

清华大学紫荆公寓管网可靠性研究

郑意德¹ 张熠¹ 林佳瑞¹

(清华大学土木水利学院, 北京 100084)

摘要: 供水管道构件的安全对供水系统的高效运输以及输水质量具有重要意义, 而腐蚀是影响埋地管道可靠度的重要因素之一。本文以清华大学紫荆公寓供水管道系统为例, 通过从紫荆管网系统的 BIM (建筑信息模型) 中提取出所有供水管道的基本信息, 包括管道内径、管道壁厚、管道粗糙系数、管道长度以及埋深等, 建立水力分析模型, 计算了考虑腐蚀作用时, 所有管道构件在外荷载条件下的时变可靠度和管网系统时变可靠度的上下界。同时通过对管道构件的时变可靠度进行聚类分析, 获取不同构件属性与工作特征对管道腐蚀退化量的影响。计算结果将对管网的运营维护提供数据支撑, 以便更好地进行运营维护策略制定。

关键词: 腐蚀; 供水管道; 时变可靠度; 系统可靠度; 聚类分析; BIM

中图分类号: TU311.4

文献标识码: A

STUDY ON THE RELIABILITY OF APARTMENT NETWORK SYSTEM IN TSINGHUA UNIVERSITY

Zheng Yide¹ Zhang Yi¹ Lin Jiarui¹

(School of Civil Engineering, Tsinghua University, 100084, China)

Abstract: The safety of water supply pipeline components is of great significance to the operation of water supply system. Corrosion is one of the important natural phenomena causing the reduction of reliability of buried pipelines. In this paper, a reliability analysis is conducted on a Building Information Model (BIM) model of Zijing water supply pipe system considering hydrodynamics. The time-varying reliability of each pipe and the upper and lower bound of system reliability under corrosion effect is calculated. The influence of structural properties and working conditions to the pipeline corrosion degradation process is also discussed based on a clustering analysis. It is shown the calculation results provide insightful information for the maintenance of pipeline and thus making better maintenance strategy.

Keywords : corrosion; water supply pipe; time-varying reliability; system reliability; cluster analysis; BIM

引言

管道网络是日常生活、运输线等生命线工程的重要组成部分, 在石油运输、给排水、能源供应等方面有着重要的意义。在 2018 年, 根据中国国家统计局数据^[1], 全国供水管网总长度达到 86 万公里, 供水总量达到 614 亿吨。同时, 随着南水北调工程的不断推进, 输水规模将逐步增大, 这是对管道质量以及已经建成的管道运营维护的巨大考验。然而许多管道的最初铺设时间距离当下久远, 且由于当时铺设时材料技术的缺陷, 再加上管道构件有的埋藏在地下或者铺设在人迹罕至的地区, 长时间的服役状态以及未知的工作环境, 使得管道更容易发生破裂泄漏, 且这种情况往往无法在第一时间排查, 产生维修延误的二次损失, 期间就会造成经济损失并存在较大的安全隐患, 因此对管道系统工作状态可视化以及可靠度研究具有重大经济价值与实际意义。

基金项目: 自然科学基金项目 (51908323)

作者简介: 郑意德, 清华大学, 博士研究生

收稿日期: 2020-07-15

1 管网可靠度计算方法

1.1 单一构件可靠度理论

1.1.1 基于可靠度的机构设计

可靠度是度量结构可靠性^[2]的指标，通常通过定义某种破坏模式下的结构功能函数来计算：

$$G(R, S) = R - S \quad (1)$$

此处 $G(R, S)$ 表示该种破坏模式下结构功能函数； R 表示结构或者构件的承载能力； S 表示荷载作用时，结构或者构件的荷载效应。

结构或者构件的荷载效应超过结构的极限承载能力时，结构失效，因此结构的失效概率有如下的定义：

$$P_f = P[R - S \leq 0] = P[G(R, S) \leq 0] \quad (2)$$

设计时，不同概率密度分布函数模拟下的结构抗力与荷载效应会得到不同的失效概率计算公式，通过限定各种失效模式下的结构失效概率从而达到基于结构可靠度的结构设计方法。

1.1.2 时变可靠度

时变可靠度是考虑结构承载力随时间退化或者荷载效应季节性变动对结构功能函数影响提出的结构可靠度计算方法。在实际工作情况下，混凝土耐久性、钢筋的锈蚀情况以及管道的锈蚀深度等都会影响到构件完成预期功能的能力，因此在结构可靠度理论中定义结构的时变功能函数来模拟这种现象⁰：

$$G(R, S, t) = R(t) - S(t) \quad (3)$$

此处 $G(R, S, t)$ 时变条件下某种破坏模式的结构功能函数， $R(t)$ 表示 t 时刻下结构的承载能力； $S(t)$ 表示 t 时刻荷载作用下结构的效应。

所以 t 时刻，管道的失效概率可以用如下公式表示：

$$P_f(t) = P[R(t) - S(t) \leq 0] = P[G(R, S, t) \leq 0] \quad (4)$$

计算时变可靠度问题的方法⁰：解析法以及数值模拟法。解析法通过用不同概率分布函数模拟结构抗力与荷载效应，数值法则多利用蒙特卡洛模拟，根据已有的数据，考虑实际误差所得到的计算结果。

1.1.3 斯皮尔曼相关系数

斯皮尔曼相关系数是统计学中用以衡量两个变量之间相关性的指标，通常用 ρ 表示。对于一个样本容量为 n 的样本，若每个样本包含一个独立变量值 X_i ，以及一个依赖变量 Y_i 。将独立变量集合与依赖变量集合分别按照变量值大小进行升序或者降序排列，则原变量集中的 X_i ， Y_i 都会对应排序后的一个等级编号 x_i ， y_i ，则斯皮尔曼相关系数的计算公式如下所示：

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

其中 \bar{x} 表示独立变量 X 的平均等级， \bar{y} 表示依赖变量 Y 的平均等级。斯皮尔曼相关系数的值在-1到1之间，当斯皮尔曼系数为正时，独立变量与依赖变量之间呈现正相关，当斯皮尔曼系数为负时，独立变量与依赖变量之间呈现负相关，且斯皮尔曼相关系数绝对值越大相关性越强。

1.2 系统可靠度理论

假设一个系统有 K 种类型的子系统（不同类型的子系统意味着系统中的构件具有不同的时变可靠度），

且子系统 k 由 m_k 构件组成。令 x_i 代表系统中第 i 构件的工作状态， $x_i = 1$ 表示第 i 构件正常工作，反之， $x_i = 0$ 表示第 i 构件失效。令 $\phi = \phi(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 表示系统内各个构件工作状态为 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in \{0, 1\}^m$ 下系统结构功能函数（ m 代表系统中构件总数）， $\phi = 1$ 代表系统正常工作。

假定 l_k 表示子系统 k 中正常工作的构件数， S_{l_1, l_2, \dots, l_K} 表示满足子系统 k 中正常工作的构件数为 l_k 情况下，所有状态向量 \mathbf{x} 的集合。则 Survival Signature⁰表示当子系统 k 中正常工作的构件数为 l_k 时，所有状态向量 \mathbf{x} 集合中导致系统失效的状态向量的占比，且可用如下公式进行描述：

$$\phi(l_1, l_2, \dots, l_K) = \left[\prod_{k=1}^K \binom{m_k}{l_k}^{-1} \right] \times \sum_{\mathbf{x} \in S_{l_1, l_2, \dots, l_K}} \phi(\mathbf{x}) \quad (6)$$

