

文章编号: 1000-8241(2017)03-0262-05

基于 ANSYS 的管道屈曲临界载荷分析

康习锋^{1,2} 张宏¹

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院; 2. 中国人民武装警察部队学院

摘要: 为了研究管道初始横向位移对其临界屈曲载荷的影响,采用数值分析方法,进行屈曲分析。首先利用特征值法进行屈曲求解,获得屈曲模态,并以此作为初始位移输入的基本参数;其次结合管道的几何参数,应用 ANSYS 有限元软件建立管道模型,并求解非线性大变形模型,分析初始横向位移对管道屈曲临界载荷的影响。结果表明:初始横向位移与管道的屈曲临界载荷是负相关的,初始位移越大,临界屈曲载荷越小,且几乎呈线性关系。研究结果可为今后的管道设计和工程建设提供技术支持。(图 6,表 3,参 21)

关键词: 管道;有限元分析;临界载荷;屈曲

中图分类号: TE88

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.03.004

网络出版时间: 2017-1-4 16:21:31

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20170104.1621.002.html>

Analysis on critical buckling load of pipelines based on ANSYS

KANG Xifeng^{1,2}, ZHANG Hong¹

1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing);

2. Chinese People's Armed Police Forces Academy

Abstract: In this paper, buckling analysis was performed by numerical analysis method to analyze the influence of initial transversal displacement of pipelines on the critical buckling load. Firstly, buckling solution was obtained by the eigenvalue method, and buckling modal was established and taken as the basic input parameter of initial displacement. Secondly, based on the geometric parameters of pipelines, a pipeline model was set up by ANSYS finite element software. And finally, nonlinear large-deformation model was solved and the influence of initial transversal displacement on the critical buckling load of pipelines was analyzed. It is shown that the initial transverse displacement is negatively correlated with the critical buckling load of pipelines and their relationship is nearly linear. The larger the initial transverse displacement is, the lower the critical buckling load is. The research results can provide the technical support for pipeline design and engineering construction in the future. (6 Figures, 3 Tables, 21 References)

Key words: pipelines, finite element analysis, critical load, buckling

油气管道一般由钢材制成,具有热膨胀性,投入运行后,受内部油品传递热量和压力的共同作用,会在轴向发生膨胀。膨胀过程中,一旦端部存在约束,或受周边土壤摩擦力作用,管壁会在轴向产生压缩应力集中,当其达到一定值时,将导致管道发生屈曲^[1-2]。在管道建设过程中,复杂的地形特征、施工技术及管理水平等均有可能造成初始位移的产生^[3]。

随着冻土区管道的不断建设,管道屈曲现象也时常出现,对屈曲机理及量化评估模型的研究亟待解

决^[4-6]。由于埋地管道涉及管道与土壤的相互作用,而土壤成分多样,且随季节变化含水量不同,土壤的力学特性也随之改变。这些困难导致管道屈曲机理的研究短时间内难以取得突破,采用解析方法求得精确理论解的难度也较大。

通过简化,早期有学者找到了屈曲模型的解析解^[5-10]。Hobbs 在铁轨屈曲分析的基础上,进行了改进,将梁的屈曲模型应用在管道分析^[11-13],采用了小变形的假设,建立了二阶微分方程,求解得出轴向载荷 P

与屈曲段波长 L 成平方反比关系。在实际工程应用中,由于现场环境复杂、现有测量方法的限制,屈曲波长难以确定^[14-16]。Allen 通过小尺寸实验进行了模拟分析,在确定边界条件求解方程时,引入了初始位移,得出载荷的平方与初始缺陷成反比关系^[17-18]。Heedo 等通过研究初始缺陷形状特征与临界载荷的关系发现,缺陷形式不仅对临界载荷产生影响,还可能影响管道的屈曲方式^[19-21]。在此采用有限元数值计算方法,分析初始位移对管道临界载荷的影响。

1 有限元模型

管道建模采用 ANSYS 中的 beam188 梁单元,为三维两节点单元,适于对细长杆件、柱体进行线性或大应变的非线性分析。材料的弹性模量 200 GPa,泊松比为 0.3,共有 400 个单元。

对管道受力情况进行分析(图 1),其中 p 为管道受到的轴向载荷; V_0 为管道初始缺陷,即横向最大位移; L 为屈曲段管道的长度; g 为线密度; v 为管道沿 y 轴的横向位移; k 为土壤对管道向下的约束反力系数。土壤产生的约束反力通常是与位移相关且呈非线性,在综合考虑平衡简化与模型精度的前提下,对土壤反力进行分段线性化处理(图 2)。 V_0 点土壤约束力达到最大值,随后线性下降至 C 点,土壤约束力为 0。 V_0 取管道埋深的中点, C 为管道埋深。

