

中文引用格式:程凯凯,李科委,王兴,等. 基于逆高斯随机过程的在役管道失效概率分析[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 112-120.

英文引用格式:CHENG Kaikai, LI Kewei, WANG Xing, et al. Analysis of failure probability for in-service pipelines based on inverse Gaussian stochastic processes[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 112-120.

基于逆高斯随机过程的在役管道失效概率分析^{*}

程凯凯¹副教授, 李科委¹, 王兴¹, 孙娜娜¹副教授, 吕高¹讲师, 翁光远²教授

(1 西安石油大学 管道工程学院, 陕西 西安 710065;

2 西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065)

中图分类号:X944.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0278

基金项目:国家自然科学基金资助(52174061); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2025JC-YBMS-561, 2025JC-YBMS-453, 2024JC-YBMS-277); 西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划项目(YCS23214321)。

【摘要】 在役管道受复杂应力的影响,性能随时间退化为一个动态时变随机过程,为解决传统确定性函数难以准确描述管道性能随机退化这一难题,提出一种基于双随机过程的在役管道失效概率动态分析方法。采用逆高斯随机过程模拟管道性能退化,以等时段平稳二项矩形波过程概率模型描述管道内压荷载变化,构建管道承载力-内压荷载双随机过程概率模型;基于某管道服役期统计参数和性能退化数据,采用逆高斯分布拟合6个时刻的管道性能退化模型,动态预测失效概率。研究表明:采用2、4年的退化数据预测管道的使用寿命为16、14年;采用6、8和10年的退化数据预测管道的使用寿命为12、11和10年。壁厚、屈服强度、管径和运行压力对管道的失效概率影响最大,缺陷初始深度次之,缺陷初始长度、深度腐蚀速率和长度腐蚀速率影响较小。

【关键词】 逆高斯随机过程; 在役管道; 失效概率; 使用寿命; 退化数据

Analysis of failure probability for in-service pipelines based on inverse Gaussian stochastic processes

CHENG Kaikai¹, LI Kewei¹, WANG Xing¹, SUN Nana¹, LYU Gao¹, WENG Guangyuan²

(1 College of Pipeline Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China;

2 College of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China)

Abstract: In-service pipelines are subject to complex stresses, and their performance degradation over time constitutes a dynamic, time-varying stochastic process. To address the challenge that traditional deterministic functions struggle to accurately capture its inherent randomness, a dynamic analysis method for failure probability of in-service pipelines based on a dual stochastic process was proposed. The degradation of pipeline performance was simulated using an inverse Gaussian stochastic process, while the variation of internal pressure loads within the pipeline was described by an equal-interval stationary binomial rectangular wave process probability model. A dual stochastic process probability model for pipeline bearing capacity and internal pressure load was then constructed. Based on statistical parameters

and performance degradation data from a specific pipeline's service period, inverse Gaussian distribution was used to fit the performance degradation models at six distinct time points, enabling dynamic failure probability prediction. The results show that the pipeline's service life is predicted to be 16 and 14 years using degradation data from 2 and 4 years, respectively. When utilizing degradation data from 6, 8, and 10 years, the predicted service lives are 12, 11, and 10 years, respectively. Sensitivity analysis indicates that wall thickness, yield strength, pipe diameter, and operating pressure have the most significant impacts on the pipeline's failure probability, followed by the initial depth of defects. In contrast, the initial length of defects, depth corrosion rate, and length corrosion rate have relatively minor effects.

Keywords: inverse Gaussian stochastic process; in-service pipeline; failure probability; service life; degradation data

0 引言

地下城市管网作为城市重大生命线工程,与国家经济建设、社会文明进步和人民日常生活息息相关。然而,输送管道受环境侵蚀、材料老化和输送物质长期效应等因素的综合作用,随着管道服役时间的推移,输送管道系统产生损伤累积,抗压能力衰减,管道失效时有发生,造成巨大的经济损失和人员伤亡,并严重污染环境。因此,准确预测管道性能退化规律、定量计算管道时变失效概率、评估管道动态剩余寿命,并提出合理的维护措施,对保证管道安全和有效运行有着重要意义。

目前,多数可靠度计算模型多采用线性函数、指数函数和幂函数模拟管道腐蚀的退化过程,即采用确定性的函数表示管道抗力随时间变化的衰减^[1-3]。为更好地反映工程结构构件实际性能退化中的不确定性和时间变异性,学者们常用独立增量的随机过程进行性能退化建模,Wiener 随机过程^[4-5]、Gamma 随机过程^[6-7]和逆高斯随机过程^[8-9]模型是最常用的3种模型。工程中很多构件的性能退化过程不可逆,即性能退化量的增量具有非负性,而逆高斯过程的增量由于独立性和非负性,在描述严格单调的退化过程时受到广泛关注^[9]。WANG Xiao 等^[10]指出,相较于 Wiener 和 Gamma 过程,逆高斯过程对数据的拟合效果更好;JIANG Peihua 等^[11]建立了基于逆高斯过程的恒定应力加速退化模型,可很好地评估产品可靠性。徐望喜等^[12]指出,相比 Gamma 过程,逆高斯过程避免了部分初始参数的假定,得到更为精确的抗力退化模型。PENG Weiwen 等^[13]采用逆高斯过程描述结构的性能退化,建立了一种将贝叶斯方法融入实时监测结构退化信息,更新逆高斯随机退化过程模型的理论框架。ZHANG Shenwei 等^[14]借助逆高斯过程,建立

