

分隔板对细长柔性立管涡激振动抑制的数值模拟

李敏, 邓迪, 万德成*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240, *通讯作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 细长柔性海洋立管是连接海底生产系统与海面作业平台的关键设备, 当洋流流经立管结构时, 在立管两侧会不断产生周期性的漩涡脱落, 其诱发的涡激振动 (VIV) 问题成为引起结构疲劳损坏的主要因素。为有效抑制海洋立管的涡激振动, 有学者提出了用分隔板抑制涡激振动的方法。目前对于分隔板的研究, 多数实验和数值模拟仅限于从流动控制的角度进行研究, 且大多基于刚性立管, 而随着工作水深的增加, 愈加重视对细长柔性立管的研究。本文基于开源软件 OpenFOAM 下的细长柔性立管流固耦合求解器 viv-FOAM-SJTU, 采用切片法对均匀来流下的裸管和加装分隔板长度为 0.1、0.25、0.35、0.5 倍立管直径的细长柔性立管进行数值模拟, 研究了几个不同工况下的立管横流向振动频率、位移响应以及泻涡模式等参数的变化特征。数值模拟结果表明裸管响应特性与带分隔板的立管响应特性区别较大, 加装一定长度的分隔板可有效抑制涡激振动, 流向不同长度的分隔板对立管涡激振动抑制效果有显著差异。

关键词: 涡激振动抑制; 分隔板; 柔性立管; viv-FOAM-SJTU 求解器

1 引言

随着海洋资源的勘探开发不断向深海迈进, 对深海环境下海洋立管结构的可靠性提出了更高的要求。细长柔性海洋立管是连接海底生产系统与海面作业平台的关键设备, 也是系统中最薄弱的构件之一。由于海洋立管处于复杂的深水环境条件下, 受到波浪和洋流的持续作用, 在立管两侧会不断产生周期性的漩涡脱落, 其诱发的涡激振动问题成为引起结构疲劳损坏的主要因素, 严重时甚至导致重大事故的发生。因此深水海洋立管涡激振动的抑制问题受到国内外学者的密切关注。

涡激振动的抑制方法主要分为两类: 主动控制法和被动控制法。主动控制法通过向流场中注入能量, 对流场进行扰动从而抑制漩涡脱落, 如: 旋转振荡法、抽吸法、喷吹法等。

被动控制法是通过在结构表面或尾流区添加附加装置来改变漩涡发展形态,抑制漩涡脱落,如分隔板、螺旋条纹、整流罩等。相比于主动控制法,被动控制法结构简单,成本较低,在海洋工程领域得到了广泛应用。分隔板是被动控制法中应用最广泛的涡激振动抑制装置之一,它是安装在立管结构正后方的一个薄平板,它的抑制原理是通过干扰尾流区的流线,将漩涡脱落推迟到结构较远处从而抑制漩涡脱落,削弱涡激振动,大量学者研究发现,分隔板的流向长度 L 是影响抑制效果的关键因素,这一问题在学术界引起了许多学者的大量研究与探讨。

Roshko^[1]最早提出了将分隔板作为流动控制装置,发现分隔板能够起到抑制柱体漩涡脱落的作用; Nakamura^[2]研究了 $300 < Re < 5000$ 范围内带有分隔板的圆柱绕流问题,并给出了不同雷诺数下随抑制板长变化 St 数的变化规律; wang 等^[3]进行了不同长度的分隔板对流动控制的研究,发现分隔板对阻力和升力具有很好抑制的效果,在 $Re=1000$ 和 $Re=30000$ 下,平均阻力系数降低了 $20\% \sim 35\%$,升力系数的幅值降低了 $94\% \sim 97\%$; Huera-Huarte^[4]研究了柔性立管附加不同流向长度的分隔板的涡激振动抑制情况,随着 Cd 的下降,立管的涡激振动响应振幅得到了有效抑制; 张弘扬^[5]开展了不同雷诺数时一系列的二维黏性流体圆柱绕流问题的数值模拟,研究抑制板流向长度对圆柱各个水动力系数和流态的影响,进而拓展到三维计算研究,探索了分隔板空间位置与展向长度对圆柱各个水动力系数和相关性的影响。

