

基于 OpenFOAM 的数值波浪水池 开发与应用研究

曹洪建, 万德成

(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, 上海 200240)

摘要

以开源程序库 OpenFOAM 为开发平台, 针对船舶海洋工程水动力问题开发了 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 采用不可压缩粘性两相流模型, 以 Navier-Stokes 或 RANS 方程为控制方程, 使用 VOF 方法处理自由面。在求解器 naoe-FOAM-SJTU 基础上构建的数值波浪水池, 通过模拟造波板运动或固定造波边界条件生成入射波, 采用设置阻尼消波区的方式实现消波。通过集成开发波浪理论模型库, 实现了对多种不同类型波浪的模拟, 包括规则周期波、不规则波、孤立波、三维短峰波、多向聚焦波等。进一步利用求解器 naoe-FOAM-SJTU 模拟研究波浪与结构物的相互作用问题, 对浮体结构物在规则波浪条件下的运动响应进行了数值模拟预报, 数值结果与物理试验结果吻合的较好, 反映了 naoe-FOAM-SJTU 求解器的可靠性。同时, 本文还对粘性漩涡流场和自由面的演化过程进行了分析。本文的数值模拟结果说明了 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以有效的处理复杂波物相互作用问题。

关键词: OpenFOAM; 数值波浪水池; naoe-FOAM-SJTU; 浮体; 运动响应

1 引言

近年来, CFD 数值模拟技术在船舶海洋工程领域的应用越来越多, 基于 CFD 技术构建数值波浪水池的工作成为深受科研学者和工程专家的重视热点研究课题。数值波浪水池在船舶海洋结构物设计和性能优化过程中发挥越来越重要的作用。

早期的数值波浪水池主要基于势流理论进行开发, 采用的数值方法以边界元为主。随着数值方法和计算机技术的快速发展, 越来越多的研究者基于粘性流体理论构建数值波浪水池。通过求解 Navier-Stokes 或 RANS 方程, 考虑了流体粘性的影响, 更真实的反映流体流动现象。求解粘流控制方程所采用的数值离散方法以有限差分法、有限体积法为主, 例如王永学^[1]、Park^[2]采用有限差分法构建了三维粘性数值波浪水池。周勤俊等^[3]、李胜忠^[4]、李凌等^[5]、董志、詹杰民^[6]、梁修锋等^[7]等应用基于有限体积法 (FVM) 开发的 FLUENT 软件开展了数值波浪水池的二次开发工作。开源软件的出现, 极大的推动了 CFD 技术的发展, 其中开源 CFD 程序库 OpenFOAM 深受 CFD 研究者的欢迎, 许多研究者基于 OpenFOAM 开展了数值波浪水池的开发工作^[8-11]。

在自由面处理方面, 为人熟知的方法的主要有 VOF (Volume of Fluid)、Level-Set、CIP (Constrained Interpolate Profile) 等, 可以有效的模拟波浪翻卷、破碎等复杂自由面演化现象。

造波功能是数值波浪水池需要具备的基本功能之一。在过去几十年里, 研究者或借鉴物理水池造波方法, 或开发新的数值造波模式, 极大的促进了数值造波技术的发展, 在模拟波浪演化、波物相互作用过程中取得了很好的效果。Kim 等^[12]和 Tanizawa^[13]对数值波浪水池的中的造波方法进行了回顾, 对造波方法进行了概述。目前, 最为常用的造波方式主要有以下几类:

- (1) 模拟造波机运动造波;
- (2) 速度入口输入式造波;
- (3) 在动量方程中添加源项造波。

造波板理论已经发展多年,并在物理水池中都得到了有效验证,可以直接应用到数值波浪水池中。速度入口输入式造波根据相应的波浪理论的解析解给定入口边界处的波面位置和水质点速度,随着时间的步进,波浪在入射边界处生成并逐渐传播到计算域内。这种造波方式与仿造波板运动造波相比,由于无需求解网格运动,具有更高的计算效率,因而被普遍应用。但存在的问题是,速度入口输入式造波需要配合有效的消波方法和质量修正方法,以保证计算过程中的质量守恒。在动量方程中添加源项实现造波最初在基于势流理论的模型中应用广泛(Brorsen & Larsen, 1987)^[14]。之后逐渐被适用到以RANS方程为控制方程的模型中^[4]。源项造波法的优点在于:可以同时实现数值造波、消波和消除二次反射波的影响;源项造波法的问题在于如何给出准确的造波源项的表达式,尤其对于复杂的三维粘性流动问题,要推导出不同形式波浪所对应的源项表达式并非易事。