了基于检测数据的地下能源管道腐蚀缺陷深度增长特征模型,并利用层次贝叶斯法考虑了不同信息来源的不确定性。陈龙等^[15]采用逆高斯随机过程模拟桥梁抗力退化,结合检测数据更新逆高斯过程的抗力退化模型参数,提出了在役钢筋混凝土桥梁构件可靠度的动态预测方法。张新生等^[16]将逆高斯过程与状态空间模型相结合,研究了腐蚀油气管道剩余寿命和维修策略。张新生等^[17]针对管道腐蚀退化特点,提出一种基于逆高斯退化模型的贝叶斯分析方法,为管道的安全管理提供了新思路。王艺斐等^[18]针对管道随服役时间产生的不可逆性能退化,提出一种基于二元逆高斯过程的输油管道剩余寿命预测方法,用于实时预测管道剩余寿命。郭凌云等^[19]将随机过程引入计算腐蚀管道的失效概率中,结果表明:该模型得到的时变失效概率可以较好地描述腐蚀增长的随机性,为预测管道时变失效概率提供准确可靠的结果。然而,现有研究未充分考虑管道性能退化与内压荷载变化的双随机过程作用,使得在役管道失效概率动态分析研究尚存在一定局限性。

鉴于此,笔者拟采用逆高斯随机过程模拟管道性能退化,建立管道承载力-内压荷载双随机过程概率模型,分析在役管道承载力的时变失效概率,并验证随机过程概率模型的合理性和有效性。

1 逆高斯随机过程的管道承载力退化模型

1.1 管道剩余内压承载力

对于在役管道,其剩余内压承载力是指缺陷管道达到极限状态时所对应的工作内压的大小。采用 DNV-RP-F101 中的预测模型评估管道剩余内压承载力^[19-20]:

$$P_0 = \sigma_f \frac{2\delta}{D_0 - \delta} \left[\frac{1 - \frac{d(t)}{\delta}}{1 - \frac{d(t)}{\delta M}} \right] \quad (1)$$

$$M = \left\{ 1 + 0.31 \left[\frac{l(t)}{\sqrt{D_0 \delta}} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$d(t) = d_0 + r_d t \quad (3)$$

$$l(t) = l_0 + r_l t \quad (4)$$

式中: P_0 为管道失效压力, MPa; σ_f 为管道屈服强度, MPa; δ 为管道壁厚, mm; D_0 为管道外径, mm; M 为膨胀因子; t 为时间, a; $d(t)$ 为 t 时管道的缺陷深度, mm; d_0 为管道缺陷初始深度, mm; $l(t)$ 为 t 时管道的缺陷长度, mm; l_0 为管道缺陷初始长度, mm; r_d 为管道深度腐蚀速率, mm/a; r_l 为长度腐蚀速率, mm/a。

1.2 逆高斯随机过程的管道承载力退化模型

管道在运行过程中, 受内外环境等因素综合作用, 会出现不同程度腐蚀, 国内外学者大量调研了各种管道的腐蚀情况。目前, 多采用幂函数增长模型、二阶段指数模型和线性增长模型等确定性函数表示管道性能随时间的衰减。但管道性能随时间的退化是一个动态时变随机过程, 因此, 目前按确定性函数难以反映管道实际性能退化是随机过程的本质特征, 故采用逆高斯随机过程来模拟管道性能的退化过程。假设随机变量 X 服从逆高斯分布, 其概率密度函数 (Probability Density Functions, PDF) 为:

$$f[x|\mu, \lambda] = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x^3}} \exp\left[-\frac{\lambda(x - \mu)^2}{2\mu^2 x}\right], x > 0 \quad (5)$$

式中 $x \sim \text{IG}(\mu, \lambda)$, μ, λ 分别为逆高斯分布的位置参数和形状参数。

定义非负随机过程 $x(t)$, 若满足以下条件: ① $x(0) = 0$; ② $x(t)$ 是独立增量过程, 即对于任意 $0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$, $x(t_4) - x(t_3)$ 与 $x(t_2) - x(t_1)$ 相互独立; ③ 对任意 $\Delta t > 0$, 是独立增量过程, $x(t + \Delta t) - x(t)$ 服从逆高斯分布。则 $x(t)$ 为逆高斯过程, 其概率密度为:

$$f[x(t)|\mu\Lambda(t), \lambda\Lambda^2(t)] = \sqrt{\frac{\lambda\Lambda(t)}{2\pi x(t)^3}} \exp\left[-\frac{\lambda[x(t) - \mu\Lambda(t)]^2}{2\mu^2 x(t)}\right], x(t) > 0 \quad (6)$$

式中: $x(t) \sim \text{IG}(\mu\Lambda(t), \lambda\Lambda^2(t))$, $x(t)$ 服从均值为 $\mu\Lambda(t)$, 方差为 $\mu^3\Lambda(t)/\lambda$ 的逆高斯分布; $\Lambda(t)$ 为

