

龙立,郑山锁,杨勇,等. 2022. 城市供水管网震后修复策略研究[J]. 地震研究, 45(3): 352–361, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0034.

Long L, Zheng S S, Yang Y, et al. 2022. Research on the recovery strategy of the urban water supply networks after an earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(3): 352–361, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0034.

城市供水管网震后修复策略研究*

龙立¹, 郑山锁², 杨勇³, 周炎⁴

(1. 成都大学 建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 西北综合勘察设计研究院, 陕西 西安 710003; 4. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为制定合理的城市供水管网震后修复决策, 提升城市供水管网抗震韧性, 通过定义供水管网水力满意度指标和震损管线水力重要度指标, 提出了供水管网震后两阶段修复策略: 第一阶段保证尽量多的用户节点供水, 以水力动态重要度作为管线重要度指标修复爆管管线; 第二阶段以最快提升管网韧性指数为原则, 以水力静态重要度作为管线重要度指标修复渗漏管线。综合考虑管网水力恢复指数、抢修时间和抢修成本, 建立多目标优化调度模型, 并利用遗传算法实现了多目标优化调度模型优化求解, 将其应用于某小型供水管网进行算例分析。结果表明: 基于多目标优化调度模型计算得到的总抢修时间、总抢修成本及水力恢复指数与对应单目标优化调度模型的最优结果分别相差 0.06%、0.03%、2%。基于多目标优化调度模型的抢修调度方案相较于基于水力恢复指数单目标优化调度模型的抢修调度方案, 管网韧性指数更高, 是一种高效、低成本且能获得较高水力恢复指数的修复方案。

关键词: 供水管网; 震后修复决策; 韧性评估; 多目标优化

中图分类号: TU991.33; P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2022)03–0352–10

doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0034

0 引言

破坏性地震作用下, 供水管网往往会由于节点破坏或管体断裂等造成大量用户节点功能失效, 导致管网系统功能部分或全部失效, 无法保证灾区消防、医疗及灾民生活用水, 甚至引发次生灾害和流行疾病, 造成二次伤害。因此, 制定管网震后修复决策, 使管网供水能力快速恢复至震前水平尤为重要。

近年来, 国内外学者分别比较了水泵更新方案、水泵运行方案、泵站和储水罐运行方案等不同方案对管网震后供水能力的影响, 主要侧重于恢复水泵、储水罐等组件以提升管网供水能力等 (Chang, Shinozuka, 2004; Cimellaro et al., 2016;

Zhao et al., 2015; Zhuang et al., 2013; Davis, 2014; Tabucchi et al., 2010; Farahmandfar et al., 2017)。相较于水泵、储水罐等组件, 管线在地震作用下更容易遭受破坏, 管线修复顺序是确保供水管网功能高效恢复至震前水平的关键。目前, 国内外学者对震后供水管线修复均有研究, 如 Liu 等 (2020a, b) 以绵竹市供水管网为例, 比较了基于静态重要度、损伤度和距离的 3 种管线修复顺序, 认为静态重要度策略更有助于提高管网供水能力。贺金川等 (2019) 建立了以修复决策指数为指标的管网节点功能修复顺序决策模型, 并以修复费用为衡量指标, 对不同修复方案进行对比, 给出了最优修复方案。程鹏 (2013) 将震后管网修复分为抢修严重破坏管线阶段、维修中等破坏管线阶段和检修轻微破坏管线阶段, 每一阶段以

* 收稿日期: 2021–12–07.

基金项目: 国家重点研发计划课题项目 (2019YFC1509302) 资助.

第一作者简介: 龙立 (1992–), 讲师, 博士, 主要从事城市生命线工程地震灾害损失评估.

E-mail: longli@cdu.edu.cn.

管网可恢复度最大化原则选取受损管线进行修复,以实际管网为例,给出了不同烈度下管网的最优修复顺序,但忽略了震后抢修队伍的优化调度问题。Osman 等 (2017) 建立了基于遗传算法的管线抢修队伍优化调度模型,最大限度地降低了修复时间、成本及对用户的影响程度。韩朝 (2016) 建立了以修复时间最短、失效节点损失最小为目标,修复可靠性最大为约束的多目标抢修队伍指派模型,利用两阶段求解方法给出了抢修队伍优化调度方案。破坏性地震作用下,关于供水管网管线会同时出现大量渗漏和爆管且应急抢修资源有限时,如何进行管网修复及抢修队伍调度的研究却鲜有报道。鉴于此,本文考虑震后管网中完好、渗漏和爆管管线共存及用户节点流量随水压变化的实际状态,首先建立供水管网水力满意度与重要度指标,然后提出在有限的应急抢修资源下供水管网的震后两阶段修复策略,进而针对第二阶段管网抢修数量较大的问题,提出抢修队伍多目标优化调度模型,并采用遗传算法对多目标优化调度模型进行求解,最终给出震损管网的最佳修复顺序及抢修队伍调度方案。