目前对于分隔板的研究,多数实验和数值模拟仅限于从流场控制的角度进行静止模型绕流问题的研究,关注分隔板对漩涡脱落及阻力升力的抑制作用、涡脱落形态以及绕流场流动模式,缺乏对结构的动力特性响应分析;另一方面,大多数研究基于刚性立管,对柔性立管涡激振动抑制措施的研究非常有限,而随着工作水深的增加,对细长柔性立管的研究更为重要,因此迫切需要深入开展细长柔性立管涡激振动抑制的研究工作。

基于以上背景,本文以细长柔性立管为研究对象,利用 CFD 的方法,改变分隔板的长度 L 的值,分析不同长度的分隔板对细长柔性立管涡激振动抑制效果的影响,研究了各个工况下漩涡脱落的流场结构,漩涡频率以及立管位移、频率响应等参数的变化特征。数值模拟通过开源软件 OpenFOAM 下的细长柔性立管流固耦合求解器 viv-FOAM-SJTU 来实现。本文首先介绍了采用的数值方法,然后给出了不同工况下几何模型的构建,最后对数值模拟结果进行分析讨论,得出了涡激振动抑制效果随分隔板长度变化的相关结论。

2 数值方法

2.1 viv-FOAM-SJTU 求解器

该求解器是基于开源程序库 OpenFOAM 开发的,求解器应用切片理论数值求解各个切片处的黏性不可压流场,应用 Bernoulli-Euler 弯曲梁理论实现结构的有限元求解,自编耦合松弛迭代程序实现结构动力学与流体动力学的耦合求解。为了验证求解器的有效性和可

靠性, Duan 等^[6]进行了单立管标准试验的数值模拟研究, 无论流向还是横向的涡激振动响应都与实验吻合较好。

2.2 流体动力学控制方程

采用不可压缩流动, 流体域的控制方程为雷诺平均 N-S 方程, 在笛卡尔坐标系下, 控制方程描述如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2\mu \bar{S}_{ij} - \overline{\rho u_j' u_i'} \right) \quad (2)$$

式中, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ 为时均应变率张量, 方程多了雷诺应力项 $-\overline{\rho u_j' u_i'}$, 该项由脉动速度

产生, 代表湍流效应, 通常用 τ_{ij} 表示。这是一个新的未知数, 需要引入湍流模型来使问题封闭, 本文采用湍流模型为 SST $k-\omega$, SST $k-\omega$ 湍流模型由 Menter^[7]提出, 该方法的原理为采用标准的 $k-\omega$ 湍流模型处理近壁处边界层区域内的流动, 采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型处理边界层边缘及自由剪切层区域的流动。SST 湍流模型对各种问题尤其是圆柱绕流问题都有较为优秀的模拟精度。

2.3 结构动力学控制方程

结构动力学计算使用 Bernoulli-Euler 弯曲梁模型。立管两端边界条件设定为简支, 立管轴向张力受重力影响沿着展向变化, 不考虑张力随时间变化。结构动力学方程离散为:

$$[M][\ddot{x}] + [C][\dot{x}] + [K][x] = [F_x] \quad (3)$$

$$[M][\ddot{y}] + [C][\dot{y}] + [K][y] = [F_y] \quad (4)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵, $[C]$ 为阻尼矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $[F_x]$ 、 $[F_y]$ 分别为顺流向和横流向的载荷矩阵, $[x]$ 、 $[\dot{x}]$ 、 $[\ddot{x}]$ 以及 $[y]$ 、 $[\dot{y}]$ 、 $[\ddot{y}]$ 分别为顺流向和横流向的结构位移、速度和加速度向量。

对结构进行有限元离散后, 采用 Newmark- β 法^[8]求解结构动力学方程。

2.4 基于切片理论的准三维数值模拟

对于深水中细长柔性立管的求解, 直接采用三维数值模拟会消耗庞大的计算资源, 因此采用切片法数值求解细长柔性立管的涡激振动问题, 这是处理此类超大计算域问题的一种简化方法, 被广泛采用。

其主要思想是沿着立管轴向等间距划分若干二维切片, 在每个切片处求解流体控制方程, 计算流体力, 并将流体力转换成均布载荷作用在每个切片所代表的立管长度上, 从而求解立管模型所受水动力载荷和该时刻的结构动力响应。图 1 是切片法流固耦合示意图。

