

赵欣, 王名豪, 张飞, 等. 基于水龄熵的供水管网可靠性及水质保障机制[J]. 净水技术, 2026, 45(1): 45-52.

ZHAO X, WANG M H, ZHANG F, et al. Reliability of water supply network and mechanism of water quality guarantee based on water age entropy [J].

Water Purification Technology, 2026, 45(1): 45-52.

基于水龄熵的供水管网可靠性及水质保障机制

赵欣^{1,*}, 王名豪², 张飞¹, 许丽芸², 姜蕾¹, 杨坤¹

(1. 上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司, 上海 200082; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 【目的】 本文以水龄熵为评价指标, 构建供水管网可靠度评价模型, 旨在通过评估管网可靠性, 探究其与水质的关联关系, 进而分析管网水质变化规律, 为提升管网供水安全提供科学依据。【方法】 本文构建了以水龄熵为核心的供水管网可靠度评价模型, 通过分析不同工况下的管网拓扑结构, 量化评估系统可靠度与水质参数包括水龄、余氯衰减速率等的变化特征。【结果】 在同一试验管网中, 针对不同的管网拓扑结构导致系统可靠度及水质变化, 在 13 个工况中, 工况 2 可靠度最高, 可靠度为 0.58, 但其在稳定前的波动幅度较大; 工况 1 系统可靠度与工况 2 相近, 因两者拓扑结构接近; 工况 5 可靠度最低, 可靠度为 0.35, 管网末端节点水龄熵增大。多路径节点可靠度较高, 同时受流量分配及拓扑位置影响较大。在不同工况条件下, 工况 5 水龄最高, 系统中余氯衰减速率最高, 随着系统路径数的增加, 水量分配的不确定性增大。工况 1 和工况 2 系统余氯接近, 而工况 2 系统余氯和出水点余氯水平高于工况 5, 在系统可靠度较高的情况下, 余氯水平高于系统可靠度较低的工况。【结论】 通过管网可靠性评估与水质变化分析, 可揭示供水管网拓扑结构、系统可靠度与管网水质的内在关联, 为优化供水管网设计及保障供水安全提供理论支撑。

关键词 水龄熵 拓扑结构 供水管网 可靠度评价 水质保障

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)01-0045-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.01.006

Reliability of Water Supply Network and Mechanism of Water Quality Guarantee Based on Water Age Entropy

ZHAO Xin^{1,*}, WANG Minghao², ZHANG Fei¹, XU Liyun², JIANG Lei¹, YANG Kun¹

(1. Shanghai National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co., Ltd., Shanghai 200082, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract [Objective] The purpose of this paper is to construct a reliability evaluation model of water supply network by using water age entropy as the evaluation index, aiming to explore the correlation between water supply network reliability and water quality by evaluating the reliability of pipe network, and then analyze the change law of water quality in pipe network, so as to provide a scientific basis for improving the water supply safety of pipe network. [Methods] In this paper, a reliability evaluation model of water supply network with water age entropy as the core was constructed, and the change characteristics of system reliability and water quality parameters (such as water age, residual chlorine decay rate, etc.) were quantitatively evaluated by analyzing the topology of the pipe network under different working conditions. [Results] In the same experimental pipe network, according to the changes in system reliability and water quality caused by different pipe network topologies, among the 13 working case schemes, the reliability of scheme 2 was the highest, with a reliability of 0.58, but its fluctuation range before stabilization was larger. The reliability of scheme 1 and scheme 2 were similar due to the similar network. The reliability of scheme 5 was the lowest, with a reliability of 0.35. The reliability of multi-paths nodes was relatively high, but it was also greatly affected by water amount allocation and topological position. The water age entropy of the end node of the pipe network increased. Under different working conditions, the water age of condition 5 was the highest, the residual chlorine decay rate in the system was the highest, and the uncertainty of water allocation increased with the

[收稿日期] 2025-06-09

[基金项目] 上海市“科技创新行动计划”启明星项目(22QB1401500)

[通信作者] 赵欣(1987—), 女, 高级工程师, 主要从事水务研发等工作, E-mail: zxss2020@126.com。

increase of the number of paths in the system. The residual chlorine in scheme 1 and scheme 2 were close. The total chlorine levels of the system and the residual chlorine at the outlet point in case 2 were higher than those in case 5. [Conclusion] Through the reliability assessment of the pipe network and the analysis of water quality change, the internal relationship between topology, reliability and water quality can be revealed, which provides theoretical support for optimizing the design of the water supply network and ensuring the safety of water supply.