1 供水管网水力满意度与重要度

1.1 节点水力满意度

供水管网管线发生渗漏或爆管时,供水管网处于低压运行状态,用户节点流量受节点水压的影响,随着节点水压的下降,节点出流量减少甚至处于断水状态。本文定义震后节点水力满意度 NSD 为震后节点水压与需求水压的比值:

$$NSD_i = \begin{cases} 1 & (H_i \geq H_i^{\text{des}}) \\ \frac{H_i}{H_i^{\text{des}}} & (H_i < H_i^{\text{des}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: NSD_i 为节点 i 震后水力满意度; H_i 为节点 i 的震后自由水压; H_i^{des} 为节点需求水压。

1.2 管网水力满意度

定义供水管网水力满意度 SDI 为全部节点水力满意度的加权和:

$$SDI = \sum_{i=1}^n w_i \times NSD_i \quad (2)$$

式中: n 为供水管网节点数; w_i 为节点 i 的权重系数,其取值为 $[0,1]$,且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。 w_i 可以通过节点服务人数、节点流量需求量、节点脆弱性等指标衡量 (Liu *et al.*, 2020a, b; Jun *et al.*, 2007; Nicholson *et al.*, 2016; Nayak, Turnquist, 2016; Cimellaro *et al.*, 2010)。

1.3 震损管线水力重要度

地震前、地震时及地震后,管网震后水力满意度 SDI 通常采用如图 1 所示的曲线进行描述。图 1 中 t_0 、 t_1 、 t_2 分别表示地震发生时、管网修复工作开展时及 SDI 恢复至震前水平的时间点。管网正常运行时, SDI 为常数 1; 地震发生时, SDI 立即下降至 SDI_0 。 SDI_0 通常被视为系统的地震吸收能力 (Liu *et al.*, 2020), 可通过增强系统的健壮性和冗余性来提高。 $t_0 \sim t_1$ 为应急响应阶段,包括抢修方案制定及抢修资源准备等;随着抢修工作的开展, SDI 值逐步上升,直至恢复至震前水平。

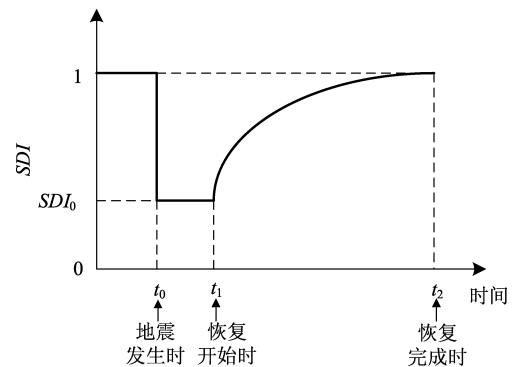


图 1 供水系统水力服务满意度 - 时间曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the service satisfaction - time curve of water supply system

定义供水管网系统的抗震韧性指数 SRI 为:

$$SRI = \frac{1}{t_2 - t_0} \int_{t_0}^{t_2} SDI_t dt \quad (3)$$

由图 1 可知, SDI 的取值范围为 $0 \sim 1$ 。对于同一个供水管网,震后采用的管线抢修顺序越合理,所用恢复时间越短,对应时间点的 SDI 值越大,则 SRI 越大。因此, SRI 有助于量化管网故障管线抢修顺序的有效性。为了获得较高的实时 SDI 值,本文引入水力静态重要度和水力动态重要度的概念,以表征管线修复引起的 SDI 的增加量。

管线 j 的水力静态重要度 $I_{s,j}$ 为:

$$I_{s,j} = SDI_j - SDI_0 \quad (4)$$

式中: SDI_j 为仅抢修管线 j 后供水管网的 SDI ; SDI_0 是全部震损管线均未抢修时的 SDI 。

管线 j 的水力动态重要度 $I_{d,j}$ 为:

$$I_{d,j} = SDI_{d,j} - SDI_{d,0} \quad (5)$$

式中: $SDI_{d,j}$ 是管线 j 抢修后基于最新拓扑网络的供水管网的 SDI ; $SDI_{d,0}$ 是管线 j 抢修前供水管网的 SDI 。

2 供水管网震后修复策略

震后应急阶段, 管网修复的首要目的是以尽可能短的时间最大限度地提升供水管网 SDI 值, 保障伤员和居民的医疗及生活用水, 然而实际抢修工作中, 由于抢修资源和人员有限, 不可能同时对全部震损管线进行修复。因此, 本文将供水管网震后抢修工作分为两个阶段: 第一阶段对爆管管线进行抢修; 第二阶段对渗漏管线进行抢修。

第一阶段的首要任务是保证尽量多的用户节点供水。相比于水力静态重要度, 水力动态重要度考虑了已修复管线对剩余未修复管线的水力影响, 可获得更为精确的重要度指标值, 因此, 本阶段采用该指标作为管线的重要度指标。首先修复与孤立节点相连的爆管管线, 当孤立节点消除后, 继续修复剩余爆管管线。每轮水力动态重要度确定后, 仅修复该轮水力动态重要度最大的管线。经过多轮水力动态重要度计算后确定抢修顺序, 对待修管线中优先级最高的管线, 调度抢修时间最短的空闲抢修队伍对其进行修复; 重复此过程, 直至全部抢修队伍均被安排抢修任务; 完成上一轮抢修任务的空闲抢修队伍, 继续对剩余待修管线中优先级最高的管线进行修复, 如此反复, 直至所有爆管管线抢修完成。

