

文章编号: 1007-7294(2026)04-0582-09

多因素联合作用下海底管道帽形 屈曲解析解优化研究

王维刚¹, 张 锐², 路敬祎³

(1. 东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 汉正检测技术有限公司, 四川 德阳 618300; 3. 东北石油大学 三亚海洋油气研究院, 海南 三亚 572000)

摘要: 针对传统海底管道屈曲理论中单因素模型忽略内压和内流体重量联合作用的局限性, 本文提出一种基于二次屈曲分析的多因素联合解析解优化方法。首先, 结合库仑摩擦定律、Maltby 计算公式及 Hobbs 和 Taylor 屈曲理论, 构建温度-内压-内流体重量联合作用下的管道二次屈曲变形分析模型, 推导出帽形屈曲模式的解析解。其次, 通过热-固联合有限元模型, 以实验数据校准管土接触刚度及边界条件参数, 确保数值模型与实际工况的等效性。在此基础上, 对比理论解与仿真结果, 修正解析解的经验系数 K_1 , 使其在屈曲位移预测中误差降低至 2% 以内。研究表明: 内流体重量对管道轴向压缩量贡献率达 35.89%, 显著影响屈曲临界阈值; 修正后的解析解在联合工况下屈曲位移预测精度提升至 98% 以上。该成果为深海管道抗屈曲设计提供了高精度理论工具, 并为多物理场联合作用下的管道稳定性分析奠定了方法基础。

关键词: 海底管道; 帽形屈曲解析解; 高温高压; 多因素联合作用; 有限元分析

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.04.007

Optimization of analytical solution of cap-shaped buckling of submarine pipeline under combined action of multiple factors

WANG Wei-gang¹, ZHANG Rui², LU Jing-yi³

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2. Hanzheng Technology Co., Ltd., Deyong 618300, China; 3. Sanya Marine Oil and Gas Research Institute, Northeast Petroleum University, Sanya 572000, China)

Abstract: Aiming at the limitation that the single-factor model ignores the combined effect of internal pressure and internal fluid weight in the traditional submarine pipeline buckling theory, this study proposed a multi-factor joint analytical solution optimization method based on secondary buckling analysis. Firstly, by combining the Coulomb friction law, Maltby formula and Hobbs and Taylor buckling theory, an analytical model for the secondary buckling deformation of the pipeline under the combined action of temperature-internal pressure-internal fluid weight was established, and the analytical solution of the cap-shaped buckling mode was derived. Secondly, through the thermal-solid coupled finite element model, the pipe-soil contact stiffness and boundary condition parameters were calibrated with experimental data to ensure the equivalence

收稿日期: 2025-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62473096); 海南省院士创新平台科研项目(YSPTZX202301); 海南省科学技术厅, 海南省自然科学基金(623MS071)

作者简介: 王维刚(1976-), 男, 博士, 副教授, 通讯作者, E-mail: ww@nepu.edu.cn;

张 锐(2000-), 男, 硕士研究生。

between the numerical model and the actual working conditions. On this basis, the empirical coefficient K_1 in the analytical solution is corrected by comparing the theoretical solution with the simulation results, so that the error in the buckling displacement prediction is reduced to less than 2%. The results show that the contribution rate of the internal fluid weight to the axial compression of the pipeline is 35.89%, a factor that significantly affects the critical buckling threshold. The prediction accuracy of the modified analytical solution is improved to more than 98% under the combined condition. The results provide a high-precision theoretical tool for the anti-buckling design of deep-sea pipelines, and lay a methodological foundation for the stability analysis of pipelines under the combined action of multiple physical fields.

Key words: submarine pipeline; cap-shaped buckling analytical solution; high temperature and pressure; combined action of multiple factors; finite element analysis

0 引言

自20世纪70年代起,人们将目光投向海洋石化资源。随着海洋油气资源勘探开发,海底管道广泛用于海上油气运输。由于海底管道长期处于高温高压环境,而且铺设中有固锚点,这会使管道产生附加应力,且该应力随管道长度增加而累积,当累积应力大于管道临界屈曲荷载时,会发生整体屈曲。不可控的整体屈曲会导致管道弯曲、截面破坏,造成油气泄漏,从而引发经济损失和安全事故。

为此,国内外学者开展大量海底管道整体屈曲研究^[1-3],对其机理、参数分析、工程实例及缓解措施进行广泛探讨,采用方法包括理论分析^[4-6]、有限元法^[7-10]和实验法。海底管道横向屈曲研究面临两大困难:一是管道受高温/高压影响的结构响应;二是管道移动时的土壤阻力响应,即管道-土壤相互作用。因土壤环境复杂且土阻力呈非线性,现有理论难以准确表示土阻力,且不同土壤环境和工况下管道所受土阻力不同,上述原因给海底管道屈曲研究带来重大挑战。目前,研究人员通过大量实验评估横向管道与土壤的相互作用,建立了库仑摩擦模型^[11-13]、考虑库仑摩擦和被动阻力的模型^[14]以及考虑土体隆起效应的修正模型^[15-16]等,上述模型为理想土壤环境下海底管道的整体屈曲分析提供了土壤阻力信息。

