

考虑两层相关性的腐蚀油气管道失效概率计算方法

王赤宇¹, 虞维超^{2*}, 陈磊¹, 张华斌³, 张杰⁴, 王超¹, 王子宇¹, 廉凌峰¹, 黄辉荣⁵

1 中国石油塔里木油田公司, 库尔勒 841000

2 国家石油天然气管网集团有限公司油气调控中心, 北京 100013

3 国家石油天然气管网集团有限公司甘肃分公司, 兰州 730060

4 深圳泊松软件技术有限公司, 深圳 518129

5 重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆 401331

* 通信作者, cupwhut@163.com

收稿日期: 2023-02-26; 修回日期: 2023-06-21

重庆市自然科学基金“纳米杂化降凝剂NPPD对含蜡油体系表观流变特性的改善机理研究”(No.cstc2021jcyj-msxmX0918)、重庆市教委科技研究计划“纳米降凝剂NPPD对含蜡油蜡沉积特性的影响机理研究”(No.KJQN202101545)和重庆科技学院科研启动项目“新型纳米流动改性剂NFM对含蜡油微观结晶过程的调控机理研究”(ckrc2021003)联合资助

摘要 在腐蚀油气管道失效概率计算中, 存在随机变量相关和腐蚀缺陷相关的两层相关性。针对当前腐蚀管道可靠性评价中对相关性影响的研究不足, 本文提出了考虑两层相关性影响的腐蚀油气管道失效概率计算方法。该方法首先基于Copula函数对具有相关性的随机变量进行抽样, 结合管道失效极限状态方程, 计算单个腐蚀缺陷的失效概率。进一步采用系统可靠性理论, 考虑缺陷间相关性, 对含多个腐蚀缺陷的腐蚀油气管道失效概率进行计算。并以我国某条天然气管道的实际数据为例, 采用拉丁超立方抽样方法研究了两层相关性以及缺陷数量对管道失效概率的影响, 并基于敏感性分析, 量化了随机变量相关系数和腐蚀缺陷相关系数对腐蚀油气管道失效概率的影响。结果表明, 缺陷相关性对管道失效概率计算影响明显高于随机变量相关性。小孔泄漏和爆裂失效概率随着缺陷之间相关系数的增大而减小, 随着缺陷数量的增加而增大。随机变量相关性对管道小孔泄漏失效概率没有影响, 管道爆裂失效概率随着壁厚与管径相关系数的增大而减小, 随着初始缺陷长度与深度的相关系数增大而增大。缺陷轴向与径向增长速率相关系数的增大对管道爆裂失效概率的影响具有双向性, 预测周期内大约前16年随着相关系数的增大, 管道爆裂失效概率增加, 大约25年后随着相关系数的增大, 随相关系数增大而降低。研究成果适用于分析含多个腐蚀缺陷的油气管道可靠性评价, 对管道安全运行、油气资源平稳供应具有参考意义。

关键词 腐蚀油气管道; 双层相关性; 拉丁超立方抽样; 可靠性; 失效概率

中图分类号: TE83; U178

A method for calculating the failure probability of corroded oil and gas pipelines considering the two layers of correlation

WANG Chiyu¹, YU Weichao², CHEN Lei¹, ZHANG Huabin³, ZHANG Jie⁴, WANG Chao¹, WANG

引用格式: 王赤宇, 虞维超, 陈磊, 张华斌, 张杰, 王超, 王子宇, 廉凌峰, 黄辉荣. 考虑两层相关性的腐蚀油气管道失效概率计算方法. 石油科学通报, 2024, 09(05): 819-830

WANG Chiyu, YU Weichao, CHEN Lei, ZHANG Huabin, ZHANG Jie, WANG Chao, WANG Ziyu, LIAN Lingfeng, HUANG Huirong.

A method for calculating the failure probability of corroded oil and gas pipelines considering the two layers of correlation. Petroleum Science Bulletin, 2024, 09(05): 819-830. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.063

Ziyu¹, LIAN Lingfeng¹, HUANG Huirong⁵

1 PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

2 PipeChina Oil & Gas Control Center, Beijing 100013, China

3 PipeChina Gansu Company, Lanzhou 730060, China

4 Shenzhen Poisson Software Technology Co., Ltd., Shenzhen 518129, China

5 School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China

Received: 2023-02-26; Revised: 2023-06-21

Abstract In the calculation of the failure probability of corroded oil and gas pipelines, there are two layers of correlation between random variables and corrosion defects. In view of the insufficient research on the influence of correlation in the reliability evaluation of corroded oil and gas pipelines, this study proposes a method for calculating the failure probability of corroded oil and gas pipelines considering the influence of the two layers of correlation. In the method, the Copula function is employed to sample the random variables with correlation, and the failure probability of a single corrosion defect is calculated by using the failure limit state equation. Then, the system reliability theory is used to calculate the failure probability of corroded oil and gas pipelines with multiple corrosion defects considering the correlation between defects. Moreover, taking the actual data of a natural gas pipeline in China as an example, the Latin hypercube sampling method was used to study the influence of the two layers of correlation and the number of defects on the failure probability of the pipeline. Moreover, the effects of random variable correlation coefficient and corrosion defect correlation coefficient on the failure probability of corroded oil and gas pipelines were quantified based on sensitivity analysis. The results show that the influence of defect correlation on pipeline failure probability calculation is significantly higher than that of random variables. The probability of leakage and burst failure of small holes in corroded pipelines decreases with the increase of the correlation coefficient between defects, and increases with the increase of the number of defects. The correlation of random variables has no effect on the probability of leakage of small holes in the pipeline, and the probability of pipeline burst failure decreases with the increase of the correlation coefficient between wall thickness and pipeline diameter, and increases with the increase of the correlation coefficient of initial defect length and depth. The increase of the correlation coefficient of the axial and radial growth rate of defects has a bidirectional effect on the probability of pipeline burst failure, and the probability of pipeline burst failure increases with the increase of the correlation coefficient in the first 16 years of the prediction cycle, and decreases after about 25 years with the increase of the correlation coefficient. The research results are suitable for the analysis of the reliability evaluation of oil and gas pipelines with multiple corrosion defects which have reference significance for the safe operation of pipelines and the stable supply of oil and gas resources.

Keywords corroded oil and gas pipeline; two layers of correlation; Latin hypercube sampling method; reliability; failure probability

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.063

管道输送是油气资源输送最有效的方式之一,其安全性已引起专家学者的广泛关注^[1-2]。通过对管道失效数据的分析^[3-6],发现金属损失腐蚀是管道失效的主要原因之一,它可能导致两种不同的失效模式,即小孔泄漏和破裂^[7]。其中小孔泄漏的定义为当腐蚀缺陷最大深度大于0.8倍的壁厚时,即可认定管道处于小孔泄漏状态。爆裂定义为管壁发生不可控制撕裂的那一刻,其导致最终管子破裂。为了确保天然气管道的完整性和制定腐蚀管理方案,大量的研究工作集中在评估含有多个活性腐蚀缺陷的腐蚀管道的剩余强度和失效概率或可靠性^[8-10]。然而,目前腐蚀管道失效概率计算方法对相关性的考虑不足:一方面,结构可靠性理论的一种经典方法是以串联单元形式表示系统。当使用这种方法计算腐蚀管道可靠度时,整个系统的可靠度等于其所有单元的无故障概率的乘积。系统的可

