

基于 GIS 的供水管网爆管检测与关阀算法

任永昌¹, 邢涛², 刘大成³

(1. 渤海大学 信息科学与技术学院, 辽宁 锦州 121013;

2. 北京城市系统工程研究中心, 北京 100089;

3. 清华大学 工业工程系, 北京 100084)

摘要:运用地理信息系统对城市供水管网爆管事故进行处理,可以及时抢修、降低损失,为供水企业科学管理提供分析和决策功能。文中从逻辑网络、爆管检测、关阀分析等方面进行研究。首先建立逻辑网络,基于图论的基本原理,构建管网模型,采用邻接表存储数据;然后是爆管检测,采用流量平衡法建立检测模型,并对模型进行讨论与分析;最后是关阀分析,采用广度优先遍历算法和函数递归调用原理,制定关阀方案,进行扩大关阀分析和影响用户分析,并给出具体实例。文中的研究内容,对于城市供水爆管事故处理具有很好的指导作用。

关键词:城市供水管网;地理信息系统;爆管事故;爆管检测;关阀分析

中图分类号: TU99

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2012)06-0258-04

Pipe Burst Detection and Valve-turnoff Algorithm on Water Supply Pipe Network Based on GIS

REN Yong-chang¹, XING Tao², LIU Da-cheng³

(1. College of Information Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. Beijing Research Center of Urban Systems Engineering, Beijing 100089, China;

3. Department of Industrial Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Dealing with urban water supply network tube rupture accident by using geographic information system can repair timely, reduce losses and provide analytic and decision-making function for scientific management of water undertaking. It is about the research on logical network, pipe burst detection, valve-turnoff analysis and so on. Firstly, it is about the establishing of logical network, constructing pipe network models based on the basic principles of graph theory, and adopting adjacent list to store data. Then, it is about pipe burst detection, establishing detection model by employing flow equilibrium method and making discussion and analysis on the model. Finally, it is about valve-turnoff analysis. Employ breadth-first traversal algorithm and recursive function theory to draw valve-turnoff plan, carry out analysis on expanded valve-turnoff and user influence and offer specific examples. The research content of the article can play an instructional role on pipe burst accident treatment of urban water supply pipe network.

Key words: urban water supply pipe network; GIS; pipe burst accident; pipe burst detection; valve-turnoff analysis

0 引言

爆管事故在城市供水系统中经常发生。大部分供水企业在发生爆管事故后,召集有关人员查阅图纸、开会研究、制定处理方案,延误了抢修时间,可能造成很大损失^[1]。随着地理信息产业的发展 and 计算机技术应用的普及,地理信息系统已经深入到各行各业,社会对地理信息系统的认识普遍提高,需求也大幅度增加,促

进了地理信息系统应用的逐步扩大与深化^[2]。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,通过GIS提供的数据管理与组织手段,建立供水管网的逻辑模型、对爆管事故进行检测、制定关阀策略,可以迅速组织力量进行抢修。将计算机应用到该领域中,结合地理信息系统进行快速、准确地分析与计算,可以实现管理现代化,从而减少抢修时间,缩小停水范围,将爆管事故造成的损失降为最小,提高工作的效率和准确性。

1 逻辑网络

在GIS中为了进行网络分析,将城市供水管网的几何网络对应逻辑网络。城市供水管网是有水流的

收稿日期:2011-10-31;修回日期:2012-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目(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。

“连通图”,基于图论的基本原理,管网模型可以用图论来分析^[3]。图由边和顶点构成,管网可以认为是由管段和节点构成的有向图,管网中的节点与连通图中的顶点相对应,管网中的管段与连通图中的弧段相对应。在 GIS 环境下,定义一条管段为由两个节点连接而成的管线。节点类型包括阀门、水表、三通、四通、消火栓等。

将供水管网记为 $D=(V,A)$,其中 V 为顶点集合,包括管网中参与爆管分析的所有点状要素, A 为弧集合,包括管网中的所有管线。一条方向从 v_i 指向 v_j 的弧, $v_i,v_j \in V$,记为 (v_i,v_j) 。

图的存储表示是网络分析的基础,比较常用的有邻接矩阵法、邻接表法、邻接多重表法等。为了进行爆管分析,构建拓扑关系时采用邻接表的思想来表示图。因为在邻接表上容易找到任意一个顶点的第一个邻接点和下一个邻接点^[4]。

邻接表是图的一种链式存储结构。每个节点由三个域组成:

- (1)邻接点域(adjvex)指示与顶点 v_i 邻接的点在图中的位置。
- (2)链域(nextarc),指示下一条弧的节点。
- (3)数据域(info)存储和弧相关的信息。

