

平台耦联作用下的悬链线型柔性立管涡激振动响应实验

朱红钧, 刘文丽, 宋金泽, 高岳

西南石油大学石油与天然气工程学院, 成都 610500

摘要 悬链线型柔性立管在涡激振动与平台涡激运动的耦联作用下, 存在潜在疲劳失效风险。采用高速摄像机非介入式监测了柔性立管的平面内与平面外振动位移, 并利用激光位移传感器同步测量了上部平台的横荡和纵荡位移。实验判别了平台运动与立管振动的强耦联和弱耦联, 其中, 强耦联又分为立管振动主导和平台运动主导2种。立管平面内与平面外的振动本身存在耦合效应, 其耦合强度有明显的时空变化。受平台纵荡的影响, 立管上部的平面内、平面外振动出现解耦现象。由于立管振动空间上存在频率竞争, 基于机器学习预测不同位置振动所需的样本数不同, 频率竞争剧烈的立管中部所需样本数最多, 其次是受到平台运动影响的上部管段。

关键词 平台运动; 涡激振动; 耦合响应; 时空演变

大长径比海洋柔性立管是深水油气输送的纽带, 在海流激励下存在涡激振动(VIV)响应, 易发生疲劳损伤。为保障其安全服役, 近年来, 大量研究人员开展了柔性立管涡激振动响应研究, 从海流速度剖面、立管管型、端部约束条件等方面分析了立管的振动响应特性。

大部分研究人员开展了两端固定、两端铰接的柔性立管振动响应分析。Gou等^[1]、Han等^[2]、Pang等^[3]发现柔性立管振动在流向存在多频参与和沿轴

向传递的行波效应, 振动轨迹的非周期性和立管响应的空间非对称性较明显。Gedikli等^[4]发现流向振动的模态切换与横向振动有关, 体现了2个方向振动的耦合作用。Du等^[5]、Fan等^[6]通过实验和模拟发现立管横向振动由多频参与, 沿管轴传递呈现行波特征, 而流向振动频率单一, 呈现驻波特征, 表明2个方向的振动不同步, 存在空间差异。

海洋立管顶部常铰接于平台底部, 故两端边界条件不同。大量研究人员开展了顶部铰接—底部

收稿日期: 2023-06-22; 修回日期: 2023-07-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979238); 四川省杰出青年科学基金项目(2023NSFSC1953); 四川省中央引导地方科技发展专项(2023ZYD0140)

作者简介: 朱红钧, 教授, 研究方向为海洋管柱多场多相耦合力学, 电子信箱: ticky863@126.com

引用格式: 朱红钧, 刘文丽, 宋金泽, 等. 平台耦联作用下的悬链线型柔性立管涡激振动响应实验[J]. 科技导报, 2024, 42(13): 62-72;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.06.00934

固定的直立立管涡激振动响应研究。Seyed-Aghazadeh等^[7]通过实验对比了不同边界条件的立管振动,指出边界条件主要影响了流向振动的幅度与频率。Gao等^[8]通过模拟发现,立管长径比大于200时,端部边界条件对振幅、频率及频带的影响减小。

除端部约束条件外,顶部平台运动也对立管振动有较大影响。Kuiper等^[9]结合实验测试和有限元模拟分析了浮式平台垂荡对直立立管稳定性的影响,发现平台垂荡振幅和频率可能会使立管失稳,引起显著的横向振动,并提出2种失稳机制:(1)参数共振;(2)局部动力屈曲。陈伟民等^[10-11]运用有限元对平台-立管整个系统响应进行了模拟研究,发现平台垂荡运动激发出更高阶的立管振动,振幅增加约10%,但随着立管振动模态阶数的升高,顶部垂荡对立管VIV的影响越来越小^[12]。Wang等^[13-14]对存在顶部激励的悬链线型立管开展了模型实验研究,分析了顶部激励Keulegan-Carpenter(KC)数对立管振动的影响^[13],观测到振动沿管轴传播至端部时出现反射波和驻波^[14]。付博文等^[15]基于切片理论开展了平台横荡运动下柔性立管的涡激振动模拟,并与Wang等^[16]的实验结果进行了对比验证,发现顺流向振动主要包括3部分:低频振动、立管转向时引起的一阶振动、泄涡引起的二阶振动。而横流向振动存在初始、锁定、去同步化3个分支。

目前,同时考虑平台纵荡和横荡运动对悬链线型柔性立管涡激振动响应的实验研究还相对较少,尚未见平台耦联作用下立管3个维度上的模态竞

争与耦合效应方面的研究分析。因此,本研究开展平台耦联作用下悬链线型柔性立管涡激振动响应的概化模型实验。

1 实验方法

1.1 实验布置

实验布置如图1所示,实验采用概化模型,悬链线型柔性立管模型为外径 $D=8$ mm、内径 $D_i=6$ mm的透明硅胶管,测试管段长 $l=1$ m(长径比为 $l/D=125$)、高 $h=0.65$ m,以自由悬垂的悬链线形状布置在水槽测试段中线所在的纵剖面上,凹面迎流。柔性立管底部固定于水槽底壁,顶部铰接于浮式平台底部。浮式平台为长方体模型,长为93 mm、宽为52 mm、高为40 mm,吊装在悬臂支撑杆下方,浸没于静水面下方的高度为10 mm,悬臂支撑杆由弹簧支撑,形成双自由度的弹簧-质量系统,实现浮式平台在水平面的纵荡和横荡运动。浸没于水中的立管横向阻塞率为1.6%,远小于5%的临界阻塞率要求^[17-18]。

为开展柔性立管振动位移的非介入光学测试,在模型立管外壁自上而下均匀标设了30个宽度为6 mm的黑色标记圈,相邻2个标记圈的中心间距为26 mm。一台高速摄像机位于水槽侧面,正对立管所在的垂直纵剖面(XOZ面),监测立管的平面内振动位移;一台高速摄像机布置于水槽底部,仰视拍摄立管的平面外振动。实验中,高速摄像的监测频率为100帧/s,即1 s可以得到100张数字图像。

