \quad (7)$$

由式 (7) 构造地下管网健康度评价指标权重的复合物元

$$R_{wj} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ \omega_j & \omega_1 & \omega_2 & \cdots & \omega_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 2.4 确定地下管网评价的复合关联熵物元 M 的参评管段的复合关联熵物元为

## 3 实例分析

下面分析某地区燃气管网的健康程度, 定量确

定地下管网的健康度评价指标. 某地区燃气输配系统采用中压一级系统, 中压管道压力 0.4 MPa. 天然气经门站调节后进入城区中压输气管网, 经管网把燃气输送楼栋调压箱等设备调为低压, 再送至各用户. 图 2 是在原图基础上经过精简, 剔除了街道名、调压设施、阀井等的燃气管网规划图.



图 2 某地区燃气管网规划图  
Fig2. A region of gas pipe network plan

管网仿真图是对城市管网系统的概括, 将该燃气管网规划图用 CAD 软件仿真后可详细的了解各管段的管径和节点情况. 如图 3 所示. (图中的三角形区域为距现场调研之日起两年内已竣工和还未竣工的施工项目.)

3.1 参评管段的选取

地下管网是一个庞大且复杂的系统, 如要对整

个管网的所有管段进行评价, 工作量相对过于繁重, 并且不是每个管段都有评价的必要, 所以本文就那些较容易发生故障的管段进行评价.

由管线事故统计可知, 第三方破坏是引起事故的重要因素, 同时管线运行时间超过使用年限也经常导致管线出现事故. 所以本文利用第三方破坏因素和运行时间超过使用年限为条件, 可确定出容易发生事故的管段.

根据图 3 的燃气管网仿真图首, 通过列表法对所有管段进行统计, 确定出较易发生故障的管段. 如表 1 所示

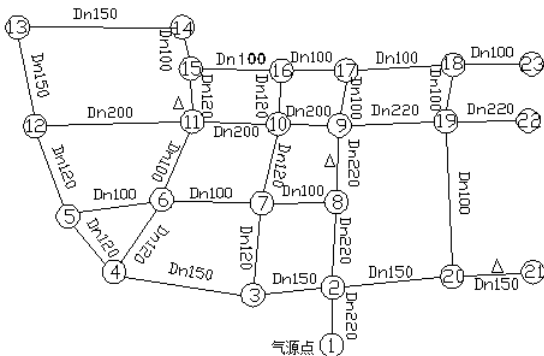


图 3 燃气管网仿真图  
Fig3.simulation diagram of Gas pipeline network

表 1 易发生事故管段选定表

Tab.1 Seletion of the section prone to accident

管段	施工破坏	车辆荷载 碾压破坏	运行时间 大于 10 年	管段	施工破坏	车辆荷载碾 压破坏	运行时间 大于 10 年
①-②		✓	✓	③-⑦			
②-③		✓		⑦-⑩			
③-④		✓		⑩-⑬			
④-⑤		✓		⑬-⑭			
⑤-⑫		✓		⑫-⑨		✓	
⑫-⑬				⑦-⑧			
⑬-⑭				②-⑧		✓	✓
⑫-⑪	✓	✓		⑧-⑨	✓	✓	✓
⑭-⑮				⑨-⑰			
⑮-⑪	✓			⑰-⑱			
⑤-⑥				⑨-⑲			
④-⑥				②-⑳			
⑮-⑯				⑳-⑲			
⑪-⑩		✓		⑲-⑱			
⑥-⑦				⑱-㉓			
⑯-⑰				⑲-㉒			
⑥-⑪				㉒-㉑	✓		

注: 1.图中每个管段✓情况是根据现场资料由专家判定.  
2.某些建筑工程施工时由于基槽开挖较深, 离地下管道较近, 使管道两侧受土的压力不均匀, 造成地下管道的损坏; 还有些拆迁工程很有可能对管线造成破坏. (距现场调研之日起 2 年内已竣工和还未竣的施工工程, 距离燃气管线 4m 范围内均认为对管线有影响) (GB50028-93)  
3.车辆碾压破坏根据道路等级判断, 道路等级越高, 车流量越大越容易对地下管线造成破坏.

