

# 基于事故率的城市供水管网全寿命运行可靠性

刘 威<sup>1,2</sup>, 宋朝阳<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 利用不同管材的事故率模型、不同事故的模拟模型和基于 Langelier 的管道粗糙度时变模型建立了城市供水管网全寿命运行可靠性分析方法。通过敏感性分析, 建议了模型中关键参数的取值。对某市供水管网进行了 50 年的运行可靠性模拟, 根据分析结果指出了薄弱区域, 并给出了管网改造措施。

**关键词:** 供水管网; 运行可靠性; 全寿命; 事故率; 管道粗糙度

中图分类号: TU991.3

文献标志码: A

## Accident Rate-Based Lifecycle Operational Reliability of Urban Water Distribution Networks

LIU Wei<sup>1,2</sup>, SONG Zhaoyang<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** An accident rate-based lifecycle operational reliability analysis approach of urban water distribution networks was proposed using the accident rate models for different pipe materials, the simulation models for different accidents, and the Langelier-based pipeline roughness model. The values of some key parameters were suggested by sensitivity analysis. Then, the operational reliability analysis of a case network was performed, by which the weak areas were determined and the network improvement measures were introduced.

**Key words:** water distribution networks; operational reliability; lifecycle; accident rate; pipe roughness

用。截止 2016 年底, 我国 297 个地级及以上城市的供水管网总里程达 75.7 万 km, 与 2004 年相比增加了 1 倍以上<sup>[2]</sup>。然而, 由于历史原因, 我国供水管网的设计、施工、管理和维护等都处于比较落后的状态。由于城市管网都已运行数 10 年之久, 近年来各种运行事故频发, 如渗漏、爆管、溢流等<sup>[3]</sup>。据统计, 2000—2003 年因爆管导致的停水事故达 13.7 万次, 影响人口 3 819 万<sup>[4]</sup>。这些事故不仅造成巨大的经济损失, 更会产生严重的社会影响, 成为制约城市安全和长远发展的短板。因此, 如何根据管网运行情况对其进行维护、维修和改造, 降低事故率, 是城市管理者十分关注的课题, 而运行可靠性研究将为这一问题的解决提供科学依据。

著名可靠性专家 Zio 认为, 随着系统本身和运行环境的复杂化, 运行可靠性将成为未来可靠性研究领域的主要方向之一<sup>[5]</sup>。目前, 运行可靠性研究主要集中在机械和电力等复杂可修系统, 这类系统的主要特点是状态可监测性、故障频发性和对性能的高要求性<sup>[6]</sup>。作为一种重要的复杂可修系统, 目前供水管网主要侧重于各种失效条件下的可靠性问题<sup>[7-8]</sup>, 如自然灾害(地震)、机械失效(管段、阀门、水泵等的失效)和水力失效(供需变化), 而整个生命周期角度的运行可靠性研究尚不多见。

为此, 本文利用不同管材的事故率模型、渗漏和爆管事故的模拟模型以及管线粗糙度时变模型, 建立基于水力分析的供水管网运行可靠性分析方法, 给出供水管网在不同运行阶段的可靠性量化指标, 为管网薄弱部位识别和维护改造工作提供参考。

## 1 供水管网运行可靠性分析框架

### 1.1 运行可靠性定义及模拟方法

供水管网运行可靠性可定义为管网在不同运行

供水管网作为一种重要的生命线工程系统<sup>[1]</sup>, 在保证城市生产生活和各项功能方面发挥着重要作用

收稿日期: 2018-09-13

基金项目: 科技部国家重点实验室基金(SLDRCE19-B-24); 国家重点研发计划(2016YFC0802400)

第一作者: 刘 威(1976—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为生命线工程防灾和韧性评价。

E-mail: liuw@tongji.edu.cn

阶段内满足用户需求的能力,对于用户节点  $i$ ,其运行可靠度  $R_i$  可表达为

$$R_i = P_r(H_i \geq H_{i,0}) \quad (1)$$

式中: $P_r(\cdot)$ 为概率; $H_i$ 为节点水压; $H_{i,0}$ 为需求水压。

虽然运行可靠性与常规可靠性都是衡量系统在规定时间和规定条件下完成预定功能的能力,但二者仍然存在差异<sup>[9]</sup>:①对于“规定时间”,常规可靠性主要服务于规划设计阶段;而运行可靠性主要服务于系统运行阶段。②对于“规定条件”,常规可靠性需要对系统整个生命周期内遭受的各种不利影响进行综合考虑,采用的组件模型参数为定值;而运行可靠性更为关注系统和周围环境在运行过程中的变化情况,采用的组件模型是动态值。

本文采用 Monte-Carlo 模拟对供水管网进行运行可靠性分析,单次模拟的基本流程见图 1,主要环节包括:

(1) 通过事故资料统计获得分析参数,包括事故类型和不同管材的事故率等,详见 1.2 节。

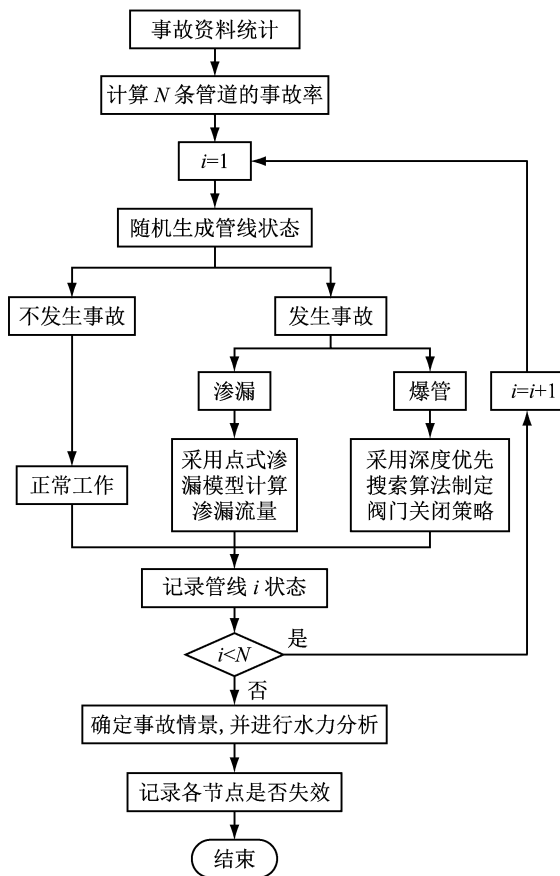


图 1 供水管网运行可靠性单次模拟流程

Fig.1 Single operational reliability simulation of water distribution networks

(2) 根据事故率随机生成管线状态,即是否发

生事故和事故类型,并进行事故模拟,详见 1.3 节。

(3) 在单次模拟中,所有管线的状态构成一种事故情景,并采用水力分析方法对该情境下的供水管网进行分析,得到节点水压,若节点水压小于需求水压,则该节点失效。

(4) 对管网进行若干次模拟,最终节点运行可靠度等于 1 减失效次数与模拟次数相除。

### 1.2 管线事故率模型

管线事故率与管线运行时间、管材、管径以及是否发生过事故等一系列因素密切相关<sup>[10-12]</sup>,为简化分析起见,这里只考虑运行时间和管材 2 种因素,其中,管材包括钢管、球墨铸铁管和灰口铸铁管 3 种形式。

#### 1.2.1 灰口铸铁管

灰口铸铁管事故率随运行时间的变化情况通常可表示为指数形式<sup>[10]</sup>,为

$$N(t) = N(t_0)e^{\beta t} \quad (2)$$

式中: $N(t)$ 为管线在时间  $t$  的事故率,处·(km·年)<sup>-1</sup>; $N(t_0)$ 为管线埋设时的初始事故率,可取 0.328~0.820 处·(km·年)<sup>-1</sup>; $\beta$ 为事故率年增长率系数,可取 0.05~0.15; $T$ 为管龄。计算时, $N(t_0)$ 可取推荐均值,即 0.574 处·(km·年)<sup>-1</sup>。对于  $\beta$ ,上述推荐范围过于宽泛,考虑到  $N(t)$ 对  $\beta$ 的敏感性较高,其取值原则将在第 2.2 节详细介绍。

需要指出,该模型对混凝土管、灰口铸铁管和水泥管均适用,考虑到不同管材的性能差异,其模型参数需结合事故资料分别拟合。由于混凝土管和水泥管在调研区域已基本淘汰,事故资料极少,因此只对灰口铸铁管的事故率进行拟合。

#### 1.2.2 钢管和球墨铸铁管

管线事故率的研究集中在 20 世纪 60 年代至 80 年代<sup>[12]</sup>,研究对象主要为灰口铸铁管,由于球墨铸铁管和钢管当时尚未普及,故其事故率研究较少。为此,根据某供水管网 2004—2013 年间的 14 206 起事故资料对 2 种管材的事故率进行统计建模。

为消除记录误差,管龄采用相邻 2 个年份的均值进行计算。图 2 分别给出了钢管和球墨铸铁管的事故率随管龄的变化情况。据此对 2 种管材的事故率进行建模,方法有二。

(1) 采用指数模型(图 3),最终拟合结果为

$$N(t) = \begin{cases} 0.158e^{0.089T} & \text{钢管} \\ 0.167e^{0.155T} & \text{球墨铸铁管} \end{cases} \quad (3)$$

(2) 采用线性模型(图 4),最终拟合结果为

$$N(t) = \begin{cases} 0.087T - 0.758 & \text{钢管} \\ 0.242T - 1.720 & \text{球墨铸铁管} \end{cases} \quad (4)$$

