

上海交大船舶与海洋工程计算水动力学研究中心
海洋工程国家重点实验室
高新船舶与深海开发装备协同创新中心

联系方式：

上海市闵行区东川路800号上海交大木兰船建大楼B101

邮编：200240

电话：021-34207971

传真：021-34207991

Email: luzou@sjtu.edu.cn

网址: <http://dcwan.sjtu.edu.cn>



CMHL COMPUTATIONAL MARINE HYDRODYNAMICS LAB
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



**涡激振动快速虚拟试验系统
(viv-FAST-SJTU)**

**涡激振动精细虚拟试验系统
(viv-FOAM-SJTU)**

**涡激运动虚拟试验系统
(vim-FOAM-SJTU)**



<http://dcwan.sjtu.edu.cn>

**上海交通大学
2017年12月**

涡激振动快速虚拟试验系统 (viv-FAST-SJTU)

涡激振动快速虚拟试验系统 (viv-FAST-SJTU) 是针对海洋隔水管、锚链等立管类结构的涡激振动问题，通过构建流体力数据库和建立结构有限元动力学模型，进行结构动力学响应计算，快速获取立管涡激动力学响应的虚拟试验系统。

viv-FAST-SJTU包含单机版和网络版两个版本，在普通微机上均可正常运行，一般在10分钟内便可计算出立管的涡激振动响应结果。系统可以进行大长径比海洋立管的模态分析，输出固有频率和振型；进行海洋立管涡激动力学响应计算，获得位移、速度、应力等均方根结果；系统还具备试验报告生成，计算数据和曲线的导出等功能。

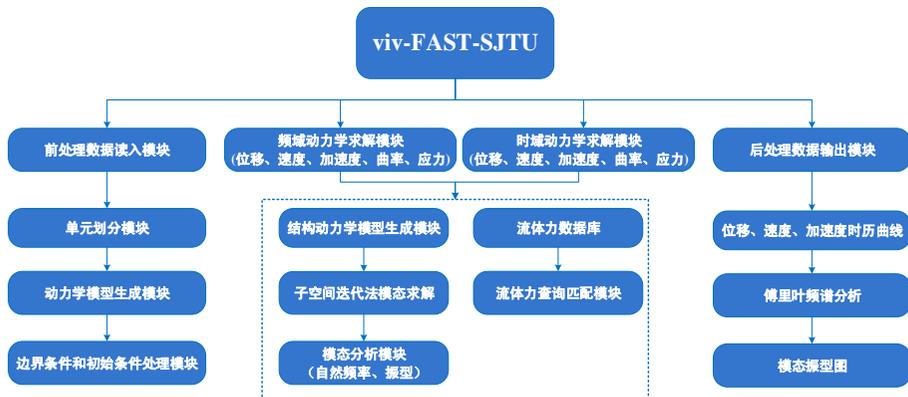


单机版主界面

网络版主界面

组成模块

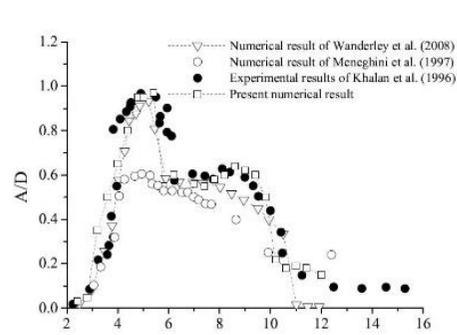
系统采用模块化结构，总体包括前处理、求解器和后处理模块三个模块，具体由10余个子模块组成，系统具备清晰的结构，使系统开发和测试非常方便，并具备了良好的拓展性。



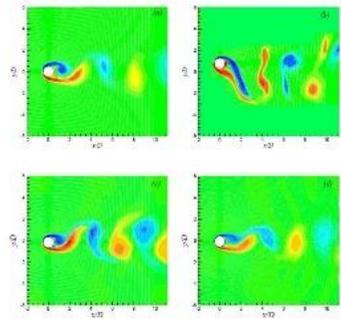
系统结构图

技术特色

涡激振动快速虚拟试验系统求解器中的立管采用了张力梁有限元动力学模型；模态分析算法采用了灵活高效的子空间迭代法；在构建流体力数据库时，采用了自主研发的TVD-EVVT高精度数值方法和离散格式。



