

# 并肩排列深海立管群涡激振动试验研究

冯丽苹<sup>1</sup>,李 朋<sup>1</sup>,姜振兴<sup>1</sup>,王淑玲<sup>1</sup>,王 峥<sup>1</sup>,陈 鑫<sup>1</sup>,王 飞<sup>1</sup>,李效民<sup>2</sup>

(1.山东科技大学 土木工程与建筑学院,山东 青岛 266590;2.中国海洋大学 工程学院,山东 青岛 266100)

**摘要:**在波流联合水槽进行均匀流下5立管群涡激振动试验。立管模型长2.0 m,外流流速范围0.1~0.6 m/s。试验采用5根立管并肩排列,相邻立管以4倍立管直径等间距布置,分析管群的无量纲位移、主导频率、位移轨迹等动力响应,探索耦合干涉效应下并肩排列立管群的涡激振动规律。研究表明:锁振区内立管横向振动相互制约,位移相近,但管群在顺流向提前跳出锁振区间;通过干涉率量化干扰程度,发现干涉效应对5管群边管顺流向影响较小,干涉效应主要集中在中间3管,5管群表现出杂乱的“8”字型轨迹,但高约化速度下,受干涉效应影响,立管发生强烈振动,位移轨迹由“8”字型转变为“1”字型。

**关键词:**立管群;涡激振动;并肩布置;管间流体;干涉效应

中图分类号:P751

文献标志码:A

## Experimental study on vortex-induced vibration of side-by-side deep-sea riser group with coupling interference effect

FENG Liping<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, JIANG Zhenxing<sup>1</sup>, WANG Shuling<sup>1</sup>,

WANG Zheng<sup>1</sup>, CHEN Xin<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, LI Xiaomin<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract:** In this paper, a vortex-induced vibration experiment of five-riser group was carried out in a wave-current combined flume. The range of outflow velocity is 0.1~0.6 m/s. The risers with the length of 2.0 m were arranged side by side, and adjacent risers were arranged with equal spacing of 4 times the riser diameter. The dynamic responses of the risers such as the dimensionless displacement, dominant frequency and displacement trajectory were analyzed, and the vortex-induced vibration law of the risers arranged side by side under the interference effect was explored. The results show that the cross-flow vibration of the risers is mutually restricted and the displacement is similar in the lock-in region, but the riser group jumps out of the lock-in region ahead of time in the in-line direction. By quantifying the degree of interference by the interference ratio, it is found that the interference effect has little influence on the in-line direction of the side risers of the riser group, and the interference effect mainly concentrates on the middle three risers. The five-riser group shows a messy “8” trajectory. However, under high reduced velocities, the risers vibrate strongly due to the interference effect, and the displacement trajectories change from the shape of “8” to the shape of “1”.

**Key words:** riser group; vortex-induced vibration; side-by-side arrangement; fluid between risers; interference effect

收稿日期:2020-12-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51709161,51979257);山东省重点研发计划项目(2019GHY112061);山东科技大学土木工程与建筑学院海洋油气开发工程结构研究创新团队(2019TJKYTD01)

作者简介:冯丽苹(1996—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为海洋工程结构动力分析。

李 朋(1984—),男,山东邹城人,副教授,博士生导师,主要研究方向为海洋工程流固耦合理论,本文通信作者。

E-mail: lipeng@sdust.edu.cn

深海石油钻井系统中,海洋立管多以立管群的形式存在,通常情况下以“串”、“列”及“群”的结构形式布置。当外流流经管群时,管群中立管产生的涡激振动会对流场及周围立管的涡激振动产生影响,相较于孤立管的涡激振动,多立管间的管间流动使得流场变得更加复杂多样,这种流固耦合现象称为“涡激振动”,近年来立管的涡激振动现象始终是各国学者的研究热点<sup>[1-3]</sup>。

双管作为研究群管系统的基本单元,其涡激振动引起了研究者较多的关注。Zdravkovich 等<sup>[4]</sup>回顾了早期相关工作,包括串联、并联和交错布置的圆柱群,并将具有相同性质的两个圆柱体的弹性流体响应变化分为 3 种特征类型;Huera-Huarte 等<sup>[5]</sup>研究了低模态下间距为  $2.0 \sim 5.0D$  ( $D$  为圆柱体直径)的并列双圆柱的动力响应,从而识别出涡激振动和尾流耦合,给出了立管模型之间的振动幅度、频率和相位同步信息;基于开源程序 Open FOAM 和动网格技术,及春宁等<sup>[6]</sup>利用切应力平衡法建立水流作用下的海上风电基础局部冲刷数学模型,在雷诺数为 100 的条件下改变上下游圆柱的振动模式对串列双圆柱的流致振动及其耦合机制进行研究,结果表明无论上游圆柱静止或者振动,下游圆柱横向振幅明显大于单圆柱。除了对双圆柱/管的广泛研究外,近年来研究者还对 3 圆柱/管群进行了进一步探讨。Sumner 等<sup>[7]</sup>使用粒子图像测速和热线风速测量来研究并列布置 2 个和 3 个固定圆柱的动力响应,分析了柱间间距和流速对漩涡脱落频率、漩涡模式和涡流强度的影响。Zhang 等<sup>[8]</sup>通过试验研究了不等间距 3 圆柱体后方的尾流效应,发现在小的间距比下,圆柱体尾迹流动行为由对称变为不对称。为了更接近实际工程,王世博等<sup>[9]</sup>通过刚性模型测试了 12 个间距比下的串联 3 圆柱,发现 3 圆柱的临界间距,并与孤立圆柱进行对比,发现 3 圆柱的平均阻力均小于单圆柱的平均阻力。由于管群模型试验的实施难度大,数据采集分析困难,更多学者通过对 3 个及以上圆柱体进行数值模拟来研究 3 管群尾流结构、升阻力和漩涡脱落模式的变化规律。其中,涂佳黄等<sup>[10]</sup>通过隐式特征线分裂算子有限元方法对剪切来流下串列 3 圆柱流致振动问题进行数值模拟,揭示了剪切来流作用下串列 3 圆柱结构流致运动响应的机理;张猛等<sup>[11]</sup>采用 XFlow 求解器研究不同间距比及来流流速对三角分布立管升阻力系数及漩涡脱落模式的影响;陈威霖等<sup>[12]</sup>对串列 3 圆柱涡激振动中的弛振现象进行研究,发现平衡位置偏移、低频振动以及旋涡脱落与圆柱运动之间的时机 3 个因素导致了弛振现象的出现;对于并列 3 圆柱立管,徐晓黎等<sup>[13]</sup>基于嵌入式压强-力迭代的高精度浸入边界法发现低雷诺数下并列 3 圆柱共有六种尾流形态,分别为窄宽窄尾流、不规则尾流、反相同步尾流、调制尾流、同相同步尾流和偏斜尾流。