靠度低于其单元的可靠度,且随着单元数量(缺陷)的增加,系统可靠性急剧下降。如果系统的单元众多,则几乎不可能建立一个具有所需(高)可靠度的系统。造成这种问题的原因之一是,在腐蚀管道串联模型中,不同缺陷的失效事件是相互独立的。实际上由于输气管道在一定距离内不同缺陷处的内部压力是近似相等的,且在一定距离内,缺陷所处外部环境是相似的,这一事实导致不同缺陷的失效事件是具有相关性。另一方面,国内外大量关于腐蚀管道可靠性的研究为简化计算,往往假设基本参数的随机变量之间是相互独立的,但是工程实际中,随机变量之间通常是相关的。基于^[11]文献提出的计算结构体系失效概率的方法,文献^[12-13]对考虑腐蚀缺陷之间相关性的腐蚀管道失效概率进行计算。文献^[14]基于多维联合正态分布方法,对含多个腐蚀缺陷的天然气管道失效概率进行计算,与

此类似的还有文献^[15]。在随机变量相关性方面,文献^[16-18]研究了缺陷初始长度与深度、管径与壁厚、缺陷长度与深度生长速率、屈服强度和拉伸强度之间的相关性对腐蚀管道可靠性的影响。然而,尚未有文献综合考虑随机变量和缺陷双层相关性对腐蚀管道可靠性的影响。

针对上述问题,笔者建立了综合考虑两层相关性作用下的腐蚀管道小泄漏、爆裂和总失效概率计算模型,并采用拉丁超立方抽样方法提高模拟计算效率,分析了缺陷数量对管道可靠性的影响。由于在爆裂失效模式中不涉及大泄漏失效和爆破失效的区分,故不涉及屈服强度的使用,因此就随机变量相关而言仅考虑缺陷初始长度与深度、管径与壁厚、缺陷长度与深度生长速率之间相关性对腐蚀管道失效概率的影响。

1 腐蚀管道失效概率模型

管道系统失效概率的评估对于优化管道系统的运行起着至关重要的作用。为了防止因缺陷不断生长而导致的管道失效,必须考虑到管道系统的实际缺陷情况,在一定时期内对管道系统可靠性进行评估。这一问题可以归结为一个典型的预测问题,利用在特定的管道运行期间收集到的有限数据,预测管道系统达到极限状态的时间,并在此基础上评估管道或管道单元的可靠性。

1.1 极限状态方程和爆裂压力模型

对应于小泄漏和爆裂两种失效模式,腐蚀缺陷存在两种极限状态。当被视为随机变量的缺陷深度超过预定的限值,或者当爆裂压力(也是随机变量)达到不可接受的水平时,管道极限状态就会出现。金属损失腐蚀缺陷的两种极限状态如式(1)所示:

$$Y(t) = \begin{cases} k \cdot w_t - d(t) \\ P_b(t) - P_{op} \end{cases} \quad (1)$$

其中, k 是安全系数,根据文献^[13-14]取为0.8; w_t 是管道壁厚; t 是最近一次在线检测以来经过的时间; $d(t)$ 是时间 t 时腐蚀缺陷的最大深度; $P_b(t)$ 是管道在腐蚀缺陷影响下时间 t 时刻不发生爆裂的最大压力; P_{op} 是管道运行压力。

在已有的腐蚀管道爆裂压力计算准则中,采用Leis和Stephens提出的PRORRC模型^[19-20]。PRORRC中定义的在给定时间的爆裂压力计算如下:

$$p_b(t) = \chi \frac{2w_t\sigma_u}{D} \times \left[1 - \frac{d(t)}{w_t} \left(1 - \exp \left(\frac{-0.157 \cdot l(t)}{\sqrt{\frac{D(w_t - d(t))}{2}}} \right) \right) \right] \quad (2)$$

其中, χ 是模型误差; σ_u 是抗拉强度; D 是管道直径; $l(t)$ 是时间 t 时腐蚀缺陷的长度。因此,对于一个给定的腐蚀缺陷,小孔泄漏及其极限状态函数为:

$$g_1(t) = 0.8w_t - d(t) \quad (3)$$

爆裂及其极限状态函数:

$$g_2(t) = \chi \frac{2w_t\sigma_u}{D} \times \left[1 - \frac{d(t)}{w_t} \left(1 - \exp \left(\frac{-0.157 \cdot l(t)}{\sqrt{\frac{D(w_t - d(t))}{2}}} \right) \right) \right] - P_{op} \quad (4)$$

1.2 腐蚀缺陷生长模型

腐蚀缺陷的长度和深度是随时间生长的,其长度、深度取决于腐蚀速率,因此,腐蚀管道的失效概率与时间有关。文献中报道的腐蚀增长模型可分为确定性模型和概率模型,其中概率模型包括随机变量模型和随机过程模型。比较常见的确定性模型包括定值腐蚀增长模型、线性腐蚀增长模型和非线性腐蚀增长模型。常见描述腐蚀增长的常见概率模型有马尔可夫模型、伽马过程模型和漂移布朗运动模型^[21]。本文采用线性模型描述腐蚀缺陷的生长^[22-23]。故给定时间 t 的缺陷深度和长度分别为:

$$d(t) = d_0 + t \cdot v_d \quad (5)$$

$$l(t) = l_0 + t \cdot v_l \quad (6)$$

其中, d_0 是初始缺陷最大深度; l_0 是初始缺陷长度, v_d 和 v_l 分别表示缺陷径向和轴向的生长速率。

1.3 拉丁超立方抽样与腐蚀缺陷失效概率

拉丁超立方抽样技术,也称为“分层抽样技术”,代表一种能够确保没有重叠设计的多变量采样方法。考虑 n 个随机变量,该技术将每个随机变量 $X_i(i=1,2,\dots,n)$ 的分布函数分割成等概率的 N 个区间,每个区间具有 $1/N$ 的分布概率且只有一个采样点。每个随机变量有 N 个采样点,它们随机组合可形成 N 组采样集合:

$$\mathbf{x}^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_j^k, \dots, x_n^k\}, \quad k=1,2,\dots,N \quad (7)$$

拉丁超立方抽样的有效性及其受欢迎的原因在于,它在每个随机变量的分布范围内提供了密集分层,样本数量相对较小就可得到大数定律下的稳定收敛结果,同时保持了蒙特卡洛抽样的理想概率特征^[24]。在一般情况下,拉丁超立方抽样的抽样次数通常是变量维数的倍数,即 $N_LHS = k \cdot d$,其中, N_LHS 是拉丁超立方抽样所需的总抽样次数, k 是抽样的单元格数, d 是变量的维数(或者说是抽样的变量个数)。而给定置信水平和精度要求下的蒙特卡洛抽样,其抽样次数为 $N_MC = \left(\frac{z \cdot \sigma}{\varepsilon}\right)^2$,其中, N_MC 是蒙特卡洛抽样所需的总抽样次数, z 是置信水平对应的 Z 值, σ 是样本标准差, ε 是预期误差。

基于极限状态方程 $g_1(t)$ 和 $g_2(t)$ 的互斥性^[17],对于单个腐蚀缺陷,在给定的时间 t ,小泄漏和爆裂失效概率分别表示为 $P'_{sl}(t)$, $P'_{bu}(t)$ 计算公式如下:

$$P'_{sl}(t) = \text{Prob}[(g_1(t) \leq 0) \cap (g_2(t) > 0)] \quad (8)$$

$$P'_{bu}(t) = \text{Prob}[(g_1(t) > 0) \cap (g_2(t) \leq 0)] \quad (9)$$

其中, \cap 表示联合事件; $\text{Prob}[E]$ 表示事件 E 发生的概率。极限状态方程所涉及的参数都是不确定的,必须用随机变量或随机过程来建模。由于缺陷生长和工作压力的时间依赖性,两个极限状态方程都是时间依赖的。为了简化,忽略了管道运行压力的时间依赖性。本文将两个极限状态函数中的参数均视为随机变量,并根据在线检测数据得到了它们的概率特征。

