

王光辉, 李坤仪, 高金良, 等. 基于失效风险指数的 S 市供水管网优化调度[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 162-170, 178.

Wang G H, Li K Y, Gao J L, et al. Optimized controlling of water supply pipelines network based on failure risk index in S City[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 162-170, 178.

## 基于失效风险指数的 S 市供水管网优化调度

王光辉<sup>1</sup>, 李坤仪<sup>2</sup>, 高金良<sup>2,\*</sup>, 李远哲<sup>2</sup>, 靖一丹<sup>2</sup>, 张天天<sup>2</sup>

(1. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044; 2. 哈尔滨工业大学环境学院, 黑龙江哈尔滨 150090)

**摘要** 【目的】为实现城市供水管网降漏控漏, 需要构建安全可靠的供水体系。管道失效风险评价可实现对失效高风险管道的提前预知, 成为保障供水管网长期稳定运行的基础。【方法】以 S 市供水管网为研究对象, 基于 Logistic 回归, 将管材、管径、管龄、运行压力、埋深和道路级别作为评价因素, 进行失效概率评价; 基于水力模型模拟结果, 将供水不足率作为评价因素, 进行失效后果评价; 提出失效风险指数, 将管道失效概率值与后果值相乘, 得到管道失效风险评价结果。以失效风险指数最小为寻优目标, 以包括泵站电耗成本在内的 6 个方程或方程组为约束条件, 构建管网优化调度模型, 采用遗传算法程序得到 S 市最优水泵调度方案。【结果】S 市高失效风险管道占比为 1.12%, 其中 0.38% 为高概率高后果, 0.42% 为高概率低后果, 0.32% 为低概率高后果。优化调度后, S 市管网全部管道的失效风险之和从 12.601 减小到 11.739, 降幅约达 6.84%。【结论】采用失效风险评价模型可筛除部分高概率低后果与低概率高后果的异常管道, 进一步缩小异常管道的范围, 优化水司管道更新改造决策, 节约管道更新改造成本。以失效风险指数最小为寻优目标的优化调度, 不仅能够有效降低管网的失效风险, 提高供水安全性, 还能在保障用户用水舒适度的同时, 实现供水企业经济效益的最大化。

**关键词** 城市供水管网 失效风险评价 优化调度 Logistic 回归 遗传算法

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)05-0162-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.019

## Optimized Controlling of Water Supply Pipelines Network Based on Failure Risk Index in S City

Wang Guanghui<sup>1</sup>, Li Kunyi<sup>2</sup>, Gao Jinliang<sup>2,\*</sup>, Li Yuanzhe<sup>2</sup>, Jing Yidan<sup>2</sup>, Zhang Tiantian<sup>2</sup>

(1. Beijing Shouchuang Ecological Environmental Protection Group Co., Ltd., Beijing 100044, China;

2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract** [Objective] To achieve leakage reduction and control in urban water supply networks, it is necessary to construct a safe and reliable water supply system. The risk assessment of pipe failure can predict high-risk pipes in advance, forming the basis for ensuring the long-term stable operation of water supply networks. [Methods] Taking S City's water supply network as the research object, Logistic regression was used, with pipe material, diameter, age, operating pressure, burial depth, and road grade as evaluation factors for failure probability assessment. Based on the result of the hydraulic model simulation, the water supply shortage rate was used as an evaluation factor for failure consequence assessment. A failure risk index was proposed, multiplying the failure probability value with the consequence value to obtain the risk assessment result of pipe failure. With the minimum failure risk index as the optimization goal and six equations or equation groups (including pump station power consumption cost) as constraints, a network optimization

[收稿日期] 2024-07-12

[基金项目] 国家重点研发计划(2022YFC3203800); 国家自然科学基金(51978203); 揭榜制科研项目(CE602022000203); 黑龙江省重点研发计划(2022ZX01A06)

[作者简介] 王光辉(1981—), 男, 正高级工程师, 主要从事供水企业运营管理工作, E-mail: 603351541@qq.com。

[通信作者] 高金良(1971—), 男, 教授, 研究方向为供水管网水力水质建模、漏失控制、优化调度等, E-mail: gjl@hit.edu.cn。

scheduling model was constructed, and the optimal pump scheduling plan for S City was obtained using a genetic algorithm program. [Results] The proportion of high failure risk pipelines in S City was 1.12%, of which 0.38% were a high probability-high consequence, 0.42% were a high probability-low consequence, and 0.32% were a low probability-high consequence. After optimization scheduling, the total failure risk value of the water network in S City decreased from 12.601 to 11.739, with a approximately reduction of 6.84%. [Conclusion] Using the failure risk assessment model can screen out some abnormal pipes with high probability-low consequence and low probability-high consequence, further narrowing the scope of abnormal pipes, optimizing the decision-making for pipeline renewal and reconstruction by the water supply company, and saving the cost of pipe renewal and reconstruction. Optimization scheduling with the minimum failure risk index as the optimization goal not only effectively reduces the failure risk of the network, improves the safety of the water supply, but also maximizes the economic benefits of the water supply companies while ensuring the comfort of users' water use.

