

陈晓晨. 基于水力水质的供水管网可靠性综合评估建模[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 63-68.

CHEN X C. Comprehensive evaluation and modeling of reliability for water supply pipelines network based on hydraulics and water quality[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 63-68.

基于水力水质的供水管网可靠性综合评估建模

陈晓晨*

(上海临港供排水发展有限公司, 上海 201306)

摘 要 【目的】供水管网可靠性评估在供水系统的规划、设计和运行中起着重要作用。文章通过建立供水管网可靠性模型,对供水管网的可靠性进行综合评估。【方法】文章通过模型定义供水管网节点的水压可靠性、水量可靠性、余氯可靠性及水龄可靠性,进一步将节点的综合可靠性定义为水压可靠性、水量可靠性、余氯可靠性及水龄可靠性的最小值,最后将节点进行加权求和得到供水管网系统可靠性。通过编写 MATLAB 程序调用 EPANET 水力水质引擎,并应用于实际管网,采用蒙特卡洛模拟供水管网在稳态、非稳态、不确定情况下的水压、水量、余氯浓度及水龄,通过模型计算获得各节点的水压可靠性、水量可靠性、余氯可靠性及水龄可靠性,进一步得到节点综合可靠性和供水管网系统可靠性。【结果】在稳态情况下供水管网的综合可靠性为 0.36,在基于所选需水模式的动态情况下供水管网的综合可靠性呈现 2 个波峰时间(5~6 h 和 15~16 h),2 个波谷时间(9~10 h 和 23~24 h),在节点需水量具有不确定性时供水管网的综合可靠性为 0.38。【结论】节点可靠性与节点在供水管网所处位置关系密切,越靠近管网末梢的节点水压可靠性、水量可靠性、余氯可靠性及水龄可靠性越低,余氯可靠性和系统可靠性与节点需水模式、余氯衰减规律等因素有关。该模型物理概念明确,计算简便,评价结果客观、合理。

关键词 供水管网 可靠性 水压可靠性 水量可靠性 水质可靠性

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)08-0063-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.008

Comprehensive Evaluation and Modeling of Reliability for Water Supply Pipelines Network Based on Hydraulics and Water Quality

CHEN Xiaochen*

(Shanghai Lingang Water Supply and Drainage Development Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract [Objective] The reliability assessment of water supply networks plays an important role in the planning, design, and operation of water supply systems. In the paper, a reliability model of the water supply network is established to conduct a comprehensive assessment of the reliability of the water supply network. [Methods] In the paper, the water pressure reliability, water volume reliability, residual chlorine reliability and water age reliability of the water supply network nodes were defined through models. Further, the comprehensive reliability of the nodes was defined as the minimum values of water pressure reliability, water volume reliability, residual chlorine reliability and water age reliability. Finally, the weighted summation of the nodes was carried out to obtain the reliability of the water supply network system. By writing a MATLAB program to invoke the EPANET hydraulic water quality engine and applying it to the actual water supply network, Monte Carlo was used to simulate the water pressure, water volume, residual chlorine concentration and water age of the water supply network under steady-state, non-steady-state and uncertain conditions. The water pressure reliability, water volume reliability, residual chlorine reliability and water age reliability of each node were obtained through model calculation. Further obtain the comprehensive reliability of the nodes and the reliability of the water supply network system. [Results] The comprehensive reliability of the water supply network was 0.36 under steady-state conditions, and presents two peaks time (5-6 hours, 15-16 hours) and two valleys time (9-10 hours, 23-24 hours) under dynamic conditions based on the selected water demand mode. The comprehensive reliability of the water supply network was 0.38 when the node water demand is

[收稿日期] 2025-01-13

[通信作者] 陈晓晨(1982—),男,高级工程师,主要从事城镇供排水设施投资、建设和运维管理等工作,E-mail:xcchen@189.cn。

uncertain. [Conclusion] Reliability of nodes is closely related to their location in the water supply network. Nodes closer to the end of the network have lower water pressure reliability, water volume reliability, residual chlorine reliability, and water age reliability. Residual chlorine reliability and system reliability are related to factors such as node water demand patterns and residual chlorine attenuation rules. This model has clear physical concepts, simple calculations, and objective and reasonable evaluation result.