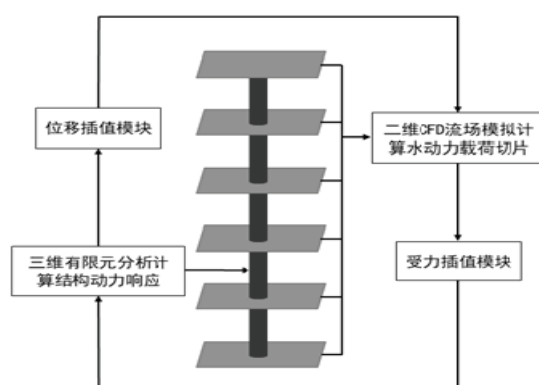


图1 流固耦合切片法示意图

3 计算模型

3.1 几何模型

本研究采用 Lehn 等^[9]的试验建立计算几何模型。柔性立管直径 0.02m, 长度 9.63m, 长细比 $L/D=481.5$, 质量比 $m^* = 2.23$ 。立管处于均匀流中, 流速为 0.2m/s。立管两端简支, 顶端施加预张力 $T=817\text{N}$ 。本研究中裸管的参数值设置与试验模型相同, 裸管的具体参数值设置如表 1 所示。Wang 等^[10]用商业软件 ANSYS MFX 数值模拟了此流动工况下的涡激振动响应, 与试验值吻合较好。

本文首先数值模拟裸管的涡激振动响应, 并与试验值进行对比, 然后改变立管正后方附加分隔板的长度, 分隔板长度与直径之比范围为 0.1~0.5, 图 2 为 $L/D=0.5$ 的立管几何模型。加分隔板后的立管(下文简称抑制管) EI 值发生了相应的改变, 由于主要研究横流向的振动响应, 因此对于 x 轴(顺流向方向)计算立管的惯性矩, 最终得到的 EI 值相比于裸管略微增大。

表 1 立管模型的主要参数

参数名称	符号	数值	单位
立管直径	D	0.02	m
立管长度	L	9.63	m
长细比	L/D	481.5	-
弯曲刚度	EI	135.4	$\text{N}\cdot\text{m}^2$
预张力	T_t	817	N
质量比	m^*	2.23	-
流速	U	0.2	m/s
雷诺数	Re	4000	-

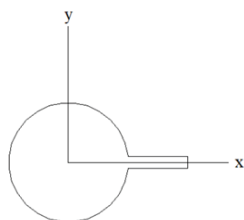


图2 L/D=0.5的抑制管几何模型

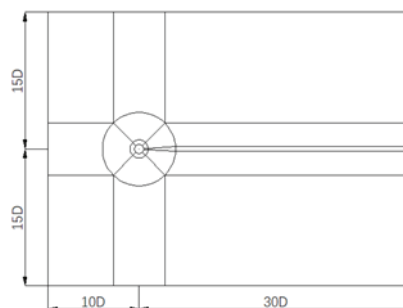


图3 计算域范围

3.2 计算域及网格划分

计算域范围： $-10D \leq x \leq 30D$ ， $-15D \leq y \leq 15D$ （图3），结构动力学上将立管沿轴向均分为40个单元，流场区域10个切片沿立管轴向均匀分布，立管切片划分的模型如图4。图5给出了附加分隔板长度为0.5倍直径时的抑制管各切片的局部计算域网格划分示意图。分隔板长度为半径内的区域网格均匀加密，以精确捕捉结构场附近的流场信息。以立管截面圆心为圆心，4倍直径为半径形成外圆，沿立管结构到外圆方向网格逐渐变稀疏，不同工况的网格数量如表2所示。