形状函数, 表示退化形状, 是时间的单增函数, $\Lambda(0) = 0$ 。当 $\Lambda(t)$ 为线性函数时, 逆高斯过程为平稳随机过程; 当 $\Lambda(t)$ 为非线性函数时, 对应的逆高斯过程为非平稳随机过程, 通常认为逆高斯随机过程其形状函数为 $\Lambda(t) = t^q$ 或 $\Lambda(t) = \exp(qt)$, q 为指数参数^[10]。当 $\mu = 2, \lambda = 0.5, \Lambda(t) = t$, 时间步长为 10 年的性能退化量演化过程, 如图 1 所示, 每条演化曲线表示一条特定的演化路径, 具有明显的随机性。

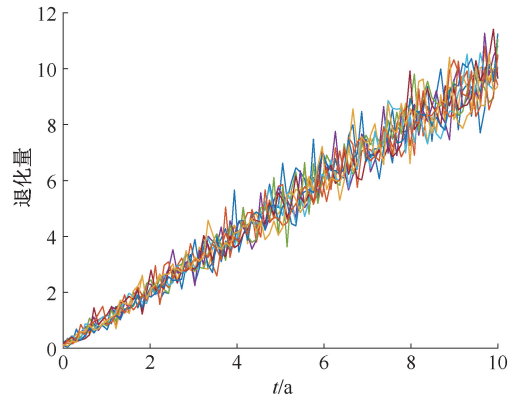


图 1 $\mu = 2, \lambda = 0.5, \Lambda(t) = t$ 时逆高斯随机过程演化曲线

Fig. 1 Evolution curves of inverse Gaussian stochastic process under $\mu = 2, \lambda = 0.5, \Lambda(t) = t$

任意 t 时刻, 管道承载力表示初始承载力 P_0 与退化量 $X(t)$ 的差值, 即:

$$P(t) = P_0 - X(t) \quad (7)$$

1.3 退化模型的参数估计

在逆高斯退化模型中, 模型参数包括 μ, λ 和 q (形状函数为 $\Lambda(t) = t^q$ 时), 假设管道在其运行期内有 n 个检测时间点 $t_1, t_2, \dots, t_n$, $X_k = \{x_0, x_1, \dots, x_k\}$ 为每个时间点对应的退化量, $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ 表示 $t_{i-1} \sim t_i$ 的退化增量。该模型的对数似然函数为

$$\ln L(\mu, \lambda, q) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\lambda t_i^q}{2\pi x_i^3} \right) - \frac{\lambda [x_i - \mu t_i^q]^2}{2\mu^2 x_i} \right] \quad (8)$$

对似然函数的 μ, λ 和 q 求偏导, 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L}{\partial \mu} = -\frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{-2(x_i - \mu t_i^q) t_i^q}{\mu^3 x_i} - \frac{2(x_i - \mu t_i^q)}{\mu^3 x_i} \right] \\ \frac{\partial \ln L}{\partial \lambda} = -\frac{n}{2\lambda} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu t_i^q)^2}{\mu^2 x_i} \\ \frac{\partial \ln L}{\partial q} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \ln t_i + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda (x_i - \mu t_i^q) (\mu t_i^q \ln t_i)}{\mu^2 x_i} \end{cases} \quad (9)$$

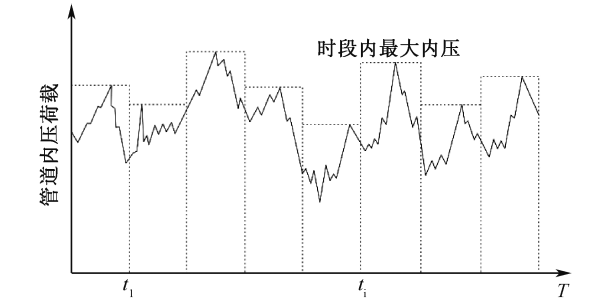
令式(9)中的 3 个表达式为 0,可得 μ 、 λ 和 q 的最大似然解。

2 管道内压荷载的随机过程模型

管道在运行过程中所受的荷载复杂,主要包括外荷载和内荷载。外荷载分为交通荷载、土壤荷载、霜冻荷载、膨胀土荷载和由于温度变化引起的膨胀收缩荷载;内荷载分为工作压力、浪涌压力和温度引起的压力变化^[19]。研究表明:管道其他荷载之和比管道工作压力小一个数量级^[21]。因此,仅研究管道内压荷载,实际上管道内压荷载也是一个离散的随机过程,随机变量服从独立同分布,给定压力序列大小由年最大内压的概率分布表征^[19,22-23]。考虑到管道内压荷载的离散型和随机性特点,采用平稳二项矩形波过程对其进行描述。平稳二项矩形波过程是一种常用于描述随机荷载的模型,其基本原理是将时间区段划分为若干等时段,在每个时段内荷载状态只有 2 种可能(出现或不出现),且不同时段之间相互独立,通过该过程,可以较好地描述管道内压荷载在时间上的变化特征。管道运行时,内压荷载随机过程如图 2 所示,随时间呈锯齿形变化,不考虑空间变异对内压荷载的影响,可将其简化为某时段内的最大内压 $Q(t)$ (图 3),采用 Poisson 过程描述管道内压荷载,其荷载模型表示为:

$$Q(t) = Q_0 + Q_i(t) \tag{10}$$

式中: Q_0 为管道运行内压的阈值; $Q_i(t)$ 为每次超过运行内压阈值的内压作用,认为独立同分布,即 $Q_i \sim E(q)$; i 为当前项的序号。



