

上海交通大学硕士学位论文

深海平台运动对立管涡激振动的影响及机器学习的应用

硕士研究生：张钰祺

学 号：118010910252

导 师：王建华

申 请 学 位：工学硕士

学 科：船舶与海洋工程

所 在 单 位：船舶海洋与建筑工程学院

答 辩 日 期：2021年1月

授予学位单位：上海交通大学

Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University
for the Degree of Master

**INFLUENCE OF DEEP SEA PLATFORM
MOTION ON VORTEX INDUCED
VIBRATION OF RISER AND
APPLICATION OF MACHINE
LEARNING**

Candidate:	Yuqi Zhang
Student ID:	118010910252
Supervisor:	Jianhua Wang
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Ship and Ocean Engineering
Affiliation:	School of Naval Architecture and Civil Engineering
Date of Defence:	Jan, 2021
Degree-Conferring-Institution:	Shanghai Jiao Tong University

深海平台运动对立管涡激振动的影响及机器学习的应用

摘要

柔性立管作为连接海底油气资源和海面钻井平台的枢纽，由于立管涡激振动背后的机理机制难于理解，对深水柔性立管的涡激振动的研究近年来称为国内外海洋工程领域研究的热门。

本文的数值模拟分析是建立在开源求解器 OpenFOAM 基础上进行二次开发的求解器 viv-FOAM-SJTU。文中首先基于切片理论，利用 RANS 方程和 SST $k-\omega$ 模型对粘性流场进行数值模拟，然后将立管视为小变形的欧拉伯努利梁，采用有限元方法求解立管的结构动力响应，最后通过流固耦合插值模块来分析流固耦合问题。

本文通过配置均匀流和顶端平台横荡和纵荡两种工况来研究其联合作用对立管涡激振动的影响。文中从位移，振型，频域等角度对问题进行了全面深入的分析，模拟结果表明，两种工况下立管顺流向均为一阶模态主控。当顶端平台激励方向与来流方向正交时，只存在一阶和二阶两种主控频率。试验还发现，较大的约化速度会导致顶端平台横荡工况下横流向出现高阶频率响应。

文中基于 BP 神经网络理论建立了瞬时运动和时均运动预报模型。瞬时运动预报模型以顶张力，流速和节点位置为输入量，对横流向和顺流向的位移进行预测，经过训练后，模型的准确率和相关度系数均在 0.99 以上。时均运动预报模型也是以顶张力，流速和节点位置为输入量，对横流向和顺流向的位移均值，位移标准差，曲率均值和曲率标准差，以及横流向频率进行了预测。试验发现，模型预测的准确率和相关度系数均在 0.98 以上，并可以复现立管涡激振动的振型特征。

关键词：涡激振动，viv-FOAM-SJTU，BP 神经网络

Influence of deep sea platform motion on vortex induced vibration of riser and application of machine learning

ABSTRACT

The mechanism behind the VIV of riser is difficult to understand, the research on VIV of deep-water flexible riser has become a hot topic in recent years.

The numerical simulation analysis of this paper is based on viv-FOAM-SJTU. In this paper, firstly, based on the slice theory, RANS equation and SST model are used to simulate the viscous flow field. Then, the riser is regarded as a small deformation Euler Bernoulli beam, and the structural dynamic response of the riser is solved by finite element method. Finally, the fluid structure coupling problem is analyzed through the fluid structure coupling interpolation module.

In this paper, the displacement, vibration mode, frequency domain and other aspects of the problem are comprehensively analyzed. The simulation results show that the riser is the first-order mode master control in both cases. When the excitation direction of the top platform is orthogonal to the inflow direction, there are only two main control frequencies, the first and the second order. It is also found that the higher reduced velocity leads to the higher frequency response in the transverse direction of the top platform.

Based on the BP neural network theory, the instantaneous motion and time average motion prediction models are established. The instantaneous motion prediction model takes the top tension, velocity and node position as inputs to predict the displacement in the cross flow direction and inline direction. After training, the accuracy and correlation coefficient of the model are above 0.99. The time average motion prediction model also takes the top tension, velocity and node position as inputs to predict the mean

displacement, standard deviation of displacement, mean curvature and standard deviation of curvature, as well as the cross flow frequency. It is found that the accuracy and correlation coefficient of the model prediction are above 0.98, and the vibration mode characteristics of vortex induced vibration of riser can be reproduced.

KEY WORDS: VIV, viv-FOAM-SJTU, Machine learning

目 录

深海平台运动对立管涡激振动的影响及机器学习的应用.....	I
摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 柔性立管涡激振动国内外研究现状.....	2
1.2.1 模型试验研究.....	2
1.2.2 基于经验公式和半经验公式的数值模拟分析.....	6
1.2.3 基于计算流体力学和结构力学的数值模拟分析.....	9
1.2.4 基于机器学习对涡激振动的预报及分析.....	13
1.3 本文主要工作及创新点.....	16
1.3.1 本文主要工作.....	16
1.3.2 本文创新点.....	17
第二章 数值模拟方法.....	18
2.1 粘性流场的数值模拟.....	18
2.2 立管结构的数值模拟.....	20
2.3 流固耦合.....	22
2.4 本章小结.....	23
第三章 BP 神经网络简介.....	24
3.1 感知机模型.....	24
3.2 激活函数.....	25
3.3 多层神经网络模型.....	27
3.4 前向传播.....	28
3.5 反向传播算法.....	30
3.6 优化算法.....	31
3.7 本章小结.....	33
第四章 VIV-FOAM-SJTU 求解器的验证.....	34
4.1 viv-FOAM-SJTU 求解器结构.....	34
4.2 viv-FOAM-SJTU 求解器模块简介.....	34

4.3 viv-FOAM-SJTU 求解器的验证	35
4.4 本章小结	38
第五章 均匀来流下平台水平运动对立管涡激振动影响的数值模拟分析	39
5.1 计算模型	39
5.2 位移分析	42
5.3 振型分析	44
5.4 频域分析	46
5.5 本章小结	48
第六章 BP 神经网络在柔性立管涡激振动中的应用	50
6.1 物理模型及数据来源	50
6.2 BP 神经网络对瞬时运动的预测	53
6.3 BP 神经网络对时均运动的预测	58
6.4 本章小结	67
第七章 结论与展望	69
7.1 主要工作与创新点	69
7.2 后续研究工作	70
参 考 文 献	71
致 谢	76
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文	77

图 录

图 1-1 阶梯流试验布局示意图	4
图 1-2 真空管布置图	4
图 1-3 正弦振荡流下的立管涡激振动试验装置	5
图 1-4 剪切流试验装置图	6
图 1-5 涡激升力数值模拟和试验对比结果	9
图 1-6 计算域大小, 几何和流体设置	10
图 1-7 Franzini 模型试验装置示意图	12
图 1-8 串列立管布置示意图	13
图 1-9 两层神经网络模型	13
图 1-10 平均绝对误差历史图	14
图 1-11 均方误差历史图	14
图 1-12 Navier-Stokes 神经网络	16
图 2-1 沿立管轴向的切片	18
图 2-2 均布载荷作用示意图	20
图 2-3 梁段微单元模型	21
图 2-4 viv-FOAM-SJTU 流固插值模块	22
图 3-1 神经元模型	24
图 3-2 M-P 神经元模型	25
图 3-3 典型神经元结构	25
图 3-4 典型激活函数图像	26
图 3-5 ReLu 和 SoftPlus 函数图像	27
图 3-6 异或问题 ^[58]	28
图 3-7 双层感知加解决“异或”问题 ^[58]	28
图 3-8 前馈神经网络结构	29
图 3-9 梯度下降算法	31
图 3-10 学习率过小	32
图 3-11 学习率过大	32
图 4-1 viv-FOAM-SJTU 求解器结构	34
图 4-2 求解器计算流程	35

图 4-3 立管切片布置和网格划分	36
图 4-4 模型试验和其他 11 中数值模拟试验结果	37
图 4-5 顺流向位移轮廓线和标准差	37
图 4-6 横流向位移轮廓线和标准差	38
图 5-1 均匀来流下纵荡和横荡工况示意图	40
图 5-2 计算域示意图	41
图 5-3 横荡和纵荡下的切片网格	42
图 5-4 均匀来流下平台纵荡和横荡工况下立管横流向位移标准差	43
图 5-5 均匀来流下平台纵荡和横荡工况下立管顺流向位移标准差	43
图 5-6 平台纵荡和横荡工况下立管横流向相对位移模态权重	44
图 5-7 平台纵荡和横荡工况下立管横流向模态权重功率谱密度	44
图 5-8 平台纵荡和横荡工况下立管横流向包络线	45
图 5-9 平台纵荡和横荡工况下立管顺流向包络线	46
图 5-10 平台纵荡和横荡工况下横流向主控频率	47
图 5-11 平台纵荡和横荡工况下顺流向主控频率	47
图 5-12 平台纵荡下横流向约化速度	48
图 5-13 平台纵荡下横流向时间-频率小波分析云图	48
图 6-1 模型训练流程	51
图 6-2 顺流向位移训练集预测结果	54
图 6-3 横流向位移训练集预测结果	54
图 6-4 预张力同为 405N, 流速分别为 0.21 m/s 和 0.31 m/s 时横流向和顺流向位移预测值与真实值对比	55
图 6-5 预张力同为 405N, 流速分别为 0.4 m/s 和 0.54 m/s 时横流向和顺流向位移预测值与真实值对比	56
图 6-6 预张力同为 407N, 流速分别为 0.21 m/s 和 0.54 m/s 时横流向和顺流向位移预测值与真实值对比	57
图 6-7 预张力同为 457N, 流速分别为 0.31 m/s 和 0.54 m/s 时横流向和顺流向位移预测值与真实值对比	58
图 6-8 横流向和顺流向曲率均值和曲率标准差验证集上预测值与真实值对比 ..	60
图 6-9 横流向和顺流向位移均值和位移标准差验证集上预测值与真实值对比 ..	61
图 6-10 横流向频率模型预测值与真实值对比	62

图 6-11 预张力同为 405N，流速分别为 0.21 m/s ， 0.31 m/s 和 0.4 m/s 时横流向曲率均值和标准差预测值与真实值对比	63
图 6-12 预张力同为 457N，流速分别为 0.31 m/s 和 0.54 m/s 时横流向曲率均值和标准差预测值与真实值对比	64
图 6-13 时均运动预报模型在顺流向曲率和曲率标准差上的预测结果	65
图 6-14 时均运动预报模型对横流向位移均值和位移标准差的预测结果	66
图 6-15 时均运动预报模型在顺流向位移和位移标准差上的预测结果	67

表 录

表 4-1 试验主要参数	35
表 5-1 立管主要参数	39
表 6-1 Chaplin 模型试验物理参数	50
表 6-2 数值模拟工况参数	50
表 6-3 瞬时运动预报模型参数	53
表 6-4 模型训练结果	53
表 6-5 时均运动预报模型参数	59
表 6-6 模型训练结果	60

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

数据显示，我国油气资源短缺，人均可开采量处于全球下游水平，同时我国油气资源短缺的情况还在日益加重，长期的油气资源开采导致新的重大油气资源发现数量日渐稀少。根据科学探测的结果，世界深海油气资源可供开采储量折算约为 1000 亿桶，预计未来全球 44% 的油气资源将来自深海油气资源。

我国拥有约为 150 万平方千米的海域，仅以近海油气资源为例，数据统计显示，仅仅在渤海和南海两处，每年可为国家贡献 1500 万吨的油气资源，科学家预计南海的油气资源储备量在 300 亿吨左右，油气资源可供开采量非常可观。在利用近海油气资源解决燃眉之急的同时，我国也在布局深海油气资源，目前已经在惠州、陆丰等深水油田布置了开采设备。早在 2006 年就已经可以实现 500 米水深的油气资源开采。截至到目前，我国已经具备了 3000 米水深的油气资源开采能力，意味着深海油气资源开发已经被国家提到了很高的战略地位。

深海油气资源开发通常依赖于海面大型浮式钻井平台，立管起到连接海底油气资源和海面钻井平台的作用。立管一方面需要承受自身重力和顶端张紧力，另一方面还需要承受由波、浪、流联合作用产生的外载荷。来流绕过立管后会当流速过高时会在立管两侧出现脱落的漩涡，其对应的频率通常称为泻涡频率。油气顶端浮式平台会在来流以及风力等作用下产生不规则运动，这种运动对于立管来讲相当于顶端激励，其对应的频率称为激励频率。当激励频率，泻涡频率和立管的固有频率三者中任意两个频率接近时，会导致立管的运动幅值响应急剧增加，从而产生涡激振动。同时由于立管长度可能会达到 10^3 量级，极易诱发高阶模态，这些都会加剧立管的疲劳损伤，很可能导致海面钻井平台的失效，从而产生重大安全事故。

由于立管实际工作海况是在平台顶端激励与波，浪，流耦合的环境，导致其背后的机理机制极为复杂，对于立管涡激振动的研究近年来受到了越来越多的研究学者的关注。涡激振动领域的研究方法通常分为开展模型试验的研究方法，根据经验公式进行的模拟，以流体力学并结合结构力学方法为基础的模拟，以及近年来发展的采用机器学习对立管运动的预报。涡激振动的研究在以上研究方法的

推动下蓬勃发展，由于涡激振动领域研究方法和方向众多，问题通常对实际工程领域有重要的参考意义。本文主要关注基于计算流体力学和计算结构力学的数值模拟分析，为实际工程提供参考，以及应用机器学习方法中的神经网络模型来对立管运动进行预报，为涡激运动的实时性预报及监控提供一定的参考。

1.2 柔性立管涡激振动国内外研究现状

根据研究方法，立管涡激振动的研究通常分为开展模型试验的研究方法，根据经验公式进行的模拟，以流体力学并结合结构力学方法为基础的模拟，以及基于机器学习的立管涡激振动实时性预报与监控。

根据研究方向，立管涡激振动的研究通常分为顶端和底端固定，顶端张紧下单立管的涡激振动数值模拟研究，双立管联合作用的模拟，顶端平台水平运动下对立管涡激振动的影响，顶端平台垂荡作用下立的模拟分析，基于厚切片法的立管涡激振动三维数值模拟分析。

1.2.1 模型试验研究

早期在计算资源匮乏时模型试验是主流的研究方法，但是由于准备模型试验对于设备的要求极高，准备周期较长，金钱成本较高，并且很难达到实际海况的雷诺数，存在一定的尺度效应，此外模型试验的数据测量通常会由于仪器设备的老化，以及外在环境因素的干扰而导致数据收集困难，也影响数据的准确性，产生的数据量也十分有限，对涡激振动的细节分析较为困难。目前模型试验一般被用来作为数值模拟的对比试验，来验证求解器的有效性。

Marcollo 和 Hinwood^[1]对柔性立管在剪切流中的涡激振动开展了研究。试验中两个流体力测量仪被布置在立管上，可以测量立管周线加速度。两个同时振动的气缸产生测试流场，用来研究立管从单一模态到多模态的转变。试验结果表明在 4 倍于立管固有频率的激励频率下，顺流向高阶模态区域和低阶模态区域出现位置有较大的重合。

Chaplin^[2]等人对立管在阶梯流下的涡激振动开展了模型试验，将立管下部 45% 部分置于均匀流，上部置于静水，并将试验结果和固定圆柱的结果进行了对比。试验发现在相同雷诺数下，阻力系数柔性立管比固定圆柱高 120%。

Chaplin^[3]将阶梯流下的实验结果与用 11 种不同数值模型模拟分析得到的结果进行对比，从两个流向的位移，主频率和曲率层面来分析差异和相似点。试验发现数值模拟结果和以往的 CFD 模拟结果相比，更接近实际试验结果，但这是因为

其他模拟在原理上都无法计算漩涡，从而造成的曲率结果上差异，所以模拟方法仍有改进的空间。

Lie^[4]等人通过将立管倾斜并通过旋转装置令立管在静水中旋转，从而形成相对剪切来流。试验发现立管涡激振动的响应通常由多种模态组成，但是仍然只有一个主控频率。试验还发现可能存在一个以上的泻涡频率，并且可能激活一个及以上的振型。

Lie^[5]等人还分开展了立管竖直放置以及倾斜放置下的试验，设置流场分别为均匀来流和剪切来流。试验发现垂直裸立管在均匀流中受到一个泻涡频率的激励，而垂直交错立管受到两个泻涡频率的激励。泻涡频率在立管交错排布下和立管直径以及浮力直径有关。

Vandiver^[6]等人对长度为 130 米，直径为 0.0318 米的立管进行顶端牵引，下端设置一定的重量来实现预张力，控制顶端牵引的速度从而实现控制最大偏离角度小于 20 度，控制斯特劳哈尔数为 0.17，并控制横流向最大振动模态数不超过 18，顺流向最大振动模态数不超过 36。实现发现立管振动的最大模态数取决于立管的质量比，长细比和顶端的最大偏离角度，在剪切流中引入折减速度带宽参数来量化剪切流中的锁定区域，可以用来描述立管的锁定区域。

Wilde^[7]等人模型试验设置立管底端 45%处于均匀流中，并将立管置于阶梯来流下，立管直径为 28 毫米，长为 13.12 米，质量比为 3.0，整个装置放置在拖车上，拖车以 0.5 至 3m/s 的速度匀速运动，始终保持顶端和底端的连线与水平面垂直，形成相对阶梯流，试验装置布置如图 1-1 和图 1-2 所示。试验采用最先进的光纤测量技术，测量了阻力载荷，加速度和弯矩，试验中观察到了 8 阶的横流向振动。

Barholm^[8]在 1977 年在挪威卑尔根开展了张紧式立管大型模型试验，立管总长为 90 米，直径为 3 厘米，试验中主要测量数据包含立管轴向张力，流速等数据和弯曲应变，来研究横流向涡激振动和顺流向涡激振动对立管疲劳损伤的影响。试验结果表明当顶张力控制模态时，疲劳损伤程度和来流速度正相关。以低阶模态为例，顺流向涡激振动对疲劳损伤有着显著影响，原因是顺流向的振动频率为横流向的两倍，在张力主导的区域，这对应着半波长模式，而弯曲刚度为主导的区域则是具有波长比为 2 的状态。

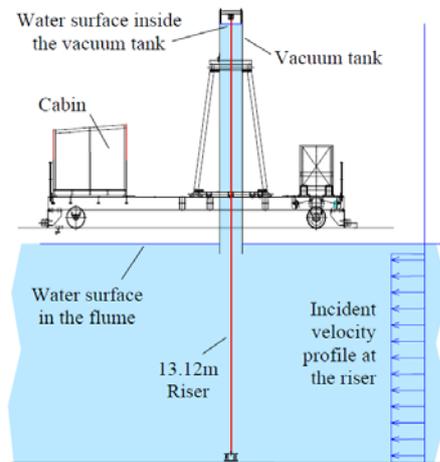


图 1-1 阶梯流试验布局示意图
Fig.1-1 Schematic diagram of test layout

Modarres-Sadeghi^[9]等人利用长度为 38 米，外径为 0.027 米的立管，在顶张力为 4000-6000 N 下开展了模型试验，利用当时最先进的响应重建技术来保证测量数据的精度，主要研究立管涡激振动的高阶模态振动响应。试验发现主导频率集中在三阶频率和五阶频率，在考虑流体力和高阶模态分量的影响下，发现立管疲劳损伤明显下降。



图 1-2 真空管布置图
Fig.1-2 Vacuum pipe layout

Trim^[10]等人在没有 VIV 抑制的情况下设置了均匀来流和剪切流，开展了立管

涡激振动的试验，试验重点关注立管横流向和顺流向的模态响应。试验数据显示，立管的响应特性和螺旋状排列的立管的响应特性截然不同。试验指出通过控制立管的长度和优化立管裸露部分的几何外形可以有效减轻立管的疲劳损伤。

Williamson^[11]使用激光诱导和粒子图像测速仪（PIV）等新技术来测量立管涡激振动的数据，保证了数据的准确性。试验发现通过三维数值模拟的分析和对二阶稳定性建模，对于理解尾流的机理机制具有重要帮助。

王俊高^[12]等人在上海交通大学 $50m \times 40m \times 10m$ 的水池中在正弦振荡来流下进行了立管涡激振动的模型试验，立管两端固定在拖车上，拖车在两条竖直轨道上做正弦运动，从而在立管和流体间形成相对振荡流，试验装置如图 1-3 所示。试验立管长度为 4 米，立管外径为 0.024 米，顶张力设置为 $500N$ ， KC 数设置为 84。试验结果显示，“振幅调制”和“分时”特性在立管振动响应中出现，在试验中观察到了立管涡激振动的“建立-锁定-衰退”完整过程。试验还发现 KC 数较小时，立管涡激振动的响应会较为明显，并发现最大约化速度越大，“锁定”区间的长度越长。

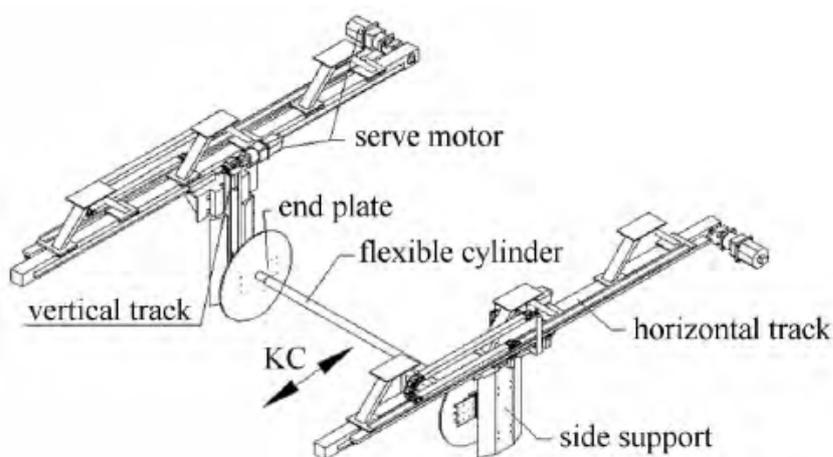


图 1-3 正弦振荡流下的立管涡激振动试验装置

Fig.1-3 Vacuum pipe layout

Franzini^[13-16]等人开展了竖直放置并完全浸没在水中立管的涡激振动试验，试验在立管的顶端设置了一个幅值为立管未拉伸状态下长度 1% 的简谐竖直激励，利用沿立管轴向布置的 43 个监测点来记录实验数据。试验中观察到了立管在顶端竖直激励下出现了多模态振动现象。

Fujiwara^[17]等人在日本国立海洋研究所深海盆地利用长为 28.5 米的立管开展

了模型试验，试验主要目的是确定深水立管的安全性和可靠性。试验中立管底端固定，顶端连接在张紧器上，顶张力设置为自身重力的 4 倍。试验中发现了立管振动模态从 15 阶到 5 阶的模态转换现象，并观察到在模态发生变化的瞬间，行波从上到下发生。

宋磊建^[18]等人在线性剪切流下进行了柔性立管涡激振动的试验。试验采用 T 型塔架旋转来形成线性剪切流，控制立管底端和塔架的夹角为 16 度，装置设置如图 1-4 所示。在立管顶端施加最高 10kN 的预张力，并且只采取第一个运动周期内的数据，保证了数据的准确性。试验发现立管涡激振动会导致阻力系数的增加，当雷诺数在 1.0×10^4 到 1.2×10^5 之间时，随着雷诺数的增加，平均阻力系数减小。给出了在高雷诺数下估算阻力系数的公式。

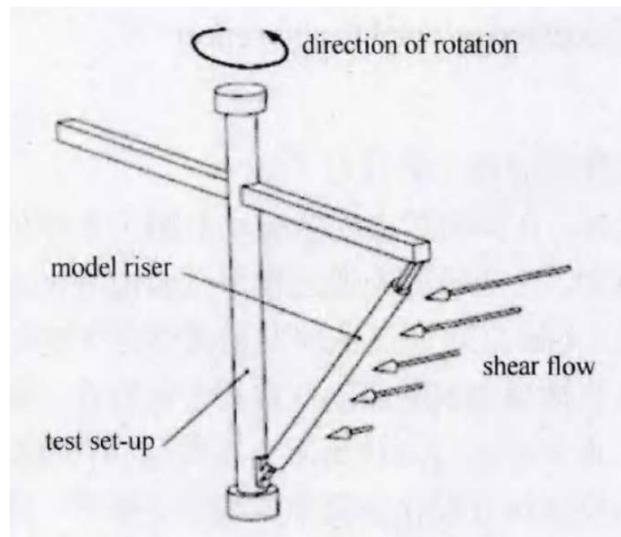


图 1-4 剪切流试验装置图

Fig.1-4 Sketch of test set-up in shear flow

1.2.2 基于经验公式和半经验公式的数值模拟分析

基于经验公式的数值模拟方法通过一定的假设来简化计算，或者根据已有的数据得到近似公式，在工业界有一定的应用，但是其对于历史数据的积累有较高的要求，排他性和商业性较强，同时由于假设很可能导致最终结果无法最大程度还原涡激振动的真实情况，对于研究涡激振动的机理机制造成了很大阻碍。

Hartlen^[19]等人通过建立尾流振荡器的概念，用其表示升力的波动行为，通过对立管的二阶线性建模，发现气动升力和脉动升力系数的瞬时值成正比。试验中

发现振荡器是自激的，立管固有频率和风速成正比。虽然 Hartlen 的理论的提出最初是针对空气动力学问题，不过由于其理论的出色适应性，仍然有部分学者通过对其修正后应用到计算流体力学的数值模拟中。该试验证明了尾流振荡器的概念在未来研究中的潜力。