第二阶段以 SRI 值提升最快为原则。由于破坏性地震中渗漏管线的数量远大于爆管管线的数量, 如果仍采用水力动态重要度进行衡量, 将耗费大量的计算时间, 严重影响管网的抢修进程, 而采用水力静态重要度时, 在大幅度提高计算效率的同时仍能获得较高 SRI 值。因此, 本阶段采用该指标作为管线重要度衡量指标。由于需修复的管线

数量较多, 抢修队伍需在渗漏管线间多次迁移, 增加了管网修复的时间和成本。为了更好地调度宝贵的抢修资源, 本文建立了综合考虑管网水力恢复指数、抢修时间和抢修成本的多目标优化调度模型, 并采用遗传算法对其进行优化, 寻找较优的调度顺序, 以较低的时间和成本, 获得较高的 SDI 。

3 抢修队伍多目标优化调度模型

抢修队伍多目标优化调度模型涵盖了管网水力恢复指数最高、修复时间最短和修复费用最低的 3 个互相冲突的目标函数。

3.1 管网水力恢复指数模型

定义管网水力恢复指数 $TSDI$ 为全部渗漏管线的水力静态重要度与顺序重要度系数的乘积的累加和:

$$TSDI = \sum_{m=1}^N \mu \cdot I_{s,m} = \sum_{m=1}^N \left[1 - (m-1) \cdot \frac{\beta}{N-1} \right] \cdot I_{s,m} \quad (6)$$

式中: μ 为管线抢修顺序的重要性系数, 抢修顺序越靠前, μ 越大; N 为渗漏管线总数; m 为管线的抢修顺序; $I_{s,m}$ 表示抢修顺序为 m 的管线的静态水力重要度; β 为重要性系数差值, 决定渗漏管线间 μ 的差值, 本文统一取 0.3。

需说明的是, 计算管网水力恢复指数模型时, 需对震损管网进行水力分析。本文考虑震后管网管线完好、渗漏和爆管共存的实际状态, 同时考虑了震后用户节点流量随水压的变化, 编制了水力计算程序, 为管网震后修复决策分析提供了技术支撑。其中渗漏模型 (刘鹤年, 2008; 邹日清等, 2018)、爆管模型 (侯本伟, 2014) 和节点压力驱动模型 (Gupta, Bhawe, 1996; 何丽荣等, 2018) 参考国内外已有研究成果。

3.2 修复时间模型

供水管网震后渗漏管线修复花费的总时间包括渗漏管线修复时间和抢修队伍在抢修点间位置迁移时间两部分, 管网修复完成时, 耗时最长的队伍所使用的时间即为抢修总时间 TT , 表示为:

$$TT = \max (TRT_c + TLT_c) \quad (c \in CN) \quad (7)$$

式中: CN 为抢修队伍数量; TRT_c 为抢修队伍 c 的总抢修时间; TLT_c 为抢修队伍 c 的位置迁移时间。

抢修队伍 c 的总抢修时间为:

$$TRT_c = \sum_{j=1}^{SN} \sum_{f=1}^{MN} x_{c,j,f} \times RT_{c,j,f} \quad (c \in CN) \quad (8)$$

式中: $x_{c,j,f}$ 为二进制变量, 当抢修队伍 c 使用抢修方法 f 修复渗漏管线 j 时, 其值为 1, 否则为 0; $RT_{c,j,f}$ 为抢修队伍 c 使用抢修方法 f 修复管线 j 花费的时间; CN 为抢修队伍数量; SN 为渗漏管线数量; MN 为抢修方法数量。

在建立抢修队伍位置迁移时间模型前, 本文引入抢修步骤的概念表示渗漏管线由指定抢修队伍修复的顺序。抢修步骤的数量 RS 为 SN/CN 向上取整。对于抢修队伍 c , 完成一根渗漏管线抢修后, 需按照既定的抢修步骤前往下一根渗漏管线进行抢修, 抢修步骤结束之后所花费的位置迁移时间之和即为抢修队伍 c 的位置迁移总时间 TLT_c :

$$TLT_c = \sum_{n=1}^{RS} \sum_{j=1}^{SN} \sum_{f=1}^{MN} (y_{c,j}^n \times y_{c,j}^{n+1}) \times LT_{j,f} \quad (c \in CN) \quad (9)$$

