

DualSPHysics+流固耦合模型开发及其在漂浮式光伏阵列动力响应分析中的应用

导师：罗敏、赵西增

答辩人：占毅

2020硕/2022博

浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

目录

CONTEXT

- **研究背景与意义**
  论文 - 第 1 章- 1.1~1.3节
- **本文目标与内容**
  论文 - 第 1 章 - 1.4 节
- **分析与讨论**
  论文 - 第 2~6 章
- **总结与展望**
  论文 - 第 7 章

1.1 研究背景与意义

全球能源低碳转型加速

- 海上可再生能源加速发展，**漂浮式光伏**成为重要新兴方向
- 模块化漂浮式光伏阵列具有**布置灵活**和**扩展性强**等优势



(a) 漂浮式光伏示范项目（中国，舟山）



(b) 2 MW海上光伏（荷兰，海牙）



(c) 近海漂浮式光伏（新加坡, 柔佛海峡）



(d) 环岛礁2.4 MW漂浮式光伏（马尔代夫）

1.2 研究现状

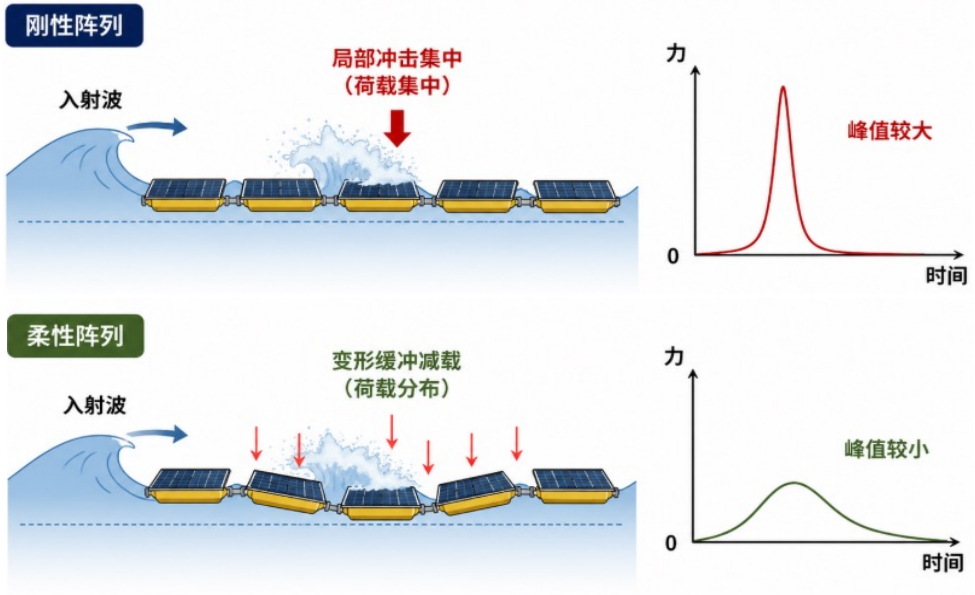
研究问题与挑战： 漂浮式光伏阵列在复杂波浪作用下具有显著流固耦合特征，现有研究对**结构柔性及阵列动力响应机理**认识仍不足

➢ 结构柔性不可忽略



- 轻质复合材料薄型结构 → 抗弯刚度较低
- 局部波浪砰击 → 诱发显著结构变形

➢ 阵列动力响应机理尚不明确



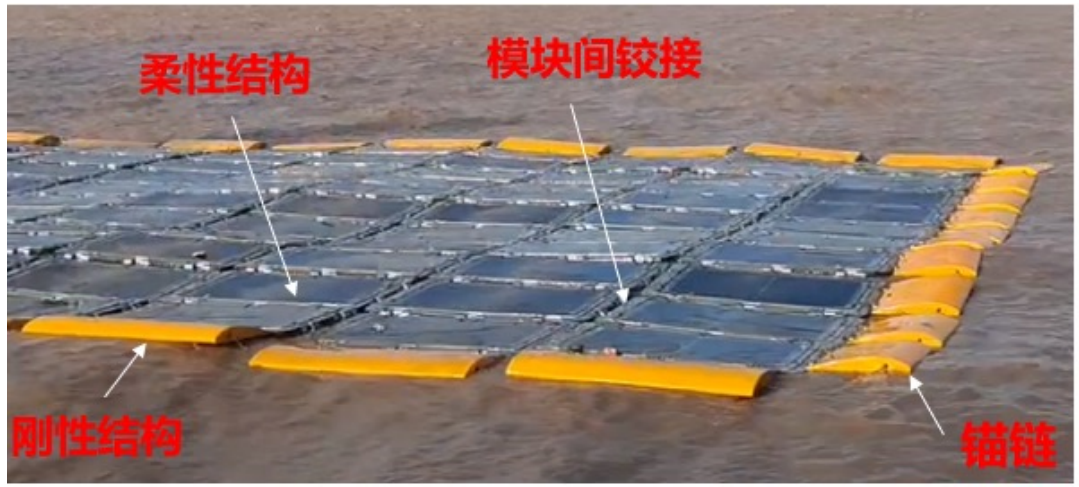
- 现有研究多基于刚性假设，柔性效应考虑不足
- 阵列运动、结构变形与荷载传递规律尚不清晰
- 刚柔阵列响应差异缺乏系统研究

1.2 研究现状

数值模拟方法： 面向漂浮式光伏复杂流固耦合问题，传统数值模拟方法存在局限，

SPH 具有无网格拉格朗日描述优势

➢ 阵列组成复杂，涉及多物理过程



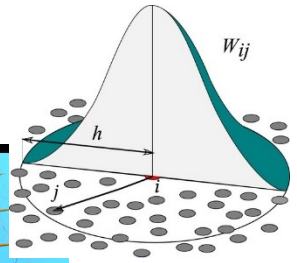
■ 自由面大变形、柔性变形、刚体运动、铰接约束和系泊动力

适用方法

➢ 光滑粒子流体动力学（SPH）

$$\langle f(\mathbf{x})\rangle = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}')W(\mathbf{x}-\mathbf{x}',h)d\mathbf{x}'$$





■ 可考虑复杂黏性流动和自由面现象

■ 无需考虑网格畸变、自由面捕捉等问题

1.2 研究现状

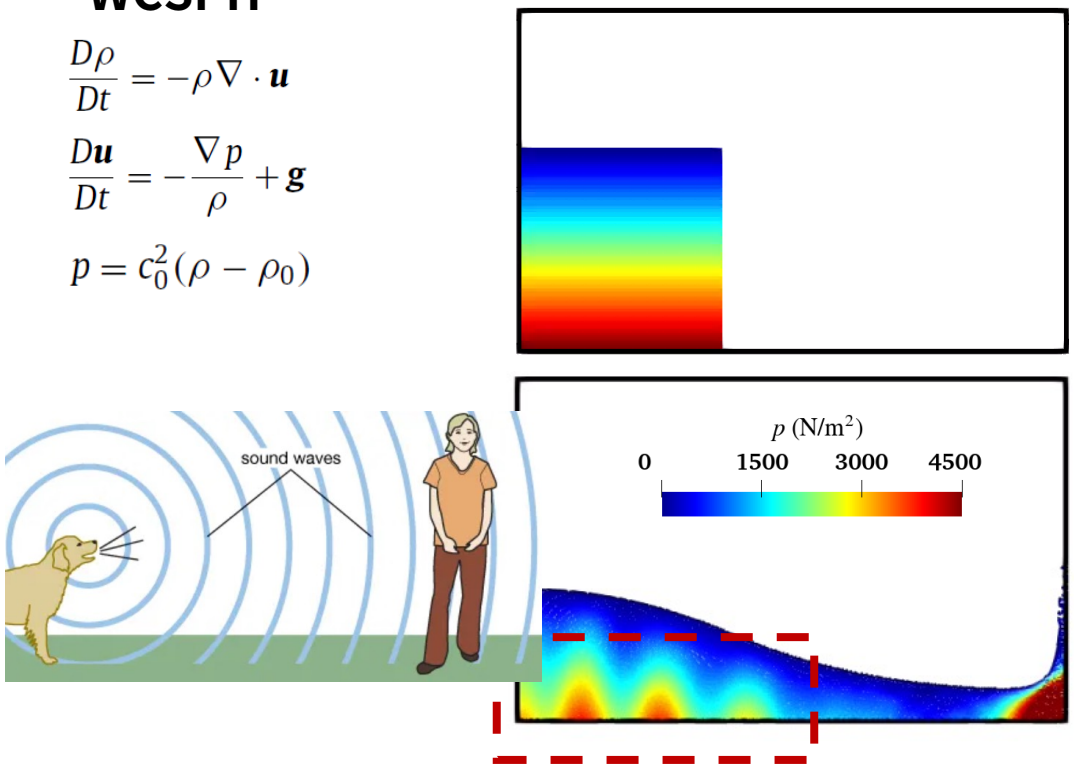
自由表面流SPH模拟存在问题：压力振荡、速度散度误差累积和体积守恒不足等问题

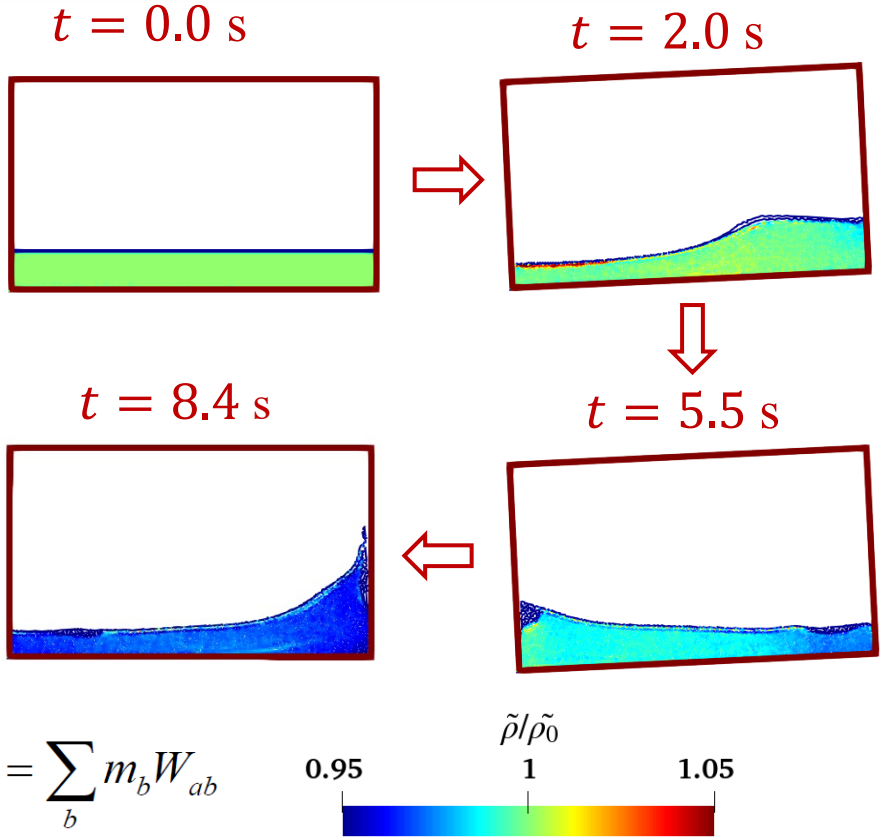
WCSPH

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \boldsymbol{u}$$

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \boldsymbol{g}$$

$$p = c_0^2(\rho - \rho_0)$$



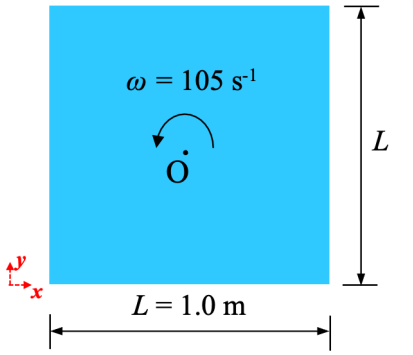


$$\tilde{\rho}_a = \sum_b m_b W_{ab}$$

- 流体弱可压假设 → 声波 → **压强震荡**
- 缺乏体积守恒约束 → **非物理膨胀或收缩**

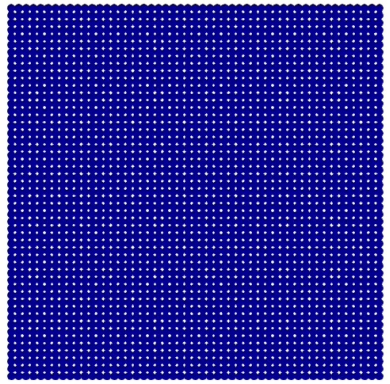
1.2 研究现状

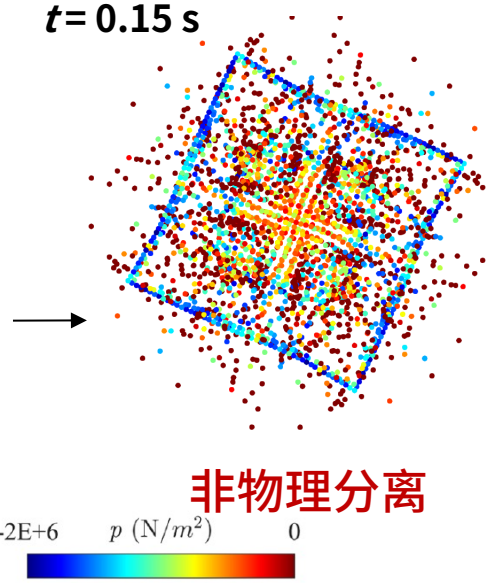
柔性固体和SPH模拟存在问题：离散精度低、沙漏模式严重、流固耦合过程应力与压强噪音



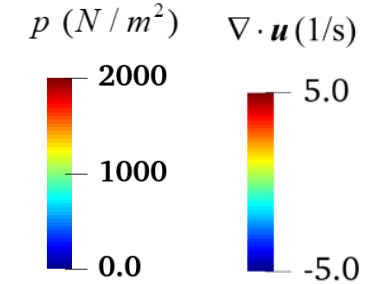
高速旋转弹性板

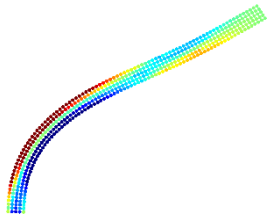
$$\frac{D\boldsymbol{u}_i}{Dt} = \sum_j (\boldsymbol{P}_i L_i + \boldsymbol{P}_j L_j)\nabla_i W_{ij} V_i^0 V_j^0$$



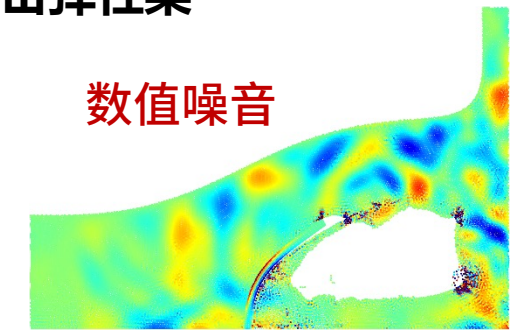


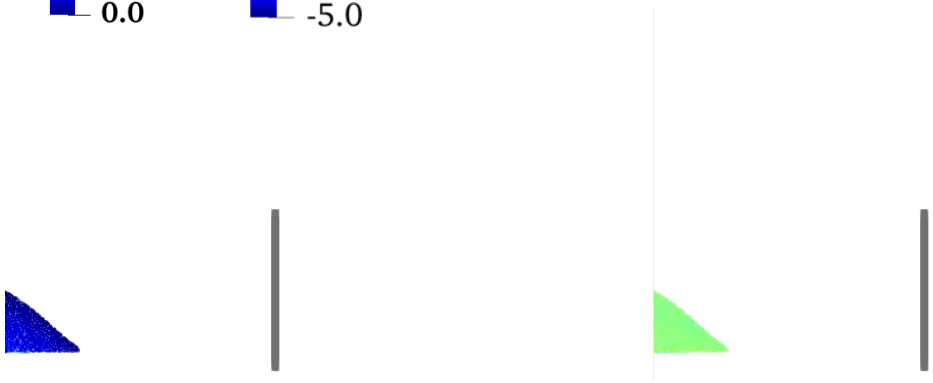
溃坝冲击弹性梁





数值噪音





- 低离散精度 + 沙漏模式 → 大变形模拟失稳
- 流体压强震荡 + 结构应力震荡 → 显著数值噪音

1.3 当前研究局限与本文研究目标

研究局限

1. 自由表面流 SPH模型稳定性与守恒性不足

2. 柔性固体SPH模型精度与稳定性不足

3. 柔性多浮体阵列流固耦合模型缺失

数值方法存在局限

4. 柔性漂浮式光伏阵列动力响应认知不足

动力响应机理不明

研究目标

1. 提升自由表面流模型稳定性与守恒性

2. 提升柔性固体模型精度并抑制零能模态

3. 开发柔性浮体阵列流固耦合模型

发展高精度流固耦合模型

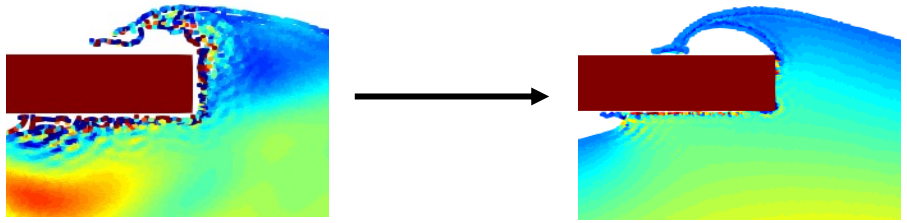
4. 揭示阵列响应规律 阐明流固耦合机理

揭示阵列响应机理

1.4 本文研究内容

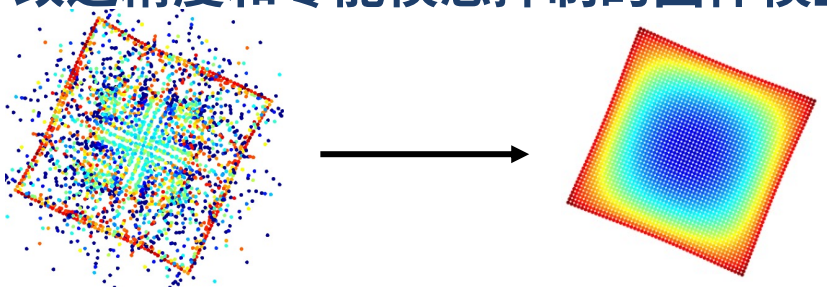
DualSPHysics+流固耦合模型开发及其在漂浮式光伏阵列动力响应分析中的应用

1. 改进稳定性和守恒性的流体模型



- δR-SPH低耗散求解器
- 速度散度误差清理
- 体积守恒控制

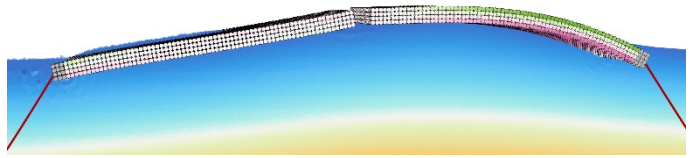
2. 改进精度和零能模态抑制的固体模型



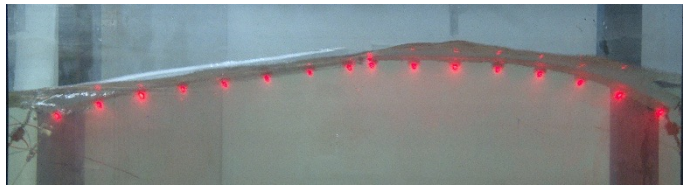
- 三维二阶精度离散
- 黎曼稳定项
- 动态沙漏控制算法

算法改进

3. 柔性多浮体阵列流固耦合模型与实验验证



验证

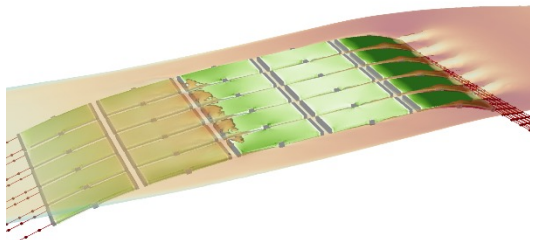


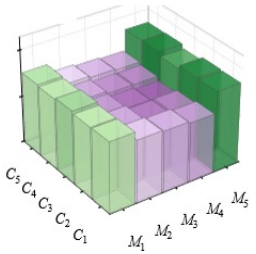
- 刚性-柔性模块耦合算法
- 流固耦合、刚体运动、铰接与系泊约束
- 自由液面、运动变形、系泊张力验证

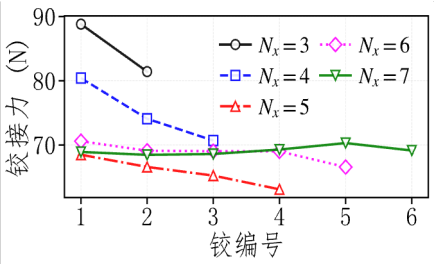
数值模拟

4. 柔性漂浮式光伏阵列动力响应机理

- 流场、应力场演变
- 量化时空分布规律
- 参数分析







02

稳定性与守恒性增强的自由表面流SPH模型

改进稳定性和守恒性的自由表面流SPH模型

针对自由表面流SPH模拟中压力振荡、数值耗散偏大、体积守恒不足和粒子分布不均等问题，提出一种**兼顾稳定性与守恒性的改进自由表面流SPH模型**

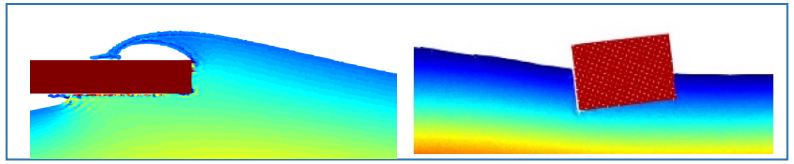
自由表面流 SPH 模型改进

问题：耗散大、稳定性与守恒性不足

- δR-SPH 低耗散格式
- 速度散度误差清理
- 粒子位移修正

DualSPHysics+流体模型开发

典型自由表面流动问题验证



DualSPHysics

DualSPHysics+

- 算法改进
- 模型开发
- 模型验证
- 本章小结

2.1 δR-SPH 低耗散离散格式

耦合黎曼求解器与密度耗散项： 针对传统WCSPH方法数值耗散偏大，提出耦合黎曼求解器与密度耗散项的δR-SPH方法，抑制非物理数值耗散，提升能量守恒性

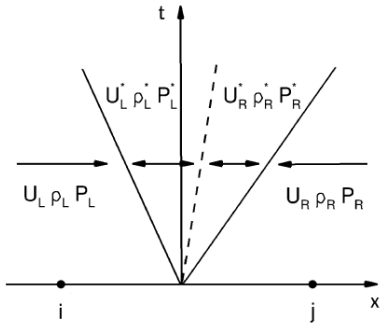
➢ 采用Riemann求解器替代人工黏性

人工黏性

$$\frac{D\boldsymbol{u}_a}{Dt}=-\sum_b m_b\left(\frac{p_b+p_a}{\rho_b\rho_a}+\boxed{\Pi_{ab}}\right)\nabla_a W_{ab}+\boldsymbol{g}$$

⇩ Riemann 求解

$$\frac{D\boldsymbol{u}_a}{Dt}=-2\sum_b m_b\left(\boxed{\frac{p^*}{\rho_a\rho_b}}\right)\nabla_a W_{ab}+\boldsymbol{g}$$



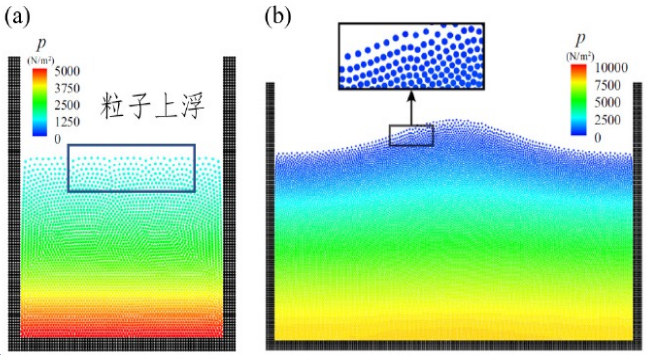
隐式地引入最小耗散

➢ 传统Riemann求解器存在问题

$$\frac{D\rho_i}{Dt}=-\rho_i\sum_j \boldsymbol{u}_{ij}\cdot\nabla_i w_{ij}V_j+D_i^R,\ \boxed{D_i^R}=2\rho_i c_0\sum_j\frac{\rho_j-\rho_i}{\rho_j+\rho_i}\frac{\boldsymbol{r_{ij}}}{|\boldsymbol{r_{ij}}|}\cdot\nabla_i w_{ij}V_j$$

$$\sum_i D_i^R V_i=\sum_i\sum_j 2\rho_i c_0\frac{\rho_j-\rho_i}{\rho_j+\rho_i}\frac{\boldsymbol{r}_{ij}}{|\boldsymbol{r}_{ij}|}\cdot\nabla_i w_{ij}V_j V_i\ \boxed{\neq 0}$$

扩散项全局不守恒



提出δR-SPH方法

$$\frac{D\rho_i}{Dt}=-\rho_i\sum_j \mathbf{u}_{ij}\cdot\nabla_i W_{ij}V_j+D_i$$

$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt}=-2\sum_j m_j\left(\frac{p^*}{\rho_i\rho_j}\right)\nabla_i W_{ij}+\mathbf{g}$$

$$D_i=2\delta h c_f\sum_j\psi_{ji}\frac{(\mathbf{r}_j-\mathbf{r}_i)\cdot\nabla_i W_{ij}}{(\mathbf{r}_j-\mathbf{r}_i)^2+\varepsilon}V_j$$

2.2 多策略联合的速度散度误差清理算法

速度散度误差清理： 提出多策略联合的速度散度误差清理方法，结合散度误差补偿与阻尼波动约束算法，**协同清理瞬时和累积误差，提高流场压力模拟稳定性**

➢ 散度误差补偿的清理算法 (VEM)

$$p_a^{\mathrm{VEM}} = c_s^2 d\rho_a = c_s^2 \Delta t \left(\frac{D\rho}{Dt}\right)_a^{k-1} = -\rho_a c_s^2 \Delta t \langle \nabla \cdot \boldsymbol{u} \rangle_a^{k-1}$$

误差逐渐累积

$$\boldsymbol{a}_a^{\mathrm{VEM}} = -\frac{1}{\rho_a} \sum_b F\left(p_a^{\mathrm{VEM}}, p_b^{\mathrm{VEM}}\right) \nabla_a W_{ab} V_b$$

$$F(p_a, p_b) = \begin{cases} p_b + p_a & (p_a \geq 0 \cup a \notin \Omega_{IN}) \\ p_b - p_a & (p_a < 0 \cap a \in \Omega_{IN}) \end{cases}$$

$$\frac{D\boldsymbol{u}_a}{Dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{F(p_a, p_b)}{\rho_a \rho_b} + \Pi_{ab}\right) \nabla_a W_{ab} + \boldsymbol{g}_a + \boldsymbol{a}_a^{\mathrm{VEM}}$$

瞬时误差清理

累积误差清理

➢ 双曲-抛物阻尼波动约束清理 (HPDC)

$$\begin{cases} \left(\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt}\right)_\psi + \nabla\psi = 0 \\ \mathcal{D}(\psi) + \nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \end{cases}$$

双曲项 ⇩ 抛物项

$$\frac{\partial^2 (\nabla \cdot \boldsymbol{u})}{\partial t} - c_h^2 \nabla^2 (\nabla \cdot \boldsymbol{u}) + \frac{c_h^2}{c_p^2} \frac{\partial (\nabla \cdot \boldsymbol{u})}{\partial t} = 0$$

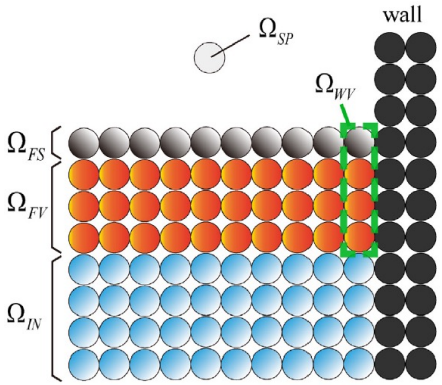
$$\frac{D\boldsymbol{u}_a}{Dt} = -2\sum_b m_b \left(\frac{p^*}{\rho_a \rho_b}\right) \nabla_a W_{ab} + \boldsymbol{g} + \boldsymbol{a}_a^{\mathrm{VEM}} - \nabla\psi_a$$

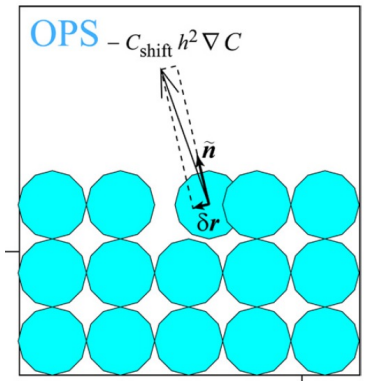
$\psi = 0$ 边界粒子

2.3 粒子位移修正算法

粒子位移修正： 发展体积守恒修正与优化的粒子位移修正方法，**提升长时序模拟粒子分布质量与流体体积守恒性**

➢ 优化的粒子分布位移修正 (OPS)





I.进行粒子类型检测

II.根据Fick扩散定律计算移位矢量

III.消除法向仅保留切向位移 $(\Omega_{FS}, \Omega_{FV})$

$$C_a = \sum_b W_{ab} V_b, \delta \boldsymbol{r}_a^{\text{OPS}} = -C_{\text{shift}} h^2 \left(\boldsymbol{I} - \tilde{\boldsymbol{n}}_a \otimes \tilde{\boldsymbol{n}}_a \right) \cdot \nabla C_a$$

粒子聚集

➢ 流体体积守恒位移修正 (VCS)

$$\tilde{\rho}_a = \sum_b m_b W_{ab}$$

体积守恒误差

$$\left\{ \nabla \cdot \left(\frac{\nabla p^{\text{VCS}}}{\rho} \right) \right\}_a^{k+1} = \frac{\tilde{\rho}_0 - \tilde{\rho}_a^k}{\tilde{\rho}_0 \Delta t^2} + \frac{1}{\Delta t^2 \tilde{\rho}_0 c_s^2} p_a^{\text{VCS},k+1}$$

显式求解

$$\delta \boldsymbol{r}_a^{\text{VCS}} = \Delta t^2 \left(-\frac{1}{\rho_a} \left\langle \nabla p^{\text{VCS}} \right\rangle_a^{\text{L}} \right)$$

$$\boldsymbol{r}_a' = \boldsymbol{r}_a + \delta \boldsymbol{r}_a^{\text{OPS}} + \delta \boldsymbol{r}_a^{\text{VCS}}$$

2.4 DualSPHysics+ 模型开发

DualSPHysics+： 基于开源SPH软件DualSPHysics二次开发了DualSPHysics+流体求解模型，提高自由表面流动模拟稳定性和守恒性

δ-SPH model in DualSPHysics

$$\frac{D\rho_a}{Dt} = -\rho_a \sum_b \boldsymbol{u}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} V_b + D_a, \quad \frac{D\boldsymbol{u}_a}{Dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{p_b + p_a}{\rho_b \rho_a} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + \boldsymbol{g} \quad Dh_a = \frac{h}{d} \sum_b \psi$$

四个方面的模型改进

i) 最小的能量耗散 ← Riemann 稳定项代替人工粘度项 （δR-SPH）

ii) 自由表面及其附近的粒子持续移动← 优化粒子分布位移（OPS）

iii) 提高连续性方程求解分辨率 ← 速度散度误差清理算法 (VEM) 体积守恒位移 (VCS)