2 腐蚀管道两层相关性模型

腐蚀管道的两层相关性分两个层次综合考虑随机变量相关性和腐蚀缺陷相关性。第一层进行具有相关性的随机变量抽样,利用Copula函数产生具有一定数量指定相关系数的随机数,进行逆运算得到具有相关性的随机变量样本,带入到极限状态方程中,获得单个腐蚀缺陷的失效概率。第二层进行具有缺陷相关性的腐蚀管道串联系统失效概率计算。提出的方法可以对包含多个腐蚀缺陷的管道做失效概率计算。

2.1 随机变量相关性

单个腐蚀缺陷基本参数的随机变量可能是部分相关或独立的,通过在随机抽样中引入Copula函数可生成具有相关性的随机变量样本。Copula函数是一个包含 $n(n \geq 2)$ 个标准均匀分布变量 $U_i(i=1, \dots, n)$ 的联合分布函数^[12-13,16]:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = P(U_1 \leq u_1, U_2 \leq u_2, \dots, U_n \leq u_n) \quad (10)$$

其中, $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 是Copula函数, u_i 是 U_i 的值($i=1, \dots, n$)。 n 维的概率分布函数 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 可用Copula函数表示如下:

$$C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (11)$$

其中, $F_i(x_i)$ ($i=1, \dots, n$)是 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的边缘概率分布函数, $C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n))$ 是具有边缘密度函数 $F_i(x_i)$ 的 n 元分布函数。Copula函数包含多种具有不同依赖性特征的类别。本文选取式(12)定义的高斯Copula函数来描述腐蚀缺陷基本参数随机变量的相关性。

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = \Phi_n(\Phi^{-1}(u_1), \Phi^{-1}(u_2), \dots, \Phi^{-1}(u_n); \mathbf{R}) \quad (12)$$

$\Phi_n(\bullet; \mathbf{R})$ 表示具有相关系数矩阵 $\mathbf{R}(n \times n)$ 的 n 维标准正态分布函数, $\Phi^{-1}(\bullet)$ 是标准正态分布函数的逆函数。矩阵 \mathbf{R} 的非对角元素 $r_{ij}(i, j=1, 2, \dots, n, i \neq j)$ 是 $\Phi^{-1}(u_i)$ 和 $\Phi^{-1}(u_j)$ 之间的Pearson线性相关系数。因此,当相关系数矩阵 \mathbf{R} 已知时,高斯Copula函数是完全定义的。由高斯Copula函数模拟多变量随机变量的相关性结构是非常简便的,对本文算例而言,其具体应用方法如下:(1)通过在线检测数据,获得缺陷基本参数的概率统计特征,确定基本参数的随机变量概率分布和相关系数。本文采用spearman相关系数计算随机变量间的相关系数,其计算公式为

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad \text{式中 } x_i \text{ 和 } y_i \text{ 分别为两}$$

组随机变量的第 i 个样本值, n 为样本数量, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为两组随机变量的均值;(2)从高斯Copula函数 $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 中获得样本 u_1, u_2, \dots, u_n ;(3)计算腐蚀缺陷基本参数 X_i 的样本 $x_i = F_i^{-1}(u_i)$ $i=1, 2, \dots, n$ 。

2.2 缺陷相关性

工程实际中,一条管道或某个管段包含多个腐蚀缺陷。按照结构可靠性理论的经典方法,简单以串联单元表示系统,以所有单元的无故障概率的乘积表示整个系统的可靠度,会导致无法建立高可靠度的腐蚀管道系统。为解决上述问题,本节考虑缺陷之间的相关性对系统失效概率的影响。结合关于小泄漏和爆裂极限状态的定义,具有 n 个相关腐蚀缺陷的管道段,其失效概率可表示为:

$$p_{sl}(t) = \text{Prob}\left(\bigcup_{j=1}^n E_{sl,j}\right) \quad (13)$$

$$= \text{Prob}\left(\bigcup_{j=1}^n [(g_{1,j}(t) \leq 0) \cap (g_{2,j}(t) > 0)]\right)$$

$$p_{bu}(t) = \text{Prob}\left(\bigcup_{j=1}^n E_{bu,j}\right) \quad (14)$$

$$= \text{Prob}\left(\bigcup_{j=1}^n [(g_{1,j}(t) > 0) \cap (g_{2,j}(t) \leq 0)]\right)$$

其中 $E_{sl,j} = (g_{1,j}(t) \leq 0) \cap (g_{2,j}(t) > 0)$, $E_{bu,j} = (g_{1,j}(t) > 0) \cap (g_{2,j}(t) \leq 0)$ 分别代表第 j 个腐蚀缺陷反生小泄漏和爆裂; $g_{1,j}(t)$ 和 $g_{2,j}(t)$ 分别为第 j 个腐蚀缺陷的小泄漏和爆裂极限状态函数。

对于由两个腐蚀缺陷 i, j 组成的串联系统, 其失效概率为:

$$P_f = \text{Prob}(E_i \cup E_j) = \text{Prob}(E_i) + \text{Prob}(E_j) - \text{Prob}(E_i \cap E_j) \quad (15)$$

$$= P_{fi} + P_{fj} - \text{Prob}(E_i | E_j) \text{Prob}(E_j)$$

$$= P_{fi} + P_{fj} - r_{ij} P_{fj}$$

$P_{fi} = \text{Prob}(E_i)$, $P_{fj} = \text{Prob}(E_j)$ 分别是缺陷 i, j 的失效概率; $r_{ij} = \text{Prob}(E_i | E_j)$ 是相关度, 指与系统失效有关的事件交集的加权交叠程度。

计算管道系统失效概率的难点主要在于相关度的确定, Guo 提出了相关度 r_{ij} 的一种高精度的近似计算方法^[11], 对于正态分布随机变量, 可以通过以下公式估计 r_{ij} :

$$r_{ij} = \Phi(-\beta_{ij}) + \frac{P_{fi}}{P_{fj}} C_{ij} \Phi(-\beta_{ji}) \quad (16)$$

$$\beta_{ij} = \frac{\beta_i - \rho_{ij} \beta_j}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}},$$

$$\beta_{ji} = \frac{\beta_j - \rho_{ij} \beta_i}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}}, \quad (17)$$

$$C_{ij} = 0.5(\rho_{ij}^2 + \rho_{ij} \sqrt{1 - \rho_{ij}^2})$$

Φ 为标准正态分布函数; β_i 和 β_j 分别是缺陷 i, j 的可靠度指标; $\rho_{i,j}$ 是两事件间的相关系数。

对于任意随机变量, 只要给定随机变量的边缘分布函数和它们的相关系数, 就可利用 Nataf 变换将这些随机变量转化为正态分布随机变量。这奠定了本方法的应用基础, 使包含多个任意分布的随机变量的串联系统可通过此计算方法考虑相关性的影响。

