

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.09.018

# 考虑最小隔离单元的古城镇消火栓维修策略分析

太梅婷<sup>1</sup>, 贾睿<sup>1</sup>, 杜坤<sup>1</sup>, 魏云飞<sup>2</sup>, 宋志刚<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 弥泸大型灌区泸西管理局,  
云南 红河 661000)

**摘要:** 云南省许多古城镇设置了专用消防管网,但由于常年暴露在室外,消火栓易发生故障。然而,由于复杂的管网拓扑结构及不合理的阀门布置,如何有效确定关阀策略对故障消火栓进行维修是当前面临的难题。针对上述问题,提出了利用Johnson最短路径算法生成距离矩阵,通过充分利用管网INP文件反映的带阀门管网拓扑结构特点,一次性找到故障消火栓对应的最小关阀布局,进而快速识别最小隔离单元,使故障消火栓的维修对管网的影响最小。相较于之前的方法,所提出的方法无需构建连通性矩阵或进行水力计算、添加虚拟阀门,故具有计算效率高、使用方便的优点。将该方法应用于云南某古城镇专用消防供水管网中,并根据关阀数与故障消火栓导致的停用消火栓数,提出了分级关阀维修和维护消火栓策略。结果表明,该古城镇管网中需要重点维护的消火栓占总数的30.82%,而需要优先维修的消火栓占32.87%。

**关键词:** 古城镇消火栓; 最小隔离单元; 维修; 阀门

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)09-0116-07

## Strategies for Fire Hydrant Maintenance in Ancient Towns Considering Segment

TAI Mei-ting<sup>1</sup>, JIA Rui<sup>1</sup>, DU Kun<sup>1</sup>, WEI Yun-fei<sup>2</sup>, SONG Zhi-gang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Milu Large-scale Irrigation District Luxi Management Bureau, Honghe 661000, China)

**Abstract:** Many ancient towns in Yunnan Province have set up special fire protection pipelines, in which these fire hydrants are prone to malfunctions because of perennial exposure to the outdoors. However, the effective determination of the valve closing strategy for repairing faulty fire hydrants is currently a challenge due to the complex topology of the pipeline network and unreasonable valve arrangement. In response to the above issues, a distance matrix was generated by using Johnson's shortest path algorithm, the minimum valve layout corresponding to the faulty fire hydrant was found at once by fully utilizing the topological structure characteristics of the pipeline network with valves reflected in the INP file, and thus segment was quickly identified to minimize the impact of faulty fire hydrant repair on the pipeline network. Compared with the previous methods, the proposed method did not require the construction of connectivity matrices or hydraulic calculations, or the addition of virtual valves, thus

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52260011); 云南省重点研发计划项目(202203AC100004)

通信作者: 杜坤 E-mail: 765818261@qq.com

having the advantages of high computational efficiency and convenient use. The method was applied to a special fire water supply network in an ancient town in Yunnan Province, and the strategy for graded valve closure repair and maintenance of fire hydrants was proposed according to the number of closed valves and the number of unworkable faulty hydrants. In the ancient town pipe network, 30.82% of the fire hydrants required key maintenance, while 32.87% of the total fire hydrants required priority maintenance.

**Key words:** ancient town fire hydrant; segment; maintenance; valve

云南存在许多古城镇,其中包括连片建造的木结构建筑群,其耐火等级低、火灾荷载大、火灾危险源多,导致火灾事故频发<sup>[1]</sup>。例如,2021年2月14日,被誉为“中国最后原始部落”的翁丁村老寨因火灾而几近毁灭。这些古城镇消防设施的建设与维护普遍滞后,是导致火灾无法及时被扑救的重要原因。针对上述问题,云南省在这些古城镇建设了专用的消防管网,但由于消火栓长期暴露在外会导致腐蚀、老化、阀门失效、接口失效等问题,影响其正常使用。例如,在云南大研古城的实际调查发现,由于缺乏有效的关阀策略指导,一些消火栓在出现故障以后多年内一直未得到有效修理,导致存在巨大火灾隐患。虽然《消防给水及消火栓系统技术规范》(GB 50974—2014)规定消防给水管道应采用阀门分成若干独立段,每段室外消火栓的数量不宜超过5个,但由于设计人员的疏忽和山地城镇实际施工中的困难,导致一些管段没有按要求设置阀门。