国内外学者在理想及缺陷管道解析解基础上,深入研究刚性地基上水平向整体屈曲解析解。Liu等先后用静力平衡法^[17]和能量法^[18]推导理想管道高阶屈曲模态解析解,并研究初始缺陷管道高阶整体屈曲,还基于静力平衡方法建立有特定初始缺陷管道的高阶水平向整体屈曲解析解。2021年,Li等^[3]提出了帽形屈曲模式,通过有限元分析不同参数下的屈曲模态变化规律,此外,还进行了小规模模型实验,以探究不同初始缺陷对海底管道横向屈曲的影响,并基于此提出了一种新屈曲模式及其幅值计算的解析解。

通过对现有文献的系统梳理发现,当前海底管道热致横向屈曲理论研究仍存在显著提升空间:第一,现有解析解体系尚未形成完整的理论框架,关键参数联合机制研究存在缺失;第二,工程实践中日益复杂的多场联合工况对传统分析方法提出挑战。本文创新性地构建了二次屈曲分析模型。在理论研究层面,系统性地纳入内压与管内流体介质的影响机制,建立多参数联合的修正解析模型;在工程应用层面,通过有限元数值模拟与解析解的对比验证,构建具有工程适用性的帽形屈曲解析模型。

1 海底管道帽形屈曲解析解构建

管道横向屈曲是指管道在轴向热膨胀作用下,于存在初始缺陷的部位发生的横向位移。由于管道受热膨胀且两端受约束,会产生类似于压杆失稳的屈曲变形。基于帽形屈曲模态分析,本文建立了如图1所示的坐标系。

管道二次屈曲变形方程 $y(x)$ 可表示为

$$y(x) = \begin{cases} y_0(x) - \frac{4H_m x^2}{L^2} + H_m \left(|x| \leq \frac{L_0}{2} \right) \\ -\frac{4H_m x^2}{L^2} + H_m \left(\frac{L_0}{2} \leq |x| \leq \frac{L}{2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: H_m 为屈曲管道的最大位移, 单位为 m; L_0 为初始缺陷波长, 单位为 m; L 为屈曲管道长度, 单位为 m; $y_0(x)$ 为初始缺陷, 参考文献[3] 其表达式可写为

$$y_0(x) = y_{om} \left(a \cos(nx) - b \left(\frac{x}{L_0} \right)^2 + c \right) \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 为经验系数; n 为决定缺陷形状的系数; y_{om} 为初始缺陷幅值。

当 $x = 0$ 时, $y_0(x) = y_{om}$, 将其代入公式(2)得

$$a + c = 1 \quad (3)$$

由公式(3)得 $c = 1 - a$ 。将 $x = \pm L_0/2$ 时, $y_0(x) = 0$ 以及 $c = 1 - a$ 代入公式(2)得

$$4a \left(\cos\left(\frac{nL_0}{2}\right) - 1 \right) + 4 = -b \quad (4)$$

为了对解析解进行验证, 根据文献[3] 取 nL_0 值为 5.8712、 $a = 0.321\ 634$, 得 $7.9154a - b = 4$ 、 $b = -1.454\ 135$ 、 $c = 0.678\ 366$ 。将所求解的系数代入公式(2)可得

$$y_0(x) = y_{om} \left(0.321\ 634 \cos(nx) - 1.454\ 135 \left(\frac{x}{L_0} \right)^2 + 0.678\ 366 \right) \left(|x| \leq \frac{L_0}{2} \right) \quad (5)$$

根据图 1 几何关系, 管道的总热膨胀量 ΔL 可表示为

$$\frac{\Delta L}{2} = \overset{\frown}{AB} - \frac{L}{2} \quad (6)$$

式中: $\overset{\frown}{AB}$ 是弧 AB 的长度, 单位为 m。由弧长计算公式可得

$$\frac{\Delta L}{2} = \int_0^{L_0/2} \sqrt{1 + (y(x)')^2} dx + \int_{L_0/2}^{L/2} \sqrt{1 + (y(x)')^2} dx - \int_0^{L_0/2} \sqrt{1 + (y_0(x)')^2} dx \quad (7)$$

先将公式(5)代入(1), 然后再将公式(1)代入公式(7)可得

$$\Delta L = \frac{8H_m^2}{3L} + \frac{4}{L} H_m y_{om} \quad (8)$$

$$H_m = \sqrt{\frac{9}{16} y_{om}^2 + \frac{3L}{8} \Delta L} - \frac{3}{4} y_{om} \quad (9)$$