Keywords water age entropy topological structure water supply pipelines network reliability evaluation water quality guarantee

供水管网作为供水系统的核心组成部分,承担着将饮用水从水厂输送至终端用户的关键职能。其可靠性不仅是供水系统安全运行的基石,更是居民生活品质与健康保障的基础。管网可靠性可定义为在特定条件和时间范围内,管网满足流量、压力及水质要求的概率,具体反映在正常或故障工况下持续保障用户水量、水压和水质需求的能力。值得注意的是,该指标不仅受水力条件制约,更与供水水质存在密切关联。

为提升供水可靠性,管网设计与优化始终聚焦于安全保障。然而随着管网规模扩大和拓扑结构复杂化,管段水体滞留现象日益凸显。水体滞留直接导致管网水龄增加,引发多重问题:余氯持续衰减削弱消毒效果、微生物滋生风险加剧、水与管壁及沉积物相互作用产生黄水浊水现象。更严重的是,长期滞留会加速管道及附属设施腐蚀,显著增加漏损、爆管等安全隐患,形成可靠性降低的恶性循环。因此,在管网优化设计中必须统筹考虑水力条件改变对水龄及水质产生的动态影响。

熵是描述系统无序性或混乱度的物理量,由德国物理学家克劳修斯于 1865 年提出,是热力学第二定律的核心概念。信息熵由 Shannon^[1] 在 1948 年提出,用于量化信息的不确定性或随机性。信息熵越高,信息的不确定性越大,反之则越可预测。在可靠性研究领域,Awumah 等^[2] 于 1990 年开创性地将熵理论引入给水管网的可靠性评估,通过熵函数量化流量分布与替代路径对可靠性的影响。国外学者^[3-5] 则在其基础上提出了更为合理的系统熵的概念,介绍了利用路径的思路求解管网最大熵的方法,并对熵在管网水力可靠度和优化设计中的应用进行了研究。Setiadi 等^[6] 研究表明:系统熵与可靠性之间存在很强的关联性,水力建模误差对配水系统熵值与可靠性之间关系可能产生的影响,误差源于设计优化与后续模拟模型之间的细微差异,从而导致网络容量与所需供水量之间存在微小差异。徐祖信

等^[7] 在熵计算模型中加入了包含管径和管长的因数,指出节点到水源距离不同,其可靠性性能也不同。针对水龄熵的研究,骆碧君^[8] 提出了水质熵的概念,但未明确给出其物理意义,也缺乏对熵值计算公式的详细推导过程,这使得水质熵在实际应用中的可操作性和理论深度有所不足。赵新华等^[9] 以余氯作为水质参数,采用路径方法重新定义了水质熵的计算模型,并对其进行了系统的推导与阐述,提供了更为详细的理论框架。Giovanni 等^[10] 在分析水分配网络拓扑特征与流动熵之间的关系基础上,提出了一种通过拓扑信息计算最大流动熵的优化方法,评估了水力网络的鲁棒性与可靠性,表明流动熵与网络结构的复杂性之间存在较强的关联。彭亚等^[11] 在路径流量的基础上引入水龄评价指标,评价了矿井防尘供水管网水力可靠性,表明管网系统可靠度同总用水量变化趋势呈现较强正相关,具有周期性。

水龄熵模型是在信息熵的基础上,结合供水管网拓扑结构、管道流量信息等数据进行建立,用于表征供水管网系统的可靠性程度。前期无论是供水管网还是其他类型的管网,其管网可靠性以水力可靠性为主,较少研究不同的管网拓扑结构以及工况条件水力水质的变化。尽管已有研究在水力可靠性方面取得进展,但针对不同拓扑结构和工况条件下水力-水质耦合演变的研究仍显不足。

本文创新性构建以水龄熵为核心的评价模型,系统探究管网可靠性与水质之间的内在关联,通过可靠性程度评估与水质变化分析,为提升管网供水安全提供科学依据。

1 模型构建及求解

1.1 模型构建

节点水龄是水龄熵模型中重要的参数,指水从进入供水管网到流经某一特定节点所需的平均时间。根据伍悦滨等^[12] 及侯煜堃等^[13] 提出的节点水龄计算方法,在本文中设定水源节点的水龄值为 0,

对于每个节点,由于存在多条供水路径且各路径的流量不同,节点的水龄应按这些路径的水龄和流量加权平均计算,即节点的水龄是所有供水路径水龄的加权平均值节点水龄如式(1)。

$$T_j = \frac{\sum_{i \in D_j} Q_{ij} T_i}{\sum_{i \in D_j} Q_{ij}} \quad (1)$$

其中: T_i 、 T_j ——节点 i 和节点 j 的节点水龄, s;
 i ——与节点 j 相邻的某个上游节点;
 D_j ——与节点 j 相邻的所有上游节点的集合;
 Q_{ij} ——节点 i 与节点 j 之间的管段流量, L/s。