同理, 对于包含 3 个腐蚀缺陷的管道子系统的失效概率表示为:

$$P_f = \text{Prob}(E_1 \cup E_2 \cup E_3) = \text{Prob}(E_{1,2} \cup E_3) \quad (18)$$

$$= \text{Prob}(E_{1,2}) + \text{Prob}(E_3) - r_{123} \text{Prob}(E_3)$$

$$= P_{f1}(t) + (1 - r_{12})P_{f2}(t) + (1 - r_{123})P_{f3}(t)$$

$$E_{1,2} = E_1 \cup E_2, \text{Prob}(E_{1,2})$$

$$= P_{f1}(t) + (1 - r_{12})P_{f2}(t) \quad (19)$$

r_{123} 是事件 $E_{1,2}$ 和事件 E_3 之间的相关度, 计算方法见式 (17)、(18), 其中相关系数为:

$$\rho_{123} = \max\{\rho_{1,2}, \rho_{1,3}\} \quad (20)$$

进一步推广, 对于包含 n 个腐蚀缺陷的管道段, 其失效概率为:

$$P_f(t) = \text{Prob}(E_{1,2,\dots,n}) = \text{Prob}(E_{1,2,\dots,n-1}, E_n)$$

$$= \text{Prob}(E_1) + (1 - r_{12})\text{Prob}(E_2) +$$

$$(1 - r_{123})\text{Prob}(E_3) + \dots +$$

$$(1 - r_{12\dots n})\text{Prob}(E_n) \quad (21)$$

$$= P_{f1}(t) + (1 - r_{12})P_{f2}(t) +$$

$$(1 - r_{123})P_{f3}(t) + \dots + (1 - r_{12\dots n})P_{fn}(t)$$

$$E_{1,2,\dots,n-1} = E_{1,2,\dots,n-2} \cup E_{n-1} = E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_{n-1},$$

$$\text{Prob}(E_{1,2,\dots,n}) = P_{f1}(t) + (1 - r_{12})P_{f2}(t) +$$

$$(1 - r_{123})P_{f3}(t) + \dots + (1 - r_{12\dots n-1})P_{fn-1}$$

$$(22)$$

其中, $r_{12\dots n}$ 是事件 $E_{1,2,\dots,n-1}$ 和事件 E_n 的相关度, 计算方法同样使用式 (16)、(17), 相关系数为:

$$\rho_{12\dots n} = \max\{\rho_{1n}, \rho_{2n}, \dots, \rho_{n-1,n}\} \quad (23)$$

由于上述方法的计算不涉及二阶以上的高阶联合概率, 采用逐次渐进求解, 计算量小, 在保证精度分基础上提高了计算效率。

3 算例分析

3.1 实例描述

以我国某天然气腐蚀管道为例, 应用所述方法进行了考虑两层相关性的时变管道系统可靠性评估。该管道直径 1016 mm, 设计压力 10 MPa, 采用 API 5L 标准 X70 钢制成。规定最小屈服强度为 485 MPa, 最小抗拉强度 570 MPa。该管道于 2013 年进行了最后一次在线检测, 根据检测报告结果结合 CSA 规范及历史文献, 在表 1 中列出了所涉及管道基本参数的概率特征, 在表 2 中列出了腐蚀缺陷参数的概率特征。初始缺陷深度和长度的不确定性是为了反映在线检测工具的测量误差。本研究所选取的管段长为 4099.542 m, 壁厚为 14.6 mm, 包含 12 个腐蚀缺陷。

3.2 拉丁超立方抽样的高效性

为验证拉丁超立方抽样技术在本研究中的高效性，以两层相关性作用下腐蚀管道小泄漏失效概率的计算为例，分别采用蒙特卡洛抽样(MC)和拉丁超立方抽样(LHS)计算腐蚀管道在最近一次检测后第 30 年的小泄漏失效概率。其中相关系数见后文表 3。当逐渐增大抽样次数时，基于大数定律，失效概率会由波动趋于稳定。通过判断得到稳定失效概率的最小抽样次数，可获得本算例中 2 种抽样方法的抽样效率。

图 1 分别展示了采用 MC 抽样和 LHS 抽样的不同抽样次数下管道小泄漏失效概率。可见使用拉丁超立方抽样仅需 15 万次即可获得稳定收敛的失效概率，而相同条件下的蒙特卡洛抽样至少需要 700 万次才能获得相同结果，由此可见 LHS 抽样方法的高效性。

3.3 相关性对腐蚀管道失效概率的影响

为研究相关性对腐蚀管道失效概率的影响，根据考虑相关性的层数，分 4 种情况进行失效概率的模拟

计算，模拟的时间步长取为 1 年。4 种情况分别为：(1)考虑系统的两层相关，即随机变量相关和缺陷相关；(2)仅考虑缺陷相关，认为随机变量相互独立；(3)考虑随机变量相关，认为缺陷相互独立；(4)随机变量

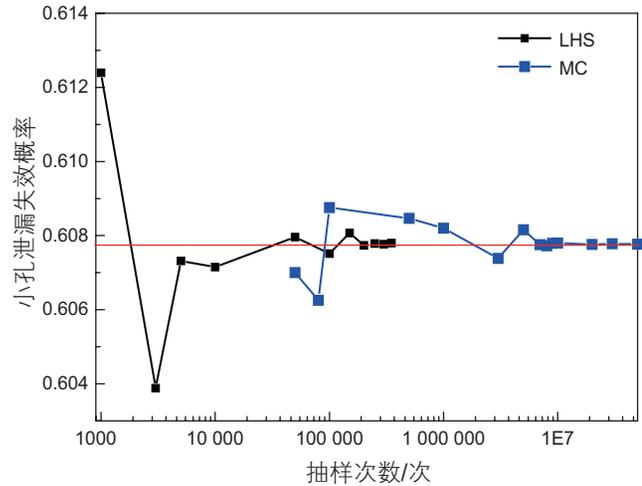


图 1 MC 抽样与 LHS 抽样方法效率比较

Fig.1 Comparison of efficiency of MC sampling and LHS sampling methods.

表 1 管道基本参数的概率表征

Table 1 Probabilistic characterizations of the basic parameters for the pipeline.

参数	单位	均值/标称值	COV/%	分布类型
p_{op} (管道内压)	MPa	1.05	2.0	耿贝尔分布
D (管道直径)	mm	1	—	确定性变量
w_t (管道壁厚)	mm	1.1	3.3	正态分布
σ_y (屈服强度)	MPa	1.12	3.5	正态分布
σ_u (抗拉强度)	MPa	1.08	3.3	正态分布
χ (模型误差)	---	0.97	10.82	对数正态分布

注： χ 为模型误差项的概率特征^[19]。

表 2 腐蚀缺陷参数概率特征

Table 2 Probabilistic characterizations of the corrosion defect.

参数	单位	均值	COV/%	分布类型
d_0 (缺陷初始深度)	mm	0.582	72	威布尔分布
l_0 (缺陷初始长度)	mm	35.68	82.1	对数正态分布
v_d (深度增长速度)	mm/year	0.576	70.3	威布尔分布
v_l (长度增长速度)	mm/year	3.0	50	对数正态分布

注： v_l 为腐蚀缺陷长度生长速率，基于文献^[16]。

表 3 基本案例的缺陷和随机变量相关系数

Table 3 Correlation coefficients of defects and random variable for basic scenario.