TVD-EVVT计算结果与实验结果、其它数值模拟结果的对比



系统特点

系统的使用流程清晰简便，界面友好灵活。工程师可以轻松方便地预测海洋立管在不同张力和结构参数下的涡激振动响应，从而为海洋工程设计和应用提供有力的支撑。

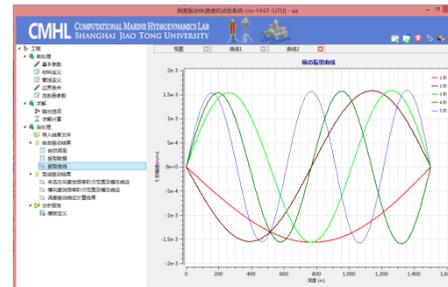


用户使用界面 (单机版)

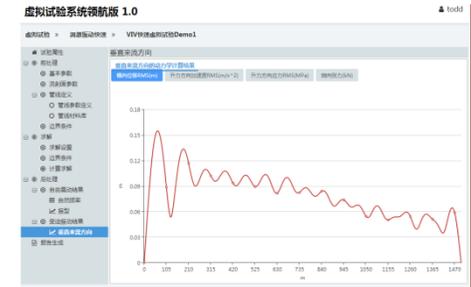
用户使用界面 (网络版)

典型试验

试验对象：隔水管长度：1500m，外径：0.5334m，内径：0.4826m，内流密度：1438 kg/m³，弹性模量：210GPa，密度：7850 kg/m³，顶部张力：7766.2kN (1.5倍湿重)，海流速度：0.5m/s-1.5m/s梯度流。



隔水管前5阶振型曲线 (单机版)



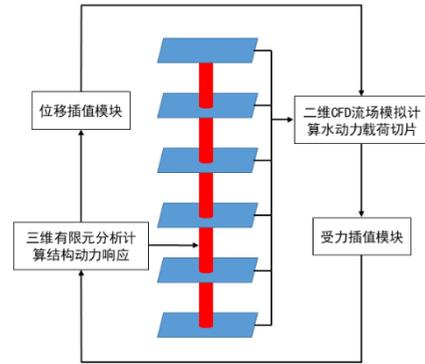
隔水管涡激振动位移RMS结果 (网络版)

涡激振动精细虚拟试验系统 (viv-FOAM-SJTU)

涡激振动精细虚拟试验系统(viv-FOAM-SJTU)与涡激振动快速虚拟试验系统(viv-FAST-SJTU)不同,采用的是计算流体力学流场切片理论耦合结构动力学方法,不仅可进行柔性立管涡激振动动力学响应计算,还可以进行精细流场分析。系统包含两套计算流体力学求解器:基于OpenFOAM自主开发的viv-FOAM-SJTU和采用高精度离散格式TVD-EVVT自主开发的TVD-FVM-VIV。



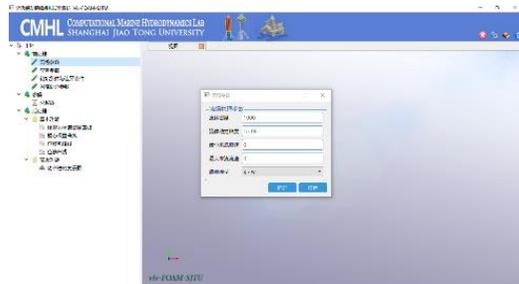
涡激振动虚拟试验系统主界面



切片法原理示意图

功能特性

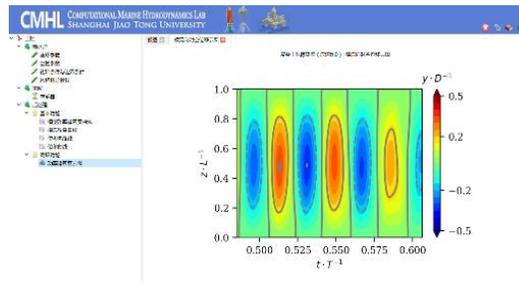
viv-FOAM-SJTU在友好的用户界面实现网格生成、参数定义、计算和可视化结果显示,根据计算结果,通过时域、频域和模态分析工具,可以生成丰富的图表和动画。



