

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230209002

基于代理指标的供水管网抗震改造优化*

侯本伟, 程雪, 缪惠全, 韩俊艳, 吴珊

(北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 基于水力模型计算的管网供水量满足率(SSIQ)指标, 是评估供水管网震后性能的常用指标。在供水管网抗震改造优化模型中, 若采用SSIQ表示优化目标函数, 优化求解需进行大量水力模型计算, 计算耗时很长。为减小管网抗震改造优化模型的计算量, 对节点流量韧性指标(FR)进行了改进, 增加了管道破坏漏水能量损失的影响项, 提出了一种管网能量指标(Energy Resilience, ER)表示震后管网性能; 以ER指标作为SSIQ的代理指标, 用于量化抗震改造优化模型的目标函数。仅通过管道地震失效概率、管网震前正常运行工况的水力参数计算ER指标, 不必进行震后管网水力模型计算, 以期提升优化模型计算效率。以供水管网震后性能最大化和改造费用最小化为目标, 以管道抗震改造措施为优化变量, 建立了管网抗震改造多目标优化模型, 并比较了ER指标、FR指标以及两个拓扑代理指标的替代效果。案例管网应用结果表明, ER指标与SSIQ指标相关系数呈现强相关性, 基于ER指标的优化方案与基于SSIQ指标的优化方案的差异小于3%, ER指标优化模型计算时间不足SSIQ指标优化模型计算时间的1%。

关键词: 供水管网; 地震破坏; 性能评估; 优化改造; 代理指标

中图分类号: P315.9; TU991.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0839-10

Seismic Retrofit Optimization of Water Distribution System Based on Proxy Indicators

HOU Benwei, CHENG Xue, MIAO Huiquan, HAN Junyan, WU Shan

(Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The system serviceability index of quantity (SSIQ), calculated based on hydraulic models, is a widely used indicator to evaluate the post-seismic performance of water distribution systems (WDS). However, using SSIQ as the objective function in seismic retrofit optimization models for WDS requires extensive hydraulic calculations, leading to time-consuming computational burden. To reduce this burden, the node flow resilience (FR) indicator was improved by incorporating the impact of pipeline breakage and leakage energy loss, and a network energy indicator, energy resilience (ER), was proposed to represent the post-seismic performance of WDS. ER served as a proxy for SSIQ to quantify the objective function of a seismic retrofit optimization model. This indicator could be calculated without the need for post-seismic hydraulic model calculations, which was achieved by using only the seismic failure probability of pipelines and the hydraulic parameters of WDS under normal opera-

* 收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978023)资助

作者简介: 侯本伟(1984—), 男, 副教授。主要从事生命线地震工程研究。E-mail: benweihou@bjut.edu.cn

通信作者: 吴珊(1963—), 女, 副教授。主要从事给排水管网模型优化与管理研究。E-mail: wushan@bjut.edu.cn

tions, thereby improving the computational efficiency of the optimization model. With the objectives of maximizing the post-seismic performance and minimizing the retrofit costs of WDS, a multi-objective optimization model for pipeline seismic retrofitting was established, with pipeline seismic retrofit measures as optimization variables. The performance of *ER*, *FR*, and two topological proxy indicators were compared. Network application results in the case study indicated that *ER* showed strong correlation with *SSIQ*, with the difference between the optimization schemes based on *ER* and that based on *SSIQ* being less than 3%. The computation time for the *ER* optimization model was less than 1% of that for *SSIQ* optimization model.

Keywords: water distribution system; seismic damage; performance evaluation; retrofit optimization; proxy indicators

0 引言

供水管网是城市生命线工程的重要组成部分,是维持城市基本功能的重要基础设施。强烈地震作用下,大量供水管道被破坏,导致供水能力下降,进而影响灾后城市的恢复和重建。在地震前,可以通过震前准备措施来提高供水管网的抵抗能力,从而提高供水管网的抗震韧性。提出供水系统震前准备措施包括^[1]:提高管道抗震能力、提高管网的冗余度,以及增加应急蓄水池等。

在减轻供水管网地震破坏初始状态的震前改造研究方面,文献研究中采取的措施多集中于管道的改造。徐良等^[2]以管网年费用折算值为优化目标、管网拓扑结构与管径为优化变量、管网节点最低可靠度为约束条件,建立供水管网抗震优化设计模型。柳春光等^[3]以管网震后水压总降幅最小为优化目标,以采用柔性接头改造措施的管道为优化变量,管道单元抗震可靠度和震后供水管网各节点的自由水压为约束条件,建立了供水管网的抗震改造优化模型。近年来,水力模型广泛用于供水管网震后状态评估^[4-6],在供水管道抗震改造优化研究中,很多文献将供水管网震后供水满足率(*SSIQ*)最大化为目标函数。D. G. Yoo等^[7]以震后供水满足率为优化目标,管网拓扑结构为优化变量,改造费用为约束条件,提出了一种供水管网抗震优化设计模型。S. Yoon等^[8]以震后供水满足率为优化目标,管道直径为优化变量,改造费用和节点压力为约束条件,提出了一种提高供水管网抗震性能的优化改造方法。上述文献中,一般采用管道失效概率表示地震破坏的不确定性,采用 Monte Carlo 随机模拟方法