类别	缺陷关系			管径壁厚	缺陷初始长度与深度	缺陷轴向与径向腐蚀速率
	相邻	间隔 1 个	间隔两个			
相关系数	0.9	0.6	0.3	0.8	0.5	0.5

与缺陷均相互独立。

考虑两层相关性为本研究的基础案例，其相关系数如表 3 所示。假设缺陷等距分布，且当缺陷之间间隔 3 个及以上缺陷时相互独立。当随机变量或缺陷相互独立时，相关系数为 0；完全相关时，相关系数为 1。

图 2(a)、(b) 分别描绘了 30 年预测周期内，缺陷线性增长假设下，管道小泄漏和爆裂的失效概率。同时图 1 对 4 种情景假设下的管道失效概率进行了比较，结果显示：缺陷之间的相关性对管道系统的失效概率影响明显大于随机变量之间相关性的影响。缺陷之间的相关性导致系统失效概率的显著降低，随机变量相关性对小泄漏失效没有影响，对爆裂失效的影响具有双向性。大约在第 25 年前，随机变量的相关性引起爆裂失效概率的增大，此后导致失效概率的减小。

出现这种现象是因为在单元独立的串联系统中，单元失效概率对系统失效概率以幂函数的形式产生影响，这将产生最为保守的管道可靠性结果，即最大的失效概率；当考虑缺陷之间的相关性时，与管道系统失效有关的各缺陷失效事件存在交集，显然导致系统失效概率的降低。进一步分析，由于缺陷相关性决定

了各缺陷失效事件的交集大小，直接决定了系统失效概率，而随机变量相关性仅存在于缺陷的部分基本参数随机变量之间，故缺陷相关性对系统失效概率的影响远大于随机变相关性的影响。由于小泄漏失效的极限状态仅与缺陷深度和壁厚有关，它们之间不存在相关性，故随机变量相关性对小泄漏失效概率没有影响。关于两层相关性对爆裂失效的影响具有双向性，由于涉及三组相关随机变量，将结合敏感性分析在后文中具体研究。

3.4 敏感性分析

3.4.1 缺陷相关性及缺陷数量的影响

为了研究缺陷相关性对管道失效概率的影响，给出了缺陷之间相关系数取值的 3 种情景。取本研究的基础案例为情景 1，另外假设两组不同的相关系数，指定为情景 2 和情景 3。3 种情景的缺陷相关系数见表 4。控制随机变量相关系数为表 3 所示基础案例的相关系数不变，分别模拟计算不同情景下，30 年预测周期内的管道小泄漏和爆裂失效概率。

图 3 和图 4 分别显示了 30 年预测周期内，缺陷相

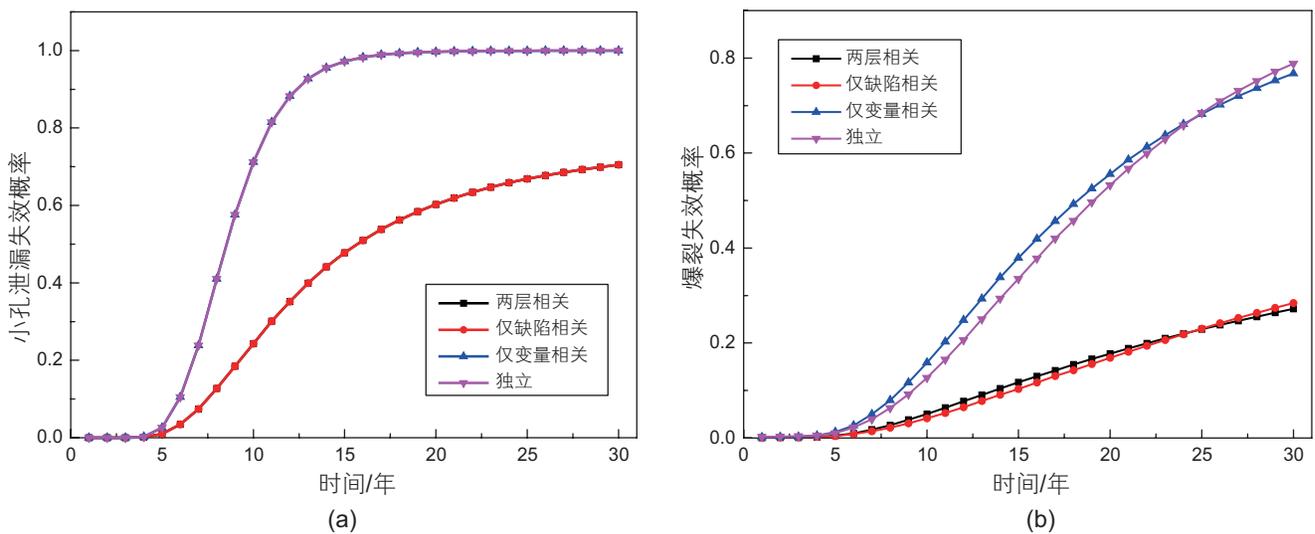


图 2 相关性对腐蚀管道失效概率的影响

Fig. 2 The effect of correlation on the failure probabilities of corroded pipeline.

表 4 三种情景的缺陷相关系数

Table 4 Defect correlation coefficients for the three scenarios.

情景	相邻缺陷	间隔 1 个缺陷	间隔 2 个缺陷
情景 1	0.9	0.6	0.3
情景 2	0.8	0.5	0.2
情景 3	0.7	0.4	0.1

关性对小泄漏和爆裂失效的影响。可见随着缺陷之间相关系数的增大,管道小泄漏和爆裂的失效概率均明显减小。

在此基础上,进一步研究了缺陷数量对管道失效概率的影响,分别计算了3种情景假设下,缺陷数量为3,6,9,12的管道小泄漏和爆裂失效概率。

图5(a),(b)分别描述了缺陷数量对管道小泄漏失效和爆裂失效的影响。可见随着缺陷数量的增加,小泄漏和爆裂失效概率均明显增大。同时可以看出,当相关系数较小时,缺陷数量对失效概率的影响较大,当相关系数较大时,其影响较小。这是必然的,由式(22)和(24)可知,当缺陷数量增加时,计算系统失效概率累加项增加,失效概率增大。同时当缺陷之间的

相关系数 ρ 增大时,相关度 r 也相应增大,此时每个缺陷的失效概率对系统失效概率贡献的权重均减小,这将导致系数失效概率的减小,但其影响相对于缺陷数量增加引起的系统失效概率增加是较小的。故缺陷之间相关系数增大时,缺陷数量增加对系统失效概率的影响将减小,但系统失效概率依然增大。

3.4.2 随机变量相关性的影响

由3.3节可知,随机变量相关系数的变化对管道小泄漏失效概率没有影响。故以下仅对随机变量相关性对爆裂失效的影响做敏感性分析。需注意的是,这一分析建立在本研究的基础案例之上,采取控制变量法,保持所研究的一组相关随机变量之外的其余相关系数不变,对其进行不同相关系数的敏感性分析。

