

悬跨管道极限长度计算方法研究

徐继录

山东省核与辐射安全监测中心, 山东 济南

收稿日期: 2023年7月23日; 录用日期: 2023年8月25日; 发布日期: 2023年9月1日

摘要

为建立满足工程应用的悬跨管道极限长度计算方法, 采用数值仿真方法开展悬跨管道涡激振动模态分析研究, 分析了不同端部约束条件、不同悬跨长度、不同内压荷载、不同轴向受力条件下悬跨管道涡激振动一阶、二阶模态自振频率, 并以此为拟合数据, 依据避免悬跨管道发生涡激共振的原则, 考虑了一定的强度裕量, 建立了悬跨管道涡激共振极限悬跨长度计算方法, 应用已有文献数据验证了该计算方法的可靠性, 表明该方法能够适应工程计算的需要。

关键词

涡激振动, 端部约束, 悬跨长度, 内压荷载, 轴向受力, 模态分析, 极限长度, 计算方法

Research on Calculation Method of Ultimate Length of Suspended Span Pipeline

Jilu Xu

Nuclear and Radiation Safety Monitoring Center of Shandong Province, Jinan Shandong

Received: Jul. 23rd, 2023; accepted: Aug. 25th, 2023; published: Sep. 1st, 2023

Abstract

In order to establish the calculation method for the ultimate length of free spanning pipeline, the vortex-induced vibration modal analysis of free spanning pipeline was carried out by numerical simulation method. This article analyzes the first-order and second-order modal natural frequencies of vortex induced vibration of suspended span pipelines under different end constraint conditions, different span lengths, different internal pressure loads, and different axial force conditions. Based on the principle of avoiding vortex induced resonance in suspended span pipelines and considering a certain strength margin, a calculation method for the maximum span length of vortex induced resonance of suspended span pipelines is established. The reliability of this calcu-

lation method has been verified using existing literature data, indicating that it can meet the needs of engineering calculations.

Keywords

Vortex-Induced Vibration, End Restraint, Span Length, Internal Pressure Load, Axial Force, Modal Analysis, Limit Length, Calculation Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

DNV-RP-F105 [1]给出固有频率[2] [3]是悬跨海管进行详细疲劳寿命计算判断准则的核心,有大量研究表明[3] [4] [5] [6] [7]判断准则中应采用悬跨管道固有频率,研究采用 ADINA 数值仿真软件分析得到了不同端部约束条件、不同悬跨长度、不同内压荷载、不同轴向受力等工况条件下的自振频率,进行拟合分析,建立了悬跨管道涡激共振极限悬跨长度计算方法。

2. 悬跨管道涡激振动模态分析

2.1. 不同端部约束条件悬跨管道模态分析

悬跨管道端部约束条件是管跨涡激振动的重要研究内容,也是决定悬跨管道涡激响应的重要因素。分别研究了悬跨管道端部简支约束、固支约束以及管道端部不同的横向弹簧约束条件对悬跨管道模态的影响。

表 1 给出了不同端部约束条件对悬跨管道振动一至二阶模态的影响,从表 1 可以看出:简支和固支约束条件对悬跨管道各阶自振频率影响不大,固支悬跨管道,自振频率稍大;横向弹簧约束对悬跨管道各阶横向自振频率有较大影响,随着横向弹簧约束刚度的增大,悬跨管道各阶自振频率逐渐增大并接近于固支约束条件。

Table 1. The effect on modal analysis of free spanning pipeline lateral vibration with different restraints

表 1. 不同端部约束悬跨管道横向振动模态分析

约束条件/自振频率	一阶	二阶
简支	0.6262	1.727
固支	0.6263	1.727
线性弹簧约束 10,000,000 N/m	0.6259	1.725
线性弹簧约束 5,000,000 N/m	0.626	1.726
线性弹簧约束 1,000,000 N/m	0.6243	1.712
线性弹簧约束 100,000 N/m	0.6087	1.588
线性弹簧约束 10,000 N/m	0.4852	0.9328
线性弹簧约束 1,000 N/m	0.2101	0.6261

