

不考虑内流影响的悬跨管道涡激振动模态分析

徐学波¹, 刘晓亮²

¹山东京博石油化工有限公司, 山东 滨州

²山东滨化滨阳燃化有限公司, 山东 滨州

Email: xueboclpec@chambroad.com

收稿日期: 2021年7月22日; 录用日期: 2021年8月24日; 发布日期: 2021年8月31日

摘要

为了理清悬跨管道自振固有频率的影响因素, 采用数值仿真方法开展悬跨管道涡激振动模态分析研究, 研究了端部约束条件、悬跨长度、内压荷载、轴向受力条件对悬跨管道涡激振动模态的影响。结果表明: 通过网格无关性验证及仿真结果实验验证, 数值仿真得到的悬跨管道各阶模态自振频率结果是可靠的; 悬跨长度对管道模态的影响以乘幂函数呈现, 轴向力和端部约束条件对管道模态的影响以对数函数呈现; 内压荷载对管道各阶自振频率的影响存在临界值, 超过临界值自振频率快速升高; 当轴向拉力不太高时, 悬跨管道自振频率随轴向拉力呈现线性函数变化趋势, 随着模态阶数的提高, 线性函数变化的临界轴向拉力值变小; 超过线性函数变化的临界轴向拉力值, 曲线变化趋势不明显; 悬跨管道自振频率随轴向拉力呈现线性函数的变化趋势。

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

Vortex-Induced Vibration Modal Analysis of Free Spanning Pipelines without Considering the Effect of Internal Flow

Xuebo Xu¹, Xiaoliang Liu²

¹Shandong Chambroad Petrochemicals Co., Ltd., Binzhou Shandong

²Shandong Binhua Binyang Fuel Chemical Co., Ltd., Binzhou Shandong

Email: xueboclpec@chambroad.com

Received: Jul. 22nd, 2021; accepted: Aug. 24th, 2021; published: Aug. 31st, 2021

Abstract

In order to clarify the influence factors of natural frequency of free vibration of free spanning pipeline, vortex-induced vibration modal analysis of free spanning pipeline was carried out by numerical simulation method, the effects of end restraint condition, span length, internal pressure load and axial force condition on vortex-induced vibration modes are studied. The results show that the numerical simulation results of the natural frequencies of each mode are reliable through the mesh-independent verification and the simulation experiment, and the influence of the length of the span on the modal is presented as a power function, the influence of the axial force and the end restraint conditions on the pipeline modes is presented as a logarithmic function; the influence of the internal pressure load on the natural frequencies of the pipeline has a critical value, and the natural frequencies increase rapidly beyond the critical value; the natural frequency of free vibration of free spanning pipeline presents a linear function change trend with the axial tension, the critical axial tension value of the linear function change decreases with the increase of the modal order, and the critical axial tension value of the linear function change exceeds the linear function change, the change trend of free vibration frequency of free spanning pipeline is linear function with the axial tension.

Keywords

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

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[3]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[4]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 [5]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,结果表明悬跨管道耦合效应明显,不可忽略。我国学者余建星[6] [7]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[8]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。

2002年,挪威船级社发布 DNV-RP-F105 [9]给出是否需对涡激振动及波浪导致海管的疲劳问题进行

详细疲劳寿命计算的判断准则, 准则的核心是判断固有频率需要满足的条件[10], 研究表明判断准则中应采用悬跨管道工况条件下的固有频率, 论文采用数值方法研究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对悬跨管道固有频率的影响。

2. 悬跨管道涡激振动仿真模型的建立

考虑到管线内流影响的复杂性, 仅考虑管线控制方程, 亦不考虑固体管道和管内流体的流固耦合现象, 采用文献[11]的三维弹性动力学的基本方程:

平衡方程:

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho u_{i,t} + \mu u_{i,tt} \quad (1)$$

几何方程:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

物理方程:

$$\varepsilon_{ij,j} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3)$$

边界条件:

$$u_i = \bar{u}_i \quad (\text{在位移边界上})$$

$$\sigma_{ij} n_j = \bar{T}_i \quad (\text{在应力边界上})$$

初始条件:

$$u_i(x, y, z, 0) = u_i(x, y, z) \quad (4)$$

$$u_{i,t}(x, y, z, 0) = u_{i,t}(x, y, z) \quad (5)$$

式中: ρ 是物质密度; μ 是阻尼系数; D_{ijkl} 为弹性常数; $u_{i,t}$ 和 $u_{i,tt}$ 分别是 u_i 对 t 的一次导数和二次导数。