基于以上阐述,各国研究学者对于单管、双管及 3 立管各种布置情况下存在的涡激振动研究成果颇丰,但对于更为复杂的多管群布置研究较少,复杂柔性管群结构动力响应及耦合作用机理的探究尚不清晰。为此,针对 5 立管并肩布置下耦合尾流干涉效应开展试验研究,以 5 立管群为研究对象,以敏感间距  $4D$  为固定间距等间距并列布置,通过与孤立管进行对比,探究并肩布置下 5 立管群与孤立管动力响应规律的异同,进一步揭示多重耦合干涉作用下的立管振动响应机理。

## 1 试验设置

### 1.1 试验装置设计

试验在中国海洋大学工程水动力学实验室波流联合水槽中进行。水槽断面尺寸  $1.0 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ ,最大工作水深  $1.0 \text{ m}$ ,最大流速  $1.0 \text{ m/s}$ ,最大波高  $0.3 \text{ m}$ 。整个系统可以用来模拟规则波和稳定的流速,满足试验要求。根据试验设计方案,自主设计并制造了满足本试验要求的支撑装置,作为支撑结构在水槽中固定立管并施加初始张力。结构允许改变模型之间的间距以及施加到模型上的张力。试验中 5 根立管采用并列立式布置形式,并通过万向节连接以保证其在两个方向的自由振动,立管下部  $0.8 \text{ m}$  ( $40\%$ ) 浸没在均匀流场内的水槽中。

### 1.2 工况布置

首先进行孤立管的模型试验,对无干涉条件下立管涡激振动的频率、位移、横向及顺流向耦合振动轨迹等动力响应进行初步分析,并作为管群试验参照依据。其次,将 5 立管并肩布置,试验模型工况布置如图 1(a)装置侧视图所示,管间间距均为  $4.0D$ ,立管编号从左到右分别为  $1^\#$ 、 $2^\#$ 、 $3^\#$ 、 $4^\#$ 、 $5^\#$  (图 1(b))。

### 1.3 立管模型

立管模型选用外径 0.018 m, 内径 0.016 m, 有效长度 2.0 m, 长细比 ( $L/D$ ) 为 111.11 的光滑有机玻璃管。试验利用布拉格光纤光栅传感器测量并沿 5 立管的耦合振动, 每个立管模型沿高度分别选取 6 个位置作为信号采集测点(图 2(a)), 为了更加准确地反映立管的动力响应, 选择邻近水面测点 G4 进行分析, 如图 1(a)。试验过程中为保证数据采样稳定性, 在立管前端 2 m 处采用多普勒流速计进行监测, 每级外流趋于稳定后采样, 采样时间为 40 s。每个测点成  $90^\circ$  布置 4 个光纤光栅应变传感器, 测点详图如图 2(b) 所示, 测量横向和顺流向的动态应变如图 2(c) 所示。

## 2 结果讨论

### 2.1 位移分析

图 3 给出孤立管及 5 管群在横向 (CF) 上的无量纲位移均方根值随约化速度 ( $Ur$ ) 的变化。5 管群与孤立管的整体变化趋势相似, 随约化速度的增加逐步增大, 但低约化速度下, 5 管群立管的振动位移与孤立管相比增长较快, 高约化速度下振动位移变化趋于平缓。值得注意的是, 在  $Ur=3.36$  时, 5 管群中的立管 1<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 的位移均方根值与孤立管极为相近, 高于 5 管群其他立管, 而在高约化速度下, 立管 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 的位移曲线走势却区别于孤立管与其他立管, 振幅趋于稳定。为了探究这一有趣现象, 图 4 给出了 5 管群在  $Ur=3.36$ 、6.73、10.10 时的横向位移时程曲线及无量纲位移均方根图。姜敏<sup>[14]</sup>指出当孤立管处于锁振状态时, 约化速度所处的区间通常为  $[6.0, 7.5]$ 。在  $Ur=3.36$  时, 5 管群中的边管 1<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup> 的振动位移较大且规律, 由于其两边流场仅受一侧间隙流干扰, 在低约化速度时对管群中的边管振动影响较小。此外, 由于两侧间隙流破坏了立管规律的漩涡泄放, 导致中间管出现了不同程度的间歇变化。 $Ur=6.73$  时, 立管保持稳定的大幅振动, 管群中立管横向振动周期规律相似且振幅相近, 主要原因是锁振区

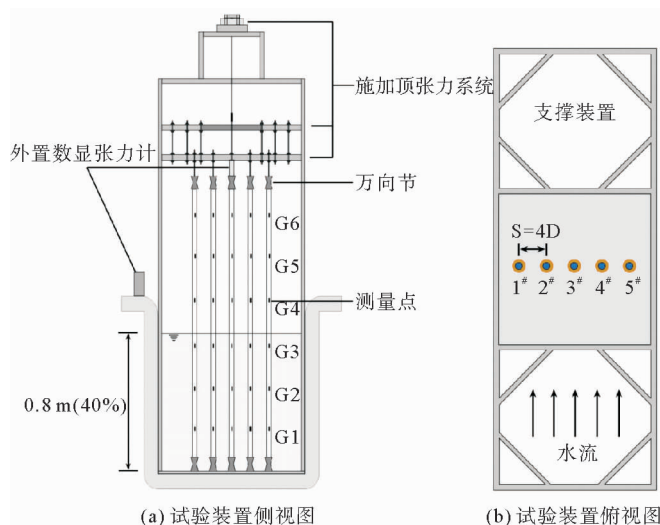


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

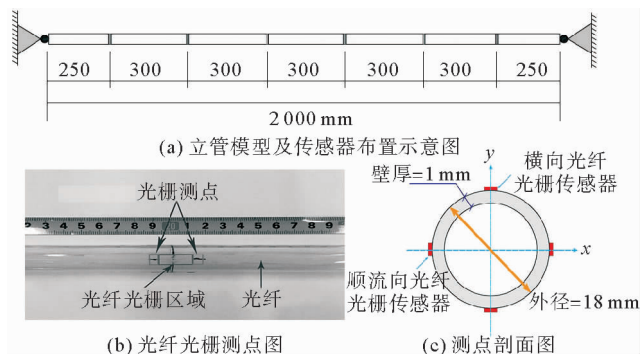


图 2 光纤光栅测点布置图

Fig. 2 Layout of fiber bragg grating measuring points

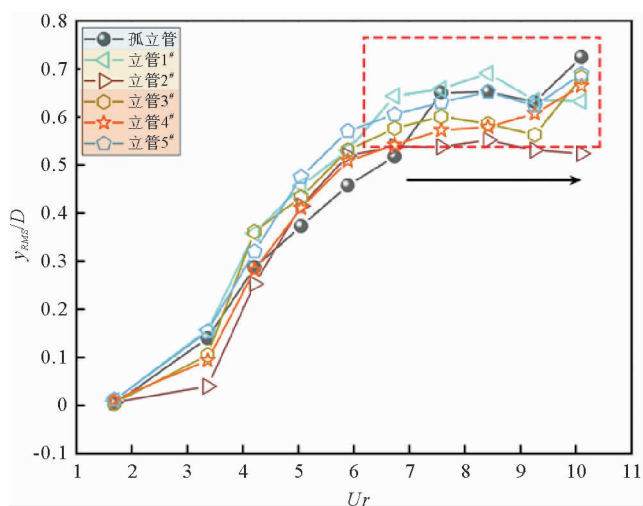


图 3 孤立管及 5 立管群横向位移均方根值随约化速度的变化曲线图

Fig. 3 Curve of RMS displacement of isolated riser and five-riser group with reduced velocity in cross-flow direction