结合 Tanyimboh 等^[4]在供水管网研究中提出的路径概念以及彭亚等^[11]提出的防尘管网水龄熵计算思路,构建水龄熵模型如式(2)。

$$S_j = \sum_{x \in D_j} \left(\frac{Q_{xj} T_{xj}}{Q_j T_j} S_x - \frac{Q_{xj} T_{xj}}{Q_j T_j} \times \ln \frac{Q_{xj} T_{xj}}{Q_j T_j} \right) \quad (2)$$

其中: S_j 、 S_x ——节点 j 和节点 x 水龄熵;
 Q_{xj} ——上游节点 x 输送到节点 j 的流量, 即管段流量, m³/h;
 T_{xj} ——管段 xj 终端水龄, h;
 Q_j ——汇入节点 j 的管段总流量, m³/h;
 T_j ——节点 j 的水龄, h。

1.2 评价指标

为表征水龄熵模型对供水管网可靠性的效果,建立节点可靠性和系统可靠性的模型评价指标。

(1) 节点可靠性

为提高评价结果的准确性和可比性,对评价结果进行归一化,引入最大水龄熵指标。最大水龄熵为在路径水龄平均分配时的水龄熵,其取值由上游路径、管网拓扑结构和流量决定。取水龄熵和最大水龄熵的比值为节点可靠度,得到供水管网节点可靠度计算公式,如式(3)。

$$R_j = \frac{S_j}{S_{j, \max}} = \frac{1}{\ln n} \sum_{x \in D_j} \left(\frac{Q_{xj} T_{xj}}{Q_j T_j} S_x - \frac{Q_{xj} T_{xj}}{Q_j T_j} \ln \frac{Q_{xj} T_{xj}}{Q_j T_j} \right) \quad (3)$$

其中: R_j ——节点 j 的可靠度;
 $S_{j, \max}$ ——最大水龄熵;

n ——最大路径数。

(2) 系统可靠度

对有 J 个节点的供水管网的系统可靠度 (\bar{R}) 定义如式(4)。

$$\bar{R} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J R_j \quad (4)$$

其中: J ——节点个数;

\bar{R} ——系统可靠度。

R_j 和 \bar{R} 越接近 1, 分别表示节点或管网系统的可靠性越强;反之则越不可靠,从而可以据此对管网可靠性较差区域和时段进行重点检测和维护。

在实际应用中,可以设置不同节点的权重系数来表示节点的重要程度,进而获得系统的加权平均可靠度,如式(5)。

$$\bar{R} = \frac{1}{\sum_{j=1}^J w_j} \sum_{j=1}^J w_j R_j \quad (5)$$

其中: w_j ——节点 j 权重。

1.3 模型求解

模型求解的基本思路如下:

(1) 利用模拟器 (WNTR) 加载 EPANET 原始的格式为 inp 的文件,获取管网的基本信息,如拓扑结构、节点标高、水池水位、管长、管径和阻力系数等;

(2) 调用模拟器 WNTR 进行管网的水力水质模拟,获取各节点和管段在不同时间下的水力参数和水质演变参数;

(3) 在当前时间下,判断管段内水流流量及方向,确定每个节点的上游节点、上游管段和路径集;

(4) 获取路径集,具体操作是创建空的有向图,根据管网流量对有向图进行填充,得到管网节点的指向,利用分层排序算法得到每个节点所处的层级;遍及每个层级的节点,根据上游管道流量、节点水龄计算节点水龄熵;

(5) 下一个时刻循环重复上述步骤,直到循环结束,计算系统可靠性。

2 试验准备与方法

2.1 管网模型

本研究使用 EPANET 管网模拟软件,依托管网图纸和运行数据,建立管网水力模型。基于试验结

果对模型进行校核和调整,包括调节管道摩阻系数和局部阻力系数,以使模型与实际管道系统的运行情况相符。在成功校核模型后,模拟管网的运行状态。管网模型包括水库、水池、管网和节点等元素,流量计、阀门等以局部阻力形式简化模型。

2.2 试验基地概况

供水管网试验基地由水池、水泵、管道、阀门、监测仪表等装置组成,水池容积为 15 m^3 ,管道管径均为 DN200,总长度约为 120 m,管网中共有 16 个采样龙头,8 个阀门,如图 1 所示。管道交叉布置形成多个环装管网,管网中间设有阀门,可控制供水区域,可模拟用户用水,也可对管道水质情况进行采样研究。

