

深海细长柔性立管涡激振动 数值分析方法研究进展

万德成, 端木玉

(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)

摘要: 深海细长柔性立管的涡激振动与刚性圆柱的涡激振动问题相比, 既有联系又有区别. 当立管的长细比(L/D)较大时, 会展现出一些刚性圆柱涡激振动没有的现象. 本文介绍了近几十年来深海开发的细长柔性立管涡激振动的研究进展, 主要侧重于数值计算分析研究领域, 对目前常用的数值分析方法进行了归纳和总结. 在此基础上, 详细介绍了目前理论研究和实际工程中的热点问题, 诸如流场剖面的影响、立管顶端浮体运动的耦合、涡激振动抑制措施、振动多模态特性等.

关键词: 细长柔性立管; 涡激振动; 切片法; 数值模拟

中图分类号: O353

文献标志码: A 文章编号: 0254-0053(2017)02-0179-18

A Recent Review of Numerical Studies on Vortex-Induced Vibrations of Long Slender Flexible Risers in Deep Sea

WAN De-cheng, DUAN-MU Yu

(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 Vortex-Induced Vibrations (VIVs) of long slender flexible risers in deep sea are related to but different from VIV of rigid cylinders. When their aspect ratio (L/D) is large, flexible risers will show some phenomena that rigid cylinders do not possess. This paper reviews the progress of research on the VIV of long slender flexible risers in deep sea in recent years. It focuses on the numerical studies and summarizes the frequently-used numerical analytical methods. On this basis, it introduces the research hotspots in recent theoretical study and practical engineering, such as the influence of flow field profile, the coupling of floating body's movement on the top of risers, the suppression of VIV, and the multi-mode vibration.

Key words: long slender flexible risers; vortex-induced vibrations; strip method; numerical method

立管是深海石油勘探开发的关键设备, 立管也是平台结构中最薄弱的环节, 立管既要承受自重和顶张力, 同时在海流的作用下还会发生涡激振动现象. 平台工作的水深越深, 立管长度越长, 那么可能激

收稿日期: 2017-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(51379125, 51490675, 11432009, 51579145); 长江学者奖励计划(T2014099);
上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022); 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300);
上海市船舶工程重点实验室基金(K2015-11); 工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)

作者简介: 万德成, 教授, 博士.

研究方向: 计算船舶与海洋工程水动力学、多浮体相互作用、流固耦合、波浪载荷、海上新能源装置开发等.

通信作者: 万德成. Email: dcwan@sjtu.edu.cn

发出的振动模态阶数也随之增高。因涡激振动造成的疲劳损坏和高阶多模态振动的联合破坏效应,可能会导致平台结构的失效和重大事故的发生。因此,深海细长柔性立管涡激振动的流固耦合分析研究已成为国内外油气勘探开发亟待解决的重要课题之一。

对涡激振动的研究,可以先从最简单的立管截面入手,目前已对二维及三维刚性圆柱开展了非常丰富的试验和数值研究,包括固定圆柱绕流问题,刚性圆柱的受迫振动与自激振动问题的研究。由于刚性圆柱涡激振动与细长柔性立管的研究侧重点不同,在研究方法与研究热点上也有很多不同。至今为止有关涡激振动的研究非常丰富,诸多综述性的文章或侧重刚性圆柱的涡激振动或侧重涡激振动的综合研究,例如 Sarpkaya^[1]、Williamson^[2]、Williamson 和 Govardhan^[3-4]、Gabbai^[5]。而针对细长柔性立管涡激振动的综述目前有 Wu^[6], 本文将对近几十年国内外在细长柔性立管的涡激振动的数值模拟方法、现象机理分析及研究热点问题归纳论述,总结不同数值研究方法的发展经过;讨论当前基础研究和工程实际中的热点问题的研究进展。

1 数值分析方法

细长柔性立管的数值分析方法主要分为两类:一类基于试验数据,如经验和半经验准则,另一类是基于计算流体力学(CFD)和计算结构动力学(CSD)的数值模拟方法。

1.1 经验模型和商业软件

1.1.1 经验模型

涡激振动实际上是流固耦合的相互作用,涉及到流体场的边界层分离、湍流的随机性及不稳定性等问题,又涉及到柔性结构振动的非线性。

基于半经验模型的数值预报方法适用于解决工程实际问题,因为其物理模型明确且计算简便。半经验模型多种多样,例如尾流振子模型、模态叠加模型、统计模型等等,其中以尾流振子模型及其改进模型应用最为广泛。Birkoff 和 Zarantanello^[7]首次提出非线性振子模型的概念。随后, Bishop 和 Hassan^[8]在此基础上提出了用 Van der Pol 振子方程来模拟尾流作用于圆柱上的流体力。Hartlen 和 Currie^[9]给出了具体的数学表达式,他们采用一个弱 Van de Pol 非线性振子来表示升力系数。模型只考虑圆柱的横向运动,并受到线性弹簧和线性阻尼的限制,圆柱运动的无量纲化方程可表示为

$$\ddot{y}_r + 2\xi\dot{y}_r + y_r = a\omega_0^2 c_L \quad (1)$$

上式是对时间 $\tau = \omega_n t$ 无量纲化的微分方程, y_r 是无量纲化位移, ω_0 是 Strouhal 频率与结构固有频率之比, c_L 是升力系数, ξ 是结构阻尼比, a 为无量纲参数。式(1)右端无量纲化的涡激力满足方程

$$\ddot{c}_L - \alpha\omega_0\dot{c}_L + \frac{\gamma}{\omega_0}(\dot{c}_L)^3 + \omega_0^2 c_L = b\dot{y}_r \quad (2)$$

其中, (α, γ, b) 参数需要对试验数据作回归分析来确定,并同时满足 $c_{L0} = (4\alpha/3\gamma)^{1/2}$, c_{L0} 是静止圆柱的升力幅值。

在参数选择合适的前提下, Hartlen 和 Currie^[9]的尾流振子模型可以定性的模拟出试验中的很多现象。基于这样的思路,又发展了很多的尾流振子模型。Iwan 和 Blevins^[10-11]根据动量守恒原理,推导出尾流振子与结构运动的耦合方程。该模型物理意义明确,较好地反映了涡激振动问题的水动力特性,在工程界有较广泛的应用。方程中的经验参数由受迫振动的试验结果来拟合确定,因此尾流振子模型对经验系数的依赖性大,不同尾流振子模型选取的经验参数相差较大,所以对相同的研究对象的结果预报也有较大差异。

Facchinetti^[12]改进了尾流振子模型的动力特性, 分别考虑了位移、速度和加速度对尾流振子的耦合影响. 将不同耦合形式的预报结果与试验结果进行对比, 发现通过加速度与涡激升力的耦合可以在一定程度上定量的反应刚性圆柱的涡激振动特性. Facchinetti^[13]进一步将该模型扩展用于细长柔性线缆的涡激振动响应. Mathelin^[14]对 Facchinetti^[13]的工作做了进一步扩展, 使之可以预报剪切流下的涡激振动响应. Furnes^[15], GE^[16]和 Li^[17]提出双耦合振子模型模拟流向和横向的脉动力, 但分开处理两个方向的尾流振子无法准确预报出流向和横向响应的相位差. Srinil^[18]和 Srinil 和 Zanganeh^[19]使用双 Duffing-Van der Pol 振子来预报两向耦合的 VIV 响应, 该模型可以较成功的预报出两向 VIV 的振幅响应.

国内, 郭海燕^[20]基于改进的尾流振子模型对输油立管的 VIV 响应进行了预报, 后 Li^[17]提出横向和流向都分别满足的 Van der Pol 模型, 并用此模型预报张紧式立管的两向 VIV 响应. 黄维平^[21-22]提出的尾流振子模型不仅考虑了流向耦合的影响, 还考虑了非线性阻尼效应. 秦伟^[23]建立了双自由度的涡强尾流振子模型分析悬链线立管的涡激振动. 吴学敏^[24]基于模型试验的结果对涡激力进行改进实现对深海立管大变形涡激振动进行分析.

1.1.2 商业软件

在实际工程应用中, 一些商业预测软件非常普及, 这些商业软件基于试验测量数据, 计算效率高. 其中 Shear7 是理论研究和工程分析应用较为广泛的涡激振动分析软件, 由美国麻省理工学院 Vandiver 教授开发, 用于计算立管在均匀流或剪切流作用下的涡激响应和疲劳分析. 其原理主要是模态叠加法, 通过无因次频率比和升力系数的非线性关系插值得到最初的升力系数, 再通过能量平衡来校核升力系数, 从而得到立管每个节点的升力系数. Shear7 可以预测横流方向的涡激振动响应, 模拟多种结构模型以及多种约束条件. 除此以外, 还有 ABAVIV、VICoMo、VIVA、VIVANA、OrcaFlex, 这些软件各有特点, 表 1 列出了这些常用的 VIV 预报软件及其模型特征. 目前, 国内工程领域还主要采用国外的商业软件进行分析, 虽然有一些高校学者形成了各自的预报模型程序, 但是具有自主知识产权且经过工程实际广泛验证的预报分析程序还有待进一步发展.