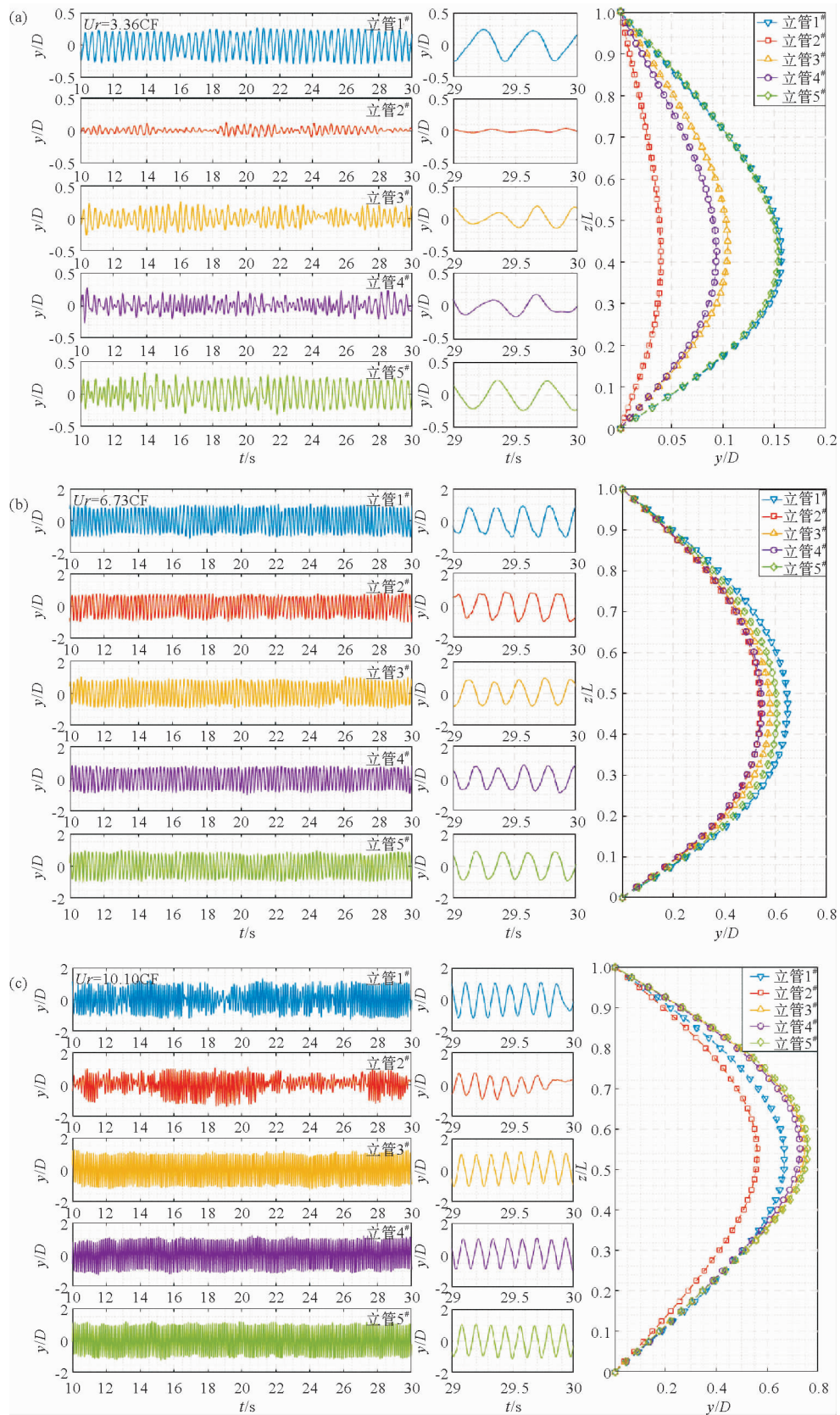


图 4  $Ur=3.36, 6.73, 10.10$  时 5 立管群横向位移时程曲线图及无量纲位移均方根沿立管展向变化图

Fig. 4  $Ur=3.36, 6.73$  and  $10.10$ , the time history curve of CF displacement of the five-riser group and the change diagram of the RMS of the dimensionless displacement along the riser extension direction

间内立管振动较为剧烈,干涉效应及尾流反馈对立管的横向振动影响较小。同时,由于管群中各立管互为边界限制,导致立管的横向振动位移稳定且接近。随着约化速度的继续增加,在 $Ur=10.10$ 时,立管 $1^\#$ 、 $2^\#$ 出现了不规律的间歇振动,试验现场可以看到其尾流遭到间隙流的破坏,其余立管尾流的干扰导致立管 $1^\#$ 、 $2^\#$ 出现相对于其余立管较小的展向位移,而其余立管仍产生规律的漩涡泄放。通过以上分析可以发现,锁振区间内5管群各立管的横向振动相互制约,受约化速度影响小,干涉作用对位移变化不大,位移大小相近。这种制约从立管进入锁振区间开始持续保持,并不会随着立管跳出锁振区间而消失。

图5给出了孤立管及5管群顺流向(IL)无量纲位移均方根值随约化速度的变化,由图观察发现,5管群立管在 $Ur \geq 3.36$ 时,位移均方根与孤立管类似出现骤增现象,振动位移在 $5 \leq Ur \leq 7$ 时范围内达到峰值,随后出现骤降现象。Chaplin等<sup>[15]</sup>指出当从一种模式切换到另一种模式时,立管会瞬间经历较大的位移偏移,如图5虚线框部分所示。造成这种现象的主要原因是间隙流干涉及复杂的尾流反馈作用导致立管提前跳出锁振区间,进入模态转换区域。随着约化速度的增加,立管振动位移再次出现小幅度增加,立管开始以二阶模态为主导振动。为此,图6给出了5管群在 $Ur=3.36$ 、 $6.73$ 、 $10.10$ 时的顺流向位移时程曲线及展向位移图。在顺流向,由于管间流体的干涉导致立管后方的剪切层出现失稳,周期性的漩涡泄放被破坏,5管群立管在低约化速度时不再表现为周期、规律性的振动,同时立管两侧的间隙流干涉使得5管群中间3管的振动位移与两边管相比较小。通过分析无量纲位移均方根图发现,5管群中间3立管振动位移接近,两边管较其余立管振动位移略低。当 $Ur=10.10$ 时,5管群立管的振动不再规律,强烈的间隙流干涉和尾流干涉导致其位移时程曲线出现了杂乱的振动,立管的顺流向振动位移减小。此外,通过观察图中无量纲位移均方根发现,5管群存在明显的1个波谷和2个波峰,表明此时立管由二阶模态主导,波谷和波峰对应的位置分别称为“节点”和“反节点”。综合上述分析发现,并肩布置下的5管群,间隙流干涉和尾流相互干涉对其顺流向振动影响显著,导致立管顺流向振动提前跳出锁振区间,激发出高阶振动模态。