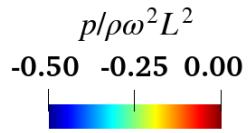
iv) 减小速度发散误差 ← 双曲/抛物速度散度清理算法（HPDC）

δR-SPH-OPS-VCS-VEM-HPDC in DualSPHysics+ [1]

$$\frac{D\rho_a}{Dt} = -\rho_a \sum_b \boldsymbol{u}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} V_b + D_a, \quad \frac{D\boldsymbol{u}_a}{Dt} = -2\sum_b m_b \left(\frac{p^*}{\rho_a \rho_b} \right) \nabla_a W_{ab} + \boldsymbol{g} + \boldsymbol{a}_a^{\mathrm{VEM}} - \nabla \psi_a, \quad p^* = \frac{1}{2} F(p_L, p_R) + \frac{1}{2} \phi \bar{\rho} (u_L - u_R), \quad \boldsymbol{r}_a' = \boldsymbol{r}_a + \delta \boldsymbol{r}_a^{\mathrm{OPS}} + \delta \boldsymbol{r}_a^{\mathrm{VCS}}$$

2.5 模型验证：强负压状态与大变形自由液面问题

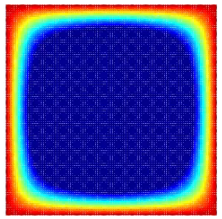
液块压强定性与定量对比

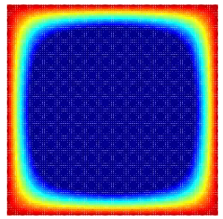


DualSPHysics

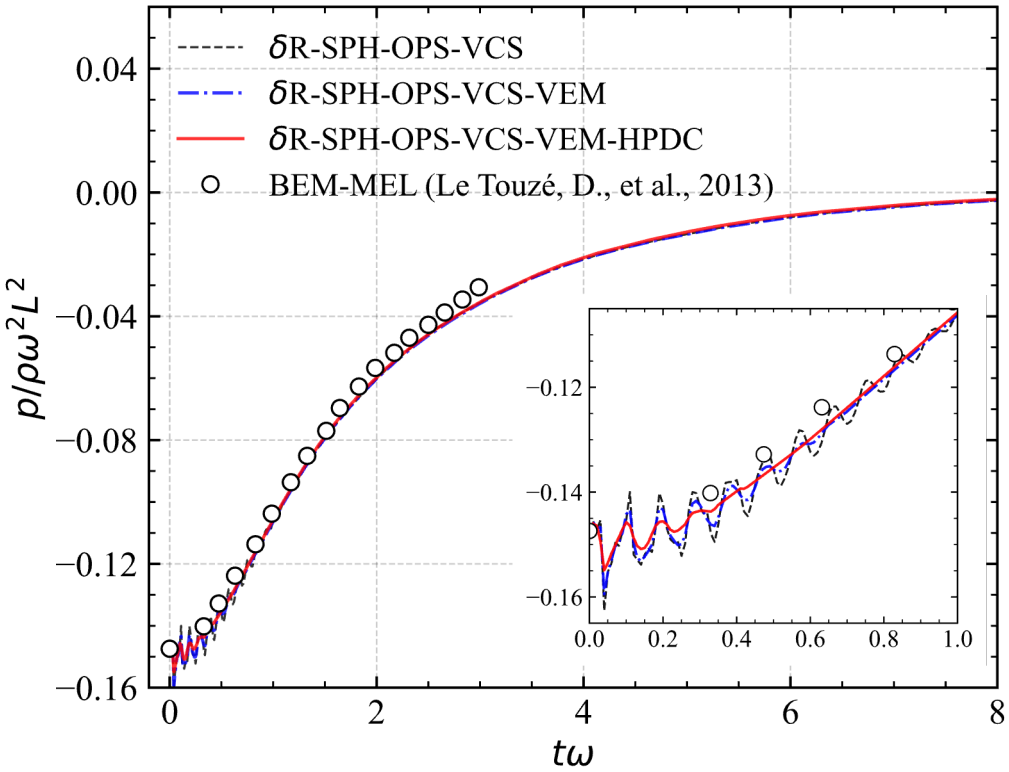
DualSPHysics+

Time: 0.0





➢ 液块中心压强历时曲线

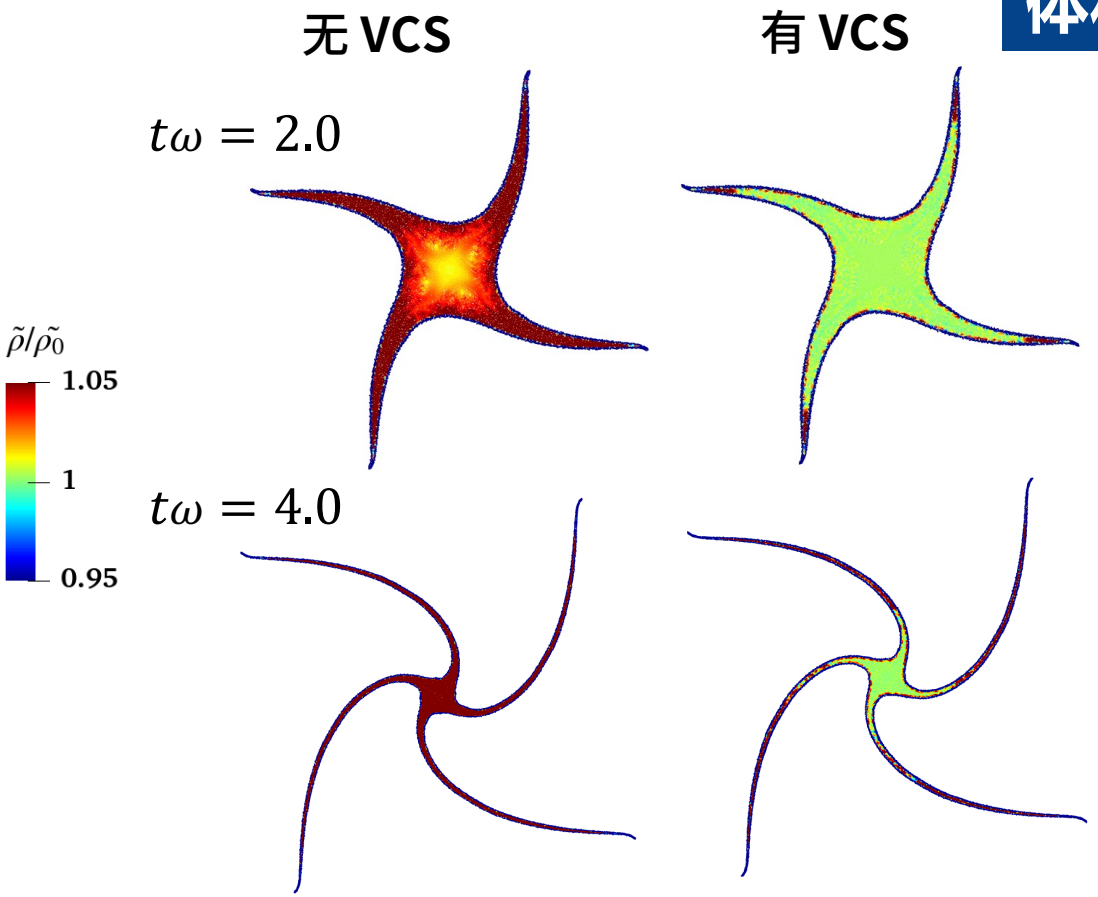


■ **DualSPHysics+** 提高数值稳定性和精度

■ **VEM + HPDC** → 显著降低压强震荡

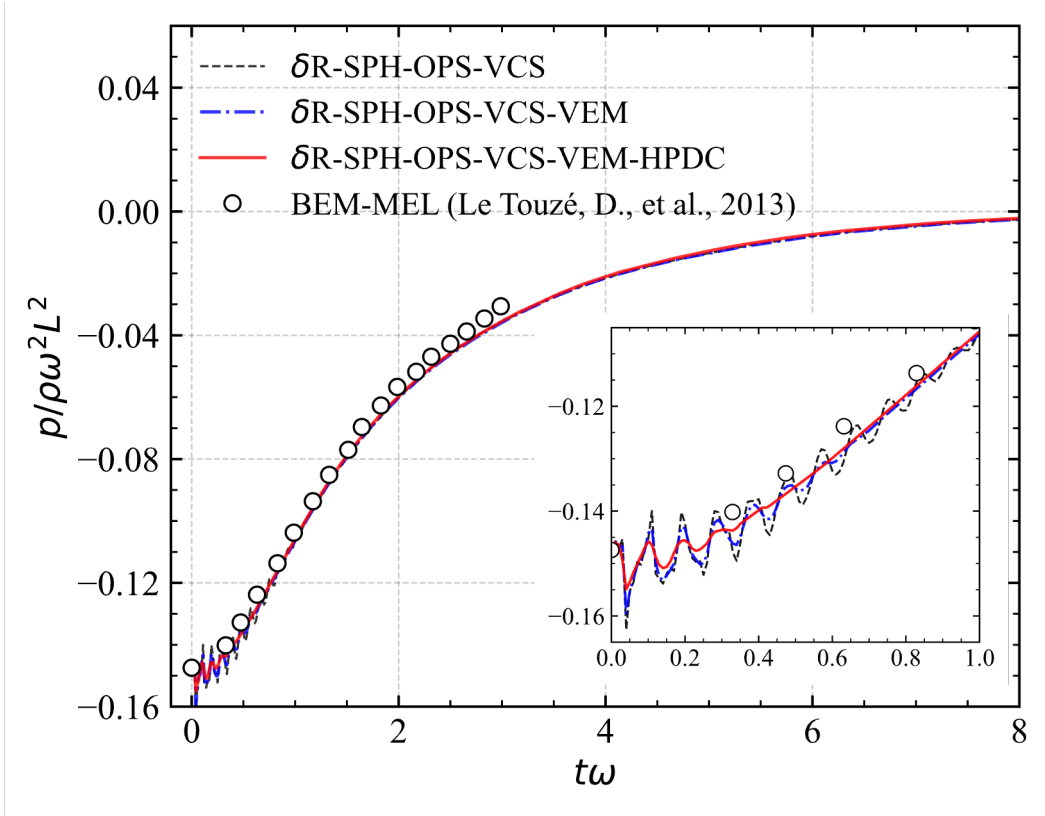
2.5 模型验证：强负压状态与大变形自由液面问题

体积守恒性对比



- VCS → 提升体积守恒性

➢ 液块中心压强历时曲线



- VEM + HPDC → 显著降低压强震荡

2.5 模型验证：空水槽规则波长时序造波问题

计算域与数值参数设置

d = 0.5 m, H = 0.1 m,

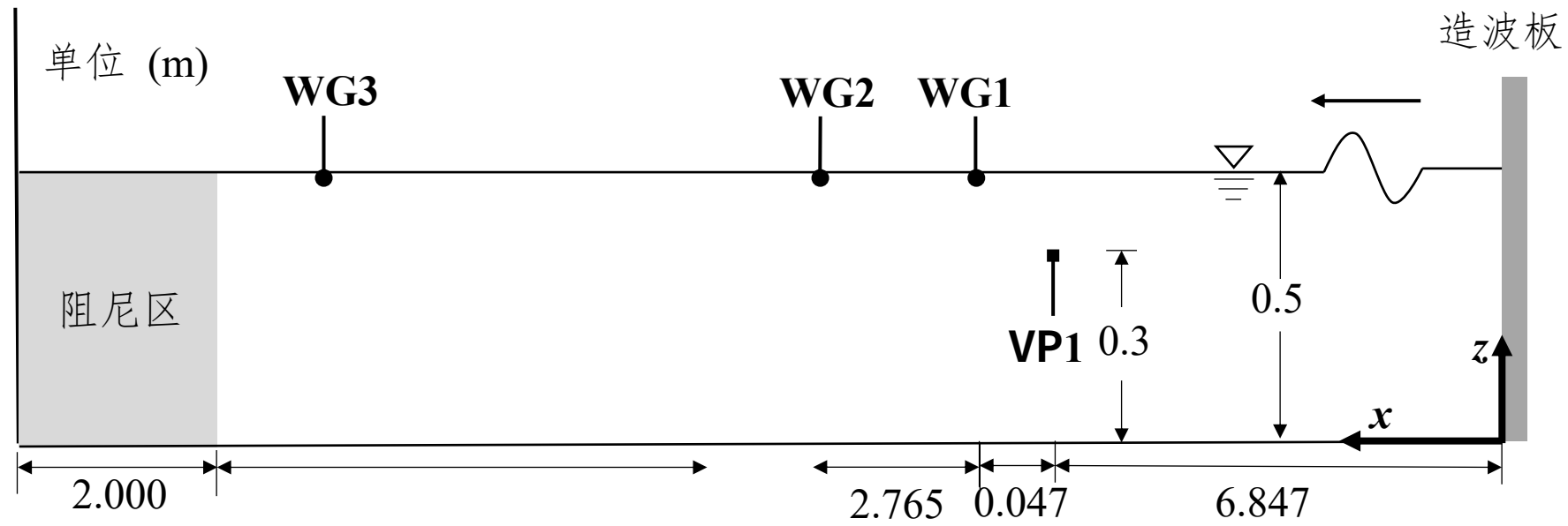
A = 0.05 m, T = 1.5 s,

L = 2.83 m

dp = 0.015 m, h/dp = 1.3, C_0 = 25.0 m/s,

C_{CFL} = 0.25

[1]

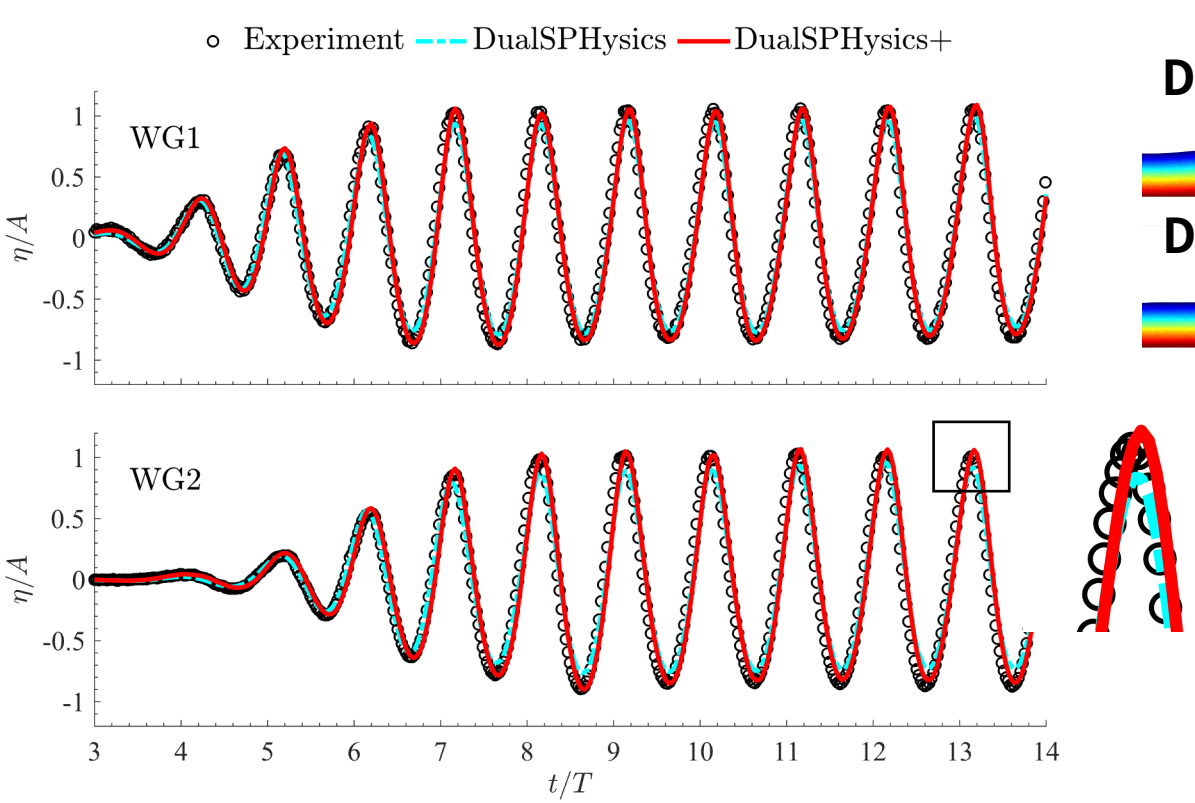


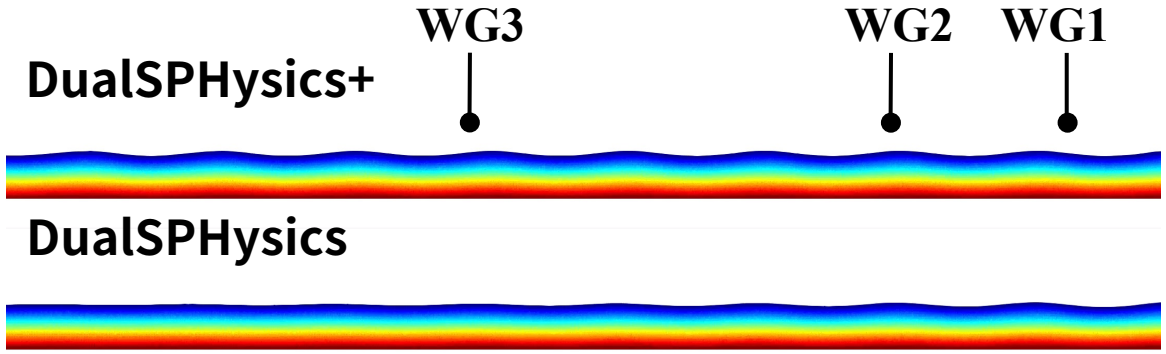
- 沿程布置多个浪高仪监测自由液面高度
- **WG3**距离造波板**7**个波长位置，用于监测远距离传播衰减程度

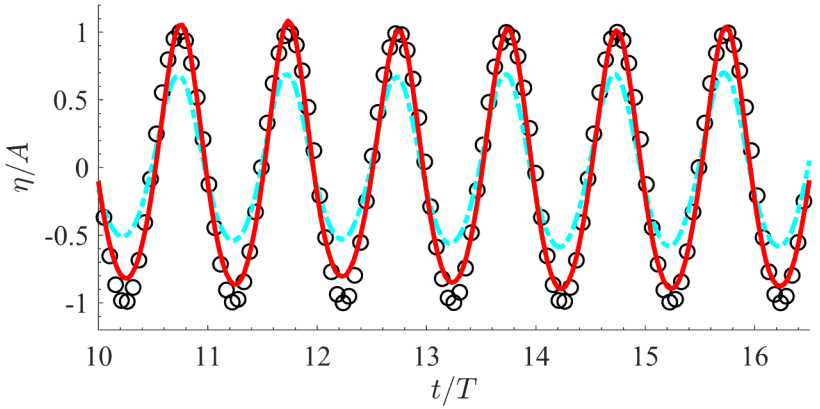
[1] Luo, et al. "Experimental investigation of freak wave actions on a floating platform and effects of the air gap." *OE* (2022)

2.5 模型验证：空水槽规则波长时序造波问题

波浪长距离传播自由液面高度验证



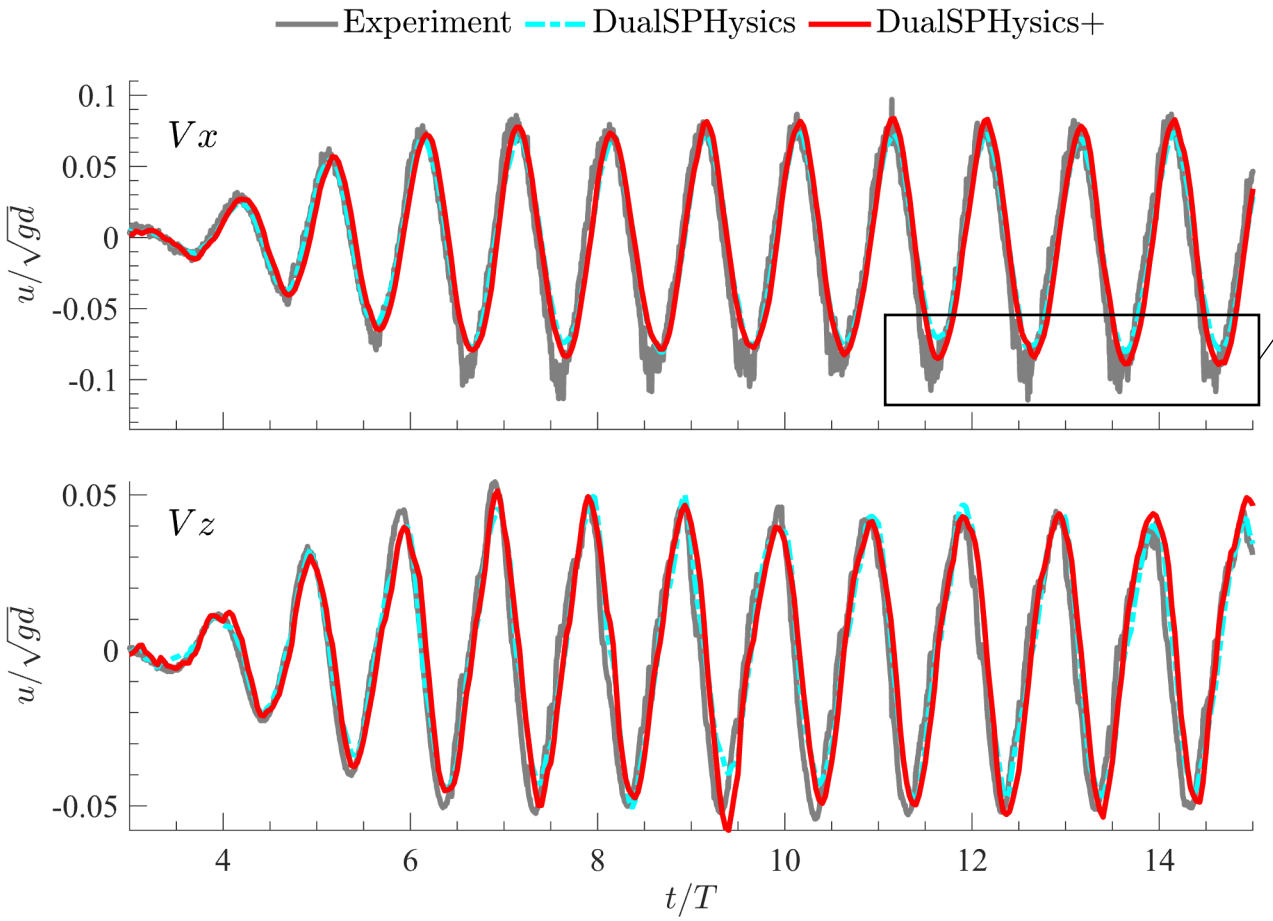


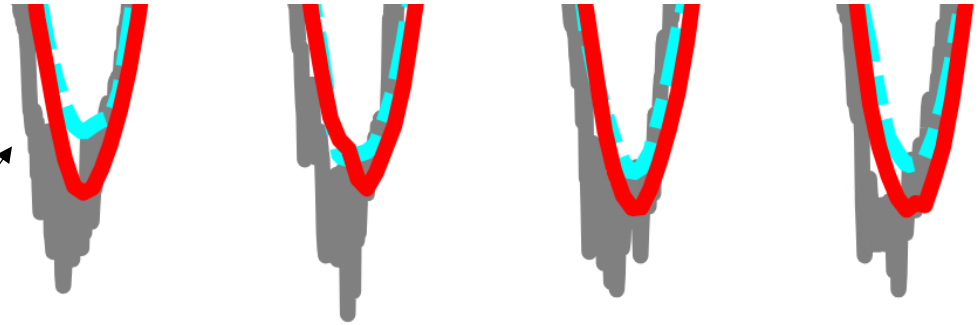


- 多个浪高仪处DualSPHysics+自由液面高程均与实验值吻合良好
- *x*= 7L 处 自由液面衰减：DualSPHysics → 37%； DualSPHysics+ → 8%

2.5 模型验证：空水槽规则波长时序造波问题

波浪长距离传播速度剖面验证





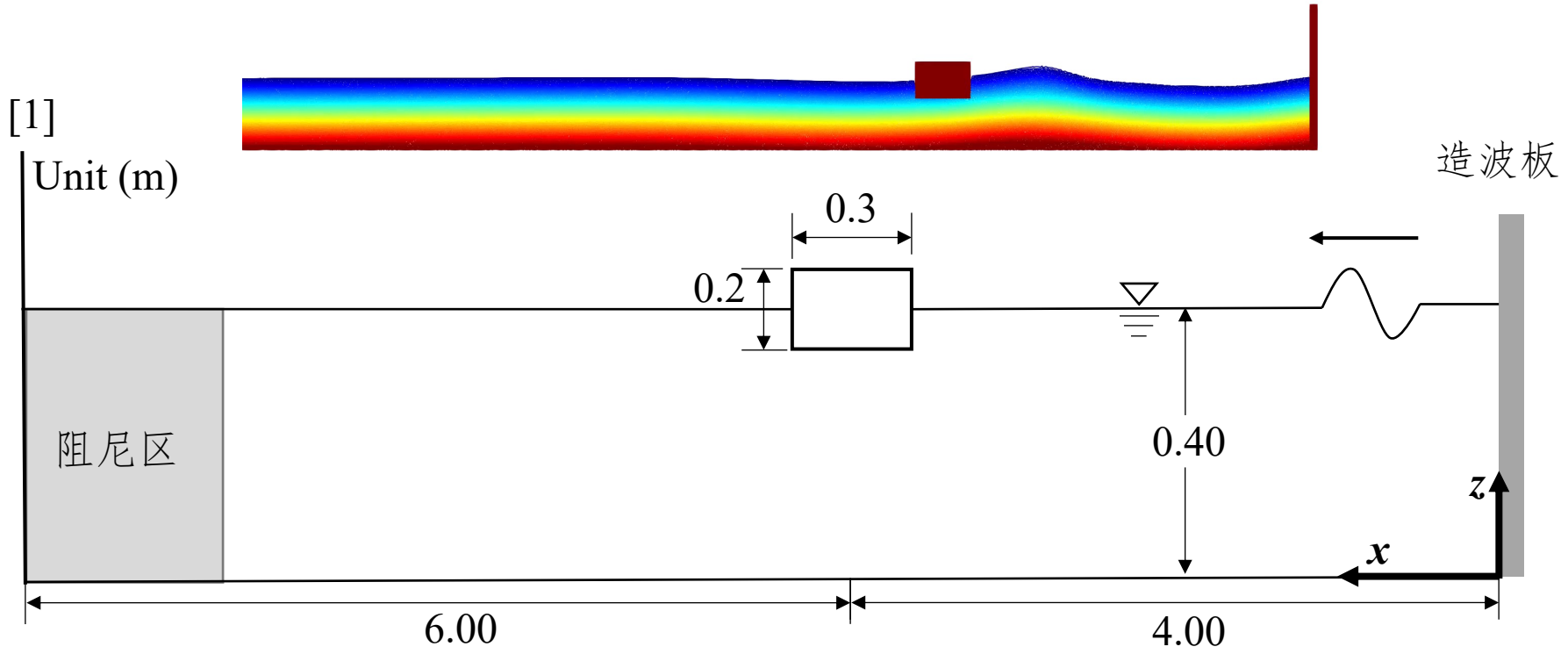
- 长时序模拟下并未出现衰减情况
- DualSPHysics+ 提高了波峰波谷处速度预测精度

2.5 模型验证：波浪与浮体相互作用问题

计算域与数值参数设置

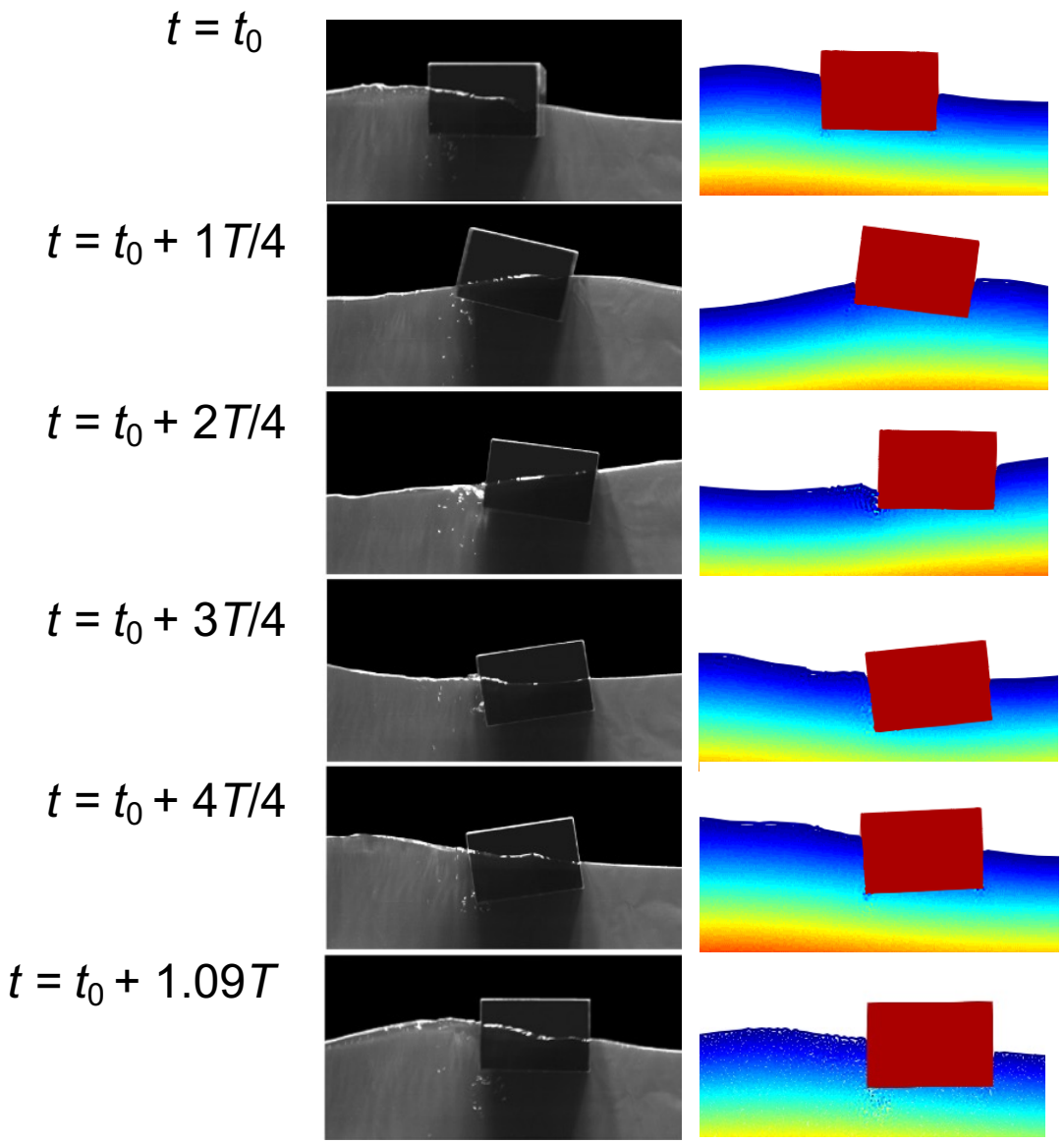
H = 0.1 m, A = 0.05 m, T = 1.5 s, L = 2.83 m

dp = 0.01 m, h/dp = 1.4, C_0 = 20.0 m/s

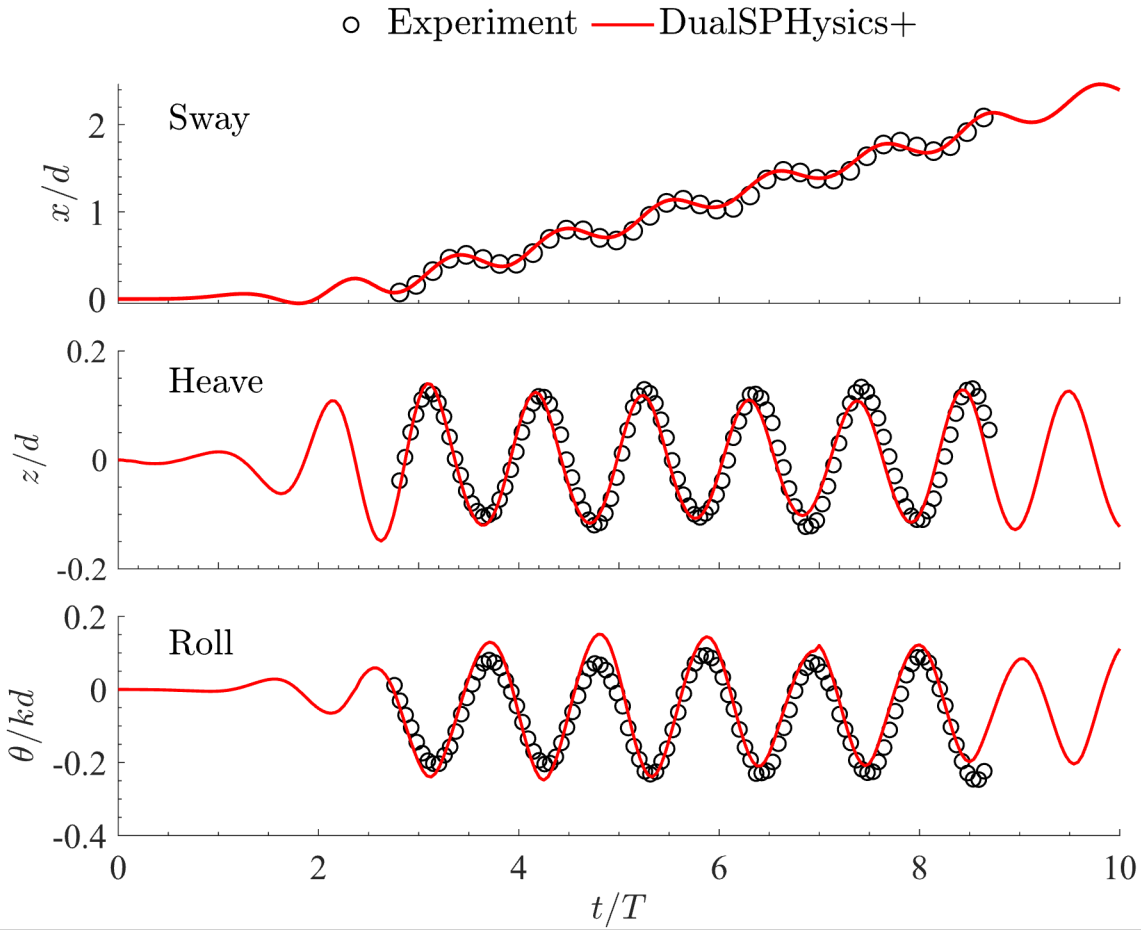


[1] Ren et al. "Nonlinear simulations of wave-induced motions of a freely floating body using WCSPH method." *APOR* (2015)

