

文章编号: 1000-4882 (2013) 01-0109-05

海底管道相邻屈曲最小间距的控制准则

刘羽霄^{1,2}

(1. 山东工商学院 管理科学与工程学院, 山东 烟台 264005;

2. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘 要

平坦海床上裸铺管道不可能仅在一个位置发生屈曲, 而是在一系列位置均有可能发生。为了激发第二个屈曲, 两个屈曲之间应该保持足够的间距。如果两个屈曲之间的距离过小, 则相邻屈曲之间的轴向力将达不到第二个屈曲的临界荷载, 无法激发第二个屈曲。论文提出了最小屈曲间距的滑动距离判别法, 给出了最小屈曲间距的判别公式。

关 键 词: 海底管道; 横向屈曲; 屈曲间距; 初始几何缺陷; 解析解

中图分类号: TE973

文献标识码: A

0 引 言

随着海洋油气资源的开发和利用, 出现了越来越多在高温/高压下工作的海底管道, 由温差和压力产生的轴向力引起了管道的屈曲, 沿管道发生的多个屈曲可以共享管道的热膨胀, 以避免热膨胀集中在一个屈曲位置, 从而更有效地降低管道的轴向力。海底管道的屈曲变形问题成为管道设计的关键性问题。

平坦海床上裸铺管道不可能仅在一个位置发生屈曲, 而是在一系列位置均有可能发生。为了激发第二个屈曲, 两个屈曲之间应该保持足够的间距。如果两个屈曲之间的距离过小, 则相邻屈曲之间的轴向力将达不到第二个屈曲的临界荷载, 无法激发第二个屈曲。本文介绍了 DNV 规范给出的轴向力的判别方法, 并提出了最小屈曲间距的滑动距离判别法, 给出了最小屈曲间距的判别公式。

1 轴向力判别方法

为了保证相邻屈曲均得到激发, DNV 规范^[1]给出了如式 (1) 所示的力的控制准则。若式 (1) 成立, 则相邻屈曲均得到激发。

$$S_{R,1} + \Delta S \geq S_{G,2} \quad (1)$$

式中, $S_{R,1}$ 为第一个屈曲对应的后屈曲的有效轴向力; ΔS 为相邻屈曲间建立的轴向力; $S_{G,2}$ 为激发第二个屈曲的轴向力。如图 1 所示。

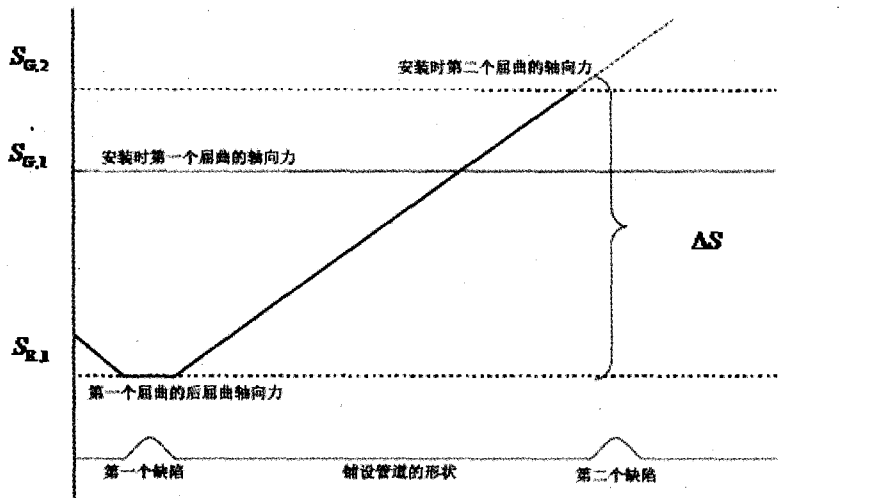


图1 轴向力分布图

2 滑动距离判别法

DNV 规范给出的力的控制准则不易于操作, $S_{R,1}$ 、 ΔS 及 $S_{G,2}$ 均没有给出具体的计算公式。本节基于含缺陷海底管道横向屈曲的理论研究结果^[2], 给出了同时激发相邻屈曲的最小间距的控制准则。