基于模态分解法获取立管振动模态权重,可以更加清晰地观察并肩布置下不同管群的干涉效应对立管振动模态的影响。图7给出了孤立管及5管群的模态权重随约化速度的变化情况。由图7可知,5管群横向模态权重变化趋势与孤立管类似,始终由一阶模态占据主导,并在 $Ur=6.0$ 后变化趋势趋于稳定,但各阶模态所占的权重大小不同。通过图8中3个约化速度下5管群的时空位移演化,发现5管群的结构振动相似,均表现为驻波特性。驻波效应是振动响应在时间上发生变化的振动现象。 $Ur=6.73$ 时,立管处于锁振区间,驻波行为最明显,说明此时5管群振动强烈。基于以上分析可以发现,立管的振动激励除了涡激振动外,还存在间隙流干涉和尾流反馈,这些复杂的耦合激励由于管间的互相约束,并没有对立管横向振动模态造成较大的影响,因此5管群的横向模态权重变化相似。

由图7右图可以看出,立管顺流向模态权重与横向有很大不同:在顺流向上,5管群与孤立管的二阶模态权重随约化速度增加开始增大,但明显看出,在试验流速区间内,孤立管在顺流向始终由一阶模态占据主导地位,而5管群在高约化速度下由于间隙流及耦合尾流的影响,主导模态发生变化,立管进入模态转换区间,并逐渐由二阶权重占据主导。同时,图9中顺流向3个约化速度下的位移时空演化也表现出不同程度的行波特性。行波效应是振动响应在空间和时间上同时发生变化的振动现象。由于行波方向的能量传递方向始

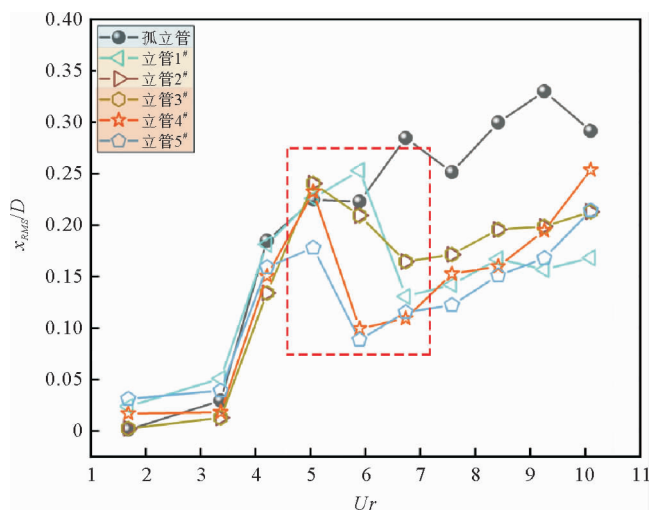


图5 孤立管及5立管群顺流向位移均方根值随约化速度的变化曲线图

Fig. 5 Curve of RMS displacement of isolated riser and five-riser group with reduced velocity in in-line direction

