

海底管道轴向走管的可靠度分析

师玉敏^{1,2}, 高福平^{1,2*}

¹ (中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190) ² (中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 在高温高压运营环境和多次开关井的循环作用下, 海底管道沿轴向走管的现象尤为突出, 甚至可能引起端部相连接结构的破坏。本文首先阐述了诱导管道走管的条件、机理及影响因素, 进而考虑轴向管土相互作用的楔形效应, 推导了走管速度的解析解。鉴于海床约束力存在不确定性, 考虑管土相互作用摩擦系数的随机特性, 建立了管道轴向走管可靠度分析的功能函数。基于该解析模型, 采用蒙特卡洛模拟法对管道轴向位移的分布规律和失效概率进行了计算分析。结果表明, 当轴向摩擦系数满足正态分布时, 管道在悬链线立管张力和斜坡海床作用下的走管速度均呈非对称分布; 二者的变异系数较为接近, 且均高于摩擦系数的变异系数。可靠度分析表明, 摩擦系数变异性的存在降低了采用确定性方法设计的海底管道的可靠性, 增大了管道失效的概率。

关键词: 轴向走管; 变异系数; 功能函数; 蒙特卡洛模拟; 可靠度分析

引言

我国海洋工程实践正从近海浅水迈向远海深水海域。对于深海油气道而言, 流动保障使得其在工作过程中常处于高温高压的超常环境。为保证安全运行, 深海管道每年要经历数次停产检修^[1]。每次开井-关井的循环过程均会引起管道沿轴向的非均匀升温膨胀和均匀冷却收缩, 进而导致管道可能朝向某一固定方向整体滑移, 该现象通常称为管道的轴向走管 (Pipeline Walking)^[2]。随着开关井循环次数的增加, 管道沿轴向的滑移量不断累积。由于浅海管道工作温度低, 且常常采用埋管作业, 几乎不出现走管现象; 深海管道常直接铺设于海床之上, 所受轴向约束力偏小, 高温高压作用下的走管现象尤为突出^[3]。“走管”并非管道结构的极限状态^[4], 但却可能导致相连跨接管道端部的过度位移、钢悬链线立管 (Steel Catenary Riser, 简称 SCR) 张力的丧失、管道整体屈曲段内的过应力等, 甚至引起上述结构的破坏^[5]。

Tornes et al (2000)^[6]根据北海油田监测数据, 发现了高温高压管道的走管现象; 采用库伦管土摩擦模型, 通过数值模拟获得了管道沿程有效轴向力分布和走管形态; 依据约束条件的不同将管道进行了“长短”分类。相比于长直管道, 短直管道更容易发生轴向走管^[5,7]。Carr et al (2006)^[5]提出了短直管走管的三个驱动条件: SCR 连接端的张力, 沿管道长度方向的海床斜坡, 开井过程中管道内的瞬态温度梯度。通过有效轴向力的变化, 分别推导了管道走管速度的解析解, 并被 DNV·GL 规范 (2018)^[8]采纳。对于侧向整体屈曲的长输管道, 屈曲段内轴向力的降低也同样会导致附近管段向屈曲段的整体轴向走管, 且屈曲和走管两种失稳模式之间相互作用和影响^[9]。由于深水海底环境比较复杂, 为更加准确地评估海底管道轴向稳定性, 诸多学者针对内流影响因素 (如运输介质的多相流、流速)、管道结构 (单层、双层)、管土相互作用、走管速度计算方法、工程防治措施等开展了大量研究^[10-13]。

深海海床地质条件复杂多变, 海床土体的性质及约束力存在不确定性和随机性, 这对海底管道的热稳定性及风险评估至关重要^[8]。因此, 本文将首先阐述 SCR 张力和斜坡海床诱导短直管轴向走管的物理机制及影响因素; 考虑轴向管土相互作用的楔形效应^[14,15], 推导走管速度的简化解析解。考虑轴向摩擦系数的随机性, 基于可靠度理论, 建立管道轴向走管可靠度分析的功能函数。进而, 通过蒙特卡洛模拟对管道走管速度的分布规律、统计特征以及失效概率进行计算和分析。

1 短直管的轴向走管

1.1 约束状态

图 1 (a) 给出了管道在升温-冷却过程中, 有效轴向力 S 沿程分布的典型示意图。 ΔP 为全约束状态下有效轴向力的变化, 表示为^[8]:

$$\Delta P = -(p_2 - p_1)A_1(1 - 2\nu) - EA_s\alpha_T(T_2 - T_1) \quad (1)$$

其中 p_1 和 p_2 分别为管道作业条件改变前后的内压, T_1 和 T_2 分别为管道作业条件改变前后的温度, A_1 为管道内径截面面积, ν 为管道泊松比, E 为管道弹性模量, α_T 为管道热膨胀系数, A_s 为管壁横截面积。受到完全约束作用时, 管道的轴向变形彻底被限制, 温度载荷全部转化为有效轴向力, 即为全约束状态下的轴向力。反之, 若管道不受任何约束作用, 温度载荷产生的轴向力则通过轴向变形的形式被完全释放。