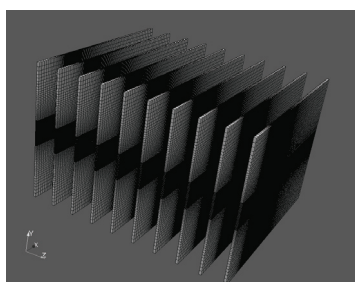


图4 沿立管展向均匀分布10个切片

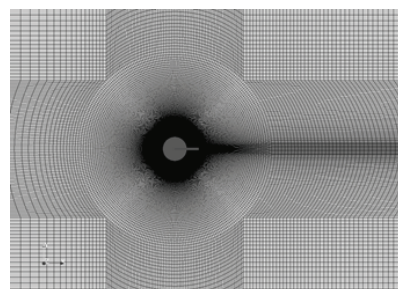


图5 结构附近的计算网格

表2 不同工况的网格数量

L/D	网格数量
0.1	657800
0.25	740120
0.35	797050
0.5	871650

4 结果分析

4.1 位移

图 6 为横流向位移标准差曲线图，图 6 (a) 为裸管的横流向位移标准差的试验值与 Wang 等人的数值模拟结果，图 6 (b) 为本文给出的计算结果，发现吻合较好。如图 6 (c) (d) (e) 所示，与裸管对比发现，附加一定长度范围内 ($L/D=0.1, 0.25, 0.35$) 的分隔板以后立管横向位移振幅有不同程度的减小，位移标准差最大值分别为 0.241、0.325、0.38。如图 6(f) 所示，当分隔板长度增大到 $L/D=0.5$ 时，位移标准差最大值 0.427，对涡激振动抑制产生了相反的效果，原因见尾涡分析部分。可见附加一定长度范围内的分隔板对柔性立管涡激振动位移响应抑制作用明显，抑制效果与分隔板长度有关。另外，如图 6 (c) 所示，当 $L/D=0.1$ 时，立管主振模态为二阶模态，出现这一现象的原因是湍流的随机性及不稳定特点可能会造成模态振幅的不稳定，从而导致多模态的发生。

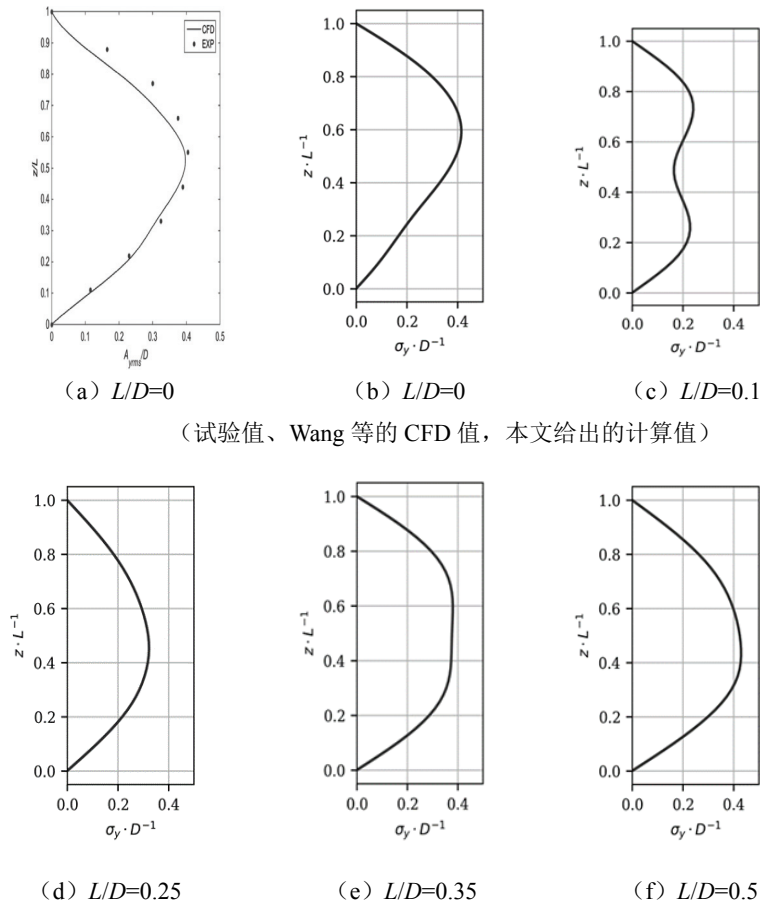


图 6 横流向位移的标准差

4.2 频率

图 7 为横流向位移功率谱密度图，横轴是立管振动频率，纵轴是立管展向位置。参与振动的频率越多，图中的频域部分（横轴区间）覆盖范围越宽。如图 7 (a)，对于不加分隔板的立管来说，只存在单一漩涡发放的主频，主控频率为 1.67Hz，这从另一角度表明不加分隔板的裸管在尾流区存在稳定的卡门涡街。如图 7 (b) 所示，当分隔板长度 $L/D=0.1$ 时，主控频率为两阶，与前面的模态分析相一致。如图 7 (c) (d) 所示，当分隔板长度 $L/D=0.25, 0.35$ 时，对振动频率产生明显影响，主控频率显著降低，且频域覆盖范围显著变宽，说明附加分隔板对漩涡脱落产生干扰，参与振动的频率变多。如图 7 (e)，当板长度继续增加到 $L/D=0.5$ 时，恢复单一主频，主控频率在 0.71 附近。综合以上分析得出，横向振动频率对分隔板长度变化敏感，但总体上振动频率都得到显著降低。发生涡激振动时，漩涡脱落频率与立管振动频率接近，据此可以分析不同分隔板长度对漩涡脱落频率的影响。

