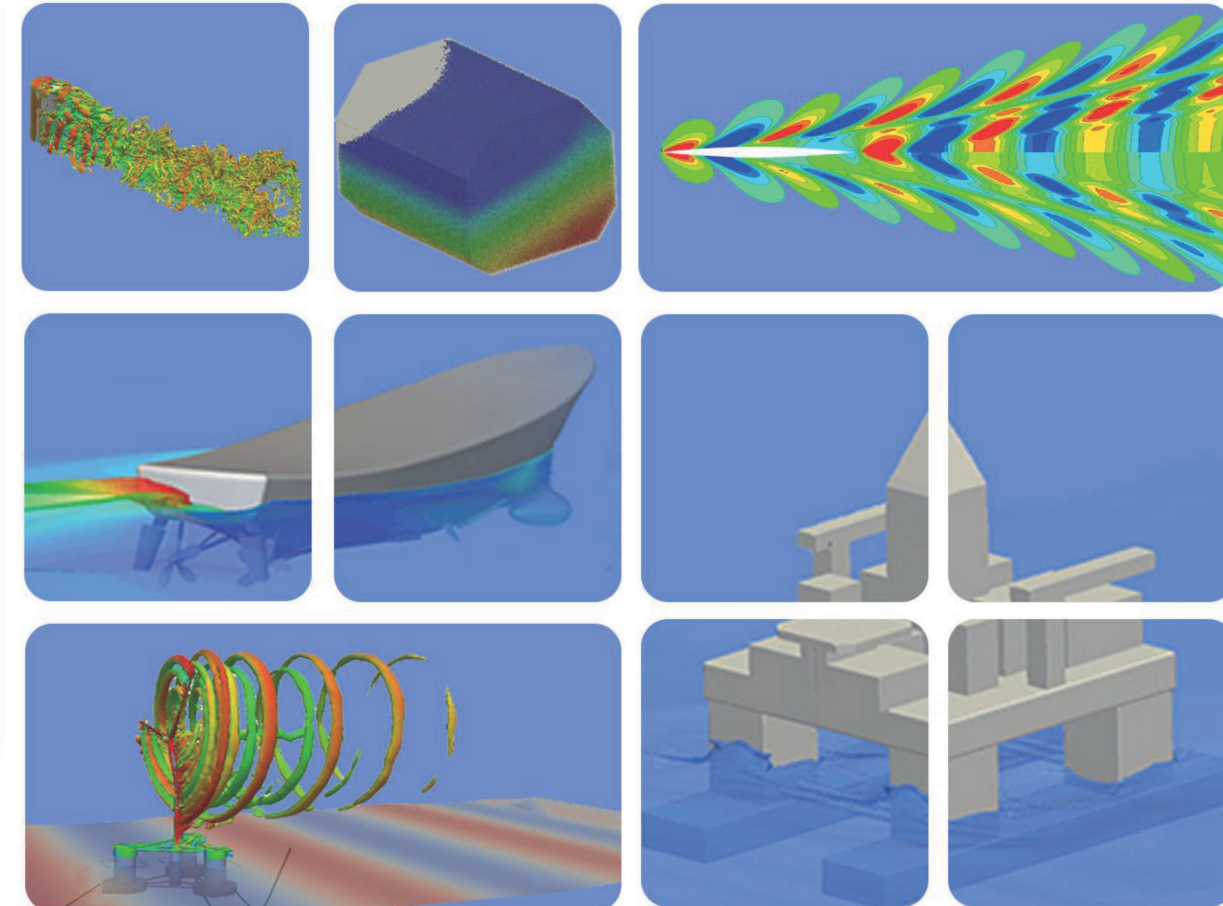


上海交通大学
船舶海洋与建筑工程学院
海洋工程国家重点实验室
高新船舶与深海开发装备协同创新中心

船舶与海洋工程水动力学 综合仿真软件系统



CMHL COMPUTATIONAL MARINE HYDRODYNAMICS LAB
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

联系方式

上海市闵行区东川路800号木兰船建大楼
邮编：200240
电话：021-34207971
传真：021-34207991
Email: dcwan@sjtu.edu.cn
网址：http://dcwan.sjtu.edu.cn



CMHL COMPUTATIONAL MARINE HYDRODYNAMICS LAB
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



上海交通大学
船舶与海洋工程计算水动力学研究中心
<http://dcwan.sjtu.edu.cn>

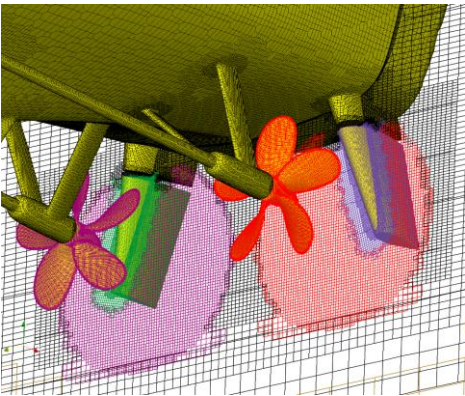
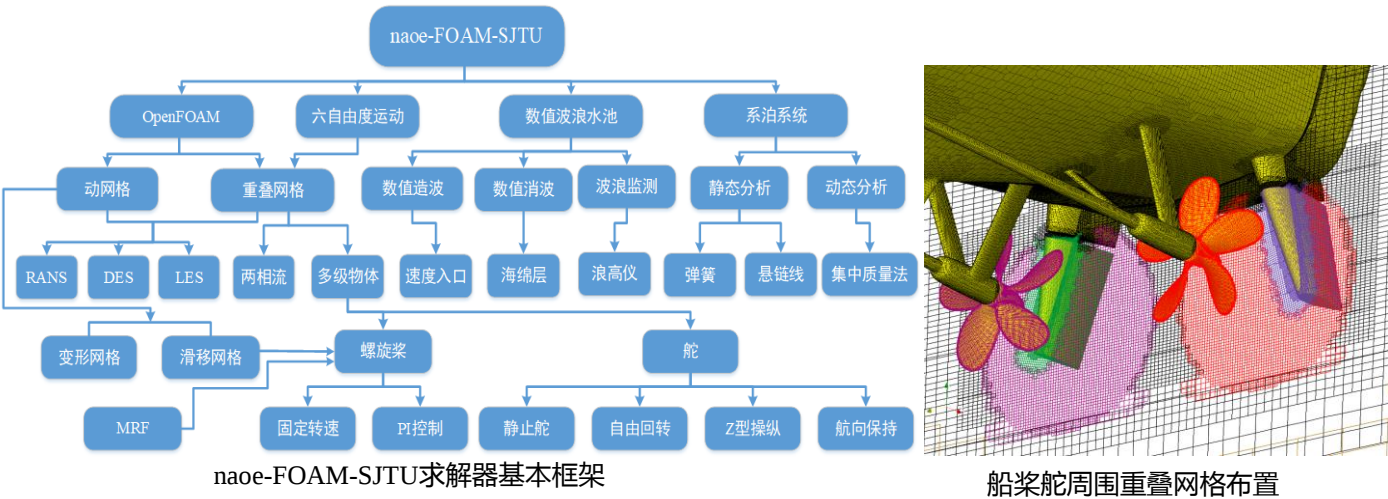
船舶与海洋工程水动力学综合仿真软件系统

上海交通大学船舶与海洋工程计算水动力学研究中心(CMHL)针对船舶与海洋结构物智能优化设计需求，自主研发了船舶与海洋工程水动力综合仿真软件系统，主要求解器软件有：船舶与海洋工程水动力学求解器naoe-FOAM-SJTU，船型优化求解器OPTShip-SJTU，海上浮式风机求解器FOWT-UALM-SJTU，深海立管涡激振动求解器viv-FOAM-SJTU，深海浮式平台涡激运动求解器vim-FOAM-SJTU，船舶与海洋工程无网格粒子法求解器MLParticle-SJTU，船舶流固耦合粒子法-有限元求解器MPSFEM-SJTU等。

船舶与海洋工程水动力学综合仿真软件系统集开源代码与专业开发优势，能够在单机或高性能并行集群上运行，可应用于复杂海况下的船舶阻力、推进、耐波、操纵等性能的全流场数值预报，多目标综合性能船型优化，深海立管涡激振动，深海浮式平台涡激运动，浮式风机气动-水动-锚链系统全耦合，上浪砰击、气隙、溃坝破波、液舱晃荡、流固耦合等复杂问题的数值模拟，可在计算机虚拟环境中实现船舶与海洋结构物流体动力综合性能的数值试验，为船舶与海洋结构物的优化设计与开发提供可靠和高效的综合软件系统。

船舶与海洋工程水动力学求解器 (naoe-FOAM-SJTU)

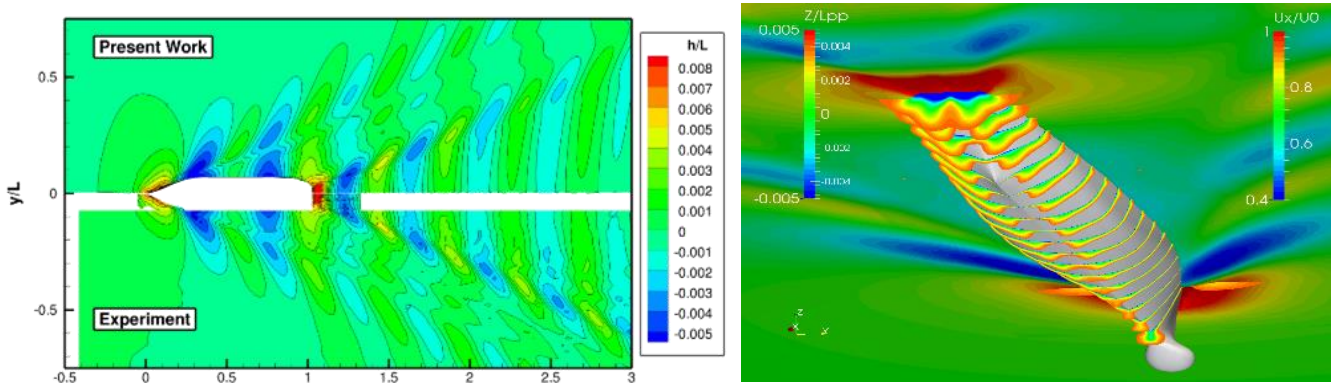
上海交通大学CMHL研究中心在开源代码OpenFOAM平台上自主开发了船舶与海洋结构物六自由度运动模块、数值波浪水池模块、浮式结构物系泊系统模块，形成了面向船舶与海洋工程水动力学问题的CFD求解器软件naoe-FOAM-SJTU，并首次在OpenFOAM平台上引入重叠网格技术，实现了物体大幅度运动以及船桨舵复杂耦合运动的数值模拟。



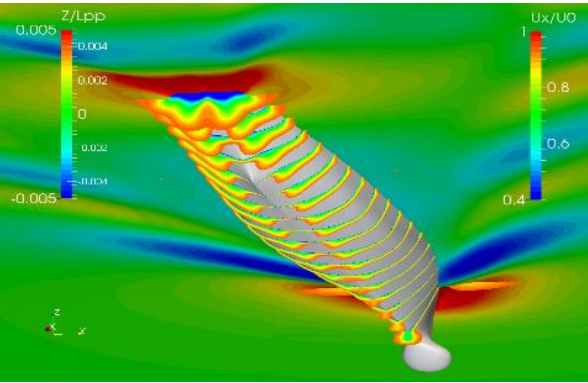
船舶舵周围重叠网格布置

船舶静水阻力

求解器可以实现船舶静水阻力的精确数值预报，误差在3%以内。得到的船舶自由面兴波、船体周围边界层分布和尾部伴流场等详细流场信息与试验结果一致。



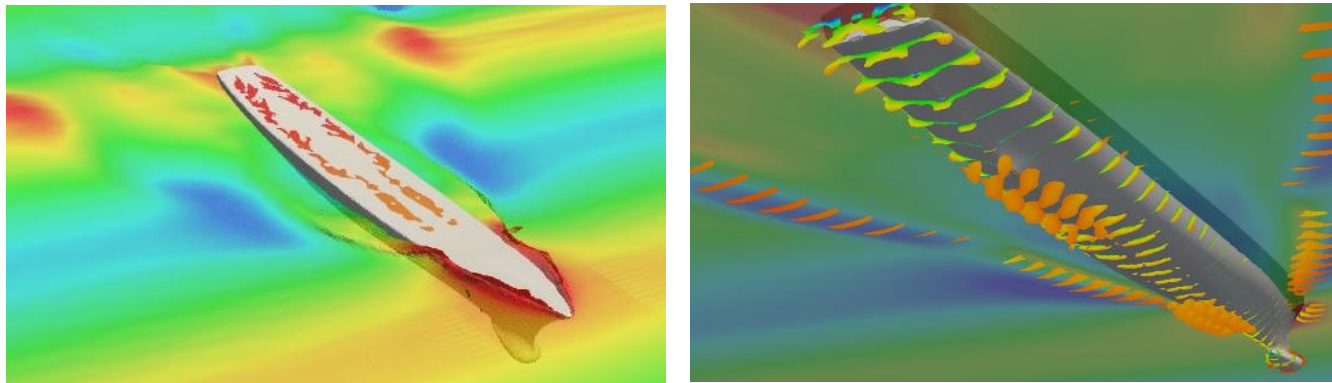
KCS船舶阻力与兴波预报



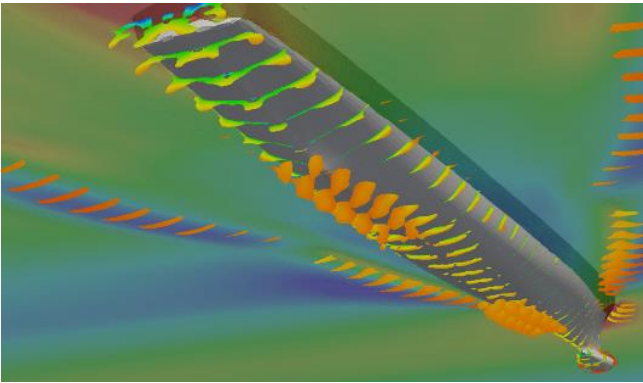
船体周围边界层分布

船舶耐波性预报

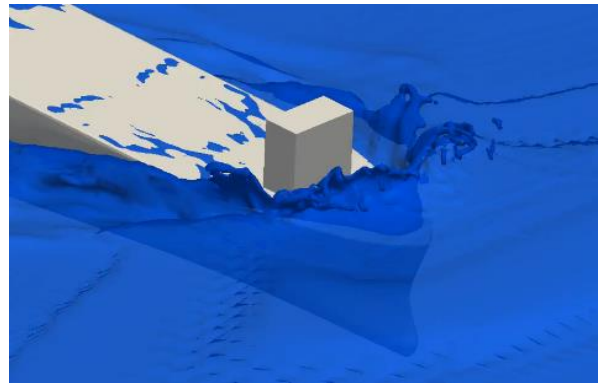
求解器结合六自由度运动模块以及数值波浪水池模块，可以实现船舶在波浪中的运动数值模拟，预报船舶运动响应、甲板上浪、砰击。对船舶运动及波浪增阻的数值预报，误差在5%以内。