假设每个构件的时变可靠度相互独立，且在相同类型的子系统内的构件具有相同的可靠度累积分布函数 $F_k(t)$ 。 $C_k(t) \in \{0, 1, \dots, m_k\}$ 表示 t 时刻子系统 k 中正常工作的构件数，则子系统 k 中正常工作的构件数为 l_k 情况的出现概率可以用如下的公式表示：

$$P(\cap_{k=1}^K \{C_k(t) = l_k\}) = \prod_{k=1}^K P(C_k(t) = l_k) = \prod_{k=1}^K \binom{m_k}{l_k} [F_k(t)]^{l_k} [1 - F_k(t)]^{m_k - l_k} \quad (7)$$

相应系统的时变可靠度可以用如下公式进行计算^{错误!未找到引用源。}：

$$P(T_s > t) = \sum_{l_1=0}^{m_1} \dots \sum_{l_K=0}^{m_K} \phi(l_1, l_2, \dots, l_K) P(\cap_{k=1}^K \{C_k(t) = l_k\}) \quad (8)$$

1.3 管道锈蚀模拟

1.3.1 基于刚度的极限失效模式

对于环形管道，有如图1的四种可能存在的腐蚀情况，分别为：外部环向腐蚀、内部环向腐蚀、外部轴向腐蚀以及内部轴向腐蚀。

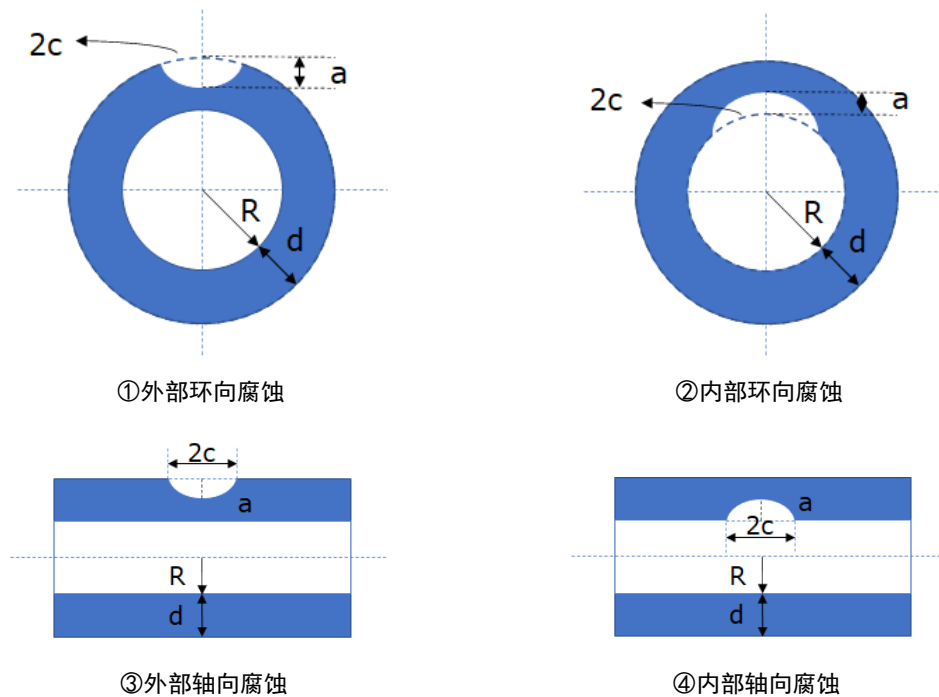


图1 管道壁面凹坑所有可能的半椭圆裂纹坑几何形状^[4]

因锈蚀诱发管道失效的机制有以下两种^{错误!未找到引用源。}：（1）管道承受的应力超过管道材料的极限应力（基

于强度极限状态失效失效模式); (2) 管道承受的应力强度超过管道断裂韧性 (基于刚度极限状态失效模式)。有学者已经研究发现^{错误!未找到引用源。}, 因为刚度损失导致的管道失效的概率是因为强度损失导致管道失效的概率三倍, 基于刚度极限状态的失效模式是腐蚀导致管道的主要失效模式。因此本文在后续研究中只考虑管道基于刚度的失效概率随腐蚀程度变化的影响。在断裂力学中, 外荷载条件下, 环向或轴向腐蚀所需的刚度状态用应力强度因子 K 表示, *Stress intensity factor and limit load handbook*⁰ 一书中, 具有上述裂纹的管道在承受环向应力以及轴向应力作用下的应力强度因子 K 计算公式如下:

$$K_{I-h} = \sqrt{\pi a} \sum_{i=0}^3 \sigma_i f_i(a, c, d, R) \quad (9)$$

$$K_{I-a} = \sqrt{\pi a} (\sum_{i=0}^3 \sigma_i f_i(a, c, d, R) + \sigma_{bg} f_{bg}(a, c, d, R)) \quad (10)$$

式中 K_{I-h} 在此破坏模式下由环向应力产生的纵向裂纹的应力强度因子; K_{I-a} 表示在此破坏模式下由轴向应力产生的环向裂纹的强度因子; a 表示裂纹的深度; σ_i 垂直于裂纹平面的应力; c 表示裂纹长度的一半; d 表示管道的壁厚; R 表示管道的内径; f_i 与 f_{bg} 表示由 a, c, d, R 决定的几何函数, 不同腐蚀情况下的取值可以通过查表得到; σ_{bg} 表示整体的弯曲应力。

1.3.2 管道腐蚀模型

铸铁管道腐蚀速率的建模有两种不同的数学方法: 确定性方法和随机性方法。

确定性管道腐蚀模型主要采用的是指数模型, 它表示管道在某一时刻 t 的腐蚀深度与时间呈指数关系, 通常根据经验以及已有数据预测管道的腐蚀深度确定值, 该模型由 Kucera 与 Mattsson^{错误!未找到引用源。} 提出, 公式如下:

$$a(t) = kt^n \quad (11)$$

式中 k 与 n 是根据实验得来的经验相关系数, 决定了腐蚀扩散的速度, 不同的土壤环境、管道外壁腐蚀以及管道内壁腐蚀等都会影响相关系数的取值; $a(t)$ 表示腐蚀深度随时间变化函数。

随机方法是在考虑影响管道腐蚀因素情况下用概率分布函数预测管道腐蚀深度。这种分布往往是韦布尔分布和极值分布的组合^{错误!未找到引用源。}。下式给出工龄为 t 年的铸铁配水管道的最大腐蚀深度的概率, 腐蚀深度用所占管壁厚度百分比 $z\%$ 表示 ($z \in (0, 100)$):

$$P(\max_corrosion_depth > z) = (1 - F_2(z))(1 - F_1(t)) + F_1(t) \quad (12)$$

式中 $F_1(t)$ 表示在 t 时刻管道最大腐蚀深度已经达到壁厚的概率, 服从带有参数 α 和 λ 的韦布尔分布^{错误!未找到引用源。}; $F_2(z)$ 表示 t 时刻, 在管道腐蚀深度并未达到壁厚的情况下, 最大腐蚀深度小于管壁厚度百分比 $z\%$ 的概率, 服从带有形状参数 k , 地理参数 μ_1, μ_2 和尺度参数 σ 的极值分布^{错误!未找到引用源。}, 具体分布公式如下所示:

$$F_1(t) = 1 - e^{-\lambda t^\alpha} \quad (13)$$

$$F_2(z) = \exp \left[- \left\{ 1 - \frac{k}{\sigma} (z - (\mu_1 \times t + \mu_2)) \right\}^{1/k} \right] \quad (14)$$

其中 $k \neq 0$, 且 $\left[1 - \frac{k}{\sigma} (z - (\mu_1 \times t + \mu_2)) \right] > 0$ 。