2.5 模型验证：波浪与浮体相互作用问题



浮体运动响应与实验值对比



- **定量+定性验证 → 模型能准确模拟波浪和浮体相互作用**

2.5 模型验证：强非线性波浪砰击问题

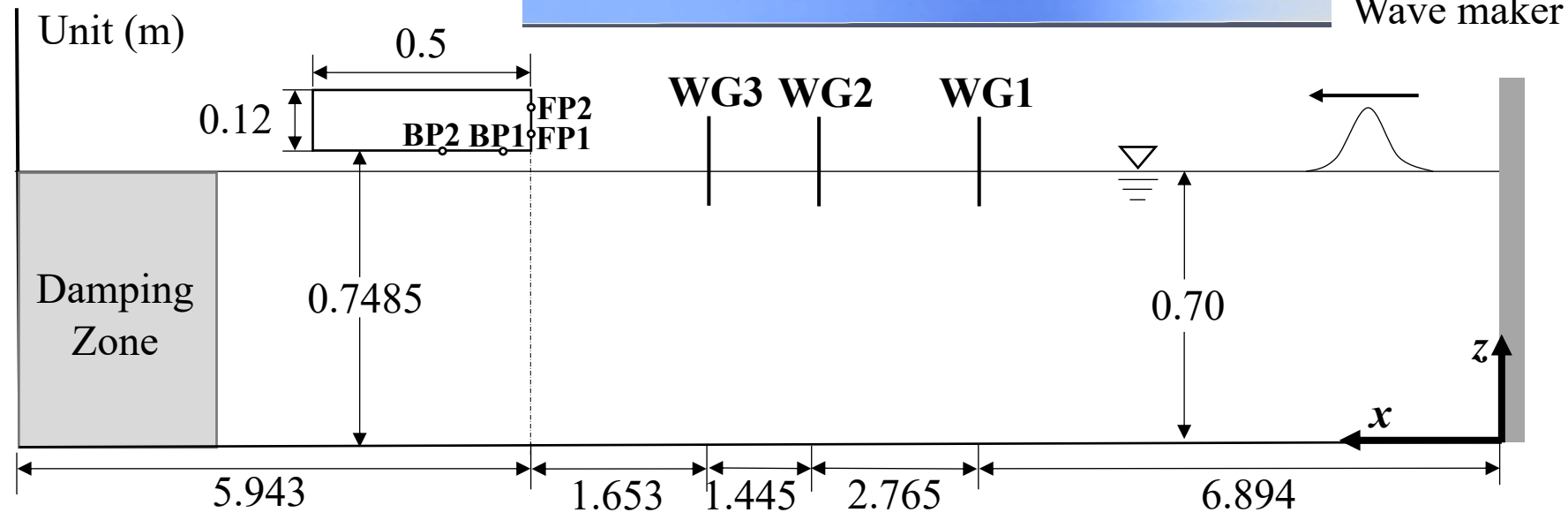
计算域与数值参数设置

d = 0.7 m, H = 0.1 m, A_f = 0.05 m, T = 1.5 s, L = 2.83 m

dp = 0.015 m, h/dp = 2.0, C_0 = 25.0 m/s, C_{CFL} = 0.25

[1]



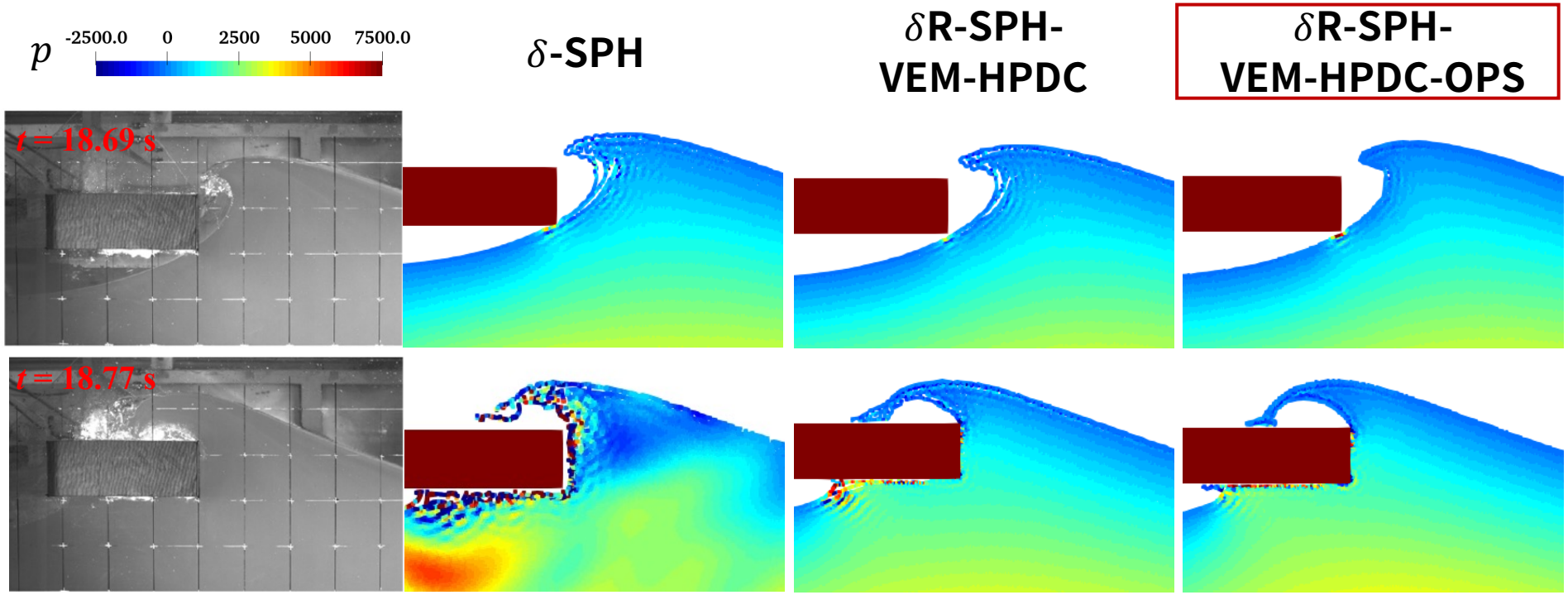


[1] Luo, et al. "Experimental investigation of freak wave actions on a floating platform and effects of the air gap." *OE* (2022)

2.5 模型验证：强非线性波浪砰击问题

不同数值模型压强场以及粒子分布对比验证

本文改进模型



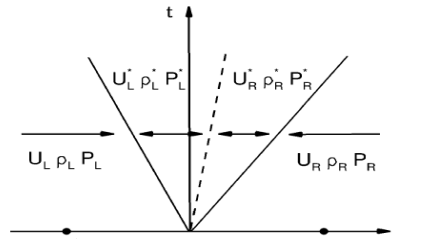
- 清理速度散度误差，压强分布更加光滑
- 自由表面附近粒子分布更加均匀 → 消除非物理聚集和分离现象

2.6 本章小结

流体模型核心改进： 建立了由δR-SPH方法、多策略联合速度散度误差清理方法、粒子位移修正算法组成的改进流体模型，开发DualSPHysics+流体求解器并进行经典算例验证

01 **方法创新：** 优化算法 → 解决传统模型中压力振荡、能量耗散与体积不守恒的固有问题

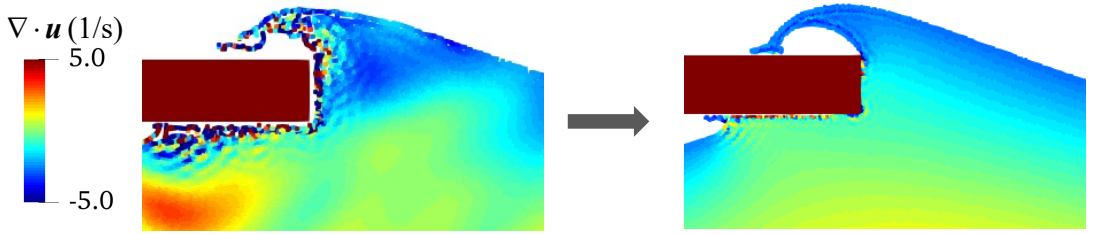
02 **模型开发：** 算法模块化集成 + CPU- GPU异构并行计算 →搭建高精度、高效率三维实际工程数值波浪水槽



$$\frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i \sum_j \mathbf{u}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} V_j + D_i$$

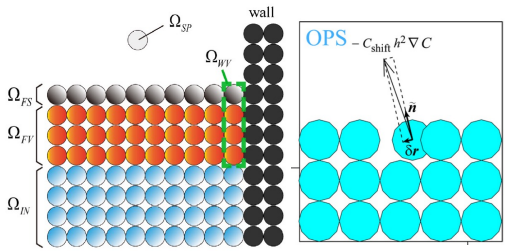
$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt} = -2\sum_j m_j \left(\frac{p^*}{\rho_i \rho_j} \right) \nabla_i W_{ij} + \mathbf{g}$$

低数值耗散(δR-SPH)



$$\frac{D\boldsymbol{u}_a}{Dt} = -2\sum_b m_b \left(\frac{p^*}{\rho_a \rho_b} \right) \nabla_a W_{ab} + \boldsymbol{g} + \boldsymbol{a}_a^{\mathrm{VEM}} - \nabla \psi_a$$

速度散度清理 (VEM) + 双曲/抛物散度清理 (HPDC)



$$-C_{\mathrm{shift}} h^2 \left(\boldsymbol{I} - \tilde{\boldsymbol{n}}_a \otimes \tilde{\boldsymbol{n}}_a \right) \cdot \nabla C_a$$

位移修正 (OPS+VCS)

改进稳定性和守恒性的自由表面流SPH模型

03

二阶精度与零能模态抑制的柔性固体SPH模型

具有二阶精度且抑制零能模态的柔性固体SPH模型

针对传统TLSPH方法存在的离散精度不足、零能模态及应力场数值噪声等问题，提出具有**二阶精度变形模拟**和**零能模态抑制能力**的改进柔性固体SPH模型

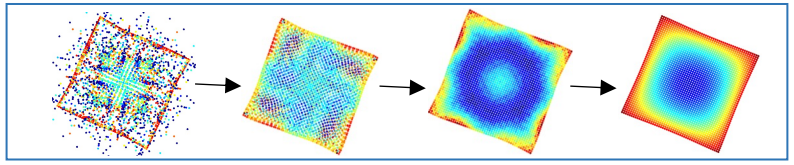
柔性固体 SPH 模型改进

问题：精度不足、零能模态与应力振荡

- 三维二阶精度 TLSPH 离散
- 动态沙漏控制算法
- 黎曼稳定项与应力稳定化

DualSPHysics+固体模型开发

典型固体力学与流固耦合问题验证



DualSPHysics+流体模型

固体求解模块开发

DualSPHysics+流固耦合模型

- 算法改进
- 模型开发
- 模型验证
- 本章小结

3.1 三维二阶精度TLSPH固体模型

三维二阶离散与并行计算优化： 针对 TLSPH 离散精度不足和三维高阶模型显存开销大的问题，构建二阶空间导数算子并优化数据存储，**提升求解精度与计算效率**

➢ 二阶空间导数离散算子构建 (F2nd)

传统一阶精度离散格式 (F1st)

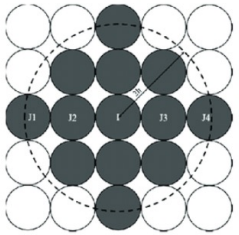
SPH离散

$$\frac{D\boldsymbol{u}_i}{Dt}=\sum_j(\boldsymbol{P}_iL_i+\boldsymbol{P}_jL_j)\nabla_iW_{ij}V_i^0V_j^0$$

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt}=\frac{1}{\rho_0}\nabla_0\cdot\boldsymbol{P}+\boldsymbol{g}$$

泰勒展开

$$\boldsymbol{F}=\nabla_0\boldsymbol{r}$$



二阶精度离散 (F2nd)

$$\frac{D\boldsymbol{u}_i}{Dt}=\frac{1}{\rho_i^0}\sum_j\left(-\boldsymbol{P}_j\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_j^{0,1}\\ \boldsymbol{A}_j^{0,2}\\ \boldsymbol{A}_j^{0,3}\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{M}_{ji}^0+\boldsymbol{P}_i\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_i^{0,1}\\ \boldsymbol{A}_i^{0,2}\\ \boldsymbol{A}_i^{0,3}\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{M}_{ij}^0\right)\frac{\partial W_{ij}^0}{\partial r_{ij}^0}\frac{V_j^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_i^{0,1}\\ \boldsymbol{A}_i^{0,2}\\ \vdots\\ \boldsymbol{A}_i^{0,9}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\left(M_{ij}^{0,1},M_{ij}^{0,1}\right)&\left(M_{ij}^{0,1},M_{ij}^{0,2}\right)&\cdots&\cdots&\left(M_{ij}^{0,1},M_{ij}^{0,9}\right)\\ \left(M_{ij}^{0,2},M_{ij}^{0,1}\right)&\left(M_{ij}^{0,2},M_{ij}^{0,2}\right)&&&\vdots\\ \vdots&&\ddots&&\vdots\\ \vdots&&&\ddots&\vdots\\ \left(M_{ij}^{0,9},M_{ij}^{0,1}\right)&\cdots&&\cdots&\left(M_{ij}^{0,9},M_{ij}^{0,9}\right)\end{bmatrix}^{-1}$$

■ 提高变形梯度与动量方程离散精度

提高计算效率

➢ 数据布局优化与显存压缩策略

属性按粒子交错存储 → 同类属性连续存储

粒子 1	x_1	y_1	z_1	v_{x1}	v_{y1}	v_{z1}
粒子 2	x_2	y_2	z_2	v_{x2}	v_{y2}	v_{z2}
粒子 3	x_3	y_3	z_3	v_{x3}	v_{y3}	v_{z3}
⋮						
粒子 N	x_N	y_N	z_N	v_{xN}	v_{yN}	v_{zN}

x:	x_1	x_2	x_3	⋯	x_N
y:	y_1	y_2	y_3	⋯	y_N
z:	z_1	z_2	z_3	⋯	z_N
v_x:	v_{x1}	v_{x2}	v_{x3}	⋯	v_{xN}
v_y:	v_{y1}	v_{y2}	v_{y3}	⋯	v_{yN}
v_z:	v_{z1}	v_{z2}	v_{z3}	⋯	v_{zN}

数组统一精度策略 → 存储半精度、计算全精度

■ 提高缓存利用率，提升GPU并行效率

■ 合理分配显存，适配千万粒子级大规模并行

3.2 大变形计算中的数值稳定化

零能模态与应力噪声清理： 针对大变形计算中的零能模态与应力振荡问题，提出动态沙漏控制方法并结合改进的黎曼稳定项，**抑制大变形结构零能模态并清理应力噪声**

➢ 无人工参数黎曼稳定项 (RS)

$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt}=\frac{1}{\rho_i^0}\sum_j\left(-\mathbf{P}_j\cdot\begin{bmatrix}\mathbf{A}_j^{0,1}\\ \mathbf{A}_j^{0,2}\\ \mathbf{A}_j^{0,3}\end{bmatrix}\cdot\mathbf{M}_{ji}^0+\mathbf{P}_i\cdot\begin{bmatrix}\mathbf{A}_i^{0,1}\\ \mathbf{A}_i^{0,2}\\ \mathbf{A}_i^{0,3}\end{bmatrix}\cdot\mathbf{M}_{ij}^0\right)\frac{\partial W_{ij}^0}{\partial r_{ij}^0}\frac{V_j^0}{\left|\mathbf{r}_{ij}^0\right|}+\boxed{\mathbf{\Pi}_i^{\mathrm{RS}}}$$

$$\mathbf{\Pi}_i^{\mathrm{RS}}=\sum\mathbf{P}_{ij}^{\mathrm{RS}}\cdot\nabla_0W_{ij}V_j^0,\mathbf{P}_{ij}^{\mathrm{RS}}=\det\left(\mathbf{F}_i\right)\Pi_{ij}^{\mathrm{RS}}\mathbf{F}_i^{-T}$$

$$\Pi_{ij}^{\mathrm{RS}}=\frac{\beta c_0}{\rho_i}\frac{\rho_i+\rho_j}{2}\frac{\mathbf{u}_{ij}\cdot\mathbf{r}_{ij}}{\left|\mathbf{r}_{ij}\right|};\beta=\max\left(0,\frac{u_L-u_R}{\left|u_L-u_R\right|}\right)$$

$$u_L=\left(u_i+\frac{1}{2}\langle\nabla u\rangle_i^c\cdot\mathbf{r}_{ij}\right)\cdot\frac{\mathbf{r}_{ij}}{\left|\mathbf{r}_{ij}\right|},\quad u_R=\left(u_j-\frac{1}{2}\langle\nabla u\rangle_j^c\cdot\mathbf{r}_{ij}\right)\cdot\frac{\mathbf{r}_{ij}}{\left|\mathbf{r}_{ij}\right|}$$

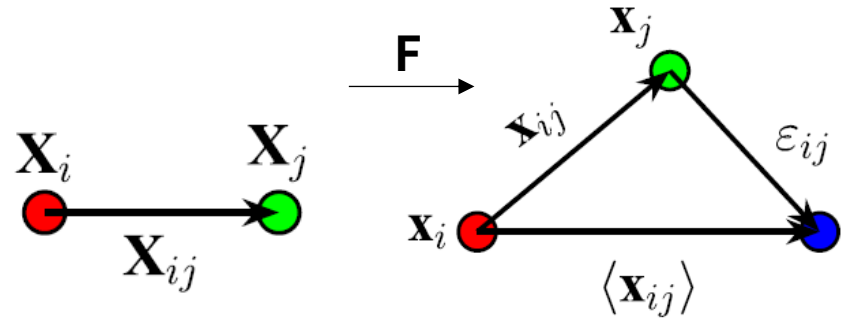
二阶重构形式

$$\langle\nabla u\rangle_i^c=\sum_i u_{ij}\otimes\left(\mathbf{L}_i\cdot\nabla_i w_{ij}V_j\right)$$

■ 结合二阶速度重构，抑制高频应力噪声

提升数值稳定

➢ 动态沙漏控制算法 (DHGC)



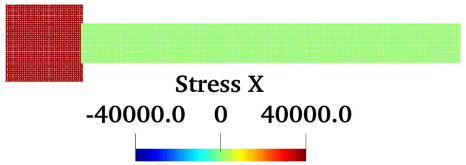
$$f_i^{\mathrm{HG}}=-\frac{1}{2}\sum_j\boxed{\frac{\alpha_i^{\,k}+\alpha_j^{\,k}}{2}}\frac{V_{0i}V_{0j}W_{0ij}}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\cdot\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\left(E_i\delta_{ij}^a+E_j\delta_{ji}^b\right)\frac{\boldsymbol{r}_{ij}}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}\right|}\qquad\boxed{\alpha_i^{\,k}=\frac{\left|\epsilon_i\right|^k}{\left|\epsilon_i\right|^{k-N}}}$$

传统沙漏控制： 固定经验系数 → **动态沙漏控制：** 自适应调整系数

■ 自适应抑制零能模态，避免过量数值耗散

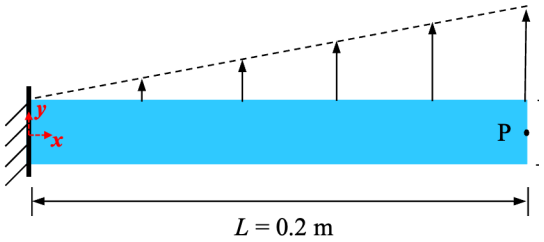
3.3 模型验证：线弹性变形问题

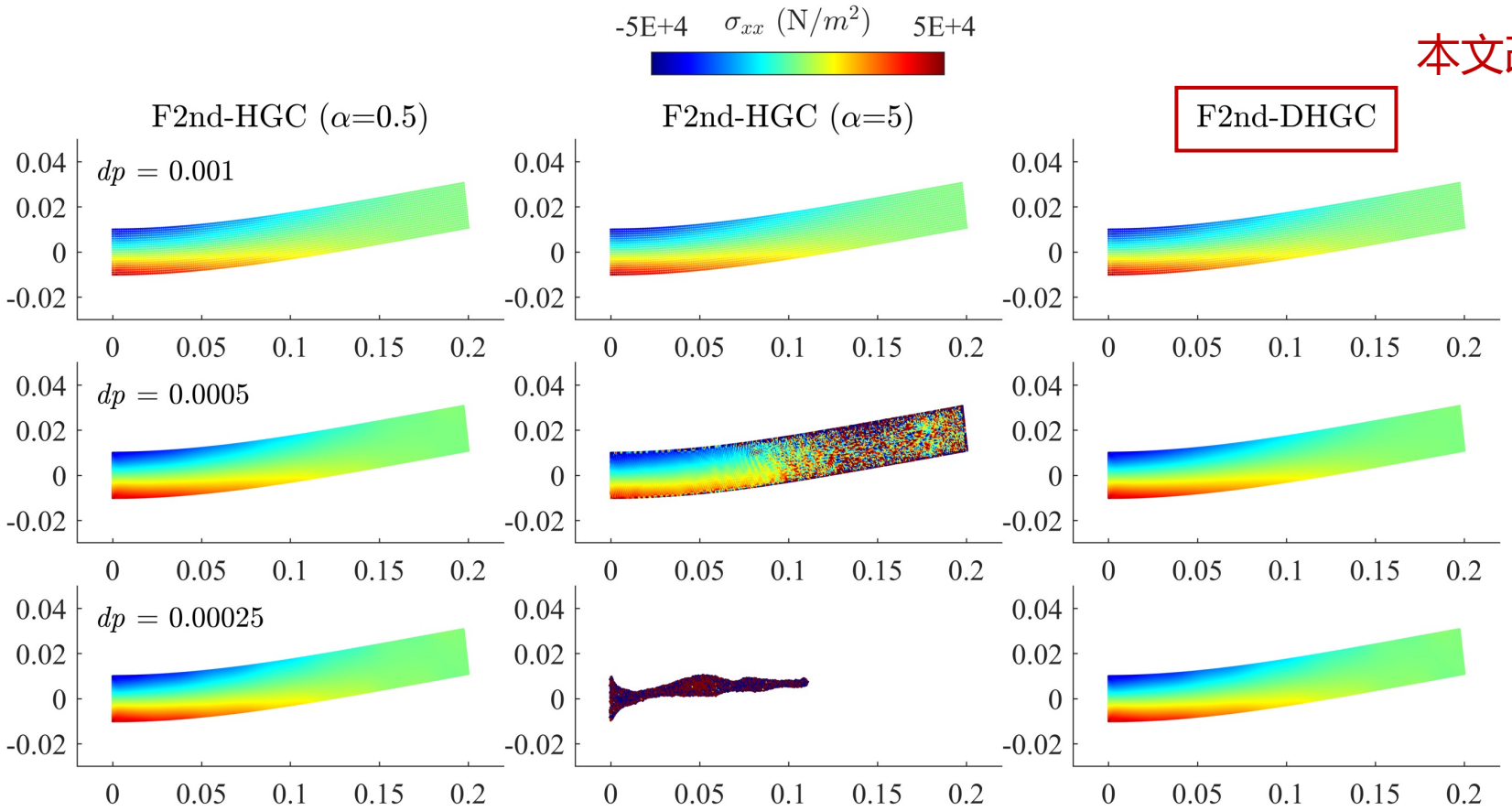
不同模型应力场结果对比



$$\begin{cases} u_y(x) = \xi c_s \dfrac{f(x)}{f(L)} \\ f(x) = (\cos kL + \cosh kL)(\cosh kx - \cos kx) + (\sin kL - \sinh kL)(\sinh kx - \sin kx) \end{cases}$$

