

中文引用格式:彭卫远,彭世亮,陈朋超,等.考虑多缺陷相关性的输气管段结构可靠性评价[J].中国安全科学学报,2025,35(12):147-153.

英文引用格式:PENG Weiyuan, PENG Shiliang, CHEN Pengchao, et al. Structural reliability assessment of gas pipeline segments considering multiple defects correlation[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 147-153.

考虑多缺陷相关性的输气管段结构可靠性评价*

彭卫远^{1,2}, 彭世亮^{1,2}, 陈朋超³教授级高工, 苏怀^{**1,2}副教授,
张宏^{1,2}教授, 张劲军^{1,2}教授

(1 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室,北京 102249;
2 中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室,北京 102249;
3 国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司,天津 300457)

中图分类号:X944.4 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.1701
基金项目:国家重点研发计划重点专项(2022YFC3070100);国家自然科学基金青年科学基金资助(51904316);中国石油大学(北京)科学基金资助(2462021YJRC013)。

【摘要】 针对输气管段多缺陷间相互联系的特点以及多缺陷高度非线性耦合作用难以量化的问题,提出基于 Copula 函数的含多缺陷输气管段结构可靠性评价方法。首先,基于不同缺陷对应的管段极限状态方程,采用蒙特卡罗法(MC)计算单缺陷作用下管段的失效概率和概率分布;其次,将各缺陷概率分布作为随机变量,通过 Copula 函数研究不同缺陷间相关性对管段失效概率的影响,得到2缺陷耦合作用下管段的联合失效概率;然后,基于二阶窄界理论确定含多缺陷输气管段可靠度;最后,探究腐蚀和裂纹缺陷间相关性对输气管段结构可靠性的影响,分析在不同缺陷深度和壁厚之比(0.2~0.8)条件下管段可靠度的变化。结果表明:在缺陷失效概率量级一致且相差不大的条件下,同种缺陷相关性更强且耦合作用对管段失效概率影响更大;相较于传统串联方法考虑缺陷间相互独立低估管段的可靠度,文中方法管段结构可靠性评价结果更符合实际需要,可为含多缺陷输气管段的稳定运行提供理论支持。

【关键词】 多缺陷; 相关性; 输气管段; 结构可靠性; 可靠性评价; Copula 函数; 失效概率

Structural reliability assessment of gas pipeline segments
considering multiple defects correlation

PENG Weiyuan^{1,2}, PENG Shiliang^{1,2}, CHEN Pengchao³, SU Huai^{1,2},
ZHANG Hong^{1,2}, ZHANG Jinjun^{1,2}

(1 National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 2 Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 3 PipeChina Institute of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: A structural reliability evaluation method for gas pipeline segments with multiple defects, based on Copula functions, was proposed to address the characteristics of the interrelationship between defects and the difficulty in quantifying the highly nonlinear coupling effects of multiple defects. First,

* 文章编号:1003-3033(2025)12-0147-07; 收稿日期:2025-07-01; 修稿日期:2025-10-10

based on the limit state equations of pipeline segments corresponding to different defects, Monte Carlo (MC) method was used to calculate the failure probability and probability distribution of pipeline segments under the influence of a single defect. Second, the probability distribution of each defect were treated as random variables, and the Copula functions were employed to study the impact of the correlation between different defects on the pipeline failure probability. The joint failure probability of the pipeline segment under the coupling effect of two defects was obtained. Third, the reliability of the pipeline segment with multiple defects was determined based on the second-order narrow-bound theory. Finally, using this method, the impact of the correlation between corrosion and crack defects on the structural reliability of gas pipeline segments was explored, and the variation of pipeline reliability was analyzed under different defect depths and wall thickness ratios (0.2–0.8). The results show that, under the condition that the failure probabilities of the defects are at the same order of magnitude and do not differ significantly, the correlation of the same type of defects is stronger, and the coupling effect has a greater impact on the pipeline failure probability. Compared with traditional series methods that assume independence between defects, which underestimate the pipeline reliability, the results of this method are more consistent with practical needs. This approach provides theoretical support for the stable operation of gas pipeline segments with multiple defects.

