

# 跨断层埋地输气管道有限元模型建立与分析

范 锋<sup>1,2</sup> 丰晓红<sup>1</sup>

1. 山东省天然气管道有限责任公司, 山东 青岛 266300;

2. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580

**摘 要:** 利用 ANSYS 软件建立了跨断层埋地管道有限元模型, 将埋地管道及其周围土体作为整体从地球半无限空间中取出, 引入 SHELL 281 单元和 SOLID 45 单元分别对管道和土体进行离散, 将管道模拟为薄壁中空圆柱结构, 土体模拟为均匀实体介质。在保证计算精度的前提下, 结合实际情况, 基于状态非线性理论, 建立了管土非线性接触模型, 模拟管道和土体的滑移、分离和闭合现象; 采用有限元技术分析了埋地管道与周围土体在断层错动下的相互影响, 确定了模型的有效计算区域; 进而提出了跨断层埋地输气管道三维多重非线性有限元数值计算模型。用所建模型及规范中方法分别对工程实例进行计算, 并将所得结果进行对比分析, 证明所建模型的合理性和准确性。

**关键词:** 跨断层; 埋地输气管道; 断层错动; 非线性; 有限元模型

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2015.01.003

## 0 前言

近 40 年来, 国内外对跨断层埋地管道断层错动反应的研究取得了较多成果, 但这些成果都是在基于大量假设条件的前提下成立的, 基于不同假设建立了各种力学模型。目前使用的 GB 50470-2008《油气输送管道线路工程抗震技术规范》<sup>[1]</sup> (简称规范) 虽然规定对于重要区段的管道和位于强震区的一般区管道应使用有限元方法进行管道的抗震校核, 但其他情况下的管道抗震校核仍然沿用 Newmark 等人<sup>[2]</sup> 在 1975 年提出的高度简化模型, 尽管采用 Newmark-Hall 计算结果的 2 倍作为修正值, 但由于管道埋设场地土体的不确定性等原因, 仍然不一定能够保证管道设计的安全性, 而且管道受压时也无法计算。规范<sup>[1]</sup> 中推荐的有限元方法为刘爱文提出的含等效非线性弹簧边界的分析方法<sup>[3]</sup>, 管土间的作用采用三向土弹簧进行模拟, 无法对管道与土体的滑移、分离和闭合等现象进行模拟。随着目前对埋地管道地震破坏机理的不断深入研究以及管道建设力度的不断加大, 需要建立更加符合实际的计算模型。埋地输气管道的断层错动反应不仅涉及到管道和周围土体的相互作用, 而且受管内气体的流态、压力、温度等影响, 因此提出能够

合理模拟跨断层管道断层错动反应特性的计算模型是当前迫切需要研究的课题。下面将利用 ANSYS 软件建立跨断层埋地管道有限元模型, 并用实例对模型的正确性进行证明。

## 1 模型建立

### 1.1 管道壳模型的建立

跨断层埋地输气钢质管道采用壳单元模拟。考虑到跨断层埋地管道在断层错动时, 发生大变形的部分集中在断层两侧附近一定距离内, 以断层面为中心对断层两侧一定长度的管段进行非线性有限元分析。管体用 SHELL 281 壳单元沿管周和管长方向进行划分, 其中沿圆周方向划分 20 个单元, 沿管长方向每 0.2 m 划分一个单元, 管道模型见图 1。

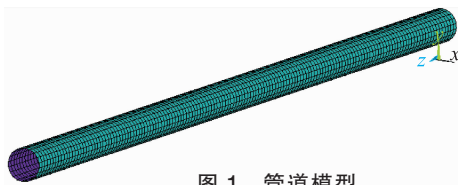


图 1 管道模型

收稿日期: 2014-05-14

作者简介: 范 锋 (1982-), 男 (回族), 河南商丘人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事天然气长输管道管理工作。