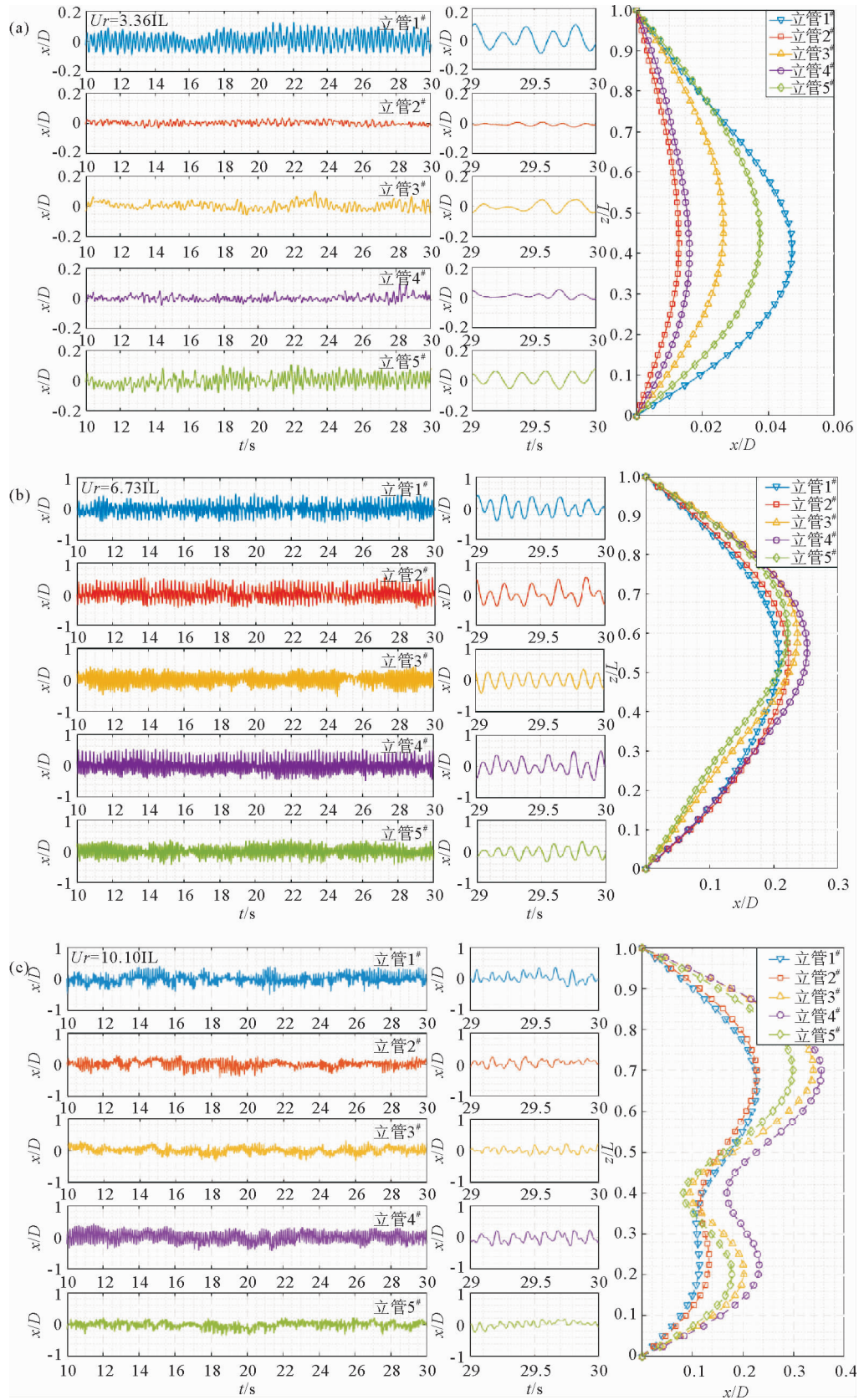


图6  $Ur=3.36, 6.73, 10.10$  时5立管群顺流向位移时程曲线图及无量纲位移均方根沿立管展向变化图  
 Fig. 6  $Ur=3.36, 6.73$  and  $10.10$ , the time history curve of IL displacement of the five-riser group and the change diagram of the RMS of the dimensionless displacement along the riser extension direction

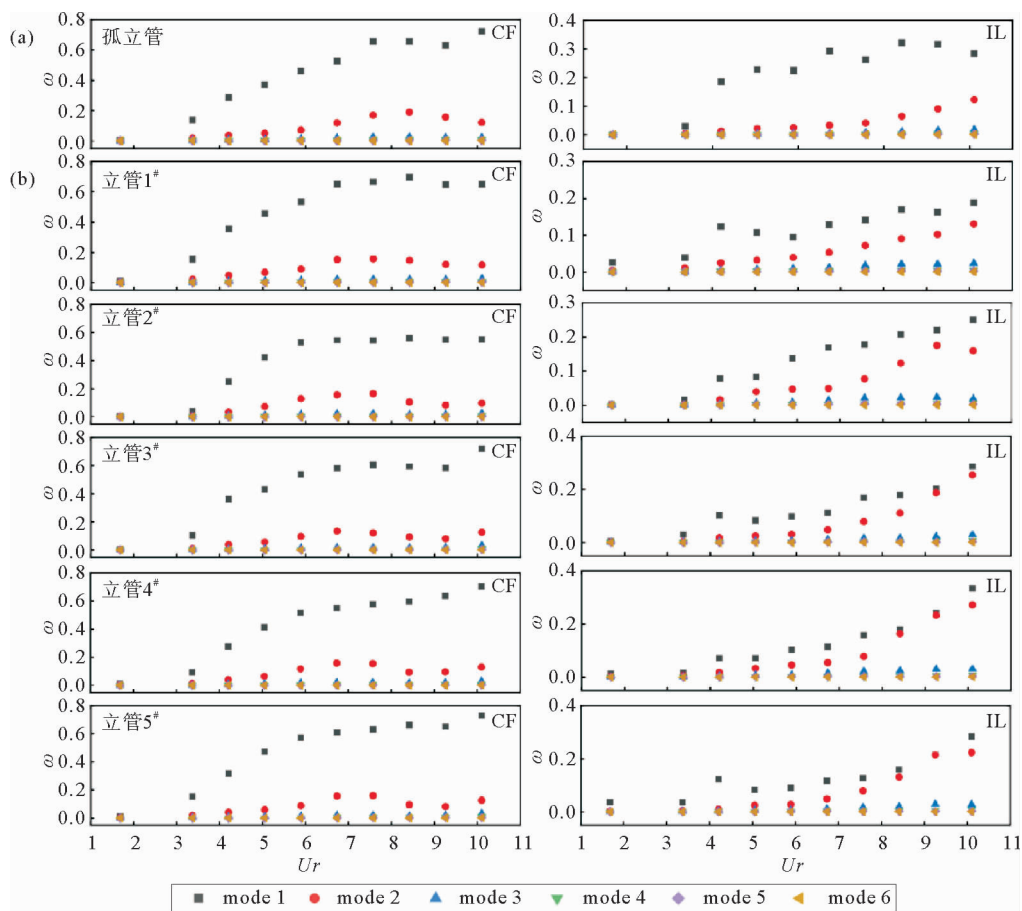
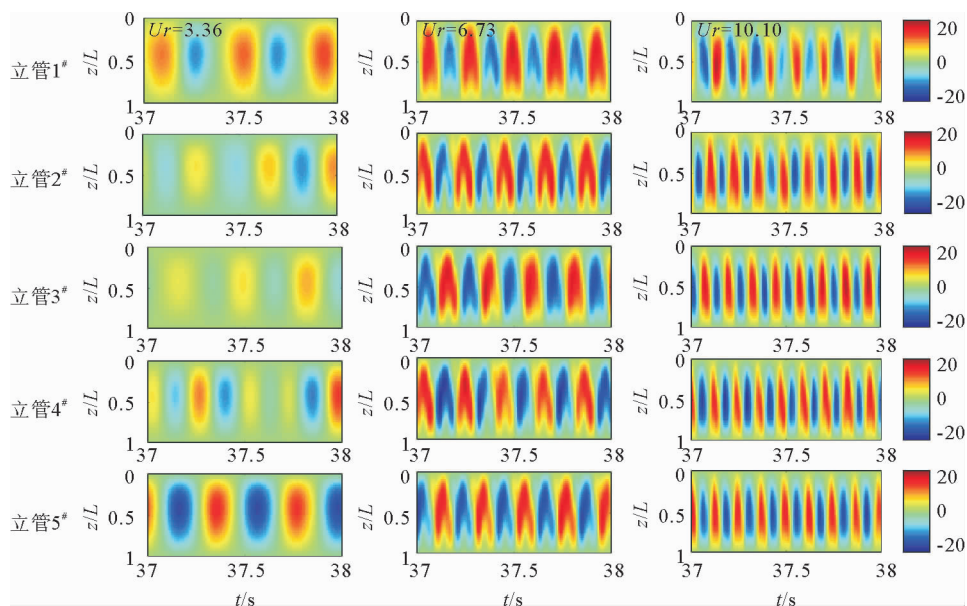


图7 孤立管与5立管群沿约化速度变化的模态权重散点图

Fig. 7 Scatter plot of modal weights of isolated rise and five-riser group along the reduced velocity

图8  $Ur=3.36, 6.73, 10.10$  时5管群的横向位移时空演化图Fig. 8  $Ur=3.36, 6.73$  and  $10.10$  the temporal and spatial evolution diagram of the CF displacement of the five-riser group