2.2. 不同悬跨长度管道模态分析

表 2 给出了不同悬跨长度管道振动一至二阶模态频率，从表 2 可以看出，悬跨管道振动模态频率的变化规律和变化量均一致；随着悬跨长度的增加，管道各阶振动频率几乎是成倍的减小。

Table 2. The effect on modal analysis of free spanning pipeline lateral vibration

表 2. 悬跨管道横向振动模态分析

悬跨长度/自振频率	一阶	二阶
5 m	36.76	99.96
10 m	9.655	26.52
20 m	2.468	6.796
30 m	1.105	3.043
40 m	0.6262	1.727
50 m	0.3998	1.102
60 m	0.278	0.7663
70 m	0.2045	0.5636
80 m	0.1566	0.4318
100 m	0.1004	0.2766

2.3. 不同内压荷载悬跨管道模态分析

表 3 给出了不同内压荷载 40 m 悬跨管道振动一至二阶模态频率，从表 3 可以看出：随着内压荷载的增加，悬跨管道振动模态频率逐渐增大，但当内压荷载较小时，悬跨管道自振频率升高有限，只有当内压荷载达到某一高值，约 3,000 kPa 后，悬跨管道各阶自振频率才会有明显的提升。

Table 3. The effect on modal analysis of free spanning pipeline lateral vibration with different internal pressure loading

表 3. 不同内压悬跨长度管道横向振动模态分析

内压荷载/自振频率	一阶	二阶
100 kPa	1.127	2.523
300 kPa	1.131	2.529
500 kPa	1.135	2.537
700 kPa	1.14	2.545
1,000 kPa	1.15	2.562
1,500 kPa	1.169	2.595
3,000 kPa	1.195	2.642
4,500 kPa	2.487	5.393

2.4. 不同轴向受力悬跨管道模态分析

1) 轴向拉力

表 4 给出了不同轴向拉力悬跨管道振动一至二阶模态频率，从表 4 可以看出：轴向拉力对悬跨管道

自振频率的影响非常明显；随着轴向拉力的增加，悬跨管道振动模态频率逐渐增大。

Table 4. The effect on modal analysis of free spanning pipeline lateral vibration with different axial tension
表 4. 不同轴向拉力悬跨管道横向振动模态分析

轴向拉力/自振频率	一阶	二阶
0 kPa	0.3972	1.249
1 kPa	0.4874	1.371
2.5 kPa	0.8037	1.874
10 kPa	0.6567	1.63
25 kPa	0.973	2.174
50 kPa	1.321	2.817
100 kPa	1.849	3.827
200 kPa	2.615	5.336
300 kPa	3.196	6.487
500 kPa	4.016	8.045
700 kPa	4.588	9.078
800 kPa	4.861	9.583
900 kPa	5.636	11.52

2) 轴向压力

表 5 给出了不同轴向压力悬跨管道振动一至二阶模态频率，从表 5 可以看出：随着轴向压力的增加，悬跨管道振动模态频率逐渐减小，轴向压力越大，这种变化趋势越明显。

Table 5. The effect on modal analysis of free spanning pipeline lateral vibration with different axial pressure
表 5. 不同轴向压力悬跨管道横向振动模态分析

轴向压力/自振频率	一阶	二阶
0.001 kPa	0.397	1.248
0.05 kPa	0.3927	1.243
0.15 kPa	0.3842	1.232
0.45 kPa	0.3608	1.204
1 kPa	0.3233	1.16
2.5 kPa	0.2922	1.127
3 kPa	0.2687	1.104
4 kPa	0.2042	1.047
5 kPa	0.1686	1.021