在轴向荷载作用下屈曲管道的变形沿轴向可分为屈曲段、滑动段和完全约束段这三部分, 轴向力的分布参见图 2。

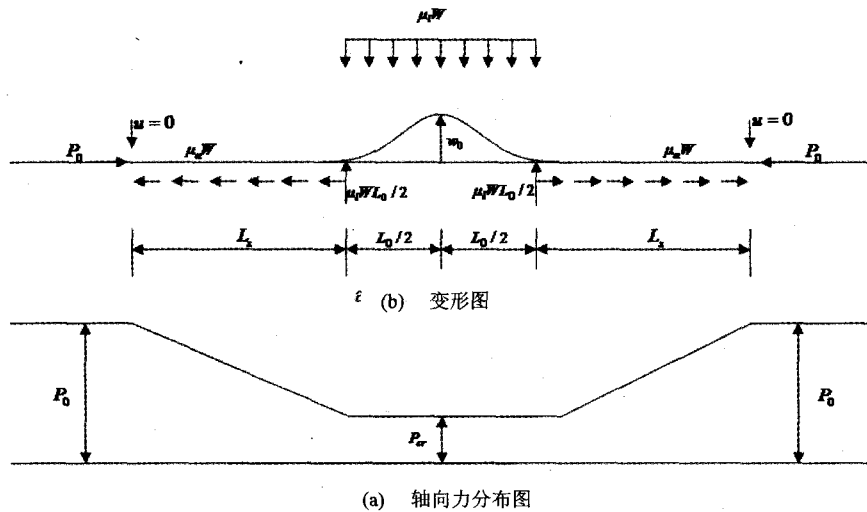


图2 轴向力及变形分布

由轴向力平衡可得:

$$P_0 = P_{cr} + \mu_a W L_s \quad (2)$$

由式 (2) 可得滑动段长度 L_s :

$$L_s = \frac{P_0 - P_{cr}}{\mu_a W} \quad (3)$$

联立下式^[2]

$$P_0 = P_{cr} - \frac{\mu_a W L_0}{2} + \left[\frac{A \pi^2 \mu_a \mu_i^2 (W)^3 L_0^7}{E (830 I)^2} + \left(\frac{\mu_a W L_0}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

得:

$$L_s = \left[\frac{A \pi^2 \mu_i^2 W L_0^7}{E (830 I)^2 \mu_a} + \frac{L_0^2}{4} \right]^{1/2} - \frac{L_0}{2} \quad (5)$$

可以通过滑动段长度来定义相邻屈曲间的最小间距 D , 为了使相邻屈曲均得到激发, 则相邻屈曲间的最小间距 D 应满足:

$$D > L_{s1} + L_{s2} \quad (6)$$

式中, L_{s1} 为第一个屈曲对应的滑动段长度, L_{s2} 为第二个屈曲对应的滑动段长度。

3 滑动距离判别法的验证

下面基于 ANSYS 建立的平坦海床上裸铺管道的非线性有限元模型分析相邻屈曲的间距^[3-7], 管道长度为 12km, 运行温度 80℃, 摩擦系数均为 0.7, 初始几何缺陷幅值分别为 1.0m 和 0.5m, 其它参数列于表 1。

表 1 管道参数

参数	数值	参数	数值
管道直径/mm	300	横向摩擦系数	0.75
管道壁厚/mm	14	轴向摩擦系数	0.5
热膨胀系数	11.7×10^{-6}	管道长度/m	2800
管道淹没重量/(N/m)	900	运行压力/MPa	20
SMYS/MPa	448	运行温度/℃	95
SMTS/MPa	550	环境温度/℃	0
100℃应力降低/MPa	25		

由式 (5) 可分别求得初始几何缺陷幅值为 1.0m 时对应的滑动段长度 $L_{s1}=353\text{m}$ 、0.5m 对应的滑动段长度 $L_{s2}=186\text{m}$ 。因此, 相邻屈曲间的最小间距 D 应满足:

$$D > 539\text{m} \quad (7)$$

分别取屈曲间距等于 400m 和 600m 进行分析, 沿管道分布的横向位移如图 3 所示。由图可知, 当屈曲间距等于 400m 时, 仅激发了缺陷幅值等于 1.0m 位置的屈曲, 而缺陷幅值等于 0.5m 位置的屈曲没有被激发。当屈曲间距等于 600m 时, 两个位置的屈曲均得到激发。由于相邻屈曲的相互作用, 屈曲间距等于 600m 时对应的最大横向位移明显小于屈曲间距等于 400m 时对应的最大横向位移。