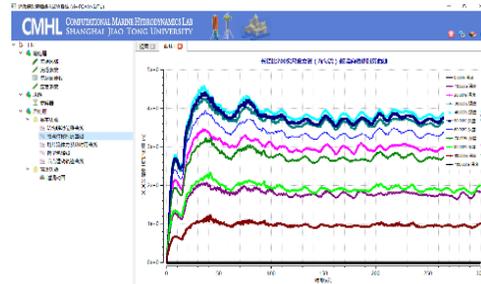
viv-FOAM-SJTU系统操作界面



系统操作界面:操作树



viv-FOAM-SJTU系统操作界面:横流向时空云图

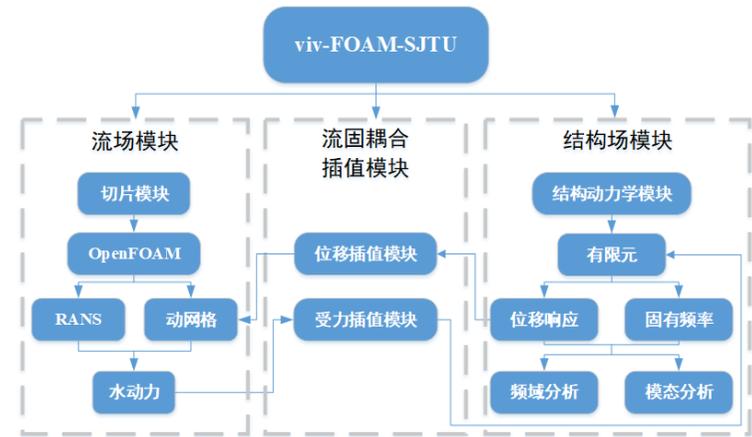


viv-FOAM-SJTU系统操作界面:顺流向位移时历曲线

viv-FOAM-SJTU求解器

组成模块

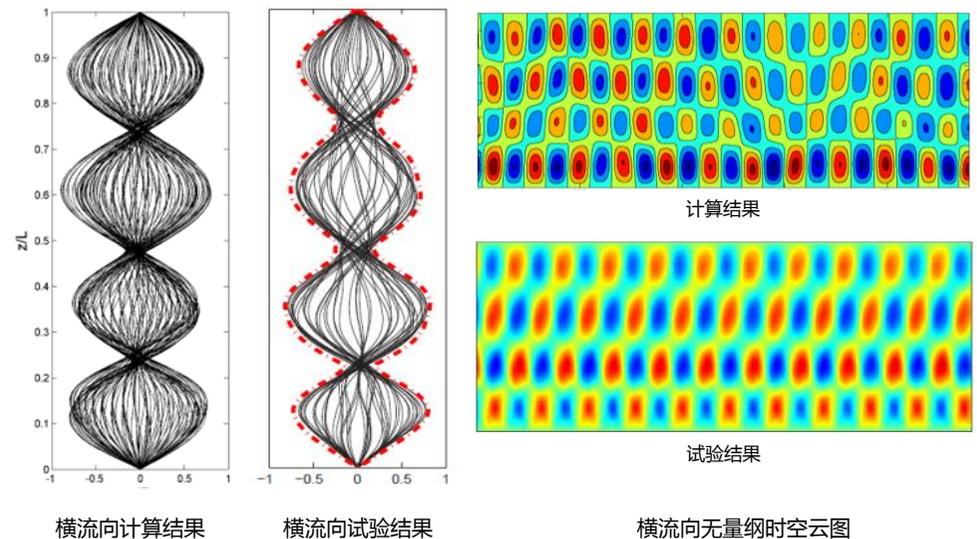
viv-FOAM-SJTU求解器基于OpenFOAM平台开发,采用切片分析方法,运用有限体积法和RANS湍流模型模拟立管周围流场,求解立管受力情况及流场特性。采用欧拉-伯努利梁模型和三维有限元方法进行建模,并通过插值模块传递信息,实现对网格变形和结构动力学响应的耦合计算。



求解器基本框图

阶梯流中单立管涡激振动

viv-FOAM-SJTU求解器能进行细长柔性立管在均匀流、剪切流、振荡流和平台运动作用下立管顺流向与横流向耦合涡激振动数值模拟。在viv-FOAM-SJTU求解器的标准试验数值模拟中,立管顺流向与横流向位移计算误差在10%以内,验证了求解器的有效性和可靠性。