实际工程中, 由于海床对管道的阻碍作用, 未被释放的部分轴向力则为管道的有效轴向力。如图1 (a) 所示, 有效轴向力沿程分布曲线的斜率为单位长度的管道所受到的约束力 F_A 。对于平坦砂质海床上的非埋管道而言, 抵抗其轴向运动的约束力由海床土阻力 F_R 提供, 可表示为^[14, 15]:

$$F_A = \mu_A \zeta W_s \quad (2)$$

其中 μ_A 为管土界面的轴向摩擦系数, W_s 为单位长度管道水下重量。 ζ 为楔形系数, 反映了管土接触面的圆弧几何特征导致界面总压力大于竖向外载荷的现象(即, 楔形效应)。管道嵌入床面深度为零时, $\zeta=1.0$; 嵌入深度越大, 楔形效应愈加显著; 当管道半埋时, 楔形系数约为 1.27。

当 $F_A < F_A^*$ (其中, $F_A^* = \Delta P / L$, L 为管道长度) 时, 抵抗管道轴向运动的累计约束力(即 $2 \times (0.5 F_A L)$) 未能使管道达到全约束状态 (ΔP), 管道所有位置点的约束力均处于“完全触发”状态。因此, 在升温-冷却过程中, 管道中点始终为虚拟锚固点 (Virtual Anchor Point, 见图1 (b) 中的A和B点), 其它位置以锚固点为中心发生周期性的膨胀和收缩。此类管道称为“短管”。

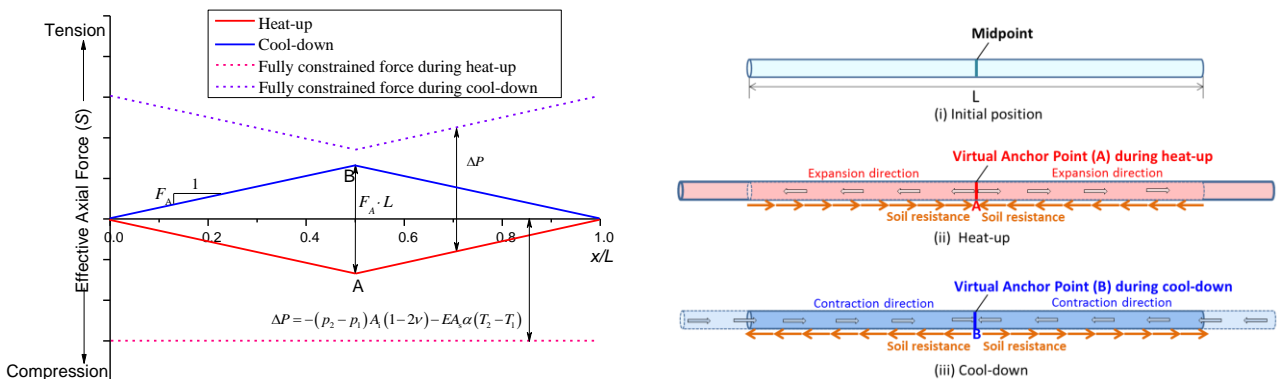


图1 (a) 短管有效轴向力沿程分布示意图; (b) 管道的升温膨胀和冷却收缩

Fig.1 (a) Illustration of force profile for a fully mobilized pipeline; (b) Expansion and contraction when the pipe is heated and cooled

1.2 走管机理与解析模型

管道在均匀升温-冷却的理想情况下, 膨胀和收缩关于同一个虚拟锚固点 (A、B 点重合) 对称分布, 膨胀量和收缩量相等 (图1 (b))。经历一次循环后, 两种变形相互抵消, 管道不会出现整体的走动。而在实际工程中, 受 SCR 张力和斜坡海床条件的影响, 管道在均匀升温 and 冷却过程中的变形并不完全对称。本节分别阐述两种条件下管道轴向走管的机理, 并推导走管速度的解析解。