Keywords water supply pipelines network reliability water pressure reliability water quantity reliability water quality reliability

供水管网可靠性是指供水管网在规定的条件下和规定的时间内保量、保压、保质完成供水功能的能力,是评价供水管网性能的重要指标^[1]。供水管网可靠性涉及机械可靠性、水力可靠性和水质可靠性。其中,机械可靠性用于评估整个管网的连通情况,确定组件在任何时候均保持有效状态的概率;水力可靠性是指在特定情况下的指定时间段内,供水系统可以提供满足用户所需水量水压的概率;水质可靠性衡量供水管网水质满足饮用水水质标准的概率。供水管网可靠性的直接评估法(如蒙特卡洛模拟、模糊数学法等)过程较为繁琐,应用于实际供水管网比较不切实际。因此,采用替代指标进行可靠性度量的方法被提出,以简化管网优化的流程,并减少计算工作量,主要有水压/能量替代指标和流量替代指标2种类别。Todini^[2]提出了与管网能量相关的弹性指数度量可靠性,弹性指数定义为需水节点的总剩余能量与总输入能量减去需水节点总需求能量所得的差的比例。然而,考虑到对于环状管网中节点的最大结余能量还受节点所连的管道数目和管径大小影响,在此基础上 Prasad 等^[3]增加了节点的管径均匀度的乘子,提出了“管网弹性指数”的指标,不仅包含节点结余能量的计算,还考虑了管段连通性的影响,使得指标更加综合与实际可靠性概念更加贴切。基于信息熵技术提出可靠性替代指标,评估供水管网流量/水压的均匀分布程度,在此基础上徐祖信等^[4]增加了考虑管径和管长因素的改进熵模型。熵指标通过计算进入单个节点的流量的比例来评估管网流量的“混乱”程度,从而提供管网连通性(可行的供水路径的数量)的替代度量。在关于可靠性替代指标的相关研究中,最常被引用和讨论的是以弹性指数和熵指数为核心概念的各种指标,关于这二者的比较,不同的学者往往从不同角度考虑得出相互矛盾的结论^[5]。替代法是利用间接的可靠性替代数学模型代替对可靠性的直接计算,应用该方法可以避免繁琐的水力计算,从而大大提高计算效率。事实上尽管目前在此领域已经有许多研

究,但是最佳可靠性替代评价措施的评估仍然是一个未解决的问题。

目前研究集中于对于机械可靠性、水力可靠性的研究,而水质可靠性由于比较复杂,研究相对较少。而供水管网水质的可靠性是人民群众及管理部门密切关注的焦点,是人民生命安全和生活质量的重要保证,大多采用余氯指标代表管网水质,除了余氯指标外,水龄也是管网水质的一个重要衡量指标,尽管已有许多研究提出从不同类别的可靠性定义考虑的可靠性替代指标。真正可靠的管网应该从所有角度考虑都是有效的,然而很少有指标考虑将这些不同类别的可靠性定义结合在一起,更全面地分析供水管网的可靠性。因此,本文提出了一种结合水力可靠性和水质可靠性的系统可靠性评估方法,对供水管网的系统可靠性进行综合度量。

1 可靠性模型构建

供水管网由管段、节点、阀门、水泵构成。供水管网可靠性通过节点可靠性定义,而节点可靠性又通过节点的水压、水量、余氯、水龄4个水力水质参数体现。

1.1 节点可靠性

(1) 水压可靠性

水压可靠性是基于节点可用压力、最小期望压力和可接受最小压力之间的关系来定义的,如式(1)。

$$R_j(P) = \begin{cases} 0, & P_j \leq P_{j,Acc} \\ \frac{P_j - P_{j,Acc}}{P_{j,Des} - P_{j,Acc}}, & P_{j,Acc} \leq P_j < P_{j,Des} \\ 1, & P_j > P_{j,Des} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $R_j(P)$ —— j 节点 t 时刻的水压可靠性;

P_j ——正常状态下 j 节点 t 时刻的压力,m;

$P_{j,Acc}$ —— j 节点最小可接受压力水平,m;