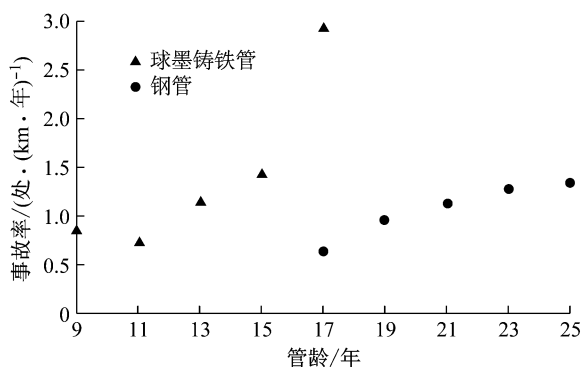


图 2 钢管和球墨铸铁管事故率

Fig.2 Accident rate of steel pipe and ductile iron pipe

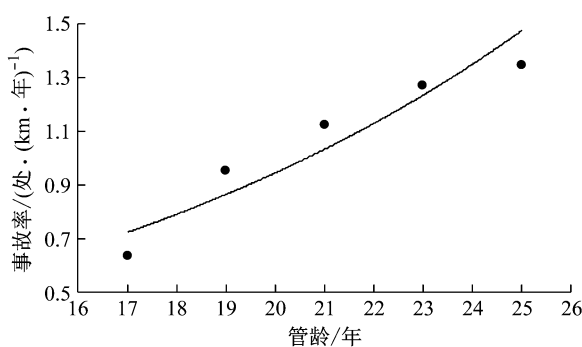
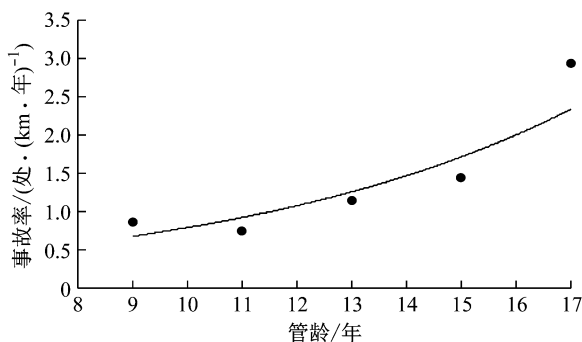
a 钢管,  $R=0.94$ b 球墨铸铁管,  $R=0.91$ 

图 3 增长率系数的指数拟合

Fig.3 Exponential fitting of growth rate coefficient

虽然指数模型的拟合结果与现有数据符合较好,但根据规范要求的 50 年设计使用年限考虑<sup>[13]</sup>,该模型依然存在两点不足:①在管线运行前 5 年,钢管的事故率偏高,且与球墨铸铁管的差别不明显;②管线运行后期,钢管和球墨铸铁管的事故率过高,例如,当管线运行至第 50 年时,球墨铸铁管事故率高达 388 处·(km·年)<sup>-1</sup>,严重背离实际工程情况.调研结果表明,钢管运行性能优于球墨铸铁管,且二者运行性能较稳定,即使在管龄较大的情况下事故率增长也过高.基于上述考虑,后续分析采用线性模型对钢管和球墨铸铁管的事故率进行刻画.

值得指出的是,尽管线性模型可以避免指数模

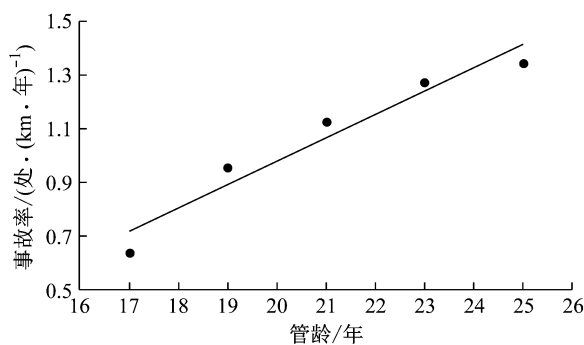
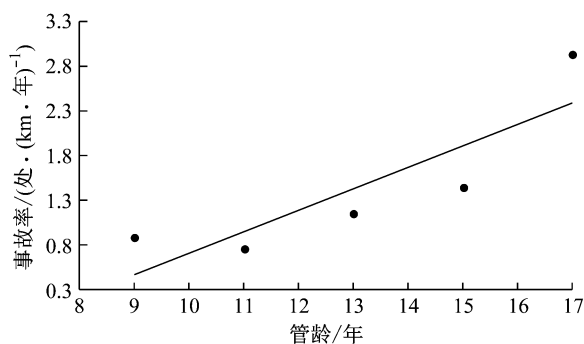
a 钢管,  $R=0.97$ b 球墨铸铁管,  $R=0.86$ 

图 4 增长率系数的线性拟合

Fig.4 Linear fitting of growth rate coefficient

型的 2 个主要缺陷,但仍然存在一些问题,主要表现为运行初期的管线事故率可能为负值.此时,可根据式(4)求出第 1 个非负事故率对应的管龄,并假定该管龄以前的管线事故率恒定(恒等于第 1 个非负事故率).

### 1.3 事故模拟

渗漏和爆管是供水管网运行过程中常见的事故类型,在收集的事故资料中,渗漏事故占比 90%,爆管占比 10%,2 种事故的模拟方式详述如下.

#### 1.3.1 渗漏

管线渗漏时会在破坏位置产生渗漏流量,但依然保有一定的输送功能,因此采用完全关闭的策略过于保守.一般而言,将渗漏流量引入水力平衡方程进行渗漏事故模拟是一种常见的方式.关于渗漏流量的计算,分为一致渗漏模型和点式渗漏模型.其中一致渗漏模型认为管网渗漏位置和渗漏面积不能确定,但可通过整体漏损率和局部水压进行估算,常用于反映管网日常运行状态;点式渗漏模型认为管线渗漏面积与水压有关,且可以量化,常用于管网渗漏水力分析之中,具有预测功能<sup>[14]</sup>.为此,采用点式渗漏模型进行模拟,平衡方程为<sup>[15-16]</sup>

$$AQ_P + Q_N + Q_L = 0 \quad (5)$$

$$Q_L = 0.6\varphi A_L \sqrt{2gH_L} \quad (6)$$

$$Q_P = 0.278CD^{2.63} \Delta E^{0.54} L^{-0.54} \quad (7)$$

式中: $A=[a_{ij}]$ 为连接矩阵,分别取 1(节点  $i$  是管段  $j$  的始节点)、-1(节点  $i$  是管段  $j$  的末节点)、0(节点  $i$  不是管段  $j$  的节点); $Q_P$  为管线传输流量; $Q_N$  为节点流量; $Q_L$  为渗漏流量; $\varphi$  为渗漏系数,可取 0.1; $A_L$  为渗漏面积; $H_L$  为节点水压; $C$  为 Hazen-Williams 系数; $D$  和  $L$  分别为管线直径与管长; $\Delta E$  为管线两端水压损失. 参数取值可参考文献[15-16].