E = 2 Mpa, ρ = 1000 kg/m^3 v = 0.3975



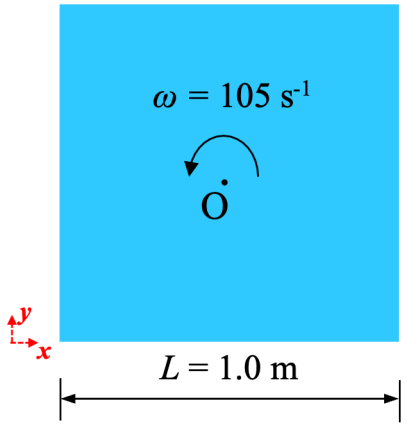


本文改进模型

- **HGC (α = 5)** → 过度控制 →结构响应过度刚化
- **DHGC** → 依照沙漏模式严重程度动态调整

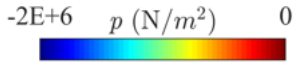
3.3 模型验证：连续拉应力作用下变形问题

不同模型粒子分布压力场结果对比

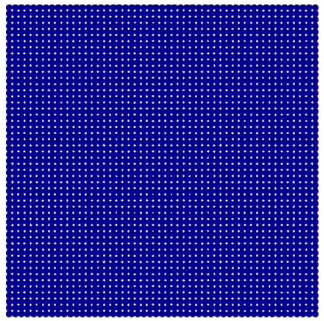


dp = 0.01 m, ρ = 1000 kg/m^3

E = 2 Mpa, v = 0.49

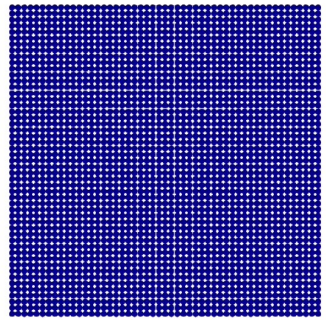


DualSPHysics





DualSPHysics+

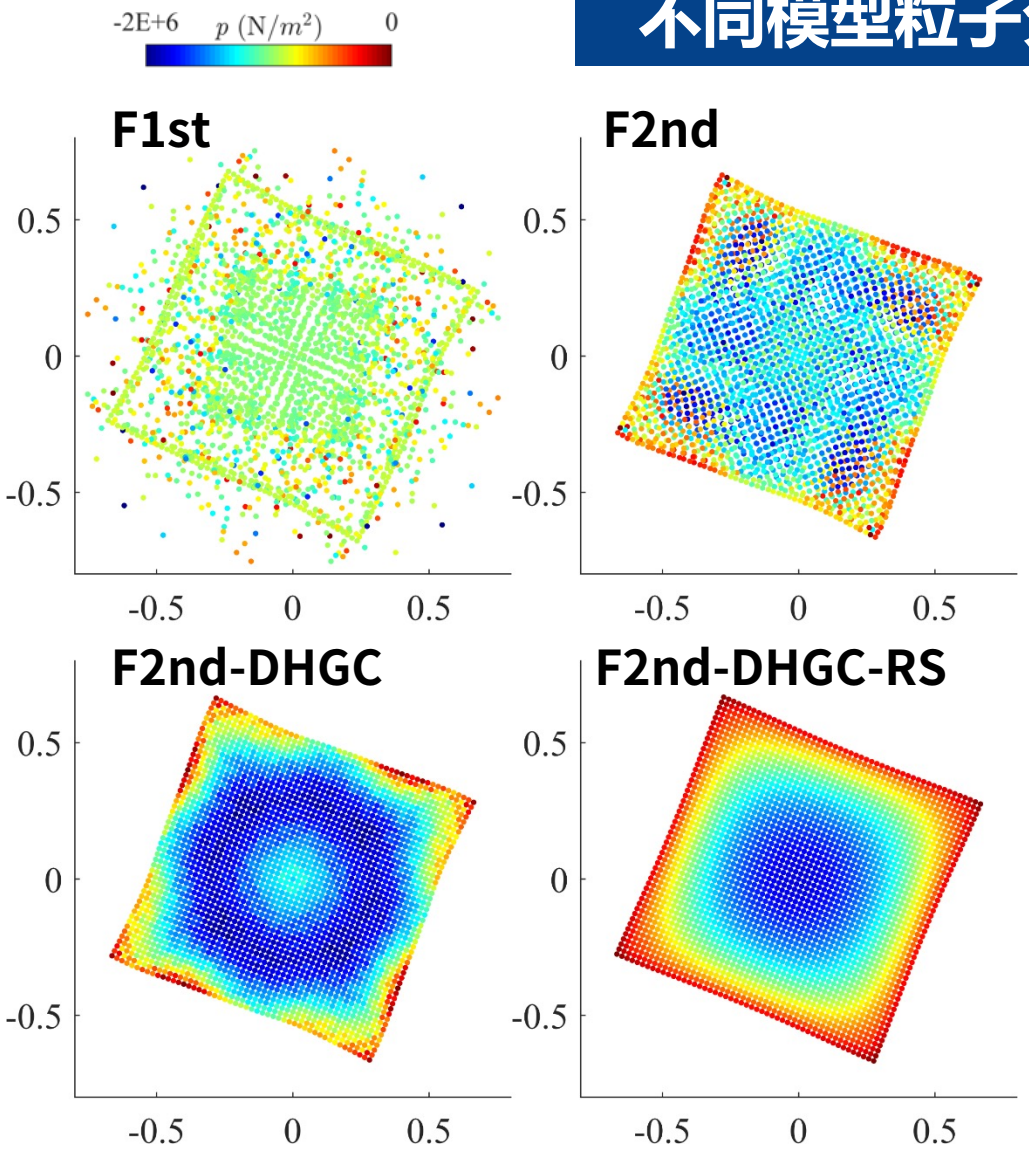




- **DualSPHysics+提高计算精度、降低数值噪声，并有效抑制沙漏模态**

3.3 模型验证：连续拉应力作用下变形问题

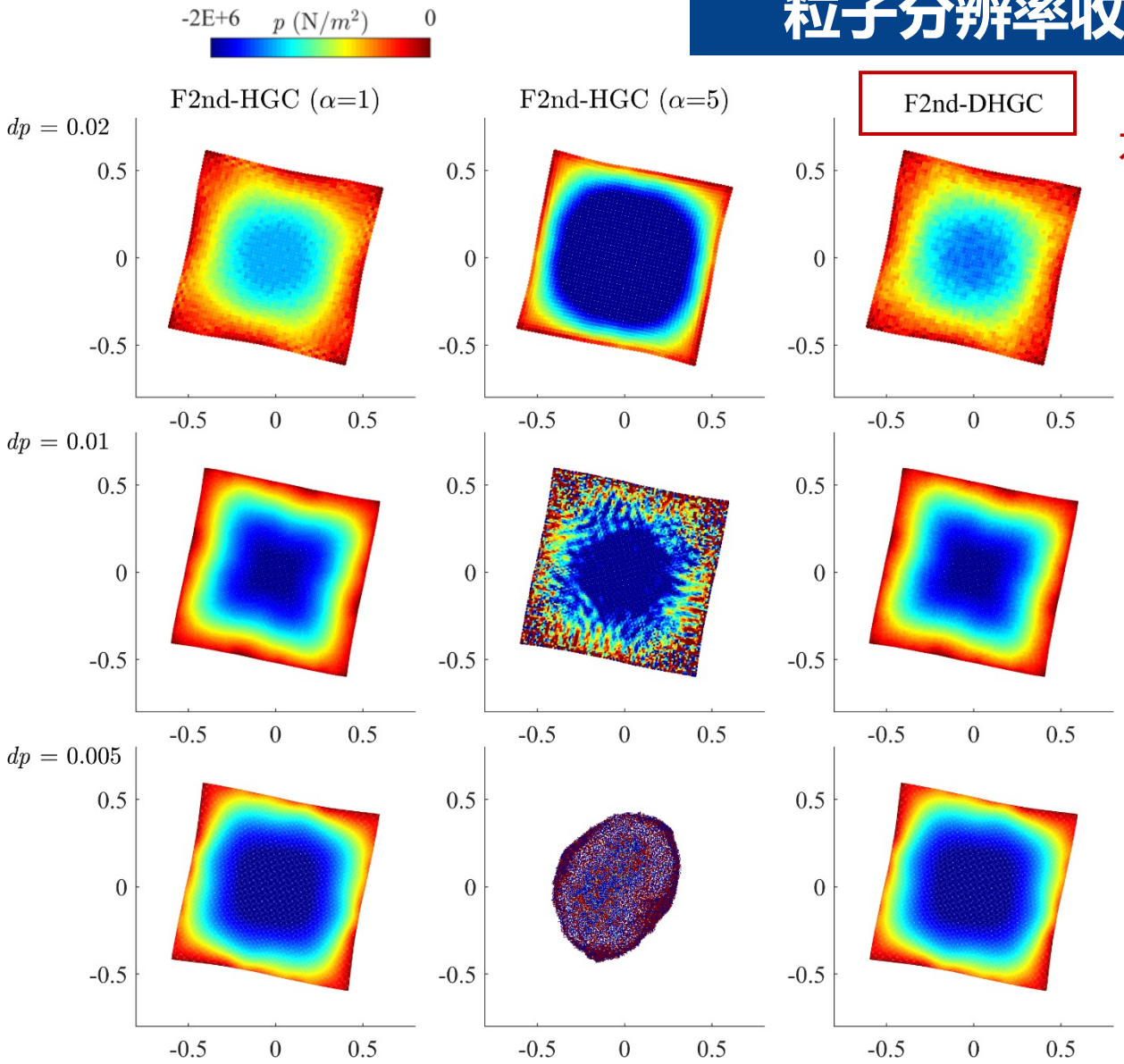
不同模型粒子分布压力场结果对比



- **F2nd** → 提高求解精度
- **DHGC** → 抑制沙漏模式
- **RS** → 降低结构应力噪音

3.3 模型验证：连续拉应力作用下变形问题

粒子分辨率收敛性测试

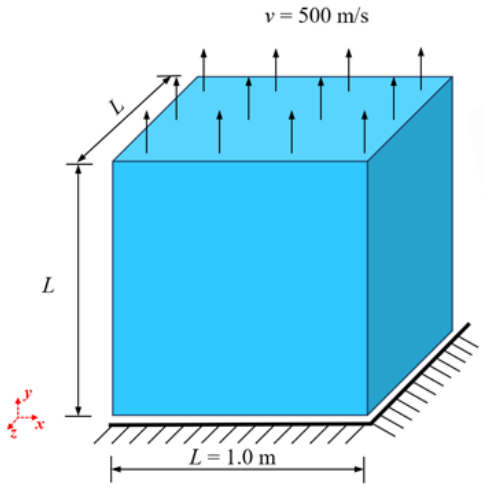


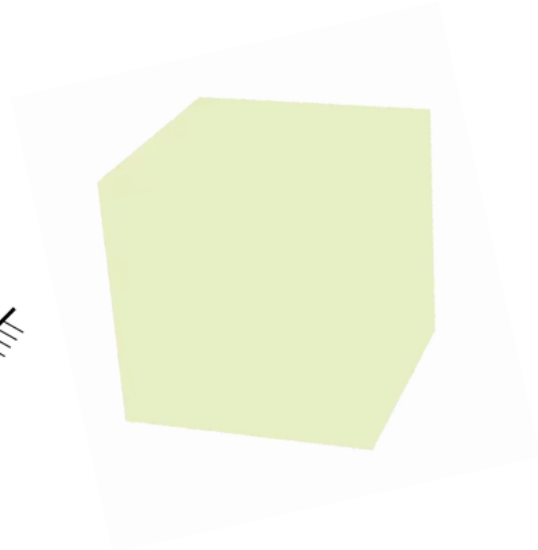
本文改进模型

- **HGC:当 *dp* = 0.01, 0.005时， 出现明显的非物理应力波动 (α = 5)**
- **DHGC: 具备良好分辨率独立性**

3.3 模型验证：三维瞬时外力作用拉伸大变形问题

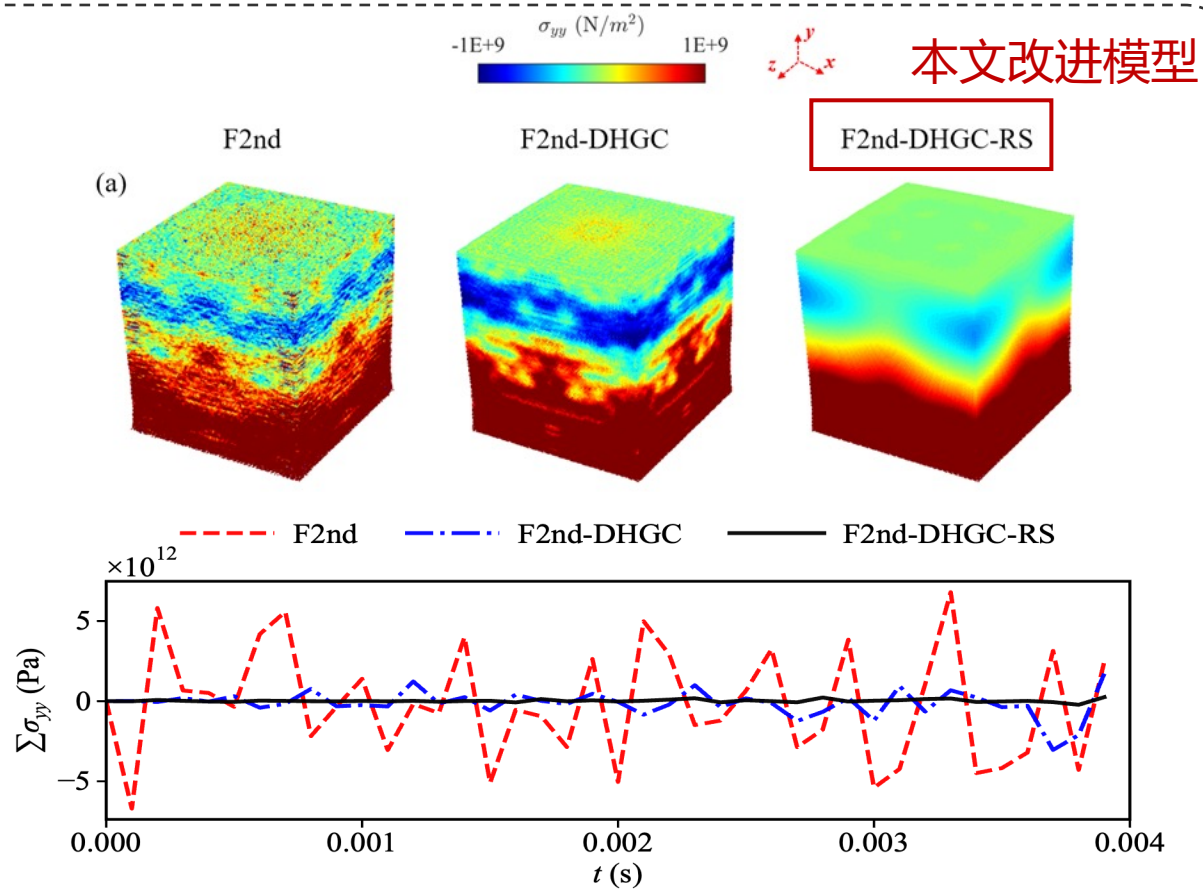
不同模型粒子分布应力场结果对比





dp = 0.01 m, ρ = 7000 kg/m^3

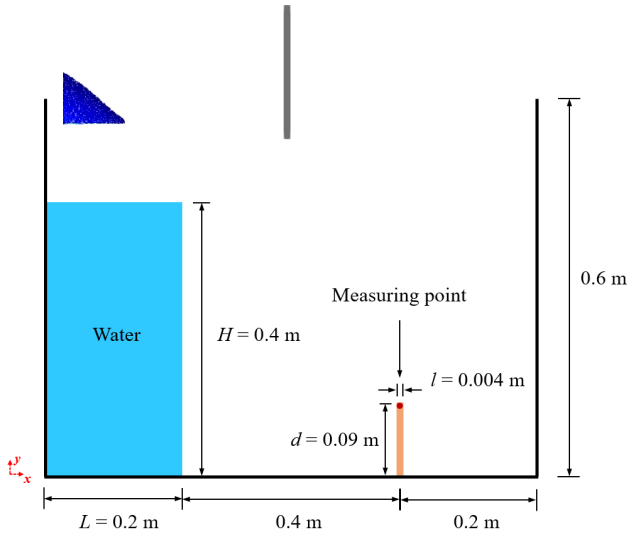
E = 210 Gpa, v = 0.3



- **DHGC** → 抑制沙漏模式；**RS** → 降低结构应力噪音
- **DHGC+RS** → 轴向应力振荡降低**90%**

3.3 模型验证：单体柔性结构流固耦合问题

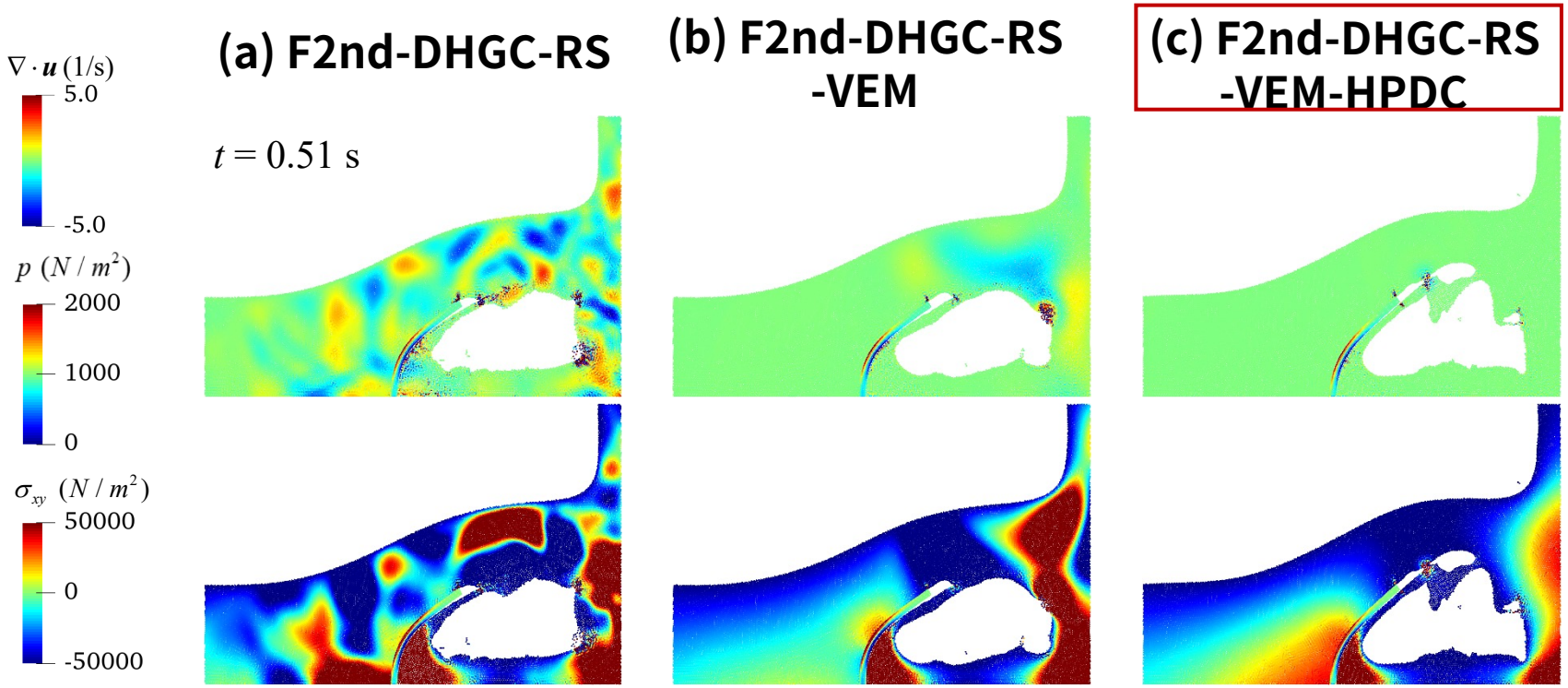
不同模型流体压强场与结构应力场结果对比



dp = 0.005 m E = 12 Mpa

ρ = 1161.5 kg/m^3 v = 0.4

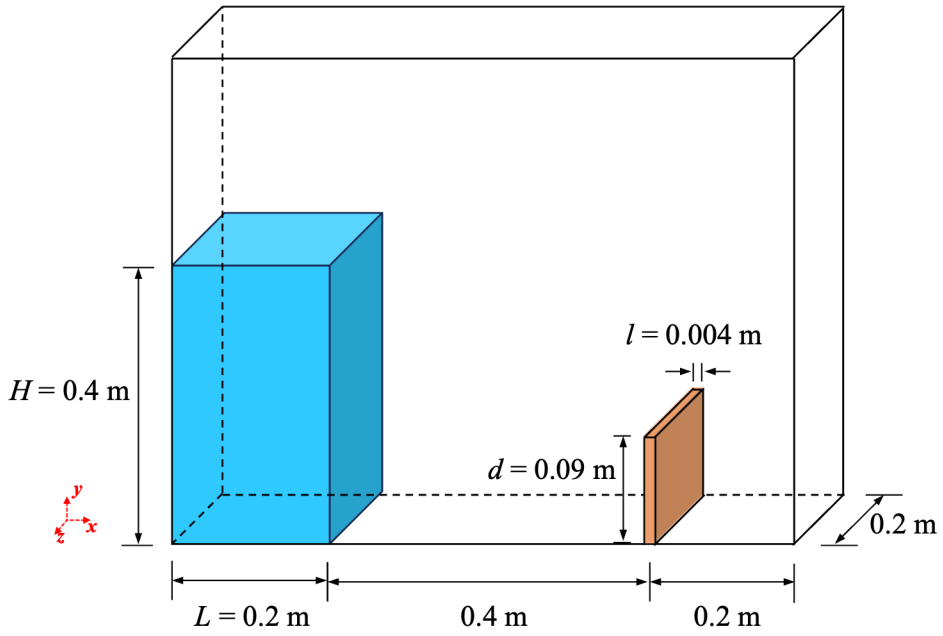
本文改进模型

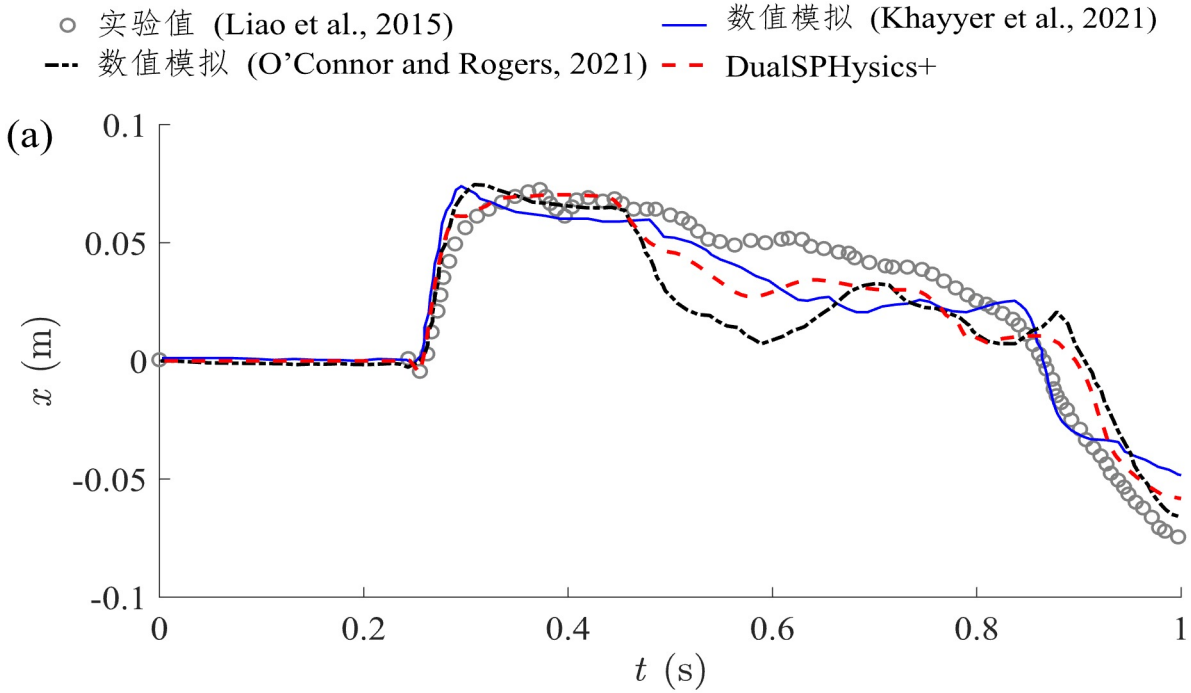


■ **VEM, HPDC** → 减少速度散度误差以及减少压强场噪音 → 提高流固耦合模拟精度

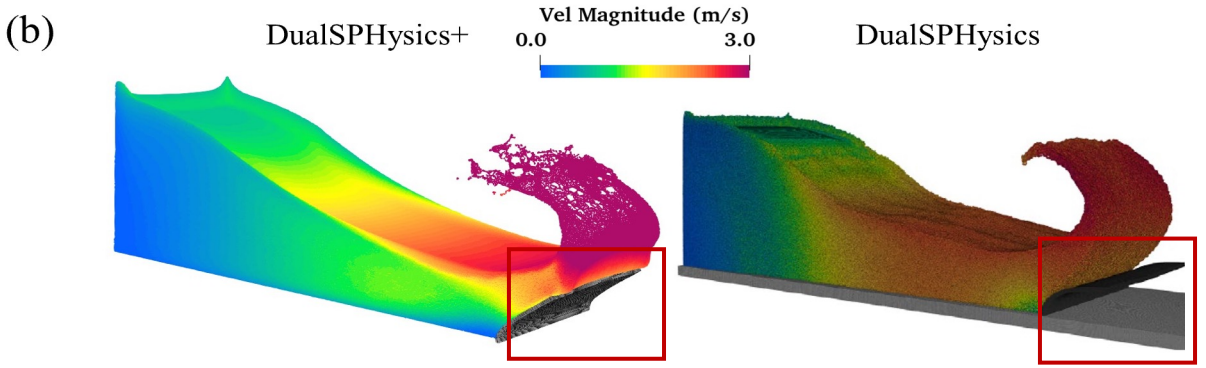
3.3 模型验证：单体柔性结构流固耦合问题

不同数值模型柔性板端位移对比





dp = 0.001 m, *t* = 1 s, ***N*** **≈ 24,000,000**



- 避免非物理的流体固体分流，提高固体的位移和变形预测精度

3.4 本章小结

固体模型核心改进： 建立三维二阶精度 TLSPH 模型，提出动态沙漏控制算法并发展黎曼稳定项，开发 DualSPHysics+ 柔性固体求解模块并完成典型算例验证

01 **方法创新：** 优化算法 → 提升大变形模拟精度并抑制零能模态与应力振荡

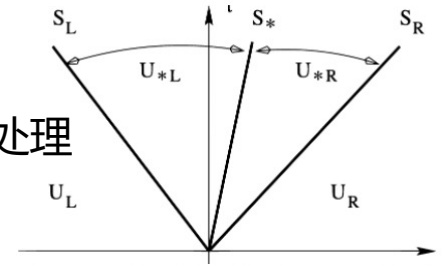
02 **模型开发：** 数据布局优化与显存压缩策略 → 实现千万粒子数量级别高效模拟

$$\frac{D\boldsymbol{u}_i}{Dt}=\frac{1}{\rho_i^0}\sum_j\left(-\boldsymbol{P}_j\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_j^{0,1}\\ \boldsymbol{A}_j^{0,2}\\ \boldsymbol{A}_j^{0,3}\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{M}_{ji}^0+\boldsymbol{P}_i\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_i^{0,1}\\ \boldsymbol{A}_i^{0,2}\\ \boldsymbol{A}_j^{0,3}\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{M}_{ij}^0\right)\frac{\partial W_{ij}^0}{\partial r_{ij}^0}\frac{V_j^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_i^{0,1}\\ \boldsymbol{A}_i^{0,2}\\ \vdots\\ \boldsymbol{A}_i^{0,9}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\left(M_{ij}^{0,1},M_{ij}^{0,1}\right)&\left(M_{ij}^{0,1},M_{ij}^{0,2}\right)&\cdots&\left(M_{ij}^{0,1},M_{ij}^{0,9}\right)\\ \left(M_{ij}^{0,2},M_{ij}^{0,1}\right)&\left(M_{ij}^{0,2},M_{ij}^{0,2}\right)&&\vdots\\ \vdots&&\ddots&\vdots\\ \left(M_{ij}^{0,9},M_{ij}^{0,1}\right)&\cdots&\cdots&\left(M_{ij}^{0,9},M_{ij}^{0,9}\right)\end{bmatrix}^{-1}$$

二阶精度离散 (F2nd)

间断处理



$$\Pi_{ij}^{RS}=\frac{\beta c_0}{\rho_i}\frac{\rho_i+\rho_j}{2}\frac{\boldsymbol{u}_{ij}\cdot\boldsymbol{r}_{ij}}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}\right|};\beta=\max\left(0,\frac{u_L-u_R}{\left|u_L-u_R\right|}\right)$$

黎曼耗散项 (RS)

传统沙漏控制算法

$$f_i^{HG}=-\frac{1}{2}\alpha\sum_j\frac{V_{0i}V_{0j}W_{0ij}}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\cdot\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\left(E_i\delta_{ij}^i+E_j\delta_{ji}^j\right)\frac{\boldsymbol{r}_{ij}}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}\right|}$$

自适应调整技术

$$f_i^{HG}=-\frac{1}{2}\sum_j\frac{\alpha_i^k+\alpha_j^k}{2}\frac{V_{0i}V_{0j}W_{0ij}}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\cdot\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\left(E_i\delta_{ij}^a+E_j\delta_{ji}^b\right)\frac{\boldsymbol{r}_{ij}}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}\right|}$$

$$\alpha_i^k=\frac{\left|\epsilon_i\right|^k}{\left|\epsilon_i\right|^{k-N}}$$

动态沙漏控制算法 (DHGC)

具有二阶精度且抑制零能模态的柔性固体 SPH 模型

04

开发柔性多浮体阵列流固耦合模型并开展实验验证

柔性多浮体阵列流固耦合模型与实验验证

针对刚柔界面协调与载荷传递难题，提出刚体–柔性体双向动量交换算法，耦合铰接与系泊动力学，建立三维 DualSPHysics+柔性多浮体阵列流固耦合模型并开展实验验证。

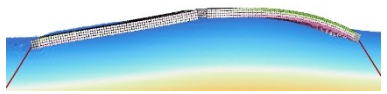
柔性多浮体阵列流固耦合模型开发

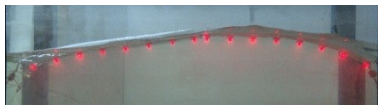
问题：缺乏考虑阵列柔性的流固耦合模型

- 刚–柔界面双向动量交换
- 刚体动力学、多体铰接模型
- 系泊动力学模型

DualSPHysics+流固耦合模型

规则波与孤立波水槽实验验证





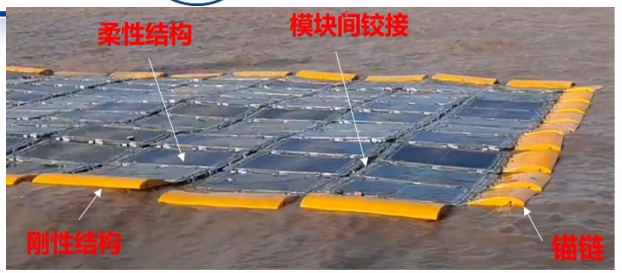
DualSPHysics+ 流体/固体模型

刚柔界面耦合 + 铰接 + 系泊约束

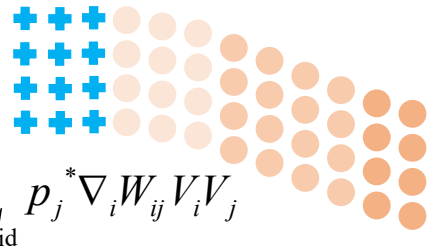
DualSPHysics+ 柔性多浮体阵列流固耦合模型

- 算法提出
- 模型开发
- 模型验证
- 本章小结

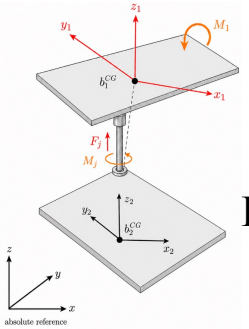
4.0 柔性多浮体阵列流固耦合模型：概要



➢ 流固耦合模型

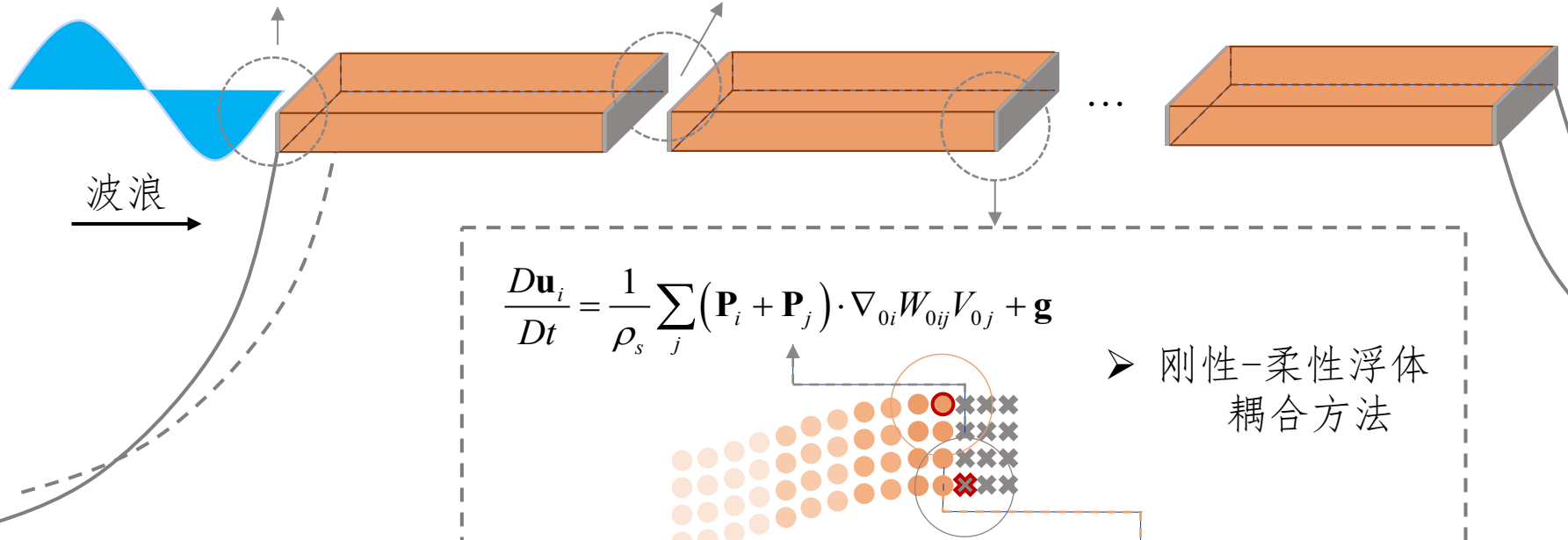


$$\mathbf{f}_i^{FS} = \frac{1}{m_i}\sum_{j\in\text{fluid}} p_j^{*}\nabla_i W_{ij} V_i V_j$$