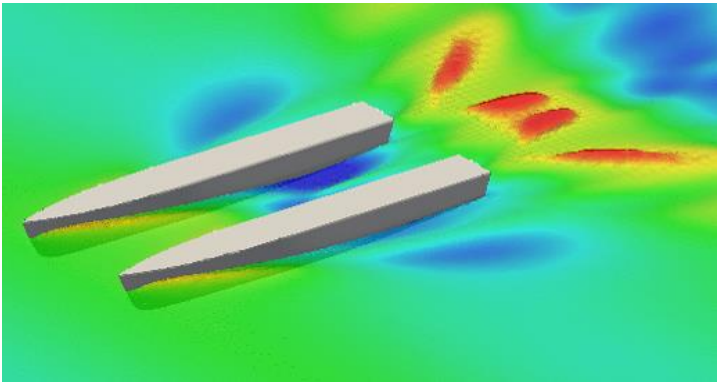
DTMB5415船模耐波性与波浪增阻预报



DTMB5415船模船体周围涡量场分布

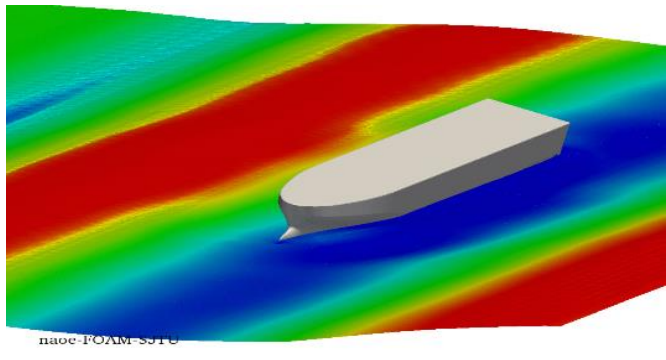


船舶甲板上浪数值预报

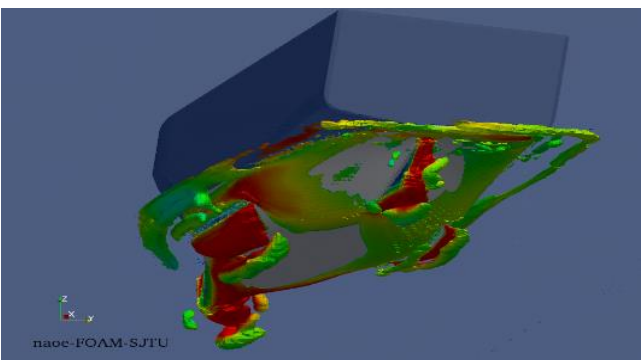


双体船波浪增阻数值预报

求解器可实现船舶强迫横摇运动及船舶在波浪中的横摇响应等问题的数值模拟。对横摇阻尼及运动响应的数值预报，误差在10%以内。

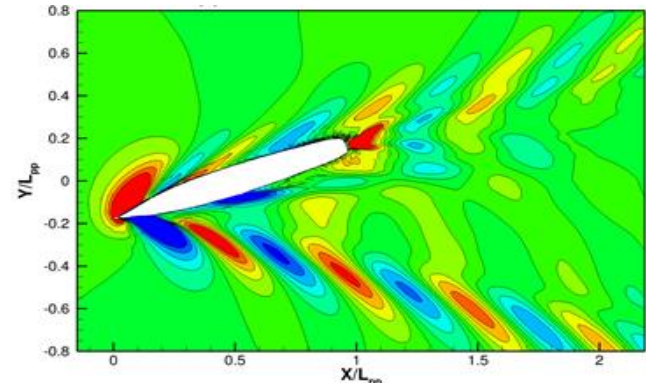


船舶在波浪中的横摇运动

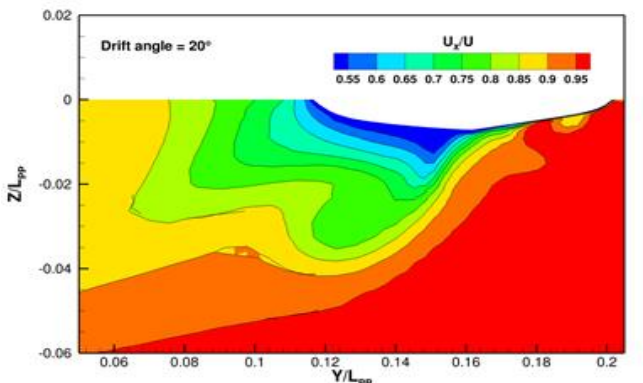


带舦龙骨船舶周围涡量场分布

通过对船舶运动的控制，可以模拟复杂船型的约束模操纵试验，完成船舶斜拖、纯横荡及纯摇艏试验等试验的数值模拟。通过数学模型回归得到水动力导数，误差在10%以内。



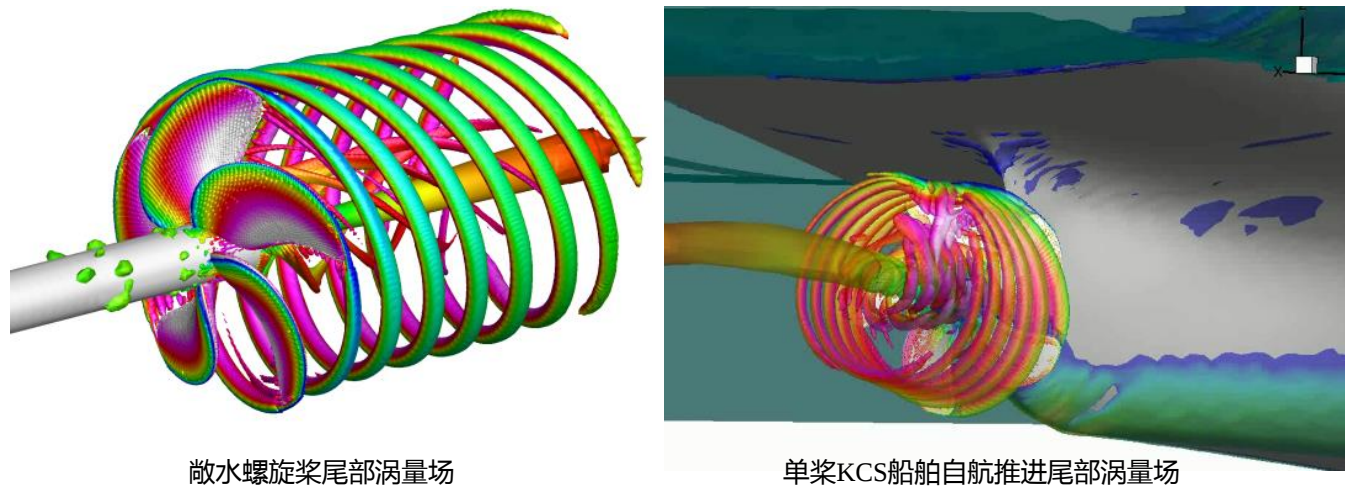
DTMB5415船模20°漂角下自由面兴波



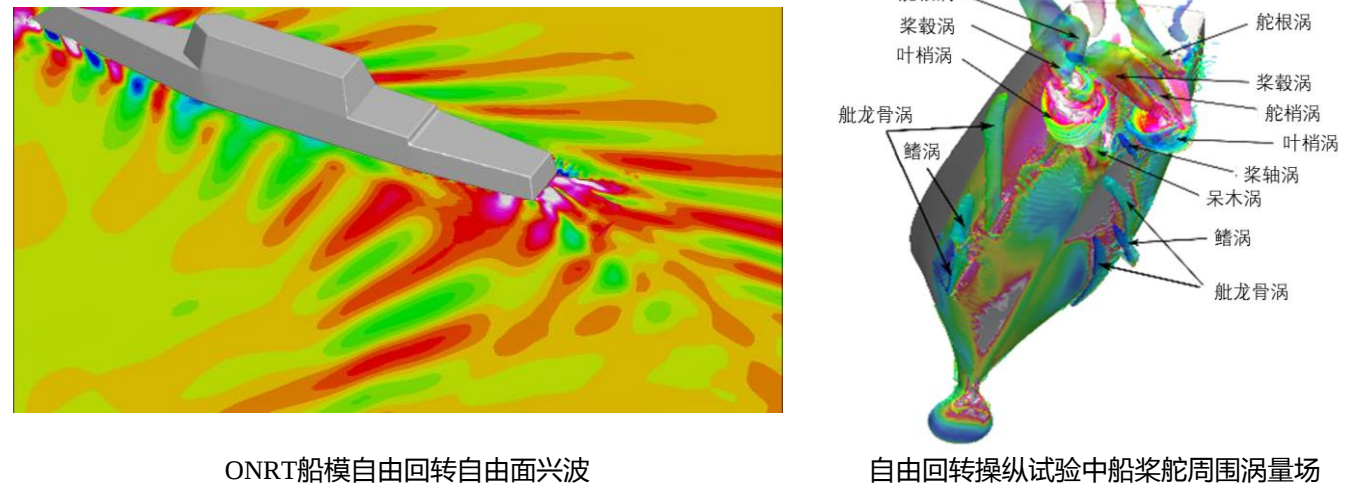
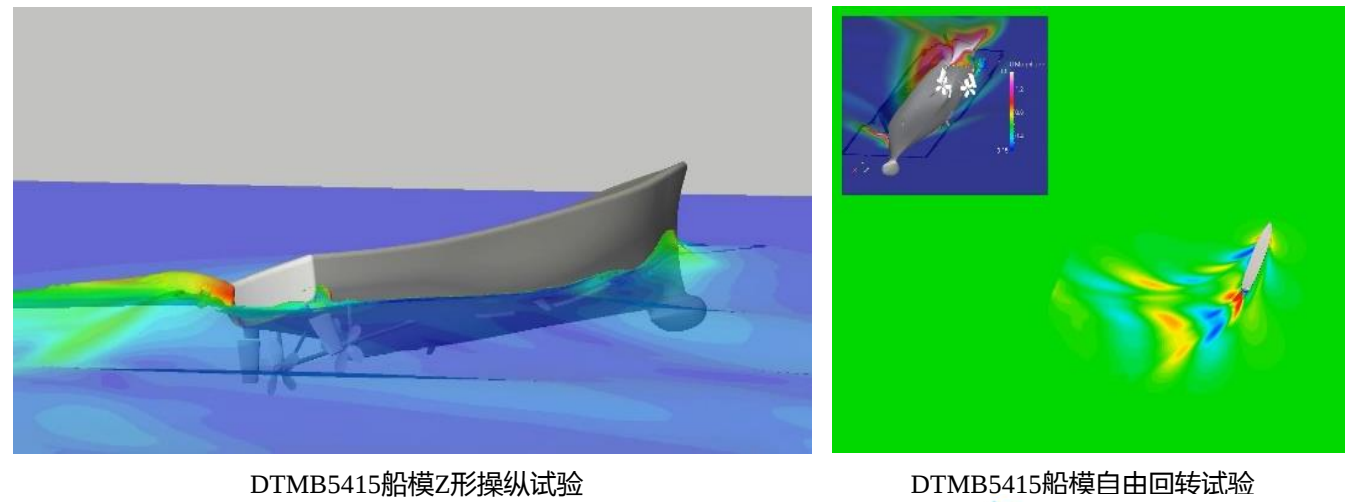
DTMB5415船模20°漂角下尾部伴流

船舶自航推进和操纵

通过引入重叠网格技术，求解器可实现螺旋桨敞水性能的数值预报，误差在3%以内，同时可进行船后螺旋桨的真实模拟。借助PID控制器，可实现船舶自航推进中螺旋桨转速的自动调节，数值预报的船舶自航点误差在4%以内。

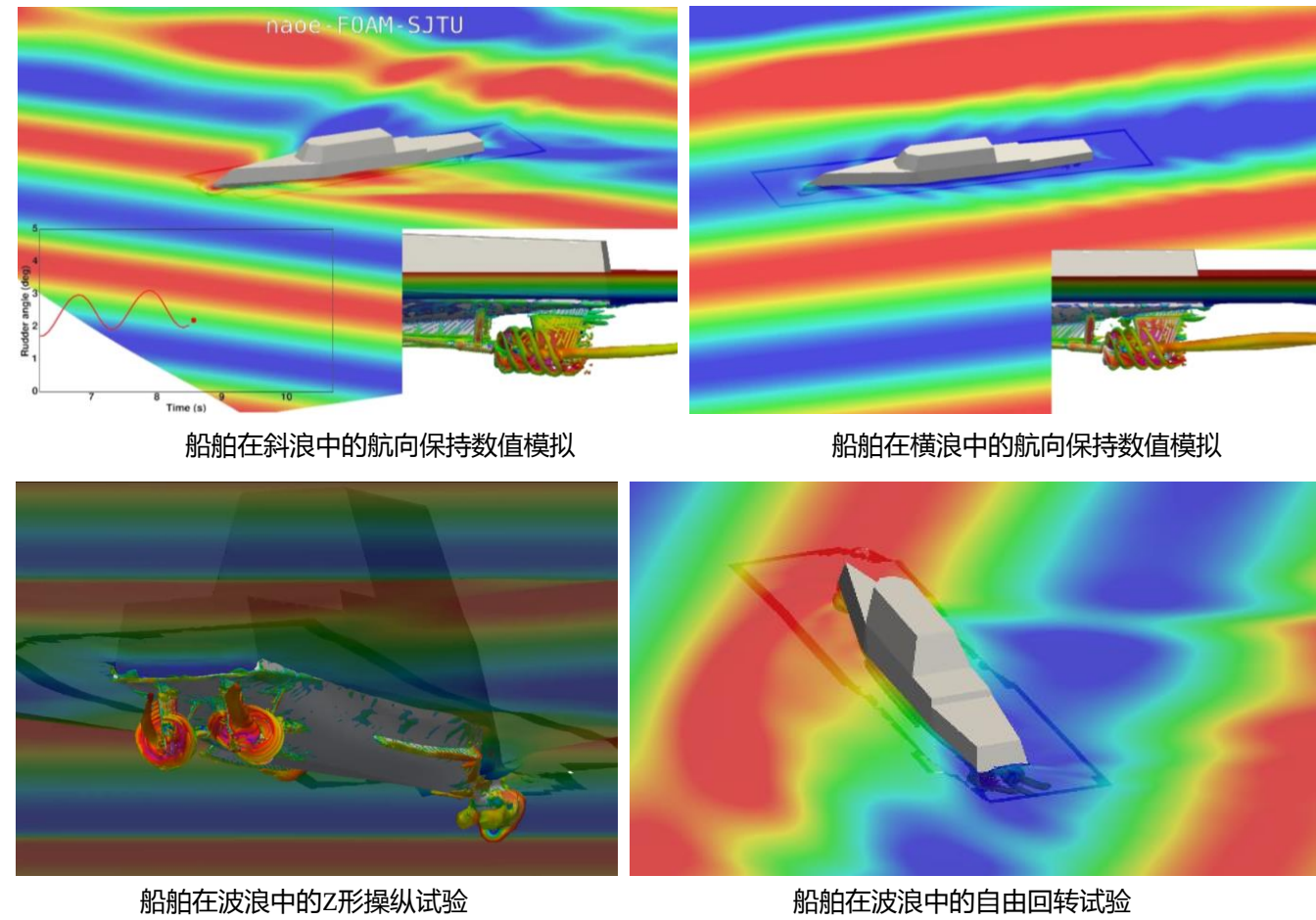


naoe-FOAM-SJTU求解器结合船舶操纵性预报的自航操纵控制模块，可以实现船-桨-舵耦合运动下的Z形操纵、自由回转等典型船舶自航操纵试验的数值模拟。



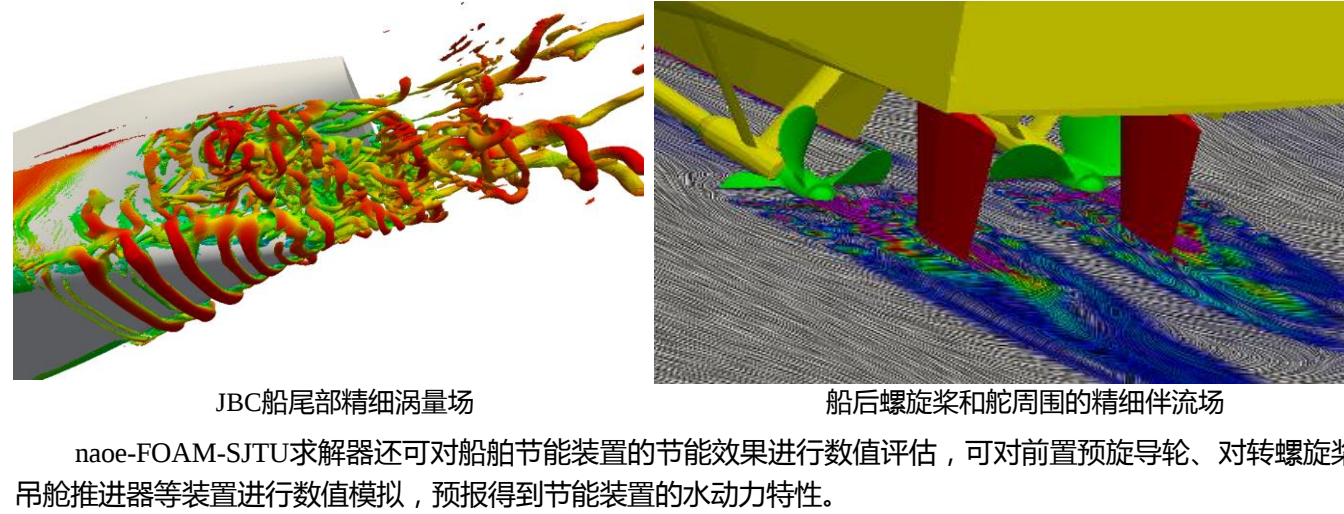
船舶在波浪中的操纵模拟

结合数值波浪水池模块，naoe-FOAM-SJTU求解器还可以实现船舶在复杂波浪工况下的航向保持、Z形操纵以及自由回转等操纵试验的数值模拟。数值预报的船舶操纵性参数同已有的试验结果吻合良好，为船舶在波浪中的操纵性预报提供了有效的研究手段。