注: T 为管道使用期。

图 2 管道内压荷载随机过程

Fig. 2 Random process of internal pressure load

3 双随机过程概率模型及失效概率分析

基于管道承载力性能和管道运行内压作用的随机过程概率模型 $P(t)$ 和 $Q(t)$,对于使用期间未经

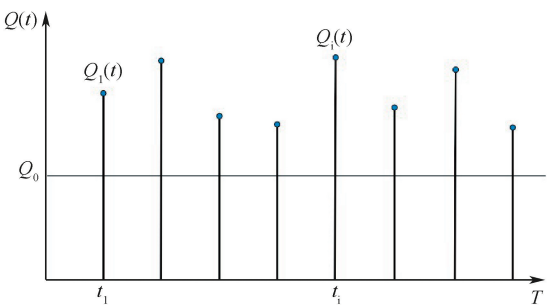


图 3 管道运行内压的随机过程描述模型

Fig. 3 Descriptive model of random process for internal pressure load

维护修理的管道,其可靠性分析的功能函数为:

$$Z(t) = P_0 - X(t) - Q_0 - Q_i(t) \tag{11}$$

在时间 $(0, t)$ 内,若 t_i 时刻内压荷载 Q_i 首次超过此时管道的承载力 P_i ,根据概率论及失效概率的定义,则管道失效概率为:

$$p_f(t) = \int_{P_0 - X(t) - Q_0}^{\infty} dE(q) \tag{12}$$

若在 $(0, T)$ 整个使用期,内压荷载 Q_i 超过管道的承载力 P_i 的次数为 n ,根据卷积定理,管道使用期 T 内的时变失效概率为:

$$p_f(T) = \prod_{i=1}^n \int_{P_0 - X(t) - Q_0}^{\infty} dE(q) = 1 - \prod_{i=1}^n E(P_0 - X(t) - Q_0) \tag{13}$$

假设管道承载力和内压荷载相互独立,基于抗力退化量模型 $X(t)$ 的概率密度和统计特征值,以及初始承载力 P_0 的概率分布和统计参数,管道时变失效概率函数表示为:

$$p_f(t) = 1 - \int_0^{\infty} f_{P_0}(p_0) dp_0 \int_{-\infty}^{\infty} E(\exp(-\theta T_s)) f_{Q_0}(q_0) dq_0 \tag{14}$$

$$p_s(t) = \int_0^{\infty} f_{P_0}(p_0) dp_0 \int_{-\infty}^{\infty} E(\exp(-\theta T_s)) f_{Q_0}(q_0) dq_0 \tag{15}$$

$$T_s = t - \int_0^t E(P_0 - X(t) - Q_0) dt \tag{16}$$

以上为考虑管道承载力-内压荷载双随机过程的时变失效概率分析模型,用于计算管道使用期内的时变失效概率并预测剩余寿命。图 4 为基于逆高斯随机过程的在役管道失效概率动态分析流程。

4 在役管道失效概率分析实例

某在役 AISI 1020 低碳钢管道,直径为 406.40 mm,壁厚为 12.70 mm,基本参数见表 1^[1,19]。

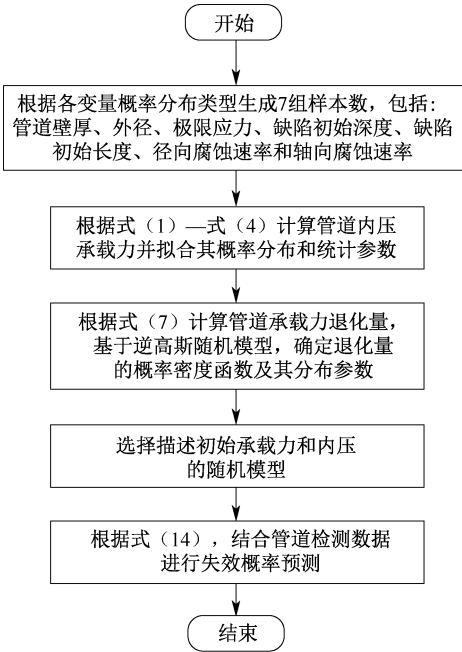


图4 基于逆高斯随机过程的在役管道失效
概率动态分析流程

Fig. 4 Flowchart of dynamic analysis of failure
probability for in-service pipelines based on
inverse Gaussian stochastic processes

不考虑管道内压初始承载力和内压荷载阈值的随机性,仅考虑性能退化和超过内压荷载阈值荷载的随机性。管道承载力性能随服役时间的增加而逐渐退化,由于没有完整的承载力退化检测数据,为验