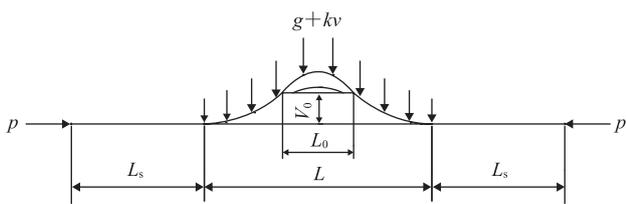


图 1 含缺陷管道受力示意图

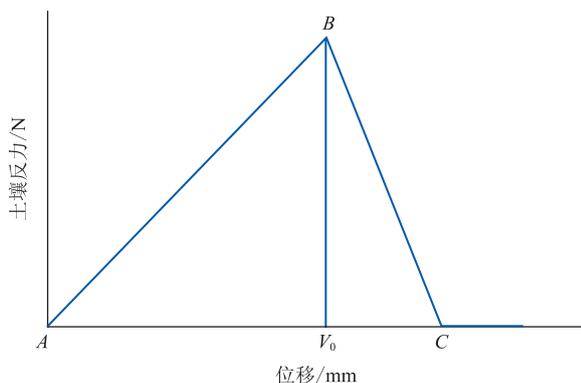


图 2 土壤约束反力模型

2 几何参数设置

管道模型长 200 m,直径为 700 mm(表 1、图 3)。节点 1 的转动和平移自由度均设定为 0,末节点 401 的 x 方向无约束,其余节点具有 x 、 y 轴的平移及 z 轴的转动自由度,载荷作用于末节点 401,为负 x 轴方向。根据特征值法求解得到的管道位移沿轴向分布情况曲线(图 4),在中间节点 201 处横向位移达到最大值,为 1.2 mm。在后续的非线性大变形稳定性分析中,将该位移曲线作为输入缺陷参数的基础,乘以一系列比例因子而获得最终的缺陷参数。

表 1 管道-土壤系统参数

管长/m	管径/mm	壁厚/mm	管道埋深/m	土壤密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
200	700	7	1	2 680

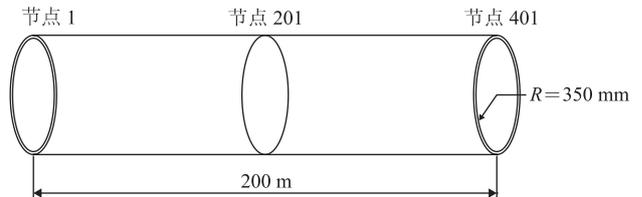


图 3 管道几何参数及节点位置

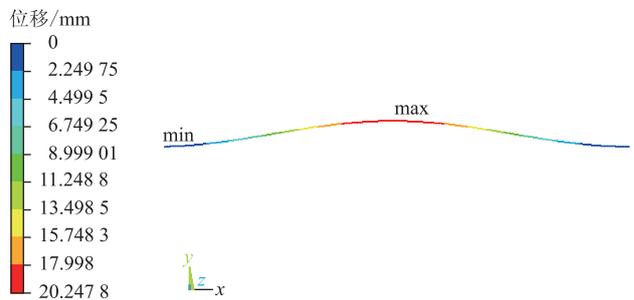


图 4 特征值法分析管道节点位移的分布曲线

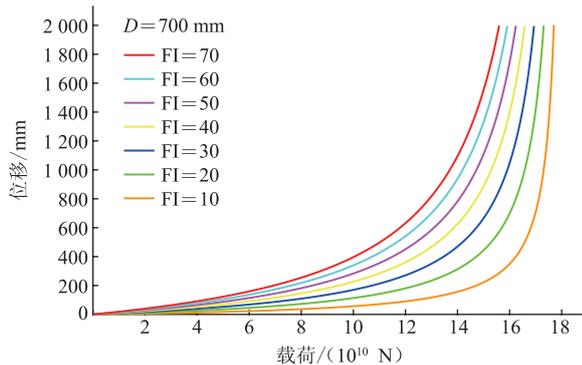
3 非线性分析

特征值屈曲分析得到管道临界载荷为 0.181×10^{12} N,利用特征值分析得到的屈曲形态,作为管道模型的非线性分析的输入参数,模拟管道的初始缺陷。由于特征值分析中得到的位移值较小,通过比例因子进行放大。比例因子 FI 根据其值大小分为 3 组,每组选 7 个值,得到最终初始缺陷(表 2)。