消波也是波浪水池需要具备的功能之一。无论是物理波浪水池还是数值波浪水池,由于水池边界的存在,波浪传播到水池边界处时会形成反射,干扰水池工作区的波浪条件。在物理水池中,通常采用消波斜堤消波,同时在斜堤上铺设有效吸收波能的材料,以达到完全消波的效果。在数值消波方面,为了使波浪能完全透射出开边界而不形成反射干扰,许多研究者进行了大量研究。Orlanski^[15]提出了Sommerfeld辐射边界条件,以此作为开边界条件,可以使波浪完全透射到计算域之外,不形成反射,从而起到消波作用。此边界条件在势流方法中应用较多。Baker^[16]在基于势流理论和边界元方法的二维数值波浪水池中,首次引入消波区的概念。通过在水池末端设置消波区(又称海绵层),利用人工添加阻尼的方式使水质点的速度按规律衰减,达到吸收波能、实现消波的目的。Ohyama & Nadaoka^[17]在基于BEM方法构建的二维数值波浪水池中,使用了人工阻尼消波技术,实现了无反射造波。Clement^[18]应用了人工阻尼消波和推板消波相结合的方式的实现消波。

本文在OpenFOAM的程序框架下,通过集成开发数值造波、消波功能,构建了粘性数值波浪水池,并结合集成开发的物体六自由度运动模块、系泊系统模块,形成了针对船舶海洋工程水动力问题的求解器naoe-FOAM-SJTU^[19, 26-32]。求解器naoe-FOAM-SJTU在预报船舶和海洋结构物在波浪条件下的受力、爬高、运动响应时,给出了较好的计算效果,展现了处理强非线性波物相互作用问题的能力,具有良好的应用前景。本文主要对基于求解器naoe-FOAM-SJTU开发的数值波浪水池的造波功能进行验证,并进一步应用于模拟研究浮体的运动响应问题,验证求解器naoe-FOAM-SJTU求解复杂波物相互作用问题的可行性,并对运动响应预报结果的可靠性进行分析。

2 数学模型

2.1 求解器 naoe-FOAM-SJTU

求解器naoe-FOAM-SJTU以OpenFOAM基本程序框架为基础,集成开发了数值波浪水池模块、物体六自由度运动模块和系泊系统模块,具备了求解海洋工程复杂流体流动问题的能力。

图1所示为求解器naoe-FOAM-SJTU的主要功能模块,它可以结合使用OpenFOAM或其他商业化的前后处理软件。求解器naoe-FOAM-SJTU采用不可压缩粘性两相流模型,以Navier-Stokes方程为控制方程,采用VOF方法处理自由面。

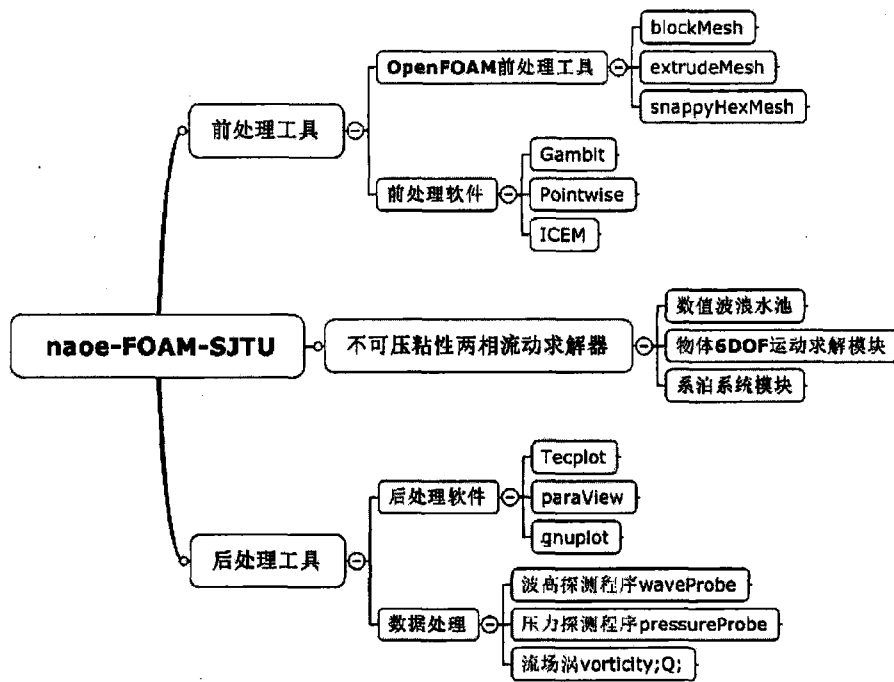


图1 求解器 naoe-FOAM-SJTU 主要模块

2.2 基本控制方程

将流体假设为不可压缩粘性牛顿流体，流体流动过程中满足质量守恒定律和动量守恒定律，控制方程为连续性方程和 Navier-Stokes 方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_{eff} (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_\sigma + \mathbf{f}_s \quad (2)$$

