

基于 GIS 的供水爆管隐患评价及维护决策

任永昌

(渤海大学 信息科学与技术学院, 辽宁 锦州 121013)

摘要:通过地理信息系统对城市供水爆管隐患评价及维护决策,为供水企业科学管理提供分析和决策功能。首先运用层次分析法,对爆管影响因素评价指标进行总排序,计算每个指标的重要性权值,建立爆管隐患评价模型,根据评价等级进行初步维护决策;对初步决策需要维护的管段,在建立检测费用、维护费用、破坏费用等函数的基础上,建立维护决策模型,从而决策是否维护,以及采取哪种维护方案。在地理信息系统中运用爆管隐患评价模型及维护决策模型,可以减少维护费用及爆管事故损失费用。

关键词:地理信息系统;城市供水管网;爆管隐患;评价模型;决策模型

中图分类号:TU99

文献标识码:A

文章编号:1673-629X (2012)12-0249-04

Evaluation and Maintenance Decision about Water Supply Pipe Burst Hidden Trouble Based on GIS

REN Yong-chang

(College of Information Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

Abstract: Through the evaluation and maintenance decision about the urban water supply pipe burst hidden trouble from the GIS, provide analysis and decision function to the water supply enterprise for scientific management. First, use AHP (Analytical Hierarchy Process) to total the evaluation quotas about the factors of pipe burst, calculate the important weight of each quota, establish the evaluation model of pipe burst hidden trouble, according to the evaluation level to do initial maintenance decision; the initial decision needs which pipe should be maintained, on the basis of test cost function, maintenance cost function, damage cost function and so on, establish the maintenance decision model, to decide to maintain, or else, and take which maintenance program. Use the evaluation model of pipe burst hidden trouble and the maintenance decision model in GIS, may reduce the maintenance cost and the pipe burst accident cost.

Key words: geographic information system; urban water supply pipe network; pipe burst hidden; evaluation model; decision model

0 引言

爆管隐患评价也称爆管预警,是在定性分析供水管道爆管机理及其影响因素的基础上,总结城市供水爆管事故的规律,对城市供水管网爆管影响因素进行定量分析,建立供水管网爆管危险性评价模型。地理信息系统(GIS)是综合应用计算机、测绘遥感、现代地理学和自动制图等技术的交叉学科,已广泛地应用于应急救援、灾害损失预测、政府管理和军事等与地理坐标的相关领域^[1]。通过GIS提供的数据库管理与组织手段,建立供水管网的逻辑模型,在城市供水管网获得了广泛的应用。将计算机应用到该领域中,结合地理信息系统进行快速、准确的分析与计算,可以实现管理的

现代化。提取供水管网的潜在危险位置,通过维护决策模型,决策是否维护,以及采取哪种维护方案,为管网维护预案提供辅助决策,减少爆管事故发生及其损失。

1 爆管隐患评价

爆管隐患综合评价属于爆管危险性的多因素安全评价,可以了解某条管线的总体安全程度。导致供水管道发生爆管的原因有多个,但在分析管段的爆管危险性时,必须综合考虑各个影响因素的权重。针对研究区域内的现状,采用层次分析法确定爆管影响因子的权重,基于GIS技术建立管道爆管危险性评价模型,并对各个管道的爆管危险等级进行划分。

层次分析法(AHP, Analytical Hierarchy Process)是由美国运筹学家T. L. Satty在20世纪70年代初提出的,是进行决策分析、综合评价的一种简单有效的方法^[2]。特别适合难于完全用定量分析的复杂问题。文

收稿日期:2012-03-25;修回日期:2012-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70871067);2011年辽宁省东欧及独联体国家重点引智项目;2011辽宁省科学事业公益基金
作者简介:任永昌(1969-),男,教授,博士,从事城市管网、信息处理等研究。

中采用层次分析法,对爆管影响因素评价指标进行总排序,并计算每个指标的重要性权值。

1.1 爆管影响因素分析

根据爆管方式不同,爆管可分成两种类型,一类为管道结构破坏引起的爆管,指由于管道结构弹性降低或管道受到外力的作用超过其极限承载力时导致的管道结构破坏,造成的管道爆管。另一类为管道内表面受到腐蚀引起的爆管,管道内部腐蚀不仅会导致管道的口径减小以致阻塞,减弱管道的输水能力,降低水质量,严重时会出现管壁穿孔,导致管道破坏。这两种类型的管道破坏形式都会降低整个输水管网的可靠性^[3]。造成爆管的因素很多,主要原因归纳如下:

●管龄。指供水管道老化,长期超限运行,年久失修,造成爆管事故;

●管材。管材质地决定着管道的强度、抗腐蚀性 & 寿命,从而引起爆管事故;