将公式(9)代入公式(1), 可得

$$y(x) = \begin{cases} y_0(x) - 4 \left(\sqrt{\frac{9}{16} y_{om}^2 + \frac{3L}{8} \Delta L} - \frac{3}{4} y_{om} \right) x^2 / L^2 + \sqrt{\frac{9}{16} y_{om}^2 + \frac{3L}{8} \Delta L} - \frac{3}{4} y_{om} \left(|x| \leq \frac{L_0}{2} \right) \\ -4 \left(\sqrt{\frac{9}{16} y_{om}^2 + \frac{3L}{8} \Delta L} - \frac{3}{4} y_{om} \right) x^2 / L^2 + \sqrt{\frac{9}{16} y_{om}^2 + \frac{3L}{8} \Delta L} - \frac{3}{4} y_{om} \left(\frac{L_0}{2} \leq |x| \leq \frac{L}{2} \right) \end{cases} \quad (10)$$

与 Hobbs 和 Taylor 的经典理论相似, 本文假设管道的力学性能是线弹性的。因此, 管道的总热膨胀 ΔL 可以通过管道屈曲过程中轴向力的减少来确定, 其表达式为^[3]

$$\Delta L = \frac{F_0 - F}{EA} L \quad (11)$$

式中: F_0 为完全约束条件下管道的轴向力, 单位为 N; E 为杨氏模量, 单位为 GPa; A 为管道截面积, 单位为 m^2 ; 截面积 $A = \pi(R^2 - r^2)$, 其中 R 为管外半径, 单位为 m, r 为管内半径, 单位为 m; F 为海管发生屈曲所需要的轴向力, 单位为 N, 根据 Maltby 计算公式, 将其修正如下^[3]

$$F = K \frac{\sqrt{E I F_s}}{y_0 L_0} \quad (12)$$

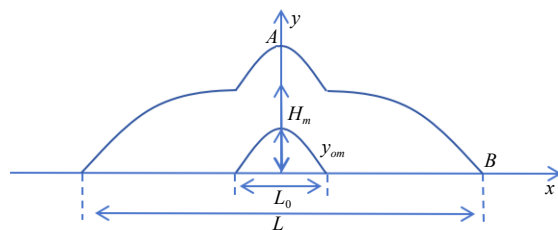


图 1 屈曲分析模型图

Fig.1 Model of buckling analysis

式中: F_s 为横向土阻力, 单位为 N; K 为经验系数, 取值为 2.647; y_0 为初始缺陷幅值, 单位为 m; L_0 为初始缺陷波长, 单位为 m; 惯性矩 $I = \pi(R^4 - r^4)/4$ 。

管道屈曲的轴向力由温度、内压产生, 屈曲过程受到土阻力的抑制, 横向土阻力包括预埋部分的断裂土阻力和底部接触产生的库仑摩擦力。根据 DNV^[16] 的管道-土壤相互作用模型, 对横向土阻力 F_s 进行如下修正

$$F_s = q \left(5k_s - 0.15k_s^2 \right) \cdot \left(\frac{1.5Z_s}{2R} \right)^{1.35} + \phi q \quad (13)$$

$$k_s = \frac{4\gamma \cdot R^2}{q} \quad (14)$$

式中: Z_s 为管道达到突破阻力时总土壤渗透深度, 单位为 m; ϕ 为管道与海底土壤之间的库仑摩擦系数; γ 为土壤密度, 单位为 kg/m^3 ; q 为管道载荷, 包括管道重量和内流体重量, 其表达式为

$$q = (\rho_1 \pi r^2 + \pi A \rho_2) g \quad (15)$$

式中: ρ_1 为管道内部流体密度, 单位为 kg/m^3 ; ρ_2 为管道材料密度, 单位为 kg/m^3 ; g 为重力加速度, 单位为 m/s^2 。

实际工况中, 管道累积轴向力 F_0 表达式为

$$F_0 = F_T + F_P \quad (16)$$

式中: F_T 为温度产生的等效轴向力, 单位为 N; F_P 为内压产生的等效轴向力, 单位为 N。二者表达式为

$$F_T = EA \Delta T \alpha \quad (17)$$

$$F_P = (0.5 - \nu) \frac{PR}{R - r} A \quad (18)$$

式中: ΔT 为工况温差, 单位为 $^\circ\text{C}$; α 为管材热膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$; P 为管道内压, 单位为 MPa; ν 为泊松比。

