

逆断层震错耦合下含腐蚀缺陷埋地管道 地震响应及预测方法研究

韩俊艳, 赵仕泽, 毕延松, 侯本伟*, 许成顺

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 传统有限元方法开展数值模型批量计算易受计算资源限制且耗时较长, 基于 BP 神经网络构建的结构响应预测方法可有效提高计算效率。采用 ABAQUS 有限元软件建立跨逆断层含腐蚀缺陷埋地管道三维数值模型, 研究管道腐蚀深厚比、径厚比、内压和埋深四项关键参数对管道地震响应的影响规律。基于参数分析结果, 将断层错动量及以上 4 项参数输入, 以管道轴向峰值压应变作为输出参数, 构建基于 BP 神经网络的跨逆断层含腐蚀缺陷埋地管道地震响应预测模型, 并结合数值计算结果数据集对预测模型进行了训练和验证。结果表明: 管道腐蚀深厚比、径厚比、内压、埋深的增加均会导致管道下盘峰值压应变达到限值时对应的断层错动量减小, 导致管道局部屈曲失效提前; 无内压管道和有内压管道的屈曲形式不同, 在应力集中处分别呈现为内陷屈曲和鼓胀屈曲; 腐蚀深厚比等 4 项参数与管道压应变响应高度相关, 且随断层错动量增加相关性由线性相关转变为非线性相关; 已完成训练的 BP 神经网络模型在管道压应变响应验证集和测试集上的最大预测误差分别为 13.60% 和 12.84%, 均小于 15%, 对于跨逆断层在役埋地管道的地震响应具有良好的预测性能和泛化能力。

关键词: 地质工程; 逆断层; 埋地管道; 震错耦合; 腐蚀缺陷; BP 神经网络

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2026)02 - 0537 - 16

第一作者: 韩俊艳 (1983 -), 现任副教授, 主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail: junyanhan@bjut.edu.cn

***通信作者:** 侯本伟 (1984 -), 现任副教授, 主要从事生命线地震工程领域的研究工作。E-mail: benweihou@163.com

Seismic response and predictive method for corroded buried pipelines under coupled reverse-fault displacement

HAN Junyan, ZHAO Shize, BI Yansong, HOU Benwei*, XU Chengshun

(Key Laboratory of Urban and Engineering Safety and Disaster Reduction of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Conventional finite element methods for large-scale numerical simulations are often constrained by high computational demands and extended runtimes. To enhance efficiency, we developed a predictive model based on a backpropagation (BP) neural network. A three-dimensional finite element model of a buried pipeline with corrosion defects crossing a reverse fault was established using ABAQUS. We systematically analyzed the effects of four key parameters—corrosion depth-to-thickness ratio, diameter-to-thickness ratio, internal pressure, and burial depth—on the seismic response of the pipeline. In this parametric study, fault displacement and the four key parameters served as inputs to the BP neural network, with the pipeline's axial peak compressive strain as the

收稿日期: 2025 - 06 - 19; **修回日期:** 2025 - 08 - 24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52494961, 5220105011); 国家重点研发计划项目 (2024YFC3808804)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52494961 and 5220105011) and National Key Research and Development Program (Grant No. 2024YFC3808804)

output. The model was trained and validated using training, validation, and test datasets. Results indicate that increasing the corrosion depth-to-thickness ratio, diameter-to-thickness ratio, internal pressure, or burial depth reduces the fault displacement necessary for the lower section of the pipeline to reach its strain limit. Failure modes differ between unpressurized and pressurized pipelines, exhibiting inward local buckling and outward bulging, respectively, at stress concentration zones. The four parameters are highly correlated with the compressive strain response, with correlations transitioning from linear to nonlinear as fault displacement increases. The trained BP neural network achieves maximum prediction errors of 13.60% on the validation set and 12.84% on the test set, both below 15%, demonstrating robust accuracy and generalization in predicting the seismic response of in-service buried pipelines across reverse faults.

Key words: geological engineering; reverse fault; buried pipeline; seismic-fault coupling; corrosion defect; BP neural network

First author: HAN Junyan (1983 -), associate professor, is engaged in research on seismic resistance of underground structures. E-mail: junyanhan@bjut.edu.cn

***Corresponding author:** HOU Benwei (1984 -), associate professor, is engaged in research within the field of lifeline seismic engineering. E-mail: benweihou@163.com

1 引言

我国地处环太平洋与欧亚地震带交汇处,活动断层分布广泛,长输管道不可避免地穿越地震高风险区。我国重要管道工程如西气东输一线途经5条地震带和8条活动断层,西气东输二线途经14条活动断层,西气东输三线途经5条地震带和30多条断裂带^[1];冀宁管道工程穿越18条断裂带^[2];涩宁兰输气管道穿越7条活动断裂带^[3]。国内外已有震害案例^[4-7]也表明,埋地管道常因地震与断层耦合作用引发的大应变而发生拉伸断裂或屈曲失效,造成严重的经济损失与次生灾害。

目前国内外学者对跨断层长线型地下结构的抗震研究逐渐从单一地震动或静力断层错动向地震-断层耦合作用拓展。在跨断层隧道研究领域不少学者开始考虑地震-断层耦合作用的影响:信春雷等^[8]开展了跨走滑断层隧道结构地震破坏机制的振动台模型试验研究,探究了地震单独作用与震错耦合下隧道的响应特征和破坏机制。闫高明等^[9]采用振动台模型试验研究了震错耦合加载方式下带柔性接头的隧道衬砌响应特征,发现震错耦合会放大衬砌接头的加速度响应,剪切破坏严重。陈之毅和郭远鹏^[10]采用数值模拟方法,量化了地震动单独作用、断层静力错动和震错耦合3种加载方式下隧道结构的损伤情况,证明了地震-断层耦合作用对跨断层隧道响应的影响不可忽略。相比之下,跨断层埋地管道的研究多数学者仍将断层错动简化为静力

线性位移^[11],仅有少数学者考虑了地震动与断层动态耦合的协同效应。W. W. Sim等^[12]通过振动台试验发现震错耦合下管道应变响应与静态假设存在偏差;范晓庆^[13]进一步探究了动态位移时程对管道变形规律的复杂影响。J. Y. Han等^[14]开展的埋地腐蚀管道研究发现,腐蚀缺陷会加剧断层错动下的局部应变集中,使管道更易发生屈曲或断裂。综上所述,目前国内外学者对震错耦合下埋地管道的响应研究已经取得了初步进展,含腐蚀缺陷管道的失效问题也得到了关注,但目前仍未完全解决震错耦合下在役管道响应及失效模式分析这一难题。

传统数值模拟方法依赖大量有限元计算,效率低且成本高昂。机器学习凭借其高效性与高精度,为地下结构响应预测提供了新思路。郑倩等^[15]基于BP神经网络实现了跨走滑断层管道应变响应的快速预测,最大相对误差低于10%;李杨等^[16]结合遗传算法优化BP神经网络,显著提升了海底管道应变预测精度;马素健^[17]利用BP神经网络建立活动断层作用下隧道的损伤范围预测模型,通过断层和隧道的各项参数预测隧道衬砌的破坏范围;这些研究验证了机器学习在地下结构响应预测中的潜力,为复杂工况下的管道抗震分析提供了新手段。

本研究基于ABAQUS软件建立跨逆断层含腐蚀缺陷管道的三维有限元模型,系统探究逆断层震错耦合下不同腐蚀深度、径厚比、内压及埋深对管道地震响应的影响规律。进一步基于有限元计算结果构建数据集,训练BP神经网络预测模型并验证其性能,以期跨断层在役管道的抗震设计与高效

计算提供理论依据和技术支撑。

2 跨逆断层埋地管道数值模型

2.1 数值模型的建立

基于 ABAQUS 有限元分析软件建立跨逆断层在埋地管道三维数值模型。I. Anastasopoulos 等^[18]研究表明,对于逆断层,断层倾角 $\varphi = 60^\circ$ 及管道与断层交叉角 $\beta = 90^\circ$ 组合是埋地管道受力的不利情况,在此组合下管道的响应强烈,可以更为直观地展示不同失效模式的破坏特征。因此本文选择断层倾角 $\varphi = 60^\circ$ 及管道与断层交叉角 $\beta = 90^\circ$ 的组合工况。为了消除边界条件的影响,确定土体尺寸为 $8\text{ m} \times 10\text{ m} \times 60\text{ m}$ ^[19],管道的直径(包含壁厚) $D = 0.9144\text{ m}$ ^[20],基础埋深为 2 m ^[21],基础壁厚 $t = 0.0119\text{ m}$ 。网格划分时,土体采用八节点减缩实体单元(C3D8R),管道采用四节点减缩厚壳单元(S4R),在断层面 20 m 范围内精细化网格,模型共 18 480 个单元,模型如图 1 所示。

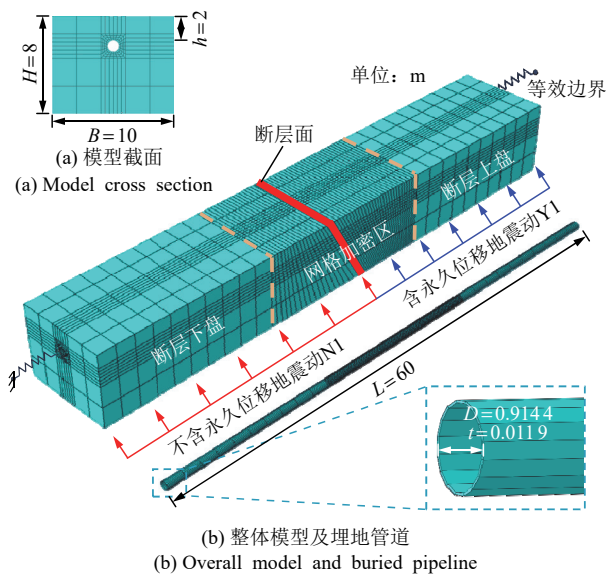


图 1 逆断层 - 管道三维数值分析模型

Fig.1 Reverse fault-pipeline 3D numerical analysis model

土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,具体参数如表 1 所示。管道选择 API 5L X65 钢管,管道模型

本构关系采用我国现行规范^[21]推荐的 Ramberg-Osgood 本构模型进行拟合。应力 - 应变关系如下所示:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{r}{1+n} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \right] \quad (1)$$

式中: ε 为总应变; σ 为应力(MPa); σ_y 为管材屈服应力,取值为 448.5 MPa; E 为管材弹性模量,取值为 210 GPa; n 和 r 为常数,分别取 14 和 8^[22]。

考虑到管道的外表面和土体会产生相互作用和相对滑移,因此在建立模型时采用表面 - 表面的离散化方法以及法向硬接触和切向罚摩擦公式来模拟管 - 土相互作用和断层的错动作用,管 - 土之间的摩擦因数选用 0.4^[23],土体之间的摩擦因数选用 0.6^[24]。

2.2 震错耦合荷载施加方式

与静力错动和先错后震相比,震错耦合将断层滑动与由此产生的地震波传播视为一个耦合的整体,统一分析两者同时发生及其相互作用的效应。通过这种方法,可以更准确地模拟近断层区域复杂的地面运动,其中永久位移和瞬时震动均对结构响应有显著影响。