求解的优化过程中计算每个待选方案的目标函数(*SSIQ*指标)时,需要进行大量的水力模型计算,计算效率较低。

为了提高管网性能评估的计算效率,一些学者采用拓扑结构指标和韧性能量指标表征供水管网的抗震性能。A. Yazdani等^[9]使用图论中的9个指标来研究管网的拓扑鲁棒性和冗余性。F. Meng等^[10]使用图论中的8个拓扑指标代表网络拓扑的6个关键属性,基于85个不同大小和拓扑特性的供水管网评估结果比较分析,揭示了供水管网全局韧性与网络拓扑属性之间的相关性。B. Pudasaini等^[11]采用了10个网络拓扑指标作为供水管网抗震鲁棒性优化的代理指标,评估了10个代理指标作为优化模型目标函数得到的优化方案与*SSIQ*指标优化方案的差异,发现网络拓扑代理指标显著降低了优化模型求解时间,其中平均节点度(*AD*)和链度密度(ρ_{link})两个代理指标的优化方案与*SSIQ*优化方案差异较小,可以用于供水管网抗震优化模型;但 ρ_{link} 和*AD*代理指标仅考虑了网络拓扑特征,不能体现供水管网压力水流输配的能量损失。E. Todini^[12]提出了一种管网韧性的代理量化指标,根据管网节点处的剩余能量与管网中最大可能剩余能量的比值表示管网能量韧性,该指标适用于正常运行状态下供水管网可用剩余能量的估计,并未考虑灾害事件引起的管道破坏的影响。Z. Farahmandfar等^[13]提出了一种基于节点流量的管网韧性代理指标*FR*,用于评估和提高地震液化沉降灾害影响下的供水管网抗震韧性;该指标考虑了管道破坏对其邻接节点能量供应的影响,并未考虑管道破坏漏水的能量损失。

上述文献分析表明,针对供水管网韧性评估和抗震改造优化问题,采用网络拓扑指标、能量指标表示管网服务性能的代理指标以提高模型计算的效率,是当前研究的重要方向。现有文献中的能量指标并不能体现地震破坏管道漏水对管网能量损失的影响,且缺乏对能量代理指标、网络拓扑代理指标的比较。

本文提出一种量化地震破坏供水管网性能的能量指标 ER (Energy Resilience),同时考虑了管道破坏导致的邻接节点能量损失、管道破坏漏水能量损失的影响;根据管道地震失效概率和震前正常运行状态下的管网水力状态参数计算 ER 指标,无需进行震后管网水力模型计算。以供水管网震后性能最大化和改造费用最小化为目标,以管道抗震改造措施为优化变量,建立了管网抗震改造多目标优化模型。将 ER 指标应用于管网抗震改造优化模型中,通过 Benchmark 管网案例应用,比较了管网能量指标(ER)、平均节点度(AD)、链度密度(ρ_{link})、基于节点流量的韧性指标(FR)、管网供水满足率($SSIQ$)对应的优化方案和计算时间,验证了管网能量代理指标 ER 应用于管网抗震改造优化问题的有效性。

1 管道结构地震失效概率

城市供水管网的破坏受到地震动强度、管道结构属性、周围土体特性等影响,产生的管道破坏存在不确定性,因此采用概率模型^[14]表示地震作用下管道失效风险。假设震后管道的破坏事件服从泊松分布^[15],则地震作用下管道的失效概率 P_f 可表示为:

$$P_f = 1 - \exp(-RR \cdot L) \quad (1)$$

式中, RR 为管道的震害率(处/km),由震害记录统计得到; L 为管道的长度(km)。

管道平均震害率 RR 与地震动区域强度(地震峰值速度 PGV)间的关系采用日本水道协会(JW-WA)^[16]提供的震害统计表达式,考虑了管材、管径、地形地质和场地液化等影响因素的修正系数。

$$\begin{cases} RR = C_p \cdot C_d \cdot C_g \cdot C_l \cdot RR_0 \\ RR_0 = 3.11 \times 10^{-3} \cdot (PGV - 15)^{1.30} \end{cases} \quad (2)$$

式中, RR_0 为标准震害率(处/km); C_p 、 C_d 、 C_g 、 C_l 分别为考虑管材、管径、地形地质、场地液化影响的调整系数,具体参数取值见表 1^[16-18]。根据文献[18],在钢管直径 $\geq DN400$ mm 时,取管材系数 $C_p=0.15$,其余取 $C_p=0.3$; PGV 为地面峰值速度(cm/s)。

表 1 管道平均震害率调整系数

Table 1 Adjustment coefficients for average seismic damage rate of pipelines

管材	C_p	管径/mm	C_d	地形地质	C_g	场地液化	C_l
球墨铸铁管	0.3	75	1.6	地质良好	0.4	无液化	1.0
灰口铸铁管	1.0	100~150	1.0	冲击平原	1.0	中等液化	2.0
石棉水泥	1.2	200~450	0.8	山地	1.1	严重液化	2.4
钢管	0.3(0.15)	500~	0.5	丘陵	1.5		
聚氯乙烯	1.0			旧河道	3.2		
聚乙烯	0.8						

2 供水管网震后服务性能评估

2.1 基于水力模型的管网震后性能评估

美国生命线协会(ALA)将地震产生的管道破坏分为渗漏和断开两类^[18]。渗漏为管道出现破裂或破口,丧失部分供水能力;断开为管道中部完全分离,丧失全部供水能力。美国建筑科学研究院(NIBS)调查表明,在地震导致的管道破坏中,渗漏

占比约 80%,断开占比约 20%^[19]。P. Shi 等^[20]根据不同的管材及管道接口形式,将管道渗漏分为:接口环向松动、纵向裂缝、横向裂缝、管壁破损、管壁撕裂 5 种破坏形式,并给出了管道在每种破坏形式下的发生概率及漏口面积计算表达式,本文采用此方法计算不同类型的破坏点渗漏面积。