实地调研发现,一些故障消火栓直接连接在消防管网上,未单独设置隔离阀,维修时甚至需要关闭十多个上下游阀门。对拓扑复杂的环状给水管网,关阀策略的制定需要考虑如何使关阀数量最少,进而使受影响的隔离单元最小,这是涉及图论知识的复杂问题<sup>[2]</sup>。针对这一问题,Wéber等<sup>[3]</sup>与Gupta等<sup>[4]</sup>提出了广度与深度搜索算法,确定了距离故障点最近的阀门,但对大型供水管网存在计算量大等缺点。鉴于此,Liu等<sup>[5]</sup>提出应用管网拓扑关联矩阵并结合水力计算替代深度或广度优先算法。然而,该算法需要修改拓扑矩阵以插入虚拟管道代表阀门并反复进行水力计算,存在使用难度大等不足。高铁军等<sup>[6]</sup>使用虚拟阀(克隆真实阀门生成虚拟阀门)来建模隔离阀,并采用改进的最短距离算法中的Warshall算法计算节点传递闭合集,从而实现单点事故和多点事故的供水管网全网关阀预案。

虽然该方法不需要复杂的水力运算模型,但虚拟的阀门对会使管网的拓扑结构更加复杂,有可能导致无用的计算。Hernandez等<sup>[7]</sup>利用连通性矩阵构造了管道和节点连接矩阵,以查找阀门确认最小隔离单元的边界,然后利用深度优先搜索算法寻找边界内的元素。此方法需要在确定边界元素后才开始找寻最小隔离单元,无疑增加了工作量且步骤繁杂。商业软件WaterGEMS<sup>[8]</sup>通过图论和水力模型来识别最小隔离单元,但其购买价格高昂且无法直接给出消火栓的关阀策略。

鉴于此,笔者提出了基于Johnson最短路径算法的最小隔离单元识别程序,其能用于快速识别给定故障消火栓的最少关阀数。与传统算法不同,所提出的算法无需构建连通性矩阵、无需进行水力计算、无需添加虚拟阀门(真实阀门与虚拟阀门构成“阀门对”,指示阀门开闭状态),而是利用管网的INP文件(水力模型通用文件)反映的带阀门管网拓扑结构特点,直接利用Johnson算法快速生成节点最短路径矩阵,以判断阀门位置和识别最小隔离单元,因此具有计算效率高、算法结构简单、容易理解的优点。将所提出的方法应用于云南某古城镇消防管网,给出了各消火栓故障时最小隔离单元的关阀策略,以及因阀门关闭导致其他消火栓的停用数,并以此为依据对消火栓的重要程度进行了分级。上述研究成果能为消防部门提供科学、高效和可靠的消火栓维修和维护方案,以提高古城镇消防的应急处置能力和防灾减灾水平。

## 1 方法介绍

### 1.1 最小隔离单元的定义

同故障点影响下的最小隔离单元失效与单个管道失效程度对比结果如图1所示。供水管网的最小隔离单元是指关闭阀门以隔离故障消火栓形成的管网最小隔离区域<sup>[6]</sup>,然而以往研究主要集中在

考虑独立或单个管道破裂的失效事件上。Walski<sup>[9]</sup>指出,实际管网故障分析应基于最小隔离单元开展,这是由于实际中并非每个管道两端都设有阀门。因此,开发高效的管网最小隔离单元识别算法具有重要意义。