Matteo Luca^[20]等人建立了关于横流向中细长钝体尾流的模型，模型遵循范德波尔振子连续分布，振子沿立管展向排列，相互之间通过扩散作用模拟剪切流中的漩涡脱落。模型可以通过对参数的解析获得漩涡的尺寸，此外模型中的扩散作用成功的描述了均匀流中弯曲结构对漩涡脱落的整体抑制。

Facchinetti^[21]等人分析了一系列涡激振动的低阶模型，模型采用 Van der Pol 方程来漩涡脱落的脉动特性进行数值模拟。该尾流振子与单自由度振子运动方程相互作用，模型还考虑了流固耦合的线性耦合项，试验从耦合项的选择和模型参数的取值等方面从动力学角度进行了分析和讨论。试验推导出了模型响应的闭合形式关系，并将数值模拟结果与模型试验的结果进行比较，发现作用在立管上的线性惯性力可以描述涡激振动现象的大部分特征。

Facchinetti^[22]等人通过行波方法研究了立管在均匀流下横流向的涡激振动，数值模拟模型采用 Van der Pol 尾流振子模型，建立了近尾迹模型，并和模型试验数据进行了比较。该试验建立了涡激振动的选择准则，根据斯特劳哈尔定律选择频率，立管结构根据色散关系来确定波数。试验对于立管结构参数的选取以及涡激振动特性估计提供了重要的参考，为实际工程领域做出了巨大贡献。

Iwan^[23]等人提出了用于分析结构系统涡激振动响应的模型，该模型通过引入隐变量来描述动力学效应，模型参数可以根据固定元件或者受迫元件的实验数据来选择，此外弹性安装元件响应模型的结果也对模型参数的选择也有重要影响，试验将模型预测数据与真实测量值进行了对比，结果表明引入隐变量对描述动力学效果有很大提高。

唐世振^[24]等人考虑了横流向流固耦合的涡激升力成分，以及顺流向的脉动拖曳力从而对经典的尾流振子模型进行了修正，并通过 Matlab 进行了数值模拟并与模型试验进行了比对。数值模拟结果显示，当质量比超过 6 时，立管顺流向振动产生的影响对横流向振动几乎不起作用，横流向振动频率大约是顺流向的振动频率的 $\frac{1}{2}$ ，与模型试验结果吻合良好，在频率比不同时，低约化速度对横流向涡激振动可以起到抑制作用。该试验对两向涡激振动的研究进行了比较全面的分析和深入的研究，研究结果对于工程应用有重要意义。

Mathelin^[25]等人利用范德波尔振子分布模型模拟了结构的振荡尾流,来研究立管细长结构与剪切流的相互作用机理。试验立管的长度由小到大增加,发现当长度增加到一定程度,会因为锁定阶段的漩涡诱导产生波包,试验对波包的振幅和分布进行了理论分析,同时也指明了该模型的局限性,即只能用尾流与结构物之间的局部相互作用来描述。

Furnes^[26]等人建立了三维时域模型,模型考虑了顺流向和横流向的偏转的影响,通过引入分段线性函数来计算流体力的分布。试验在每个间隔处设置尾迹振荡器,用来模拟漩涡脱落引起的升力系数和阻力系数。试验利用自由跨管道储罐模型试验数据作为参照,发现该三维模型可以很好的复现模型试验中的特征。

Fei Ge^[27]等人建立了三维时域模型来研究立管的涡激振动响应特性,其将立管轴向和横向偏转结合在一起,模型用一对非线性振子来描述尾流沿立管的分布,用加速度耦合项将尾流振荡器与立管动力学耦合。模型还考虑了非线性流体力模型,用来反映立管和流体间的相对运动。模拟结果和自由跨立管水池试验数据进行了比对。结果表明,该模型计算出的振动频率,主振振型,驻波和行波的转变都与模型试验结果非常吻合,当顺流向曲率不小于横流向曲率时,顺流向和横流向的振动都对立管疲劳损伤有重要的影响。

黄维平^[28]等人首先通过数值模拟实验发现对于细长柔性立管,流固耦合现象明显,立管自身的运动对于流场的影响很大,从立管尾部脱落的漩涡影响了涡激升力和脉动拖曳力,反作用于立管的运动。黄维平基于以上分析,提出了一个考虑两自由度的立管弯曲振动的涡激振动分析模型,如公式 1-1 和 1-2 所示。黄维平用提出的公式进行了数值模拟试验,预实验结果对比发现,约化速度在小于 12 范围内吻合良好。

$$(m + m_a)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f_D(z, t) + \frac{1}{2}C_D\rho D(U - \dot{x})|U - \dot{x}| \quad (1-1)$$

$$(m + m_a)\ddot{y} + (c + c_d)\dot{y} + ky = f_L(z, t) \quad (1-2)$$

吴学敏^[29]等人对泻涡频率和涡激升力模型做出了修正,如公式 1-3 和 1-4 所示,其中 \dot{x} 为立管顺流向速度,公式体现了流固耦合对立管涡激振动的影响程度。吴学敏还对立管涡激升力做了模拟分析来进行验证,发现涡激升力谱数据实测值和模拟值非常接近。

$$f'_s = \frac{St \cdot (U - \dot{x})}{D} \quad (1-3)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho D (U - \dot{x})^2 \cos(2\pi f_s' t) \quad (1-4)$$

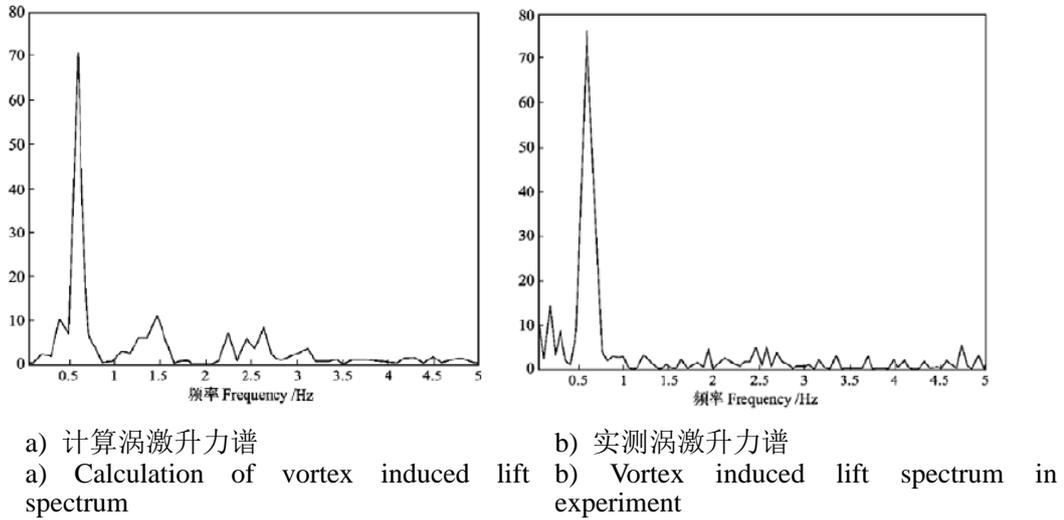


图 1-5 涡激升力数值模拟和试验对比结果

Fig.1-5 Comparison of numerical simulation and experimental results of vortex induced lift

吴学敏将修正后的公式融入到立管非线性涡激振动时域模型中，得到如公式 1-5 和公式 1-6 的横流向和顺流向运动方程。发现当泄涡频率和立管自然频率不一致时，将会产生具有一定带宽的随机涡激力，流速增加，立管的振动幅度增加，但是这种增加是非线性的，研究结果对立管因涡激振动产生的疲劳损伤进行预测具有重要意义。

$$(m + m_a)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \frac{1}{2} C_D \rho D (U - \dot{x})^2 + \frac{1}{2} C''_D \rho D (U - \dot{x})^2 \cos(4\pi f_s' t) \quad (1-5)$$

$$(m + m_a)\ddot{y} + (c + c_a)\dot{y} + ky = \frac{1}{2} C_L \rho D (U - \dot{x})^2 \cos(2\pi f_s' t) \quad (1-6)$$

1.2.3 基于计算流体力学和结构力学的数值模拟分析

近年来随着计算机的发展，CFD 方法由于其开展试验简易，并且有众多的开源求解器可以选择，便于二次开发，此外由于 CFD 方法可以产生大量的数据，能够很好的展示涡激振动的细节，受到大量研究人员和学者的追捧，越来越多的研究人员开始采用 CFD 方法来研究涡激振动。

Yamamoto^[30]等人主要研究了振荡流中柔性立管和来流间的相互作用力对VIV的影响。Yamamoto将数值模拟结果与Fujarra(1997)的试验数据进行比较,发现沿立管长度方向,尾涡的脱落呈现混合模式,2S模态在振幅较小区域内出现,振幅较大区域内则呈现出2P模态,模态转换发生的位置高度随着流速的下降而降低。

端木玉^[31-33]以Chaplin^[2]模型试验作为对照,证明了viv-FOAM-SJTU求解器的准确性,从顶端预张力、来流速度以及质量的影响角度展开研究。发现顶端张力的增加会降低立管的振动模态,质量比的增加会使立管振动模态提升,来流速度越高,立管的振动模态也越高。

黄智勇^[34]等人采用RANS方法分析了低质量对立管涡激振动的影响,试验中考虑了两个流向的振动对横向振幅的影响。试验结果展示了各种尾涡模式,而且清晰的绘制了均匀流中立管的运动轨迹。

Karniadakis^[35]等人给出了雷诺数为1000时柔性立管涡激振动的数值模拟的结果,该模拟基于一类新的谱方法,适用于非结构网格和混合网格。模拟中通过改变结构的弯曲刚度来获得立管流固耦合的振动响应。试验发现,立管横流向振动幅值约为一个直径,和模型试验测量值较为接近。

Gallardo^[36]等人为了探究湍流尾迹的物理机制,开展了圆截面曲面绕流的数值模拟试验,如图1-6所示。流入速度和圆柱体曲率保持一致,并朝向其凸面。该试验在雷诺数为3900下进行。瞬时尾涡结构表明,漩涡主要与曲轴对准,存在一个单独的主控频率影响泻涡频率。根据速度-时间曲线证实了在剪切层具有间歇性的特点,其具体表现为大幅度波动。在回流区的二次流更是加剧了湍流的不稳定性。

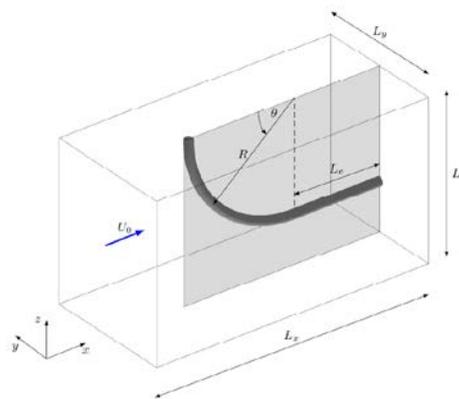


图 1-6 计算域大小,几何和流体设置

Fig.1-6 Computational domain size, geometry and flow configuration

Evangelinos^[37]等人在雷诺数为 1000 的情况下采用直接三维数值模拟方法,研究了 Reynolds 数对短立管振幅和长立管振幅,升力系数和阻力系数地影响。结果表明,Skop, Griffin & Ramberg (1977) 给出的经验公式高估了阻力系数,通过修正后得出可以在低维度下可以准确预测流体力学的结论。

Srinil^[38]等人重点研究了变张力下垂直立管在线性剪切流中的涡激振动现象,在不同剪切流剖面的情况下进行了数值模拟,从非动力学特性等角度进行了评测,预测结果对日后学者开展模型试验或者进行数值模拟提供了一个有力的参考,甚至可能称为该领域研究的基准之一。

付博文^[39-42]以王俊高^[12]的模型试验作为对照试验,验证了求解器的有效性,对立管的涡激振动进行了模态,振型等角度进行分析,通过对流场信息的整合,分析了顺流向振动的三种主要成分的形成原因。并通过数值模拟的结果,发现顺流向与来流的相对速度较小时,顺流向振动幅值响应也较小。

黄智勇^[43]等人首先对剪切来流,均匀来流等工况下进行了直接数值模拟,成功的观测到了三维尾涡结构。采用雷诺平均处理方法针对低质量比的柔性立管进行了数值模拟,发现剪切率即使在不同雷诺数下,也会存在至少一个锁定区间。在阶梯来流作用下,出现了多模态现象,并在几种模态之间相互切换,这是由于沿立管轴向的附加质量造成的。

董婧^[44]等人在数值模拟研究中采用了离散涡方法,试验观察到了“建立-锁定-衰退”现象发生的过程,通过比较单自由度和两自由度立管横流向的振动幅值响应,有效的说明了离散涡方法是研究立管涡激振动的有效途径,离散我方法在高雷诺数下依然具有可行性,这对高雷诺数下的研究提供了重要的参考。

Meneghini^[45]等人在立管单自由度的涡激振动问题中采用了二维离散涡方法,将模型计算结果的振动幅值响应与 Khalakhe Williamson (1996) 的实验数据进行了对比,实验结果表明,数值模拟的最大振动幅值响应要低于模型试验的结果,但是由于二维离散涡方法消耗费用较少,对定性研究立管涡激振动和开发涡激振动的求解器提供了很好的参考。

Joel^[46]等人提出了一种在高雷诺数下求解 N-S 方程的解决方案,该模型通过计算机生成的伪随机数对尾涡的产生和扩散进行了数值模拟,但是也为此付出计算可能不收敛的代价。该数值方法还提出了采用涡线代替涡流的思路来模拟三维流动问题,对于三维尾涡的数值模拟具有重要的参考意义。

王哲^[47-50]对 viv-FOAM-SJTU 求解器引入平台垂荡的影响,并通过 Franzini 的模型试验验证了扩展求解器的有效性, Franzini 模型试验立管外径 22.2 毫米,

长为 2.552 米，预张力设置为 40N，模型试验布置如图 1-7 所示。然后深入分析了不同垂荡振幅，不同来流速度，以及不同垂荡激励频率下立管振动模态转换背后的机理机制。试验发现预张力大小对平均位移和平均曲率的结果具有决定性作用，平台自身的垂荡运动对计算结果中的幅值响应具有放大效应。平台的激励频率较高时，立管涡激振动的幅值响应会因此受到一定程度的抑制，但是会增加立管曲率从而加剧立管的疲劳损伤。

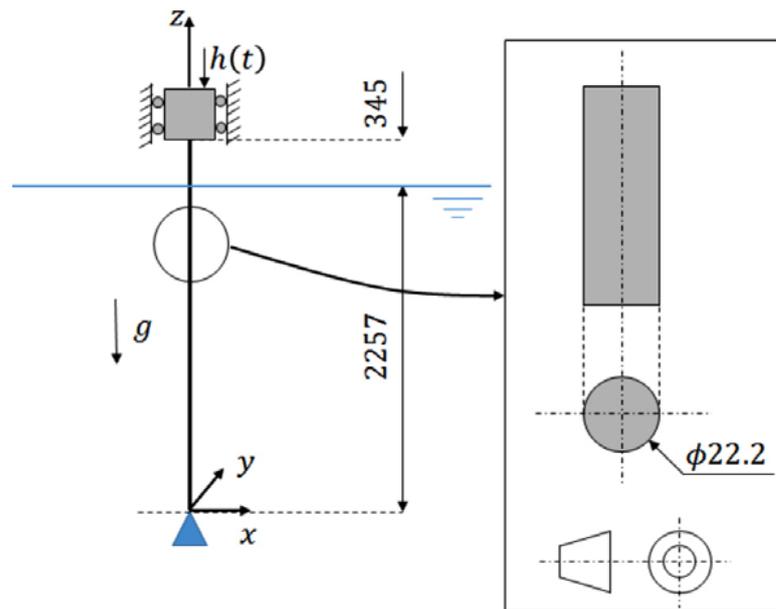


图 1-7 Franzini 模型试验装置示意图

Fig.1-7 Sketch of the Franzini experiment setup

武磊^[51]对串列双立管在不同浸没长度下的涡激振动进行了数值模拟，立管布置如图 1-8 所示，双立管下部 40%浸没于流速为 0.55 m/s 的均匀流中。试验发现立管所受流体力随着立管浸没长度的增加而增加。下游立管会随着浸没长度的增加，受到上游立管的尾流影响也随之增加，下游立管的涡激频率将不再保持稳定，并在试验中观察到了多模态现象。

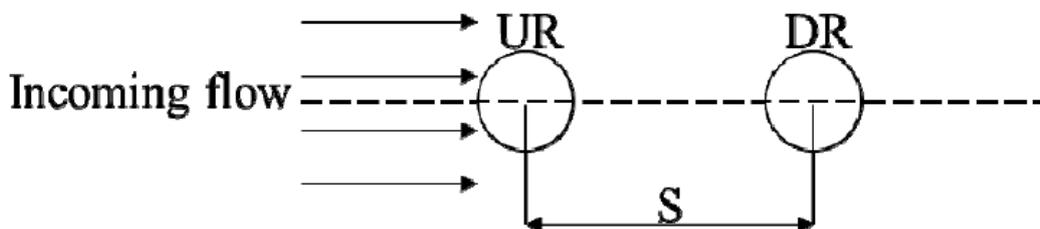


图 1-8 串联立管布置示意图

Fig.1-8 Schematic view of risers in tandem arrangement

1.2.4 基于机器学习对涡激振动的预报及分析

近年来随着计算机技术的发展和数据量的增加，以机器学习为代表的新兴技术逐渐出现在研究人员的视野，从 AlphaGo 到无人车，机器学习向世人证明了其强大的能力。在数值模拟领域，通常一次计算会产生大量的数据，这些数据是训练机器学习模型天然土壤，另外数值模拟相较于模型试验虽然开展实验较快，但是一般情况下也需要借助超算中心等资源，完成一次普通的数值模拟通常需要一周的时间，这在面对实时性要求较强的需求时，数值模拟显得力不从心。

而机器学习模型通常可以通过分布式训练等途径来加快其训练速度，当模型训练完毕，可以实现实时性预测，并且通常具有很高的准确度。目前进行通过机器学习模型来对立管涡激振动进行预报的研究较少，可以研究的空间较大，研究成果进行工业落地并转化为生产力的过程大大加快，是未来研究的一个重要方向。

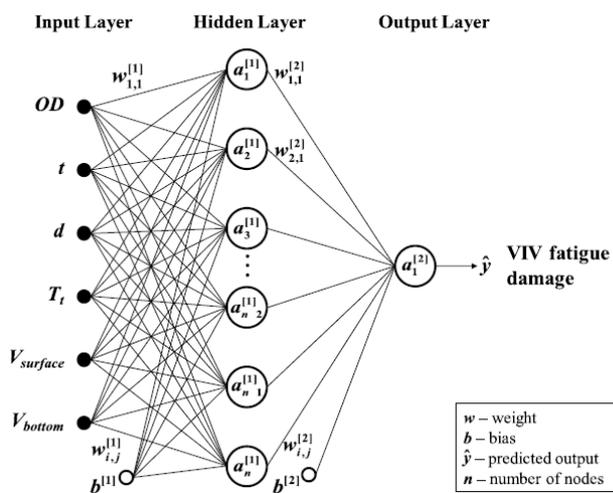


图 1-9 两层神经网络模型

Fig.1-9 Architecture of 2-layer neural network

Wong^[52]等人通过构建人工神经网络模型（Artificial Neural Network, ANN）来对立管涡激振动的疲劳损伤进行了预测，其构建的 ANN 模型如图 1-9 所示，其模型只包含一个隐含层，比较了 Sigmoid, Tanh, ReLu 等激活函数在 ANN 中的表现，在平均误差均方根图（Mean Squared Error）和平均绝对误差图（Mean Absolute Error, MAE）中进行比对，如图 1-10 和图 1-11 所示。试验发现 ReLu 和 Leaky ReLu 函数的模型收敛速度要比 Sigmoid 函数和 Tanh 函数快，但是收敛误差较大。

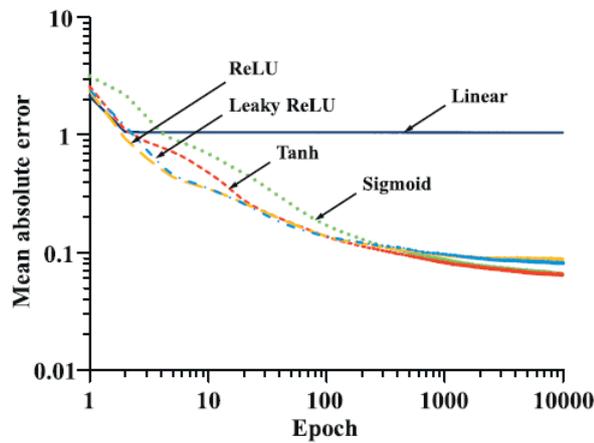


图 1-10 平均绝对误差历史图

Fig.1-10 MAE cost history

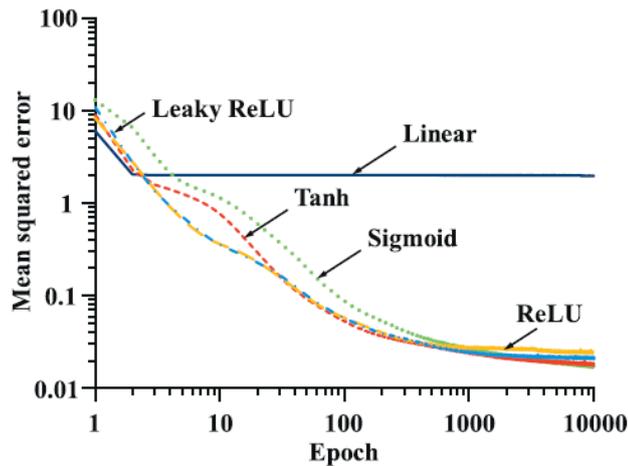


图 1-11 均方误差历史图

Fig.1-11 MAE cost history

林海花^[53]以粗糙度, KC 数和雷诺数作为输入变量, 当立管倾斜时, 会增加倾斜角度这一变量, 共记录 2000 个数据点, 初始权值在(-1, 1)之间选取, 以 S 型函数作为激活函数, 迭代计算 100 万次。该模型计算得到的无因次升力系数和阻力系数与试验值吻合良好, 只需耗时约一小时, 充分展示了 BP 神经网络在涡激振动领域的潜力。

高喜峰^[54]等人分别构建了立管涡激振动的位移预报模型和频率预报模型, 只设置一层隐藏层, 其中位移预报模型隐藏层设置 20 个神经元, 频率预报模型隐藏层设置 15 个神经元, 层间采用 Sigmoid 函数作为激活函数。位移预报模型样本量为 1680, 以轴向力, 流速, 立管上的空间位置作为输入量, 选取 30 个样本作为验证集, 频率预报模型以轴向力和流速作为输入量, 共 80 个样本点, 从中选取 10 个样本点作为验证集。模型以相关系数 R^2 作为模型评价标准, 试验发现位移预报模型的相关系数可以超过 0.8, 频率预报模型的相关系数可以超过 0.9, 证明了模型具有很强的预报能力。

孟杨^[55]利用 BP 神经网络和卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN) 构建了钝体绕流预报模型, 圆柱绕流预报模型, 并研究了物理模型与机器学习的模型融合, 将物理模型嵌入到神经网络中, 来辅助确定神经网络中的参数。试验发现 CNN 模型对于钝体绕流的预报精度要明显高于 BP 神经网络模型。在不同雷诺数, 立管半径不同条件下, CNN 模型的精度要比 OpenLB 物理计算模型的精度要提高一个数量级。该工作为神经网络与物理模型的融合做出了重要的奠基性贡献。

Raissi^[56]等人将 N-S 方程求解和神经网络模型进行融合, 构建如图 1-12 所示的网络结构, 以时间, 横流向和顺流向的位移作为输入量, 包含两个隐藏层, 输出对横流向, 顺流向速度, 压力场的预测结果。其首先在给定速度场和结构运动的时空离散数据下, 使用耦合的神经网络预测出立管结构参数和压力长信息, 并重建了速度矢量场。其次通过给定的离散时空数据, 使用五个全耦合的神经网络来预测速度矢量, 该模型可用于多耦合物理问题, 还可以用于流量控制应用以及系统辨识。

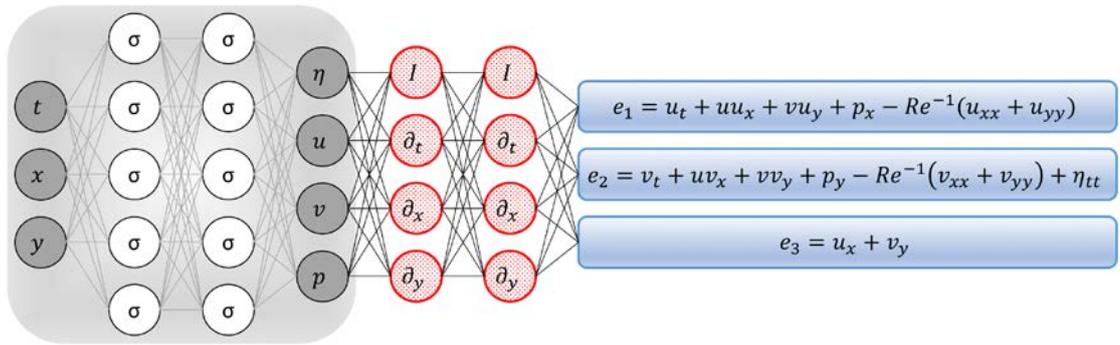


图 1-12 Navier-Stokes 神经网络

Fig.1-11 Navier-Stokes informed neural networks

1.3 本文主要工作及创新点

1.3.1 本文主要工作

目前针对深水柔性立管的研究工作通常集中在立管顶端和底端固定，通过改变流场信息，来研究立管涡激振动的特性，而实际工况时顶端平台通常会有水平和竖直方向的运动，相对于立管来讲，会产生水平和竖直方向的激励，而此方面的研究成果相对较少，来流与平台联合作用于立管的涡激振动更是稀少，本文的工作可以弥补这一空白。