表 1 常用的几种 VIV 预报软件及模型特征

Tab.1 Several VIV predict software and model characteristics

Model	Model Characteristic
ABAVIV	The time domain code ABAVIV has demonstrated the ability to reproduce basic features of riser vortex induced vibration. It uses the finite element software package ABAQUS to calculate the response from the VIV forcing. ABAVIV captures structural nonlinearities and the transient nature of the VIV phenomenon.
SHEAR7	The SHEAR7 VIV response prediction includes Root Mean Square (RMS) displacement, velocity, acceleration, RMS stress and fatigue damage rate as well as local drag amplification coefficients.
VICoMo	The empirical database in VICoMo which is based on tests in which the flow was perpendicular to the riser elements. The timeseries from the experiment showed large temporal variations.
VIVA	The program has adopted a pragmatic analysis methodology based on experimental tests and rigorous structural modeling. The purpose of the program is to include high-harmonic effect on fatigue, to add new database based on field data, and to improve the reliability of the prediction.
VIVANA	VIVANA is at present limited to compute vibrations orthogonal to the current velocity. The hydrodynamic model in VIVANA is based on empirical coefficients, while the structural model applies a non-linear 3-dimensional finite element formulation. The program is able to work with an arbitrary distribution of tension, mass, stiffness, buoyancy and diameter.
OrcaFlex	OrcaFlex provides fast and accurate analysis of catenary systems such as flexible risers and umbilical cables under wave and current loads and externally imposed motions. And It is a fully 3D non-linear time domain finite element program capable of dealing with arbitrarily large deflections of the flexible from the initial configuration.

1.2 基于 CFD 的数值模型

由于涡激振动工程分析软件的数据来源于水深在 10 米以内的模型试验, 与深水的情况相比, 存在尺度上的巨大差异. 此外, 它们也不能提供流向的 VIV 分析. 与经验模型相比, CFD 模型近年来发展得非常迅速, 采用数值方法将控制方程进行离散, 借助计算机技术达到分析流体流动的目的, 这是一种基于精细流场模型并耦合结构动力学响应的流固耦合方法. 其中, 大规模高雷诺数的模拟是采用 CFD 研究 VIV 问题的难点之一, 按照所采用的湍流模式不同, 处理方式主要分以下几种

(1) 基于直接数值模拟(DNS), 采用直接数值模拟的方法可以在空间域和时间域上高精度地求解流场, 这种方法精度高, 对计算资源消耗巨大. 目前这种方法在固定圆柱绕流问题及刚性圆柱涡激振动的数值模拟方面应用比较多^[25].

Evangelinos^[26]采用 DNS 方法对长细比为 4π 的固定圆柱绕流和长细比为 378 的柔性立管的涡激振动分别开展了数值模拟研究. 在 Evangelinos^[26]的工作基础之上, Lucor^[27]进一步采用 DNS 方法开展了涡激振动更深入的系列研究, 对剪切流中长细比大于 500 的柔性立管的涡激振动问题进行了数值模拟. 主要研究了线性变化与指数型变化的剪切流中, 立管不同的振动响应特性. 数值结果显示, 在线性变化的剪切流中激励出的横向振动锁定在 3 阶, 而在指数变化型剪切流中立管呈现多模态振动特性, 振动模态高达 12~14 阶. Lucor^[28]采用 DNS 方法对低质量比的刚性圆柱涡激振动问题进行数值模拟, 捕捉到了涡激振动的三个响应分支, 并重点研究了发生上端分支与下端分支跳转时的折合速度范围.

(2) 基于雷诺平均(RANS), RANS 方法对 N-S 方程进行时均化处理, 将流场中的脉动速度和压强分解为时均值和瞬态振荡值之和, 反映流场变量在整个时域内总的变化趋势. RANS 方法常用的湍流模型有双方程标准 k- ϵ 模型和 SST k- ω 模型. RANS 仅计算和存储时均变量, 计算效率高, 对计算机硬件资源要求低, 因此应用比较广泛.

黄智勇^[29]采用 RANS 方法, 基于 Fluent 的 UDF 功能开展了细长柔性立管横向 VIV 的切片法研究, 应用该模型对阶梯流和剪切流条件下的细长柔性立管进行了横向响应计算, 计算结果与实验结果拟合较好. 何长江^[30]基于 RANS 方法, 结合有限体积法(FVM)、和任意拉格朗日欧拉法(ALE), 建立了二维圆柱涡激振动的求解器 VIV2D, 并基于此程序结合切片理论, 实现对柔性立管涡激振动的数值模拟. Schulz 和 Meling^[31]结合 RANS 方法和有限元结构动力响应, 建立了一种多重切片法, 分析了剪切流作用下柔性立管流固耦合问题. Schulz 和 Meling^[32]利用此方法进行了轴向张紧式立管的涡激振动数值模拟与载荷分析. Huang 和 Chen^[33]采用 RANS 方法对长细比为 1400 的柔性立管在剪切流中的 VIV 响应进行了预报. 随后, Huang 和 Chen^[34]又进一步对长细比为 3300 的悬链线立管在均匀流中的 VIV 问题进行了数值模拟. 端木玉和万德成^[35]用大涡模拟方法对细长圆柱绕流问题进行了数值模拟研究.

(3) 基于大涡模拟(LES), LES 方法的基本出发点是对空间尺度做处理, 将漩涡区分为大尺度涡和小尺度涡, 引入滤波函数对网格尺度进行过滤, 需要构造不同的亚格子应力模式来封闭湍流模型. LES 方法对网格要求精密, 计算资源的要求比 RANS 苛刻.

郭宇^[36]采用 LES 方法, 基于商业软件 ANSYS+CFX, 通过 ANSYS 自带的耦合平台 workbench 实现流固耦合, 模拟了均匀流和剪切流下柔性立管的涡激振动响应. 研究表明, 在相同流速下, 剪切流引起的立管涡激振动响应要明显小于均匀流. 韩翔希^[37]采用 LES 方法, 基于 Fluent+ANSYS 平台, 模拟不同来流下的柔性立管的 VIV 特性. 桂洪斌^[38]采用 LES 方法, 先对二维圆柱进行了数值模拟, 计算出不同折合速度下的水动力系数, 再进一步对流固耦合作用下柔性立管 VIV 响应进行了分析. Kamble 和 Chen^[39]采用 LES 方法, 结合重叠网格技术, 对长细比分别为 1400 和 4200 的柔性立管的涡激振动进行模拟, 并

对立管的疲劳损伤进行了分析.

(4) 基于离散涡方法(DVM), 通过在流场中布置离散涡元来模拟尾流结构的主要特征, 采用拉格朗日方法模拟流体的运动过程, 物理量随涡元在流场中的运动而发生对流扩散, 计算不依赖于网格, 不易应用于三维问题.

对于早期的离散涡模型, 在涡元脱落之前判断准确的分离点位置是一个难点, 有的直接假定分离点的位置, 有的根据经验拟合曲线判断^[40], 对于非定常运动, 需要每个时刻重新判断分离点位置^[41]. Chorin^[42]提出在圆柱周围布置一系列涡元, 这样分离点的位置就无需确定, 在涡元的运动中, 分离点会自动出现. Yamamoto^[43]通过在每个切片处采用 DVM 法求解流场来模拟细长柔性立管的 VIV 问题. Lima^[44]基于 DVM 方法模拟了悬链线的 VIV 响应及疲劳分析.

1.2.1 切片模型

由于深海立管的轴向尺度非常大, 是典型的大规模高强度计算问题, 无论采用何种 CFD 模型, 要想实现对整个流场的三维时域求解都很困难. 一个比较折中的方法是沿立管轴向选取若干截面, 在各个截面上应用 CFD 方法求解水动力, 认为在截面所代表的立管长度范围内, 立管所受的流体力可以按计算截面处的流体力换算得到. 这种方法无需引入过多假设, 也不像经验模型那样依赖实验数据或经验参数, 物理机制强, 计算效率高, 是预报细长柔性立管 VIV 响应的一种比较主流的方法. 这种方法称为切片法, 如图 1 所示, 是一种准三维流固耦合数值模型.

基于切片法开展的细长柔性立管 VIV 分析的数值研究很多, 早期采用切片法的是 Herfjord^[45], 其开发了一套流固耦合算法程序, 其中 CFD 模块应用“切片”理论离散流场并用 NAVISM 的 CFD 代码进行求解; CSD 模块采用 USFOS 的计算代码. 在每个时间步内, 通过一个耦合模块进行两模块间的数据交互. 另外有代表性的还有 Yamamoto^[46], 其在流场计算部分采用了适合于模拟二维不可压缩粘性流体的离散涡法 (DVM), 结合基于流函数的边界积分程序对二维流场进行求解; 结构单元采用 Euler-Bernoulli 梁单元模型求解. Willden^[47]等采用流固耦合模型 VIVIC 来模拟立管涡激振动的响应, 其中 CFD 模块是基于混合的 Eulerian-Lagrangian Vortex-in-Cell 法求解二维不可压缩 N-S 速度涡量方程.

国内, 黄智勇^[29]最早采用切片法预报柔性立管的横向 VIV 响应, 模拟基于 Fluent 平台. 谷家扬^[48]基于切片法对张力腿的横向涡激振动进行数值研究, 模拟也是基于 Fluent 平台完成. 何长江^[30]基于切片法, 采用 C++和 MATLAB 混合编程方法, 形成了求解器 RISER, 实现对柔性立管的 VIV 响应分析. 吴浩^[49]采用切片法对低雷诺数下的裸管和多根控制杆的柔性立管横向响应进行 VIV 模拟, 程序考虑了张力随立管长度的非线性变化, 每个时刻更新结构刚度矩阵.