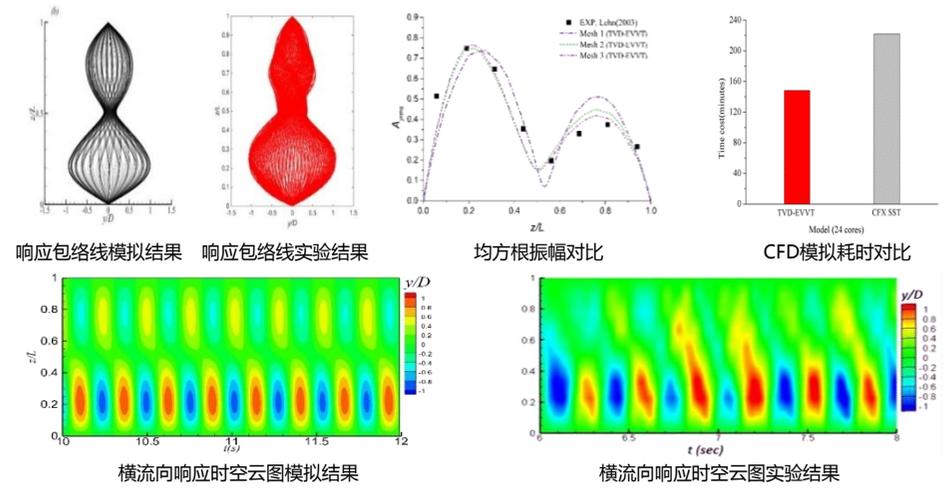
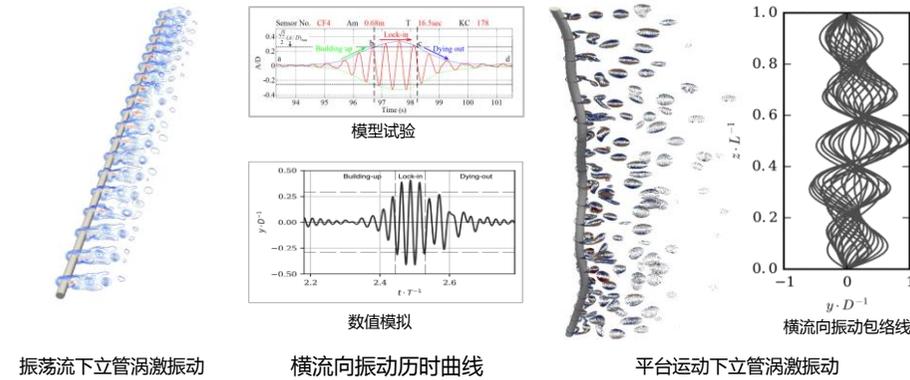
横流向计算结果

横流向试验结果

横流向无量纲时空云图

平台运动下柔性立管涡激振动

viv-FOAM-SJTU求解器可以模拟振荡流下柔性立管涡激振动周期性的“产生-锁定-消亡”过程，结果与试验吻合良好；可模拟顶端平台水平运动下立管的涡激振动和顶端平台垂荡作用下立管的涡激振动。

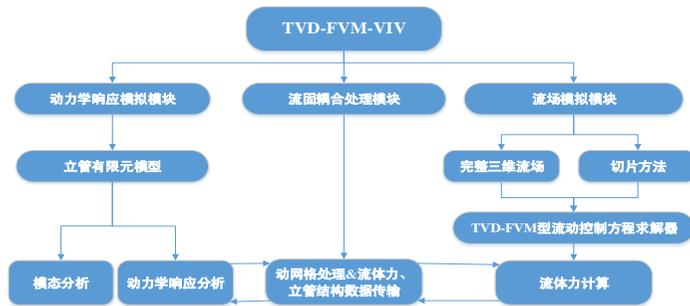


TVD-FVM-VIV求解器

TVD-FVM-VIV求解器是王嘉松教授及其研究生采用多年研究成果——基于总变差减小 (TVD) 和单元速度向量转化 (EVVT) 的有限体积(FVM)数值方法开发的，以纳维-斯托克斯方程作为流动控制方程，结合立管动力学响应方程和流固耦合处理模块，能准确模拟实尺度及实际海洋环境下的柔性立管涡激振动。

组成模块

求解器可以选择采用切片方法或者完整三维流动控制对方对立管周围的流场进行模拟。流动控制方程经过任意拉格朗日欧拉方法(ALE)处理，以实现流场运动边界的模拟。采用三维梁单元对立管动力学响应进行建模，并通过流固耦合模块处理流场网格和结构动力学响应的耦合。