Keywords: multiple defects; correlation; gas pipeline segments; structural reliability; reliability assessment; Copula functions; failure probability

0 引言

长输天然气管道是油气输送的重要组成部分,随着管道服役年限的增加,输气管段失效事件发生的风险也随之增加。大量试验和现场检测数据表明:失效管段往往同时存在多个缺陷,各缺陷的失效模式可能不同,而管段失效的主要原因是不同缺陷间高度非线性耦合作用。因此,考虑管段多缺陷相互作用,开展含多缺陷管段结构可靠性评价,对输气管段安全评估具有重要意义。

目前,国内外在评价含多缺陷管段结构可靠性时,一般采用有限元数值模拟法^[1]和基于结构可靠性理论的概率分析法^[2]。胡雄伟等^[3]利用数值模拟方法研究管段双缺陷相互作用特征,建立双缺陷管段的三维有限元波动数值模型,并在此基础上系统研究了相同大小双缺陷相对位置对导波反射特性的响应机制。MENSAH 等^[4]基于概率有限元的结构可靠性方法开发了有效的隐式极限状态函数评估了相互作用的管段腐蚀聚类缺陷。陈飞^[5]采用 Ansys Workbench 软件分析了含腐蚀缺陷 X80 管段的应力应变状态,研究了管段相邻双腐蚀缺陷间的相互作用。针对基于概率分析的含多缺陷管段结构可靠性研究,国内外开展了一系列相关工作。NAHAL 等^[6]利用 Karhunen-Loève 展开法考虑土壤侵蚀性和残余应力耦合效应,研究了不规则区域

(弯头、法兰和对接焊接区域)的空间和随机依赖关系,采用蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 模拟计算了各不规则区域和串联系统的失效概率,完成腐蚀管段的系统结构可靠性评估。XIAO Rui 等^[7]考虑腐蚀输气管段小泄漏和破裂 2 种失效模式,采用 Copula 理论分析了随机变量间的相关性,提出了基于 Copula 和重要性抽样的独立串联管段时变结构可靠性评估方法。CHAKRABORTY 等^[8]考虑腐蚀管段以泄露和爆裂 2 种相互竞争的失效模式中任意一种模式失效的情况,针对缺陷数量有限及不确定 2 种情况,提出了基于子集仿真的腐蚀管段时空结构可靠性评价方法。针对长输天然气管道,各管段上可能包含多个缺陷,数值模拟将面临计算量大、缺陷数量多和程序复杂等问题。以上基于概率分析的可靠性研究均从单缺陷角度考虑随机变量间的相关性,基于独立串联理论评估含多缺陷管段结构可靠性。依据该理论,管段可靠度等于所有缺陷可靠度的乘积,随着管段缺陷数量增多,其可靠度逐渐下降。然而,当缺陷尺寸足够小时,其对管段整体可靠度的影响可忽略不计,导致管段实际可靠度高于传统理论预测值^[9]。这种偏差源于独立串联理论基本假设的局限性,即未考虑缺陷间的相互作用。

因此,笔者拟以含多缺陷输气管段为对象,根据各缺陷失效模式确定对应管段极限状态方程,采用 MC 方法计算各缺陷的失效概率和累积分布函数,

然后基于极限状态的概率分布函数,引入 Copula 理论构建缺陷间联合概率分布,描述多缺陷间相关关系并量化缺陷间非线性耦合作用对管段失效概率的影响,依据二阶窄界理论完成含多缺陷输气管段的结构可靠性评价,以期对含多缺陷输气管段的稳定运行提供理论支持。

1 单个缺陷失效概率计算流程

管段的极限状态方程一般表示为:

$$Z = g(x_1, x_2, \cdots, x_k) \tag{1}$$

式中: Z 为管段结构状态表征量; $g(\cdot)$ 为管段极限状态函数; $x_i(i = 1, 2, \cdots, k)$ 为方程中所涉及的基本随机变量(管段结构参数、缺陷尺寸参数和外部环境参数),通常服从特定的概率分布。