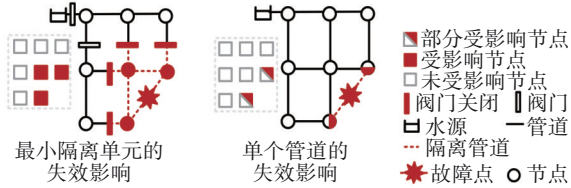


图1 同故障点影响下的最小隔离单元失效与单个管道失效程度对比结果

Fig.1 Comparison results of the degree of failure of segment with that of a single pipe under the influence of the same failure point

## 1.2 基于Johnson算法的最小隔离单元识别

Johnson算法<sup>[10]</sup>是一种常用的最短路径算法,适用于稀疏图中节点间的最短路径问题。Johnson算法通过Bellman-Ford算法<sup>[11]</sup>进行权重转换和消除负权边,然后再多次使用Dijkstra算法<sup>[12]</sup>来计算最短路径。具体来说,首先利用Johnson算法计算最短路径,然后生成最短距离矩阵 $M$ 。最后,根据矩阵 $M$ 识别最小隔离单元。

### ① Johnson算法计算最短路径的实现过程

a. 构建原始图 $G=(V,E)$ ,其中 $V$ 表示图中的节点集合, $E$ 表示图中的边集合。

b. 初始化:往构建的原始图 $G$ 中新增虚拟节点 $n+1$ (用于帮助重新调整所有的边权),使该节点指向图 $G$ 中的所有顶点都建立连接,得到转化后的图 $G'$ ,使从该虚拟节点到图 $G$ 每一个点的权重为0。

c. 使用Bellman-Ford算法计算单源最短路径<sup>[13]</sup>,得到最短路径数组 $h[]=\{h[0], h[1], \dots, h[V-1]\}$ 。

d. Bellman-Ford法转换权重:使用上一步骤中Bellman-Ford算法计算的最短路径值对原来的图进行重赋值,即对于每个边 $(i,j)$ ,其新的权值为 $w'(i,j)$ ,得到式(1)并满足式(2),以保证 $w'(i,j) \geq 0$ 。

$$w'(i,j) = w(i,j) + h[i] - h[j] \quad (1)$$

$$h[j] \leq h[i] + w(i,j) \quad (2)$$

式中: $w'(i,j)$ 为新权值; $w(i,j)$ 为原权值; $h[i]$ 为从虚拟节点 $n+1$ 到节点 $i$ 的最短距离长度, $m$ ;  $h[j]$ 为从虚拟节点 $n+1$ 到节点 $j$ 的最短距离长度, $m$ 。

e. Dijkstra算法计算距离:去掉虚拟节点 $n+1$ ,用Dijkstra算法计算 $G'$ (留下的原始图 $G$ 的边权重修正后生成转化后的图)。

f. 得到最短路径矩阵:返回的是 $|V| \times |V|$ 的矩阵 $M=w(i,j)$ (矩阵对角线上的元素始终为0,非对角线上的零值表示源节点和目标节点之间的距离为0,Inf表示源节点和目标节点之间没有路径),该矩阵 $M$ 称为图 $G$ 的最短距离矩阵。

### ② 寻找最小隔离单元的实现过程

图2为识别最小隔离单元的步骤,首先输入文件,其次建立最短距离矩阵,最后输出最小隔离单元的节点集合。

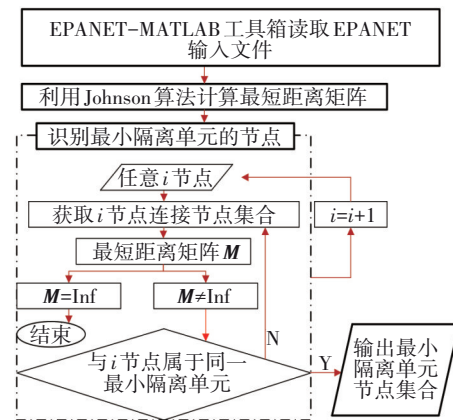


图2 识别最小隔离单元的步骤

Fig.2 Step-by-step diagram for identifying segment

a. 输入文件:在MATLAB中调用EPANET MATLAB Toolkit<sup>[14]</sup>工具箱读取EPANET的INP文件(在MATLAB2016b中调用EPANET2.2软件构建的管网拓扑模型)。