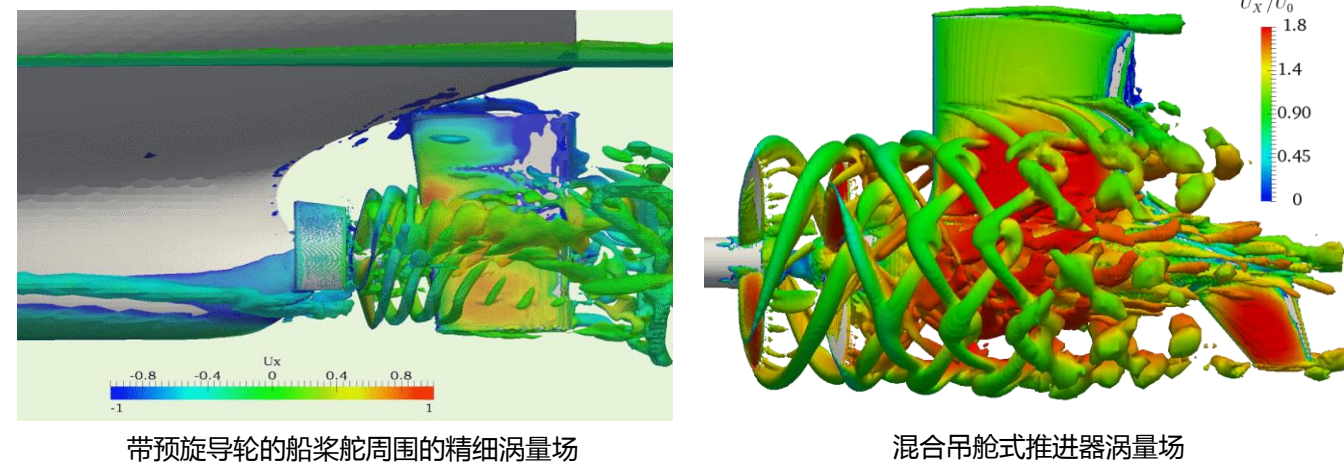


船舶精细流场数值模拟

在大规模并行计算的支持下，求解器可解析高雷诺数流动中的精细流场。

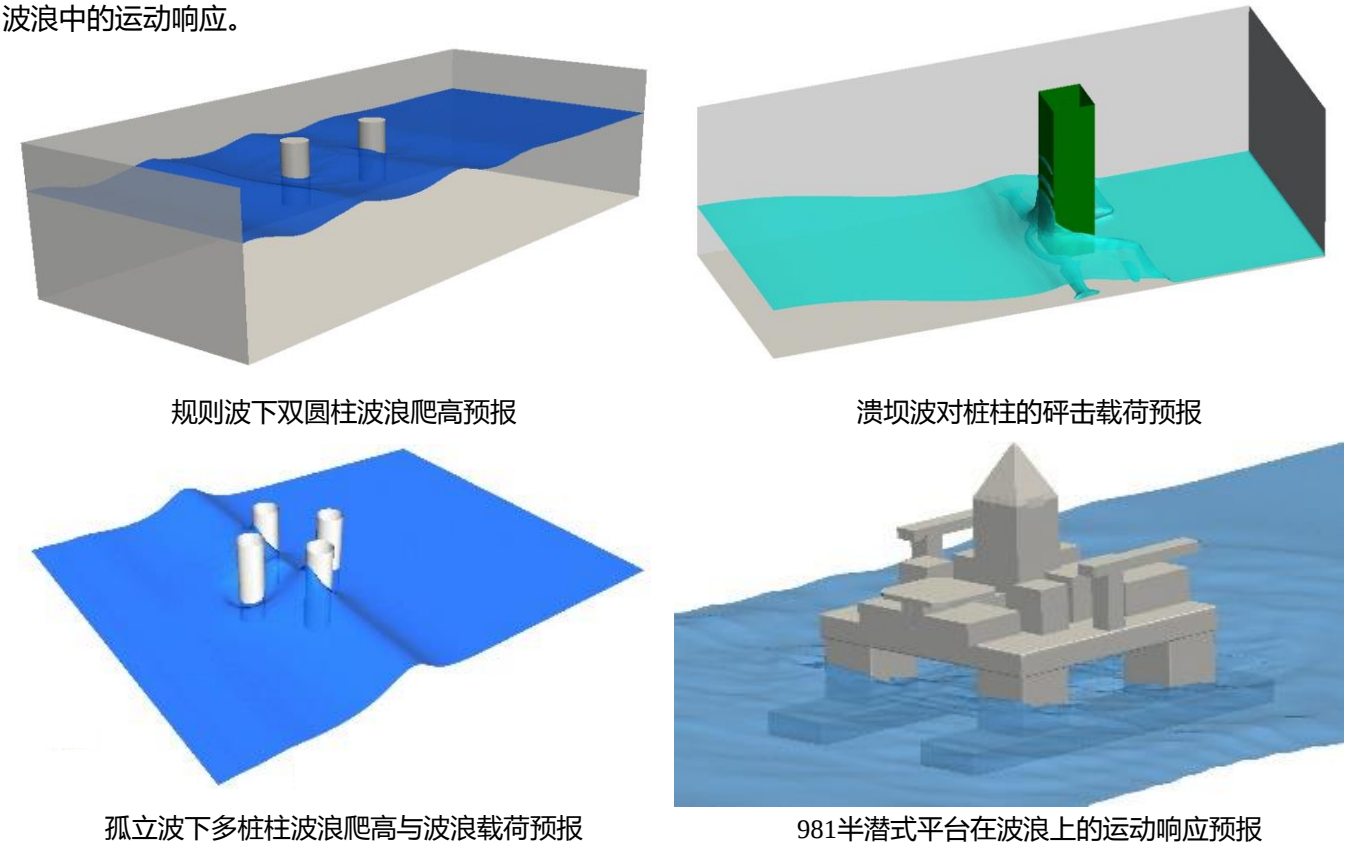


naoe-FOAM-SJTU求解器还可对船舶节能装置的节能效果进行数值评估，可对前置预旋导轮、对转螺旋桨、吊舱推进器等装置进行数值模拟，预报得到节能装置的水动力特性。



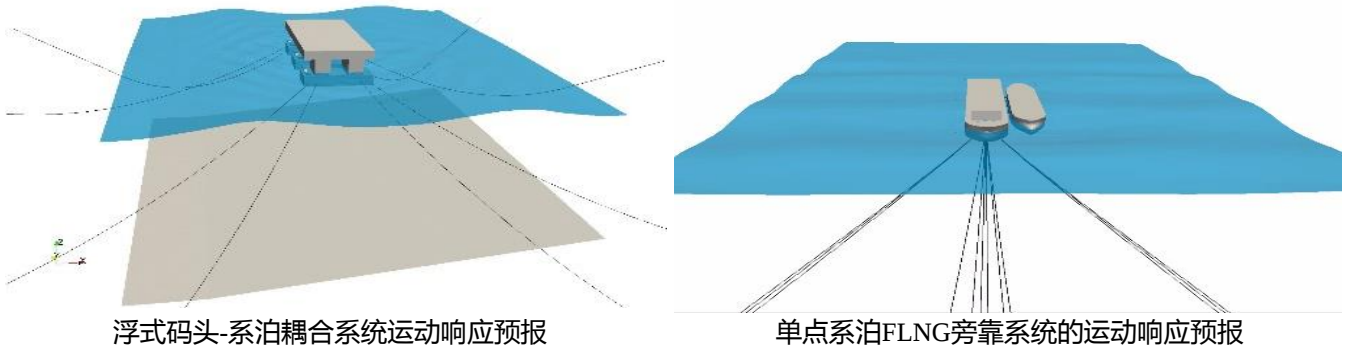
波浪载荷预报

naoe-FOAM-SJTU求解器还可对海洋工程中的热点问题进行分析。结合三维数值水池模块，能够模拟固定式桩柱的波浪爬高、砰击过程，波浪载荷的预报误差在5%以内；结合六自由度运动模块，可模拟浮式平台在波浪中的运动响应。



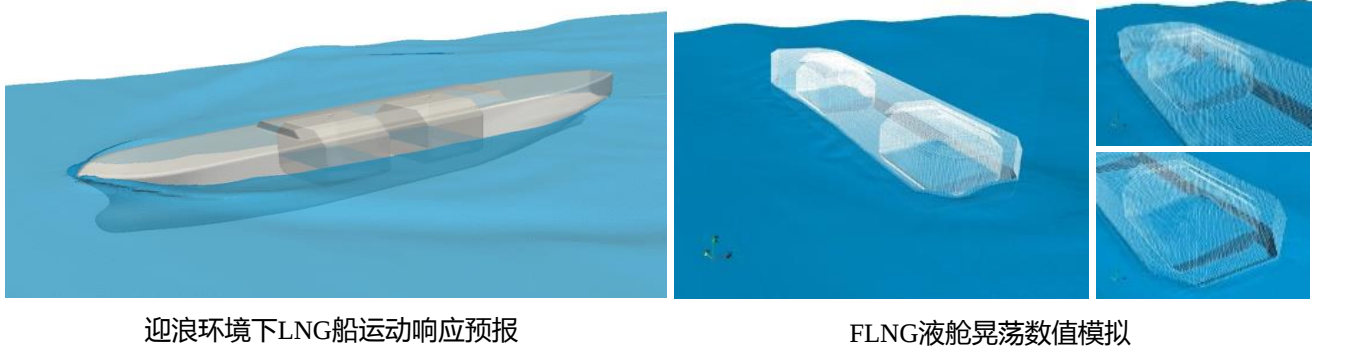
浮式平台-系泊系统运动预报

结合六自由度运动模块和系泊系统模块，求解器可预报981深海钻井平台、浮式码头以及单点系泊FLNG旁靠系统在复杂波浪环境上的运动响应，对作用在结构物上的波浪力进行精确预报。



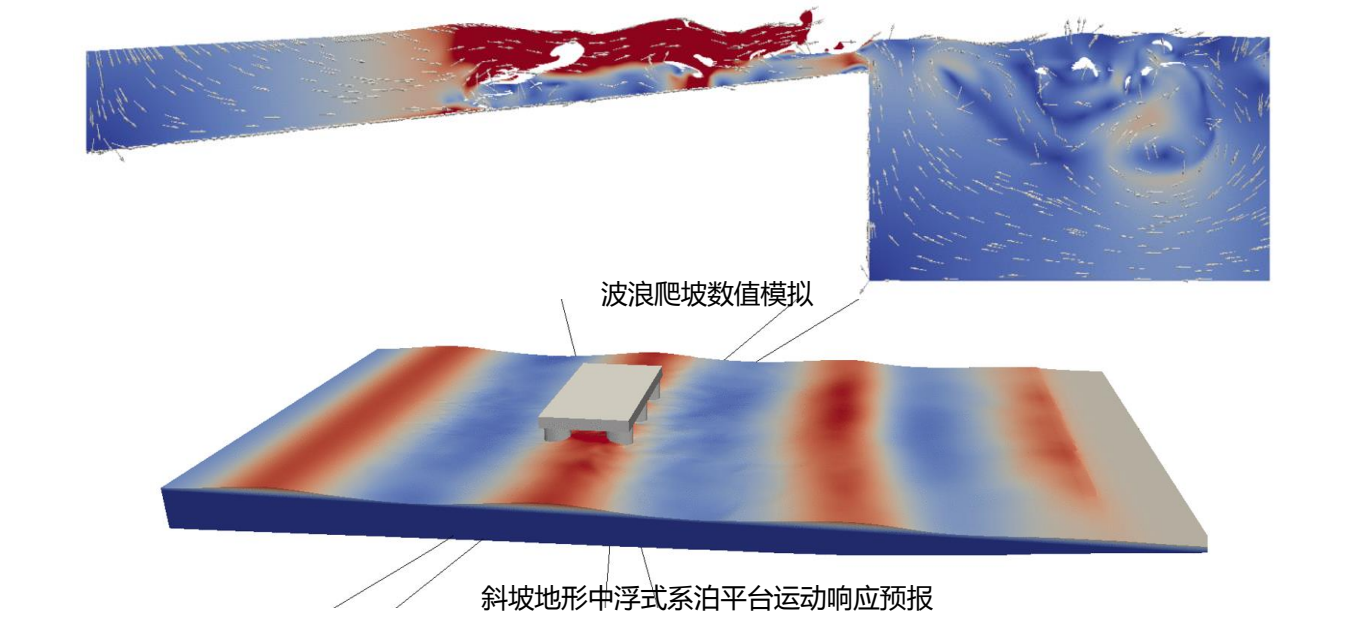
液舱晃荡数值模拟

使用内外流场整体耦合求解方法，求解器可模拟外部波浪与船舱内液体联合作用下FLNG船的运动响应，同时对液舱内外壁压力进行预报，液舱壁面上的砰击压力预报误差在5%以内，并精确展示全流场流动信息。