表1 腐蚀管道的基本参数

Table 1 Basic parameters of corroded pipeline

参数	分布类型	均值	方差	变异系数/%
荷载内压 P_0/MPa	极值 I 型 分布	17.28	1.21	7.00
管径 D_0/mm	正态分布	406.40	0.41	0.10
壁厚 δ/mm	正态分布	12.70	0.13	1.00
屈服强度 σ_f/MPa	对数正态 分布	410.70	32.86	8.00
缺陷初始深度 d_0/mm	正态分布	2.54	0.25	10.00
缺陷初始长度 l_0/mm	正态分布	71.84	93.39	130.00
深度腐蚀速率 $r_d/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	对数正态 分布	0.30	0.15	50
长度腐蚀速率 $r_l/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	对数正态 分布	3.00	1.50	50

证所提方法可行性,采用文献[1,19]中的管道数据确定其承载力退化模型,基于提出的逆高斯随机过程模拟管道承载力退化模型,可得管道性能退化在任意时点的PDF及其分布参数,这里仅列出 $t=0、2、4、6、8、10$ 年时刻的,如图5所示。显然,随着时间的增加,管道承载力性能退化量均值呈线性增加,离散程度越来越大,其PDF和分布参数均随时间发生变化。

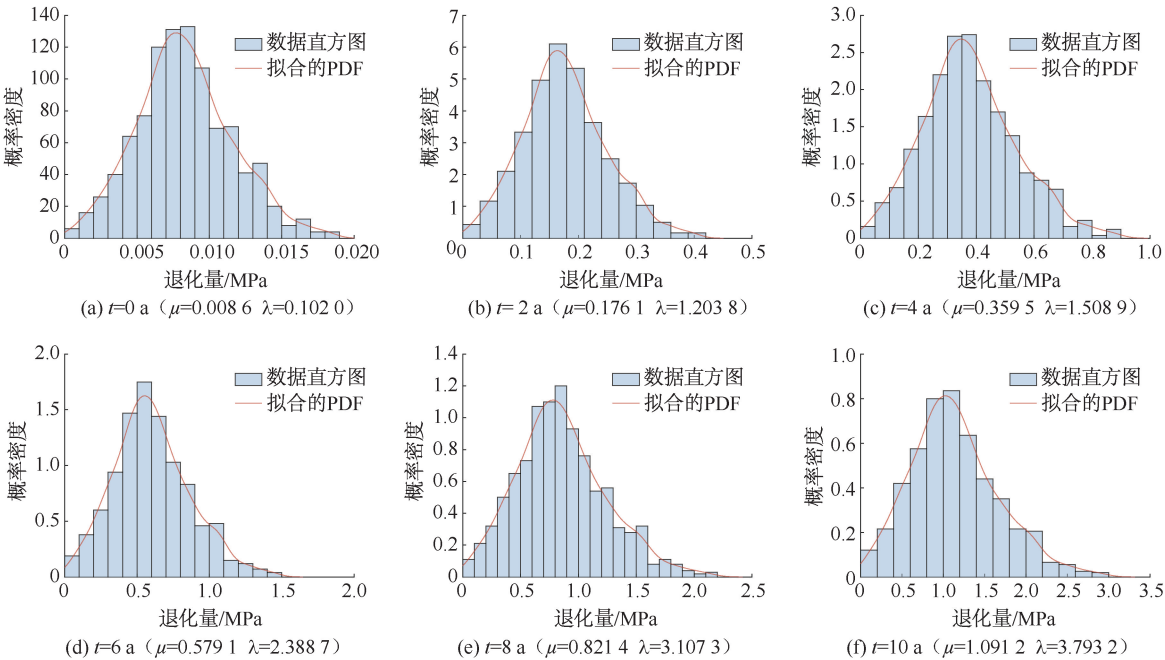


图5 不同使用年限下管道性能退化量 PDF 及其分布参数

Fig. 5 PDF and distribution parameters of pipeline performance degradation over different service years

为得到合适的形状参数,基于已得到的退化数据,引入决定系数 R^2 和误差平方和 (Sum of Square for Error, SSE) 评价^[24]。形状函数 $\Lambda(t) = t^q$ 的 $R^2 = 0.994$ 、 $SSE = 0.015$, $\Lambda(t) = \exp(qt)$ 的 $R^2 = 0.961$ 、 $SSE = 0.091$,不同形状函数的拟合如图 6 和图 7 所示。显然,形状函数 $\Lambda(t) = t^q$ 的拟合效果更佳,因此,选择 $\Lambda(t) = t^q$ 作为形状函数拟合。将确定好的形状函数应用于逆高斯退化模型,基于 1.3 节,在 Matlab 软件中计算得到管道承载力退化模型参数,见表 2。