在管网水力模型中,渗漏点水力模型如图 1(a)所示,在渗漏位置添加包含一个需水量为零的虚拟节点,一个带止回阀的虚拟管道以及虚拟水库的组

合,形成管道渗漏点水力模型(图1(c)),虚拟管道的参数与漏口面积有关。断开点模型如图1(b)所示,分别在管道开口处增加一个没有需求的虚拟节点,一个虚拟水库以及一个附加单向阀的虚拟管道(图1(d))。添加的虚拟节点、虚拟水库和虚拟管道的具体参数详见文献[21]。

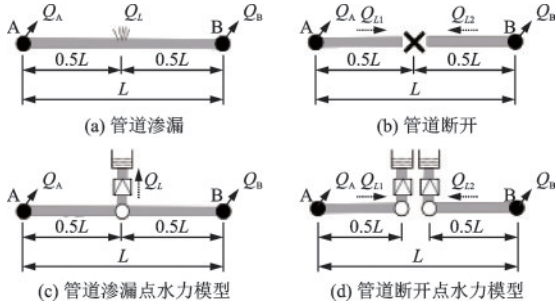


图1 管道破坏示意图及破坏点水力模型

Fig.1 Diagrams for pipeline damages and hydraulic models at damage points

使用破坏点模型对正常状态的管网拓扑结构进行修改,形成震后管网水力模型。对于含有地震断开点和渗漏点的管网水力模型,采用压力驱动节点配水量模型(PDA)^[22-23]计算管网中用户节点的实际配水量,由此得到的节点实际配水量可用于计算供水管网性能,节点配水量与节点水压满足如下函数关系:

$$Q_i = \begin{cases} 0 & H_i \leq H^{\min} \\ Q_{0i} \cdot \sqrt{\frac{H_i - H^{\min}}{H^{\text{req}} - H^{\min}}} & H^{\min} < H_i < H^{\text{req}} \\ Q_{0i} & H^{\text{req}} \leq H_i \end{cases} \quad (3)$$

式中, Q_{0i} 为节点*i*的需水量(L/s); Q_i 为考虑节点水压和配水关系的节点*i*的实际配水量(L/s); H_i 为节点*i*的水压(m); H^{\min} 为节点*i*配水量 Q_i 大于0所需的最低节点水压(m); H^{req} 为节点*i*满足需水量 Q_{0i} 的服务水压(m)。

根据地震破坏管网水力模型计算结果,采用管网震后供水满足率SSIQ作为供水管网震后水力功能指标^[4,7],其表达式如下:

$$\text{SSIQ}_k = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i^k}{\sum_{i=1}^n Q_{0i}} \quad (4)$$

式中, n 为管网中用户节点的数量; k 为QMC模拟抽样; Q_i^k 和 Q_{0i} 分别为第*i*节点在第*k*次QMC模拟中的震后配水量和震前配水量(L/s)。

2.2 管网震后性能评估的代理指标

针对管网抗震改造优化问题,基于E. Todini^[12]和Z. Farahmandfar等^[13]采用的管网能量韧性指标,本节提出一种考虑管道地震失效概率和管网能量特征的管网性能评估代理指标,也即地震破坏供水管网能量指标(Energy Resilience, ER),表达式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} ER &= \frac{E_1 - E_2}{E_3} \\ E_1 &= \sum_{i=1}^n \left[\frac{\left(\sum_{j=1}^{n_i} (1 - P_{fj}) \right)}{n_i} \right] \cdot Q_i \cdot (h_i - h_i^*) \\ E_2 &= \sum_{j=1}^m \left(P_{fj} \cdot q_j \cdot \frac{h_{j1} + h_{j2}}{2} \right) \\ E_3 &= \sum_{r=1}^{nr} (Q_r \cdot H_r) - \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot h_i^*) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中, n 为管网中用户节点数量; m 为管网中管道(边)数量; n_i 为连接到节点*i*的管道的个数; n_r 为管网中水源数量; P_{fj} 为地震荷载作用下管道*j*的失效概率; Q_i 和 h_i 是日常运行工况下用户节点*i*的配水量(m^3/s)和总水头(m); h_i^* 是满足用户节点*i*的用水量的最小服务水头(m); q_j 为日常运行工况下管道*j*的流量(m^3/s); h_{j1} 和 h_{j2} 分别为日常运行工况下管道*j*的起始节点和终止节点的总水头(m); Q_r 为日常运行工况下水源*r*的出水量(m^3/s); H_r 为日常运行工况下水源*r*的总水头(m)。

考虑地震破坏影响的供水管网能量指标ER的物理意义。根据流体力学的能量方程,节点总水头(m)表示单位重量流体所具有的机械能,节点总水头与流量的乘积表示水流所具有的总机械能。式(5)中分子项 E_1 表示地震损伤管网实际到达用户节点的能量,体现了邻接管道地震破坏失效概率对节点能量供应的影响;分子项 E_2 表示地震破坏导致的管道漏水量所消耗的管网能量;分母项 E_3 表示管网日常运行工况下最大可能能量冗余值,第1项 $Q_r H_r$ 表示水源输入到管网中的总能量,第2项表示用户节点所需的最小能量。

在式(5)中,管道抗震改造措施可以减小地震作用下的管道失效概率 P_{fj} ,较严重的地震破坏情景对应较大的管道失效概率,以及较小的 E_1 、较大的 E_2 。因此,管网地震失效概率越大,管网能量指标