●管径。小管径发生爆管事故尤为突出。管径越大,管壁越厚,对抗内外腐蚀的能力越强,使腐蚀所引起的故障越少;

●埋深。管道埋设的深浅及载重动荷载碾压作用,也是爆管的重要原因;

●水锤。由于停电及误操作而突然关阀、停泵产生的水锤振荡,也是引起爆管的重要原因;

●腐蚀。管材与水、土壤、空气或其它物质接触后,发生化学或电化学反应,受到腐蚀,从而引起爆管;

●地形。由于地形的差异,管网压力差别大,压力越高越容易发生爆管事故。

1.2 建立递阶层次分析结构模型

把实际问题分解为若干因素,按不同属性把因素分成若干组,递阶层次结构一般可分为最高层、中间层和最底层。最高层又称为顶层或目标层,只有一个元素,表示系统的目的或总目标;中间层又称为准则层,表示实现系统总目标所涉及的中间环节,根据问题规模的大小和复杂程度可以有多层;最低层又称为方案层或措施层,表示为实现目标所要选用的各种措施、决策、方案等。爆管隐患评价递阶层次分析结构共分两层,模型如图 1 所示。



图 1 爆管隐患评价递阶层次分析结构模型

1.3 构造判断矩阵

层次分析的主要信息是对每一层次中各因素的相对重要性做出判断,通过引入合适的标度进行量化,形成判断矩阵,表示相对上一层次的某一个因素,本层次有关因素之间相对重要性的比较。因为直接确定有关

因素之间的相对重要性很困难,因此用两两比较的方式建立判断矩阵。

设与上层因素 z 关联的 n 个因素为 x_1, x_2, \dots, x_n , 用 a_{ij} 表示 x_i 与 x_j 关于 z 的影响之比值,其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$, n 个因素关于 z 的两两比较的判断矩阵为^[4]:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

为了便于操作, Satty 建议使用 1~9 及其倒数共 17 个数作为标度来确定 a_{ij} 的值,习惯上称为 9 标度法。相对重要性取值如表 1 所示。

表 1 标度法的相对重要性取值表

标度取值	含 义
1	x_i 与 x_j 同样重要
3	x_i 比 x_j 稍微重要
5	x_i 比 x_j 明显重要
7	x_i 比 x_j 强烈重要
9	x_i 比 x_j 极端重要
2, 4, 6, 8	介于两种情况之间的取值
倒数	表示相反的情况,即重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

对于任意的判断矩阵 A , 有下列性质:

$$\begin{cases} a_{ij} > 0 \\ a_{ji} = 1/a_{ij} \\ a_{ii} = 1 \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

根据作者经验及专家讨论分析,第二层对顶层的判断矩阵如表 2 所示。

表 2 第二层对顶层的判断矩阵

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇
B ₁	1	2	7	3	1	6	5
B ₂	1/2	1	4	3	1/3	2	3
B ₃	1/7	1/4	1	1/3	1/2	1/3	1
B ₄	1/3	1/3	3	1	1/2	1/4	1/3
B ₅	1	3	2	2	1	3	4
B ₆	1/6	1/2	3	4	1/3	1	5
B ₇	1/5	1/3	1	3	1/4	1/5	1

1.4 层次单排序

层次单排序,是指利用线性代数知识计算矩阵的最大特征值及对应的特征向量,将特征向量归一化处理,结果即为该层次各评价因素对上一层次某因素影响程度大小的权重。通常有方根法以及和积法,在此采用方根法。

方根法是将判断矩阵 A 的各行向量采用几何平均,然后归一化,行到排序权重向量。以表 2 数据为例,计算步骤如下:

(1) 计算判断矩阵各行元素的乘积。

计算公式为:

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

对于第二层因素,计算结果如下:

$$M_1 = 1260, M_2 = 12, M_3 = 0.0020, M_4 = 0.0139, M_5 = 144, M_6 = 1.6667, M_7 = 0.0100.$$

(2) 计算乘积的 n 次方根。

计算公式为:

$$\overline{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (4)$$

对于第二层因素,计算结果如下:

$$\overline{W}_1 = 2.4209, \overline{W}_2 = 1.4262, \overline{W}_3 = 0.5874, \overline{W}_4 = 0.7182, \overline{W}_5 = 1.7702, \overline{W}_6 = 1.0757, \overline{W}_7 = 0.7815.$$

(3) 对向量 $\overline{W} = \{\overline{W}_1, \overline{W}_2, \dots, \overline{W}_n\}$ 作归一化处理。