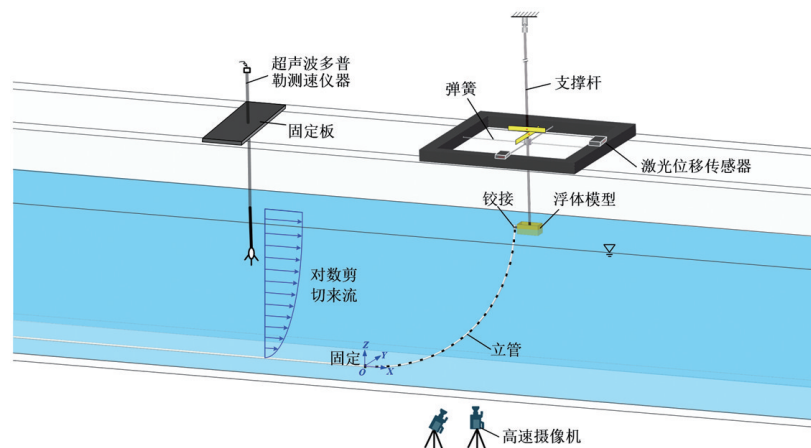


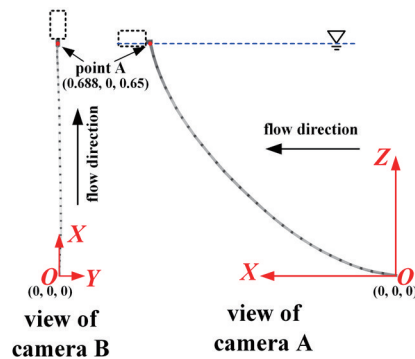
图1 平台耦联作用下悬链线型柔性立管涡激振动响应实验布置示意

该非介入式测试手段与图像后处理方法在前期实验研究中已成功运用,测试流程与误差分析见文献[19]~[22]。在监测立管振动同时,利用2台激光位移传感器同步监测平台在 X 方向(流向)和 Y 方向(横向)的运动位移。

上游来流通过整流装置整流后,在水槽内逐步发展为对数剪切流,在实验测试段上游1 m处利用超声波多普勒测速仪监测了来流速度剖面。实验一共测试了18组来流速度作用下的平台运动与立管振动响应,由于实际流速沿垂向存在变化,为更好地区别实验组次,定义沿水深的平均约化速度为

$$\bar{U}_r = \frac{\bar{U}}{f_{o,i}^w D} \quad (1)$$

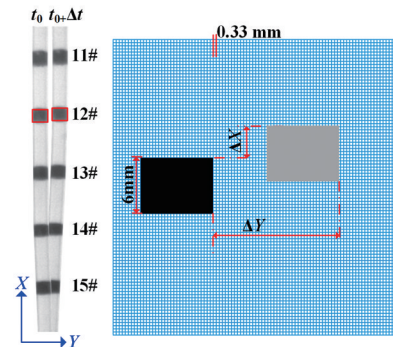
式中, \bar{U} 为来流沿水深的平均速度(单位:m/s), $f_{o,i}^w D$ 为静水中立管平面外振动的一阶固有频率(单位:Hz)^[17]。实验测试的平均约化速度范围为4.40~39.33,对应的平均雷诺数范围为150~1330。



(a) 坐标定义

1.2 图像后处理方法

将初始时刻拍摄的柔性立管图像作为模板,在后续记录的每一帧图像上定义 X 、 Y 、 Z 空间坐标,并将每个标记圈所占有的像素单元与实际宽度(6 mm)进行关联,即得到每个标记圈位置单位尺寸所占据的像素单元数。然后,将每一帧图像的每个标记圈与初始图像进行对比,得到每个标记圈平移的像素单元数,换算得到其实际振动位移。将2 min记录的图像按时序批量处理,即得到各个标记圈2 min的位移时程曲线。对时程曲线进行滤波降噪后,由快速傅里叶变换得到相应的振动频率^[22-24]。如图2所示,以12#标记圈为例,当标记圈从初始位置运动到 $t_0 + \Delta t$ 时刻,在 X 向和 Y 向平移的像素单元数约为10和43,单个像素单元对应0.33 mm,换算得到的运动位移增量分别为 $\Delta X = 3.30$ mm、 $\Delta Y = 14.19$ mm。



(b) 图像识别与位移获取

图2 平台耦联作用下悬链线型柔性立管涡激振动响应实验后处理示意

1.3 衰减实验测试

实验前,首先对浸没于静水中充满水的柔性立管模型和上方浮式平台模型进行了自由振动的衰减测试,以得到其固有频率。衰减测试时,分别在平面内和平面外给立管施加了一个初始位移后释放^[19-20],利用高速摄像机拍摄立管自由振动的位移时程曲线,将其快速傅里叶变换后得到柔性立管的

固有频率。同样,对平台的 X 向和 Y 向分别施加一个初始位移后释放,由激光位移传感器得到的位移时程曲线快速傅里叶变换后得出平台运动的固有频率。其中,平台纵荡和横荡的固有频率一致, $f_{px} = f_{py} = 0.87$ Hz,下文统一记为 f_p ,立管在平面内、平面外振动的前三阶固有频率如表1所示。

表1 平台-立管系统的固有频率

平台 X 向/Hz	平台 Y 向/Hz	柔性立管平面外振动/Hz	柔性立管平面内振动/Hz
$f_{px} = 0.87$	$f_{py} = 0.87$	$f_{o,1}^w = 0.53$	$f_{i,1}^w = 1.41$
—	—	$f_{o,2}^w = 1.32$	$f_{i,2}^w = 3.06$
—	—	$f_{o,3}^w = 2.69$	$f_{i,3}^w = 6.09$