$P_{j,Des}$ —— j 节点期待压力水平,m。

当可用压力低于最小可接受服务水平时,水压可靠性为0;当可用压力高于所需服务水平时,水压

可靠性为 1.0。

(2) 水量可靠性

节点可用流量与可用节点压力密切相关^[6]。当压力从最小期望压力下降到最小压力时,可用流量从期望流量下降到 0。在正常模式下,节点处的压力高于所需的最小压力,这意味着节点处的流量是可接受的。在故障模式下,节点处的压力低于所需的最小压力,导致节点处的流量小于所需流量。当节点处的压力低于最小压力时,节点无法接收流量。因此,水量可靠性采用式(2)来定义。

$$R_j(Q) = \begin{cases} 0, & P_j = 0 \\ \frac{Q_{j,avl}}{Q_{j,Des}} = \left(\frac{P_j}{P_{j,Des}}\right)^{\frac{1}{n}}, & 0 \leq P_j \leq P_{j,Des} \\ 1, & P_j > P_{j,Des} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $R_j(Q)$ —— j 节点 t 时刻的水量可靠性;

$Q_{j,Des}$ —— j 节点 t 时刻期待的节点流量, L/s;

$Q_{j,avl}$ —— j 节点 t 时刻期待的可获得的流量, L/s;

n ——流量与压力的关系指数,一般在 1.5~2.0^[7]。

当可用压力为 0 时,水量可靠性为 0;当可用压力高于所需服务水平时,水量可靠性为 1.0。

(3) 余氯可靠性

氯浓度过高,会与水中的天然有机物(NOM)反应形成致癌消毒副产物,且会带来难闻的气味,而较低的氯浓度可能会导致微生物再生和生物膜的形成。因此,余氯可靠性评估设置可接受的最低浓度和最高浓度。此外,还设置了另外 2 个氯浓度限制,即期待的氯浓度下限和上限。余氯可靠性采用式(3)定义。

$$R_j(C) = \begin{cases} 0, & C_j < C_{j,Acc} \\ \frac{C_j - C_{j,Acc}}{C_{j,LDes} - C_{j,Acc}}, & C_{j,Acc} \leq C_j < C_{j,LDes} \\ 1, & C_{j,LDes} \leq C_j \leq C_{j,HDes} \\ \frac{C_{j,UAcc} - C_j}{C_{j,UAcc} - C_{j,HDes}}, & C_{j,HDes} \leq C_j < C_{j,UAcc} \\ 0, & C_j > C_{j,UAcc} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $R_j(C)$ —— j 节点 t 时刻的余氯可靠性;

C_j ——正常状态下 j 节点 t 时刻的余氯质量浓度, mg/L;

$C_{j,Acc}$ ——可接受的余氯最低质量浓度, mg/L;

$C_{j,UAcc}$ ——可接受的余氯最高质量浓度, mg/L;

$C_{j,LDes}$ ——期待的余氯质量浓度下限, mg/L;

$C_{j,HDes}$ ——期待的余氯质量浓度上限, mg/L。

当节点余氯低于可接受的余氯最低浓度时,余氯可靠性为 0,当节点余氯高于可接受的余氯最高浓度时,余氯可靠性亦为 0,当余氯浓度在期待的余氯浓度上下限之间时,余氯可靠性为 1。

(4) 水龄可靠性

供水管网水质随着水龄的增长而恶化,因此,水龄可以用来度量水质状况,水龄可靠性度量如式(4)。

$$R_j(W) = \begin{cases} 1, & W_j \leq W_{j,LDes} \\ \frac{W_{j,HDes} - W_j}{W_{j,HDes} - W_{j,LDes}}, & W_{j,LDes} < W_j < W_{j,HDes} \\ 0, & W_j \geq W_{j,HDes} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $R_j(W)$ —— j 节点 t 时刻的水龄可靠性;

W_j —— j 节点 t 时刻的水龄, h;

$W_{j,LDes}$ —— j 节点 t 时刻水龄期待下限, h;