其中： ρ ， \mathbf{U} ， p 分别为流体密度、速度矢量和压力； $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$ 为有效动力粘性系数，其中 ν 和 ν_t 分别表示运动粘性系数和湍流粘性系数； \mathbf{g} 为重力加速度； $\mathbf{f}_\sigma = \sigma \kappa(x) \mathbf{n}$ 为表面张力项，这一项只在自由面上产生； $\kappa(x) = \nabla \cdot \mathbf{n}$ ， \mathbf{n} 分别为自由面的曲率和单位法向量； σ 为常数。 \mathbf{f}_s 为消波源项，将在后面进行介绍。

2.3 自由面处理方法

本文采用 VOF 方法捕捉空气和水的交界面。定义体积分数函数 α 为计算网格中液体相所在体积的比重：

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{液面} \\ \alpha = 1 & \text{水} \end{cases} \quad (3)$$

每一个计算网格对应一个体积分数 α 值，当 α 值介于 0 和 1 之间时，认为是空气和水的交接面。一般取 $\alpha = 0.5$ 对应的曲面为自由面。

体积分数函数 α 同样需要满足连续性方程：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) = 0 \quad (4)$$

OpenFOAM 中求解自由面时, 引入一个只在自由面起作用的相对速度 U_r 来实现对自由面的压缩。因此式 (4) 改写为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) + \nabla \cdot [\alpha(1-\alpha)U_r] = 0 \quad (5)$$

气液两相流的密度和粘性系数可以通过体积分数 α 联系在一起, 统一的表示为

$$\begin{cases} \rho = \alpha\rho_1 + (1-\alpha)\rho_2 \\ \mu = \alpha\mu_1 + (1-\alpha)\mu_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中, 下标 1、2 分别表示水和空气。

2.4 数值求解方法

OpenFOAM 中主要采用有限体积法对控制方程进行离散求解。计算过程中将计算域划分为若干网格体单元, 在每个体单元内对控制方程进行积分, 再通过高斯变化得到离散后的控制方程。求解过程中待求解流场变量采用同位网格存储, 速度、压力等均存储在计算网格的网格中心处。计算过程中, 先计算得到网格中心处的流场变量值, 再插值获得其他位置的流场信息。

针对控制方程中的各项, 可以根据需要, 采用不同的数值离散格式。其中, 对于方程中对流项的离散最为关键。本文采用带线性限制函数的 TVD 格式离散动量方程中的对流项; 采用二阶中心差分格式离散动量方程中的扩散项; 采用隐式欧拉格式处理时间项; 采用 vanLeer 格式离散 VOF 连续性方程中的对流项。

对于非定常流动问题, 需要采用适合的计算方法处理速度和压力的耦合求解过程。Issa^[20]提出的 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) 算法对处理非定常问题具有较好的效果, 因此本文采用 PISO 算法对速度压力进行耦合求解。

3 数值波浪水池

基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器, 通过集成造波功能、消波功能、波浪理论模型库构建了粘性数值波浪水池, 其基本功能程序结构如图 2 所示。

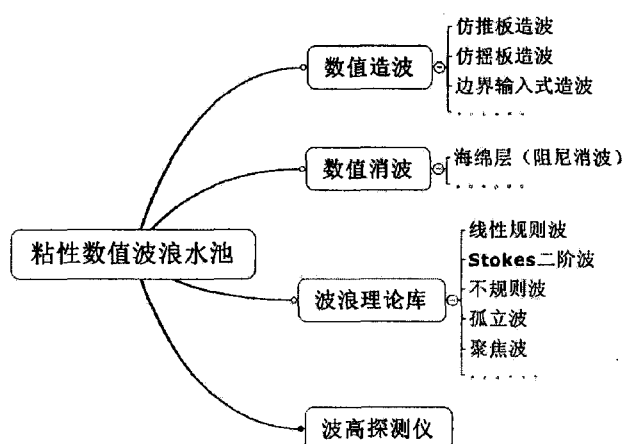


图 2 数值波浪水池的基本程序结构

3.1 数值造波方法

不同的造波方式适用于处理不同的水动力问题。因此, 本文所开的数值波浪水池中实现了三种数值造波方法, 包括仿推板造波、仿摇板造波、速度入口边界造波。在单独研究波浪问题时, 采用