终是由高能量区向低能量区域,即行波从立管底部向顶部传播,这就意味着立管的振动能量主要集中在底部区域内。当  $Ur=10.10$  时,管群涡激振动响应有轻微的行波行为,是驻波与行波模型的混合,5 管群复杂的尾流耦合激励和两侧间隙流的干涉效应叠加,导致立管阻力系数的大幅度增大,立管振动频率骤增,当立管结构承受高阶频率激励时,导致行波效应出现。值得注意的是,更高阶模态权重也随着约化速度出现小幅度增加,多模态参与振动导致立管更为复杂。较其他管群更为复杂的耦合尾流激励,是导致 5 管群更早地跳出锁振区间进入模态转换区域的主要原因。

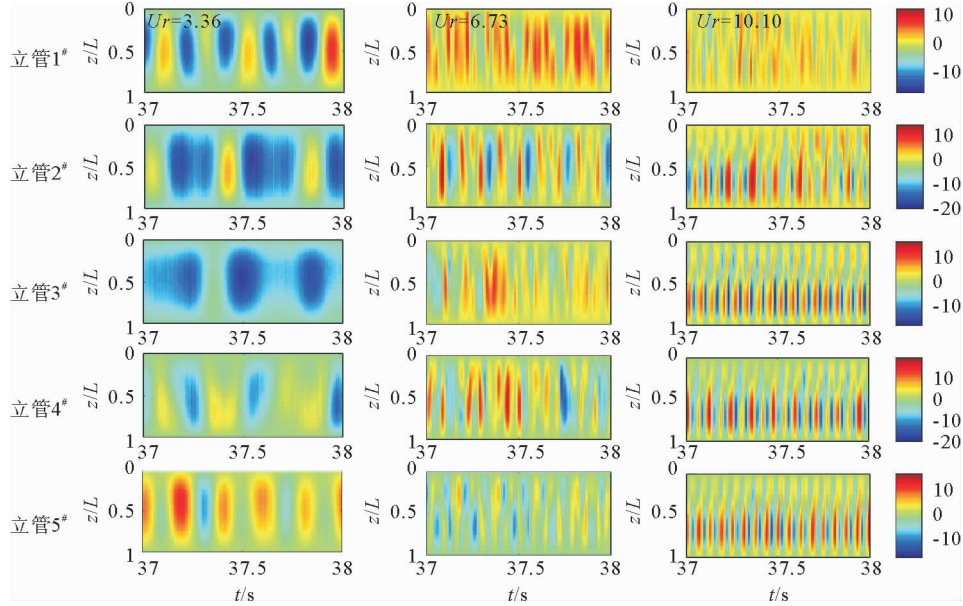


图 9  $Ur=3.36、6.73、10.10$  时 5 管群的顺流向位移时空演化图

Fig. 9  $Ur=3.36, 6.73$  and  $10.10$  the temporal and spatial evolution diagram of the IL displacement of the five-riser group

## 2.2 频率分析

图 10 给出孤立管及 5 管群横向主导频率沿约化速度的变化,由图可知,孤立管与  $3.36 \leq Ur \leq 8.40$  时的 5 管群无量纲主导频率沿约化速度的增长均遵循斯特劳哈尔定律,而 5 管群的边管受干涉效应的影响在低约化速度时出现小幅度增加,在  $8.40 < Ur \leq 10.10$  时,5 管群的主导频率出现大面积离散分布,如图 10 中椭圆形虚线框中所示。发生该现象的原因是高约化速度下,管间挤压来流产生高动量流体,导致 5 管群中的立管振动频率骤增,同时间隙流与尾流反馈耦合干涉导致 5 管群的频率出现差异。

图 11 为孤立管及 5 管群顺流向与横向主导频率比  $f_x/f_y$  随约化速度的变化散点图。虽然干涉作用会影响立管的振动频率,但在锁振区间内,孤立管和 5 管群主导频率仍符合顺流向为横向的 2 倍规律,这意味着干涉效应对锁振区间内立管的两方向的频率比影响较小。随着约化速度的增加,5 管群中的间隙流加剧立管振动现象,导致横向主导频率增加,从而立管 1#、2#、4# 的频率比降低至 1 附近,此时立管两个方向发生同频振动。有趣的是,立管 3#、5# 却仍然以频率比为 2:1 振动,说明虽然横向频率出现增加,但顺流向的主导频率会随之增加,立管仍然表现出规律的漩涡泄放,与图 5 中立管 3# 位移时程曲线相符合。

## 2.3 位移轨迹

立管位移轨迹是横向与顺流向振动非线性耦合的结果,图 12 给出了孤立管及 5 管群沿约化速度的位移轨迹图。由图 12 观察发现,孤立管在锁振区间的位移轨迹呈规律的“8”字型,此时立管两个方向振动满足频率比接近 2,高约化速度下,孤立管处于模态转换区域,轨迹表现为“棒”状型。5 管群中的立管在  $Ur \in [4.20, 6.73]$  时呈现出“8”字型振动,与孤立管不同的是,该“8”字型的轨迹更加杂乱,这是由管间流体参与导致宽频、随机的立管振动响应引起的。高约化速度下,受到外部极大激励的影响,孤立管位移轨迹逐渐由“8”字型转变为“棒”状型,而 5 管群受到大流速激励的同时,间隙流及尾流的干涉作用导致立管顺流向的一阶模态权重下降、二阶振动模态权重上升,顺流向与横向的频率比逐渐高于 2,立管发生不稳定振动,振动位移轨

迹较早出现出“1”字型或“棒”状型,其中立管 3<sup>#</sup> 受到双重间隙流的影响,较边管相比尾流受到更严重的破坏,位移轨迹从“8”转变为“1”字型时的约化速度提前。随着约化速度的增加,间隙流挤压的高动量流体促使 5 管群出现两种模态的重叠区域,立管出现模态选择问题,立管的顺流向振动位移降低,各管的“1”字型位移轨迹开始缩短,逐渐转变成“S”型轨迹,这表明管群间存在的多重尾流和间隙流干涉会显著影响立管的振动位移轨迹。

#### 2.4 干涉率

为了更好地量化干涉效应对 5 管群涡激振动的影响,引入“干涉率(interference ratio,  $I$ )”这一概念,其定义为 5 管群各立管与孤立管位移均方根值的差值与对应约化速度下无量纲位移均方根的比值。横向、顺流向位移干涉效率分别为  $I_y$ 、 $I_x$ ,其计算公式为:

$$I_y = \frac{y_{RMS} - y_{0RMS}}{y_{0RMS}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$I_x = \frac{x_{RMS} - x_{0RMS}}{x_{0RMS}} \times 100\%。 \quad (2)$$

其中: $y_{RMS}$ 、 $x_{RMS}$  分别为立管群中每个立管的横向、顺流向位移均方根, $y_{0RMS}$ 、 $x_{0RMS}$  分别为孤立管横向、顺流向位移均方根。