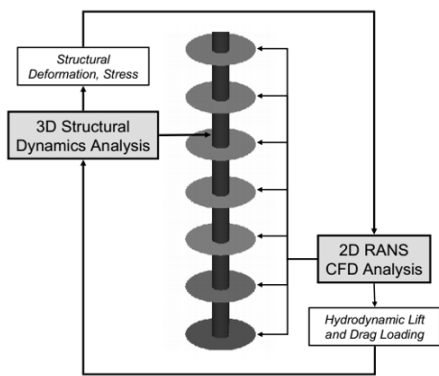


图 1 切片法示意图

Fig.1 The strip method

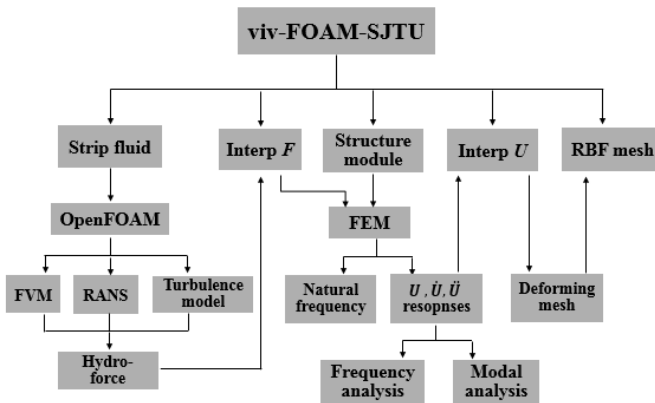


图 2 viv-FOAM-SJTU 求解器模块

Fig.2 Module of viv-FOAM-SJTU solver

万德成团队基于开源程序库 OpenFOAM 开发了适应于模拟细长柔性立管 VIV 的求解器 viv-FOAM-SJTU^[50], 求解器模块如图 2 所示. 求解器基于切片法开发, 采用 OpenFOAM 求解各切片处的流体场, 自编程序实现结构有限元求解及流体场与结构场的耦合, 并将径向基函数动网格技术(RBF)植入 OpenFOAM 中, 使得求解器可以处理 VIV 响应中横向及流向大柔性变形的情况^[51]. 求解器经过标准算例的考察验证^[52], 并针对不同参数的影响(质量比、顶端预张力、流速大小、流场剖面)及串列双立管开展了深入的应用研究^[53-56].

1.2.2 三维数值模拟

从已有的数值研究来看, 基于切片理论的涡激振动模拟虽然对 VIV 响应的预报精度较高, 但却忽略了流场三维效应, 所以基于未简化流场的三维数值模拟最能反映细长柔性立管涡激振动的物理模型机制. 一些学者进行了大长细比立管涡激振动的三维时域模拟, 如 Holmes^[57]; Constantinides 和 Oakley^[58]; Chen 和 Kim^[59].

Holmes^[57]提出基于三维 CFD 模拟的一种方法, 使用了一千万网格单元, 能够反映出三维流动效应, 和 Trim^[60]实验结果比较相当好. Constantinides 和 Oakley^[58]后来使用该三维模型来分析大长细比的立管, 其长细比高达 4200, 和实测试验 Deepstar-MIT Gulf Stream 比较结果吻合较好. 其三维模型能够模拟出试验中观察到的谐波成分.

另一种较为简单的方法就是基于 ANSYS 的多场求解器 MFX 来实现三维数值模拟, 如 Chen 和 Kim^[61]、王成官^[62]及范杰利^[63]. Chen 和 Kim^[64]使用 ANSYS Inc.发布的 ANSYS MFX 模块进行三维数值模拟, 结果与实验对比较好. 其数值模拟包括多立管组合问题, 发现四立管系统比双立管系统更易破坏, 其三维模拟反映出了 VIV 和 WIV 的耦合机理问题. Wang 和 Fu^[65]基于 ANSYS MFX 模块构建流固耦合求解器, 对长细比为 943 的立管在流速分别为 0.1m/s 和 0.5m/s 的两种均匀流场中的涡激振动进行了数值模拟, 如图 3 所示, 当流速增加到 0.5m/s, 流向位移是 0.1m/s 时的 20 倍, 横向位移是其 6 倍. 并且流速越大, 涡量场沿立管轴向相关度越弱. Wang 和 Xiao^[66]使用基于商业软件的 ANSYS MFX 多场求解器开展了三维流固耦合的数值模拟, 模拟了均匀流及线性剪切流中立管的涡激振动, 所得的数值结果和 ExxonMobil 立管模型实验结果吻合较好.

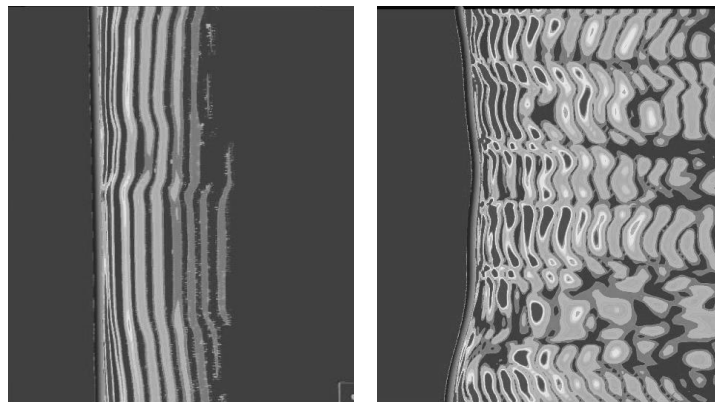


图 3 x-z 平面的涡量等值面 (左: $U=0.1\text{m/s}$, 右: $U=0.5\text{m/s}$)

Fig.3 Vorticity contours in the x-z plane (left: $U=0.1\text{m/s}$, right: $U=0.5\text{m/s}$)

总之, 近年来 CFD 技术有了长足的发展, 由于在预报精度上的不断提高, 以及在物理机制上的更贴合实际, 相信在不久的将来采用 CFD 方法会成为研究细长柔性立管涡激振动的最主要趋势.

2 研究热点

柔性立管 VIV 的研究与刚性圆柱之间既有联系又有区别, 相比单模态锁频的刚性圆柱而言, 细长柔性立管的 VIV 响应更为复杂, 影响参数更多, 近年来的研究主要集中在以下热点问题。

2.1 流向振动与横向振动的耦合

因为流向振动的幅值很小, 在试验中很难测得, 所以早期的试验和数值模拟中都只关注立管的横向振动。尽管顺流向的振动幅值小, 但顺流向振动频率却是横向振动的 2 倍左右, 因此而造成的疲劳损伤与横向振动在一个量级, 所以不应被忽略。

即使是对刚性圆柱涡激振动的研究 (端木玉等^[67], Williamson^[68]), 也发现两自由度的耦合响应与单自由度的情况已有很大的区别, 两自由度的情况下能激励出比单自由度更高的横向响应。双向运动的耦合会使得柔性立管涡激振动变得更加复杂, 相应的动力分析也变得困难。关于双向涡激振动的计算模型也主要分尾流振子模型和 CFD 模型两种。Furnes^[15]和 Srinil^[19]提出的多振子耦合模型, 将顺流向振子的频率设为横向的 2 倍, 这种方法可以大致预报出 VIV 响应的模态及幅值, 却不能反映两向之间的相位差。秦伟^[23]使用的涡强尾流振子模型对前人的模型进行了改进考虑了横向与流向之间的相位差。唐世振^[69]基于 Matlab 建立了顺流向与涡激振动的耦合分析模型。

基于 OpenFOAM 的求解器 viv-FOAM-SJTU^[50], 是可以预报细长柔性立管两向 VIV 响应的 CFD 模型, 求解器不受雷诺数和长细比的限制, 预报模型适用范围较广, 如图 4 所示。此外, 前文介绍的基于 ANSYS Inc. 的多场求解器 MFX 也是实现 VIV 两向预报的 CFD 模型。

2.2 流场剖面的影响

流场剖面对立管 VIV 的影响, 也是研究的热点问题之一。在平均速度相同的前提下, 流场入口处的梯度不同所造成立管的 VIV 响应也会不同, 很多学者就流场剖面的影响做了对比分析, 即保持立管的结构参数及边界条件不变, 分别考察立管在均匀流、剪切流或阶梯流下的涡激响应^[35], 有些学者还进一步考察了剪切流的剪切率对 VIV 的影响^[66]。多数的研究表明, 立管在剪切流中所激励出的 VIV 响应会略高于均匀流, 即使主控模态相同, 剪切流场中也会表达出多模态振动响应。因为剪切流虽然沿着立管轴向呈线性连续变化, 但立管不同位置处的漩涡是以单元的形式脱落, 从一个单元到另一个单元, 漩涡脱落的频率呈跳跃变化, 所以沿着立管轴向各节点的振动频率各不相同, 激发出的振动模态也不止一个。

王嘉松^[70]以深海隔水管为研究对象, 采用 ANSYS 独具特色的 FSI 流固耦合高级分析技术对均匀流与剪切梯度流中的 VIV 问题进行了数值模拟, 如图 5 所示。计算结果显示, 隔水管的横向振动在两种剖面流场中都表现出 3 阶模态, 剪切梯度流中隔水管的振动更加复杂, 振型没有明显的驻点, 且挠度比均匀流下要大。