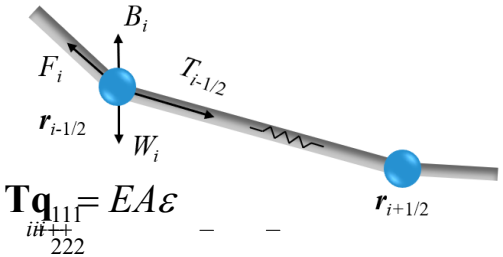


➢ 多刚体铰接模型

$$\mathbf{F}_j = \sum_{a\in\mathrm{J}}\left(\lambda_{a,n}\mathbf{D}_{a,n} + \lambda_{a,u}\mathbf{D}_{a,u} + \lambda_{a,w}\mathbf{D}_{a,w}\right)$$



➢ 集中质量点法



$$\mathbf{T}\mathbf{q}_{iii+1+1} = EA\varepsilon$$

$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt} = \frac{1}{\rho_s}\sum_j\left(\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_j\right)\cdot\nabla_{0i}W_{0ij}V_{0j} + \mathbf{g}$$

➢ 刚性-柔性浮体耦合方法

$$I\frac{D\boldsymbol{\Omega}}{Dt} = \sum_j m_j(\mathbf{r}_j - \mathbf{R}_0)\times\mathbf{f}_j$$

$$M\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \sum_j m_j\mathbf{f}_j$$

流体粒子

柔性浮体粒子

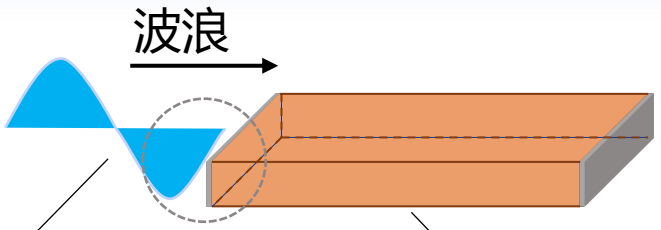
刚性浮体粒子

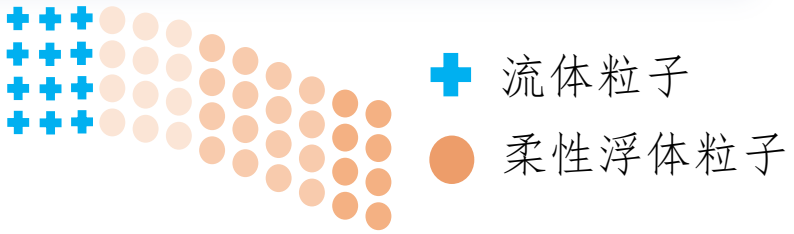
4.1 波浪和结构物耦合作用模型

双向流固耦合： 基于改进的流体与柔性固体 SPH 模型，建立波浪–柔性结构双向弱耦合框架，实现流体运动与结构变形的流固耦合求解



概化模型





$$\mathbf{f}_i^{FS} = \sum_{j\in\text{fluid}} p^* \nabla_i W_{ij} V_i V_j$$

■ 改进的流体模型 (研究内容一)

黎曼求解器

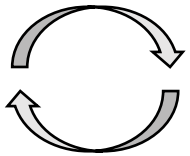
$$\frac{D\boldsymbol{u}_i}{Dt} = -2\sum_j m_j \left(\frac{p^*}{\rho_i\rho_j}\right)\nabla_i W_{ij} + \boldsymbol{g} + \boldsymbol{a}_i^{\text{VEM}} - \nabla\psi_i$$

速度散度误差清理

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i\sum_j \boldsymbol{u}_{ij}\cdot\nabla_i W_{ij} V_j + D_i$$

密度耗散项

流固耦合



■ 改进的固体模型 (研究内容二)

$$\frac{D\boldsymbol{u}_i}{Dt} = \frac{1}{\rho_i^0}\sum_j \left(-\boldsymbol{P}_j\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_j^{0,1}\\ \boldsymbol{A}_j^{0,2}\\ \boldsymbol{A}_j^{0,3}\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{M}_{ji}^0 + \boldsymbol{P}_i\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_i^{0,1}\\ \boldsymbol{A}_i^{0,2}\\ \boldsymbol{A}_i^{0,3}\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{M}_{ij}^0\right)\frac{\partial W_{ij}^0}{\partial r_{ij}^0}\frac{V_j^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_i^{0,1}\\ \boldsymbol{A}_i^{0,2}\\ \vdots\\ \boldsymbol{A}_i^{0,9}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\left(M_{ij}^{0,1},M_{ij}^{0,1}\right) & \left(M_{ij}^{0,1},M_{ij}^{0,2}\right) & \cdots & \left(M_{ij}^{0,1},M_{ij}^{0,9}\right)\\ \left(M_{ij}^{0,2},M_{ij}^{0,1}\right) & \left(M_{ij}^{0,2},M_{ij}^{0,2}\right) & & \vdots\\ \vdots & & \ddots & \vdots\\ \left(M_{ij}^{0,9},M_{ij}^{0,1}\right) & \cdots & \cdots & \left(M_{ij}^{0,9},M_{ij}^{0,9}\right)\end{bmatrix}^{-1}$$

二阶精度

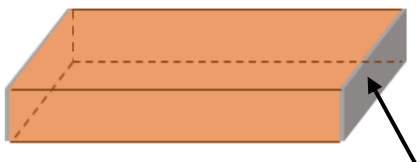
$$\boldsymbol{M}_{ij}^0 = \left[\frac{x_{ij}^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\ \frac{y_{ij}^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\ \frac{z_{ij}^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\ \frac{1}{d_0}\frac{x_{ij}^0x_{ij}^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\ \frac{1}{d_0}\frac{y_{ij}^0y_{ij}^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\ \frac{1}{d_0}\frac{z_{ij}^0z_{ij}^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\ \frac{1}{d_0}\frac{x_{ij}^0y_{ij}^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\ \frac{1}{d_0}\frac{x_{ij}^0z_{ij}^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\ \frac{1}{d_0}\frac{y_{ij}^0z_{ij}^0}{\left|\boldsymbol{r}_{ij}^0\right|}\right]^T$$

4.2 刚体-柔性体界面动量交换算法

界面双向动量交换： 针对柔性主体与刚性连接件材料和动力学差异，提出界面双向动量交换方法，**实现刚柔界面运动、力和力矩的一致传递**

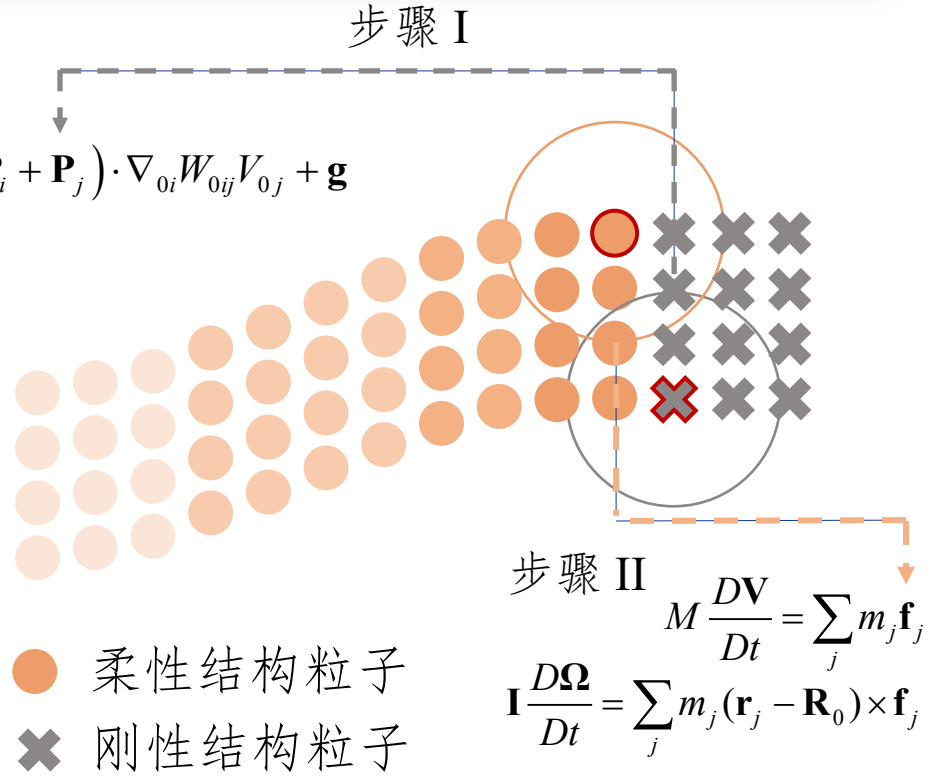


概化模型



数值离散

$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt}=\frac{1}{\rho_s}\sum_j\left(\mathbf{P}_i+\mathbf{P}_j\right)\cdot\nabla_{0i}W_{0ij}V_{0j}+\mathbf{g}$$



$$M\frac{D\mathbf{V}}{Dt}=\sum_j m_j\mathbf{f}_j$$

$$\mathbf{I}\frac{D\boldsymbol{\Omega}}{Dt}=\sum_j m_j(\mathbf{r}_j-\mathbf{R}_0)\times\mathbf{f}_j$$

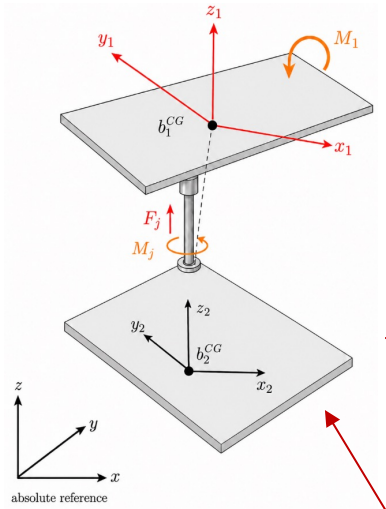
1. **计算弹性结构PK1 应力**
2. **PK1 → 作为外力施加到刚性结构粒子**

(PK1：第一皮奥拉应力)

4.3 模块间铰接与系泊动力学模型

铰接与系泊动力学： 针对多模块阵列中的连接约束与系泊响应，耦合铰接动力学和系泊动力学模型，实现**模块间铰接约束与系泊载荷的同步求解**

➢ 多模块铰接约束模型

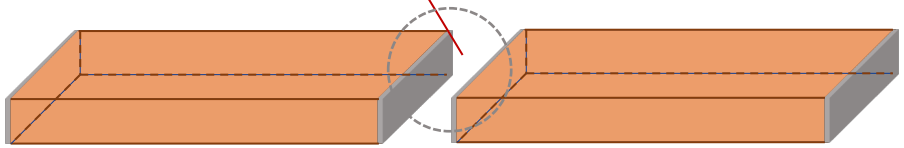


CHRONO

$$\mathbf{q}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Theta}^T & \mathbf{P}^T\end{bmatrix}^T \qquad \frac{\mathrm{d}\mathbf{q}}{\mathrm{d}t}=\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{V}$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\frac{\mathrm{d}\mathbf{V}}{\mathrm{d}t}=\mathbf{F}(\mathbf{q},\mathbf{V},t)+\mathbf{F}_{\mathrm{j}}$$

$$\mathbf{F}_j=\sum_{a\in\mathcal{J}}\left(\lambda_{a,n}\mathbf{D}_{a,n}+\lambda_{a,u}\mathbf{D}_{a,u}+\lambda_{a,w}\mathbf{D}_{a,w}\right)$$



■ 多体动力学 → 基于约束方程的铰接耦合

➢ 系泊动力学模型

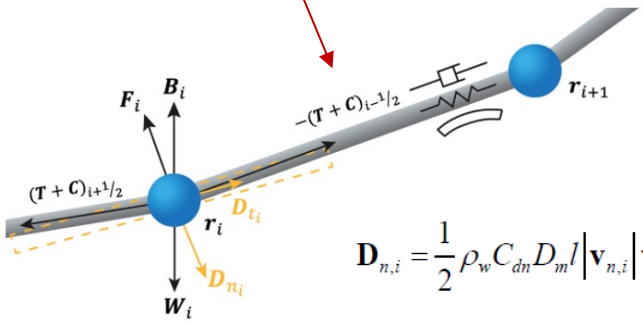


MoorDynPlus

$$\mathbf{C}_{t+\frac{1}{2}}=C_{\mathrm{int}}A\dot{\varepsilon}_{t+\frac{1}{2}}\mathbf{q}_{t+\frac{1}{2}}$$

$$\mathbf{T}_{t+\frac{1}{2}}=EA\varepsilon_{t+\frac{1}{2}}\mathbf{q}_{t+\frac{1}{2}}$$

$$\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}=\frac{\left\|\mathbf{r}_{i+1}-\mathbf{r}_i\right\|}{l_0}-1$$



$$\mathbf{D}_{n,i}=\frac{1}{2}\rho_w C_{dn}D_m l\left|\mathbf{v}_{n,i}\right|\mathbf{v}_{n,i},\qquad \mathbf{D}_{t,i}=\frac{1}{2}\rho_w C_{dt}D_m l\left|\mathbf{v}_{t,i}\right|\mathbf{v}_{t,i}$$

■ 集中质量法 → 基于离散节点的力平衡求解

4.4 缩尺水槽模型实验

柔性双模块浮体铰接模型：开展规则波与孤立波水槽试验，测量自由液面、结构运动和变形及系泊张力





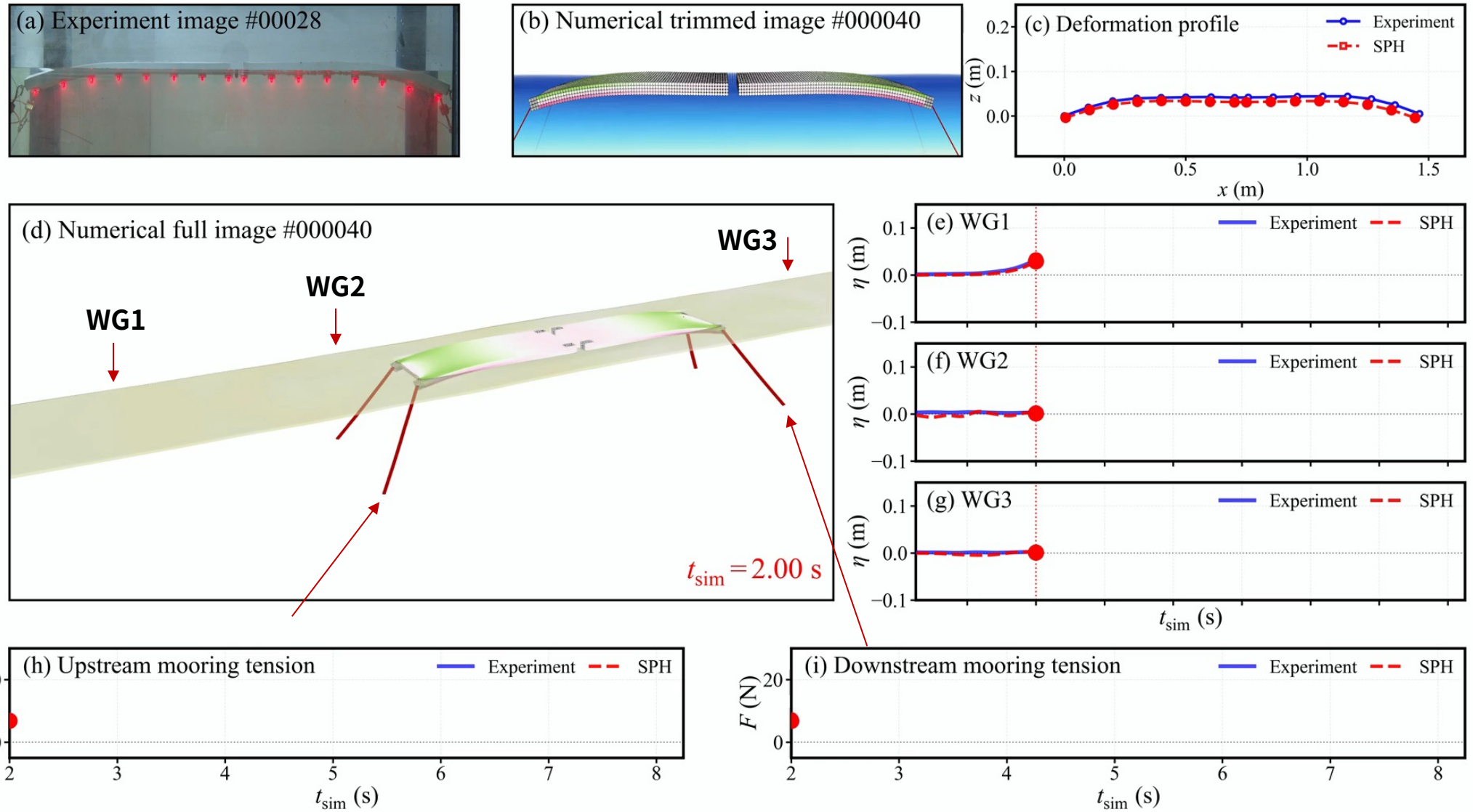






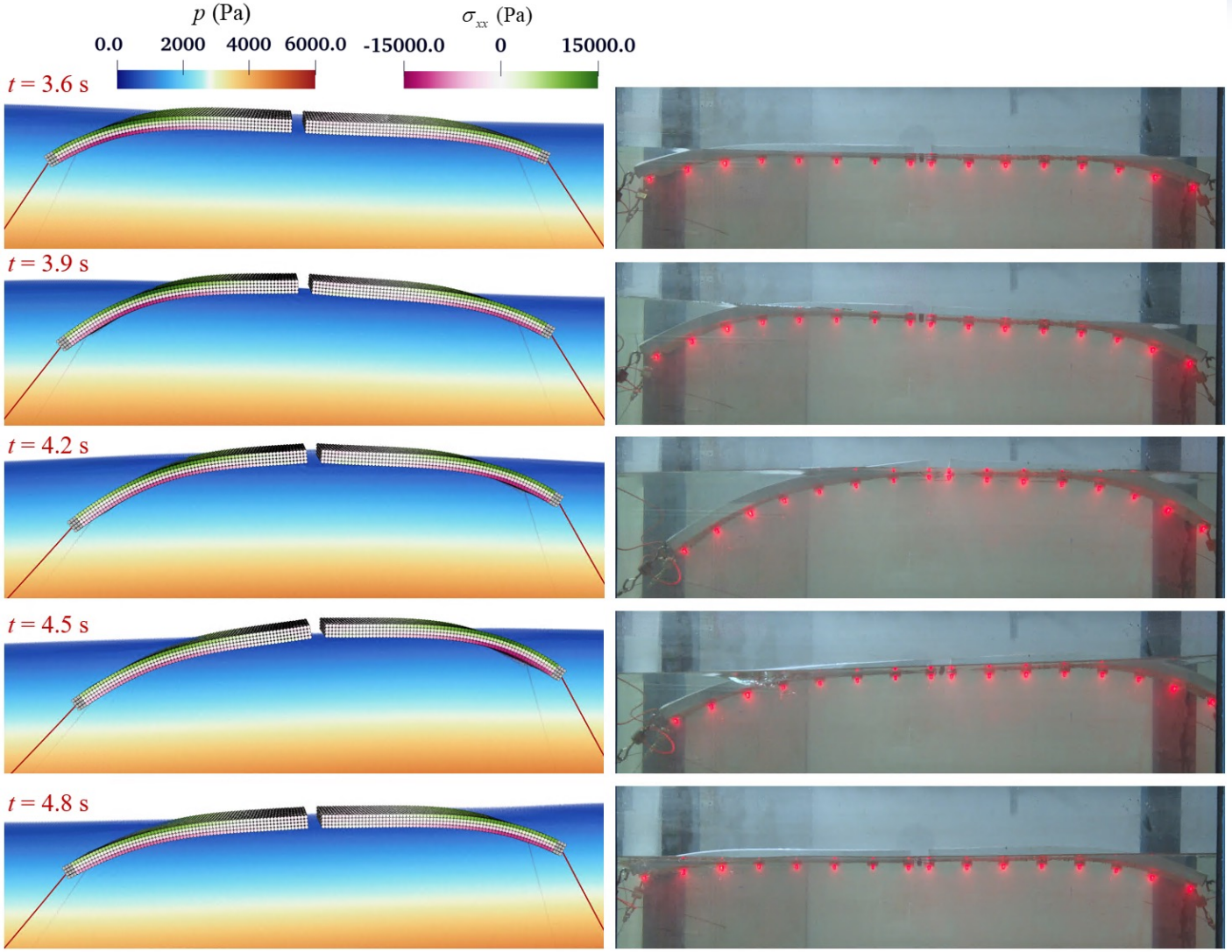
4.4 缩尺水槽模型实验

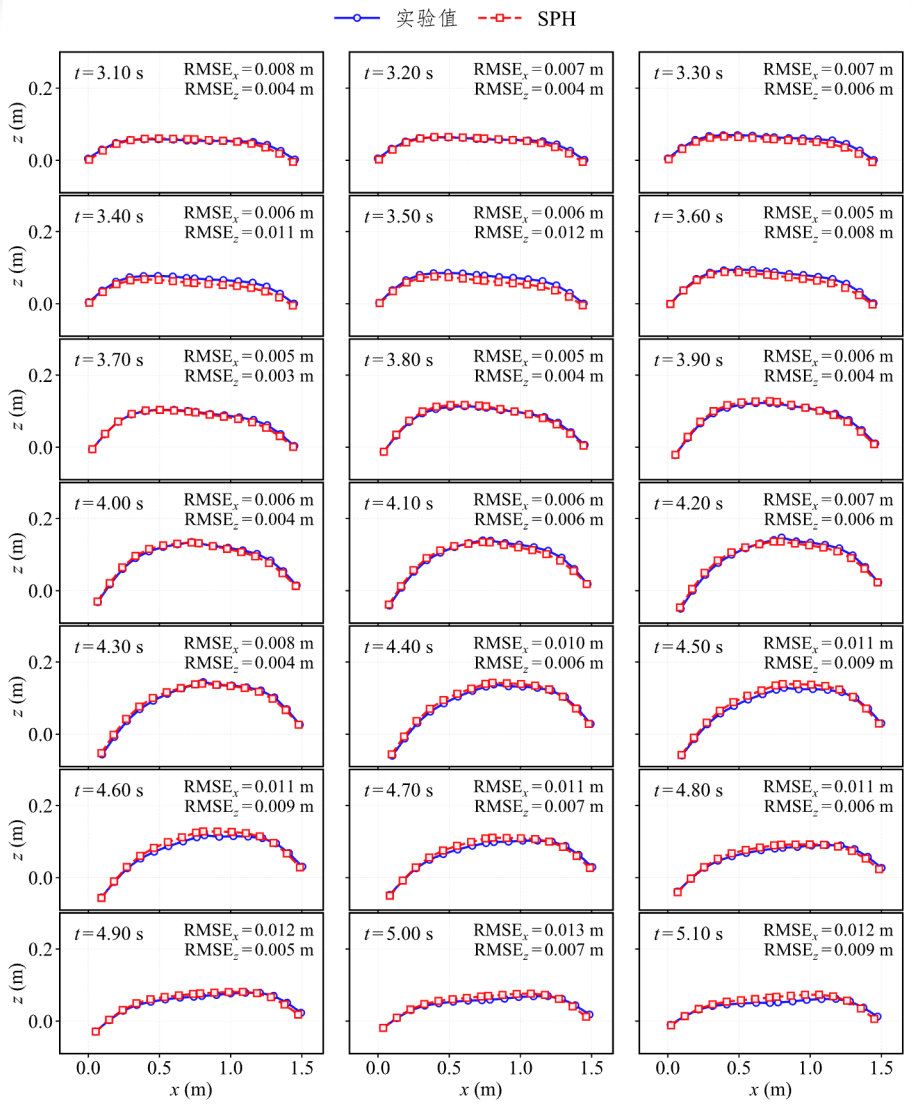
孤立波工况验证： 较好地复现瞬态作用过程，流体压力场和结构应力场连续且光滑



4.4 缩尺水槽模型实验

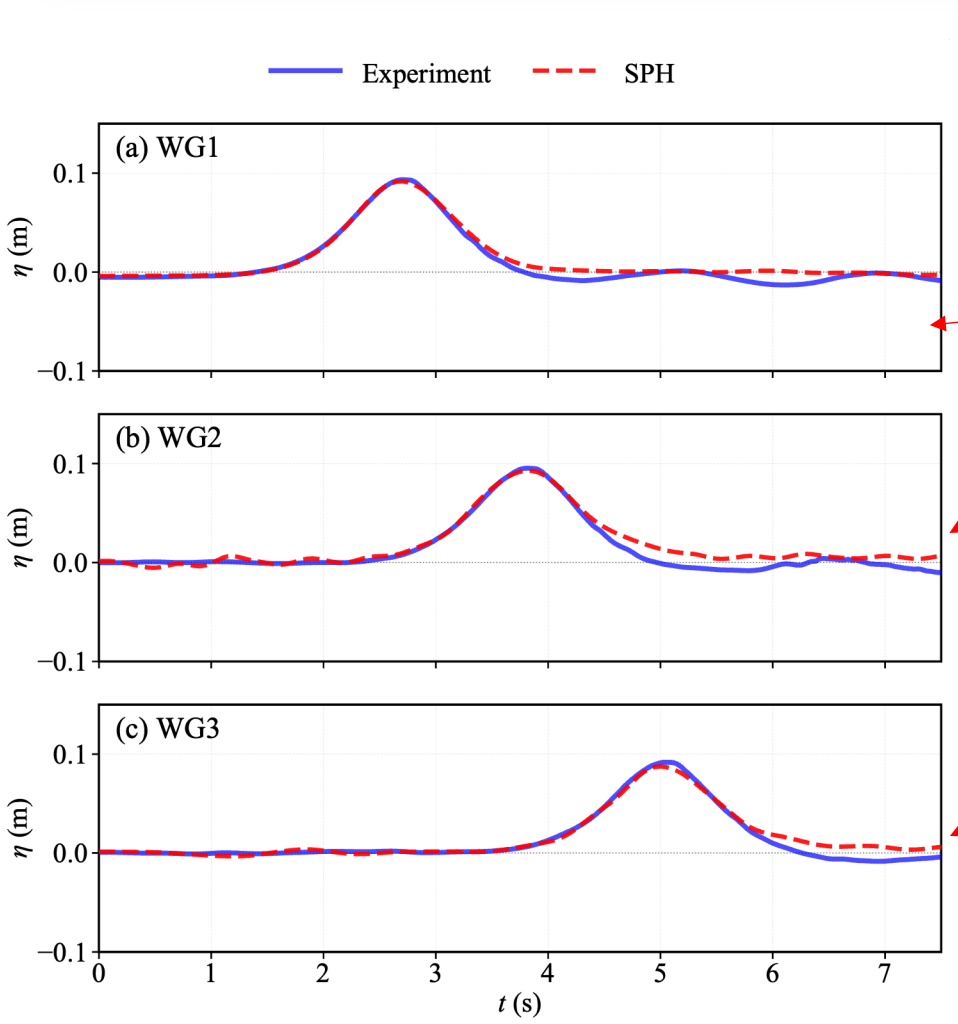
孤立波工况验证： 较好复现截面变形形态，最大变形时刻 RMSE 分别为 5.61 mm 和 6.09 mm