注:下标 i 和 o 分别表示平面内和平面外,下标1、2、3表示一阶、二阶、三阶固有频率,上标 w 表示浸没在静水中。

2 结果与分析

2.1 立管的振动位移

图3对比了4个典型约化速度时的柔性立管三维均方根振幅曲线,其在平面内和平面外的振动位移分别投影在 XOZ 和 XOY 平面上。由于立管的长径比较大($l/D=125$),为了更清楚地显示立管的三维振动形态,将振幅整体放大了90倍。单从平面内(XOZ 平面)均方根振幅曲线判断,4个约化速度的立管平面内振动均由一阶模态主导,而从 XOY 平面的均方根振幅曲线可以看到空间上振幅峰值的个数逐渐增大, $\bar{U}_r=4.40$ 为一阶模态主导(1个波峰), $\bar{U}_r=9.09$ 时已演变为二阶模态主导(2个波峰),

$\bar{U}_r=22.50$ 时为三阶模态主导(3个波峰)。从立管的三维振幅图上,也可以看到与平面外振动一致的波峰个数,表明柔性立管的振动形态主要由更高阶模态主导的平面外振动决定。

图3(a)为考虑平台耦联运动的柔性立管振动结果,图3(b)为过滤了与平台固有频率相近振动频率后得到的结果。对比可见,平台运动对立管平面内振动的影响更为明显,这与平台纵荡位移较大有直接的关系。然而,仅凭立管均方根振幅曲线不能全面反映平台耦联运动的影响。因此,以下重点从振幅和频率的时空分布探讨立管振动与平台运动的耦联效应。

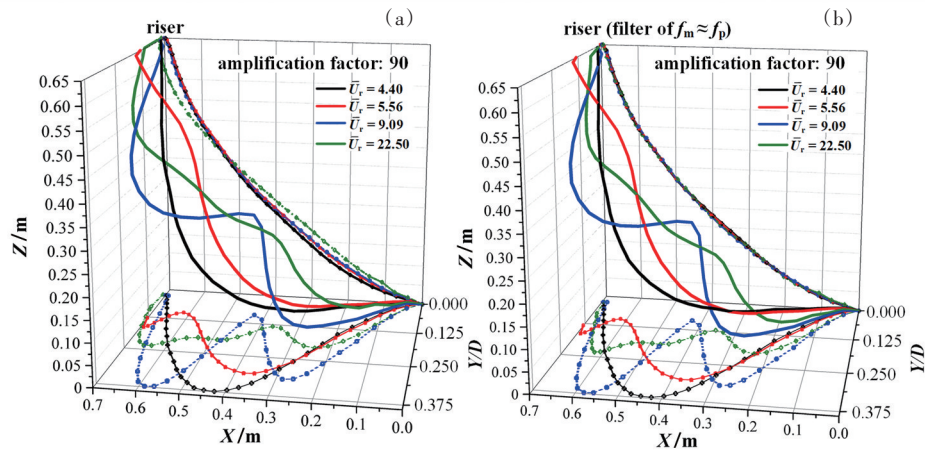


图3 典型约化速度组次的柔性立管均方根振幅

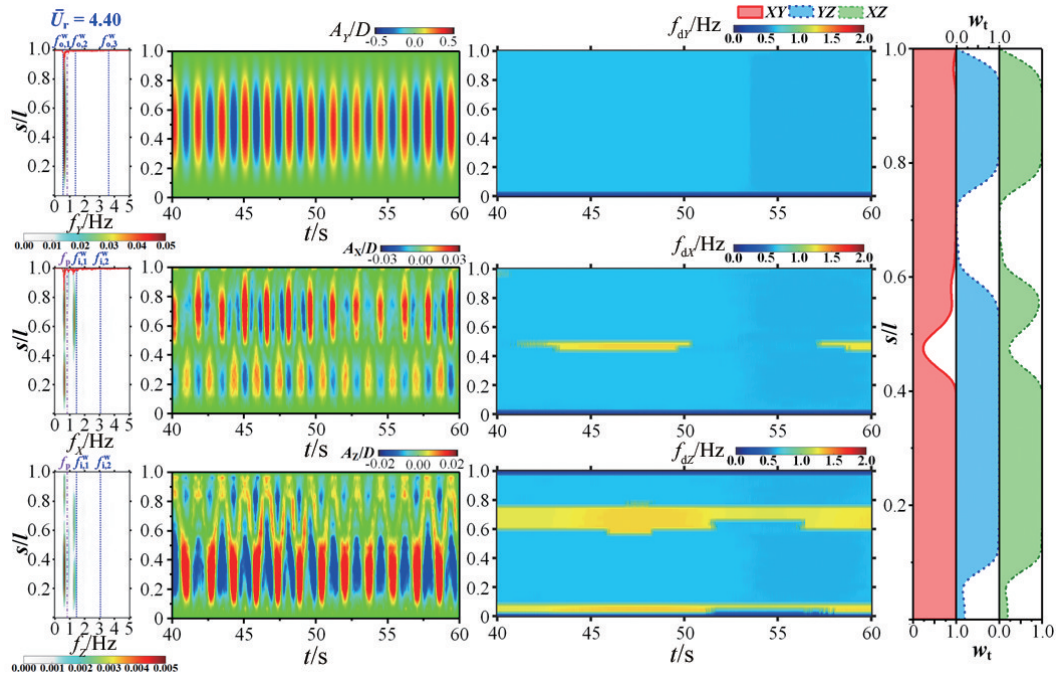
2.2 立管振动与平台运动的耦联效应

图4为 $\bar{U}_r=4.40$ 时立管振幅与频率的时空分布,第1列为3个方向的振动频率沿管轴的空间分布,平台纵荡和横荡的频率以红线标注于立管 X 向和 Y 向振动频率分布图的顶部;第2列为3个方向振幅的时空演变图;第3列为3个方向的振动主频随时间和空间的分布;第4列为3个方向的振动两两之间出现共同主频的时间百分比 w_i ,体现了对应2个方向振动的耦合响应在空间上的分布。

由图4可见,此时平面外振动为一阶模态主导,振动频率在一阶固有频率($f_{n,1}^*$)附近,振幅的时空分布呈现典型的驻波形式。相比之下,平面内振动存在2个频率,一个接近平面内一阶固有频率

