

文章编号: 1000-8241(2021)07-0809-07

连续地表位移作用下埋地管道应变计算模型

高宁^{1,2} 张宏¹ 刘高灵¹ 陈朋超³ 施宁^{1,3} 刘啸奔¹

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院·油气管道输送安全国家工程实验室·石油工程教育部重点实验室·城市油气输配技术北京市重点实验室; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司; 3. 国家管网集团北方管道公司

摘要: 油气长输管道途经多种复杂地质环境,经常面临地质灾害的威胁。针对现有地质灾害段管道地表位移监测数据离散型的特征,提出了一种基于三次样条插值的地表位移三维重构方法,实现了地表位移的连续表示。在此基础上,采用非线性有限元方法,依据非线性土弹簧单元描述管土相互作用,利用 Ramberg-Osgood 本构模型描述管材力学特性,使用 INP 参数化编程语言建立了参数化的连续地表位移作用下埋地管道应变计算模型。新建模型能够考虑温度、外压等工作载荷与管道实际路由对管道初始应力的影响,实现管道应变的准确计算。采用 C# 编程语言,编制了基于 C/S 架构的管道设计应变智能计算与评估软件。研究结果可为智慧管道数字孪生的建设与地质灾害地段管道的完整性评估提供技术支撑。(图 7,表 3,参 25)

关键词: 油气管道; 地质灾害; 管土相互作用; 地面位移; 插值; 设计应变

中图分类号: TE973.1; TE88

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.07.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Calculation model for strain of buried pipeline under the action of continuous surface displacement

GAO Ning^{1,2}, ZHANG Hong¹, LIU Gaoling¹, CHEN Pengchao³, SHI Ning^{1,3}, LIU Xiaoben¹

1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)/National Engineering Laboratory for Pipeline Safety//MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering//Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology; 2. CNOOC China Ltd. Tianjin Branch; 3. PipeChina North Pipeline Company

Abstract: The long-distance oil & gas pipelines run through areas with various complicated geological conditions and often face the threats of geological hazards. In terms of the discrete characteristics of the surface displacement monitoring data in existing pipeline sections threatened by geological disaster, a three-dimensional reconstruction method of surface displacement based on cubic spline interpolation (CSI) was proposed to realize the continuous representation of surface displacement. Then, the pipe-soil interaction was described using the nonlinear soil spring element with the nonlinear finite element method, the pipes were described with the Ramberg-Osgood constitutive model, and the parametric calculation model for strain of buried pipeline under the action of continuous surface displacement was established with the INP parametric programming language. The new model takes the influence of the working load (such as temperature and pressure) and the actual route of the pipeline on the initial stress of the pipeline into consideration, and realizes the accurate calculation of the pipeline strain. The intelligent calculation and evaluation software for the design strain of pipelines based on the C/S architecture was developed with the C# programming language. The research results provide technical support for the Digital Twin construction of intelligent pipelines and the integrity evaluation of pipelines in geological hazard area. (7 Figures, 3 Tables, 25 References)

Key words: oil and gas pipeline, geological hazards, pipe-soil interaction, surface displacement, interpolation, design strain