端木玉等^[53]和付博文等^[54]基于万德成教授课题组自主开发的求解器 viv-FOAM-SJTU^[50], 对细长柔性立管分别在阶梯流、均匀流与剪切流中的 VIV 问题进行了研究。流速剖面一方面对立管流向平衡位置及曲率产生影响, 另一方面也会影响到立管横向及流向振动的各阶模态, 如图 6 所示。对长细比为 500 的

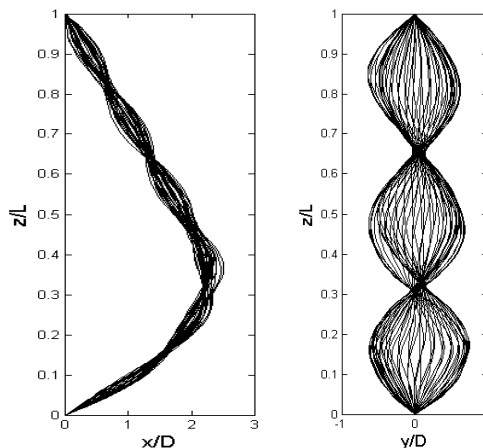


图 4 立管流向和横向的涡激振动响应(Duan^[52])
Fig.4 In-line and cross-flow VIV responses of riser (Duan^[52])

柔性立管，流速 $\bar{U} = 0.4m/s$ ，在阶梯流中流向挠度最小，均匀流和剪切流中流向挠度相当。在阶梯流中立管横向存在 2-3 阶的多模态振动，流向振动为 5 阶。均匀流与剪切流中，立管横向振动为 3 阶驻波，但流向存在差异，均匀流为 5-6 阶的多模态振动，剪切流的振动模态略高，为 6-7 阶多模态振动。

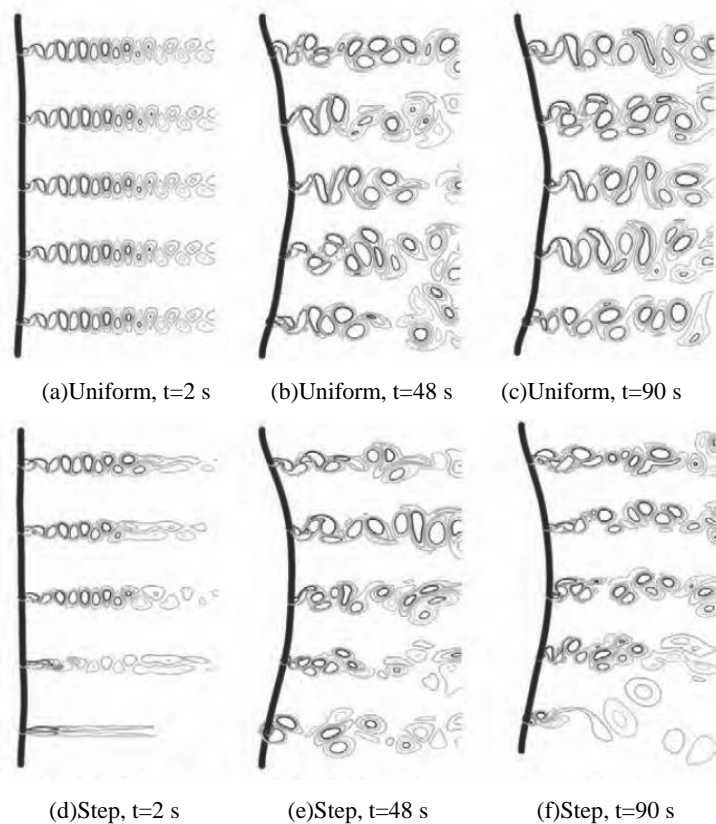


图 5 均匀流与剪切梯度流中的隔水管 VIV
Fig.5 The VIV of riser in uniform and shear flow

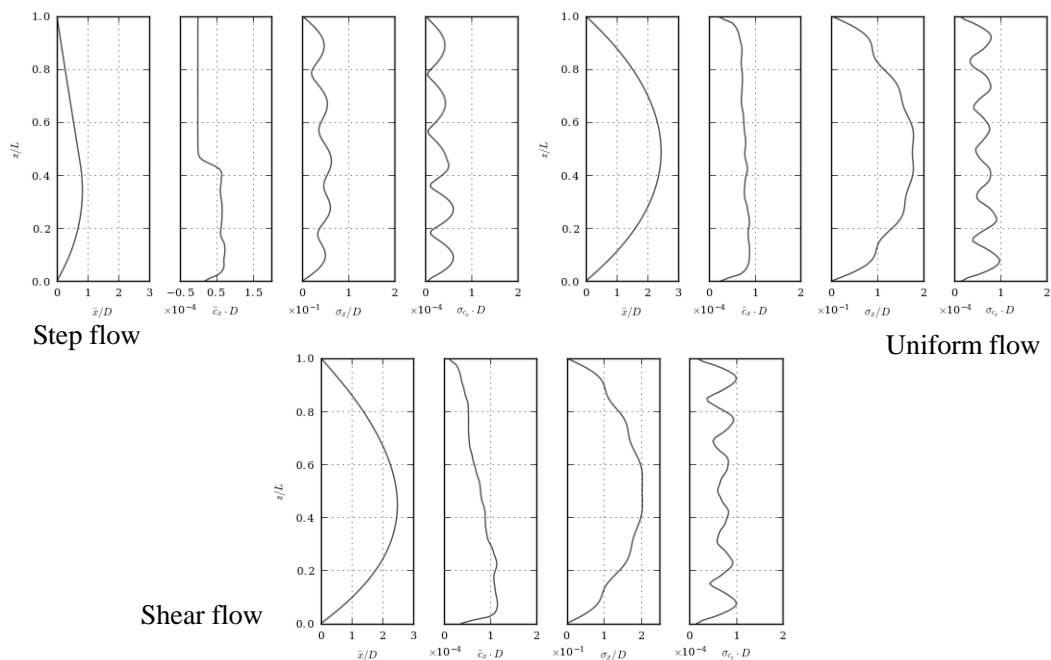


图 6 不同流场中立管流向位移的平均值及曲率、标准差及标准差的曲率

Fig.6 Mean, curvature, standard deviation and curvature standard deviation of in-line displacement in different flows

2.3 多模态特性

细长柔性立管的多模态振动特性是与刚性圆柱振动相比最大的区别, 刚性圆柱因为其展向完全相关, VIV 表现为单模态的锁频振动. 而对于细长柔性立管而言, 多模态的振动响应更是其常态, 并且随着长细比的增加, 立管振动的多模态特性越加明显. 端木玉^[51]对比了长细比分别从 500 变化至 1000 情况下的 VIV 响应, 研究发现: 随着长细比的增加, 立管振动由单一模态逐渐转变成多模态, 并且这种转变在横向和流向上均有体现, 如图 7 所示. 基于立管振动的多模态特性, Facchinetti^[13]直接采用行波振动解的形式给出立管振动的行波响应, 该研究基于尾流振子模型与结构动力学的相互作用.

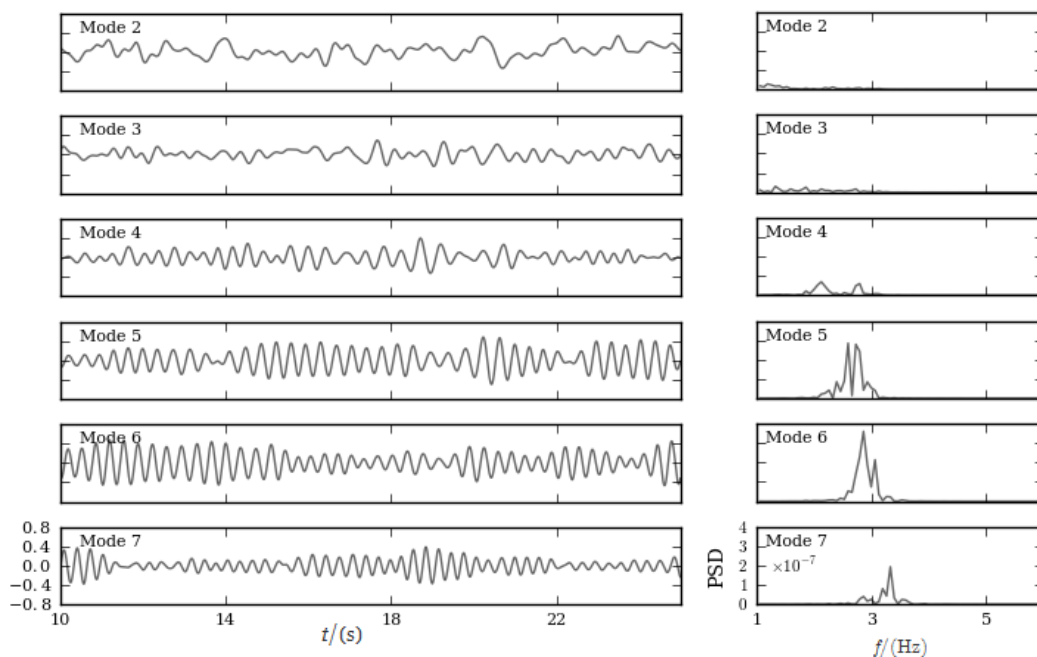


图 7 长细比为 1000 的立管横向各阶模态幅值和能量谱分析

Fig.7 Cross-flow modal amplitude and power density of riser with L/D=1000

除长细比以外, 高雷诺数的影响、立管轴向张力的变化等都是激发立管振动多模态的因素. 高雷诺数下由于湍流的随机性及脉动特性会引起幅值和频率的改变, 这会引起立管振动的频率带宽, 从而引发立管的多模态振动. 由于结构参数沿轴向的变化, 特别是张力的变化也是激发立管多模态振动的因素之一. 研究发现行波在沿着立管长度方向传播时, 波长和波幅由于结构参数的变化而变化. Chen^[71]考察了变张力和变弯曲刚度的立管的涡激振动响应, 研究表明: 张力和弯曲刚度会影响立管振动的波长. 张力越大, 波长越长; 弯曲刚度越大, 波长越小. 波长较大的位置波速也较大, 从而引发立管多模态振动的行波传播.