每个链表上附设一个表头节点^[5],如图 1 所示。

邻接点域	链接	数据域
adjvex	nextarc	info

(a) 表节点

顶点域	链域
vertex	firstarc

(b) 头节点

图 1 邻接表的表示方法

邻接表示如图 2 所示。供水管网网络拓扑关系的建立实际上就是生成管网中参与进行爆管分析的所有点状要素之间的邻接表。

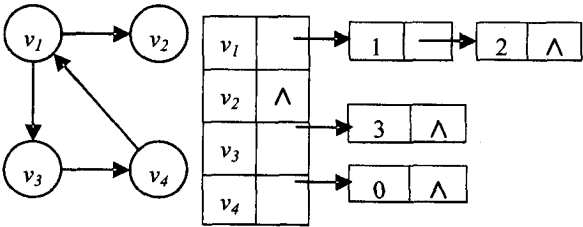


图 2 邻接表示例

2 爆管检测模型

针对输送管道爆管及泄漏检测的理论和应用近年来发展很快,广泛应用于石油、天然气等重要的能源输送管道,而针对城市供水自动在线检测的研究和应用并不多见。管道爆管及泄漏检测主要有压力梯度法、

负压波法、流量平衡法、声发射法、超声波检测法等,其中负压波法、流量平衡法等的应用比较成熟。对泄漏信号的处理有经典谱、现代谱、小波、模式识别、神经网络等方法,对泄漏状态的判断综合了模式识别、神经网络、分形处理等技术^[6]。文中爆管检测方法采用流量平衡法。

2.1 模型建立

管段爆管检测模型如图 3 所示。

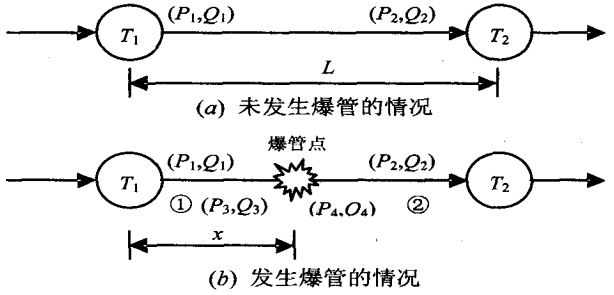


图 3 管段爆管检测模型

通常对城市供水管网设置若干个检测点来检测管段是否爆管,检测点的压力用 P 表示,单位为 MPa;流量用 Q 表示,单位为 m^3/s ,检测点的压力和流量构成二维数组 (P,Q) 。在管段长度为 L 的爆管检测模型中,设 T_1,T_2 是管段最临近的水力检测点,压力和流量构成的二维数组分别为 (P_1,Q_1) 和 (P_2,Q_2) 。

2.2 模型讨论

2.2.1 未发生爆管的情况

如图 3(a) 所示,讨论该管段在一小段时间内的情况。

流入时的压力大于流出时的压力,即有下式:

$$P_1 > P_2 > 0 \tag{1}$$

平均流入流量 Q_1 总是约等于平均流出流量 Q_2 ,即有下式:

$$Q = Q_1 \approx Q_2 \tag{2}$$

若不考虑流体压缩舒张作用,满管时供水管段的瞬时进出流量相等^[7]。

设 k 为与管段结构、材料有关的阻力系数,压力与流量之间存在一定的关联关系,即有下式:

$$P_1^2 - P_2^2 = kQ^2L \tag{3}$$

2.2.2 发生爆管的情况

当发生爆管时,以爆管点为界线,原来的管段可以被分解成①、②两段无爆管管段,在两段上仍可以分别套用未发生爆管时的计算公式。

由于爆管点相对于整个管段很小,根据帕斯卡定理,流体压力在爆管点两侧管中直接传递,基本是相等的,即有下式:

$$P_3 = P_4 \tag{4}$$

爆管点与检测点 T_1,T_2 间的流量关系如下:

$$Q_1 \approx Q_3, \quad Q_2 \approx Q_4 \quad (5)$$

压力与流量之间的关联关系如下:

$$P_1^2 - P_3^2 = kQ_1^2 x, \quad P_4^2 - P_2^2 = kQ_2^2 (L - x) \quad (6)$$

由式(4)和式(6)得:

$$P_1^2 - P_2^2 = kQ_1^2 x + kQ_2^2 (L - x) \quad (7)$$

整理式(7)得:

$$x = \frac{P_1^2 - P_2^2 - kQ_2^2 L}{k(Q_1^2 - Q_2^2)} \quad (8)$$

管段爆管检测模型中未发生爆管的情况用于判断爆管,发生爆管的情况用于确定爆管点位。

2.3 模型分析

2.3.1 阻力系数 k 的确定

设进出流量最大相对允许差值为 q_{\max} (根据城市供水管网漏损控制及评定标准 CJJ 92 - 2002, 可设为 3% ~ 5%); 满管稳定供水的水压下限为 P_{\min} 。在管段初装试压和年检正常的情况下, 根据以下公式测定:

$$k = \frac{(P_1^2 - P_2^2)}{Q^2 L} \quad (9)$$

2.3.2 爆管判断

在运行情况下, 根据水力检测点间的流量传递特性或检测点管压剧烈下降情况, 可以判断是否发生了爆管^[8]。若满足以下条件, 判断为爆管发生:

$$|Q_1 - Q_2|/Q_1 > q_{\max} \quad (10)$$

为了避免噪音干扰造成误报, 上式中的流量参数 Q_1 、 Q_2 利用时间窗口进行多点采样后的值平均得到。

还可以进一步判断破损程度。若 $P_1 > P_2 > P_{\min}$, 说明破损点前后仍基本处于满管带压供水, 为轻微爆管; 否则说明发生了严重爆管。

2.3.3 爆管点定位

若判断为轻微爆管, 按式(8)定位破损点。

严重爆管时, 由于不满足满管供水条件, 因此管压流量间的关联关系被破坏, 由此导致的定位结果也不准确, 在此不予讨论。

3 关阀分析

关阀分析首先从爆管地点出发对管网进行遍历, 找到构成最小封闭区域的所有阀门; 然后使用阀门控制信息进行筛选, 得到必须关闭的阀门; 最后从不必关闭的阀门出发做遍历, 找到所有受影响的用户。

3.1 关阀方案

3.1.1 初步关阀方案

在环状管网中关阀方案过程如下^[9]:

①标识故障管段。如果爆管位置在某管段上, 则将该管段标识为故障管段。若事故在阀门或节点, 根

据管网图的拓扑结构关系标识出故障管段。

②以故障点为中心, 采用确定影响区, 影响区中的管段所构成的集合为 G_1 。若故障点所在的管段两侧均有阀门, 将离故障点最近的两个阀门关闭即可^[10]。在这个过程中确定的影响区中关闭阀门构成的集合为 V_1 , 设 V_1 中的阀门对应的管段构成的集合为 G_2 , 则 $G_2 \subseteq G_1$ 。

3.1.2 最终关阀方案

通过初步的阀门搜索, 可以找出发生爆管事故时需要关闭的阀门。但是在这些阀门中可能存在一些不必关闭的阀门, 尤其是在管网中有多处管段发生事故时。因此要通过以下搜索过程找出这些不需要关闭的阀门。

没有搜索到的管段构成的集合为 G , 则 $G_1 \subseteq G$; 最终得到的集合 G_2 所对应关闭阀门的集合为 V , 则 $V \subseteq V_1$ 。集合 G 中的管段是必须停水的管段, 集合 V 中的阀门是必须关闭的阀门。

3.1.3 扩大关阀分析

必须关闭的阀门集 V 中某个阀门损坏或操作失灵而无法关闭时, 就必须进行扩大关阀分析^[11]。假定阀门 h ($h \in V$) 无法关闭, 阀门 h 的直接控制阀门为 v_3 , 则扩大关阀方案为关闭集合 $V_3 \cup V$ 中剔除阀门 h 后的所有阀门; 阀门 h 的直接受控管段为 G_3 , 事故的扩大关阀影响范围 $G_3 \cup G$ 。

3.1.4 影响用户

关阀分析过程中得到的所有进户点都是关阀影响用户, 只要与给水单位用户信息结合, 就知道哪些用户受到关阀影响。对于某个关阀影响用户, 如果被关的阀门是其唯一给水来源, 则该用户属于停水用户; 否则该用户属于受到关阀一般影响用户 (水压下降或供水不足, 但不一定停水)。

3.2 关键算法

爆管事故处理主要是根据图的广度优先遍历方法和函数递归调用的原理。

3.2.1 算法描述

广度优先遍历定义为: 首先访问出发点 v , 接着依次访问 v 的所有邻接点 w_1, w_2, \dots, w_i , 然后再依次访问与 w_1, w_2, \dots, w_i 邻接的所有未曾访问过的顶点。

若 G 是连通图, 则遍历完成; 否则, 在图 G 中另选一个尚未访问的顶点作为新源点继续上述的搜索过程, 直至 G 中所有顶点均已被访问为止。

在搜索过程中使用先进先出队列来保存已访问过的顶点。将每个已访问的顶点入队, 保证每个顶点至多只有一次入队^[12]。

3.2.2 广度优先搜索示例

以图 4 为例说明广度优先搜索的过程。首先从起

点 v_1 开始, v_1 有两个未曾访问的邻接点 v_2 和 v_3 ; 先访问 v_2 , 再访问 v_3 ; 然后先访问 v_2 未曾访问过的邻接点 v_4 , v_5 及 v_3 未曾访问过的邻接点 v_6 和 v_7 ; 最后访问 v_5 未访问过的邻接点 v_8 , v_9 , v_{10} 。至此图中所有顶点均已被访问过。得到的顶点访问序列为: $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3 \rightarrow v_4 \rightarrow v_5 \rightarrow v_6 \rightarrow v_7 \rightarrow v_8 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{10}$