**Keywords** urban water supply pipelines network failure risk evaluation optimized controlling Logistic regression genetic algorithm

人民对于美好生活的需求驱动我国供水管网扩张与改造,保障饮用水安全成为供水事业发展的重要课题<sup>[1-2]</sup>。与此同时,供水管网的高效稳定运行需要以合理可行的优化调度方案为基础<sup>[3]</sup>。现有研究<sup>[4-5]</sup>多从水司利益最大化的角度出发,以经济因素为寻优目标函数,也有部分学者<sup>[6-7]</sup>以水质优化为重点进行优化调度方法研究。供水管网中服役管道常因受到人为破坏、自然灾害等外界打击,或因使用年限已高、防腐不到位等问题引发爆管,称为管道失效<sup>[8]</sup>。管道失效通常导致饮用水二次污染、停水、城市道路塌陷等事故,严重影响用户用水安全性与城市经济发展。从用户需求与城市发展角度来看,以管道失效风险最小作为目标函数的管网优化调度十分重要。目前已有学者提出系统可靠性框架<sup>[9]</sup>、模糊综合评价法<sup>[10]</sup>、贝叶斯理论<sup>[11]</sup>、多指标风险评价<sup>[12-13]</sup>等管道失效风险评价方法。基于城市供水管道统计数据对管道失效风险做出评价,并以降低管网总体失效风险为目标对城市管网进行优化调度,能够有效避免管道失效事故发生和预防管道失效事故可能导致的严重后果。

本文以S市供水管网为研究对象,分别对管道失效概率和失效后果进行评价,并构建管道失效风险指数。以失效风险指数为寻优目标,建立管网优化调度模型,在约束条件下寻找到管网中泵组的最优调度方案。

## 1 研究方法

### 1.1 技术路线图

本文涉及供水管网水力建模、供水管道失效风险评价、泵组优化调度以及S市实例工程的应用4

个部分,各部分之间关系采用技术路线图的方式描述,如图1所示。

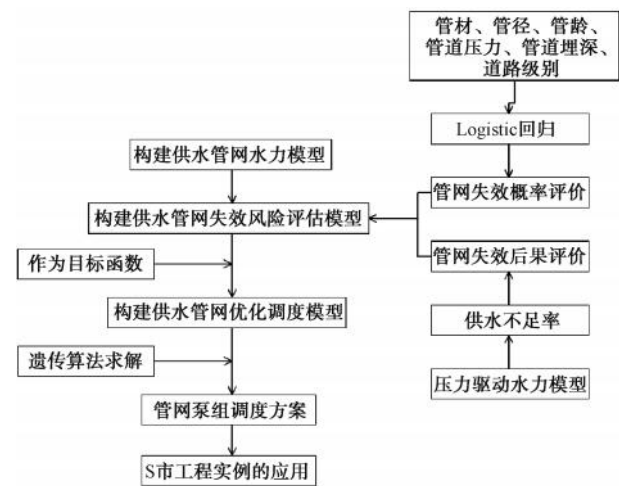


图1 技术路线

Fig. 1 Technical Route

### 1.2 管道失效风险评价方法

#### 1.2.1 管道失效概率

一次管道失效事故就可能严重影响水司的经济效益和用户的用水安全。因此,比起管道发生失效事件的确切次数,水司更关心管道是否存在失效的可能性,这也使得输出为0~1的类概率值的Logistic回归成为构建供水管道失效概率评价模型的优先选择<sup>[14]</sup>。基于Logistic回归构建失效概率评价模型如式(1)。

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_{j=1}^m w_j x_j + b\right)}} \quad (1)$$

其中: $P_i$ ——第*i*条管道的失效概率;

$x_j$ ——第  $j$  个失效概率评价因素;  
 $w_j$ ——第  $j$  个失效概率评价因素的权重;  
 $m$ ——失效概率评价因素的种类数;  
 $b$ ——截距。

管道失效概率评价通常基于三类评价因素,包括管道物理属性,管道运行状态和环境因素<sup>[15-16]</sup>。针对管道失效问题,进行水司走访与现场调研,统计分析管道失效原因,综合考虑各因素在实际管网中对管道失效的影响程度,选取供水管道的材质  $M$ 、管径  $D$ 、管龄  $A$ 、地下埋深  $h$ 、管道运行时平均压力  $H$ ,以及管道埋设位置所属道路级别  $R$  作为评价因素进行管道失效概率评价,将它们划分为特征集,将失效历史设置为目标变量,建立数据集。其中管材、管径、管龄、埋深这 4 个评价因素经调研获得,属于管道物理属性;运行压力通过测量或模型管道两端节点压力并求平均值计算得到,属于管道运行状态;道路级别根据单位时间内车辆通过量确定,分为主干道、次干道和支路,它可代表供水管道的动态荷载,属于环境因素。在各因素中,与调度相关的只有管道运行时平均压力,其他因素是固定的,不随调度方案变化而改变。