图 13 和图 14 分别给出了 5 立管横向、顺流向两个方向的干涉率随约化速度的变化关系,其中,由于干涉率为位移敏感参数,低约化速度时立管由涡激振动产生的位移微弱,轻微的扰动可能会引起干涉率的大幅度变化,所以在后续的干涉率分析中,该部分不作为主要研究对象。而由于  $Ur \geq 4.20$  时的干涉率变化较小,在图中过于密集,故在图 13、图 14 右子图给出了放大后的图形。图中可知 5 管群干涉率表现出相同的变化趋势,极低约化速度下正值较大,随着约化速度的增加,5 管群的边管始终在 0 附近变化,而中间 3 管干涉率从正值逐渐下降到负值,并逐渐趋于稳定,最小值接近 28%,此时管间流体对立管振动产生负反馈效应,说明在高约化速度时管群间存在的间隙流干涉和尾流反馈对边管影响较小,而对中间 3 管持续存在振动加剧干涉,造成这种现象的主要原因是立管两侧存在的双重间隙流叠加干涉。

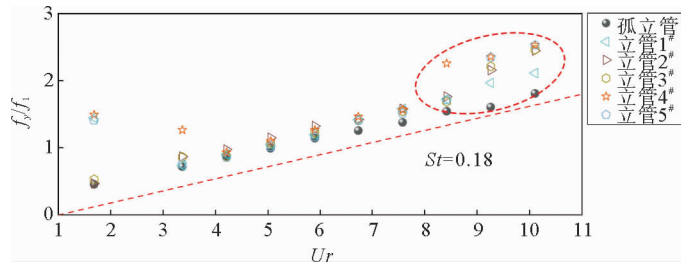


图 10 孤立管及 5 立管群横向主导频率随约化速度变化的散点图

Fig. 10 Scatter plot of CF dominant frequency variation with reduced velocity for isolated riser and five-riser group

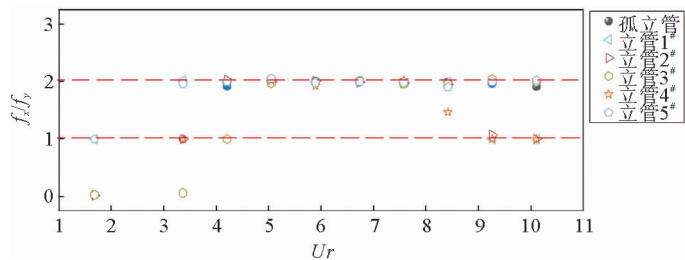


图 11 顺流向与横向主导频率比随约化速度变化的散点图

Fig. 11 Scatter plot of the ratio of IL to CF dominant frequency varying with reduced velocity

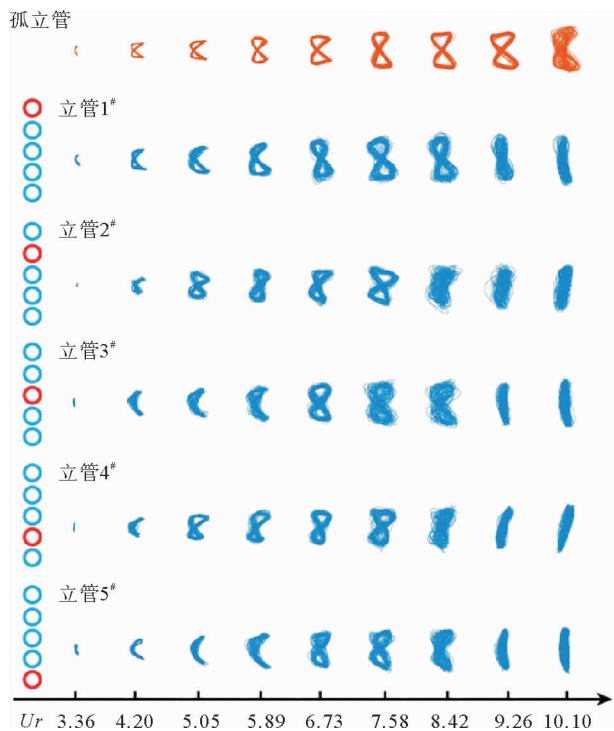


图 12 孤立管及 5 管群立管沿约化速度变化的位移轨迹图

Fig. 12 Displacement trajectories of isolated riser and five-riser group riser along reduced velocity

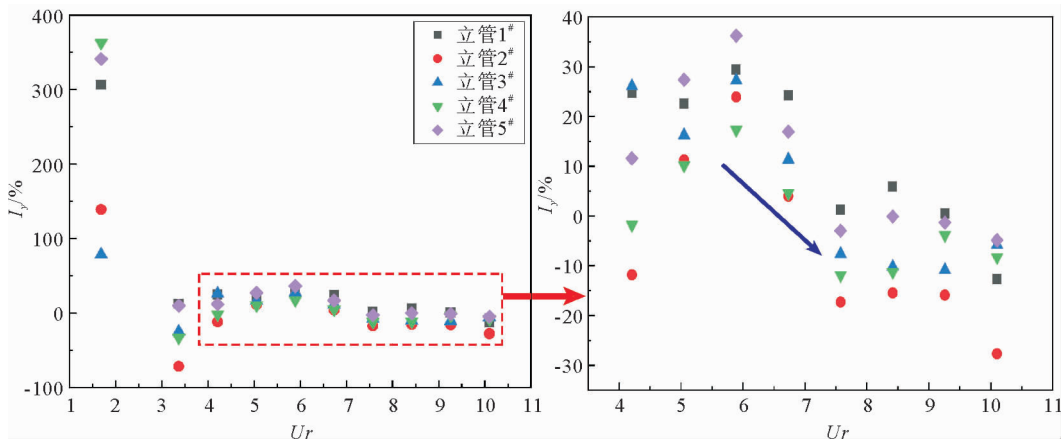


图 13 沿约化速度变化的 5 立管群横向干涉率散点图

Fig. 13 Scatter plot of CF interference rate of five-riser group changing along reduced velocity

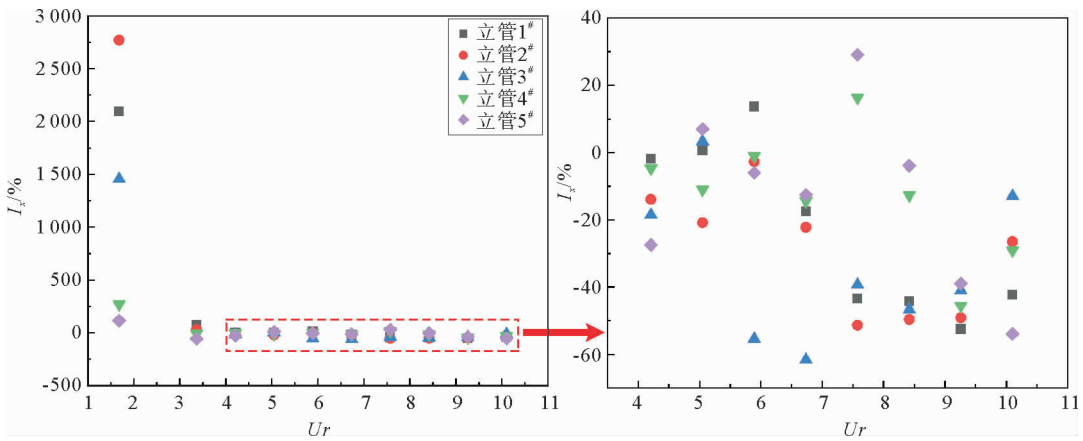


图 14 沿约化速度变化的 5 立管群顺流向干涉率散点图

Fig. 14 Scatter plot of IL interference rate of five-riser group changing along reduced velocity