式中: 决策变量 $y_{c,j}^n$ 和 $y_{c,j}^{n+1}$ 为二进制变量, 用于追踪抢修队伍在不同渗漏管线之间的移动情况, 当抢修步骤处于第 n 步时, 抢修队伍 c 从渗漏管线 j 迁移到渗漏管线 f 时, 两者取值为 1, 否则取值为 0, 下同; $LT_{j,f}$ 为故障管线 j 和 f 之间的位置迁移时间, 可表示为:

$$LT_{j,f} = \frac{L_{j,f}}{v} \quad (10)$$

式中: $L_{j,f}$ 为故障管线 j 和 f 之间的最短路径距离; v 为位置迁移速度, 主要与发震时间、地震强度、沿街建筑物倒塌情况等因素有关 (赵晶晶, 2016), 可表示为:

$$v = 0.578 t_v r_v v_0 \quad (11)$$

式中: t_v 为发震时间对车速的影响系数; r_v 为建筑倒塌对车速的影响系数; v_0 为城市平均行车速度。

3.3 修复费用模型

定义修复费用总成本为 TC , 包括渗漏管线抢修费用 TRC 和抢修队伍位置迁移费用 TLC :

$$TC = TRC + TLC \quad (12)$$

$$TRC = \sum_{c=1}^{CN} \sum_{j=1}^{SN} \sum_{f=1}^{MN} x_{c,j,f} \times RC_{c,j,f} \quad (13)$$

式中: $x_{c,j,f}$ 为二进制变量, 当抢修队伍 c 使用抢修方法 f 修复渗漏管线 j 时, 其值为 1, 否则为 0; $RC_{c,j,f}$ 为抢修队伍 c 使用抢修方法 f 修复渗漏管线 j 花费的费用。

供水管网每处破坏管线的抢修费用 $RC_{c,j,f}$ 采用《地震现场工作第 4 部分: 灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2011) 所提出方法进行计算:

$$RC_{c,j,f} = m_1 + \delta m_2 \quad (14)$$

式中: m_1 为管线维修直接费, 包括机械费、破路费、材料费 (元) 等; m_2 为人工费 (元); δ 为季节影响系数, 冬季施工时取 1.1, 其他时间施工取 1.0。其中, 材料费、人工费用与管径有关, 机械费、破路费与管径及管线破坏处的道路类型有关, 参照杨丹 (2011) 研究结果取值。

定义 TLC 为管网修复完成时所有抢修队伍花费的位置迁移成本:

$$TLC = \sum_{n=1}^{RS} \sum_{c=1}^{CN} \sum_{j=1}^{SN} \sum_{f=1}^{MN} (y_{c,j}^n \times y_{c,j}^{n+1}) \times LC_{j,f} \quad (15)$$

式中: $LC_{j,f}$ 为抢修队伍在渗漏管线 j 和 f 之间的位置迁移成本; 其它参数同式 (9)。

3.4 多目标优化调度模型

基于上述单目标优化模型的目标函数, 采用线性加权法构建渗漏管网抢修队伍多目标优化调度模型的目标函数为:

$$\begin{aligned} \text{Min}(Z) = & \alpha_1 \cdot \frac{TSDI_0 - TSDI}{TSDI_0} + \alpha_2 \cdot \frac{TT - TT_0}{TT_0} + \\ & \alpha_3 \cdot \frac{TC - TC_0}{TC_0} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: α_1 、 α_2 和 α_3 为权重系数, 分别代表水力恢复指数、时间和成本目标的相对重要性, 且 $\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1$ 。 $TSDI_0$ 、 TT_0 和 TC_0 为分别按水力恢复指数模型、修复时间模型和修复费用模型计算求得的最优值; $TSDI$ 、 TT 和 TC 分别为采用某种抢修方案对应的水力恢复指数、修复时间和修复费用。

本文多目标优化调度模型的主要约束是管网水力平衡约束, 需满足节点流量连续性方程、管线压降和能量方程。

本文采用的某小型供水管网共有 40 个节点, 64 根管线, 管材均采用球墨铸铁, 节点 40 为供水源点, 水位恒定在 60 m, 供水量为 840.41 L/s。该管网所处场地为 II 类场地, 埋深均为 2 m。管线水头损失采用 Hazen - Williams 公式计算, 管线的粗糙系数均为 130, 各节点的流量、标高及各管线的管长和管径如图 4 所示。所有节点的设计最小水压和基准水压分别为 0 m 和 15 m。假定 IX 度地震作用下管线 1、4、38、62 发生爆管破坏, 管线 3、8、12、16、21、24、27、32、36、44、46、49、50、53、57、60 发生渗漏破坏, 由 4 支抢修队伍分两阶段进行抢修。抢修队伍的抢修时间及成本如图 5 所示, 抢修队伍在各故障管线之间位置迁移时间和成本如图 6 所示。

5.1 震后抢修第一阶段

管网中出现了孤立节点1和39, 基于第一阶段抢修策略, 优先修复震前管网中与孤立节点相连的管线, 结合漏损管网的水力计算程序与管线水力动态重要度指标, 计算得到第一阶段爆管管

线的抢修顺序和抢修队伍调度方案见表1和表2。由表可知, 管线抢修顺序为1-62-38-4, 调度用时最短的抢修队伍优先对水力动态重要度高的管线维修。所有爆管管线修复完成后, 共花费时间1.88 h, *SDI* 值恢复至0.45。