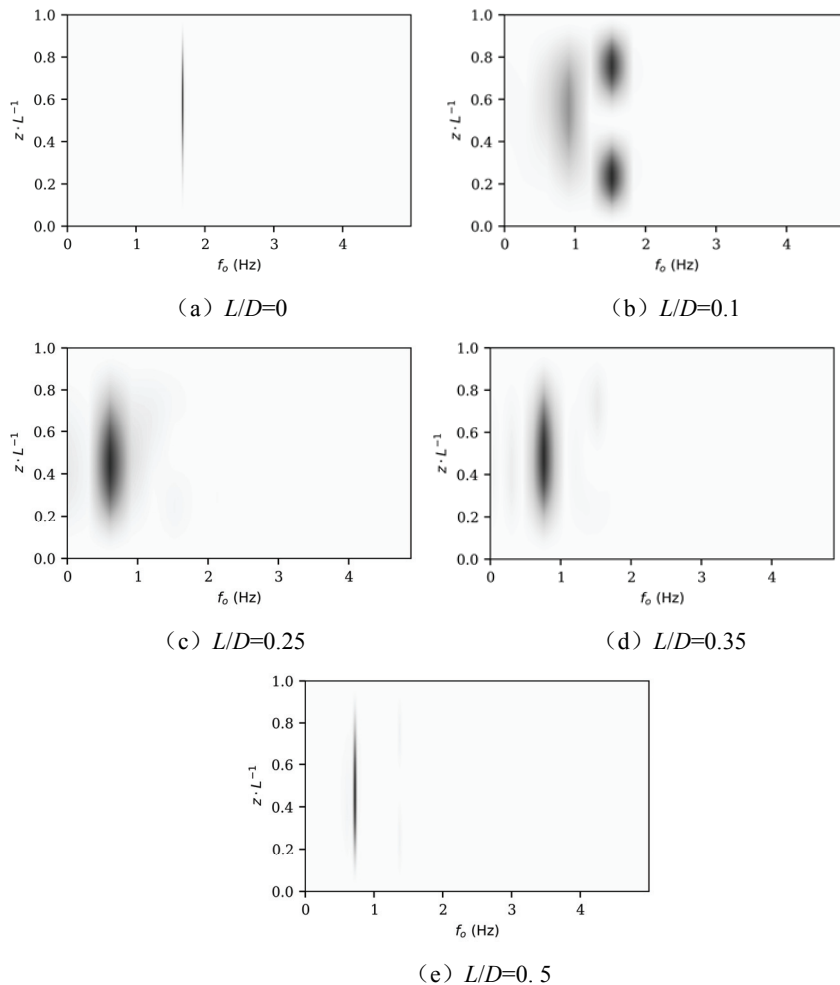


图 7 横流向位移功率谱密度

图 8 为频域下横流向各阶模态权重对应的功率谱密度曲线图，如图 8 (a) 所示，裸管横流向振动为单一的一阶主振模态。如图 8 (b) 所示， $L/D=0.1$ 的抑制管的主控模态为两阶，一阶模态占比重较小，各阶模态的频率覆盖范围较裸管更广。如图 8 (c)、图 8 (d)、图 8 (e) 所示， $L/D=0.25,0.35,0.5$ 的抑制管的模态特性与裸管相似，表现为单一的一阶振动模态，二阶振动极为微弱，且主振频率显著降低，与前面频率分析一致。