根据极限状态方程的取值将管段运行状态分为可靠状态、极限状态和失效状态 3 种。若 $Z > 0$, 管段结构处于安全可靠状态;若 $Z < 0$, 管段结构处于失效状态;若 $Z = 0$, 管段结构处于极限状态。MC 方法是一种随机模拟方法,不需要解析求解极限状态方程,只需要将重复随机抽样产生的一系列样本代入极限状态方程,依据结构可靠性理论和统计分析方法得到管段的失效概率。基本思路为:基于 k 个管段基本随机变量的概率分布,大量重复随机抽样获得 k 个变量对应样本,将生成一系列的样本 $x_{ij}(j = 1, 2, \cdots, M)$ 代入极限状态方程,得到管段极限状态方程一系列数值,假定其中 $Z < 0$ 的次数为 m , 则依据大数定律,管段的失效概率 $P = m / M$ 。Python 程序可进一步拟合得到管段概率分布。

表 1 几种常见的二元 Copula 函数及其特性

Table 1 Several commonly used bivariate Copula functions and their properties				
Copula 函数类型	相关参数 α	分布函数 $C_\alpha(u_1, u_2; \alpha)$	Kendall Rank 相关系数 τ 与 α 的关系	函数特性
Gaussian	$\alpha \in [-1, 1]$	$\Phi_2(\Phi^{-1}(u_1), \Phi^{-1}(u_2); \alpha)$	$\tau = \frac{2}{\pi} \arcsin(\alpha)$	对称相关性 不作边缘分布相关假设
Student t	$\alpha \in (-1, 1)$	$T_v(t_v^{-1}(u_1), t_v^{-1}(u_2); \alpha, v)$	$\tau = \frac{2}{\pi} \arcsin(\alpha)$	对称尾部相关性
Gumbel	$\alpha \in (0, 1]$	$\exp(-[(-\ln u_1)^{\frac{1}{\alpha}} + (-\ln u_2)^{\frac{1}{\alpha}}]^{\alpha})$	$\tau = 1 - \alpha$	非对称性 上尾部相关性变化敏感
Frank	$\alpha \neq \{0\}$	$-\frac{1}{\alpha} \ln\left(1 + \frac{(\exp(-\alpha u_1) - 1)(\exp(-\alpha u_2) - 1)}{e^{-\alpha} - 1}\right)$	$\tau = 1 + \frac{4}{\alpha} [D_1(\alpha) - 1]$	对称性描述非负和负相关性的随机变量
Clayton	$\alpha \in (-1, 0) \cup (0, +\infty)$	$\max((u_1^{-\alpha} + u_2^{-\alpha} - 1)^{-\frac{1}{\alpha}}, 0)$	$\tau = \frac{\alpha}{2 + \alpha}$	非对称性 下尾部相关性变化敏感

注: $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准一元正态分布的逆函数; $\Phi_2(\cdot)$ 为二元正态分布函数; $t_v^{-1}(\cdot)$ 为自由度为 v 的一元 t 分布函数的逆函数; $T_v(\cdot)$ 为自由度为 v 的二元 t 分布函数; $D_1(\alpha)$ 为 Debye 函数。

2 考虑多缺陷相关性的概率分布模型

2.1 基于 Copula 函数的联合失效概率分布模型

对于含多缺陷管段,缺陷尺寸参数和管段结构参数之间的相互作用对管段结构可靠性的影响具有不确定性,宏观反映为缺陷对应管段极限状态概率分布间具有高度非线性关系。研究发现,Copula 函数具有易于构造多维联合概率分布模型和可以描述多维随机变量间高度非线性关系 2 方面优势,因此,采用 Copula 函数考虑缺陷间失效相关性。将基于 MC 方法得到的缺陷极限状态概率分布作为随机变量,输入至 Copula 函数,得到缺陷间多维联合概率分布。