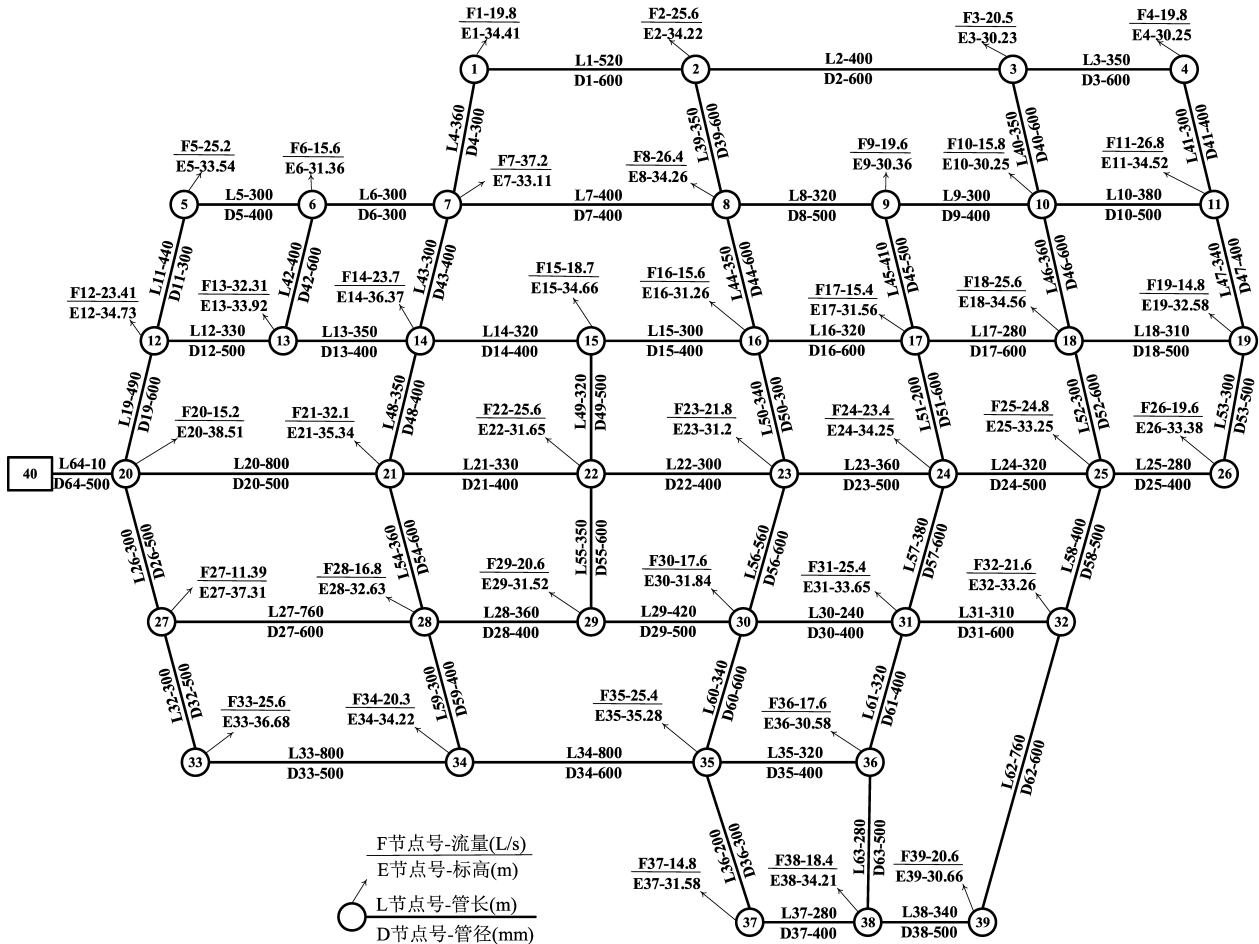


图4 城市供水管网图

Fig. 4 Map of urban water supply networks

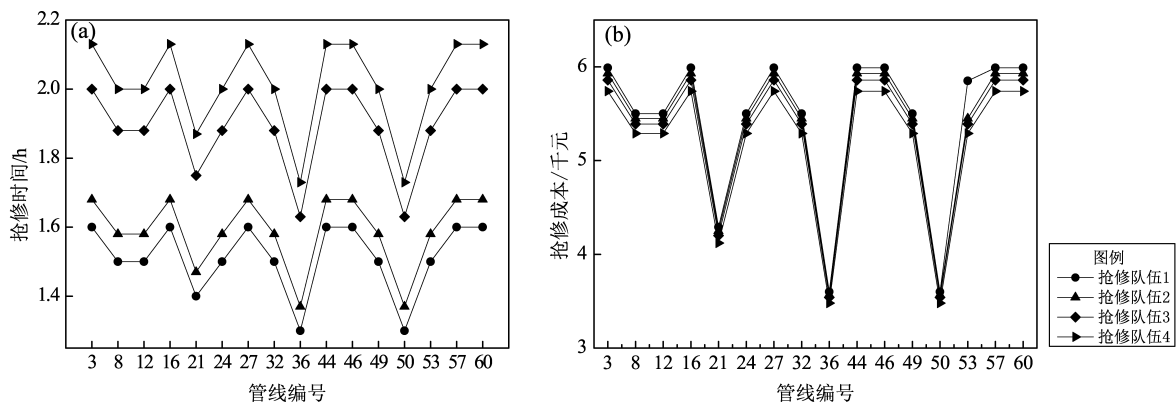


图5 抢修队伍修复不同管线花费的时间 (a) 和成本 (b)