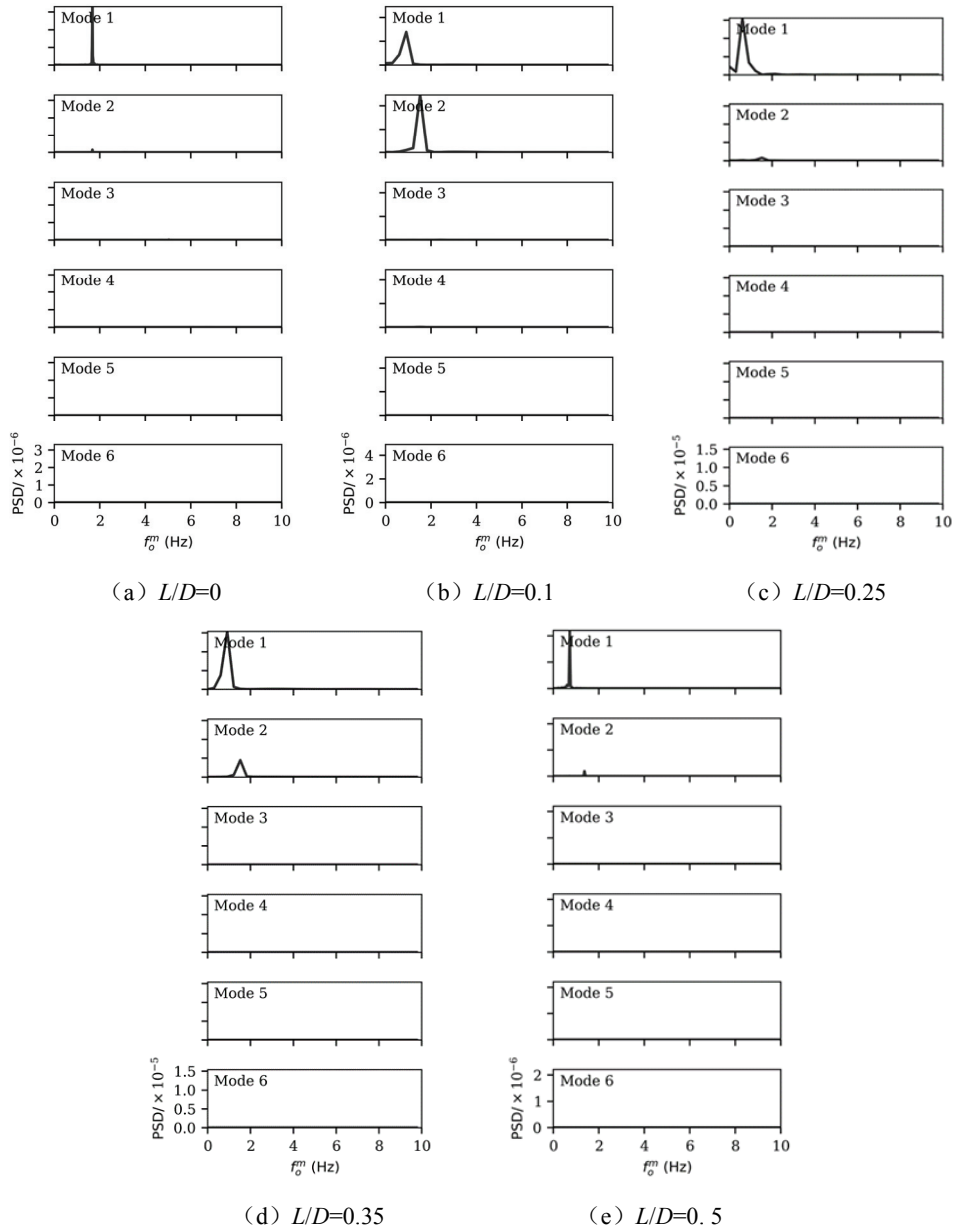


图 8 各阶模态权重对应的功率谱密度曲线图

4.3 尾涡分析

图 9 显示了裸管和抑制管的瞬时涡量场，本算例中雷诺数为 4000，处于亚临界雷诺数范围，出现旋涡周期性脱落现象^[11]。从图 9 中可以清晰地看到，在分离点位置处由于边界层分离产生的旋涡随着立管的横向运动向两侧摆动，并在近尾流场交叠脱落，在离立管较远的位置产生交替脱落的正负涡对，在黏性的作用下旋涡能量发生了耗散直至旋涡消失，形成了卡门涡街。

如图 9 (a) 所示，未加分隔板的光滑立管在立管后缘处直接发生旋涡脱落，使得立管后缘压力差较大，横向位移振动幅值较大。图 9 (b)、图 9 (c)、图 9 (d) 所示，随着分隔板长度的增加，旋涡脱落的位置不断向后移动，且与光滑管不同，旋涡均在流动交汇后在分隔板后缘附近发生脱落，起到了抑制涡激振动的效果；如图 9 (e) 所示，当分隔板长度增大到 $L/D=0.5$ 时，可以明显地看到在分隔板的后缘产生了较小的次生旋涡，次生旋涡的产生及脱落使得分隔板两侧压力差增大，从而引起立管横向位移振动幅值增大，这也很好地解释了 $L/D=0.5$ 时对涡激振动抑制产生了相反的效果。