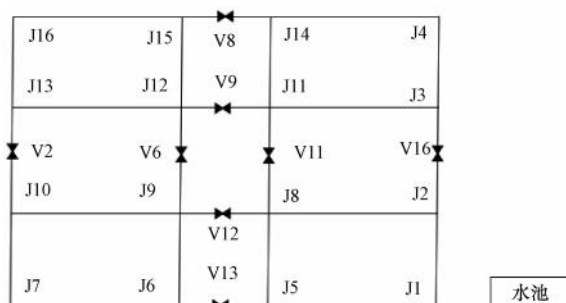


图 1 试验区域管网拓扑结构

Fig. 1 Topological Structure of the Pipelines Network at the Test Area

在本试验中,由市政管网的水源直接引入基地水池,随后通过变频水泵进行增压,在末端处设置出水龙头,模拟用户用水点,确保水流顺畅地流向整个环状管网系统。

2.3 水质检测

试验基地管网上通过采样龙头采集管道内水体,采样前放水时间为 10 s,排空采样管道内滞留水体。检测采样龙头出水余氯浓度参照《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),采用哈希便携式余氯比色计(型号为 DR300)测定样品余氯浓度。

3 供水管网可靠性及水质评估

3.1 不同拓扑结构下供水管网系统可靠度变化

为了探讨水龄、水龄熵、节点可靠度、系统可靠度与余氯之间的关系,针对试验基地管网系统可控制的阀门,进行阀门关闭和开启的组合,列举了 13 种工况情况,如表 1 所示。每一种供水管网的工况

均在管网模型中进行模拟与验证,并进行管网系统可靠度的计算,计算结果如图 2 所示。

表 1 不同工况条件方案

Tab. 1 Schemes of Different Working Conditions

阀门编号	V2	V6	V8	V9	V11	V16	V12	V13
工况 1	常开	常闭	开启	关闭	常闭	常开	关闭	关闭
工况 2	常开	常闭	关闭	开启	常闭	常开	关闭	关闭
工况 3	常开	常闭	关闭	关闭	常闭	常开	开启	关闭
工况 4	常开	常闭	关闭	关闭	常闭	常开	关闭	开启
工况 5	常开	常闭	开启	开启	常闭	常开	开启	开启
工况 6	常开	常闭	开启	关闭	常闭	常开	开启	关闭
工况 7	常开	常闭	开启	关闭	常闭	常开	关闭	开启
工况 8	常开	常闭	关闭	开启	常闭	常开	开启	关闭
工况 9	常开	常闭	关闭	开启	常闭	常开	关闭	开启
工况 10	常开	常闭	开启	开启	常闭	常开	开启	关闭
工况 11	常开	常闭	开启	开启	常闭	常开	关闭	开启
工况 12	常开	常闭	关闭	开启	常闭	常开	开启	开启
工况 13	常开	常闭	开启	关闭	常闭	常开	开启	开启

以上所有工况方案均采用统一的用水模式:用水点为节点 J7,每日用水模式划分为 2 个时段(9:00—16:00,流量为 $0.6\text{ m}^3/\text{h}$; 16:00—次日 9:00,流量为 $0.3\text{ m}^3/\text{h}$)。通过水力模型对每种工况进行 24 h 动态仿真,分析结果表明:受用水量时变影响,系统可靠度在整个模拟周期内呈现一定的波动趋势。如图 2 所示,仿真初期,各工况的可靠度均呈不同幅度的上升趋势;除工况 1 和工况 2 外,其余 11 种工况均在用水高峰开始前(9:00)逐渐趋于稳定。而工况 1 和工况 2 在水量增大阶段表现出可靠度的大幅提升。在用水量下降的时段(16:00),所有工况的可靠度均出现同步下降,随后以不同速率缓慢回升并再次趋于稳定。

各方案在 24 h 内的最大可靠度变化如图 3 所示。工况 2 可靠度最高,稳定可靠度达 0.58,但其在初期波动幅度较大;工况 5 则最低,稳定值仅为 0.35;其余工况的稳定可靠度为 0.40~0.51,其中工况 1 与工况 2 在稳定阶段的可靠度最为接近。

在同一套管网系统中,通过阀门启闭,模拟不同拓扑结构下系统水力状况,对比不同拓扑结构下。基于上述模拟结果,选取 3 组具有代表性的工况方案开展试验验证。工况 2 作为可靠度最优方案,工况 5 作为最差方案,工况 1 则作为与工况 2 性能相