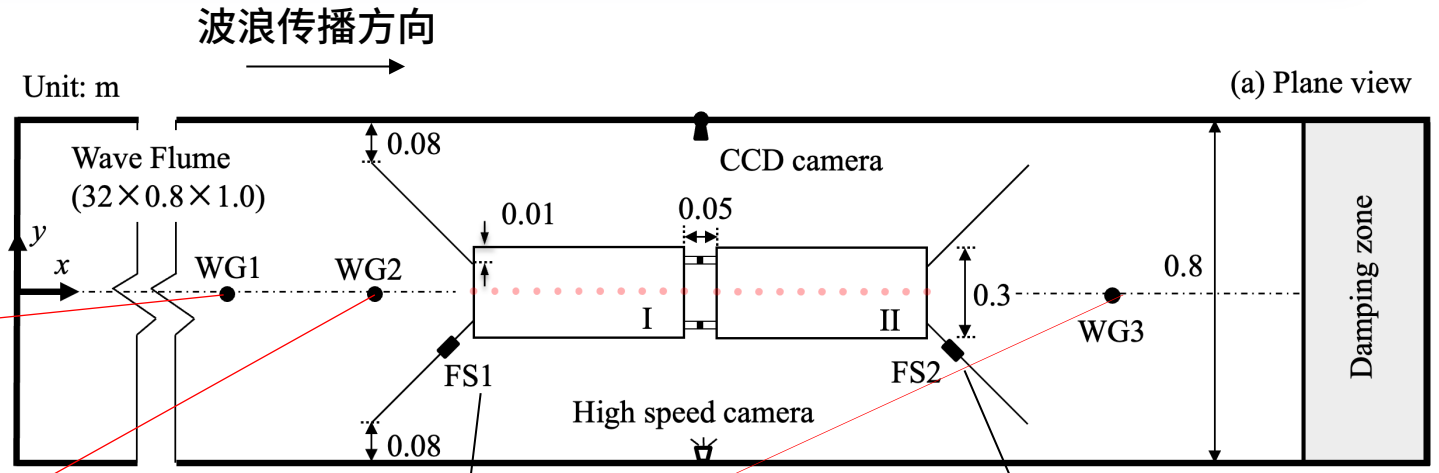


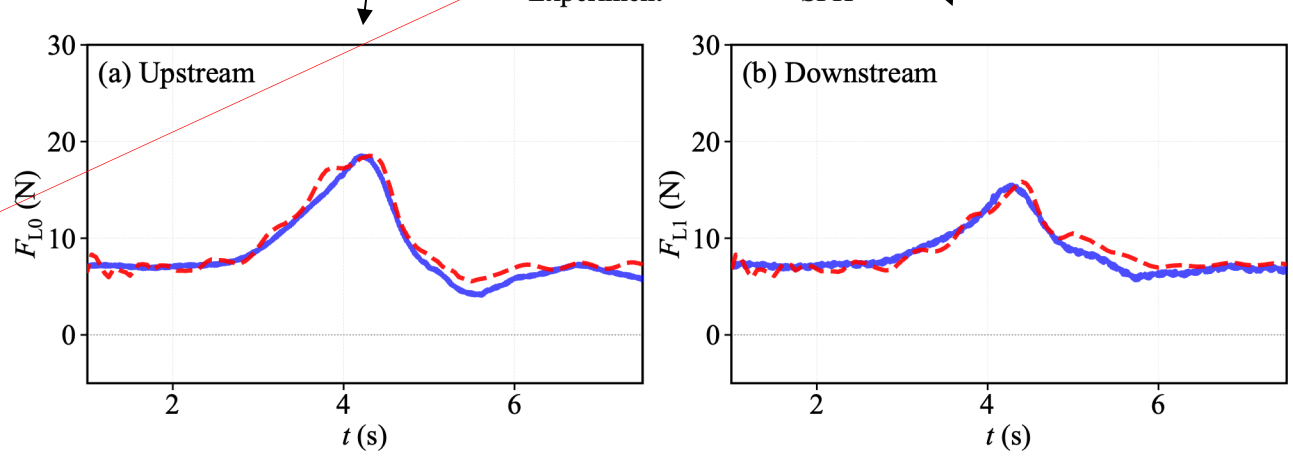


4.4 缩尺水槽模型实验

孤立波工况验证： 多个波高测点峰值误差均小于 5%，上下游系泊张力峰值误差约为 2%

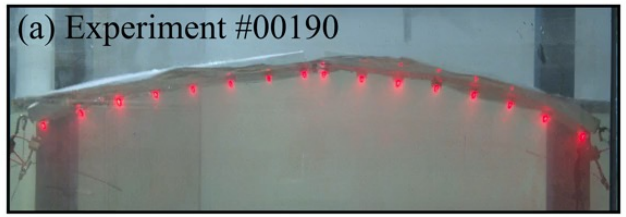


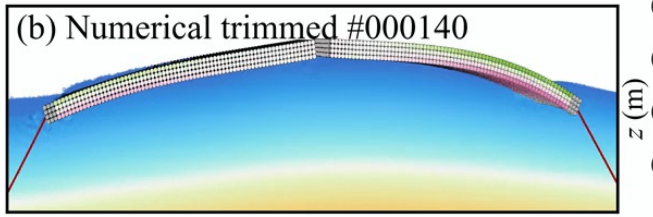


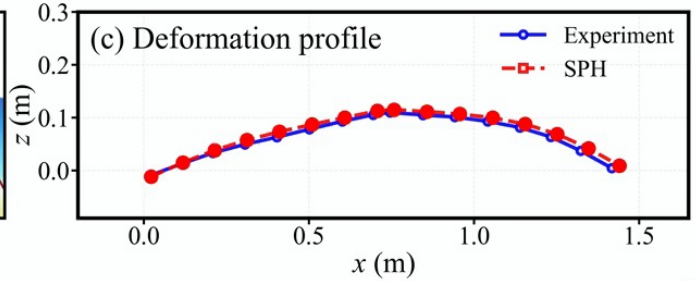


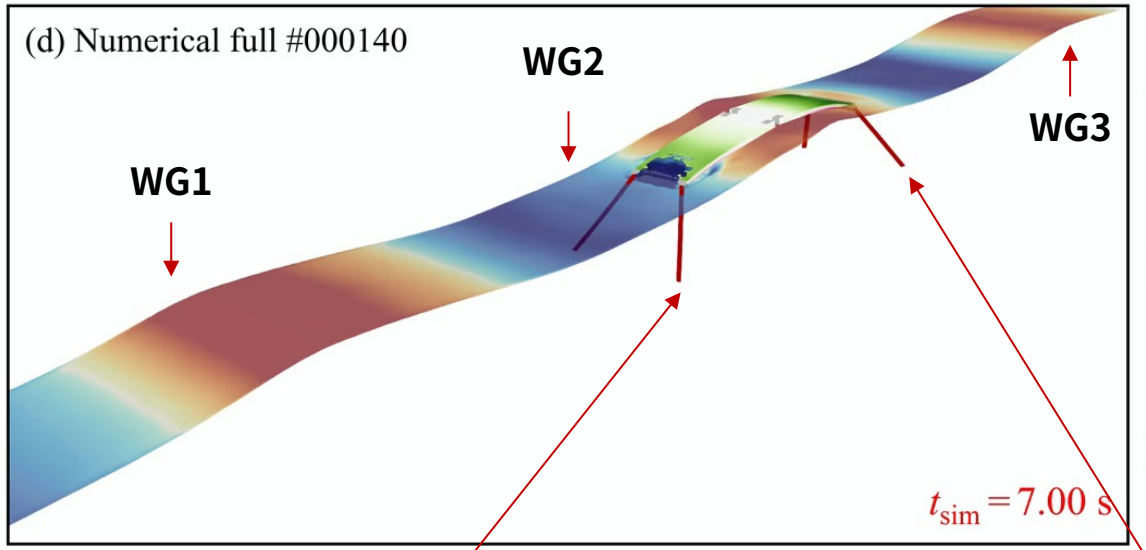
4.4 缩尺水槽模型实验

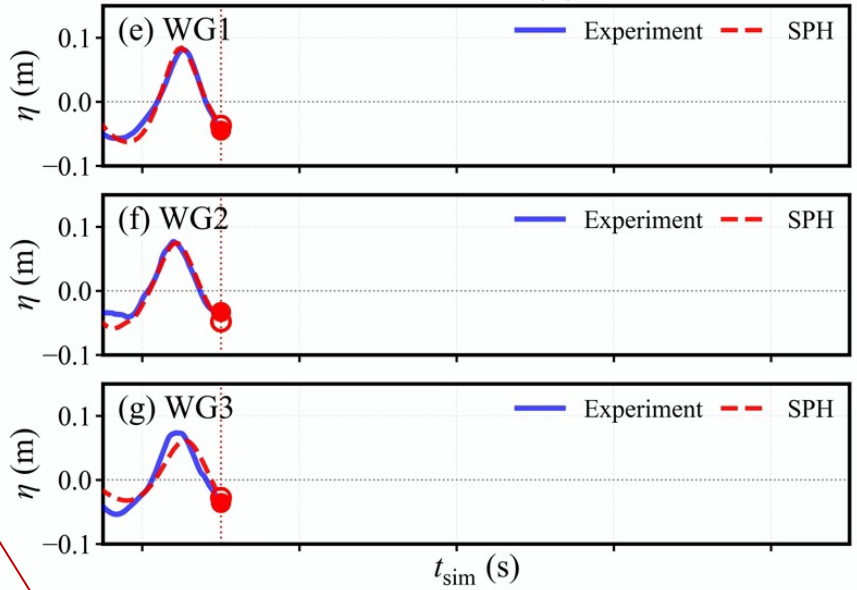
规则波工况验证： 较好复现规则波循环荷载作用过程，流体压力场和结构应力场连续且光滑

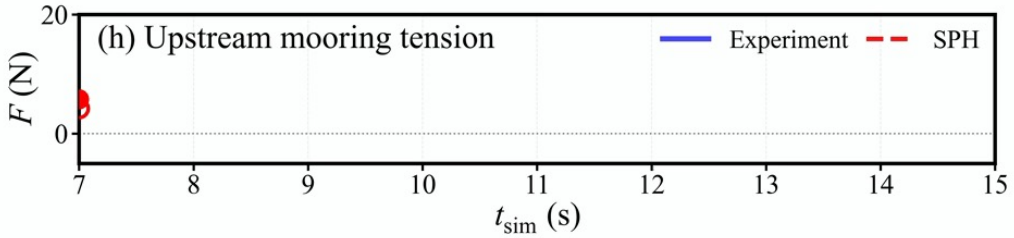


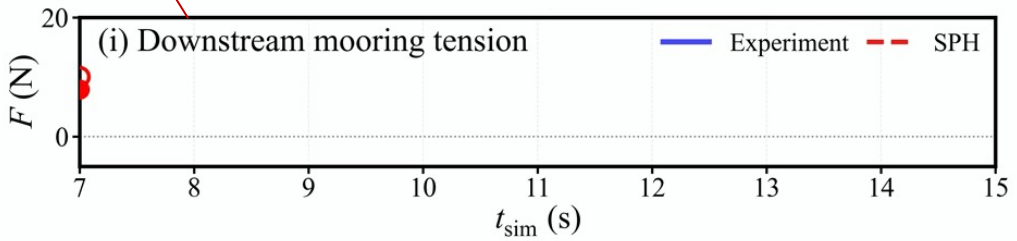






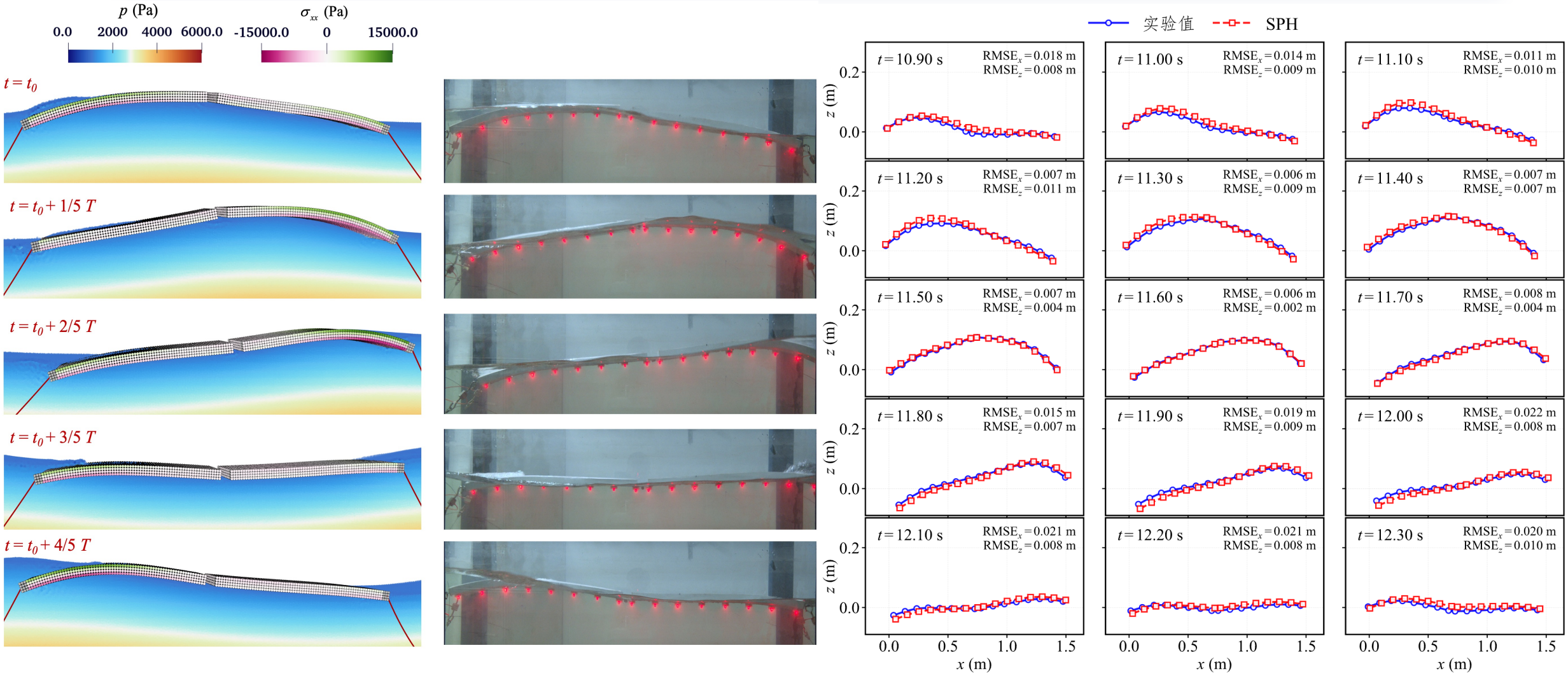






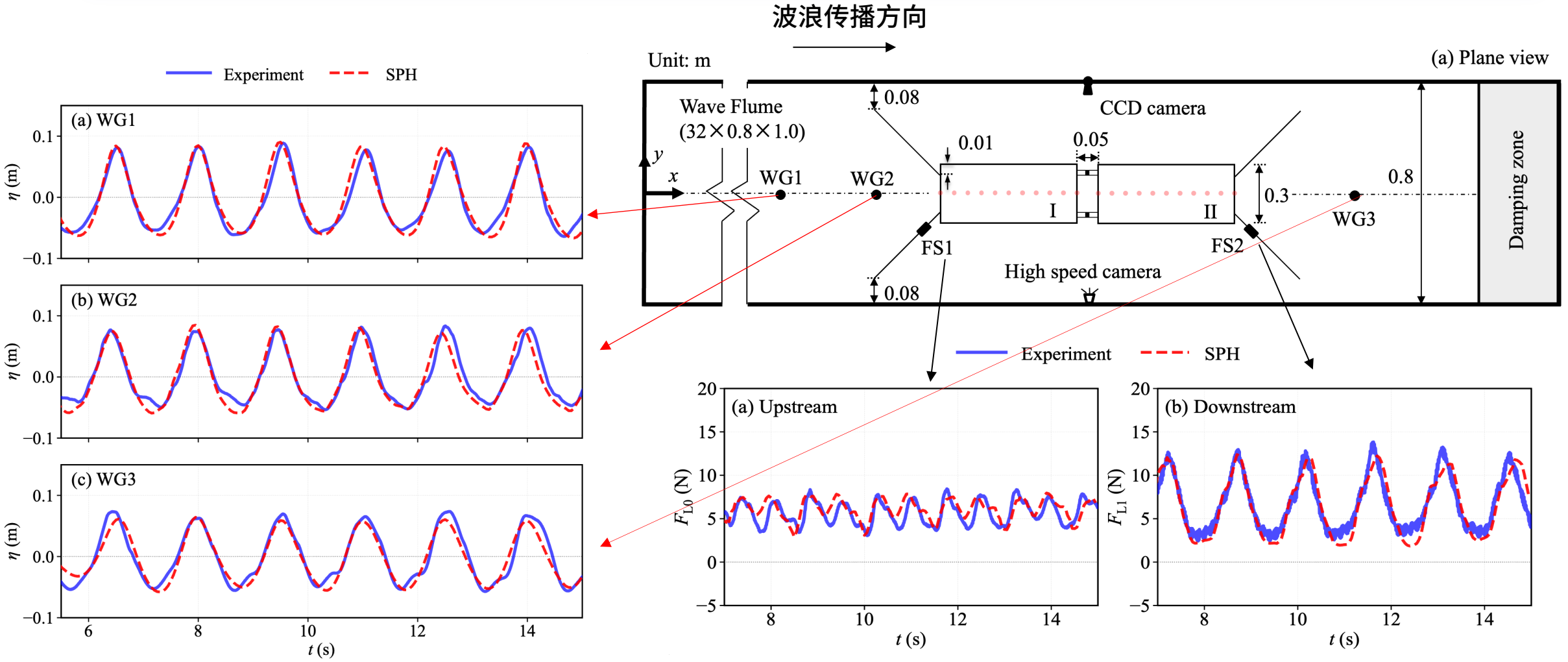
4.4 缩尺水槽模型实验

规则波工况验证：较好复现不同波浪相位下截面变形形态，完整波浪周期内RMSE均小于0.02 m



4.4 缩尺水槽模型实验

规则波工况验证： 多个波高测点波峰误差均分别为3.6%，4.8%和7.9%，系泊力误差小于10%



4.6 本章小结

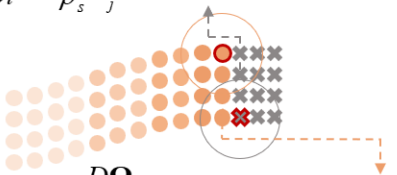
流固耦合模型开发与验证： 建立了适用于多连接柔性浮体阵列的三维流固耦合DualSPHysics+模型，并开展缩尺模型水槽实验进行定性和定量验证

01 **方法创新：** 界面双向动量交换 + 铰接/系泊动力学耦合 → 建立柔性多浮体阵列三维流固耦合模型

02 **模型验证：** 规则波与孤立波缩尺水槽试验 → 准确复现自由液面、结构变形及系泊张力响应

双向动量交换算法

$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt}=\frac{1}{\rho_s}\sum_j\left(\mathbf{P}_i+\mathbf{P}_j\right)\cdot\nabla_{0i}W_{0ij}V_{0j}+\mathbf{g}$$

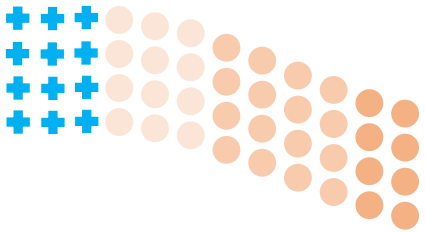


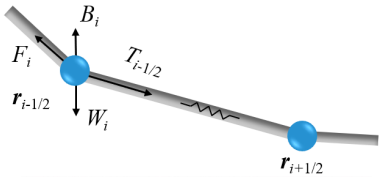
$$I\frac{D\boldsymbol{\Omega}}{Dt}=\sum_j m_j(\mathbf{r}_j-\mathbf{R}_0)\times\mathbf{f}_j$$

$$M\frac{D\mathbf{V}}{Dt}=\sum_j m_j\mathbf{f}_j$$

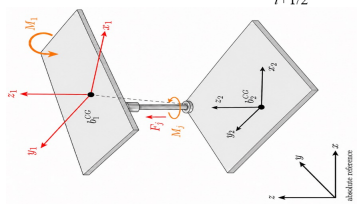
刚体-柔性体耦合

阵列流固耦合模型



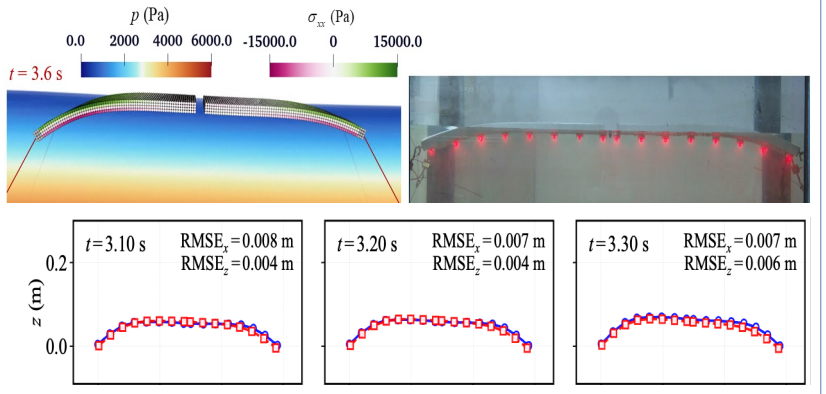


$$\mathbf{f}_i^{FS}=\frac{1}{m_i}\sum_{j\in\text{fluid}}p_j{}^*\nabla_i W_{ij}V_iV_j$$



流固耦合、模块铰接与系泊

物理模型实验验证



波面演化、运动变形与系泊张力验证

DualSPHysics+柔性多浮体阵列三维流固耦合模型

05

柔性漂浮式光伏阵列动力响应研究

柔性漂浮式光伏阵列动力响应机理

基于验证的DualSPHysics+模型，揭示柔性漂浮式光伏阵列的被动减载机制及阵列尺度–波长匹配对动力响应与荷载传递的控制规律

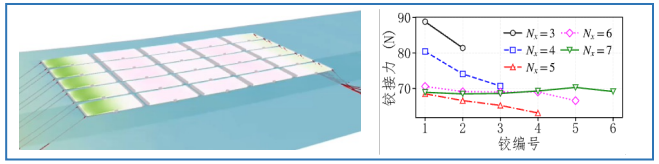
柔性漂浮式光伏阵列动力响应研究

问题：阵列动力响应与荷载传递机理不明

- 波浪参数与结构参数
- 模块数量与模块间距
- 阵列列数与系泊条件

规则波与孤立波典型工况分析

运动变形、连接力、系泊响应



DualSPHysics+柔性多浮体阵列流固耦合模型

参数化数值试验

阵列动力响应机理

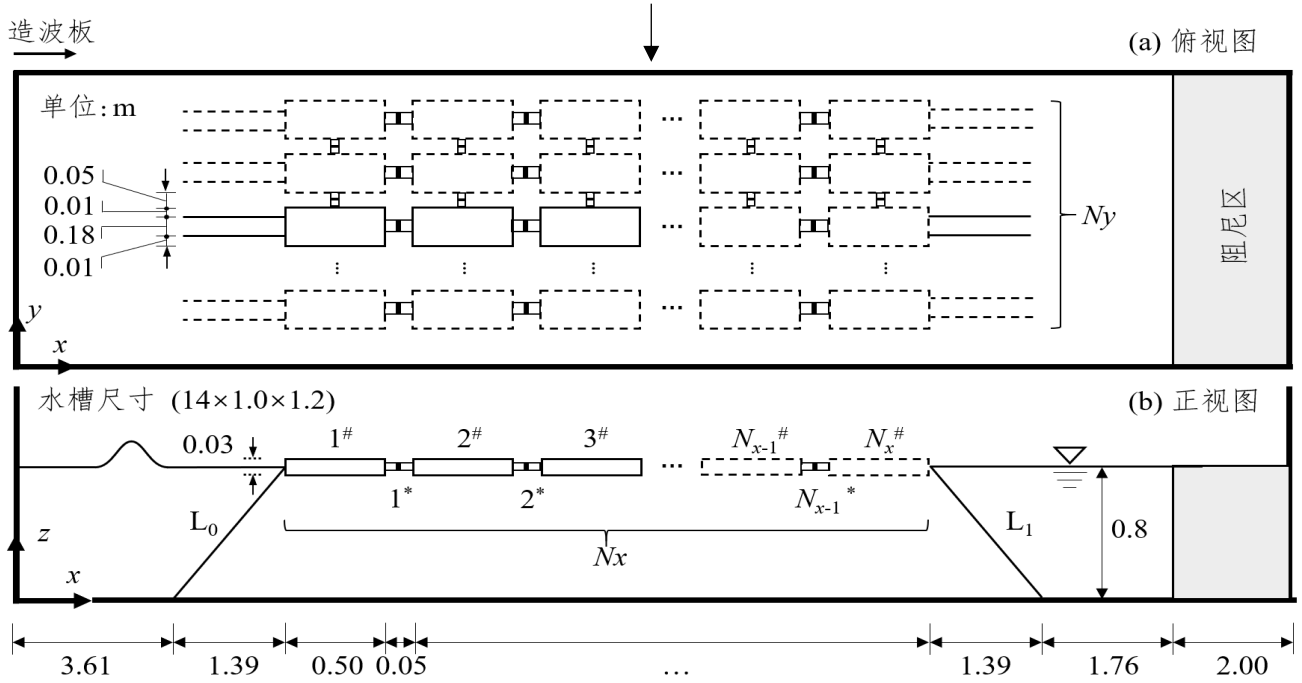
- 工况设置
- 参数分析
- 机理凝练
- 本章小结

5.1 工程背景

工程背景 以舟山市摘箬山岛漂浮式光伏示范项目作为工程研究背景



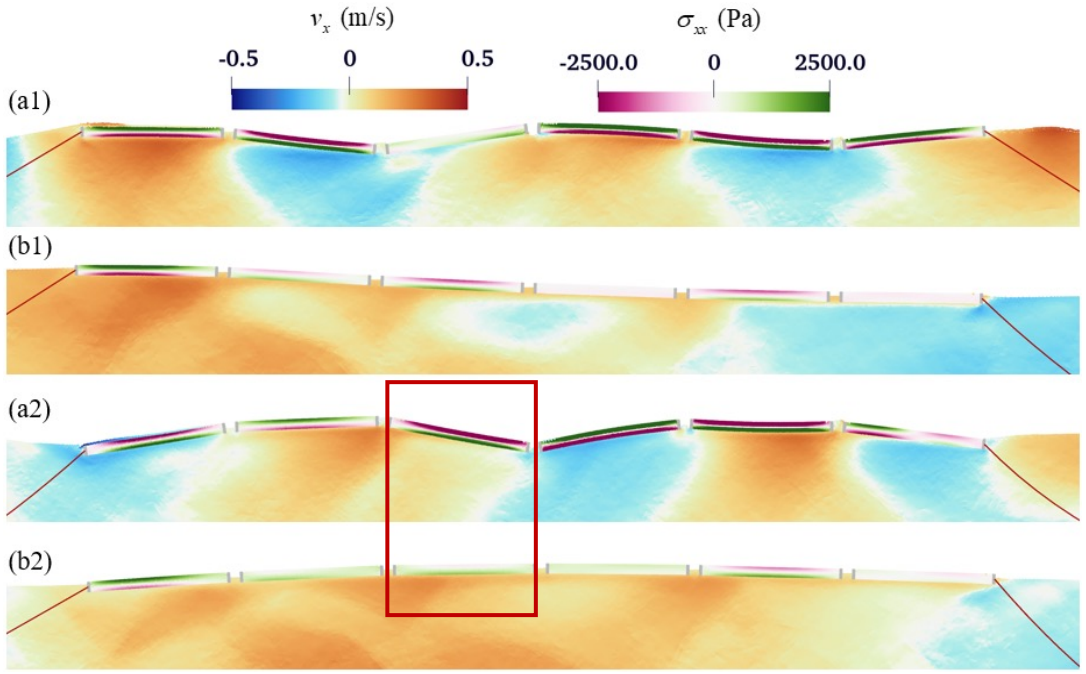




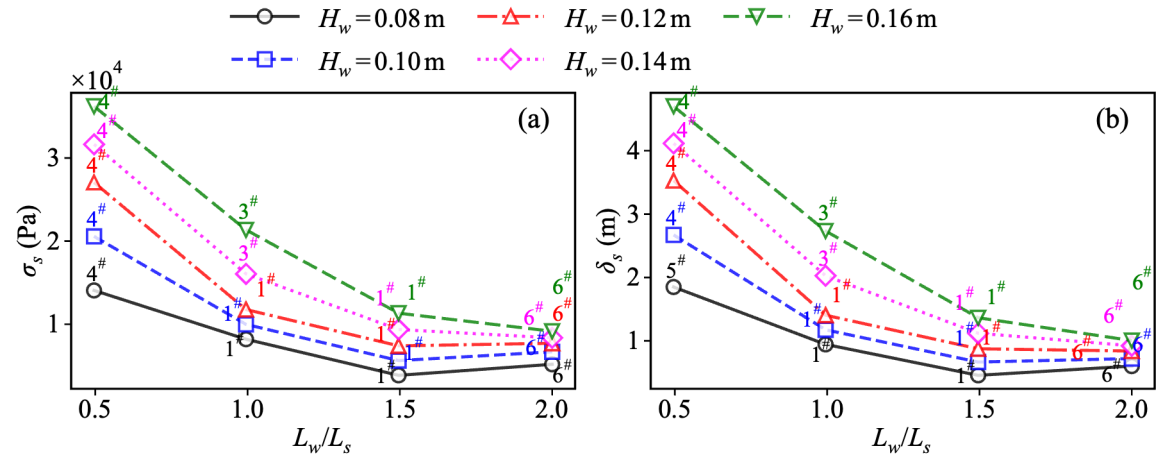
- 简化模型：忽略翼板、连接件理想铰接、模块视作长方体
- 规则波+孤立波 d= 8m; H_w = 1.6, 2.5 m; T= 1.93 s; 1:10 弗劳德相似缩尺

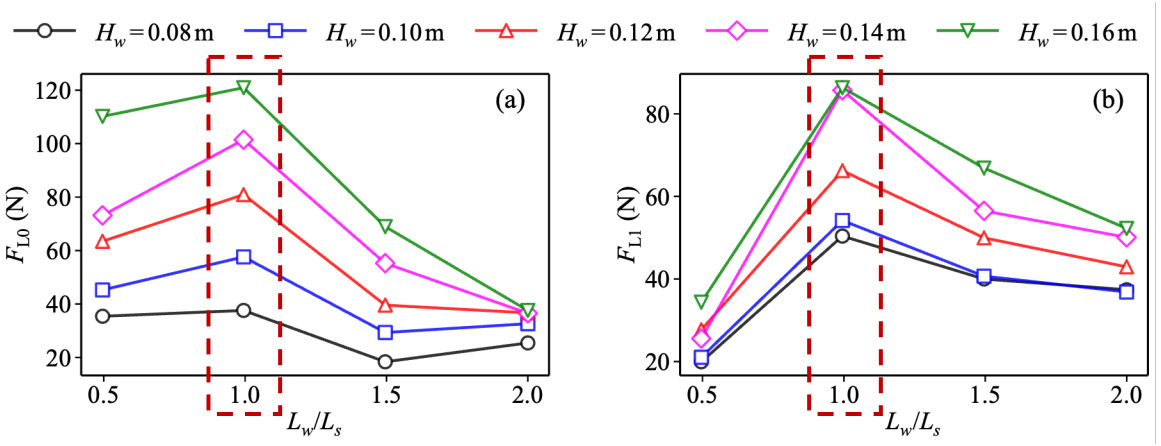
5.2 规则波作用下阵列动力响应特性分析

波浪参数对运动响应和荷载分布的影响规律



(a) 短波 (b)长波

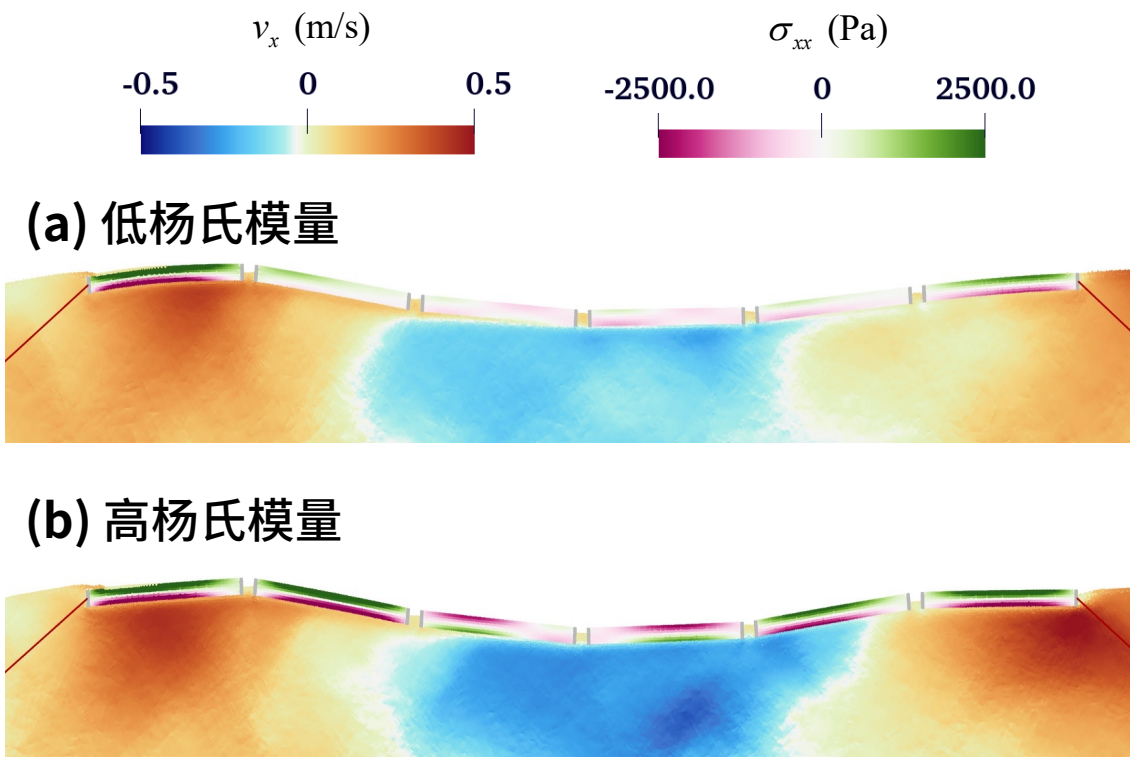


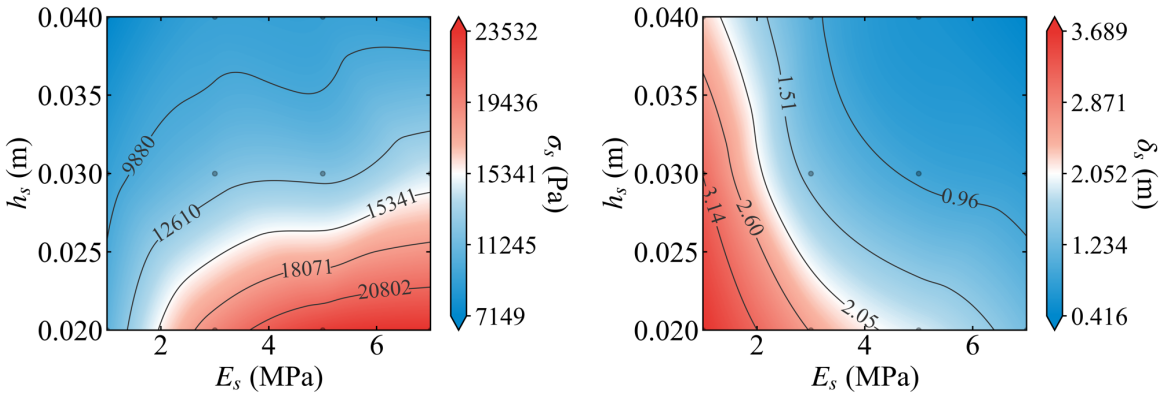


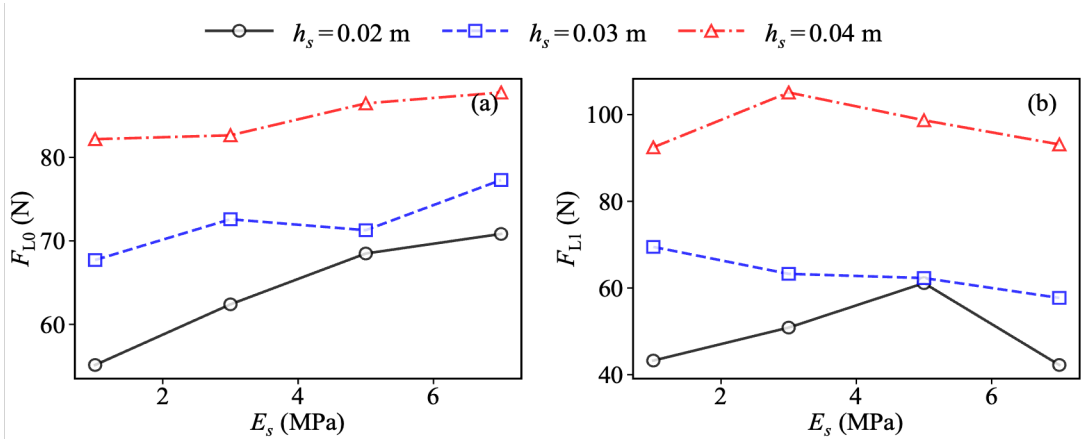
- 短波诱发显著相位差与局部荷载集中，阵列中部更易发生弯曲变形和应力集中
- 波长接近阵列尺度时，铰接力与系泊力出现峰值，系统呈现明显的共振放大效应