Copula 函数是单缺陷极限状态边缘概率分布为 $u_1, u_2, \cdots, u_n$ 的随机变量 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 的多缺陷极限状态联合概率分布函数,其中, $u_w = F(X_w)$, n 为缺陷数量。根据 Sklar^[10] 定理,基于 Copula 函数的 n 维联合概率分布 F 表示为:

$$F(X_1, X_2, \cdots, X_n) = C(u_1, u_2, \cdots, u_n; \alpha) \tag{2}$$

式中: $C(\cdot)$ 为 Copula 函数; α 为 Copula 相关参数,可以表征缺陷间的相关性。一些常用的二维 Copula 函数及其特性见表 1。对于 Copula 函数,通常采用极大似然法获得 α 的估计值。但是,由于 α 需要根据缺陷极限状态概率分布和 Copula 函数联合估计,这种方法会带来计算负担^[11]。与极大似然法相比,依据肯德尔等级(Kendall Rank)相关系数推导 α 的方法更高效,且 Kendall Rank 相关系数可以考察缺陷间的非线性相关测度和尾部相关测度。

Kendall Rank 相关系数是一种等级相关统计量,相关系数 τ 计算公式见下:

$$\tau = \frac{Q_e - Q_h}{n(n-1)/2} \tau \in [-1, 1] \quad (3)$$

式中: Q_e 为一致性缺陷序对总数; Q_h 为非一致性缺陷序对的总数。

$\tau > 0$ 表示 2 缺陷正相关; $\tau = 0$ 表示相互独立; $\tau < 0$ 表示负相关。且其绝对值越大,表示 2 缺陷单调相关性越强。Kendall Rank 相关系数与 Copula 函数有如下关系:

$$\tau = 4 \int_0^1 \int_0^1 C(u_1, u_2; \alpha) dC(u_1, u_2; \alpha) - 1 \quad (4)$$

2.2 信息准则优选模型

在构建缺陷间的联合概率分布模型时, Copula 函数的选择会显著影响缺陷间相关性的建模结果。不同 Copula 函数因其独特的尾部相关性和对称性特征,会导致联合概率分布估计产生显著差异。具体而言:对于存在显著上尾相关性的实际缺陷数据,若误选具有对称结构的 Gaussian 或 Frank Copula,将低估高风险事件联合发生的概率;相比之下,上尾敏感(Gumbel Copula)和下尾敏感(Clayton Copula)能更准确地刻画这类非对称相关关系;此外,Student t Copula 虽然与 Gaussian Copula 同属对称结构,但其对尾部极端值的刻画更为敏感,会得到更保守的估计结果。因此,需要根据实际数据从不同类型的候选 Copula 函数中选出最合适的。基于此,通过赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC),统计分析不同 Copula 函数联合概率分布随机样本,选择最优的 Copula 函数。

AIC 是建立在信息论中的熵概念之上,是衡量统计模型拟合优良性的一种标准,可以综合考虑所评估模型的拟合效果和复杂程度^[12], AIC 值越小,模型越优秀。AIC 表示为:

$$AIC = -2\ln(L) + 2b \quad (5)$$

式中: L 为似然函数; b 为参数的数量。

基于 Copula 函数描述多缺陷相关性及其计算联合失效概率的流程如图 1 所示。

3 管段可靠度计算模型

传统串联结构可靠性评价是基于独立假设原则,假定各缺陷相互独立,其管段可靠度的求解方法是:将各缺陷在单独作用时得到的可靠度相乘,表达式为:

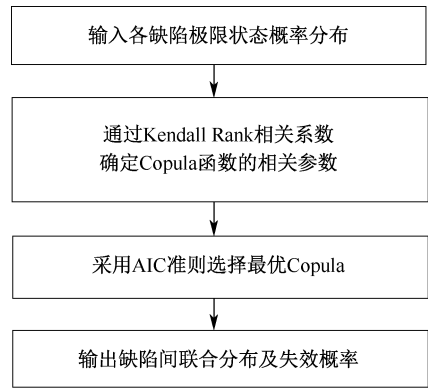


图 1 Copula 函数应用流程

Fig. 1 Copula functions application flowchart

$$R = \prod_{r=1}^n (1 - P_r) \quad (6)$$

式中: R 为管段可靠度; P_r 为第 r 个缺陷的失效概率。

含多缺陷管段结构可靠性评价是一个串联系统可靠性分析问题,若忽略多缺陷相关性,则管段失效概率评价结果偏保守,即独立串联结构可靠性评价方法会导致管段可靠度被低估,无法满足实际需求。为此,引入二阶窄界理论^[13],在基于 MC 方法求解得到的单缺陷失效概率和基于 Copula 函数计算得到的联合失效概率的基础上,建立系统失效界限,采用边界的上界和下界理论公式求得管段的失效概率,并根据失效概率与可靠度的关系完成管段结构可靠性评价。管段的失效概率和可靠度计算式分别为:

$$\begin{cases} P \leq P_q = \sum_{r=1}^n P_r - \sum_{r=2}^n \max P_{rs} (s < r) \\ P \geq P_o = P_1 + \sum_{r=2}^n \max [(P_r - \sum_{s=1}^{r-1} P_{rs}), 0] \end{cases} \quad (7)$$

$$R_q = 1 - P_o, R_o = 1 - P_q \quad (8)$$

式中: P_q 为管段失效概率的上界; P_o 为管段失效概率的下界; P_{rs} 为 r 和 s 这 2 个缺陷间的联合失效概率; R_q 和 R_o 分别为管段可靠度上界与下界。

4 管段可靠性评价案例分析

假设输气管管段管体存在 2 种典型缺陷组合: 2 处体积型腐蚀缺陷在压缩载荷下引发局部屈曲失稳; 2 处环向裂纹缺陷在拉伸载荷下导致脆性断裂扩展。根据文献[14],应用上述方法评价管段结构可靠性,以验证评价方法的可行性。管段随机变量统计特征见表 2。基于假设场景分别分析管段结构可靠性、参数敏感性以及维检修决策,其结果可以为

含多缺陷输气管段的稳定运行提供理论支持。实际应用本方法时需要根据管段缺陷的失效模式明确对应的极限状态方程。根据假设场景,腐蚀缺陷对应的管段极限状态方程采用 ASME B31G^[15],管体裂纹缺陷对应的管段极限状态方程采用 BS 7910^[16]。

表 2 管段随机变量统计特征

Table 2 Statistical characteristics of random variables in pipeline segments			
随机变量	分布类型	均值	变异系数
屈服强度 σ_y /MPa	正态	467	0.07
抗拉强度 σ_u /MPa	对数正态	576	0.07
管段壁厚 t /mm	正态	19.05	0.03
管段外径 D /mm	正态	1219.2	0.03
运行压力 p /MPa	I 型广义极值	6~16	0.02
腐蚀深度 d /mm	正态	$(20\% \sim 80\%)t$	0.1
腐蚀长度 l /mm	正态	200	0.05
裂纹深度 a /mm	正态	$(20\% \sim 80\%)t$	—
裂纹半长 c /mm	—	25~100	—
夏比冲击值 C_v /J	正态	200	0.16

4.1 管段结构可靠性评价

针对腐蚀和裂纹 2 种缺陷,以 $d/t=0.55$ 、 $a/t=0.65$ 为例进行管段结构可靠性分析。首先,分别建立单缺陷作用下管段结构可靠性模型,评估其失效概率。通过 MC 法抽样 10^6 次,基于结构可靠性理论和概率统计分析,得到管段各失效模式的可靠度和失效概率,见表 3。综合考虑算力与评估结果的科学性,在误差允许范围内,在算例中采用相对较小的抽样次数(10^6)。在该设定下,由于 MC 方法本身存在一定的随机性,导致 2 腐蚀和 2 裂纹缺陷计算结果存在数值差异。但从统计意义上讲,在输入参数完全一致的情况下,同种类型 2 缺陷所得到的失效概率应是一致的,即理论误差为 0。