($f_{n,1}^*$),一个与平面外振动同频,且后者的能量占比和对应空间管段长度更大。因此,平面内与平面外振动呈现较强的耦合效应,即 X 向和 Y 向、 Z 向和 Y 向的 w_i 均较大,而在空间上 w_i 较小的部分刚好对应了主导频率接近 $f_{n,1}^*$ 的管段。由于平面内 X 向和 Z 向的振动不完全同步,主振频率在空间和时间上的分布均有一定的差异,因此, X 向和 Z 向的 w_i 沿管轴存在波动。此外,平台的纵荡和横荡频率偏离了自身的固有频率 f_p ,而与立管的 X 向和 Y 向主振频率吻合,表明此时的平台运动与立管振动为强耦联关系,且平台运动由立管振动主导。

增大约化速度至5.56时,立管的平面外振动仍由一阶主导,其振动频率大于一阶固有频率,如图



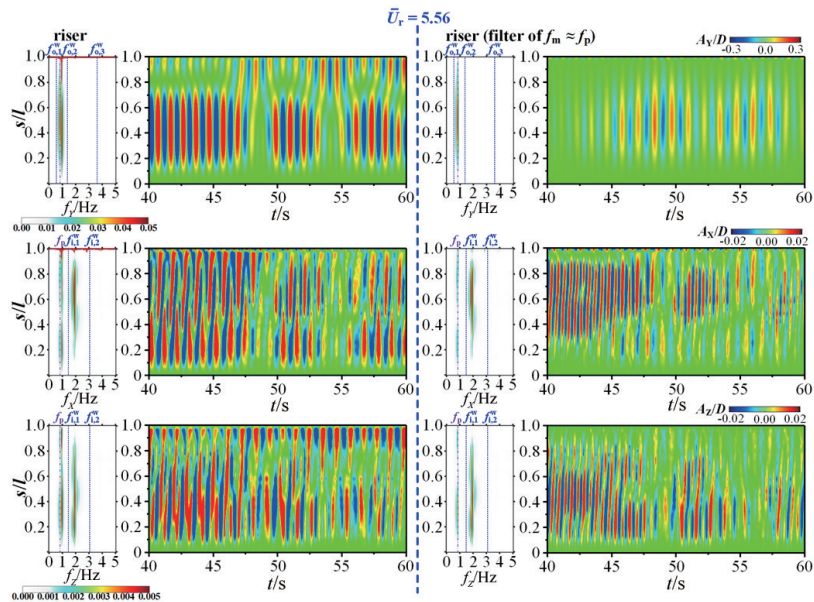
紫色点划线标注了平台运动的固有频率、蓝色短点线为立管平面内和平面外振动前几阶的固有频率，

下标 i 和 o 分别表示平面内与平面外，下标 1、2、3 分别表示一阶、二阶和三阶固有频率

图4 $\bar{U}_r=4.40$ 时立管的振幅与频率时空分布

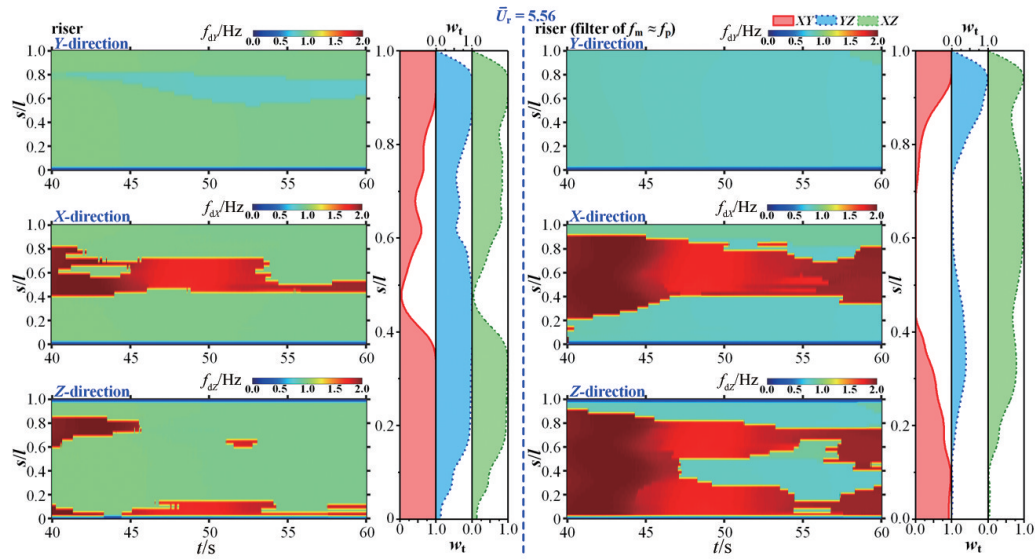
5所示。由图5(a)左侧的振幅时空分布图可见，立管顶部存在一定的行波效应。若将立管振动响应中与平台固有频率相近的频率(f_p)过滤后，则得到右图所示振幅时空分布图，呈明显的驻波形式。表明该约化速度条件下，平台运动已对立管平面外振

动产生的影响，是引起顶部行波传递的主要原因。同样，对于平面内振动而言(X向和Z向振动)，过滤与 f_p 相近的频率后，顶部的行波效应消失。此时，平面内振动能量主要集中在二阶固有频率附近，振动由二阶主导。由主导频率的时空分布图可



(a) 频率的空间分布与振幅的时空分布

图5 $\bar{U}_r=5.56$ 时立管的振幅与频率时空分布(续)



