

适用于关阀分析算法的供水管网单元-阀门图模型

曾文¹ 敖卿鑫¹ 杨之江¹

¹ 中国地质大学(武汉)信息工程学院,湖北 武汉,430074

摘要:关阀分析在供水管网施工中用来快速确定最佳的关阀停水方案,对于供水安全具有重要意义。在管网传统结点-边图模型的基础上,提出了优化实体数量并简洁表达拓扑结构的单元-阀门图模型。该模型是结点-边图的一种伪对偶图,它将管网内被阀门区隔形成的封闭连通区域归为顶点,将分隔两个区域的阀门作为边。设计了关断单元生成算法,从而实现单元-阀门图的构建,并提出基于该模型的高效供水管网关阀分析算法。实验表明,与基于结点-边图的传统算法相比较,结合单元-阀门图模型的新算法能够大幅度提高关阀分析效率,并且可以在多施工点情况下得出正确的关阀方案。

关键词:供水管网;分析模型;关阀分析;地理信息系统
中图分类号:P208 **文献标志码:**A

供水企业在爆管抢修以及接水施工时,需要关闭一定数量的阀门实现施工点(爆管处或者管段施工处)的停水。关阀分析就是在适当的管网数据模型基础上,求取尽可能少的需关阀门,并使关阀后受影响的供水区域最小。准确高效的关阀分析算法对于保障供水安全、减少事故损失具有重要意义。

地理信息系统(GIS)技术在供水管网管理中的应用,为关阀分析提供了一种基础的数据模型,即结点-边图模型。这种模型将管网整体抽象为一个图,管点就是图中顶点,管段即为图中的边。例如,ArcGIS的Geodatabase网络模型将管网抽象为一个有向图,为管段定义了3种资源流向^[1-2]。王方雄等人基于该模型设计了一种适用于单源树状结构的关阀分析算法^[3]。更多的研究将管网抽象为无向图,相应的关阀分析算法通常由搜索候选阀门、筛选关键阀门和确定停水区域等3部分组成^[4-6]。

结点-边图模型是管网真实状况的直接反映,把所有管点(阀门、三通、弯头等)以及管段都视为模型的组成单元,要素数量庞大、拓扑结构复杂,从而直接制约了网络分析的效率。因此,一些研究者探讨使用更加简洁有效的管网模型来实施各类分析。Walski提出,在进行管网可靠性分析时,阀门的阻断功能对决定管网内各实体间的连

通关系起到关键作用,应该重点考察阀门与被阀门分隔开来的各部分(segments)之间的连接关系^[7-8]。这一思想为管网模型的研究提供了新思路。众多学者在此基础上提出规模更小、结构更简化的新模型并应用于管网可靠性评估及管网优化设计等领域^[9-11]。

无论基于何种模型,既往的关阀分析算法一般只考虑单点施工的情况。而在实际的管道施工中,经常需要同时从多个主干管道接水;在特殊灾害状况下管网也可能出现多处管道爆裂故障,需要同时抢修。这些应用场景说明,设计针对多施工点的关阀分析算法是非常必要的。

本文首先在Walski的管网简化思想基础上提出供水管网单元-阀门图(unit-valve graph, U-V图)模型,讨论该模型的快速构建方法;然后设计了基于该模型的面向多施工点的关阀分析算法(multi-leak valve closing algorithm, MuVCA)。最后使用真实供水管网数据对新的模型和算法进行了验证。

1 单元-阀门图模型

U-V图的构建是以关断单元(isolated unit, IU)的定义为基础的。设图 $G(V, E)$ 是代表某个供水管网的原始结点-边图模型,则 $G(V, E)$ 中的

收稿日期:2013-05-30

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41201385)。

第一作者:曾文,博士,教授,主要从事地理信息系统和最优化方法研究。E-mail:zengwen69@163.com

关断单元 IU 是满足如下条件的所有导出子图 $G'[V']$: ① V' 中任意两个结点之间至少存在一条不以阀门为内部结点的路径; ② 对任意结点 $v \in V - V'$, 至少存在一个结点 $w \in V$, v 与 w 之间的路径要么不存在, 要么以阀门为内部结点。

U-V 图模型以 IU 为顶点, 以阀门为边, 是原始结点-边图模型的一种伪对偶图。图 1 所示是一个供水管网的结点-边图模型, 矩形表示阀门, 三角形表示水源, 圆形表示其他类型管点。该模型中包含三个 IU , 其管段分别用三种不同线型表示。