表 3 单缺陷作用下管段的失效概率和可靠度

Table 3 Failure probability and reliability of pipeline segments under single defect action		
缺陷	可靠度	失效概率
腐蚀 z_1	0.997 8	0.002 2
腐蚀 z_2	0.998 6	0.001 4
裂纹 z_3	0.997 8	0.002 2
裂纹 z_4	0.997 0	0.003 0

然后,基于 4 个缺陷极限状态概率分布,采用 Copula 函数求解缺陷间的联合概率分布。Python 程序根据 AIC 准则在 Gaussian、Student t、Clayton、Gumbel、Frank Copula 函数和独立函数 (Independence, Indep) 中优选模型,结果见表 4。

表 4 缺陷组合 z_3z_4 模型优选结果

Table 4 Result of model selection for defect combination z_3z_4

拟合模型	τ	AIC	联合失效概率
Gaussian	0.847	-2 720	0.002089
Student t		-2 741	0.002 134
Clayton		-2 451	0.002 187
Gumbel		-2 831	0.002 18
Frank		-2 607	0.000 152 7
Indep	0	0	6.561×10^{-6}

表 4 表明:依据 AIC 值,缺陷组合 z_3z_4 间的相关性最符合 Gumbel Copula 模型,表明缺陷 3、缺陷 4 间存在显著的上尾相关性。而对称结构 Copula 模型低估了缺陷 3 和缺陷 4 相关失效发生的概率,下尾敏感的 Clayton Copula 模型高估了缺陷 3、缺陷 4 相关失效发生的概率。

所有缺陷组合的模型比选结果及各缺陷间相关性参数见表 5。计算结果表明:混合缺陷基本不存在相关性,其联合失效概率较小,且数量级一致;同种缺陷间正相关性较强,其联合失效概率较大。即相较于混合缺陷,同种缺陷耦合作用对管段失效概率的影响更大。缺陷组合 z_1z_2 和 z_3z_4 优选的拟合模型分别是 Frank Copula 和 Gumbel Copula,反映了 2 腐蚀缺陷具有对称相关关系,2 裂纹缺陷具有上尾部正相关性较强的相关关系。

根据上述计算结果,进一步求解得到 R_q 、 R_o 和 R 的结果分别为 0.993 500 9、0.993 487 1、0.991 228 4。

表 5 联合失效概率计算结果

Table 5 Calculation results of joint failure probability

缺陷组合	拟合模型	τ	α	联合失效概率
z_1z_2	Frank	0.89	35	1.01×10^{-4}
z_1z_3	Indep	0.00	0	4.48×10^{-6}
z_1z_4	Indep	0.00	0	6.6×10^{-6}
z_2z_3	Indep	0.00	0	3.08×10^{-6}
z_2z_4	Indep	0.00	0	4.2×10^{-6}
z_3z_4	Gumbel	0.98	50	2.18×10^{-3}

分析在不同缺陷深度和壁厚之比(0.2~0.8)条件下管段可靠度的变化,并与传统串联方法预测结果进行对比,结果如图 2 所示。2 种方法评价结果总体发展趋势一致,表明文中方法适用于含多缺陷管段结构可靠性评价;该方法有助于解决传统方法的局限性,考虑缺陷间的相关关系,预测值更贴合实际,其可靠性预测曲线在传统方法计算结果之上。

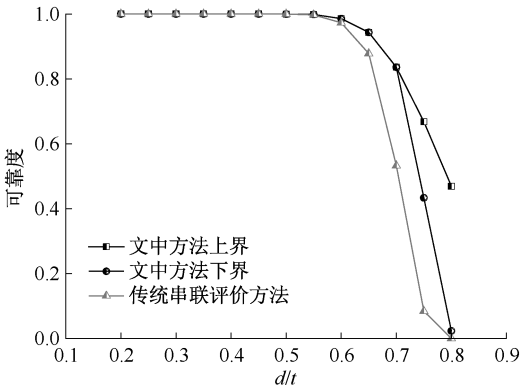


图2 含多缺陷管段结构可靠性评价

Fig.2 Structural reliability assessment of pipeline segments with multiple defects