(1) SCR 张力

若管道一端受到SCR张力 N_{SCR} 作用, 有效轴向力的沿程分布则不再对称 (图2 (a)), 以SCR位于冷端为例)。升温虚拟锚固点A和冷却虚拟锚固点B并不重合, 其中A点远离SCR端, 而B点靠近SCR端。A和B之间的管段在升温 and 冷却过程中均朝SCR方向滑移, 轴向力曲线斜率相同 (土阻力方向相同)。可见, 管道的轴向走管位移由AB之间的管段控制, 每经历一次循环, 管道便整体向SCR方向发生滑移。通过计算, 虚拟锚固点之间的管段长度 X_{ab} 为:

$$X_{ab} = \frac{N_{SCR}}{\zeta \mu_A W_s} \quad (3)$$

沿 X_{ab} 管段内有效轴向力的变化 $(\Delta S)_{SCR}$ 为:

$$(\Delta S)_{SCR} = N_{SCR} - \zeta \mu_A W_s L \quad (4)$$

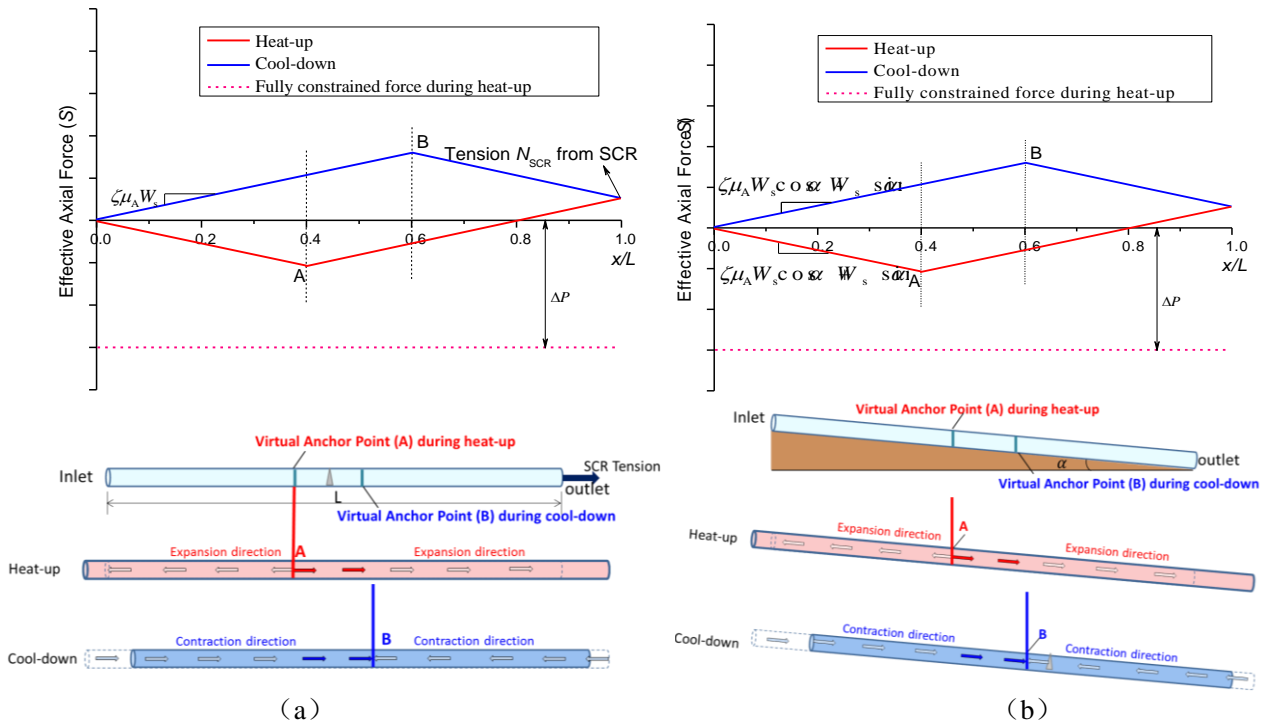


图 2 虚拟锚固点分离引起的管道走管示意图: (a) SCR 张力; (b) 斜坡海床

Fig.2 Illustration of pipe walking due to separation of virtual anchor point: (a) SCR tension; (b) Sloping seabed

(2) 斜坡海床

若管道顺坡铺设于斜坡海床之上, 受管道自重沿斜坡方向分量 ($W_s \sin \alpha$) 的影响, 相比式 (2), 抵抗管道轴向运动的约束力 F_A 可表示为^[15]:

$$F_A = \begin{cases} \mu_A \zeta W_s \cos \alpha + W_s \sin \alpha & (\text{上坡滑移}) \\ \mu_A \zeta W_s \cos \alpha - W_s \sin \alpha & (\text{下坡滑移}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, α 为海床坡角。上坡滑移和下坡滑移中约束力的不同导致管道有效轴向力呈非对称分布 (如图2 (b) 所示, 以热源位于斜坡顶面为例)。与SCR张力作用下类似, 升温过程中的虚拟锚固点A和冷却过程中的虚拟锚固点B并不重合, 其中A点靠近斜坡顶面, 而B点靠近斜坡底面。AB之间的管段在升温 and 冷却过程中均朝下坡方向滑移。虚拟锚固点之间的管段长度 X_{ab} 为:

$$X_{ab} = \frac{L \tan \alpha}{\zeta \mu_A} \quad (6)$$

沿 X_{ab} 管段内轴向力的变化 $(\Delta S)_{SP}$ 为:

$$(\Delta S)_{SP} = W_s L |\sin \alpha| - \zeta \mu_A W_s L \cos \alpha \quad (7)$$