将机器学习算法尤其是深度学习算法应用于深水柔性立管涡激振动的预报近年来逐渐成为立管涡激振动领域的研究热点，本文通过合理的布置算例，在数据量和预报精度上都有了大幅提高，在预报信息方面，通过合理设置神经网络的结构，可以输出如两自由度位移，频率，均方差等高阶信息，本文的主要工作主要分为以下几方面：

本文设置均匀流，分别令顶端平台做振动幅度和频率相同的横荡和纵荡运动，来对比分析平台和来流联合作用下对立管涡激振动的影响。

本文利用 BP 神经网络，以顶张力，均匀来流速度，节点的空间位置作为输入量，通过布置三个隐藏层，可以对立管的瞬时运动的横流向和顺流向的位移进行精准预报。

本文利用 BP 神经网络构建了立管涡激振动时均运动预报模型，以顶张力，均匀流速度，节点的空间位置作为输入量，设置两个隐藏层，可以对立管横流向和顺流向时均位移，位移标准差，曲率，曲率标准差和横流向频率进行精准预报。

1.3.2 本文创新点

本文设置均匀流，分别令顶端平台做振动幅度和频率相同的横荡和纵荡运动，来对比分析平台和来流联合作用下对立管涡激振动的影响。考虑平台和来流联合作用下的数值模拟实验室以及学术界目前资料几乎处于空白，本数值模拟实验很好的弥补了这一方面的资料，为后续研究以及工业模型落地提供了很好的参考。

本文利用 BP 神经网络，以顶张力，均匀来流速度，节点的空间位置作为输入量，通过布置三个隐藏层，可以对立管的瞬时运动的横流向和顺流向的位移进行精准预报。相较于以往横流向位移和顺流向位移需要分别预测，本模型综合考虑了两个方向上位移数据的相关性，仅需要一个模型即可同时完成对横流向和顺流向位移的预测，并且准确度和训练时间都相较于以往模型更优。

本文利用 BP 神经网络构建了立管涡激振动时均运动预报模型，以顶张力，均匀流速度，节点的空间位置作为输入量，设置两个隐藏层，可以对立管横流向和顺流向时均位移，位移标准差，曲率，曲率标准差和横流向频率进行精准预报。模型的创新点在于其增加了输出层神经元的数量，付出的代价仅仅是增加了隐藏层神经元的数量，而并没有新增隐藏层。模型可以对横流向和顺流向曲率进行预测，这在以往还没有模型能够对这些数据进行预测，相较于以往的模型在输出信息量上有了很大的提高。

利用 BP 神经网络进行预测，对于实时性预报会有重大促进意义，并且通过少数量的数值模拟试验即可训练一个模型，理论上可以在相同立管参数下预测无数组结果，很大程度上节省了计算资源。

第二章 数值模拟方法

2.1 粘性流场的数值模拟

三维流场的直接计算是一个典型的大规模计算问题，需要耗费大量的资源。一种比较好的方法是沿立管的轴向方向选取若干切片，并应用 CFD 方法求解每个切片处的水动力。认为可以通过计算每个切片处的流体力，从而求解得到整个立管所受的流体力，即通过切片的流场信息综合后获得整个流场的信息，其优点是可以节省大量的计算资源，效率较高。切片法如图 2-1 所示。

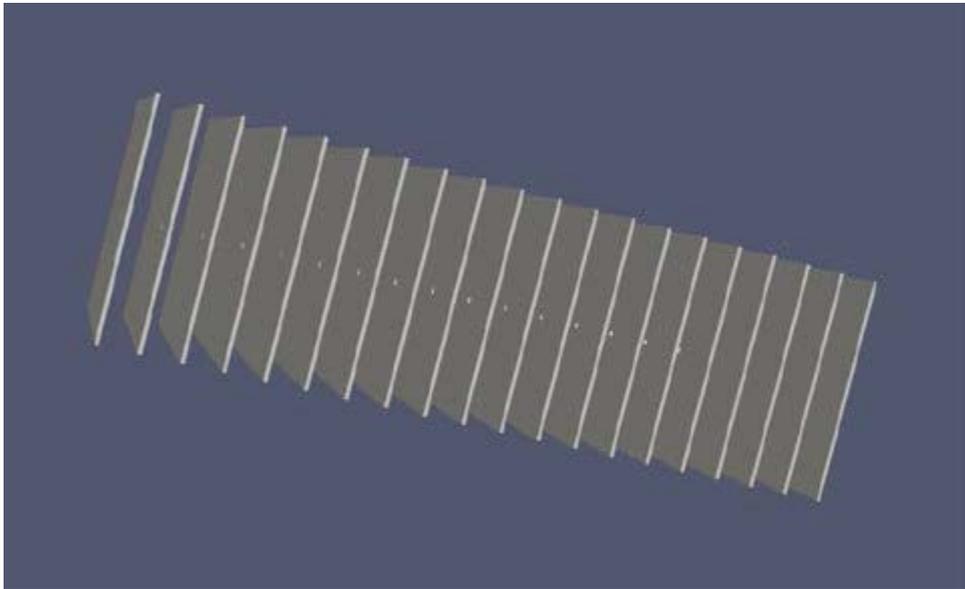


图 2-1 沿立管轴向的切片

Fig.2-1 Strips equidistantly distributed along the span of the cylinder

粘性流场的数值模拟主要是通过求解切片处流场的控制方程，主要涉及公式 2-1 所示的连续性方程和公式 2-2 所示的动量方程，

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij}) \quad (2-2)$$

式中 ρ —— 流体密度；

p —— 压力；

μ —— 流体的动力粘性系数；

S_{ij} —— 应变率张量， $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ；

为了进一步求解方程，通常选择 RANS 方程并配和 SST $k - \omega$ 模型，改写后的方程如公式 2-3 和公式 2-4 所示

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \overline{u'_j u'_i}) \quad (2-4)$$

式中 τ_{ij} —— 雷诺应力项， $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_j u'_i}$ ；

\bar{S}_{ij} —— 时均应变率张量， $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ ；

此时又增加了一个未知量 τ_{ij} ，为了使方程封闭，需要引入湍流模型。雷诺应力和平均速度梯度则通过 Boussinesq 假设联系起来：

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_j u'_i} = 2\mu_t \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2-5)$$

式中 k —— 湍动能， $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ ；

SST $k - \omega$ 模型包含了湍动能 k 和耗散率 ω 的运输方程，如公式 2-6 和公式 2-7 所示

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2-6)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega \omega}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2-7)$$

式中 P —— 压力, $P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

μ_t —— 湍粘性, $\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_1)}$

F_1 —— 混合长度, $\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$

系数 ϕ_1 和 ϕ_2 分别代表近壁面和边界层外的 $k - \omega$ 模型, 可以通过预定义常量计算得到。

2.2 立管结构的数值模拟

对于立管的计算结构力学分析, 采用切片切片法将立管划分为小的单元后, 将切片处的水动力系数换算成均布载荷施加到每个立管单元上。均布载荷的施加位置为沿立管轴向上每个切片上下间距的一半, 如图 2-2 所示。

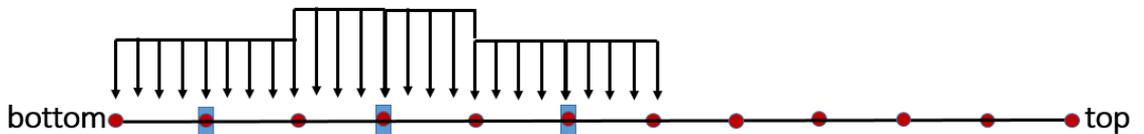


图 2-2 均布载荷作用示意图

Fig.2-2 Schematic diagram of uniform load action

考虑到力和力矩的平衡, 梁的横向运动可用四阶微分方程表示。图 2-3 展示了梁段微单元受力分析模型:

将立管视为小变形的欧拉伯努利梁, 两端简支, 得到梁弯曲刚度和张力横向变形的微分方程, 如公式 2-8 所示

$$EI \frac{\partial^4 u(z,t)}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left(T(z) \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} \right) + m \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} = f(z,t) \quad (2-8)$$

式中 m —— 质量

- $T(z)$ ——轴向张力, $T(z) = T_t(L - z)$
 T_t ——施加在立管顶端的预张力
 L ——立管长度
 ω_s ——立管浸没在水中的单位长度的质量
 EI ——弯曲刚度

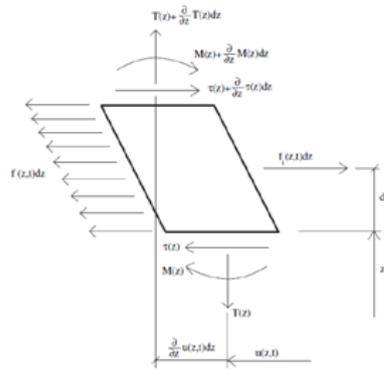


图 2-3 梁段微单元模型
 Fig. 2-3 Infinitesimal beam element

将结构阻尼引入到振动系统中，所选用的 Reyleigh 阻尼模型在工程领域有着广泛的应用。在 Reyleigh 模型中，控制方程如下：

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (2-9)$$

- 式中 M ——质量矩阵
 K ——刚度矩阵
 F ——流体载荷
 C ——阻尼矩阵

阻尼矩阵 C 可以表示成质量矩阵和刚度矩阵的线性组合：

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2-10)$$

其中系数 α 和 β 可以通过立管一阶和二阶固有频率计算得到：

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{2\zeta}{f_{n1} + f_{n2}} \begin{bmatrix} 2\pi f_{n1} f_{n2} \\ 1/(2\pi) \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

结构动力学方程通过 Newmark- β 方法求得数值解，该方法可以实现在参数适当选取的情况下保持稳定。其核心思路是通过选取适当的步长和参数值，形成有效刚度矩阵，然后通过时刻 t 的位移，速度，加速度来求解在 $t + \Delta t$ 时刻的位移，速度和加速度，直到到达终止时刻。

2.3 流固耦合

流固耦合插值模块在每个时间步起始，通过求解流体力，将所得结果映射到立管模型的节点上，最后插值得到立管的运动信息。在结构场中得到立管的运动后，在流场中进行网格变形运算，得到一个新的流场。整个计算过程可以在图 2-4 中看到。

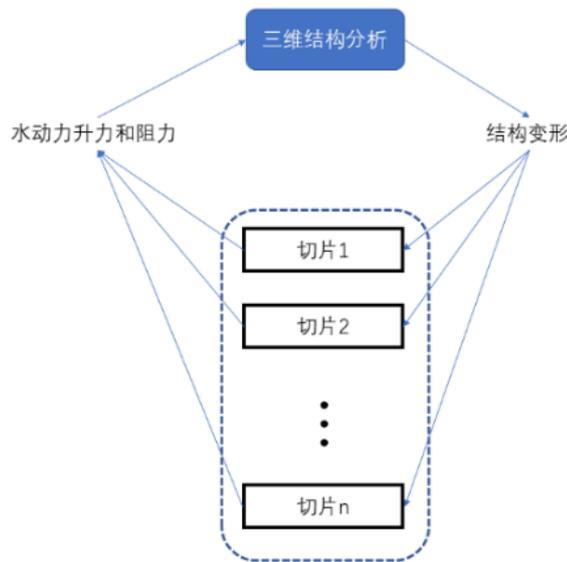


图 2-4 viv-FOAM-SJTU 流固插值模块

Fig. 2-4: viv-FOAM-SJTU diagram of fluid-structure interaction

2.4 本章小结

本章介绍了立管涡激振动数值模拟的主要方法，首先针对三维流场直接计算效率低下的问题，通过引入切片法来解决这一难题。对于粘性流场的数值模拟，通过 RANS 方程的 SST $k-\omega$ 模型来求解流体控制方程。立管结构的数值模拟则将立管视为两端铰接的 Euler-Bernoulli 梁，通过 Newmark- β 法求解结构动力学方程，根据立管的一阶和二阶固有频率来求得系数，最后通过 viv-FOAM-SJTU 的流固耦合插值模块进行流场和结构之间的信息传递。

第三章 BP 神经网络简介

3.1 感知机模型

神经元模型是研究深度学习的基础模型，如图 3-1 所示。每个神经元和另一个神经元相连，当神经元被激活的时候，与其直接相连的神经元会接收来自于被激活神经元传递的化学物质，当这种传递的化学物质产生的影响达到某个阈值，就会按照上述方式继续传递。“激活”的效果是改变了神经元内的电位，神经元处于激活状态，完成信号的传递。

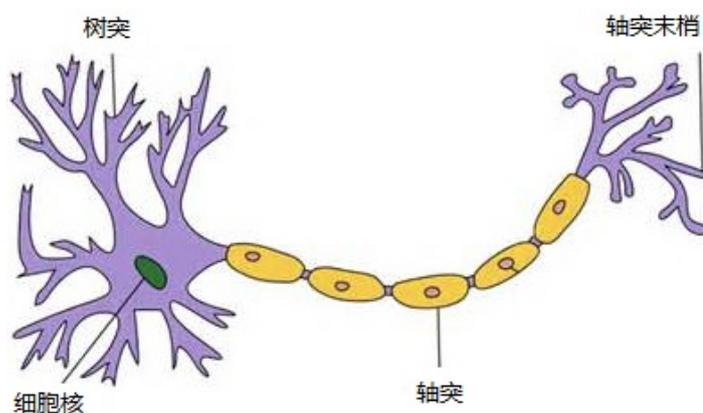


图 3-1 神经元模型

Fig. 3-1 Neuron model

McCulloch 和 Pitts^[57]等人将神经元模型向数学模型进行了转化，使其具有数学上的意义，每一个输入量对应一个神经元，一条与当前神经元相连的直线代表两个神经元之间存在连接，当前神经元接收与之相连的其他神经元传递的信息，这些信息与图中所示的权重 ω 有关。当前神经元会把收到的输入和自身阈值进行比较，如果超过了阈值，则当前神经元被“激活”，其会产生一个输出 y ，作为另一个与之相连的神经元的输入。

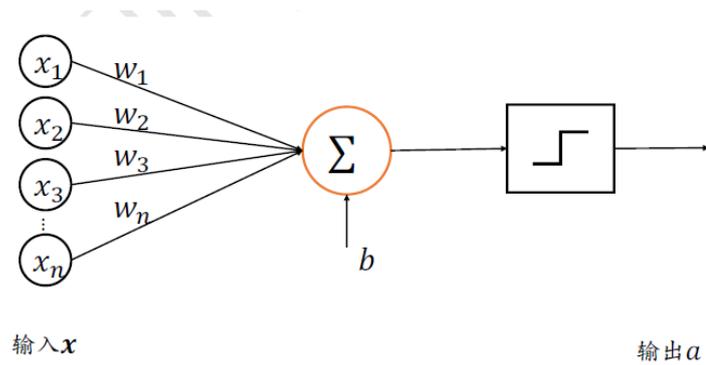


图 3-2 M-P 神经元模型
Fig. 3-2 M-P Neuron model

3.2 激活函数

图 3-3 展示了一个简单的神经元模型，其只包含一个隐藏层，输入部分通常作为输入层，定义为 L_1 层，1 作为偏置项，输出部分作为输出层，图中所示共包含三个网络层，如果共 n 个网络层，则包含 $n - 2$ 个隐藏层。

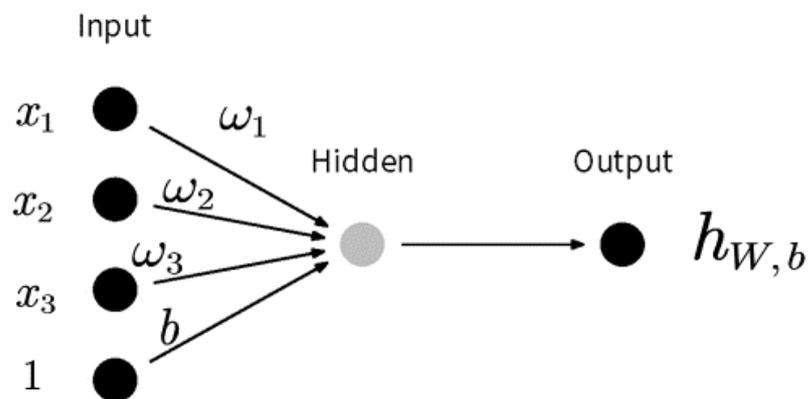


图 3-3 典型神经元结构
Fig. 3-3 Typical Neuron model

$$h_{W,b}(X) = f(W^T X) = f\left(\sum_{i=1}^3 w_i x_i + b\right) \quad (3-1)$$

式中 W —— 权重向量矩阵
 $f: R \rightarrow R$ —— 激活函数

X —— 输入矩阵

b —— 偏置项

根据生物学上神经元模型的逻辑，如果以数字 0 代表神经元处于“平静”状态，数字 1 代表其处于“兴奋”状态，神经元被激活意味着其从 0 转变为 1，那么阶跃函数很显然是一种直接的选择。但是阶跃函数在数学性质上存在天然的缺陷，其导数不连续，所以一般采用 S 型函数来作为替代，典型的比如 Logistic 函数和 Tanh 函数，其图像如图 3-4 所示。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3-2)$$

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (3-3)$$

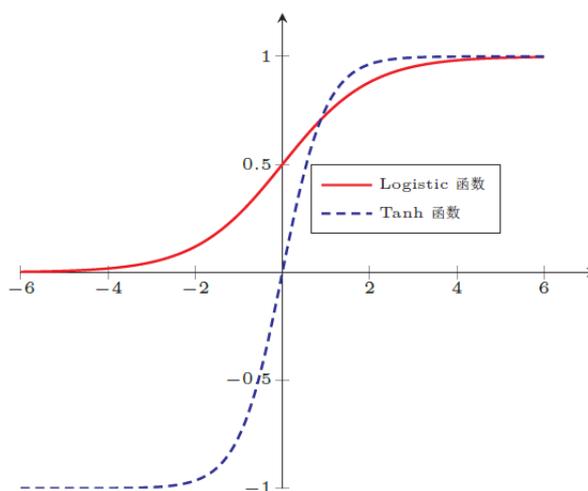


图 3-4 典型激活函数图像

Fig. 3-4 Typical activation function

由于 Logistic 函数值域为 $[0, 1]$ ，Tanh 函数的值域为 $[-1, 1]$ ，在反向传播中会造成梯度消失，关于梯度消失的概念将在 3.5 节反向传播进行细致分析。一些新的激活函数也经常会被采用，如 ReLu 函数和 SoftPlus 函数，其函数图像如图 3-5 所示

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ x & \text{if } x \geq 0 \end{cases} \quad (3-4)$$

$$f(x) = \log_e(1 + e^x) \quad (3-5)$$

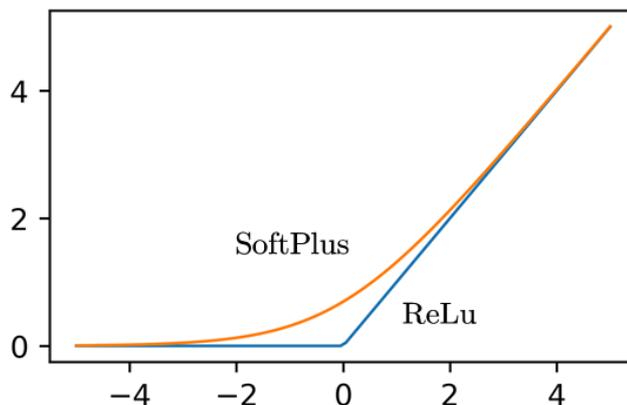
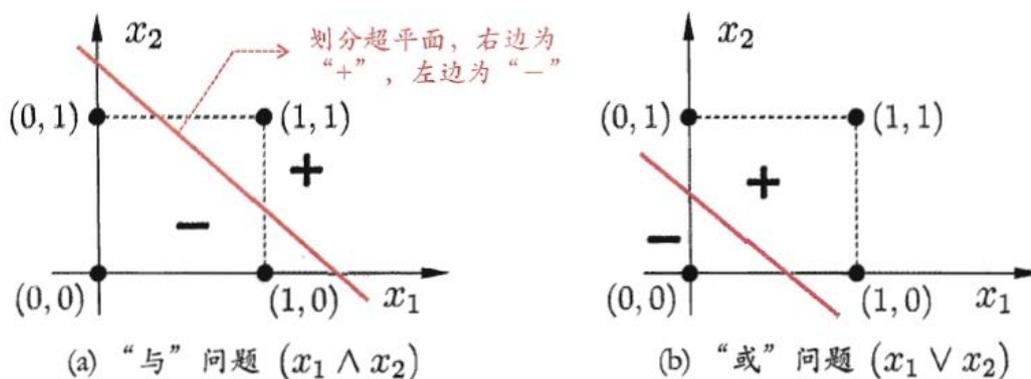


图 3-5 ReLu 和 SoftPlus 函数图像
Fig. 3-5 Relu and SoftPlus function images

3.3 多层神经网络模型

单层神经网络在最基本的分类问题中，针对“与”问题和“或”问题有很好的效果，但是对于“异或”问题则效果欠佳。如图 3-6 所示的“异或”问题。一个解决办法就是增加神经元的数量，比如对于“异或”问题，通过增加隐藏层神经元的数量，从而解决线性不可分问题，如图 3-7 所示。



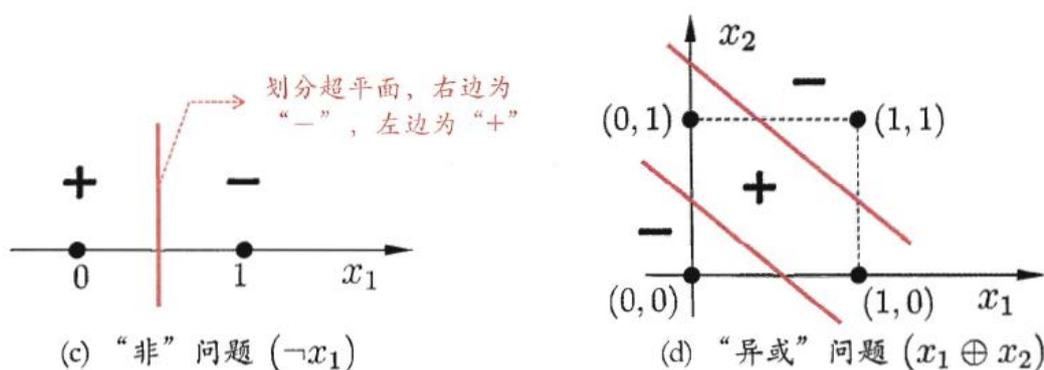


图 3-6 异或问题^[58]
Fig. 3-6 XOR problems

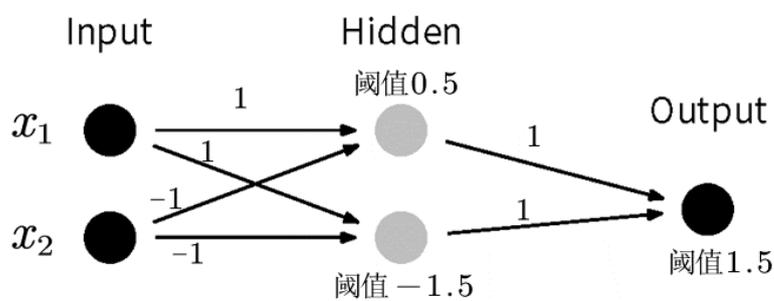


图 3-7 双层感知加解决“异或”问题^[58]
Fig. 3-7 Solving XOR problem with double layer perceptual addition

Hornik^[59]等人证明，单层神经网络如果包含足够多的神经元，其可以对任意连续函数进行拟合，并且可以设置任意精度。基于这一点，选择用多层神经网络来进行预测，通常可以通过调节隐藏层的数量和神经元的数量来实现对预测精度的控制。对于隐藏层的个数和每个隐藏层包含的神经元的个数，通常采用试错法来进行确定。

3.4 前向传播

前向传播可以通过图 3-8 所示的基本模型来进行分析，网络连接中的权重矩阵用 W 来表示，偏执项组成的矩阵用 b 来表示，设 $W_{ij}^{(l)}$ 表示第 l 层的第 j 个神经元和第 $l+1$ 层的第 i 个神经元的连接权重， $b_i^{(l)}$ 表示第 $l+1$ 层的第 i 个神经元的偏置项，网络层结构如图 3-8 所示。