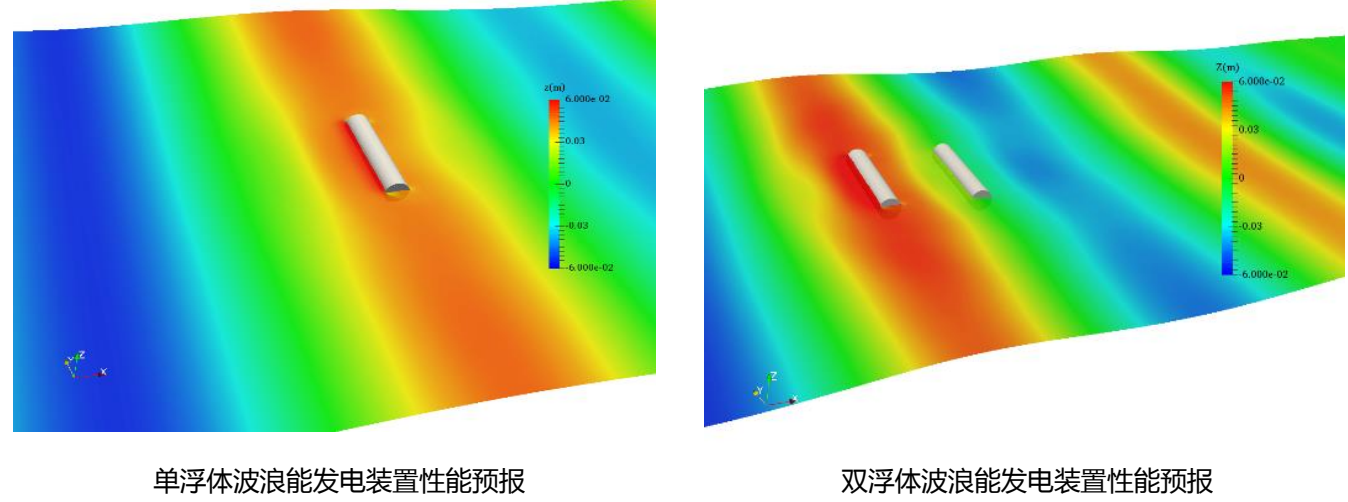
波浪爬坡数值模拟

求解器可以较好地模拟波浪演化现象，包括二维波浪翻卷、三维波浪随地形演化、翻卷现象以及演化后的强非线性波浪对浅水浮式结构物的作用，并捕捉波浪爬高、砰击等现象。



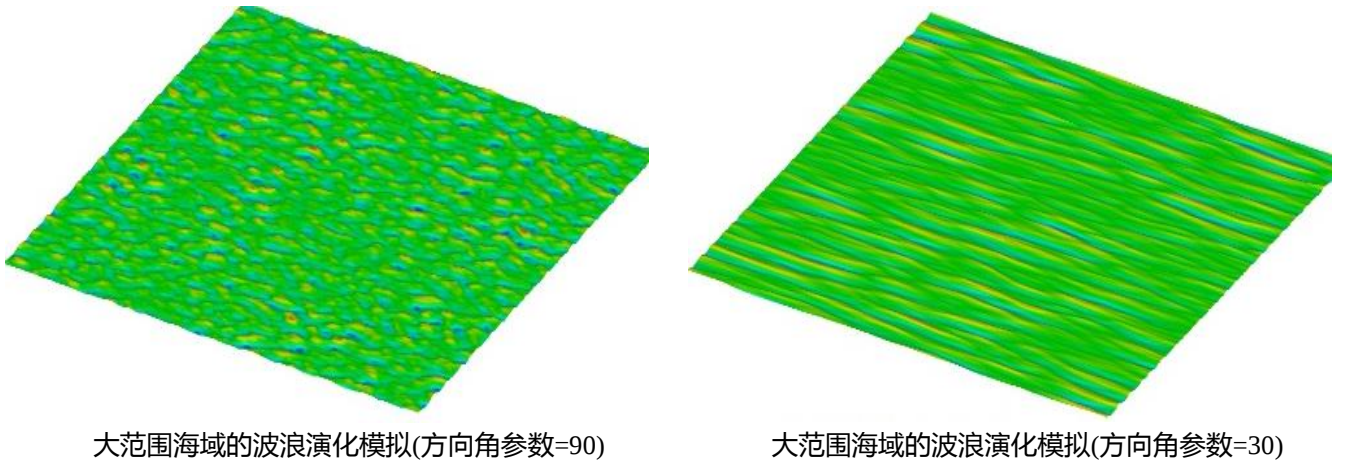
波浪能装置运动预报

naoe-FOAM-SJTU求解器可模拟波浪能发电装置在波浪中的运动过程，预报浮体在波浪中的运动响应、浮体表面动压力分布及浮体周围波浪的衍射等，浮体运动预报误差在3%以内。



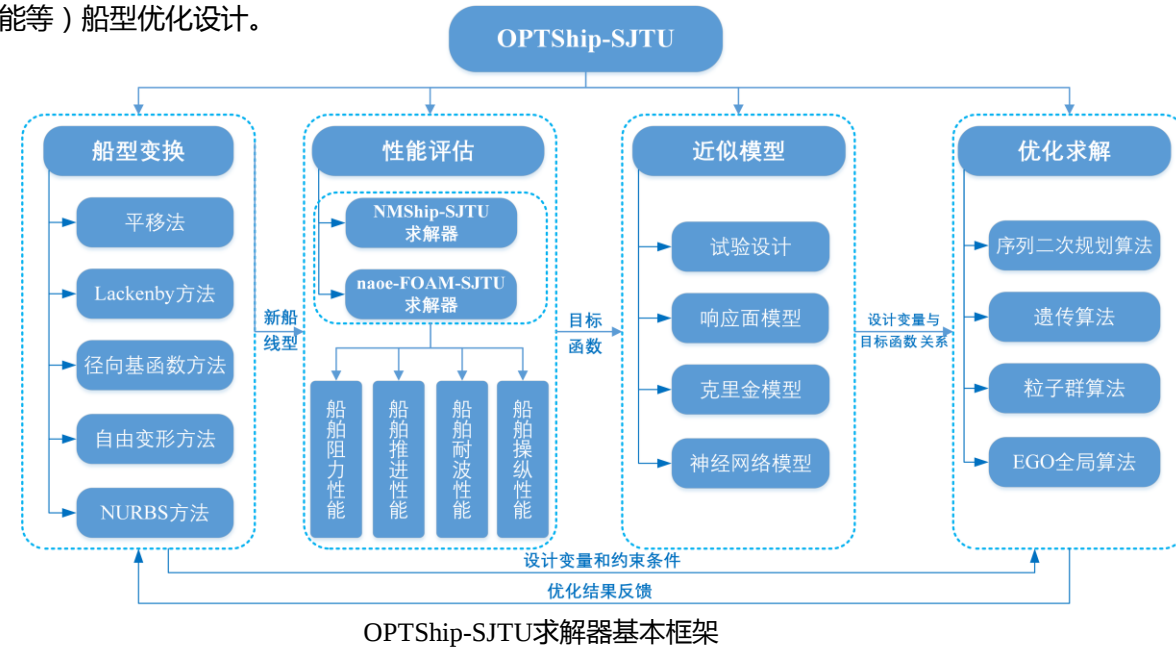
波浪非线性演化

结合基于高阶谱方法的开源程序HOS-ocean，求解器可对大范围海域的波浪长期非线性演化进行模拟。



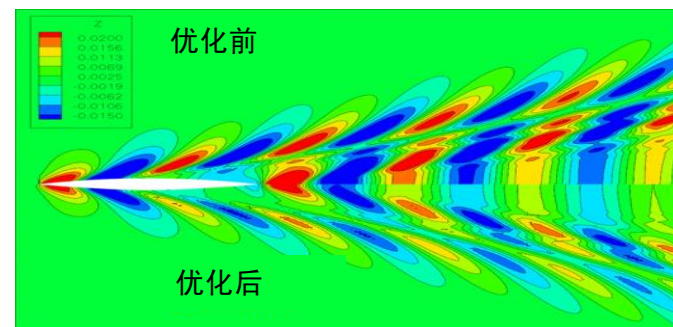
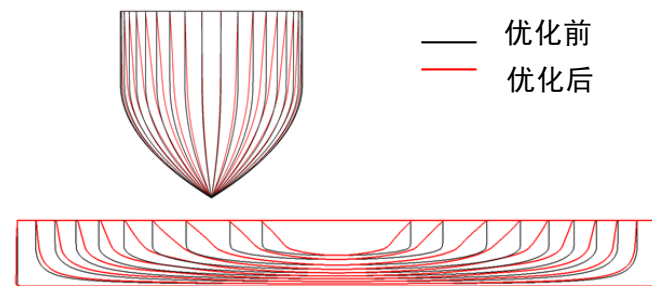
船型优化求解器 (OPTShip-SJTU)

上海交通大学CMHL研究中心自主开发了船型优化设计工具OPTShip-SJTU求解器，并已获得国家软件著作权。该求解器集成了船型变换模块、水动力性能评估模块、近似模型和优化模块，实现了船型的自动优化设计。已成功应用于单目标（单航速下的阻力性能）船型优化设计以及多目标（多航速下的阻力性能、阻力与伴流综合性能等）船型优化设计。



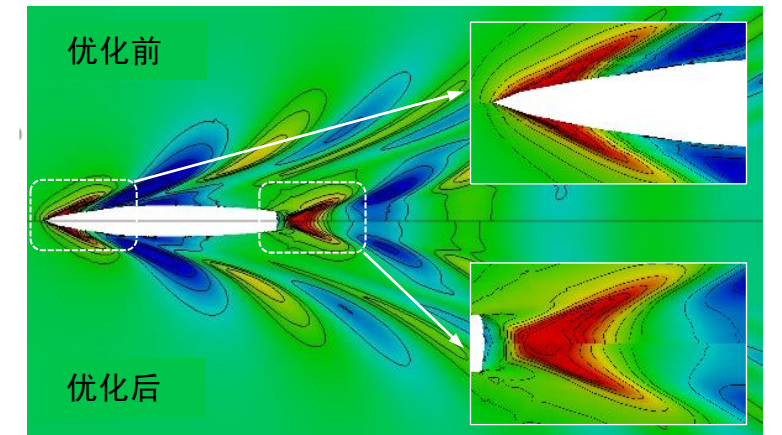
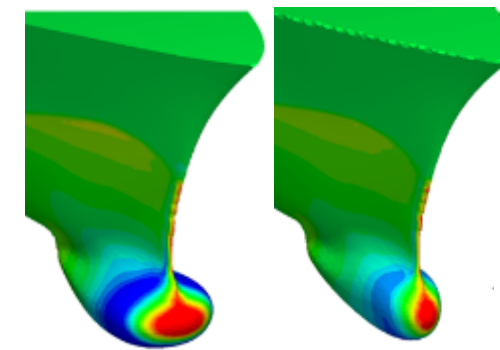
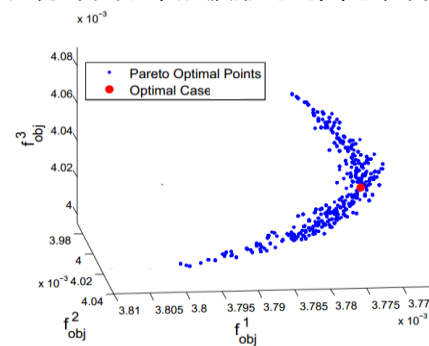
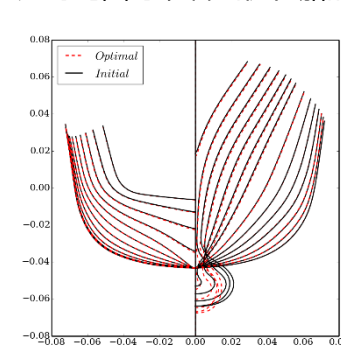
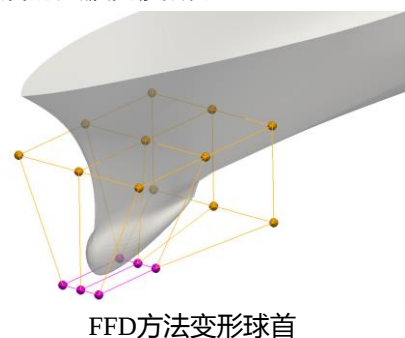
Wigley船兴波阻力单目标优化

求解器可对Wigley船在航速 $Fr=0.3$ 下的兴波阻力进行单目标优化设计。船型变换采用平移法对全船变换和RBF方法对船艏局部变换，兴波阻力采用势流理论计算，优化求解采用单目标遗传算法。最终得到优化船型，兴波阻力系数降低47.1%，通过母型船和优化船型的自由面兴波对比可以看出优化后的船自由面兴波高度显著减小。



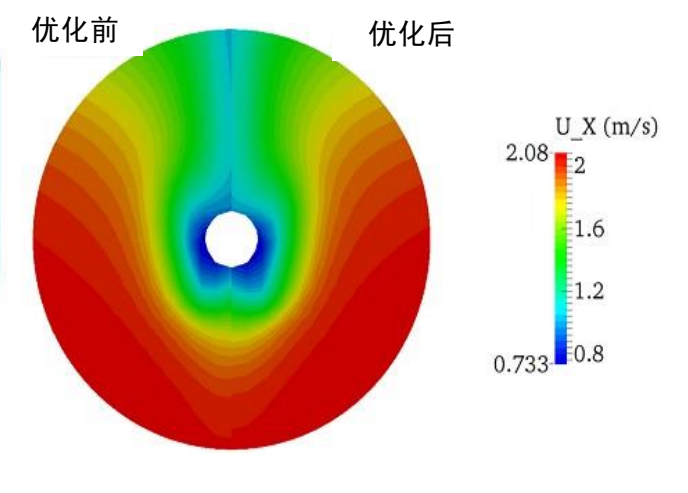
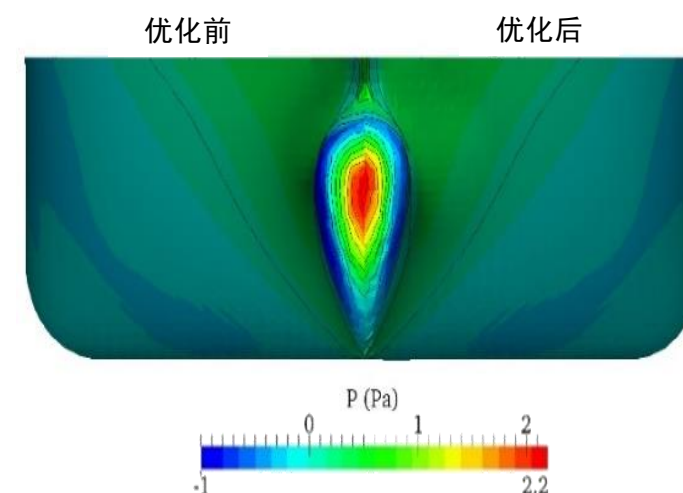
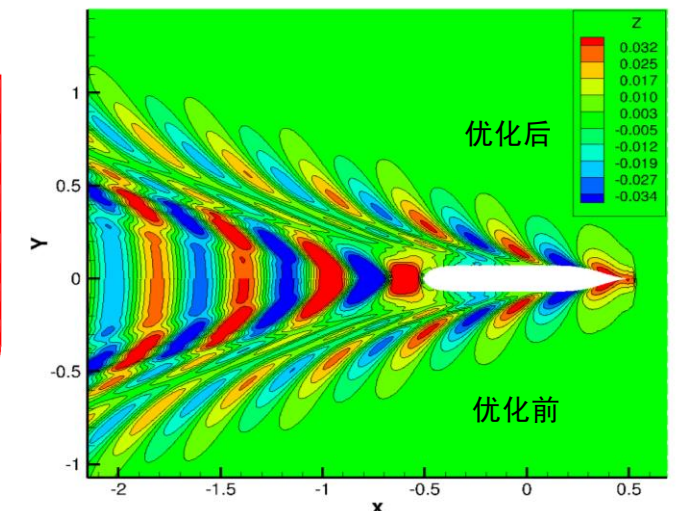
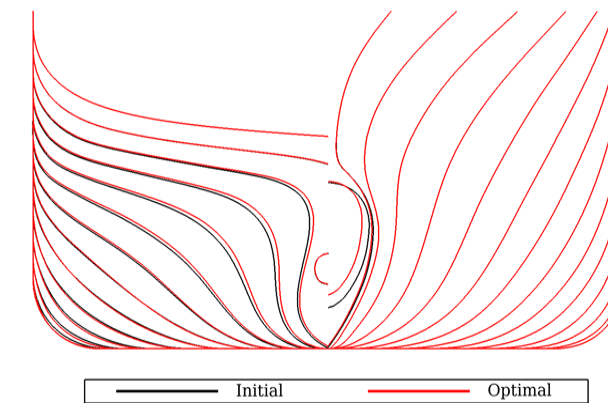
DTMB5415 船总阻力多目标优化

求解器可对DTMB5415船在三个航速下的总阻力进行多目标优化设计，采用FFD方法对船艏局部变换，基于RANS方法求解总阻力，优化求解采用多目标遗传算法。得到系列优化船型，总阻力均降低。选择其中一条优化船型进行详细分析，从船艏压力对比图可以看出优化船的压力分布变小，从波形对比图可以看出优化后的兴波高度减小。