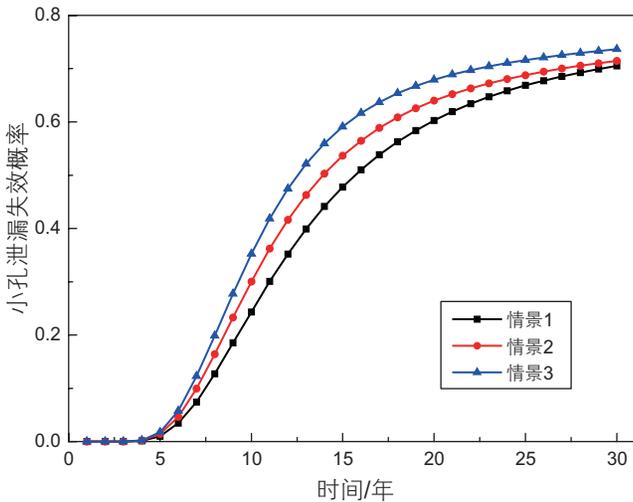


图3 缺陷相关性对小泄漏失效的影响

Fig. 3 Influence of defect correlation on small leak failure

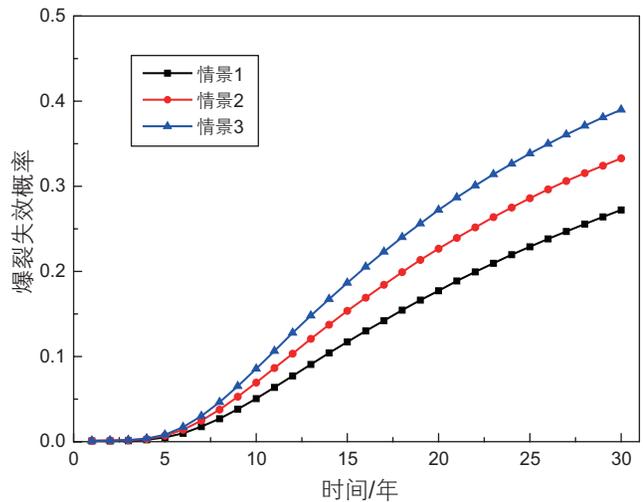


图4 缺陷相关性对爆裂失效的影响

Fig. 4 Influence of defect correlation on burst failure

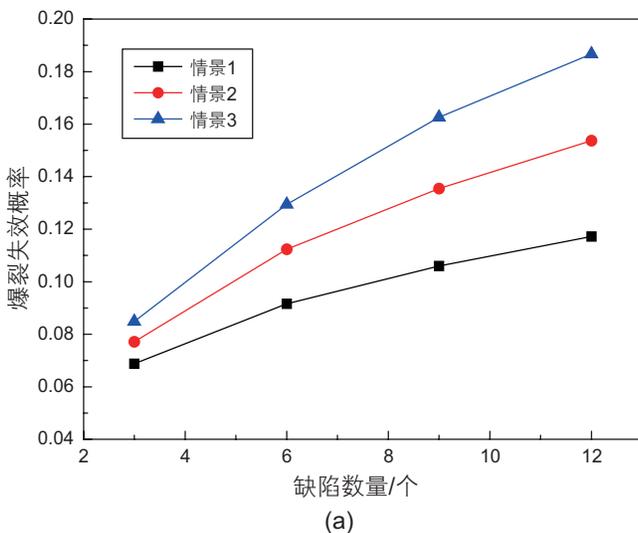
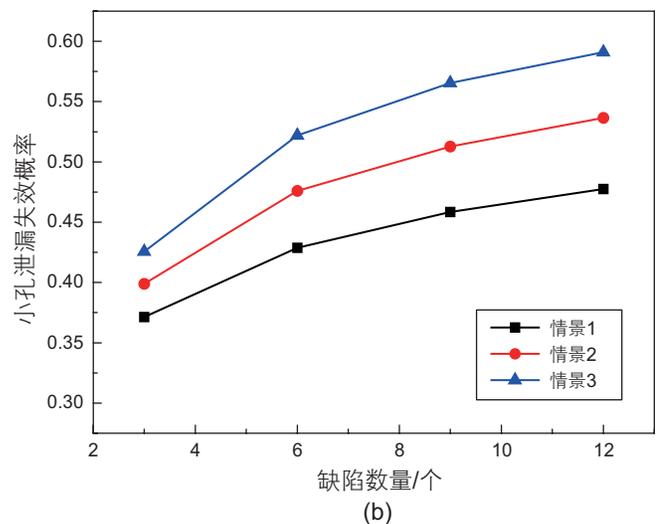


图5 缺陷数量对管道失效概率的影响

Fig. 5 The effect of the number of defects on the pipeline failure probabilities



(1) 管径与壁厚

管道的管径与壁厚存在相关性。相同压力下，一般管径越大，则壁厚越大。取 0~1 之间的不同相关系数，分别对管道的爆裂失效概率进行了模拟计算。基于管径与壁厚相关性对爆裂失效概率影响的单向性，为了更清晰直观的显示随机变量相关性对管道爆裂失效概率的影响，选取最近一次检测以来第 18 年不同相关系数下的管道爆裂失效概率进行了研究。

图 6 显示了管径与壁厚相关性对爆裂失效的影响。其中 (a) 图是 30 年预测周期内，不同相关系数下管道爆裂失效概率的比较。(b) 图为最近一次检测之后第 18 年，在不同相关系数下管道失效概率的变化。可见管径与壁厚相关性对管道爆裂失效的影响是单向性的，随着管径与壁厚相关系数的增大，管道爆裂失效概率

减小。

(2) 腐蚀缺陷初始长度与深度

腐蚀缺陷处于特定的环境之下，其初始长度和深度必然存在一定的相关性。缺陷长度越长，深度也越深。从 0~1 之间取不同的相关系数表征腐蚀缺陷初始长度与深度之间的相关性，控制其余相关变量以及缺陷之间的相关性与基础案例保持一致，模拟计算了预测周期 30 年内的管道失效概率。结果显示腐蚀缺陷初始长度与深度之间的相关性对爆裂失效概率的影响也是单向性的，故同样取第 18 年的结果进行了表征性的研究。

图 7(a), (b) 分别显示了 30 年预测周期内和第 18 年，腐蚀缺陷初始长度与深度相关性对爆裂失效的影响。其影响是单向性的，随着缺陷初始长度与深度相关性的增大，管道爆裂失效概率也增大。

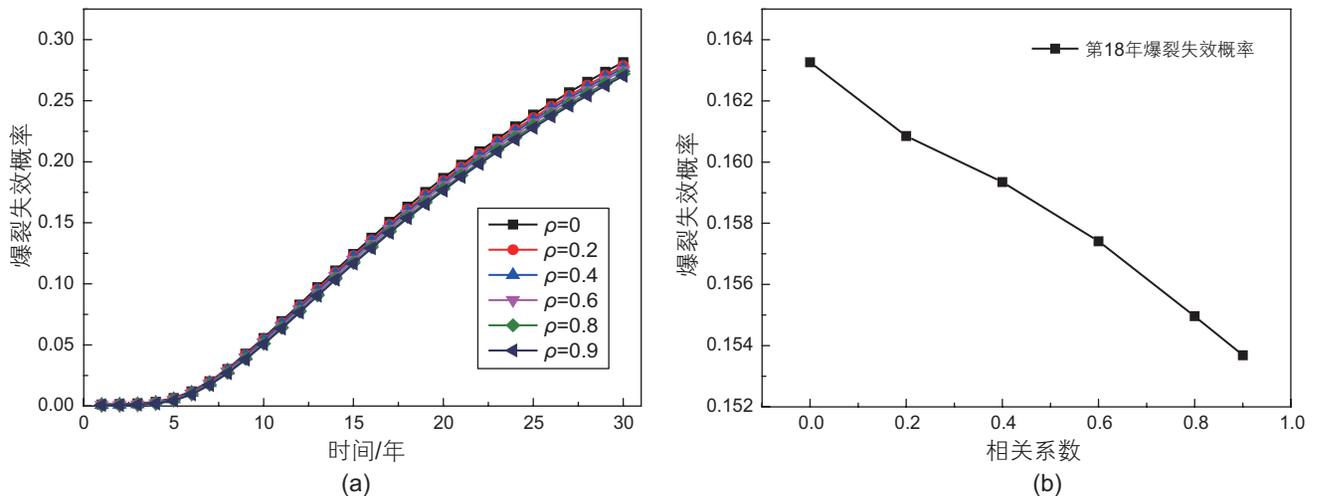


图 6 管径与壁厚相关性对爆裂失效概率的影响

Fig. 6 Effect of correlation between pipeline diameter and wall thickness on burst failure probability