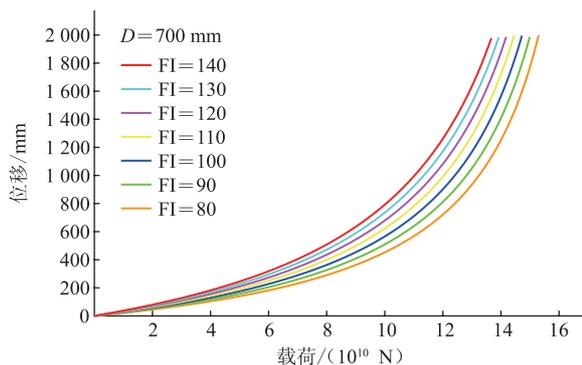
按照特征值方法分析的结果,中间节点 201 的位移值取得最大(图 5)。在大变形分析中,此节点所受的弯矩最大,位移也最大,因此,将该点的位移作为临界载荷判据。

表2 通过比例因子放大得到节点201的几何缺陷

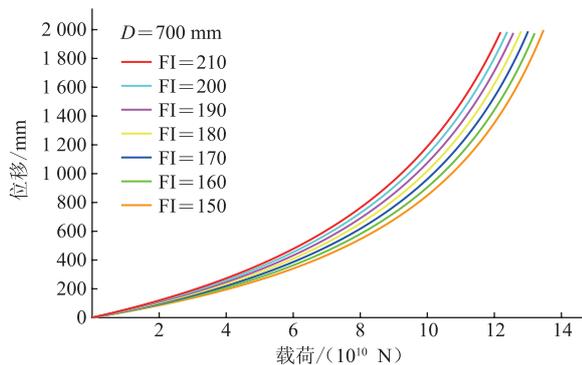
比例因子			几何缺陷位移/mm		
第1组	第2组	第3组	第1组	第2组	第3组
10	80	150	12	96	180
20	90	160	24	108	192
30	100	170	36	120	204
40	110	180	48	132	216
50	120	190	60	144	228
60	130	200	72	156	240
70	140	210	84	168	252



(a) 第1组



(b) 第2组



(c) 第3组

图5 3组比例因子对应的中间节点201的位移-载荷曲线

分析上述3组结果可以发现,比例因子越小,位移变化越剧烈。当比例因子为10时,位移-载荷曲线有明显拐点,出现在载荷为 17.5×10^{10} N附近,表明该载荷处位移迅速增大,该点即为管道的屈曲载荷;当比例

因子为20时,拐点也可以大致确定,但是其位置左移,在载荷为 17×10^{10} N附近,说明此时屈曲载荷较比例因子为10的工况下降了约 0.5×10^{10} N。随着比例因子的增加,初始缺陷也逐渐放大,位移曲线趋于平缓,无明显的拐点。

该曲线单调增加,且形状下凹,表明该曲线各阶导数也单调增加,因此,不存在极值点。但是对该曲线应用拉格朗日中值定理,发现曲线中值点位置与位移拐点位置几乎重合,因此,将曲线的拉格朗日中值点确定为临界载荷(表3、图6)。

表3 不同比例因子及其相应的临界载荷

比例因子	临界载荷/(10^{10} N)	比例因子	临界载荷/(10^{10} N)
10	17.5	60	15.4
20	17.0	70	15.0
30	16.5	80	14.7
40	16.2	90	14.5
50	15.8	100	14.2

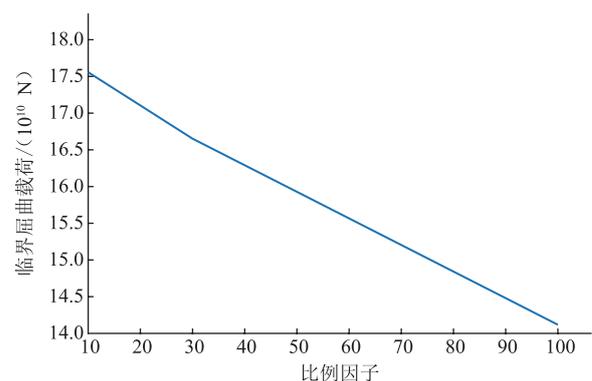


图6 不同比例因子对应的临界载荷曲线

经 Matlab 线性拟合临界载荷曲线,得到最终的屈曲载荷计算公式:

$$F = -0.002\ 098\ X + 0.987\ 7$$

式中: F 为临界屈曲载荷, 10^{10} N; X 为特征值分析得到的欧拉屈曲载荷,取 18.1×10^{10} N。

4 结论

通过建立有限元模型,对受轴向载荷的埋地管道进行非线性大变形分析,结果表明,初始缺陷与管道的屈曲载荷有较高的关联度。随着初始缺陷的不断增大,屈曲载荷不断降低。经过对临界载荷曲线的线性拟合,得到管道的屈曲临界载荷公式,管道的屈曲载荷与初始缺陷具有负线性相关性。