## 1.2 管土非线性接触模型的建立

等效土弹簧的应用使得管土作用问题的分析大为简化,能够真实反应复杂的管土作用,但其参数的确定极其困难。因此,采用土弹簧对土体效应进行模拟的方法并不适用于需要精细计算管道与土体的相互作用、管道屈曲分析以及管道破坏机理研究等相关的研究工作。

整体来看,断层错动时管道和土体是一起运动的,但在管土交界面,管道和土体发生了非线性接触变形,随着断层位错量的增加,管道和土体因其自身材料的不同,其接触部位的接触力也在不断发生变化。本文采用非线性接触问题的研究方法对跨断层埋地管道进行研究,不但考虑了管道和土体的材料非线性、管道的大变形行为,同时还考虑到管道与土体界面发生粘接、滑移及分离等非线性接触行为。

接触单元是指覆盖在所分析模型接触面之上的一层单元,它根据接触条件,把接触点对应的位移和接触力,以单元的形式进行表示,主要分为点一点接触单元、点一面接触单元和面一面接触单元三种。由于管道刚度较大,因此管道外表面作接触单元的目标面,土体与管道的交界面则为接触单元的接触面。其中管道本构关系采用规范<sup>[1]</sup>中规定的三折线模型,土体本构管线采用 ANSYS 软件中的 Drucker-Prager (DP) 模型,采用增广拉格朗日乘法对管土的接触问题进行求解。由于涉及到土体的膨胀性,故土体的实体单元选取 SOLID 45 单元。土体沿各个坐标轴每 0.2 m 划分一个单元。本文所建的跨断层埋地输气管道有限元模型,即管土非线性接触模型,见图 2~3。

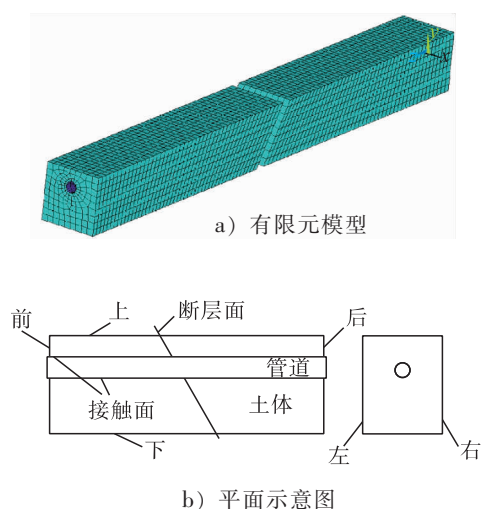


图2 跨断层埋地输气管道有限元模型



图3 接触单元示意图

## 1.3 边界条件的确定

对跨断层埋地管道的分析,实质上是分析管道在地面永久变形作用下的反应,分析时应该首先确定出断层的错动量以及施加错动量的断盘。本文所建模型的重点在于探讨跨断层埋地管道在断层错动下的反应,故主要针对管土相互作用进行分析,不考虑土层的反应。管道跨越不同类型断层示意图见图4。

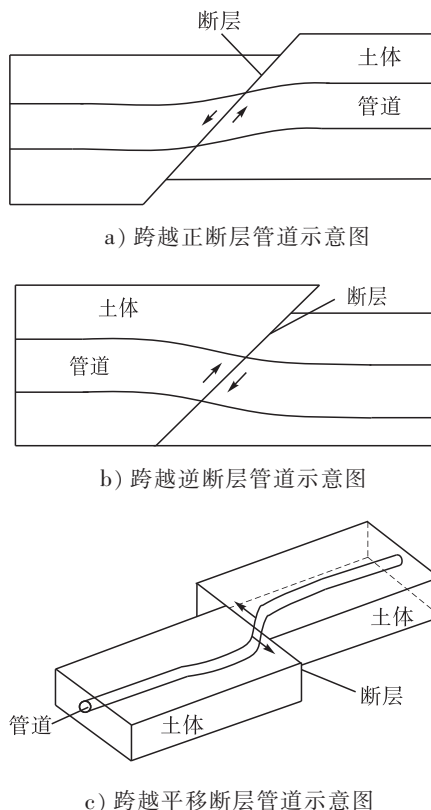


图4 管道跨越不同类型断层示意图

模型边界条件的确定需考虑管道和土体在断层错动时的有效作用以及实际场地条件和管道的功能等。针对模型中上下、左右、前后6个平面边界(如图2b),确定以下边界条件:

1) 上表面为地表自由面,故将上表面设为自由边界,无任何方向的约束。

2) 假设土体下边界为直接与基岩接触的接触面,因此断层下盘底面约束三个方向的自由度,使其固定不动,在断层上盘底面针对不同类型的断层施加相应方向的位移荷载。

3) 对于正断层和逆断层,前后边界仅约束 $x$ 方向的自由度, $y$ 方向和 $z$ 方向是自由的,而对于平移断层,前后边界是自由的,不加任何约束,限制其在 $y$ 方向和 $z$ 方向的自由度。

4) 土体的左边界由于下盘底面已经约束了 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向,故可以不进行任何约束,或者取为固定边界,因为在沿管轴方向的计算长度足够长时,管土相对运动产生

的摩擦力可以完全平衡因断层运动引起的变形而不至于传递至边界,因此取固定边界不会对结果造成影响;右边界要随底面施加的位移移动,对正断层和逆断层可以只约束  $x$  方向自由度,对于平移断层,则可以约束  $z$  方向的自由度。

5) 管道要随土体在竖直面内运动,同时也会发生轴向的滑移,只要管道计算长度足够,管土间的摩擦力足以维持管道的平衡,故管道不设任何约束。

6) 一般情况下,断层基岩位错传至地面时往往会形成具有一定宽度的断裂带,将断裂带处理为理想边界,不受任何约束,断层两盘不会互相影响。

以上条件中坐标  $x$  为沿管道径向水平方向, $y$  为竖直方向, $z$  为沿管道轴向水平方向。

#### 1.4 有效计算区域的确定

有限元模型在进行非线性分析时,工作量相当大,计算区域越小,其计算时间就越短,但计算区域选得太小时往往会导致计算结果失真,降低模拟结果的有效性和可靠性。

对于土体的宽度和厚度,采用有限元技术对管道及其周围土体在断层错动作用下的相互影响进行分析,通过模型的试算发现,在断层错动量小于 5 m 时,根据土体对管道的影响区域,宽度和高度均取 5 m 能够满足条件。

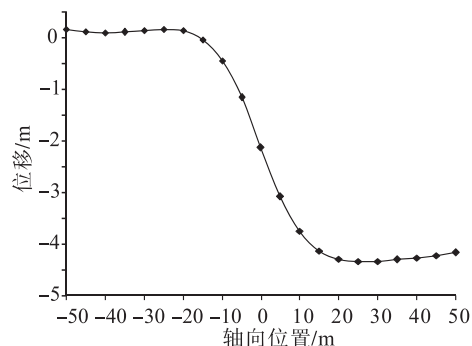
通过 Kennedy 方法<sup>[4]</sup>计算得到断层一侧管土之间大变形段的长度  $L_{CL}$  为 15.75 m,采用刘爱文方法<sup>[3]</sup>计算得到的管道最小计算长度为 51.2 m。下面采用本文所建模型进行试算,模型参数:土体高度和宽度均为 8 m,管道及沿管轴方向土体的长度均为 100 m,土质选用砂粘土,管道外径为 1 m,壁厚为 15 mm,管材选用 X 60 钢。

如图 4 所示为采用所建模型在断层错动量为 5 m 时管道沿原始管轴方向在竖直方向的位移曲线以及管道的轴向应力分布,图 4 中横轴 0 m 处为断层面,可以发现,在 -20 ~ 20 m 处为管道的大变形段,此范围外管道的竖直向位移逐渐减少直至趋近于 0。在距断层面 10 m 左右处管道的应力最大,这与金浏等人<sup>[5]</sup>提出的应力最大处位于距断层约 10 倍管径的地方相吻合,此范围外,两侧的应力逐渐减小,在距离断层面约 25 m 处达到管道初始应力值而处于稳定状态。因此取 50 m 作为管道的有效计算长度。