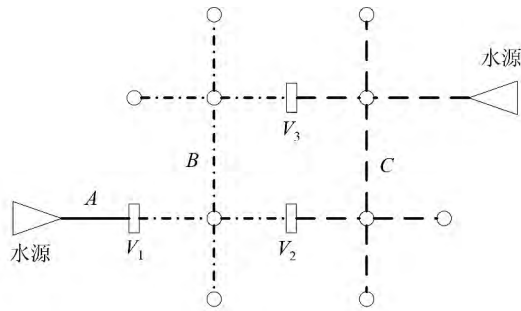


图 1 关断单元
Fig. 1 Isolated Unit

图 2 所示即为与图 1 相对应的 U-V 图模型。与原始图相比, 这个图模型要简洁很多, 更清晰地体现出阀门在管网中的关断作用。对于 A 和 C 这样的包含水源的 IU , 我们称为水源性关断单元 (source isolated unit, SIU)。在 U-V 图中, 所有管网设施至少归属于某个 IU 。非阀门实体所属 IU 是唯一的, 而处于 IU 边界的阀门 (如阀门 V_1 , V_2 和 V_3) 则同时与两个 IU 相关联。

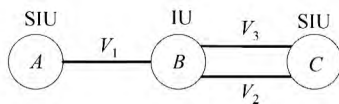


图 2 单元-阀门图模型
Fig. 2 Unit-Valve Graph Model

2 构建单元-阀门图

为了完成 U-V 图的构建, 首先需要生成 U-V 图中的所有顶点 (即 IU)。在生成全部 IU 的过程中, 如果将每个 IU 的边界阀门记录下来, 就可以实现 U-V 图中顶点与边 (即阀门) 的连接, 从而形成完整的 U-V 图。

为了快速从原始的结点-边图模型得到所有 IU , 我们设计了生成 IU 的“种子填充算法”。该算法的核心操作是以一条边为种子执行遍历操作

来构建一个新的 IU : 选择一条未归属到任何 IU 的边, 从它的两端结点开始遍历原始图, 把访问到的边收集到同一 IU 中, 在遍历过程中一旦遇到阀门就停止在该方向的搜索。当不再能够访问到新的结点和边时, 本轮遍历结束, 即完成了一个新 IU 的生成, 然后取下一个种子开始新一轮遍历。这一操作反复执行直至找不到新的种子时 (全部边都有了归属的 IU) 为止。

关断单元生成算法的伪代码如图 3 所示, 该算法的输入为原始管网图 $G_0(V_0, E_0)$, 图 G_0 中边的编号为 $0 \sim m-1$, 节点编号为 $0 \sim n-1$, r 为包含水源节点的关断单元, SRC 为水源节点集合, VAL 为阀门节点集合, 队列 Q 用来存放遍历过程中遇到的节点, 操作 $INITQUEUE(Q)$ 初始化空队列 Q , 操作 $DEQUEUE(Q)$ 取出队列 Q 的头元素并将其从 Q 中删除, 操作 $ENQUEUE(Q, v)$ 判断 v 是否在 Q 中, 若不在则将其加入 Q 。算法执行完毕之后, 得到 p 个关断单元, 编号为 $1 \sim p$, 集合 R 内包含了全部 SIU , 所有边所属的关断单元被记录在数组 $mp[0 \sim m-1]$ 中, 所有节点所属的关断单元被记录在数组 $up0[0 \sim n-1]$ 和 $up1[0 \sim n-1]$ 中。

```

输入: 原始管网图  $G_0(V_0, E_0)$ 
输出: 所有关断单元及它们与阀门节点的关联关系

1 for  $i = 0$  to  $m-1$ 
2    $mp[i] = 0$ ;
3 for  $i = 0$  to  $n-1$ 
4    $up0[i] = up1[i] = 0$ ;
5  $p = e = r = 0$ ;
6  $INITQUEUE(Q)$ ;
7 for each edge  $e(u, v) \in E_0$ 
8   if  $mp[e] == 0$ 
9      $p = p + 1$ ;  $mp[e] = p$ ;
10     $ENQUEUE(Q, u)$ ;  $ENQUEUE(Q, v)$ ;
11    while  $Q \neq \Phi$ 
12       $u = DEQUEUE(Q)$ ;
13      if  $up0[u] == 0$ 
14         $up0[u] = p$ ;
15         $up1[u] = p$ ;
16      if  $u \in SRC$ 
17         $R = R + p$ ;
18      for each edge  $e(u, v) \in E_0$  and  $u \in VAL$ 
19        if  $mp[e] == 0$ 
20           $mp[e] = p$ ;
21           $ENQUEUE(Q, v)$ ;