依据孙静怡^[25]对跨断层桥梁结构地震响应的研究,将场地基岩设计反应谱设为目标谱,从美国 NGA 加速度记录数据库中选取了 1992 年 Landers 地震中的 2 条相互垂直的水平向加速度记录(LANDERS/LCN - 260 和 LANDERS/LCN - 345)作为初始地震动,记录台站的断层投影距为 2.2 km,用单脉冲函数来调整时程,通过反复地迭代对初始加速度时程进行调整,直至满足目标反应谱拟合的精度需求,获得含地面永久位移的近断层地震动。

震错耦合荷载施加方法是:假设主动盘一侧沿断层面方向输入的地震动分量包含全部永久位移,被动盘一侧输入的地震动不包含断层永久位移,在断层上下盘间形成位移时程差异。输入的地震动是根据场地基岩地震动加速度拟合获得的含永久位移的地震动(Y1)和不含永久位移的地震动(N1),如图 2 所示。施加的断层错动量 M 参考已有的经验预测公式^[26],计算求得为 1.2 m。调整地震动的峰值加

表 1 Mohr-Coulomb 本构模型土体的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil in Mohr-Coulomb constitutive model

| 土体(soil mess) | 密度 (density)/(kg · m ⁻³) | 弹性模量(elastic modulus)/MPa | 泊松比(Poisson's ratio) ν | 内摩擦角(internal friction angle) φ / (°) | 黏聚力 (cohesion)/kPa | 膨胀角(dilation angle) ψ / (°) |
|---------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------|---|--------------------|----------------------------------|
| 黏土 | 1 960 | 20 | 0.3 | 33.5 | 26 | 3 |

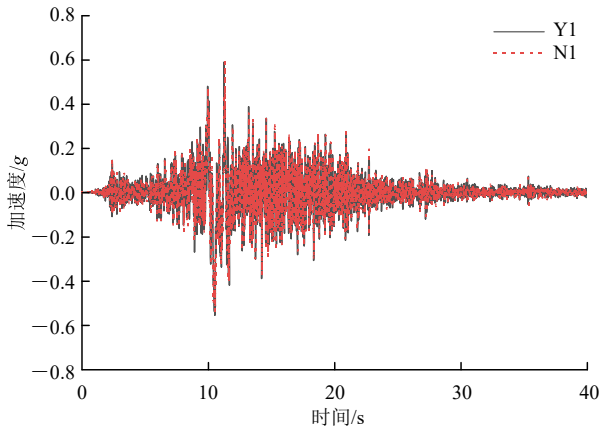


图2 含永久位移地震动(Y1)和不含永久位移地震动(N1)加速度时程曲线

Fig.2 Acceleration time-history curves of the ground motion with permanent displacement(Y1) and the ground motion without permanent displacement(N1)

速度 PGA 来改变 Y1 二次积分后的永久位移大小, 获得 1.2 m 位移量, 对应 Y1 与 N1 的 PGA 均为 0.8 g, 对应的位移时程曲线如图 3 所示。

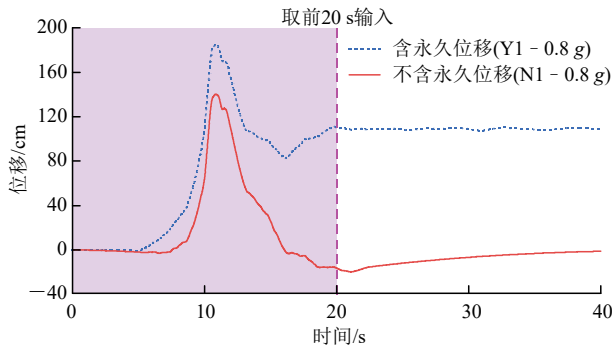


图3 有无永久位移地震动位移时程曲线

Fig.3 Displacement time history of the ground motions with and without permanent displacement

2.3 管道内腐蚀缺陷模拟

选用均匀壁厚缺陷作为腐蚀统一形貌。均匀腐蚀缺陷的三维尺寸由深度 d 、环向长度 c 和纵向长度 l 共同确定, Z. Zhang 等^[27]研究表明, 局部腐蚀区域可延伸至管道环向长度的 25%。考虑内腐蚀的最不利情况, 本文拟定腐蚀区域的环向长度为 0.24 m, 并假设腐蚀纵向长度 l 与环向长度 c 一致, 将腐蚀区域简化成边长为 0.24 m 的正方形, 如图 4 所示。

为找出管道内腐蚀最不利位置, 先计算完好管道在逆断层 60° 倾角工况下的力学响应, 依据应力云图确定受力集中处, 于断层上下盘管道局部屈曲位置设顶部内腐蚀缺陷。如图 5 所示, 图中 d 为腐蚀深度, c 为腐蚀区域的边长, L_1 和 L_2 分别为上下

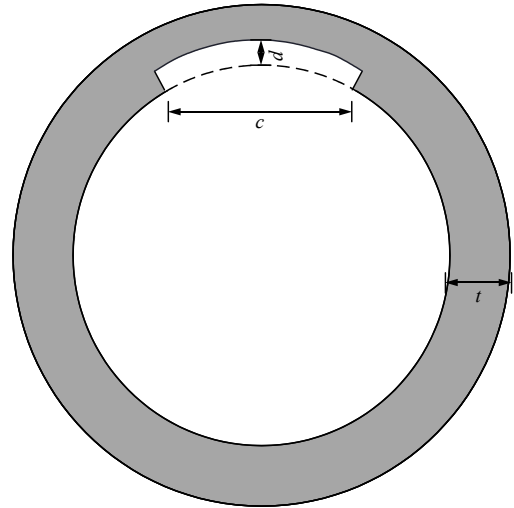
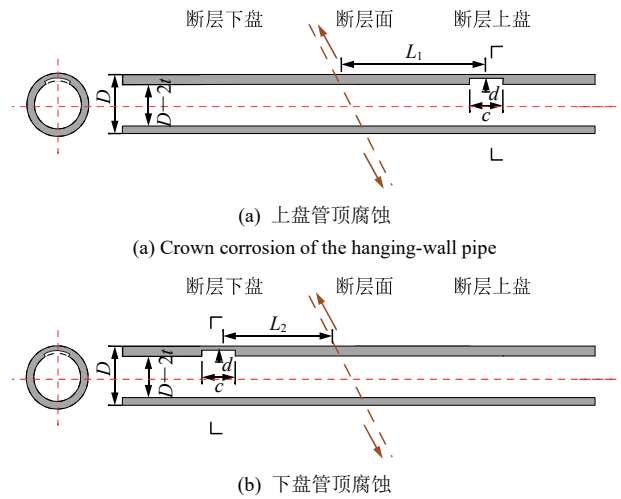


图4 管道顶部内腐蚀剖面图

Fig.4 Cross-sectional diagram of internal corrosion at pipeline's top



(a) 上盘管顶腐蚀
(a) Crown corrosion of the hanging-wall pipe

(b) 下盘管顶腐蚀
(b) Crown corrosion of the footwall pipe

图5 管道顶部内腐蚀位置示意图

Fig.5 Diagram of location of internal corrosion at pipeline's top

盘屈曲位置距断层面距离。韩俊艳等^[28]研究表明, 下盘腐蚀会导致管道屈曲失效显著提前, 是最不利情况, 因此本文选择的腐蚀位置为下盘管道应力集中处。

定义腐蚀深度 d 与管道壁厚 t 比值为腐蚀深厚比 d/t , 即腐蚀深度占管道壁厚的比例大小。根据庆 - 哈输油气管线首站至中一站的管道体积型缺陷统计数据^[29], 确定管道不同腐蚀深度的占比, 设计出腐蚀深厚比为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 五种腐蚀计算工况, $d/t = 0$ 时为完好管道, 随腐蚀深厚比增大腐蚀程度加重, 最严重腐蚀程度为管道壁厚的 40%。

2.4 跨逆断层埋地管道失效准则

管道拉伸失效对应的容许拉应变 $[\epsilon_1]$ 采用美国

土木工程协会埋地钢管设计规范(ASCE-ALA)给出的管道极限拉伸应变的建议值 2%。

管道的容许压缩应变 $[\epsilon_c]$ 采用 CSA-Z662—2007 规范给出的对应压力完整性极限状态作为含腐蚀管道屈曲失效的判断依据, 公式如下:

$$\epsilon_c^{crit} = 1.76 \frac{t}{D} \quad (2)$$

式中: ϵ_c^{crit} 为管壁的极限压缩应变(MPa)。管道的容许压缩应变 $[\epsilon_c]$ 取值与外径 D 和壁厚 t 相关, 需具体计算。本文所选失效模式判别如表 2 所示。

表 2 本文所选失效模式判别

Table 2 Identification of the selected failure modes in this paper

| 失效模式 (failure modes) | 对应指标 (corresponding indicator) | 本文选取限值 (selected limits) |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 拉伸断裂 | 容许拉伸应变 $[\epsilon_t]$ | 0.02 |
| 局部屈曲 | 容许压缩应变 $[\epsilon_c]$ | $1.76t/D$ |
| 截面过度变形 | 极限椭圆率 $[f]$ | 0.15 |

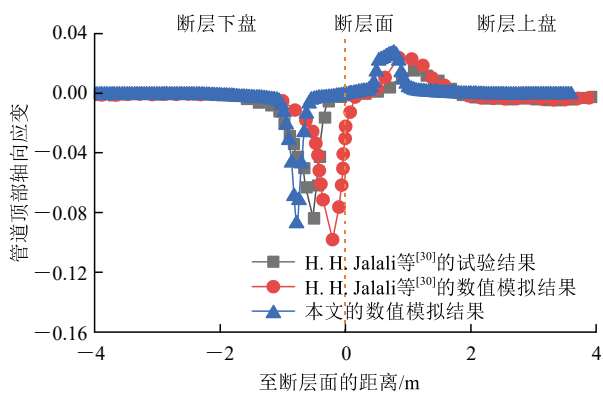
采用量纲一参数椭圆率 f 来衡量管道椭圆化程度, 公式如下:

$$f = \frac{\Delta D}{D} \quad (3)$$

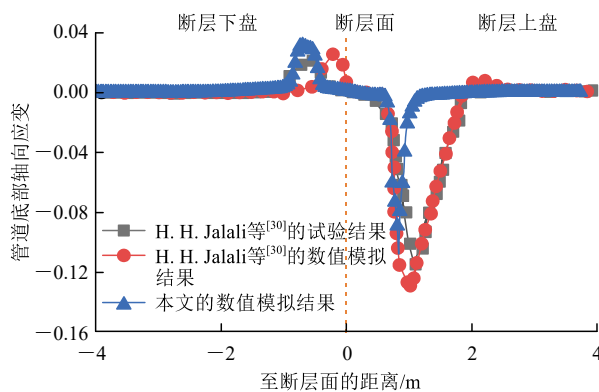
式中: ΔD 为管道外径的变化量。当椭圆率达到 0.15 时管道发生破坏。

2.5 数值模拟及荷载施加的验证

为验证本文数值模拟方法的可靠性, 与 H. H. Jalali 等^[30]已开展的跨逆断层管道足尺模型试验及数值模拟结果进行对比, 采用了与试验相同的几何尺寸和试验参数建立验证模型。图 6 为断层错动 0.6 m 时, 管道顶部和底部应变分布结果对比。由图可知, 本文数值模拟得到的管顶和管底压应变峰