ER 越小。当计算不同改造方案对应的 ER 指标时,只需计算该方案对应的管道失效概率,不需计算此改造方案对应的震后水力功能状态。

3 供水管网抗震改造优化模型

针对城市供水管网抗震改造问题,可采用的抗震改造措施包括:管网拓扑结构^[2,7]、增大管径^[24-25]和更换管材等。在选择改造措施(决策变量)时,应考虑管网的实际压力、流速条件和成本限制。考虑到日常运行情景下的供水安全保障需求,不宜对现状管网的拓扑结构进行较大调整。根据表 1 所示的管道震害率调整系数,增大管径、更换延性管材均可减小管道破损率;此外,增大管径还可降低管段沿程水头(能量)损失,能提升管网的输水能力。本文选择增大管径、更换管材作为管道抗震改造措施。根据表 1 和式(2)中的 RR 调整参数 C_p 、 C_d ,增加管径、将普通铸铁管更改为铸铁管或钢管,则对应管道的平均震害率 RR 和管道失效概率 P_f 降低。

本研究建立的管网抗震改造优化模型中,以管网抗震改造措施为优化变量,管网震后性能指标最大化、管网改造费用最小为优化目标,建立多目标优化模型如下:

$$\max F(X) \quad (6)$$

$$\min CC(X) \quad (7)$$

式中, $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ 为供水管网中管道的改造方案,如: $X_j = \{0, 1, 2, \dots\}$ ($j=1 \sim m$) 分别表示管道 j 不改造,改造措施 1,改造措施 2, \dots ; $F(X)$ 为该方案对应的管网震后性能指标值,可以采用式(4)所示的 SSIQ 指标表示,也可以采用式(5)中的管网能量代理指标; $CC(X)$ 为整个管网中所有管道抗震改造的投资费用,计算表达式如下:

$$CC(X) = \sum_{j=1}^m K_j(X_j) \cdot C_j \cdot L_j \quad (8)$$

式中, $K_j(X_j)$ 为针对管道 j 采取的改造措施的造价系数,即为管道改造措施费用与基础造价的比值,如 $K_j = \{0, 1.0, 1.25, \dots\}$ 分别代表不改造,改造措施 1,改造措施 2, \dots 的造价系数; C_j 为第 j 根管道对应的单位长度的基础造价(元/m); L_j 为第 j 根管道的长度(m)。

针对式(6)~(8)所示的管网抗震改造多目标优化模型,本研究采用 NSGA-II 算法^[26]求解优化模型,以获得供水管网的最优抗震改造方案。根据式

(1)~(3)和表 1 可知,以失效概率表示管道改造方案 X 对应的管道物理状态;当采用管网供水满足率指标 SSIQ、代理指标链路密度 ρ_{link} 和管网平均节点度 AD 表示地震损坏管网的性能时,每个管网改造方案 X 对应的震后管网性能 $F(X)$ 也是不确定性量,则式(6)~(8)所示的优化模型为多目标随机规划问题。

在求解优化模型的过程中,采用 SSIQ 指标表示震后管网性能 $F(X)$ 时,本研究采用 Quasi-Monte Carlo(QMC)方法^[27]模拟计算得到每个优化备选方案对应的目标函数,则优化模型求解嵌套 QMC 随机模拟的计算量非常大,优化模型计算耗时较长。而采用能量指标 ER 表示震后管网性能 $F(X)$ 时,可直接采用式(5)计算得到每个优化备选方案对应的目标函数,并不需要 QMC 模拟计算,优化模型计算耗时非常少。

4 案例分析

4.1 管网参数设置与地震破坏场景

选用 Benchmark 供水管网 Modena^[28]作为案例管网,管网的拓扑结构如图 2 所示。Modena 管网^[28]为意大利北部的一个中型真实管网,用户节点 268 个,管道 317 根,平均管径为 127 mm,总需水量 407 L/s。



图 2 Modena 算例管网拓扑结构示意图

Fig.2 Diagram of topological structure in Modena WDS

以管径范围划分管材,假定管径 $< DN200$ mm 为灰口铸铁管, $DN200 \sim 700$ mm 为球墨铸铁管, $DN800$ 及以上为钢管;忽略地震动荷载参数在管网区域内的变化,地震动荷载参数 PGV 取值来自于《中国地震烈度表》^[29],破坏工况的参数设置见表 2;管道的造价参考《给水排水设计手册》(第 10 册)^[30]的公式进行计算;计算案例管网在地震荷载作用下管道破坏率 RR 时,假定管网处在地质良好,土壤无

表2 破坏工况参数设置

Table 2 Parameters for damage scenarios

破坏场景	地震动荷载参数		管道平均震害率 RR/(处·km ⁻¹)	未改造时 SSIQ
	地震烈度	PGV/ (cm·s ⁻¹)		
DS1	IX	55.5	0.137 3	0.827 0
DS2	X	119	0.468 2	0.561 9

液化的场地,地质地形调整系数 $C_g=0.4$,液化程度 $C_l=1.0$ 。对于震后管网水力计算,PDA需求水压 $H^{req}=20\text{ m}$,最小水压 $H^{min}=0\text{ m}$ 。

