



网衣系统动力学快速高保真仿真方法研究

贾万通, 尤鑫星

中国海洋大学 水产学院 青岛 266003



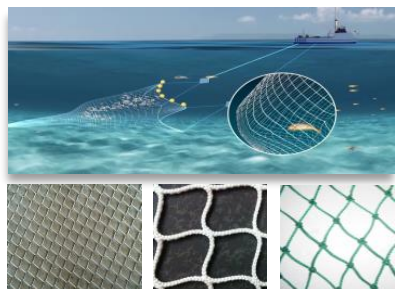
① 研究背景与内容

研究背景

- 网渔具是经济性水生生物的渔业生产装备, 是我国建设“蓝色粮仓”, 践行“大食物观”的承接载体, 是推动海洋渔业生物资源可持续利用的重要基石。
- 开展网衣系统动力学快速高保真仿真方法研究对网渔具的数字化优化设计与精准动态控制具有重要意义, 是构建渔船捕捞生产数字孪生系统的关键。
- 现有研究在进行网衣系统动力学仿真时多采用商业软件, 而对数值计算的底层算法, 模型降阶、保真恢复等基础性研究鲜有报道, 造成网衣系统动力学仿真效率低、收敛性欠佳、保真度不高等实际现状, 难以满足网渔具的精细化设计优化工作以及高质量操控要求。

研究内容

- ① 结构动力学底层算法优化
- ② 模型降阶与保真恢复方法
- ③ 虚拟仿真的应用验证



② 结构动力学的数值模拟方法

□ 底层优化算法 (Newmark-β+半隐式修正拟牛顿法)

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U} + [(1-\gamma)\ddot{U}_t + \gamma\ddot{U}_{t+\Delta t}]\Delta t$$

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \dot{U}_t\Delta t + [(\frac{1}{2}-\beta)\ddot{U}_t + \beta\ddot{U}_{t+\Delta t}]\Delta t^2$$

式中: $U_t, \dot{U}_t, \ddot{U}_t$ 为每一时间步的位移、速度和加速度; β 和 γ 为Newmark-β的系数, 取0.25和0.5。

$$S_k = u_{k+1} - u_k$$

$$y_k = g_{k+1} - g_k = -R(u_{k+1}) + R(u_k)$$

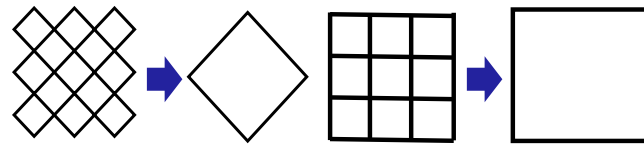
$$\rho_k = \frac{1}{y_k^T S_k}$$

$$H_{k+1} = (I - \rho_k S_k y_k^T) H_k (I - \rho_k y_k S_k^T) + \rho_k S_k S_k^T$$

式中: H_k 为Hessian矩阵, ρ_k 为更新系数。

□ 网目群化算法

- 保证相同水动力
- 保证相同体积力
- 保证相同网目结构



□ 基于三角形曲面拟合的网目线性插值算法

$$\begin{cases} L_i = \frac{1}{2S} [y_j z_k - y_k z_j + (z_j - z_k)y + (y_k - y_j)z] \\ L_j = \frac{1}{2S} [y_k z_i - y_i z_k + (z_k - z_i)y + (y_i - y_k)z] \\ L_k = \frac{1}{2S} [y_i z_j - y_j z_i + (z_i - z_j)y + (y_j - y_i)z] \end{cases}$$