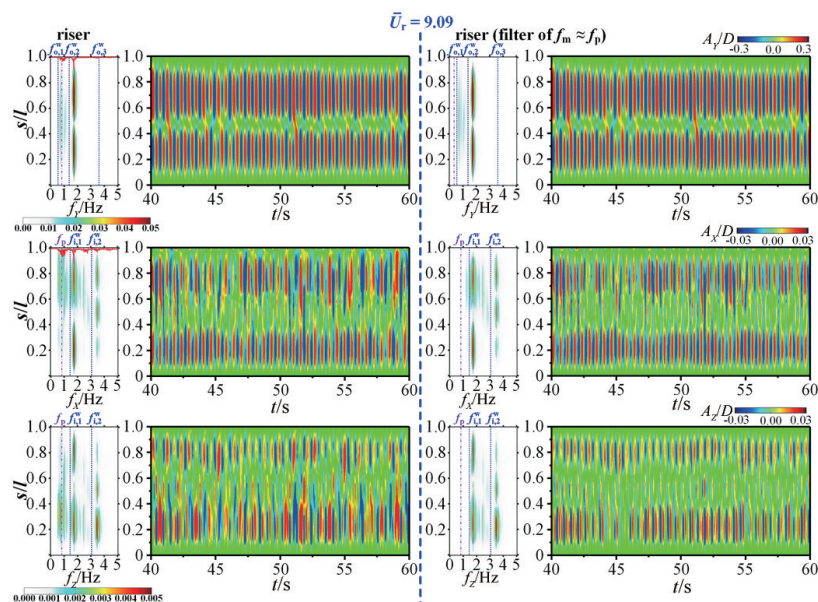
(b) 主振频率的时空分布与出现相同主频的时间百分比

图5 $\bar{U}_r=5.56$ 时立管的振幅与频率时空分布(续)

见,该约化速度时平面内振动的空间竞争较 $\bar{U}_r=4.40$ 时激烈,空间上不同管段的主振频率不同,且随着时间有明显波动,表明相应管段的主振频率随时间不断切换。当过滤了 f_p 后,立管平面外振动的空间竞争基本消失,再次证明平面外振动本身为单一频率主导,是由平台运动引入了次频。然而,过滤 f_p 后的平面内振动频率在空间上分布更不均匀,更多的管段接近其一阶固有频率(f_{1i}^w),说明平台运动造成了部分管段的主频脱离了 f_{1i}^w 而锁定至平台运动的频率。由图5(b)可知,不管是平面外振动

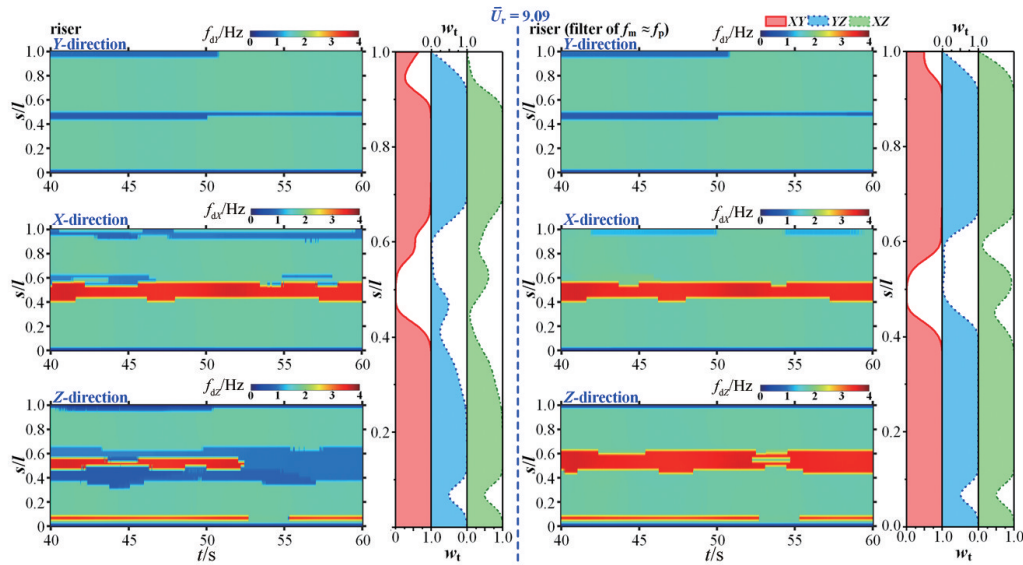
还是平面内振动,其频率分布图均存在与平台运动频率吻合的频率分量,体现了两者的耦联效应。对比过滤 f_p 前后同主频的时间百分比分布可见,平台运动促使立管振动空间上的耦合加强,尤其是平面内和平面外振动之间,这是由于部分管段的主振频率转移至与平台运动频率一致,表明此时部分管段的振动由平台运动主导。

图6为 $\bar{U}_r=9.09$ 时立管振幅与频率的时空分布,此时立管的平面外振动已呈现明显的二阶主导,且过滤 f_p 前后的振幅时空分布没有明显区别,均由驻



(a) 频率的空间分布与振幅的时空分布

图6 $\bar{U}_r=9.09$ 时立管的振幅与频率时空分布



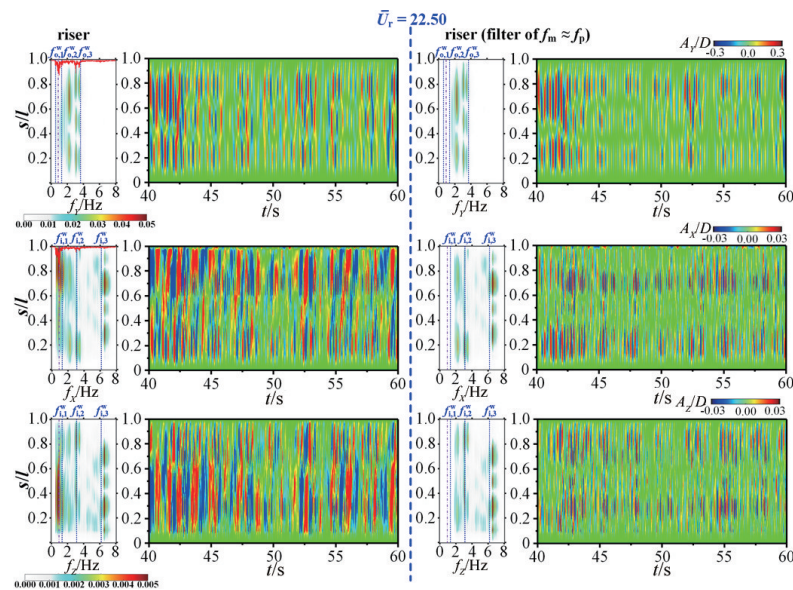
(b) 主振频率的时空分布与相同主频的时间百分比

图6 $\bar{U}_r=9.09$ 时立管的振幅与频率时空分布(续)

