

蛇形铺管形状对海底管道横向屈曲的影响

基金项目：国家自然科学基金重点项目（50439010）

刘云霄，李 昕，周 晶

（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：蛇形铺管法是一种有效控制管道横向屈曲的方法，该方法的关键是使管道在预设位置激发屈曲，且管道后屈曲的弯矩及应变控制在合理的范围内。文章提出了一种新的蛇形铺管形状，即正弦曲线形状，基于 ANSYS 软件建立了用于平坦海床上蛇形铺设管道横向屈曲分析的计算模型，对正弦曲线形状的蛇形铺管形状进行了分析，并与工程普遍采用的弧形铺管形状进行了对比。对比分析表明，正弦曲线铺管形状有效地降低了管道屈曲的临界荷载，且管道后屈曲的弯矩及应变更低。

关键词：海底管道；横向屈曲；铺管形状；临界荷载；后屈曲

中图分类号：TE53 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-2206（2010）03-0025-04

0 引言

海底管道在工作荷载作用下可能发生整体屈曲，限制屈曲的传统方法是应用覆盖物，即采用挖沟埋设或堆石的方法。然而，覆盖物在保护管道的同时也增加了沿管道的有效轴向力。越来越多的海底管道需要在高温、高压下运行，通过大量的覆盖物来限制隆起屈曲显得很经济。管道在控制下屈曲的方法越来越多地应用于裸铺海底管道的设计，管道在控制下的屈曲即允许管道在预设位置屈曲，并使管道的后屈曲（弯矩及应变）控制在允许的范围内。蛇形铺设管道法、铺设枕木法、分布浮力法都是控制管道横向屈曲的有效方法，其中蛇形铺设法得到了最多的应用^[1-5]。蛇形铺设管道方法的设计关键是如何更好地控制管道的屈曲，即激发沿管道预设位置发生屈曲，且将管道后屈曲的弯矩及应变控制在合理的范围以内。

本文提出了一种新的蛇形铺管形状，蛇形铺设管道弯曲段为正弦曲线。基于有限元模型研究了蛇形铺设管道的前屈曲及后屈曲反应。

1 蛇形铺管法

1.1 基本概念

在预定位置设置一系列水平缺陷是为了激发管道在这些位置发生屈曲，以使管道热膨胀分布在多个屈曲之间，而不是集中在少数的屈曲位置，可以有效降低管道轴向荷载。与其他控制海底管

道横向屈曲的方法相比，蛇形铺管方法的优点是费用低，经济合理^[6]。

图 1 为蛇形铺管形状的示意。由图 1 可知，蛇形铺设管道由弯曲段及直管段两部分组成。

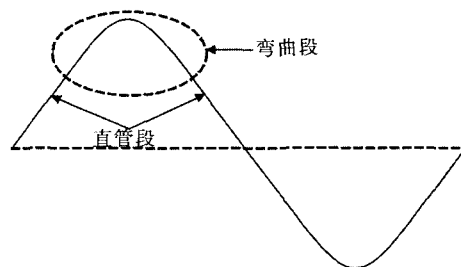


图 1 蛇形铺管形状

1.2 弧形 (Arc)

弧形铺管形状被广泛地用于工程实践中，用以控制管道的横向屈曲^[2-3]，其中弧长、铺管角度及铺管半径如图 2 所示，三者之间的关系由公式（1）确定。

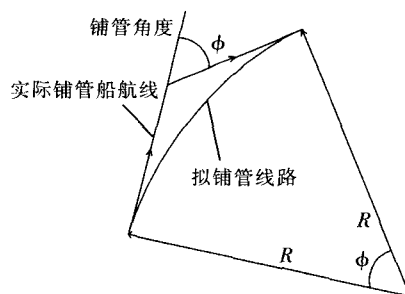


图 2 蛇形铺管弯曲段形状

$$L_{\text{arc}} = R\phi \quad (1)$$

式中 L_{arc} ——弧长;
 R ——铺管半径;
 ϕ ——铺管角度。

1.3 正弦形 (Sine)