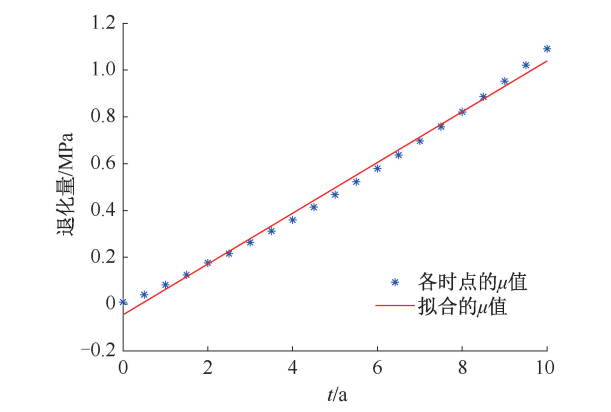


图 6 形状函数为 $\Lambda(t) = t^q$ 时的拟合图

Fig. 6 Fitting diagram of shape function $\Lambda(t) = t^q$

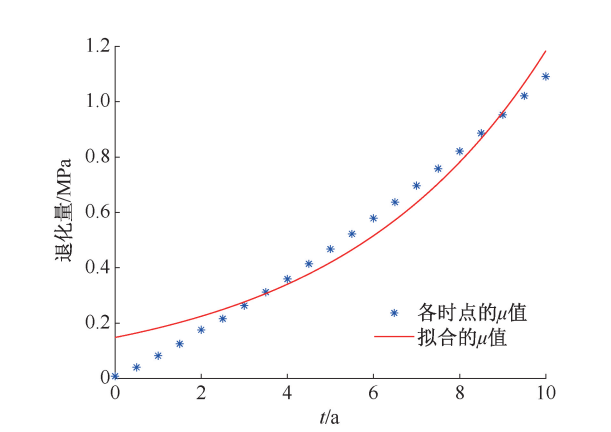


图 7 形状函数为 $\Lambda(t) = \exp(qt)$ 时的拟合图

Fig. 7 Fitting diagram of shape function $\Lambda(t) = \exp(qt)$

表 2 不同时刻的管道承载力逆高斯退化模型参数

Table 2 Parameters of inverse Gaussian degradation model for pipeline bearing capacity at different times

时间/a	μ	λ	q
2	0.082 4	0.001 382	1.085
4	0.082 7	0.001 408	1.059
6	0.342 6	0.001 416	1.110
8	0.074 4	0.001 359	1.150
10	0.070 0	0.001 283	1.187

基于各时点的退化数据和分布参数,可预测管

道在 $t=2, 4, 6, 8, 10$ 年时的失效概率曲线,如图 8 所示,横坐标为从预测时刻起管道再运行时间。随预测时刻增加,管道失效概率不断上升,但增长速率逐渐减小,相同预测时刻涨幅内,失效概率增长越高,管道可继续运行时间越短。退化数据对应的时间越小,时变失效概率曲线变化拐点越靠后,可继续运行时间延长,但失效概率的增加越快,退化数据对应的时间越大,拐点越提前,可继续运行时间缩短,失效概率的增加越慢。采用 $t=2$ 年的退化数据预测,失效概率增长程度低,增长速率慢,继续运行 14 年时进入大概率破坏时期,此时需对管道进行大规模的检修,使用寿命为 16 年;采用 $t=4$ 年的退化数据预测,失效概率增长程度提高,增长速率加快,继续运行 10 年时进入大概率破坏,使用寿命为 14 年;采用 $t=6$ 年的退化数据预测,继续运行 6 年进入大概率破坏,使用寿命为 12 年;采用 $t=8$ 年的退化数据预测,继续运行 3 年进入大概率破坏,使用寿命为 11 年;采用 $t=10$ 年的退化数据预测,管道已大概率破坏,无法继续运行,使用寿命为 10 年。显然,给定管道的失效概率时,基于不同时刻退化数据预测的管道失效概率和使用寿命各不相同。

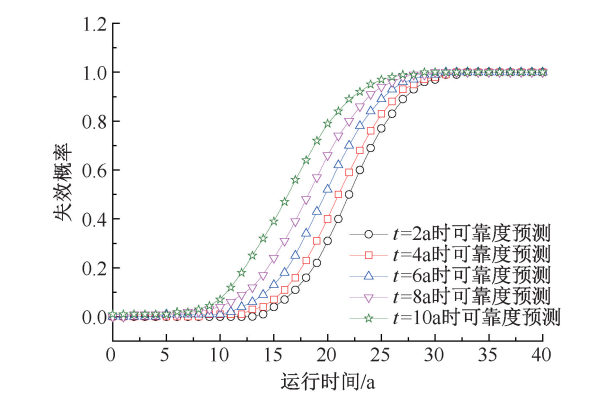


图 8 不同运行时刻预测的管道失效概率曲线

Fig. 8 Failure probability curves of pipeline at different predicted time points

在管道失效概率分析中,充分考虑了管道壁厚、管径、缺陷初始深度、缺陷初始长度、深度腐蚀速率和长度腐蚀速率、屈服强度、运行压力等因素对失效概率的影响,深入探究这些参数与失效概率之间的关联,对于优化管道设计、确保评定准确性及满足特定工程需求具有至关重要的作用,特别是在面对管道性能提升时,如增大输送流体流量、有效管理腐蚀过程以及确保服役期内的长期可靠性,科学合理地调整上述关键参数显得尤为重要。以文献[1]中的“管道”及相应的“失效概率”为基准,让管道壁厚、