分别联立式 (1) ~ (4), 式 (1), (5) ~ (7), 根据线弹性的应力-应变关系, 便可推导出 SCR 张力和斜坡海床作用下管道轴向走管速度 (单次循环管道整体滑动的位移, 单位: m/循环) 为:

$$\Delta X_{SCR} = \frac{\left[(N_{SCR} - \zeta \mu_A W_s L) + |\Delta p A_1 (1 - 2\nu) + EA_s \alpha_T \Delta T| \right]}{EA_s} \cdot \frac{N_{SCR}}{\zeta \mu_A W_s} \quad (8a)$$

$$\Delta X_{SP} = \frac{\left[(W_s L |\sin \alpha| - \zeta \mu_A W_s L \cos \alpha) + |\Delta p A_1 (1 - 2\nu) + EA_s \alpha_T \Delta T| \right]}{EA_s} \cdot \frac{L \tan \alpha}{\zeta \mu_A} \quad (8b)$$

式中 $\Delta p = p_2 - p_1$, $\Delta T = T_2 - T_1$ (见式 (1))。

图3给定管土界面的轴向摩擦系数 μ_A 时, 随着张力 N_{SCR} 和坡角 α 的增大, 管道走管速度 ΔX_{SCR} 和 ΔX_{SP} 呈线性增长, 对管道端部相连接结构的安全性愈加不利。当摩擦系数不同, 其它参数相同时, 走管速度的范围跨越了 $10^{-2} \sim 10^0$ 量级; 随着 μ_A 的增大呈非线性降低。摩擦系数的增大增强了管道轴向约束力 (见式 (2) 和 (5)), 缩短了虚拟锚固点之间的距离 X_{ab} (见式 (3) 和 (6)), 降低了有效轴向力变化 (见式 (4) 和 (7)) 及轴向应变, 导致管道走管速度的降低 (见式 (8a) 和 (8b))。尤其是当摩擦系数较小时, 增大约束条件能够快速抑制管道的走管现象。

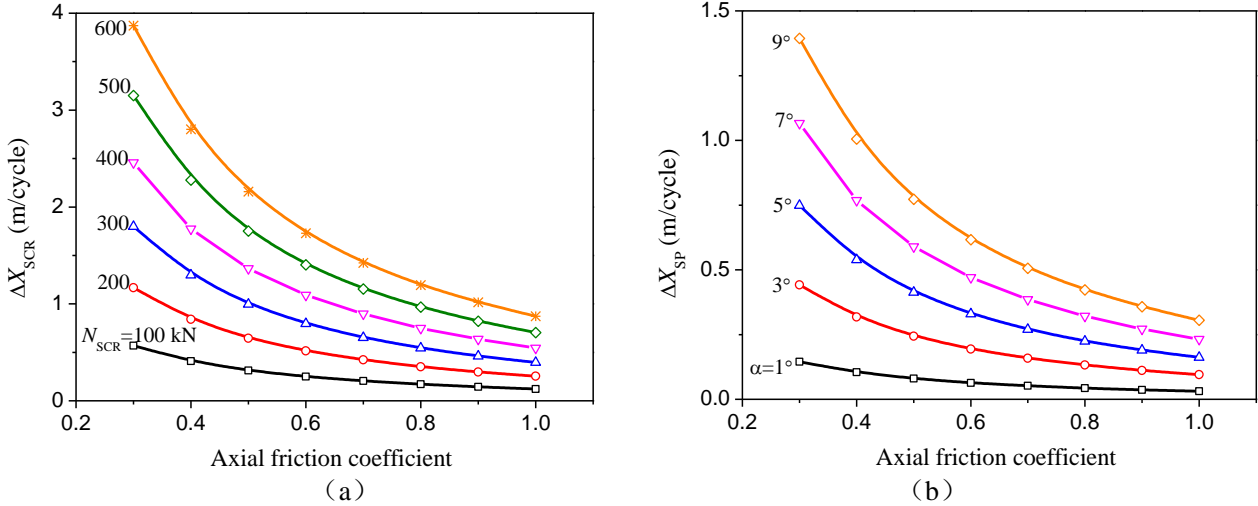


图3 管道走管速度随摩擦系数的变化: (a) SCR 张力; (b) 斜坡海床 ($L=2\text{km}$, $D=258.9\text{mm}$, $t=18.3\text{mm}$, $W_s=0.746\text{kN/m}$, $\Delta T=116^\circ\text{C}$, $\Delta p=0\text{MPa}$, $\alpha_T=1.1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\zeta=1.0$)