5.2 规则波作用下阵列动力响应特性分析

结构参数对变形协调与荷载传递的影响规律



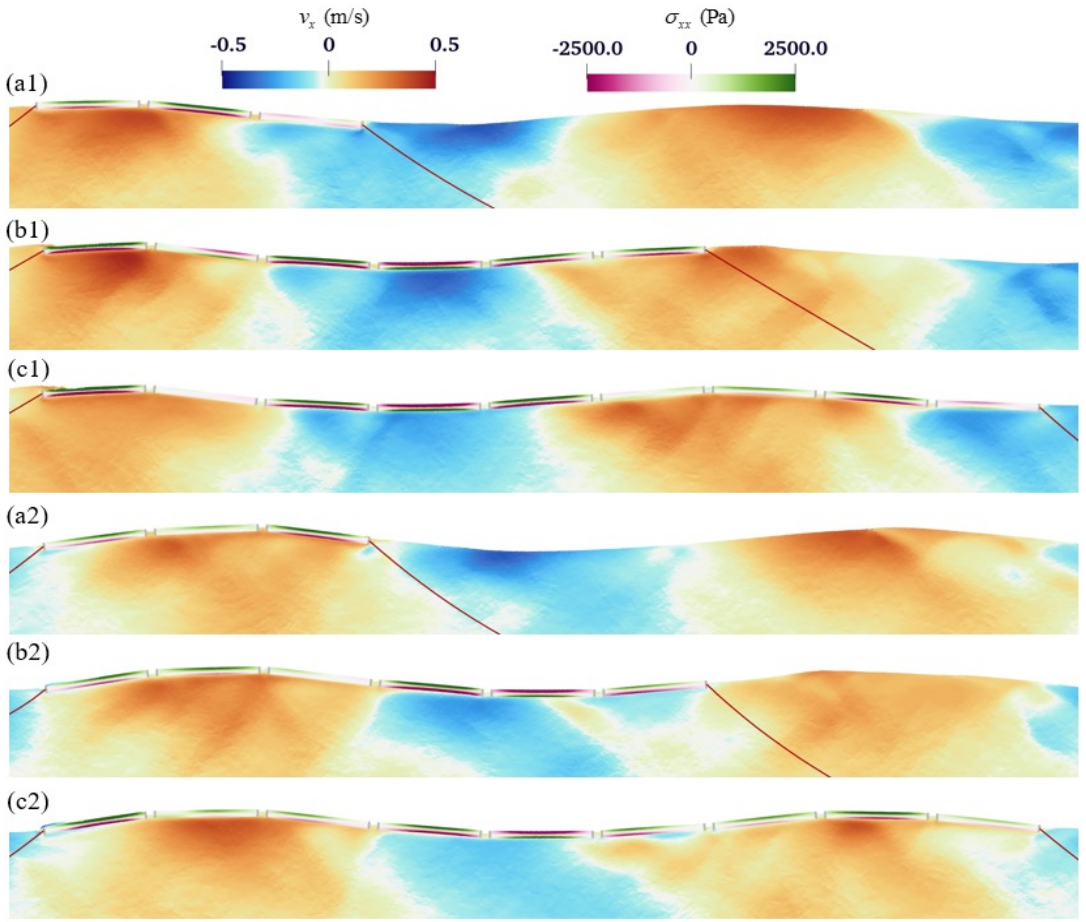


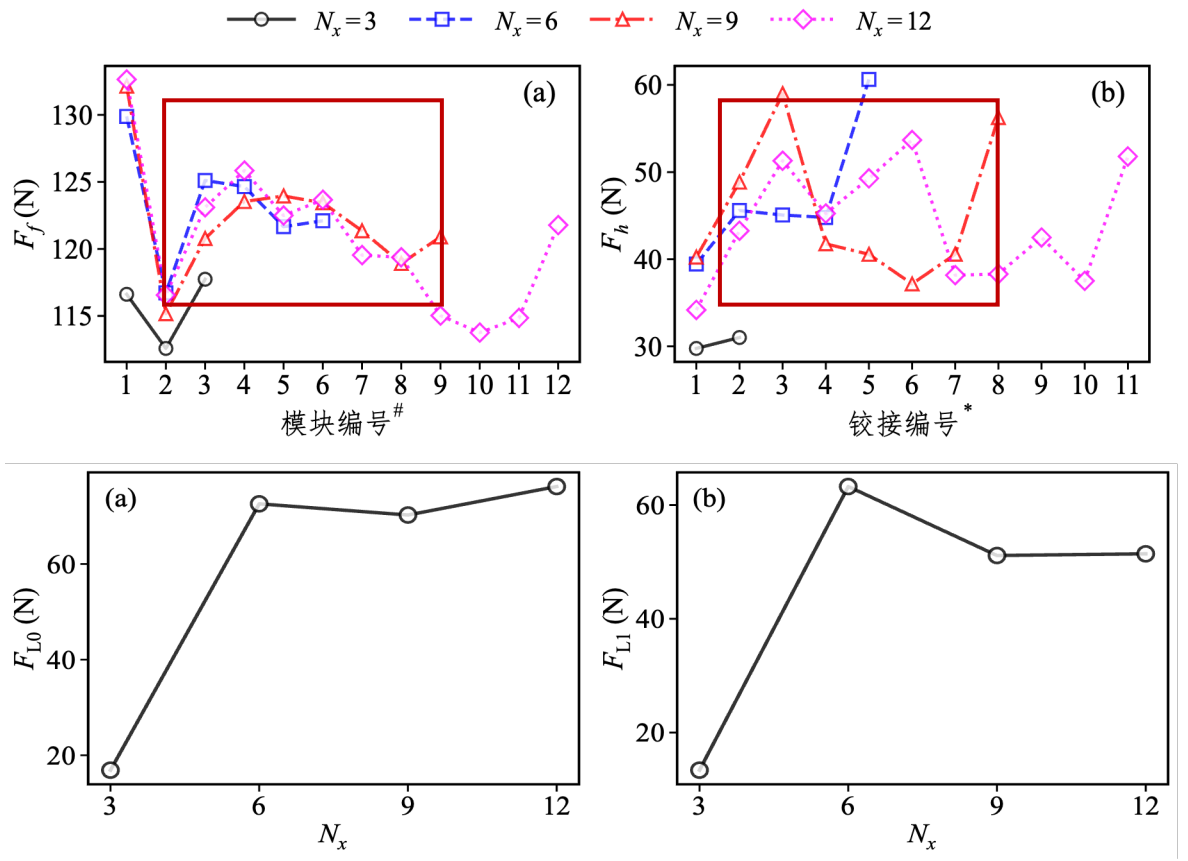


- 提高结构刚度可显著抑制柔性变形，但会削弱变形释能，使更多波浪荷载转化为结构内力
- 模块厚度增加显著放大流体力、铰接力与系泊力，并强化荷载向背浪侧端部的传递

5.2 规则波作用下阵列动力响应特性分析

模块数量对荷载传递和空间分配的影响规律





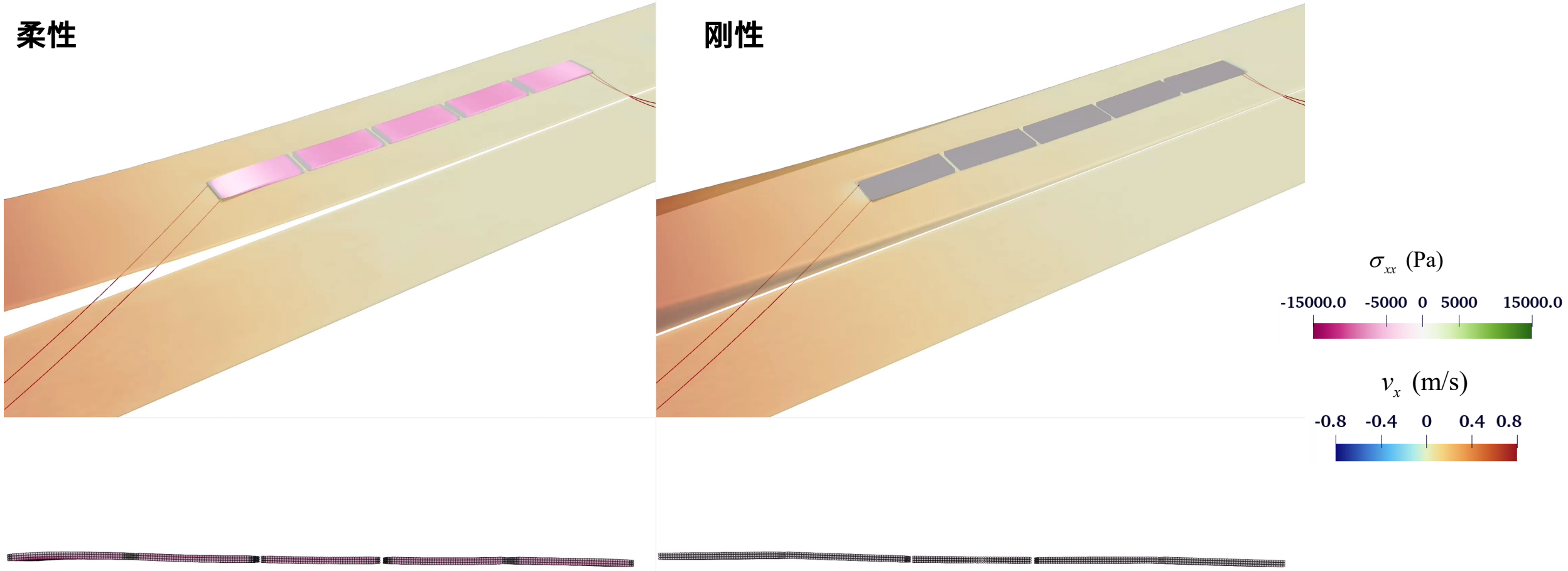
- 模块数量增加对各模块受波浪载荷和连接受力影响较小
- 阵列加长整体上并未显著放大模块受力和铰接力

5.3 孤立波作用下阵列动力响应特性分析

结构柔性对波浪荷载与结构响应的缓冲作用

柔性

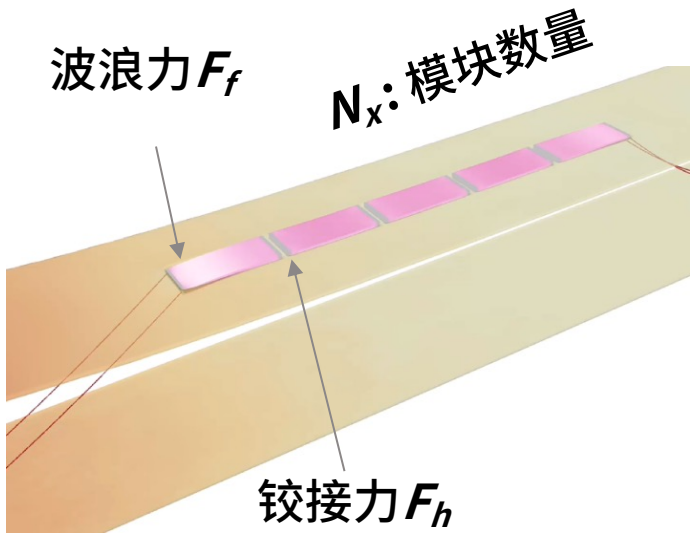
刚性

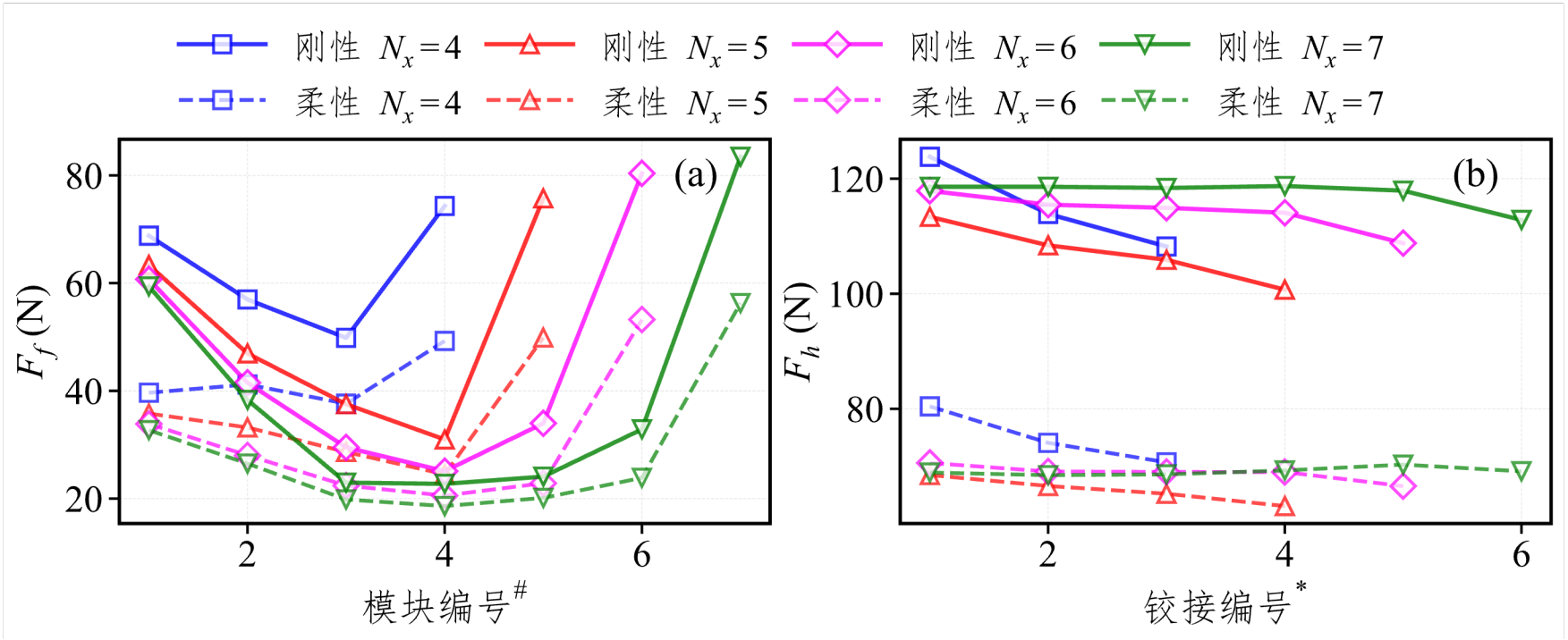


- 刚体阵列 → 波浪爬升与越浪增强
- 柔性变形 → 整体弯曲与相对转动调节荷载传递 → 顺应波面变化 → 局部冲击减弱

5.3 孤立波作用下阵列动力响应特性分析

结构柔性对波浪荷载与结构响应的缓冲作用

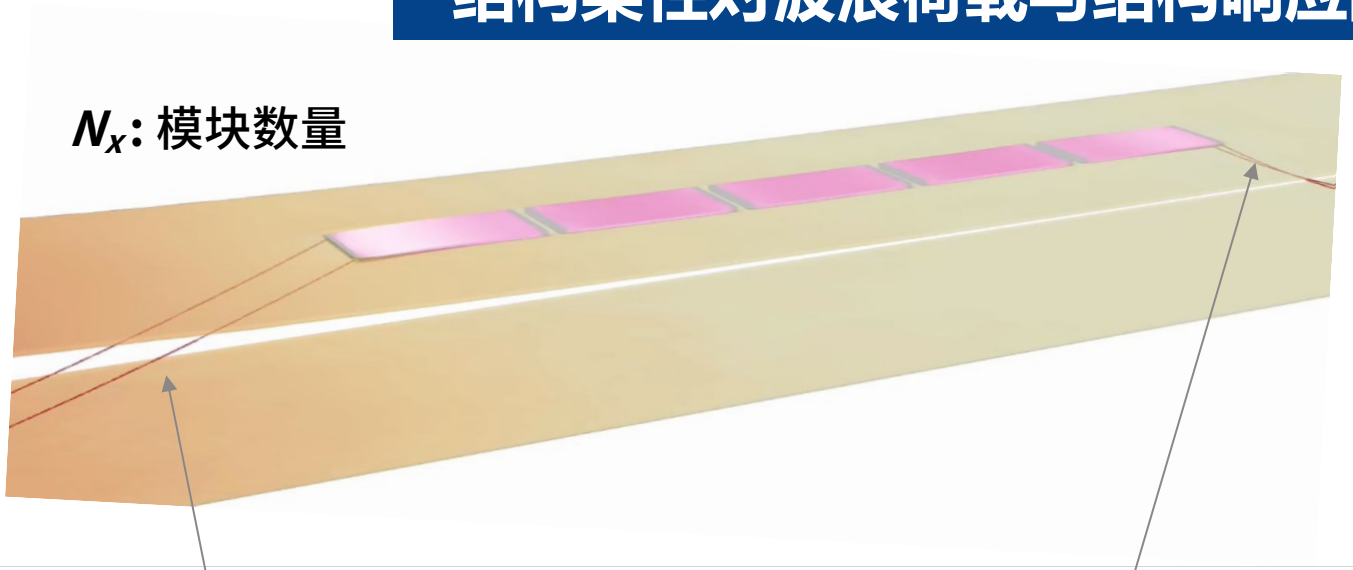




- 结构柔性的被动减载作用：模块受力降低 30–45 %, 铰接力降低 35–41%

5.3 孤立波作用下阵列动力响应特性分析

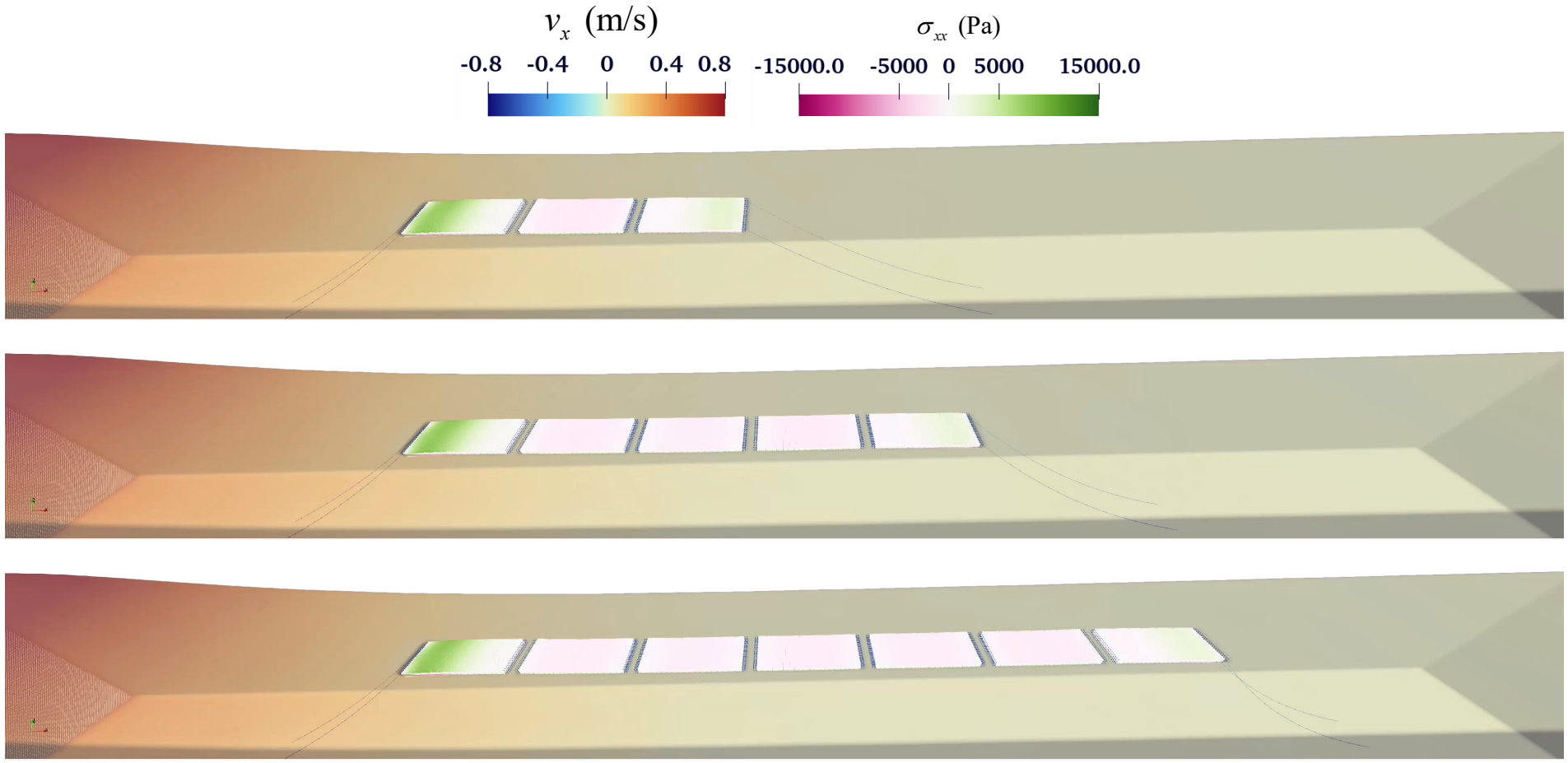
结构柔性对波浪荷载与结构响应的缓冲作用



■ 模块变形与转动 → 缓冲波浪荷载 → 锚链力降低 36%～43%

5.3 孤立波作用下阵列动力响应特性分析

模块数量对模块间协同运动与荷载传递的影响规律

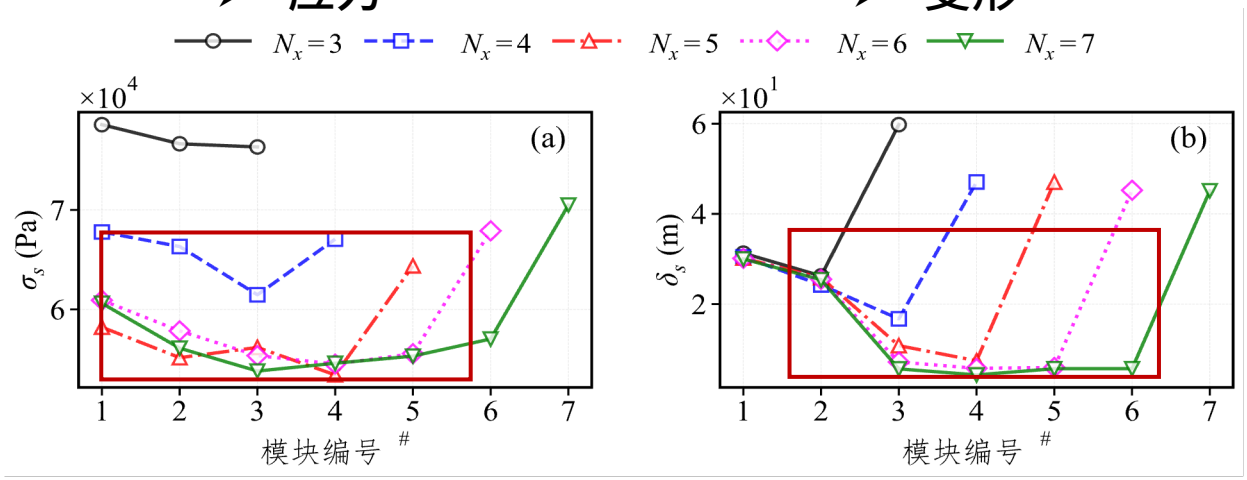


- 越浪、大变形及强流固耦合效应显著
- 模块数量增加 N_x → 阵列协同运动增强

5.3 孤立波作用下阵列动力响应特性分析

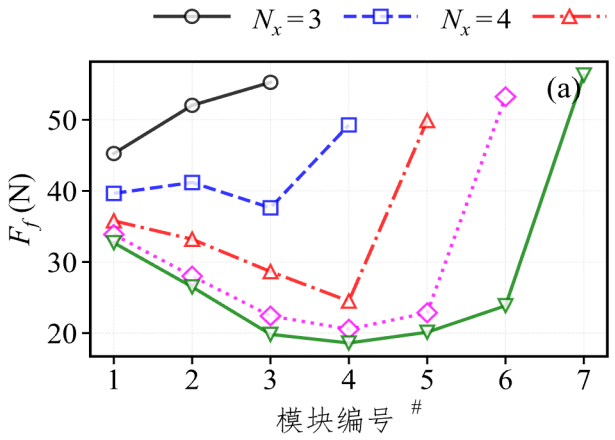
模块数量对模块间协同运动与荷载传递的影响规律

➢ 应力

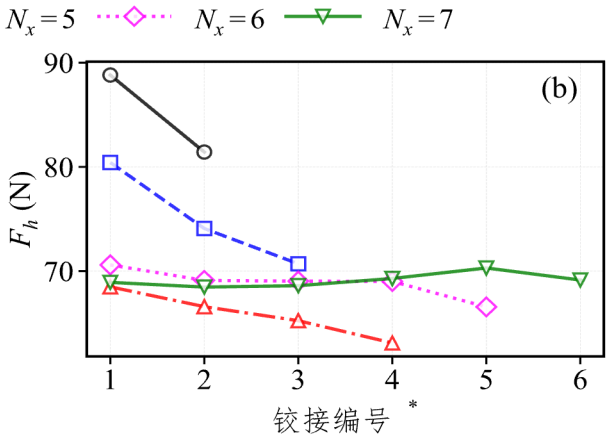


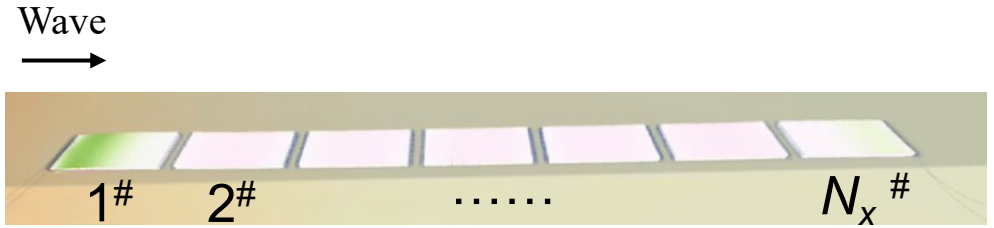
➢ 变形

➢ 波浪力



➢ 铰接力

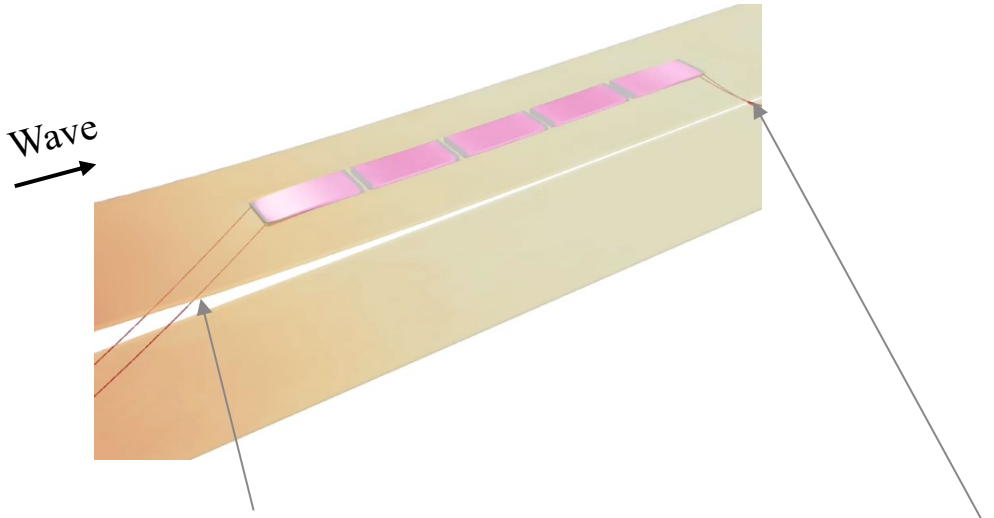




- 增加模块数量 N_x →除末端模块外，多数模块的流体力、变形与应力减小
- 增加模块数量 N_x → 铰接力与波浪荷载沿阵列分布更均匀 → 各模块响应趋于一致