管径、缺陷初始深度、缺陷初始长度、深度腐蚀速率和长度腐蚀速率、屈服强度、运行压力 8 个影响因素先后取“低值”和“高值”，每次变动一个参数，计算得到 $t=10$ 年时各参数变化对管道失效概率的影响，如图 9 所示，可知：壁厚、屈服强度、管径和运行压力对管道的失效概率影响最大，缺陷初始深度次之，缺陷初始长度、深度腐蚀速率和长度腐蚀速率影响较小。

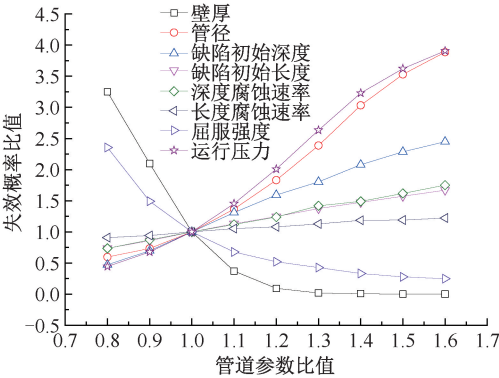


图 9 $t=10$ 年时各参数变化对管道失效概率的影响

Fig. 9 Impact of various parameter on pipeline failure probability at $t=10$ years

管道运行中壁厚小于设计要求或受损变薄时，其失效概率急剧增长，若壁厚变为 0.8 倍，失效概率提高至 3.25 倍；当满足设计要求且未受损时，失效概率较小；设计中若将壁厚提高 20%，失效概率降至 0.09 倍，但进一步增加壁厚，失效概率降低幅度不显著。屈服强度影响类似，但程度较小，若屈服强度为 0.8 倍，失效概率将提高至 2.35 倍；当屈服强度满足设计要求时，失效概率较小；屈服强度提高 20%，失效概率降至 0.52 倍，再次增加强度，失效概

率降低幅度不显著。运行压力对失效概率影响显著，当为设计压力的 80% 时，失效概率降至 0.44 倍；若运行压力提高 10%，失效概率变提高为 1.45 倍，若运行压力提高至 1.6 倍，失效概率骤升至 3.91 倍，因此，实际工程要注意超压运行管道。管径与运行压力影响类似，但实际中改变管径的情况较少。缺陷初始深度也影响管道的失效概率，实际中要注意其发展，因为这会在一定程度上影响管道壁厚。缺陷初始长度、深度腐蚀速率和长度腐蚀速率等影响较小，这是因为缺陷长度达到临界值后，其增加对管道的影响有限，而深度腐蚀速率和长度腐蚀速率的变异系数小，对失效概率的影响也不显著。

5 结 论

- 1) 该模型突破了传统确定性退化模型的局限，可更好地预测管道未来运行过程中的失效概率和剩余寿命。
- 2) 结合实际算例，预测了管道在 $t=2、4、6、8、10$ 年时的失效概率曲线，结果表明：采用 $t=2、4$ 年的退化数据进行预测的管道使用寿命为 16、14 年；采用 $t=6、8$ 和 10 年时刻的退化数据进行预测的管道使用寿命为 12、11 和 10 年。因此，采用退化数据更新管道性能的 PDF 和分布参数，能够更准确地反映管道的实际状况，从而提高管道剩余使用寿命预测的准确性。
- 3) 分析在役管道关键参数的灵敏性发现，壁厚、屈服强度、管径和运行压力对管道的失效概率影响最大，缺陷初始深度次之，缺陷初始长度、深度腐蚀速率和长度腐蚀速率影响较小。这可为管道的设计、制造、运行和维护提供参考依据。

参 考 文 献

[1] 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): 1 293-1 301.
ZHANG Peng, PENG Yang. Failure probability of corroded pipeline considering random variables correlation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1 293-1 301.

[2] 韩文海, 周晶. 腐蚀海底管道可靠性分析[J]. 石油学报, 2015, 36(4): 516-520.
HAN Wenhai, ZHOU Jing. Reliability analysis of corroded subsea pipeline [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 516-520.

[3] TEE K F, PESINIS K. Reliability prediction for corroding natural gas pipelines [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2017, 65: 91-105.

[4] 冉琰, 吉昱, 朱晓. 融合寿命信息与多性能退化信息的元动作单元可靠性评估[J]. 湖南大学学报, 2025, 52(2):

109–121.

RAN Yan, JI Yu, ZHU Xiao. Reliability assessment of Meta-action unit integrating lifetime information and multi-performance degradation information [J]. Journal of Hunan University, 2025, 52(2): 109–121.

- [5] 皇甫兰兰, 苏宏升, 林俊亭. 基于 Wiener 退化过程的动车组部件状态-机会维修模型分析与研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(2): 36–44.

HUANGFU Lanlan, SU Hongsheng, LIN Juntong. Condition-based opportunity maintenance model analysis and research for EMU components based on Wiener degradation process [J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(2): 36–44.

- [6] 冯洪, 齐金平, 刘晓宇, 等. 考虑随机变失效阈值的多相关退化可靠性建模[J]. 中国机械工程, 2024, 35(5): 811–820.

FENG Hong, QI Jinping, LIU Xiaoyu, et al. Reliability modeling for multi-correlation degradation considering random variable failure threshold [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(5): 811–820.