Fig.3 Variation of walk per cycle with axial friction coefficient due to: (a) SCR tension; (b) Seabed slope ($L=2\text{km}$, $D=258.9\text{mm}$, $t=18.3\text{mm}$, $W_s=0.746\text{kN/m}$, $\Delta T=116^\circ\text{C}$, $\Delta p=0\text{MPa}$, $\alpha_T=1.1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\zeta=1.0$)

2 管道轴向走管的可靠度分析

DNV • GL 规范^[8]指出, 海床约束力是管道热稳定性评估中最难以确定的参量, 存在大量不确定性, 可采用概率密度函数进行描述。为体现海床土体对管道约束力的随机特性, 本文将管土界面的轴向摩擦系数 μ_A 视为基本随机变量。由式 (8a) 和 (8b) 可知, 管道轴向走管速度及多次循环后的累计位移可能也存在随机性, 服从某一概率分布。就结构安全性而言, 管道的可靠度设计需要针对走管现象提出结构功能要求, 防止管道端部因过度位移导致相连接结构的破坏。因此, 本节基于结构可靠度理论, 采用蒙特卡洛模拟法对管道轴向走管的可靠性进行分析。

2.1 功能函数和失效概率

若管道位于斜坡海床之上, 并在下坡端受到 SCR 张力作用时, 管道安全性处于风险最高的情况, 须将两种条件单独作用下的走管速度进行叠加。此时, 管道轴向走管的可靠度分析的功能函数 Z 为:

$$Z = \Delta X_{lim} - (\Delta X_{SCR} + \Delta X_{SP}) \quad (9)$$

其中 ΔX_{lim} 为端部结构的设计位移限值^[8], 视为确定变量。若功能函数 $Z=0$, 管道轴向位移刚好达到限值, 管道结构处于极限状态; 若功能函数 $Z>0$, 则管道的轴向走管处于可靠或安全状态; 若 $Z<0$, 则轴向走管使得管道结构处于不可靠状态或失效状态。

假定摩擦系数随机变量服从正态分布, 均值为 $\bar{\mu}_A$; 标准差为 σ_{μ_A} ; 变异系数为 $\text{cov} = \sigma_{\mu_A} / \bar{\mu}_A$, 表征随机变量的大小偏离均值的无量纲参数。由式 (8a) 和 (8b) 可知, ΔX_{SCR} 和 ΔX_{SP} 均为导出随机变量。功能函数 Z 的均值和标准差分别为 $\bar{Z} = \Delta X_{lim} - \overline{\Delta X_{SCR} + \Delta X_{SP}}$, $\sigma_Z = \sigma_{\Delta X_{SCR} + \Delta X_{SP}}$, 可靠度指标 $\beta = \bar{Z} / \sigma_Z$, 则管道走管处于失效区域的概率 p_f 为:

$$p_f = p(Z < 0) = \psi\left(\frac{0 - \bar{Z}}{\sigma_Z}\right) = \psi(-\beta) \quad (10)$$

式中 ψ 为累计概率分布函数。

2.2 蒙特卡洛模拟

取轴向摩擦系数随机变量的均值 $\bar{\mu}_A = 0.6$ ，变异系数 $\text{cov}_{\mu_A} = 20\%$ ，其它参数如表 1 所列。通过 Matlab 随机生成容量为 5000 的摩擦系数样本观测值。针对各随机样本，通过公式 (8a) 和 (8b) 分别对 SCR 张力和斜坡海床作用下管道的轴向滑移速度进行确定性计算。

表 1 材料参数
Table 1 Material parameter

长度 L (km)	外径 D (mm)	壁厚 t (mm)	水下重量 W_s (kN/m)	弹性模量 E (GPa)	温度变化 ΔT (°C)	内压变化 Δp (MPa)	热膨胀系数 α_T (°C ⁻¹)
1.024	400	20	1.465	204	150	0	1.2×10^{-5}