3. 悬跨管道涡激振动数值分析可靠性验证

3.1. 悬跨管道模态分析网格无关性分析

如不做特殊说明, 研究悬跨管道物理参数如表 1 所示:

Table 1. The physical parameters of spanning pipeline

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

图 1 可以看出, 径向网格密度对悬跨管道模态分析几乎没有影响; 随着环向网格密度的增加, 一阶、二阶模态自振频率逐渐升高; 而随着轴向网格密度的增加, 一阶、二阶模态自振频率逐渐降低。依据图 1 的内容, 本文选择网格密度 80。

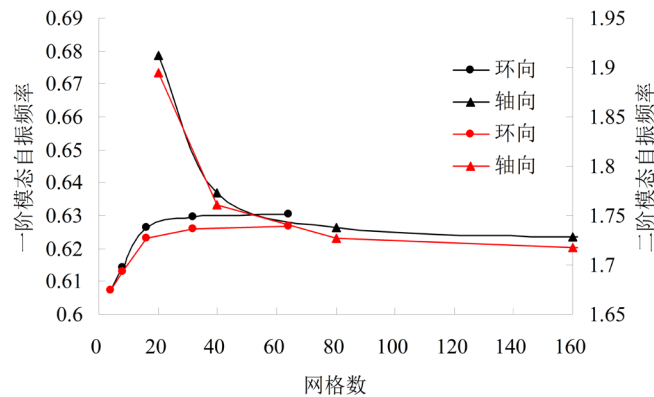


Figure 1. The impact on modal analysis of spanning pipeline mesh density
图 1. 网格密度对悬跨管道模态分析的影响

3.2. 涡激振动数值分析实验验证

表 2, 表 3 分别表示不同雷诺数对悬跨管道升力系数、曳力系数的影响, 从表 2, 表 3 可以看出, 本文的计算与已有公布的研究成果较为接近, 只是较其中 3~4 例计算结果偏大, 因此可认为本文的计算结果能够满足研究要求。

Table 2. The effects on C_L of Reynolds number
表 2. 雷诺数对升力系数的影响

Re	200	180	160	140	120	100	80
本文结果	0.71	0.625	0.55	0.53	0.48	0.35	0.2
唐国强[12]	0.6831	0.6246	0.56	0.4896	0.414	0.3343	0.2468
Herfjord [13]	0.7	/	/	/	/	0.34	/
Rengel & Sphaier [14]	0.67	/	/	/	/	0.32	/
Norberg [15]	0.53	/	/	/	/	0.32	/
Wanderley [16]	0.51	/	/	/	/	0.25	/
万德成[17]	0.75	/	/	/	/	/	/
Braza [18]	0.77	/	/	/	/	/	/
Lecoite & Piquet [19]	/	/	/	/	/	/	/
Mendes & Branco [20]	0.726	/	/	/	/	/	/
赵婧[21]	0.7328	/	/	/	/	/	/
Farrant T. [22]	0.714	/	/	/	/	/	/
Meneghini J.R. [23]	0.707	/	/	/	/	/	/
Lam K. [24]	0.653	/	/	/	/	/	/
徐枫[25]	0.632	/	/	/	/	/	/

Table 3. The effects on C_D of Reynolds number
表 3. 雷诺数对曳力系数的影响

Re	200	180	160	140	120	100	80
本文结果	1.313	1.328	1.315	1.322	1.323	1.346	1.372
唐国强[12]	1.314	1.312	1.3114	1.3135	1.3198	1.3327	1.3557

Continued

Herford [13]	1.35	/	/	/	/	1.36	/
Henderson	1.3412	/	/	/	/	1.35	1.3727
Rengel & Sphaier [14]	1.35	/	/	/	/	/	/
He <i>et al.</i>	1.356	/	/	/	/	1.3528	1.3489
Wanderley [16]	1.27	/	/	/	/	1.3	/
万德成[17]	1.47	/	/	/	/	/	/
Braza [18]	1.38	/	/	/	/	/	/
Lecoite & Piquet [19]	1.46	/	/	/	/	/	/
Mendes & Branco [20]	1.399	/	/	/	/	/	/
赵婧[21]	1.3803	/	/	/	/	/	/
Farrant T. [22]	1.36	/	/	/	/	/	/
Meneghini J.R. [23]	1.3	/	/	/	/	/	/
Lam K. [24]	1.32	/	/	/	/	/	/
徐枫[25]	1.321	/	/	/	/	/	/