地质灾害可能引起土体移动、变形,从而导致穿越地质灾害区域的油气长输管道在土力作用下变形

甚至失效。根据土壤位移形式,地质灾害可以分为地表位移突变型、地表位移连续型两种类型。针对地

质灾害位移载荷作用下的管道应变计算,国内外学者进行了大量的研究。Zhang等^[1]对采空沉陷作用下管道设计应变进行了案例分析,明确了暗悬、沉陷等多种载荷形式下管道的应变响应规律。韩冰等^[2]针对各类采空区工况,使用实体单元模拟管道与土壤,采用Ramberg-Osgood本构关系描述管材,运用ABAQUS建立了采空区管道的有限元计算模型,分析了不同影响参数下的管道力学状态,对管道同时进行了应力、应变校核,研究了两种校核准则的适用性。夏梦莹等^[3]建立了三维连续型位移采空区管道应变数值计算模型,分析了管道应变空间分布特征。Liu等^[4]提出在管道轴向施加抛物线分布位移载荷来模拟滑坡的有限元计算方法。Liu等^[5-12]对不同断层形式下的管道应变进行了研究,提出了简化管道地质灾害综合位移模型及管道设计应变计算模型,将地质灾害位移类比为水平面于垂直面内的断层位移形式,从而衍生出其他地质灾害形式的管道应变计算方法。吴锴等^[13]建立了局部突变型位移载荷作用下埋地管道力学分析模型,采用非线性土弹簧描述管土相互作用,分析了局部突变区域长度及突变位移量对埋地管道受力的影响。郑倩等^[14]基于有限元方法,建立了走滑断层作用下管道的应变响应数值计算模型,验证了神经网络模型计算效率高,可为断层作用下埋地管道的应变设计与评估提供参考;同时,基于应变准则的极限状态建立了方程,采用MC法开展走滑断层X80管道可靠性分析^[15]。刘鹏等^[16]采用实验结果与数值模拟相结合的方法,开展了3种地质灾害下管土相互作用实验,而后采用FLAC3D进行数值模拟,验证了FLAC3D开展管土相互作用模拟的可行性,并提出需考虑土体摩擦力等多种因素以提高理论计算结果精度。曾希等^[17]自制土箱试验装置,探究了断层错动量等参数对埋地管道力学性能的影响规律。

可见,国内外对于位移载荷作用下管道应变计算研究较多,但大多数都针对特定地质灾害类型^[18-20]。此外,针对地表位移突变型地质灾害,张宏等^[12]已给出管道应变计算方法,但对于一般连续地表位移作用下的管道应变计算的研究尚不多见。在实际工程中,管道途经多种地质灾害,针对不同地质灾害采用不同的应变计算方法进行监测评估过于繁琐、复杂。目前对于长输管道安全监测主要集中在部分危险管段,未对管道全线进行监测。为此,采用三次样条插值方法

计算得到完整地表位移函数,并利用INP参数化编程语言建立参数化的一般连续地表位移作用下埋地管道应变计算模型,通过有限元方法计算得到管道应变情况,以实现长输管道全线进行安全运行监测。

1 基于插值的地表位移三维重构方法

1.1 地表位移监测特点

现场采用三维激光扫描技术、全站仪等装置监测地表位移情况^[21],土壤位移数据类型为离散型,并会出现不能将位移形式归结为某一类地质灾害的情况;每组数据间隔较大,无法直接应用于数值计算。同时,在已有工程实践中,针对地质灾害常见的分析方法是根据土壤位移形式特点建立相应的有限元模型进行计算。为得到连续地表位移作用下管道力学状态有限元模型,需要先对监测数据进行处理,得到完整的地表位移函数。

1.2 基于三次样条插值的地表位移计算

一般连续地表位移是指以连续性采空为主、地表位移形式为连续型的缓慢发生的地质灾害。为得到连续地表位移曲线,根据一般连续地表位移监测点的离散特征,选择三次样条插值方法^[22-23]。三次样条插值具有稳定性好、收敛性有保障、易于在计算机上实现的优点,同时又能保证整条曲线的光滑性。因此,在安全监测数据分析过程中,三次样条插值方法是一种理想的插值方法。

在区间 $[a, b]$ 上定义一个函数 $f(x)$,并在区间 $[a, b]$ 上给定一个分割^[24]:

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b \quad (1)$$

上述各节点上的函数值 $y_i = f(x_i)$ ($i=0, 1, 2, \dots, n$),若函数 $S(x)$ 满足以下条件:① $S(x_i) = y_i$;②在每个小区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上 $S(x) = S(x_i)$,且均为三次多项式;③ $S(x)$ 、一阶导数 $S'(x)$ 、二阶导数 $S''(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上均是连续的,则称 $S(x)$ 为函数 $f(x)$ 的三次样条插值函数。

根据三次样条插值函数定义,对管道周围土壤位移进行插值时,有 $n+1$ 个插值点,因此需要确定 $n+1$ 个 M_i (M_i 为区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上函数 $S(x)$ 的二阶导数,即 $M_i = S''(x_i)$)。设定边界条件 $S'(x_0) = f'(x_0) = M_0$ 、 $S'(x_n) = f'(x_n) = M_n$,并建立三弯矩方程矩阵,列出方程组式(2),求解 M_i ,即可得到三次样条插值函数。