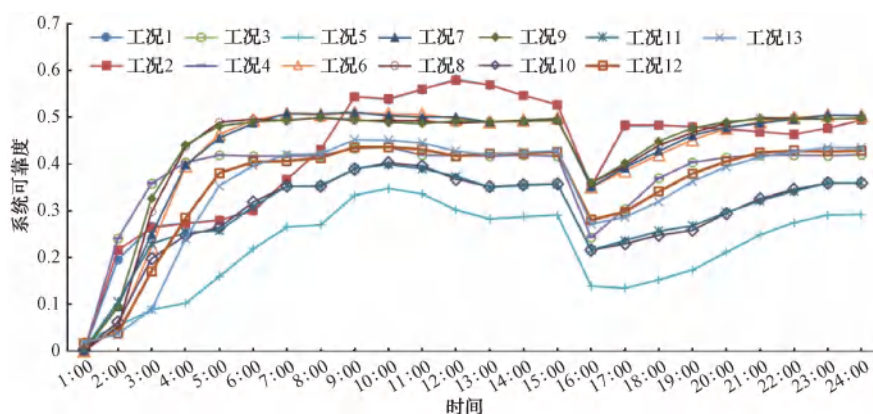


图2 不同工况方案24 h系统可靠度变化

Fig. 2 System Reliability Changes of Different Schemes in 24 Hours

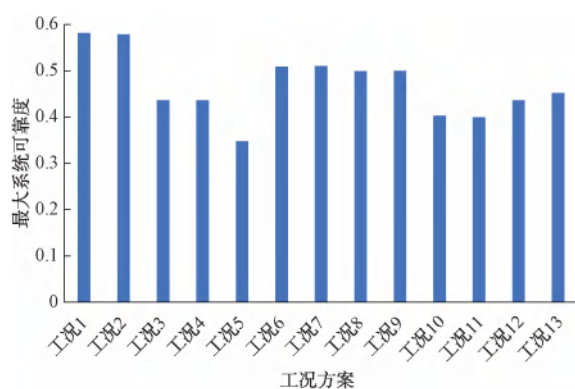


图3 不同工况最大可靠度变化

Fig. 3 Maximum Reliability Changes of Different Schemes

近的对照组,用以进一步分析不同水力条件下系统响应的差异性。各工况通过调整阀门启闭状态模拟不同拓扑结构下的水力运行特性,验证系统在不同配置下的稳定性与可靠性表现。

3.2 不同工况下供水管网节点可靠度变化

3.2.1 节点水龄熵变化

水龄熵反映了节点接收不同路径水流的不确定性。通过分析不同工况下节点水龄熵的变化规律,可以更好地理解管网中各节点的供水状态和水质变化特征。各节点在工况1、工况2和工况5条件下水龄熵的变化如图4所示。

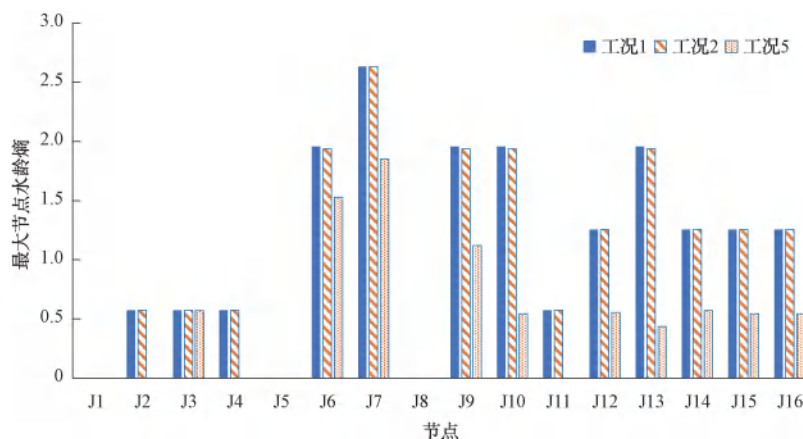


图4 不同工况下最大节点水龄熵的变化

Fig. 4 Variation of Maximum Nodes Water Age Entropy under Different Schemes

在单路径条件下,由于只有1条供水路径,水龄熵始终为0,如工况1和工况2条件下的节点J1、J5和J8。类似的规律也适用工况5单路径的节点,节点J1~J5以及J8、J11。多路径节点的水龄熵明显高于单路径节点,尤其是在管网末端节点J7,3种工况下节点J7的水龄熵均显著大于其他节点,分别为