图3为本文提出的新的蛇形铺设管道的弯曲段形状——正弦曲线。

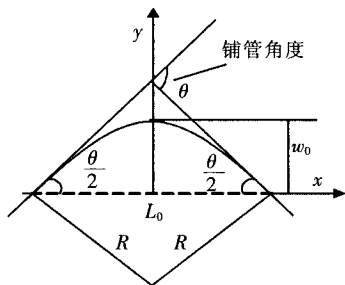


图3 新的蛇形铺设管道弯曲段

图3中形状可用公式(2)表示:

$$y_0 = w_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi x}{L_0}\right) \quad (2)$$

式中 y_0 ——蛇形铺设管道弯曲段相对于 x 轴的 y 坐标值;

w_0 ——蛇形铺设管道弯曲段相对于 x 轴的 y 坐标幅值;

L_0 ——蛇形铺设管道弯曲段长度。

图3中蛇形铺管半径、铺管段长度及铺管角度满足如下的关系:

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{L_0}{2R} \quad (3)$$

式中 θ ——蛇形铺设管道弯曲段铺设角度;

R ——蛇形铺设管道弯曲段半径。

由公式(2)可知:

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{\pi w_0}{L_0} \quad (4)$$

图4是两种蛇形铺管弯曲段形状的对比,其中蛇形铺管弯曲段半径 $R = 1000$ m, 铺管段长度 $L_0 = 200$ m, 图中为 $1/2$ 模型。

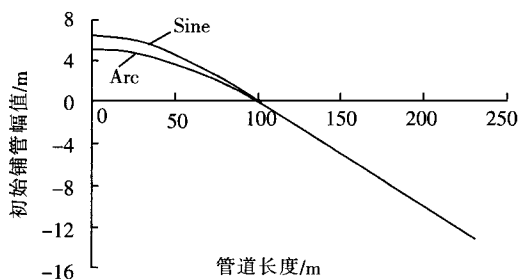


图4 两种蛇形铺管形状的对比

2 有限元模型

2.1 材料本构模型

管道钢材采用 Ramberg-Osgood 本构模型模拟, R-O 模型的表达式如公式(5)所示。X65 管材的应力—应变关系如图5所示。

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_0} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (5)$$

式中 ε_x ——应变;
 σ_x ——应力;
 E_0 ——初始弹性模量;
 σ_y ——屈服应力;
 n, r ——R-O 模型参数。

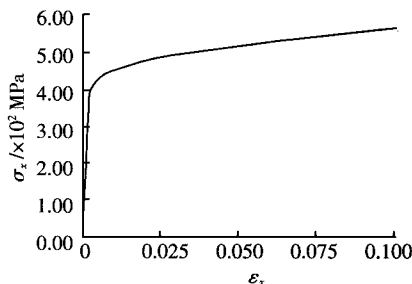


图5 X65 管材应力—应变关系

海床与管道之间的轴向、横向相互作用力采用弹簧单元模拟, 弹簧单元的力—位移关系如图6所示。其中海床与管道之间相互作用的轴向、横向摩擦力采用库仑定律计算, 如公式(6)所示:

$$F = \mu N \quad (6)$$

式中 F ——弹簧对应的屈服力;

μ ——海床与管道之间的摩擦系数;

N ——管道单位长度的有效重量。

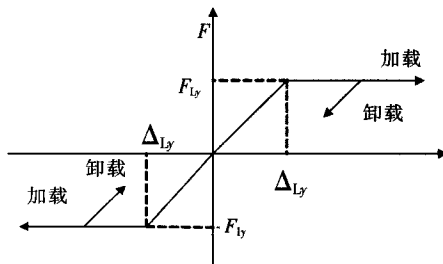


图6 土弹簧的力—位移关系

2.2 管道与海床的相互作用模型

基于 ANSYS 软件建立了平坦海床上裸铺管道的非线性有限元模型^[7-12], 管—土相互作用模型的示意如图7所示。管道采用 PIPE20 管单元, 可以考虑管道的材料非线性。海床与管道之间的非线性弹塑性的轴向、横向相互作用力采用 COMBINE39