参考文献:

- [1] 张宏. 基于应变的管道强度设计方法的适用性[J]. 油气储运, 2012, 31(12): 952-954.
ZHANG H. The applicability of strain-based pipeline strength design method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(12): 952-954.
- [2] 何瑞霞, 金会军, 吕兰芝, 等. 格尔木拉萨成品油管道沿线冻土工程和环境问题及其防治对策[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 18-27.
HE R X, JIN H J, LYU L Z, et al. Permafrost and environmental problems along the Golmud to Lhasa oil product and their mitigation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 18-27.
- [3] 刘啸奔, 张宏, 李勳, 等. 断层作用下埋地管道应变分析方法研究进展[J]. 油气储运, 2016, 35(8): 799-807.
LIU X B, ZHANG H, LI M, et al. Research progress of strain analysis methods for buried pipelines under faulting process[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(8): 799-807.
- [4] 蔡克, 杨锋平, 罗恒金. 天然气管道的屈曲变形模拟[J]. 油气储运, 2013, 32(4): 402-405.
CAI K, YANG F P, LUO H J. Simulation on buckling deformation of natural gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(4): 402-405.
- [5] 刘啸奔, 张宏, 夏梦莹. 冻土区管道上浮屈曲临界载荷试验研究[J]. 石油化工设备, 2014, 43(4): 11-14.
LIU X B, ZHANG H, XIA M Y. Research on experimental method of upheaval buckling of pipeline in permafrost zone[J]. Petro-Chemical Equipment, 2014, 43(4): 11-14.
- [6] 姬贺炯, 白长青, 韩省亮. 输流管道动力有限元建模及实验研究[J]. 应用力学学报, 2013, 30(3): 422-427.
JI H J, BAI C Q, HAN S L. Dynamic finite element modeling and experimental research of the fluid-filled pipeline[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(3): 422-427.
- [7] WANG L Z, SHI R W, YUAN F, et al. Global buckling of pipelines in the vertical plane with a soft seabed[J]. Applied Ocean Research, 2011, 33(3): 130-136.
- [8] 王丽. 冻土区输油管道轴向稳定性分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2009: 70-78.
WANG L. The axial stability analysis of the oil pipeline in permafrost areas[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2009: 70-78.
- [9] 余建星, 李智博, 杜尊峰, 等. 深海管道非线性屈曲理论计算方法[J]. 海洋工程, 2013, 31(1): 54-60.
YU J X, LI Z B, DU Z F, et al. Theoretical calculation method of the nonlinear buckling of deep sea pipes[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(1): 54-60.
- [10] 李璞, 陶燕丽, 周建. 基于应变设计管道局部屈曲应变极限值的计算[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 101-107.
LI P, TAO Y L, ZHOU J. A study of the ultimate compressive strain of local buckling in strain-based design of pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 101-107.
- [11] 龚顺风, 陈源, 金伟良, 等. 高静水压力作用下深海油气管道的局部屈曲[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(1): 14-19.
GONG S F, CHEN Y, JIN W L, et al. Local buckling of deep water oil-gas pipeline under high hydrostatic pressure[J]. Journal of Zhejiang University, 2012, 46(1): 14-19.
- [12] 金浏, 王苏, 杜修力. 场地沉陷作用下埋地管道屈曲反应分析[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2): 142-147.
JIN L, WANG S, DU X L. Buckling response analysis of buried pipelines subjected to the site soil settlement[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(2): 142-147.
- [13] 金浏, 李鸿晶. 逆冲断层作用下埋地管道屈曲分析[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 98-104.
JIN L, LI H J. Buckling analysis of buried pipeline subject to reverse fault crossings[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 98-104.
- [14] 林镇诗, 余建星, 王永更, 等. 深水海底管道屈曲试验数据采集技术研究[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(12): 62-66.
LIN Z S, YU J X, WANG Y G, et al. Data acquisition technology of deep water submarine pipeline buckling experiments[J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(12): 62-66.
- [15] 车小玉, 段梦兰, 曾霞光, 等. 双层管道整体屈曲实验研究及数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(2): 188-201.
CHE X Y, DUAN M L, ZENG X G, et al. Experimental study and numerical simulation of global buckling of pipe-in-pipe systems[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35(2): 188-201.
- [16] ZENG X G, DUAN M L, CHE X. Critical upheaval buckling forces of pipelines[J]. Applied Ocean Research, 2014, 45(2): 33-39.
- [17] 刘羽霄, 葛涛, 李昕, 等. 初始几何缺陷在海底管道整体屈曲数值建模中的引入方法[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(3): 32-35.