综合考虑温度、内压以及内流体重量联合作用, 将公式(12)和(16)代入式(11), 然再将公式(11)代入式(10), 并增加修正系数 K_1 , 可得到海底管道帽形屈曲解析解的最终表达式为

$$y(x) = \begin{cases} y_0(x) - \left(4 \left(\sqrt{\frac{9}{16} y_{om}^2 + \frac{3L^2 K_1}{8} \left(EA \Delta T \alpha + (0.5 - \nu) \frac{PRA}{R - r} - \frac{2.647 \sqrt{EIF_s}}{y_0 L_0} \right)} / EA - \frac{3}{4} y_{om} \right) x^2 / L^2 - \right. \\ \left. \sqrt{\frac{9}{16} y_{om}^2 + \frac{3L^2 K_1}{8} \left(EA \Delta T \alpha + (0.5 - \nu) \frac{PRA}{R - r} - \frac{2.647 \sqrt{EIF_s}}{y_0 L_0} \right)} / EA - \frac{3}{4} y_{om} \right) \left(|x| \leq \frac{L_0}{2} \right) - \\ \left(4 \left(\sqrt{\frac{9}{16} y_{om}^2 + \frac{3L^2 K_1}{8} \left(EA \Delta T \alpha + (0.5 - \nu) \frac{PRA}{R - r} - \frac{2.647 \sqrt{EIF_s}}{y_0 L_0} \right)} / EA - \frac{3}{4} y_{om} \right) x^2 / L^2 - \right. \\ \left. \sqrt{\frac{9}{16} y_{om}^2 + \frac{3L^2 K_1}{8} \left(EA \Delta T \alpha + (0.5 - \nu) \frac{PRA}{R - r} - \frac{2.647 \sqrt{EIF_s}}{y_0 L_0} \right)} / EA - \frac{3}{4} y_{om} \right) \left(\frac{L_0}{2} \leq |x| \leq \frac{L}{2} \right) \end{cases} \quad (19)$$

2 海底管道有限元模型建立及验证

2.1 有限元模型建立

根据参考文献[3]中的管道模型参数(表1)和土壤参数(表2), 采用 Abaqus 建立海底管道-土壤有限元模型, 如图2所示。管道部分选取单元类型为 DC3D8 与 C3D8R, 其中 DC3D8 被用于隐式热传递分析, C3D8R 则用于隐式应力-应变分析。采用边布种的方式对管道进行网格划分, 沿圆周方向分为8等份, 沿轴向分为900等份, 划分单元数量为7200个。土壤部分选取单元类型为 DC3D6 和 DC3D8, 划分单元数量为120个。

表 1 海底管道模型参数

Tab.1 Model parameters of submarine pipeline	
参数	实验管道
外半径 R/mm	18
壁厚 t/mm	3
弹性模量 E/GPa	70
长度 L/m	9
热膨胀系数 $\alpha/(1/^\circ\text{C})$	2.32×10^{-5}
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2700
弯曲刚度 $EI/(\text{kN}\cdot\text{m})$	2.99
泊松比 ν	0.33
初始缺陷 y_{om}/m	0.08

表 2 土壤参数

Tab.2 Parameters of soil	
参数	土壤
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1557
泊松比 ν	0.25
弹性模量 E/GPa	0.0402
热膨胀系数 $\alpha/(1/^\circ\text{C})$	1.2×10^{-4}
库仑摩擦系数 μ	0.5

管土相互作用采用面对面接触离散算法 (surface-to-surface discretization) 建立主从接触对, 其中定义海床土体表面为主面 (master surface), 定义管道外表面为从面 (slave surface)。通过用户自定义摩擦行为模拟非线性土体力学响应: 基于 Visual Studio (VS) 与 Fortran 联合编译环境, 开发用户子程序动态修正接触面摩擦系数, 实现土体塑性变形与摩擦耗能的耦合计算。边界条件方面, 考虑海底管道的实际工程约束, 管道两端设置为完全固定约束, 同时将海床土体模型的外围边界施加固定约束, 以模拟周围土体的连续性约束效应。

初始几何缺陷的引入采用线性屈曲模态分析法: 首先对管道进行特征值屈曲分析, 提取前 10 阶屈曲模态; 然后基于模态能量占比及变形特征, 选定某模态作为初始缺陷模式, 并通过修改 Abaqus 关键字文件将归一化模态位移场嵌入显式动力分析模型。温度场的加载通过顺序耦合热力分析实现: 建立管道内壁面与内流体的对流换热模型, 外壁面及土体边界设为深海环境温度, 完成瞬态热传导计算后将温度分布场 (ODB 文件) 导入后续力学分析模块。载荷施加方面, 采用准静态加载策略, 通过 Load 模块对管道内壁施加均布内压及重力加速度。

2.2 模型验证

为验证有限元模型的准确性, 将其计算结果与文献[3] 中的实验数据进行对比。通过在模型中引入与实验管道相同的初始几何缺陷, 确保仿真与实验具有一致的初始条件, 并进一步修正管土接触刚度及模型参数, 以提高仿真精度。计算结果如图 3 所示, 在相同工况下与实验结果对比, 36 °C 时有限元仿真最大位移误差为 1.83%, 72 °C 时为 2.5%, 在误差允许范围内, 表明有限元模型具有合理性和真实性, 为后续解析解优化奠定基础。