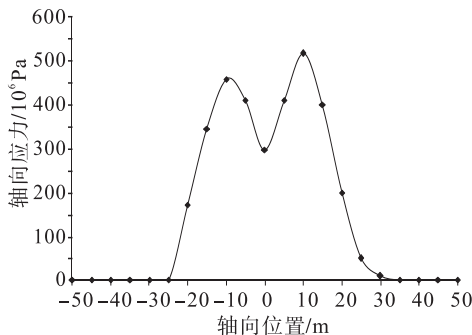
通过以上分析计算确定模型的有效计算区域:管道有效计算长度为 50 m,土体的有效计算区域长宽高分别为 5 m×5 m×50 m。模型试算结果见图 5,模型参数见表 1~2。

以上所建跨断层埋地输气管道有限元模型是基于如下假设条件而成立的:

1) 管道的小变形段相对其周围土体只有轴向位移,只发生轴向应变,不存在横向位移,由断层横向位移分



a) 竖直位移沿管轴方向的分布图



b) 管道轴向应力分布

图 5 模型试算结果

表 1 管道参数

| 参数                        | 值                 | 参数          | 值       |
|---------------------------|-------------------|-------------|---------|
| 外径 /m                     | 1                 | 弹性屈服强度 /MPa | 458     |
| 壁厚 /m                     | 0.015             | 弹性屈服应变 /m   | 0.002 2 |
| 计算长度 /m                   | 50                | 塑性屈服强度 /MPa | 517     |
| 埋深 /m                     | 1.5               | 塑性屈服应变 /m   | 0.040   |
| 弹性模量 /MPa                 | $2.1 \times 10^5$ | 内压 /MPa     | 10      |
| 密度 /(kg·m <sup>-3</sup> ) | 7 850             | 穿越角 /(°)    | 60      |

表 2 断层及土体参数

| 参数        | 值 | 参数                        | 值     |
|-----------|---|---------------------------|-------|
| 弹性模量 /MPa | 8 | 泊松比                       | 0.37  |
| 内聚力 /MPa  | 5 | 摩擦角 /(°)                  | 20    |
| 膨胀角 /(°)  | 0 | 密度 /(kg·m <sup>-3</sup> ) | 1 900 |
| 断层带宽度 /m  | 1 |                           |       |

量造成的弯矩完全由土体的被动土抗力平衡。

2) 管道的变形主要是由断层位错导致管道周围土体产生永久性位移而造成的,本文假设所加的位移荷载为线性的。

3) 本文是针对断层的错动对跨断层埋地管道造成的影响进行分析,在分析过程中没有考虑地震波、土体液化等产生的附加作用影响。

4) Lee 等人<sup>[6-7]</sup>研究认为在非震中区域或其附近,埋地管道的动力效应非常小,其扰动不会引起埋地管道的拉伸或屈曲破坏,采用静力分析便可对通常的埋地管线

受力进行分析。因此本文忽略了管道在断层错动下的动力放大作用,采用拟静力方法对断层错动下管道的反应进行分析。

## 2 实例计算与分析

一条材料为进口钢材 X 60 的 529×6 钢管通过活动断层带,断层为正断层,预测的最大错动量为:水平向  $\Delta H=2$  m,垂直向  $\Delta Z=0.5$  m,错动总量为 2.062 m,管道与断层错动方向的交角  $\beta=30^\circ$ 。管道轴线至地表的埋深为 2 m。断层带覆盖土层为密实的干粘土,土的密度为  $\rho_s=1800$  kg/m<sup>3</sup>,内摩擦角  $\phi=20^\circ$ ;粘聚力  $c=10$  kPa。计算该管道是否需要抗震加固。管道与断层的相对位置见图 6。