3. 悬跨管道极限跨长计算模型

考虑到海底管道设计中一般都会留有较大的强度裕量，海底悬跨管道更多的是处于涡激共振的危险

中,因此,本文从避免悬跨管道发生涡激共振的角度直接计算管道的临界跨长,管跨一旦超过临界跨长,悬跨管道将处在涡激共振的危险,即避免涡激共振的角度计算管道极限跨长。

3.1. 悬跨管道涡激共振极限悬跨长度

依据文献[8],当尾流漩涡释放频率 f_s 与管子的一阶自振频率 f_n 两者相接近或相一致时,管跨即发生涡激共振现象,从而使管道失稳而遭破坏。因此可利用流漩涡释放频率 f_s 与管子的自振频率 f_n 两者之间的关系得到悬跨管道涡激共振极限悬跨长度。

尾流漩涡释放频率 f_s 表示为:

$$f_s = \frac{S_t U}{D} \quad (1)$$

式中斯特罗哈数 S_t 的取值参考文献[9]。

悬跨管道固有频率与悬跨管道长度、悬跨管道端部约束条件、悬跨管道轴向作用力、悬跨管道内压荷载等因素有关[10],但目前依据已有的研究文献[11],上述影响因素与悬跨管道固有频率的关系并不明确,更多采用了经验系数的方法涵盖上述因素的影响。因此,参考文献[12]以及前文模态分析写出悬跨管道涡激共振的经验公式:

$$f_n = C \cdot \frac{(\ln(k + x_1) + x_2) \cdot (\ln(F + x_3) + x_4)}{2\pi \cdot l^2} \sqrt{\frac{EI}{M_p}} \quad (2)$$

式中: C 为待定系数; k 为悬跨管道端部约束条件,两端固支, $k = 1$,两端简支, $k = 0.85$,两端以线性弹簧表示,则 k 为线性弹簧刚度系数, $k =$ 线性弹簧刚度/10,000,000N/m; F 为悬跨管道轴向受力,轴向拉力为正,轴向压力为负; l 为管道悬跨长度, E 为弹性模量; I 为惯性矩; M_p 为管道单位长度质量; x_i 为待定系数。

考虑到计算需要有一定的安全裕量,得到:

$$f_s < 0.5 \cdot f_n \quad (3)$$

将(1)和(2)分别代入(3)得到,悬跨管道涡激共振极限悬跨长度:

$$l = \sqrt{\frac{0.5 \cdot D \cdot C \cdot (\ln(k + x_1) + x_2) \cdot (\ln(F + x_3) + x_4) \cdot \sqrt{\frac{EI}{M_p}}}{2\pi \cdot S_t \cdot U}} \quad (4)$$

将上文不同条件下悬跨管道一阶模态固有频率代入上式得: $C = 1.11$ 、 $x_1 = -0.0001$ 、 $x_2 = 64.4$ 、 $x_3 = 102$ 、 $x_4 = -4.3$ 。

3.2. 悬跨管道涡激振动极限悬跨长度可靠性验证

为验证悬跨管道极限跨长选择文献[13]中的研究数据作参考,所选管道物理参数如表6所示:

Table 6. The physical parameters of verify pipeline
表 6. 验证海底管道物理参数

弹性模量/Pa	管道外径/m	管道内径/m	管材密度 kg/m ³	管内流体密度 kg/m ³	管外流体密度 kg/m ³	轴向力/kPa	端部约束
2.1e ¹¹	0.324	0.292	8200	908.2	1025	0	简支