2 工作案例

2.1 案例背景

清华大学紫荆公寓地下供水管网提供建筑面积达到 30 万平方米的供水, 包含了清华大学所有紫荆公寓以及留学生公寓的地下管网部分, 整个紫荆公寓的供水管道建筑信息模型 (BIM 模型) 如图 2 所示。本文

计算的紫荆公寓供水管道部分具有双管运输、闭合管路的运输特点，这种管网设计方式有助于管道发生破裂时的供水运输，对供水系统起到保障作用。通过对 BIM 模型中管道属性信息提取，本次计算分析的管道共有 1366 个(不包含建筑内供水管道，仅包括地下部分)，且均为球墨铸铁材料，管道内径有 200mm, 150mm, 100mm, 80mm, 65mm, 50mm 六种类型。最长管道的长度为 191.57m，最短的则为 0.114m。每根管道的具体信息可以通过 Revit-dynamo 提取成 excel 表格，包括管道内径、壁厚、管道粗糙度、管道起止处理深等。管道正常工作的内压力通过根据提取的管网信息建立相应的水力分析模型，运行计算水里分析软件 Epanet 2.0 计算得到，水力计算模型如图 3 所示。

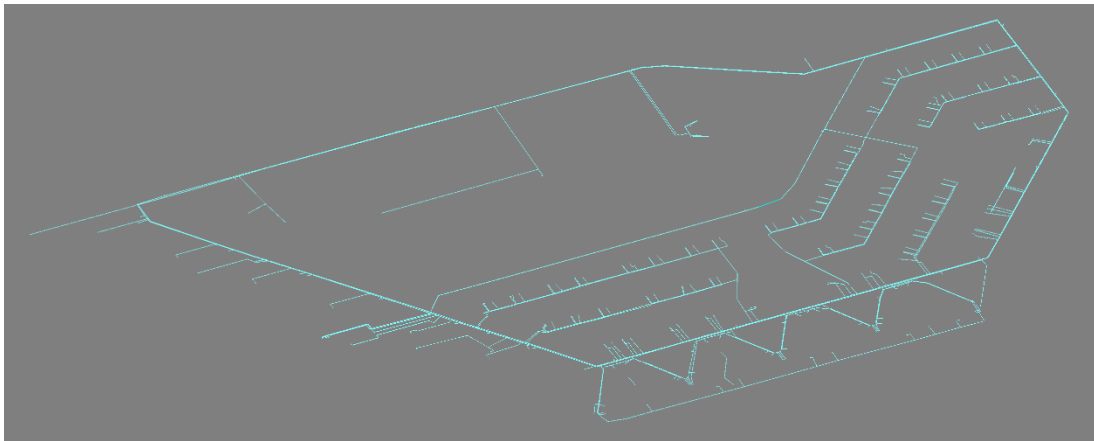


图 2 本文计算的紫荆公寓供水管网系统的 BIM 模型

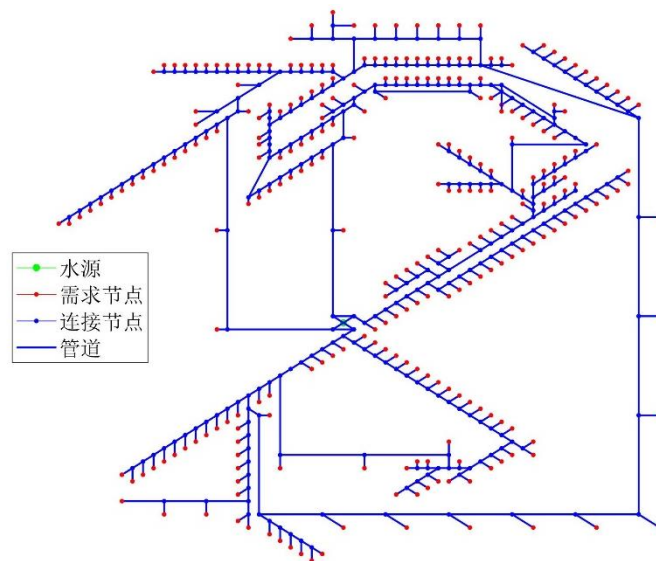


图 3 本文建立的紫荆公寓供水管网系统的水力分析模型

本案例中，外荷载条件采用我国《给水排水管道结构设计规范》(GB50332-2002)⁰中相应永久荷载与可变荷载的设计取值，考虑的外荷载包括正常工作时管道内水压力、土压力、交通压力、温度压力。各个荷载作用下管道截面所受应力大小分布按照 Ahammed⁰与 Rajani⁰出的公式进行计算，相应应力状态下腐蚀坑的应力强度因子计算按照前文公式(10)与(11)计算得到。同时考虑到计算公式中参数的随机性，除可直接从 BIM 模型中提取的属性信息外，其他参数通过相应的随机分布进行模拟，具体参数信息如表 1 所示(表 1 修改自 Li⁰)。

表 1 清华大学紫荆公寓供水系统参数信息

符号	参数意义	单位	分布函数	分布均值	分布方差	参考文献
P	管道内压	MPa	--	Epanet 模型计算	--	--
D	管道内径	mm	正态分布	从 BIM 模型提取	--	--
d	管道壁厚	mm	正态分布	从 BIM 模型提取	--	--
K_m	弯矩	--	对数正态分布	0.235	0.04	Sadiq et al. (2004) 错误:未找到引用源。
C_d	计算系数	--	对数正态分布	1.32	0.2	Sadiq et al. (2004) 错误:未找到引用源。
B_d	沟槽开挖深度	mm	正态分布	D+900	--	GB50268-2008 错误:未找到引用源。
E_p	弹性模量	MPa	--	105000	--	GB50332-2002 错误:未找到引用源。
K_d	挠度系数	--	对数正态分布	0.108	0.2	Sadiq et al. (2004) 错误:未找到引用源。
I_c	影响因子	--	正态分布	1.5	0.375	Sadiq et al. (2004) 错误:未找到引用源。
C_t	表面荷载系数	--	对数正态分布	0.12	0.2	Sadiq et al. (2004) 错误:未找到引用源。
F	轮荷载	N	正态分布	270000	1300	JTG D60-2015 错误:未找到引用源。
γ	土壤容重	N/mm ²	正态分布	18×10^{-6}	18×10^{-7}	GB50332-2002 错误:未找到引用源。
ν_p	管道材料泊松系数	--	对数正态分布	0.24	0.6	Sadiq et al. (2004) 错误:未找到引用源。
A	管道有效长度	mm	--	$300+1.4H$	--	JTG D60-2015 错误:未找到引用源。

						引用来源。
H	管道埋深	mm	--	从 BIM 模型提取	--	--
K_{IC}	管道断裂韧性	N/mm ^{1.5}	--	21.88	--	Fracture toughness test of ductile iron 错误!未找到引用源。

值得注意的是表中提到的管道有效长度*A*并非管道的实际长度，管道有效长度是通过计算本文中的交通荷载中轮荷载通过上覆土传递至管道上表面所影响的长度，如图 6 所示，管道的有效长度与管道的埋深有关。另外，由于在管道再埋设时可能并不是水平埋置，即管道起始点与管道的终点埋深深度不一致，本文采用管道长度中点处埋深作为上述计算公式的管道平均埋深值进行计算。

2.2 案例分析

2.2.1 确定性腐蚀模型下管道时变可靠度

由于从 BIM 模型中提取的整个管网构件的管道壁厚均为 5.6mm，且受工作环境、荷载分布等影响，管道外部腐蚀对管道构件的可靠度影响更大，与内部腐蚀相比每年腐蚀坑增长速度更快，因此本文研究中确定性腐蚀模型假设管道生命周期内只考虑外部腐蚀情况，具体公式如下

$$a(t) = 0.92t^{0.4}$$
 (15)