计算公式为:

$$w_i = \overline{W}_i / \left[\sum_{i=1}^n \overline{W}_i \right] \quad (5)$$

对于第二层因素,计算结果如下:

$$\sum_{i=1}^7 \overline{W}_i = 8.781$$

$$w_1 = 0.2757, w_2 = 0.1624, w_3 = 0.0669, w_4 = 0.0818, w_5 = 0.2016, w_6 = 0.1225, w_7 = 0.0890$$

$\overline{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 即为所求的特征向量,即指标权重。

第二层对顶层的排序权重向量为 $\overline{W}^2 = (0.2757, 0.1624, 0.0669, 0.0818, 0.2016, 0.1225, 0.0890)^T$

根据权重向量,对爆管影响因素重要性由大到小排序依次为:管龄、水锤、管材、腐蚀、地形、埋深、管径。

1.5 爆管隐患评价模型

Cheng-I Ho (2011) 研究了利用地理信息系统和人工神经网络模型评估爆管和管道维护置换优先决策的方法,可以迅速找出漏点区域,制定多个备选方法,比传统方法更有效^[5]。文中综合考虑多因素影响,构造爆管隐患评价模型为线性判别函数 $F^{[6]}$, 即:

$$F = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (6)$$

式(6)中, $w_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为评价因素的权重值, $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为评价因素的特征值。

根据上述所选取的评价因素及计算得到的各评价因素权重,管道爆管隐患评价数学模型为:

$$F = 0.2757 \times \text{管龄等级} + 0.1624 \times \text{管材等级} + 0.0669 \times \text{管径等级} + 0.0818 \times \text{埋深等级} + 0.2016 \times \text{水锤等级} + 0.1225 \times \text{腐蚀等级} + 0.0890 \times \text{地形等级} \quad (7)$$

依据此数学模型,将计算结果划分为4个爆管隐患等级区,即易发生区、一般发生区、可能发生区、安全区,如表3所示。

表3 爆管隐患评价等级

等级	1	2	3	4
值 F	≤ 1	1 - 2	2 - 3	≥ 3
描述	安全区	可能发生区	一般发生区	易发生区

2 维护决策

通过爆管隐患评价模型确定爆管隐患评价等级后,根据评价等级进行相应的维护决策。究竟对哪种等级的管段进行维护,不同的管理部门有不同的决策标准,通常对易发生区和一般发生区要进行维护,对安全区不需要进行维护,对可能发生区一般也不需要维护^[7]。通过维护决策模型,决策是否维护,以及采取哪种维护方案。

2.1 费用函数

在建立维护决策模型前,先研究预期费用函数。第 i 管段的总预期费用 FT_i 包括三部分费用^[8]:

(A) 检测费用。

第 i 管段的检测费用,用 FL_i 表示,是管径 D_i 和交通状况 T_i 的函数。即:

$$FL_i = f(D_i, T_i) \quad (8)$$

城市的交通条件通常都较好,交通状况对管道的检测费用影响较少,可以忽略不计。根据对管道检测费用的统计分析,检测费用可用下式表示:

$$FL_i = 1000\alpha \cdot L_i \cdot D_i \quad (9)$$

式中, α 为管道单位检测费用,不同的检测技术单位检测费用不同; L_i 为第 i 段管道的检测长度; D_i 为第 i 段管道的管径。

(B) 维护费用。

第 i 管段的维护费用,用 FM_i 表示。供水管道维护方案很多,每种维护方案有不同的费用计算方法。最常用的维护方案有不处理、软管内衬和更新三种,下面研究这三种方案的维护费用。

● 不维护。

不发生维护费用,维护费用为0,即 $FM_i = 0$ 。

● 软管内衬。

维护费用是新建管道费用的函数:

$$FM_i = f(CU_i) \quad (10)$$

式中, CU_i 为第 i 管段的单位长度造价。

管道维护费用占新建管道投资的百分比不是管径的单调函数,通过回归分析,可用下式来表示:

$$FM_i = p \cdot L_i \cdot CU_i = (1.0354 - 1.32D_i + D_i^2) \cdot L_i \cdot CU_i \quad (11)$$

式中各参数表示的意义同上。

● 更新。

维护费用除新建管道费用外,还包括对已新建管

道的处理费用等其它费用,维护费用是新建管道的函数,可用式(10)表示。考虑更新费用与新建管道的投资比率,维护费用可用下式表示:

$$FM_i = \gamma \cdot L_i \cdot CU_i \quad (12)$$

式中, γ 为更新管道与新建管道的投资比率; L_i 为第 i 管段的新建长度; CU_i 为第 i 管段的单位长度造价。

(C) 破坏费用。

第 i 管段的破坏费用,用 FD_i 表示,包括直接损失费用和间接损失费用。有些间接费用很难量化处理,通常是建立与新建管道费用和实际健康度的关系。用下式表示:

$$FD_i = f(v_i, CU_i) \quad (13)$$

式中, v_i 为第 i 管段的实际健康度; CU_i 为第 i 管段的单位长度新建费用。

考虑到管道的破坏系数,破坏费用可用下式表示:

$$FD_i = (1 - v_i) \cdot \delta_i \cdot L_i \cdot CU_i \quad (14)$$

式中 v_i 、 L_i 、 CU_i 表示的意义同上; δ_i 为第 i 管段的破坏系数,数学含义为管道区域破坏惩罚系数。管道破坏后对区域环境和社会影响越大,惩罚系数选取越大。 $(1 - v_i)$ 可理解为第 i 段管段的综合破坏程度,与管道状态因素及社会环境因素有关。

2.2 维护决策模型

第 i 管段总预期费用是检测费用、维护费用、破坏费用之和^[9]。即:

$$FT_i = FL_i + FM_i + FD_i \quad (15)$$

式中, FT_i 、 FL_i 、 FM_i 、 FD_i 分别总预期费用、检测费用、维护费用、破坏费用。

问题的求解过程,就是按第 i 管段总预期费用 FT_i 最小化原则确定最佳的维护方案。

约束条件为:

$$FL_i + FM_i < FD_{\max} = \delta_i \cdot L_i \cdot CU_i \quad (16)$$

计划维护最优方案 k_0 为:

$$k_0 = \min\{k; FT_{ki}\} \quad (17)$$

城市供水管道主动维护费用不能超过管道的最大破坏费用,否则可以等到管 c 到破坏后再修补而没有主动维护的必要了,因此应满足式(16)的约束条件。根据约束条件以及国内外相关城市供水管道的破坏费用数据, δ 取值范围一般为 1~5。

3 结束语

随着地地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)以及遥感(RS)等空间信息技术(简称 3S 技术)的发展,3S 技术已经成为构建灾害预警和应急信息系统的核心技术^[10]。运用 3S 技术并结合高分辨率成像探地雷达系统研究设计管网结构进行爆管修复的设计与实

施也获得了应用^[11]。

城市供水管网系统拓扑结构复杂、规模庞大、变化随机性强,运行控制为多目标的网络系统。随着供水规模的不断扩大,供水管网系统的复杂性和多变性更为突出。利用传统的手工管理、图纸记录、人为处理信息、凭经验运行等方法很难满足现代化供水企业科学管理的需要。地理信息系统技术近年来虽然被广泛应用到城市供水管网系统中,为供水企业科学管理提供分析和决策功能^[12]。文中的研究内容,对供水企业运用地理信息系统对城市供水爆管隐患进行评价并对维护进行决策,可以辅助供水企业进行科学决策,减少维护费用及爆管事故损失费用,是地理信息系统领域重要的研究方向。

参考文献:

- [1] 李东平,姚 远. GIS 的发展趋势与数字地震应急救援的实现技术[J]. 计算机技术与发展,2011,21(1):214-217.
- [2] 吴祈宗. 系统工程[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
- [3] 黄廷林,邢翔轩,郭新潮,等. 地裂缝活动对城市供水管网供水安全性的影响研究[J]. 给水排水,2011,37(12):109-112.
- [4] 任永昌. 系统分析员综合能力评价指标体系建立[C]//第十届人-机-环境系统工程大会论文集. 出版地不详:出版者不详,2010.
- [5] Ho Cheng-I, Lin Min-Der. Use of a GIS-based hybrid artificial neural network to prioritize the order of pipe replacement in a water distribution network[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 167(1-4):177-189.
- [6] 项目课题组. 管网运行安全评价科研报告[R]. 北京:北京城市系统工程研究中心,2008.
- [7] 陈 兴,王 勇,吴凌云,等. 多阶段多目标多部门应急决策模型[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(11):1977-1985.
- [8] Kleiner Y. Optimal scheduling of rehabilitation and inspection/condition assessment in large buried pipes[C]//4th International Conference on Water Pipeline Systems- Managing Pipeline Assets in an Evolving Market. [s. l.]: [s. n.], 2001:181-197.
- [9] 颜文涛. 基于 GIS 的城市污水管网监测维护决策系统研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
- [10] 孙芹芹,陈少沛,谭建军. 基于 MDA 的城市地质灾害应急 GIS 模型研究[J]. 计算机技术与发展,2008,18(7):184-186.
- [11] Bimpas M, Arnditis A. Design and Implementation of an Integrated High Resolution Imaging Ground Penetrating Radar for Water Pipeline Rehabilitation[J]. Water Resources Management, 2011, 25(4):1239-1250.
- [12] 肖化政. GIS 环境下供水管网故障时决策系统的研究[D]. 长沙:湖南大学,2003.