$$\begin{cases} M_0=f'(x_0) \\ \mu_1 M_0+2 M_1+\lambda_1 M_2=J_1 \\ \mu_i M_{i-1}+2 M_i+\lambda_i M_{i+1}=J_i \\ \mu_{n-1} M_{n-2}+2 M_{n-1}+\lambda_{n-1} M_n=J_{n-1} \\ M_n=f'(x_n) \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_i=\frac{h_{i-1}}{h_{i-1}+h_i} \quad (3)$$

$$\lambda_i=\frac{h_i}{h_{i-1}+h_i}=1-\mu_i \quad (4)$$

$$J_i=\frac{6 f\left[x_i, x_{i+1}\right]-f\left[x_{i-1}, x_i\right]}{x_{i+1}-x_{i-1}} \quad (5)$$

$$f\left[x_i, x_{i+1}\right]=\frac{f\left(x_{i+1}\right)-f\left(x_i\right)}{h_i} \quad (6)$$

式中: h_i 为区间长度 ($h_i=x_{i+1}-x_i$), m。

2 模型建立

2.1 管土相互作用模型

管道埋地后会受到土壤的约束作用, 业界常采用离散的非线性土弹簧模拟管土相互作用。利用土弹簧(图 1)模拟管土间作用力, 其力学特性计算参照 2005 年美国土木工程师学会颁布的《Guidelines for the design of buried steel pipe》相关规定。

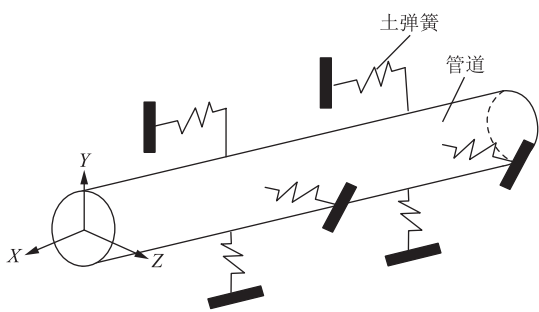


图 1 土弹簧模拟管土相互作用示意图

2.2 连续地表位移作用下管道应变计算模型

连续型采空、滑坡蠕滑、连续型地表沉陷等地质灾害使管道在连续地表位移作用下发生变形(图 2), 影

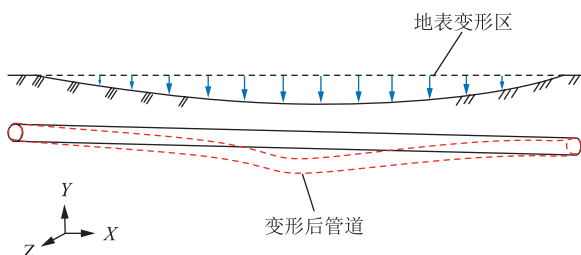


图 2 连续地表位移作用下管道变形示意图

响管道运行安全。为了更好地描述管道全应力应变曲线特征, 采用 Ramberg-Osgood 本构模型描述管材力学特性, 主要关注管道的整体应变情况; 同时, 为提高运算速度, 管道选用梁单元进行模拟。非线性土弹簧模型使用 ABAQUS 软件的管土相互作用单元 PSI34 进行模拟, PSI34 单元存在 3 个方向的土弹簧刚度, 能够准确模拟管土的非线性作用。

梁单元适用于模拟某一方向结构长度远小于另两个方向的工况, 建模速度快、使用方便且易于修改, 因此采用梁单元模拟管道。Elbow 弯管单元为梁单元但类似于壳单元, 且计算成本低于壳单元, 因此采用 Elbow 弯管单元对连续地表位移作用下管道有限元模型进行网格划分(图 3)。管段整体分为以下 3 种类型: A 管段为待分析管段; 为消除模拟计算过程中边界条件对结果的影响, 在 A 管段两侧分别设置 B 管段(包括 B₁ 管段、B₂ 管段)以及 C 管段(包括 C₁ 管段、C₂ 管段)。其中, A 管段长度为 L , B 管段、C 管段长度分别为 100 m、1 000 m。A~C 管段的单元长度分别取 0.1 m、0.2 m、1.0 m, 则 3 部分管段分别有 10 L 、500、1 000 个单元。设置第一个节点为 1 001 节点, 可依次得到 3 类管段交界处节点号。