在管网抗震改造优化模型中,采用 SSIQ 作为管网性能指标时,设置 QMC 模拟次数 $N=100$;当采用 ER 或 FR 作为管网性能指标时,则不必进行 QMC 模拟计算。NSGA-II 求解优化模型的参数设置为:进化代数 200,种群规模 200,个体交叉概率为 0.9,个体变异概率为 0.1^[31-32]。针对种群规模、进化代数进行多次试算,发现针对本文案例,种群规模 200 个和进化代数 200 代,可以满足种群多样性和寻优收敛要求。文献[31]中说明交叉概率的一般范围为 0.4~0.9,根据经验值变异概率一般取 0.000 1~0.1。文献[32]中的采用交叉和变异概率分别为 0.9 和 0.1。因此,本文设置的交叉和变异概率为 {0.9,0.1}。

根据第 3 节分析,本文采用增大管径、更换管材两种改造方式。根据案例管网属性特征,提出了 5 种管道改造措施,具体信息见表 3。将管径增大范围限制在 50~100 mm,是考虑到增大管径不宜对现

表3 管道抗震改造措施及说明

Table 3 Measures and descriptions for pipeline seismic retrofitting

编号	改造措施	备注说明
①	管径增加 50 mm	原管径增加 50 mm,管材不变
②	管径增加 100 mm	原管径增加 100 mm,管材不变
③	更换管材	原灰口铸铁管(CIP)更换为球墨铸铁管(DIP),原球墨铸铁管(DIP)更换为钢管(SP);管径不变
④	且管径增加 50 mm	同时更换管径和管材
⑤	且管径增加 100 mm	同时更换管径和管材

状管网水力条件(流速、压力)产生过大的影响。

4.2 代理指标与 SSIQ 的相关性分析

为了验证 ER 代理指标的有效性,除本文提出的管网能量指标 ER 外,还在算例分析中比较了文献[11]推荐的拓扑结构代理指标(管网链路密度 ρ_{link} 和平均节点度 AD),以及文献[13]采用的基于节点流量的韧性指标 FR。较高 ρ_{link} 、AD、FR 值,对应较高的管网服务性能。

对 Modena 管网采用改造措施③进行管网整体改造,计算其改造措施对应的 SSIQ 时,采用 QMC 随机模拟的 1 000 个破坏样本对应的管网性能指标的 SSIQ 指标、ER 指标、 ρ_{link} 指标、AD 指标值和 FR 指标,计算四个代理指标与 SSIQ 的皮尔逊相关性系数,如图 3 所示。Modena 管网中,两种破坏场景下 SSIQ 与 ER 指标呈极强相关,皮尔逊相关系数分别为 0.863 4 和 0.898 9;SSIQ 与 FR 指标呈极强相关,皮尔逊系数分别为 0.905 1 和 0.908 0;显著高于 ρ_{link} 指标和 AD 指标值的相应值(0.643 1 和 0.644 6)。由图 3(c)、(g)可知,对于 SSIQ 取值在 [0.8, 1.0] 的管网样本,其对应的 ER 指标取值区间为 [0.2, 0.7];对于 ER 指标取值在 [0, 0.2] 的管网样本,其对应的 SSIQ 取值区间为 [0.4, 0.8];因此,ER 指标针对较高服务性能的管网样本区分度较高,SSIQ 指标对于较低服务性能的管网样本区分度较高。

4.3 优化模型系统服务性能对比

对于案例管网,管网每根管道对应的 5 种改造措施作为优化变量,分别采用 {SSIQ, ER 指标, FR 指标, ρ_{link} 指标, AD 指标} 五个指标作为管网性能目标函数,采用 NSGA-II 方法求解式(6)~(8)的管网抗震改造优化模型,得到的五个管网性能指标对应的帕累托前沿如图 4 所示。在优化模型求解过程中,对于 ρ_{link} 、AD 指标,需调用 QMC 模拟产生管道震后随机破坏场景,并将“断开”管道从管网图模型中删除;对于 ER 和 FR 指标,直接根据管道失效概率计算,不必调用 QMC 产生随机破坏场景。以 Modena 管网 DS1 场景为例,对 {ER 指标, FR 指标, ρ_{link} 指标, AD 指标} 四个代理指标得到的帕累托前沿中所有的改造方案,计算这些改造方案对应的 SSIQ 值结果如图 5 所示。采用五个管网性能指标,多目标优化模型求解时间对比如图 6 所示,采用 i7-13700k CPU 处理器计算,内存 32 GB。