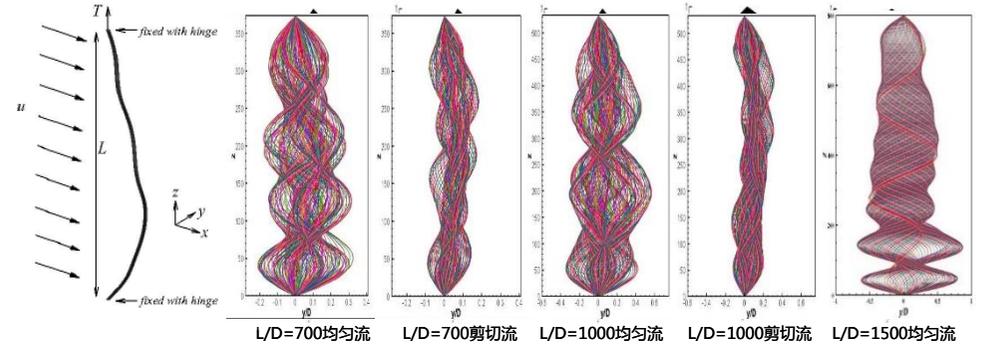
求解器基本框图

均匀流中长径比481立管涡激振动

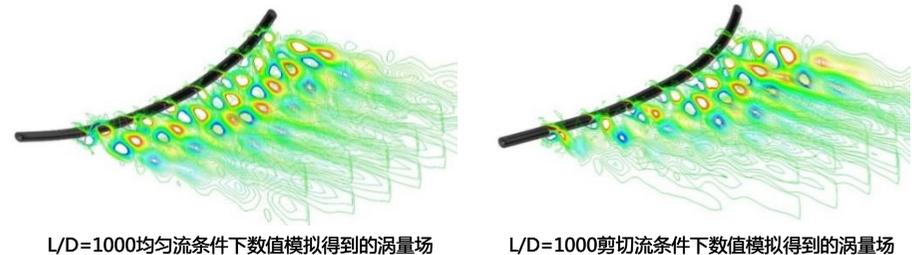
对立管长度为9.63m、长径比为481的标准试验模型在速度为0.42m/s的均匀来流条件下进行数值模拟，响应包络线、均方根振幅结果与试验吻合良好。在相同计算条件下，本求解器相比商用软件CFX的计算时间减少30%。本求解器可模拟实际工程条件下（雷诺数达到 10^6 ，长径比1000以上）的深海立管涡激振动。

实尺度柔性立管涡激振动

使用TVD-FVM-VIV求解器对一系列实尺度案例进行了模拟，成功捕捉到立管涡激振动中存在的多模态以及高阶模态特征。立管的长径比为700、1000、1500，立管顶端施加了相当于1.5倍湿重的轴向张力。立管两端采用铰接固定，在速度为0.6m/s的均匀流条件下以及0.1m/s~1.0m/s的剪切流条件下模拟了立管的VIV响应，得到不同工况下的立管响应包络线。立管响应呈现出高阶模态以及多重模态的特征，模拟结果表明本求解器能对立管的此种响应特征进行有效捕捉。

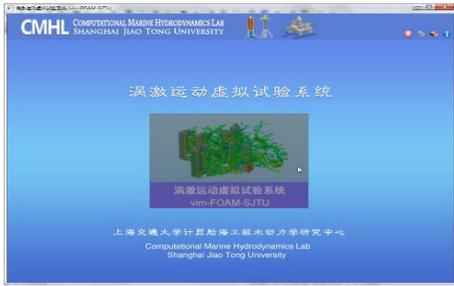


本求解器有效模拟出物理水池试验环境下难以捕捉的大长径柔性立管高雷诺数流动下的行波响应特性；可对立管周围的流场特征进行准确模拟，描述柔性立管涡激振动流场在不同截面上的涡脱形态，由于可以使用完整三维流动控制对方对立管周围的流场进行模拟，流场的三维输运特征也能得到有效捕捉。

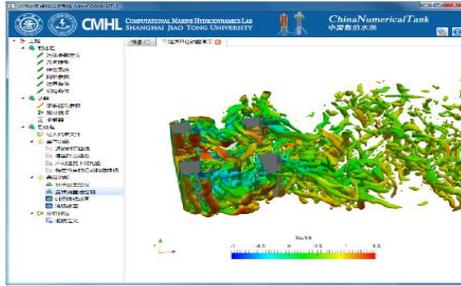


涡激运动虚拟试验系统 (vim-FOAM-SJTU)