通过观察顺流向的干涉率发现,在低约化速度时,5 管群的干涉率为正值,管群间存在的间隙流干涉和尾流反馈在此约化速度区间内对立管振动产生抑制效果,而在  $U_r > 4$  以后,由图 14 右图发现,5 管群的干涉率始终稳定在  $[-62\%, 29\%]$  的范围内,在  $U_r = 5.05$  后出现下降情况,其中立管 3# 极为明显,最大降幅达到 62%,说明在此约化速度下,中间管受管间流体及尾流反馈的干涉作用最强。随着约化速度的增加,5 管群的干涉率始终为负值,说明在高约化速度下管群间存在的间隙流干涉和尾流反馈对管群始终有较大影响。

### 3 结论

针对均匀流下并肩排列 5 立管涡激振动的动力响应特性进行试验研究,得到以下结论:

- 1) 受干涉效应的影响,低约化速度下孤立管与 5 管群边管位移大小相近并高于中间 3 管,而锁振区间内 5 管群各立管的横向振动相互制约,位移大小相近。而在顺流向,干涉效应使得立管提前跳出锁振区间,位移出现波动变化。
- 2) 在两侧间隙流叠加干涉和多重尾流反馈的作用下,5 管群更易激发出更高阶模态,高约化速度下,5 管群中部分立管出现两方向同频振动现象。
- 3) 由 5 管群的振动轨迹图发现,由于多重尾流反馈的影响,5 管群的振动轨迹不再是循环的极限环解,“8”字型振动轨迹与孤立管相比更加杂乱。
- 4) 就 5 管群立管的干涉率而言,在横向,管群间存在间隙流干涉和尾流反馈对边管影响较小,而对中间 3 管持续存在振动加剧干涉;在顺流向,高约化速度时管群间存在的管间流体和尾流反馈对中间管的干涉作用最强。

## 参考文献:

- [1] 芮雪,陈东阳,王国平.海洋热塑性增强管(RTP)涡激振动数值计算[J].力学学报,2020,52(2):235-246.  
RUI Xue, CHEN Dongyang, WANG Guoping. Numerical calculation of vortex-induced vibration of reinforced thermoplastic pipe[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(2): 235-246.
- [2] 娄敏,钱刚.海洋立管涡激振动实验设计[J].实验室研究与探索,2020,39(4):59-62.  
LOU Min, QIAN Gang. Experimental design of vortex-induced vibration of marine riser[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(4): 59-62.
- [3] 李朋,郭海燕,刘景伟,等.阶段流下大长细比深海立管抑振敏感性试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(4):93-101.  
LI Peng, GUO Haiyan, LIU Jingwei, et al. Experimental study on sensibility of VIV suppression of deep-sea risers with large slenderness ratio in a stepped current[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(4): 93-101.
- [4] ZDRAVKOVICH M M. Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders[J]. Journal of Sound and Vibration, 1985, 101(4): 511-521.
- [5] HUERA-HUARTE F J, GHARIB M. Flow-induced vibrations of a side-by-side arrangement of two flexible circular cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27: 354-366.
- [6] 及春宁,陈威霖,黄继露,等.串列双圆柱流致振动的数值模拟及其耦合机制[J].力学学报,2014,46(6):862-870.  
JI Chunling, CHEN Weilin, HUANG Jilu, et al. Numerical investigation on flow-induced vibration of two cylinders in tandem arrangements and its coupling mechanisms[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(6): 862-870.
- [7] SUMNER D, WONG S S T, PRICE S J, et al. Fluid behaviour of side-by-side circular cylinders in steady cross-flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 1999, 13: 309-338.
- [8] ZHANG H J, ZHOU Y. Effect of unequal cylinder spacing on vortex streets behind three side-by-side cylinders[J]. Physics of Fluids, 2001, 13(12): 3675-3686.
- [9] 王世博,刘夕强,刘小兵.串列三圆柱平均风压和平均阻力的干扰效应[J].工程力学,2020(增1):261-264.  
WANG Shibao, LIU Xiqiang, LIU Xiaobing. Interference effects on the average wind pressure and average drag force in tandem three circular cylinders[J]. Engineering Mechanics, 2020(S1): 261-264.
- [10] 涂佳黄,谭潇玲,邓旭辉,等.平面剪切来流作用下串列布置三圆柱流致运动特性研究[J].力学学报,2019,51(3):787-802.  
TU Jiahuang, TAN Xiaoling, DENG Xuhui, et al. Study of flow-induced motion characteristics of three tandem circular cylinders in planar shear flow[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(3): 787-802.
- [11] 张猛,刘冉,赵桂峰,等.三角分布的海洋立管涡激振动数值分析[J].振动与冲击,2019,38(19):123-130.  
ZHANG Meng, LIU Ran, ZHAO Guifeng, et al. Numerical simulation for vortex-induced vibration of marine risers with triangular distribution[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(19): 123-130.
- [12] 陈威霖,及春宁,许栋.低雷诺数下串列三圆柱涡激振动中的弛振现象及其影响因素[J].力学学报,2018,50(4):766-775.  
CHEN Weilin, JI Chunling, XU Dong. Galloping in vortex-induced vibration of three tandem cylinders at low Reynolds numbers and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(4): 766-775.
- [13] 徐晓黎,及春宁,张力,等.层流条件下并列三圆柱涡激振动响应与尾流形态[J].计算力学学报,2018,35(5):643-649.  
XU Xiaoli, JI Chunling, ZHANG Li, et al. Flow-induced vibrations of three side-by-side cylinders in laminar flow: Vibration response and near-wake patterns[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2018, 35(5): 643-649.
- [14] 娄敏.海洋输流立管涡激振动试验研究及数值模拟[D].青岛:中国海洋大学,2007:16-17.  
LOU Min. Experimental study and numerical simulation on the vortex-induced vibration of marine risers conveying fluid [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007: 16-17.
- [15] CHAPLIN J R, BEARMAN P W, HUARTE F J H, et al. Laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a vertical tension riser in a stepped current[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 21(1): 3-24.

(责任编辑:吕海亮)