在进行时变可靠度计算时，将计算时间点的腐蚀深度带入 $K_{(1-h)_{ext}}(t)$ 与 $K_{(1-a)_{ext}}(t)$ 的计算公式，通过蒙特卡洛模拟，失效样本总量除以总的样本数可以得到该时间点的失效概率。整个管网中腐蚀敏感性最高与最低的管道构件（腐蚀敏感性高：随着腐蚀深度增加，管道失效概率增加更显著）的时变可靠度如图 4 所示。而所有管道构件服役 50 年时的失效概率分布直方图如图 5 所示。

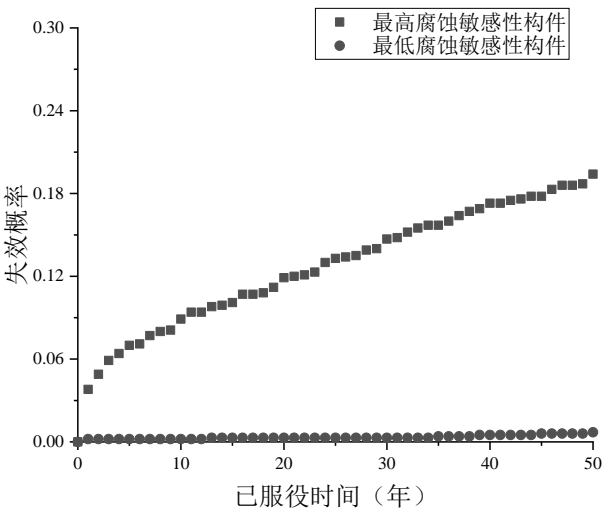


图 4 最高与最低腐蚀敏感性构件时变可靠度

从图 4 中可以看出，腐蚀敏感性最高的构件在 50 年时失效概率高达 0.194，而腐蚀敏感性最低的构件

在 50 年时的失效概率只有 0.007。且我们发现腐蚀最敏感的构件的失效概率在 0-1 年时发生突变，失效概率从 0 增加至 0.048，失效概率变化率占 50 年变化的 20.4%，这与选择的腐蚀模型有关。根据采用的腐蚀模型可以得到，最开始管道腐蚀深度为 0mm，而第一年的腐蚀深度达到 0.92mm，第 50 年的腐蚀深度则是 4.4mm，第一年的腐蚀变化量占 50 年的 21%，这与这类腐蚀模型的建立的基础，前期腐蚀速率快，后期腐蚀速率变缓基本符合。加上从 BIM 模型中提取出的全部供水管道构件的壁厚只有 5.6mm（反映到计算公式中，影响几何函数的取值，腐蚀百分比越大，应力强度因子越大），因此腐蚀深度变化大对失效概率的影响还是非常显著。这种现象也是确定性模型的不足之处，管道构件工作前期，可能存在低估管道可靠性的情况。

而图 5 中显示整个管网构件服役 50 年的失效概率主要集中在 0.02 至 0.08 区间内，失效概率较大的管道通过溯源，发现主要集中在水源处，这一部分管道具有工作压力大，埋深较浅，管径大等特点，将服役 50 年时管道失效概率超过 0.1 的管道反映到上述水力分析模型的示意图如图 6 所示。

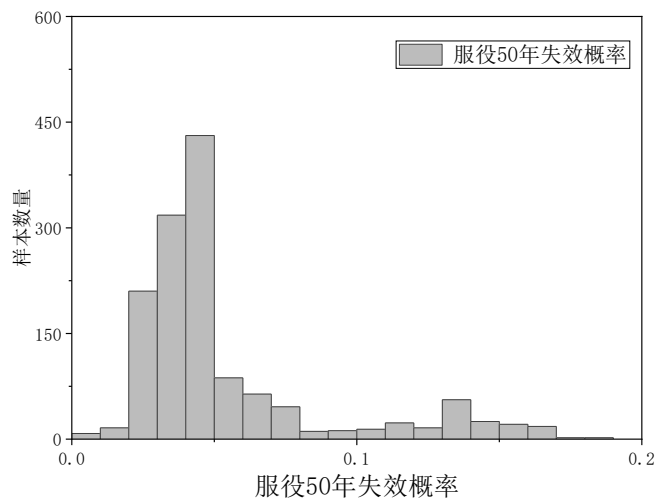


图 5 所有管件服役 50 年失效概率分布直方图

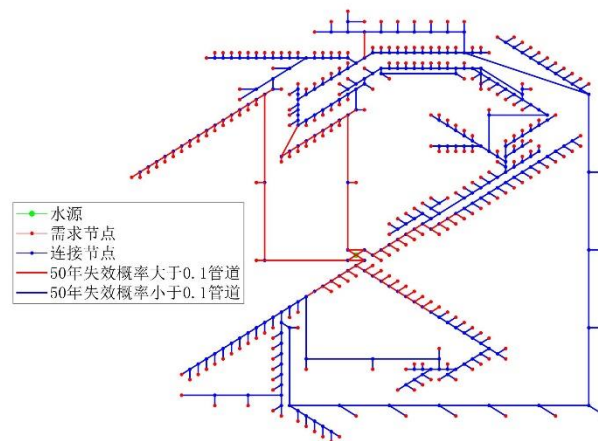


图 6 所有管件服役 50 年时失效概率地理分布图

根据计算结果，每一个管道构件中影响管道时变可靠度数值的独立变量包括管道正常工作内压力、管道内径、管道埋深。将管道不同年限下的管道可靠度数值作为依赖变量与上述三个独立变量进行斯皮尔曼系数计算可以得到图 7 所示的结果。

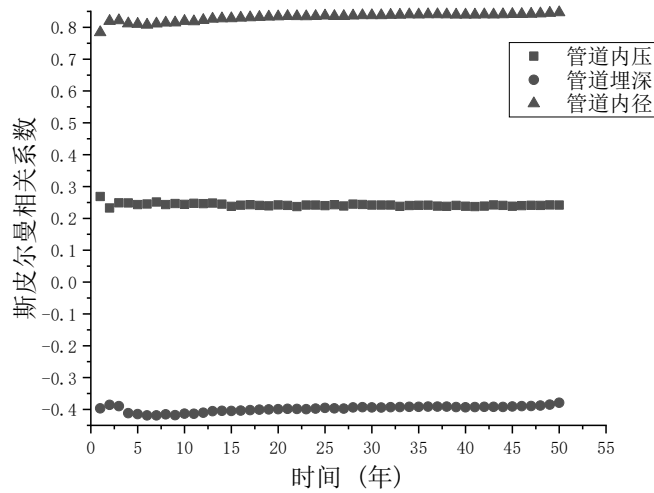


图7 最高与最低腐蚀敏感性构件时变可靠度

从图7可以看出,管道内压与管道内径与管道的时变可靠度呈现正相关性,而管道埋深与管道的时变可靠度呈现负相关性。且在三个独立变量中管道内径对管道时变可靠度的影响最大,50年平均斯皮尔曼相关系数为0.8313,而管道埋深与管道正常工作内压与管道时变可靠度的相关性相对较小,分别为-0.3980, 0.2423。