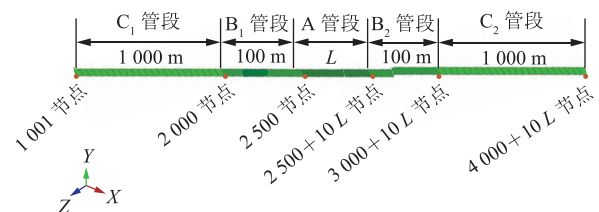


图 3 连续地表位移作用下管道有限元模型网格划分图

连续地表位移作用下管道有限元模型的分析步骤为: ①对管道施加工作内压、温度等, 即对全部土壤节点进行约束; ②根据三次样条插值得到的地表位移曲线, 将地表位移曲线规律化取值后的地表位移数据作为位移边界条件施加到土壤节点上, 模拟位移载荷对管道的作用。

3 软件开发

为了实现连续地表位移作用下管道应变的实时监测与评价, 基于 C# 软件开发平台, 采用三次样条插值实现地表位移的三维重构, 即地表位移的连续化。基于 INP 编程语言, 实现管道应变分析有限元模型参数化编程, 即有限元软件的二次开发: 将有限元软件中

复杂的模型建立、前处理、后处理过程软件化,最终采用C#软件,提取有限元模型计算结果,将计算结果与监测结果具体化、可视化,得到连续地表位移作用下埋地管道应变分析软件(图4),使整个分析方法更适用于工程应用。

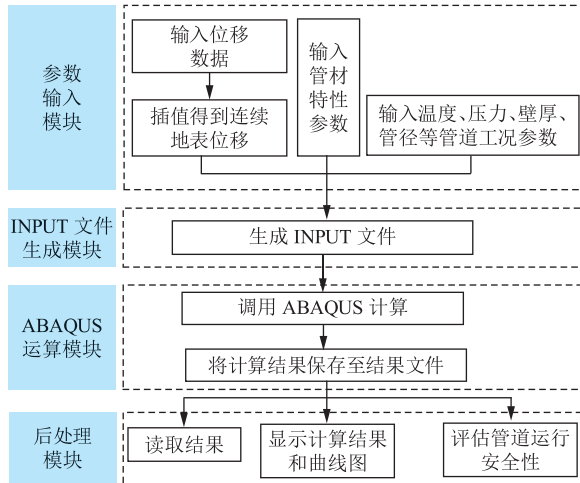


图4 连续地表位移作用下埋地管道应变分析软件组成示意图

连续地表位移作用下埋地管道应变分析软件包括监测位移数据输入、插值结果展示、管材相关参数输入、土弹簧参数计算、许用应变计算、管道轴向应变结果对比、基于应变安全评价7个模块。其中,该软件主体为两大关键模块:①三次样条插值模块。其以第1类边界条件为补充条件,采用三弯矩方程法进行三次样条插值算法开发,实现监测位移数据的准确插值,得到连续地表位移曲线。②有限元软件二次开发模块。在该模块中,通过输入界面,可实现数值模型计算所需的管材、土弹簧等参数的输入以及许用应变计算等功能。对于数值模型计算,首先需要对INP文件进行参数化编程,再通过文件流命令导入C#软件,实现ABAQUS有限元软件的调用及运算。

4 实例应用

选取穿越采空区主断面的某管道工程(表1、表2)为例。由全站仪监测得到的实际位移监测数据(表3,由于几乎不产生横向位移,Z方向位移均为0)。Ramberg-Osgood模型中参数应力硬化指数 $m = 19.9$ 、屈服偏移量 $\alpha = 1.288$ 。

目前,概率积分法^[25]已发展成为预测采空区地表位移变形应用最为广泛的方法之一^{—[3]},因此实例分析采用概率积分法预测地表位移。同时,对实际位移离

表1 某管道工程基础参数

管材	管长/m	管径/mm	壁厚/mm	埋深/m	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa
X65	800	813	16	1.7	207	459

表2 某管道工程所穿越采空区的相关参数

岩性	开采深度/m	主要影响角/(°)	下沉系数	水平移动系数	煤层倾角/(°)	煤层采厚/m	采空区长度/m
中硬	250	62	0.75	0.25	0	6	200