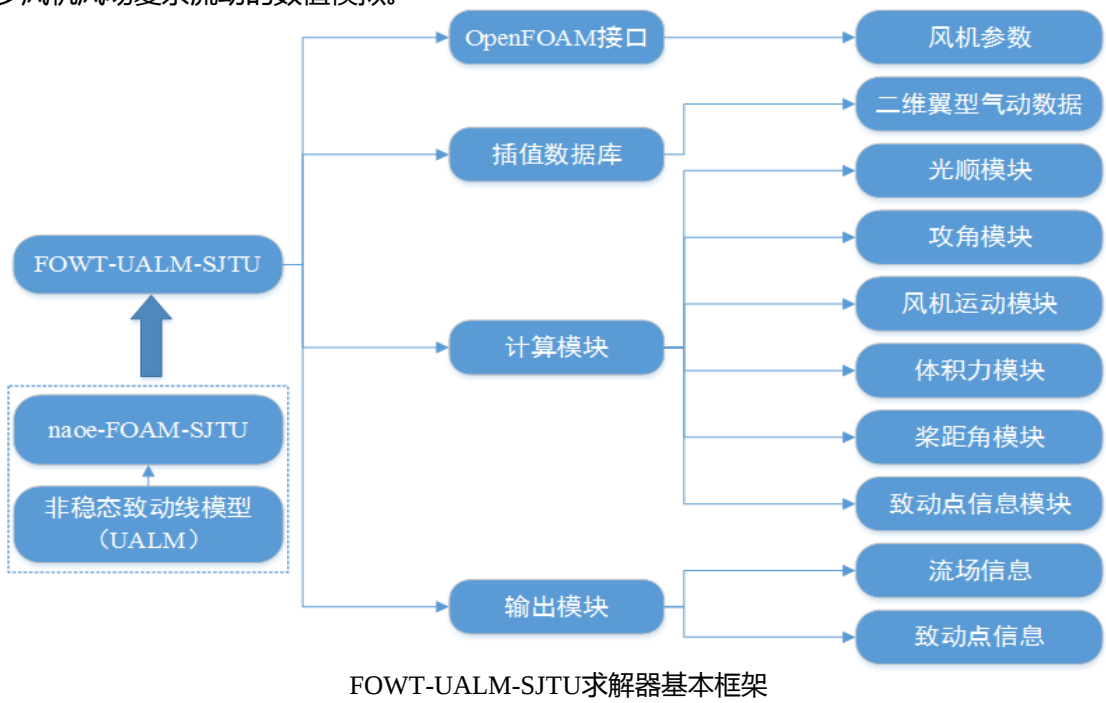
KCS船总阻力和尾部伴流综合优化

求解器可对KCS船在航速 $Fr=0.26$ 下的总阻力和尾部伴流进行多目标综合优化设计。采用FFD方法对船舶艏部进行变换。采用基于RANS的naoe-FOAM-SJTU求解器预报总阻力，优化求解采用多目标遗传算法，最终获得优化船型的阻力性能与伴流性能综合最佳。优化船型总阻力降低3.62%，伴流性能改善2.8%。从母型船和优化船型的自由面兴波对比可以看出优化船的兴波减小，从船艏压力对比可以看出优化船的压力分布变小，从伴流对比图可以看出船艏桨盘面处速度场更均匀，伴流性能更好。



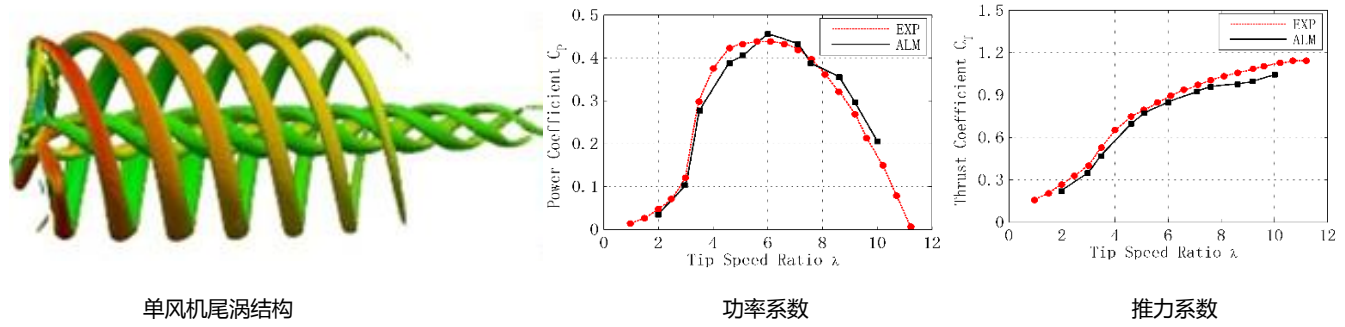
浮式风机气动与水动性能耦合求解器（FOWT-UALM-SJTU）

上海交通大学CMHL研究中心基于非稳态致动线模型（UALM）开发了海上浮式风机气动与水动性能耦合求解器FOWT-UALM-SJTU。该求解器包含OpenFOAM接口、插值数据库、计算模块和输出模块，可实现对风机气动性能 and 平台水动力性能的数值模拟，及海上风机气动与水动耦合动力性能的预报。同时能够实现阵列分布多风机风场复杂流动的数值模拟。

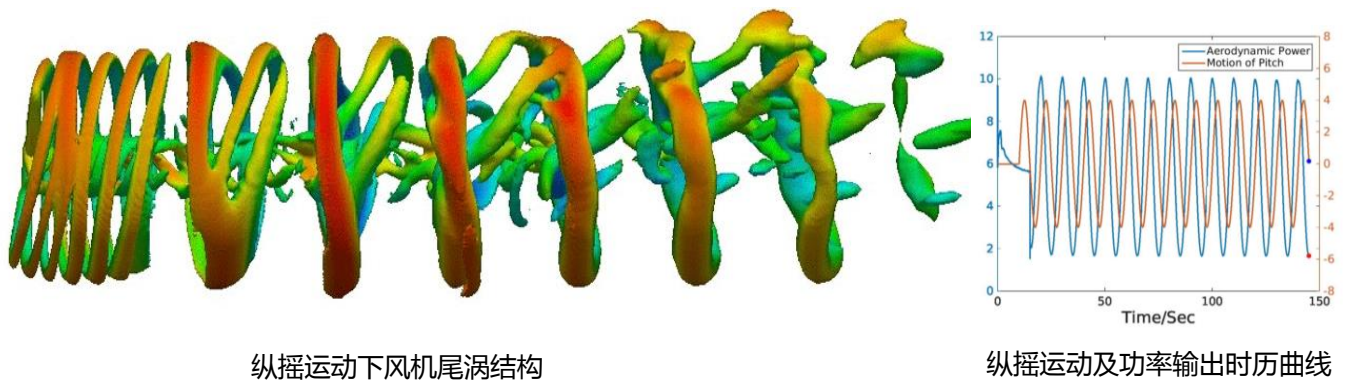


单风机气动性数值模拟

非稳态致动线模型利用带体积力的致动线模拟真实的风机叶片，可有效提高计算效率，并得到比较准确的气动载荷数值模拟结果，对均匀流下固定单风机气动载荷的预报误差在5%以内。此外，可对给定运动风机的非稳态气动性能进行数值模拟。