(a) Axial strain distribution along the crown of the pipe



(b) 管底轴向应变分布

(b) Axial strain distribution along the invert of the pipe

图 6 管道轴向应变的数值模拟与试验对比

Fig.6 Comparison between numerical simulation and experiment of pipeline's axial strain

值分别为 0.085 和 0.109, 对应的试验结果分别为 0.081 和 0.115, 误差最大为 8%, 吻合较好, 与 H. H. Jalali 等^[30]的数值模拟结果相比, 本文模拟得到的管道应变峰值大小以及出现位置与试验结果更接近, 验证了模型的可靠性。

为了验证震错耦合荷载施加方式的合理性, 提取了断层上下盘相对位移时程, 如图 7 所示。由图可知, 断层上下盘相对位移曲线与地震位移时程走向一致, 上下盘相对位移与地震动永久位移大小相同, 场地变形响应可实现断层动态荷载的施加。图 8 为沿管道轴向和垂直管道轴向的场地加速度分量时程曲线图, 从图中可以看出场地各深度处的加速度存在放大效应, 随埋深减小加速度的放大效应增强。输入空间非一致地震动引发断层错动荷载得到的场地响应规律与现有研究结论高度符合^[31], 验证了震错耦合输入方式的合理性。

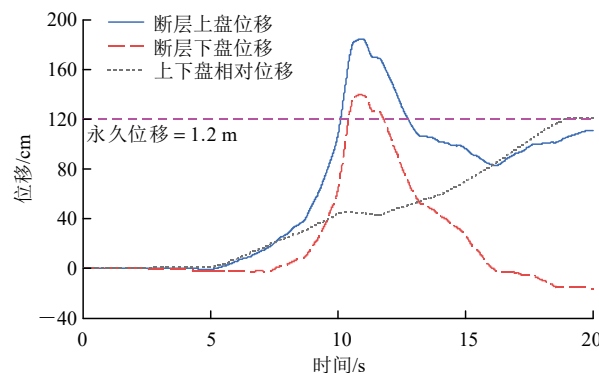


图 7 断层上下盘相对位移时程曲线

Fig.7 Time history of the relative displacement between hanging wall and foot wall

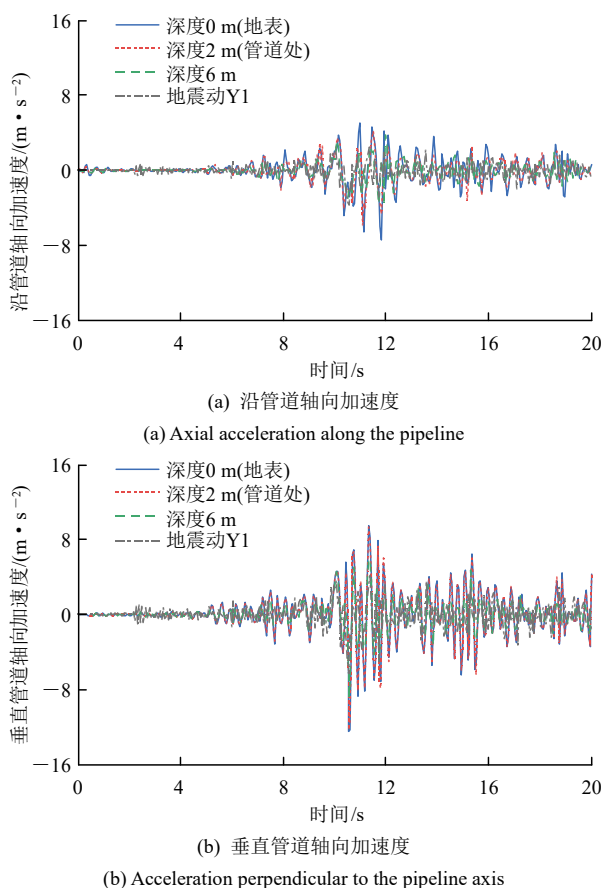


图8 不同深度场地土体的加速度时程曲线

Fig.8 Acceleration time history of soil at different depths

3 逆断层震错耦合作用下参数分析

3.1 管道腐蚀深厚比

腐蚀形貌选择均匀壁厚缺陷，顶部腐蚀缺陷设置在下盘管道的应力集中处，并探究腐蚀深厚比 $d/t =$

0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 时的管道地震响应。

图9为下盘管顶发生腐蚀，断层错动0.9 m时，不同腐蚀深度管道加密区的应力云图。由图可知，随腐蚀深厚比的增加，管道腐蚀位置的屈曲鼓胀程度更加显著，并且腐蚀位置的应力水平明显高于周边。逆断层震错耦合下，管道的应力集中位置关于断层面非对称分布，上盘管道屈曲位置距断层面的距离约为下盘管道屈曲位置的1/3。

图10(a)和(b)分别为下盘管顶不同腐蚀深度下管道下盘和上盘峰值轴向应变发展规律(图中，C和T分别表示受压区和受拉区)。由图可知，在相同断层错动量下下盘管顶腐蚀深厚比越大，管道下盘的峰值压应变越大，管道腐蚀加深造成管道发生局部屈曲的断层错动量提前，管道峰值压应变发展曲线上加快；在相同断层错动量下下盘管顶腐蚀深厚比对管道上盘的峰值压应变影响不显著，管道发生屈曲破坏对应的断层错动量没有随腐蚀深厚比的增加而提前；下盘管顶腐蚀深厚比对管道峰值拉应变无影响，管道拉应变始终未达到失效限值。图10(c)为下盘管顶不同腐蚀深度下管道峰值椭圆率发展规律。由图可知，腐蚀对于管道截面变形影响较小，且不同腐蚀深度工况管道截面椭圆率均未达到失效限值。表3汇总了下盘管顶不同腐蚀深度下管道失效时的临界断层错动量。

3.2 管道径厚比

为探究管道径厚比的影响，在保持管道外径、内压、埋深恒定的前提下，通过调整管道壁厚 t ，设定 D/t 分别为 144, 96, 72 三种计算工况。同时，将腐蚀位置设定在管道下盘应力集中处，并固定腐

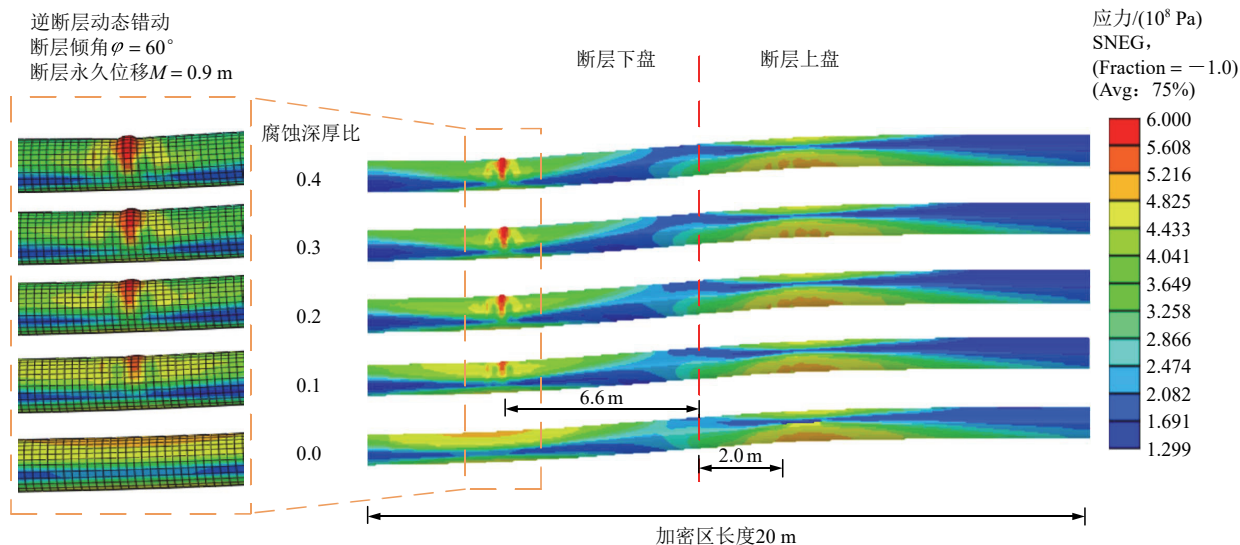


图9 下盘管顶腐蚀不同深度时管道加密区应力云图

Fig.9 Stress diagram with different corrosion depths at foot wall pipeline's top

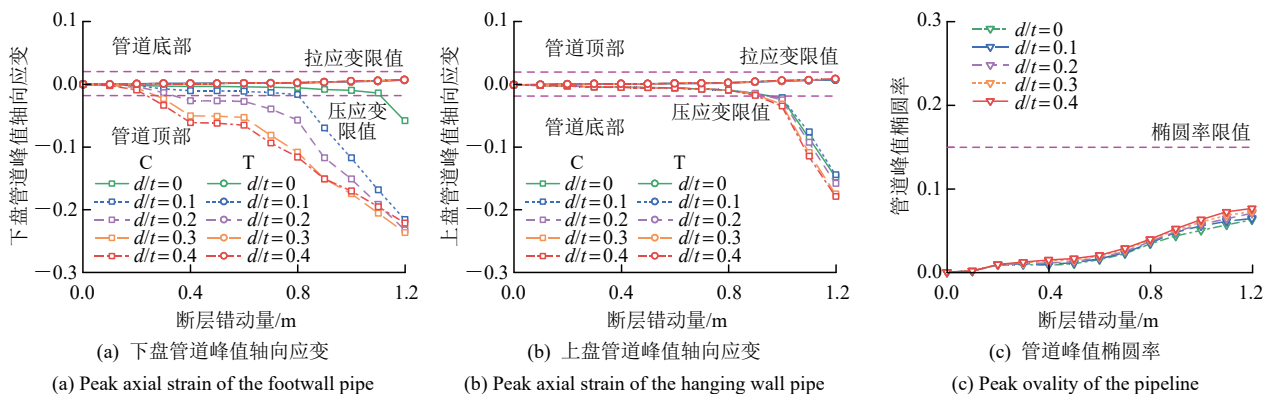


图 10 下盘管顶不同腐蚀深度下管道峰值轴向应变以及峰值椭圆率发展规律

Fig.10 Development of peak axial strain and peak ellipticity with different corrosion depths at foot wall pipe's top

表 3 下盘管顶不同腐蚀深度下管道失效对应的临界断层错动量

Table 3 Critical fault displacement corresponding to pipeline failure at different corrosion depths of the top of the lower coil pipe

| 失效模式 (failure modes) | 临界断层错动量(critical fault displacement)/m | | | | |
|-------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | $d/t=0.0$ | $d/t=0.1$ | $d/t=0.2$ | $d/t=0.3$ | $d/t=0.4$ |
| 局部屈曲 | 1.10 | 0.80 | 0.34 | 0.27 | 0.24 |
| 拉伸断裂 | - | - | - | - | - |
| 截面过度变形 | - | - | - | - | - |

蚀深厚比 $d/t = 0.4$ ，以此研究最不利腐蚀状况下管道的地震响应特性。

图 11 为下盘管顶发生腐蚀，断层错动 0.9 m 时，不同径厚比下管道加密区的应力云图。由图可知，

随径厚比增大管道 S 型变形加剧，应力集中位置逐步出现屈曲褶皱，管道顶部腐蚀造成屈曲凸起更加严重，环向范围进一步扩大。 $D/t = 72$ 时，仅在下盘出现微弱的屈曲现象； $D/t = 96$ 时，下盘屈曲程度加深，上盘未出现屈曲； $D/t = 144$ 时，下盘屈曲程度进一步加深，上盘出现屈曲，但屈曲程度弱于下盘。