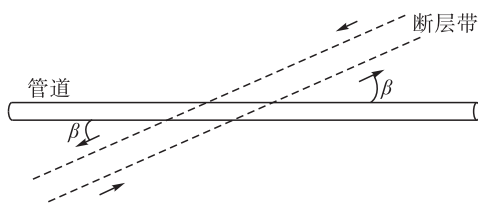


图 6 管道与断层的相对位置图

### 2.1 GB 50470-2008 采用的解析法

1) 计算沿管轴方向的单位长度管土间摩擦力  $f_s$ :

$$W=\rho_s D H g=1800 \times 0.529 \times 2 \times 9.8=18682(\text{N/m}) \quad (1)$$

$$W_p=\left[\pi(D-\delta) \delta \rho_m+\frac{\pi}{4}(D-2 \delta)^2 \rho\right] g=2827(\text{N/m}) \quad (2)$$

$$f_s=\mu(2 W+W_p)=0.6 \times(2 \times 18682+2827)=24115(\text{N/m}) \quad (3)$$

2) 由断层错动引起的管道几何伸长  $\Delta L_1$ :

$$\Delta L_1=\begin{cases} \Delta X+\frac{(\Delta Y^2+\Delta Z^2) f_s}{4 \pi D \delta E_1 \varepsilon_{\text{new}}} & \varepsilon_{\text{new}} \leq \varepsilon_1 \\ \Delta X+\frac{(\Delta Y^2+\Delta Z^2) f_s}{4 \pi D \delta\left[E_1 \varepsilon_1+E_2\left(\varepsilon_{\text{new}}-\varepsilon_1\right)\right]} & \varepsilon_{\text{new}} > \varepsilon_1 \end{cases} \quad (4)$$

3) 计算管道内轴向应变引起的物理伸长  $\Delta L_2$ :

$$\Delta L_2=\begin{cases} \frac{\pi D \delta E_1 \varepsilon_{\text{new}}^2}{f_s} & \varepsilon_{\text{new}} \leq \varepsilon_1 \\ \frac{\pi D \delta\left[E_1 \varepsilon_1^2+E_2\left(\varepsilon_{\text{new}}^2-\varepsilon_1^2\right)\right]}{f_s} & \varepsilon_{\text{new}} > \varepsilon_1 \end{cases} \quad (5)$$

4) 根据管道的物理伸长等于管道在断层错动后引起的几何伸长,采用迭代法对变形协调方程  $\Delta L_1=\Delta L_2$  求解:

$$\begin{cases} 86833 \times \varepsilon_{\text{new}}^2=1.732+\frac{3.598 \times 10^{-6}}{\varepsilon_{\text{new}}} & \varepsilon_{\text{new}} \leq \varepsilon_1 \\ 562.3 \times \varepsilon_{\text{new}}^2+0.497=1.732+\frac{3.014}{1997+5424 \times \varepsilon_{\text{new}}} & \varepsilon_{\text{new}} > \varepsilon_1 \end{cases} \quad (6)$$

通过 excel 软件解出  $\varepsilon_{\text{new}}=0.0469$ 。

5) 根据规范要求,需对上述结果进行修正,因此,断层错动作用下管道的最大应变为:

$$\varepsilon_{\text{max}}=2 \times \varepsilon_{\text{new}}=2 \times 0.0469=0.0938 \quad (7)$$

由于管道的最大拉伸应变大于管道的许用应变,即  $\varepsilon_{\text{max}} > [\varepsilon]_F$ ,因此需要采取抗震措施。

式(1)~(7)中: $W$ 为管道上表面至管沟上表面之间的土壤单位长度上的重力,N/m; $\rho_s$ 为回填土的密度,kg/m<sup>3</sup>;  $D$ 为管道外径,m; $H$ 为管道轴线至管沟上表面之间的埋深,m; $g$ 为重力加速度,取 9.8 m/s<sup>2</sup>;  $W_p$ 为管道和内部天然气自重,N/m; $\delta$ 为管道壁厚,m; $\rho$ 为天然气密度,kg/m<sup>3</sup>;  $f_s$ 为纵向摩擦力,N/m; $\mu$ 为土壤与管道外表面的摩擦系数; $\Delta L$ 为断层错动引起的管道长度变化,m; $\Delta X$ 为平行于管轴线的位移分量,m; $\Delta Y$ 为管道法线方向的断层位移,m; $\Delta Z$ 为垂直方向的断层位移,m; $E_1$ 为管道弹性区的材料模量,MPa; $E_2$ 为管道弹塑性区的材料模量,MPa; $\varepsilon_1$ 为管道弹性区起点处的应变; $\varepsilon_{\text{new}}$ 为管道内的拉伸应变。