弹簧单元模拟，因为主要研究管道横向的屈曲，所以模型中约束管道竖向的运动。

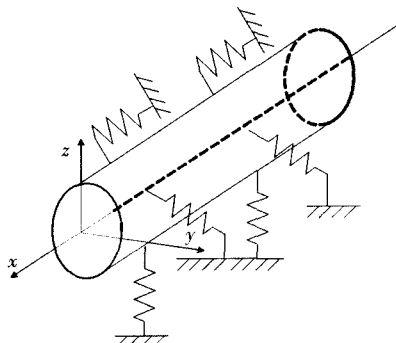


图 7 管—土相互作用模型

2.3 数值模型的验证

参考文献 [3] 中的算例，选取铺管半径 $R = 900\text{ m}$ ， $L_0 = 8, 16, 31.4, 62.8\text{ m}$ 时的情况进行了模拟，管道长度 2 000 m ，其他管道输入参数如表 1 所示，管道的有限元剖分如图 8 所示。

表 1 管道参数

参数	取值
外直径/mm	508
淹没重力/(kN/m)	2.1
轴向屈服位移/mm	10
轴向摩擦系数	0.6
轴向残余屈服位移/mm	2 000
轴向残余摩擦系数	0.6
横向屈服位移/mm	140
横向摩擦系数	1.1
横向残余屈服位移/mm	990
横向残余摩擦系数	0.6



图 8 管道有限元剖分

本文模型计算结果与文献 [3] 的对比如表 2 所示。可知，本文模拟的结果与文献 [3] 中的结果相比误差在 4% 以内，由此验证了本文建立的模型的可信性。

表 2 管道屈曲临界荷载对比

铺管角度/ $^{\circ}$	文献/kN	FEA/kN	误差/%
0.5	3 250	3 201	1.53
1.0	2 650	2 558	3.60
2.0	2 050	1 966	2.71
4.0	1 750	1 738	0.69

3 两种铺管形状的对比分析

建立两种铺管形状管道的有限元分析模型，其中管道的外直径为 0.814 m ，内直径为 0.763 2 m ，管道与海床之间的轴向摩擦系数为 0.87 ，横向摩擦系数为 0.5 ，管道长度为 1 000 m ，铺管段半径 $R = 1\text{ 000 m}$ ，铺管段长度 $L_0 = 400\text{ m}$ 。

两种铺管形状的计算结果如表 3 所示。由表 3 可知，本文提出的 Sine 形铺管形状与 Arc 形铺管形状相比，管道后屈曲最大弯矩降低了 26.0% ，塑性应变降低了 99.9% 。管道屈曲的临界荷载降低了 27.5% 。即与 Arc 形铺管形状相比，本文提出的 Sine 形铺管形状更易于控制管道的屈曲。

表 3 两种蛇形铺管形状对比

	Sine 曲线	Arc 曲线	降低/%
最大弯矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	$0.358\ 919 \times 10^7$	$0.485\ 148 \times 10^7$	26.0
轴向塑性应变	$0.375\ 54 \times 10^{-6}$	$0.280\ 27 \times 10^{-3}$	99.9
临界荷载/N	$0.211\ 731 \times 10^7$	$0.291\ 915 \times 10^7$	27.5

当蛇形铺设管道弯曲段为弧形时，研究表明：当铺管半径一定时，蛇形铺管段长度增加到一定值后，随着铺管段长度的增加，后屈曲状态下管道的弯矩降低很小。在铺管半径一定的情况下，当铺管段长度较大时，本文提出的 Sine 形铺管形状与 Arc 形铺管形状相比，管道后屈曲对应的弯矩及应变均有明显降低。且本文提出的新的蛇形铺设形状与文献中相比，管道屈曲的临界荷载亦明显降低，更易于激发蛇形铺管在预设位置的屈曲，避免管道在非预设位置发生屈曲。

4 结论

随着现代科技的高速发展，通过铺管船 GPS 自动定位系统可以实现对管道的精确铺设。因此，本文提出了一种新的蛇形铺管形状——正弦曲线形状。

通过对比分析表明，与弧形铺管形状相比，本文提出的蛇形铺管形状有效地降低了管道屈曲的临界荷载，更易激发沿管道分布的预设位置的屈曲，且管道后屈曲变形均得到更好的控制。

参考文献：

[1] Jiong Guan, Per R Nyström, Hans F Hansen. Optimized solutions to control lateral buckling of pipelines with snaked-lay: theoretical and numerical studies[A]. Proc. of OMAE[C]. San Diego,USA,2007.

[2] Rundsga J O, Kenny J P, Norge A S. Optimized snaked lay geometry [A]. Proc. of ISOPE[C]. Vancouver,2008.