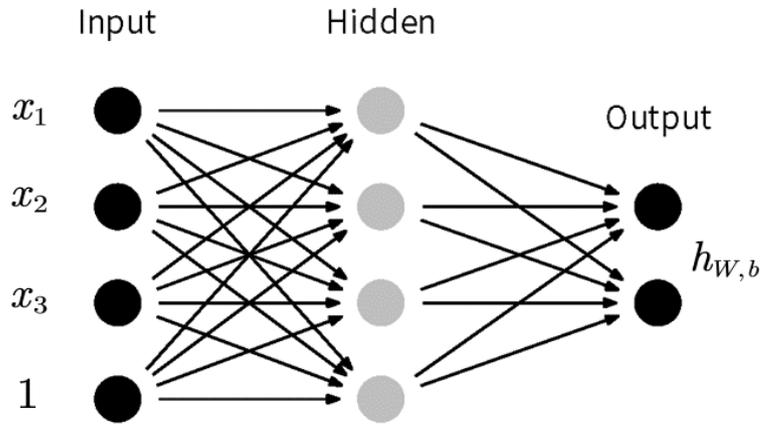


图 3-8 前馈神经网络结构

Fig. 3-8 Feedforward neural network structure

深度学习多层网络模型中，前一个神经元自身接收上一层神经元的输入，同时自身也会对下一层的神经元产生输出，第 l 层的第 i 个神经元的输出量用 $a_i^{(l)}$ 表示，第 l 层的第 i 个神经元的输入量用 $z_i^{(l)}$ 表示，对于一个样本的情况，一次前向传播计算将会得到一个输出 $h_{w,b}$ 。

$$\begin{aligned}
 z_1^{(2)} &= w_{11}^{(1)} x_1 + w_{12}^{(1)} x_2 + w_{13}^{(1)} x_3 + b_1^{(1)} \\
 a_1^{(2)} &= f(w_{11}^{(1)} x_1 + w_{12}^{(1)} x_2 + w_{13}^{(1)} x_3 + b_1^{(1)}) \\
 z_2^{(2)} &= w_{21}^{(1)} x_1 + w_{22}^{(1)} x_2 + w_{23}^{(1)} x_3 + b_2^{(1)} \\
 a_2^{(2)} &= f(w_{21}^{(1)} x_1 + w_{22}^{(1)} x_2 + w_{23}^{(1)} x_3 + b_2^{(1)}) \\
 z_3^{(2)} &= w_{31}^{(1)} x_1 + w_{32}^{(1)} x_2 + w_{33}^{(1)} x_3 + b_3^{(1)} \\
 a_3^{(2)} &= f(w_{31}^{(1)} x_1 + w_{32}^{(1)} x_2 + w_{33}^{(1)} x_3 + b_3^{(1)})
 \end{aligned} \tag{3-6}$$

通过上式推到可以得到输出 $h_{w,b}$

$$h_{w,b}(X) = f(w_{11}^{(2)} a_1^{(2)} + w_{12}^{(2)} a_2^{(2)} + w_{13}^{(2)} a_3^{(2)} + b_1^{(2)}) \tag{3-7}$$

对于 n 个样本，将会得到 n 个输出量，这个过程叫做前向传播。

3.5 反向传播算法

当得到 n 个输出量的时候，在训练集中也会有 n 个真实值，将两者之间的差值记为损失 (loss)，损失函数为：

$$J(W, b, X, y) = \frac{1}{2} \|h_{W, b}(X) - y\|^2 \quad (3-8)$$

过拟合是 BP 神经网络中经常出现的问题，通常会在损失函数中增加正则项来避免。

$$J(W, b) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J(W, b; X^{(i)}, y^{(i)}) \right] + \frac{\lambda}{2} \sum_{l=1}^{n_l-1} \sum_{i=1}^{s_i} \sum_{j=1}^{s_{i+1}} (W_{ij}^{(l)})^2 \quad (3-9)$$

神经网络训练的过程是为了让损失函数取到最小值，梯度下降法是一种对参数进行调整的常用手段，过程如下：

- (1) 初始值为一个随机数 w_0 ；
- (2) 计算在第 i 次迭代时的梯度的相反数， $d_i = -\frac{\partial}{\partial \omega} f(\omega)|_{\omega_i}$
- (3) 选择步长 α （也叫做学习率）
- (4) 更新 $\omega_{i+1} = \omega_i + \alpha \cdot d_i$
- (5) 重复第二步直到达到迭代次数的要求

梯度下降算法的直观解释如图 3-9 所示，对参数的求解如公式 3-10 和 3-11 所示：

$$\frac{\partial}{\partial W_{ij}^{(l)}} J(W, b) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial W_{ij}^{(l)}} J(W, b; X^{(i)}, y^{(i)}) \right] + \lambda W_{ij}^{(l)} \quad (3-10)$$

$$\frac{\partial}{\partial b_i^{(l)}} J(W, b) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial b_i^{(l)}} J(W, b; X^{(i)}, y^{(i)}) \quad (3-11)$$

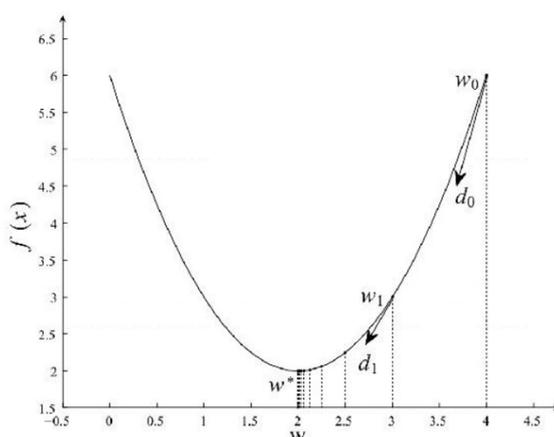


图 3-9 梯度下降算法

Fig. 3-9 Gradient descent algorithm

用 $\delta_i^{(l)}$ 表示第 l 层网络的第 i 个神经元计算得到的残差，表达式如公式 3-12 所示，通过残差来更新每一层的权重和偏置项，如公式 3-13 和 3-14 所示，发现第 l 层的参数是通过第 $l+1$ 层的参数来进行更新，这就是所谓的反向传播算法。

$$\delta_i^{(l)} = \left(\sum_{j=1}^{s_{l+1}} \delta_j^{(l+1)} \cdot W_{ji}^{(l)} \right) \cdot f'(z_i^{(l)}) \quad (3-12)$$

$$\frac{\partial}{\partial W_{ij}^{(l)}} J(W, b; X, y) = a_j^{(l)} \delta_i^{(l+1)} \quad (3-13)$$

$$\frac{\partial}{\partial b_i^{(l)}} J(W, b; X, y) = \delta_i^{(l+1)} \quad (3-14)$$

从反向传播算法中可以观察到，更新参数过程中必然会对激活函数求偏导数，而 Logistic 函数和 Tanh 函数都会在数据较大或过小的时候使偏导数为接近 0 的很小的数值，从而造成参数无法更新，这就是梯度消失，所以会有 ReLu 这样的函数来解决梯度消失的问题，解决梯度消失的其他办法是减少隐藏层的个数，并将数据进行归一化处理，从而避免出现数据过大或过小。

3.6 优化算法

在梯度下降算法中，学习率 α 的设置会影响模型的收敛速度以及避免陷入局部极小值。如果学习率的值过小，则会造成收敛速度较慢，并且容易陷入局部极

小值，如图 3-10 所示；如果学习率的数值较大，则可能出现反复横跳的现象，其避开最优解，在最优值附近振荡，如图 3-11 所示。

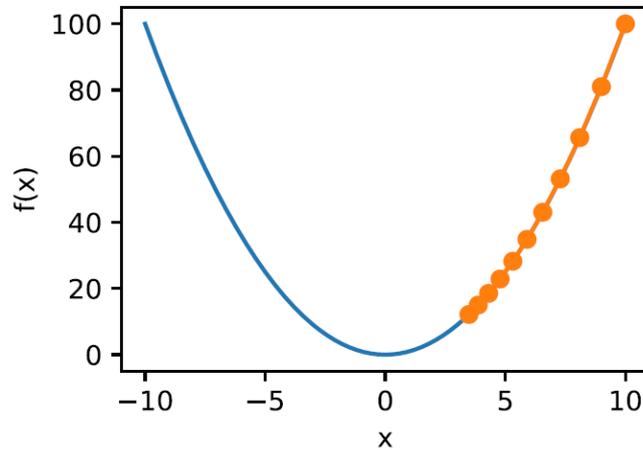


图 3-10 学习率过小
Fig. 3-10 Learning rate is lower

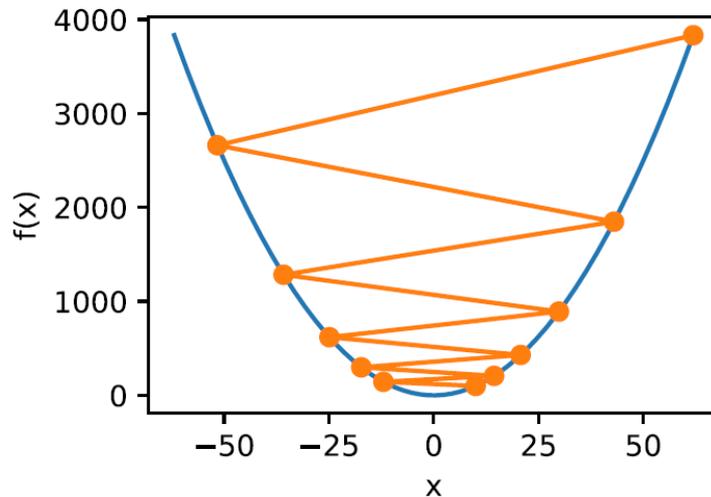


图 3-11 学习率过大
Fig. 3-11 Learning rate is higher

针对以上问题，通常可以采用随机梯度下降，L-BFGS 算法，Adam 算法等来解决。

随机梯度下降相比于梯度下降算法，其减少了每次迭代计算的开销，每次迭代随机均匀采样一个样本，并计算在该点的梯度，这样每次梯度下降计算的时间

复杂度从 $O(n)$ 降到了 $O(1)$ ，随机梯度是对梯度的无偏估计。

L-BFGS (Limited-memory BFGS) 是对 BFGS 算法的改进，相比于 BFGS 其在确定搜索方向时效率更高，只保存最近的 m 次迭代信息，从而大大减少数据的存储空间。

3.7 本章小结

本章介绍了 BP 神经网络的生物学模型神经元模型，在此基础上引出感知机模型，并分析了感知机模型的优缺点，详细的分析了各类激活函数如 Logistic 等激活函数的优缺点和适用条件。然后通过一个典型的多层神经网络模型对前向传播和反向传播算法进行了公式推导，最后分析了各类优化算法的作用。

第四章 viv-FOAM-SJTU 求解器的验证

4.1 viv-FOAM-SJTU 求解器结构

viv-FOAM-SJTU 求解器是上海交通大学万德成教授团队，在 OpenFOAM 开源求解器的基础上进行二次开发形成的求解器，其主要由流场模块，流固耦合插值模块，结构场模块三个模块组成，可以对涡激振动响应进行数值模拟，并进行时域和模态等分析。

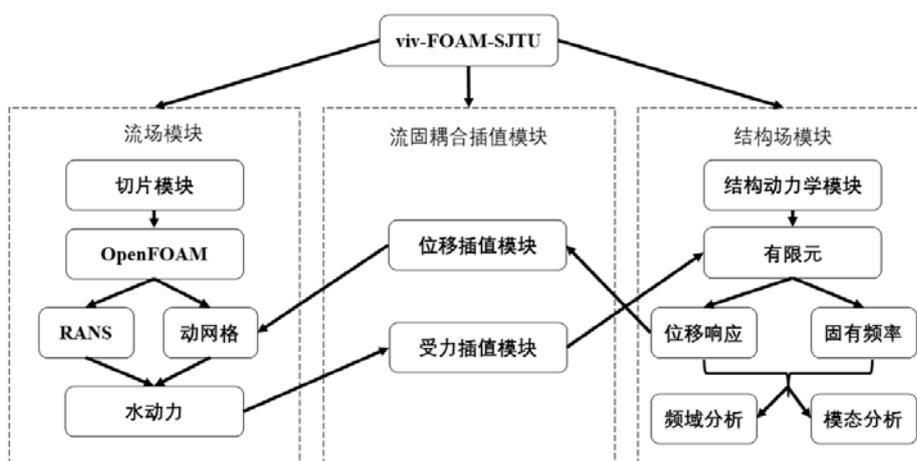


图 4-1 viv-FOAM-SJTU 求解器结构

Fig.4-1 Structure of viv-FOAM-SJTU solver

4.2 viv-FOAM-SJTU 求解器模块简介

图 4-2 展示了求解器的典型计算流程。在输入模块完成后，从流场计算模块开始，设置切片数量并划分切片，然后通过流固插值模块和结构计算模块得到响应，接着固流插值计算后，经动网格处理后进行新一轮的流场计算，循环求解。

输入模块实际上就是从外部导入数值模拟需要的参数，这些参数主要有结构参数，结构有限元求解参数和流场切片相关参数。结构参数需要输入和立管有关的信息，如线密度，弯曲刚度，直径，顶端张力，总长度等信息；结构有限元求解参数需要输入和计算结构动力需方法需要的参数如结构场划分的单元数，阻尼矩阵的参数；流场切片相关参数主要是基于切片理论，需要输入切片的数量，切片的轴向长度，流体密度，切片处的入口速度。

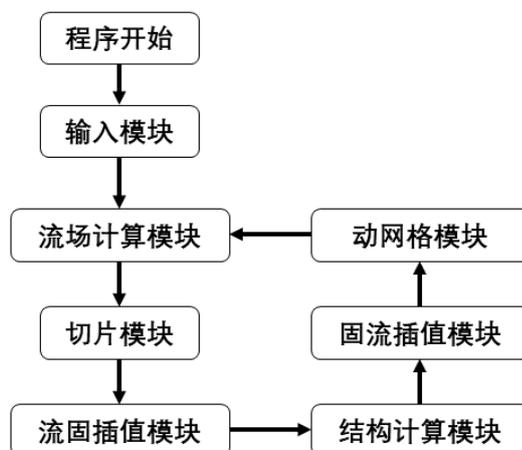


图 4-2 求解器计算流程
Fig.4-2 Calculation process of the solver

4.3 viv-FOAM-SJTU 求解器的验证

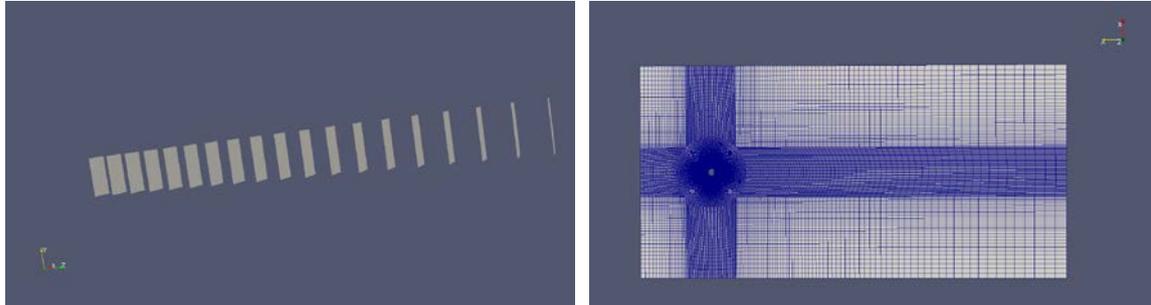
采用 Chapin^[1]的模型试验的第一组实验数据作为对照，立管浸没在水中的长度为 5.9m，设置均匀来流速度为 0.16 m/s，立管顶端预张力为 405N，试验参数见表 4-1 所示。

表 4-1 试验主要参数
Table 4-1 Parameters of the experiment

参数	符号	数值	单位
立管长度	L	13.12	m
立管密度	ρ	1.847	kg/m
立管直径	D	0.028	m
预张力	T	405	N
长细比	L/D	469	-
流速	V	0.16	m/s

数值模拟试验中模型沿立管轴向做 20 个切片，每个切片厚度为 1 厘米，计算域为 $-10D \leq x \leq 50D$ ，横流向上 $-15D \leq y \leq 15D$ ，网格量 2377600。网格采用

结构化网格，在立管附近网格布置的较为密集，在距离立管较远的位置布置的较为稀疏，近避免网格量控制在 5-10 层使其能处于层流层。模型如图 4-3 所示。



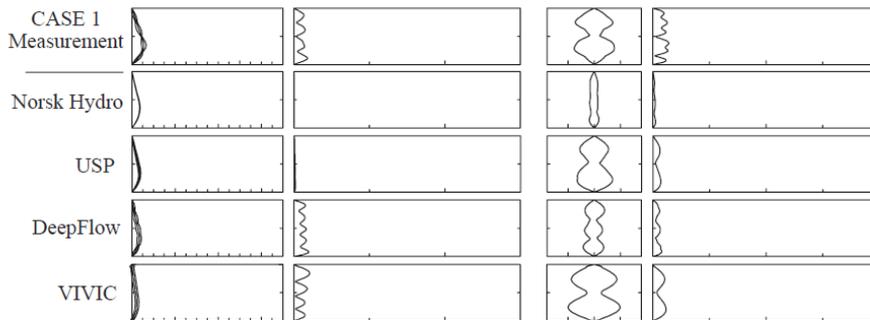
a)立管切片布置
a)Strip distribution of the riser

b)网格划分
b)Grids distribution

图 4-3 立管切片布置和网格划分
Fig.4-3 Strips and grids distribution of the riser

图 4-4 展示了模型试验在第一组工况下的实验数据，以及其他 11 组在横流向上和顺流向上的数值模拟结果。图 4-5 展示了数值模拟试验在顺流向上的数值模拟结果。图 4-6 展示了横流向上数值模拟结果。

从图 4-4 中顺流向位移标准差可以观察到，模型顺流向振型为四阶，在图 4-5 中顺流向位移标准差，以及从位移轮廓线均验证了顺流向振型为四阶。顺流向实验结果 x_{max}/D 为 1.04，数值模拟结果为 1.12；模型试验 x_{mean}/D 为 0.768，数值模拟结果为 0.774，误差较小。



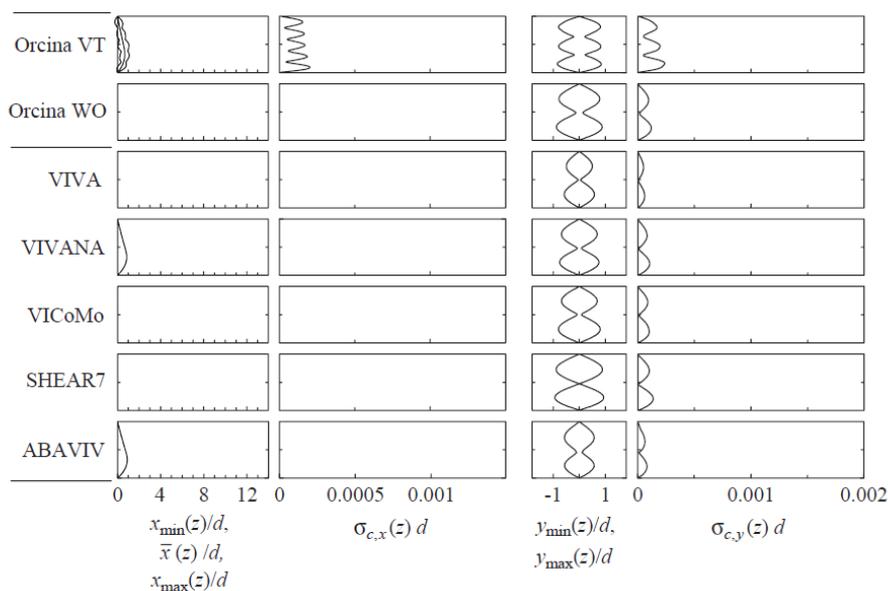


图 4-4 模型试验和其他 11 中数值模拟试验结果

Fig.4-4 Results of model test and other 11 numerical simulation tests

模型试验其横流向标准差显示其振型并不清晰，存在许多波动，这可能是试验环境受到较多干扰所致。从模型试验的轮廓线可知，其横流向振型为二阶，图 4-6 的结果和模型试验吻合。横流向上模型试验 y_{max}/D 为 0.81，数值模拟结果为 0.72，在误差允许范围内与实验结果吻合良好。

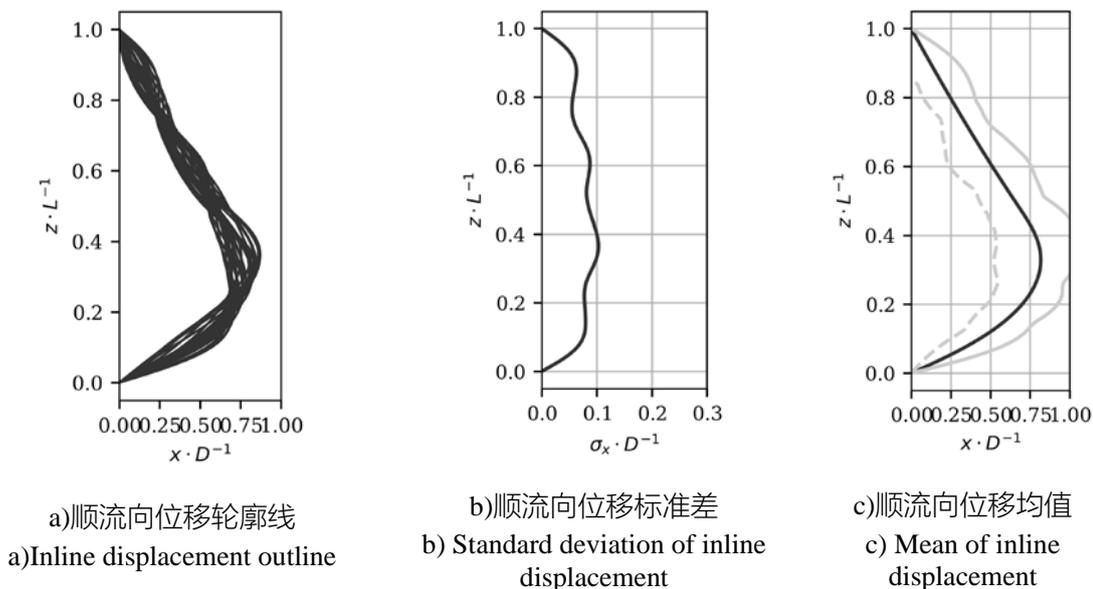


图 4-5 顺流向位移轮廓线和标准差

Fig.4-5 Inline displacement profile and standard deviation

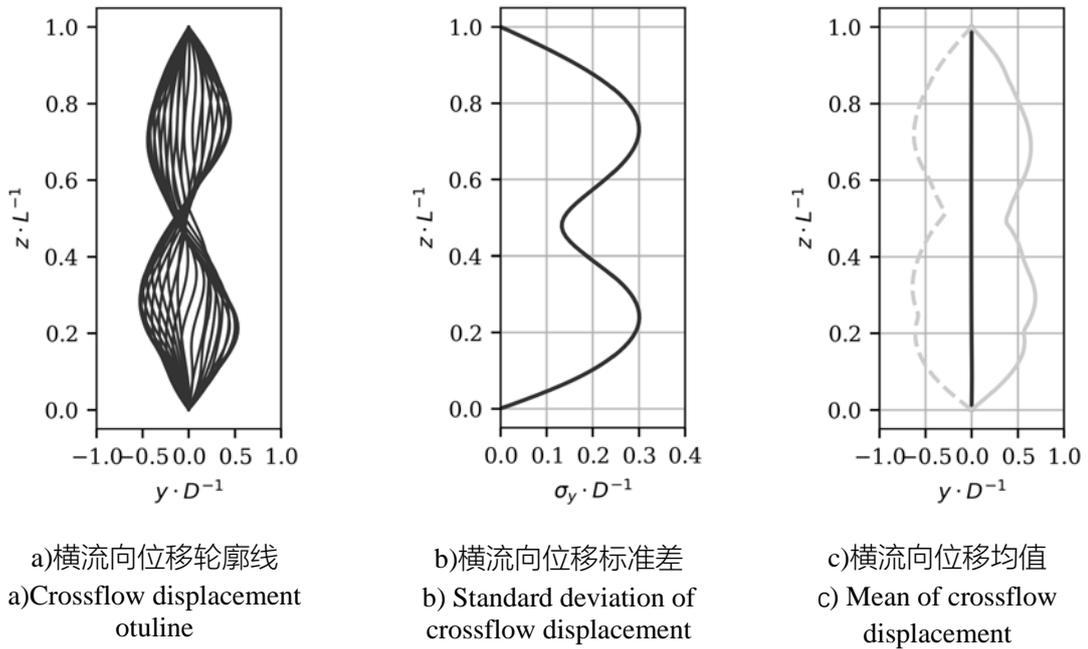


图 4-6 横流向位移轮廓线和标准差

Fig.4-6 Crossflow displacement profile and standard deviation

综合横流向和顺流向的数值模拟结果可知，模型预测值和实测数据误差很小，证明了求解器的有效性。

4.4 本章小结

本章介绍了上海交通大学万德成教授团队的求解器 viv-FOAM-SJTU，介绍了其流场模块，流固耦合插值模块，结构场模块三个模块，并展示了求解器典型计算流程。

本章通过 Chaplin 的试验作为对比试验来验证求解器的有效性。经对比验证，从两个方向位移，振型上对比了数值模拟结果和模型试验结果，结果误差较小，从而验证了求解器的有效性。

第五章 均匀来流下平台水平运动对立管涡激振动影响的数值模拟分析

5.1 计算模型

为了研究均匀来流下平台横荡和纵荡对立管涡激振动的影响,设置两组算例,立管的结构参数见表 5-1。为了便于算例配置,在立管顶端沿 x 轴施加正弦激励,保证其在两种工况下的激励周期为 8 秒,顶端激励的最大振幅为 0.32 米并保持不变,根据公式 5-1 可知 KC 数为 84。

表 5-1 立管主要参数
Table 5-1 Main Parameter of the riser

参数	单位	数值
直径	m	0.024
长度	m	12
质量比	-	1.53
单位长度质量	kg/m	1.768
弯曲刚度	N/m^2	10.5
预张力	N	500
一阶固有频率	Hz	1.08
二阶固有频率	Hz	2.16