### 1.3.2 爆管

爆管主要源于第三方破坏、误操作等因素,事故后果较渗漏严重. 由于此时事故管线已基本丧失输送功能,因此,为避免水资源的浪费和次生灾害的产生,需要及时关闭阀门、隔离事故管线. 事实上,供水管网中的阀门数量远少于管段数量,以调研区域为例,该区共存在 9 338 条管段,但阀门数量仅为 1 607 个. 换言之,由于爆管导致的阀门关闭势必会波及周围的非事故管线. 因此,如何快速有效地制定阀门关闭策略是爆管后面临的首要问题. 显然,事故管线存在如下 3 种阀门布置情况:

(1) 事故位置两侧均存在阀门,如图 5 中的管线 7,此时,只需将事故管线两侧的 2 个阀门关闭即可达到隔离管线的目的.

(2) 事故管线存在 1 个阀门,如图 5 中的管线 3,此时除了关闭管线 3 的阀门之外,还需要将管线 6 的阀门关闭.

(3) 事故管线不存在阀门,如图 5 中的管线 1,此时,需要关闭临近管线上的阀门,包括管线 3、4 和 5.

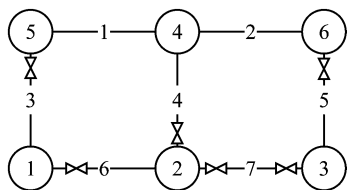


图 5 小型管网阀门布置

Fig. 5 Valve layout of a small network

对于以上 3 种阀门布置形式,本文采用深度优先搜索算法解决大型管网爆管后的阀门识别问题<sup>[17-18]</sup>. 具体而言,对于情况(1),直接关闭事故管线上的 2 个阀门;对于(2),首先关闭事故管线一侧阀门,然后以另一侧节点为开始节点对所有邻接非事故管线进行深度优先搜索,遇到阀门则关闭,并停止该路径的搜索,转而进入其他分支路径,直至达到隔离事故管线的目的;对于(3),对管线两侧节点均进

行类似(2)的搜索,直至达到隔离事故管线的目的.

阀门关闭后,隔离区的管线(包括事故管线和非事故管线)退出工作,管网拓扑结构发生变化,此时水力分析需按照新生成的管网进行.

### 1.4 基于 Langelier 的管线粗糙度时变模型

在供水管网运行过程中,即使无事故发生时,管线内壁粗糙度也会随着时间的推移而增加. 一般而言,管线粗糙度与管线采用的衬砌材料、管径大小、水体性质、运行时间和流动速度等因素有关. 在水力分析中,管道内壁粗糙度通过 Hazen-Williams 系数(式(7)中的系数  $C$ )表示,该系数通常不可直接测得,但可以通过其他可测物理量进行反算,其中管壁绝对粗糙度  $e$  是一个常用参数.

Sharp 和 Walski<sup>[19]</sup> 根据大量调查和试验研究结果,将 Hazen-Williams 系数  $C$  与管壁绝对粗糙度  $e$  的关系表示为

$$C = 18.0 - 37.2 \lg \frac{e}{D} \quad (8)$$

$$e = e_0 + aT \quad (9)$$

$$a = 10^{-4.08 + 0.38L_1} \quad (10)$$

式中: $D$  为管道直径; $e_0$  为新铺管道的初始绝对粗糙度,取 0.18 mm; $a$  为绝对粗糙度增长率; $T$  为管龄; $L_1$  为 Langelier 指标,对于结垢型水体, $L_1 > 0$ ,对于侵蚀型水体, $L_1 < 0$ ,对于一般供水系统,可取 -1.5.

文献[19]指出,式(8)~(10)适用金属管线粗糙度预测,对于塑料管或采用水泥衬砌的管线,其粗糙度在运行过程中变化不大,分析时可近似取常量.

## 2 参数敏感性分析

以某市供水管网为例讨论了管线粗糙度、灰口铸铁管的事故率年增长系数和渗漏面积对管网运行状态的影响,该管网包括 82 个节点(4 个水源点)、107 条管线,由于缺乏阀门资料,这里虚拟设置了 92 个阀门,管网拓扑结构如图 6.