2.4 立管顶端浮体运动的耦合

与浅海中的固定式平台不同, 深水平平台多为浮式的, 因此上部平台的运动幅度增大, 使平台与水下立管之间的动力耦合作用加强, 并引发一些新现象. 由顶部平台运动所引起的立管全局动力响应分为全耦合分析和非耦合分析两种. 耦合分析是指将平台运动简化为 6 自由度运动, 立管采用有限元离散之后, 每个时刻将他们作为一个整体求解结构的动力学方程, 立管的水动力采用 Morison 公式. 非耦合分析是先单独求解平台在波浪作用下的运动, 在将其作为立管顶部的边界条件, 通过结构动力学方程的求解来获得立管的全局响应.

深海平台在波浪中的 6 自由度运动主要以垂荡运动为主, 平台的垂荡运动将导致立管的轴向拉压,

从而引起立管结构的水平动力响应, 该现象称为参数响应. 参数激振会导致系统的不稳定性, 有关参数激振的研究(杨和振^[72-73])可以避开参数共振区域, 是深海立管安全设计中的重要要求(黄维平^[74]).

Hsu^[75]是第一个提出研究参数激振的研究人员, Haquang^[76]研究了综合激励下的立管非线性动力响应. Thampi^[77]采用马克夫方法研究了海洋立管非线性动力响应. Ryu^[78]研究了在规则波和浮体运动下的柔性立管的动力响应特性. Park^[79]基于有限元法研究了参数激励下柔性立管的结构动力响应. Suzuki^[80]开展了模型试验研究, 表明发生参数共振时对结构的安全影响很大. Chatjigeorgiou^[81]基于前两阶模态研究参数共振的简化模型. Kuiper^[82]采用 Floquet 理论开展了浮体升沉运动的立管参激稳定性研究. Brouwers^[83]研究了随机参数激励和非线性阻尼下不稳定性的渐进解, Fujiwara^[84]采用大比尺模型试验, 研究了参数激励对涡激振动的影响. Chen^[85-86]利用有限元法研究了平台运动与立管 VIV 之间的耦合规律, 分析了响应增大、模态转换等现象, 同时考察了平台运动频率对 VIV 的影响.

国内对参数激振与立管的耦合分析还处于起步阶段, 杨和振^[73]采用富洛开理论分析了立管的参数稳定性, 分别考虑了四个典型工况下的结构水平动力响应. 唐友刚^[87]建立了立管动边界的力学模型, 采用有限差分法求解立管的动力响应. 研究了剪切流中的涡激振动响应和参激-涡激耦合响应. 张杰^[88]采用 Floquet 理论分析了立管无阻尼和有阻尼两种情况下参数激励的稳定性, 并给出临界参数激振下的动力响应. 肖飞^[89]对悬链线立管的不稳定性进行了预测. Fu^[90]对 viv-FOAM-SJTU 求解器进行改进, 在原来简支模型的基础上考虑了两端边界运动及顶端张力随时间的变化, 因此可以进一步研究相关平台横荡、纵荡、垂荡运动下对柔性立管涡激振动的影响, 也可以考察振荡流中立管的涡激振动响应.

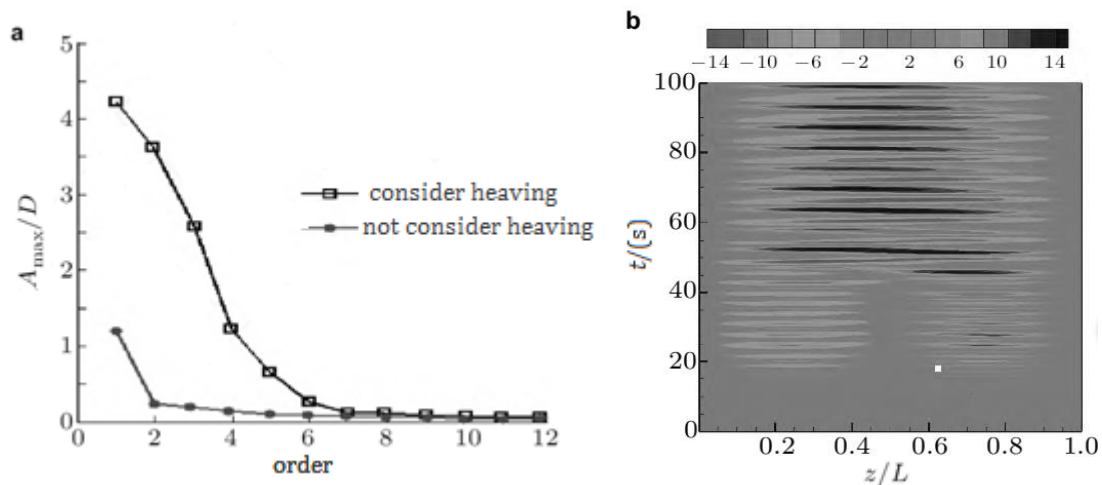


图8 平台垂荡运动下的立管 VIV 耦合响应 (a)考虑与不考虑平台垂荡下的立管响应位移 (b)参数激振中的模态转变

Fig.8 The VIV responses of riser coupling with heaving motion of platform (a)the displacement responses considering and not considering heaving (b)the mode transformation in parametric vibration

综合考虑参数激振对立管涡激振动的耦合影响, 与纯涡激振动的结果比较, 可以得到以下结论, 如图8所示

(1) 考虑参数激振的影响后, 立管的动力响应幅值会增大, 不仅表现在立管顶部的响应, 立管底部的响应也会大于纯涡激振动的情况(Chen^[85-86]).

(2) 考虑参数激振的耦合后, 立管出现了更高阶的模态振动, 立管的振动频率出现了更多的组成部分, 振动响应出现谐振成分.

(3) 流速会影响参数共振区域, 流速越大立管发生参数共振的区域越小. 在参数共振区域, 即使很小

的激励都将导致结构破坏(Wu^[91], Wang^[65]).

(4) 浮体垂荡运动的幅值越大, 立管横向振动的动力响应越大; 而浮体垂荡运动的频率越大, 立管横向振动的动力响应越小(Chen^[86], Wang^[65]).

2.5 抑制措施

因为涡激振动往往对结构产生不利影响, 特别是会造成结构的疲劳损伤. 过去几十年, 人们为了抑制 VIV 开展了大量的抑涡装置的研究. 其中最早采用也是最主流的一种方法就是加装垂直螺旋侧板, 有关前人的研究中我们可以得到一些通用的结论

(1) 加装螺旋侧板后, 与裸管相比, 升力系数(C_l)的值减小了, 但阻力系数(C_d)的值有所增大, 因为加装侧板相当于增大了等效直径 (Korkischko^[92], Huang 和 Sworn^[93], Quen^[94], Juan^[95]).

(2) 加装螺旋侧板可以在一个很大的雷诺数范围内起到抑制 VIV 的效果(Allen^[96]), 但是随着折合速度的增加, 螺旋侧板的抑涡效果会有所降低(Zhou^[97]).

(3) 带螺旋侧板的立管可使锁定区变窄, 甚至消除锁定区 (Bearman 和 Brankovic^[98], Zhou^[97], Quen^[94]).

(4) 螺旋侧板能够破坏流向交替脱落的尾涡, 并破坏沿立管展向的尾涡连续性 (Bearman 和 Brankovic^[98], Korkischko 和 Meneghini^[99-100], Hao^[101], Zhou^[97], Carmo^[102]).

(5) 加装螺旋侧板可以使得立管由高阶多模态响应转变为低阶单模态响应(Fang^[103]).

在研究螺旋侧板时, 主要考察侧板数、螺距、侧板高度、覆盖率这四个方面对抑涡效果的影响: 从抑涡效果来看, 侧板数对 VIV 影响不大, 也就是说安装三块侧板与四块侧板的抑涡效果相差不大, 但是立管受到的阻力却随着侧板数的增加而增加 (Baarholm 和 Lie^[104]); 螺距的改变对抑涡效果的影响不大, 但是螺距的改变会影响锁定区域的出现, 阻碍振动频率转向高频(Quen^[94]); 侧板高度对 VIV 的影响显著, 侧板越高, 抑涡效果越好(Allen^[96], Trim^[59], Korkischko^[92]); 覆盖率越高, 抑涡效果越好(Frank^[105], Trim^[59]).

赵伟文^[106]基于自主开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对加装螺旋侧板的 Spar 平台进行了涡激振动研究, 如图 9, 分别计算了折合速度 $U_r = 5-9$ 时 Spar 平台的涡激响应, 捕捉到了“8”字形轨迹及锁定区域. 并与 Finnigan^[107] 的模型试验及 Oakley^[108] 的 CFD 结果进行了对比, 验证了求解器的可靠性.

