

悬跨管道间隙比对涡激振动动态响应的影响

郭富仁¹, 何海红²

¹山东瑞一科生物科技有限公司, 山东 济南

²山东京博石油化工有限公司, 山东 滨州

收稿日期: 2021年11月14日; 录用日期: 2021年12月16日; 发布日期: 2021年12月24日

摘要

为了理清管道悬跨间隙比对涡激振动动态响应的影响, 采用数值仿真方法分析了悬跨管道间隙比、海流速度对漩涡脱落频率、涡激振动动态响应的影响。结果表明: 间隙比 < 2 时, 升力系数振幅中心位置是一负值; 间隙比 > 4 时, 升力系数振幅中心位置接近0, 对周围流场的影响消失。同一间隙比下, 升力系数频率随海流速度呈线性变化; 不同间隙比下, 悬跨管道漩涡脱落频率随约化速度呈线性变化。不同间隙比悬跨管道涡激振动频率锁定时的海流速度相等, 锁定后, 横向(Z方向)振幅随着间隙比的增大逐渐增大, 间隙比达到4后, 影响消失。不同间隙比悬跨管道涡激振动一阶模态自振频率锁定时的约化速度相差不大, 在(5,7)范围内; 间隙比小于2时, 对横向(Z方向)振动中心位置的影响非常明显, 间隙比达到4后, 横向(Z方向)振动中心位置逐渐趋向于0。

关键词

涡激振动, 间隙比, 海流速度, 漩涡脱落, 横向振动, 顺向振动, 锁定

Influence of Gap Ratio on Vortex-Induced Vibration Dynamic Response of Free Spanning Pipeline

Furen Guo¹, Haihong He²

¹Shandong Ruiyike Biotechnology Co., Ltd., Jinan Shandong

²Shandong Chambroad Petrochemicals Co., Ltd., Binzhou Shandong

Received: Nov. 14th, 2021; accepted: Dec. 16th, 2021; published: Dec. 24th, 2021

Abstract

In order to clarify the influence of free span gap ratio on vortex-induced vibration (VIV) dynamic

response, the effects of free span gap ratio and current velocity on vortex shedding frequency and VIV dynamic response were analyzed by numerical simulation method. The results show that the center of lift coefficient amplitude is a negative value when the clearance ratio is <2 , and the center of lift coefficient amplitude is close to 0 when the clearance ratio is >4 . The frequency of lift coefficient varies linearly with a current velocity at the same gap ratio, and the frequency of vortex shedding varies linearly with a reduced velocity at different gap ratios. When the vortex-induced vibration frequency is locked, the velocity of ocean current is equal. After locking, the transverse (Z direction) amplitude increases with the increasing of the gap ratio, and the influence disappears when the gap ratio reaches 4. When the gap ratio is less than 2, the reduction velocity of vortex-induced vibration in the first-order mode of free vibration is similar, and the influence of the gap ratio on the location of the vibration center in the transverse (Z direction) is obvious, when the gap ratio reaches 4, the center of transverse (Z direction) vibration tends to 0.

Keywords

Vortex-Induced Vibration, Gap Ratio, Current Velocity, Vortex Shedding, Lateral Vibration, Consequent Vibration, Locking

Copyright © 2021 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

涡致振动是海底悬跨管道的主要振动形式。当漩涡脱落的频率接近悬跨管道自振频率时, 悬跨管道的振动会使漩涡脱落的频率固定在悬跨管道自振频率附近, 而不按其本身的频率发放, 此即为频率“锁定”现象。由涡致振动以及频率“锁定”导致的结构失稳以及疲劳破坏是海底管线破损的重要形式, 而这种破坏形式在浅海区尤其明显。过去的几十年里, 国内外学者针对悬跨管道振动的一系列相关问题开展了大量数值分析、理论与实验研究, 取得了一定的研究成果。