在建立管道失效概率模型时,面临着如何合理分配各因素权重分布的问题。基于 Logistic 回归构建失效概率评价模型,使得构成模型各因素的权重分布不需要提前确定,而是在基于数据集训练之后得到各因素权重分布,即式(1)中的  $w_j$  与  $b$  需通过模型训练得到。

### 1.2.2 管道失效后果

管道发生失效事件后,需维修或更换。在此期间内,部分用户的水量和水压会受到不同程度的影响,甚至可能发生停水事故,导致一系列供水不利后果,称为管道失效后果,可由供水不足率量化该指标。供水不足率为整体管网在日最大用水量小时内因管道失效导致的供水量降低比率,体现供水管网因管道失效而损失的供水能力,计算如式(2)。

$$C_i = \frac{V_0 - V_i}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

其中: $C_i$ ——第  $i$  条管道的失效后果(供水不足率);

$V_0$ ——所有管道正常运行时整体管网的最大总供水量,  $m^3/h$ ;

$V_i$ ——关闭第  $i$  条管道后整体管网的最大总供水量,  $m^3/h$ 。

式(2)中  $V_0$  利用 EPANET 2.2 对研究区域供水管网进行水力计算得到。供水管网中多条管线同时发生失效事件属于小概率事件。因此,为提高计算效率,本文假设供水管网在同一时刻仅存在一条失效管道。利用 EPANET 2.2 的关闭管道功能模拟管道失效,通过水力计算得到  $V_i$ 。水力计算所采用模型为压力驱动模型,流量与压力关系采用 Wagner 关系式表达,如式(3)。

$$q_i^{avl} = \begin{cases} 0, & H_i^{avl} < H_i^{min} \\ q_i^{req} \left( \frac{H_i^{avl} - H_i^{min}}{H_i^{des} - H_i^{min}} \right)^{\frac{1}{n}}, & H_i^{min} \leq H_i^{avl} < H_i^{des} \\ q_i^{req}, & H_i^{des} \leq H_i^{avl} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $q_i^{avl}$ ——节点  $i$  实际流量,  $m^3/h$ ;

$q_i^{req}$ ——节点  $i$  需求流量,  $m^3/h$ ;

$H_i^{des}$ ——节点  $i$  处设计供水水压,  $m$ ;

$H_i^{avl}$ ——节点  $i$  处实际供水水压,  $m$ ;

$H_i^{min}$ ——节点  $i$  处所需最小供水水压,  $m$ ;

$n$ ——指数。

### 1.2.3 管道失效风险指数

将管道失效概率与管道失效后果的乘积称为管道失效风险指数,如式(4),用于管道失效风险评价。

$$R_i = P_i \cdot C_i \quad (4)$$

其中: $R_i$ ——第  $i$  条管道的失效风险指数。

## 1.3 供水管网优化调度方法

### 1.3.1 目标函数

目前多数研究仅从水司利益最大化角度出发,选择以经济最优作为供水管网优化调度最终目标<sup>[4-5]</sup>。这种单一目标的优化显然存在不合理之处。泵组整体能耗降低可能会引起管网末端用户水压不足,同时频繁的压力变化可能增大某些管道失效概率,存在过于追求经济效益而忽视用户用水舒适度与管网供水安全的问题。因此,为同时满足需求侧(用户)用水舒适度和供给侧(水司)利益最大化,基于上述失效风险评价模型,将研究供水区域内全部管道的失效风险指数相加,形成供水管网失效风险指数,并以其最小为管网调度优化目标。目标函数表达为式(5)。

$$\min R = \min \sum_{i=1}^n R_i = \min \sum_{i=1}^n P_i \cdot C_i \quad (5)$$

其中： $R$ ——供水管网失效风险指数。

### 1.3.2 约束条件

约束条件是供水管网优化调度模型构建不可缺少的内容,本研究总计包括6项,具体如下。

供水管网中的水力平衡为第1个约束条件,如式(6)。

$$G(\vec{H}, \vec{Q}, \vec{a}) = 0 \quad (6)$$

其中： $\vec{H}$ ——节点压力, m;

$\vec{Q}$ ——节点流量, m<sup>3</sup>/h;

$\vec{a}$ ——管段比阻。

水厂供水量为第2个约束条件,如式(7)。

$$Q_{\min, N, t} \leq Q_{N, t} \leq Q_{\max, N, t} \quad (7)$$

其中： $Q_{\min, N, t}$ ——第  $N$  泵站在时段  $t$  的最小供水量, m<sup>3</sup>;

$Q_{N, t}$ ——第  $N$  泵站在时段  $t$  的供水量, m<sup>3</sup>;