Fig. 5 Time (a) and cost (b) for rescues teams to repair different pipelines

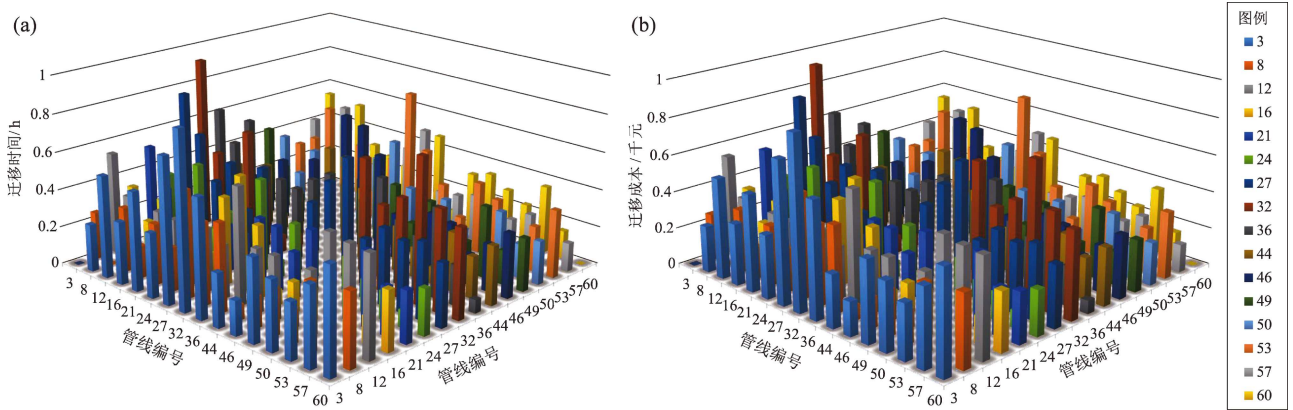


图 6 抢修队伍在不同管线间位置迁移的时间 (a) 和成本 (b)

Fig. 6 Time (a) and cost (b) for rescue teams moving between different pipelines

表 1 爆管管线的抢修顺序

Tab. 1 Order of repairing the burst pipe

参数	抢修顺序确定过程				抢修顺序
管线编号	1	4	38	62	抢修管线 1
<i>SDI</i>	0. 254	0. 251	0. 243	0. 244	
管线编号	38	62	抢修管线 62		
<i>SDI</i>	0. 255	0. 260			
管线编号	4	38	抢修管线 38		
<i>SDI</i>	0. 318	0. 377			
管线编号	4	抢修管线 4			
<i>SDI</i>	0. 450				

注: 抢修开始前的 SDI_0 为定值, 故 SDI 优先级为水力动态重要度优先级。

表 2 震后第一阶段抢修队伍调度表

Tab. 2 Schedule of emergency crews in the first stage after the earthquake

管线	抢修队伍	修复起始时间/h	修复完成时间/h
1	C1	0	1.6
62	C2	0	1.68
38	C3	0	1.88
4	C4	0	1.73

5.2 震后抢修第二阶段

爆管管线抢修完毕后, 剩余故障管线全部为渗漏破坏, 管网抢修进入第二阶段, 采用遗传算法分别对成本目标、时间目标和水力恢复指数进行单目标优化, 其中, 种群大小为 100, 最大遗传代数为 400, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.05。进而基于单目标优化结果进行多目标优化, 优化程序采用 Matlab 实现。单目标及多目标优化结果、各优化方法的抢修调度方案见表 3、4。

表 3 单目标及多目标优化结果

Tab. 3 Results from the single-objective and multi-objective optimization

优化方法	总时间/h	总成本/万元	水力恢复指数
成本目标	8.895	8.333	0.452
时间目标	8.404	9.096	0.453
水力恢复指数	8.595	8.921	0.464
多目标优化	8.406	8.338	0.455

表 4 不同优化方法抢修调度方案

Tab. 4 The emergency repair schedule with different optimization methods

抢修步骤	抢修队伍	优化方法			
		成本目标	时间目标	水力恢复指数	多目标优化
1	C1	管线 27	管线 27	管线 60	管线 49
	C2	管线 16	管线 36	管线 27	管线 27
	C3	管线 12	管线 50	管线 3	管线 3
	C4	管线 21	管线 46	管线 16	管线 36
2	C1	管线 8	管线 21	管线 46	管线 16
	C2	管线 53	管线 60	管线 44	管线 32
	C3	管线 49	管线 16	管线 57	管线 50
	C4	管线 50	管线 3	管线 8	管线 60
3	C1	管线 46	管线 49	管线 49	管线 46
	C2	管线 57	管线 24	管线 53	管线 24
	C3	管线 24	管线 44	管线 24	管线 44
	C4	管线 60	管线 53	管线 12	管线 57
4	C1	管线 3	管线 12	管线 50	管线 8
	C2	管线 44	管线 32	管线 21	管线 53
	C3	管线 32	管线 8	管线 36	管线 12
	C4	管线 36	管线 57	管线 32	管线 21