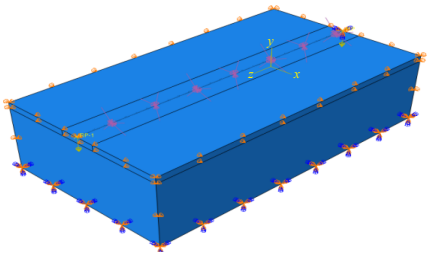


图 2 海底管道-土壤有限元模型
Fig.2 Finite element model of submarine pipeline-soil

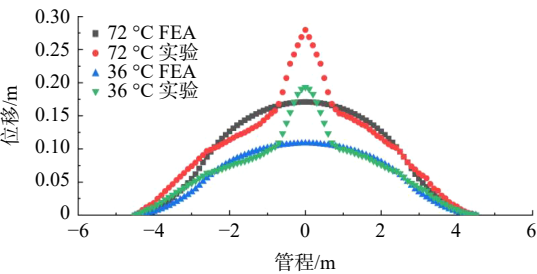


图 3 不同温度下实验结果和仿真结果对比
Fig.3 Comparison of experimental and simulation results at different temperatures

3 多因素联合作用下屈曲解析解修正系数的确定

依据公式(13)可以计算出内流体重量对管道轴向压缩量的贡献率, 随着内流体密度从 0 kg/m^3 上

升到 1500 kg/m^3 , 单位长度下轴向压缩力由 9.5095 N 上升到 14.8325 N 。内流体重量对管道轴向压缩量的贡献率达到 35.89% , 显著影响屈曲的临界阈值。因此本文将内流体重量引入到屈曲解析解公式中, 构建了考虑温度、内压及内流体重量联合作用下的管道屈曲解析解, 见公式(19)。

为了考虑三因素的联合作用, 设计了如表 3 所示的 8 组正交实验, 每个因素选择两个指标, 温度设为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $72\text{ }^{\circ}\text{C}$, 内流体密度设为 0 kg/m^3 和 1500 kg/m^3 , 内压设为 0 MPa 和 5 MPa , 其中管道内压承载极限值 5 MPa 由 $P = \sigma \times (R - r) / r$ 确定, σ 为抗拉强度, 单位为 MPa 。首先对设计的 8 组实验进行仿真计算, 计算结果如图 4~9 所示, 然后基于仿真结果校准理论计算结果, 从而可以确定解析解参数 K_1 , 结果如表 4 所示。

表 3 正交实验方案
Tab.3 Orthogonal experimental schemes

实验号	1	2	3	4	5	6	7	8
温度/ $^{\circ}\text{C}$	24	24	24	24	72	72	72	72
内压/ MPa	0	0	5	5	0	0	5	5
内流体密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	0	1500	0	1500	0	1500	0	1500