表3 某管道工程穿越采空区管段不同方向的位移监测结果

管道轴向长度/m	土壤位移/m	
	X方向(沿管道轴向)	Y方向(沿管道垂向)
1	0.00	0.00
10	0.00	0.00
20	0.00	0.00
30	0.00	0.00
50	0.00	0.00
100	0.00	0.00
150	-0.01	0.02
200	-0.13	0.19
250	-0.79	0.72
270	-1.29	0.99
300	-2.25	1.13
330	-3.21	0.95
350	-3.71	0.70
370	-4.05	0.42
390	-4.21	0.14
400	-4.23	0.00
420	-4.15	-0.27
440	-3.90	-0.56
500	-2.25	-1.12
520	-1.59	-1.05
550	-0.78	-0.72
580	-0.31	-0.36
600	-0.13	-0.19
650	-0.01	-0.02
700	0.00	0.00
750	0.00	0.00
800	0.00	0.00

散数据进行三次样条插值算法处理,获得管道穿越采空区段地表位移,从而验证三次样条插值算法准确性。

根据概率积分法,采空沉陷区地表垂向、轴向位移的计算式为:

$$\begin{cases} W_0(t) = W(t+l/2) - W(t-l/2) \\ U_0(t) = U(t+l/2) - U(t-l/2) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} W(t) = \frac{W_{\max} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{t\sqrt{\pi}}{r} \right) + 1 \right]}{2} \\ U(t) = \varepsilon W_{\max} e^{-\pi t^2/r^2} \end{cases} \quad (8)$$

$$W_{\max} = Dq \cos \theta \quad (9)$$

$$\operatorname{erf}\left(\frac{t\sqrt{\pi}}{r}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{t\sqrt{\pi}}{r}} e^{-\frac{t\sqrt{\pi}z}{r}} dz \quad (10)$$

$$r = H / \tan \beta \quad (11)$$

式中: t 为以采空沉陷区中心为 X 轴坐标原点的主断面坐标, m ; $W(t)$ 、 $U(t)$ 分别为垂向、水平方向位移函数, m ; $W_0(t)$ 、 $U_0(t)$ 分别为采空沉陷区地表垂向、水平方向

位移, m ; l 为沿采空区走向的计算长度, m ; W_{\max} 为地表最大垂向位移, m ; ε 为采空区水平移动系数; D 为煤层法向采厚, m ; q 为下沉系数; θ 为煤层倾角, ($^\circ$); r 为主要影响半径, m ; H 为开采深度, m ; β 为主要影响角, ($^\circ$)。

以 X 方向(轴向)三次样条插值函数为例, 利用式(2), 可解得其函数形式(由于公式较多, 仅列出轴向位移 $x \in [200, 520]$ 时的三次分段函数):

$$\begin{cases} S_9(x) = -2.27 \times 10^{-6}(x-550)^3 + 8.54 \times 10^{-6}(x-550)^2 + 0.01(x-550) + 0.72, x \in [200, 250] \\ S_{10}(x) = -9.84 \times 10^{-7}(x-530)^3 - 1.27 \times 10^{-4}(x-530)^2 + 0.01(x-530) + 0.96, x \in [250, 270] \\ S_{11}(x) = 9.22 \times 10^{-7}(x-500)^3 - 2.16 \times 10^{-4}(x-500)^2 - 8.20 \times 10^{-5}(x-500) + 1.12, x \in [270, 300] \\ S_{12}(x) = 1.63 \times 10^{-6}(x-470)^3 - 1.33 \times 10^{-4}(x-470)^2 - 0.01(x-470) + 0.95, x \in [300, 330] \\ S_{13}(x) = 8.74 \times 10^{-7}(x-450)^3 - 3.55 \times 10^{-5}(x-450)^2 - 0.01(x-450) + 0.70, x \in [330, 350] \\ S_{14}(x) = -3.34 \times 10^{-8}(x-430)^3 + 1.69 \times 10^{-5}(x-430)^2 - 0.01(x-430) + 0.41, x \in [350, 370] \\ S_{15}(x) = -5.16 \times 10^{-7}(x-410)^3 + 1.49 \times 10^{-5}(x-410)^2 - 0.01(x-410) + 0.13, x \in [370, 390] \\ S_{16}(x) = -3.89 \times 10^{-7}(x-400)^3 - 5.34 \times 10^{-7}(x-400)^2 - 0.01(x-400), x \in [390, 400] \\ S_{17}(x) = 5.60 \times 10^{-7}(x-380)^3 - 2.39 \times 10^{-5}(x-380)^2 - 0.01(x-380) - 0.27, x \in [400, 420] \\ S_{18}(x) = 1.19 \times 10^{-6}(x-360)^3 + 9.75 \times 10^{-6}(x-360)^2 - 0.01(x-360) - 0.56, x \in [420, 440] \\ S_{19}(x) = -9.75 \times 10^{-7}(x-300)^3 + 2.24 \times 10^{-4}(x-300)^2 - 0.01(x-300) - 1.12, x \in [440, 500] \\ S_{20}(x) = -1.73 \times 10^{-6}(x-280)^3 + 1.65 \times 10^{-4}(x-280)^2 + 0.01(x-280) - 1.05, x \in [500, 520] \end{cases} \quad (12)$$