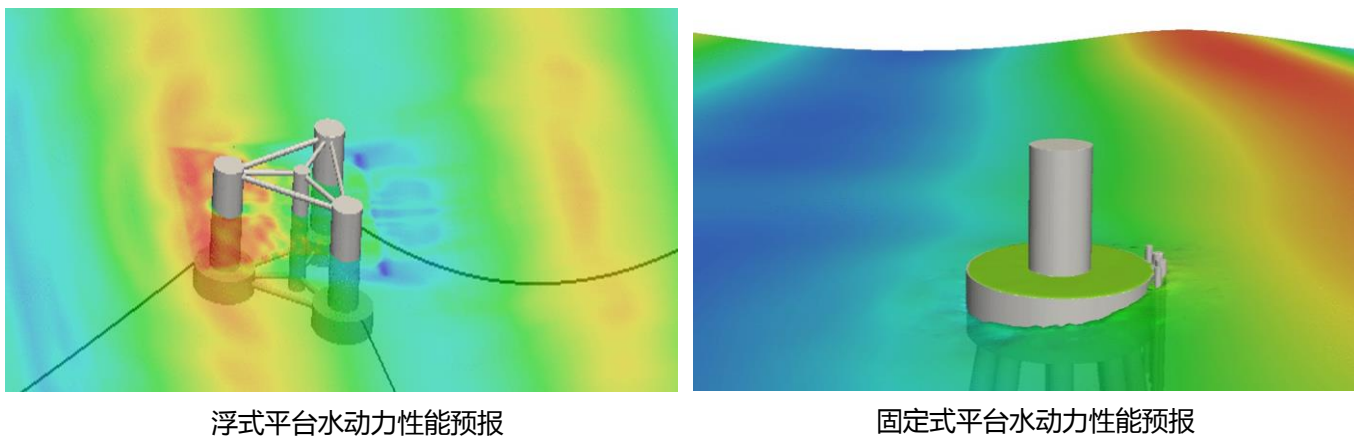


基于标准试验“Blind Test”单风机数值模拟



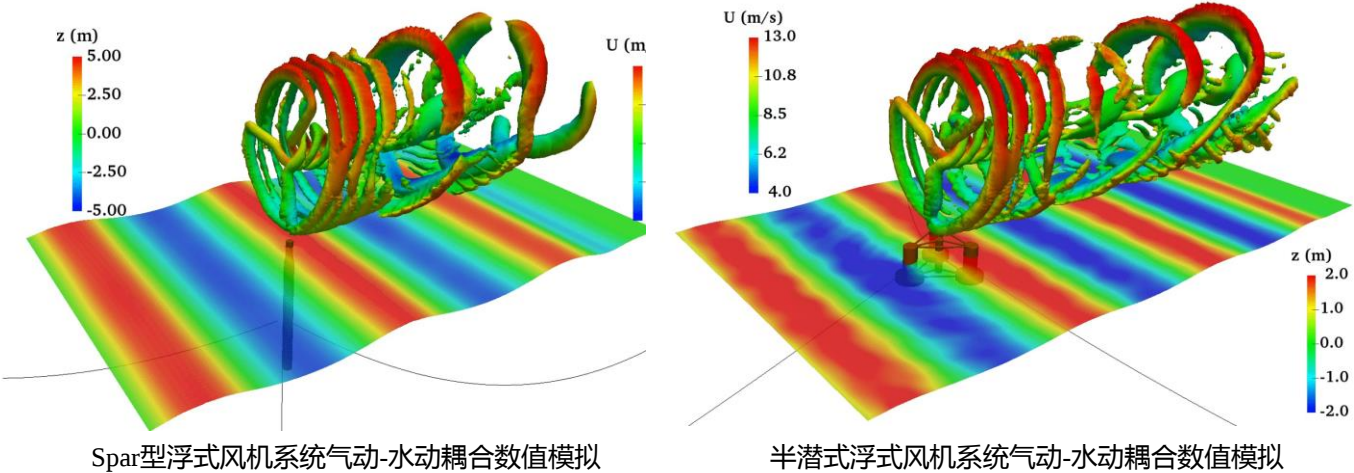
平台水动力性能预报

求解器可对波浪与固定式、浮式风机支撑平台的相互作用过程进行模拟，预报支撑平台所受的水动力载荷和锚泊系统张力特性。



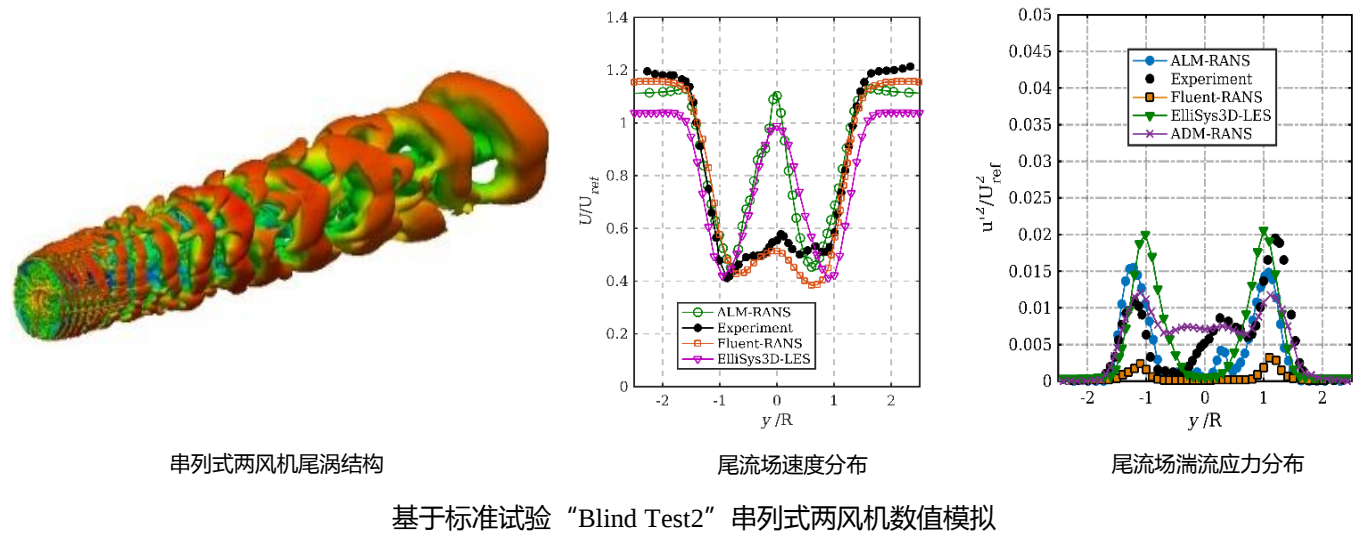
浮式风机气动-水动耦合数值模拟

FOWT-UALM-SJTU求解器实现了浮式风机系统的气动-水动全耦合数值模拟，可对不同形式浮式风机的耦合动力响应进行数值预报。

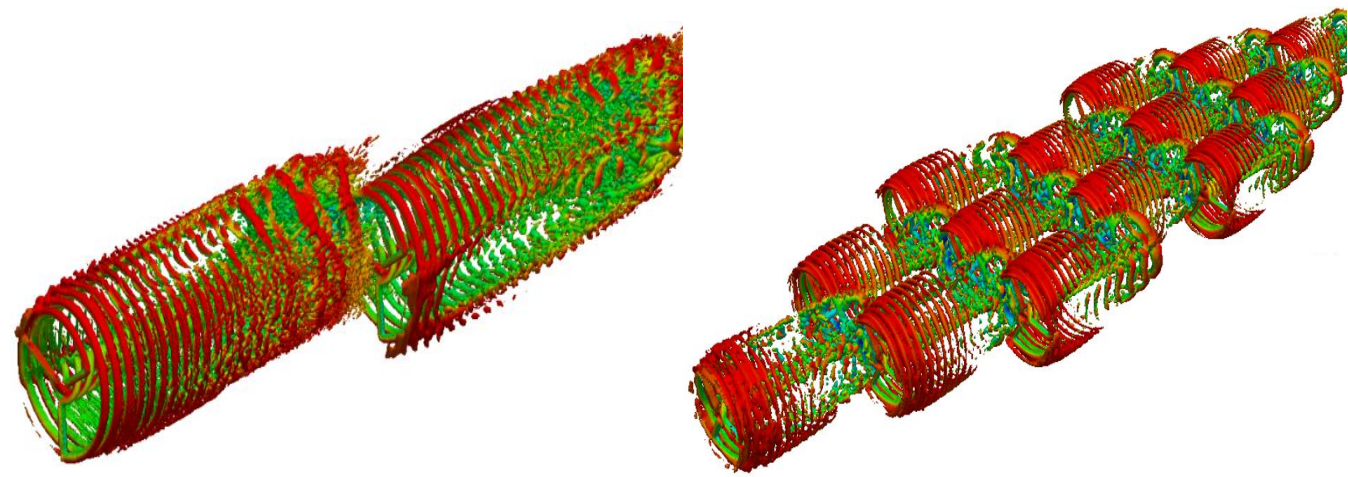


多风机风电场数值模拟

FOWT-UALM-SJTU求解器基于致动线模型，可对不同布置形式多风机风电场进行气动力数值模拟。对串联式两风机进行气动载荷预报，误差在10%以内。



FOWT-UALM-SJTU求解器可对阵列式多风机大型风电场进行数值模拟，得到流场特性，尾涡结构及复杂尾流相互干扰特性。

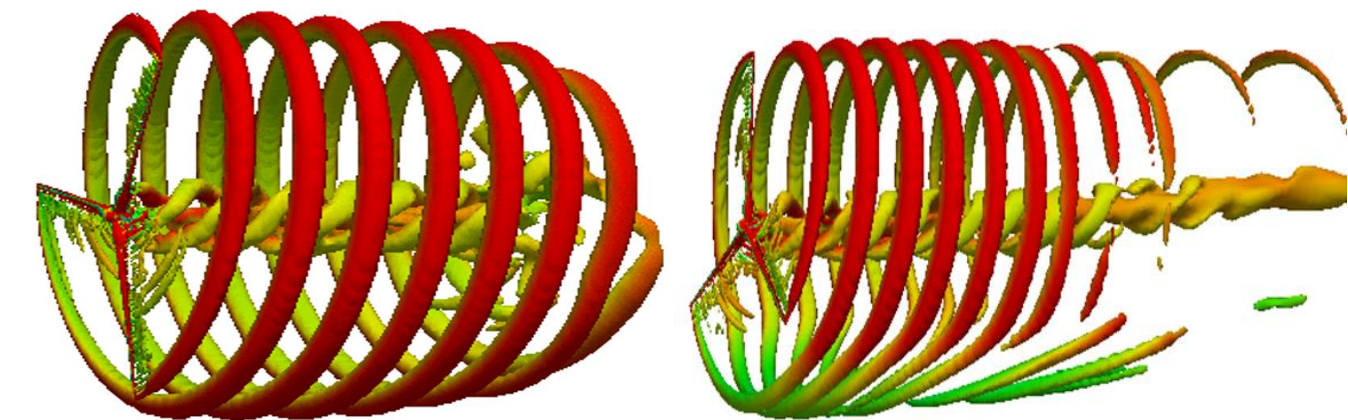


错列式两风机数值模拟

阵列式多风机风场数值模拟

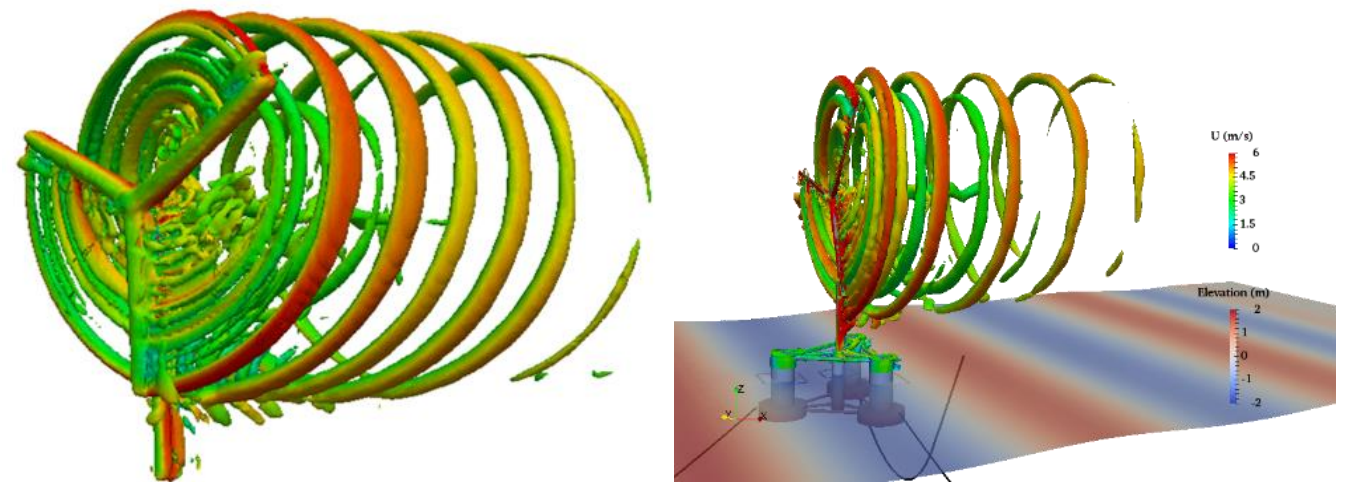
基于重叠网格技术风力机数值模拟

此外，基于重叠网格技术，可对全尺度风机的气动特性进行数值模拟，包括单独风机在均匀风下的气动特性数值模拟、考虑塔影效应的风机气动载荷预报、考虑剪切风作用的风机非稳态气动性数值仿真，并可实现浮式风机系统在风浪联合作用下气动-水动全耦合动力响应数值模拟。



风机气动特性数值模拟

剪切风下风机气动特性数值模拟

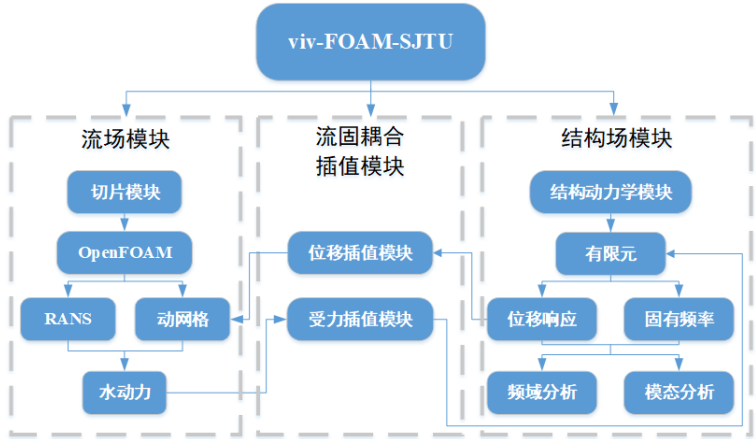


带塔架风机气动特性数值模拟

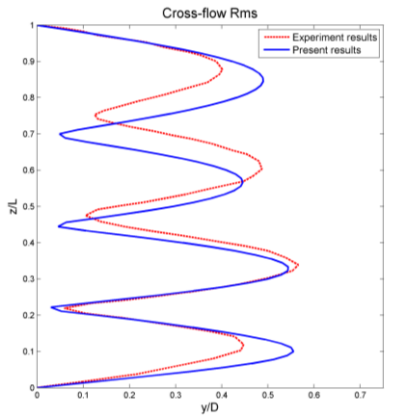
浮式风机系统气动-水动耦合数值模拟

深海立管涡激振动求解器 (viv-FOAM-SJTU)

上海交通大学CMHL研究中心针对深海立管涡激振动问题，在OpenFOAM平台下开发了viv-FOAM-SJTU求解器，采用切片分析方法，运用有限体积法和RANS方程模拟流场，求解立管受力情况及流场特性。求解器采用欧拉-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。viv-FOAM-SJTU求解器可模拟细长柔性立管在均匀流和剪切流等不同流场剖面下单根或多根立管涡激振动，还可模拟平台横荡/纵荡运动和垂荡运动作用下的立管涡激振动。



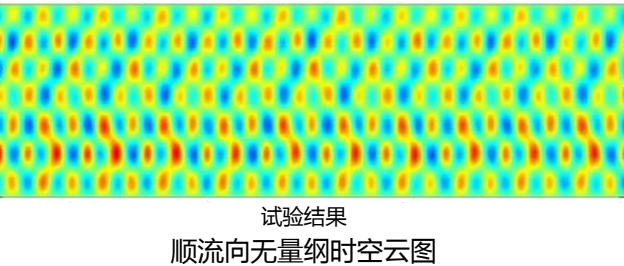
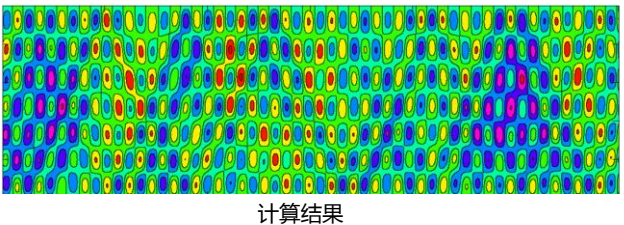
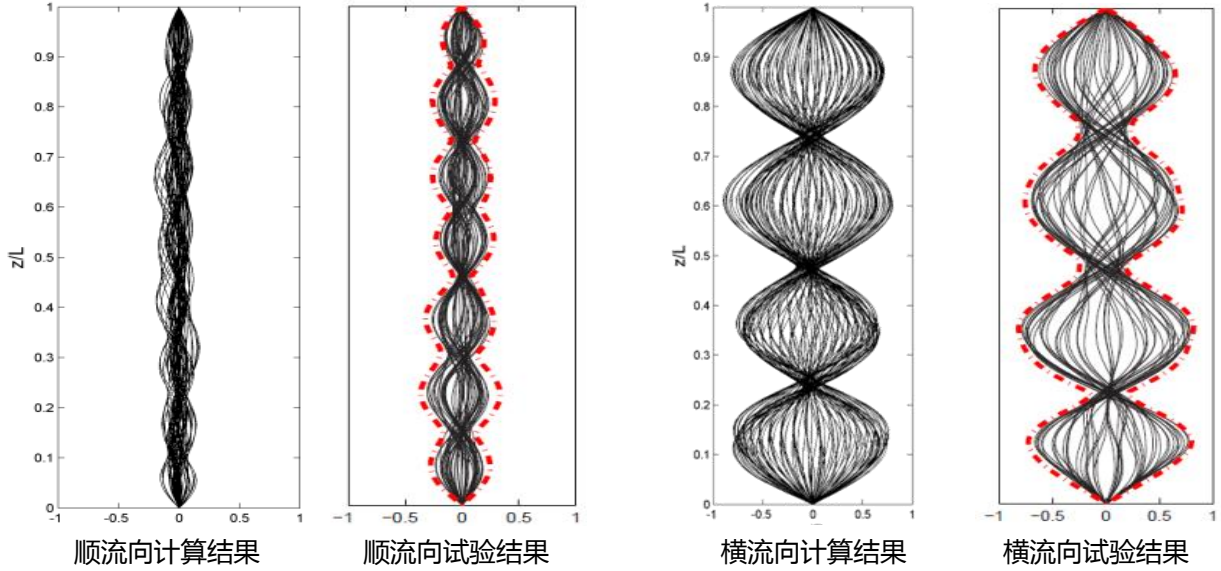
viv-FOAM-SJTU求解器基本框架



横流向位移均方根与试验对比结果

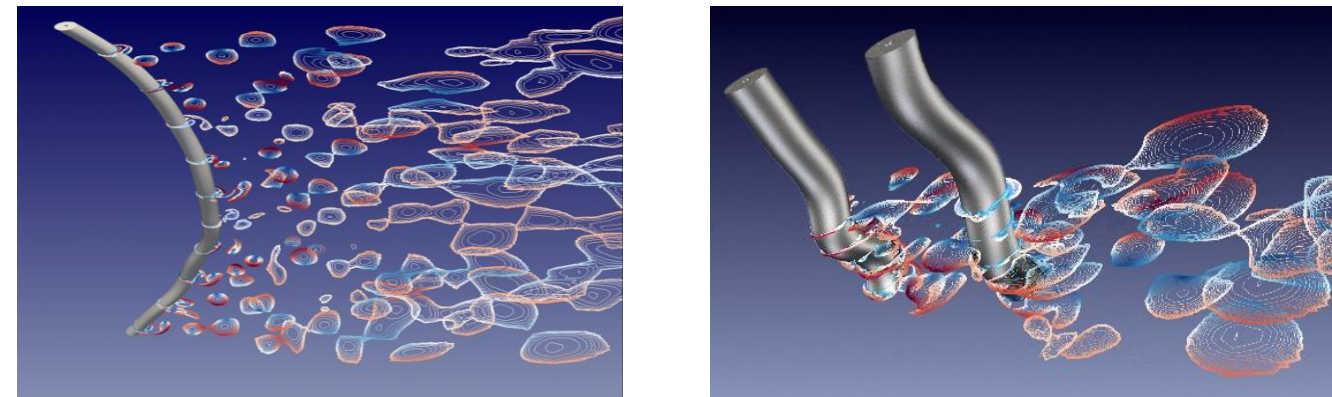
阶梯流中单立管涡激振动问题

viv-FOAM-SJTU求解器可模拟阶梯流下立管涡激振动问题，准确计算立管动力响应，时空云图与试验结果一致，位移包络线与试验吻合良好，顺流向与横流向位移最大误差不超过5%。



均匀流中单立管与双立管涡激振动问题

viv-FOAM-SJTU求解器可进行均匀流下单立管与双立管的涡激振动数值模拟。



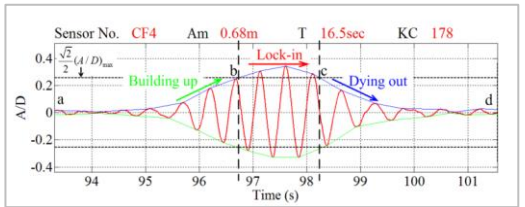
均匀流下单根立管涡激振动 阶梯流下串联双立管涡激振动

振荡流中立管涡激振动问题

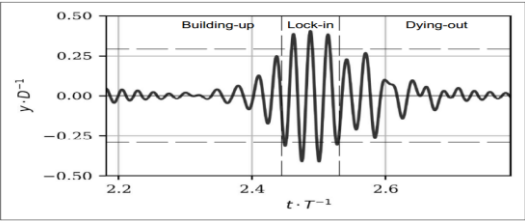
viv-FOAM-SJTU求解器可模拟振荡流下立管涡激振动。准确再现出振荡流中立管涡激振动“产生-锁定-消亡”的振动过程，锁定区间与试验结果吻合良好。



振荡流下立管涡激振动



模型试验

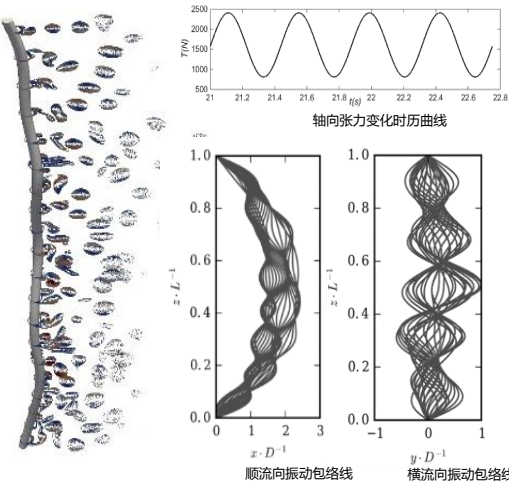


数值模拟

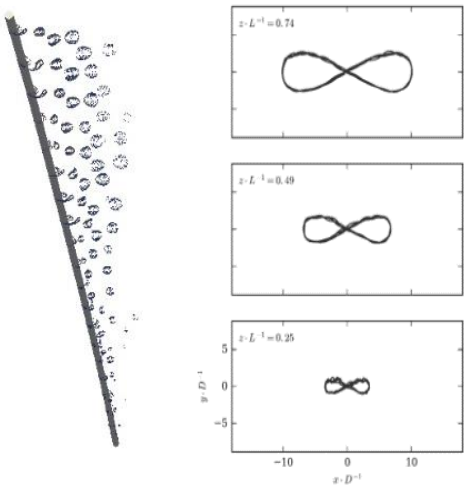
横流向振动历时曲线

平台运动影响下立管涡激振动问题

viv-FOAM-SJTU求解器可以模拟平台运动影响下立管的涡激振动响应特性。其中，平台横荡/纵荡运动通过对立管模型施加支座激励来模拟，平台垂荡运动通过对立管施加随时间变化的轴向张力来模拟。