图 12(a)和(b)分别为下盘管顶腐蚀时不同径厚比下管道下盘和上盘峰值轴向应变发展规律。由图可知，相同断层错动量下径厚比越大，管道的峰值压应变越大，管道下盘峰值压应变发展迅速，更快地达到压应变限值，发生局部屈曲；管道上盘在 $D/t = 96$ 和 144 下峰值压应变达到限值，对应的断层错动量要大于同条件下下盘管道局部屈曲破坏对应的断层错动量，即管道下盘要先于管道上盘发生

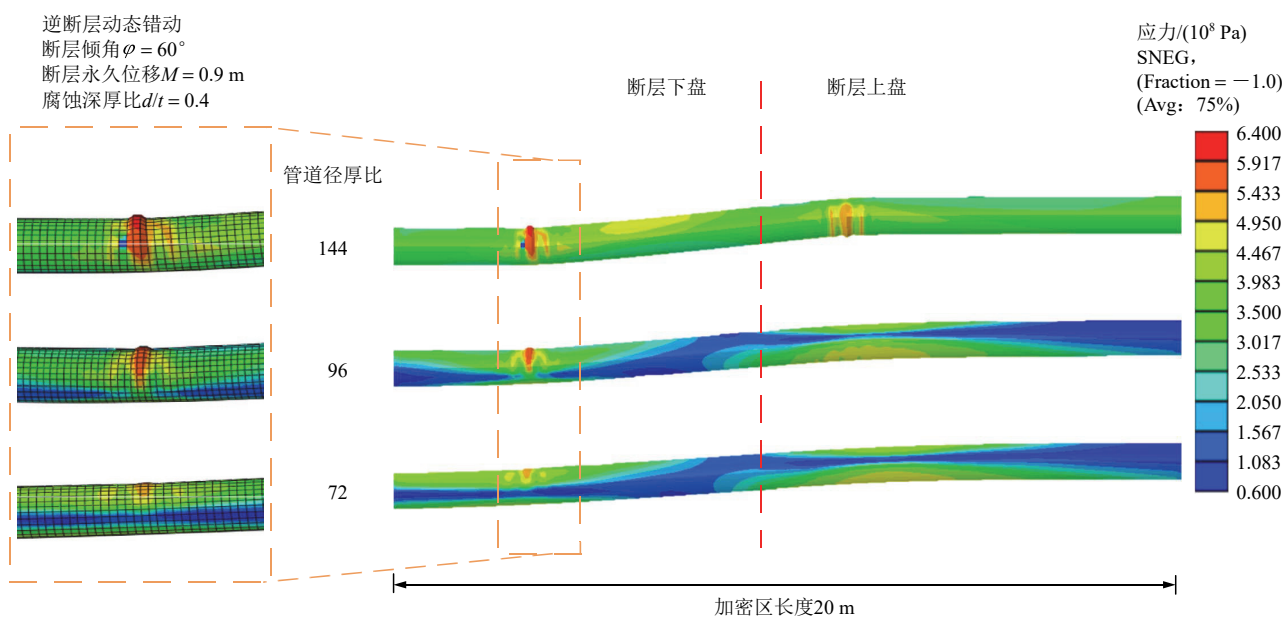


图 11 不同径厚比下管道加密区应力云图

Fig.11 Stress diagram under different diameter-thickness ratios

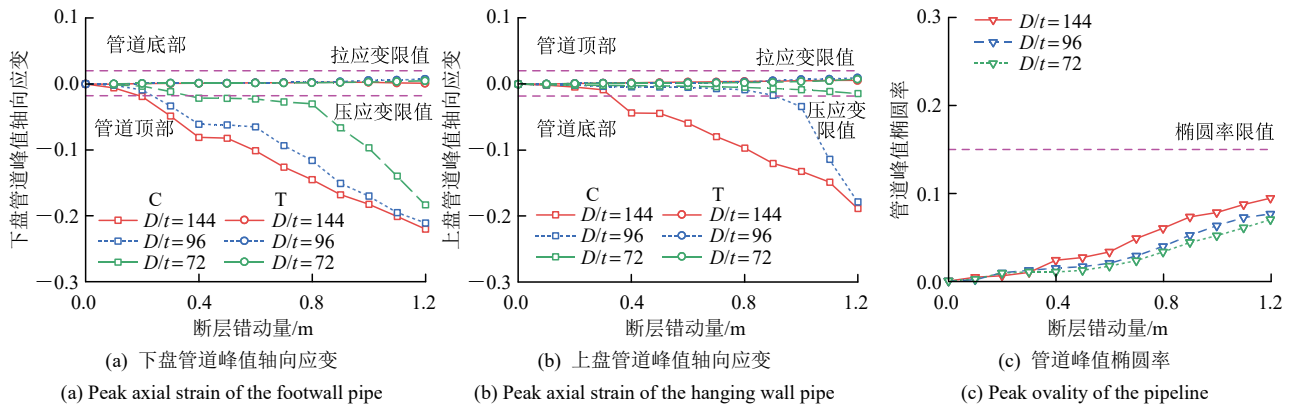


图 12 不同径厚比下管道峰值轴向应变以及峰值椭圆率发展规律

Fig.12 Development of peak axial strain and peak ellipticity under different diameter-thickness ratios

破坏；径厚比对管道峰值拉应变无显著影响，管道拉应变始终未达到失效限值。图 12(c)为下盘管顶腐蚀时不同径厚比下管道峰值椭圆率发展规律。由图可知，相同断层错动量下径厚比越大，管道截面刚度降低导致椭圆率增速和峰值增加，但并未达到椭圆率限值。表 4 汇总了下盘管顶腐蚀时不同径厚比下管道失效对应的临界断层错动量。

表 4 不同径厚比下管道失效对应的临界断层错动量

Table 4 Critical fault displacement corresponding to pipeline failure at different diameter-to-thickness ratios

| 失效模式 (failure modes) | 临界断层错动量(critical fault displacement)/m | | |
|-------------------------|--|------------|-------------|
| | $D/t = 72$ | $D/t = 96$ | $D/t = 144$ |
| 局部屈曲 | 0.37 | 0.24 | 0.19 |
| 拉伸断裂 | - | - | - |
| 截面过度变形 | - | - | - |

3.3 管道内压

内压 P 作为输气管道流体输送的核心参数，其合理控制对提升输送效率、降低能耗并保障流体流动的稳定性与均匀性至关重要。为此设定 0, 2, 4, 6 MPa 四种内压工况开展研究。在进行参数分析时，通过固定管道径厚比及埋深条件，同时假定腐蚀深厚比 $d/t = 0.4$ 的最不利腐蚀状态，探究不同内压作用下管道的地震响应特性。

图 13 为下盘管顶发生腐蚀，断层错动 0.9 m 时，不同内压下管道加密区的应力云图。由图可知，随着管道内压的增大，下盘管道屈曲位置的应力分布逐渐集中。在管道内压 $P = 0$ MPa 时，即无压管道的屈曲模式表现为内陷压溃；在管道内压 $P = 2, 4, 6$ MPa 时，即有压管道的屈曲模式表现

为鼓胀凸出。

图 14(a)和(b)分别为下盘管顶腐蚀时不同内压下管道下盘和上盘峰值轴向应变发展规律。由图可知，相同断层错动量下内压越大，管道的峰值压应变越大，管道下盘峰值压应变发展迅速，管道更快达到压应变限值，屈曲现象提前出现；管道下盘峰值拉应变发展缓慢，同条件下上盘峰值压应变达到限值对应的断层错动量要大于下盘，即管道下盘先于上盘出现局部屈曲破坏；内压对管道峰值拉应变无影响，管道拉应变始终未达到失效限值。图 14(c)为下盘管顶腐蚀时不同内压下管道峰值椭圆率发展规律。由图可知，无内压管道截面变形程度较大，有压管道截面刚度大，抑制了管道截面变形的发展，但都未达到椭圆率限值。表 5 汇总了下盘管顶腐蚀时不同内压下管道失效对应的临界断层错动量。

3.4 管道埋深

为探究埋深因素对跨断层管道的力学响应及失效模式的影响，选取埋深 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m 四种工况进行计算。在进行参数分析时，保持径厚比和内压不变，同时假定腐蚀深厚比 $d/t = 0.4$ ，研究最不利腐蚀情况下的管道力学响应。

图 15 为下盘管顶发生腐蚀，断层错动 0.9 m 时，不同埋深下管道加密区的应力云图。由图可知，随着埋深增加，管道的变形程度加剧，且管道上、下盘应力集中处位置逐渐向断层面靠近。在埋深 $h = 1.0$ m 时，管道并未出现屈曲现象；在埋深 $h = 1.5, 2.0, 2.5$ m 时，仅在管道下盘应力集中处出现局部屈曲。