- LIU Y X, GE T, LI X, et al. Introduction method of initial geometric imperfection in the numeral model of subsea pipeline global buckling[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, 22(3): 32-35.
- [18] 刘羽霄, 葛涛, 李昕, 等. 管-土相互作用对海底管道横向屈曲的影响[J]. 石油机械, 2011, 39(8): 7-10.
- LIU Y X, GE T, LI X, et al. The effect of pipe-soil interaction on the lateral buckling of seafloor pipeline[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(8): 7-10.
- [19] 张萌, 余建星, 孙震洲, 等. Patran 与 Abaqus 技术在海底管道屈曲分析中的应用研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(3): 55-62.
- ZHANG M, YU J X, SUN Z Z, et al. Application research of Patran and Abaqus in offshore pipeline buckling analysis[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(3): 55-62.
- [20] 闫宏生, 王铿, 李怀亮, 等. 海底管道临时管跨允许最大跨长的计算[J]. 油气储运, 2015, 34(9): 1015-1018.
- YAN H S, WANG K, LI H L, et al. Calculation of the allowable maximum span of temporarily-suspended submarine pipeline section[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(9): 1015-1018.
- [21] 叶皓, 金志江, 梁勇. 海底管道局部屈曲研究进展[J]. 船舶工程, 2014, 36(3): 1-5.
- YE H, JIN Z J, LIANG Y. Review of research on local buckling of subsea pipeline[J]. Ship Engineering, 2014, 36(3): 1-5.
- (收稿日期: 2016-08-13; 修回日期: 2017-02-06; 编辑: 刘朝阳)
-
- 作者简介:** 康习锋, 男, 1977年生, 讲师, 2008年硕士毕业于武警学院作战指挥学专业, 现主要从事管道安全工程、消防装备等技术的研究和教学工作。地址: 河北省廊坊市西昌路220号中国人民武装警察部队学院消防指挥系技术装备教研室, 065000。电话: 13833663121, Email: kangxifeng@outlook.com
- 通讯作者:** 张宏, 男, 1963年生, 教授, 2003年博士毕业于中国石油大学(北京)机械设计及理论专业, 现主要从事油气管道的安全评价方面研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 102249。电话: 010-89733274, Email: zhanghong630215@139.com

(上接第261页)

- [16] 贾方, 何建敏. 数据包络分析法在评价区域经济发展效率中的应用[J]. 现代管理科学, 2007, 6(3): 4-7.
- JIA F, HE J M. Application of data envelopment analysis in evaluating the efficiency of regional economic development[J]. Modern Managerial Science, 2007, 6(3): 4-7.
- [17] 张杰, 唐宏, 苏凯, 等. 效能评估方法研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 58-63.
- ZHANG J, TANG H, SU K, et al. Research of effectiveness evaluation method[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 58-63.
- [18] 郭齐胜, 郭志刚, 杨瑞平, 等. 装备效能评估概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 112-118.
- GUO Q S, ZHI Z G, YANG R P, et al. Introduction to equipment effectiveness evaluation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005: 112-118.
- [19] 刘毅军, 甘丽华, 于汐. 管道完整性管理模式经济效益评价方法[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 181-184.
- LIU Y J, GAN L H, YU X. Economic benefit evaluation method of pipeline integrity management mode[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(4): 181-184.
- [20] 徐瑞恩. 武器装备效能模型和方法概论[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(1): 1-6.
- XU R E. Introduction to the effectiveness of weapon equipment model and method[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2002, 13(1): 1-6.
- (收稿日期: 2016-01-14; 修回日期: 2016-11-17; 编辑: 刘朝阳)
-
- 基金项目:** 十二五国家科技支撑计划课题“城镇油气管道重大事故风险防控与应急处置技术研发及示范”, 2015BAK16B00。
- 作者简介:** 帅义, 男, 1987年生, 在读博士生, 2014年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气管道的风险管理、内检测数据评价与大数据挖掘、完整性管理信息化研发、管道结构力学计算与可靠性分析等科研工作。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102249。电话: 13811386578, Email: shuaiyi_cjdx2008@126.com
- 通讯作者:** 帅健, 男, 1963年生, 教授, 2000年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气管道安全及完整性管理相关技术的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102249。电话: 010-89733372, Email: shuaij@cup.edu.cn