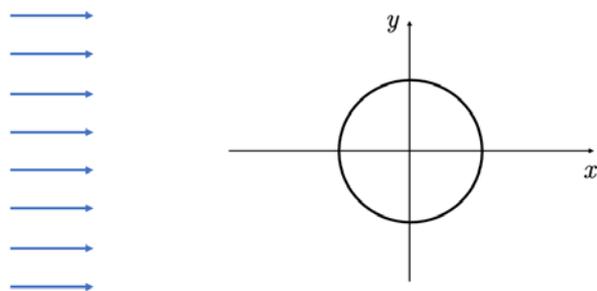
$$KC = \frac{2\pi A_m}{D} \quad (5-1)$$

$$A(t) = A_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (5-2)$$

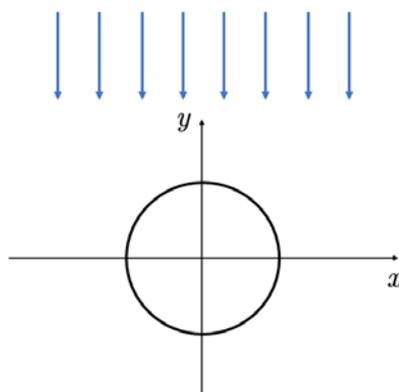
$$V(t) = V_m \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (5-3)$$

式中 T ——顶端平台运动周期;
 V_m ——激励的最大约化速度;
 A_m ——顶端平台的最大振幅。

试验中设置激励的最大约化速度为 12，设置均匀来流的速度为 6，通过改变均匀来流的方向形成横荡和纵荡工况，工况设置如图 6-1 所示。



a) 纵荡工况
a) Surge condition



b) 横荡工况
b) Sway condition

图 5-1 均匀来流下纵荡和横荡工况示意图

Fig. 5-1 Schematic diagram of surge and sway conditions flowing evenly

付博文^[60]在平台水平单方向运动，以及来流最大约化速度为 6 的三种单独工况进行了求解器验证，本文沿用其求解器和网格。沿立管轴向做 20 个切片，计算域以立管底端圆心作为原点，如图 5-2 所示，计算域长度为 $-90D \leq x \leq 90D$ ，

$$-90D \leq y \leq 90D。$$

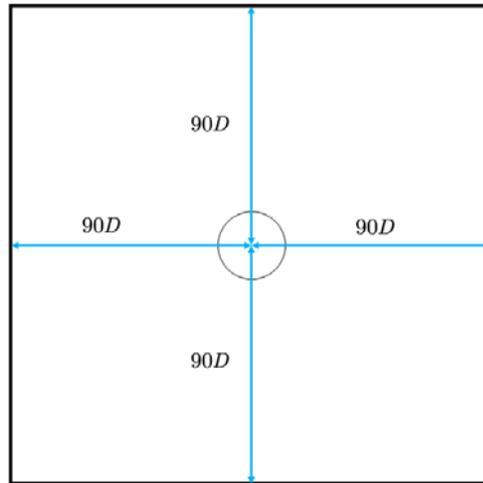
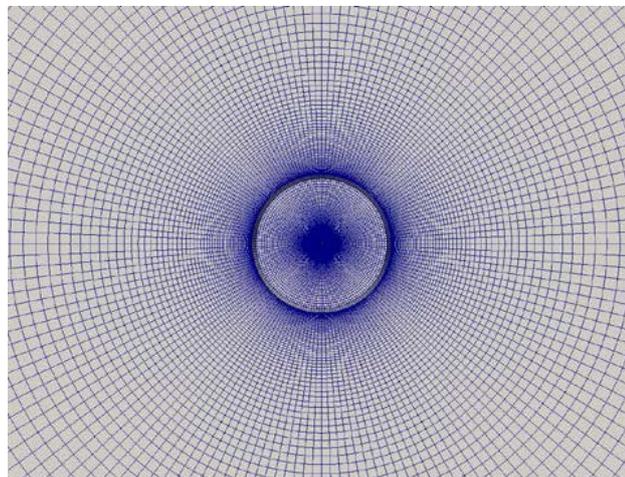
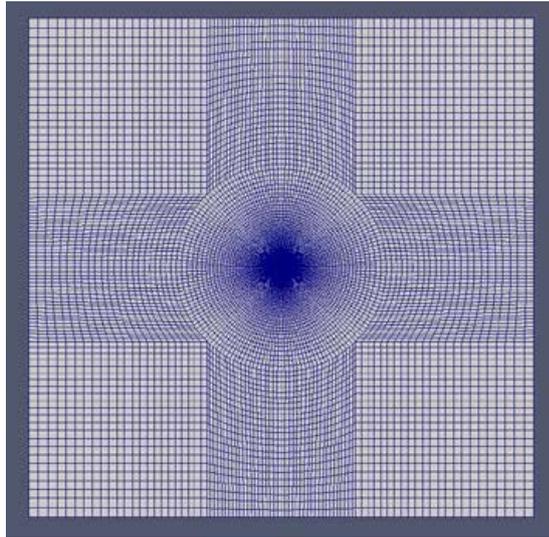


图 5-2 计算域示意图
Fig. 5-2 Calculation domain diagram

网格采用结构化网格，在立管附近网格划分的较为密集，在距离立管较远的部分网格设置的较为稀疏。近壁面处网格设置控制在 5-10 层能够处于层流层内，两种工况下网格两均为 1073920，图 5-3 展示了网格的细节。



a) 立管周围网格
a) Grid around riser



b) 单个切片计算域和网格划分
b) Single slice computing domain and meshing

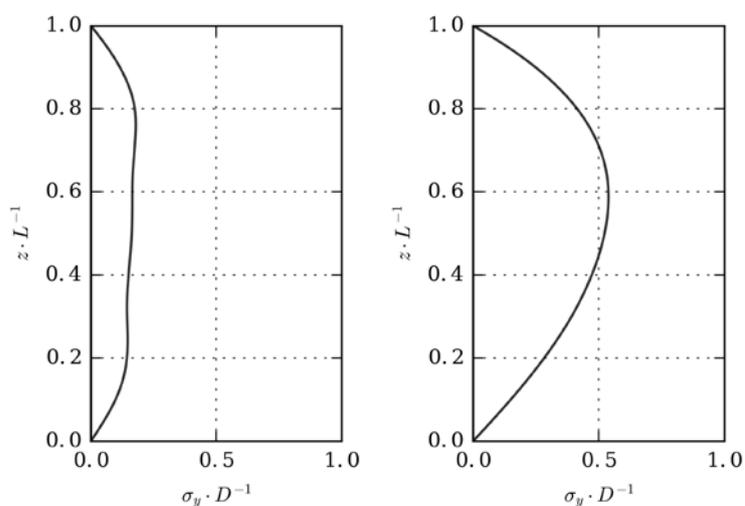
图 5-3 横荡和纵荡下的切片网格
Fig.5-3 Slice grid under sway and surge conditions

5.2 位移分析

图 5-4 和图 5-5 分别展示了平台纵荡和横荡工况下立管横流向和顺流向的位移标准差，通常可以利用位移标准差来辅助分析立管涡激振动的振型，并评价振动的稳定性。

模拟结果表明，在顶端平台横荡工况下，横流向振动的波动幅度要远大于顶端平台纵荡工况，横荡工况下横流向最大波动幅度大约是纵荡工况下的 2 倍。在顺流向上，顶端平台纵荡的最大波动幅度大约是顶端平台横荡工况下的 3 倍，并且最大波动幅度的位置在距离立管底端 60%立管长度的位置。

在流向相同的情况下，不同工况波动幅度差距如此明显的原因是因为顶端激励产生的影响。对于横流向的位移标准差，顶端平台横荡工况下，顶端激励沿着 y 轴方向，此时顶端平台产生的激励对于立管涡激振动的影响要远远大于涡激升力引发的横流向振动，所以在横流向波动幅度上，顶端平台横荡工况下的横流向最大波动幅度是顶端平台纵荡工况下的 2 倍。

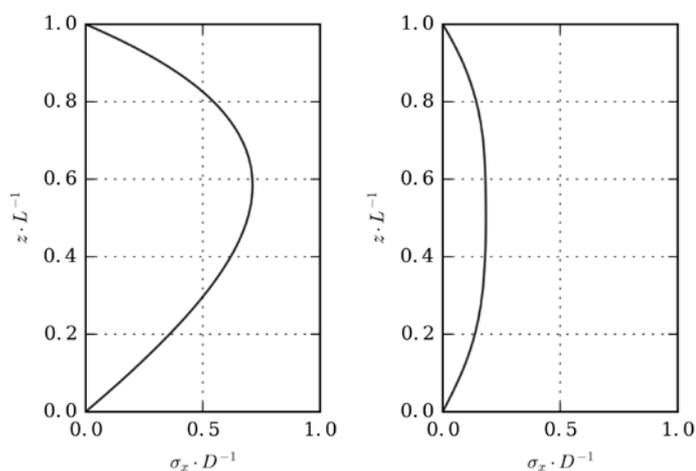


a)纵荡
a)Surge
b)横荡
b)Sway

图 5-4 均匀来流下平台纵荡和横荡工况下立管横流向位移标准差

Fig.5-4 Standard deviation of cross flow displacement of riser under platform surge and sway conditions in uniform flow

试验中发现顺流向上顶端平台纵荡工况下的最大波动幅度是顶端平台横荡工况下的 3 倍左右，这是因为顶端平台纵荡下，顶端平台产生的激励和来流方向平行，各自诱发的振动相互叠加，从而对立管涡激振动的顺流向幅值响应产生了放大效应。



a)纵荡
a)Surge
b)横荡
b)Sway

图 5-5 均匀来流下平台纵荡和横荡工况下立管顺流向位移标准差

Fig.5-5 Standard deviation of downstream flow displacement of riser under platform surge and sway conditions under uniform flow

5.3 振型分析

相对位移模态权重和模态权重功率谱密度图通常被用来分析立管涡激振动的振型。图 5-6 展示了两个工况下立管横流向相对位移模态权重。

从图 5-6 中可以观察到，顶端平台纵荡工况下其一阶和二阶的振动模态幅值响应较大，三阶模态振动幅值响应在小部分时间内幅值接近一阶和二阶，所以需要图 5-7 所示的模态权重功率谱密度图来分析立管两个流向上涡激振动的主控模态。

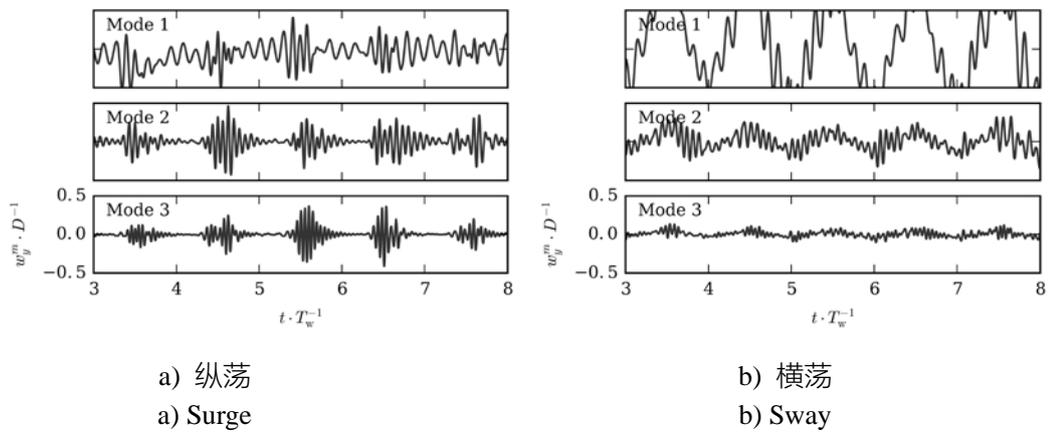


图 5-6 平台纵荡和横荡工况下立管横流向相对位移模态权重

Fig.5-6 Modal weight of cross flow relative displacement of riser under platform surge and sway conditions

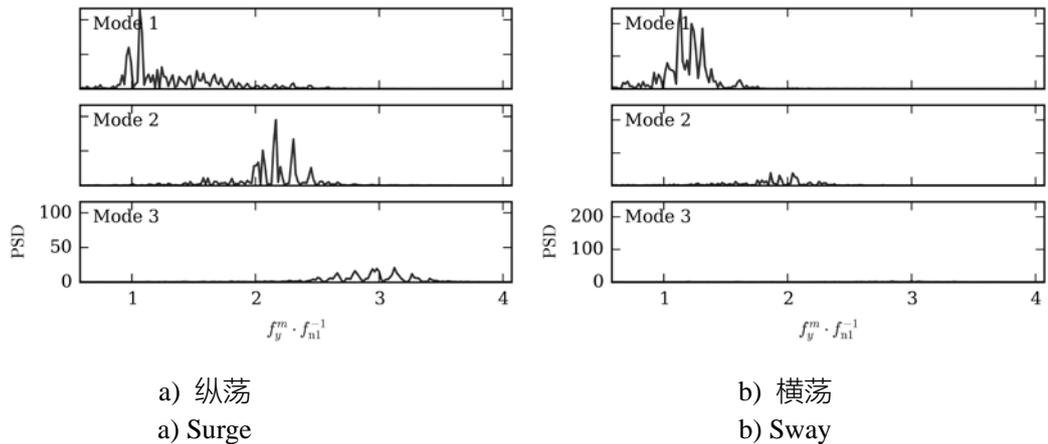


图 5-7 平台纵荡和横荡工况下立管横流向模态权重功率谱密度

Fig.5-7 Cross flow modal weight power spectral density of riser under surge and sway conditions

从图 5-7 中可以观察到，顶端平台纵荡工况下其横流向涡激振动的三阶模态

能量较低，不能作为主控模态，其一阶而二阶振动模态能量则较为接近，依然无法判断顶端平台纵荡工况下横流向的主控模态，所以需要通过图 5-4 横流向位移标准差和图 5-8 横流向立管振动位移包络线来辅助分析横流向主控模态。

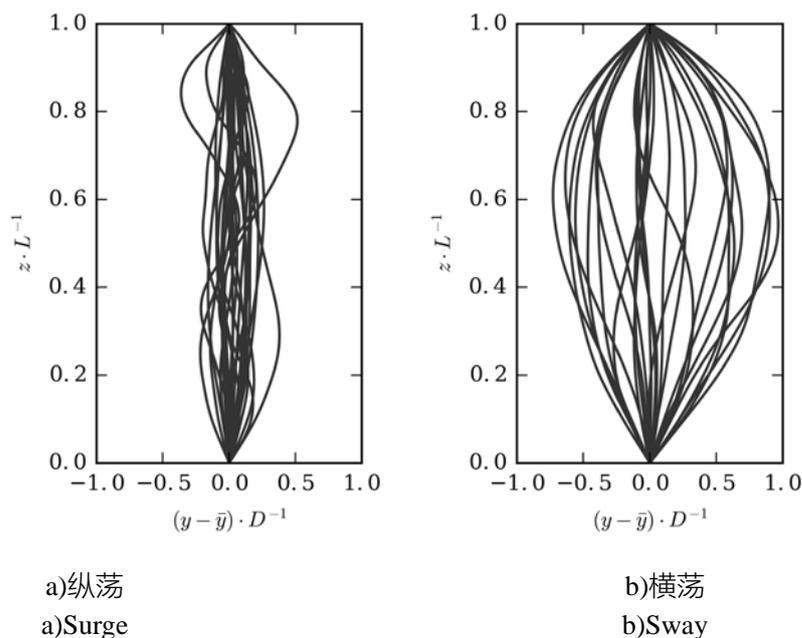


图 5-8 平台纵荡和横荡工况下立管横流向包络线
Fig.5-8 Cross flow outline of riser under surge and sway condition

从图 5-8 中可以观察到顶端平台纵荡工况下横流向位移包络线在部分时刻呈现二阶振型，绝大部分时间振型为一阶，结合图 5-4 横流向位移标准差可知，顶端平台纵荡工况下立管横流向振动的主控模态为一阶，同时也观察到了一阶到二阶振动的模态转换现象。

顶端平台横荡工况下立管横流向和顺流向的主控模态则较为容易辨识，通过图 5-4 横流向唯一标准差，图 5-6 模态权重和图 5-8 振型，可以了解到顶端平台横荡工况下，立管横流向振动的主控模态为一阶。

图 5-9 展示了立管顺流向包络线，综合其顺流向位移标准差，可以得到顶端平台纵荡和横荡工况下立管顺流向振型都为一阶。

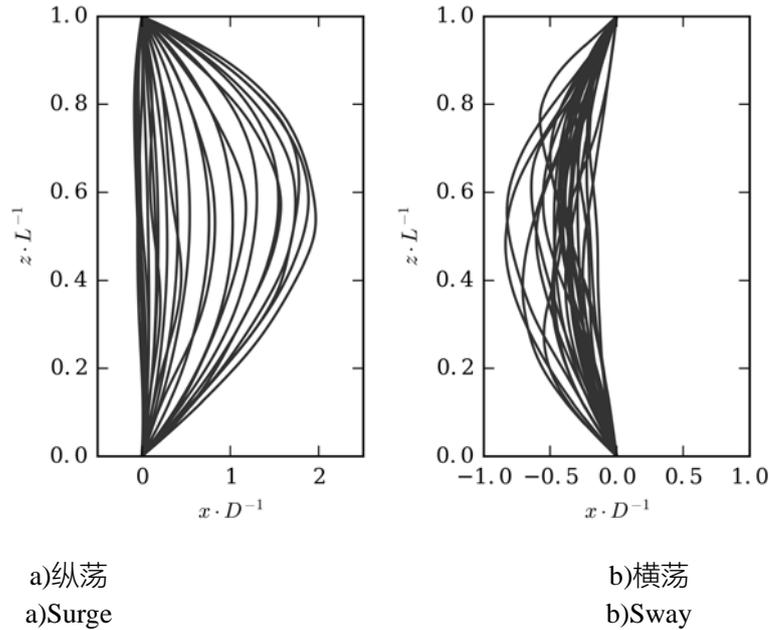


图 5-9 平台纵荡和横荡工况下立管顺流向包络线
Fig.5-9 Inline flow outline of riser under surge and sway condition

5.4 频域分析

MIT 学者 Swithenbank^[61]在 2007 年首次提出了时间共享的概念，即在立管涡激振动过程中，可能存在多个主控频率，但是在一个小段区间内，主控频率有且仅有一个，随着时间的推移，各个频率竞争成为主控频率。

Swithenbank 的结论目前已知情况是适用于均匀流和剪切流，但是在振荡流和其他更复杂工况下暂无定论。本实验工况接近于振荡流，并通过绘制立管横流向和顺流向上不同时刻的主控频率，发现时间共享特性同样可以应用于近似振荡流的工况，对 Swithenbank 的结论做了进一步的推广。

图 5-10 展示了两种工况下横流向上立管涡激振动的主控频率，选取距离立管底端 $0.2L$ (L 是立管长度) 处的节点作为例子。从图中数据可知，顶端平台纵荡工况下三种主控频率在不同时刻共存，每种频率主控的时间并不稳定，而且存在从一阶主控频率到三阶主控频率的跳跃。顶端平台横荡工况下，发现大部分时间立管横流向涡激振动的主控频率是一阶，也存在从一阶主控频率到二阶频率的转换。

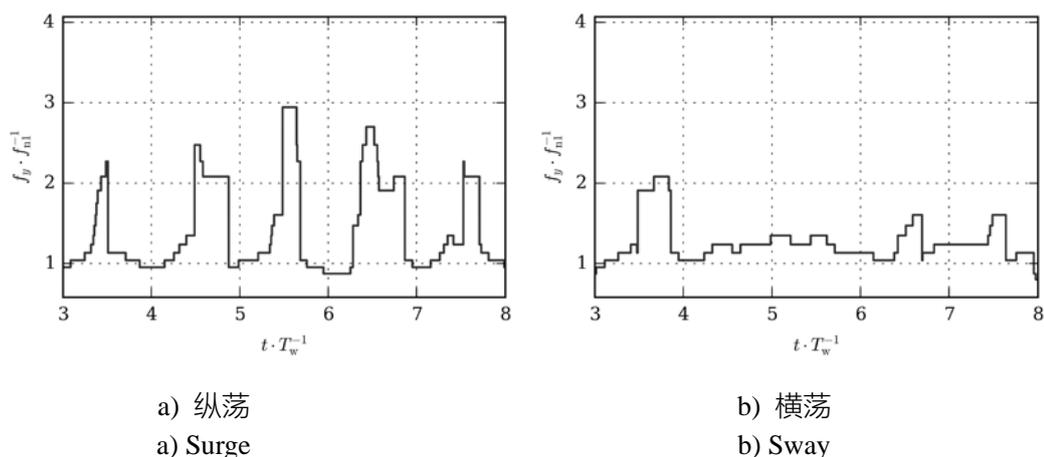


图 5-10 平台纵荡和横荡工况下横流向主控频率
Fig.5-10 Main control frequency of cross flow under surge and sway conditions

图 5-11 展示了两种工况下顺流向上立管涡激振动的主控频率，选取节点位置与横流向相同。发现在顶端平台纵荡工况下，顺流向上存在四种主控频率，分别是底端支座诱发的低频振动，此外就是一阶至三阶的主控频率。

顶端平台横荡运动下，存在三种主控频率，分别是低阶振动频率，一阶和二阶频率。

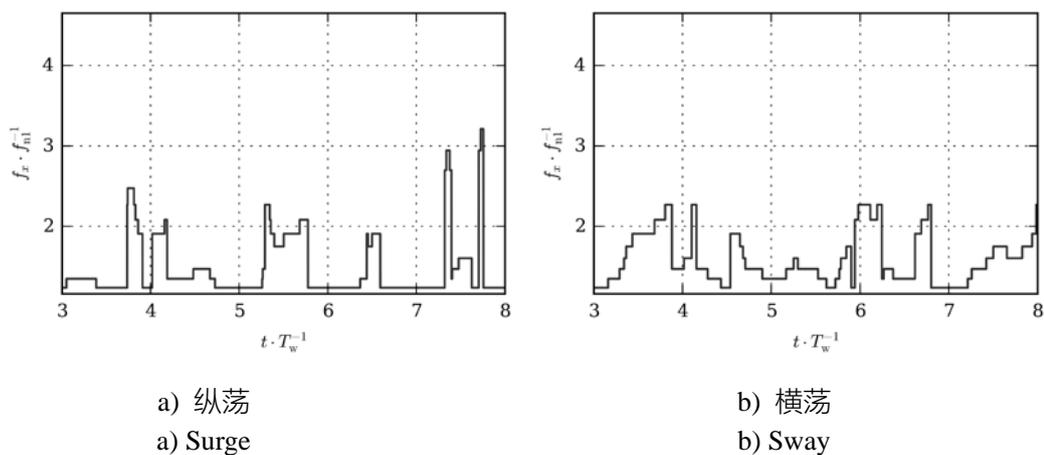


图 5-11 平台纵荡和横荡工况下顺流向主控频率
Fig.5-11 Main control frequency of inline flow under surge and sway conditions

图 5-12 展示了立管横流向上的约化速度，选取的节点位置与前面相同，图 5-13 展示了立管时间-频率小波分析云图，云图中不同颜色代表着相应主控频率下振动幅值相应的强弱。

从图 5-14 中可以观察到当横流向约化速度较高时，平台平台横荡运动的激励会诱发高阶频率响应，这也就解释了图 5-10 中平台横荡工况下横流向上出现的主控频率的跃迁现象。结合图 5-6 中顶端平台横荡工况下横流向位移模态权重，可以知道，在约化速度较高时，立管涡激振动出现高阶模态响应。

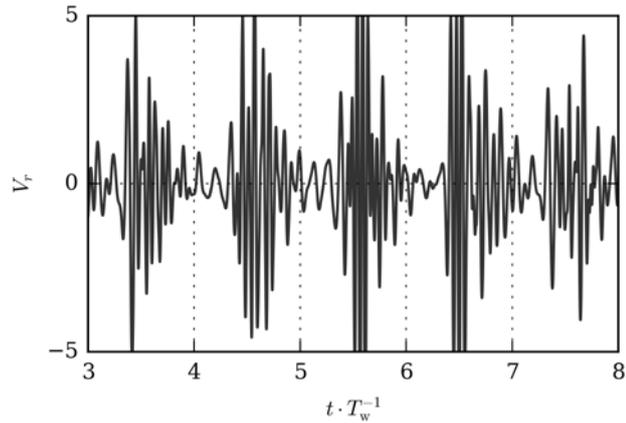


图 5-12 平台纵荡下横流向约化速度

Fig.5-12 Cross flow reduced velocity under platform surge

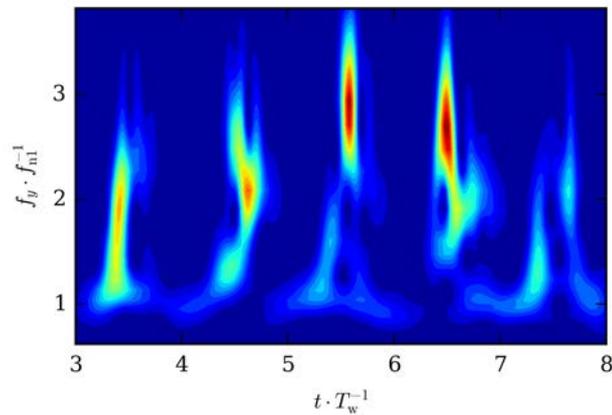


图 5-13 平台纵荡下横流向时间-频率小波分析云图

Fig.5-13 Time frequency wavelet analysis cloud image of cross flow under platform surge motion