4. 悬跨管道涡激振动模态分析

4.1. 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。

图 2 描述了悬跨管道各阶自振频率随线性弹簧约束条件的变化,从图 2 可以看出,变化曲线以对数函数的方式呈现。

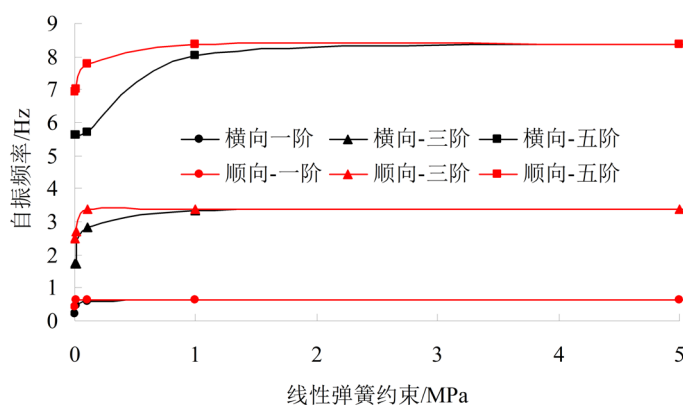


Figure 2. The impact on modal analysis of spanning pipeline with different restraint
图 2. 不同端部约束悬跨管道模态分析图

悬跨管道端部约束条件对其涡激振动有重要影响,但当弹簧刚度达到一定数值以后,悬跨管道各阶自振频率变化已经不大。

4.2. 不同悬跨长度管道模态分析

图 3 描述了悬跨管道各阶自振频率随管道悬跨长度的变化,从图 3 可以看出,变化曲线以乘幂函数的方式呈现,悬跨管道横向和顺向振动频率的变化规律和变化量一致;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,影响非常明显。

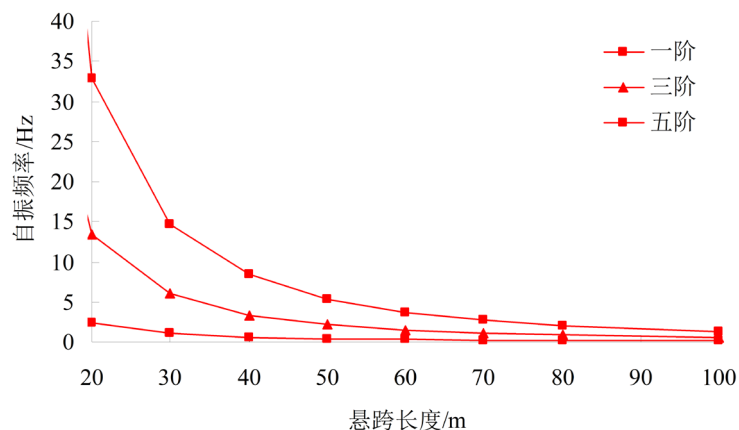


Figure 3. The impact on modal analysis of spanning pipeline with different spanning length
图 3. 不同悬跨长度管道模态分析

4.3. 不同内压荷载悬跨管道模态分析

图 4 描述了悬跨管道各阶自振频率随管道内压荷载的变化, 图 4 曲线变化表明内压荷载对悬跨管道各阶自振频率的影响存在临界值, 超过临界值自振频率快速升高, 随着内压荷载的增加, 悬跨管道横向和顺向振动频率逐渐增大, 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 3000 kPa 后, 悬跨管道各阶自振频率才会有明显的提升。

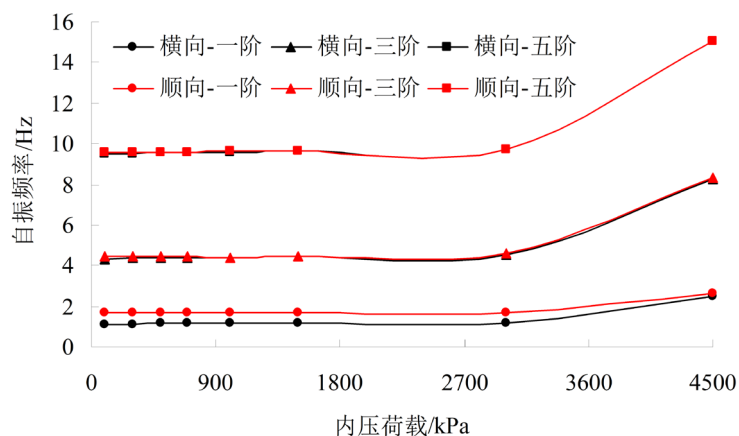


Figure 4. The impact on modal analysis of spanning pipeline with different internal pressure
图 4. 不同内压荷载悬跨长度管道模态分析图