b. 建立矩阵:获取连接管段的节点索引以构建节点矩阵,且稀疏化以减少运算量<sup>[15-16]</sup>。建立无向图的邻接矩阵,并将上三角部分(包括对角线)的元素设为0,确保在后续计算最短路径时不会重复计算。最后,利用Johnson算法计算最短距离以得到矩阵 $M$ 。

c. 输出集合:遍历节点间距离矩阵 $M$ 的每一行,找出与 $i$ 节点连接的节点,并找出 $M$ 中距离不等于Inf的元素,最终得到最短距离矩阵的节点集合。

## 1.3 简单举例管网

最短距离矩阵将阀门识别为“节点对”,从而简化拓扑结构(见图3),简化结果见表1。Walski<sup>[9]</sup>提出供水管网的图论方法并认为水源、节点为“节



点”,管段和阀门为“边”。然而,本研究将阀门简化为“节点对”。这是由于在节点最短距离矩阵的寻找过程中,阀门被视为两个紧挨着且没有距离的“节点对”。这意味着网络模型中的每个隔离阀都表示为由两个节点界定的连接,以与 EPANET 文件格式一致(EPANET 中,阀门对应两个索引编号)。尽管该表示将每个阀门细分为两个节点,但它使用拓扑中已经存在的连接而不是伪连接(如虚拟阀门等)来精确地保持隔离阀的位置。

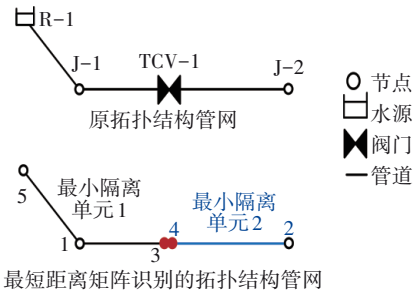


图3 简单举例管网

Fig.3 Simple pipe network

表 1 简化结果

Tab.1 Simplified results

项 目	节 点		阀 门		水 源
原编号	J-1	J-2	TCV-1		R-1
最短距离矩阵识别的编号	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5

最短距离矩阵见表 2(3、4 表示阀门)。由最短距离矩阵  $M$  的第一行可知,节点 1、3 和节点 1、5 之间的距离为非 Inf,而节点 1、2 和节点 1、4 之间的距离为 Inf(不存在距离),即可知节点 1、3、5 属于同一最小隔离单元,而节点 1、2、4 属于不同最小隔离单元,直到遍历元素得到所有的最小隔离单元集合。具体结果见表 3。

表 2 最短距离矩阵

Tab.2 Matrix of shortest distances

节点编号	1	2	3	4	5	属性
1	0	Inf	0.39	Inf	0.35	节点
2	Inf	0	Inf	0.50	Inf	节点
3	0.39	Inf	0	Inf	0.74	阀门
4	Inf	0.50	Inf	0	Inf	阀门
5	0.35	Inf	0.74	Inf	0	水源

表 3 最小隔离单元节点

Tab.3 Segment nodes

项 目	节点编号
最小隔离单元 1	1、3、5
最小隔离单元 2	2、4

1.4 计算评价指标

图 4 为消防栓的分级指标。

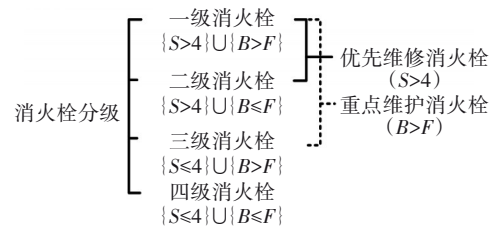


图 4 消防栓分级指标

Fig.4 Classification index of fire hydrants

分级指标来自经验法则(为了隔离管道,  $S$  应不超过 4 个)。本研究的评价指标包括关闭最小隔离单元的阀门数  $S$  和停用消防栓数  $B, F$  表示维修故障消防栓而关闭最小隔离单元的阀门致停用消防栓数的平均值,按式(3)计算。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^p q}{p}$$