$W_{j,HDes}$ —— j 节点 t 时刻水龄期待上限, h。

当水龄低于期待水龄下限时,水龄可靠性为 1;当水龄高于期待水龄上限时,水龄可靠性为 0。

(5) 节点可靠性

将各节点的水压可靠性、水量可靠性、余氯可靠性、水龄可靠性的最小值作为该节点的可靠性度量, j 节点 t 时刻的综合可靠性采用式(5)定义。

$$R_j(m) = \min[R_j(P), R_j(Q), R_j(C), R_j(W)] \quad (5)$$

其中: $R_j(m)$ ——综合可靠性。

节点的综合可靠性取决于制约节点可靠性的水压、水量、余氯、水龄中的最不利因素。

1.2 系统可靠性

供水管网系统可靠性综合各节点各时刻的可靠性,节点的权重取决于节点需水量的相对大小,采用式(6)~式(7)定义。

$$R(t) = \frac{\sum_{j=1}^N Q_{j,Des} \times R_j(m)}{\sum_{j=1}^N Q_{j,Des}} \quad (6)$$

$$R(S) = \frac{\sum_{i=0}^t Q_i \times R(t)}{\sum_{i=0}^t Q_i} \quad (7)$$

其中: $R(t)$ ——时刻 t 管网系统可靠性;

$R(S)$ ——管网可靠性;

Q_i ——时刻 t 管网系统需水量, L/s。

2 实例分析

2.1 研究对象

供水管网管段的管长、管径、管段编号、各节点的需水量、节点编号如图 1 所示。各管段的粗糙系数为 100。假设最小可接受压力水平为 15 m, 节点最小期待压力水平为 25 m, 可接受的余氯最低质量浓度为 0.2 mg/L, 可接受的余氯最高质量浓度为 0.7 mg/L, 期待的余氯质量浓度下限为 0.3 mg/L, 期待的余氯质量浓度上限为 0.6 mg/L, 期待的 j 节点 t 时刻水龄下限为 10 h, 期待的 j 节点 t 时刻水龄上限为 50 h。假设管网余氯衰减遵循一级反应, 余氯主体水衰减系数和管壁衰变系数, 分别为 -1 d^{-1} 和 -0.3 m/d 。假设水库源的余氯质量浓度为 1.0 mg/L, 所有节点的初始余氯质量浓度为 0.5 mg/L。

2.2 模型应用

通过编制 MATLAB 计算程序调用 EPANET 工具箱, 进行水力和水质模拟, 获取模拟结果, 通过式 (1)~式 (7) 分别计算各节点的水压可靠性、水量可靠性、余氯可靠性及水龄可靠性, 进而得到管网的系统可靠性。

(1) 在稳态情况下

当节点需水量不随时间变化, 即节点需水量分别为 (10, 10, 6.5, 10, 13, 10, 6.5, 6.5) 时, 节点的水量可靠性为 (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1), 水压可靠性为 (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1), 余氯可靠性为 (0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0), 水龄可靠性为 (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1), 供水系统的综合可靠性为 0.36。

(2) 在动态情况下

当节点需水量随时间变化, 24 h 乘子分别为 (1.0, 1.0, 1.2, 1.2, 1.4, 1.4, 1.6, 1.6, 1.4, 1.4, 1.2, 1.2, 1.0, 1.0, 0.8, 0.8, 0.6, 0.6, 0.4, 0.4,