```

图 3 关断单元生成算法

Fig. 3 Isolated Unit Constructing Algorithm

在上述算法的基础上可以直接构建完整的 U-V 图, 所有 IU 都是 U-V 图的顶点, 而阀门 v 是否为 U-V 图的边则取决于它的两个标记值 $up0[v]$ 和 $up1[v]$, 若它们相等, 则说明该阀门位

于某个 IU 内部,不形成 U-V 图中的边;反之,该阀门就处于两个 IU 的交界处,在 U-V 图中形成一条边。

3 面向多施工点的关阀分析算法

面向多施工点的关阀分析算法 MuVCA 如图 4 所示。它在 U-V 图模型的基础上运行,能够得到多施工点情况下的正确关阀方案,即在截断所有施工点水流的前提下,关闭尽量少的阀门,并使停水区域最小。

```

输入: 供水管网的单元-阀门图 $G(V, E)$ 和施工点集合 $L$ 
输出: 关键阀门集合 $CV$ 和停水管段集合 $FP$ 

1  $LC = \Phi; CE = \Phi; CV = \Phi; FP = \Phi;$ 
2  $INITQUEUE(Q);$ 
3 for each leaked-pipe  $lp \in L$ 
4    $LC = LC + mp[lp];$ 
5   for each edge  $e(mp[lp], v) \in E$ 
6      $CE = CE + v;$ 
7 for each vertex  $v \in R$  and  $v \notin LC$ 
8    $ENQUEUE(Q, v);$ 
9 while  $Q \neq \Phi$ 
10   $u = DEQUEUE(Q);$ 
11  for each edge  $e(u, v) \in E$ 
12    if  $e \in CE$ 
13       $CV = CV + e;$ 
14    else
15       $ENQUEUE(Q, v);$ 
16 for each vertex  $v \in V$  and  $v \notin Q$ 
17   for each pipe  $p$  in  $v$ 
18      $FP = FP + p;$ 
19 return  $CV$  and  $FP;$ 

```

图 4 关阀分析算法 MuVCA

Fig. 4 Valve-Closing Algorithm MuVCA

该算法主要步骤是:首先将所有施工点所属的 IU 加入集合 LC,然后把把这些 IU 的全部关联边加入候选阀门集合 CE。这些关联边代表了施工点周边起到隔离作用的全部阀门,可以保证截断施工点水流,同时它们又是离施工点最近的阀门,从而保证了停水区域最小;但是,CE 中可能有部分阀门通向下游分支管道,而非连通水源,实际上并不需要关闭。我们需要将 CE 中真正起到隔离水流作用的关键阀门识别出来,以实现关闭尽量少的阀门。算法接着从每个 SIU 出发遍历 U-V 图,若访问到集合 CE 中的边就将其加入关键阀门集合 CV 并停止在该方向的搜索。遍历结束之后,将所有未被遍历到的 IU 内的管段加入集合 FP,算法执行完毕。集合 CV 代表了全部关键阀门,集合 FP 代表了全部停水管段。

4 算法分析及实验验证

阀门关闭方案只由施工点、阀门和水源三者之间的连通关系决定。由 U-V 图模型的定义可知,每个 IU 内的实体都不被阀门所阻隔,将其抽象为关断单元作为 U-V 图中的顶点,并以阀门为边将这些顶点连接起来,不会破坏任何实体间的连通关系。无论是基于传统结点-弧段图还是基于 U-V 图,关阀分析算法的核心任务都是对相应的图进行一次遍历,考察实体间的连通关系以确定最终关阀方案。由于 U-V 图维持了结点-弧段图的连通关系,基于 U-V 图的 MuVCA 算法与传统关阀分析算法是等价的。