(3)

式中:  $p$  为管网中消防栓的数量,个;  $q$  为维修每个故障消防栓关阀而导致的停用消防栓数,个;  $S$  为关阀数,个;  $B$  为维修每个故障消防栓而关阀致停用消防栓数,个。

2 案例分析

2.1 研究对象管网

图 5 为云南某古城镇消防供水管网。

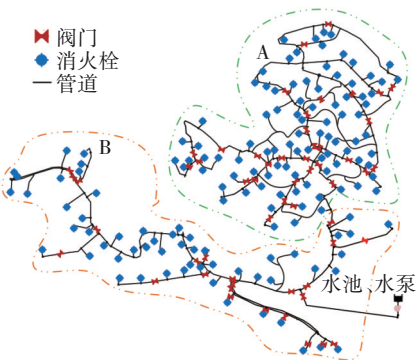


图 5 云南某古城镇消防供水管网

Fig.5 Firefighting water supply network in an ancient town in Yunnan

图 5 中 A 区(绿色区域)位于盆地,地势平缓,因此管网多为环状管网,拓扑结构复杂。B 区(橘色区域)地势起伏较大,建设环形管网比较困难,所以大多是树状管网。该古城风景旖旎,随着旅游人口增多,人为火灾隐患亦增大,但交通不便,故消防供水

基本依靠古城镇专用的消防管网。该管网包括146个消火栓、60个阀门、252个节点和479条管道,由东南面的水池和水泵供水。管道总长度约为6.3 km,由钢丝网骨架复合管制成,其中主管管径为200 mm,支管管径为100 mm。

## 2.2 关阀所形成的最小隔离单元

应用所提出的方法分析每个消火栓故障时关阀形成的最小隔离单元,限于篇幅原因,下面给出两个例子(见图6)。第48号消火栓需关闭6个阀门,形成的最小隔离单元包括39根管道;第132号消火栓仅需关闭1个阀门。差异由管网环状部分和阀门数量不同所致。第48号消火栓形成的最小隔离单元拓扑结构复杂且所需关闭的6个阀门距离较远,难以通过人工正确查找并关闭阀门及评估隔离单元。由此可见,所提出的方法能有效确定复杂管网中消火栓故障时所需关闭的阀门,所编制的最小隔离单元程序对消防队开展消防管网的维护工作具有指导意义。

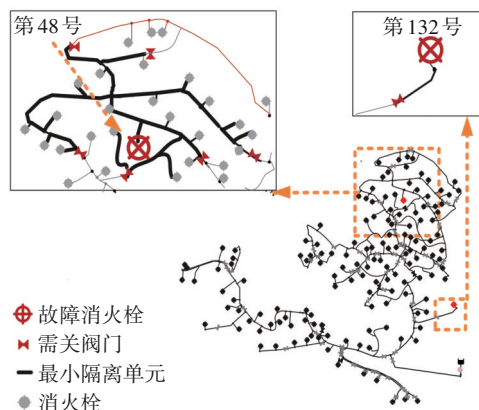


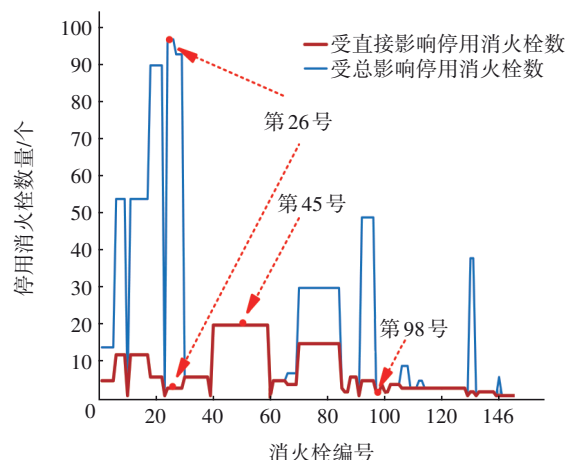
图6 不同位置消火栓故障时所需关闭最小隔离单元

Fig.6 Segment to be closed in case of fire hydrant failure at different locations