2.6、2.6及1.9。水龄熵越高代表节点的供水不确定性越高,水质状况受到较大影响,具有更大的不确定性。工况1和工况2的多数节点水龄熵相近,这是由于2个管网具有相近的布置形式和相同的水流方向,且节点流量和管段流量对应成比例时,这2个管网系统的熵值相近。

从节点水龄熵的变化可以看出,试验管网末端节点的水龄熵增大主要是由于路径数量较多和管段流速较低,这导致水龄较大、水质更新缓慢,同时管壁与水体的化学反应更加显著。此外,不同工况下路径的开启与关闭会引起流量分配的变化,例如在工况 1 和工况 2 中,多路径节点 J7 的水龄熵明显高于其他节点,反映出拓扑结构对水龄熵分布的显著

影响。

3.2.2 节点可靠度变化

节点可靠度基于水龄熵归一化计算,反映了节点在系统供水中的稳定性。高可靠度的节点通常具有多路径供水和较快的水质更新能力。各节点在工况 1、工况 2 和工况 5 条件下管网节点可靠度的变化如图 5 所示。

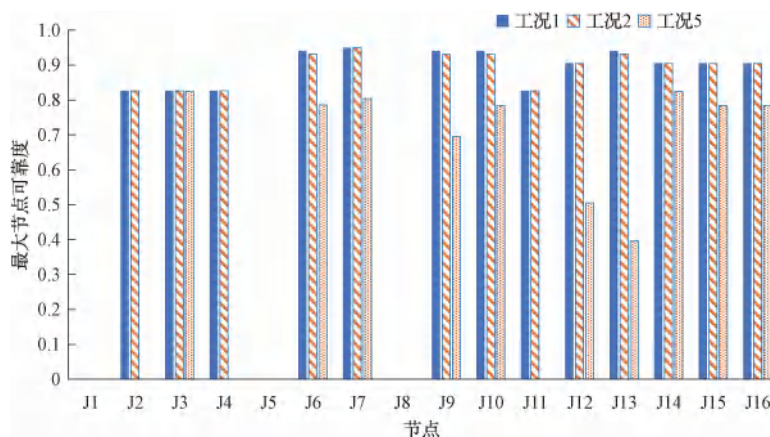


图 5 不同工况下最大节点可靠度变化

Fig. 5 Variation of Maximum Nodes Reliability under Different Operating Modes

在 3 种工况下,多路径节点的可靠度始终较高,如节点 J10 等,而单路径节点的可靠度为 0,如节点 J5。末端节点 J7 可靠度变化相对平缓,这可能与流经末端节点的路径较少、水质更新较慢有关。工况 5 下,由于次末端节点减少,J10 成为次末端节点,其可靠度相较于其他节点更高。从系统可靠度来看,虽然工况 5 阀门开启数量多于工况 1 和工况 2,但工况 1 和工况 2 的可靠度高于工况 5。

从节点可靠度的变化来看,路径数量对可靠度并非起到决定性作用。一般认为,多路径节点由于水龄熵较低、水质更新速度较快,其可靠度普遍较高,而单路径节点因供水来源唯一,其可靠度往往较低。但工况 5 中,由于阀门均为开启状态,系统的供水灵活性达到最高,理论上节点的可靠度应优于其他工况。然而,在实际计算中仍出现部分节点可靠度较低的现象,是因为这些节点位于管网的末端,尽管路径增加,但流量分配较少,导致水龄较大、更新较慢,从而影响了可靠度表现。这反映了路径数量虽重要,但流量分配及拓扑位置同样起到关键作用。

3.3 不同工况下供水管网节点水龄变化

不同工况下供水管网节点水龄变化如图 6 所示。不同工况下节点水龄随用水量变化,呈周期性

变化。在工况 1 条件下,试验基地的管网节点水龄为 14.9~27.6 h,其中节点 J6 和 J9 水龄较大,分别为 27.6 h 和 27.1 h。在工况 2 条件下,试验基地的管网节点水龄为 14.9~27.5 h,其中节点 J6 和 J9 水龄较大,分别为 27.5 h 和 26.9 h。在工况 5 条件下,试验基地的管网节点水龄为 14.9~29.9 h,其中节点 J7、J13 和 J16 较大,分别为 29.0、29.5 h 及 29.9 h。工况 5 条件下最大水龄大于工况 1 和工况 2。

工况 1 和工况 2 的水龄情况接近,主要原因在于两种工况阀门启闭数量相同,管网拓扑结构相近,所开阀门位于两条相邻的管段上,而工况 5 所开阀门数量多于工况 1 和工况 2。在所有方案中,工况 5 条件下系统可靠度最低,而系统水龄最高。在试验基地管网上,通过调节阀门启闭,改变管网拓扑结构,随着系统路径数的增加,水量分配的不确定性增大,水龄也在增大。