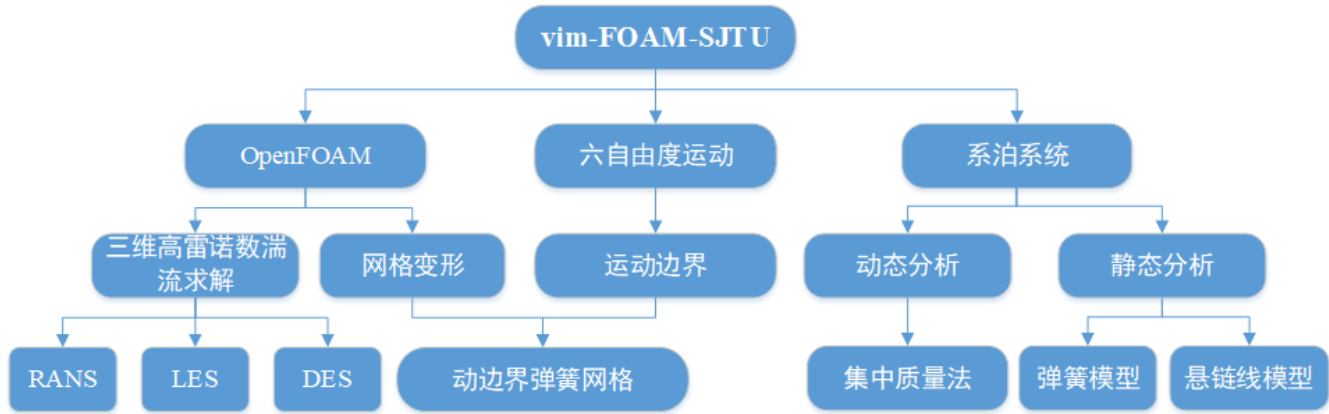
平台垂荡运动下柔性立管涡激振动



平台横荡运动下柔性立管不同位置的轨迹线

深海浮式平台涡激运动求解器 (vim-FOAM-SJTU)

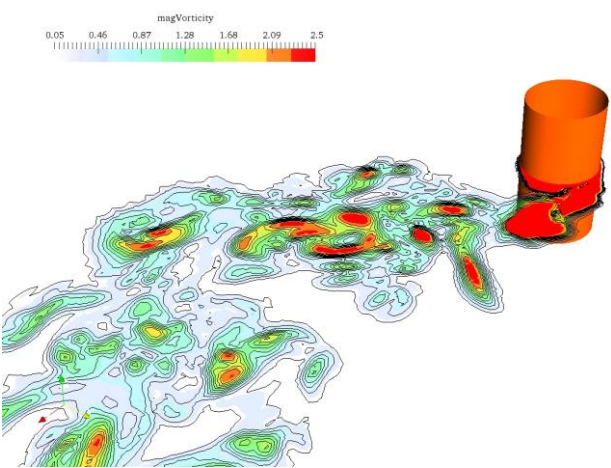
上海交通大学CMHL研究中心基于OpenFOAM，自主开发了深海平台涡激运动求解器vim-FOAM-SJTU。该求解器采用分离涡模拟（DES）方法处理高雷诺数下三维流动分离问题，结合物体六自由度运动理论和动边界弹簧网格技术求解海洋平台涡激运动问题，适用于浮筒、Spar和半潜式等浮式海洋结构物的涡激运动预报。



vim-FOAM-SJTU求解器基本框架

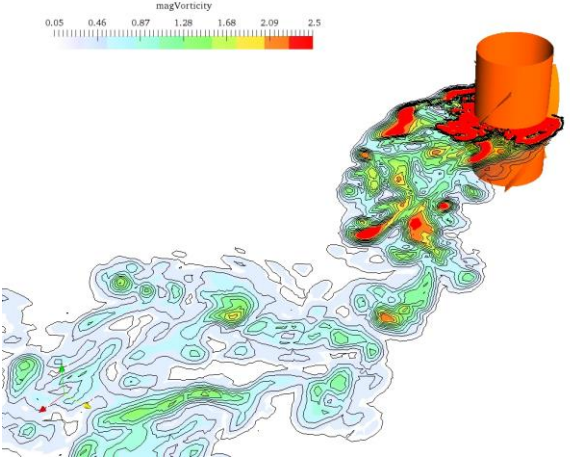
Spar平台涡激运动模拟

vim-FOAM-SJTU求解器可用于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，及柱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平台涡激运动截面涡量图

无螺旋侧板Spar平台涡激运动轨迹线

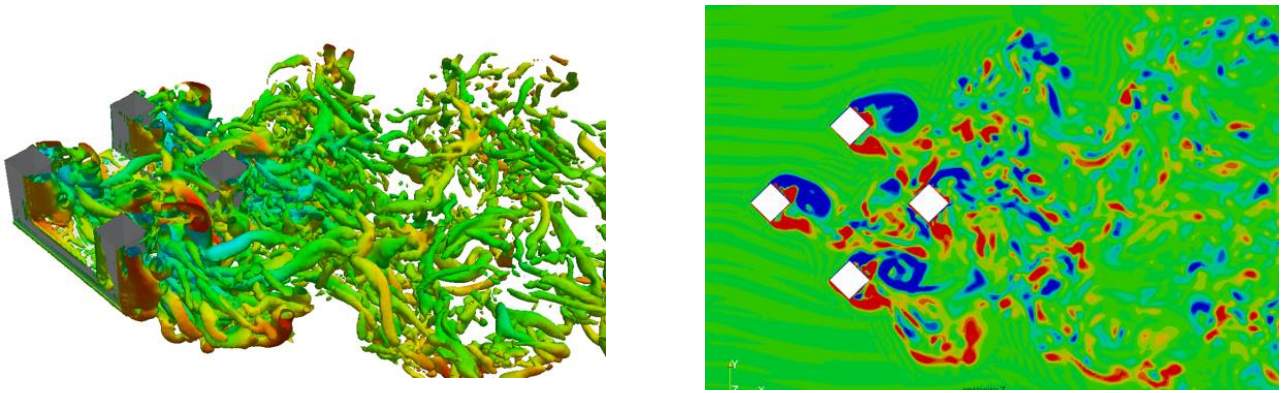


有螺旋侧板Spar平台涡激运动截面涡量图

有螺旋侧板Spar平台涡激运动轨迹线

半潜式平台涡激运动模拟

vim-FOAM-SJTU求解器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流特征。

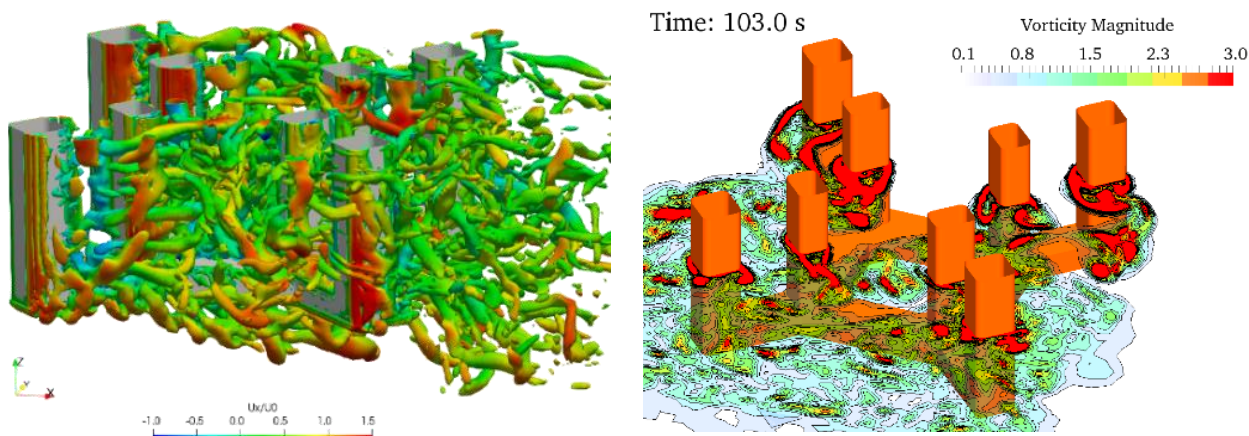


半潜平台尾涡结构

半潜平台水平截面涡量场

对柱式半潜平台涡激运动模拟

vim-FOAM-SJTU求解器可模拟对柱式半潜平台涡激运动，预报分析其在不同情况下的涡激运动响应特性。

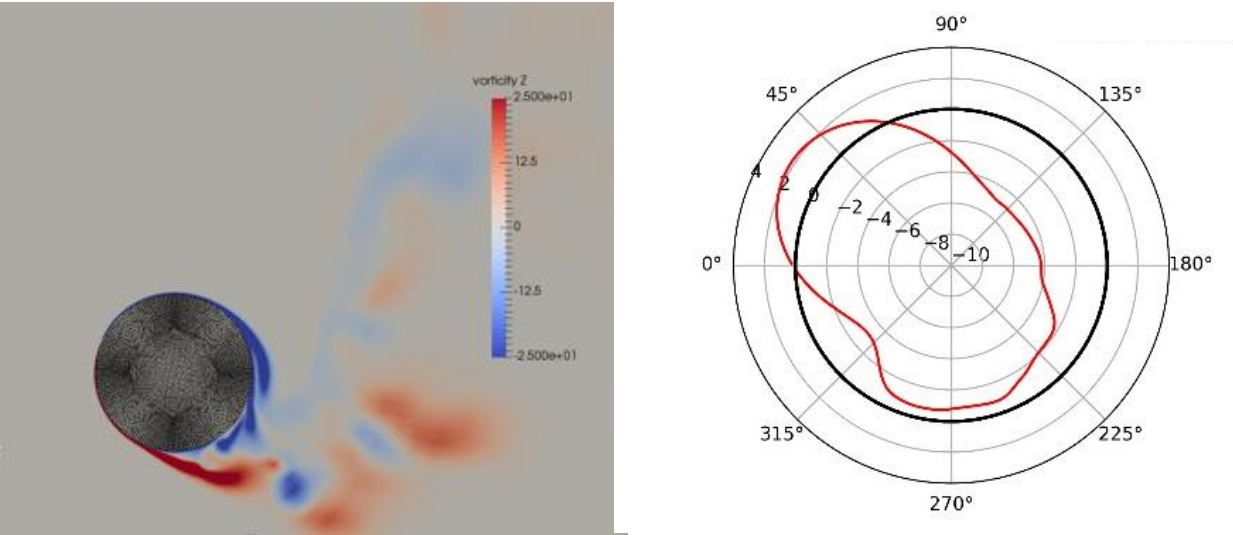


对柱式半潜平台尾涡结构

对柱式半潜平台截面涡量图

考虑旋转的浮筒涡激运动模拟

vim-FOAM-SJTU求解器可模拟考虑旋转运动的圆柱浮筒涡激运动。

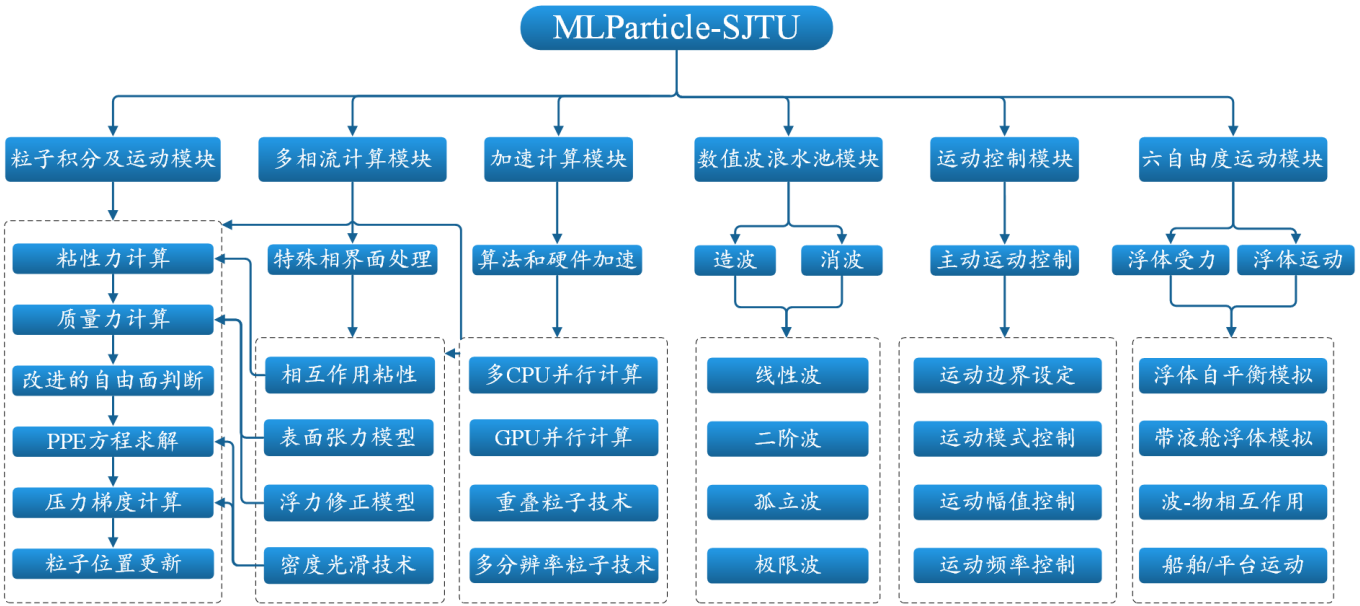


旋转浮筒涡激运动

压力系数周向分布图

船舶与海洋工程无网格粒子法求解器（MLParticle-SJTU）

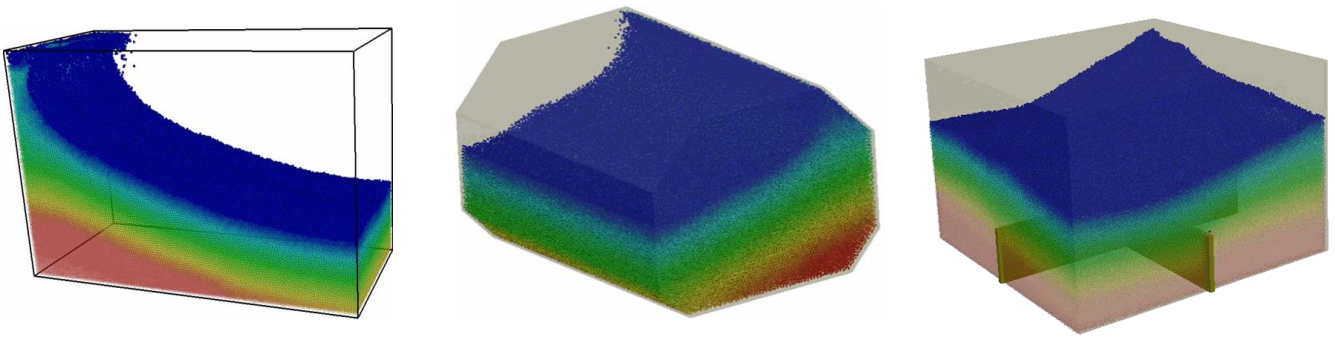
上海交通大学CMHL研究中心基于改进的移动粒子半隐式方法，自主开发了船舶与海洋工程无网格粒子法求解器软件MLParticle-SJTU，包括粒子积分及运动、数值波浪水池、六自由度运动、计算加速、多相流等多个模块。求解器通过改进核函数、自由面粒子判别方法和压力泊松方程源项表达式等途径，集成GPU、多CPU、重叠粒子及多分辨率等加速技术，抑制了压力振荡问题，极大提高了计算效率，能有效模拟溃坝波、液舱晃荡、波浪与船体的相互作用、上浪砰击、涌潮波演化、物体入水等复杂剧烈流动问题。