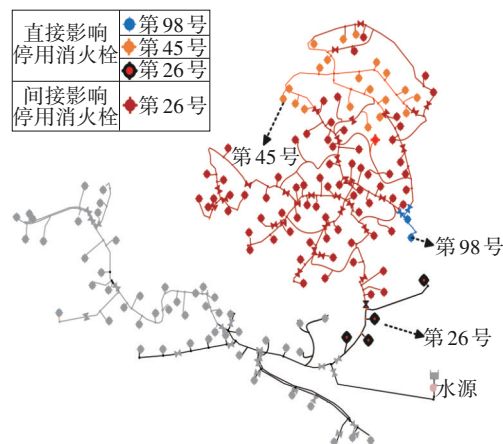
## 2.3 关阀维修致其他消火栓停用的影响

图7为不同消火栓故障时关阀维修致其他消火栓停用的影响。由图7(a)可知,不同消火栓故障维修所导致的停用消火栓数量存在较大差异。阀门关闭后隔离单元内的停用消火栓是受直接影响的消火栓,而因隔离单元停用导致下游消火栓也停用的消火栓是受间接影响的消火栓,受直接与间接影响消火栓的和是受总影响的消火栓。本研究给出3个具有代表性的例子。例如,第26号消火栓故障导致受总影响停用消火栓数量最多,远超直接停用数

量。具体而言,第26号消火栓故障导致受总影响停用消火栓数量为97个,而直接停用数量为3个。这是因为第26号消火栓离水源较近,下游消火栓(红色消火栓)较多且位于树状管网上,如图7(b)所示。因此,当该消火栓发生故障并关闭阀门时,不仅最小隔离单元的消火栓(黑色消火栓)停用,而且下游的消火栓也随之停用。



a. 停用消火栓数据



b. 停用消火栓位置

图7 不同消火栓故障时关阀维修致其他消火栓停用的影响

Fig.7 Effect of closing valves for maintenance on other fire hydrants unworking due to different faulty fire hydrant

与其他消火栓相比,第98号消火栓故障所导致的受总影响停用消火栓数量最少,与其受直接影响消火栓数量相等。具体而言,第98号消火栓受直接影响和受总影响的消火栓数量均为2个。这是因为第98号消火栓位于环形管网上,没有下游消火栓,且离水源较远。因此,在维修该消火栓时,停用的消火栓数量等于最小隔离单元中的消火栓数量。

从图7(a)还可以看出,第45号消防栓的最小隔离单元最大。具体而言,受第45号消防栓直接影响的消防栓数量为20个,见图7(b)橘色,而受直接影响消防栓数量最少的第98号消防栓仅为2个,见图7(b)蓝色。这是因为第45号消防栓的最小隔离单元中的消防栓密度较大。因此,当该消防栓发生故障时,包含故障消防栓的最小隔离单元的阀门被关闭,导致最小隔离单元内的消防栓都被停用(橘色)。

考虑最小隔离单元和受直接或总影响消防栓数量可知,故障导致的消防栓停用数量因消防栓不同而异。因此,在修复消防栓时,应特别关注树状管网中距离水源较近且下游消防栓众多的故障消防栓,因为修复它们可能会对消防栓系统产生较大的影响。综上所述,这些建议可以帮助消防队更加有效地维护和修复消防栓。