### 2.1 管线粗糙度

为突出管线粗糙度的影响,分析过程中假设管线事故率为零,管网运行至不同年份时各节点水压如图 7 所示. 可见,管壁粗糙度的增加会导致节点水压出现不同程度的降低,且对于成环性低的区域影响更为明显,最高可达 5.94 m(节点 76,运行至第 50 年). 此外,该管网运行过程中各节点的水压都维持在 30 m 以上,因此在无事故且需求水压为 20 m 时,单纯的管道粗糙度增加不会对管网运行可靠性造成较大影响. 但事故发生后,管网将出现由于漏损(渗

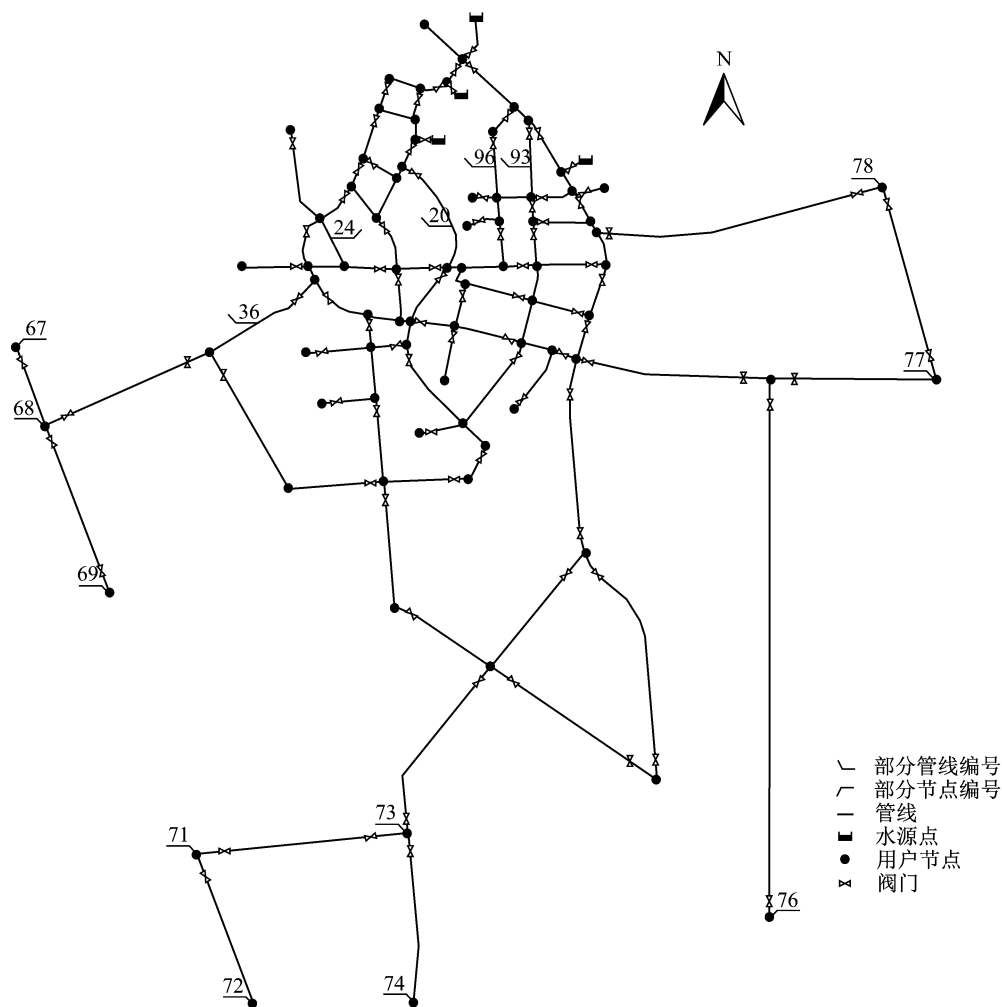


图 6 案例管网

Fig.6 Case network

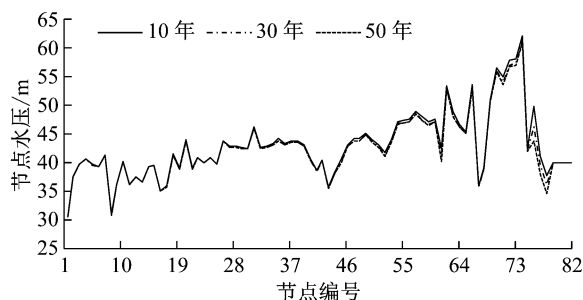


图 7 不同年份时的节点水压

Fig.7 Nodal heads in different years

漏)或阀门关闭(爆管)导致的节点水压降低,此时管道粗糙度的影响将被放大。

## 2.2 灰口铸铁管事故率年增长率系数

根据 1.2.1 节所述,灰口铸铁管的事故率  $N(t)$  对  $\beta$  较为敏感,而文献[10]给出的取值范围过于宽泛,为此,选取了 5 组  $\beta$  值并进行了运行可靠性分析,并结合分析结果给出建议值。根据控制变量法,其余参数在模拟过程中取为确定性量,其中 Hazen-

Williams 系数取为管网运行至 10 年的值,渗漏面积取为管线截面积  $S$  的 5%,模拟次数 7 000 次。

由图 8a 可知, $\beta$  的取值对管网运行初期(取 10 年)的影响并不显著,根据表 1(第 2 列),最薄弱节点(出现在节点 72、74、76 等处)的运行可靠度保持在 0.99 以上。

由图 8b 可知,当管网运行至中期(取 30 年), $\beta$  的取值对高成环性区域的节点运行可靠性影响依然不明显,但对于成环性较低且连接长距离管线的节点影响增加。根据表 1(第 3 列),当  $\beta$  从 0.05 提高到 0.13 时,最薄弱节点的运行可靠度降低 3.1%。

由图 8c 可知,当管网运行至末期(取 50 年),部分成环性较高的节点也会随着  $\beta$  的提高出现显著降低,对于成环性较低的节点,这种影响更为显著,根据表 1(第 4 列),当  $\beta$  取值从 0.05 提高到 0.13 时,最薄弱节点的运行可靠度降低 39.8%。