图 1 表示本章极限悬跨长度计算数据与文献值的对比, 从图 1 可以看出, 数据吻合得很好, 因此本文悬跨管道极限长度计算方法能够适应工程计算的需要。

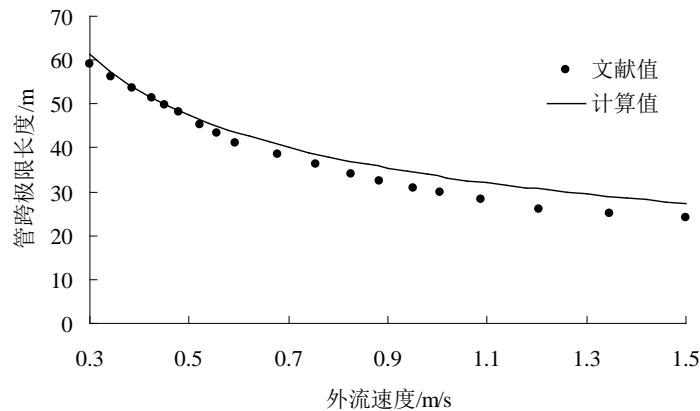


Figure 1. The comparison between chapter calculation data and literature values

图 1. 本章计算数据与文献值对比

4. 结论

1) 通过悬跨管道涡激振动数值分析可靠性验证, 证明论文采用的数值仿真研究方法开展悬跨管道模态分析结果是可靠的;

2) 悬跨管道各阶模态主要受悬跨长度、轴向力、端部约束条件以及内压荷载的影响, 数值分析了各种工况下悬跨管道一阶、二阶自振频率。

3) 依据避免悬跨管道发生涡激共振的角度, 并考虑了一定的强度裕量, 以数值仿真得到的不同工况下悬跨管道一阶自振频率为拟合数据, 建立了悬跨管道涡激共振极限悬跨长度计算方法, 应用已有文献数据验证了该计算方法的可靠性, 能够适应工程计算的需要。

参考文献

- [1] DNV-RP-F105 (2006) Recommended Practice RP-F105 Free Spanning Pipelines.
- [2] 徐万海, 谢武德, 高喜峰, 马焯璇. 海底多段悬跨管道涡激振动特性分析[J]. 船舶力学, 2017, 21(8): 1025-1034.
- [3] Larsen, C.M., Vikestad, K., Yttervik, R., et al. (2015) MARINTEK Report: VIVANA Theory Manual. Trondheim, Norway.
- [4] Larsen, C.M., Koushan, K. and Passano, E. (2017) Frequency and Time Domain Analysis of Vortex Induced Vibrations for Free Span Pipelines. *Proceedings of the 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Oslo, 20-25 June 2004, 1-9.
- [5] Furnes, G.K. and Berntsen, J. (2018) On the Response of a Free Span Pipeline Subjected to Ocean Currents. *Ocean Engineering*, **30**, 1553-1577.
- [6] 余建星, 俞永清, 李红涛, 吴海欣. 海底管跨涡激振动疲劳可靠性研究[J]. 船舶力学, 2015, 9(2): 109-115.
- [7] 余建星, 傅明扬, 杜尊峰. 海底管道涡激振动疲劳可靠性分析[J]. 天津大学学报, 2018, 41(11): 1321-1325.
- [8] 李朋. 海洋输流立管涡激振动试验研究及数值模拟[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [9] Feng, C.-C. (1968) The Measurement of Vortex Induced Effects in Flow Past Stationary and Oscillating Circular and D-Section Cylinders. University of British Columbia.
<https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/831/items/1.0104049>
- [10] Vikestad, K., Vandiver, J.K. and Larsen, C.M. (2000) Added Mass and Oscillatory Frequency for a Circular Cylinder Subjected to Vortex-Induced Vibrations and External Disturbance. *Journal of Fluids and Structures*, **14**, 1071-1088.

-
- [11] Blackburn, H.M., Govardhan, R.N. and Williamson, C.H.K. (2000) A Complementary Numerical and Physical Investigation of Vortex-Induced Vibration. *Journal of Fluids and Structures*, **15**, 481-488.
 - [12] 冯振宇, 张希农. 圆柱结构的流动诱发振动[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 102.
 - [13] Choi, H.S. (2001) Free Spanning Analysis of Offshore Pipelines. *Ocean Engineering*, **28**, 1325-1338.