4.4. 不同轴向受力悬跨管道模态分析

4.4.1. 轴向拉力

图 5 描述了悬跨管道各阶自振频率随管道轴向拉力的变化, 从图 5 可以看出, 悬跨管道顺向和横向五阶自振频率存在差异, 一阶、三阶自振频率的变化一致。从图中可以看出, 当轴向拉力不太高时, 悬跨管道自振频率随轴向拉力呈现线性函数的变化趋势, 随着模态阶数的提高, 线性函数变化的临界轴向拉力值变小; 超过线性函数变化的临界轴向拉力值, 曲线变化趋势不明显; 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, 悬跨管道横向和顺向振动频率逐渐增大, 但这种影响随着模态阶数的提高而弱化。

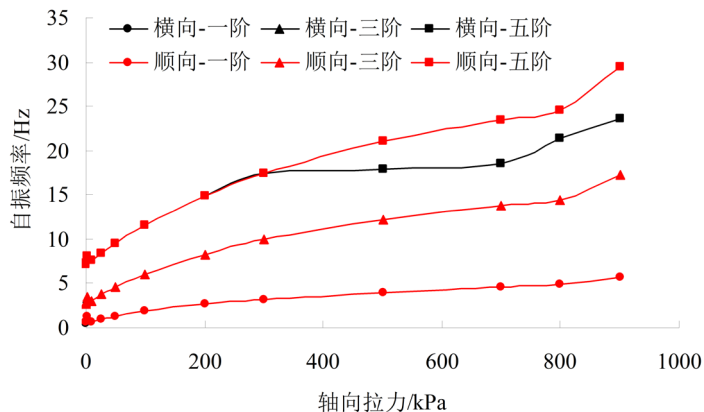


Figure 5. The impact on modal analysis of spanning pipeline with different axial tension
图 5. 不同轴向拉力悬跨管道模态分析图

4.4.2. 轴向压力

图 6 描述了悬跨管道各阶自振频率随管道轴向压力的变化, 从图 6 可以看出, 悬跨管道自振频率随轴向拉力呈现线性函数的变化趋势; 随着轴向压力的增加, 悬跨管道横向振动频率逐渐减小, 轴向压力越大, 这种变化趋势越明显; 轴向压力对悬跨管道顺向振动频率的影响较小。

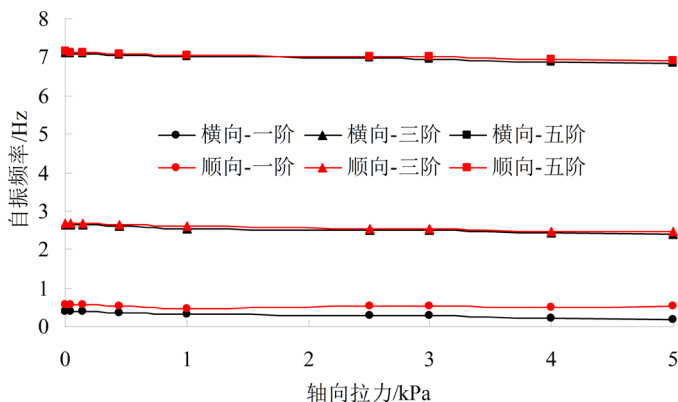


Figure 6. The impact on modal analysis of spanning pipeline with different axial pressure
图 6. 不同轴向压力悬跨管道模态分析图