根据上述分析,供水管网各节点的运行可靠度对  $\beta$  较为敏感(后期尤为明显),为确定一个合理的  $\beta$

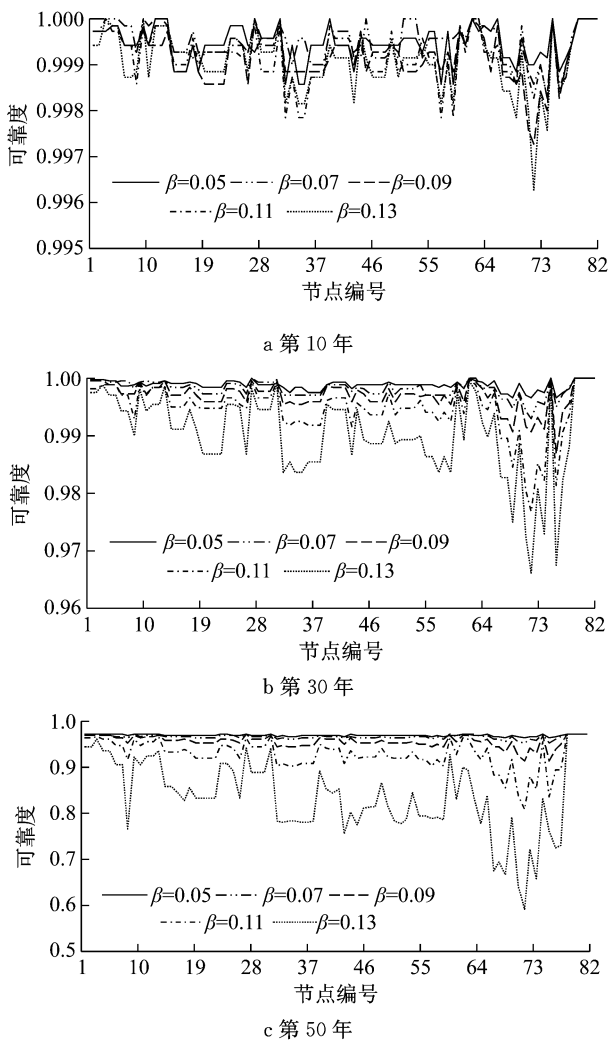


图 8 不同增长率系数时的节点运行可靠度

Fig.8 Nodal operational reliability at different growth rate coefficient

表 1 不同增长率系数时最薄弱节点运行可靠度

Tab.1 Operational reliability of the weakest nodes at different growth rate coefficient

$\beta$	第 10 年	第 30 年	第 50 年
0.05	0.999	0.997	0.991
0.07	0.998	0.993	0.979
0.09	0.997	0.987	0.939
0.11	0.998	0.977	0.826
0.13	0.996	0.966	0.597

值,这里主要依据 2 个原则:① 调研资料表明,灰口铸铁管在运行过程中的性能劣于球墨铸铁管,因此,其事故率也更高,由于球墨铸铁管事故率曲线可根据 1.2.2 节确定,因此根据该原则可确定  $\beta$  值的下限,计算可知,该下限值为 0.09 左右;② 根据分析结果,当  $\beta$  值过高时,管网运行中后期的部分节点失效概率过高,如当  $\beta$  取 0.13 时,管网运行至第 50 年时的最薄弱节点失效概率为 40.3%,虽然分析过程中未考虑维修,但这一结果仍然与事实差距较大.根据

以上原则,推荐  $\beta$  值为 0.11.

### 2.3 渗漏面积

调研结果表明,渗漏面积  $A_L$  的离散性大,且目前缺少统计结果.为简化分析,推荐  $A_L$  取值范围为  $0.1\%S \sim 20\%S$ ,原因在于:① 当渗漏面积小于  $0.1\%S$  时,监测设备难以定位<sup>[20]</sup>,且渗漏流量很小,对用户需求影响甚微;② 当渗漏面积较大时,爆管事故发生的可能性更大.为进一步确定  $A_L$  的取值,分析了 5 组  $A_L$  对管网运行可靠性的影响,分析过程中,其他参数取值参见 2.2 节, $\beta$  取为 0.11.

由图 9a 可知,渗漏面积的变化对管网运行初期的影响并不显著,根据表 2(第 2 列),最薄弱节点的运行可靠度保持在 0.997 以上.