2.2.2 随机性腐蚀模型下管道时变可靠度

从前一节确定性腐蚀模型得到的构件时变可靠度可以看出,结果存在可靠度突变,且确定性模型固定,容易导致不同管道埋设环境,不同土壤结构下腐蚀变化难以模拟的情况发生,因此随机性模型的出现,可以有效解决上述情况。随机性腐蚀模型对于特定的时间,管道的腐蚀深度不是特定的值,它可以是任意的值,不一样的是每一腐蚀深度的概率是不同的,正如前文提到,随机模型公式由韦布尔分布和极值分布组合而成,带入相应的系数值^{错误!未找到引用源。}公式如下:

$$P(\max_corrosion_depth > z) = (1 - F_2(z))(1 - F_1(t)) + F_1(t) \quad (13)$$

$$F_1(t) = 1 - e^{-1.2 \times 10^{-7} t^{4.21}} \quad (16)$$

$$F_2(Z < z) = \exp \left[- \left\{ 1 - \frac{0.1515}{17.5379} (z - (0.4383 \times t + 5.1804)) \right\}^{1/0.1515} \right] \quad (17)$$

图8展示 $P(\max_corrosion_depth \leq z)$ 函数的三维分布(最大腐蚀深度此处指的是腐蚀深度所占管道壁厚的百分比,而非长度),管道腐蚀深度在第20年、第30年、第50年的分布如图2.12所示,从图9中可以发现管道在某时间点的腐蚀深度累积分布函数随腐蚀深度增加逐渐增大,且管道腐蚀深度小于等于100%的概率不为1,且随着时间的增加而减小,这与呈韦布尔分布的 $F_1(t)$ 函数有关,这部分函数存在也说明随着工作时间的增加,管道在工作期内腐蚀深度就已经达到壁厚100%概率在逐渐增加。

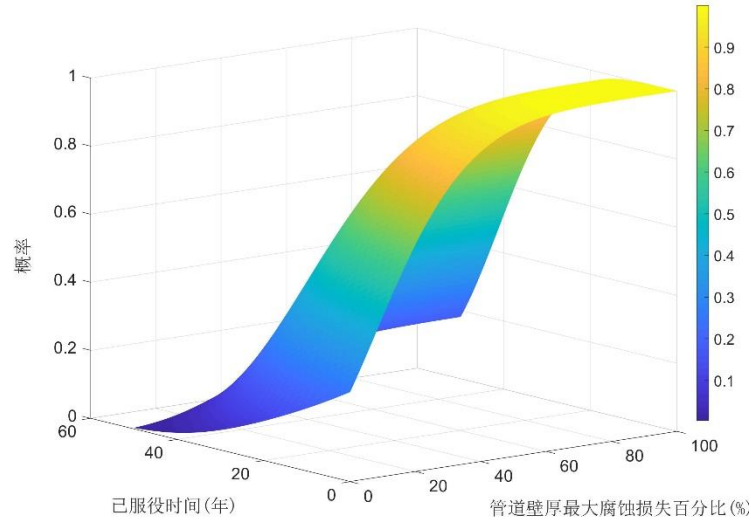
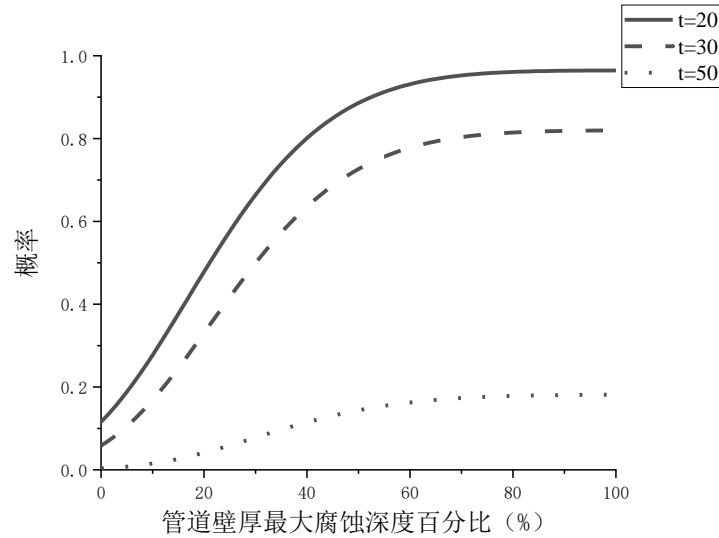
图8 $P(\max_corrosion_depth \leq z)$ 三维模型

图9 特定年限下管道最大腐蚀深度分布

从上图和公式中可以看到,得到的是管道某时刻下管道腐蚀深度的累积分布模型,通过对该函数中的腐蚀深度变量 z 进行求导,可以得到管道腐蚀深度在某时刻下的概率密度函数,计算公式如公式(18)。

$$P(Z) = \frac{\partial P(\max_corrosion_depth \leq z)}{\partial z} \quad (18)$$

结合前文的时变可靠度计算方法可以发现,在数值模拟法进行计算时,得到虽然是管道失效概率随时间变化的概率密度模型,但是在求解过程实际影响失效概率变化的变量是腐蚀深度。因此我们可以通过计算不同管道在腐蚀深度从 0%-100%变化下的可靠度,结合上述计算的腐蚀深度的概率密度函数,公式(19),可以得到管道失效概率随腐蚀深度变化的概率密度函数,计算公式如下所示。。

$$P_f(Z) = F(Z)P(Z) \quad (19)$$

其中 $P_f(Z)$ 是管道失效概率随腐蚀深度变化的概率密度函数, $F(Z)$ 表示最大腐蚀深度达到壁厚 $Z\%$ 时,管道的失效概率,通过前文的数值分析对最高腐蚀敏感性管道与最低腐蚀敏感性管道分析,可以得到如图10所示

的蒙特卡洛模拟结果。

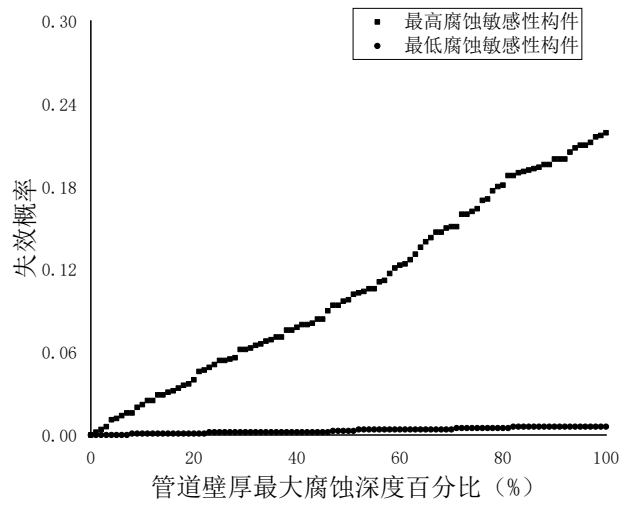


图 10 管道失效概率随管道最大腐蚀深度变化

管道的失效概率随腐蚀深度的概率密度函数 $P_f(Z)$ 对最大腐蚀深度 Z 进行积分，可以得到管道的失效概率随腐蚀深度的累计概率分布函数 $P_f(Z \leq z)$ ，然而得到的蒙特卡洛数据结果是离散的，原有的概率密度函数是连续，因此通过梯形积分的方式得到如图 11 与 12 所示，最高腐蚀敏感性与最低腐蚀敏感性的失效概率与最大腐蚀深度的累计概率分布函数，可以发现最高腐蚀敏感性构件在某一时刻腐蚀深度小于壁厚 100% 情况下，失效概率最大约为 0.06 左右，而对于腐蚀敏感性最低的构件该值约为 0.005，且对自变量管壁损失百分比，分布呈现递增的趋势，符合实际结果，但是考虑时间变化，最大值的出现并不是在 50 年，而是在 50 年内的某一时刻。