MLParticle-SJTU求解器基本框架

液舱晃荡

MLParticle-SJTU求解器可对各液舱类型，包括方形液舱、LNG形液舱的晃荡问题进行模拟，还可对带隔板液舱晃荡问题进行模拟。



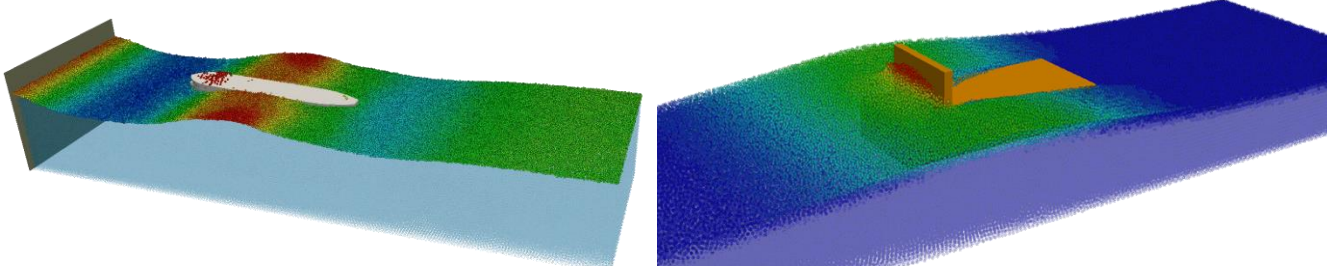
方形液舱晃荡

LNG液舱晃荡

带隔板的液舱晃荡

船在波浪上的运动

MLParticle-SJTU求解器可通过推板数值造波，模拟船舶在波浪上运动、甲板上浪及上浪对上层建筑物的砰击等现象过程。

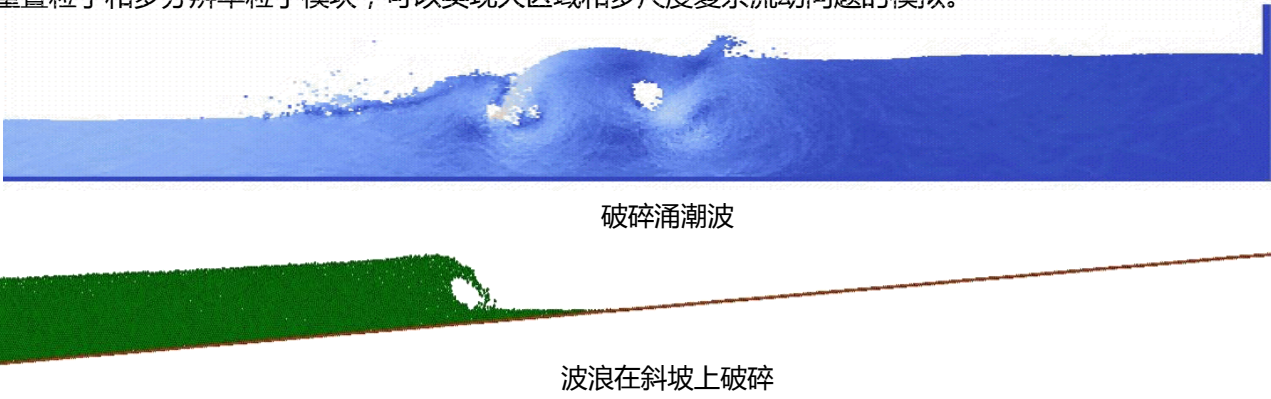


KVLCC船在波浪上的运动

甲板上浪和对上层建筑的砰击

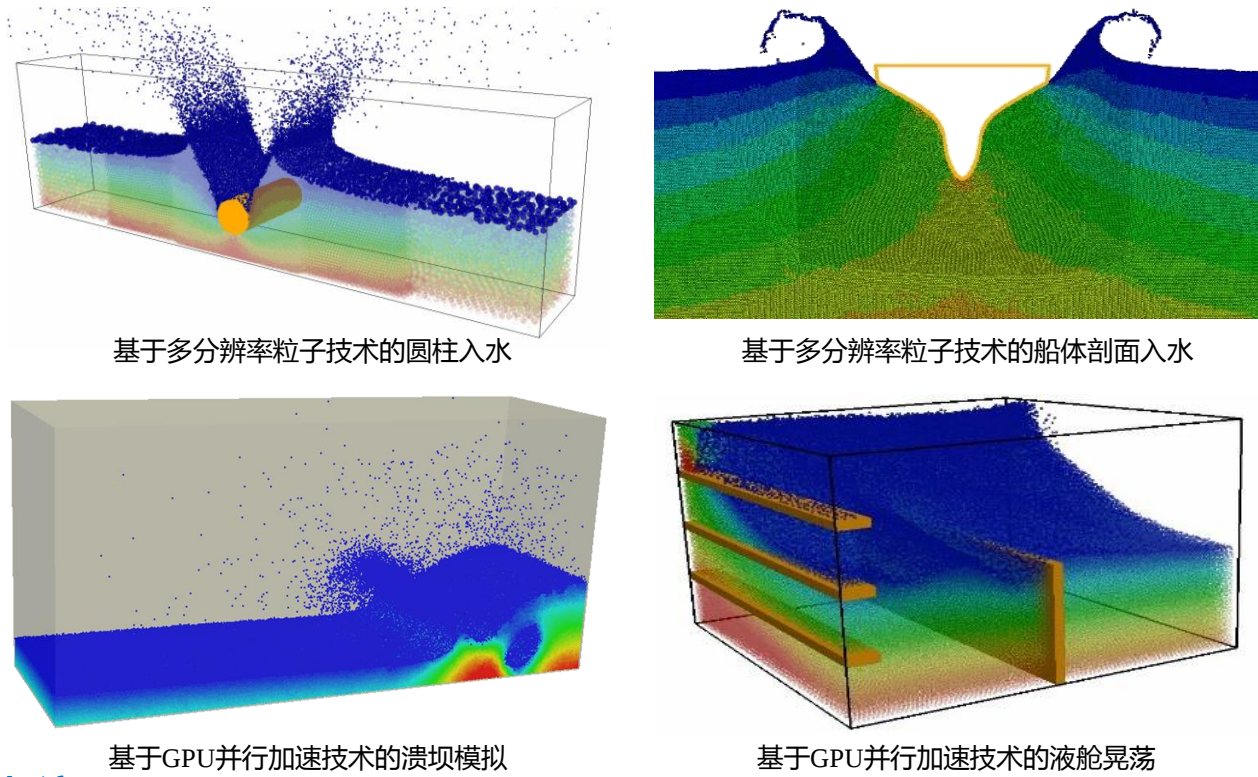
涌潮波与波浪爬坡

MLParticle-SJTU求解器可模拟涌潮波演化过程，也可有效模拟波浪爬坡过程中出现的波浪破碎现象。使用重叠粒子和多分辨率粒子模块，可以实现大区域和多尺度复杂流动问题的模拟。



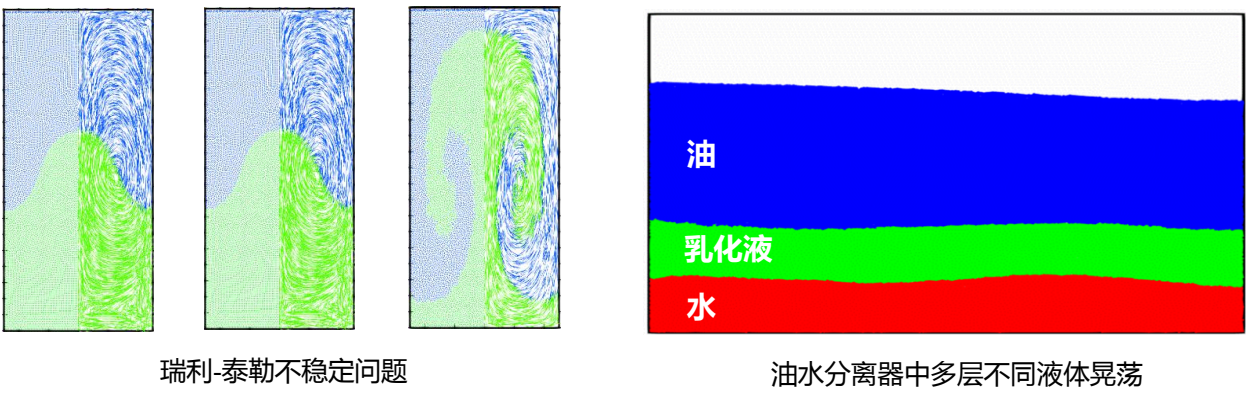
计算加速技术

MLParticle-SJTU求解器采用重叠粒子、多分辨率粒子、多CPU并行及GPU并行等加速技术，极大地提高了求解器计算效率，可对物体入水、溃坝、晃荡等大规模计算问题进行模拟，计算速度可提高30倍。



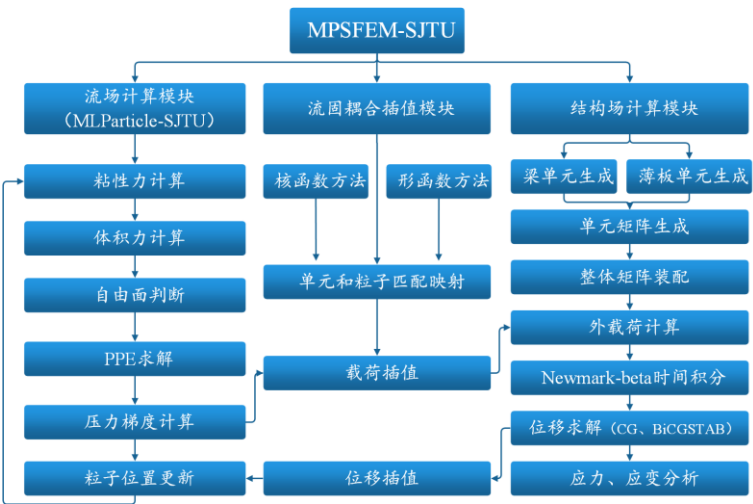
多相流

MLParticle-SJTU求解器通过引入一系列相界面处理方法，实现了复杂多相流问题的数值模拟，如瑞利-泰勒不稳定问题和油水分离器中多层不同液体的晃荡问题。

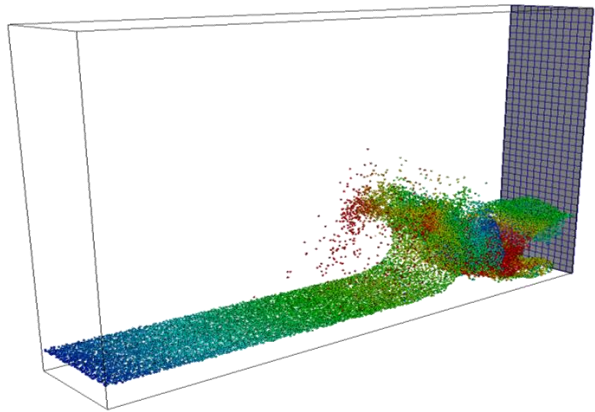


船海流固耦合粒子法-有限元求解器（MPSFEM-SJTU）

上海交通大学CMHL研究中心在自主开发的无网格粒子法求解器MLParticle-SJTU的基础上，扩展开发了有限元法的结构场求解模块以及流-固界面数据插值传递模块，形成了船舶与海洋工程流固耦合粒子法-有限元求解器软件MPSFEM-SJTU。该求解器结合了MPS方法在剧烈自由面流动问题模拟的优势，以及FEM方法在结构动力学响应分析中的可靠性，可应用于船舶与海洋工程中多种典型流固耦合问题的数值仿真，例如溃坝冲击波与弹性结构物的相互作用、弹性液舱内的晃荡等问题。



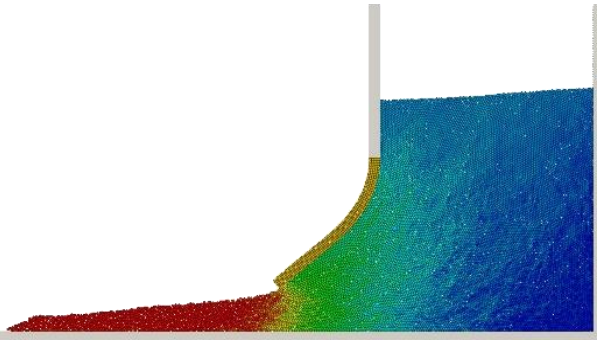
MPSFEM-SJTU求解器基本框架



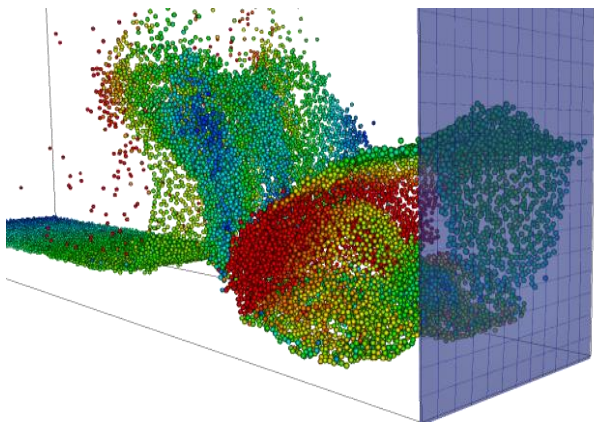
溃坝波与弹性水槽壁的相互作用

溃坝流固耦合

当遭受溃坝流动时，结构物可能会产生显著的变形甚至破坏，MPSFEM-SJTU求解器能够很好地模拟溃坝波对弹性结构物撞击作用。



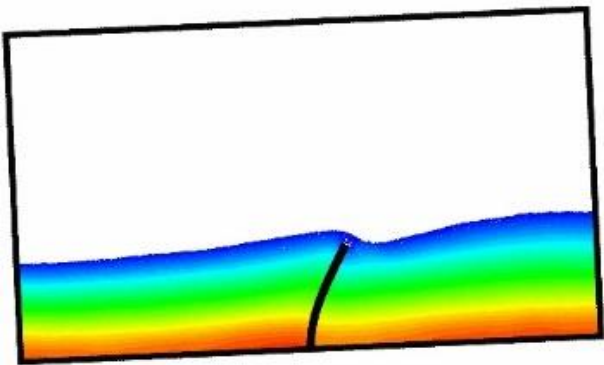
溃坝波与弹性闸门的相互作用



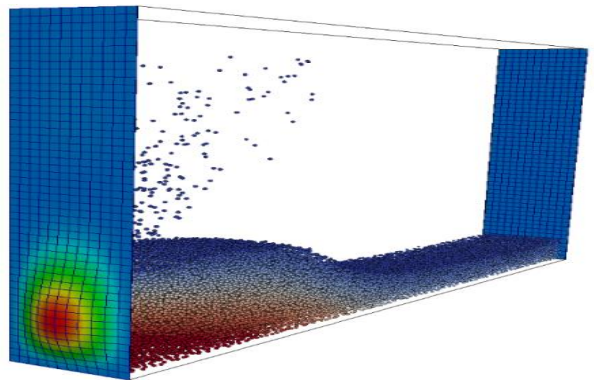
溃坝波与弹性水槽壁的相互作用（局部放大图）

液舱晃荡流固耦合

液舱晃荡是船舶与海洋工程中的常见问题，MPSFEM-SJTU求解器可用于模拟弹性液舱中的晃荡流动，包括带弹性隔板的液舱晃荡，以及带弹性侧壁的三维液舱晃荡等问题。可以很好地模拟出结构弹性对晃荡流动的影响。



带弹性隔板的液舱晃荡



带弹性隔板的三维液舱晃荡