- [7] 张立杰, 阿喜塔, 田笑, 等. 基于 Gamma 过程的加速退化试验多目标优化设计[J]. 吉林大学学报, 2022, 52(2): 361–367.

ZHANG Lijie, A Xita, TIAN Xiao, et al. Multi-objective optimization design of accelerated degradation test based on Gamma process [J]. Journal of Jilin University, 2022, 52(2): 361–367.

- [8] 殷如心, 锁斌, 杨少华. 非单调 IG 过程运算放大器剩余寿命预测[J]. 探测与控制学报, 2025, 47(2): 127–134.

YIN Ruxin, SUO Bin, YANG Shaohua. Operational amplifiers residual life prediction based on processing inversion data and IG process [J]. Journal of Detection & Control, 2025, 47(2): 127–134.

- [9] 安绮梦, 闫在在, 孙立君. 基于逆高斯过程的二元退化可靠性建模与评估[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3 727–3 735.

AN Qimeng, YAN Zaizai, SUN Lijun. A bivariate degradation model for reliability analysis based on inverse Gaussian process [J]. Control and Decision, 2024, 39(11): 3 727–3 735.

- [10] WANG Xiao, XU Dihua. An inverse Gaussian process model for degradation data [J]. Technometrics, 2010, 52(2): 188–197.

- [11] JIANG Peihua, WANG Bingxing, WANG Xiaofei, et al. Inverse Gaussian process based reliability analysis for constant-stress accelerated degradation data [J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 105(6): 137–148.

- [12] 徐望喜, 钱永久, 金聪鹤, 等. 基于逆高斯随机过程的混凝土梁桥抗力退化模型[J]. 东南大学学报, 2024, 54(2): 303–311.

XU Wangxi, QIAN Yongjiu, JIN Conghe, et al. Resistance degradation model of concrete beam bridge based on inverse Gaussian stochastic process [J]. Journal of Southeast University, 2024, 54(2): 303–311.

- [13] PENG Weiwen, LI Yanfei, YANG Yuanjian, et al. Inverse Gaussian process models for degradation analysis: a Bayesian perspective [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2024, 230(2): 275–289.

- [14] ZHANG Shenwei, ZHOU Wenxing, QIN Hao. Inverse Gaussian process-based corrosion growth model for energy pipelines considering the sizing error in inspection data [J]. Corrosion Science, 2023, 73(23): 309–320.

- [15] 陈龙, 黄天立. 基于贝叶斯更新和逆高斯过程的在役钢筋混凝土桥梁构件可靠度动态预测方法[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 186–195.

CHEN Long, HUANG Tianli. Dynamic prediction of reliability of in-service RC bridges using the Bayesian updating and Inverse Gaussian process [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 186–195.

- [16] 张新生, 李亚云, 王小完. 基于逆高斯过程的腐蚀油气管道维修策略[J]. 石油学报, 2017, 38(3): 356–362.

ZHANG Xinsheng, LI Yayun, WANG Xiaowan. Maintenance strategy of corroded oil-gas pipeline based on inverse Gaussian process [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(3): 356–362.

[17] 张新生, 吕品品. 考虑随机效应的腐蚀管道贝叶斯退化分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(8): 73-80.
ZHANG Xinsheng, LYU Pinpin. Bayesian degradation analysis of corroded pipeline considering random effect[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(8): 73-80.

[18] 王艺斐, 苏春, 谢明江. 基于二元逆高斯过程的腐蚀输油管道剩余寿命预测[J]. 东南大学学报, 2020, 50(6): 1 038-1 044.
WANG Yifei, SU Chun, XIE Mingjiang. Remaining useful life prediction of corroded oil pipelines based on binary inverse Gaussian process [J]. Journal of Southeast University, 2020, 50(6): 1 038-1 044.

[19] 郭凌云, 周晶, 代云云. 基于不同随机退化过程的腐蚀管道时变失效概率[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1 542-1 552.
GUO Lingyun, ZHOU Jing, DAI Yunyun. Time-dependent failure probability of corroded pipelines based on different stochastic degradation processes [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1 542-1 552.

[20] 孙明明, 赵海盛, 方宏远, 等. 基于等效形状的不规则缺陷管道失效压力评估方法[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 319-329.
SUN Mingming, ZHAO Haisheng, FANG Hongyuan, et al. Failure pressure evaluation method of pipeline with irregular-shaped [J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 319-329.

[21] DATTA K, FRASER D R. A corrosion risk assessment model for underground piping [C]. 2009 Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2009:263-267.

[22] 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.

[23] ZHOU Wenxing. System reliability of corroding pipelines [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2010, 87(10): 587-595.

[24] 鄢伟安, 孔文琪, 刘卫东, 等. 具有初始退化随机特征的光伏组件可靠性评估[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 152-157.
YAN Weian, KONG Wenqi, LIU Weidong, et al. Reliability assessment of photovoltaic modules with initial degradation random characteristics [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(3): 152-157.

作者简介：程凯凯（1990—），女，甘肃天水人，博士，副教授，主要从事工程结构可靠性理论方面的研究。E-mail: chengkaikai_1990@126.com。