附加分隔板后，涡脱落模式未发生显著变化，涡脱落模式为 2S 模式，即每一周期泄出一对方向相反的尾涡，部分切片出现同向或反向涡黏现象，涡脱落呈现出明显的随机性和不规则性，但附加分隔板后涡的尺寸明显下降。

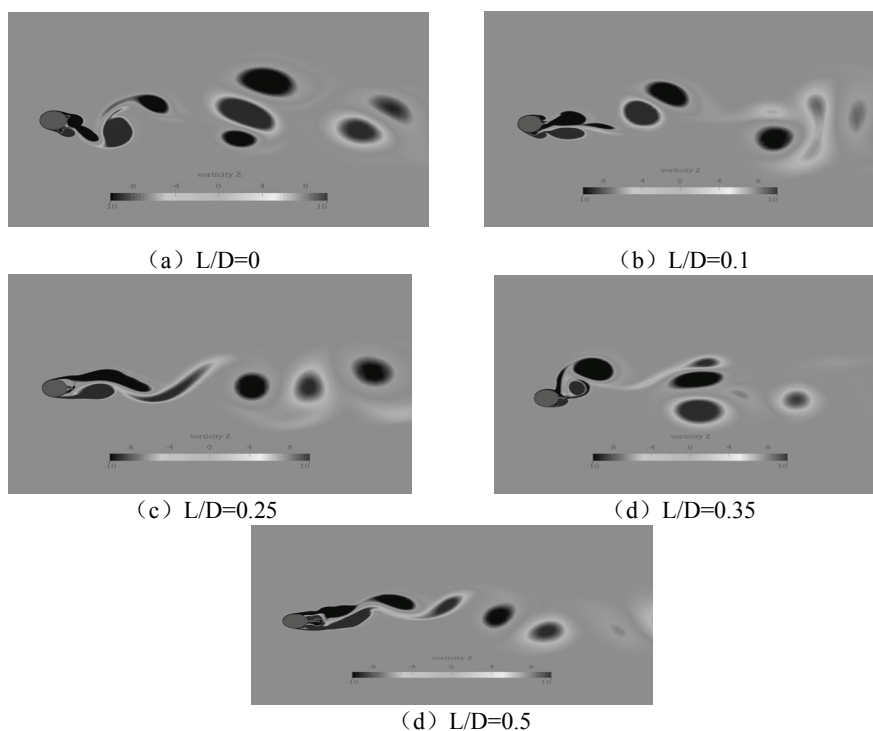


图 9 裸管和抑制管的瞬时涡量场

4.4 抑制效率分析

利用 CF 方向最大位移标准差的减小率来定义抑制效率如下：

$$\eta = \frac{y_1 - y_2}{y_1} \times 100\%$$

其中 y_1 是无分隔板时裸管的位移标准差幅值， y_2 是附加分隔板后的位移标准差幅值， η 值越大则抑制效果越好。由上式可以得到分隔板的抑制效率随分隔板长度变化的柱状图，如图 10 所示。从图 10 中可以看出 $L/D=0.1, 0.25, 0.35$ 的分隔板均对横流向振动位移起到了一定的抑制作用，最高抑制效率为 42.1%，但综合考虑抑制涡激振动的位移和振动频率， $L/D=0.25$ 的分隔板在此计算工况下抑制效果最佳，可以很好的抑制横流向的涡激振动的振动频率和位移。