两种算法的核心操作都是对图进行一次遍历,在使用邻接表作为图存储结构的情况下,图遍历的时间耗费与图中顶点数和边数成线性正比。在面对相同供水管网时,两种算法所依赖的基础数据模型,其顶点和边的总数差异较大,往往接近一个数量级。由于 MuVCA 算法的基础模型规模小得多,在实际应用中的效率明显优于传统算法。具体而言,假设某管网的管点数目为 n ,管段数目为 e ,阀门数目为 v ,构建 U-V 图后的 IU 数目为 u ,则基于原始结点-弧段图和 U-V 图的关阀分析算法的问题规模分别为 $n+e$ 和 $u+v$,在实际管网中,阀门数 v 远小于管点总数 n ,单元数 u 远小于管段数 e ,所以新算法的问题规模远小于传统算法。

在针对 MuVCA 算法的实验验证中,首先考虑它对于多点施工情况的适应性。在实际的管网施工中,经常会遇到如下情况:某新建小区通水工程中,经常会有多个接水口,施工时需要在几个不同的道路主干管上接入引水管道。图 5 便是利用 MuVCA 算法针对这种情况进行的关阀分析结果,图中的圆点代表普通管点,共有两根输水管线通向水源,其余管线均通向无水源区域。选定管道 P_1 和 P_2 为新建小区 A 的接水施工点,分析结果显示共需关闭 4 个阀门 V_1, V_2, V_3 和 V_4 ,图中虚线表示关阀后的停水区域。

为了验证基于 U-V 图的 MuVCA 算法的效率优势,采用文献[4]中所阐述的传统关阀分析算法作为比较的对象。虽然 MuVCA 算法可以处理多个施工点,但是比对时只考虑单一施工点的情况。这样做的原因,一方面因为文献[4]给出的算法并没有考虑多施工点;另一方面,实验表明,与单一施工点情况相比, MuVCA 算法在处理多

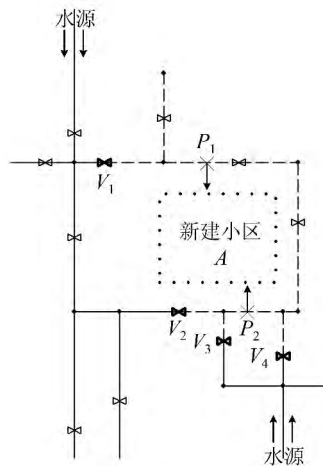


图5 多点施工情况下的关阀分析实例

Fig. 5 Instance of Valve-Closing in Case of Multiple Construction Points

施工点情况时所耗费的时间并无明显差异,因为无论有多少个施工点,该算法都只执行一次遍历搜索。

算法实验的程序编译和运行环境分别为 Visual Studio 2010 和 Windows 7 Ultimate; 硬件设备采用 1.8 GHz 双核 AMD CPU 和 4 GB RAM; 实验数据为中国某东部城市真实的供水管网数据,该供水管网的总体信息如表 1 所示,原始结点-弧段图中共有 14 728 个结点和 14 899 条边,而 U-V 图中只有 1 652 个结点和 1 817 条边,后者较前者而言,结点数减少了 88.8%,边数减少了 87.8%。若以结点和边的总数衡量图的规模,则 U-V 图相较原始结点-弧段图的规模缩减比例达到 88.3%,差异接近一个数量级。

表 1 管网总体信息

Tab. 1 General Information of the Pipe Network

数据类型	管点 n	管段 e	水源	阀门 v	关断单元 u
实体数量	14 728	14 899	3	1 817	1 652

实验中使用传统算法和 MuVCA 算法分别为随机选取的 500 个施工点求解关阀方案,对两种算法的运行时间差值进行排序后,生成图 6 所示的坐标图,横坐标左侧表示差值较小的施工点,右侧表示差值较大的施工点。在 500 对实验结果中, MuVCA 算法的耗时始终少于传统算法,其中 MuVCA 算法的平均耗时为 0.63 ms,而传统算法的平均耗时为 3.81 ms,平均效率提升 83.5%。