4.如管段 $\checkmark \geq 1$  即被判定为较易发生事故管段.

根据现场资料和专家的评定结果，确定较易受到破坏的管段为：①-②、②-③、③-④、④-⑤、⑤-⑫、⑫-⑪、⑬-⑪、⑪-⑩、⑩-⑨、②-⑧、⑧-⑨、⑩-⑫）。为了方便描述将其按顺序一次标记为管段 G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9、G10、G11、G12.

3.2 地下管网评价指标值选取

该燃气管网较易发生事故管段的评价指标值如表 2 所示.

表 2 某地区燃气管网健康度评价指标取值  
Tab.2 Evaluation index value of gas pipeline health in a given area

评价指标		取值											
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12
设计因素	管径/mm	220	150	150	120	120	200	120	200	200	220	220	150
	覆土厚度/m	1.5	1.3	1.3	1.4	1.6	1.8	1.2	1.6	1.7	1.5	1.8	1.2
	压力/MPa	0.3	0.25	0.24	0.26	0.28	0.32	0.29	0.3	0.32	0.34	0.35	0.26
	接口形式（见注解）	3	4	4	4	4	3	4	3	3	3	3	4
	管材（管土相对刚度）	2.6	2.4	2.4	2.2	2.2	2.5	2.2	2.5	2.5	2.6	2.6	2.4
第三方破坏因素	施工破坏（见注解）	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2
	车辆荷载碾压破坏（见注解）	3	3	3	3	3	2	1	2	2	3	3	2
	运行时间/a	11	5	5	7	7	5	3	6	6	11	11	4
腐蚀因素	外防腐层状况（见注解）	3	3	4	3	2	3	4	3	3	2	3	4
	定期检查制度（见注解）	4	3	3	2	3	4	1	3	3	4	4	2
管理因素	对检查出的危险隐患整改是否及时（见注解）	5	4	4	3	3	4	2	3	5	5	5	2
	安全培训与宣传教育（见注解）	4	3	3	3	2	2	2	3	3	4	4	3

应用复合物元确定的燃气管网健康度物元矩阵为

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 & M_7 & M_8 & M_9 & M_{10} & M_{11} & M_{12} \\ c_1 & 220 & 150 & 150 & 120 & 120 & 200 & 120 & 200 & 200 & 220 & 220 & 150 \\ c_2 & 1.5 & 1.3 & 1.3 & 1.4 & 1.6 & 1.8 & 1.2 & 1.6 & 1.7 & 1.5 & 1.8 & 1.2 \\ c_3 & 0.3 & 0.25 & 0.24 & 0.26 & 0.28 & 0.32 & 0.29 & 0.3 & 0.32 & 0.34 & 0.35 & 0.26 \\ c_4 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 3 & 4 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 \\ c_5 & 2.6 & 2.4 & 2.4 & 2.2 & 2.2 & 2.5 & 2.2 & 2.5 & 2.5 & 2.6 & 2.6 & 2.4 \\ c_6 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ c_7 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 4 & 3 & 3 & 2 & 2 & 3 \\ c_8 & 11 & 5 & 5 & 7 & 7 & 5 & 3 & 6 & 6 & 11 & 11 & 4 \\ c_9 & 3 & 3 & 4 & 3 & 2 & 3 & 4 & 3 & 3 & 2 & 3 & 4 \\ c_{10} & 4 & 3 & 3 & 2 & 3 & 4 & 1 & 3 & 3 & 4 & 4 & 2 \\ c_{11} & 5 & 4 & 4 & 3 & 3 & 4 & 2 & 3 & 5 & 5 & 5 & 2 \\ c_{12} & 4 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 & 4 & 3 \end{bmatrix}$$