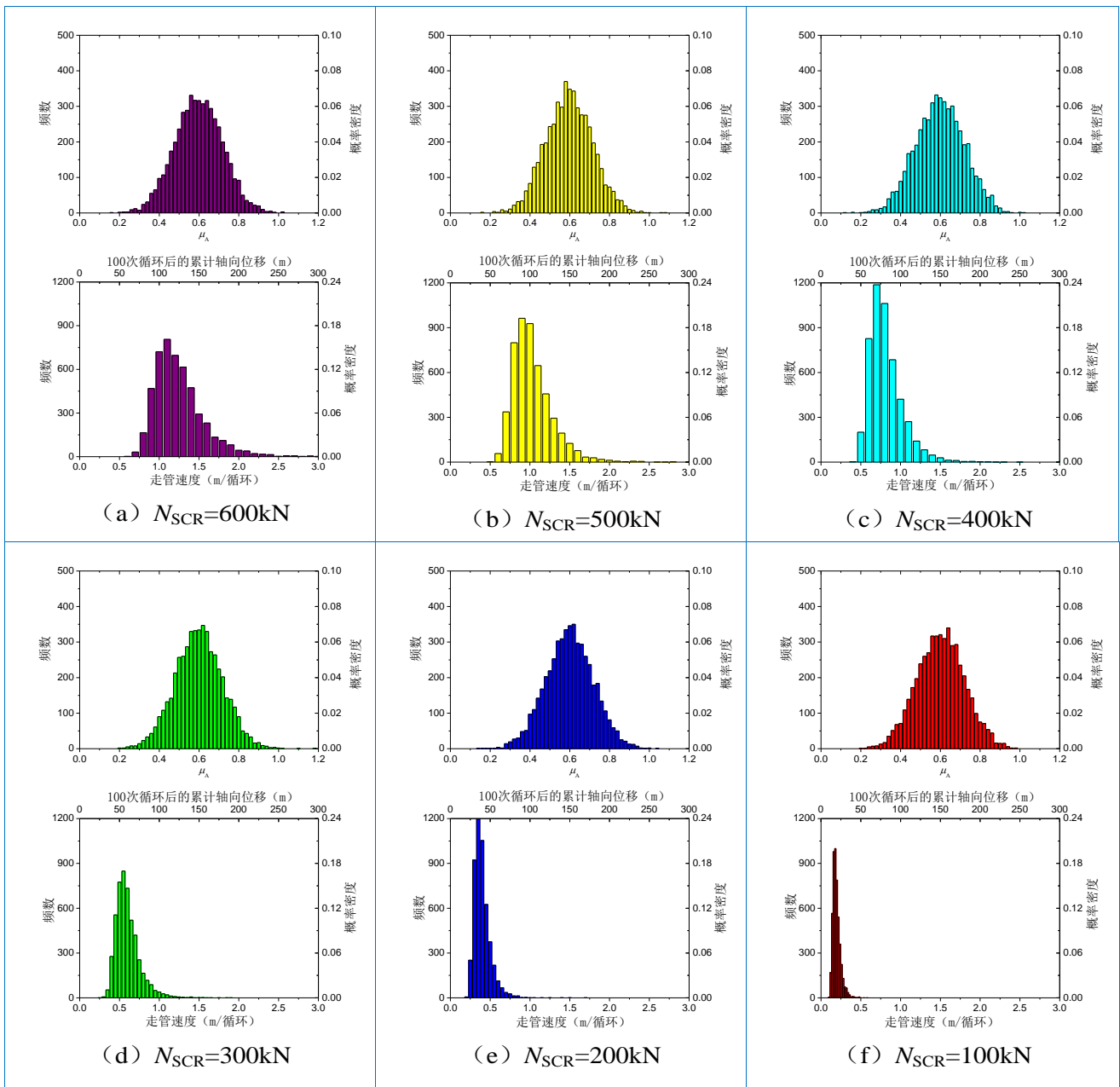


图 4 SCR 张力作用下管道走管速度及累计位移分布图

Fig.4 Distributions of walk per cycle and cumulative displacement of pipeline due to SCR tension

图 4 和图 5 给出了管道轴向走管速度的概率分布图，统计特征参数如表 2 所列。两种条件下的走管速度均呈现非对称分布，存在一定的偏斜。偏度值介于 1.5~2.5，相比于正态分布，走管速度分布为正偏离；大于均值的数据点偏少，图中体现为右侧尾部相对于左侧偏长。统计表明，两种不同条件下走管速度的变异系数非常接近，约为 25~27%。该变异系数不受确定性变量张力 N_{SCR} 和坡角 α 变化的影响，仅与基本随机变量的变异系数相关，且高于后者。假如该管道整个生命周期内历经 100 次开井-关井作业，其轴向累计位移可高达 $10^1 \sim 10^2$ 量级，严重威胁了管道系统的可靠性。

为对比分析海床约束力的随机特性对管道可靠性的影响，采用确定性分析方法（取 $\overline{\mu_A} = 0.6$ ）所得的轴向位移作为设计极限值 ΔX_{lim} 。采用蒙特卡洛模拟法，将走管速度随机变量的样本值作为输入获得功能函数的样本，统计失效区域（ $Z < 0$ ）样本的数量从而估算失效概率 p_f 。结果表明，考虑轴向摩擦系数随机性时，管道轴向走管导致结构处于失效区的概率 p_f 略小于 50%。如果管道设计中假设海床约束力为确定性参量，采用其均值作为设计参数时，将只有约 50% 置信度保证结构的安全性，仍有近 50% 的概率管道会失效。可见，可靠度分析方法能够为高温高压管道的轴向走管问题提供一种风险评估方法，对于管道设计时安全系数的选取，热稳定性的校核及工程抑制方法的确定具有一定的指导意义。