由图 9b 可知,当管网运行至中期,各节点运行可靠度较初期稍有降低,但并不明显.此时,渗漏面积的变化对节点运行可靠度影响依然不显著,根据

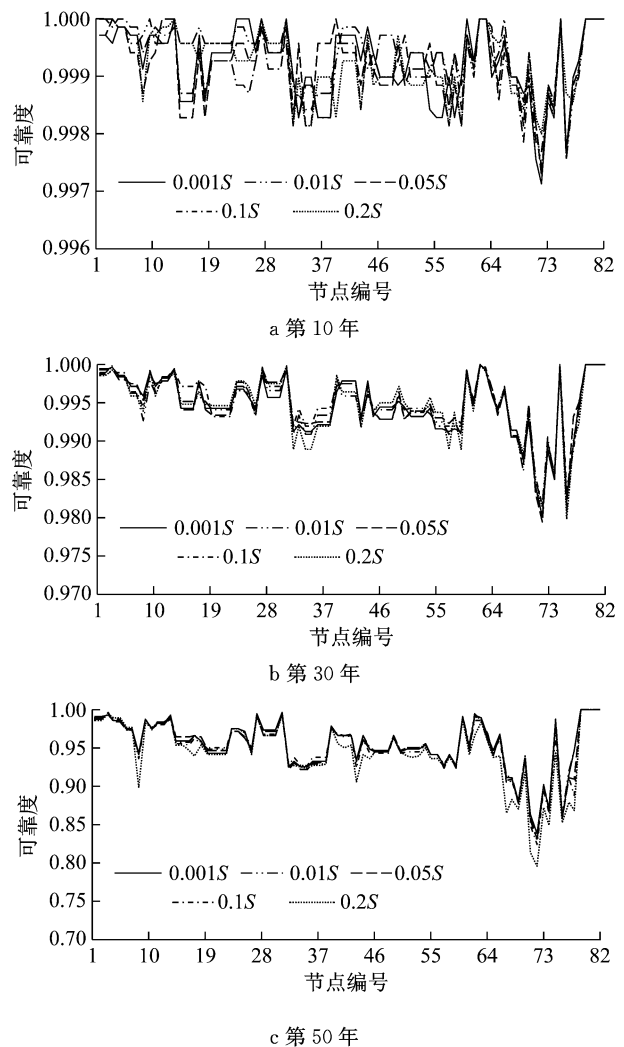


图 9 不同渗漏面积时各节点运行可靠度

Fig.9 Nodal operational reliability at different leak area

表 2(第 3 列),最薄弱节点的运行可靠度保持在 0.97 以上。

由图 9c 可知,当管网运行至末期,各节点运行可靠度与中期相比有了大幅度降低。根据表 2(第 4 列),最薄弱节点的运行可靠度随渗漏面积的提高有所降低,但降低幅度有限,当渗漏面积从 0.001S 提高到 0.2S 时,最薄弱节点的运行可靠度降低 4.4%。

上述分析表明,单纯的渗漏面积变化对管网前中期的运行可靠度影响甚微,但对后期影响较大,但这种影响弱于  $\beta$ 。根据表 2,当渗漏面积取为 0.2S 时,其破坏程度相当于震后中等破坏水平<sup>[21]</sup>,但最薄弱节点运行可靠度仍保持在 0.80 以上。因此,在进行管网运行可靠性分析时,不同于  $\beta$  的取法,本文建议渗漏面积可取为  $[0.1\%S, 20\%S]$  内服从均匀分布的随机变量。

表 2 不同渗漏面积时最薄弱节点运行可靠度

Tab.2 Operational reliability of the weakest nodes at different leak area

$A_L$	第 10 年	第 30 年	第 50 年
0.001S	0.997	0.980	0.837
0.01S	0.997	0.980	0.829
0.05S	0.997	0.979	0.831
0.1S	0.998	0.982	0.824
0.2S	0.998	0.980	0.800

### 3 案例分析

通过某市供水管网对上述分析方法进行可行性论证,管网信息见第 2 节,分析参数汇总如下:

(1) 需求水压 20 m.

(2) 不同管材事故率为

$$N(t) = \begin{cases} 0.087T - 0.758 & \text{钢管} \\ 0.242T - 1.720 & \text{球墨铸铁管} \\ 0.574e^{0.11T} & \text{灰口铸铁管} \end{cases} \quad (11)$$

(3) 渗漏面积服从  $[0.1\%S, 20\%S]$  的均匀分布。

(4) 管道粗糙度系数考虑随运行时间的变化,根据 1.4 节确定。

(5) 对于一个具体事故而言,渗漏发生的概率为 0.9,爆管概率为 0.1。

(6) 模拟次数 7 000 次。

该市供水管网运行至第 10 年、30 年和 50 年的节点可靠度如图 10 所示。分析可知:① 各节点的运行可靠度均随年份的增加而降低,但总体依然处于较高水平,所有节点的可靠度均在 0.80 以上,这与网络的环状布置以及多水源点设置密切相关;② 在

管网运行前中期,各节点可靠度保持在 0.97 以上,且均未出现明显降低;③ 在管网运行末期,各节点可靠度均出现显著降低,根据表 3,薄弱区域位于管网南部,如节点 71、72 和 76,与第 10 年相比,其运行可靠度分别降低了 15.92%、18.04% 和 14.24%,原因在于该区域节点处于树状管网末端,成环性低,一旦连接管线失效,用户供水将受到严重影响。

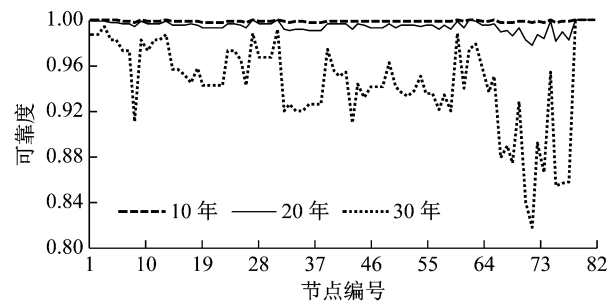


图 10 案例管网各节点运行可靠度

Fig.10 Nodal operational reliability of the case network

为进一步改善该市供水管网的运行可靠性,根据上述分析结果提出如下建议:① 对管龄超过 30 年的管线进行重点监测,提高巡视频率;② 增加管网南部区域的供水环路或增设泵站,若条件允许,可增加水厂,提高该区域用户的冗余水压,主要包括节点 67、68、69、71、72、73、74、76、77、78;③ 适时将灰口铸铁管更换为球墨铸铁管或钢管,降低事故率;④ 对于小管径且流速低的老旧管道要及时清洗,改善水力特性;⑤ 在支管、道路交叉口等部位增设阀门,降低爆管的影响范围,主要包括管线 20、93、96 南侧、管线 36 西侧、管线 24 南北侧等。