国外研究起步较早, 以挪威海洋技术研究所(MARINTEK)和挪威科技大学(NTNU)在该领域做出的贡献最为突出[1]。1997年, Larsen 领导的研究团队研发了 VIVANA 商业软件, 该软件能够实现海底悬跨管道和海洋立管涡激振动分析和疲劳分析[2]。为了进一步完善软件功能, 2015年, Larsen 等人使用了频域和时域方法研究悬跨管道涡激振动现象。2017年, Larsen 领导的课题组人[3]利用非线性时域方法进一步研究了悬跨管道的涡激振动。2018年, Furns 和 Berntse [4]假设 IL 和 CF 挠曲是通过任意时刻的轴向张力耦合的, 研究了海流作用下悬跨管道 IL 方向和 CF 方向运动的耦合性, 结果表明悬跨管道涡合效应明显, 不可忽略。我国学者余建星[5][6]等人根据建立的悬跨管道的非线性涡激振动方程对涡激振动疲劳可靠度进行了研究。黄维平[7]等人对输液模型管道进行了涡激振动实验研究, 根据实验结果修正了涡激升力模型中 IL 方向上流速的影响。

论文采用数值方法研究了悬跨管道间隙比、海流速度等对漩涡脱落频率、涡激振动动态响应的影响, 以为海底悬跨管道完整性运行提供理论借鉴。

2. 悬跨管道涡激振动数值分析可靠性验证

2.1. 悬跨管道涡激振动动态响应仿真条件无关性分析

如不做特殊说明, 研究悬跨管道物理参数如表 1 所示:

Table 1. Physical parameters of free-span pipelines**表 1.** 悬跨管道物理参数

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	内压荷载 /MPa	悬跨长度 /m
2.1e ¹¹	0.2	0.18	7850	1000	1025	0	简支	0	40

1) 网格密度无关性分析

轴向网格密度分析:

表 2 表示不同轴向网格密度对悬跨管道模型升力系数、曳力系数的影响, 可以看出, 轴向网格密度增加, 升力系数 C_L 、曳力系数 C_D 逐渐减小, 当轴向网格密度达到 32 时, 升力系数 C_L 、曳力系数 C_D 的变化已经很小。因此模拟选择 8/10 m 的轴向网格密度。

Table 2. Influence of different axial mesh density models on lift coefficient and drag coefficient**表 2.** 不同轴向网格密度模型对升力系数、曳力系数的影响

系数/轴向网格数量	8	12	16	20	24	28	32	40
C_L	2.3	1.5	1.2	1	0.85	0.8	0.75	0.72
C_D	6	4	3	2.5	2.05	1.8	1.65	1.58

纵向网格密度分析:

表 3 表示不同纵向网格密度对悬跨管道模型升力系数、曳力系数的影响, 可以看出, 纵向网格密度增加, 升力系数 C_L 逐渐增大, 曳力系数 C_D 变化不规律, 不予考虑。当纵向网格密度达到 12/36 时, 升力系数 C_L 变化已经很小。因此模拟选择 12/36 的纵向网格密度。

Table 3. The influence of different longitudinal grid density models on lift coefficient and drag coefficient**表 3.** 不同纵向网格密度模型对升力系数、曳力系数的影响

系数/管道周围网格	8/24	12/36	16/48
C_L	0.5	0.75	0.8
C_D	2	1.6	2.05

2) 时间步长无关性分析

表 4 表示不同时间步长对悬跨管道模型升力系数的影响, 可以看出, 随着时间步长减小, 升力系数 C_L 逐渐增大。当时间步长达到 1/100T 时, 升力系数 C_L 变化已经很小。因此模拟选择 1/100T 作为悬跨管道涡激振动研究的时间步长。

Table 4. The influence of different time steps on the lift coefficient**表 4.** 不同时间步长对升力系数的影响

系数/时间步长	1/20 T	1/50 T	1/80 T	1/100 T	1/120 T	1/150 T
C_L	0.13	0.36	0.7	0.75	0.76	0.77