$Q_{\max, N, t}$ ——第  $N$  泵站在时段  $t$  的最大供水量, m<sup>3</sup>。

水泵供水能力为第3个约束条件,如式(8)~式(9)。

$$Q_{\min, N, k} \leq Q_{N, k} \leq Q_{\max, N, k} \quad (8)$$

$$H_{\min, N, k} \leq H_{N, k} \leq H_{\max, N, k} \quad (9)$$

其中： $Q_{\min, N, k}$ ——第  $N$  泵站中,编号为  $k$  的水泵可提供的最小流量, m<sup>3</sup>/h;

$Q_{N, k}$ ——第  $N$  泵站中,编号为  $k$  的水泵的流量, m<sup>3</sup>/h;

$Q_{\max, N, k}$ ——第  $N$  泵站中,编号为  $k$  的水泵可提供的最大流量, m<sup>3</sup>/h;

$H_{\min, N, k}$ ——第  $N$  泵站中,编号为  $k$  的水泵可提供的最低扬程, m;

$H_{N, k}$ ——第  $N$  泵站中,编号为  $k$  的水泵的扬程, m;

$H_{\max, N, k}$ ——第  $N$  泵站中,编号为  $k$  的水泵可提供的最高扬程, m。

每个泵站中可开启水泵数量为第4个约束条件,如式(10)。

$$n_{\min, N} \leq n_N \leq n_{\max, N} \quad (10)$$

其中： $n_{\min, N}$ ——第  $N$  泵站允许开泵最小数量;

$n_N$ ——第  $N$  泵站水泵开启数量;

$n_{\max, N}$ ——第  $N$  站允许开的最大数量。

泵站电耗成本为第5个约束条件,如式(11)。

$$F \leq F_p \quad (11)$$

其中： $F$ ——优化调度后所有泵站的电耗总成本,元;

$F_p$ ——优化调度前所有泵站的电耗总成本,元。

为确保用户用水舒适度,以水压为表征手段,将用户节点出水水压设置为第6个约束条件,如式(12)。

$$H_{\min, m, t} \leq H_{m, t} \leq H_{\max, m, t} \quad (12)$$

其中： $H_{\min, m, t}$ ——节点  $m$  在时段  $t$  的最小允许

压力, m, 根据《城市给水工程规划规范》(GB 50282—2016)<sup>[17]</sup>, 城市给水工程规划中的水压应根据城市供水分区布局特点确定,并满足城市直接供水建筑层数的

最小服务水头,本案例 S 市的直接供水建筑层数为 6 层,考虑到水力计算的误差,在本案例中将  $H_{\min, m, t}$  值设置为 30 m 以满足用户用水舒适度;

$H_{m, t}$ ——节点  $m$  在时段  $t$  的压力, m;

$H_{\max, m, t}$ ——节点  $m$  在时段  $t$  的最大允许压力, m。

### 1.4 S 市供水管网简介

S 市位于我国东南沿海,供水普及率为 100%,供水管网规模庞大。其存在老旧城区管龄普遍偏大,以及供水调度与管理相对缺乏等问题,导致管道失效事故频发,漏损率居高不下。S 市亟需经济合理的方法降低管道失效风险,以达到降损控漏目的。因此,选择 S 市作为本文研究对象,进行管道失效概率与失效后果评价及优化调度,以解决其现在面临问题。

小管径管道连接复杂且数目庞大,且在 S 市现场调研中发现小管径(管径 < DN200)管道的失效概率很小,并且发生失效后对用户用水范围影响通常不大。为达到简化水力计算的目的,仅考虑管径  $\geq$  DN200 的管道对 S 市供水管网进行水力建模,拓扑如图 2 所示。所建立 S 市水力模型中包括节点



图2 S市供水管网拓扑

Fig. 2 Topology of Water Supply Pipelines Network in S City

表1 S市各水厂水泵配置

Tab. 1 Water Pump Configuration of Various WTPs in S City

水厂编号	水泵编号	水泵型号	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	扬程/m
R-1	1#、2#、3#、4#、5#、6#	RDL600-710A	3 800	38
	7#	RDL500-640B	2 500	28
R-2	8#	RDL500-640A1	3 000	24
	9#	RDL500-640A1	2 800	42
	10#	OMEGA350-510A	1 440	24
R-3	11#	OMEGA350-510A	1 787	24
	12#、13#、14#、15#、16#	800S-40	5 370	39
	17#、18#	24SA-10A	2 700	25
R-4	19#、20#、21#	500S-35A	1 800	28
	22#、23#	OMEGA250-370B	860	28

所示。各因素在不同区间(类别)内的赋值大小,依据管道历史失效比例的统计结果由小到大确定,在管道失效比例较小区间(类别)赋予较小的数值,反之赋予较大的数值。在管径因素中,统计结果表明聚乙烯(PE)管的失效比例最小,因此按照失效比例由小到大的排名赋值为1,聚氯乙烯(PVC)的失效比例较大,因此按照排名赋值为2,以此类推,铸铁管的失效比例最大,因此按照排名赋值为7。最为重要的是,在本文中,将S市水司记录在册的,具有失效历史的管道赋值为1,不具有失效历史的管道赋值为0。将管径、管材、道路级别、管龄、埋深与运行压力划分为特征集,将失效历史设置为目标变量,建立数据集。