上述评价指标的权重矩阵经公式(2)和(3)标准化处理后为

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 & M_7 & M_8 & M_9 & M_{10} & M_{11} & M_{12} \\ c_1 & 0.9 & 0.34 & 0.34 & 0.1 & 0.1 & 0.74 & 0.1 & 0.74 & 0.74 & 0.9 & 0.9 & 0.34 \\ c_2 & 0.5 & 0.16 & 0.16 & 0.33 & 0.66 & 1 & 0.1 & 0.63 & 0.76 & 0.5 & 0.9 & 0.1 \\ c_3 & 0.46 & 0.82 & 0.9 & 0.75 & 0.61 & 0.31 & 0.54 & 0.46 & 0.32 & 0.17 & 0.1 & 0.75 \\ c_4 & 0.1 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.1 & 0.9 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.9 \\ c_5 & 0.9 & 0.5 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0.7 & 0 & 0.7 & 0.7 & 0.9 & 0.9 & 0.5 \\ c_6 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.1 & 0.1 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.1 & 0.1 \\ c_7 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.5 & 0.9 & 0.5 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0.5 \\ c_8 & 0.1 & 0.75 & 0.75 & 0.5 & 0.5 & 0.75 & 0.9 & 0.6 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0.8 \\ c_9 & 0.5 & 0.5 & 0.9 & 0.5 & 0.1 & 0.5 & 0.9 & 0.5 & 0.5 & 0.1 & 0.5 & 0.9 \\ c_{10} & 0.9 & 0.63 & 0.63 & 0.37 & 0.63 & 0.9 & 0.1 & 0.63 & 0.63 & 0.9 & 0.9 & 0.37 \\ c_{11} & 0.9 & 0.63 & 0.63 & 0.36 & 0.36 & 0.63 & 0.1 & 0.36 & 0.9 & 0.9 & 0.9 & 0.1 \\ c_{12} & 0.9 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.5 & 0.5 & 0.9 & 0.9 & 0.5 \end{bmatrix}$$

由公式 (6) 得关联函数矩阵为

$$\varepsilon_{i,j} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 & M_7 & M_8 & M_9 & M_{10} & M_{11} & M_{12} \\ c_1 & 1 & 0.417 & 0.417 & 0.333 & 0.333 & 0.714 & 0.333 & 0.714 & 0.714 & 1 & 1 & 0.417 \\ c_2 & 0.5 & 0.375 & 0.375 & 0.429 & 0.6 & 1 & 0.333 & 0.6 & 0.75 & 0.5 & 1 & 0.333 \\ c_3 & 0.478 & 0.846 & 1 & 0.733 & 0.579 & 0.407 & 0.523 & 0.478 & 0.407 & 0.354 & 0.333 & 0.733 \\ c_4 & 0.333 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.333 & 1 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 1 \\ c_5 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.333 & 0.333 & 0.667 & 0.333 & 0.667 & 0.667 & 1 & 1 & 0.5 \\ c_6 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.333 & 0.333 & 1 & 1 & 1 & 0.333 & 0.333 \\ c_7 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.333 & 0.333 & 0.5 \\ c_8 & 0.333 & 0.667 & 0.667 & 0.5 & 0.5 & 0.667 & 1 & 0.571 & 0.571 & 0.333 & 0.333 & 0.8 \\ c_9 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.333 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.333 & 0.5 & 1 \\ c_{10} & 1 & 0.6 & 0.6 & 0.429 & 0.6 & 1 & 0.333 & 0.6 & 0.6 & 1 & 1 & 0.429 \\ c_{11} & 1 & 0.6 & 0.6 & 0.428 & 0.428 & 0.6 & 0.333 & 0.428 & 1 & 1 & 1 & 0.333 \\ c_{12} & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