涡激运动虚拟试验系统(vim-FOAM-SJTU)是针对浮式海洋平台涡激运动问题,以计算流体力学理论为基础,采用分离涡模拟方法处理高雷诺数下三维流动分离,结合物体六自由度运动理论和动边界弹簧网格技术求解平台涡激运动的虚拟试验系统。



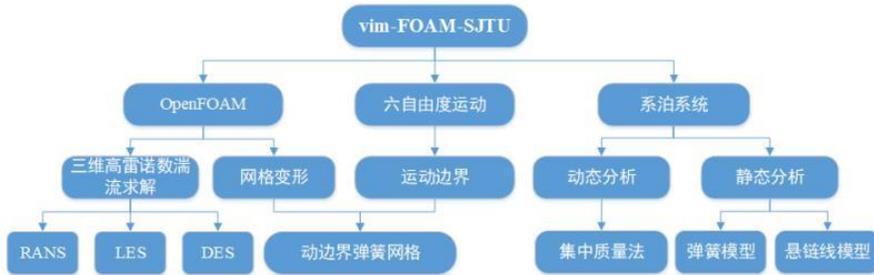
VIM虚拟试验系统



VIM虚拟试验结果展示

组成模块

vim-FOAM-SJTU基于OpenFOAM平台开发,运用有限体积法和分离涡模拟方法求解平台附近的流场,采用成熟的六自由度运动理论求解平台运动,用弹簧变形网格处理运动带来的动边界问题,可采用不同静态分析模型模拟系泊系统。



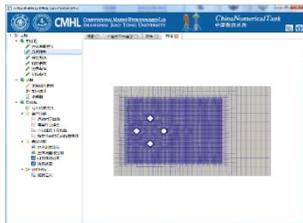
vim-FOAM-SJTU框架图

功能特性

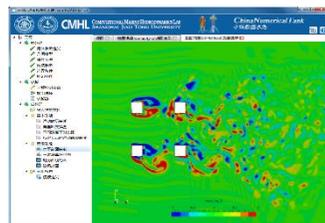
vim-FOAM-SJTU核心求解器采用分离涡数值模拟方法捕捉精细的三维高雷诺数流场特征,可实现Spar平台、半潜式平台以及新型浮式海洋平台多自由度下的耦合运动,准确预报“锁定”现象出现的速度区间;可在友好的用户界面下实现网格生成、参数定义、计算和可视化结果显示。