5.5 本章小结

本章通过设置顶端平台横荡和纵荡两种工况，保持均匀来流方向和大小不变，从位移，振型，频率等角度，探究了顶端平台运动和来流联合作用下立管涡激振

动的响应特性，得到了以下几点结论：

(1) 在顶端平台横荡工况下，立管横流向的最大波动幅度是顶端平台纵荡工况下横流向最大波动幅度的 2 倍，这是因为在横流向上顶端平台的激励对立管涡激振动的影响要远远大于涡激升力产生的影响。

(2) 在顶端平台纵荡工况下，立管顺流向的最大波动幅度出现在距离立管底端 $0.6L$ 处。

(3) 扩大了时间共享概念的适用范围，在近似振荡流工况下，也观察到了在均匀流和剪切流才能观察到的时间共享特性，发现当顶端平台的激励方向和来流方向垂直时，只存在一阶和二阶两种主控频率。

第六章 BP 神经网络在柔性立管涡激振动中的应用

6.1 物理模型及数据来源

构建 BP 神经网络模型的样本来源于邓迪^[62]采用厚切片法的阶梯流下的数值计算结果。通过设置不同顶张力和流速得到共 11 组数据，立管的结构参数见表 6-1，算例配置情况见表 6-2，邓迪在文中通过与 Chaplin^[2]的模型试验验证了求解器的有效性。

表 6-1 Chaplin 模型试验物理参数

Table 6-1 Main Parameter of the riser in Chapin model experiment

	符号	数值	单位
立管长度	L	13.12	m
立管直径	D	0.028	m
弯曲刚度	EI	29.88	Nm^2
质量比	m^*	3.0	—
长细比	L/D	469	—
流速	U	0.16	m/s
预张力	T	405	N

表 6-2 数值模拟工况参数

Table 6-2 Numerical simulation condition parameters

编号	预张力 (N)	流速 (m/s)
工况 1	405	0.21
工况 2	405	0.31
工况 3	405	0.40
工况 4	405	0.54
工况 5	407	0.21
工况 6	407	0.54
工况 7	457	0.31
工况 8	457	0.54

工况 9	506	0.40
工况 10	506	0.54
工况 11	598	0.54

每个工况下计算时间为 0 至 70 秒，时间步长为 0.0005 秒，立管被分割为 80 个单元，共 81 个节点。

图 6-1 展示了搭建 BP 神经网络模型的流程，初始时得到的是每个工况下不同时刻 81 个节点的横流向和顺流向的位移信息，首先通过 Python 从中提取出预报模型的数据并形成新的 dat 文件，然后利用 scikit-learn 库函数对数据进行标准化，其标准化方法如公式 6-1 所示。

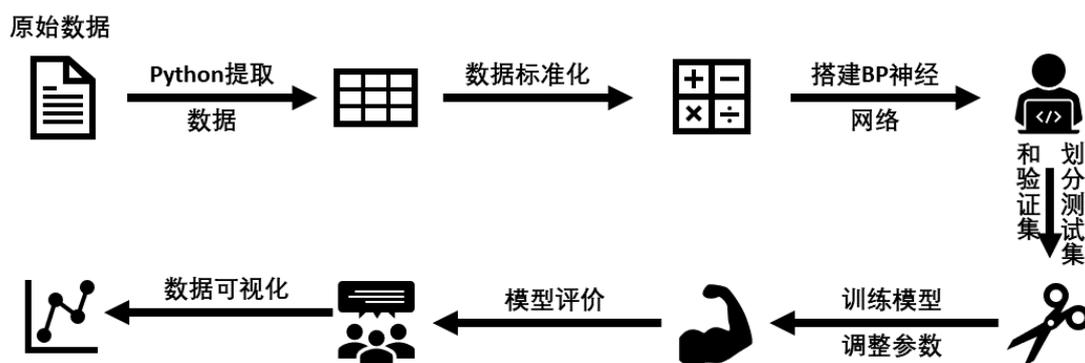


图 6-1 模型训练流程

Fig.6-1 Model training process

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad (6-1)$$

利用 scikit-learn 的标准库器将每个数据减去均值后并处以方差来将数据标准化，这样做的好处是可以以训练集的数据来对数据进行标准化，然后可以泛化到测试集上，并且可以很方便的将标准化的数据进行还原，此外标准化还可以消除量纲的影响。

搭建神经网络的过程中，需要关注的是模型的参数设置，训练时长，激活函数的选择，优化器的选择，正则化参数的选择，这些概念已经在第三章进行了详

细介绍. 参数确定上采用试错法, 综合考虑准确率, 训练时间, 相关度系数等来确定。

对于数据集的划分, 如果数据量过小, 比如只有不足 100 个数据, 通常可以采用 10 折交叉验证来解决, 本文的数据量在 891, 可以通过正则化来避免过拟合, 参考高喜峰^[54]等人的经验, 测试集数据量为 27, 训练集样本量为 864。

对于模型的评估, 通常采用准确率, R^2 得分和解释方差得分来进行评估。准确率的表达式见公式 6-2:

$$1 - \text{MSE}(\hat{\theta}) = 1 - \text{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 \quad (6-2)$$

式中 $\hat{\theta}$ —— 样本点
 θ —— 真实值

解释方差的表达式见公式 6-3, 其用来衡量模型对于数据集波动的解释能力, 越接近 1 表明模型对于数据集波动的解释能力越强。

$$\text{explained variance} = 1 - \frac{\text{Var}(y - \hat{y})}{\text{Var}(y)} \quad (6-3)$$

式中 Var —— 计算方差
 y —— 真实值
 \hat{y} —— 预测值

相关度系数的表达式见公式 6-4 所示, 其表示对于验证集数据的拟合效果, 越接近 1.0, 代表模型的拟合效果越好。

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (6-4)$$

式中 \hat{y}_i —— 预测值
 y_i —— 真实值

\bar{y} —— 真实值均值

6.2 BP 神经网络对瞬时运动的预测

输入量为预张力，流速和节点标号，共三个输入量，所以输入层设置三个神经元，输出量为横流向和顺流向位移，输出层设置两个神经元，设置两个隐藏层，与输入层相连的隐藏层设置300个神经元，与输出层相连的隐藏层设置100个神经元，构成四层神经网络。

统一选取在 35 秒时刻立管横流向和顺流向的位移数据，因为立管两端始终无位移，故只提取中间有位移数据的 79 个节点，共 869 个样本点，测试集样本量为 27，对于数据集先打乱顺序来消除顺序产生的影响，然后利用标准化器进行数据标准化，模型参数的选择见表 6-3。

表 6-3 瞬时运动预报模型参数

Table 6-3 Parameters of instantaneous motion prediction model

参数	数值
激活函数	Tanh 函数
优化求解器	L-BFGS 算法
L^2 正则化系数	0.001
批处理大小	30
参数初始化范围	[0, 1] 内的随机数
迭代次数	10000
初始学习率	0.005
是否打乱顺序	否

利用开源 Python 函数库 scikit-learn 进行模型训练，结果如表 6-4 所示。

表 6-4 模型训练结果

Table 6-4 Model training result

项目	结果
准确率	0.998577
R^2	0.996621

解释方差	0.996633
训练时间	31 秒

图 6-2 和 6-3 展示了顺流向和横流向上训练后的模型在测试集上的预测结果。从图中可以观察到，对于测试集的数据拟合效果非常好，这也符合 R^2 的结果。在横流向上，在第 6 至 8 个测试点略有差异，但是总体上吻合程度非常高，证明了瞬时运动预报模型在瞬时位移预报上精度很高，泛化性也很好。

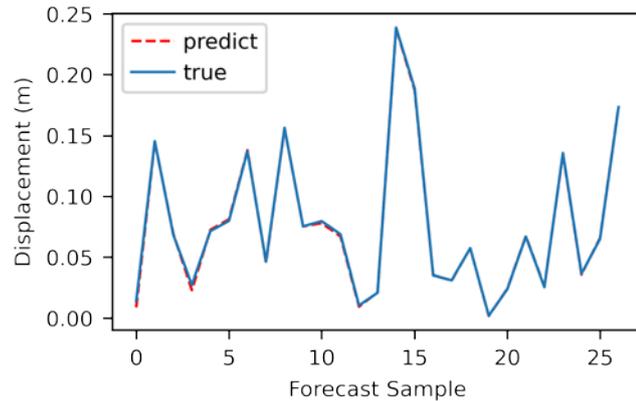


图 6-2 顺流向位移训练集预测结果

Fig.6-2 Prediction displacement results of downstream training set

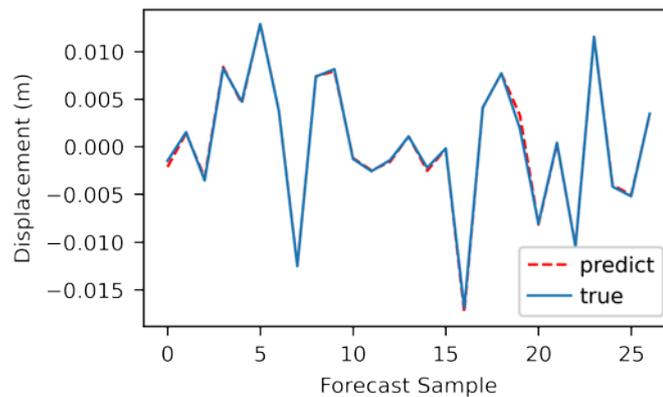
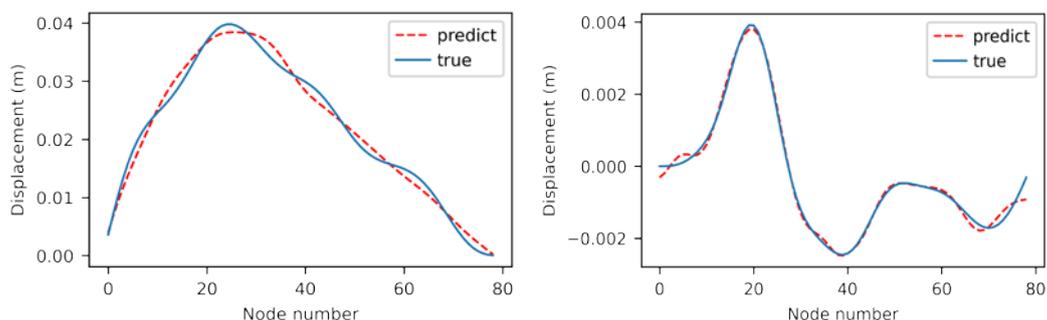


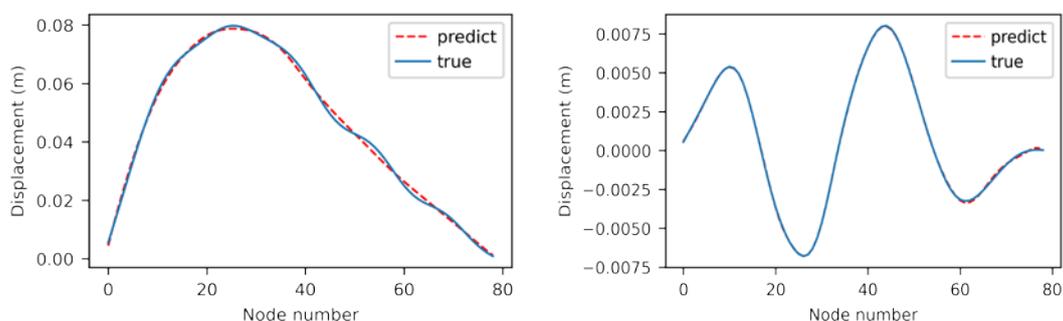
图 6-3 横流向位移训练集预测结果

Fig.6-3 Prediction displacement results of inline training set

图 6-4 展示了在顶张力均为 405N 下，流速为 0.21m/s 和 0.31m/s 工况下横流向和顺流向上立管不同节点处模型预测值和真实值的对比图。从图中可以发现，在流速较低的时候，模型预测值存在一定的抖动。在相同顶张力下，流速增加，模型拟合的效果提高。



a) 顶张力 405N, 流速 0.21 m/s , 顺流向位移
 a) Top tension is 405N, velocity is 0.21 m/s , inline displacement
 b) 顶张力 405N, 流速 0.21 m/s , 横流向位移
 b) Top tension is 405N, velocity is 0.21 m/s , crossflow displacement



c) 顶张力 405N, 流速 0.31 m/s , 顺流向位移
 c) Top tension is 405N, velocity is 0.31 m/s , inline displacement
 d) 顶张力 405N, 流速 0.31 m/s , 横流向位移
 d) Top tension is 405N, velocity is 0.31 m/s , crossflow displacement

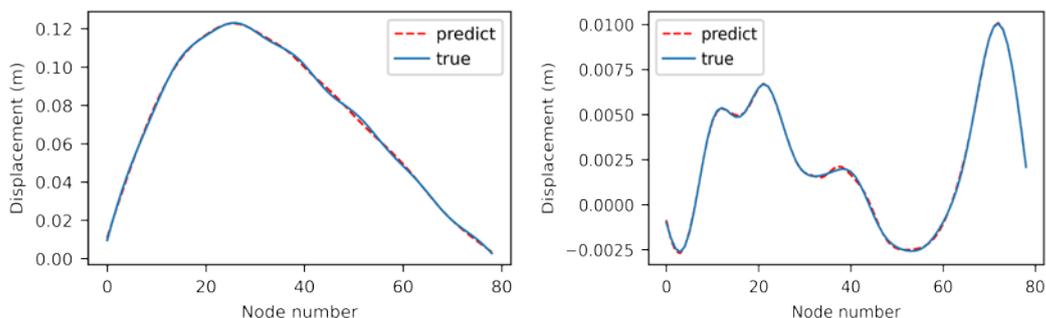
图 6-4 预张力同为 405N, 流速分别为 0.21 m/s 和 0.31 m/s 时横流向和顺流向位移预测值与真实值对比

Fig.6-4 When the pretension is 405N and the flow velocity is 0.21 and 0.31 m/s , the predicted values of inline and crossflow displacement are compared with the real values

图 6-5 展示了顶张力为 405N, 流速为 0.4 m/s 和 0.54 m/s 工况下立管横流向和顺流向位移预测值和真实值对比图。结合图 6-4 可以进一步验证流速增加, 模型预测值与真实值的吻合程度增加。对比发现, 模型在横流向上的预测能力要比顺流向上强, 这是因为顺流向上立管振动幅值响应较为强烈, 流速高的情况下振动幅度增加, 会减少局部的抖动, 节点之间的位移连线相对较为平滑, 所以模型预测效果提升。

比较在 0.4 m/s 和 0.54 m/s 两种工况, 发现流速的提高对于模型拟合效果的

提升不如从 0.21 m/s 到 0.4 m/s 之间效果提升的明显。流速在 0.54 m/s ，虽然仍有局部的抖动，但是模型可以进行很好的预测。

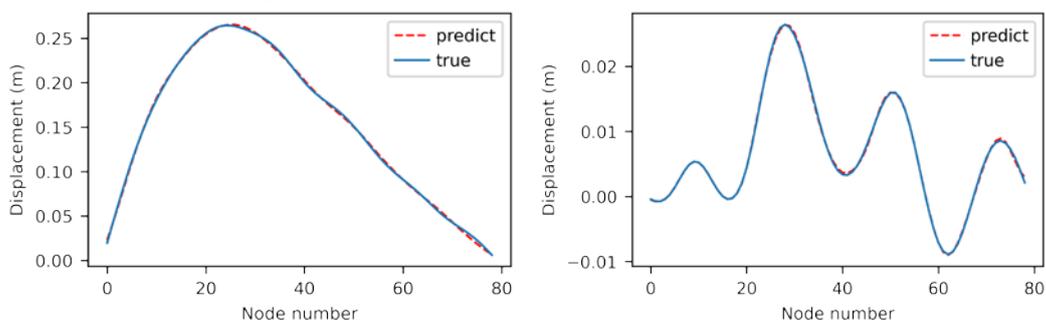


a) 顶张力 405 N ，流速 0.4 m/s ，顺流向位移

b) 顶张力 405 N ，流速 0.4 m/s ，横流向位移

a) Top tension is 405 N , velocity is 0.4 m/s ,
inline displacement

b) Top tension is 405 N , velocity is 0.4 m/s ,
crossflow displacement



c) 顶张力 405 N ，流速 0.54 m/s ，顺流向位移

d) 顶张力 405 N ，流速 0.54 m/s ，横流向位移

c) Top tension is 405 N , velocity is 0.54 m/s ,
inline displacement

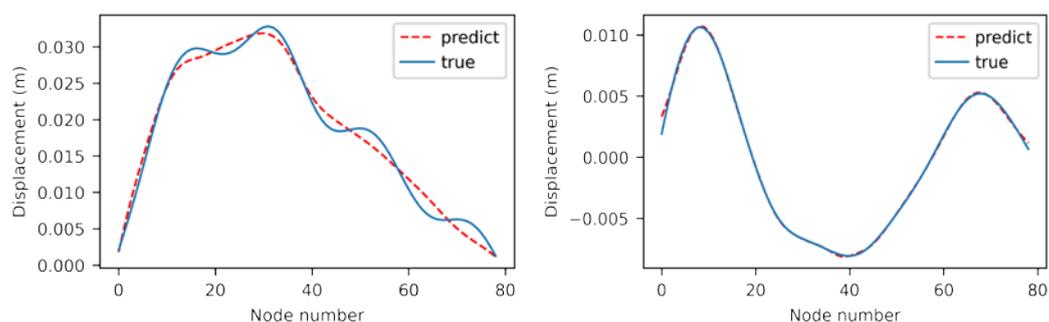
d) Top tension is 405 N , velocity is 0.54 m/s ,
crossflow displacement

图 6-5 预张力同为 405 N ，流速分别为 0.4 m/s 和 0.54 m/s 时横流向和顺流向位移预测值与真实值对比

Fig.6-5 When the pretension is 405 N and the flow velocity is 0.4 and 0.54 m/s , the predicted values of inline and crossflow displacement are compared with the real values

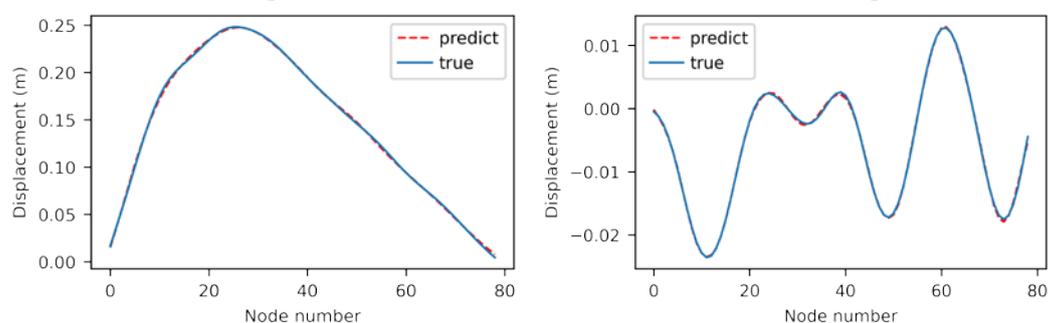
图 6-6 展示了顶张力为 407 N ，流速为 0.21 m/s 和 0.54 m/s 两种工况下立管横流向和顺流向位移预测值和真实值对比。与顶张力为 405 N ，流速为 0.21 m/s 工况相比，顶张力增加，在流速相同情况下，模型的预测能力反而下降。

图 6-7 展示了顶张力为 457 N ，流速为 0.31 m/s 和 0.54 m/s 下立管横流向和顺流向位移预测值和真实值对比。仍然可以验证在顶张力相同条件下，流速增加，模型的预测精度以及预测值与真实值的相关度都有提升。



a) 顶张力 407N, 流速 0.21 m/s , 顺流向位移
 a) Top tension is 407N, velocity is 0.21 m/s , inline displacement

b) 顶张力 407N, 流速 0.21 m/s , 横流向位移
 b) Top tension is 407N, velocity is 0.21 m/s , crossflow displacement



c) 顶张力 407N, 流速 0.54 m/s , 顺流向位移
 c) Top tension is 407N, velocity is 0.54 m/s , inline displacement

d) 顶张力 407N, 流速 0.54 m/s , 横流向位移
 d) Top tension is 407N, velocity is 0.54 m/s , crossflow displacement

图 6-6 预张力同为 407N, 流速分别为 0.21 m/s 和 0.54 m/s 时横流向和顺流向位移预测值与真实值对比

Fig.6-6 When the pretension is 407N and the flow velocity is 0.21 and 0.54 m/s, the predicted values of inline and crossflow displacement are compared with the real values

在图 6-7 中, 顶张力相同, 流速增加, 从第 40 个节点以后, 节点间位移的连线趋近于一条直线。这是因为流速增加, 立管的顺流向位移整体会有较大幅度的提升, 所以导致节点间的连线趋于直线, 可以观察到, 模型对于倾斜直线的预测能力要明显优于对于局部抖动的预测。

综合 11 种工况下不同节点横流向和顺流向位移预测结果, 从图中可以观察到, 对于绝大部分工况, 模型的预测几乎完美契合真实数值计算结果, 在横流向上只有在预张力为 405N, 流速为 0.21 m/s 时, 模型的预测结果和真实值略有出入, 其他工况下横流向的预测结果和真实值几乎一致。

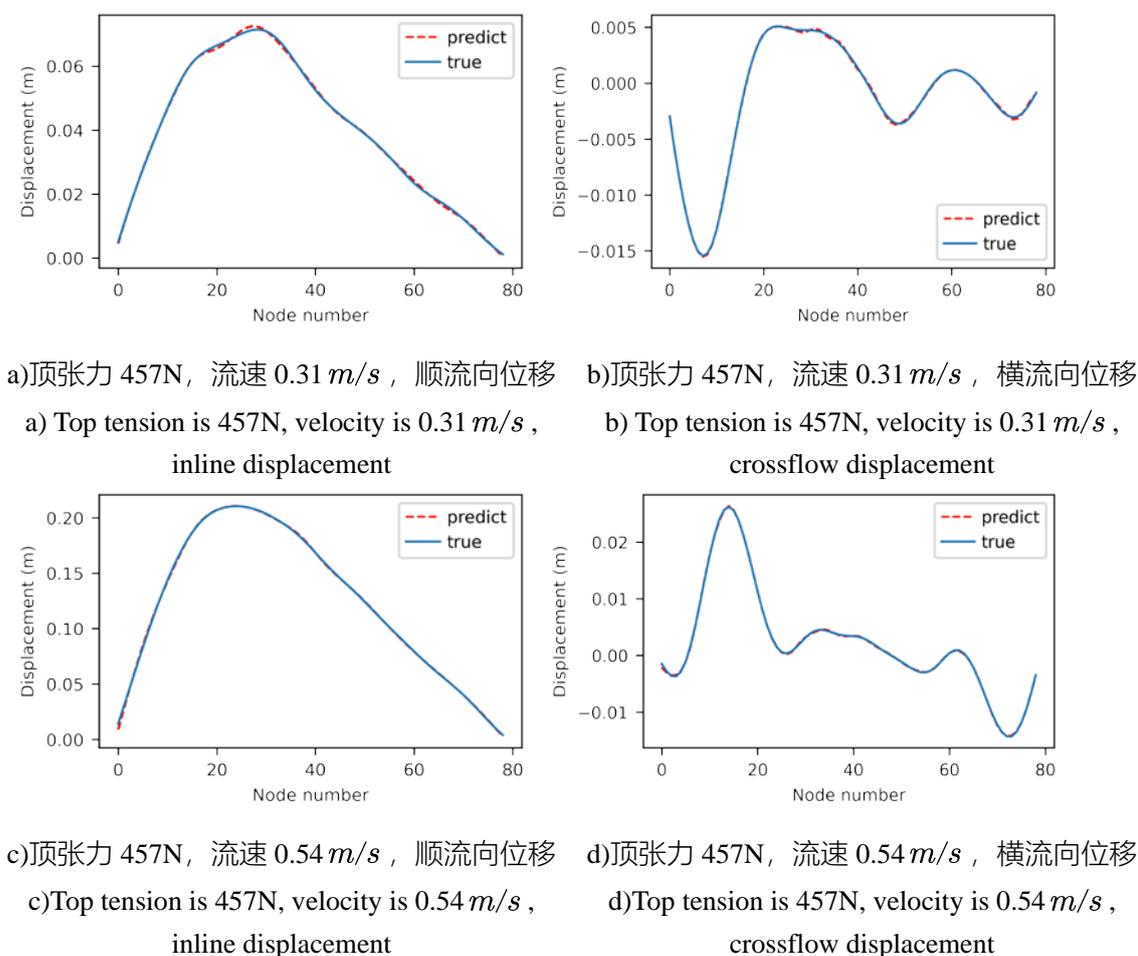


图 6-7 预张力同为 457N，流速分别为 0.31 m/s 和 0.54 m/s 时横流向和顺流向位移预测值与真实值对比

Fig.6-7 When the pretension is 457N and the flow velocity is 0.31 and 0.54 m/s, the predicted values of inline and crossflow displacement are compared with the real values

模型对顺流向的预测结果在预张力为 405N，流速为 0.21 m/s 的工况，以及预张力为 407N，流速为 0.21 m/s 时，一些细致的波动信息会与真实值有一定的差别。观察发现，顺流向的振动幅值响应要明显强于横流向，受尾涡的影响造成的波动也明显强于横流向，所以对位移明显的峰谷预测结果很好，而对局部细微的峰谷预测能力则有待提高。