工作平面为YZ平面
 L_h : 三角形三个顶点的面积坐标;
 w_h : 权重函数;
 $F(y, z)$: 三角形内任一点的X值

$$w_h(y, z) = L_h(y, z), h = i, j, k$$

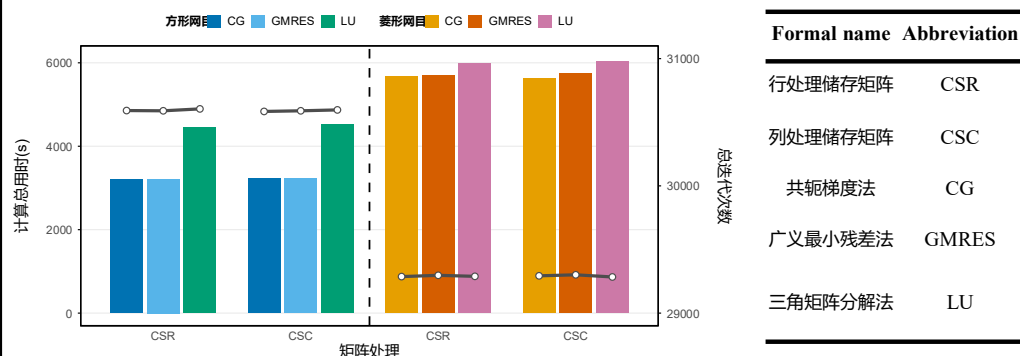
$$F(y, z) = w_i(y, z)f_i(y, z) + w_j(y, z)f_j(y, z) + w_k(y, z)f_k(y, z)$$

方形 (48×48网目)

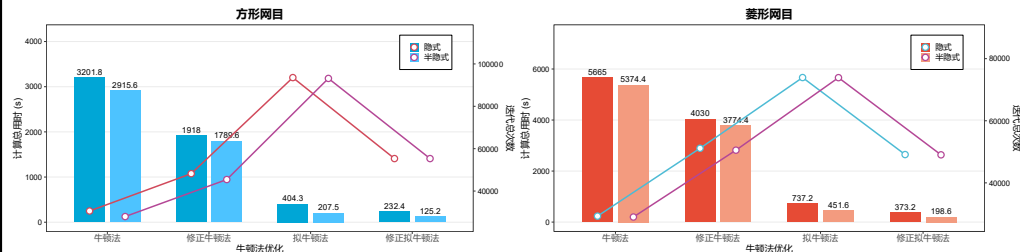
菱形 (48×48网目)

③ 底层算法优化与模型降阶测试

● 结果 (全局结构物性矩阵处理与求解器的计算性能对比)

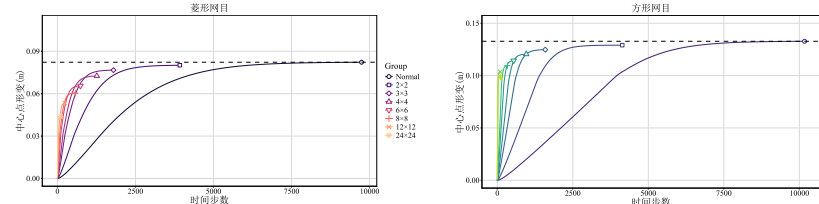


● 结果 (不同迭代方法的计算性能对比)

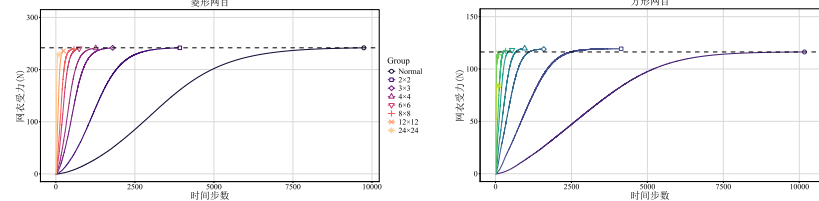


● 结果 (不同群化比例对网衣系统力形仿真结果的影响)