### 2.2 GB 50470-2008 中的有限元法

#### 2.2.1 土弹簧参数的确定

用有限元方法进行求解时首先要求出三个方向的土弹簧最大作用力以及屈服位移。下面根据规范中给出的土弹簧参数的公式进行求解。

##### 2.2.1.1 管轴方向土弹簧

沿管轴方向单位长度的摩擦力同上面解析方法中的求解过程相同,因此此处不作详细计算:

$$f_s=\mu(2 W+W_p)=24115(\text{N/m}) \quad (8)$$

##### 2.2.1.2 水平横向土弹簧

水平横向单位长度土压如下:

$$N_{\text{ch}}=6.752+0.065 H / D-\frac{11.063}{(H / D+1)^2}+\frac{7.119}{(H / D+1)^3}=6.579 \quad (9)$$

查表(GB 50470-2008 规范中表 E.0.2)计算出水平横向土弹簧屈服位移:

$$X_u=0.04(H+D / 2)=0.091(\text{m}) \quad (10)$$

##### 2.2.1.3 垂直向上土弹簧

$$N_{\text{ex}}=2(H / D)=7.561 \quad (11)$$

$$N_{\text{qv}}=(\phi / 44)(H / D)=\frac{20}{44} \times \frac{2}{0.529}=1.719 \quad (12)$$

$$q_u=N_{\text{ex}} c D+N_{\text{qv}} \rho_s g H D=7.211 \times 10^4(\text{N/m}) \quad (13)$$

屈服位移

$$Y_u=0.1 H=0.2(\text{m}) \quad (14)$$

##### 2.2.1.4 垂直向下土弹簧

三个计算参数  $N_{\text{cvd}}$ 、 $N_{\text{qv}}$ 、 $N_r$  分别计算如下:

$$N_{\text{cvd}}=[\cot(\phi+0.001)]$$

$$\left\{e^{\pi \tan(\phi+0.001)}\left[\tan\left(45+\frac{\phi+0.001}{2}\right)\right]^2-1\right\}=14.8 \quad (15)$$



$$N_{qv}=e^{\pi \tan \phi}\left[\tan \left(45+\frac{\phi}{2}\right)\right]^2=6.4 \quad (16)$$

$$N_r=e^{0.18 \phi-2.5}=3.0 \quad (17)$$

单位长度土压力:

$$q_{ul}=N_{cvd}cD+N_{qv}\rho_{sl}gHD+N_r\rho_{sl}gD^2/2=2.055\times10^5(\text{N/m}) \quad (18)$$

屈服位移:

$$Y_u=0.2D=0.106(\text{m}) \quad (19)$$

式(8)~(19)中: $N_{ch}$ 为水平横向考虑土体粘聚力的计算参数; $X_u$ 为水平横向土弹簧屈服位移,m; $N_{ev}$ 、 $N_{qv}$ 为垂直向上土弹簧的计算参数; $N_{cvd}$ 、 $N_{qv}$ 、 $N_r$ 为垂直向下土弹簧的

表 3 管道参数

| 弹性模量 / MPa      | 泊松比 | 弹性屈服强度 / MPa | 弹性屈服应变  | 塑性屈服强度 / MPa | 塑性屈服应变 | 壁厚 / mm | 管径 / mm | 埋深 / m | 密度 / (kg·m <sup>-3</sup> ) |
|-----------------|-----|--------------|---------|--------------|--------|---------|---------|--------|----------------------------|
| $2.1\times10^5$ | 0.3 | 462          | 0.002 2 | 517          | 0.040  | 6       | 529     | 2      | 7 850                      |