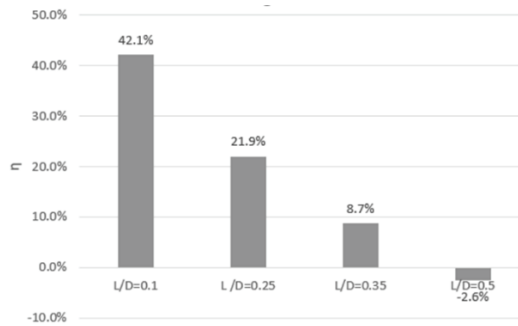


图 10 抑制效率柱状图

5 结论

本研究应用 viv-FOAM-SJTU 求解器对细长柔性立管和附加分隔板的抑制管进行数值模拟，获得了不同长度分隔板下的涡激振动响应，并分析比较了不同长度分隔板的抑制效果，得出了以下结论：①一定长度范围的分隔板可以有效抑制涡激振动，抑制效率 η 可达 42.1%，涡激振动响应频率和幅值显著降低，可以很好地减少立管疲劳；②在一定的分隔板长度内尾流场漩涡脱落后移，使得立管前后表面压差降低，所受涡激力减小。③分析 $Re=4000$ 下带分隔板细长柔性立管数值模拟结果，从位移响应、频率、漩涡脱落等方面综合考虑，得出本文中在细长柔性立管后方附加分隔板长度 $L=0.25D$ 时能够达到抑制涡激振动的最优效果。

致谢

本文得到国家自然科学基金 (51879159, 51490675, 11432009, 51579145)、长江

学者奖励计划(T2014099)、上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022)、上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)、工信部数值水池创新专项课题(2016-23/09)资助项目。在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 A Roshko. On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Street, NACA Technical Note 2913, 1953.
- 2 Nakamura, Y., 1996. Vortex shedding from bluff bodies with splitter plates. *Journal of Fluids and Structures* 10(2), 147-158.
- 3 Wang, JS, Liu, H, Gu, F, et al. Numerical Simulation of Flow Control on Marine Riser With Attached Splitter Plate, Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 6-11, 2010, Shanghai, China. OMAE-20195.
- 4 G R S Assi, P W Bearman, N Kitney, et al. Suppression of Wake-Induced Vibration of Tandem Cylinders with Free-to-Rotate Control Plates[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2010,26:1045- 1057.
- 5 张弘扬. 抑制板对湍流中圆柱绕流抑制机理的数值研究[D]. 哈尔滨: 船舶工程学院, 2017.
- 6 DUAN M Y, WAN D C. Prediction of response for vortex-induced vibrations of a flexible riser pipe by using multi-strip method[C]// The Twenty-sixth International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, 2016.
- 7 Menter F R. Influence of freestream values on k-omega turbulence model predictions[J]. *AIAA journal*, 1992, 30(6): 1657-1659.
- 8 Clough R W, Penzien J. Dynamics of Structures[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2001, 44(2): 366.
- 9 Lehn, E., 2003. VIV Suppression Tests on High L/D Flexible Cylinders. Norwegian Marine Technology Research Institute, Trondheim, Norway.
- 10 Wang E , Xiao Q . Numerical simulation of vortex-induced vibration of a vertical riser in uniform and linearly sheared currents[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 121:492-515.
- 11 BLEVINSR. Flow-induced vibration[M]. 2nded. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 2001.

Numerical simulation of vortex-induced vibration suppression of a flexible riser with attached splitter plate

LI Min, DENG Di, WAN De-cheng

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The slender flexible marine riser is the key equipment for connecting the subsea production system and the sea surface working platform. When the ocean current flows through the riser structure, periodic vortex shedding will occur continuously on both sides of the riser, and the induced vortex-induced vibration will be induced. The (VIV) problem has become a major cause of structural fatigue damage. In order to effectively suppress the vortex-induced vibration of the marine riser, a method of suppressing vortex-induced vibration by a splitter plate is proposed. At present, most of the experimental and numerical simulations of the splitter plate are limited to the research from the perspective of flow control, and most of them are based on rigid risers, and with the increase of the working water depth, the research on the elongated flexible riser is paid more and more attention. This paper adopts the slicing method and is based on the viv-FOAM-SJTU of the slender flexible riser fluid-solid coupling solver under the open source software OpenFOAM. A riser system attached with splitter plates of length to diameter $L/D = 0.1 \sim 0.5$ was numerically simulated. The variation characteristics of the riser frequency, displacement response and effusion vortex mode of the vortex shedding under several different working conditions were studied. The numerical simulation results show that the response characteristics of the bared riser are different from those of the riser with the splitter plate. The addition of the splitter plate can effectively suppress the vortex-induced vibration. There is a significant difference in the vortex-induced vibration suppression effect of the riser with the splitter plates of different lengths.

Key words: vortex induced vibration suppression; splitter plate; flexible riser; viv-FOAM-SJTU solver.