波主导,说明此时平台运动对立管平面外振动的影响很小。平台运动频率作为一个次频参与了立管的平面内振动,但能量占比较低,过滤后对振幅的时空分布影响也不大(图6(a))。从主振频率的时空分布和同主频的时间百分比分布可见(图6(b)),过滤 f_p 前后的变化不大,表明此时立管振动受平台运动的影响较小,但由于平台运动频率作为次频参与了立管的振动,故将两者的耦联效应定义为弱耦联。

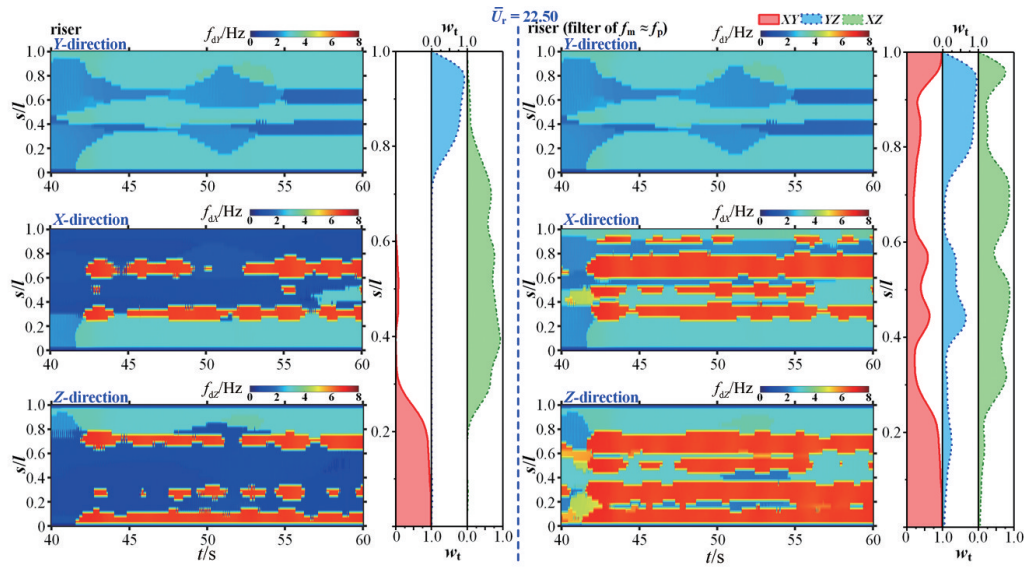
当归一化速度升至 $\bar{U}_r=22.50$ 时,立管平面内、平

面外的振动出现了较明显的差异。平面外振动主要存在2个频率,一个接近三阶固有频率($f_{\alpha 3}^w$),一个靠近二阶固有频率($f_{\alpha 2}^w$),体现了二阶模态和三阶模态的竞争,因此,振幅的时空分布图出现了明显的行波效应,而平台运动频率未在平面外振动中出现。不同的是,尽管平面内振动存在高频,但更多的能量集中在与平台运动频率相同的低频上,对比过滤 f_p 前后的频率分布、同主频的时间百分比分布,都可以看出明显的变化(图7),说明此时的立管平面



(a) 频率的空间分布与振幅的时空分布

图7 $\bar{U}_r=22.50$ 时立管的振幅与频率时空分布



(b) 主振频率的时空分布与相同主频的时间百分比

图7 $\bar{U}_r=22.50$ 时立管的振幅与频率时空分布(续)

内振动受平台运动的影响显著。由于立管平面外振动不受平台运动影响,而立管平面内振动由平台运动主导,所以立管平面内、平面外的耦合强度较弱。

2.3 机器学习样本数的确定

鉴于平台耦联作用下的悬链线型柔性立管的振动响应复杂,系统的实验测试成本高。因此,基于测得的实验数据,采用机器学习对立管的振动响应进行预测,并就空间不同标记点学习所需的样本数和计算效率进行探讨。

常用于时序预测的机器学习模型有很多,如循环神经网络(RNN)、长短期记忆递归神经网络(LSTM)、自回归模型(AR)及滑动平均模型(MA)等众多经典模型。考虑到逆向传播(BP)神经网络纠错能力较强,处理大样本数据表现稳定,具有很好的非线性分析能力,已在时序预测中广泛应用^[25],故本研究选择BP神经网络进行振动响应的预测。其中,前馈神经网络中隐含层神经元,依据式(2)对训练数据(学习数据)进行正向运算

$$f(x) = W_2 g(W_1^T x + b_1) + b_2 \quad (2)$$

式中, $W_1 \in R^m$, $W_2, b_1, b_2 \in R^n$ 均为模型的待训练的参数, g 是激活函数,本研究采用 sigmoid 函数。

多层前馈神经网络通过式(3)~式(4)的优化损失函数获得模型的最佳参数 W_1, W_2, b_1, b_2

$$Loss(\hat{y}, y, W) = \frac{1}{2n} \|\hat{y} - y\|_2^2 \quad (3)$$

$$W_1, W_2, b_1, b_2 = \arg \min (Loss) \quad (4)$$

梯度下降法是应用优化损失函数的一种方法,通过求取损失函数的梯度值调整参数取值

$$W^{i+1} = W^i - \varepsilon \nabla Loss_W^i \quad (5)$$

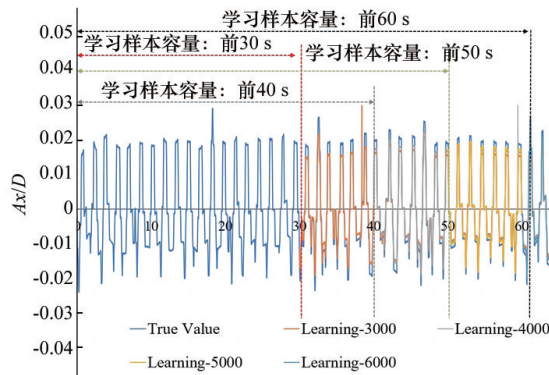
式(5)中, i 是迭代次数, ε 是学习率。

在本研究的神经网络学习过程中,引入 Weight Decay 方法调整权重,防止过拟合现象出现;引入 Nesterov Momentum 方法加速收敛,同时克服局部极值的影响。本研究选取 $R^2(0 \sim 1)$ 作为评估机器学习预测结果准确率的主要参数,不同的学习样本量的预测准确率不同。本研究的神经网络模型采用2个隐藏层,其他参数利用遍历穷举的方式确定最优参数组合(表2)。