19 468个,管道共20 204根,水源5个,水泵31台。S市4个泵站共有水泵23台,均为定速泵,水泵型号及额定流量和额定扬程如表1所示。经过核实拓扑结构、调整水量分配、调整管道粗糙系数等操作后,该市供水管网所有测压点的误差和水厂水位误差均满足校核标准。

## 2 结果与讨论

### 2.1 失效风险评价

S市供水管网失效概率模型训练过程如下。

第一步,数据预处理:S市管道数据统计工作截至2024年3月,删除缺失值和异常值后可用管道数据有20 204条,各管道失效历史的统计数据来自统计工作截止时间前10年期间内。将分类变量(管径、管材、道路级别)进行赋值处理,同时为便于分析,对连续变量(管龄,埋深,压力)也进行分组与赋值处理。针对S市的失效概率评价因素赋值如表2

第二步,哑变量设置:将管材和管径设置为哑变量,将各组管材与管径进行01编码。若分类变量有 $k$ 个类别,仅设置 $k-1$ 个哑变量以避免多重共线性。管材编码如表3所示,管径编码如表4所示。哑变量下标的数字,是哑变量的序号,仅用于区分不同类别,无数值大小、等级、数量等含义。

以0.5为边界,将管道分为高与低失效概率( $P$ )管道,以2%为边界,将管道分为高与低失效后果( $C$ )管道。

第三步,训练集与测试集划分:将数据集划分为训练集(80%)和测试集(20%)。为防止出现过拟合现象,采用 $K$ 折交叉验证法( $K=5$ )。

表 2 失效概率评价因素赋值

Tab. 2 Assignment of Failure Probability Evaluation Factors

因素	分类	赋值
<i>M</i>	PE	1
	PVC	2
	未增塑聚氯乙烯 (UPVC)	3
	钢	4
	钢筋混凝土	5
	球墨铸铁	6
	铸铁	7
<i>D/mm</i>	[ 200, 400)	1
	[ 400, 600)	2
	[ 600, 800)	3
	[ 800, 1 000)	4
	[ 1 000, +∞)	5
<i>A/a</i>	( 0, 10)	1
	[ 10, 20)	2
	[ 20, +∞)	3
<i>H/m</i>	( 0, 10)	1
	[ 10, 20)	2
	[ 20, 30)	3
	[ 30, +∞)	4
<i>h/m</i>	( 0, 0.5)	1
	[ 0.5, 1.0)	2
	[ 1.0, 1.5)	3
	[ 1.5, 2.0)	4
	[ 2.0, 2.5)	5
	[ 2.5, +∞)	6
<i>R</i>	支路	1
	次干道	2
	主干道	3

表 3 管材编码

Tab. 3 Pipe Material Coding

分组	编码					
	<i>M</i> <sub>1</sub>	<i>M</i> <sub>2</sub>	<i>M</i> <sub>3</sub>	<i>M</i> <sub>4</sub>	<i>M</i> <sub>5</sub>	<i>M</i> <sub>6</sub>
1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0

表 4 管径编码

Tab. 4 Pipe Diameter Coding

分组	编码			
	<i>D</i> <sub>1</sub>	<i>D</i> <sub>2</sub>	<i>D</i> <sub>3</sub>	<i>D</i> <sub>4</sub>
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1
5	0	0	0	0

第四步,训练模型:使用 Python 语言编程训练模型,得到截距 *b* 及各评价因素对应权重,失效概率评价模型得以建立。

第五步,模型的检验:使用接受者工作特征曲线 (ROC) 检验模型精度。当 ROC 曲线下面积 (AUC) 不小于 0.7 时,认为模型精度较高<sup>[18]</sup>。

基于 S 市管道数据集训练后,得到失效概率评价模型[式(1)]中各因素的权重分布以及截距 *b* 的值,如表 5 所示。

表 5 各因素的权重分布以及截距 *b* 的值

Tab. 5 Distribution of Weights for Each Factor and Value of Intercept *b*

指标	内容	指标	内容
<i>M</i> <sub>1</sub> 权重	-1.022	<i>D</i> <sub>3</sub> 权重	0.926
<i>M</i> <sub>2</sub> 权重	-0.871	<i>D</i> <sub>4</sub> 权重	0.796
<i>M</i> <sub>3</sub> 权重	-0.837	<i>A</i> 权重	1.174
<i>M</i> <sub>4</sub> 权重	-1.271	<i>H</i> 权重	0.86
<i>M</i> <sub>5</sub> 权重	-1.143	<i>h</i> 权重	-0.216
<i>M</i> <sub>6</sub> 权重	-1.128	<i>R</i> 权重	0.761
<i>D</i> <sub>1</sub> 权重	1.131	<i>b</i>	-8.089
<i>D</i> <sub>2</sub> 权重	1.009		