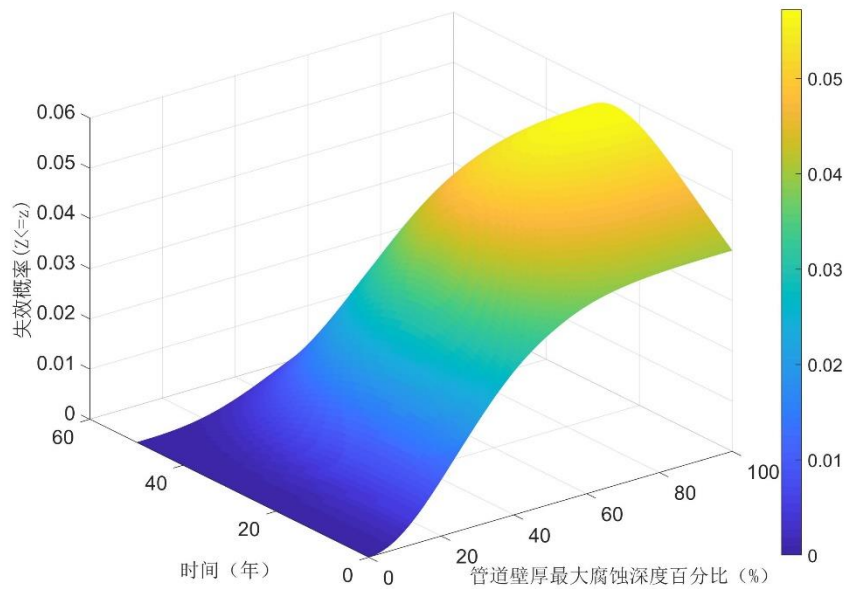


图 11 最高腐蚀敏感性构件 $P_f(Z \leq z)$ 三维模型

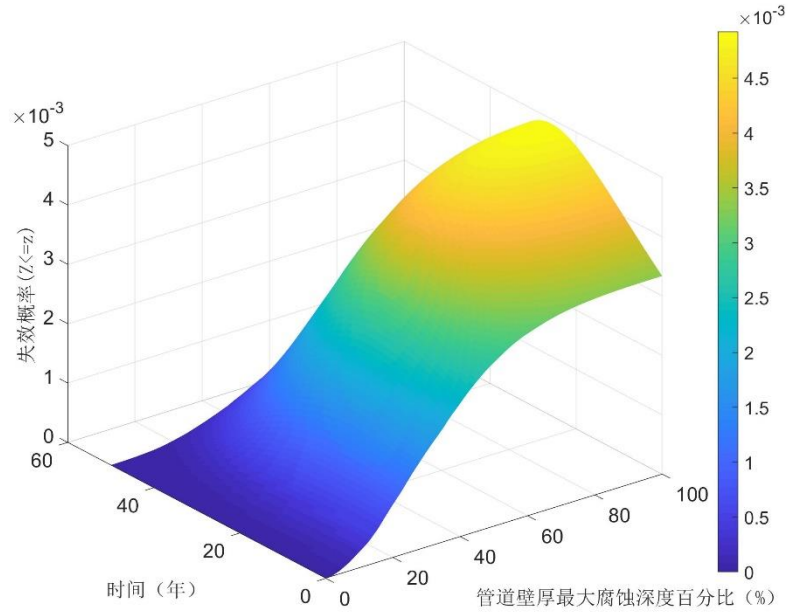


图 12 最低腐蚀敏感性构件 $P_f(Z \leq z)$ 三维模型

分别截取上述最高腐蚀敏感性与最低腐蚀敏感性管道的 $P_f(Z \leq z)$ 三维模型的 $t = 20$, $t = 30$, $t = 50$ 平面,可以得到图 13 与图 14 的结果,可以发现对于同一时间点不同腐蚀深度,失效概率呈现递增趋势,但是对于不同时间点同一最大腐蚀深度,失效概率并没有随着时间增加而增加,这是与管道最大腐蚀深度概率密度函数不一样的地方。但是随着年限的增加,管道的失效概率应该是增长趋势,所得到的图像中管道失效概率之所以没有出现该种趋势,是因为在计算该年限下失效概率没有考虑管道在该年限之前最大腐蚀深度已经达到管道壁厚的 100%,也就是随机模型中 $F_1(t)$ 部分,即管道有 $F_1(t)$ 的概率在 t 时刻前最大腐蚀深度已经达到管道壁厚 100%,所计算的失效概率 $P_f(Z \leq z)$ 也是基于管道在在 t 时刻以前最大腐蚀深度没有达到管道壁厚 100%而计算的,而 $F_1(t)$ 随着时间的增加而逐渐增加,可以计算在 50 年时, $F_1(50) = 0.81$,因此管道工作时间越长,其失效概率主要由最大腐蚀深度已达到管道壁厚 100%导致,且这种占比将随着时间增加,逐渐变大。

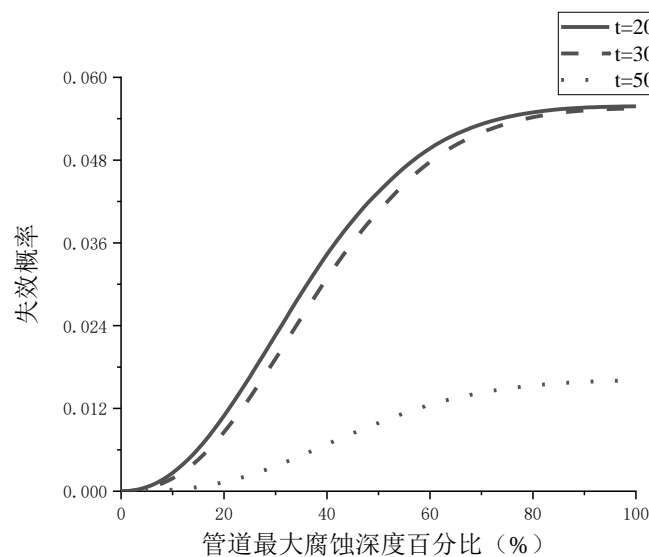


图 13 不同年限下最高腐蚀敏感性管道 $P_f(Z \leq z)$ 二维模型

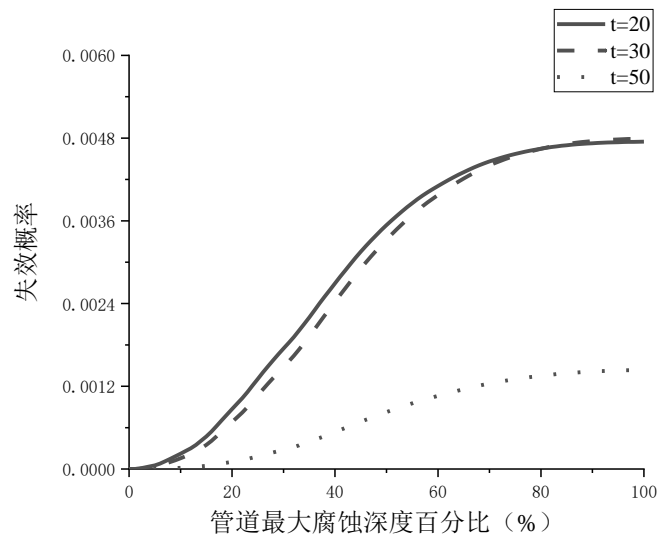


图 14 不同年限下最低腐蚀敏感性管道 $P_f(Z \leq z)$ 二维模型

本次进行随机性腐蚀模型进行可靠度计算过程中, $F_1(t)$ 与 $F_2(t)$ 函数中的系数如 k , σ , α 等均是参考文献基于其特定管道试验拟合出的结果, 其管道试验主要集中在内径 150mm 的管道, 150mm 的内径也是紫荆公寓管网系统中主要的管道直径类型。对于特定的工作环境, 不同管道属性可以跟据管道的实际数据和土壤条件, 得到不同的参数拟合值, 以使得结果更贴近实际情况。