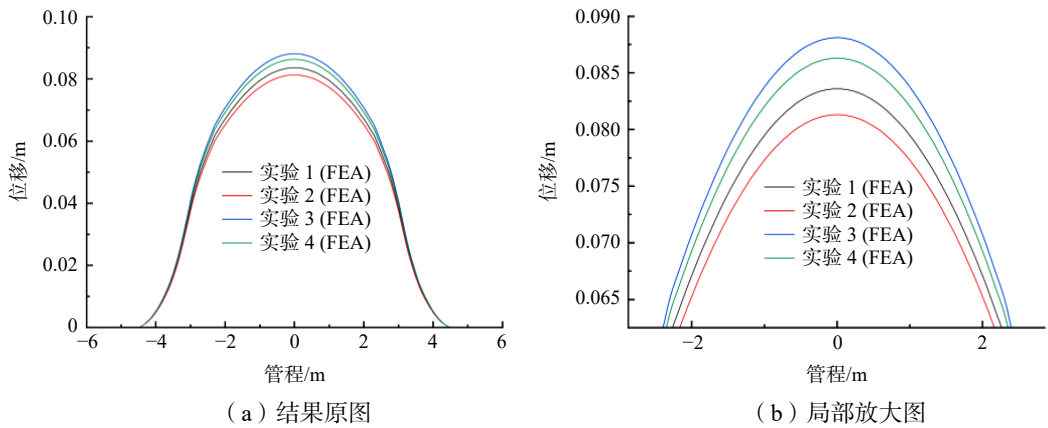


图 4 实验 1-4 屈曲仿真结果图

Fig.4 Buckling simulation results in Experiments 1-4

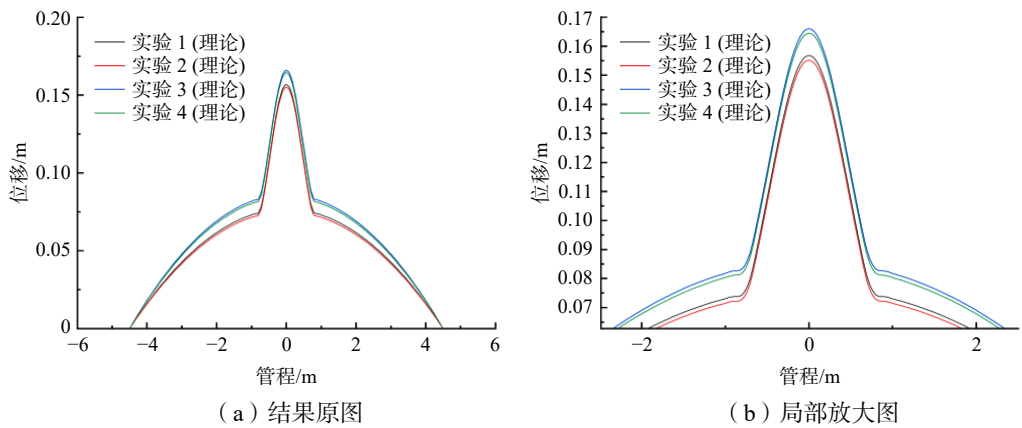
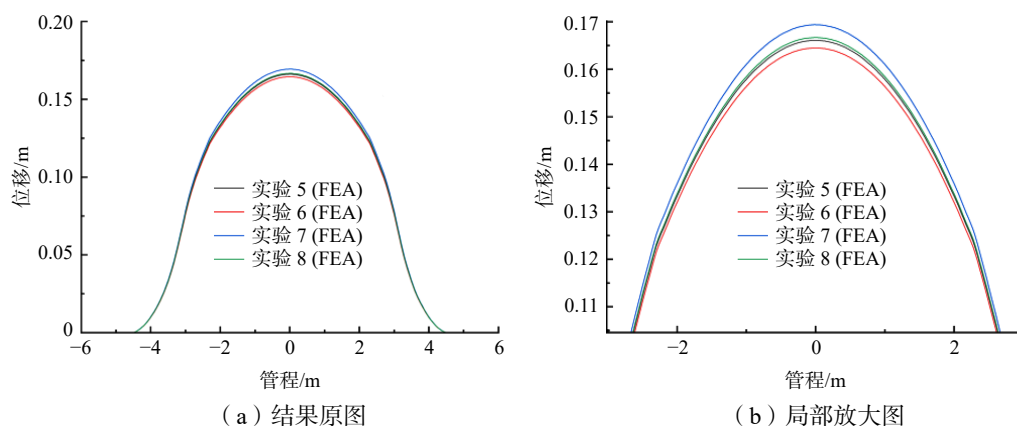


图 5 实验 1-4 屈曲理论计算结果图

Fig.5 Theoretical calculation results of buckling in Experiments 1-4

图 4~9 分别展示了 8 组实验的屈曲理论计算结果及有限元仿真结果。结果表明: 温度、内压以及内流体密度三因素对管道屈曲位移均有一定的影响。随着温度的升高, 管道的屈曲位移随之增大; 随着内压的升高, 管道的屈曲位移也随之增大; 而随着内流体密度的增大, 管道的屈曲位移却随之减小。