由表 5 可知,管材 *M* 与管径 *D* 所占权重相对较大,这说明管材与管径对管道失效概率的影响与其他因素相比更大。同时也说明,可能有某些管径和管材的管道经常失效,这个发现将指导水司在未来的管理工作中更加密切关注具有高失效概率管材与管径的管道。与管材 *M* 与管径 *D* 所占权重相比,地下埋深 *h* 所占权重相差一个数量级。这说明在所研究地区范围内,地下埋深普遍合理,对于管道失效概率影响较小。

失效概率评价模型的 ROC 曲线如图 3 所示,其 AUC 为 0.802,大于 0.7,说明拟合效果较好。

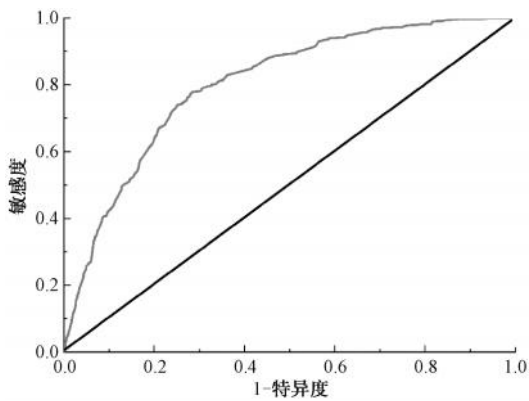


图 3 失效概率评价模型的 ROC 曲线

Fig. 3 ROC Curve for Failure Probability Evaluation Model

表 6 中, S 市失效后果高于 2% 的管道占比很小, 仅有 1.48%, 这是因为 S 市供水管道大体呈环状分布, 一条管道失效后可通过成环的其他管道弥补因管道失效导致的供水不足。S 市管道失效概率分布大致与管道历史失效分布相同, 这说明有失效历史的管道通常具有更高的失效概率。失效后果高于 2% 的管道和失效概率高于 0.5 的管道共占比为 13.32%, 即 2 691 根管道, 若全部进行更新改造, 将是一个极大的工程, 不仅要耗费很多人力物力, 并且在管道更新改造过程中也会严重影响到居民的生活。水司可按照失效风险评价结果进一步优化更新改造决策。

表 6 S 市供水管道分类

Tab. 6 Classification of Water Supply Pipelines in S City

P 值	$C \leq 2\%$	$C > 2\%$
$P \leq 0.5$	86.68%	1.10%
$P > 0.5$	11.84%	0.38%

S 市 0.38% 的管道 (77 条) 失效概率与失效后果均较高, 认为它们具有高的失效风险。如图 4 所示, S 市高风险管道重点分布于水厂出口与管网上游的重要区域, 示例采用白色虚线表示。相比于仅采用失效概率评价模型和失效后果评价模型进行决策, 采用失效风险评价模型可筛除部分高概率低后果与低概率高后果的异常管道, 可进一步缩小异常管道的范围, 优化水司管道更新改造决策, 节约管道更新改造成本。对于失效概率与失效后果均较高的管道, 水务公司必须采取紧急行动进行修复或尽快进行更新改造; 对于失效概率或失效后果一项较低的管道, 水务公司需进行密切监测, 以防管道失效事件产生不良后果。

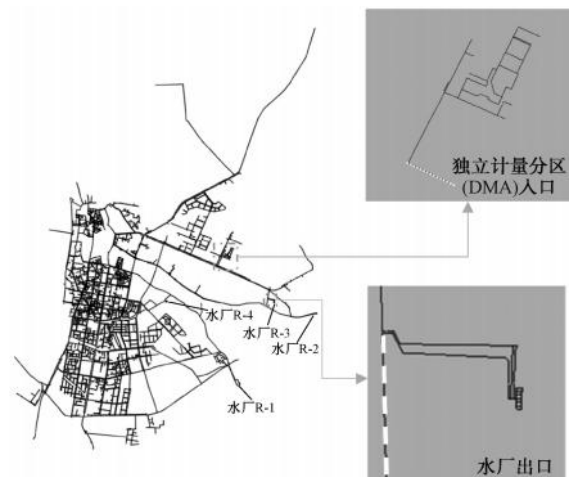


图 4 S 市高失效风险管道分布示例

Fig. 4 Example of High Failure Risk Pipelines Distribution in S City

## 2.2 优化调度最优方案

根据日用水量曲线变化, 将 24 h 分为 4 段, 分别是 0 时—6 时、6 时—12 时、12 时—18 时、18 时—次日 0 时。每个时段内水泵启闭状态保持不变, 只在时段变化时进行水泵的开关操作。泵组优化调度前后方案如表 7 所示。