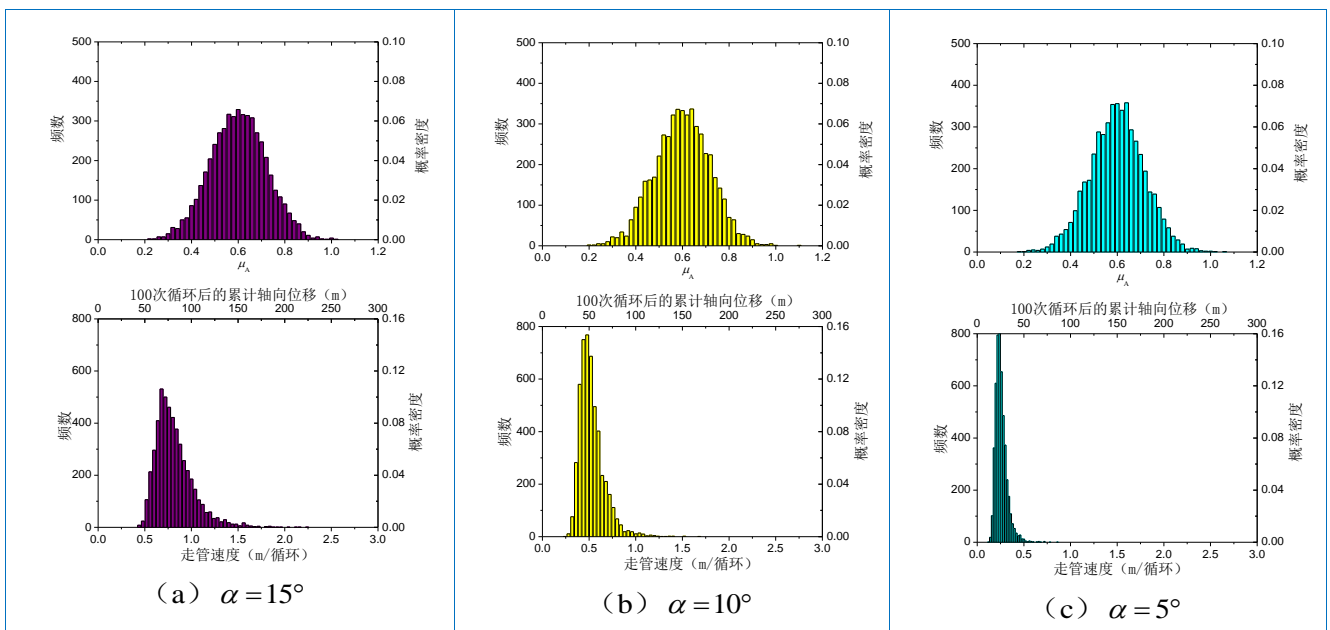


图 5 斜坡海床上管道走管速度及累计位移分布图

Fig.5 Distributions of walk per cycle and cumulative displacement of pipeline on the sloping seabed

表 2 管道走管速度的统计参数

Table 2 Statistical parameters of walk per cycle

驱动条件	管道轴向走管速度 (m/循环)								失效概率 (%)	
	最大值	最小值	中位数	峰度	偏度	均值	标准差	变异系数 (%)		
N_{SCR} (kN)	600	4.7	0.6	1.2	8.0	1.9	1.25	0.326	26.0	49.24
	500	3.8	0.5	1.0	9.2	1.9	1.03	0.261	25.3	48.30
	400	4.2	0.4	0.8	18.0	2.4	0.82	0.220	27.0	49.50
	300	1.9	0.3	0.6	6.2	1.7	0.60	0.155	25.7	49.66
	200	1.7	0.2	0.4	12.3	2.2	0.40	0.105	26.4	49.68
	100	0.6	0.1	0.2	4.6	1.6	0.20	0.050	25.5	50.64
α ($^\circ$)	15	2.2	0.4	0.78	3.9	1.5	0.82	0.205	25.2	49.56
	10	1.7	0.2	0.5	5.9	1.7	0.53	0.136	25.7	49.46
	5	0.9	0.1	0.24	7.3	1.8	0.26	0.065	25.2	49.48

3 结论

(1) 阐述了悬链线立管张力和斜坡海床诱导短直管道轴向走管的物理机制及影响因素。考虑轴向管土相互作用的楔形效应, 推导了单次循环管道整体走动量的解析解。

(2) 考虑管土界面轴向摩擦系数的随机特性, 基于解析模型, 通过蒙特卡洛模拟获得了管道轴向走管速度及累计位移的分布规律和统计特征。当轴向摩擦系数服从正态分布时, 在悬链线立管张力和斜坡海床作用下, 管道的走管速度均呈非对称分布。两种条件下的走管速度的变异系数较为接近, 不受确定性变量的影响, 仅与基本随机变量的变异系数相关, 且高于后者。