2.2. 悬跨管道涡激振动动态响应实验验证

本文参考文献[5]的实验结果, 验证了数值仿真的可靠性, 图 1(a)~(d)分别表示本文数值仿真结果与文献[5]中图 3.9~3.13 结果的对比, 从图 1 可以看出, 数值仿真的计算结果与文献[5]实验结果吻合的较好,

证明本文数值仿真方法能够满足悬跨管道涡激振动动态响应的研究要求。

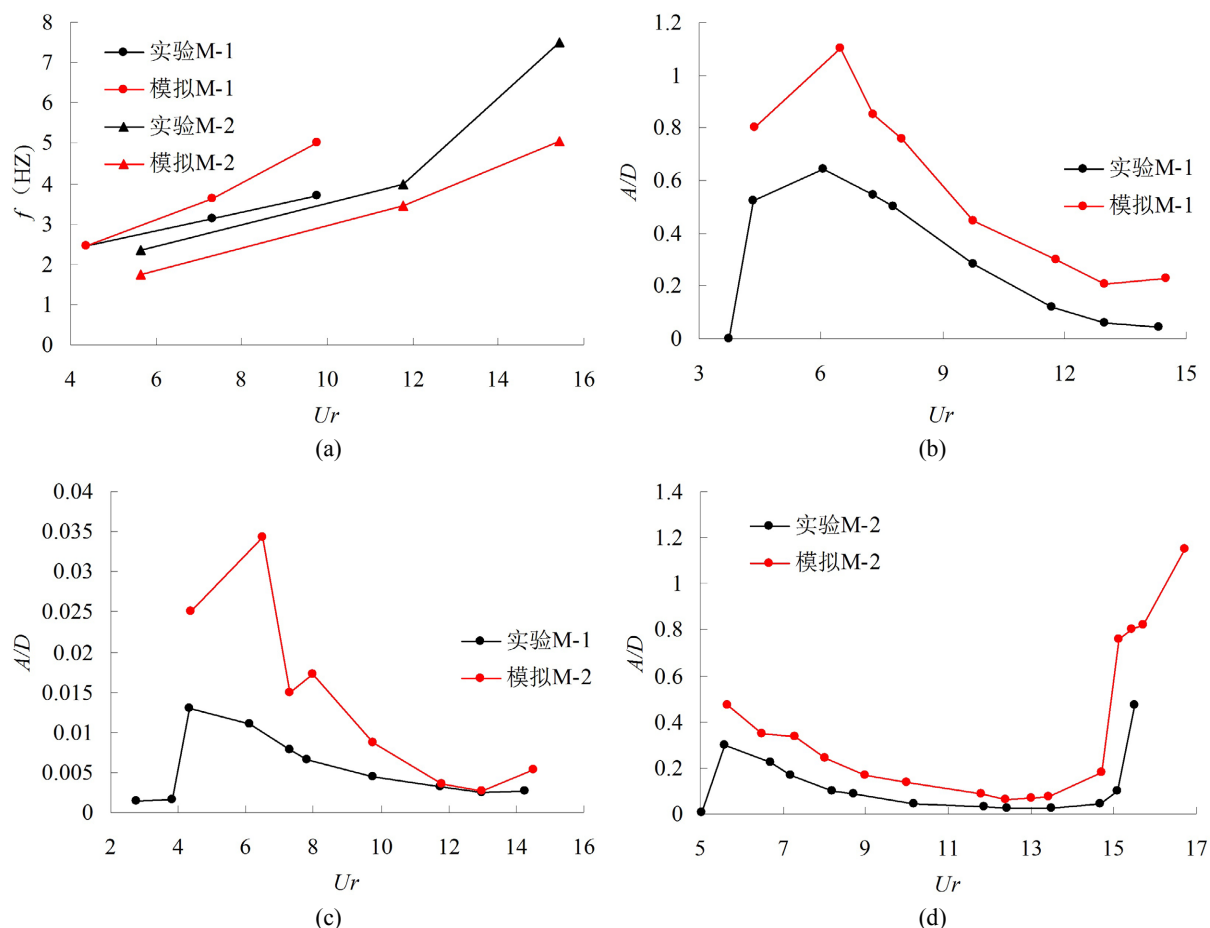


Figure 1. Comparison of simulation data and experimental data; (a) The comparison in figure 3.9~figure 3.11; (b) The comparison in figure 3.12; (c) The comparison in figure 3.12; (d) The comparison in figure 3.13

图 1. 仿真数据与实验数据对比; (a) 图 3.9~图 3.11 数据对比; (b) 图 3.12 数据对比; (c) 图 3.12 数据对比; (d) 图 3.13 数据对比

3. 不同间隙比悬跨管道涡激振动动态响应分析

间隙比是指悬跨管道中心位置距离海底的垂直距离与悬跨长度之间的比值, 用“ e ”表示。

3.1. 对漩涡脱落频率的影响

表 5 表示不同间隙比悬跨管道在不同海流速度下升力系数变化频率, 从表 5 可以看出, 相同海流速度下, 不同间隙比悬跨管道升力系数变化不大; 同一间隙比下, 悬跨管道涡激振动升力系数频率随海流速度呈线性变化。图 2 表示不同间隙比悬跨管道漩涡脱落频率随约化速度的变化, 可以看出漩涡脱落频率随约化速度呈线性变化。