优化调度前, 水司仅考虑在 0 时—6 时内 (覆盖夜间最小流量时段), 关闭部分水泵以达到节能降耗的目的, 在 6 时—次日 0 时的时段内, 为保证用户用水舒适度, 几乎全部水泵都处于运行状态, 管网整体压力偏高, 导致管网全部管道失效风险之和较大, 为 12.601。对比优化调度前后 6 时—次日 0 时的时段, 发现优化调度后, 在保证用户水压达到用水舒适度要求前提下, 减少了水泵开启的数量, 水厂能耗可能有所减少。

S 市管网全部管道的失效风险之和从优化调度前的 12.601 减小到优化调度后的 11.739, 降幅约达 6.84%。其中具有高失效风险的 77 条管道的失效风险均有明显下降, 如图 5 所示。这些高风险管道全部位于图 4 所示的水厂出口与管网上游等重要区域, 具有高失效后果, 并且水压常年较高。在优化调度后, 这些管道的运行压力有所下降, 失效概率相应下降, 使得失效风险有所下降。

## 3 结论

(1) 提出管道失效风险指数, 为供水管道维护管理提供新的决策依据。S 市失效后果高于 2% 的管道和失效概率高于 0.5 的管道共占比为 13.32%,

表 7 优化调度前后泵组运行方案  
Tab. 7 Operation Plan of Pump Groups before and after Controlling Optimization

时段	水厂编号	水泵编号	优化调度前水泵运行台数/台	优化调度后水泵运行台数/台
0 时—6 时	R-1	1#、2#、3#、4#、5#、6#	2	2
		7#	1	1
	R-2	8#	1	1
		9#	0	0
		10#	0	0
		11#	0	0
	R-3	12#、13#、14#、15#、16#	3	3
		17#、18#	0	0
	R-4	19#、20#、21#	0	0
		22#、23#	1	1
6 时—12 时	R-1	1#、2#、3#、4#、5#、6#	6	6
		7#	1	1
	R-2	8#	1	0
		9#	1	0
		10#	1	1
		11#	1	1
	R-3	12#、13#、14#、15#、16#	4	3
		17#、18#	2	2
	R-4	19#、20#、21#	3	3
		22#、23#	2	0
12 时—18 时	R-1	1#、2#、3#、4#、5#、6#	6	6
		7#	1	1
	R-2	8#	1	1
		9#	1	1
		10#	1	0
		11#	1	0
	R-3	12#、13#、14#、15#、16#	4	4
		17#、18#	2	0
	R-4	19#、20#、21#	3	3
		22#、23#	2	2
18 时—次日 0 时	R-1	1#、2#、3#、4#、5#、6#	6	5
		7#	1	1
	R-2	8#	1	1
		9#	1	1
		10#	1	0
		11#	1	0
	R-3	12#、13#、14#、15#、16#	4	4
		17#、18#	2	0
	R-4	19#、20#、21#	3	3
		22#、23#	2	2

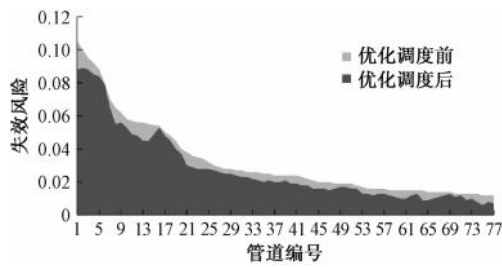


图5 高失效风险管道优化调度前后变化

Fig. 5 Changes of High Failure Risk Pipes before and after Optimized Controling

采用失效风险评价模型可筛除部分高概率低后果与低概率高后果的异常管道,进一步缩小异常管道的范围为占比为0.38%的高失效风险管道,优化水司管道更新改造决策,节约管道更新改造成本。

(2)以失效风险指数最小化为目标,建立供水管网优化调度模型。同时考虑水力平衡、供水量、水泵能力、水泵数量、电耗成本和用户水压等约束条件。优化调度后,S市管网全部管道的失效风险之和从12.601减小到11.739,降幅约达6.84%。

(3)本文提出的基于失效风险指数的城市供水管网优化调度方法,能够有效降低管网的失效风险,提高供水安全性。S市优化调度后用户用水舒适度是否受到影响以及供水企业经济效益提高的具体数额还需要经过长期持续关注与核算,有望在保障用户用水舒适度的同时,实现供水企业经济效益的最大化。这一研究成果可为城市供水管网的科学管理和优化运行提供了理论支持和实践指导。

### 参考文献

[1] 王远,陆纳新,汪鹏,等. 供水管网系统中DOM解析与DBPs生成特征[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 63-70.  
Wang Y, Lu N X, Wang P, et al. Analysis of DOM and formation characteristics of DBPs in water supply pipelines network system[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 63-70.

[2] 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. Optimization of pipelines midpoint chlorination in water supply distribution networks based on water age of pipelines nodes[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 71-79, 160.

[3] 陈伟,查人光,朱海涛,等. 嘉兴市从源头到龙头的最优供水系统探索与实践[J]. 净水技术, 2023, 42(9): 1-6, 103.  
Chen W, Zha R G, Zhu H T, et al. Exploration and practice of optimization for source-to-tap water supply system in Jiaxing City

[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(9): 1-6, 103.