5. 结论

- 1) 仿真结果实验验证证明论文采用数值仿真方法得到的悬跨管道各阶模态结果是可靠的。
- 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, 尤其以悬跨长度、轴向力、端部约束条件的影响最为严重。
- 3) 悬跨长度对悬跨管道模态的影响以幂函数呈现, 轴向力和端部约束条件悬跨管道模态的影响以对数函数呈现。
- 4) 内压荷载对悬跨管道各阶自振频率的影响存在临界值, 超过临界值自振频率快速升高。
- 5) 当轴向拉力不太高时, 悬跨管道自振频率随轴向拉力呈现线性函数的变化趋势, 随模态阶数提高, 线性函数变化的临界轴向拉力值变小。
- 6) 超过线性函数变化的临界轴向拉力值, 曲线变化趋势不明显; 悬跨管道自振频率随轴向拉力呈现线性函数变化。

参考文献

- [1] Jin, W.-L. and Shao, J.-W. (2004) Pressure Test Method of Safety Assessment on Existed Submarine Pipeline. *ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vancouver, 20-25 June 2004, 275-280.
- [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., 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. *ASME 2002 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Oslo, 23-28 June 2002, 103-111.
- [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. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(02\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(02)00138-5)
- [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] 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.
- [9] DNV (2006) Recommended Practice RP-F105 Free Spanning Pipelines. Det Norske Veritas.
- [10] 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.
- [11] 杨章锋. 内流对海底悬跨管线管壁应力影响的数值研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [12] 唐国强. 立管涡激振动数值模拟方法及物理模拟实验[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [13] Herfjord, K. (1995) A Study of Two-Dimensional Separated Flow by a Combination of the Finite Element Method and Navier-Stokes Equations. The Norwegian Institute of Technology, Trondheim.
- [14] Rengel, J.E. and Sphaler, S.H. (1999) A Projection Method for Unsteady Navier-Stokes Equation with Finite Volume Method and Collocated Grid. *Hybrid Methods in Heat and Mass Transfer*, **4**, 1.
- [15] Norberg, C. (2003) Fluctuating Lift on a Circular Cylinder: Review and New Measurements. *Journal of Fluids and Structures*, **17**, 57-96. [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(02\)00099-3](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(02)00099-3)
- [16] Wanderley, J.B.V., Souza, G.H.B., Sphaier, S.H., et al. (2008) Vortex-Induced Vibration of an Elastically Mounted Circular Cylinder Using an Upwind TVD Two-Dimensional Numerical Scheme. *Ocean Engineering*, **35**, 1533-1544. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.06.007>
- [17] 梁亮文, 万德成. 横向受迫振荡圆柱低雷诺数绕流问题数值模拟[J]. 海洋工程, 2009, 27(4): 45-60.
- [18] Braza, M., Chassaing, P. and Haminh, H. (1986) Numerical Study and Physical Analysis of the Pressure and Velocity Fields in the Near Wake of a Circular Cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, **165**, 79-130. <https://doi.org/10.1017/S0022112086003014>
- [19] Lecoq, Y. and Piquet, J. (1984) On the Use of Several Compact Methods for the Study of Unsteady Incompressible Viscous Flow Round a Circular Cylinder. *Compute Fluids*, **12**, 255-280. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(84\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0045-7930(84)90009-4)
- [20] Mendes, P.A. and Branco, F.A. (1990) Analysis of Fluid-Structure Interaction by an Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Formulation. *International Journal for Numerical Method in Fluids*, **30**, 897-919. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0363\(19990815\)30:7<897::AID-FLD871>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0363(19990815)30:7<897::AID-FLD871>3.0.CO;2-U)
- [21] 赵婧. 海洋立管涡制耦合振动 CFD 数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [22] Farrant, T., Tana, M. and Price, W.G. (2000) A Cell Boundary Element Method Applied to Laminar Vortex-Shedding from Arrays of Cylinders in Various Arrangements. *Journal of Fluids and Structures*, **14**, 375-402. <https://doi.org/10.1006/jfls.1999.0275>
- [23] Meneghini, J.R., Saltara, F., Soqueira, C.L.R. and Ferrari, J.A. (2001) Numerical Simulation of Flow Interference between Two Circular Cylinders in Tandem and Side-By-Side Arrangements. *Journal of Fluid and Structures*, **15**, 327-350. <https://doi.org/10.1006/jfls.2000.0343>
- [24] Lam, K., Gong, W.Q. and So, R.M.C. (2008) Numerical Simulation of Cross-Flows around Four Cylinders in an In-Line Square Configuration. *Journal of Fluids and Structures*, **24**, 34-57. <https://doi.org/10.1016/j.fluidstructs.2007.06.003>
- [25] 徐枫. 结构流固耦合振动与流动控制的数值模拟[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.