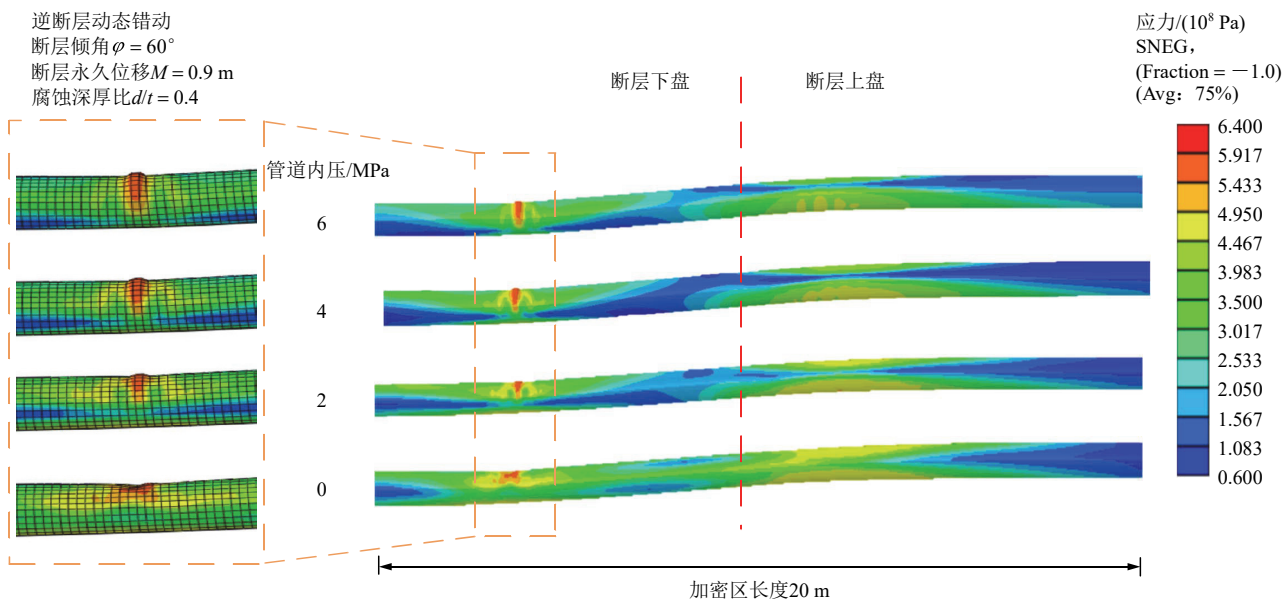


图 13 不同内压下管道加密区应力云图

Fig.13 Stress diagram under different internal pressures

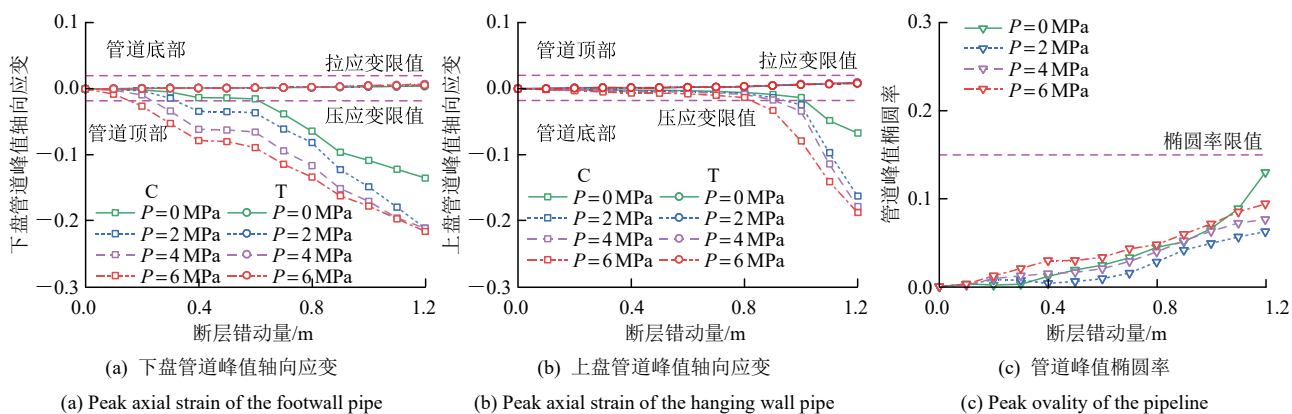


图 14 不同内压下管道峰值轴向应变以及峰值椭圆率发展规律

Fig.14 Development of peak axial and peak ellipticity strain under different internal pressures

表 5 不同内压下管道失效对应的临界断层错动量

Table 5 Critical fault displacement corresponding to pipeline failure under different internal pressures

| 失效模式 (failure modes) | 临界断层错动量(critical fault displacement)/m | | | |
|-------------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | P = 0 MPa | P = 2 MPa | P = 4 MPa | P = 6 MPa |
| 局部屈曲 | 0.61 | 0.32 | 0.24 | 0.16 |
| 拉伸断裂 | - | - | - | - |
| 截面过度变形 | - | - | - | - |

图 16(a)和(b)分别为下盘管顶腐蚀时不同埋深下管道下盘和上盘峰值轴向应变发展规律。由图可知，在相同断层错动量下埋深越大，管道的压应变峰值越大，管道下盘压应变峰值发展迅速，更快达到压应变限值，屈曲现象提前出现；管道下盘峰值

压应变发展缓慢，同条件下上盘峰值压应变达到限值对应的断层错动量要大于下盘；埋深对管道峰值拉应变无影响，管道拉应变始终未达到失效限值。图 16(c)为下盘管顶腐蚀时不同内压下管道峰值椭圆率发展规律。由图可知，埋深对管道截面变形响应有一定程度影响，随埋深增加管道椭圆率增长加快，峰值增大，且在断层错动较大距离后不同埋深管道的椭圆率峰值差异更为明显，但都未达到椭圆率限值。表 6 汇总了下盘管顶腐蚀时不同埋深下管道失效对应的临界断层错动量。

4 逆断层在役管道地震响应预测方法

本研究基于 BP 神经网络构建了跨逆断层在

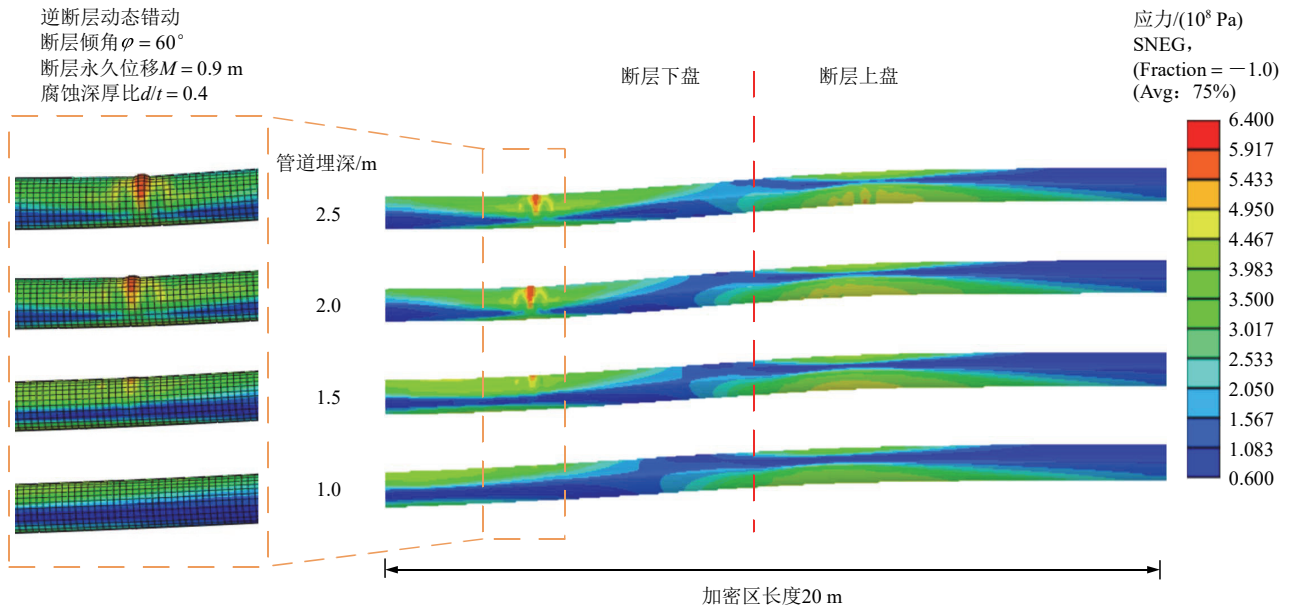
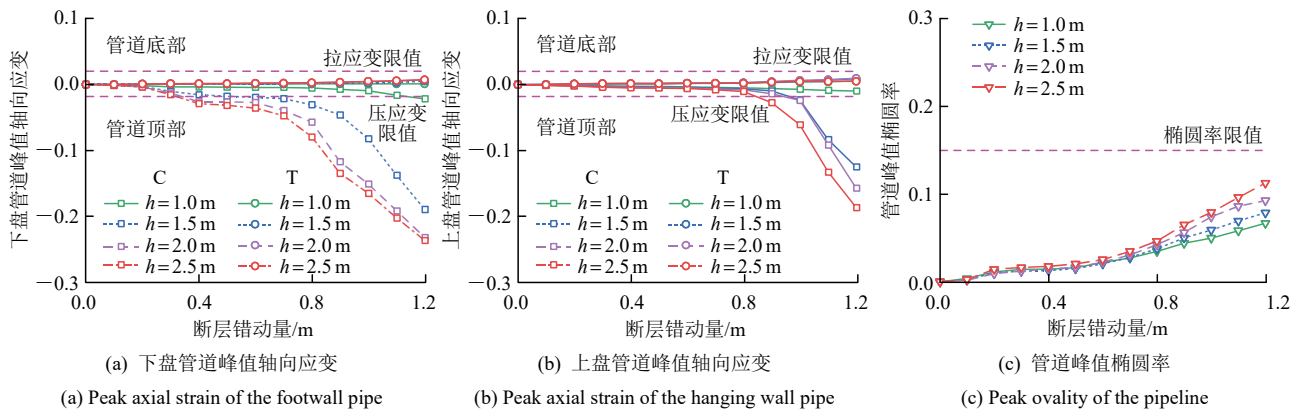


图 15 不同埋深下管道加密区应力云图

Fig.15 Stress diagram under different burial depths



(a) Peak axial strain of the footwall pipe

(b) Peak axial strain of the hanging wall pipe

(c) Peak ovality of the pipeline

图 16 不同埋深下管道峰值轴向应变以及峰值椭圆率发展规律

Fig.16 Development of peak axial and peak ellipticity strain under different burial depths

表 6 不同埋深下管道失效对应的临界断层错动量

Table 6 Critical fault displacement corresponding to pipeline failure at different burial depths

| 失效模式 (failure modes) | 临界断层错动量(critical fault displacement)/m | | | |
|-------------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|
| | $h = 1.0 \text{ m}$ | $h = 1.5 \text{ m}$ | $h = 2.0 \text{ m}$ | $h = 2.5 \text{ m}$ |
| 局部屈曲 | 1.13 | 0.53 | 0.34 | 0.32 |
| 拉伸断裂 | - | - | - | - |
| 截面过度变形 | - | - | - | - |

役埋地管道的地震响应预测模型^[32]。通过引入 Sigmoid 激活函数的隐含层结构,充分发挥神经网络在高度非线性映射关系中的表征优势^[15],以有限的数值模拟数据为训练样本,重点突破传统分析方法的计算效率瓶颈。

4.1 参数相关性分析

为探讨逆断层错动下在役埋地管道轴向压应变响应的主要影响因素,在建立 BP 神经网络预测模型之前,需要选取出于管道轴向压应变相关性较高的几项参数。很显然,断层错动量大小直接关系到管道响应程度,同时结合前面的参数分析结果,除断层错动量 M 之外,选取管道腐蚀深厚比 d/t 、管道径厚比 D/t 、管道内压 P 和管道埋深 h 四项参数,采用最小二乘迭代法,验证以上参数与逆断层错动下管道轴向压应变峰值 ϵ_{cmax} 的相关性。管道轴向压应变峰值 ϵ_{cmax} 实际为负值,为使结果展示更直观,以下均取 ϵ_{cmax} 的绝对值进行分析。

4.1.1 腐蚀深厚比与管道应变响应的相关性

为确定管道腐蚀深厚比 d/t 与管道轴向压应变

峰值 ϵ_{cmax} 之间的相关程度，分别取相同错动量下管道 ϵ_{cmax} 随 d/t 的变化规律进行分析。取腐蚀深厚比分别为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 固定断层错动量为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m, $D/t = 96$, $P = 4$ MPa, $h = 2$ m, 绘制各个错动量下管道 ϵ_{cmax} 与腐蚀深厚比 d/t 的散点图，并拟合曲线，如图 17 所示。

分析逆断层错动下管道 ϵ_{cmax} 随腐蚀深厚比 d/t 变化曲线可知，随着断层错动量增大，管道应变响应与腐蚀深厚比之间由线性相关转变为非线性相关，决定系数 R^2 最小为 0.94，最大为 0.99，均大于 0.8，说明在断层错动量一定的情况下，管道轴向压应变峰值 ϵ_{cmax} 与腐蚀深厚比 d/t 之间具有较高的相关性。