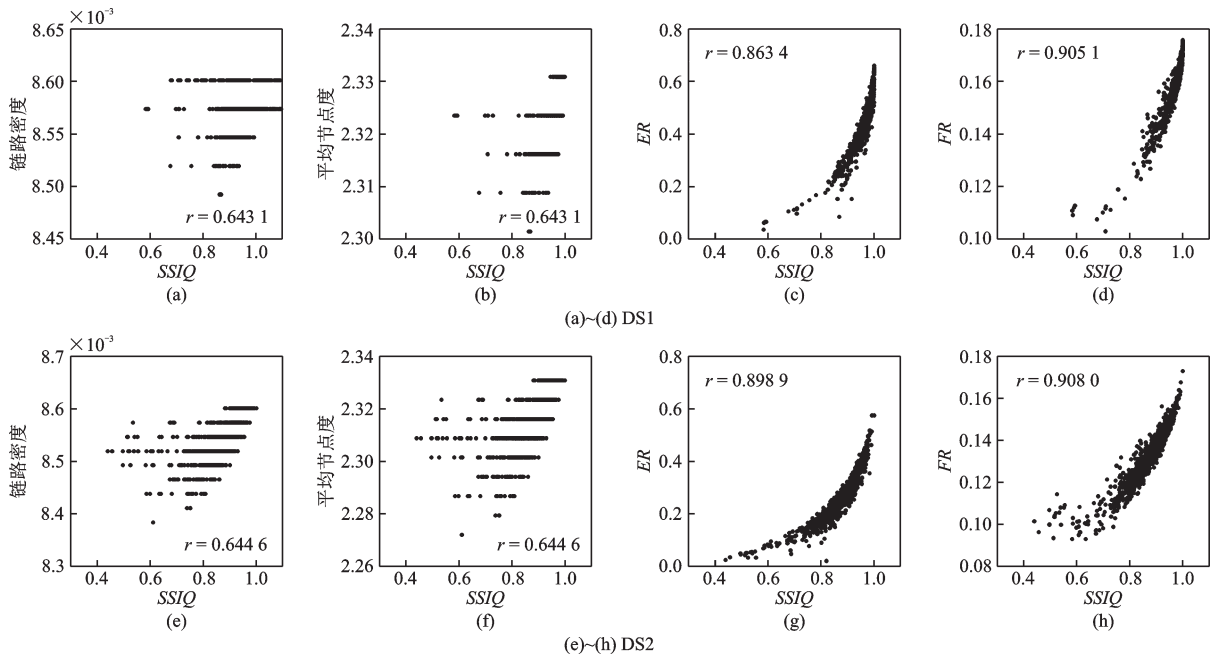


图3 管网性能代理指标与 SSIQ 指标的相关性

Fig.3 Correlation between network performance proxy indicators and SSIQ

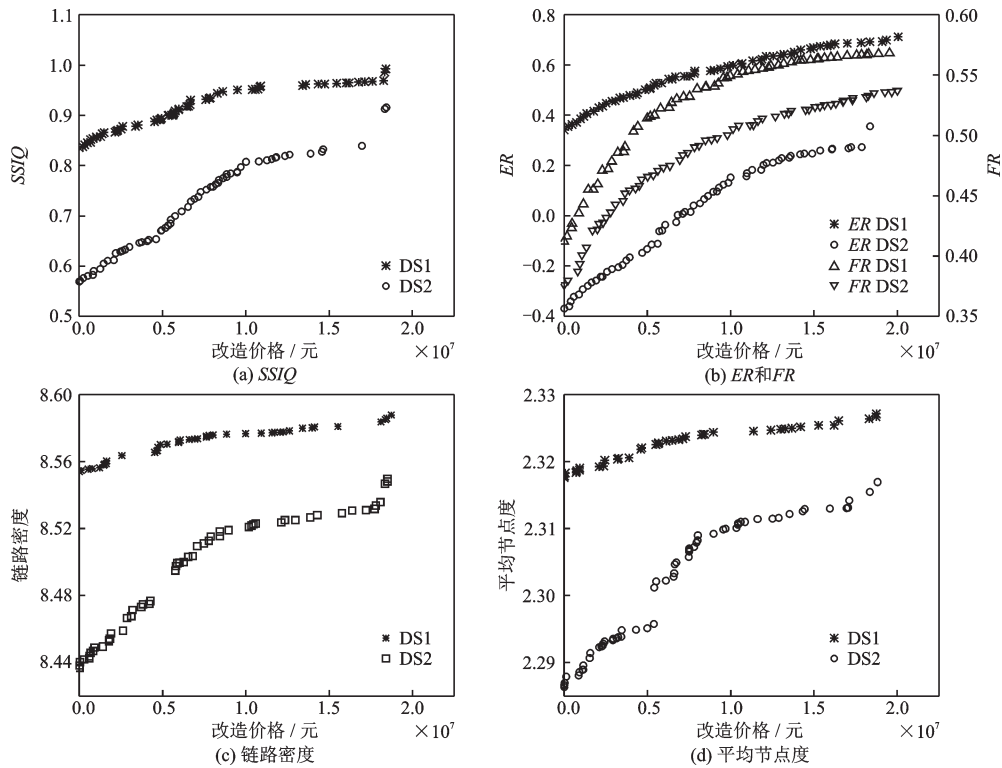


图4 五个指标管网改造优化模型帕累托前沿

Fig.4 Pareto fronts of network retrofit optimization models with five indicators

由图4发现, ER 指标帕雷托前沿数据点的横向变化规律与 SSIQ 指标最为接近。由图5发现, 基于 ER 指标优化求解得到的改造方案, 最接近 SSIQ 指标优化求解的改造方案, 两个拓扑结构指标的改造方案效果与 SSIQ 指标的改造方案也很接近, 但是

ER 指标效果最好; FR 指标在造价为 1 000 万元以后 SSIQ 值有下降的趋势, 原因在于 FR 指标未考虑管道漏水量的能量损失, FR 选择的优化方案中很多管道的改造措施是增加管径, 而针对本案例管网更换管材是提升 SSIQ 最有效的措施。从图6可