同理, 可得到 Y 方向的三次样条插值函数。采用三次样条插值算法对位移监测数据进行处理, 可以得到地表位移函数曲线, 将其与采用概率积分法得到的地表位移函数曲线进行对比(图 5)可见, 两种方法的结果基本相同, 由此验证了三次样条插值算法的准确性。

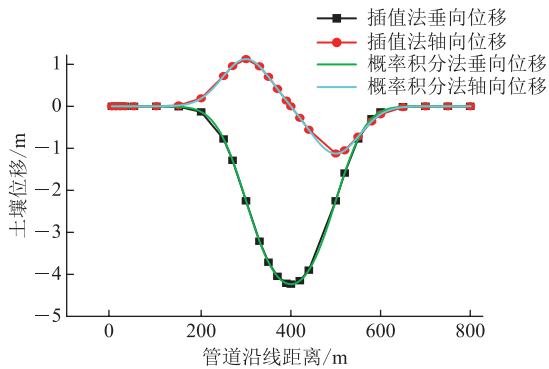


图 5 三次样条插值方法与概率积分法计算得到的某管道地表位移结果对比图

为验证连续地表位移作用下管道应变设计方法的准确性, 将表 1、表 3 中相关数据输入连续地表位移作用下管道应变计算分析软件中, 将土壤类型设置为密砂, 并输入土弹簧参数等条件, 生成 INP 文件, 调用 ABAQUS 软件进行计算, 并提取该管段的轴向应变数据(图 6)。同时, 以概率积分法计算得到的地表位移为位移载荷, 采用 ABAQUS 软件计算该管段的轴向

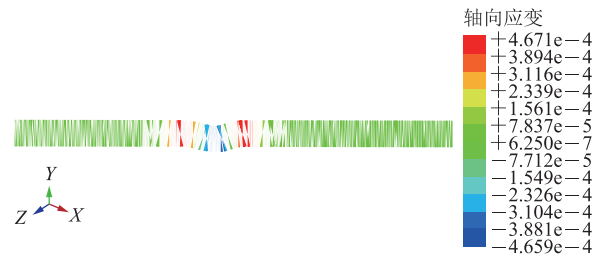


图 6 采用三次样条插值算法计算得到的连续地表位移作用下某管道轴向应变云图

应变。对两种方法计算得到的最大轴向应变进行对比(图 7)可见: 两种方法的计算结果基本相同, 且均在管道中心处取得管道最大轴向应变值。由此可知: 新建的连续地表位移作用下埋地管道应变计算模型能够有效、准确地评估管道的安全性, 并可避免模型参数的反复输入, 缩短建模过程。

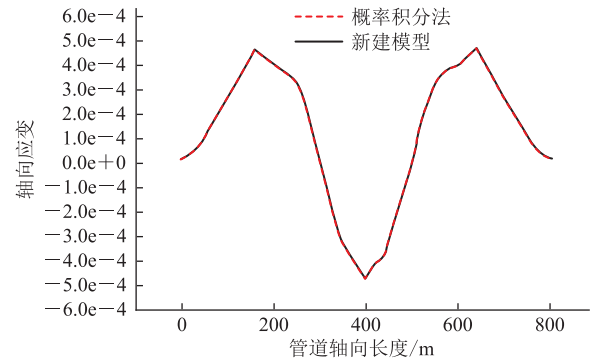


图 7 新建管道应变计算模型与概率积分法得到的管段最大轴向应变对比图

5 结束语

基于三次样条插值方法和非线性有限元方法,提出了连续地表位移作用下管道应变设计方法。该方法解决了不同地质灾害需要重复建立有限元模型的问题,根据该方法设计的连续地表位移作用下埋地管道应变分析软件能够实现管道应变的智能计算与安全评估。经过与概率积分法计算结果的对比,验证了该方法监测管道应变的准确性,可为智慧管道的建设与地质灾害地段管道的完整性评估提供理论参考。但在软件开发方面,由于未考虑管道内压等参数变化,因此需根据现场参数加以改进。