6.3 BP 神经网络对时均运动的预测

输入量为预张力，流速和节点标号，共三个输入量，所以输入层为三个神经元，输出量为横流向和顺流向位移均值及标准差，横流向和顺流向曲率及曲率标

准差，以及横流向频率均值，因为顺流向频率均值始终为 0，没有预测价值，所以输出层设置 9 个神经元。设置两个隐藏层，与输入层相连的隐藏层设置 300 个神经元，与输出层相连的隐藏层设置 200 个神经元，构成四层神经网络。增加隐藏层神经元的数量是因为其需要预测的输出结果个数增加，通过增加神经元的方式可以提高神经网络的预测能力。

统一选取在 30 秒到 40 秒时间区间内立管横流向和顺流向的位移数据，共 891 个样本点，测试集样本量为 27，对于数据集先打乱顺序来消除顺序产生的影响，然后利用标准化器进行数据标准化，模型参数的选择见表 6-5。

表 6-5 时均运动预报模型参数
Table 6-5 Parameters of time averaged motion prediction model

参数	数值
激活函数	Tanh 函数
优化求解器	L-BFGS 算法
L^2 正则化系数	0.001
批处理大小	30
参数初始化范围	[0, 1] 内的随机数
迭代次数	10000
初始学习率	0.005
是否打乱顺序	否

利用开源 Python 函数库 scikit-learn 进行模型训练，结果如表 6-6 所示。模型的准确率和相关度系数均在 0.98 以上，代表模型对于预测值的预测能力较好。相比于瞬时运动预测模型，精度和相关度有所降低，训练时间增加，这是因为模型需要预测的输出值增加，预测难度也随之增加，并且有一个隐藏层相比于瞬时运动模型增加了 100 个神经元，所以精度下降，训练时间增加在所难免。

和数值模拟动辄 140 多小时的数值模拟时间，模型的训练时间为分钟级别，在效率上几乎是飞跃上的提升，并且精度几乎没有降低。同时相比于数值模拟对于计算集群的依赖，模型的训练仅仅在一台普通电脑上即可完成，极大的节省了计算资源，并减轻了对计算资源的依赖，更有助于普通科研工作者进行相关方面的研究。

表 6-6 模型训练结果
Table 6-6 Model training result

项目	结果
准确率	0.987464
R^2	0.984421
解释方差	0.984565
训练时间	224 秒

图 6-8 展示了时均运动预报模型在测试集上关于横流向和顺流向曲率及曲率标准差的预测结果。从预测结果来看，模型对横流向的曲率预测效果相对于顺流向要弱一些，但是在横流向曲率标准差的预测效果要远远优于顺流向，这是因为顺流向的振动幅值响应要高于横流向所致。

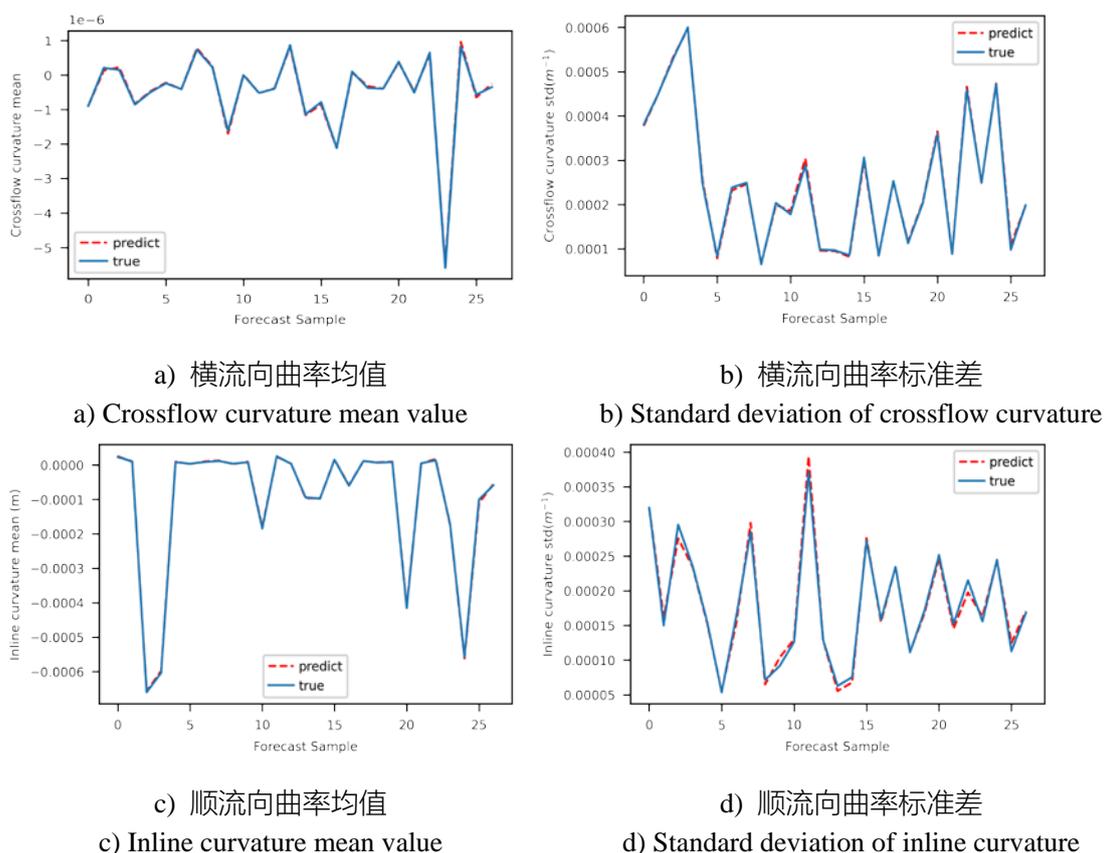


图 6-8 横流向和顺流向曲率均值和曲率标准差验证集上预测值与真实值对比
Fig.6-8 Comparison of predicted values and true values on validation set of mean and standard deviation of crossflow and downstream curvatures

图 6-9 展示了模型在横流向和顺流向位移以及位移均方根上的预测结果，从预测结果来看，模型在验证集上的准确率及相关度上效果很好，相比于曲率和曲率标准差的预测效果，可以发现模型对于位移数据的拟合效果更好一些，学习能力更强。

综合图 6-8 和图 6-9，我们发现在第 10 个测试点的曲率标准差和位移标准差误差要高于其他测试点，通过图 6-9 的数据点可知，第 10 个测试点的位移数据接近于 0 值，说明其幅值响应较小，从而说明模型对于趋近于 0 值的数据点预测能力有待提高，而对于非零数据点有较强的预测能力。

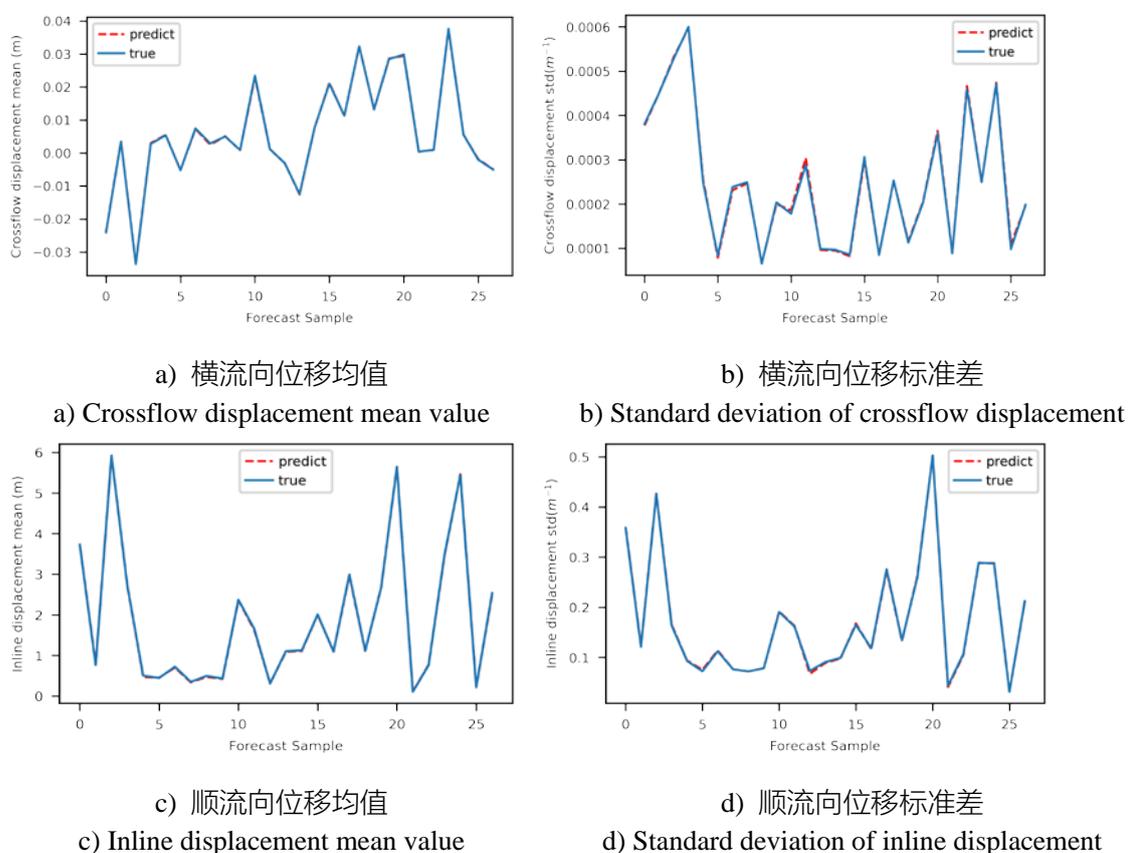


图 6-9 横流向和顺流向位移均值和位移标准差验证集上预测值与真实值对比

Fig.6-9 Comparison of predicted values and true values on validation set of mean and standard deviation of crossflow and downstream displacement

图 6-10 展示了模型在横流向频率验证集上的预测效果，相比于位移和均方根的预测结果，在频率上的预测效果相对较弱，构成了预测误差的主要来源。推测原因是模型对于位移相关的数据学习能力较强，从高喜峰等人的模型结果来看，也是对位移的预测效果优于对频率的预测效果，推测原因是频率的跳跃性和不规

律性明显大于位移相关的数据，位移相关的物理信息因为其振动特性的限制，总体上规律性较强，较难产生较大的跳跃，而频率则会因为流体载荷，尾涡等影响，未必需要保持空间上的连续性，所以频率的规律性较弱，从而使模型预测效果降低。

综合以上模型预测结果可知，模型对于规律性较强的位移和曲率数据有较好的预测效果，对于规律性较弱的频率则会有相对较大的偏差。从总体预测效果来看，通过增加神经元的方式，可以在维持相对较高的准确率的情况下，能增加模型的预测输出，并且可以保持较高的计算效率。

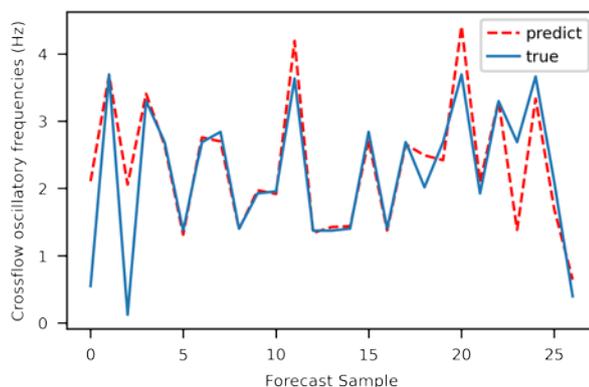
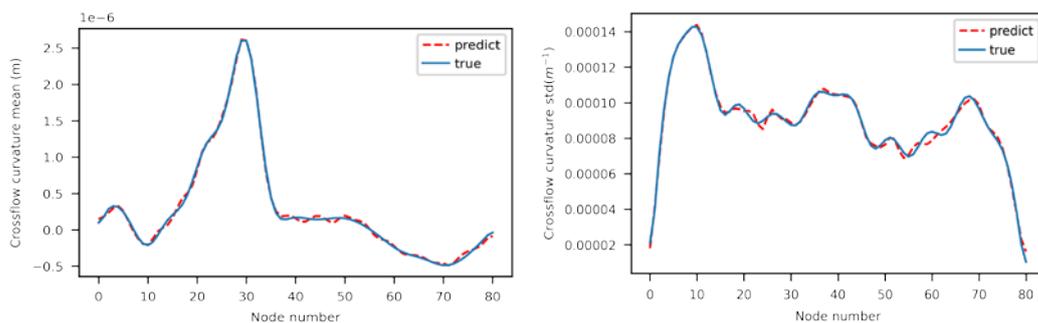


图 6-10 横流向频率模型预测值与真实值对比

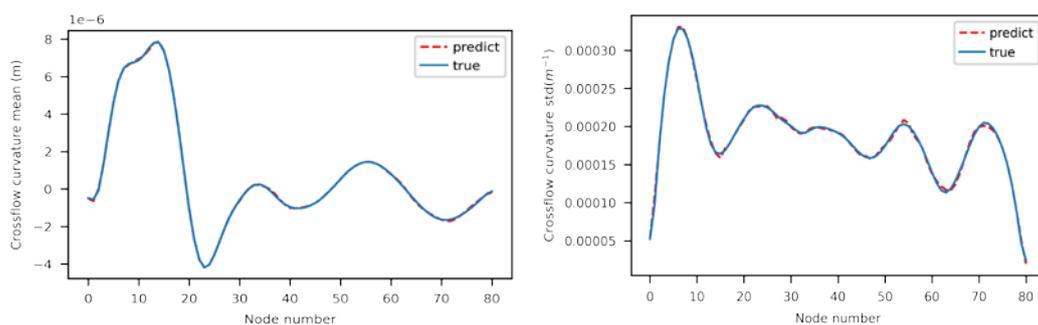
Fig.6-10 Comparison of predicted and real values of cross flow frequency model

图 6-11 展示了在顶张力保持 405N 不变，流速分别为 0.21 m/s , 0.31 m/s 和 0.4 m/s 下关于横流向曲率的预测效果。实验结果表明，在顶张力相同的情况下，随着流速的增加，模型对于横流向曲率以及曲率标准差的预测能力随之增强。



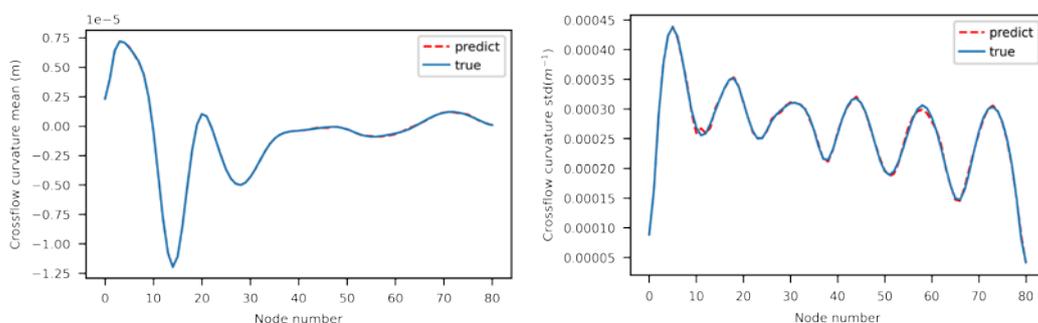
a) 顶张力 405N, 流速 0.21 m/s , 横流向曲率均值 b) 顶张力 405N, 流速 0.21 m/s , 横流向曲率标准差

a) Top tension is 405N, velocity is 0.21 m/s , crossflow mean curvature b) Top tension is 405N, velocity is 0.21 m/s , crossflow curvature standard deviation



c) 顶张力 405N, 流速 0.31 m/s , 横流向曲率均值
d) 顶张力 405N, 流速 0.31 m/s , 横流向曲率标准差

c) Top tension is 405N, velocity is 0.31 m/s , crossflow mean curvature
d) Top tension is 405N, velocity is 0.31 m/s , crossflow curvature standard deviation



c) 顶张力 405N, 流速 0.4 m/s , 横流向曲率均值
d) 顶张力 405N, 流速 0.4 m/s , 横流向曲率标准差

c) Top tension is 405N, velocity is 0.4 m/s , crossflow mean curvature
d) Top tension is 405N, velocity is 0.4 m/s , crossflow curvature standard deviation

图 6-11 预张力同为 405N, 流速分别为 0.21 m/s , 0.31 m/s 和 0.4 m/s 时横流向曲率均值和标准差预测值与真实值对比

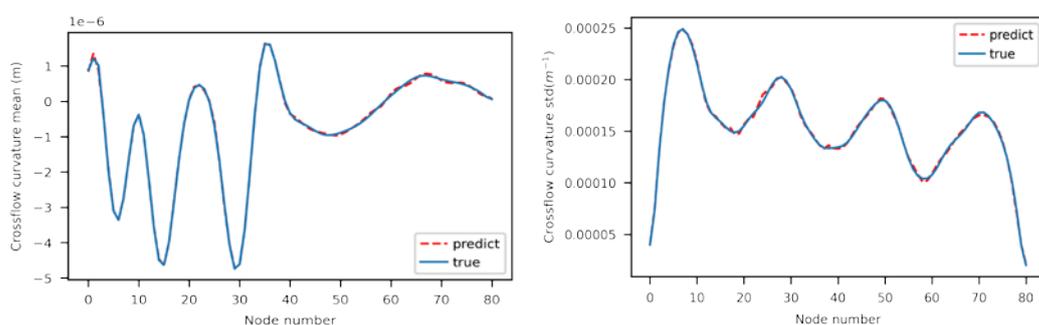
Fig.6-11 When the pretension is 405N and the flow velocity is 0.21, 0.31 and 0.4 m/s, the predicted values of crossflow mean curvature and curvature standard deviation are compared with the real values

从流速为 0.21 m/s 的曲率标准差图中可以看出, 流速较低时, 存在许多微小的波动, 随着流速的增加, 横流向曲率的标准差呈现出正弦形式, 规律性越来越明显, 从而模型的预测能力也越来越强, 进一步证明模型对于规律性的数据学习能力较强, 对于流速较低以及顶张力较低的情况下, 模型的预测能力有待提高。

图 6-12 展示了在预张力同为 457N, 流速分别为 0.31 m/s 和 0.54 m/s 时模型在横流向曲率和曲率标准差上的预测结果。从图中可以发现, 流速为 0.54 m/s 时, 横流向曲率标准差的正弦结构第 20 个节点到第 25 个节点之间被破坏。在流速为

0.31 m/s 时，横流向曲率标准差的预测值与真实值的最大差距为 6.27×10^{-6} ，而流速为 0.54 m/s 时，预测值与真实值的最大差距为 1.42×10^{-5} 。

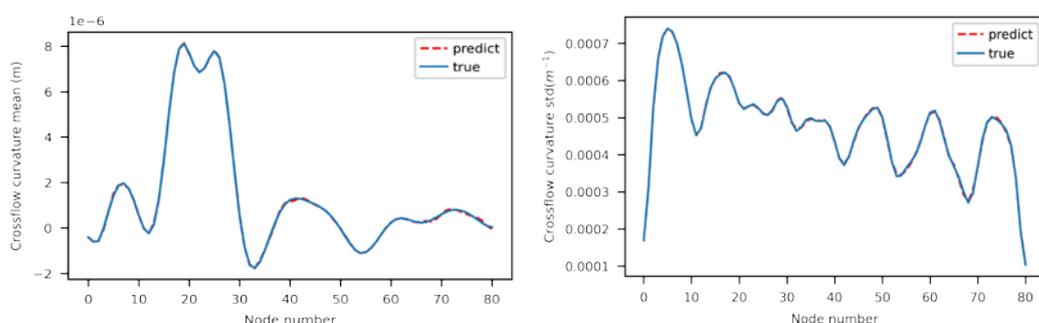
结合之前的结论，发现在顶张力相同的情况下，预测效果并不是简单的随流速增加而增加，而是先增加后下降。预测结果验证了模型对规律性结果有较强的预测能力，因为随着流速的增加，横流向曲率标准差的正弦结构出现了破坏，也正是因为其结构的破坏，造成了预测效果的下降。



a) 顶张力 457N, 流速 0.31 m/s , 横流向曲率均值
b) 顶张力 457N, 流速 0.31 m/s , 横流向曲率标准差

a) Top tension is 457N, velocity is 0.31 m/s ,
crossflow mean curvature

b) Top tension is 457N, velocity is 0.31 m/s ,
crossflow curvature standard deviation



c) 顶张力 457N, 流速 0.54 m/s , 横流向曲率均值
d) 顶张力 457N, 流速 0.54 m/s , 横流向曲率标准差

c) Top tension is 457N, velocity is 0.54 m/s ,
crossflow mean curvature

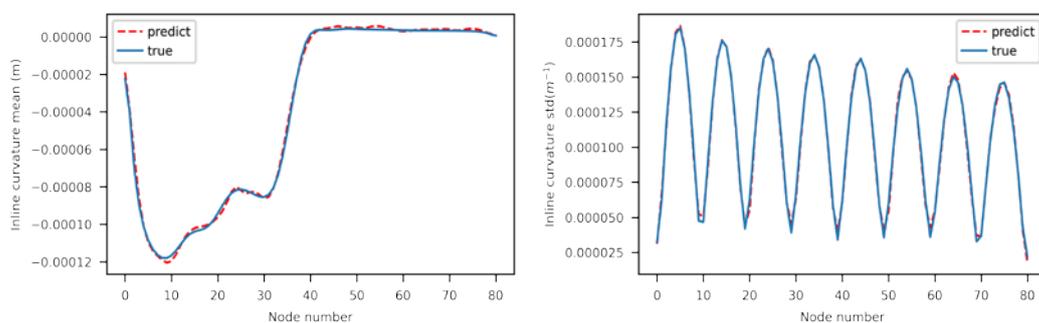
d) Top tension is 457N, velocity is 0.54 m/s ,
crossflow curvature standard deviation

图 6-12 预张力同为 457N, 流速分别为 0.31 m/s 和 0.54 m/s 时横流向曲率均值和标准差预测值与真实值对比

Fig.6-12 When the pretension is 457N and the flow velocity is 0.31 and 0.54 m/s , the predicted values of crossflow mean curvature and curvature standard deviation are compared with the real values

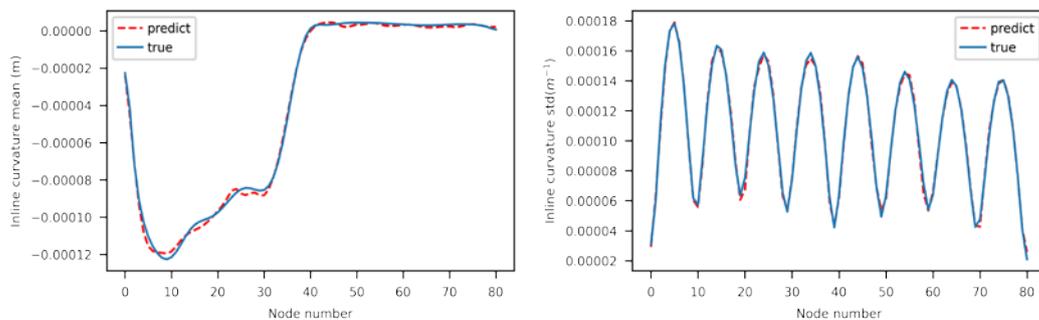
图 6-13 展示了时均运动预报模型在顺流向上的曲率和曲率标准差的预测结果。从图中可以观察到，预测值和真实值基本吻合，证明模型在顺流向上对曲率和曲率标准差的预测较为准确。还可以观察到，模型对于恒定数值，尤其是接近 0 值的恒定值的预测有待加强，比如预张力 405N，流速 0.21 m/s 和预张力 407N，流速 0.21 m/s 这两个工况下，在 40 到 80 节点部分，曲率几乎为 0，模型的预测值会出现上下抖动。

试验发现模型对于类似正弦波动的结果具有很好的拟合性，比如对于顺流向上曲率标准差的预测就非常吻合。



a) 顶张力 405N，流速 0.21 m/s ，顺流向曲率均值
 b) 顶张力 405N，流速 0.21 m/s ，顺流向曲率标准差

a) Top tension is 405N, velocity is 0.21 m/s , inline mean curvature
 b) Top tension is 405N, velocity is 0.21 m/s , inline curvature standard deviation



a) 顶张力 407N，流速 0.21 m/s ，顺流向曲率均值
 b) 顶张力 407N，流速 0.21 m/s ，顺流向曲率标准差

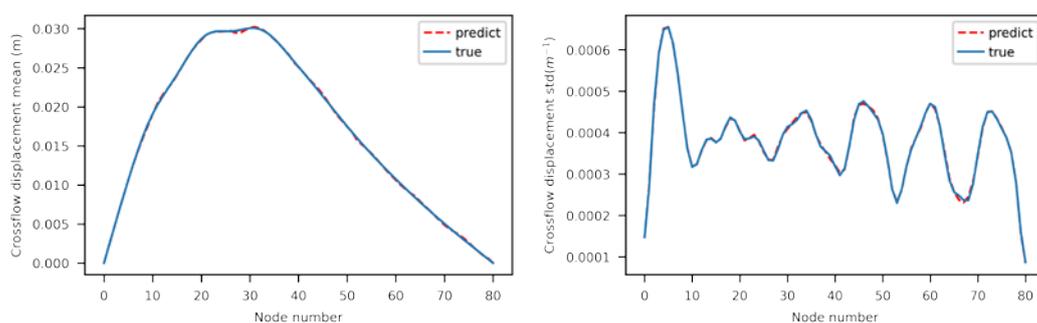
a) Top tension is 407N, velocity is 0.21 m/s , inline mean curvature
 b) Top tension is 407N, velocity is 0.21 m/s , inline curvature standard deviation