3.4 不同工况下供水管网节点余氯变化

不同工况下供水管网节点余氯变化如图 7 所示。工况 5 条件下,节点 J5 和 J10 处余氯质量浓度最低分别为 0.29 mg/L 和 0.35 mg/L,在试验中此两节点的水龄最高,分别为 29.8 h 和 32.2 h。工况

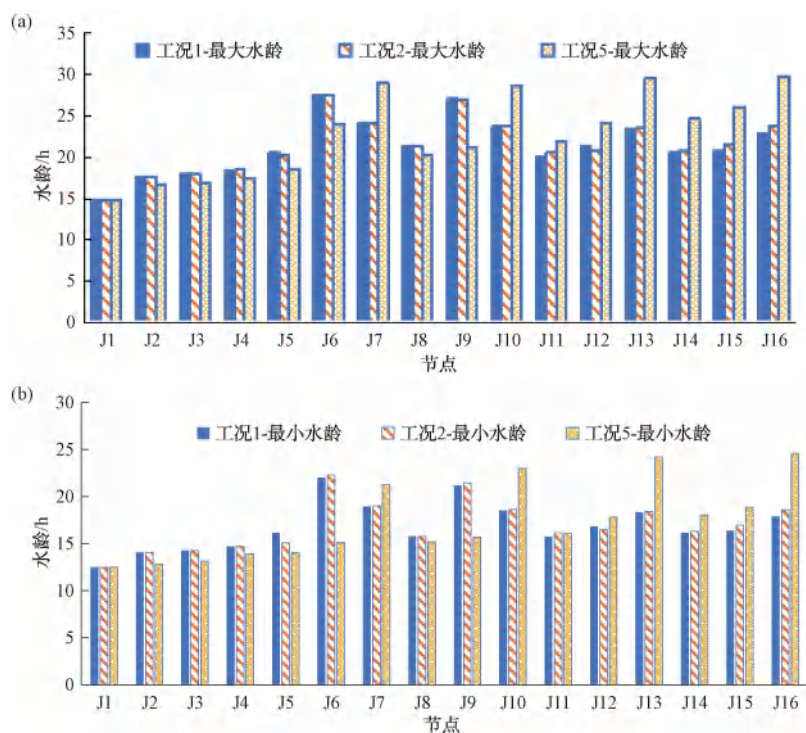


图 6 不同工况下节点最大水龄和最小水龄变化

Fig. 6 Variation of Maximum and Minimum Nodes Water Ages under Different Schemes

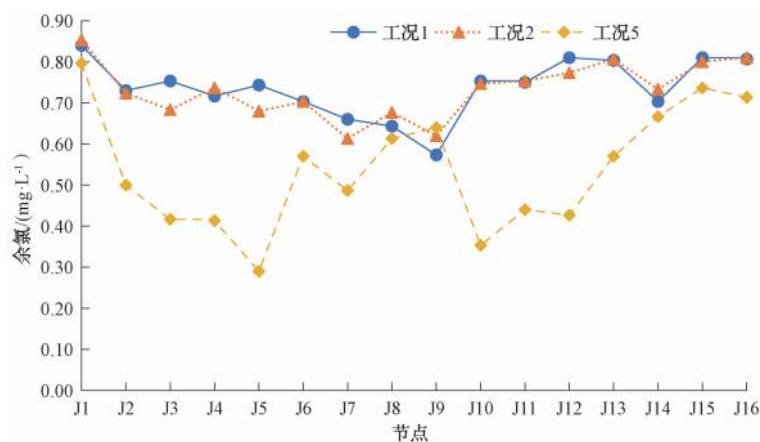


图 7 不同工况下管网余氯变化

Fig. 7 Variation of Residual Chlorine in Pipelines Network under Different Schemes

1 和工况 2 余氯最低点为节点 J9,该点水龄为 27 h,余氯质量浓度分别为 0.57 mg/L 和 0.62 mg/L,是该工况条件下所有节点中余氯衰减最快的节点,同时节点 J16 的水龄最小,对应的余氯浓度最高。例如,在工况 5 条件下,节点 J7 为管网最末端但其水龄并不是所有管网节点中最小的节点,说明在管网系统中存在水力滞留的节点,在此节点处水龄最高,余氯浓度最低。