4.1.2 管道径厚比与管道应变响应的相关性

为确定管道径厚比 D/t 与管道轴向压应变峰值 ϵ_{cmax} 之间的相关程度，分别取相同错动量下管道 ϵ_{cmax} 随 D/t 的变化规律进行分析。取管道径厚比分别为 58, 74, 96, 144, 固定断层错动量为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m, $d/t = 0.4$, $P = 4$ MPa, $h = 2$ m, 绘制各个错动量下管道 ϵ_{cmax} 与径厚比 D/t 的散点图，并拟合曲线，如图 18 所示。

分析逆断层错动下管道 ϵ_{cmax} 随径厚比 D/t 变化曲线可知，随着断层错动量增大，管道应变响应与腐蚀深厚比之间由线性相关转变为非线性相关，决定系数 R^2 最小为 0.93，最大为 0.99，均大于 0.8，说明在断层错动量一定的情况下，管道轴向压应变峰值 ϵ_{cmax} 与径厚比 D/t 之间具有较高的相关性。

4.1.3 管道内压与管道应变响应的相关性

为确定管道内压 P 与管道轴向压应变峰值 ϵ_{cmax} 之间的相关程度，分别取相同错动量下管道 ϵ_{cmax} 随 P 的变化规律进行分析。取管道内压分别为 0, 2,

4, 6 MPa, 固定断层错动量为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m, $d/t = 0.4$, $D/t = 96$, $h = 2$ m, 绘制各个错动量下管道 ϵ_{cmax} 与内压 P 的散点图，并拟合曲线，如图 19 所示。

分析逆断层错动下管道 ϵ_{cmax} 随内压 P 变化曲线可知，随着断层错动量增大，管道应变响应与内压之间均呈现非线性相关，决定系数 R^2 最小为 0.94，最大为 0.98，均大于 0.8，说明在断层错动量一定的情况下，管道轴向压应变峰值 ϵ_{cmax} 与内压 P 之间具有较高的相关性。

4.1.4 管道埋深与管道应变响应的相关性

为确定管道埋深 h 与管道轴向压应变峰值 ϵ_{cmax} 之间的相关程度，分别取相同错动量下管道 ϵ_{cmax} 随 h 的变化规律进行分析。取管道埋深 h 分别为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m, 固定断层错动量为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m, $d/t = 0.4$, $D/t = 96$, $P = 4$ MPa, 绘制各个错动量下管道 ϵ_{cmax} 与埋深 h 的散点图，并拟合曲线，如图 20 所示。

分析逆断层错动下管道 ϵ_{cmax} 随埋深 h 变化曲线可知，随着断层错动量增大，管道应变响应与埋深之间由线性相关转变为非线性相关，决定系数 R^2 最小为 0.90，最大为 0.97，均大于 0.8，说明在断层错动量一定的情况下，管道轴向压应变峰值 ϵ_{cmax} 与埋深 h 之间具有较强的相关性。

综上所述，根据决定系数 R^2 可以将腐蚀深厚比 d/t 、管道径厚比 D/t 、管道内压 P 、管道埋深 h 对管道应变响应程度进行划分：腐蚀深厚比 $d/t >$ 管道径厚比 $D/t >$ 管道内压 $P >$ 管道埋深 h 。4 项主要参数单独对于管道轴向压应变峰值 ϵ_{cmax} 进行相关性分析发现均具有较强的相关性，因此在建立 BP 神经网络算法预测模型时，除断层错动量 M 之外，需要将上述参数同样作为预测模型的输入参数。

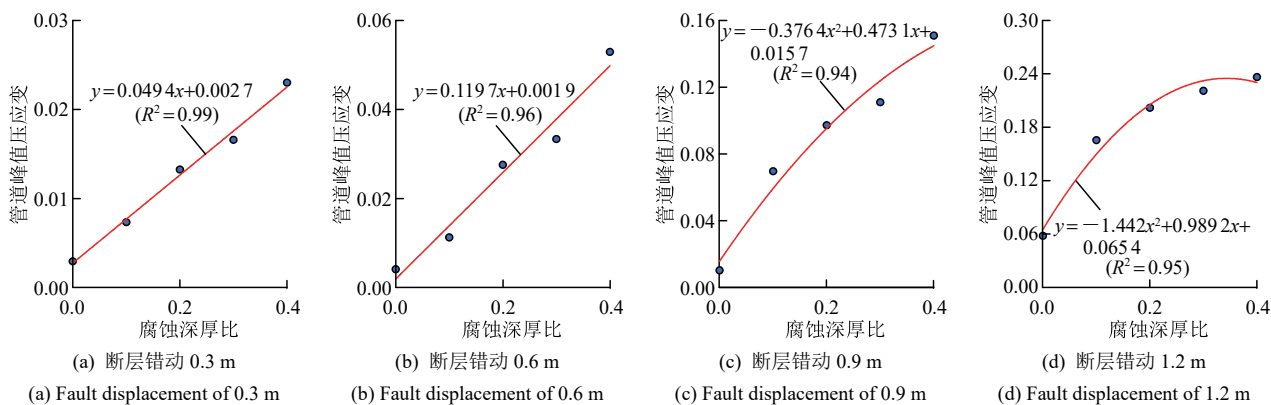


图 17 不同断层错动量下腐蚀深厚比与管道峰值压应变的相关性

Fig.17 Correlation between corrosion depth-thickness ratio and peak compressive strain of pipeline under different fault displacements

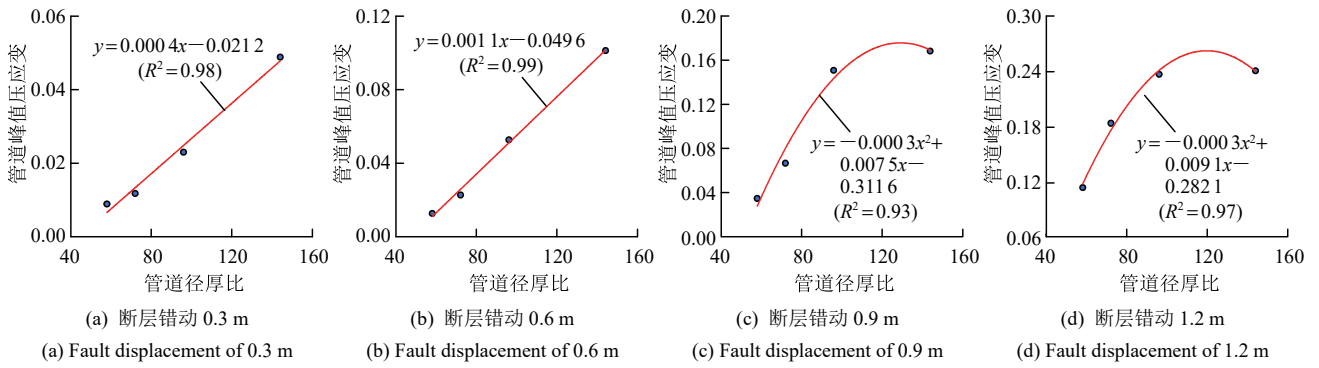


图 18 不同断层错动量下管道径厚比与管道峰值压应变的相关性

Fig.18 Correlation between diameter-thickness ratio of pipeline and peak compressive strain of pipeline under different fault displacements

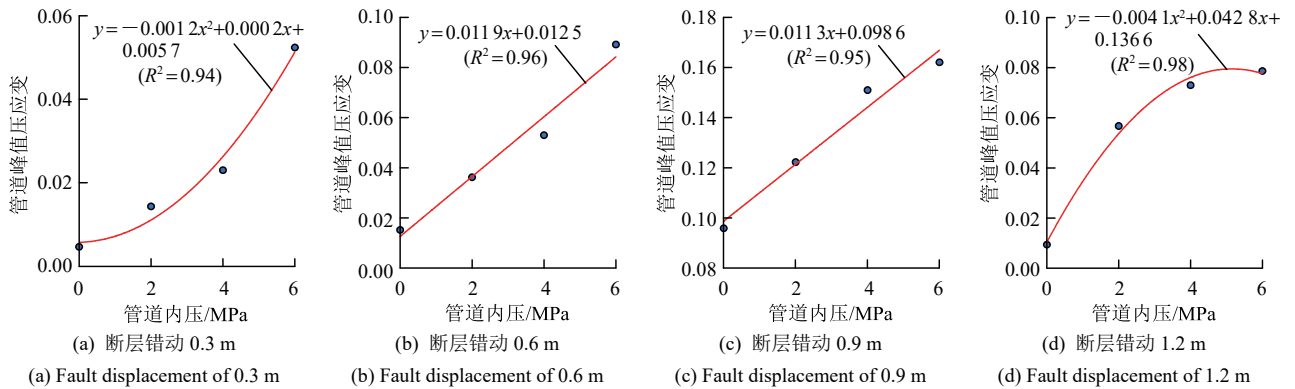


图 19 不同断层错动量下管道内压与管道峰值压应变的相关性

Fig.19 Correlation between pipeline internal pressure and pipeline peak compressive strain under different fault displacements

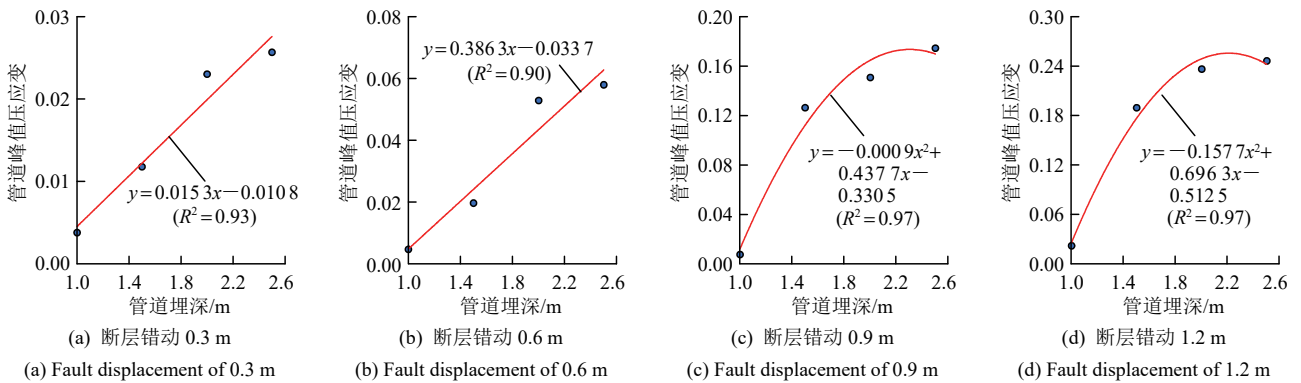


图 20 不同断层错动量下管道埋深与管道峰值压应变的相关性

Fig.20 Correlation between pipeline burial depth and pipeline peak compressive strain under different fault displacements

4.2 BP 神经网络预测模型建立

本文采用MATLAB 科学计算软件编写BP神经网络预测模型代码，具体的建模流程如图 21 所示：

(1) 将跨逆断层在役埋地管道数值模型的计算结果进行处理，将断层错动量 M 、腐蚀深厚比 d/t 、管道径厚比 D/t 、管道内压 P 和管道埋深 h 作为输入参数，管道轴向峰值压应变 ϵ_{cmax} 作为输出参数，将处理完毕的数据样本导入到编写好的 MATLAB 程序中。