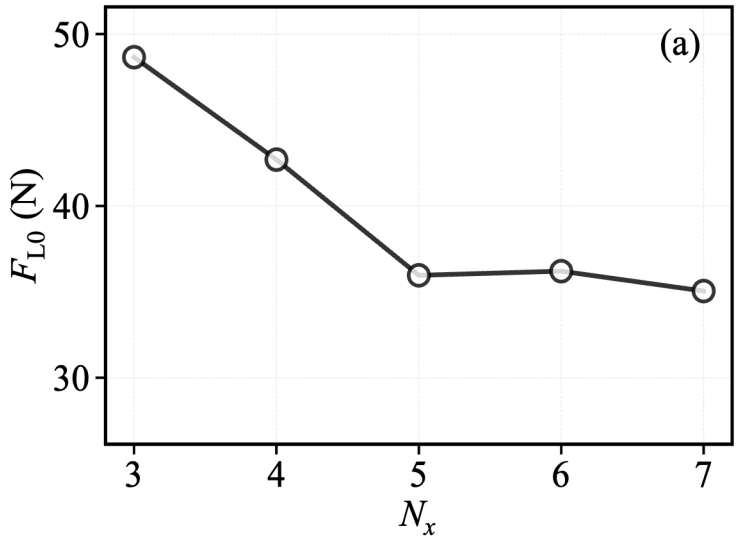
5.3 孤立波作用下阵列动力响应特性分析

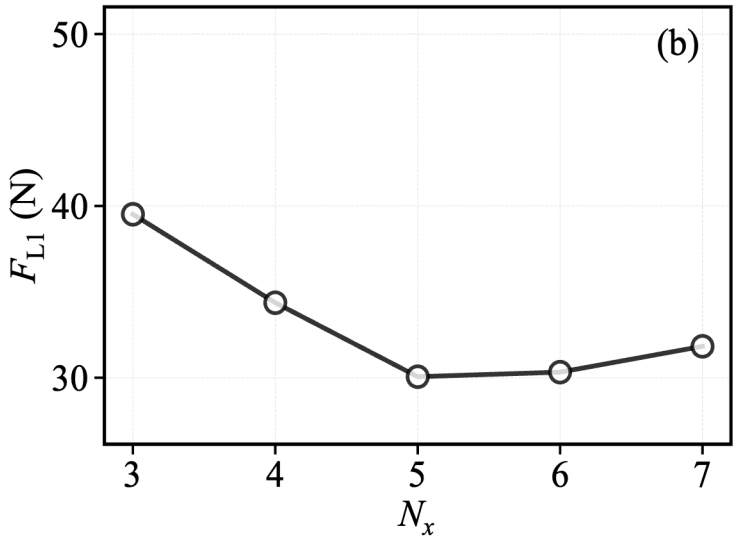
模块数量对模块间协同运动与荷载传递的影响规律



- 增加模块数量 N_x → F_{L0} ↓ 28.0%, F_{L1} ↓ 19.1%

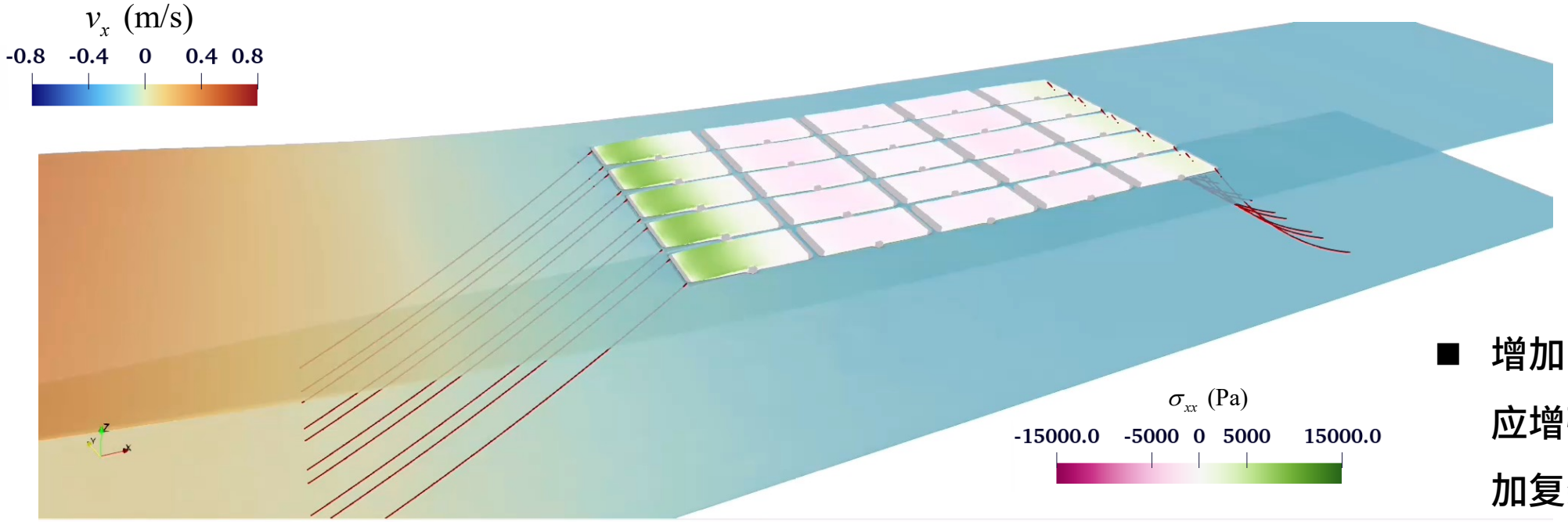
  → 两端锚链张力分布更加均衡





5.3 孤立波作用下阵列动力响应特性分析

阵列列数对模块间三维流动及模块动力响应的影响

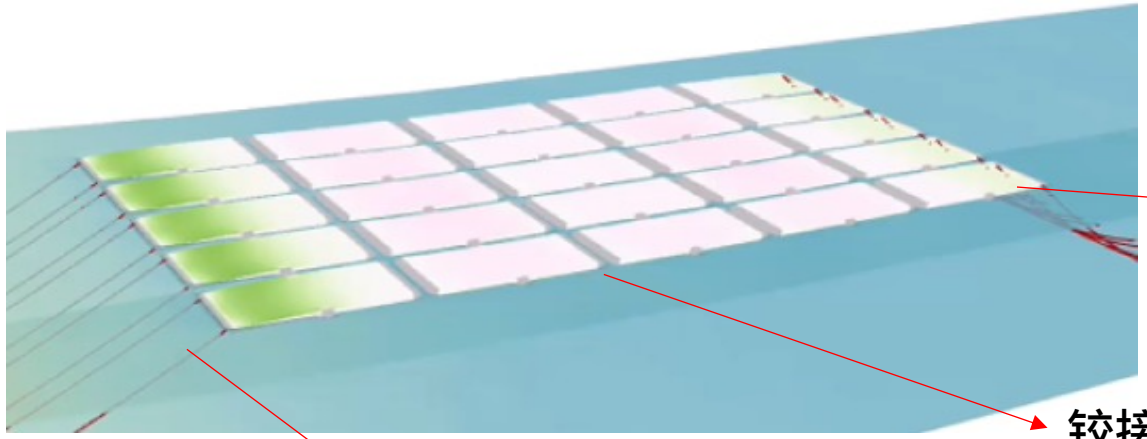


- 增加阵列列数N_y→ 三维效应增强，阵列内部流场更加复杂

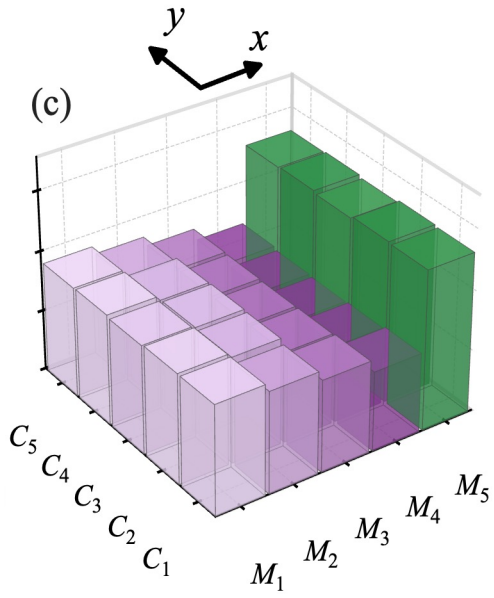


5.3 孤立波作用下阵列动力响应特性分析

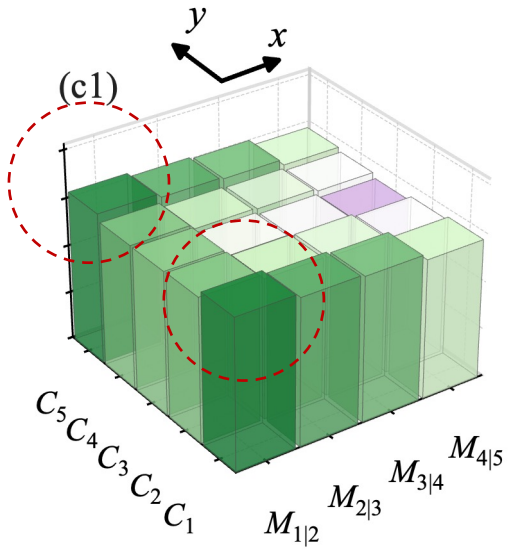
阵列列数对模块间三维流动及模块动力响应的影响



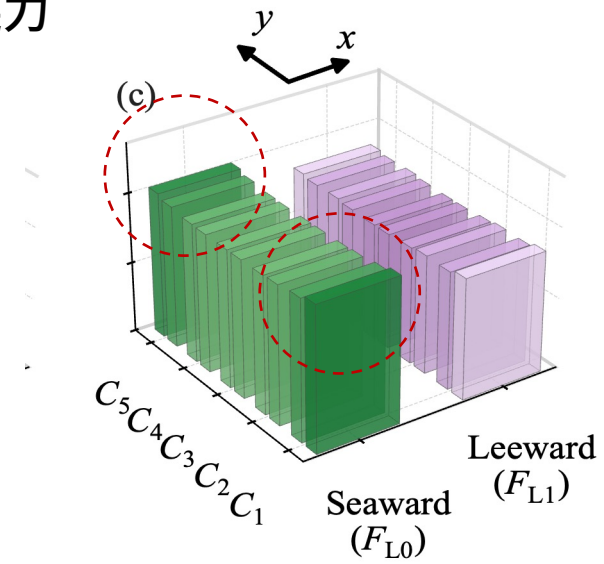
波浪力



铰接力



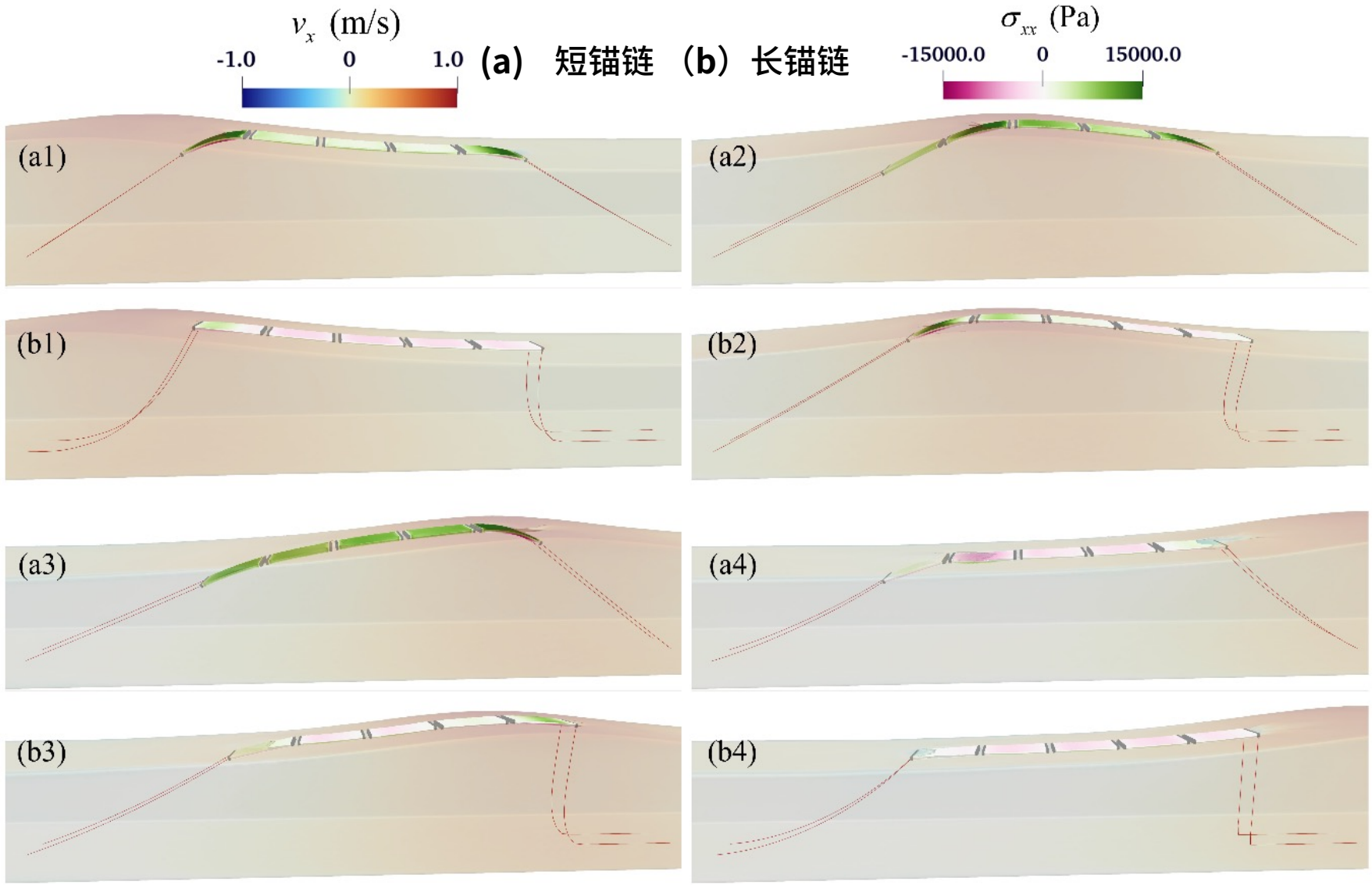
锚链力



- 非对称约束 → 外侧列铰接力与锚链力提高约 10%

5.3 孤立波作用下阵列动力响应特性分析

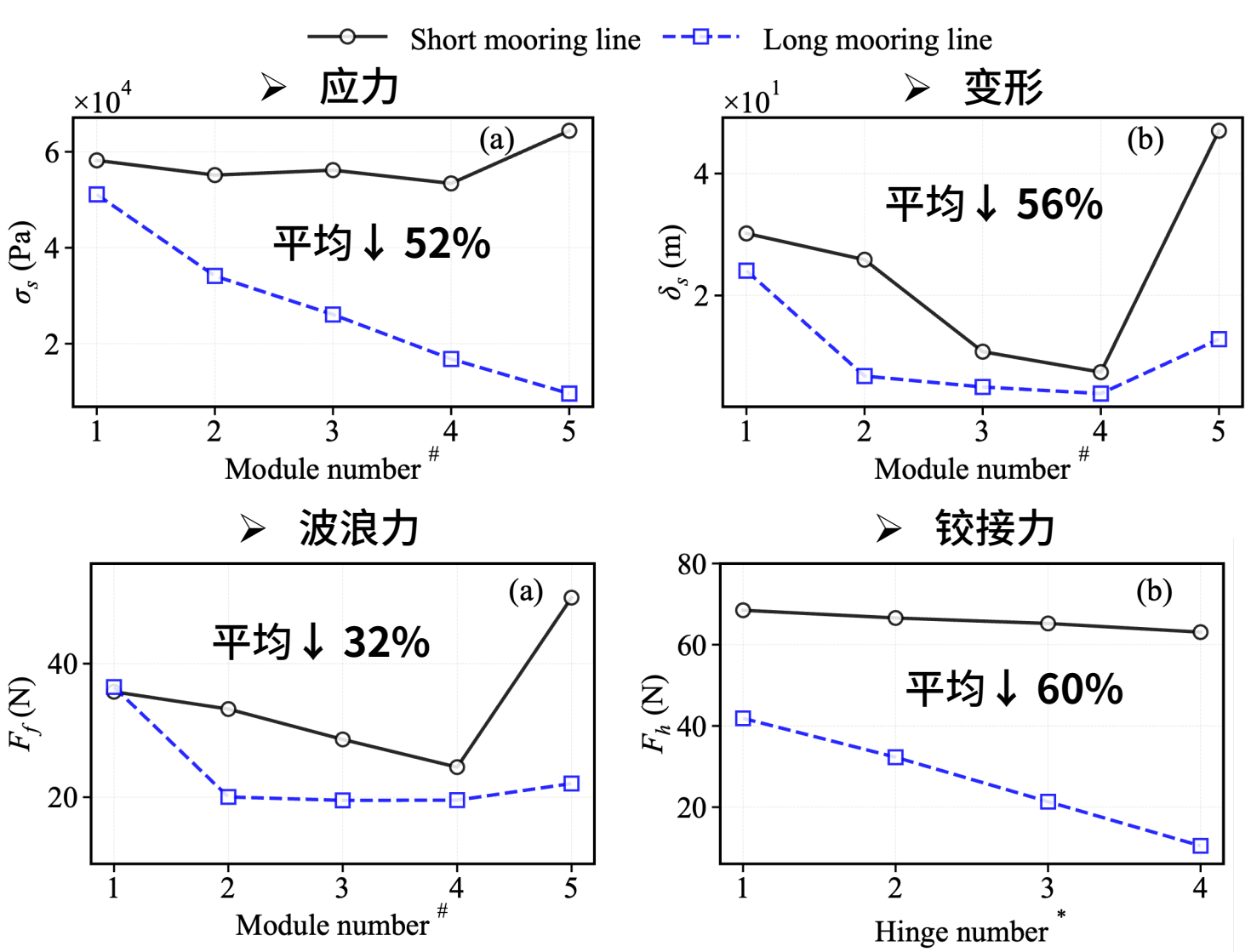
锚链长度对阵列运动和系泊力的影响规律

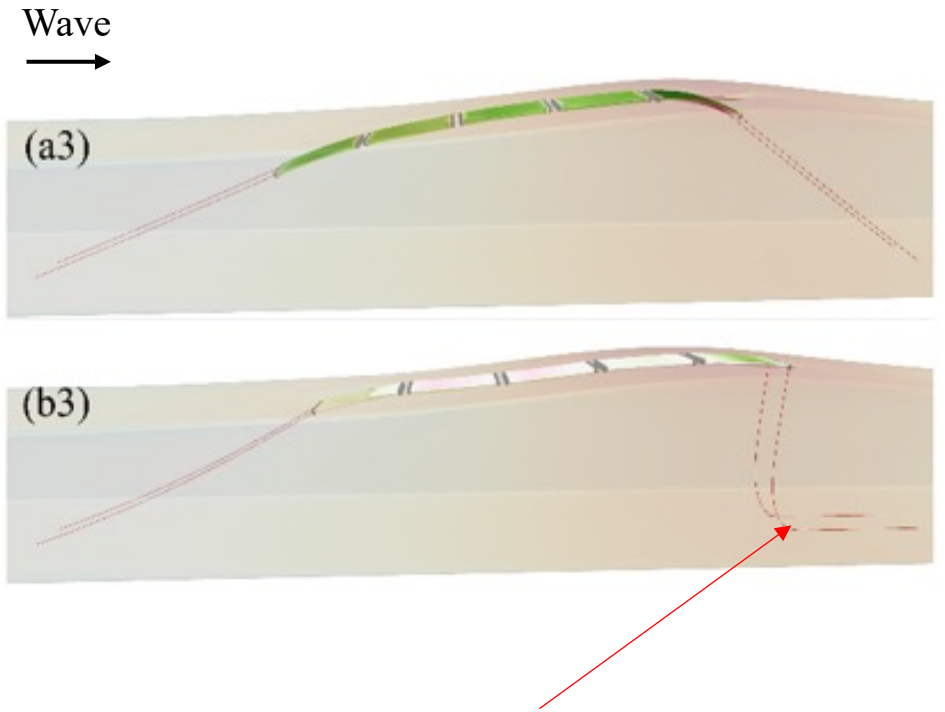


- 锚链长度增加 → 端部约束减弱 → 阵列整体运动增大
- 锚链长度减小 → 端部约束增强 → 局部弯曲与应力集中加剧

5.3 孤立波作用下阵列动力响应特性分析

锚链长度对阵列运动和系泊力的影响规律

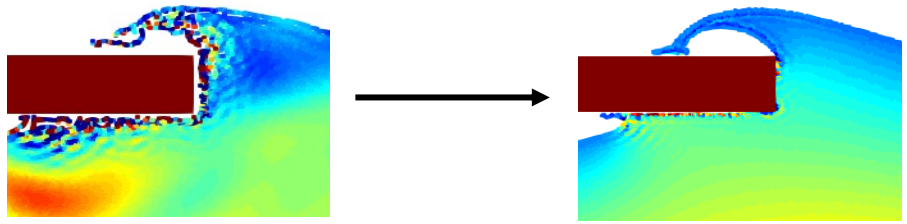




锚链近似松弛，回复力主要由锚链自重提供

6.1 研究工作总结

➢ 改进稳定性与守恒性的自由表面流SPH模型



➢ δR-SPH算法 → 降低数值耗散

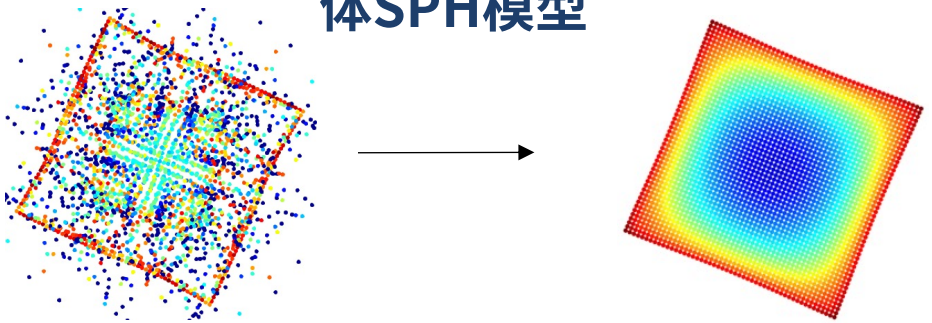
➢ 多策略速度散度误差清理 → 减少压强振荡

➢ 粒子位移修正 → 提高体积守恒

■ 多算例验证：压力振荡幅值↓80%，体积守恒误差↓80%，波峰衰减↓10%

+

➢ 具有二阶精度且抑制零能模态的柔性固体SPH模型



➢ 三维二阶精度离散 → 提高离散精度

➢ 动态沙漏控制算法 → 自适应抑制零能模式

➢ 黎曼稳定项 → 降低应力噪音

➢ 数据布局优化与显存压缩 → 大规模高效并行

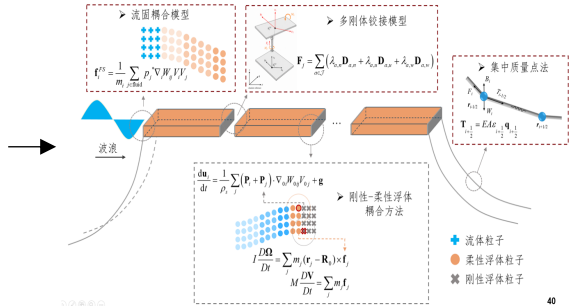
■ 多算例验证：二阶收敛；核函数导数误差↓90%；应力噪音↓85%

6.1 研究工作总结

➢ 柔性多浮体阵列流固耦合模型与实验验证

- ➢ 刚体-柔性体界面双向动量交换算法 → **刚柔耦合**
- ➢ 建立流固耦合、铰接传力与系泊动力学同步求解模型

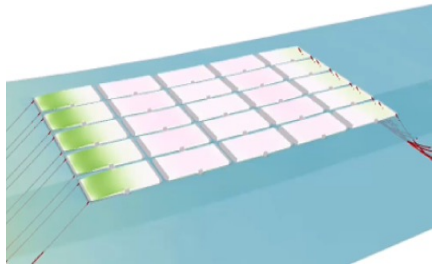


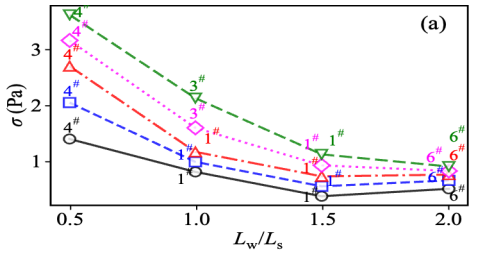


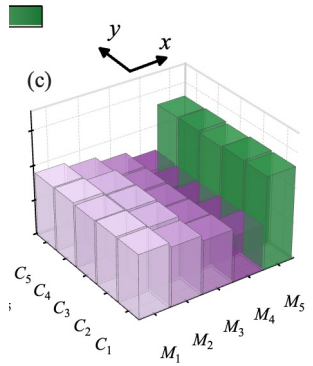
■ 缩尺模型水槽实验验证：验证自由液面高度、结构运动和变形及锚链力等核心物理量求解精度

➢ 柔性漂浮式光伏阵列动力响应机理

- ➢ 柔性减载： 整体弯曲与相对转动调节荷载传递 → **关键荷载峰值↓ 30%～40%**
- ➢ 阵列规模： 增加模块数量增强模块间协同运动与变形 → **内部模块波浪力、铰接力↓ 约45%**
- ➢ 尺寸匹配： 阵列尺寸–波长比决定响应模式 → **尺度比接近 1 时连接力与系泊张力显著增大**







6.2 研究创新点

➢ 自由表面流SPH模拟方法创新

针对传统 WCSPH 方法数值耗散偏大、压力振荡及体积守恒不足的问题：

- **提出 δR-SPH、多策略散度误差清理及粒子位移修正方法，建立兼顾稳定性、精度与守恒性的自由表面流 SPH 模型 DualSPHysics+**

➢ 柔性固体SPH模拟方法创新

针对传统 TLSPH 方法离散精度不足、零能模态及应力振荡的问题：

- **提出三维二阶离散与动态沙漏控制方法，动态沙漏控制方法，并结合黎曼稳定项与二阶速度重构**

➢ 柔性多浮体阵列流固耦合数值模型创新

针对柔性浮体阵列刚–柔界面两侧的材料刚度和变形差异显著，运动变形模拟难：

- **提出刚体–柔性体界面双向动量交换算法，实现刚柔界面运动、力和力矩的一致传递**
- **耦合改进的流体与固体 SPH 模型、刚体动力学、铰接约束及系泊动力学模型，植入 DualSPHysics+**

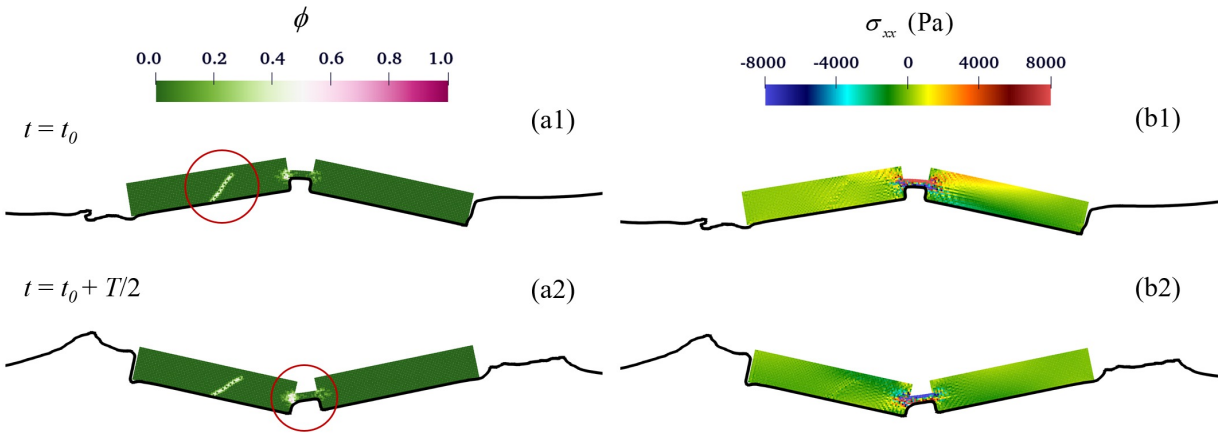
➢ 漂浮式光伏阵列流固耦合响应机理揭示

针对柔性漂浮式光伏阵列动力响应规律认知不足的问题：

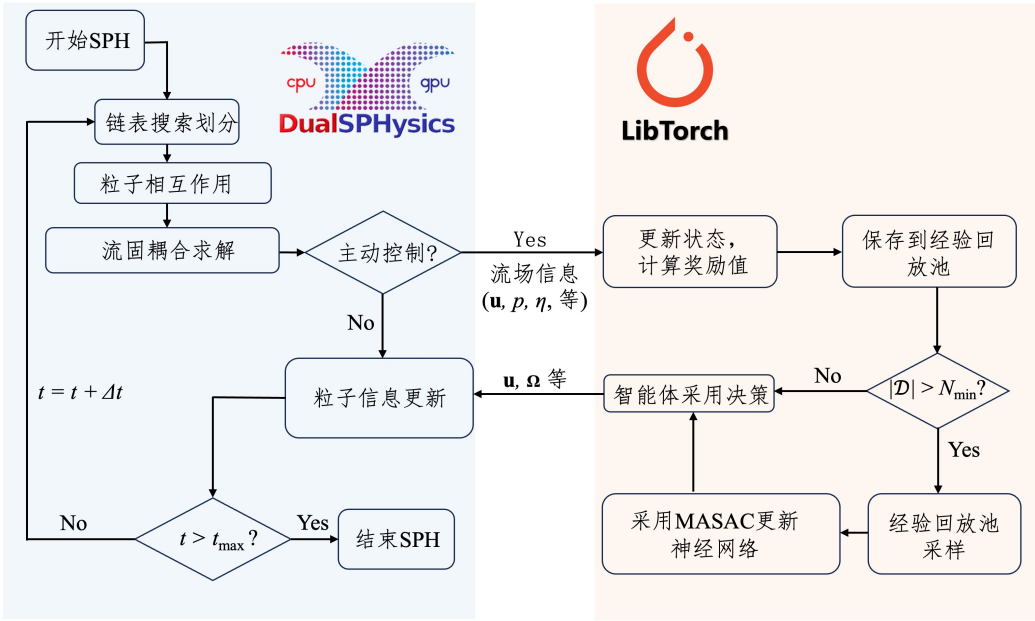
- **揭示结构柔性与模块相对运动对局部冲击和连接荷载的缓冲作用**
- **明确阵列尺寸与波长比对整体运动及荷载响应的关键影响**
- **阐明不同波浪尺度下阵列运动、内力及系泊响应的变化规律**

6.3 研究展望

➢ **建立多浮体阵列关键部位损伤与断裂行为的数值模型**



➢ **发展面向多浮体阵列主动控制与性能优化方法**



➢ **基于图神经网络增强的加速SPH数值模拟：**

高维粒子信息 → 低维空间重构 → 回映粒子空间

6.4 在读期间学术成果

➢ 近一年共获70余次引用



学术论文

以第一作者在国际高水平SCI期刊（*CPC*、*JFS*、*EAAI*、*OE*）发表论文 *4* 篇

国际会议论文 *2* 篇

国内外学术会议报告 *15* 次



技术成果

软件著作权两项：

1、高分辨率低耗散 SPH 水动力模拟软件V1.0

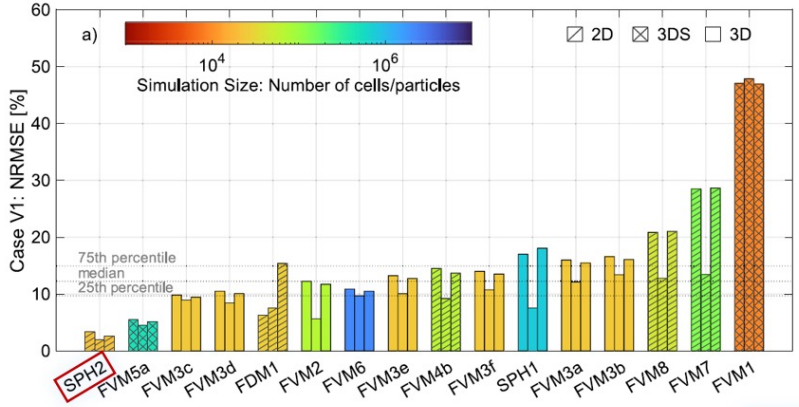
2、高分辨率低耗散 SPH 水动力模拟软件 V2.0

发明专利一项

➢ 国际权威盲测验证







performed better than the others in this metric (−5 s); this is the SPH2 solution which performed well in all cases considered (H1, V1, and V2).

多支国际顶尖研究团队
多类数值模型同台对比

包含牛津大学、京都大学（含英国皇家科学院院士）的22个模型中，
DualSPHysics+综合精度排名第一

https://ccp-wsi.ac.uk/events/blind_test_workshops/series_5/

浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

博士学位论文答辩会

感谢各位专家

答辩人： 占毅

指导教师：罗敏 赵西增

专业：海洋技术与工程

日期：2026年9月1日