本文同时解决了4个不同的优化问题，结合表3和表4可以得出如下结论：不同优化目标获得的管线抢修顺序及抢修队伍调度方案差异较大。基于多目标优化模型计算得到的总时间、总成本及水力恢复指数与对应单目标优化模型的最优结果分别相差0.06%、0.03%、2%。与修复时间单目标方案相比，多目标优化方案在时间仅增加0.06%的同时节约了5.5%的总成本，水力恢复指数提高了0.6%；与修复成本单目标方案相比，多目标优化方案成本增加了0.03%，但时间节约了8.3%，水力恢复指数提高了0.29%；与水力恢复指数单目标优化方案相比，多目标优化方案水力恢复指数仅下降2%，但节约了6.5%的总时间和2.2%的总成本。多目标优化方案虽然不能获得单项最优结果，但综合结果最优。

由于震后修复的首要目标是恢复管网水力满意度，表5对比了基于水力恢复指数的最优方案（方案1）与多目标优化方案（方案2）修复过程中SDI值随抢修时间变化的详细过程。由表5可知，方案1中管网SDI值提升幅度较大，管线53修复完成后，管网SDI值为1，恢复至震前供水

表5 抢修调度方案对应的SDI-t结果

Tab.5 SDI-t results corresponding to the emergency repair schedule

水力恢复指数单目标优化(方案1)			多目标优化(方案2)		
管线	抢修完成时间/h	SDI	管线	抢修完成时间/h	SDI
—	2.0	0.45	—	1.84	0.45
60	3.7	0.48	27	2.18	0.47
27	3.86	0.51	49	3.34	0.49
16	4.13	0.51	32	3.89	0.52
3	4.47	0.54	36	4.03	0.53
46	5.64	0.59	3	4.47	0.56
44	6.08	0.64	60	5.1	0.60
8	6.3	0.78	24	5.56	0.65
57	6.88	0.90	16	6.23	0.82
49	7.45	0.96	50	6.46	0.85
53	7.97	1	46	6.86	0.91
12	8.64	1	53	7.29	1
24	8.85	1	57	8.51	1
50	8.91	1	8	8.52	1
21	9.83	1	44	8.54	1
36	10.59	1	21	10.63	1
32	10.92	1	12	10.75	1

水平，此时，已完成10根管线修复，所需时间7.97 h；方案2同样在管线53修复完成后，使管网SDI值恢复至1，虽然比方案1多抢修1根管线，但抢修速度较快，所需时间为7.29 h，比方案1提前了40 min。图7给出了两种方案SDI-t折线图，由图可知，管网SDI值恢复至1前，方案2每个时间点对应的SDI值均大于方案1，且恢复所用时间更短，SRI值更高，表明方案2的修复调度方案更优。

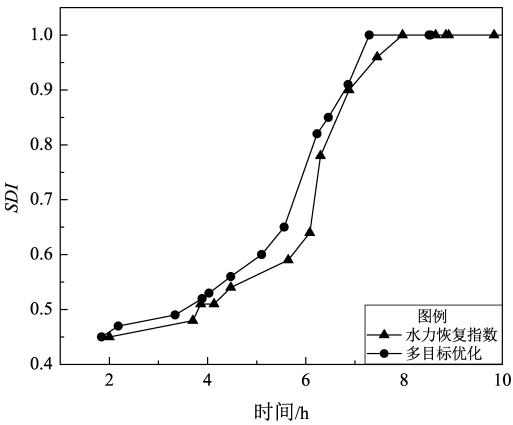


图7 基于水力恢复指数与多目标优化方法的SDI值对比
Fig.7 SDI values based on the hydraulic recovery index and the multi-objective optimization

6 结论

本文提出了供水管网震后抢修两阶段优化调度策略，建立并编码实现了抢修队伍多目标优化调度模型，并将其应用于某小型供水管网进行算例分析，得出以下结论：

(1) 第一阶段以水力动态重要度作为管线的重要度指标，优先修复爆管管线，保证了尽量多的用户节点供水。

(2) 第二阶段以水力静态重要度作为管线的重要度指标修复渗漏管线，不同优化目标获得的管线抢修顺序及抢修队伍调度方案差异较大。基于多目标优化模型计算得到的总时间、总成本及水力恢复指数与对应单目标优化模型的最优结果分别相差0.06%、0.03%、2%。多目标优化方案虽然不能获得单项最优结果，但综合结果最优。

(3) 基于多目标优化方案的管网水力满意度

比基于水力恢复指数最优方案的管网水力满意度 SDI 值恢复至 1 的时间更短, 管网韧性指数更高, 基于多目标优化的修复调度方案更优。

基于多目标优化的抢修调度方案是一种高效、低成本且能获得较高水力恢复指数的修复方案, 可为震后开展供水管网抢修工作提供有力支撑。

参考文献:

- 程鹏. 2013. 给水管网系统震后水力状态评价及可恢复性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 韩朝. 2016. 基于 GIRAFFE 的供水管网抗震性能与恢复研究[D]. 北京: 北京工业大学.
- 和丽荣, 杜坤, 宋志刚, 等. 2018. 城市供水管网抗震可靠性评估的随机模拟方法[J]. 土木与环境工程学报, 40(2): 62–69.
- 贺金川, 谢孝奎, 郑山锁, 等. 2019. 供水管网震后功能快速修复决策研究[J]. 世界地震工程, 35(4): 1–10.
- 侯本伟. 2014. 城市供水管网抗震能力分析及性能化设计方法研究[D]. 北京: 北京工业大学.
- 刘鹤年. 2008. 流体力学(2 版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 杨丹. 2011. 供水系统震害与功能失效模式分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 赵晶晶. 2016. 震后伤员救援车辆调度问题研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学.
- 邹日青, 郭恩栋, 于天洋, 等. 2018. 供水管网地震漏损蒙特卡洛模拟分析[J]. 土木与环境工程学报, 40(2): 83–87.
- Chang S E, Shinozuka M. 2004. Measuring improvements in the disaster resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 20(3): 739–55.
- Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. 2010. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. *Engineering Structures*, 32(11): 3639–3649.
- Cimellaro G P, Tinebra A, Renschler C, *et al.* 2016. New resilience index for urban water distribution networks[J]. *Journal of Structural Engineering*, 142(8): C4015014.
- Davis C A. 2014. Water system service categories, post-earthquake interaction, and restoration strategies[J]. *Earthquake Spectra*, 30(4): 1487–1509.
- Farahmandfar Z, Piratla K R, Andrus R D. 2017. Resilience evaluation of water supply networks against seismic hazards[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 8(1): 04016014.
- Gupta R, Bhavé P R. 1996. Comparison of methods for predicting deficient – network performance[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(3): 214–217.
- Jun H, Loganathan G V, Kim J H, *et al.* 2007. Identifying pipes and valves of high importance for efficient operation and maintenance of water distribution systems[J]. *Water Resources Management*, 22(6): 719–736.
- Liu W, Song Z, Ouyang M, *et al.* 2020a. Recovery – based seismic resilience enhancement strategies of water distribution networks[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 203(3): 107088.
- Liu W, Song Z, Ouyang M. 2020b. Lifecycle operational resilience assessment of urban water distribution networks[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 198(C4015014): 106859.
- Nayak M A, Turnquist M A. 2016. Optimal recovery from disruptions in water distributions networks[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(8): 566–579.
- Nicholson C D, Barker K, Ramirez – Marquez J E. 2016. Flow-based vulnerability measures for network component importance; experimentation with preparedness planning[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 145(C): 62–73.
- Osman H, Ammar M, El – Said M. 2017. Optimal scheduling of water network repair crews considering multiple objectives[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(1): 28–36.
- Tabucchi T, Davidson R, Brink S. 2010. Simulation of post – earthquake water supply system restoration[J]. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 27(4): 263–279.
- Zhao X D, Chen Z L, Gong H D. 2015. Effects comparison of different resilience enhancing strategies for municipal water distribution network; a multidimensional approach[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, doi:10.1155/2015/438063.
- Zhuang B Y, Lansey K, Kang D. 2013. Resilience/availability analysis of municipal water distribution system incorporating adaptive pump operation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5): 527–537.
- GB/T 18208.4—2011, 地震现场工作第 4 部分: 灾害直接损失评估[S].

Research on the Recovery Strategy of the Urban Water Supply Networks after an Earthquake

LONG Li¹, ZHENG Shansuo², YANG Yong³, ZHOU Yan⁴

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, Sichuan, China)

(2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

(3. Northwest Research Institution of Engineering and Design, Xi'an 710003, Shaanxi, China)

(4. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract

In order to make reasonable decisions for post-earthquake repair of the urban water supply networks and improve the networks' seismic resilience, a service satisfaction index of the water supply and an importance index of the earthquake-damaged pipelines are defined and a two-stage recovery strategy for the water supply networks after the earthquake is proposed. In the first stage, to ensure the water supply for as many user nodes as possible, the dynamic importance of water supply is set as the importance index for repairing the burst pipeline. In the second stage, focusing on fastest improving the networks' resilience index, the static importance of water supply is set as the importance index for repairing the leaking pipeline. A multi-objective optimal regulation model that involves the hydraulic recovery index, repair time and repair cost of the networks is established, and the genetic algorithm is used to solve the multi-objective optimal regulation model. The model is applied to a small water supply network for case study, and the results show that the total repair time, total repair cost and hydraulic recovery index calculated based on the multi-objective optimal regulation model differ from the corresponding optimal results from the single objective optimal regulation model by 0.06%, 0.03% and 2%, respectively. The plan for emergency repair and regulation based on multi-objective optimal regulation model produces a higher resilience index for pipe networks than the plan does based on single objective optimal regulation model that only involves hydraulic recovery index. This plan is high-efficient, low-cost and helps to obtain a high hydraulic recovery index.

Keywords: water supply networks; decision of post-earthquake recovery; resilience assessment; multi-objective optimization