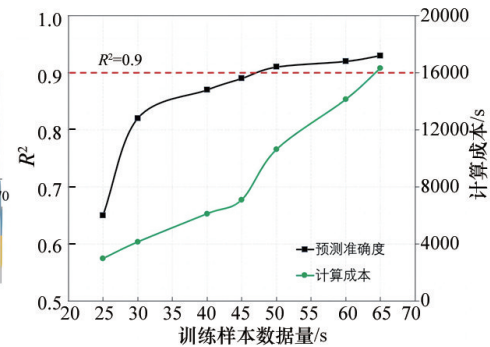
如图8(a)所示,以某一标记点的 X 方向振动为例,选取一段时间的实验数据进行学习,由此预测后续的振动位移,并与实测的数据进行对比。当选取前30 s的实验数据作为训练样本(共3000个位移数据)对后40 s的振动响应进行预测,其预测结果的 R^2 为0.82,有明显的异常值;当选取前40 s的4000个位移数据作为训练样本,后30 s的振动预测准确度为0.87,异常值数量减少;当训练样本数增加至5000个时,后20 s预测结果的 R^2 为0.91,准

表2 神经网络预测模型参数选取及遍历范围

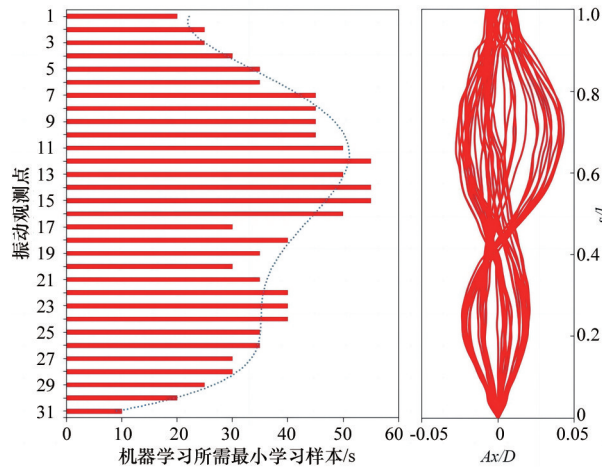
参数名称	遍历范围 [起点, 终点, 步长]
隐藏层1神经元数目	[10, 300, 5]
隐藏层2神经元数目	[10, 200, 5]
学习率	[0.0001, 0.1, 0.005]
初始学习率	[0.0001, 0.01, 0.0001]
权重优化器	随机梯度下降, 机遇随机梯度
正则化参数	[0.0001, 0.01, 0.005]
最大迭代次数	[100, 500, 10]
优化容忍度	[0.00001, 0.0001, 0.00005]



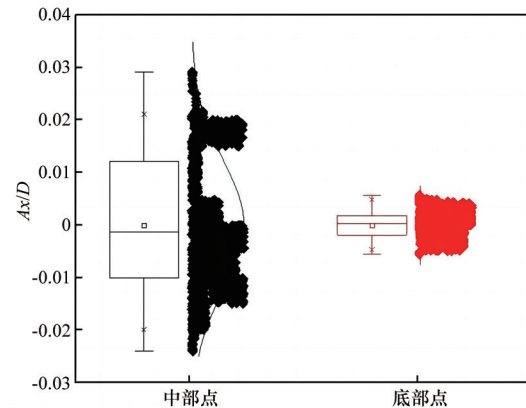
(a) 单个标记点不同样本数预测结果对比



(b) 预测精度与计算成本变化曲线



(c) 空间上不同位置振动预测所需的样本数



(d) 立管中部与底部位移数据箱体图

图8 机器学习所需的样本数

准确度提升明显;当训练样本数增加至6000个时,后10 s的预测准确度达到0.93。将不同训练样本数的预测准确度与计算成本综合对比,如图8(b)所示。当学习样本数增大,预测准确度增大,但当样本数达到一定量后,预测准确度的提升不再明显,而同时计算成本增加迅速。当预测准确度达到0.9

后,再次增加样本数,准确度提升1.1%,但计算成本增加了33%。因此,综合考虑预测准确度与计算成本,采用准确度 ≥ 0.9 作为本研究机器学习预测立管振动的标准。

对 $\bar{U}_r=4.40$ 时立管X向振动响应进行整体预测后,结果如图8(c)所示。可见,机器学习预测所需的

最小样本数与振动包络图呈现一定的相关性。所需最小样本量的标记点出现在立管底部,由于其接近固定边界、振动位移小、数据分布集中、规律特征显著,故较小的样本量即可满足预测精度要求。而立管中部的振动预测需要较多的样本数量,这与立管中部存在空间上的频率竞争有关。如图8(d)所示,立管中部的位移数据相较于底部的位移数据更加分散(箱体较宽),出现显著的“多中心”分布特征,因此,机器学习需要更多的样本数据以提高预测精度。

3 结论

利用非介入光学测试方法实验研究了存在平台耦联运动的悬链线型柔性立管的涡激振动响应,从立管振幅、频率的时空演变特性划分了平台运动与立管振动的耦联效应类型,并基于机器学习对不同空间位置立管振动预测所需的样本数进行了分析探讨。

1) 平台运动与立管振动的耦联效应存在强耦联和弱耦联2类,而强耦联又分为立管振动主导和平台运动主导2种。

2) 立管平面内与平面外振动可以由不同的模式主导,但立管的三维振动形态由其中的高阶模式振形决定。因立管不同位置的主振频率有区别,平面内振动与平面外振动的耦合程度沿管轴有一定的变化。当平台运动对立管平面内、平面外振动都有显著影响时,增强了平面内与平面外振动的耦合;而当平台运动只对平面内振动有影响时,减弱了立管平面内与平面外振动的耦合。