参考文献:

- [1] ZHANG F, LIU M, WANG Y Y, YU Z F, TONG L. Strain demand in areas of mine subsidence[C]. Calgary: 2012 9th International Pipeline Conference, 2012: 391-401.
- [2] 韩冰, 王芝银, 吴张中, 赵宏林, 荆宏远. 基于应变理论在采空区管道失效分析中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 134-138, 148.
HAN B, WANG Z Y, WU Z Z, ZHAO H L, JING H Y. Application of strain-based theory in failure analysis of pipeline subjected to mining collapse areas[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(4): 134-138, 148.
- [3] 夏梦莹, 张宏, 王宝栋, 顾晓婷. 基于壳单元的连续型采空区埋地管道应变分析[J]. 油气储运, 2018, 37(3): 256-262.
XIA M Y, ZHANG H, WANG B D, GU X T. Strain analysis of buried pipelines in continuous mining subsidence areas based on shell element[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(3): 256-262.
- [4] LIU P F, ZHENG J Y, ZHANG B J, SHI P. Failure analysis of natural gas buried X65 steel pipeline under deflection load using finite element method[J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1384-1391.
- [5] LIU X B, ZHANG H, HAN Y S, XIA M Y, ZHENG W. A semi-empirical model for peak strain prediction of buried X80 steel pipelines under compression and bending at strike-slip fault crossings[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 32: 465-475.
- [6] LIU X B, ZHANG H, GU X T, CHEN Y F, XIA M Y, WU K. Strain demand prediction method for buried X80 steel pipelines crossing oblique-reverse faults[J]. Earthquakes and Structures, 2017, 12(3): 321-332.
- [7] LIU X B, ZHANG H, LI M, XIA M Y, ZHENG W, WU K, et al. Effects of steel properties on the local buckling response of high strength pipelines subjected to reverse faulting[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 378-387.
- [8] 刘啸奔, 张宏, 李勤, 郑伟, 吴锴. 断层作用下埋地管道应变分析方法研究进展[J]. 油气储运, 2016, 35(8): 799-807.
LIU X B, ZHANG H, LI M, ZHENG W, WU K. Research progress of strain analysis methods for buried pipelines under faulting process[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(8): 799-807.
- [9] LIU X B, ZHANG H, WU K, XIA M Y, CHEN Y F, LI M. Buckling failure mode analysis of buried X80 steel gas pipeline under reverse fault displacement[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 77: 50-64.
- [10] 张宏, 崔红升. 基于应变的管道强度设计方法的适用性[J]. 油气储运, 2012, 31(12): 952-954.
ZHANG H, CUI H S. The applicability of strain-based pipeline strength design method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(12): 952-954.
- [11] 刘啸奔, 陈严飞, 张宏, 夏梦莹, 郑伟, 张振永, 等. 跨断层区 X80 钢管道受压时的设计应变预测[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 123-130.
LIU X B, CHEN Y F, ZHANG H, XIA M Y, ZHENG W, ZHANG Z Y, et al. Prediction on the design strain of the X80 steel pipelines across active faults under stress[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 123-130.
- [12] 张宏, 刘啸奔. 地质灾害作用下油气管道设计应变计算模型[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 91-97.
ZHANG H, LIU X B. Design strain calculation model for oil and gas pipelines subject to geological hazards[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 91-97.
- [13] 吴锴, 张宏. 基于有限元的局部突变位移荷载下埋地管道力学分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(4): 59-64.
WU K, ZHANG H. Finite element analysis of the buried pipelines subjected to abrupt displacement load locally[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(4): 59-64.
- [14] 郑倩, 张宏, 张克政, 刘啸奔, 夏梦莹, 吴锴, 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 Q, ZHANG H, ZHANG K Z, LIU X B, XIA M Y, WU K, et al. Design strain laws and neural network prediction of X80 pipeline under effect of strike-slip fault[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(2): 26-32.