a. 不同群化比例对网衣中心点形变的影响

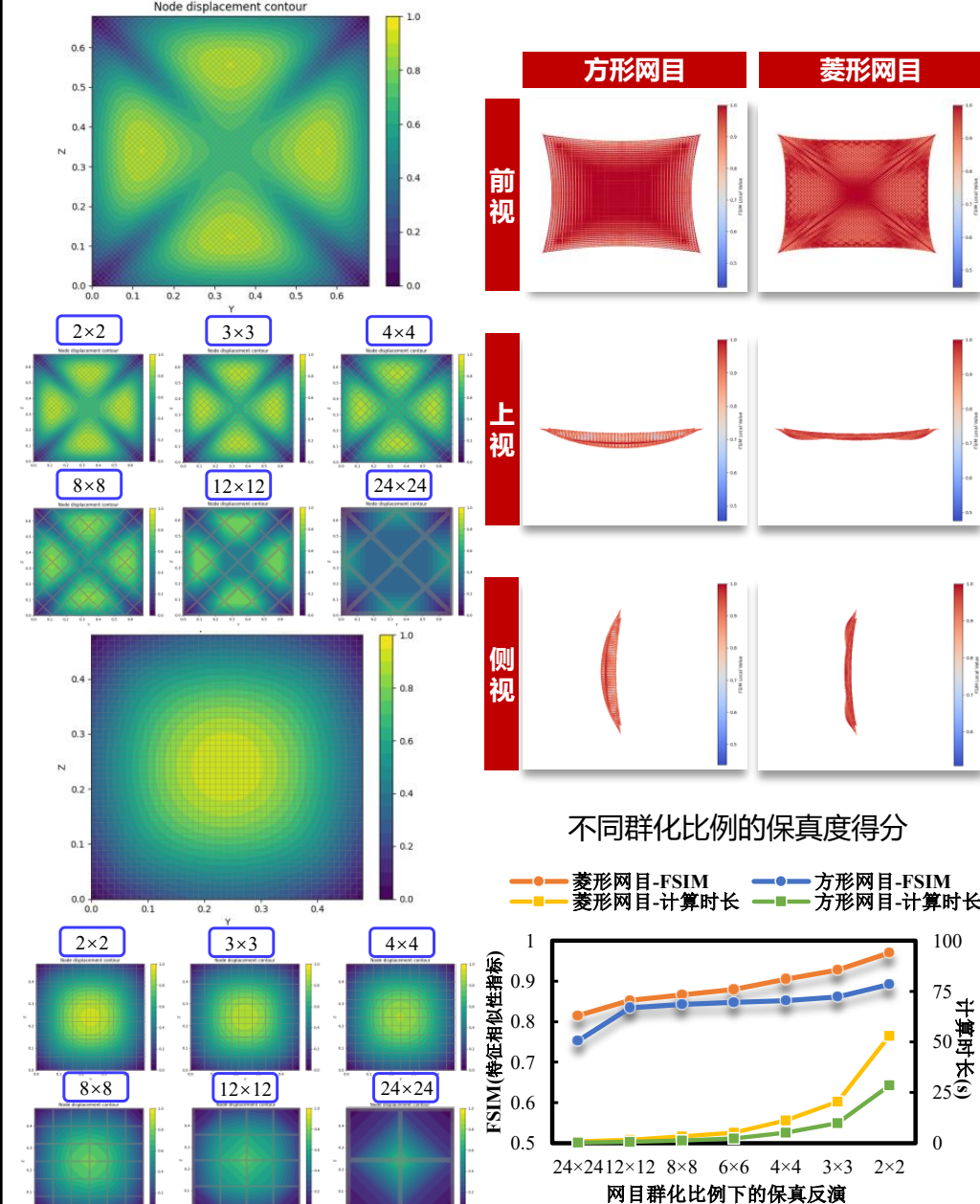


b. 不同群化比例对网衣受力的影响



④ 映射反演与保真评估

● 结果 (群化比例对全局位移的影响) ● 结果 (保真反演下的网片形态对比)



结论与展望

- 本研究以纵横各48目、共2401节点的方形网片和4705节点的菱形网片为仿真案例, 基于结构动力学方程与隐式数值计算方法, 通过结构物性全局矩阵构造、求解器选择及迭代优化等手段加速底层算法效率, 采用网目群化和插值映射算法实现模型降阶与保真反演, 验证了网衣系统快速高保真仿真算法的可行性;
- 结果显示, 批量构造和行处理储存的全局矩阵处理方式、共轭梯度法求解器和半隐式修正拟牛顿迭代法能使两种网片计算时间由3200s与5600s提升到120s与200s, 通过模型降阶和保真反演, 在3×3群化比例下进一步提升到9-20s, 实现了秒级高保真虚拟仿真, 为网衣系统动力学仿真提供了高效、高保真的解决方案, 可作为数字孪生系统的核心仿真引擎。