3) 由于柔性立管的平面内振动存在空间上的频率竞争,基于机器学习预测不同位置振动响应所需的样本数不同,频率竞争剧烈的立管中部所需样本数最多。另外,受到平台运动影响的上部管段,需要样本数最小的是接近底部固定端的下部管段。

受实验平台限制,本研究为概化模型实验。今后需考虑模型实验相似及浮式平台的六自由度响应,开展系统的大尺度实验测试,以便更好地指导工程实际。

参考文献 (References)

- [1] Gou R Y, Zhang X D, Yang W W, et al. Nonlinear dynamics of three-dimensional prediction model for a flexible riser under linearly sheared currents[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(2): 829–844.
- [2] Han X X, Lin W, Qiu A, et al. Understanding vortex-induced vibration characteristics of a long flexible marine riser by a bidirectional fluid-structure coupling method [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2020, 25(2): 620–639.
- [3] Pang J H, Zhu B S, Zong Z. A numerical simulation model for the vortex induced vibration of flexible risers using dynamic stiffness matrices[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 178: 306–320.
- [4] Gedikli E D, Chelidze D, Dahl J M. Bending dominated flexible cylinder experiments reveal insights into modal interactions for flexible body vortex-induced vibrations[C]// *Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference Sapporo*. Sapporo: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2018: 1003–1010.
- [5] Du Kim J, Jang B S, Yun R H, et al. Improvement of the bending behavior of a flexible riser: Part ii-hysteretic modeling of bending stiffness in global dynamic analysis [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101: 102249.
- [6] Fan D X, Wang Z C, Triantafyllou M S, et al. Mapping the properties of the vortex-induced vibrations of flexible cylinders in uniform oncoming flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 881: 815–858.
- [7] Seyed-Aghazadeh B, Edraki M, Modarres-Sadeghi Y. Effects of boundary conditions on vortex-induced vibration of a fully submerged flexible cylinder[J]. *Experiments in Fluids*, 2019, 60(3): 38.
- [8] Gao Y, Zhang Z Z, Zou L, et al. Effect of boundary condition and aspect ratio on vortex-induced vibration response of a circular cylinder[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 188: 106244.
- [9] 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(3): 541–557.
- [10] 陈伟民, 郑仲钦, 郭双喜. 浮式平台横荡运动对水下柔性立管涡激振动的影响[J]. *海洋工程*, 2014, 32(3): 8–13, 27.
- [11] 陈伟民, 李依伦, 姜春晖, 等. 深水浮式平台垂荡运动与水下柔性立管涡激振动的动力耦合[J]. *海洋工程*, 2016, 34(3): 1–9, 79.
- [12] 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.
- [13] Wang J G, Xiang S, Fu S X, et al. Experimental investigation on the dynamic responses of a free-hanging water intake riser under vessel motion[J]. *Marine Structures*, 2016, 50: 1–19.
- [14] Wang J G, Fu S X, Baarholm R. Evaluation of vortex-induced vibration of a steel catenary riser in steady current and vessel motion-induced oscillatory current[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 82: 412–431.
- [15] 付博文, 端木玉, 万德成. 平台横荡运动下柔性立管滴激振动的数值模拟[C]//第十四届全国水动力学学术会议暨第二十八届全国水动力学研讨会会议论文集. 上海: 海洋出版社, 2017: 1013–1023.
- [16] 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.
- [17] Feng C C. The measurement of vortex induced effects in flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders[D]. Vancouver, Canada: University of British Columbia, 1968.
- [18] Khalak A, Williamson C H K. Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1999, 13(7/8): 813–851.
- [19] Zhu H J, Gao Y, Zhao H L. Coupling vibration response of a curved flexible riser under the combination of internal slug flow and external shear current[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 91: 102724.
- [20] Zhu H J, Gao Y, Zhao H L. Experimental investigation of slug flow-induced vibration of a flexible riser[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 189: 106370.
- [21] Zhu H J, Hu J, Gao Y, et al. Spatial-temporal mode transition in vortex-induced vibration of catenary flexible riser[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2021, 102: 103234.
- [22] Zhu H J, Lin P Z, Yao J. An experimental investigation of vortex-induced vibration of a curved flexible pipe in shear flows[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 121: 62–75.
- [23] Zhu H J, Lin P Z. Numerical simulation of the Vortex-induced vibration of A curved flexible riser in shear flow [J]. *China Ocean Engineering*, 2018, 32(3): 301–311.
- [24] Zhu H J, Lin P Z, Gao Y. Vortex-induced vibration and mode transition of a curved flexible free-hanging cylinder in exponential shear flows[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 84: 56–76.
- [25] 张建辉. 基于BP神经网络的时序预测模型的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.

Experimental study on vortex-induced vibration of catenary flexible riser under coupling effect of platform motion

ZHU Hongjun, LIU Wenli, SONG Jinze, GAO Yue

Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Abstract Due to the combination of vortex-induced vibration and coupled platform motion, fatigue damage is a potential issue for catenary flexible risers. This paper reports the experimental results of vortex-induced vibration of a catenary flexible riser hinged underneath a two-degree-of-freedom vortex-induced moving platform. The in-plane and out-of-plane responses of the riser are monitored by high-speed cameras while the cross-flow and in-line motions are recorded by laser displacement sensors. The strong and weak couplings between the platform motion and riser vibration are identified. Moreover, the strong coupling is further classified into two types: riser vibration dominated and platform motion dominated ones. The in-plane and out-of-plane responses of the riser also present the interaction which varies along the span. Affected by the in-line motion of the top platform, the interaction between in-plane and out-of-plane responses is weakened. Because of the spatial frequency competition, the number of required samples for machine learning varies along the riser. The maximum required number occurs in the middle part, followed by the top part as a result of the platform motion.

Keywords platform motion; vortex induced vibration; coupling response; spatial-temporal evolution ●



(责任编辑 王微)