5 结语

供水管网的结点-弧段图模型是对物理实体的直接记录,图中元素与管网设施存在一一对应

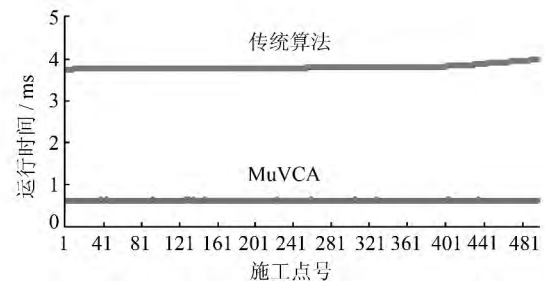


图 6 算法运行时间对比图

Fig. 6 Runtime Comparison Between the Two Algorithms

的关系,便于对设施的空间分布、属性信息和连接关系进行管理,所以在 AM/FM/GIS 系统中被广泛采用,作为管网的数据模型。但是,这种模型数据量庞大,不利于管网规划、水力建模、关阀分析、脆弱性评价等各项专业分析。所以,需要在原始数据模型的基础上开发面向专业分析的分析模型,满足实际应用对分析效率的要求。本文提出的管网简化模型就是一种分析模型,可以预先生成并重复使用。相比原始图,简化模型包含的元素少得多,更加简洁,除了用于关阀分析,还可以应用于管网设计和脆弱性评价等其他方面。在管网简化模型的基础上设计的关阀分析 MuVCA 算法具有明显的效率优势,并且能够适应多点同时施工的状况,从而可以更有力地支持管网的应急处置和安全施工。

参考文献

- [1] Zeiler M. Modeling Our World: the ESRI Guide to Geodatabase Design[M]. Kapiolani: ESRI Press, 1999: 140-141
- [2] ESRI. Building a Geodatabase[M]. Kapiolani: ESRI Press, 2004: 207
- [3] Wang Fangxiang, Cui Yu. Optimization and Implementation of Pipe Burst Analysis Algorithm Based on GIS[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2012, 36(3): 575-578(王方雄, 崔羽. 基于 GIS 的管网爆管分析算法优化与实现[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(3): 575-578).
- [4] Deng Haiying, Zhao Hongbin, Xie Bin. Resolution of Valve Closing Scheme for Water Supply Networks Accident[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 16(6): 42-44(邓海英, 赵洪宾, 解斌. 供水管网事故时阀门关闭方案的确定[J]. 中国给水排水, 2010, 16(6): 42-44)
- [5] Chen Peng, Zhuang Baoyu, Zhao Xinhua. Topolog-

- ical Analysis for Water Distribution System Under Failure State [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(9): 48-51(陈芑, 庄宝玉, 赵新华. 事故状态下供水管网的拓扑分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(9): 48-51)
- [6] Huang Ling, Sheng Kesu. Study and Implement of the Valve-turnoff Analysis in GIS for Urban Flow Pipe Network Management[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2003, 20(4): 85-88(黄玲, 盛克苏. 城市供水管网 GIS 系统中关阀分析的研究与实现[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003, 20(4): 85-88)
- [7] Walski T M. Discussion of "Quantitative Approaches to Reliability Assessment in Pipe Networks" [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1987, 113(5): 585-587
- [8] Walski T M. Water Distribution Valve Topology for Reliability Analysis [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1993, 42(1): 21-27
- [9] Jun H, Loganathan G V, Deb A K, et al. Valve Distribution and Impact Analysis in Water Distribution Systems[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, 133(8): 790-799
- [10] Giustolisi O, Savic D. Identification of Segments and Optimal Isolation Valve System Design in Water Distribution Networks[J]. *Urban Water Journal*, 2010, 7(1): 1-15
- [11] Creaco E, Franchini M, Alvisi S. Evaluating Water Demand Shortfalls in Segment Analysis[J]. *Water Resource Manage*, 2012, 26(8): 2 301-2 321

The Unit-valve Graph Model of Water Supply Networks for Valve-closing Analysis Algorithm

ZENG Wen¹ AO Qingxin¹ YANG Zhijiang¹

¹ Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Valve-closing analysis is used to obtain the optimal valve-closing scheme in maintenance of water distribution networks, which is significant for water supply security. A new pipeline analysis model, unit-valve graph, is presented based on the traditional node-link graph model, which has much less features and concise topology. As a pseudo-dual graph of the original node-link graph, the unit-valve graph classifies the network regions isolated by valves as vertexes, and takes valves as edges. An efficient isolated unit constructing algorithm is designed based on the node-link graph, which helps to build the unit-valve graph. Further more, an efficient valve closing algorithm based on the unit-valve graph is developed. Experimental results show that the new algorithm has a remarkable advantage in terms of efficiency compared with the traditional algorithm and get a correct valve closing scheme even in the case of multi point construction.

Key words: water supply networks; analysis models; valve-closing analysis; geographic information systems

First author: ZENG Wen, PhD, professor, specializes in geographic information systems and optimization methods. E-mail: zengwen69@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41201385.