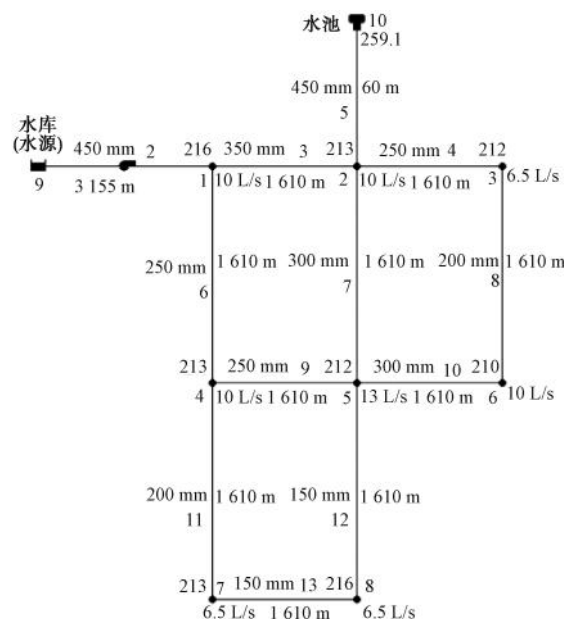


图 1 供水管网拓扑结构

Fig. 1 Topology of Water Supply Pipelines Network

0.6, 0.6, 0.8, 0.8), 将乘子模式应用于所有节点需水量, 并在 960 h 的模拟期内重复, 直到所有节点的余氯浓度达到周期性稳态条件, 即在连续的模拟日内重复 24 h 内的余氯浓度。最后 24 h 的输出被保存以进行可靠性评估。节点的水量可靠性、水压可靠性、水龄可靠性 24 h 均为 (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1), 24 h 余氯可靠性如图 2 所示。

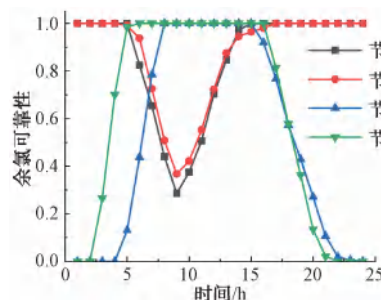


图 2 节点水龄可靠性动态变化

Fig. 2 Dynamic Changes of Nodal Water Age Reliability

由图 2 可知, 节点的余氯可靠性随时间变化不同, 节点 3 和节点 5 的余氯可靠性变化规律相似, 节点 6 和节点 8 的变化规律相似。这主要取决于节点在管网中的位置, 不同位置处节点的余氯衰减规律不同。系统可靠性如图 3 所示, 可见系统可靠性出现 2 个波峰 (5~6 h 和 15~16 h), 2 个波谷 (9~10 h 和 23~24 h)。因此系统可靠性与节点需水模式、余氯衰减规律等因素有关。

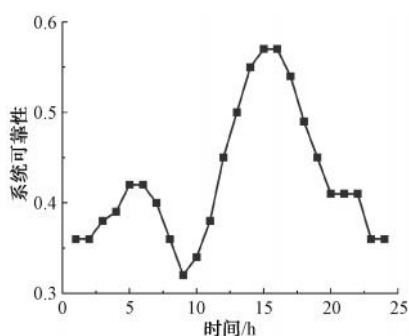


图3 系统可靠性动态变化

Fig. 3 Dynamic Changes of System Reliability

(3) 在水力水质参数节点需水量具有不确定性时

影响水力和水质模拟的输入参数主要包括管道粗糙度系数、余氯主体水衰减系数、余氯管壁衰减系数以及节点需水量。假设管道粗糙度系数、余氯主体水衰减系数、余氯管壁衰减系数以及节点需水量

是相互独立的,且服从正态分布,正态分布的均值为确定的管网模拟值,变差系数为 0.2,从而得到各正态分布参数的方差。当各输入参数为正态概率分布时,采用蒙特卡洛模拟可以重复执行与具有已知或假设概率分布的输入参数相对应的输出变量,在时间要求可以大大缩短的情况下采用蒙特卡洛模拟无需复杂的数学运算即可快速执行。编写 MATLAB 程序,调用 EPANET 水力水质引擎,基于蒙特卡洛模拟节点的水压、水量、余氯浓度及水龄,如图 4 所示。

由图 4 可知,节点 4 的水压、流量、余氯均高于节点 7,其主要原因在于节点 4 和节点 7 在管网中的位置不同,节点 7 更靠近管网末端,导致节点 7 的压力和流量均小于节点 4,另外节点 7 的水龄更长,余氯衰减时间长。因此,节点 7 余氯浓度低于节点 4。采用各节点的水压、流量、余氯、水龄均值计算节点可靠性,得到节点的水量可靠性为 (1, 1, 1, 1, 1,