4.2 参数敏感性分析

解决实际工程问题时,考虑管段缺陷数量较多且一些随机变量可能缺乏完整的统计数据,分析管段结构参数敏感性,提出不需要重点关注的参数,以期简化计算量与计算时间。现根据假设场景对管段随机变量:壁厚 t 、外径 D 、运行压力 p 、抗拉强度 σ_u 和屈服强度 σ_y 进行敏感性分析,结果如图3所示。分析表明:在该实例中,算法敏感参数为 t 和 σ_y ,弱敏感参数为 p 、 D 和 σ_u ,可根据实际情况忽略弱敏感参数概率分布,基于参数定值进行管段结构可靠性评价。

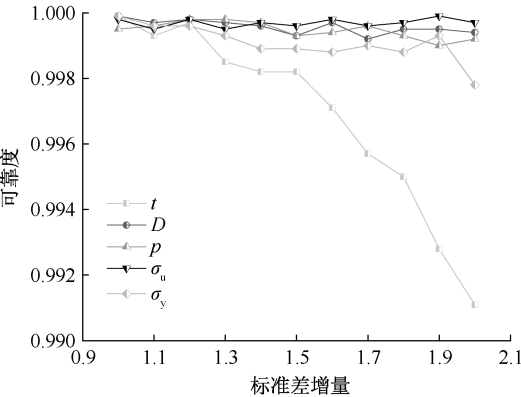


图3 参数敏感性分析

Fig.3 Parameter sensitivity analysis

4.3 维检修决策分析

依据假设场景,采用文中方法确定管段缺陷的重要度排序。分别计算 $d_1/t=c_3/t=0.5$ 、 $d_2/t=c_4/t=0.6$ 、 $a/t=0.65$ 条件下含4个缺陷管段可靠度以及单独修复各缺陷后管段可靠度,结果如图4所示。分析表明:修复腐蚀2后管段可靠度明显提升,修复裂纹3可靠度变化幅度最小,缺陷重要度排序为: $3 < 1 < 4 < 2$ 。图4中也展示了单个缺陷的失效概率,而排序与失效概率大小顺序一致。可结合修复难度和修复成本,确定更合理的修复顺序。

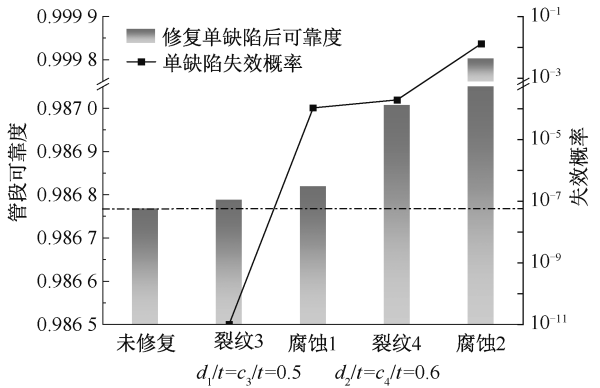


图4 缺陷修复优先级排序

Fig.4 Defect repair priority ranking

5 结 论

1) 针对含多种失效模式、多个缺陷的输气管段,在缺陷失效概率量级一致且相差不大条件下,相较于混合失效模式缺陷组合,同种失效模式的缺陷之间相关性更强,其耦合作用对管段失效概率影响更大。

2) 含多缺陷输气管段结构可靠性评价是一个串联系统可靠性分析问题,多缺陷间相互影响、共同作用,传统串联理论的缺陷独立性假设限制了评价结果的准确性,导致其预测的可靠度低于实际水平,文中方法引入 Copula 函数考虑缺陷间的相关性,其评价结果更贴合实际,可靠度预测值比传统方法高。

参 考 文 献

[1] 赵鹏程, 帅健, 唐雨, 等. 轴向应力对腐蚀缺陷管道极限内压的影响[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(3): 70-75.
ZHAO Pengcheng, SHUAI Jian, TANG Yu, et al. Impact of axial stress on ultimate internal pressure of corroded pipelines[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(3): 70-75.