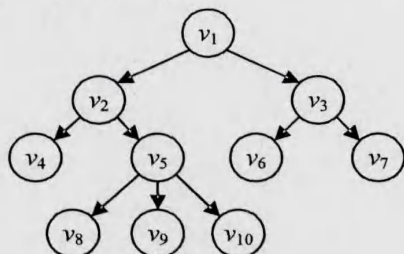


图4 广度优先搜索示例

3.3 关阀示例

以图5虚拟的供水管网模型为例,对关阀进行分析。

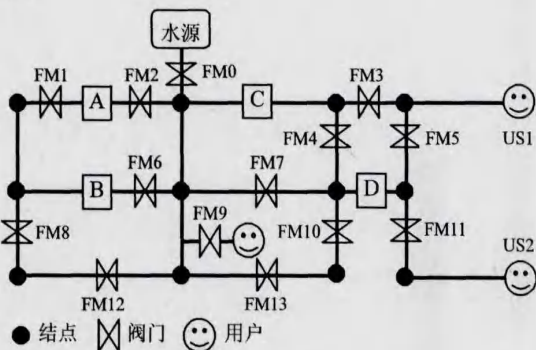


图5 关阀分析示例

3.3.1 初步关阀方案

①爆管事故发生在A处,管段的两个端点都是阀门,若不考虑阀门的故障,直接关闭这两个阀门即可,搜索结束。关闭阀门的集合为 $V = \{FM1, FM2\}$ 。

②爆管事故发生在B处,管段的一个端点是阀门FM6,直接关闭,该方向上的搜索结束;另一个端点是节点,采用广度优先遍历算法进行搜索,遇到阀门则关闭,遇到节点则继续搜索,直到搜索到所有要关闭的阀门。关闭阀门的集合为 $V = \{FM1, FM6, FM8\}$ 。

③爆管事故发生在C处,管段的两个端点是节点,在两个端点均采用广度优先遍历算法进行搜索,遇到阀门则关闭,遇到节点则继续搜索,直到搜索到所有要关闭的阀门。关闭阀门的集合为: $V = \{FM0, FM2, FM6, FM7, FM9, FM12, FM13, FM3, FM4\}$

3.3.2 最终关阀方案

爆管事故发生在D处,初步关闭阀门的集合为 $V = \{FM4, FM5, FM7, FM10, FM11\}$ 。但由于FM11所在的管段是支线管,关闭了 $\{FM4, FM5, FM7, FM10\}$ 后,下游FM11所在的管段已经没有水流通过了,所以不需要关闭。在最终关阀方案中,把FM11从关闭阀

门的集合中剔除掉。

3.3.3 影响用户

爆管事故发生在D处时,关闭阀门后影响US1和US2两个用户。对于US1用户,关闭的阀门FM5不是其唯一给水来源,可能造成水压下降或供水不足,但不一定停水;对于US2用户,关闭的阀门FM11是其唯一给水来源,属于停水用户。

4 结束语

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,但还未真正做到GIS技术与供水专业技术的有机结合,这也是未来一段时间地理信息系统的研究热点。文中的研究内容,对供水企业运用地理信息系统对城市爆管事故进行检测与处理具有很好的指导作用,是地理信息系统重要的研究方向。

参考文献:

- [1] 史义雄. GIS环境下供水管网事故关阀分析的研究与实现[J]. 城市管理与科技, 2005, 7(5): 204-206.
- [2] 曹丽娟, 杨丽芬, 张玉强. 基于组件技术的GIS数据格式转换研究与实现[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(9): 141-144.
- [3] 王利梅, 王 圆, 杨朝晖. 基于WebGIS的供水管网爆管事故关阀分析研究[J]. 供水技术, 2008, 2(6): 26-29.
- [4] Haestad, Walski, Chase, et al. Water Distribution Modeling (First Edition) [M]. New York: Haestad Press, 2001.
- [5] Booth R. Using GIS Technology to Manage Infrastructure Assets[J]. AWWA, 2001, 93(11): 58-73.
- [6] 宋中硕. 城市供水管网地理信息系统的研究与实现[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [7] 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.
- [8] McKinney D C, Cai X M. Linking GIS AND WATER resources management model: an object-oriented method[J]. Environment Modeling & Software, 2002, 22(17): 413-425.
- [9] 郭永林, 齐楠楠. 基于邻接表存储结构的潜藏通路搜索算法的研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(8): 1621-1623.
- [10] 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.
- [11] 徐少平, 吴信才, 曾 文. 基于GIS的供水管网水力计算模型[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(3): 176-178.
- [12] 李玉华, 孙希兵. 基于GIS的城市供水管网管理系统开发[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(4): 476-478.