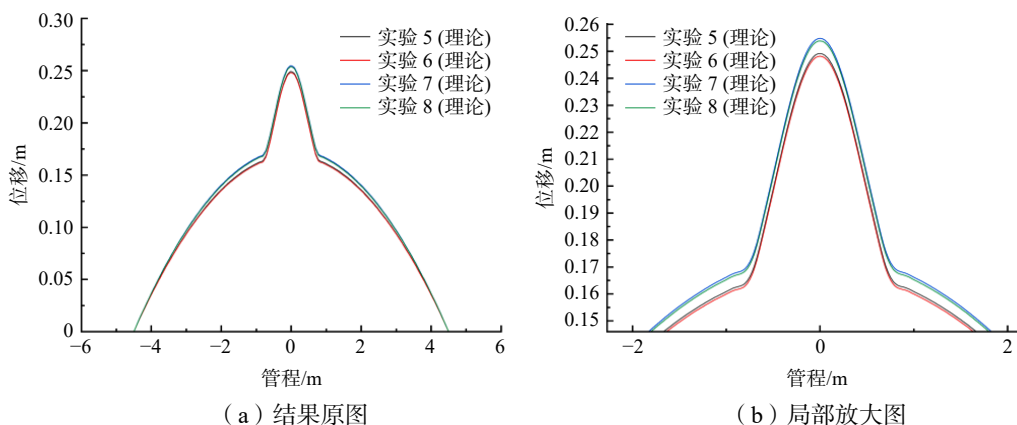


(a) 结果原图

(b) 局部放大图

图6 实验5-8屈曲仿真结果图

Fig.6 Buckling simulation results of Experiments 5-8



(a) 结果原图

(b) 局部放大图

图7 实验5-8屈曲理论计算结果图

Fig.7 Theoretical calculation results of buckling in Experiments 5-8

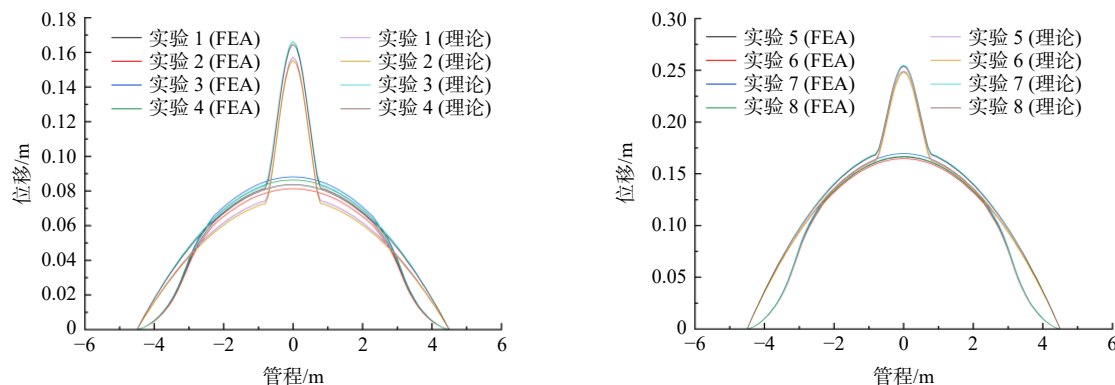


图8 实验1-4屈曲理论计算结果及仿真结果对比图

Fig.8 Comparison of the theoretical calculation and simulation results of buckling in Experiments 1-4

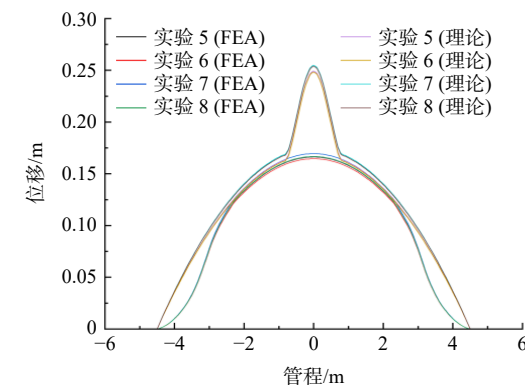


图9 实验5-8屈曲理论计算结果及仿真结果对比图

Fig.9 Comparison of the theoretical calculation and simulation results of buckling in Experiments 5-8

表4给出了8组正交实验的误差及修正经验系数 K_1 。结果表明:随着温度升高、内压增大以及内流体密度的增加,计算误差呈上升趋势;同时,经验系数 K_1 的取值则随之减小,其取值范围为0.935~1.107。实际工程中海底管道多处于高温高压的工况环境,因此取实验5-8经验系数 K_1 平均值0.953作为最终修正系数,修正后实验5-8误差分别为1.20%、0.91%、0.12%、1.19%,结果表明修正后的解析解在实际联合工况下的屈曲路径预测精度提升至98%以上。

表 4 正交实验结果

Tab.4 Results of the orthogonal experiments

实验号	仿真位移计算结果/m	理论位移计算结果/m	修正前误差	经验系数 K_1
1	0.0826	0.0768	7.02%	1.107
2	0.0803	0.0752	6.35%	1.096
3	0.0881	0.0860	2.38%	1.035
4	0.0863	0.0845	2.09%	1.031
5	0.1661	0.1692	1.87%	0.971
6	0.1645	0.1683	2.29%	0.965
7	0.1694	0.1748	3.19%	0.951
8	0.1667	0.1739	4.32%	0.935

4 结 论

针对传统海底管道屈曲理论中单因素模型忽略内压和内流体重量联合作用的局限性,本文提出了一种适用于多种复杂工况的帽形屈曲解析解,并对其进行了修正和优化。主要研究结论如下:

(1) 在传统一次屈曲分析模型基础上,首次构建了二次屈曲分析模型。该模型通过引入 Maltby 公式、库仑摩擦定律及 Hobbs 和 Taylor 理论,综合考虑了温度、内压、内流体密度的联合效应,进而推导出帽形屈曲振幅解析解。

(2) 基于 ABAQUS 平台,利用 VS 与 Fortran 联合编程环境,开发了自定义管土接触摩擦模型。结合初始缺陷、温度场及载荷边界条件,构建了与实际工况高度吻合的仿真模型。通过实验对比验证,该仿真模型在温度场作用下的屈曲位移误差仅为 1.83%~2.5%,证明了本文模型的有效性。