由公式 (7) 和 (8) 的燃气管网健康度评价指标权重的复合物元为:

$$R_{ai} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 & c_7 & c_8 & c_9 & c_{10} & c_{11} & c_{12} \\ \omega_i & 0.078 & 0.084 & 0.082 & 0.080 & 0.098 & 0.097 & 0.095 & 0.089 & 0.084 & 0.066 & 0.072 & 0.057 \end{bmatrix}$$

根据以上计算结果,并由公式 (9) 计算 12 个管段的健康度复合关联熵物元为:

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 & M_7 & M_8 & M_9 & M_{10} & M_{11} & M_{12} \\ H & 0.946 & 0.964 & 0.968 & 0.912 & 0.873 & 0.967 & 0.833 & 1 & 0.992 & 0.907 & 0.906 & 0.930 \end{bmatrix}$$

经过计算得出该管网的 12 条较易发生事故管段的优先排序关系为:  $G_8 > G_9 > G_3 > G_6 > G_2 > G_1 > G_{12} > G_4 > G_{10} > G_{11} > G_5$ 。所以应按该排列的倒序对这 12 条管段依次进行安全排查。

#### 4 结语

本文在分析城市地下管网健康度影响因素的

基础上,主要选取管径、覆土厚度、压力、接口形式、管材、施工破坏、车辆荷载碾压破坏、运行时间、外防腐层状况、定期检查制度、对检查出的危险隐患整改是否及时、安全培训与宣传教育为评价指标,建立了评价指标体系,采用关联熵法确定指标权重,运用物元分析理论,建立关联熵与复合物元评价模型,并举例验证了模型的有效性和可行性。

## 参考文献

## References

- [1] 刘克会, 江贻芳, 邓楠, 王艳霞. 城市地下管线主要风险因素分析[J]. 工程勘察, 2013.  
LIU Kehui, JIANG Yifang, WANG Yanyxia. The analysis of the urban underground pipeline main risk factors[J]. Engineering survey, 2013.
- [2] 颜文涛, 龙腾锐, 陈朝晖, 等. 城市污水管道实际健康度评价模型及应用研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(07):79-82.
- [3] 应时彦, 汪胜, 殷建军. 基于物元可拓性的配置规则衍生技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(6):1113-1117.  
YING Shiyan, WANG Sheng, YIN Jianjun. Derivation technology of product configuration rule based on extension of matter-element[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2010, 44(6):1113-1117.
- [4] 赵燕伟, 苏楠. 可拓设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
ZHAO Yanwei, SU Nan. Method of Extension Design [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [5] 杨秋侠, 单春林. 基于运输经济性的总图方案综合评价模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(6):791-796.  
YANG Qiuxia, SHAN Chunlin. Optimal selection of deep foundation pit sup program based on AHP and grey system[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech(Natural Science Edition), 2013, 45(6): 791-796.
- [6] 兰守奇, 张庆贺. 基于模糊理论的深基坑施工风险评估[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4):1000-4548.  
LAN Shouqi, ZHANG Qinghe. Deep foundation pit construction risk assessment based on fuzzy theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4):1000-4548.
- [7] 尤秋菊, 朱伟, 白永强, 等. 北京市燃气管网危险因素的事故树分析[J]. 油气储运, 2009, 28(9):27-30.  
YOU Qiujia, ZHU Wei, BAI Yongqiang, et al. Fault tree analysis on risk factors of underground gas networks of Beijing city[J]. OGST, 2009, 28(9):27-30.
- [8] 李海霞, 孙宝江, 谭诗瑶. 城市燃气管网系统脆弱性影响因素分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2013, 15(4):1673-1980.  
LI Haixia, SUN Baojiang, TAN Shiyao. The vulnerability factors analysis of city gas pipeline network System[J]. Chongqing University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013, 15(4):1673-1980.
- [9] BRITO A J. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94(2):187-198.
- [10] JOUNG Y D, Jong A B. Analysis of hazard area associated with high pressure natural gas pipeline[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2002, 15(3): 79-188.
- [11] 李锐, 任欢, 单春林等. 基于关联熵与复合物元的城市快速路立体交叉方案评价模型[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2014(1): 38-43.  
LI Rui, REN Huan, SHAN Chun-lin, et al. Evaluation

model of urban expressway interchange based on relational entropy and complex matter element[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2014(1): 38-43.