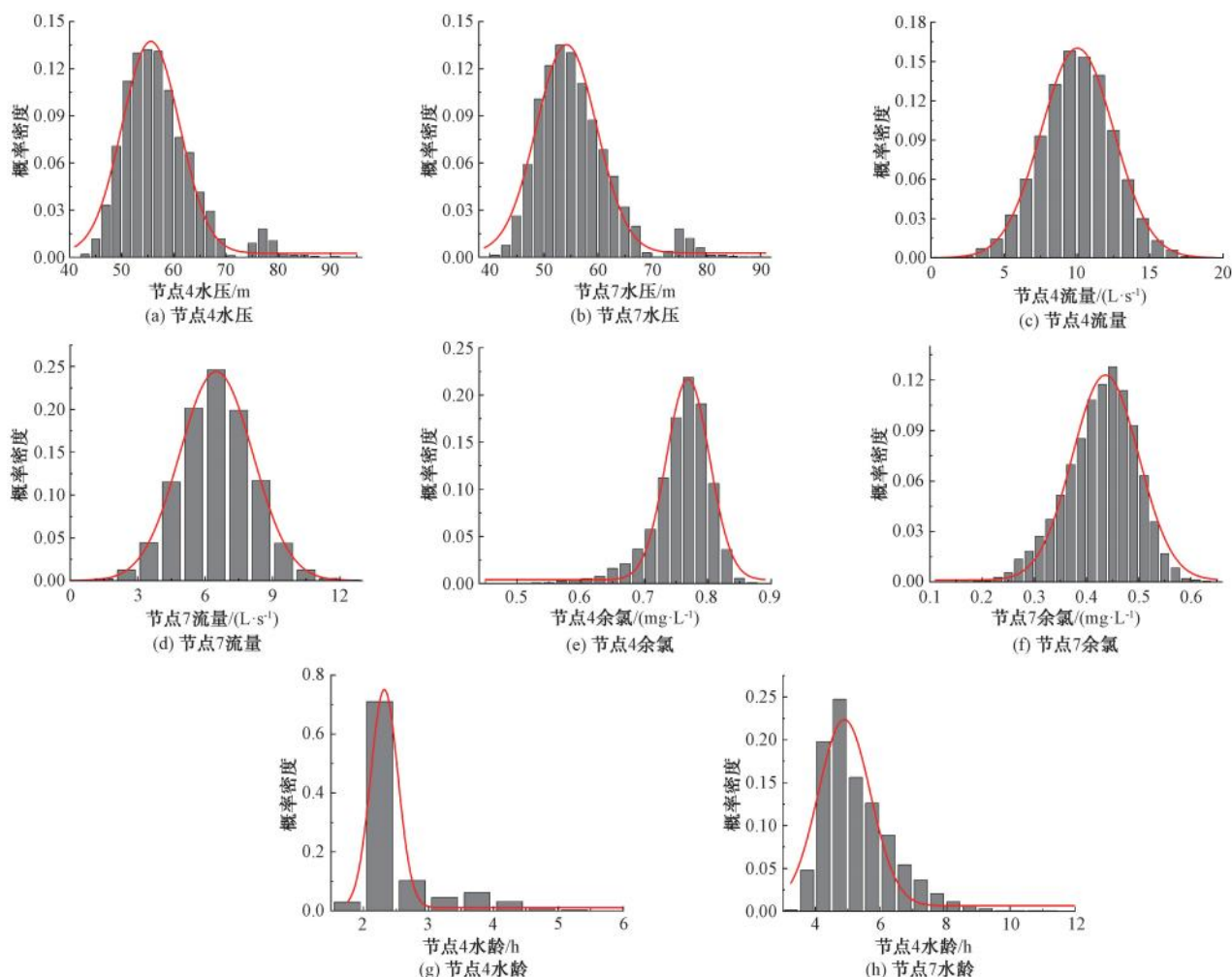


图4 蒙特卡洛模拟估算的节点水力水质参数直方图和拟合正态分布曲线

Fig. 4 Histogram and Fitted Normal Distribution Curve of Hydraulic and Water Quality Parameters Estimated by Monte Carlo Simulation

1,1,1), 水压可靠性为(1,1,1,1,1,1,1,1), 余氯可靠性为(0.00, 0.02, 1.00, 0.04, 0.98, 0.04, 0.99, 0.15), 水龄可靠性为(1.00, 0.98, 0.99, 1.00, 0.98, 0.04, 0.99, 0.15), 供水系统的综合可靠性为0.38。