2.2.3 管网系统可靠度

考虑到紫荆供水管网管道数有 1366 个, 在进行系统可靠度计算时对系统管网进行简化, 提出对主流管道网络进行研究分析 (如图 15 所示)。主流管道具有以下三个特点: 1、主流管道上没有需求节点, 所有的需求节点都分布在主流管道的支流线路之上; 2、主流管道是形成闭环的; 3、主流管道的断路会引发区域性断水, 区域性断水, 指的是主流管道上没有水源供应的管道部分的支流路线上所有需求点无法满足。由于紫荆供水管网是双管、闭合运输, 对图 13 中的主流管道进行简化, 简化模型如图 16 所示, 主要包含外环管道、内环管道以及连接部分。同时区域性断水的示意图如图 17 所示, 图中导致圆圈部分的支流上需求节点没有水源供应。

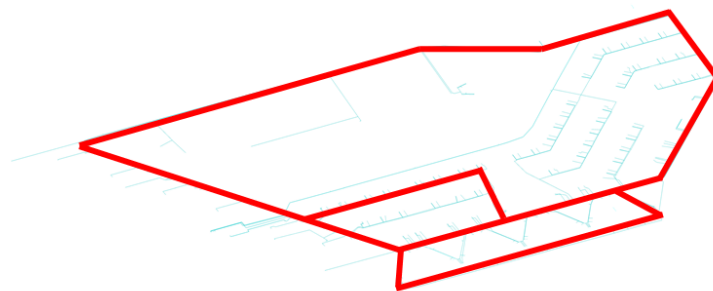


图 15 紫荆公寓主流管网示意图

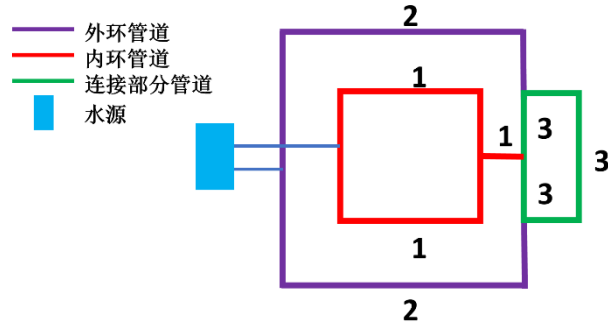


图 16 紫荆公寓主流管网简化模型

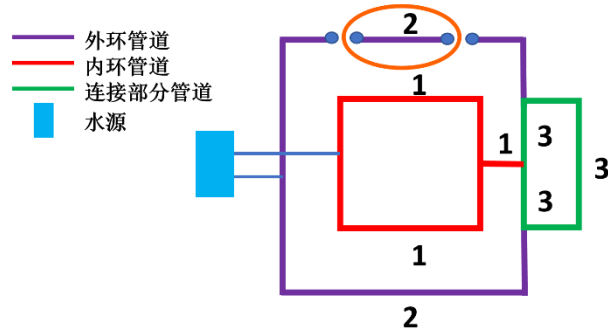


图 17 紫荆公寓管网区域性断水情况示意图

从图 17 可以发现,因为管网的闭环、双管运输的特点,单一构件的失效并不能导致管网的失效(即区域性断水)。在进行分类讨论外环管道、内环管道、连接管道三部分管道失效导致管网失效的情况时,引入前文的 Survival Signature 概念。令 $m_i (i = 1, 2, 3)$ 分别表示上述三个部分所含管道数,再继续将每个部分进行细分,内环管道分为三个部分,每个部分的管道构件数为 $x_i (i = 1, 2, 3)$; 外环管道分为两个部分,每个部分管道构件数为 $y_i (i = 1, 2)$; 连接部分分为三个部分,每个部分管道构件数为 $z_i (i = 1, 2, 3)$ 。

令 $l_i (i = 1, 2, 3)$ 表示三个子系统中正常工作的构件数,通过分析可以发现,内环子系统最多有两个构件同时失效,外环子系统最多有两个构件同时失效,连接部分最多有三个构件同时失效,所以导致系统失效最多有 $3 \times 3 \times 4 = 36$ 种情况,根据分类讨论以及公式 (7) 可以制作表 2 (表中只展示可能导致系统失效的情况)。

表 2 紫荆公寓主流管道系统 Survival Signature

l_1	l_2	l_3	$\phi(l_1, l_2, l_3)$	l_1	l_2	l_3	$\phi(l_1, l_2, l_3)$
m_1	m_2	m_3	1	m_1	m_2	m_3	$\frac{x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3}{C_{m_1}^2}$
m_1	m_2	m_3	1	-2	-1	-1	$\frac{y_1 y_2}{C_{m_2}^2}$
m_1	m_2	m_3	1	m_1	m_2	m_3	$\frac{(x_1 + x_2) y_1 y_2}{C_{m_1}^1 C_{m_2}^2}$
m_1	m_2	m_3	1	-1	-2	m_3	$\frac{(x_1 + x_2) y_1 y_2}{C_{m_1}^1 C_{m_2}^2}$
m_1	m_2	m_3	1	m_1	m_2	m_3	$\frac{y_1 y_2}{C_{m_2}^2}$
m_1	m_2	m_3	1	-1	-2	-1	$\frac{z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_2 z_3}{C_{m_3}^2}$
m_1	m_2	m_3	1	m_1	m_2	m_3	$\frac{z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_2 z_3}{C_{m_3}^2}$
m_1	m_2	m_3	1	-1	-2	-1	$\frac{z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_2 z_3}{C_{m_3}^2}$

m_1	m_2	m_3	1	m_1	m_2	m_3	$\frac{\sum_{i,j,k=1,i \neq j}^3 z_i z_j x_k - x_1 z_1 z_2}{C_{m_3}^2 C_{m_1}^1}$
-1	-1			-1			
m_1	m_2	m_3	1	m_1	m_2	m_3	$\frac{m_2 z_1 z_2 + y_2 z_1 z_3 + y_1 z_2 z_3}{C_{m_3}^2 C_{m_2}^1}$
-1	-1	-1		-1	-1		
m_1	m_2	m_3	$\frac{x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3}{C_{m_1}^2}$	m_1	m_2	m_3	$\frac{x_1 + x_2}{C_{m_1}^1} \phi(m_1, m_2 - 1, m_3 - 2)$
-2				-1	-1	-2	
m_1	m_2	m_3	$\frac{x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3}{C_{m_1}^2}$	m_1	m_2	m_3	$\frac{z_1 z_2 z_3}{C_{m_3}^3}$
-2		-1				-3	
m_1	m_2	m_3	$\frac{x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3}{C_{m_1}^2}$	m_1	m_2	m_3	$\frac{z_1 z_2 z_3}{C_{m_3}^3} \cdot \frac{x_1 + x_2}{C_{m_1}^1}$
-2	-1			-1		-3	

根据前文公式(7)与(8)以及前文计算的管道单一构件时变可靠度, 尽管构件时变可靠度的结果是离散的, 且并非失效概率的累计密度函数, 但是我们可以通过假设每个子系统内的构件都具有该系统最高腐蚀敏感性的时变可靠度 $P_{f-min}^k(t)$ 和最低腐蚀敏感性构件的时变可靠度 $P_{f-max}^k(t)$, 得到系统时变可靠度的上界与下界, 此处的上界 $\overline{P_{system-t}}$ 与下界 $\underline{P_{system-t}}$ 是离散的, 具体计算公式如公式(20)与(21)所示, 且可靠度的上界与下界计算结果如图19与图20所示。

$$\overline{P_{system-t}} = \prod_{k=1}^K \binom{m_k}{l_k} [P_{f-min}^k(t)]^{l_k} [1 - P_{f-min}^k(t)]^{m_k - l_k} \quad (20)$$

$$\underline{P_{system-t}} = \prod_{k=1}^K \binom{m_k}{l_k} [P_{f-max}^k(t)]^{l_k} [1 - P_{f-max}^k(t)]^{m_k - l_k} \quad (21)$$