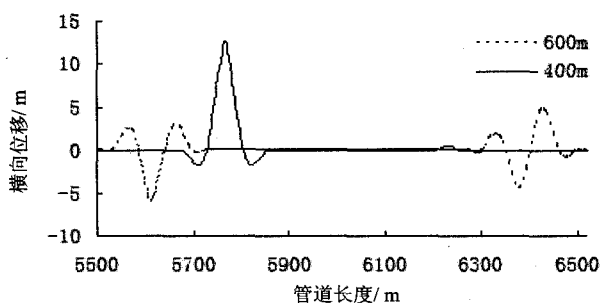


图3 屈曲间距对横向位移的影响

沿管道分布的弯矩和轴向总应变分别如图4及图5所示。可以看出,若相邻屈曲均得到激发,则管道后屈曲的最大弯矩及应变均得到降低,特别是管道的最大总应变降低非常明显。

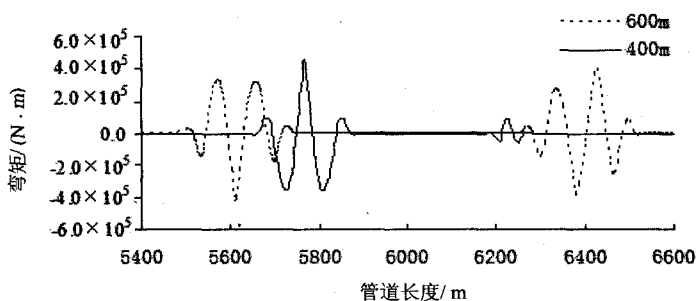


图4 屈曲间距对弯矩的影响

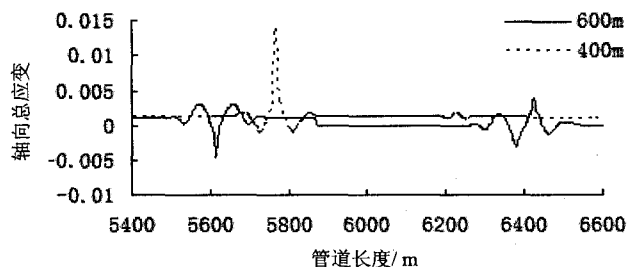


图5 屈曲间距对轴向总应变的影响

两个屈曲之间的相互作用可以降低管道的最大弯矩及应变。因此,可以通过人为设置多个缺陷的方法来激发管道屈曲,以更好地控制管道后屈曲的变形、弯矩及应变。管道的最小屈曲间距应满足式(6)。

4 两种判别方法的比较

基于 Hobbs 的解析解来计算 DNV 规范中的 $S_{R,1}$ 、 $S_{G,2}$ 。

(1) 间距等于 400m 时,

$$S_{R,1}=520\,036\text{N}, \Delta S=0.7 \times 900 \times 400=252\,000\text{N}, S_{R,1}+\Delta S=772\,036\text{N}, S_{G,2}=822\,669\text{N},$$

则有 $S_{R,1}+\Delta S < S_{G,2}$, 第二个屈曲未激发。

(2) 间距等于 600m 时,

$$S_{R,1}=520\,036\text{N}, \Delta S=0.7 \times 900 \times 600=378\,000\text{N}, S_{R,1}+\Delta S=898\,036\text{N}, S_{G,2}=822\,669\text{N},$$

则有 $S_{R,1} + \Delta S > S_{G,2}$, 第二个屈曲得到激发。

可见用 DNV 轴向力方法判断的结果与本文提出的滑动距离判断的结果是一致的。

5 结 语

在平坦海床上裸铺管道不可能仅在一个位置发生屈曲, 而是在一系列位置均有可能发生。为了激发第二个屈曲, 两个屈曲之间的应该保持足够的间距。如果两个屈曲之间的距离过小, 则相邻屈曲之间的轴向力将达不到第二个屈曲的临界荷载, 无法激发第二个屈曲。本文提出了最小屈曲间距的滑动距离判别法, 给出了最小屈曲间距的判别公式。

参 考 文 献

- [1] DNV-RP-F110. Global buckling of submarine pipelines structural design due to high temperature/high pressures[S]. Det Norske Veritas, Norway, 2007.
- [2] LIU Yuxiao, LI Xin, ZHOU Jing. Analytical studies of imperfect pipelines on lateral buckling[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(9): 1033-1040.
- [3] SONG X J. Numerical solutions for pipeline wrinkling[D]. University of Alberta, Canada, 2003.
- [4] NADER Y G. Analysis of buried pipelines with thermal applications [D]. University of Alberta, Canada, 2002.
- [5] ANSYS Inc. ANSYS User's guide[M]. version 10.0.
- [6] ENRICO T, LUIGINO V, ERIK L. Snaking of submarine pipelines resting on flat sea bottom using finite element method[C]// Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France, 1999: 34-44..
- [7] LARS C, PERTH. Displacement control in lateral buckling of "short" pipelines[C]// Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, 2005: 84-92.

Control Criterion for Minimum Spacing between Adjacent Buckles of Pipeline

LIU Yuxiao^{1,2}

(1. Dept. of Management Science and Engineering, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract

An exposed pipeline may buckle not only at one location, but also at a series of locations. In order to activate the second imperfection to buckle, a build up of sufficient spacing between the adjacent buckles is required. If spacing between the adjacent buckles is too small, effective axial force when reaching at the second buckle is less than the axial global buckling capacity, this buckle will not be triggered. In this paper, sliding distance method is proposed, and the minimum buckling spacing is given.

Key words: pipeline; lateral buckling; buckling spacing; initial imperfection; analytical solution

作者简介

刘羽霄 女, 1978 年生, 工学博士, 讲师。主要从事结构防灾减灾方面的研究。