[3] Rathbone A D,Tørnes K,Cumming G,et al. Effect of lateral pipelay

PEMEX 海洋模块钻机技术方案的实施

胡鹏飞¹, 冯翠鑫²

(1. 中国石油大学(华东), 山东东营 257061; 2. 贝特海利科技(北京)有限公司, 北京 100085)

摘要:墨西哥国家石油公司(PEMEX)四套模块钻机为我国第一次自主设计、自主建造的钻深可达7 000 m的海洋钻机,其国产化率达到了92%,该钻机凭借其技术、价格优势成功地打入了国际市场,实现我国海上钻机出口零的突破。文章介绍了PEMEX模块钻机的技术要求、设计思路、总体布置、钻机主要设备参数、高压泥浆及泥浆处理系统、泥浆混合及储存系统、固井系统、辅助系统等。

关键词:海洋钻机;模块钻机;总体布置;技术参数;工艺流程

中图分类号:TE52 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-2206(2010)03-0028-05

0 引言

2006年初,中海油服通过国际公开招标,取得了墨西哥国家石油公司(PEMEX)四套模块钻机建造项目的招标合同。每套模块钻机包含一个90人的生活楼及钻井深度可达到7 000 m的标准模块装置。PEMEX模块钻机项目于2006年2月开始设计,同年7月详细设计基本完成,2007年5月开始分批投入使用,经营期10年。

PEMEX海上模块钻机是我国第一批钻进能力可达7 000 m的钻机,拥有100%自主的知识产权。

1 技术要求

为了适应墨西哥海域作业要求,并保证模块钻

机顺利通关,项目建造均按照API和墨西哥国家石油公司有关规范进行四套模块钻机设计工作。

由于四套钻机分别位于不同位置的导管架平台,有共性也有区别。为了使PEMEX模块钻机满足性能可靠、操作维修方便、施工建造容易等要求,在进行深入分析、比较、论证的基础上,在确保功能和技术指标的前提下,优选技术成熟、质量可靠的设备,在模块钻机的总体布置及工艺设计过程中,最大限度满足四套模块钻机设计一致化。

2 技术亮点

钻井“八大件”——绞车、泥浆泵、井架、天车、游车、转盘、水龙头、方钻杆,全部采用国

-
- imperfections on global buckling design [A]. Proc. of the Eighteenth Int. Offshore and Polar Eng. Conf.[C]. Vancouver, 2008.
- [4] Hooper J, Maschner E, Farrant T. HT/HP Pipe-in-Pipe Snaking Lay Technology—Industry Challenges[A]. Proc. of OTC[C]. Houston, 2004.
- [5] Hobbs R E, Ling F. Thermal buckling of pipelines close to restraints [A]. Proc. of the Inter. Conf. on OMAE[C]. Hague, Netherlands, 1989, (V): 121-127.
- [6] Yong Bai, Qiang Bai. Subsea Pipelines and Risers[M]. Elsevier Science Ltd, 2005.
- [7] Lars Christensen, Perth, Displacement Control in Lateral Buckling of “Short” Pipelines[A]. Proceedings of the Fifteenth (2005) International Offshore and Polar Engineering Conference[C]. Seoul, Korea, 2005.
- [8] David Bruton, Malcolm Carr, Michael Crawford, et al. The safe design of hot on-bottom pipelines with lateral buckling using the design guideline developed by the SAFEBUCK joint industry project [A]. Proc. of Deep Offshore Technology Conf.[C]. Vitoria, Espirito Santo, Brazil, 2005.
- [9] Enrico Torselleti, Luigino Vitali, Erik Levold. Snaking of submarine pipelines resting on flat sea bottom using finite element method [A]. Proc 9th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.[C]. Brest, France, 1999.
- [10] Nader Yoosef-Ghodsi. Analysis of buried pipelines with thermal applications [D]. Canada: University of Alberta, 2002.
- [11] Costa A M, Oliveira Cardoso, Santos Amaral C, et al. Soil-structure interaction of heated pipeline buried in soft clay [A]. International Pipeline Conference[C]. Vitoria, Espirito Santo, Brazil, 2005.
-
- 作者简介: 刘羽霄(1978-),女,山东临沂人,大连理工大学在读博士生,主要从事海底管道破坏机理研究工作。
- 收稿日期: 2010-01-20