从系统可靠度角度来看,工况 1 和工况 2 的可

靠度高于工况 5;工况 1 和工况 2 的余氯平均质量浓度分别为 0.74 mg/L 和 0.73 mg/L,高于工况 5 余氯平均质量浓度为 0.54 mg/L。出水点 J7 在工况 1、工况 2 和工况 3 条件下,余氯质量浓度分别为 0.66、0.61 mg/L 和 0.49 mg/L,也是在工况 5 条件下最低。因此,在系统可靠度较高的情况下,余氯水平高于系统可靠度较低的工况。通过提高系统可靠度可以实现系统余氯以及出水点余氯水平的调控,为用户龙头水水质的提升提供支撑。

4 结论

通过构建以水龄熵为核心的供水管网可靠度评价模型,解析了管网可靠性与水质之间的关系,为未来的管网设计与优化中,在提升管网可靠性提供理论支撑。

(1)在试验管网系统中,管网最末端出水处水龄不是水龄最高的节点,管网系统中存在水力滞留节点,该节点处的水龄高于末端节点。因此,在实际管网中优化水龄较高的节点以此改善该节点处的水质情况。针对盲肠管开展管道末端放水或者管道冲洗等措施,提升管道供水水质情况。

(2)随着管网中节点路径数的增加,系统节点处水龄就越高,然而管网系统可靠度并不随着管网路径数的增加而增大;路径数增多提高了管网节点水量分配的可能性,增大了管网整体水龄,降低了管网余氯浓度。因此,应考虑到路径数的增多对输配管网水龄提高和余氯衰减等方面的影响。

(3)在现役管网中可以通过新排管段、阀门操作、缩小管径或减小调蓄设施容积等手段,优化管网拓扑结构,在提高供水可靠性的同时,改善输配管网的水质情况。

参考文献

- [1] SHANNON C E. A mathematical theory of communication, part II[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27: 623-656.
- [2] AWUMAH K, GOULTER I. Maximizing entropy defined reliability of water distribution networks[J]. Engineering Optimization, 1992, 20(1): 57-80.
- [3] TANYIMBOH T T, TEMPLEMAN A B. Maximum entropy flows for single-source networks[J]. Engineering Optimization, 1993, 22(1): 49-63.
- [4] TANYIMBOH T T, TEMPLEMAN A B. Calculating maximum entropy flows in networks[J]. Journal of the Operational Research Society, 1993, 44(4): 383-396.
- [5] TANYIMBOH T T, TEMPLEMAN A B. A quantified assessment of the relationship between the reliability and entropy of water distribution systems[J]. Engineering Optimization, 2000, 33(2): 179-199.
- [6] SETIADI Y, TANYIMBOH T T, TEMPLEMAN A B. Modelling errors, entropy and the hydraulic reliability of water distribution systems[J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36(11/12): 780-788.
- [7] 徐祖信, 刘遂庆, R. Guercio. 熵在水分配系统优化设计中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1997(1): 71-76.
XU Z X, LIU S Q, GUERCIO R. Application of entropy in the optimal design of water water distribution system[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 1997(1): 71-76.
- [8] 骆碧君. 基于可靠度分析的供水管网优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
LUO B J. Reliability-based optimization of water distribution systems[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [9] 赵新华, 张高娜, 庄宝玉, 等. 基于路径熵的供水管网水质可靠性评价[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(9): 799-804.
ZHAO X H, ZHANG G Y, ZHUANG B Y, et al. Path entropy method for reliability assessment of water quality in water distribution networks[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2013, 46(9): 799-804.
- [10] GIOVANNI F S, ARMANDO D N, MICHELE D N, et al. Scaling-laws of flow entropy with topological metrics of water distribution networks[J]. Entropy, 2018, 20(2): 95-95.
- [11] 彭亚, 蒋仲安, 王佩. 基于水龄熵的矿井防尘供水管网可靠性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(8): 2221-2231.
PENG Y, JIANGZ Z A, WANG P. Reliability analysis of mine water supply network for dust control based on water age entropy[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(8): 2221-2231.
- [12] 伍悦滨, 赵洪宾, 张海龙. 用节点水龄量度给水管网的水质状况[J]. 给水排水, 2002, 28(5): 36-36.
WU Y B, ZHAO H B, ZHANG H L. Using node water age to measure the water quality of water supply networks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2002, 28(5): 36-36.
- [13] 侯煜堃, 赵硕, 冯玉冠. 基于管道节点水龄的供水管网中途加氯优化[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 71-79, 160.
HOU Y K, ZHAO S, FENG Y G. Optimiztion of pipelines midpoint chlornation in water supply distribution networks based on water age of pipelines nodes[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 71-79, 160.