(3) 基于可靠度理论, 建立了管道轴向走管可靠度分析的功能函数; 采用蒙特卡洛模拟法, 统计不满足功能要求的走管速度样本数量, 估算了结构处于失效区域的概率。对比确定性与可靠度分析两种方法的计算结果, 考虑轴向摩擦系数的随机特性时, 管道轴向走管不可靠的概率略小于 50%。摩擦系数变异性的存在降低了采用确定性方法设计的海底管道的可靠性, 增大了管道失效的概率。

致谢: 本研究得到国家杰出青年科学基金项目(编号: 11825205); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(编号 XDB22030202)资助。

参考文献

- 1 Thompson H, Reiners J, Brunner M, et al. Tahiti flowline expansion control system. In: *Offshore Technology conference*, 2009. OTC-19858-MS
- 2 Carr M, Bruton D, Leslie D. Lateral buckling and pipeline walking, a challenge for hot pipeline. In: *Offshore Technology conference*, Amsterdam, 2003. 1-36
- 3 Bai Y, Tang J, Xu W, et al. Reliability-based design of subsea light weight pipeline against lateral stability. *Marine Structure*, 2015, 43: 107-124
- 4 Randolph MF, Gaudin C, Gourvenec SM. Recent advances in offshore geotechnics for deep water oil and gas developments. *Ocean Engineering*, 2011, 38(7): 818-834
- 5 Carr M, Sinclair F, Bruton D. Pipeline walking—understanding the field layout challenges and analytical solutions developed for the SAFBUCK JIP. In: *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, Houston, USA, 2006. OTC 17945.
- 6 Tornes K, Ose BA, Jury J et al. Axial creeping of high temperature flowlines caused by soil ratcheting In: *Proceedings of the Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2000. ASME, 1229-1239
- 7 Rong HC, Inglis R, Bell G, et al. Evaluation and mitigation of axial walking with a focus on deep water flowlines. In: *Offshore Technology Conference*, 2009.
- 8 Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd. *Global Buckling of Submarine Pipelines*, Recommended Practice DNV-RP-F110, 2018
- 9 刘云霄. 高温/高压海底管道横向热屈曲机理及控制措施研究[博士论文]. 大连: 大连理工大学, 2010, 66-73
- 10 Bruton DAS, Carr M, Sinclair F, et al. Lessons learned from observing walking of pipeline with lateral buckles including new driving mechanisms and updated analysis models. In: *Offshore Technology conference*. 2010
- 11 Chen Q, Chia HK. Pipe-in-pipe walking: Understanding the mechanism, evaluating and mitigating the phenomenon: In: *International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2010. ASME, 73-79.
- 12 Reda A, Sultan IA, Howard IM, et al. Pipeline walking and anchoring considerations in the presence of riser motion and inclined seabed. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2018, 162: 71-85.
- 13 Castelo A, White D, Tian YH. Simple solutions for downslope pipeline walking on elastic-perfectly-plastic soils. *Ocean Engineering*, 2019, 172: 671-683
- 14 White DJ, Randolph MF. Seabed characterisation and models for pipeline-soil interaction. In: *Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, Portugal, 2007. ISOPE, 758-769.
- 15 Shi YM, Wang N, Gao FP, et al. Physical modeling of the axial pipe-soil interaction for pipeline walking on a sloping sandy seabed. *Ocean Engineering*, 2019, 178: 20-30.

Reliability analysis for axial walking of submarine pipelines

Shi Yumin^{1,2}, Gao Fuping^{1,2*}

¹(*Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

²(*School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: High internal pressure and temperature usually cause submarine pipelines to undergo expansion/contraction and induce the axial walking on the seabed during start-up and shut-down cycles in the operating life. The cumulative movement of the whole pipeline could lead to significant end displacement, and even the security failure of associated infrastructures. Firstly, the driving conditions, walking mechanisms and influential factors of the pipeline walking phenomenon are discussed, respectively. Considering the wedging effect in the axial pipe-soil interaction, the analytical solutions are then provided for predicting the amount of walking per cycle. In this study, to reflect the uncertainty or variability of soil resistance, the pipe-soil friction coefficient is described as a random variable. Meanwhile, a performance function for the reliability analysis of pipeline walking is established. Based on analytical solutions, probability distribution of the walk per cycle and the reliability of pipe-walking are evaluated with Monte Carlo simulations. The results demonstrate that, when the friction coefficient satisfies a normal distribution, the respective walking rates due to steel catenary riser tension and seabed slope are distributed asymmetrically. Furthermore, their variation coefficients are approximately close to each other, which are higher than that of friction coefficient. Reliability assessment of pipeline walking indicates that, the existence of friction coefficient variability would degrade reliability and increase failure probability of the pipeline designed with deterministic method, which may pose risks to the associated infrastructures.

Key words: Pipeline walking, Coefficient of variation, Performance function, Monte Carlo simulation, Reliability assessment