(2) 利用 Mapminmax 函数将输入数据归一化，

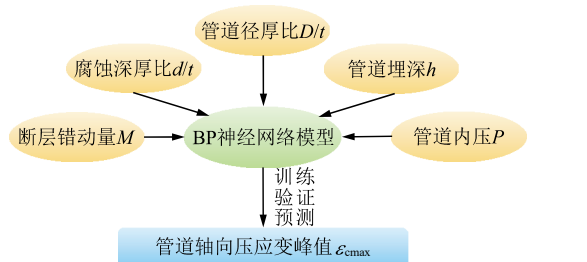


图 21 基于BP神经网络的跨逆断层在役埋地管道地震响应预测体系

Fig.21 Seismic response prediction system of in-service buried pipeline crossing reverse fault based on BP neural network

并采用 Randperm 函数将数据随机打乱，将处理后的数据按 70%，15%，15%的比例划分为训练集、验证集和测试集，开始构建网络。

(3) 设置 BP 神经网络参数的初始化设置，包括最大训练次数、学习率和训练误差阈值，多次迭代调整权重和偏置项至达到模型终止条件^[33]。

(4) 将输出数据反归一化，得到管道 ϵ_{cmax} 的预测输出结果，并计算相关指标决定系数 R^2 和均方根误差 R_{MSE} 。

4.3 BP 神经网络预测性能验证

基于含有 244 组数据的训练集完成 BP 神经网络模型训练，而后对含有 52 组数据的验证集进行预测，并拟合曲线如图 22 所示，直线 $y = x$ 代表预测值等于期望值，即预测点越接近该直线说明该点预测结果越准确。由图可知，验证集管道轴向压应变峰值的预测值和期望值较为接近，尤其在应变响应较小的情况下，预测值和期望值的离散度较小，而随着断层错动量增大，管道材料进入弹塑性阶段，同时管 - 土交界面的相互作用更为复杂，造成管道应变的预测值和期望值离散度增大。总体而言，已完成训练的 BP 神经网络模型得到的管道轴向压应变峰值预测结果决定系数 $R^2 = 0.97$ ，接近于 1，均方根误差 $R_{MSE} = 0.0069$ ，接近于 0，表明已完成训练的 BP 神经网络模型在管道轴向应变响应指标上的预测效果良好。

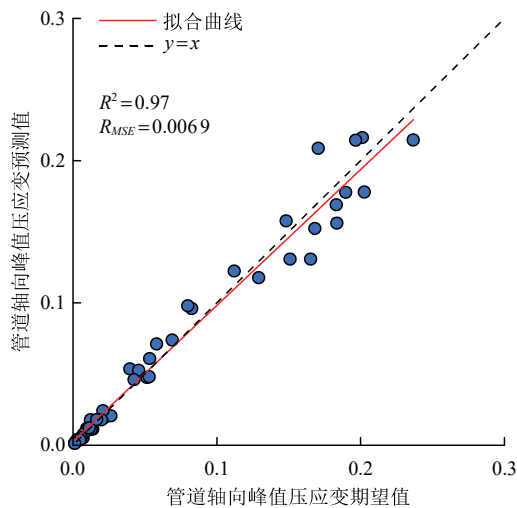


图 22 BP 神经网络对于验证集的预测结果

Fig.22 Prediction results of BP neural network for validation set

提取验证集部分工况的期望值和预测值，计算并汇总各工况误差，如图 23 和表 7 所示。由图可知，验证集管道应变预测结果的最大误差为

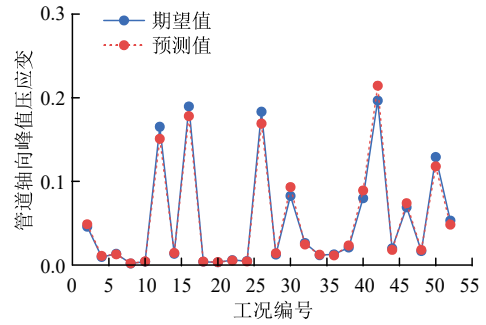


图 23 验证集部分工况的管道轴向峰值压应变预测值与期望值对比

Fig.23 Comparison between predicted values and expected values for peak axial compressive strain of the pipeline in validation set

表 7 验证集部分工况的管道轴向峰值压应变预测值与期望值误差比较

Table 7 Comparison of errors between predicted values and expected values for peak axial compressive strain of the pipeline in validation set

| 工况编号 (case ID) | 管道轴向峰值压应变(peak axial compressive strain of the pipeline) | | 误差 (percentage error)/% |
|-------------------|--|--------------------------|----------------------------|
| | 期望值 (expected value) | 预测值 (predicted value) | |
| 2 | 0.045 7 | 0.048 6 | 6.48 |
| 4 | 0.009 5 | 0.010 8 | 13.38 |
| 6 | 0.013 3 | 0.012 7 | 4.53 |
| 8 | 0.001 7 | 0.001 9 | 11.31 |
| 10 | 0.004 0 | 0.004 2 | 6.84 |
| 12 | 0.165 1 | 0.150 8 | 8.68 |
| 14 | 0.013 3 | 0.014 4 | 8.22 |
| 16 | 0.189 6 | 0.177 8 | 6.20 |
| 18 | 0.003 8 | 0.003 9 | 3.42 |
| 20 | 0.003 1 | 0.003 4 | 11.40 |
| 22 | 0.005 7 | 0.005 3 | 6.68 |
| 24 | 0.004 7 | 0.004 1 | 11.73 |
| 26 | 0.183 2 | 0.168 9 | 7.76 |
| 28 | 0.012 2 | 0.013 9 | 13.60 |
| 30 | 0.082 4 | 0.093 0 | 12.86 |
| 32 | 0.026 2 | 0.024 5 | 6.52 |
| 34 | 0.011 6 | 0.012 2 | 5.07 |
| 36 | 0.012 6 | 0.011 4 | 9.84 |
| 38 | 0.020 8 | 0.023 2 | 11.41 |
| 40 | 0.079 7 | 0.089 0 | 11.68 |
| 42 | 0.196 5 | 0.214 4 | 9.11 |
| 44 | 0.019 7 | 0.017 9 | 9.47 |
| 46 | 0.068 9 | 0.073 8 | 7.13 |
| 48 | 0.016 5 | 0.018 0 | 9.12 |
| 50 | 0.129 0 | 0.117 8 | 8.68 |
| 52 | 0.053 0 | 0.048 1 | 9.16 |

13.60%，未高于 15%，仍处于工程计算分析可接受误差范围内，印证了已建立的 BP 神经网络模型具备优良的预测性能和较高的准确度。

由于含有 52 组数据的测试集并未参与训练，未被 BP 神经网络认知，所以采用已完成训练的 BP 神经网络对测试集中的管道轴向压应变峰值进行预测，预测结果如图 24 所示，决定系数 $R^2 = 0.96$ 接近于 1，均方根误差 $R_{MSE} = 0.0083$ 接近于 0，预测结果精度较高，说明该模型具有优秀的预测以及泛化性能^[31]。

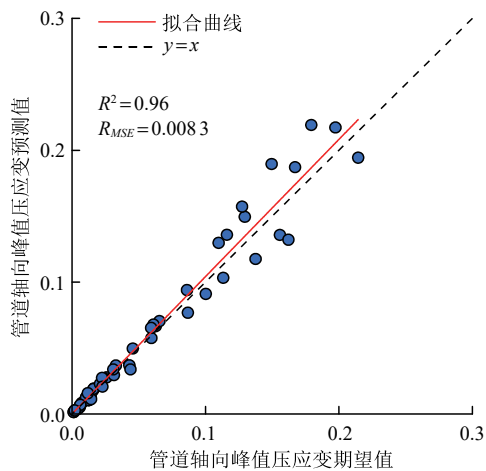


图 24 BP 神经网络对于测试集的预测结果

Fig.24 Prediction results of BP neural network for test set

提取测试集部分工况的期望值和预测值，计算并汇总各工况误差，如图 25 和表 8 所示。由图表可知，测试集管道轴向压应变峰值预测结果的最大误差为 12.84%，未高于 15%，印证了已完成训练的 BP 神经网络模型在具备优良预测性能的同时，兼备出色的泛化性能。

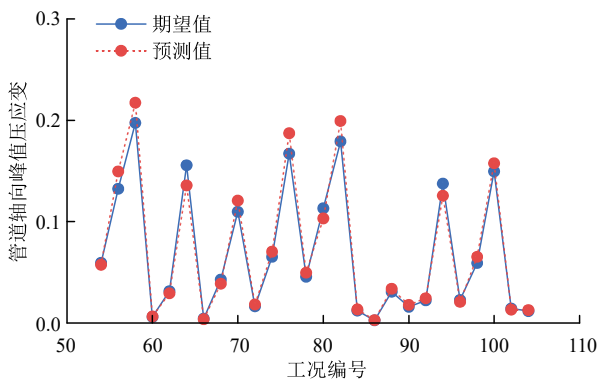


图 25 测试集部分工况的管道轴向峰值压应变预测值与期望值对比

Fig.25 Comparison between predicted values and expected values for peak axial compressive strain of the pipeline in test set

表 8 测试集部分工况的管道轴向峰值压应变预测值与期望值误差比较

Table 8 Comparison of errors between predicted values and expected values for peak axial compressive strain of the pipeline in test set

| 工况编号 (case ID) | 管道轴向峰值压应变(peak axial compressive strain of the pipeline) | | 误差 (percentage error)/% |
|-------------------|--|--------------------------|----------------------------|
| | 期望值 (expected value) | 预测值 (predicted value) | |
| 54 | 0.059 5 | 0.057 5 | 3.36 |
| 56 | 0.132 5 | 0.149 5 | 12.83 |
| 58 | 0.197 3 | 0.217 3 | 10.13 |
| 60 | 0.006 0 | 0.006 4 | 6.64 |
| 62 | 0.031 4 | 0.029 4 | 6.36 |
| 64 | 0.155 7 | 0.135 7 | 12.84 |
| 66 | 0.003 8 | 0.004 3 | 11.66 |
| 68 | 0.042 9 | 0.038 9 | 9.33 |
| 70 | 0.109 7 | 0.120 7 | 10.02 |
| 72 | 0.016 4 | 0.018 4 | 12.19 |
| 74 | 0.065 4 | 0.070 4 | 7.65 |
| 76 | 0.167 1 | 0.187 1 | 11.97 |
| 78 | 0.045 6 | 0.049 6 | 8.78 |
| 80 | 0.113 2 | 0.103 2 | 8.83 |
| 82 | 0.179 2 | 0.199 2 | 11.16 |
| 84 | 0.012 2 | 0.013 5 | 10.64 |
| 86 | 0.002 6 | 0.002 9 | 11.54 |
| 88 | 0.030 8 | 0.033 8 | 9.74 |
| 90 | 0.016 0 | 0.018 0 | 12.53 |
| 92 | 0.022 5 | 0.024 5 | 8.90 |
| 94 | 0.137 6 | 0.125 6 | 8.71 |
| 96 | 0.022 8 | 0.020 8 | 8.77 |
| 98 | 0.059 3 | 0.065 3 | 10.13 |
| 100 | 0.149 6 | 0.157 6 | 5.35 |
| 102 | 0.014 3 | 0.013 3 | 7.01 |
| 104 | 0.011 8 | 0.012 8 | 8.45 |

5 结 论

本文采用数值模拟方法，系统研究了腐蚀深厚比、径厚比等关键参数对跨逆断层埋地管道地震响应与失效模式的影响规律，结合有限元分析与人工神经网络技术，提出了一种基于 BP 神经网络的跨逆断层在役埋地管道地震响应预测模型，并验证了模型的预测准确性和泛化能力，得出以下主要结论：