- [15] 郑倩, 张宏, 刘啸奔. 基于 BP-MC 方法的断层区管道可靠性分析[J]. 油气储运, 2020, 39(3): 277-283.
- ZHENG Q, ZHANG H, LIU X B. Reliability analysis of pipeline in fault area based on BP-MC method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3): 277-283.
- [16] 刘鹏, 李玉星, 张宇, 孙明源, 张玉, 张炎. 典型地质灾害下埋地管道的应力计算[J]. 油气储运, 2021, 40(2): 157-165.
- LIU P, LI Y X, ZHANG Y, SUN M Y, ZHANG Y, ZHANG Y. Stress calculation of buried pipelines affected by typical geological hazards[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(2): 157-165.
- [17] 曾希, 雷震, 靳方倩, 杜国锋. 不同断层对埋地管道受力性能的影响[J]. 油气储运, 2020, 39(7): 788-800.
- ZENG X, LEI Z, JIN F Q, DU G F. Influence of different faults on stress performance of buried pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(7): 788-800.
- [18] LIMURA S. Simplified mechanical model for evaluating stress in pipeline subject to settlement[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 469-479.
- [19] 王晓霖, 帅健, 张建强. 开采沉陷区埋地管道力学反应分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3373-3378, 3386.
- WANG X L, SHUAI J, ZHANG J Q. Mechanical response analysis of buried pipeline crossing mining subsidence area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3373-3378, 3386.
- [20] 赵雷, 李小军, 赵纪生, 彭小波, 崔成臣. 断层上覆土层破裂对埋地管道的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 6(6): 891-898.
- ZHAO L, LI X J, ZHAO J S, PENG X B, CUI C C. Responses of buried pipeline crossing fault due to the overlaying soil rupture[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 6(6): 891-898.
- [21] 任月龙, 李如仁, 张信. 基于多传感器网的露天矿边坡形变监测[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 868-873.
- REN Y L, LI R R, ZHANG X. Open pit slope deformation monitoring based on multiple-sensors[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 868-873.
- [22] 杨琼, 帅健, 左尚志. 管道凹陷研究现状[J]. 油气储运, 2009, 28(6): 10-15.
- YANG Q, SHUAI J, ZUO S Z. Research actuality of pipelines with dents[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(6): 10-15.
- [23] 杨琼, 帅健. 凹陷管道的工程评定方法[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 649-653.
- YANG Q, SHUAI J. Engineering evaluation method for dented pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 649-653.
- [24] 文世鹏, 张明. 应用数值分析[M]. 第 3 版. 北京: 石油工业出版社, 2012: 181-190.
- WEN S P, ZHANG M. Applied numerical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 181-190.
- [25] 何国清, 杨伦, 凌赓娣, 贾凤彩, 洪钲. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991: 5-43.
- HE G Q, YANG L, LING G D, JIA F C, HONG D. Mining subsidence[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991: 5-43.
- (收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2021-05-11; 编辑: 李在蓉)
-
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“逆断层作用下 X80 管道屈曲演化与韧性破损机理研究”, 52004314; 北京市自然科学基金项目“时变温压荷载作用下大口径直埋热水管道-土体耦合机制与失效机理研究”, 8214053; 新疆自治区天山青年计划项目“复杂荷载作用下高钢级管道韧性断裂与后屈曲失效行为”, 2019Q088; 深水油气管线关键技术与装备北京市重点实验室开放课题资助项目“断层作用下碳纤维增强海底管道的力学响应与失效机理研究”, BIPT2020005; 中国石油大学(北京)青年拔尖人才科研基金资助项目“断层作用下高钢管道失效机理与可靠性评价”, 2462018YJRC019; 中国石油大学(北京)科研基金资助项目“基于大数据的天然气管网智能运行与控制研究”, 2462020YXZZ045.
- 作者简介:** 高宁, 女, 1995 年生, 助理工程师, 2020 年硕士毕业于中国石油大学(北京)安全科学与工程专业, 现主要从事海上油气的前期项目研究工作。地址: 天津市滨海新区海川路 2121 号, 300450。电话: 18810058665。Email: gaoning9@cnooc.com.cn
- 通信作者:** 刘啸奔, 男, 1991 年生, 讲师, 2018 年博士毕业于中国石油大学(北京)安全科学与工程专业, 现主要从事油气装备失效分析与管道完整性管理方面的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 102249。电话: 010-89731239。Email: xiaobenliu@cup.edu.cn