图 6-13 时均运动预报模型在顺流向上曲率和曲率标准差上的预测结果

Fig.6-13 Prediction results of averaged motion prediction model on downstream curvature and curvature standard deviation

图 6-14 为横流向的位移均值，以及位移标准差上预测值和真实值的对比。从图中可以看出，预测值可以完美的展示横流向上立管涡激振动的振型，预测值和真实值基本吻合。

在工况预张力 598N，流速 0.54 m/s 下的横流向位移标准差，预测值和真实值的最大差值为 1.31×10^{-5} ，最小差距为 9.29×10^{-9} 。发现相较于瞬时预报模型，增加了神经元后，对于细微的局部波动也可以进行比较好的预测，模型的拟合能力相较于瞬时预报模型有了很大的提高。



a) 顶张力 598N，流速 0.54 m/s ，横流向位移均值 b) 顶张力 598N，流速 0.54 m/s ，横流向位移标准差

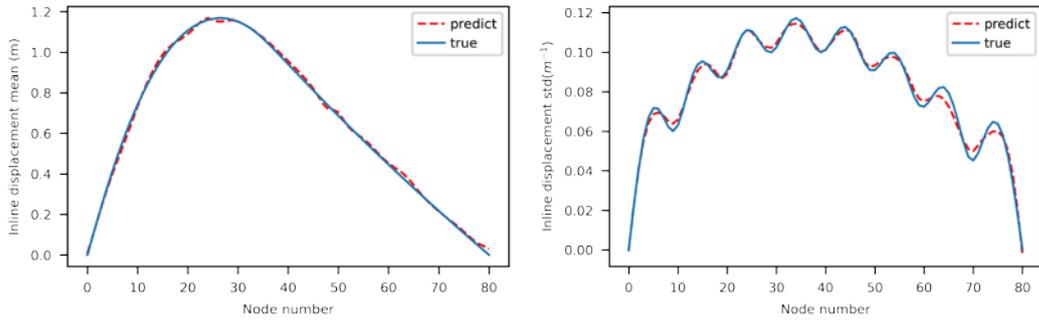
a) Top tension is 598N, velocity is 0.54 m/s , crossflow mean displacement b) Top tension is 598N, velocity is 0.54 m/s , crossflow displacement standard deviation

图 6-14 时均运动预报模型对横流向位移均值和位移标准差的预测结果

Fig.6-14 Prediction results of mean and standard deviation of displacement along crossflow direction by averaged motion prediction model

图 6-15 展示了时均运动预报模型在顺流向位移和位移标准差上的预测结果。发现模型对于立管涡激振动的特性可以进行完美的预测，比如在预张力 405N，流速 0.21 m/s 的工况，以及预张力 407N，流速 0.21 m/s 的工况，立管在顺流向上呈现出八阶振型，模型对振型进行了很好的复现。

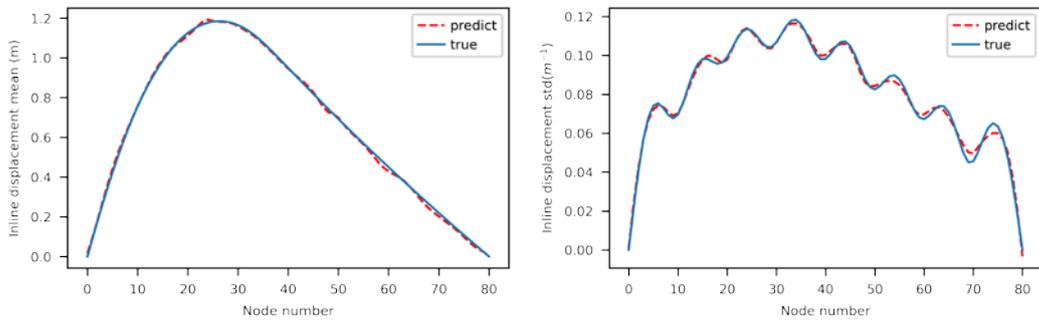
预张力为 405N，流速 0.21 m/s 时，顺流向位移标准差预测值与真实值的最大差距为 0.007；预张力 407N，流速 0.21 m/s 时，顺流向位移标准差预测值与真实值的最大差距为 0.006，相比于横流向和顺流向曲率标准差为 10^{-5} 级别，对于顺流向位移标准差的预测能力有待提高。



a) 顶张力 405N, 流速 0.21 m/s, 顺流向位移均值
b) 顶张力 405N, 流速 0.21 m/s, 顺流向位移标准差

a) Top tension is 405N, velocity is 0.21 m/s, inline mean displacement

b) Top tension is 405N, velocity is 0.21 m/s, crossflow displacement standard deviation



c) 顶张力 407N, 流速 0.21 m/s, 顺流向位移均值
d) 顶张力 407N, 流速 0.21 m/s, 顺流向位移标准差

c) Top tension is 407N, velocity is 0.21 m/s, inline mean displacement

d) Top tension is 407N, velocity is 0.21 m/s, crossflow displacement standard deviation

图 6-15 时均运动预报模型在顺流向位移和位移标准差上的预测结果

Fig.6-15 Prediction results of the averaged motion prediction model on the downstream displacement and displacement standard deviation

6.4 本章小结

本章基于 BP 神经网络构建了立管涡激振动瞬时运动和时均运动预报模型，以阶梯流下不同流速和不同顶张力的立管位移作为训练数据，对立管涡激振动的位移、频率等物理量进行了预测。

瞬时运动预报模型通过构建包含两个隐藏层的 BP 神经网络，来对横流向和顺流向的位移进行了预测，预测值和真实值吻合良好，准确率可以达到 0.99，相关度系数也达到了 0.99，表明模型的泛化能力较强。结果表明模型在横流向上的

预测能力要比顺流向上强，这是因为顺流向上立管振动幅值响应较为强烈，流速高的情况下振动幅度增加，会减少局部的抖动，节点之间的位移连线相对较为平滑，所以模型预测效果提升。瞬时运动预报模型对位移明显的峰谷预测结果很好，而对局部细微的峰谷预测能力则有待提高，这是因为顺流向的振动幅值响应要明显强于横流向，受尾涡的影响造成的波动也明显强于横流向。

时均运动预报模型通过增加隐藏层神经元的数量来对横流向和顺流向位移，位移标准差，曲率和曲率标准差，以及横流向频率进行了预测。试验结果发现，模型的准确率可以达到 0.98，相关度系数也达到 0.98。模型在位移，位移标准差，曲率以及曲率标准差的预测上，预测值和真实值几乎完全吻合，并可以复现立管涡激振动的振型特征。在对横流向频率的预测上，在相关度和准度上模型仍有提高的空间，模型对于接近 0 值的恒定值预测能力略显不足。

第七章 结论与展望

7.1 主要工作与创新点

目前针对深水柔性立管的研究工作通常集中在立管顶端和底端固定，通过改变流场信息，来研究立管涡激振动的特性，而实际工况时顶端平台通常会有水平和竖直方向的运动，相对于立管来讲，会产生水平和竖直方向的激励，而此方面的研究成果相对较少，来流与平台联合作用于立管的涡激振动更是稀少，本文的工作可以弥补这一空白。

将机器学习算法尤其是深度学习算法应用于涡激振动的预报，近年来逐渐成为该领域的研究热点，本文通过合理的布置算例，在数据量和预报精度上都有了大幅提高，在预报信息方面，通过合理设置神经网络的结构，可以输出如两自由度位移，频率，均方差等高阶信息，本文的主要工作主要分为以下几方面：

(1) 本文系统地阐述了顶端平台运动和来流对立管涡激振动影响相关的研究成果，总结了机器学习在立管涡激振动中应用相关的研究成果。

(2) 利用已有流固耦合求解器 `viv-FOAM-SJTU`，对阶梯流作用下的立管涡激振动标模问题，开展了数值计算并与模型试验比较，验证了求解器的有效性。本文以 `Chaplin` 的恒定张力盲测试验作为对照试验，开展了阶梯流下立管涡激振动数值模拟研究。从顺流向位移标准差，以及顺流向位移轮廓线验证了顺流向振型为四阶。横流向位移标准差及位移轮廓线结果表明横流向振型为二阶，与模型试验结果相同，可以认为利用求解器 `viv-FOAM-SJTU` 开展相关的数值模拟结果是准确可靠的。

(3) 建立了平台运动对立管涡激振动影响的数值模型，并利用该模型对考虑平台横荡和纵荡运动的立管涡激振动进行了数值模拟，分析了顶端平台运动和均匀来流联合作用对立管涡激振动响应的影响规律。通过对平台纵荡和横荡工况下立管横流向和顺流向的位移标准差的结果分析，发现在顶端平台横荡工况下，立管横流向的最大波动幅度是顶端平台纵荡工况下横流向最大波动幅度的 2 倍，这是因为在横流向上顶端平台的激励对立管涡激振动的影响要远远大于涡激升力产生的影响。模拟结果还表明在顶端平台纵荡工况下，立管顺流向的最大波动幅度出现在距离立管底端 $0.6L$ 处。以两自由度相对位移模态权重和模态权重功率谱密度图作为模态分析的出发点，利用两自由度位移标准差及立管振动位移包络线来辅助分析，发现顶端平台纵荡工况下立管横流向振动的主控模态为一阶，同时

也观察到了一阶到二阶振动的模态转换现象。论文最后通过绘制立管横流向和顺流向上不同时刻的主控频率，发现时间共享特性同样可以应用于近似振荡流的工况，对 Swithenbank 的结论做了进一步的推广。

(4) 基于 BP 神经网络构建了立管涡激振动瞬时运动和时均运动预报模型，以阶梯流下不同流速和不同顶张力的立管位移作为训练数据，对立管涡激振动的位移、频率等物理量进行了预测。瞬时运动预报模型和时均运动预报模型都以顶张力，均匀来流速度，节点的空间位置作为输入量，都设置两个隐藏层，时均运动预报模型在第二个隐藏层比瞬时运动预报模型多布置了 100 个神经元。瞬时运动预报模型具有训练时间短、精度高以及相关度系数高的特点，结果表明模型在横流向上的预测能力要比顺流向上强，这是因为顺流向上立管振动幅值响应较为强烈，流速高的情况下振动幅度增加，会减少局部的抖动，节点之间的位移连线相对较为平滑，所以模型预测效果提升。瞬时运动预报模型对位移明显的峰谷预测结果很好，而对局部细微的峰谷预测能力则有待提高，这是因为顺流向上的振动幅值响应要明显强于横流向，受尾涡的影响造成的波动也明显强于横流向。

7.2 后续研究工作

涡激振动领域是当下的热门研究领域，本文只是研究了领域的一小部分，未来仍然有很大的研究空间，主要为：

(1) 本文设置的两种工况下相当于来流和平台的夹角分别为 90 度和 0 度，未来可以保持顶端平台激励仍然是沿 x 轴方向上的正弦激励，来流大小不变，但是与来流呈现出 α 夹角，对来流大小进行正交分解，从而分析来流和顶端平台运动在不同夹角下产生的影响。这样的数值模拟一方面可以更加真实的接近实际海况，另一方面其可以产生一系列的梯度数据，从而可以利用机器学习模型来根据夹角以及已经计算出的结果进行预测。

(2) 本实验训练的神经网络模型是针对工况参数训练后进行预测，未来可以改变结构参数先进行数值模拟得到关于结构参数的数据，然后改进神经网络的输入层结构，训练模型根据结构参数进行预测，从而提高模型的预测能力和应用价值。

(3) 可以引入循环神经网络模型，循环神经网络模型相比于 BP 神经网络，其突出的特点在于具有记忆性，并且适合针对时间序列建模，但是相应的，也会对输入的数据量有较大的要求，所以如何引入大数据量并且能更高效的训练也会是一个值得研究的课题。

参 考 文 献

- [1] Marcollo H , Hinwood J B . On shear flow single mode lock-in with both cross-flow and in-line lock-in mechanisms[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(2):197-211.
- [2] Chaplin J R, Bearman P W, Cheng Y, et al. Blind predictions of laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a tension riser[J]. Journal of fluids and structures, 2005, 21(1): 25-40.
- [3] 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 & Structures, 2005, 21(1):3-24.
- [4] Lie H, Larsen C M, Vandiver J K. Vortex induced vibrations of long marine risers; model test in a rotating rig[C] //PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 1997: 241-252.
- [5] Lie H, Mo K, Vandiver J K. VIV model of a bare-and a staggered buoyancy riser in a rotating rig[C]//Offshore Technology Conference Proceedings, OTC. 1998, 8700.
- [6] Vandiver J K, Marcollo A. High mode number VIV experiments[C]//IUTAM Symposium on Integrated Modeling of Fully Coupled Fluid Structure Interactions Using Analysis, Computations and Experiments. Springer, Dordrecht, 2003: 211-231.
- [7] de Wilde J J, Huijsmans R H M. Laboratory investigation of long riser VIV response[C]//The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004.
- [8] Baarholm G S, Larsen C M, Lie H. On fatigue damage accumulation from in-line and cross-flow vortex-induced vibrations on risers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(1): 109-127.
- [9] Modarres-Sadeghi Y , Mukundan H , Dahl J M , et al. The effect of higher harmonic forces on fatigue life of marine risers[J]. Journal of Sound & Vibration, 2010, 329(1):43-55.
- [10] Trim A D , Braaten H , Lie H , et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers[J]. Journal of Fluids & Structures, 2005, 21(3):335-361.

- [11] Williamson C H K . Vortex Dynamics in the Cylinder Wake[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1996, 28(1):477-539.
- [12] 王俊高, 付世晓, 许玉旺, 等. 正弦振荡来流下柔性立管涡激振动发展过程[J]. 力学学报, 2014, 46(2): 173-182.
- [13] Franzini G.R., Pesce C.P., Salles R., Goncalves R.T., Fugarra A.L.C., Mendes P. Experimental analysis of a vertical and flexible cylinder in water response to top motion excitation and parametric resonance[J]. Journal of Vibration and Acoustics. 2015, 137: 031010.
- [14] Franzini G.R., Pesce C.P., Goncalves R.T., Fugarra A.L.C., Mendes P. Experimental investigations on vortex-induced vibrations with a long flexible cylinder. Part I: Modal-amplitude analysis with a vertical configuration[C]. Proceedings of the 11th International Conference on Flow-Induced Vibration. Hague, the Netherlands, July 4th-6th, 2016.
- [15] Franzini G.R., Pesce C.P., Goncalves R.T., Fugarra A.L.C., Mendes P. Experimental investigations on vortex-induced vibrations with a long flexible cylinder. Part II: Effect of axial motion excitation in a vertical configuration[C]. Proceedings of the 11th International Conference on Flow-Induced Vibration. Hague, the Netherlands, July 4th-6th, 2016.
- [16] Franzini G.R., Pesce C.P., Goncalves R.T., Fugarra A.L.C., Mendes P. An experimental investigation on concomitant vortex-induced vibration and axial top-motion excitation with a long flexible cylinder in vertical configuration[J]. Ocean Engineering. 2018, 156: 596-612.
- [17] Fujiwara T., Uto S., Kanada S. An Experimental Study of Effects that Change the Vibration Mode of the Riser VIV[C]. OMAE2011-49677, Rotterdam, the Netherlands, June 19-24, 2011.
- [18] 宋磊建, 付世晓, 于大鹏, 等. 剪切流下发生涡激振动的柔性立管阻力特性研究[J]. 力学学报, 2016, 48(2): 300-306.
- [19] Hartlen R T, Currie I G. Lift-oscillator model of vortex-induced vibration[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1970, 96(5): 577-591.
- [20] Facchinetti M L , De?Langre E , Biolley F . Vortex shedding modeling using diffusive van der Pol oscillators[J]. Comptes rendus - Mécanique, 2014, 330(7):451-456.
- [21] 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.
- [22] Facchinetti M L , Langre E D , Biolley F . Vortex-induced travelling waves along a

- cable[J]. *European Journal of Mechanics*, 2004, 23(1):199-208.
- [23] Iwan W D , Blevins R D . A Model for Vortex Induced Oscillation of Structures[J]. *J Appl Mech*, 1974, 41(3):581.
- [24] 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]. 中国海洋大学, 2010.
- [25] Mathelin L , Langre E D . Vortex-induced vibrations and waves under shear flow with a wake oscillator model[J]. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2014, 24(4):478-490.
- [26] Furnes G.K., Srensen K. Flow Induced Vibrations Modeled by Coupled Non-Linear Oscillators[C]. In *Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, Portugal, 2007.
- [27] 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*, 2009.
- [28] 黄维平, 曹静, 张恩勇, 唐世振. 大柔性圆柱体两自由度涡激振动试验研究[J]. *力学学报*, 2011, 43(02):436-440.
- [29] 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]. 中国海洋大学, 2013.
- [30] Yamamoto C T, Meneghini J R, Saltara F, et al. Numerical simulations of vortex-induced vibration on flexible cylinders[J]. *Journal of fluids and structures*, 2004, 19(4): 467-489.
- [31] Duan M, Fu B, Wan D. The effect of top tension on VIV model analysis of a vertical flexible riser[C]. *Proceedings of the second conference of global Chinese scholars on hydrodynamics*. 2016: 11-14.
- [32] Muyu Duan, Decheng Wan. Frequency and Moving Direction Effects on Lift, Drag and Vortex Mode for Flows around an Oscillating Cylinder. *The twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*, Kona, Big Island, Hawaii, USA. 2015: 1010-1017.
- [33] Muyu Duan, Decheng Wan. Vortex-induced Vibration Analysis of Umbilical Cable. *The seventh International Workshop on Ship Hydrodynamics*, Shanghai, China, 2011: 174-179.
- [34] 黄智勇. 柔性立管涡激振动时域响应分析[D]. 上海交通大学, 2008.
- [35] Evangelinos C , Karniadakis G E . Dynamics and flow structures in the turbulent wake of rigid and flexible cylinders subject to vortex-induced vibrations[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 400:91-124.
- [36] Gallardo J P, Pettersen B, Andersson H I. Dynamics in the turbulent wake of a

- curved circular cylinder[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2011, 318(6): 062008.
- [37] Evangelinos C , Lucor D , Karniadakis G E . DNS-DERIVED FORCE DISTRIBUTION ON FLEXIBLE CYLINDERS SUBJECT TO VORTEX-INDUCED VIBRATION[J]. Journal of Fluids & Structures, 2000, 14(3):429-440.
- [38] 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.
- [39] Bowen Fu, Lu Zou, Decheng Wan, Numerical study of vortex-induced vibrations of a flexible cylinder in an oscillatory flow, Journal of Fluids and Structures, 2018, 77:170-181. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2017.12.006>
- [40] Bowen Fu, Lu Zou and Decheng Wan, Numerical Study on the Effect of Current Profiles on Vortex-Induced Vibrations in a Top-Tension Riser, Journal of Marine Science and Application, vol.16, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11804-017-1429-3>
- [41] Bowen Fu, Di Deng, Decheng Wan, Numerical Study of Riser Vibration Due to Top-End Platform Motion, Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods (ICCM2017),25-29 July 2017, Guilin, Guangxi, China, PP.944-951
- [42] Bowen Fu, Muyu Duan, Decheng Wan, Effect of mass ratio on the vortex-induced vibrations of a top tensioned riser, Proceedings of the Second Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, Nov. 11-14, 2016, Wuxi, China, pp. 431-435
- [43] 黄智勇. 柔性立管涡激振动时域响应分析[D]. 上海交通大学, 2008.
- [44] 董婧,宗智,李章锐,孙雷,陈伟.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(Z1):9-20.
- [45] Saltara F , Meneghini J R , Fregonesi R A . Numerical Simulation of Flow Around Elastically Mounted Cylinder[J]. International Journal of Offshore & Polar Engineering, 2003, 13(2).
- [46] Joel C A . Numerical study of slightly viscous flow[J]. Computational Fluid Mechanics, 1989, 57(4):65-76.
- [47] 王哲,邓迪,万德成.基于 CFD 方法的变张力柔性圆柱涡激振动数值模拟[J].水动力学研究与进展(A 辑),2019,34(02):201-209.
- [48] Wang Z., Deng D., Wan D. Modal Analysis of a Top-Tensioned Riser

- Experiencing Vortex-Induced Vibration and Varying Axial Tensions[C]. Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference Sapporo, Japan, June 10-15, 2018, pp.971-978.
- [49] 王哲, 邓迪, 万德成. 变张力作用下张紧式立管涡激振动的数值模拟[C]. 第二十九届全国水动力学研讨会论文集, 2018年8月24-27日, 江苏镇江, pp.598-606.
- [50] 王哲, 付博文, 万德成. 平台垂荡运动对深海立管涡激振动的影响分析[C]. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 2017年9月22日-25日, 中国舟山, pp.617-622.
- [51] 武磊, 赵伟文, 万德成. 不同浸没长度下串列双立管涡激振动数值模拟[J]. 海洋工程, 2020, 38(03):52-61.
- [52] Wong E W C, Kim D K. A simplified method to predict fatigue damage of TTR subjected to short-term VIV using artificial neural network[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 126(DEC.):100-109.
- [53] 林海花. 隔水管涡激动力响应及疲劳损伤可靠性分析[D]. 大连理工大学, 2008.
- [54] 高喜峰, 翟立宾, 徐万海. 应用BP神经网络的柔性圆柱涡激振动预报[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(08):1150-1155.
- [55] 孟杨. 圆柱绕流及其涡激振动的物理模型与机器学习相结合方法研究[D]. 大连海事大学, 2020.
- [56] Raissi M, Wang Z, Triantafyllou M S, et al. Deep learning of vortex-induced vibrations[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 861:119-137.
- [57] McCulloch W S, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity[J]. The bulletin of mathematical biophysics, 1943, 5(4): 115-133.
- [58] 周志华. 机器学习 := Machine learning[M]. 清华大学出版社, 2016.
- [59] Hornik K, Stinchcombe M, White H. Multilayer feedforward networks are universal approximators[J]. Neural networks, 1989, 2(5): 359-366.
- [60] Fu B, Wan D. Numerical Study of Vibrations of a Vertical Tension Riser Excited at the Top End[J]. Journal of Ocean Engineering and Science, 2017, 2(4):268-278.
- [61] Swithenbank S B. Dynamics of long flexible cylinders at high-mode number in uniform and sheared flows[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [62] Deng D, Wan D. THICK STRIP MODEL FOR VORTEX-INDUCED VIBRATION OF TWO FLEXIBLE CYLINDERS IN TANDEM ARRANGEMENTS[J].

致 谢

转眼间到了毕业的时间，不知不觉中从一个初入科研领域的懵懂少年，到如今一个行将毕业马上步入社会的工作者，不禁会对过往两年半内对自己帮助的人有深深的感激。

感谢万德成教授两年半时间内对我的谆谆教诲。万老师在我本科期间就指导我完成了本科毕业设计，那时就被万老师求真务实的科研态度所感染，也对涡激振动这一领域产生了强烈的研究兴趣。令我印象深刻的是每周一次的组会，每次组会万老师都会给汇报的同学给予很多高屋建瓴的指导，虽然个别研究方向与我自己的研究方向并不吻合，但是从其他同学清晰的汇报中，自己也从这些汇报中受到了启发，所以非常感谢万老师提供每周组会这样一个机会，帮助我建立起知识间的联系。

感谢王建华老师，不光在科研事业上蒸蒸日上，也会从繁忙的工作中抽出时间对我指导，小到答辩汇报的签字，大到研究课题的选题，都会给予我很多宝贵的建议。

感谢赵伟文老师的指导，赵老师作为涡激振动方向的老师，对涡激振动这个领域有很深入的研究，研究成果丰硕。赵老师非常擅长软件开发，对 OpenFOAM 的体系结构非常了解，很多时候可以修改其源代码，赵老师高超的编程能力让我深深折服，赵老师在理解 viv-FOAM-SJTU 求解器上给予我很多的指导。

感谢邓迪博士的指导，邓博应该是在我整个研究生两年半内联系最频繁的了。从最开始不熟悉 Ubuntu 系统，对集群提交算例毫无头绪，邓博都会耐心的给予指导，很多时候会录制一些操作的视频来帮助我理解。邓博还在网格划分，毕业设计的选题，都提供了诸多宝贵的意见和建议，每次看到邓博发给我的论文修改批注，都不禁深深感叹邓博的严谨认真。也非常感谢邓博提供的厚切片算例的数据。

最后需要感谢我的父母，爸妈作为我坚强的后盾，在精神层面给予了我很大的支持，也希望爸妈身体能够健健康康。

攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] **Yuqi Zhang**, Di Deng, Decheng Wan, Numerical Study of Effect of KC Number on the Vortex-Induced Vibration of a Flexible Riser in the Oscillatory Flow, The 13th World Congress on Computational Mechanics(WCCM-2018), New York City, July 22-27, 2018
- [2] **Yuqi Zhang**, Di Deng, Decheng Wan, Numerical Study of Vortex-induced Vibration of a Flexible Riser under Offshore Platform Horizontal Motion, The 30th (2020)International Ocean and Polar Engineer Conference, Shanghai, October 11-16, 2020
- [3] **张钰祺**, 邓迪, 王德成. 均匀来流下平台横荡和纵荡对立管涡激振动影响的数值分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑 (已录用, 中文核心)