精细的三维高雷诺数流场



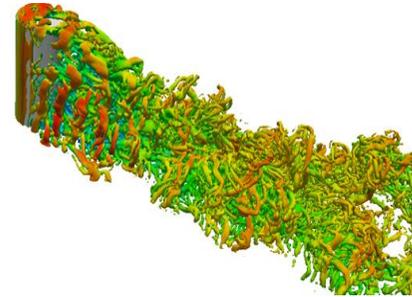
网格生成界面



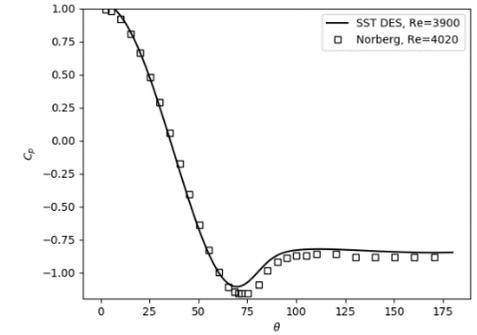
计算结果可视化

圆柱绕流虚拟试验

vim-FOAM-SJTU在圆柱绕流标准试验数值模拟中可捕捉到比时均方法更加精细的涡结构及明显的三维旋涡脱落效应,表面压力系数预报误差5%以内。



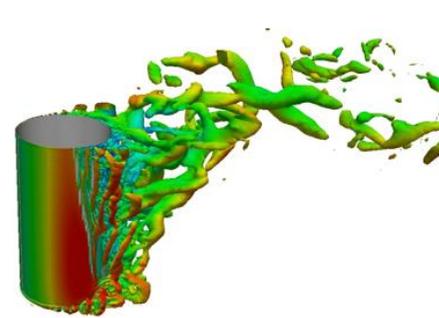
DES湍流模型计算三维圆柱绕流涡情况



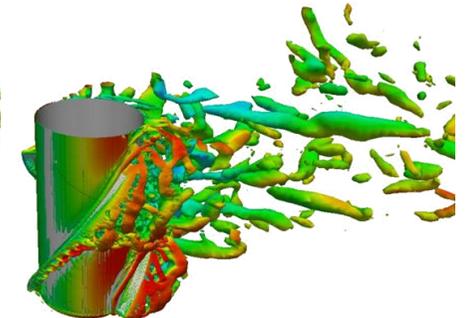
圆柱表面压力系数与试验对比

Spar平台涡激运动虚拟试验

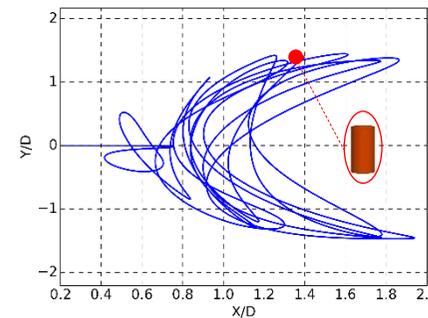
vim-FOAM-SJTU可用于Spar平台涡激运动预报,分析平台在不同情况下的涡激运动响应,以及主体表面螺旋侧板的减涡效果。螺旋侧板可以显著降低流向和横向运动响应。