3 结论

(1)供水管网可靠性应综合考虑节点水力指标和水质指标, 不仅应包括水力可靠性, 如水压可靠性、水量可靠性等, 还应包括水质可靠性, 如余氯可靠性、水龄可靠性等。

(2)针对供水管网对水压、水量、余氯和水龄的要求, 本文提出基于节点可靠性的管网系统可靠性, 可以分析供水管网在动态变化下的系统可靠性。

(3)供水管网可靠性应考虑节点在供水管网中的重要性, 节点重要性与节点在供水管网的拓扑位置关系密切。今后研究应结合节点拓扑结构, 如节点介数、节点度数、接近中心性等赋予不同的权重, 而不是仅仅根据节点需水量赋权。

(4)针对参数的不确定性, 本文仅考虑了管道粗糙度系数、余氯主体水衰减系数、余氯管壁衰减系数、节点需水量的随机分布, 今后还应考虑参数的多重不确定性和多维参数的不确定性对供水管网可靠性的影响。

参考文献

[1] 曾文, 汪鼎雄, 陈金娅. 利用带流向阀门拓扑模型评价供水

管网可靠性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 222-227.

ZENG W, WANG D X, CHEN J Y. Reliability evaluation of water distribution networks using a valve topology model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(2): 222-227.

[2] TODINI E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach [J]. Urban Water, 2000, 2(2): 115-122.

[3] PRASAD T D, HONG S H, PARK N. Reliability based design of water distribution networks using multi-objective genetic algorithms [J]. Journal of Civil Engineering, 2003, 7(3): 351-361.

[4] 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, 1997, 25(1): 71-76.

XU Z X, LIU S Q, GUERCIO R. Application of entropy in the optimal design of water distribution system [J]. Journal of Tongji University, 1997, 25(1): 71-76.

[5] CIMORELLI L, MORLANDO F, COZZOLINO L, et al. Comparison among resilience and entropy index in the optimal rehabilitation of water distribution networks under limited-budgets [J]. Water Resources Management, 2018(32): 3997-4011.

[6] WAGNER J M, SHAMIR U, MARKS D H. Water distribution reliability: Simulation methods [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1988, 114(3): 276-294.

[7] GUPTAL R, BHAVEZ P R. Comparison of methods for predicting deficient-network performance [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1996, 122(3): 214-217.

(上接第 37 页)

[28] 宋凌志, 施周, 徐勇, 等. 西江原水有机物成分解析及其消毒副产物生成特性[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 32-38.

SONG L Z, SHI Z, XU Y, et al. Analysis of organic compounds in Xijiang raw water and characteristics of disinfection by-products formation [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 32-38.

[29] KIM Y H, HENSLEY R. Effective control of chlorination and dechlorination at wastewater treatment plants using redox potential [J]. Water Environment Research, 1997, 69(5): 1008-1014.

[30] REYNAERT E, NAGAPPA D, SIGRIST J A, et al. Ensuring microbial water quality for on-site water reuse: Importance of online sensors for reliable operation [J]. Water Research X, 2024, 22: 100215. DOI: 10.1016/j.wroa.2024.100215.

[31] REYNAERT E, STEINER P, YU Q X, et al. Predicting microbial water quality in on-site water reuse systems with online sensors [J]. Water Research, 2023, 240: 120075. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120075.

[32] REYNAERT E, GRETENER F, JULIAN T R, et al. Sensor setpoints that ensure compliance with microbial water quality targets for membrane bioreactor and chlorination treatment in on-site water reuse systems [J]. Water Research X, 2023, 18: 100164. DOI: 10.1016/j.wroa.2022.100164.

[33] RICHARD D, ZIMMERMAN R A, PADMANABHAN G. Evaluation of ORP-based chlorination for wastewater treatment plant effluent disinfection [C]. RiO: 20th Congresso Brasil De Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2015.

[34] REN X L, WANG F, ZHANG Y J, et al. Characterization and disinfection by product formation of dissolved organic matter in anaerobic-anoxic-oxic membrane bioreactor (AAO-MBR) process [J]. Water, 2023, 15(6): 1076.

[35] SONG Q Y, GRAHAM N, TANG Y N, et al. The role of medium molecular weight organics on reducing disinfection by-products and fouling prevention in nanofiltration [J]. Water Research, 2022, 215: 118263. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118263.