Marlow^[109]对串列柔性双立管的涡激振动问题进行了数值模拟研究, 立管长细比为 $L/D=26$, 立管间距为 10D. 分别研究了裸管和加装螺旋侧板两种情况下的涡激振动响应, 如图 10 所示. 数值计算结果显示: 对于裸管, 上游立管和下游立管的运动幅度相当, 上游立管的响应幅值略微稍大一些. 对于加装螺旋侧板的立管, 上游立管响应幅值非常小, 立管几乎不运动, 而下游立管的响应幅值要远大于上游立管. 所以文章认为对于加装了螺旋抑涡状态的立管, 由于其他立管的尾流, 有可能使得抑涡效果减弱. Deng^[110]基于 viv-FOAM-SJTU^[50]分别考察了不同间距对串列及并列立管涡激振动的影响.

除了安装螺旋侧板这种常规方式外, 抑涡装置多种多样. 刘晓春^[111]对月牙型抑涡装置进行了研究, 吴浩^[112]基于有限元方法求解 N-S 方程, Wu^[113]和詹禄禄^[114]基于 ANSYS+CFX 方法对安装多根控制杆对立

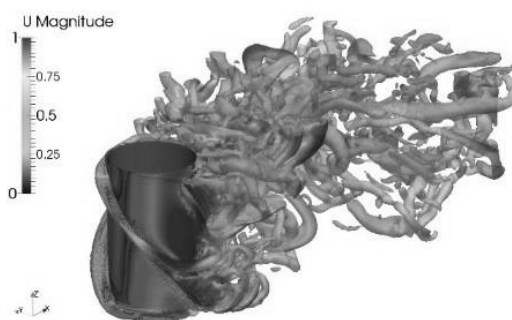


图 9 Spar 平台尾部流场涡量图 (Q 准则)

Fig.9 Vorticity contour (Q-criterion)

管 VIV 的影响进行了分析, 重点考察了不同控制杆的安装方位对抑涡效果的影响. 朱仁庆^[115]基于 Fluent 的 UDF 功能对二维圆柱动波壁的 VIV 抑制作用进行了研究, 重点考察动波壁速度对 VIV 的影响, 但基于这种抑涡装置的细长柔性立管的研究目前还是空白.

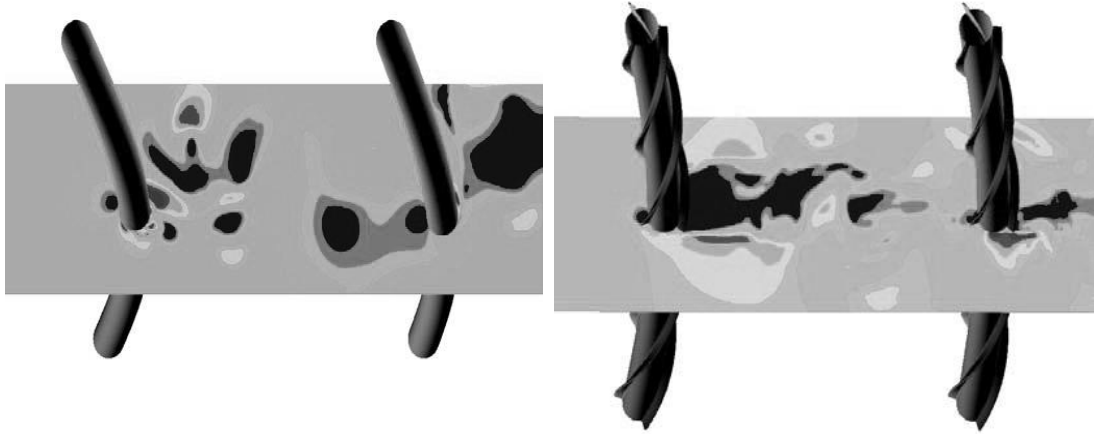


图 10 串联立管的涡激振动切片处的速度场 (左: 裸管, 右: 加装螺旋侧板)

Fig.10 Instantaneous velocity contours for two risers (left: bare riser right: strake riser)

2.6 复杂结构

海洋工程中除了 TTR(Top tension riser)立管外, SCR(Steel Catenary Riser)也是一种常见形式. 1994 年, 美国壳牌石油公司在墨西哥湾 Auger 张力腿平台上安装了世界上第一条钢悬链式立管. 随后, 有关 SCR 的研究也越来越多, 研究热点主要集中在动力学的求解、顶部浮体激励作用下的动力响应、涡激振动、疲劳分析、设计理论等等.

Martins 和 Higashi^[116]对 SCR 进行了参数分析, 对靠近上端浮体的区域进行了疲劳分析. Larsen 和 Passano^[117]对 SCR 的涡激振动进行了时域和频域的分析. Dale 和 Bridge^[118]对深水中 SCR 的涡激振动响应进行了实验研究. Srinil 和 Wiercigroch^[119]对 SCR 的涡激振动进行了分析, 立管模型简化为三维铰接张力梁模型, 水动力模型通过非线性尾流振子模拟, 分析过程中综合考虑了 SCR 弯曲、伸长、下垂等引起的结构非线性.

国外对 SCR 的研究积累了比较丰富经验, 国内关于 SCR 的研究还处于起步阶段, 且多集中于动力响应、疲劳分析、实验研究. 董永强^[120]利用有限元软件 ABAQUS 对 SCR 进行了静力和动力分析, 进而对 SCR 进行了疲劳分析. 高云^[121]针对 SCR 的特点, 采用了简化后的振动模型 (图 11 所示), 基于 ANSYS 的 CAE 模块, 根据悬链线方程建立了 SCR 的有限元模型, 并进行模态分析. 饶志标^[122]根据悬链线方程将 SCR 等效为顶端张紧立管, 通过研究顶端张紧式立管的涡激振动响应来研究 SCR 的涡激振动响应, 图 12 为悬链线振型. 刘庆海^[123]采用实验的手段研究在阶梯流作用下 SCR 的涡激振动, 模型采用长细比为 390 且具有大变形特性的 SCR 立管.

通过对 SCR 的试验和数值研究, 可以得到一些结论

- (1) SCR 与平台间的柔性接头刚度对 SCR 的疲劳寿命有较大的影响.
- (2) SCR 的疲劳特性对参数非常敏感, 与 SCR 在平台的位置、方向、锚链系统的类型、水深等都有着重要的关系.
- (3) 时域和频域分析相结合的形式可以很好地考虑到涡激振动的局部非线性影响; 当 SCR 和海底的

摩擦力较大时, 必须采用完整的模型来进行涡激振动分析; 当 SCR 和海底摩擦力较小时, 可以采用线性截断模型来进行涡激振动分析。

(4) SCR 的疲劳损伤沿着立管轴线方向呈振荡性质, 且最大疲劳损伤最易出现在边界区域, 随着水流速度的增大, 立管的疲劳损伤的峰值呈上升趋势。

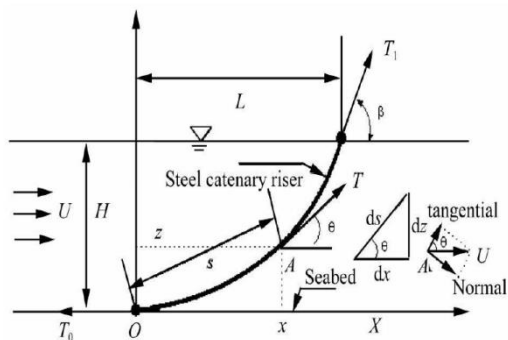


图 11 悬链线模型

Fig.11 Steel catenary riser model

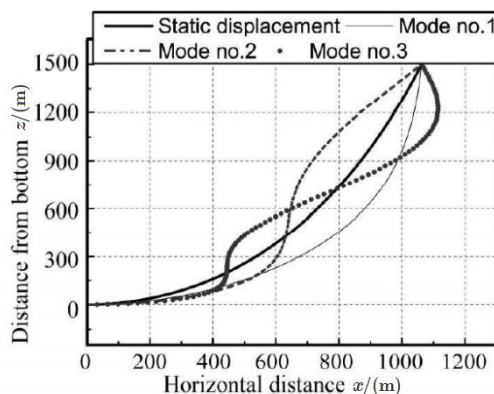


图 12 悬链线前 3 阶振型

Fig.12 First three model shapes of SCR

3 总结

细长柔性立管的涡激振动特性与刚性圆柱相比有很大的不同, 对于刚性圆柱, 我们侧重于研究其在不同折合速度下的振动响应或尾涡模式. 刚性圆柱的研究相当于是细长柔性立管的一个节点, 而沿着立管轴向不同节点的整体响应还会造成一些新的现象. 例如, 即使是在锁定的状态下, 也不再是单一模态的振动形式, 而表现为多模态的振动特性, 即有一个主控模态, 而其他非主控的模态在振动过程中也有表达. 除此以外, 细长柔性立管在两向自由度的耦合振动、流场剖面的影响、顶端浮体的驱动耦合、VIV 的抑制措施等方面都与刚性圆柱有很大区别, 文章对这些问题进行了总结归纳。

随着计算机技术和并行技术的发展, 使得对立管涡激振动的数值模拟可以应用于更高雷诺数及更大长细比问题, 通过文中列出的热点问题的深入研究来进一步填补数值研究与工程实际之间的差别。

参考文献:

- [1] SARPKEYA T. A Critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19(4):389-447.
- [2] WILLIAMSON C H K. Vortex dynamics in the cylinder wake[J]. Fluid Mechanics, 1996, 28:477-539.
- [3] WILLIAMSON C H K, GOVARDHAN R. Vortex-induced vibrations[J]. Fluid Mechanics, 2004, 36:413-455.
- [4] WILLIAMSON C H K, GOVARDHAN R. A brief review of recent results in vortex-induced vibrations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6-7):713-35.
- [5] GABBAI R D, BENAROYA H. An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 282(3-5):575-616.
- [6] WU X D, GE F, HONG Y H. A review of recent studies on vortex-induced vibrations of slender cylinders[J]. Journal of Fluids and Structure, 2011, 28:292-308.
- [7] BIRKOFF G, ZARANTANELLO E H. Jets, wakes and cavities[M]. New York: Academic Press, 1957.
- [8] BISHOP R E D, HASSAN A Y. The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid[J]. Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1964, 277:51-75.
- [9] HARTLEN R T, CURRIE I G. Lift-oscillator model of vortex-induced vibration[J]. Journal of the Engineering Mechanics, 1970, 96:577-591.