表 4 土体和断层参数

| 弹性模量 / MPa | 泊松比  | 内聚力 / Pa | 摩擦角 / (°) | 密度 / (kg·m <sup>-3</sup> ) | 穿越角 / (°) | 错动量 / m |     |
|------------|------|----------|-----------|----------------------------|-----------|---------|-----|
|            |      |          |           |                            |           | 水平      | 垂直  |
| 7          | 0.37 | $10^4$   | 20        | 1 800                      | 30        | 2       | 0.5 |

通过计算,沿管轴方向的最大轴向应变为 0.307,大于管道的容许拉伸应变,故需采取抗震措施。

规范<sup>[1]</sup>所用方法与本文所建模型计算结果的比较,见图 7。

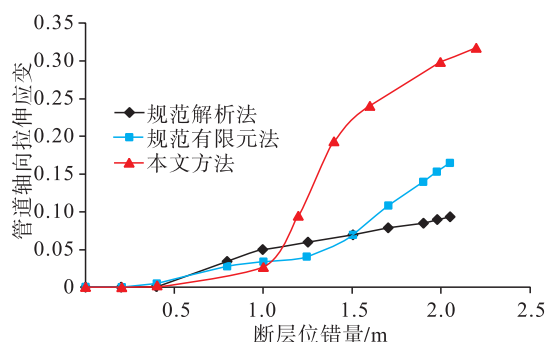


图 7 不同方法得到的管道轴向应变比较

经比较发现,在错动量较小的时候,三种方法计算所得到的最大应变值相差不大,但是随断层错动量的继续增加,三种方法出现了明显差异,本文方法在断层错动量小于 1 m 时产生的应变值比其他两种方法要小,但是随着错动量的继续增大,本文方法中管道较早出现了塑性应变集中现象,而规范<sup>[1]</sup>中的有限元法出现应变集中现象较晚,因此本文方法产生的应变值小很多,解析法的结果在管道进入塑性阶段后的应变值要比有限元法得到的应变值小得多。分析结果表明,现行规范<sup>[1]</sup>中对管道在断层作用下反应结果的计算偏于不安全。

计算参数; $q_u$ 为单位长度垂直向上土压,N/m; $\rho_{sl}$ 为管道周围场地土的密度,kg/m<sup>3</sup>; $\phi$ 为土的内摩擦角,(°); $q_{ul}$ 为单位长度垂直向下土压,N/m; $y_{ul}$ 为垂直向下土弹簧的屈服位移,m。

经计算,本例中管道以拉伸应变为主,其最大应变值为 0.164 5,大于管道的允许拉伸应变,因此需要采取抗震措施。

## 2.3 本文模型

本文模型需要输入的参数见表 3~4。

## 3 结论

1) 断层的错动往往会引发地震,跨断层埋地管道地震反应是一个十分复杂的问题:多数情况下断层的错动既具有倾滑断层的运动特性,又有沿断层破裂面运动的趋势,而并非单一的相对向上、向下或平移错动;断层错动引发的地震会伴有砂土液化、滑坡等其他地震灾害的发生,地震波对钢质管道的反应也存在一定的影响;地震发生时管道通常都处于工作状态,在今后的研究中应充分考虑管内介质的作用,建立管—土—气耦合模型,综合考虑介质的力学和热力作用。目前仅有针对单一或少数因素开展的研究,因此下一步应考虑将以上各因素综合起来进行研究。

2) 本研究涉及土力学、弹塑性力学、固体力学、断裂力学、流体力学、地震工程学、材料科学以及材料腐蚀等学科,属于综合性交叉学科研究,可在其他生命线工程系统中推广应用。

参考文献:

- [1] GB 50470—2008, 油气输送管道线路工程抗震技术规范[S]. GB50470—2008, Seismic Technical Code for Oil and Gas Transmission Pipeline Engineering[S].
- [2] Newmark N M, Hall W J. Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement[A]. Proc. U. S. Nat. Conf. Earthquake Engineering[C]. U.S. University of Michigan, 1975. 416—425.
- [3] 刘爱文. 基于壳模型的埋地管线抗震分析[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2002.  
Liu Aiwen. Response Analysis of a Buried Pipeline Crossing the Fault Based on Shell—model[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2002.