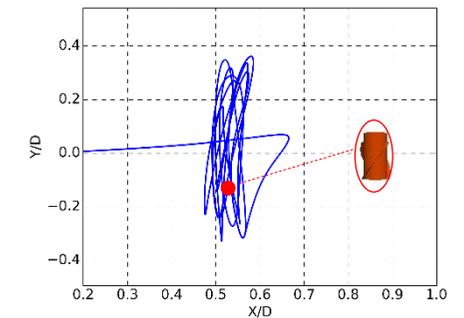
无螺旋侧板Spar平台三维涡结构



有螺旋侧板Spar平台三维涡结构



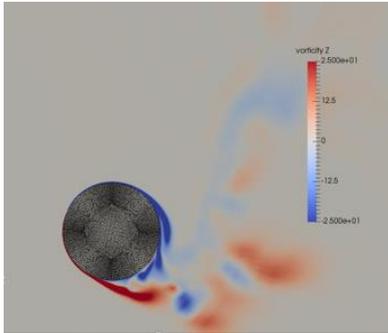
无螺旋侧板Spar平台运动轨迹



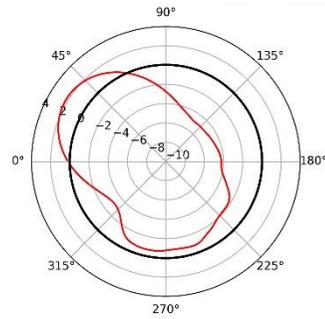
有螺旋侧板Spar平台运动轨迹

考虑旋转的浮筒涡激运动虚拟试验

vim-FOAM-SJTU可模拟考虑旋转运动的圆柱浮筒涡激运动。

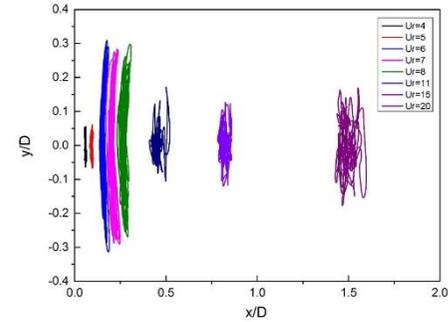


旋转浮筒涡激运动

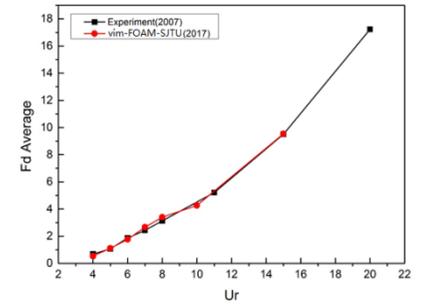


压力系数 C_p 周向分布图

拖曳力预报误差在6%左右, 涡激运动响应预报误差在10%以内。



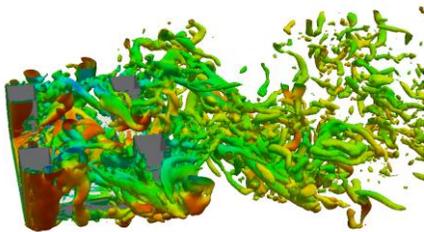
准确预报“锁定”现象



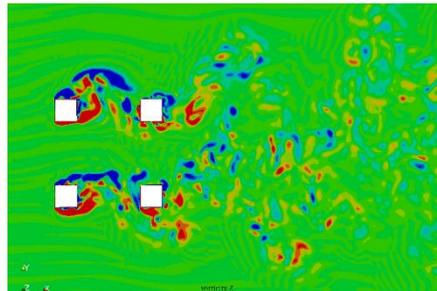
平均拖曳力随折合速度变化曲线

半潜式平台涡激运动虚拟试验

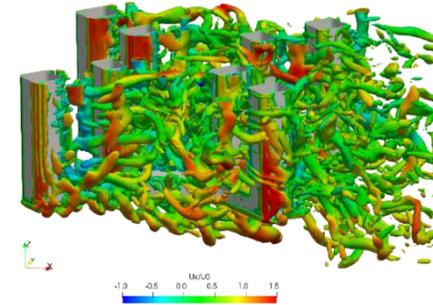
vim-FOAM-SJTU还可模拟多柱式半潜平台涡激运动, 可进行不同来流下半潜式平台涡激运动的数值模拟, 分析平台的运动以及涡特征。



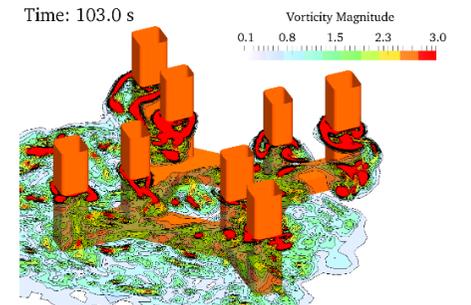
来流角0度半潜平台尾涡结构



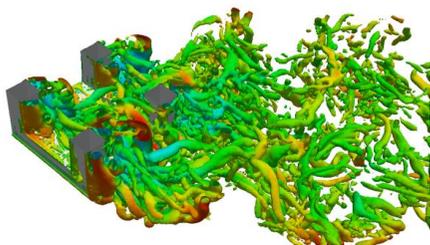
来流角0度半潜平台水平截面涡结构



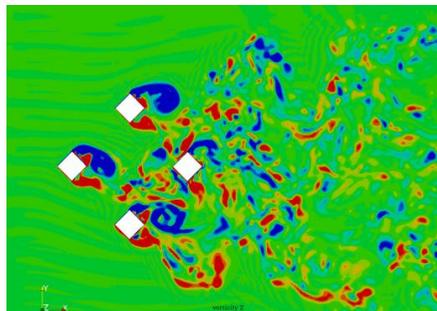
来流角0度对柱式半潜平台尾涡结构



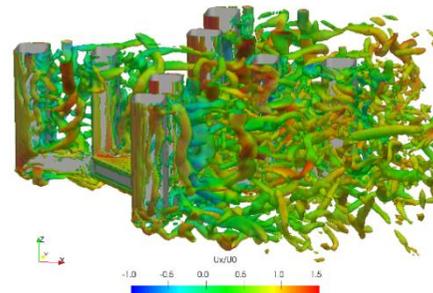
来流角0度 $z/L=0.5$ 平面内涡结构



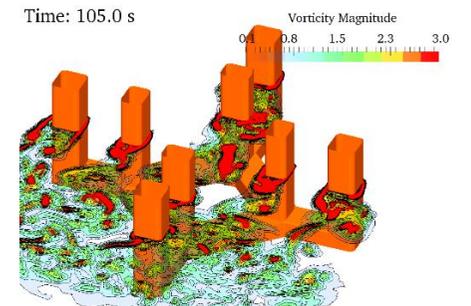
来流角45度半潜平台尾涡结构



来流角45度半潜平台水平截面涡结构



来流角45度对柱式半潜平台尾涡结构



来流角45度 $z/L=0.5$ 平面内涡结构

对柱式半潜平台涡激运动虚拟试验

vim-FOAM-SJTU可对新型对柱式半潜平台进行涡激运动虚拟试验, 预报分析其在不同情况下的涡激运动响应特性。