注解:

## 1. 接口形式

燃气管道的接口形式分为螺纹连接、承插连接、法兰连接、焊接连接等。

## ① 焊接

焊接的优点是焊口牢固、耐久, 严密性好, 焊缝强度一般可达到管子强度的 85% 以上, 甚至超过母材强度; 管段间直接焊接, 不需要接头配件, 构造简单, 成本低, 管路整齐美观, 使用后运行可靠, 不需要经常维修, 施工进度快, 劳动强度低。

## ② 法兰连接

法兰连接一般适用于大管径压力高的钢管或非金属管上, 拆卸安装方便、接合强度好、严密性好。但安装复杂, 安装精度高, 占用空间大。

## ③ 螺纹连接

螺纹连接适用于压力低, 管径小, 安装简单, 缺点是易发生滴漏, 人工套丝强度大。

## ④ 承插铸铁管

承插铸铁管最早采用青铅接口, 由于造价贵, 消耗大量有色金属, 早已被石棉水泥接口取代, 除在特殊情况下使用外, 一般很少采用。石棉水泥接口打口时, 劳动强度大, 效率低。开放以后一些单位进行了新的接口材料的试验, 大多数是利用接口材料的膨胀达到密封接口的目的。摆脱了繁重的打口工序, 提高了工效。其中较为成熟的有: 自应力水泥接口、石膏水泥接口。

根据各接口特性及优缺点由专家对接口打分, 打分区间为

接口形式	螺纹连接	法兰连接	焊接	承插连接
得分	2	3	4	2

## 2. 车辆荷载碾压破坏:

车辆荷载碾压对埋地管线的影响一般转化为道路等级对埋地管线的影响。道路等级越高, 通过车流量越多, 越容易对埋地管线造成碾压破坏。所以根据道路等级对管段所在道路进行打分, 打分区间 1~4 分

道路等级	一级道路	二级道路	三级道路	四级道路
得分	1	2	3	4

## 3. 外防腐层状况:

外防腐层状况检测系统一般包括管线敷设环境调查、防腐保温层状况非开挖检测、管道阴极有效性检测、开挖直接检测。根据检验结果, 对外防腐层状况进行分级, 原则上分为好 (4 分)、较好 (3 分)、一般 (2 分)、差 (1 分)。根据调研情况对各管段直接打分。

## 4. 定期检查制度:

根据《燃气管道定期检验规则》一般性检查次数每年不得少于一次, 所以根据管线一般性检查的时间间隔可对各管段定期检查制度打分。打分区间为 1~4 分。

时间间隔 / 月	6	12	18	24
得分	4	3	2	1

## 5. 对检查出的危险隐患整改是否及时:

对检查出的危险隐患整改是否及时是按发现隐患的时间起, 到采取相应措施的时间间隔进行打分。打分区间为 1~5 分。

时间间隔 / d	1~3	4~6	7~9	10~12	13~15
得分	5	4	3	2	1

## 6. 安全培训与健康教育

安全培训与健康教育因素按该管段所属管理部门对工作人员培训的时间间隔进行打分。打分区间为 1~5 分。

时间间隔 / 月	3	6	12	18	24
得分	5	4	3	2	1

施工破坏影响因素主要是由于一些工程施工时由于基槽开挖较深, 距离地下管道较近, 使管道两侧受土的压力不均匀, 发生沉降造成地下管道的折损破坏。施工破坏因素根据现场实际情况打分, 无影响 1 分, 有影响 2 分。

(编辑 沈波)