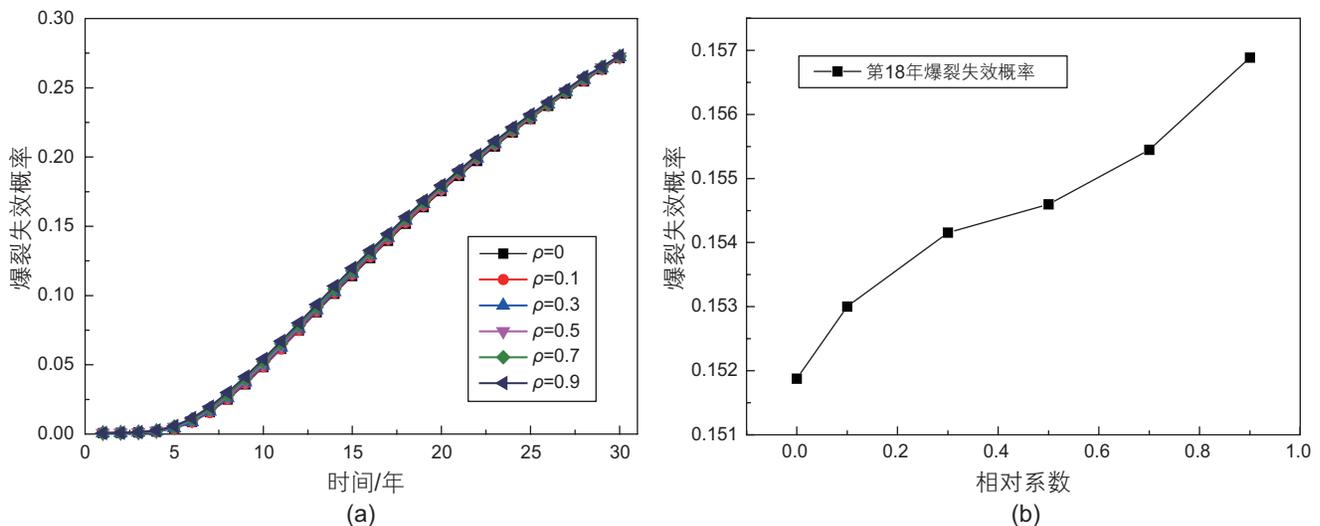


图 7 初始缺陷长度与深度相关性对爆裂失效概率的影响

Fig. 7 The effect of initial defect length and depth correlation on burst failure probability

(3) 腐蚀缺陷轴向与径向增长速率

与初始腐蚀缺陷长度和深度之间的相关性同理, 腐蚀缺陷轴向与径向增长速率之间也必然存在相关性。轴向腐蚀速率越大, 则径向腐蚀速率也越大。取 0~1 之间的相关系数, 对腐蚀缺陷轴向与径向增长速率之间相关性对爆裂失效的影响进行研究。图 8(a) 描述了 30 年预测周期内, 腐蚀缺陷轴向与径向增长速率的相关性对管道爆裂失效的影响。其影响是双向的, 可见大约前 16 年随着相关系数的增大, 管道爆裂失效概率增加, 后经过一段时间的过渡, 大约 25 年后随着相关系数的增大, 管道爆裂失效概率降低。为更直观的显示其影响的双向性, 图 8(b), (c) 分别描述了第 15 年和第 29 年, 缺陷轴向与径向增长速率相关性对爆裂失效的影响, 可见结果与上述一致。同时可见第 15 年时, 随着相关系数的增大, 引起的爆裂失效概率的增

加量逐渐减小; 在第 29 年时, 随着相关系数的增大, 引起的爆裂失效概率的减小量逐渐增大。

由三组相关随机变量各自对管道爆裂失效概率影响的敏感性分析可知: 在本研究中, 就对管道爆裂失效的影响而言, 管径与壁厚相关性的影响是单向的, 正面的; 初始缺陷长度与深度相关性的影响的单向的负面的; 缺陷轴向与径向增长速率相关性的影响是双向的, 先为正面后为负面。进一步就影响的大小而言, 缺陷轴向与径向增长速率相关性的影响最大, 管径与壁厚相关性的影响次之, 初始缺陷长度与深度的影响最小。故综合而言, 在最初的较长一段时间内, 管道爆裂失效概率随着随机变量相关性的增大而增大; 在预测周期的后段(大约 25 年后)随着随机变量相关性的增大而减小。

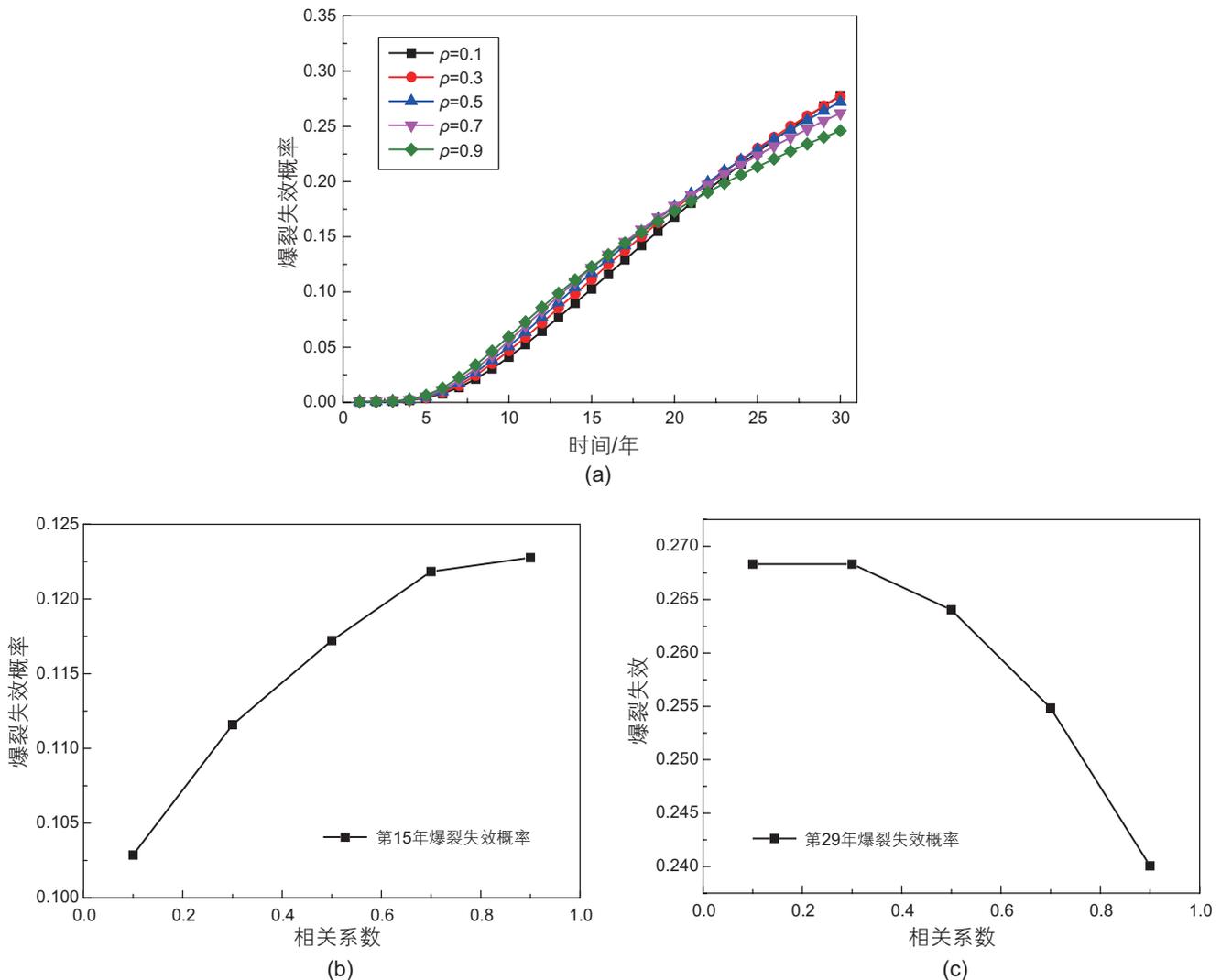


图 8 缺陷轴向与径向增长速率相关性对爆裂失效概率的影响

Fig. 8 Influence of correlation between axial and radial growth rate of defects on burst failure probability