- [10] IWAN W D, BLEVINS R D. A model for vortex induced oscillation of structures[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1974, 41:581-586.
- [11] IWAN W D. The Vortex-induced oscillation of non-uniform structure analysis[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1981, 79:291-301.
- [12] FACCHINETTI M L, DE LANGRE E, BIOLLEY F. Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2004a, 19:123-140.
- [13] FACCHINETTI M L, DE LANGRE E, BIOLLEY F. Vortex-induced travelling waves along a cable[J]. *European Journal of Mechanics B-Fluids*, 2004b, 23:199-208.
- [14] MATHELIN L, DE LANGRE E. Vortex-induced vibrations and waves under shear flow with a wake oscillator model[J]. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 2005, 24:478-490.
- [15] FURNES G K, SRENSEN K. Flow induced vibrations modeled by coupled non-linear oscillators[C]// *The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, Portugal, 2007.
- [16] GE F, LONG X, WANG L, et al. Flow-induced vibrations of long circular cylinders modeled by coupled nonlinear oscillators[J]. *Science in China, Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2009, 52(7):1086-1093.
- [17] LI X M, GUO H Y, MENG F S. Nonlinear coupled in-line and cross-flow vortex-induced vibration analysis of top tensioned riser[J]. *China Ocean Engineering*, 2010, 24(4):749-58.
- [18] SRINIL N. Analysis and prediction of vortex-induced vibrations of variable-tension vertical risers in linearly sheared currents[J]. *Applied Ocean Research*, 2011, 33:41-53.
- [19] SRINIL N, ZANGANEH H. Modelling of coupled cross-flow/in-line vortex-induced vibrations using double Duffing and Van der Pol oscillators[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 53:83-97.
- [20] 郭海燕, 傅强, 娄敏. 海洋输油立管涡激振动响应及其疲劳寿命研究[J]. *工程力学*, 2005, 22(4):220-224.
- [21] 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*, 2007, 24(12):153-157.
- [22] 黄维平, 刘娟, 唐世振. 考虑流固耦合的大柔性圆柱体涡激振动非线性时域模型[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(9):140-143.
- [23] 秦伟, 康庄, 宋儒鑫. 基于离散点涡的双自由度涡激振动尾流振子模型研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(09):294-299.
- [24] 吴学敏. 考虑大变形的深水立管涡激振动非线性分析方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [25] DONG S, KARNIADAKIS G E. DNS of flow past a stationary and oscillating cylinder at $Re=10000$ [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 20:519-531.
- [26] EVANGELINOS C, LUCOR D, KARNIADAKIS G E. DNS-derived force distribution on flexible cylinders subject to vortex-induced vibration[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1999, 14:429-440.
- [27] LUCOR D, IMAS L, KARNIADAKIS G E. Vortex dislocations and force distribution of long flexible cylinders subjected to sheared flows[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15:641-650.
- [28] LUCOR D, FOO J, KARNIADAKIS G E. Vortex mode selection of a rigid cylinder subject to VIV at low mass-damping[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 20:483-503.
- [29] 黄智勇. 柔性立管涡激振动时域响应分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [30] 何长江. 柔性立管涡激振动试验与数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [31] SCHULZ K W, MELING T S. Multi-strip numerical analysis for flexible riser response[C]// *The International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2004:379-384.
- [32] SCHULZ K W, MELING T S. VIV analysis of a riser subjected to step and multi-directional currents[C]// *The International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2005:383-389.
- [33] HUANG K, CHEN H C, CHEN C R. Time-domain simulation of riser VIV in sheared current[C]// *The International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2007:911-920.
- [34] HUANG K, CHEN H C, CHEN C R. Flexible catenary riser VIV simulation in uniform current[C]// *The*

- International Offshore and Polar Engineering Conference, 2010:1129-1135.
- [35] 端木玉, 万德成. 不同长细比圆柱绕流的大涡模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(3):295-302.
- [36] 郭宇. 深海立管涡激振动的大涡模拟与涡振疲劳累积损伤分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [37] 韩翔希. 柔性立管流固耦合特性数值模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [38] 桂洪斌. 海洋立管涡激振动的数值模拟研究[J]. 船舶力学, 2016, 20(1-2):93-98.
- [39] 廖俊, 景思睿. 高雷诺数下双圆柱绕流的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2000, 16(1):101-110.
- [40] 凌国灿, 伊协远. 圆柱高雷诺数层流非定常运动初期流动[J]. 力学学报, 1981, 2:109-120.
- [41] 董婧, 宗智, 李章锐, 等. 两自由度运动圆柱绕流的离散涡方法模拟[J]. 船舶力学, 2012, 16(1):9-20.
- [42] CHORIN A J. Numerical study of slightly viscous flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1973, 57(04):785-796.
- [43] YAMAMOTO C T, MENEGHINI F, et al. Numerical simulations of vortex-induced vibration on flexible cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2002, 19:467-489.
- [44] LIMA A A, MENEGHINI J R, MOURELLE M. Numerical investigation of vortex-induced vibration of a marine SCR[C]// The Twenty-sixth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2007.
- [45] HERFJORD K K, DRANGE S O, KVAMSDAL T T. Assessment of vortex-induced vibrations on deepwater risers by considering fluid-structure interaction[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1999, 121(4):207-212.
- [46] YAMAMOTO C T, FREGONESI R A, MENEGHINI J R, et al. Numerical simulations of vortex-induced vibration of flexible cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19:467-489.
- [47] WILLDEN R H J, GRAHAM J M R. Multi-modal vortex-induced vibrations of a vertical riser pipe subject to a uniform current profile[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2004, 23:209-218.
- [48] 谷家扬. 张力腿平台复杂动力响应及涡激特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [49] 吴浩. 多根控制杆对细长柔性立管涡激振动抑制作用的实验及数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [50] 万德成. 深海柔性立管涡激振动流固耦合求解器软件 viv-FOAM-SJTU: 2017SR051978[P]. 2017.
- [51] 端木玉, 付博文, 万德成. 长细比 500 的柔性立管涡激振动时域响应的数值计算分析[C]// 第九届全国流体力学学术会议论文集, 南京, 2016a:132.
- [52] 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.
- [53] DUAN M Y, FU B W, WAN D C. The effect of top tension on VIV model analysis of a vertical flexible riser[C]// The Second Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, Wuxi, Jiangsu, China, November 20-23, 2016b:455-460.
- [54] 端木玉, 付博文, 万德成. 阶梯来流下细长柔性立管涡激振动的时域响应分析[C]// 2016 年船舶力学学术会议文集. 武汉, 2016b.
- [55] 付博文, 端木玉, 万德成. 均匀流中大长细比的柔性立管涡激振动的响应分析[C]// 第四届全国船舶与海洋工程 CFD 学术研讨会. 镇江, 2016:58-68.
- [56] FU B W, DUAN M Y, WAN D C. On the effect of mass ratio upon vibrations of a top tension riser[C]// The Second Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, Wuxi, Jiangsu, China, November 20-23, 2016b.
- [57] HOLMES S, OAKLEY H, CONSTANTINIDES Y. Simulation of riser VIV using fully three dimensional CFD simulations[C]// The Twenty-fifth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, 2006:563-570.
- [58] CONSTANTINIDES Y, OAKLEY O H. Numerical prediction of VIV and comparison with field