## 2.4 分级关阀维修和维护消防栓策略

针对消防栓进行分级,以指导消防栓的维修和维护顺序。图8为基于关阀数和停用消防栓数的维护难度及其影响分级。根据消防栓分级,一级和二级消防栓(红色和蓝色)应优先维修,一级和三级消防栓(红色和橘色)应重点维护,例如提高检修及防水测试频率。

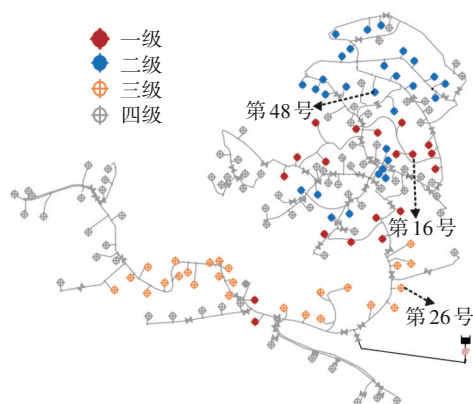


图8 基于关阀数和停用消防栓数的维护难度及其影响分级

Fig.8 Maintenance difficulty and its impact based on the number of closed valves and deactivated fire hydrants

具体而言,一级消防栓中的第16号消防栓应优先维修,并在平时重点维护;二级消防栓中的第48号消防栓应优先维修;三级消防栓中的第26号消防栓应重点维护。第16号消防栓属于一级消防栓,位于拓扑结构复杂的环状管网上且下游消防栓较多,

应优先维修并在平时重点维护;第48号消防栓属于二级消防栓,位于拓扑结构复杂的环状管网上,但无下游消防栓,应优先维修;第26号消防栓属于三级消防栓,位于拓扑结构较简单的树状管网上、靠近水源且下游消防栓较多,平时应重点维护。

由式(3)可知, $F$ 为21.86个,表4展示了不同级别消防栓的占比。可以看出,一、二、三级消防栓的占比都小于四级消防栓,其中优先维修消防栓(一级和二级消防栓)占比为32.87%,重点维护消防栓(一级和三级消防栓)占比为30.82%。由于树状管网和环状管网对消防栓的破坏程度不同,树状管网容易造成消防栓的损坏,导致经济上的重大损失,因此这是一个值得深入探讨的问题。建议采用阀门隔断的方式更有利于避免消防栓发生故障,但也会增加成本。建议消防队按照消防栓的分级顺序进行维修和维护,以合理利用人力和物力并确保维修的优先次序,节省维护时间。

表4 消防栓分级结果

Tab.4 Results of fire hydrant classification

项目	数量/个	占比/%
优先维修、重点维护(一级)	19	13.01
优先维修(二级)	29	19.86
重点维护(三级)	26	17.81
其他(四级)	72	49.32

## 3 结论

重点维护消防栓和优先维修消防栓是管道改造、管道检测和设备维护的重要领域和对象。其中,一级和二级消防栓应优先维修,一级和三级消防栓应重点维护。本研究提供的方案可有效提高管网维护效率,如建议优先维修消防栓仅占管网消防栓总数的32.87%,建议重点维护的消防栓占管网消防栓总数的30.82%。同时,利用Johnson最短路算法生成了距离矩阵,利用网络拓扑分析方法找到了最小隔离单元,相比以往研究不需要构建连通性矩阵或进行水力计算、添加虚拟阀门,具有广泛的适用性。

## 参考文献:

- [1] 张健,宋志刚,张雨,等. 西南传统村落火灾蔓延风险简化模拟评估方法[J]. 安全与环境学报,2023,23(7):2167-2176.  
ZHANG Jian, SONG Zhigang, ZHANG Yu, et al.