3.2. 对管道涡激振动动态响应的影响

表 6 表示不同间隙比悬跨管道在不同海流速度下横向(Z 方向)振动振幅, 可以看出, 不同间隙比悬跨管道涡激振动频率锁定时的海流速度相等, 但频率锁定时, 横向(Z 方向)振幅随着间隙比的增大逐渐增大, 当间隙比达到 4 以后, 影响消失。

Table 5. The frequency of the lift coefficient of the free-span pipeline with different clearance ratios at different ocean current speeds

表 5. 不同间隙比悬跨管道在不同海流速度下升力系数频率

海流速度/m/s \ 间隙比	0.5	1	2	4	6	8
0.05	/	0.05	0.047	0.043	0.042	0.041
0.1	/	0.1	0.093	0.084	0.86	0.09
0.2	/	0.2	0.182	0.162	0.18	0.18
0.35	0.33	0.35	0.32	0.32	0.31	0.31
0.5	0.45	0.5	0.47	0.46	0.43	0.43
0.65	0.6	0.65	0.6	0.59	0.61	0.505
0.8	0.7	0.8	0.7	0.71	0.73	0.7
1	0.82	1	0.93	0.87	0.87	0.88
1.25	1.12	1.25	1.2	1.2	1.17	1.15
1.5	1.3	1.5	1.41	1.33	1.31	1.4
2	1.82	1.923	1.84	1.83	/	/
2.5	2.35	2.06	2.25	2.254	/	/
3	2.8	2.84	2.76	2.71	/	/
3.5	/	/	/	3.15	/	/
4	/	/	/	3.54	/	/