- experiments[C]// The Twenty-seventh International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2008:577-583.
- [59] CHEN Z S, KIM W J. Numerical investigation of vortex shedding and vortex-induced vibration for flexible riser models[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2010, 2(2):112-118.
- [60] TRIM A D, BRAATEN H, LIE H, et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21:335-361.
- [61] CHEN Z S, KIM W J. Numerical simulation of a large scale riser with vortex-induced vibration[C]// The Eighth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Bangkok, Thailand, November 2008.
- [62] 王成官, 王嘉松, 田中旭, 等. 海洋隔水管涡激振动的三维数值模拟研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2011, 26(4):437-443.
- [63] 范杰利, 黄维平. 细长立管两向自由度涡激振动数值研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(24):65-68.
- [64] CHEN Z S, KIM W J. Numerical investigation of vortex shedding and vortex-induced vibration for flexible riser models[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2010, 2(2):112-118.
- [65] WANG J G, FU S X, BAARHOLM R, et al. Fatigue damage of a steel catenary riser from vortex-induced vibration caused by vessel motions[J]. *Marine Structures*, 2014, 39:131-156.
- [66] 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.
- [67] 端木玉, 万德成. 单向及两向自由度低质量比弹性支撑圆柱体的涡激振动[C]// 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上), 中国海洋工程学会, 2015:71-77
- [68] WILLIAMSON C H K, GOVARDHAN R. Vortex-induced vibrations[J]. *Fluid Mechanics*, 2004, 36:413-455.
- [69] 唐世振. 考虑顺流向振动的深水顶张力立管涡激振动分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [70] 王嘉松, 蒋世全, 许亮斌. 深水钻井隔水管涡激振动特性的数值模拟研究[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(1):30-35.
- [71] CHEN W M, LI M, ZHENG Z Q, et al. Dynamic characteristics and VIV of deep water riser with axially varying structural properties[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 42:7-12.
- [72] 杨和振, 李华军, 黄维平. 海洋平台结构环境激励的实验模态分析[J]. *振动与冲击*, 2005, 24(2):129-133.
- [73] 杨和振, 李华军. 参数激励下深海立管动力特性研究[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(9):65-78.
- [74] 黄维平, 李华军. 深水开发的新型立管系统[J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(5):775-780.
- [75] HSU C S. The response of parametrically excited hanging string in fluid[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1975, 39:305-316.
- [76] HAQUANG N, MOOK D T, PLAUT R H A. A nonlinear analysis of the interactions between parametric and external excitations[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1987, 118(3):425-439.
- [77] THAMPI S K, NIEDZWECKI J M. Parametric and external excitation of marine risers[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(5):943-960.
- [78] RYU C S, ISAACSON M. Dynamic response analysis of slender maritime structure under vessel motion and regular waves[J]. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineering*, 1998, 10(2):64-72.
- [79] PARK H J, JUNG D H. A finite element method for dynamic analysis of long slender marine structures under combined parametric and forcing excitations[J]. *Ocean Engineering*, 2002, 29:1313-1325.
- [80] SUZUKI H, TAKANO K, ENOMOTO K. Axial and lateral response of a deep sea riser for scientific drilling[C]// The Twenty-third International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada, 2004.
- [81] CHATJIGEORGIOU I K, MAVRAKOS S A. Nonlinear resonances of parametrically excited risers numerical and analytical investigation[J]. *Computers and Structures*, 2005, 83:560-573.
- [82] KUIPER G L, BRUGMANS J, METRIKINE A V. Destabilization of deep-water risers by a heaving platform[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 310:541-557.

- [83] BROUWERS J J H. Asymptotic solutions for Mathieu instability under random parametric excitation and nonlinear damping[J]. *Physica D Nonlinear Phenomena*, 2011, 240(12):990-1000.
- [84] FUJIWARA T, UTO S. An experimental study of the effects that change the vibration mode of riser VIV[C]// *The 30th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE*, 2011.
- [85] CHEN W M, LI M, GUO S X, et al. Dynamic analysis of coupling between floating top-end heave and riser's vortex-induced vibration by using finite element simulations[J]. *Applied Ocean Research*, 2014, 48:1-9.
- [86] CHEN W M, LI M, ZHENG Z Q, et al. Impacts of top-end vessel sway on vortex-induced vibration of the submarine riser for a floating platform in deep water[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 99:1-8.
- [87] 唐友刚, 邵卫东, 张杰, 等. 深海顶张力立管参激-涡激耦合振动响应分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(5):282-286.
- [88] 张杰, 唐友刚, 黄磊, 等. 参数激励下深海立管多模态耦合振动特性分析[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(19):51-56.
- [89] 肖飞, 杨和振. 深海钢悬链立管 hill 不稳定性预测[J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48:583-588.
- [90] FU B W, DUAN M Y, WAN D C. Vortex-induced vibrations of a flexible cylinder experiencing an oscillatory flow[C]// *The Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, California*, 2017.
- [91] WU X D, GE F, HONG Y H. A review of recent studies on vortex-induced vibrations of slender cylinders[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2012a, 28:292-308.
- [92] KORKISCHKO I, MENEGHINI J R, GIORIA R S, et al. An experimental investigation of the flow around straked cylinders[C]// *The 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 10-15, San Diego, California, USA*, 2007.
- [93] HUANG S, SWORN A. Hydrodynamic coefficients of two fixed circular cylinders fitted with helical strakes at various staggered and tandem arrangements[J]. *Applied Ocean Research*, 2013, 43:21-26.
- [94] QUEN L K, ABU A, KATO N, et al. Investigation on the effectiveness of helical strakes in suppressing VIV of flexible riser[J]. *Applied Ocean Research*, 2014, 44:82-91.
- [95] JUAN S, JIASONG W, SHENGPING L, et al. VIV suppression for a large mass-damping cylinder attached with helical strakes[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2016, 62:125-146.
- [96] ALLEN D W, HENNING D L, LEE L. Performance comparisons of helical strakes for VIV suppression of risers and tendons[C]// *The Annual Offshore Technology Conference, OTC 16186, Houston, TX*, 2004.
- [97] ZHOU T, RAZALI, RAZALI S F M, et al. On the study of vortex-induced vibration of a cylinder with helical strakes[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27:903-917.
- [98] BEARMAN P, BRANKOVIC M. Experimental studies of passive control of vortex induced vibration[J]. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2004, 23:9-15.
- [99] KORKISCHKO I, MENEGHINI J R. Experimental investigation of flow-induced vibration on isolated and tandem circular cylinders fitted with strakes[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2010, 26:611-625.
- [100] KORKISCHKO I, MENEGHINI J R. Volumetric reconstruction of the mean flow around circular cylinders fitted with strakes[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 51:1109-1122.
- [101] HAO Z, ZHOU T, WANG X, et al. Experimental studies of vortex structures in the wake of a cylinder with helical strakes[C]// *The ASEM 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Shanghai, China*, 2010.
- [102] CARMO B S, GIORIA R S, KORKISCHKO I, et al. Two- and three-dimensional simulations of the flow around a cylinder fitted with strake[C]// *The ASEM 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil*, 2012.
- [103] FANG S M, NIEDZWECKI J M, FU S X, et al. VIV response of a flexible cylinder with varied coverage by buoyancy elements and helical strakes[J]. *Marine Structures*, 2014, 39:70-89.
- [104] BAARHOLM R, LIE H. Systematic parametric investigation of the efficiency of helical strakes[C]// *Deep*

- Offshore Technology Conference, Vitoria, Brazil, 2005.
- [105]FRANK W R, TOGNARELLI M A, SLOCUM S T, et al. Flow-induced vibration of a long, flexible, straked cylinder in uniform and linearly sheared currents[C]// Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2004.
- [106]赵伟文, 万德成. 用大涡模拟方法数值模拟 Spar 平台涡激振动问题[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2015, 30(1):40-46.
- [107]FINNIGAN T, RODDIER D. Spar VIM model tests at supercritical Reynolds numbers[C]// The International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE, San Diego, California, USA, 2007.
- [108]OAKLEY O H, CONSTANTINIDES Y. CFD truss spar hull benchmarking study[C]// The International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE, San Diego, California, USA, 2007.
- [109]MARLOW S, RAJEEV K, JAIMAN S C. Numerical modeling of vortex-induced vibrations of two flexible risers[C]// The International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE, Honolulu, Hawaii, USA, 2009.
- [110]DENG D, FU B W, WAN D C. Modal vibrations of Side-by-side and tandem vertical riser pipes experiencing a stepped current[C]// The Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, 2017
- [111]刘晓春, 郭海燕. 月牙肋抑振装置对柔性立管涡激振动抑振作用的试验研究[J]. 中国海洋大学学报自然科学版, 2011, 4:116-120.
- [112]吴浩. 多根控制杆对细长柔性立管涡激振动抑制作用的实验及数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [113]WU W B, WANG J S, JIANG S Q, et al. Flow and flow control modeling for a drilling riser system with auxiliary lines[J]. Ocean Engineering, 2016, 123:204-222.
- [114]詹禄禄. 实尺度海洋钻井隔水管涡激振动及其抑制的数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [115]朱仁庆, 张友林. 动波壁对圆柱体涡激振动的抑制作用研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(11):1203-1209.
- [116]MARTINS C A, HIGASHI E, SILVA R M C. A parametric analysis of steel catenary risers: fatigue behavior near the top[C]//The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference-ISOPE, Seattle, Washington, USA, 2000.
- [117]LARSEN C M, PASSANO E. Time and frequency domain analysis of catenary risers subjected to vortex induced vibrations[C]// The twenty-fifth international conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE, Hamburg, Germany, 2006.
- [118]DALE M N, BRIDGE C D. Measured VIV response of a deepwater SCR[C]// The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference-ISOPE, Lisbon, Portugal, 2007.
- [119]SRINIL N, WIERCIGROCH M, BRIEN P O. Reduced-order modelling of vortex-induced vibration of catenary riser[J]. Ocean Engineering, 2009, 36:1404-1414.
- [120]董永强. 深海钢悬链线立管的分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [121]高云, 宗智, 周力, 等. 钢悬链式立管涡激振动疲劳损伤分析[J]. 中国舰船研究, 2010, 5:54-59.
- [122]饶志标, 杨建民, 付世晓, 等. 剪切流下钢悬链线立管涡激振动响应研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29:4-8.
- [123]刘庆海. 钢悬链线立管涡激振动试验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.