(下转第 31 页)

can be due to the reduction of the pipeline throughput, the unavailability of associated products (oil on an oil platform, condensates in a gas plant), or due to penalties assessed because contractual commitments are not met. The value associated with the lost production is not necessarily the market value of the lost production. It may also be the loss of income from transportation tariffs, the cost from penalties for not being able to satisfy delivery contracts, or the cost for lost opportunity (i.e. due to the requirement to keep spare power to compensate for poor availability, instead of being able to use the spare power to increase contractually agreed deliveries).

与机组可用率相关的成本是由于压气站在一段时间内无法处于满负荷工作状态, 这段时间就没有利润。收益损失可以是因为管输气量的降低, 相关产品(石油平台上的石油, 天然气处理厂的凝析油)生产率的下降或者是由于没有履行合同条款而造成的罚款。当然损失商品的价值不一定是其市场价值, 还可能包括管输费的减少, 没能满足输送合同要求而引起的罚款或错失机会而带来的损失(机会成本, 例如将备用功率用来补偿较低可用率站场而不是提高合同约定的输气量)。

Station availability can be improved by installing spare units, but this is an additional first cost factor.

站场可用率可通过增加备用机组来提高, 但这又会增加机组购置成本。

## 7 Conclusion

### 结论

In this paper, we have tried to establish a comprehen-

sive set of criteria for the economic evaluation of various drivers and driven equipment technologies in gas compression applications. The goal is not to advertise the advantages or disadvantages of different configurations, but to provide a methodology that allows the user of equipment to make informed, data driven judgments, based on the actual specifics of a given application. It should be understood that no single parameter (for example fuel efficiency) is sufficient to make an economically advantageous decision

本文尝试为配置了不同驱动机和压缩机的压气站建立一套全面的经济评估标准, 旨在为用户提供一种方法使其可以在实际应用工程的真实数据基础上做出有数据支撑的判断, 而并不是为了宣传压气站不同机组配置的优势和劣势。我们需认识到要做一个综合的经济性决定, 仅考虑一个因素(例如燃烧效率)是远远不够的。

### References

#### 参考文献:

- [1] Olsen B, Kurz R, Hughes M, et al. Economic Evaluation Model for Various Drivers and Driven Equipment Technologies in Gas Compression Applications[C]. Nashville: Gas Machinery Conference, 2001.
- [2] Kurz R. Carbon Footprint Assessment for Compressor Stations [C]. Brussels: 7<sup>th</sup> International Gas Turbine Conference, 2014.
- [3] Kurz R, Sheya C, Gas Turbines or Electric Drives in Offshore Applications[C]. ASME Paper GT 2005-68003, 2005.

(上接第 15 页)

- [4] Kennedy R P, Darrow A W, Williamson R A. Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline [J]. Transportation Engineering Journal, 1977, 617-633.
  - [5] 金 浏, 李鸿晶, 姚保华. 埋地管线—土体相互作用分析计算区域的选取[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2009, 31(3): 37-41.
- Jin Liu, Li Hongjing, Yao Baohua. Determination of Interaction Area in Pipeline-Soil System under Ground Permanent Deformation[J]. Journal of Nanjing University of Technology

(Natural Science Edition), 2009, 31(3): 37-41.

- [6] Lee L H N, Ariman T, Chen C C. On Buckling of Buried Pipelines by Seismic Excitation [C]. San Francisco: ASME. Proceedings of the Vessel, and Piping Div. ASME Century 2 Conference, 1980.
- [7] Lee L H N, Ariman T, Chen C C. Elastic-plastic Buckling of Buried Pipelines by Seismic Excitation [J]. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1984, 3(4): 168-173.