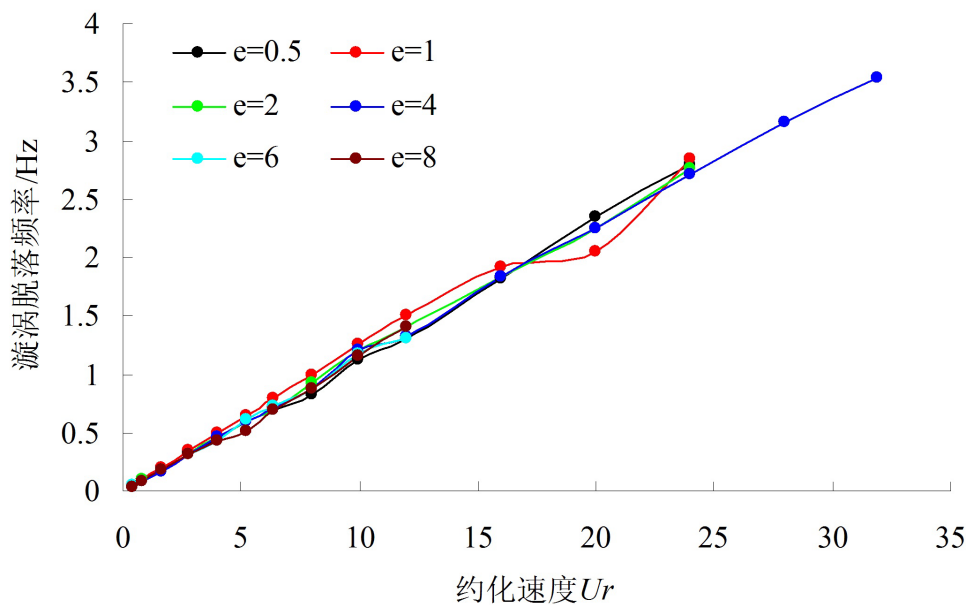


Figure 2. Variation of vortex shedding frequency of overhanging pipes with different clearance ratios with reduced speed

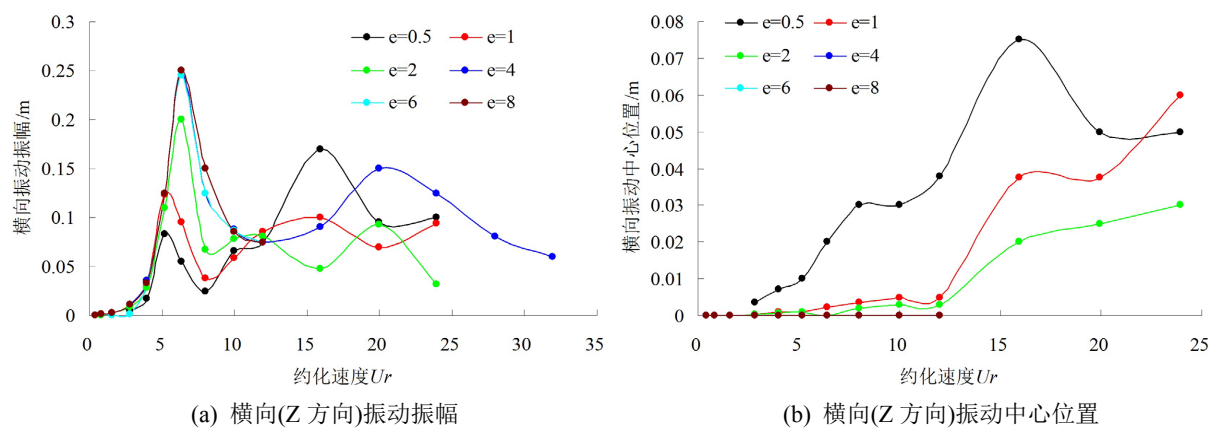
图 2. 不同间隙比悬跨管道漩涡脱落频率随约化速度的变化

Table 6. Transverse (Z-direction) vibration amplitude of overhanging pipelines with different clearance ratios under different ocean current velocities**表 6.** 不同间隙比悬跨管道在不同海流速度下横向(Z 方向)振动振幅