4 结论

本文研究了考虑两层相关性的腐蚀管道可靠性评价方法。采用拉丁超立方抽样和蒙特卡洛抽样方法对管道小泄漏失效进行概率模拟计算,证明了拉丁超立方抽样方法的先进性、高效性。文章进一步研究了不同种类相关性以及缺陷数量对管道失效概率的影响。研究表明缺陷之间的相关性对管道系统的失效概率影响明显大于随机变量之间相关性的影响,考虑缺陷之间相关性会显著降低系统失效概率。随机变量相关性对管道小泄漏失效没有影响,而对爆裂失效的影响具有双向性。大约在预测周期内的第25年前,随机变量的相关性引起爆裂失效概率的增大,此后导致失效概率的减小。随着缺陷数量的增加,小泄漏和爆裂失效概率均明显增大。

管径与壁厚、腐蚀缺陷初始长度与深度之间的相关性对管道爆裂失效的影响是单向性的。随着管径与

壁厚相关系数的增大,管道爆裂失效概率减小。随着腐蚀缺陷初始长度与深度相关系数的增大,管道爆裂失效概率增大。腐蚀缺陷轴向与径向增长速率的相关性对管道爆裂失效的影响是双向的,大约前16年随着相关系数的增大,管道爆裂失效概率增加,大约在25年后随着相关系数的增大,管道爆裂失效概率降低。从各种相关性对管道失效概率影响的大小来说,缺陷之间的相关性对管道失效概率的影响大于随机变量相关性。相关随机变量中,缺陷轴向与径向增长速率相关性对管道失效概率的影响最大,管径与壁厚相关性的影响次之,初始缺陷长度与深度相关性对管道失效概率的影响最小。

考虑两层相关性的腐蚀管道可靠性评价方法较基于独立假设的方法更为合理,为腐蚀管道的完整性管理提供了借鉴。此方法的难点在于相关系数的获取,在工程实际中应加强有关数据的收集和挖掘,为相关系数的统计推断提供更充分的数据支持,从而提高腐蚀管道可靠性评价的预测精度。

参考文献

- [1] YU W C, SONG S F, LI Y C, et al. Gas supply reliability assessment of natural gas transmission pipeline systems[J]. *Energy*, 2018, 162: 853–870.
- [2] YU W C, WEN K, MIN Y, et al. A methodology to quantify the gas supply capacity of natural gas transmission pipeline system using reliability theory[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 175: 128–141.
- [3] DONG Y H, YU D T. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005, 18(2): 83–88.
- [4] ALAMILLA J L, OLIVEROS J, GARCÍA-VARGAS J. Probabilistic modelling of a corroded pressurized pipeline at inspection time[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2009, 5(2): 91–104.
- [5] LAM C, ZHOU W X. Statistical analyses of incidents on onshore gas transmission pipelines based on PHMSA database[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2016, 145: 29–40.
- [6] 帅健, 单克. 基于失效数据的油气管道定量风险评价方法[J]. *天然气工业*, 2018, 38(09): 129–138.[SHUAI J, SHAN K. A quantitative risk assessment method for oil and gas pipelines based on failure data [J] *Natural Gas Industry*, 2018, 38(09): 129–138.]
- [7] 虞维超, 黄维和, 宫敬, 等. 天然气管网系统可靠性评价指标研究[J]. *石油科学通报*, 2019, 4(02): 184–191.[YU W C, HUANG W H, GONG J, WEN K, LI Y C, DANG F H, XIONG J Y. Research into a reliability evaluation index of natural gas pipeline network systems[J] *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 02: 184–191.]
- [8] AHAMMED M. Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1998, 75(4): 321–329.
- [9] CALEYO F, GONZÁLEZ J L, HALLEN J M. A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defects[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2002, 79(1): 77–86.
- [10] PESINIS K, TEE K F. Statistical model and structural reliability analysis for onshore gas transmission pipelines[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 82: 1–15.
- [11] 郭书祥. 结构体系失效概率计算的一种快速有效方法[J]. *计算力学学报*, 2007, 24(1): 107–110.[GUO S X. A fast efficient procedure for computing failure probability of uncertain structural systems [J] *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2007, 24(1): 107–110.
- [12] YU W C, ZHANG J, WEN K, et al. A novel methodology to update the reliability of the corroding natural gas pipeline by introducing the effects of failure data and corrective maintenance[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2019, 169: 48–56.
- [13] LI S X, ZENG H L, YU S R, et al. A method of probabilistic analysis for steel pipeline with correlated corrosion defects[J]. *Corrosion*

- Science, 2009, 51(12): 3050–3056.
- [14] GONG C Q, ZHOU W X. Improvement of equivalent component approach for reliability analyses of series systems[J]. *Structural Safety*, 2017, 68: 65–72.
- [15] YU W C, HUANG W H, WEN K, et al. Subset simulation-based reliability analysis of the corroding natural gas pipeline[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 213: 107661.
- [16] ZHOU W X. System reliability of corroding pipelines[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2010, 87(10): 587–595.
- [17] ZHOU W X. Reliability evaluation of corroding pipelines considering multiple failure modes and time-dependent internal pressure[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2011, 17(4): 216–224.
- [18] 张鹏, 彭杨. 考虑随机变量相关性的腐蚀管道失效概率[J]. *石油学报*, 2016, 37(10): 1293–1301.[ZHANG P, PENG Y. Failure probability of corroded pipeline considering random variables correlation [J]. *ACTA Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1293–1301.
- [19] LEIS B N, STEPHENS D R. An Alternative Approach to Assess the Integrity of Corroded Line Pipe – Part I: Current Status[C]. *The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1997: 11.
- [20] LEIS B N, STEPHENS D R. An alternative approach to assess the integrity of corroded line pipe – Part II: Alternative criterion[C]. *The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1997: 7.
- [21] 张杰. 腐蚀管道结构可靠性评价与维修策略优化[D]. 中国石油大学(北京), 2020.[ZHANG J. Corrosion pipeline structure reliability evaluation and maintenance strategy optimization [D]. *China University of Petroleum (Beijing)*, 2020]
- [22] TIMASHEV S A, BUSHINSKAYA A V. Practical methodology of predictive maintenance for pipelines[J], 2010(44205): 329–338.
- [23] LI S X, YU S R, ZENG H L, et al. Predicting corrosion remaining life of underground pipelines with a mechanically-based probabilistic model[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, 65(3): 162–166.
- [24] 何蕾, 温凯, 吴长春, 等. 基于多种智能算法的腐蚀天然气管道可靠性评价方法[J] *石油科学通报*, 2019, 4(03): 310–322.[HE L, WEN K, WU C C, GONG J, et al. A corroded natural gas pipeline reliability evaluation method based on multiple intelligent algorithms [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 03: 310–322.

(编辑 马桂霞)