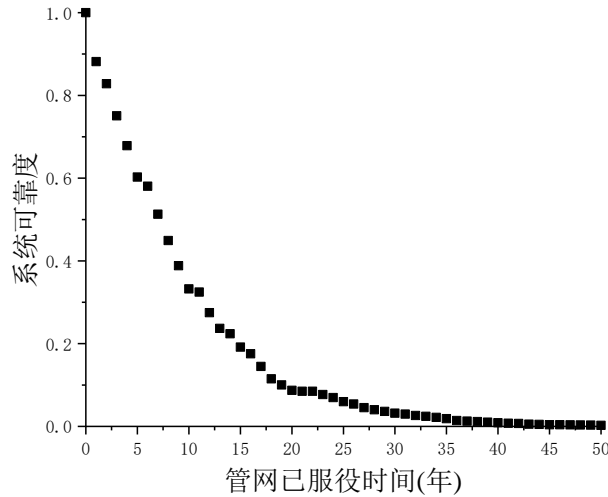


图19 主流管网系统可靠度上界

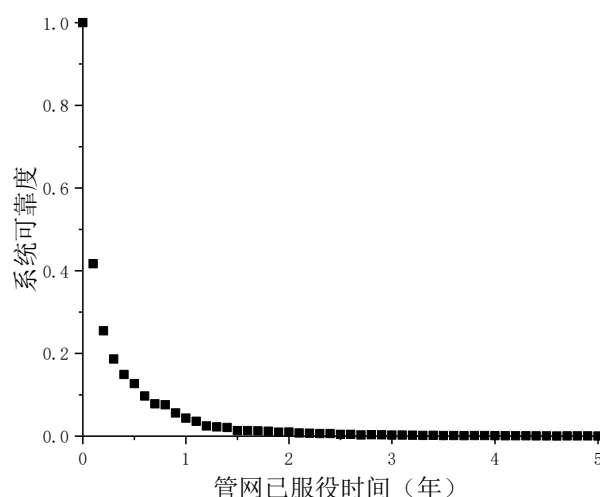


图 20 主流管网系统可靠度下界

通过图 19 与图 20 可以看出,通过假定相同子系统中构件具有相同的子系统内最高腐蚀敏感性与最低腐蚀敏感性构件的时变可靠度,系统可靠度的上下边界变化范围很大,尤其是假定具有最高腐蚀敏感性构件时变可靠度时,系统可靠度衰变非常迅速,在两年时系统可靠度已经接近 0,从计算公式也可以说明管道构件数对系统可靠度的影响是指数级的。

3 结论

本文通过从紫荆公寓管网系统的 BIM 模型中提取管网各个构件的信息,建立紫荆公寓管网水力分析模型,并对各个管道构件以及管网系统的可靠度进行计算与分析。研究发现紫荆公寓管道构件受腐蚀最严重的部分主要集中在管网水源供应处,该处的管道特点有:正常工作压力大、管道流量大、管道内径大(200mm)等,在进行运营维护时应该进行重点排查检测;同时紫荆公寓系统构件繁多,通过计算斯皮尔曼相关系数得到在管道内径、管道埋深以及管道内压三个独立变量中,管道内径对管道可靠度影响最大;而确定性腐蚀模型在进行管道可靠度计算时具有局限性,主要表现在可能存在实际腐蚀深度与假定腐蚀深度相差较大,结果相较于随机性模型更为绝对,计算结构受模型系数影响大。而随机性腐蚀模型可以有效弥补这一不足,在考虑管道埋设条件后,将某一时刻管道的最大腐蚀深度以概率的形式表示,更好地模拟了实际情况;本文尽管计算出了管道系统可靠度的上下界,但是由于构件多,构件时变可靠度差异大,导致得到的系统可靠度上下界相差幅度大,不利于对实际管网的评估和预测。

另外本文在研究上存在一定不足,在计算管道可靠度的时候,只考虑了管道的外部腐蚀并只考虑了基于刚度的失效模式,因此在计算结果上较之真实值偏小。

参考文献

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] 赵国藩等编写. 工程结构可靠度[M]. 水利电力出版社, 1984.
- [3] Semenov, V. N., & Sokolov, S. M. (2012). Prediction of reliability and service life of pipelines without lining. 100-102.
- [4] Rackwitz, R. . (2001). Structural reliability — analysis and prediction. *Structural Safety*, 23(2), 194-195.
- [5] Coolen, F. P. A. , & Coolen-Maturi, T. . (2015). Modelling Uncertain Aspects of System Dependability with Survival Signatures. *Dependability Problems of Complex Information Systems*. Springer International Publishing.
- [6] Feng, G., Patelli, E., Beer, M., & Coolen, F. P. A. (2016). Imprecise system reliability and component importance based on survival signature. *Reliability Engineering & System Safety*, 150, 116-125. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.01.019>.

- [7] Li, C. Q., and Mahmoodian, M. (2013). "Risk based service life prediction of underground cast iron pipes subjected to corrosion." *J. Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 119(Nov), 102–108.
- [8] Li, C. Q., and Mahmoodian, M. (2018). Reliability-based service life prediction of corrosion-affected cast iron pipes considering multifailure modes. *Journal of Infrastructure Systems*.
- [9] Laham, S. (1998) Stress Intensity Factor and Limit Load Handbook. British Energy Generation Ltd., 2, AI.47.
- [10] Rajani, B., & Makar, J. (2000). A methodology to estimate remaining service life of grey cast iron water mains. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(6), 1259-1272. doi:10.1139/l00-073.
- [11] Duchesne, S., Chahid, N., Bouzida, N., & Toumbou, B. (2013). Probabilistic modeling of cast iron water distribution pipe corrosion. *Aqua*, 62, 279. doi:10.2166/aqua.2013.125.
- [12] Rajani, B. and Y. Kleiner (2013). "External and Internal Corrosion of Large-Diameter Cast Iron Mains." **19**(4): 486-495.
- [13] GB50332-2002. (2002). "Structure design code for pipelines of water supply and waste water engineering." Building materials industrial standard of the People's Republic of China, Beijing.
- [14] Prevost, R. (1996). Discussion: Reliability of Underground Pipelines Subject to Corrosion. *Journal of Transportation Engineering-asce - J TRANSP ENG-ASCE*, 122. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:5(407).
- [15] Rajani, B. , Makar, J. , Mcdonald, S. , Zhan, C. , Kuraoka, S. , & Jen, C. K. , et al. (2000). Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life. *tubulações de ferro*.
- [16] Sadiq, R., Rajani, B., & Kleiner, Y. (2004). Probabilistic risk analysis of corrosion associated failures in cast iron water mains. *Reliability Engineering & System Safety*, 86, 1-10. doi:10.1016/j.ress.2003.12.00.
- [17] GB50268-2008. (2008). "Code for construction and acceptance of water supply and drainage pipeline projects." National standards of the People's Republic of China, Beijing.
- [18] JTG D60-2015. (2015). "General Specifications for design of Highway Bridges and Culverts." Industrial standard of the People's Republic of China, Beijing.
- [19] Fracture toughness test of ductile iron [J]. *International rolling stock technology*, 1977(01):29-45.
- [20] Marshall, P. (2001). The residual structural properties of cast iron pipes – Structural and design criteria for linings for water mains. London: UK Water Industry Research.