海流速度/m/s	间隙比						
	0.5	1	2	4	6	8	
0.05	/	0.000118	0.000128	0.00016	0.00016	0.00015	
0.1	/	0.00051	0.0005	0.0007	0.00063	0.00063	
0.2	/	0.002175	0.00225	0.003	0.0003	0.003	
0.35	0.0045	/	0.0085	0.011	0.0011	0.011	
0.5	0.0175	0.02975	0.0275	0.035	0.033	0.033	
0.65	0.0825	0.123	0.11	0.125	0.125	0.125	
0.8	0.055	0.095	0.2	0.25	0.245	0.25	
1	0.025	0.0375	0.0665	0.125	0.125	0.15	
1.25	0.0655	0.0588	0.0775	0.0875	0.087	0.085	
1.5	0.075	0.085	0.08	0.075	0.075	0.075	
2	0.17	0.1	0.0475	0.09	/	/	
2.5	0.095	0.07	0.0925	0.15	/	/	
3	0.1	0.0938	0.032	0.125	/	/	
3.5	/	/	/	0.08	/	/	
4	/	/	/	0.06	/	/	

图 3(a)表示不同间隙比悬跨管道横向(Z 方向)振动振幅随约化速度的变化,可以看出,不同间隙比悬跨管道涡激振动一阶模态自振频率锁定时的约化速度相差不大,随着间隙比的增大,约化速度会稍微增大,约化速度在(5,7)范围内;二阶模态自振频率锁定不明显。

图 3(b)表示不同间隙比悬跨管道横向(Z 方向)振动中心位置随约化速度的变化,可以看出,当间隙比小于 2 时,对中心位置的影响非常明显,随着间隙比的增大,横向(Z 方向)振动中心位置逐渐趋向于 0,影响消失。

**Figure 3.** The variation of lateral (Z direction) vibration of overhanging pipelines with different clearance ratios with reduced speed**图 3.** 不同间隙比悬跨管道横向(Z 方向)振动随约化速度的变化

4. 结论

1) 通过网格无关性、时间步长及涡激振动动态响应实验验证, 证明论文采用数值仿真研究方法得到的管道悬跨间隙比对涡激振动动态响应结果是可靠的。

2) 间隙比 $e < 2$ 时, 升力系数振幅中心位置是一负值; 间隙比 $e > 4$ 以后, 升力系数振幅中心位置接近 0, 对流场影响消失。

3) 不同间隙比悬跨管道升力系数变化不大; 同一间隙比下, 悬跨管道涡激振动升力系数频率随海流速度呈线性变化; 不同间隙比悬跨管道涡脱落频率随约化速度呈线性变化。

4) 不同间隙比悬跨管道涡激振动频率锁定时的海流速度相等, 频率锁定后, 横向(Z 方向)振幅随着间隙比的增大逐渐增大, 间隙比达到 4 后, 影响消失。

5) 不同间隙比悬跨管道涡激振动一阶模态自振频率锁定时的约化速度相差不大, 在(5,7)范围内, 随着间隙比的增大, 约化速度会稍微增大; 当间隙比小于 2 时, 对横向(Z 方向)振动中心位置的影响非常明显, 随着间隙比的增大, 横向(Z 方向)振动中心位置逐渐趋向于 0, 影响消失。

参考文献

- [1] Jin, W.-L. and Shao, J.-W. (2004) Pressure Test Method of Safety Assessment on Existed Submarine Pipeline. *Proceedings of the ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **3**, 275-280. <https://doi.org/10.1115/OMAE2004-51579>
- [2] Larsen, C.M. and Halse, K.H. (1997) Comparison of Models for Vortex Induced Vibrations of Slender Marine Structures. *Marine Structures*, **10**, 413-419. [https://doi.org/10.1016/S0951-8339\(97\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S0951-8339(97)00011-7)
- [3] 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*, **1**, 103-111.
- [4] Furnes, G.K. and Berntsen, J. (2018) On the Response of a Free Span Pipeline Subjected to Ocean Currents. *Ocean engineering*, **30**, 1553-1577. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(02\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(02)00138-5)
- [5] 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.
- [6] 余建星, 傅明炆, 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.
- [7] 黄维平, 王爱群, 李华军. 海底管道悬跨段流致振动实验研究及涡激力模型修正[J]. 工程力学, 2008, 24(12): 153-157.