[2] 李长俊, 曾江浩, 杨帆. 多失效模式与变量相关的管道失效概率预测[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5):

36-43.

LI Changjun, ZENG Jianghao, YANG Fan. Prediction of pipeline failure probability with multiple failure modes and variable correlation[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5):36-43.

[3] 胡雄伟, 冯新, 周晶. 纵向导波与管道中双缺陷相互作用的数值模拟[J]. 油气储运, 2021, 40(3):306-312.
HU Xiongwei, FENG Xin, ZHOU Jing. Numerical simulation on the interaction of longitudinal guided waves with double defects in pipes[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(3):306-312.

[4] MENSAH A, SRIRAMULA S. Probabilistic finite element-based reliability of corroded pipelines with interacting corrosion cluster defects [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2024, 207: DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.105086.

[5] 陈飞. X80 管道双腐蚀缺陷间相互作用规律研究[J]. 应用力学学报, 2020,37(2): 723-729.
CHEN Fei. Study on interaction rule between double corrosion defects in X80 pipeline[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(2): 723-729.

[6] NAHAL M, SAHRAOUI Y, KHELIF R, et al. System reliability of corroded pipelines considering spatial and stochastic dependency in irregular zones[J]. Gas Science and Engineering, 2023,117: DOI:10.1016/j.gjsce.2023.205083.

[7] XIAO Rui, ZAYED T, MEGUID M, et al. Time varying reliability analysis of corroded gas pipelines using copula and importance sampling[J]. Ocean Engineering, 2024,306: DOI:10.1016/j.oceaneng.2024.118086.

[8] CHAKRABORTY S, TESFAMARIAM S. Subset simulation based approach for space-time-dependent system reliability analysis of corroding pipelines[J]. Structural Safety, 2021,90: DOI:10.1016/j.strusafe.2020.102073.

[9] 王赤宇, 虞维超, 陈磊, 等. 考虑两层相关性的腐蚀油气管道失效概率计算方法[J]. 石油科学通报, 2024, 9(5): 819-830.
WANG Chiyu, YU Weichao, CHEN Lei, et al. A method for calculating the failure probability of corroded oil and gas pipelines considering the two layers of correlation[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024,9(5): 819-830.

[10] 董增寿, 裴杰, 石慧,等. 基于藤蔓树降维剪枝的多部件系统剩余寿命预测[J]. 振动与冲击, 2024,43(21): 31-45.
DONG Zengshou, PEI Jie, SHI Hui, et al. Residual life prediction of multi-component system based on vine-tree reduced-dimensional reduction pruning[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024,43(21):31-45.

[11] LIU Xin, LAI Hao, WANG Xinyu, et al. Aerospace structural reliability analysis method based on regular vine copula model with the asymmetric tail correlation[J]. Aerospace Science and Technology, 2023,142: DOI:10.1016/j.ast.2023.108670.

[12] SONG Laifu, YING Hao, WANG Wei, et al. Reliability modelling of pipeline failure under the impact of submarine slides-copula method[J]. Mathematics, 2022, 10(9): DOI:10.3390/math10091382.

[13] 李帅. 重载刮板输送机圆环链结构可靠性评估研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
LI Shuai. Research on reliability evaluation of scraper chain for heavy-duty scraper conveyor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

[14] GUILLAL A, BEN SEGHER M E A, NOURDDINE A, et al. Probabilistic investigation on the reliability assessment of mid- and high-strength pipelines under corrosion and fracture conditions[J]. Engineering Failure Analysis, 2020,118: DOI:10.1016/j.engfailanal.2020.104891.

[15] ASME B31G-2023, Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines[S].

[16] BS 7910-2019, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures[S].



作者简介： 彭卫远 （2001—）,女,安徽亳州人,硕士研究生,研究方向为油气管网可靠性评价。E-mail:cup_yuan@163.com。