(1) 含腐蚀缺陷管道在逆断层震错耦合下，腐蚀促使管道地震响应愈发剧烈，相比完好管道，20%

腐蚀深度即可使管道屈曲失效对应错动量降低至完好管道的 30%，严重削弱管道的抗震性能，导致屈曲失效大幅提前。

(2) 管道壁厚比减小使得管道抗弯刚度提升，逆断层震错耦合下管道的“S 型”变形程度显著降低，管道发生屈曲失效对应临界断层错动量最高增幅约 50%；管道内压与管道局部屈曲形式密切相关，无压管道在应力集中位置产生内陷屈曲，截面椭圆率高出有压管道约 45%；有压管道的应力集中范围更小，发生均匀凸出的鼓胀屈曲，一定程度抑制截面过度变形，随内压增大管道屈曲失效对应错动量最高降幅约 50%；管道埋深增加将改变管道周边应力状态，管道周围土压力与管-土摩擦力增大，管道在断层运动下的地震响应逐渐增加，随埋深增大管道屈曲失效对应错动量最高降幅约 53%。

(3) 实际工程中，建议在预算范围内管道尽量采用 $D/t < 100$ 的厚壁、浅埋管道，工作内压维持在 $50\%P_{\max}$ 以上。

(4) 已完成训练的 BP 神经网络模型，对于验证集管道地震响应预测结果的决定系数 R^2 高达 0.97 接近于 1，均方根误差 $R_{MSE} = 0.0069$ 接近于 0，预测结果的最大误差为 $13.60\% < 15\%$ ；将未参与训练的测试集数据输入模型，可得到 BP 神经网络模型预测管道地震响应的 R^2 高达 0.96 接近于 1，均方根误差 $R_{MSE} = 0.0083$ 接近于 0，预测结果的最大误差为 $12.84\% < 15\%$ ，表明对于跨逆断层在役埋地管道的地震响应，已完成训练的 BP 神经网络模型同时具备良好的预测精度和出色的泛化能力。

参考文献(References):

- [1] 赵应奎. 西气东输三线输气管道工程线路区域地震地质环境与地质灾害[J]. 工程地质学报, 2015, 23(增): 526 - 533.(ZHAO Yingkui. Seismic geological environment and geological hazards in the area of the route of the third line of west-east gas pipeline project[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(Supp.): 526 - 533.(in Chinese))
- [2] 李志勇, 王福胜, 许砚新. 冀宁管道工程断裂带抗震设计简介[J]. 中国勘察设计, 2006, (10): 69 - 71.(LI Zhiyong, WANG Fusheng, XU Yanxin. Introduction to seismic design of fracture zone of Jining pipeline project[J]. China Survey and Design, 2006, (10): 69 - 71.(in Chinese))
- [3] 苏欣, 陈静, 杨汗青, 等. 涩宁兰输气管道复线抗震设计探讨[J]. 天然气与石油, 2009, 27(3): 14 - 19.(SU Xin, CHEN Jing, YANG Hanqing, et al. Discussion on the seismic design of Shibining-Lan gas pipeline duplex[J]. Natural Gas and Petroleum, 2009, 27(3): 14 - 19.(in Chinese))
- [4] 王祥建, 郭思栋, 张美晶. 汶川地震燃气管道震害分析及对策[J]. 世界地震工程, 2012, 28(4): 44 - 50.(WANG Xiangjian, GUO Endong, ZHANG Meijing. Analysis of gas pipeline damage and countermeasures in Wenchuan earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(4): 44 - 50.(in Chinese))
- [5] 姚志祥. 格拉管道一次地震断裂分析及防范措施[J]. 管道技术与设备, 2003, (6): 23 - 44.(YAO Zhixiang. Analysis of a seismic rupture of Gera pipeline and preventive measures[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2003, (6): 23 - 44.(in Chinese))
- [6] 李娥. 埋地管道的震害及对策[J]. 工程抗震, 1991, (1): 48 - 49.(LI E. Earthquake damage and countermeasures for buried pipelines[J]. Engineering Seismicity, 1991, (1): 48 - 49.(in Chinese))
- [7] 张敏政. 土耳其伊兹米特地震震害考察[J]. 工程抗震, 2000, (4): 34 - 38.(ZHANG Minzheng. Investigation of earthquake damage in Izmit, Turkey[J]. Engineering Seismicity, 2000, (4): 34 - 38.(in Chinese))
- [8] 信春雷, 高波, 闫高明, 等. 跨走滑断层隧道地震破坏特征与抗震减灾措施研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(4): 694 - 703.(XIN Chunlei, GAO Bo, YAN Gaoming, et al. Research on seismic damage characteristics and seismic mitigation measures of tunnels across strike-slip faults[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(4): 694 - 703.(in Chinese))
- [9] 闫高明, 申玉生, 高波, 等. 穿越断层隧道钢筋橡胶接头振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 129 - 135.(YAN Gaoming, SHEN Yusheng, GAO Bo, et al. Experimental study on vibration table of reinforced rubber joints in tunnels through faults[J]. Vibration and Shock, 2021, 40(13): 129 - 135.(in Chinese))
- [10] 陈之毅, 郭远鹏. 断层错动和地震动共同作用下跨断层隧道的损伤分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(1): 132 - 137.(CHEN Zhiyi, GUO Yuanpeng. Damage analysis of cross-fault tunnels under the combined effect of fault misalignment and ground shaking[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1): 132 - 137.(in Chinese))
- [11] 徐龙军, 张建宇, 靳超越, 等. 跨断层工程结构研究中地震断层作用研究综述[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(4): 139 - 151.(XU Longjun, ZHANG Jianyu, JIN Chaochao, et al. A review on the role of earthquake faults in the study of cross-fault engineering structures[J]. Journal of Natural Hazards, 2024, 33(4): 139 - 151.(in Chinese))
- [12] SIM W W, TOWHATA I, YAMADA S. One-g shaking-table experiments on buried pipelines crossing a strike-slip fault[J]. Geotechnique, 2012, 62(12): 1067 - 1079.
- [13] 范晓庆. 逆断层动态位错作用下埋地管道的振动台试验及变形规律研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2023.(FAN Xiaoqing. Shaking table test and deformation law study of

- buried pipeline under dynamic dislocation of reverse fault[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2023.(in Chinese))
- [14] HAN J Y, BI Y S, HOU B W, et al. Response of corroded steel pipeline without and with CFRP reinforcement to reverse fault movement[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(23): 10 896.
- [15] 郑倩, 张宏, 张克政, 等. 走滑断层作用下 X80 管道设计应变规律和神经网络预测[J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(2): 26 - 32.(ZHENG Qian, ZHANG Hong, ZHANG Kezheng, et al. Design strain law and neural network prediction of X80 pipeline under the action of strike-slip fault[J]. *China Safety Production Science and Technology*, 2018, 14(2): 26 - 32.(in Chinese))
- [16] 李杨, 余建星, 余杨, 等. 穿越走滑断层海底管道局部屈曲研究及应变响应预测[J]. *世界地震工程*, 2019, 35(4): 105 - 113.(LI Yang, YU Jianxing, YU Yang, et al. Study of local buckling and strain response prediction of submarine pipelines crossing strike-slip faults[J]. *World Earthquake Engineering*, 2019, 35(4): 105 - 113.(in Chinese))
- [17] 马素健. 活动断层错动下隧道灾害响应机制及致灾范围预测研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2022.(MA Sujian. Study on tunnel disaster response mechanism and disaster range prediction under active fault dislocation[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.(in Chinese))
- [18] ANASTASOPOULOS I, GAZETAS G, BRANSBY M F, et al. Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(8): 943 - 958.
- [19] VAZOURAS P, KARAMANOS S A, DAKOULAS P. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 41: 164 - 180.
- [20] VAZOURAS P, DAKOULAS P, KARAMANOS S A. Pipe-soil interaction and pipeline performance under strike-slip fault movements[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 72: 48 - 65.
- [21] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50470—2017 油气输送管道线路工程抗震技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T50470—2017 Technical specification for seismic resistance of oil and gas transmission pipeline lines engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2017.(in Chinese))
- [22] 徐震. X65 管线钢的本构关系及失效判据研究[J]. *石油工程建设*, 2014, 40(3): 23 - 27.(XU Zhen. Study on the intrinsic relationship and failure criterion of X65 pipeline steel[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2014, 40(3): 23 - 27.(in Chinese))
- [23] YIMSIRI S, SOGA K, YOSHIZAKI K, et al. Lateral and upward soil-pipeline interactions in sand for deep embedment conditions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(8): 830 - 842.
- [24] 张如林, 蒋城, 李帅, 等. 跨越断层的钢埋地管道响应数值模拟研究[J]. *世界地震工程*, 2023, 39(4): 46 - 52.(ZHANG Rulin, JIANG Cheng, LI Shuai, et al. Numerical simulation of the response of steel buried pipelines across faults[J]. *World Earthquake Engineering*, 2023, 39(4): 46 - 52.(in Chinese))
- [25] 孙静怡. 考虑断层两侧地震动差异和永久位移的跨断层梁桥地震反应分析[硕士学位论文][D]. 北京: 北京工业大学, 2023.(SUN Jingyi. Seismic response analysis of girder bridges across faults considering ground shaking differences and permanent displacements on both sides of the fault[M. S. Thesis][D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2023.(in Chinese))
- [26] 刘艳琼. 活动断层的地震地表永久位移研究[博士学位论文][D]. 黑龙江: 中国地震局工程力学研究所, 2013.(LIU Yanqiong. Study of earthquake surface permanent displacement of active faults[Ph. D. thesis][D]. Heilongjiang: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013.(in Chinese))
- [27] ZHANG Z, HINKSON D, SINGER M, et al. A mechanistic model of top-of-the-line corrosion[J]. *Corrosion*, 2007, 63(11): 1 051 - 1 062.
- [28] 韩俊艳, 赵文乐, 帅义, 等. 逆断层作用下局部腐蚀埋地管道的失效模式研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(6): 1 386 - 1 397.(HAN Junyan, ZHAO Wenle, SHUAI Yi, et al. Study on the failure mode of locally corroded buried pipelines under the action of reverse fault[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(6): 1 386 - 1 397.(in Chinese))
- [29] 马明利. 庆-哈输油管道腐蚀缺陷评估与补强技术研究[博士学位论文][D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.(MA Mingli. Research on corrosion defect assessment and reinforcement technology of Qing-Ha oil pipeline[Ph. D. Thesis][D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.(in Chinese))
- [30] JALALI H H, ROFOOEI F R, ATTARI N K A, et al. Experimental and finite element study of the reverse faulting effects on buried continuous steel gas pipelines[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 86: 1 - 14.
- [31] ZHONG Z, NI B, SHI Y, et al. Convolutional neural network-based seismic fragility analysis of subway station structure considering spatial variation of site shear-wave velocity[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 163, 105741.
- [32] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. *Nature*, 1986, 323(6088): 533 - 536.
- [33] 胡守仁, 余少波, 戴葵. 神经网络导论[M]. 长沙: 国防工业出版社, 1992: 1 - 36.(HU Shouren, YU Shaobo, DAI Kwai. Introduction to neural networks[M]. Changsha: National Defense Science and Technology Press, 1992: 1 - 36.(in Chinese))