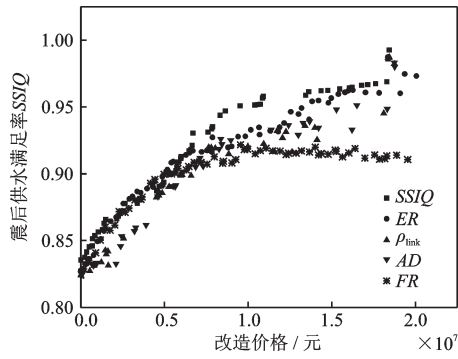


图5 DS1场景不同指标优化方案对应的SSIQ值

Fig.5 SSIQ values for different indicator optimization schemes in DS1 scenario

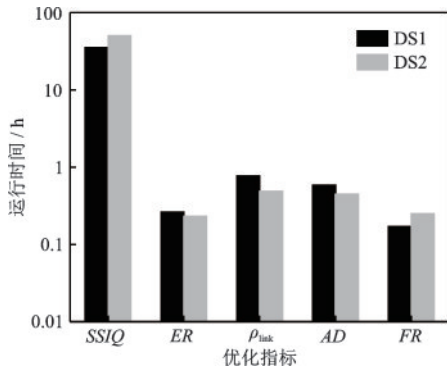


图6 五种指标的管网改造优化模型求解运行时间

Fig.6 Computation time for solving network retrofit optimization models with five indicators

以发现四个代理指标计算的时间远小于SSIQ指标计算的时间,例如,Modena管网在DS1时以SSIQ为优化目标的优化模型计算时间为35.4 h,但以ER为优化目标、以链路密度为优化目标、以平均节点度为优化目标和以FR为优化目标的模型计算时间分别为0.26 h,0.77 h,0.58 h和0.17 h,使用代理指标作为优化目标节约了计算时间。DS1场景下,ER指标的运行时间仅次于FR指标,在场景DS2时,ER指标的运行时间最小。

对每种指标选择五个方案,Modena管网中五个方案的改造价格分别为400万、600万、800万、1 200万和1 600万。将该方案应用于案例管网,进行1 000次QMC模拟,计算其SSIQ值,结果如图7所示。对于Modena管网而言,四个代理指标{ER指标, ρ_{link} 指标, AD 指标, FR 指标}与SSIQ指标的结果差异分别为{0.04%~2.61%, 1.01%~11.65%, 0.83%~5.20%, -0.39%~21.26%}。从上述比较可以看出,与SSIQ指标相比,除FR指标外,其他三类代理指标均可以反映改造措施的有效性;其中,

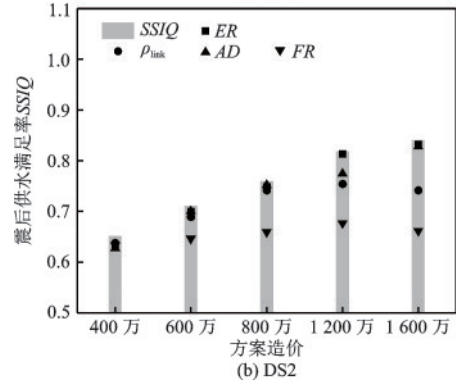
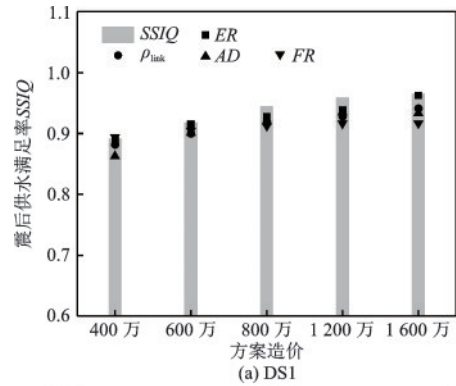


图7 不同指标优化改造方案对应的管网服务性能对比

Fig.7 Comparison of network service performance for different indicator optimization schemes

平均节点度代理指标优化方案结果与SSIQ指标相应方案结果差异在6%以内,而管网能量指标ER优化方案结果与SSIQ指标方案结果差异在3%以内。

综合图4~7的结果可知,对于供水管网抗震优化改造问题,本文提出的管网能量ER指标的计算精度与SSIQ指标方案结果差异小于3%,ER指标计算时间不足SSIQ指标计算时间的1%。与其他代理指标计算结果相比,ER指标、FR指标与SSIQ指标相关性都很好;但是FR指标优化得到的改造方案误差最大超过20%,ER指标对应方案误差约为FR指标误差的1/8;ER指标对应方案误差约为 ρ_{link} 指标和AD指标结果误差的1/4和1/2。ER指标计算时间与FR指标计算时间相近,ER指标计算时间约为 ρ_{link} 指标和AD指标计算时间的1/3~1/2。因此,管网能量特征的ER指标是计算精度和效率较高的代理指标。

5 结 论

提出了一种地震破坏供水管网能量指标ER作为优化模型中水力功能指标SSIQ的代理指标,比较了以ER指标得到的优化改造方案与以SSIQ指

标得到优化改造方案的接近程度、优化模型的计算时间,验证了ER代理指标的有效性,得到如下结论:

(1)对比以震后性能指标最大、改造费用最小的优化模型得到的多目标优化方案,发现ER指标的计算精度与SSIQ指标方案结果差异小于3%,ER指标计算时间不足SSIQ指标计算时间的1%。在抗震改造优化模型中ER指标可以成为SSIQ指标的代理指标。

(2)与网络拓扑特性代理指标(链路密度 ρ_{link} 和平均节点度AD)相比,本文提出的能量代理指标ER与SSIQ指标的皮尔逊相关性系数较高;与基于节点流量的韧性代理指标(FR)相比,ER指标与SSIQ指标的相关系数,与FR指标对应的相关系数接近。

(3)ER指标优化改造方案误差约为FR指标优化改造方案误差的1/8,ER指标对应方案误差约为 ρ_{link} 指标和AD指标结果误差的1/4和1/2;ER指标计算时间与FR指标计算时间相近,ER指标计算时间约为 ρ_{link} 指标和AD指标计算时间的1/3~1/2。ER指标的计算精度和效率较高。

参考文献:

- [1] Eiding J, Davis C A. Recent earthquakes: implications for US water utilities[R]. Denver, CO: Water Research Foundation, 2012.
- [2] 徐良,刘威,李杰.基于微粒群算法的供水管网抗震优化设计[J].防灾减灾工程学报,2010,30(3):269-273.
Xu L, Liu W, Li J. Seismic optimization design of water distribution network based on particle swarm algorithm[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(3): 269-273. (in Chinese)
- [3] 柳春光,何双华.基于正交枚举法的给水管网抗震加固优化研究[J].地震工程与工程振动,2010,30(1):167-175.
Liu C G, He S H. Optimum seismic strength research for water supply network based on orthogonal enumeration method[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(1): 167-175. (in Chinese)
- [4] Yoo D G, Jung D, Kang D, et al. Seismic reliability-based multiobjective design of water distribution system: sensitivity analysis[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(2): 06016005.
- [5] Lee C W, Kwon H J, Yoo D G. Seismic reliability assessment of water supply systems considering critical paths[J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8056.
- [6] Hou B, Ma X, Diao K, et al. Seismic performance assessment of water distribution systems based on multi-indexed nodal importance[J]. Water, 2021, 13(17): 2362.
- [7] Yoo D G, Jung D, Kang D, et al. Seismic-reliability-based optimal layout of a water distribution network[J]. Water, 2016, 8(2): 50.
- [8] Yoon S, Lee Y J, Jung H J. Flow-based optimal system design of urban water transmission network under seismic conditions[J]. Water Resources Management, 2020, 34: 1971-1990.
- [9] Yazdani A, Jeffrey P. Robustness and vulnerability analysis of water distribution networks using graph theoretic and complex network principles[C]//Water Distribution Systems Analysis 2010. Tucson, Arizona, United States: American Society of Civil Engineers, 2011: 933-945.
- [10] Meng F, Fu G, Farmani R, et al. Topological attributes of network resilience: a study in water distribution systems[J]. Water Research, 2018, 143: 376-386.
- [11] Pudasaini B, Shahandashti M. Topological surrogates for computationally efficient seismic robustness optimization of water pipe networks[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(10): 1101-1114.
- [12] Todini E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach[J]. Urban Water, 2000, 2(2): 115-122.
- [13] Farahmandfar Z, Piratla K R, Andrus R D. Flow-based modeling for enhancing seismic resilience of water supply networks[C]//Pipelines 2015. Baltimore, Maryland: American Society of Civil Engineers, 2015: 756-765.
- [14] Metropolis N, Ulam S. The monte carlo method[J]. Journal of the American Statistical Association, 1949, 44(247): 335-341.
- [15] 李立云,任灿,侯本伟.城市供水管网系统抗震能力分析模型对比研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(6):81-93.
Li L Y, Ren C, Hou B W. Comparative study on seismic performance analysis models of water distribution system[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 40(6): 81-93. (in Chinese)

- [16] Japan Water Works Association (JWWA). Seismic damage prediction of water supply pipelines [R]. Tokyo: Japan Water Works Association, 1998.
- [17] Isoyama R, Ishida E, Yune K, et al. Seismic damage estimation procedure for water supply pipelines[J]. Water Supply, 2000, 18(3): 63-68.
- [18] American Lifelines Alliance (ALA). Seismic guidelines for water pipelines[R]. USA: [s.n.], 2005.
- [19] Federal Emergency Management Agency (FEMA). Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model, hazus - MH 2.1 technical manual[R]. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [20] Shi P, O'Rourke T D. Seismic response modeling of water supply systems [R]. Buffalo: The Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2008.
- [21] 韩朝. 基于EPANET的供水管网震后功能仿真与韧性评估平台开发研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- Han Z. Study on post-earthquake performance simulation and resilience evaluation platform development of urban water supply network based on EPANET [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [22] Yoo D G, Kang D, Kim J H. Optimal design of water supply networks for enhancing seismic reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 146: 79-88.
- [23] Han Z, Ma D, Hou B, et al. Seismic resilience enhancement of urban water distribution system using restoration priority of pipeline damages[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 914.
- [24] 李天华. 供水管网脆弱性评价及承灾能力优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- Li T H. Research on vulnerability assessment and disaster-bearing capacity optimization of water supply networks [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [25] 庄宝玉, 杨宇飞, 赵新华. 基于改进混合蛙跳算法的供水管网优化[J]. 中国给水排水, 2011, 27(9): 45-49.
- Zhuang B Y, Yang Y F, Zhao X H. Optimization of water distribution system based on improved shuffled frog leaping algorithm[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(9): 45-49. (in Chinese)
- [26] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [27] 马锡涛. 城市供水管网功能抗震易损性与韧性概率特征分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2022.
- Ma X T. Seismic fragility analysis and probabilistic characteristics of resilience of water distribution systems [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [28] Bragalli C, D'Ambrosio C, Lee J, et al. On the optimal design of water distribution networks: a practical MIN-LP approach[J]. Optimization and Engineering, 2012, 13: 219-246.
- [29] 中国地震烈度表: GB/T 17742—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [30] 上海市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册(第三版第10册)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [31] 魏静. 基于改进NSGA2算法的供水管网多目标优化设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- Wei J. Multi-objective optimal design of water supply systems via improved NSGA2 algorithm [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [32] 陈锐. 基于多目标进化算法的供水管网优化研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- Chen R. Research on optimization of water supply network based on multi-objective optimization algorithm [D]. Xian: Xidian University, 2021. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)