[4] Mackle G, Savic D, Walters G. Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply [C]. Sheffield: First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, 1995.

[5] 叶露,郑雪婷. 基于城市供水管网优化调度研究[J]. 建筑与预算, 2020(5): 56-61.  
Ye L, Zheng X T. Research on optimal dispatching based on urban water supply network[J]. Construction and Budget, 2020(5): 56-61.

[6] 胡益. 基于水压和水质目标的给水管网优化调度的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.  
Hu Y. Based on water pressure and water quality objectives of the water distribution network optimization study [D]. Changsha: Hunan University, 2009.

[7] 信昆仑,瞿玲芳,陶涛,等. 基于综合水龄指数评价的供水管网优化调度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1579-1584.  
Xin K L, Qu L F, Tao T, et al. Optimal scheduling of water supply network based on node water age[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(10): 1579-1584.

[8] 顾晨浩. 基于工程实例的市政供水管道健康状态评估技术[J]. 净水技术, 2024, 43(S1): 97-103.  
Gu C H. Research on health evaluation technology of water supply pipeline based on engineering cases [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(S1): 97-103.

[9] Wang W G, Wang Y L, Zhang B H, et al. Failure prediction of buried pipe network with multiple failure modes and spatial randomness of corrosion[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 191: 104367. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104367.

[10] 翟钰婷. 供水管道腐蚀状况下长期运行的风险分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019: 63.  
Zhai Y T. Risk analysis of long-term operation water supply pipeline under the corrosion[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 63.

[11] 王晨婉. 基于贝叶斯理论的供水管道风险评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2010: 108.  
Wang C W. Research on water pipe risk assessment using Bayesian theory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010: 108.

[12] Pietrucha-Urbanik K, Studziński A. Qualitative analysis of the failure risk of water pipes in terms of water supply safety[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 95: 371-378. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.09.008.

[13] Pietrucha-Urbanik K, Tchórzewska-Cieslak B. Failure risk assessment in water network in terms of planning renewals-A case study of the exemplary water supply system[J]. Water Practice and Technology, 2017, 12(2): 274-286.

(下转第178页)

- monitoring mode[J]. *Analytical Methods*, 2011, 3(7): 1667.
- [12] Mompremier R, Fuentes Mariles Ó A, Ghebremichael K, et al. Impact of pipe material on the wall reaction coefficients and its application in the rehabilitation of water supply system of San Pedro Nexapa, State of Mexico [J]. *Water Supply*, 2022, 22(4): 4296–4306.
- [13] Hallam N B, West J R, Forster C F, et al. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems[J]. *Water Research*, 2002, 36(14): 3479–3488.
- [14] World Health Organization. Principles and practices of drinking-water chlorination: A guide to strengthening chlorination practices in small-to medium sized water supplies[M]. New Delhi: World Health Organization Regional Office for South-East Asia, 2017.
- [15] Mao R Y, Zhang K J, Zhang Q Z, et al. Joint majorization of waterworks and secondary chlorination points considering the chloric odor and economic investment in the DWDS using machine learning and optimization algorithms [J]. *Water Research*, 2022, 220: 118595. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118595.
- [16] 牛志广, 张玉彬, 吕志伟, 等. 溴离子对预氯化 and 常规水处理工艺中消毒副产物的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(1): 109–117.
- Niu Z G, Zhang Y B, Lü Z W, et al. Effects of bromide ions on disinfection by-products during water treatment processes [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 44(1): 109–117.
- [17] 韩迪, 雷亚萍, 徐小存, 等. 饮用水中氯消毒副产物控制技术中的应用[J]. *城镇供水*, 2025(4): 42–48, 63.
- Han D, Lei Y P, Xu X C, et al. Application of control technologies for chlorinated by-products in drinking water [J]. *City and Town Water Supply*, 2025(4): 42–48, 63.
- [18] Mazhar M A, Khan N A, Ahmed S, et al. Chlorination disinfection by-products in municipal drinking water-A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: 123159. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123159.

(上接第 170 页)

- [14] Yamijala S, Guikema S D, Brumbelow K. Statistical models for the analysis of water distribution system pipe break data [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(2): 282–293.
- [15] Barton N A, Farewell T S, Hallett S H, et al. Improving pipe failure predictions: Factors affecting pipe failure in drinking water networks [J]. *Water Research*, 2019, 164: 114926. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114926.
- [16] Seo J, Koo M, Kim K, et al. A study on the probability of failure model based on the safety factor for risk assessment in a water supply network [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 119: 206–215. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.877.
- [17] GB 50282—2016 城市给水工程规划规范[S]. GB 50282—2016 Code for urban water supply engineering planning[S].
- [18] 宋花玲. ROC 曲线的评价研究及应用[D]. 上海: 第二军医大学, 2006: 66.
- Song H L. Evaluation study and application of ROC curve[D]. Shanghai: Second Military Medical University, 2006: 66.