(3) 通过正交实验系统量化了温度、内压、内流体密度对屈曲位移的影响,并基于仿真数据校准理论模型,提出经验系数动态修正方法,该系数取值范围为 0.935~1.107,工程应用建议值为 0.953。修正后,解析解在实际联合工况下的屈曲路径预测精度提升至 98% 以上。

参 考 文 献:

[1] 贾鲁生,侯富恒,张琦,等. 外压影响下含凹陷深海管道局部屈曲和压缩应变承载力研究[J]. 海洋工程, 2024, 42(6): 170–177.
Jia L S, Hou F H, Zhang Q, et al. Research on local flexion and compression strain bearing capacity of sunken deep-sea pipeline under the influence of external pressure[J]. Ocean Engineering, 2024, 42(6): 170–177. (in Chinese)

[2] Liu R, Wang X Y. Lateral global buckling of submarine pipelines based on the model of nonlinear pipe-soil interaction[J]. China Ocean Engineering, 2018, 32(3): 312–322.

[3] Li C F, Liu R, Wang X Y, et al. Experimental and theoretical studies on lateral buckling of submarine pipelines[J]. Marine Structures, 2021, 78: 102983.

[4] Hobbs RE. In-service buckling of heated pipelines[J]. Journal of Transportation Engineering, 1984, 110(2): 175–189.

[5] Taylor N, Gan A B. Submarine pipeline buckling—imperfection studies[J]. Thin-Walled Structures, 1986, 4(4): 295–323.

[6] 李英,王维,韩宇. 含初始缺陷海底管道侧向屈曲临界力的参数解[J]. 海洋工程, 2023, 41(4): 103–113.
Li Y, Wang W, Han Y. Parameter solution of critical force of lateral flexion with initial defect[J]. Ocean Engineering, 2023, 41(4): 103–113. (in Chinese)

[7] 谢鹏,陈昇琳,郑若晗,等. 轴向含多处椭圆缺陷管道的屈曲失稳分析[J]. 船舶力学, 2024, 28(5): 760–770.
Xie P, Chen S L, Zheng R H, et al. Analysis of buckling instability in axial pipes with multiple elliptical defects[J]. Journal of Ship Mechanics, 2024, 28(5): 760–770. (in Chinese)

- [8] 梁 鹏, 李少芳, 朱梦影, 等. 渤海地区高温埋设海底管道竖向屈曲数值模拟分析[J]. 广州化工, 2023, 51(16): 58–60.
Liang P, Li S F, Zhu M Y, et al. Numerical simulation analysis of vertical buckling of high temperature buried submarine pipeline in Bohai Sea[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2023, 51(16): 58–60. (in Chinese)
- [9] 刘羽霄, 李 昕, 周 晶. 含缺陷海底管道横向屈曲理论研究 (英文)[J]. 船舶力学, 2011, 15(9): 1033–1040.
Liu Y X, Li X, Zhou J. Study on the lateral buckling theory of defective submarine pipelines[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(9): 1033–1040. (in Chinese)
- [10] 宋日悬, 张煜杭. 裸置海底管道在扰动力下的整体屈曲分析[J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52(2): 26–29.
Song R X, Zhang Y H. Analysis of overall buckling of bare submarine pipes under disturbance force[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2023, 52(2): 26–29. (in Chinese)
- [11] 谢 鹏, 岳前进, 赵 岩. 考虑铺设残余变形影响的管道屈曲分析[J]. 船舶力学, 2016, 20(11): 1441–1448.
Xie P, Yue Q J, Zhao Y. Pipeline bending analysis considering the influence of residual deformation[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(11): 1441–1448. (in Chinese)
- [12] Brennodden H, Sveggen O, Wagner D A, et al. Full-scale pipe-soil interaction tests[C]//Offshore Technology Conference, Houston, 1986.
- [13] 余 杨, 胡少谦, 韩梦雪, 等. 扭矩与外压联合作用下海底管道的屈曲研究[J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2022, 55(6): 596–602.
Yu Y, Hu S Q, Han M X, et al. Study on flexion of submarine pipeline under combination of torque and external pressure[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology Edition), 2022, 55(6): 596–602. (in Chinese)
- [14] Cheuk C Y, White D J, Bolton M D. Large-scale modelling of soil-pipe interaction during large amplitude cyclic movements of partially embedded pipelines[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(8): 977–996.
- [15] White D J, Cheuk C Y. Modelling the soil resistance on seabed pipelines during large cycles of lateral movement[J]. Marine Structures, 2008, 21(1): 59–79.
- [16] DNV GL-RP-F114. Pipe-soil interaction for submarine pipelines[S]. Norway, DNV GL, 2017.
- [17] Guo L P, Liu R. High-order lateral buckling analysis of submarine pipeline under thermal stress[J]. Transactions of Tianjin University, 2012, 18(6): 411–418.
- [18] Liu R, Liu W B, Wu X L, et al. Global lateral buckling analysis of idealized subsea pipelines[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(1): 416–427.