- Simplified simulation assessment method of fire spreading risk in traditional villages in Southwest China [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(7): 2167–2176(in Chinese).
- [2] 王晓霞, 赵立华, 邹平华, 等. 多热源环状热网故障关阀方案及程序实现[J]. *建筑技术*, 2015, 46(2): 122–125.  
WANG Xiaoxia, ZHAO Lihua, ZOU Pinghua, *et al.* Valve closing scheme and program compilation for multi-heat source ring-shaped heat supply network in malfunction[J]. *Architecture Technology*, 2015, 46(2): 122–125(in Chinese).
- [3] WÉBER R, HUZSVÁR T, HOS C. Vulnerability analysis of water distribution networks to accidental pipe burst[J]. *Water Research*, 2020, 184: 116178.
- [4] GUPTA R, BABY A, ARYA P V, *et al.* Segment-based reliability/supply short fall analysis of water distribution networks[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 89: 1168–1175.
- [5] LIU J, KANG Y. Segment-based resilience response and intervention evaluation of water distribution systems [J]. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 2022, 71(1): 100–119.
- [6] 高铁军, 赵明, 毛亚纯. 供水管网全关阀预案与关键阀门分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(2): 94–99.  
GAO Tiejun, ZHAO Ming, MAO Yachun. Analysis of valve closing schemes and key valves in water distribution networks [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(2): 94–99(in Chinese).
- [7] HERNANDEZ E, ORMSBEE L. Segment based robustness assessment for water distribution networks [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2021, 147(4): 4021009.
- [8] KOWALSKA B, SUCHORAB P, KOWALSKI D. Division of district metered areas (DMAs) in a part of water supply network using WaterGEMS (Bentley) software: a case study [J]. *Applied Water Science*, 2022, 12(7): 166.
- [9] WALSKI T. Closure to “Graph-theoretic surrogate measure to analyze reliability of water distribution system using Bayesian belief network-based data fusion technique” by Ngandu Balekelayi and Solomon Tesfamariam [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020, 146(8): 07020002.
- [10] BASSO R, KULCSÁR B, SANCHEZ-DIAZ I. Electric vehicle routing problem with machine learning for energy prediction [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 145: 24–55.
- [11] 张晗, 钱育蓉, 王跃飞, 等. CUDA 下单源最短路径算法并行优化[J]. *计算机工程与设计*, 2019, 40(8): 2181–2189.  
ZHANG Han, QIAN Yurong, WANG Yuefei, *et al.* Parallel optimization of single source shortest path algorithm under CUDA [J]. *Computer Engineering and Design*, 2019, 40(8): 2181–2189(in Chinese).
- [12] 曹祥红, 李欣妍, 魏晓鸽, 等. 基于 Dijkstra-ACO 混合算法的应急疏散路径动态规划[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(6): 1502–1509.  
CAO Xianghong, LI Xinyan, WEI Xiaoge, *et al.* Dynamic programming of emergency evacuation path based on Dijkstra-ACO hybrid algorithm [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(6): 1502–1509(in Chinese).
- [13] 邓军勇, 赵一迪. 图计算中压缩格式对单源最短路径算法影响的特性化分析[J]. *计算机应用与软件*, 2022, 39(6): 246–251, 287.  
DENG Junyong, ZHAO Yidi. Performance characterization of compression formats on single source shortest path algorithm in graph processing [J]. *Computer Applications and Software*, 2022, 39(6): 246–251, 287(in Chinese).
- [14] ARANDIA E, ECK B J. An R package for EPANET simulations [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 107: 59–63.
- [15] JOHNSON D B. Efficient algorithms for shortest paths in sparse networks[J]. *Journal of the ACM*, 1977, 24(1): 1–13.
- [16] BOOPATHI M, SUJATHA R, KUMAR C S. Identification of most critical paths using sparse matrix in software testing[J]. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 2021, 10(1): 39–52.

作者简介: 太梅婷(1998–), 女, 宁夏中卫人, 硕士研究生, 主要研究方向为供水管网优化。

E-mail: 1638057579@qq.com

收稿日期: 2023-06-23

修回日期: 2023-10-07

(编辑: 任莹莹)