表 3 案例管网最薄弱节点运行可靠度

Tab.3 Operational reliability of the weakest nodes in the case network

运行时间/年	节点 71	节点 72	节点 76
10	0.999	0.998	0.997
30	0.983	0.978	0.981
50	0.840	0.818	0.855

### 4 结论

(1) 建立了基于事故率的供水管网全寿命运行可靠性分析方法,包括不同管材事故率模型的确定、渗漏和爆管事故的模拟以及管道粗糙度模型的建立。通过敏感性分析对参数取值进行了讨论,其中,灰口铸铁管事故率可采用指数模型、球墨铸铁管和钢管可采用线性模型,渗漏面积可取为  $[0.1\%S,$

20%S]内服从均匀分布的随机变量。

(2) 以某市供水管网为例对分析方法进行了可行性论证,结果表明,该市供水管网运行可靠性整体处于较高水平;但从第30年开始,各节点运行可靠性均出现显著下降,薄弱区域位于管网南部,该区域管线成环性低,长距离管线较多,一旦管线失效,所连接的用户供水将受到严重影响。根据分析结果,建议了可提高管网运行可靠性的工程措施。

(3) 后续研究可针对以下几个问题展开:① 综合考虑不同管材、管径、管龄、埋深等因素对管线事故率及运行可靠性的影响;② 考虑不同拓扑结构、源点数量、需求水压等对运行可靠性的影响;③ 基于运行可靠性的最优阀门布置方案;④ 考虑修复的运行可靠性(韧性)研究。

### 参考文献:

- [1] 李杰. 生命线工程抗震——基础理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
LI Jie. Lifeline earthquake engineering—Basic methods and applications[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] 国家统计局. 2017 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.  
National Bureau of Statistics. 2017 China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [3] 刘书明, 王欢欢, 徐锦华, 等. 基于智能优化算法的供水管网漏水点定位[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 740.  
LIU Shuming, WANG Huanhuan, XU Jinhua, et al. Identification of leakage location based on modern optimization algorithms [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(5): 740.
- [4] 中国城镇供水排水协会. 2003 年城市供水统计年鉴[M]. 北京: 中国城镇供水排水协会, 2004.  
China Urban Water Association. 2003 Urban statistics yearbook [M]. Beijing: China Urban Water Association, 2004.
- [5] ZIO E. Reliability engineering: Old problems and new challenges [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94(2): 125.
- [6] 王华伟, 高军. 复杂系统可靠性分析与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
WANG Huawei, GAO Jun. Reliability analysis and evaluation of complex systems[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [7] 庄宝玉. 城市输配水管网可靠性研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.  
ZHUANG Baoyu. Research on reliability of urban water distribution systems[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [8] SHUANG Qing, ZHANG Mingyuan, YUAN Yongbo. Node vulnerability of water distribution networks under cascading failures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2014, 124: 132.
- [9] 孙元章, 程林, 何剑. 电力系统运行可靠性理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.  
SUN Yuanzhang, CHENG Lin, HE Jian. Operational reliability theory of power systems [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [10] SHAMIR U, HOWARD C D D. An analytic approach to scheduling pipe replacement [J]. Journal American Water Works Association, 1979, 71(5): 248.
- [11] WALSKI T M, PELLICCIA A. Economic analysis of water main breaks [J]. Journal American Water Works Association, 1982, 74(3): 140.
- [12] KETTLER A J, GOULTER I C. An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1985, 13(1): 286.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇给水排水技术规范: GB 50788—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for water supply and sewage of urban: GB 50788—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [14] 贾辉. 城市供水管网渗漏水力特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.  
JIA Hui. Study on leakage hydraulic characteristics of municipal water supply network [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [15] LIU W, XU L, LI J. Seismic design of water distribution networks using auto-generation techniques [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 13(7): 831.
- [16] LIU W, ZHAO Y G, LI J. Seismic functional reliability analysis of water distribution networks [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2014, 11(3): 363.
- [17] 邓海英, 赵洪宾, 解斌. 供水管网事故时阀门关闭方案的确定 [J]. 中国给水排水, 2000, 16(6): 41.  
DENG Haiying, ZHAO Hongbin, XIE Bin. Determination of valve closing scheme in the event of water supply network accident [J]. China Water and Wastewater, 2000, 16(6): 41.
- [18] 郑成志. 城市供水管道完整性分析评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
ZHENG Chengzhi. Analysis and assessment of urban water supply pipeline integrity [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [19] SHARP W W, WALSKI T M. Predicting internal roughness in water mains [J]. Journal of American Water Works Association, 1988, 80(11): 34.
- [20] WANG X, LAMBERT M F, SIMPSON A R, et al. Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7): 697.
- [21] 陈伶俐, 李杰. 供水管线震害量化参数——渗漏面积的估算方法 [J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 69.  
CHEN Lingli, LI Jie. Leakage area calculation method—the quantitative description of seismic damage to buried pipeline [J]. Journal of Natural Disaster, 2003, 12(1): 69.