两种造波方式都可以得到较好的结果。若需要同时考虑波和流的情况，采用速度入口边界造波更容易实现。

3.1.1 推板造波

在物理波浪水池中，推板和摇板造波理论已经较为成熟。同过给定运动边界和造波板相同的运动方式，即可实现波浪的生成，如推板的运动可以通过线性造波理论^[21]或二阶造波理论^[22]给定。式(7)给出了由二阶造波板理论确定的造波板的实时位置。

$$X(t) = S_0 \left[\sin(\omega t) - \frac{H}{4dn_1} \left(\frac{3}{4\sinh^2 kd} - \frac{n_1}{2} \right) \sin 2\omega t \right] \quad (7)$$

其中： S_0 表示有线性造波板理论计算得到的冲程； $n_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sin 2kd} \right)$ 。

3.1.2 摇板造波

当水深较大时，通常会采用摇板造波机造波，摇板的转动轴设置在高于水底的位置，如图3所示。

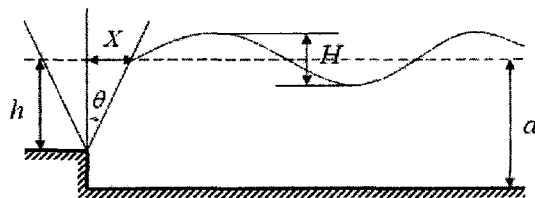


图3 摇板造波机示意图

通过理论推导可以得到摇板冲程 S 与规则波波高之间的传递关系：

$$\frac{S}{H} = \frac{kh[kd + \sinh(kd)\cosh(kd)]}{2\sinh(kd)[kh\sinh(kd) - \cosh(kd) + \cosh(k(d-h))]} \quad (8)$$

式中： d 表示水深； h 表示摇板转轴位置深度；初始时刻，摇板与自由水面垂直。造波时，摇板绕转动轴摆动，推动水体形成波面。在某一时刻，摇板和初始自由面的交点位置为：

$$X(t) = \frac{S}{2} \sin(\omega t) \quad (9)$$

摇板所对应的摇板运动角度 θ 可由下式计算：

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{X}{h} \right) \quad (10)$$

3.1.3 速度入口边界造波

速度入口边界造波方法通过在入口边界上设置波面位置和流体速度实现造波。例如，要生成线性波，只需在入射边界给定如式(11)、(11)所示的波面和流体速度即可。

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (11)$$

$$\begin{cases} u = \frac{H\omega \cosh k(z+d)}{2 \sinh kd} \cos(kx - \omega t) \\ v = 0 \\ w = \frac{H\omega \sinh k(z+d)}{2 \sinh kd} \sin(kx - \omega t) \end{cases} \quad (12)$$

3.2 数值消波方法

由于自由出流边界条件并不能保证波浪的完全透射,会在出口边界处形成波浪反射,从而对计算域工作区的波浪形成干扰。为了避免反射波的形成,许多研究者对消波方法进行了大量的研究。设置海绵层阻尼消波区是目前应用较为广泛的消波方法。通过在动量方程中增加一个源项 $f_s = -\rho\mu_s(U - U_{corr})$, 使在特定区域内的自由波面逐渐消弱至水平面,从而避免在出口边界处形成反射。本文使用的消波阻尼源项中,

$$\mu_s(x) = \begin{cases} \alpha_s [(x - x_0)/L_s]^2 & x > x_0 \\ 0 & x \leq x_0 \end{cases} \quad (13)$$

其中: x_0 表示消波区的起始位置; L_s 表示消波区的长度; α_s 为无量纲的人工粘性系数,用于控制消波强度, α_s 的值越大,对应的消波强度越大。与传统的海绵层消波方法不同,本文在消波源项 f_s 中引入了修正速度 U_{corr} 。其主要作用是进行质量修正,保证计算过程中的质量守恒。

3.3 物体的 6DOF 运动求解

求解物体六自由度运动时,定义两套坐标系:固定的全局坐标系和随物体运动的局部坐标系。在全局坐标系下,物体的六个自由度运动表示为:

$$\eta = (\eta_1, \eta_2) = (x, y, z, \phi, \theta, \psi) \quad (14)$$

其中:前三个分量分别表示沿坐标轴方向的平动线位移:纵荡、横荡、垂荡;后三个分量则表示绕坐标轴的转动角位移:横摇、纵摇、艏摇。

在随浮体运动的局部坐标系下,浮体的六个自由度的运动表示为:

$$v = (v_1, v_2) = (u, v, w, p, q, r) \quad (15)$$

前三个分量表示物体平动速度沿坐标轴方向的分量;后三个分量表示物体绕坐标轴的转动角速度。

对全局固定坐标系下的物体运动的位移求导可以得到全局固定坐标系下的速度矢量,如对线位移 η_1 求导可以获得全局坐标系下的线速度,用 $\dot{\eta}_1$ 表示;这个速度与在局部坐标系的线速度 v_1 之间可以通过下式进行转换:

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_1 &= J_1 v_1, v_1 = J_1^{-1} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 &= J_2 v_2, v_2 = J_2^{-1} \dot{\eta}_2 \end{aligned} \quad (16)$$

其中, J_1 J_2 及其逆矩阵为两个坐标系之间进行变量转化操作的转化矩阵,具体表达式可参考 Carrica 等 (2007)^[23]。同样,对于物体的受力也有相应的转换关系

$$\begin{cases} F_b = (X, Y, Z) = J_1^{-1} \cdot F_c \\ M_b = (K, M, N) = J_2^{-1} \cdot M_c \end{cases} \quad (17)$$

式中: F_c 、 M_c 表示全局坐标系下的力和力矩; F_b 、 M_b 表示局部随体坐标系下的力和力矩。

物体运动的加速度可由式 (18) 计算获得。其中, m 表示物体的质量; I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{zz} 分别表示物体绕局部坐标系三个坐标轴的转动惯量; x_g 、 y_g 、 z_g 表示物体重心到旋转中心的向量分量。将加速度对时间积分即可得到物体在局部坐标系下的速度,再通过式 (16) 转换到全局坐标系下。再对时间积分得到全局坐标系下的物体的线位移和角位移。

$$\begin{cases}
 \dot{u} = X/m + vr - wq \\
 \quad + x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) - z_g(pr + \dot{q}) \\
 \dot{v} = Y/m + wp - ur \\
 \quad + y_g(r^2 + p^2) - z_g(qr - \dot{p}) - x_g(qp + \dot{r}) \\
 \dot{w} = Z/m + uq - vp \\
 \quad + z_g(p^2 + q^2) - x_g(rp - \dot{q}) - y_g(rp + \dot{p}) \\
 \dot{p} = \{K - (I_{xx} - I_{yy})qr \\
 \quad - m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)]\} / I_{xx} \\
 \dot{q} = \{M - (I_{xx} - I_{zz})pr \\
 \quad - m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)]\} / I_{yy} \\
 \dot{r} = \{N - (I_{yy} - I_{xx})pq \\
 \quad - m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)]\} / I_{zz}
 \end{cases} \quad (18)$$

物体运动过程中，计算网格也要相应的反生变化。由于本文所研究的物体运动幅度不大，可以采用网格变形技术，通过求解和网格节点移动相关的 Laplace 方程实现 (Jasak & Tukovic, 2007)^[24]

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla U_g) = 0 \quad (19)$$

其中， γ 表示扩散系数，它的值有多种选择方式，通常取为网格点到运动边界距离的平方； U_g 表示网格点的变形速度。网格变形后，网格新节点位置为：

$$\mathbf{x}_{new} = \mathbf{x}_{old} + \Delta t \cdot \mathbf{U}_g \quad (20)$$

4 数值结果与讨论

4.1 波浪模拟及验证

本节将在数值波浪水池中对不同类型的波浪进行数值模拟，验证所开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器以及所开发的造波消波模块的有效性。首先对单向规则波、不规则波进行模拟。数值波浪水池模型如图 4 所示，左侧为造波边界，右侧为出口边界，出口边界前设置消波区。

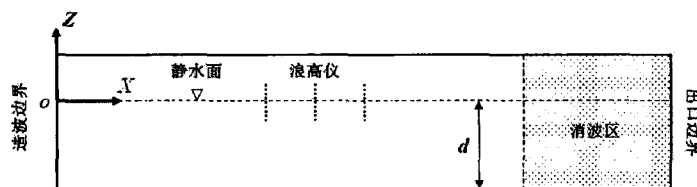


图 4 数值波浪水池模型示意图

表 1 所示为要模拟的目标的参数。本文采用 OpenFOAM 提供的前处理工具 snappyHexMesh 和 extrudeMesh 对计算域进行网格划分。在自由面附近采用较密的网格，便于更精确的捕捉自由面。计算网格如图 5 所示。

| 波浪参数 | 规则波 A | 规则波 B | 不规则波 |
|--------|--------|-------|-------|
| 波高 H | 0.125m | 0.50m | 0.20m |
| 周期 T | 2s | 2s | 4s |

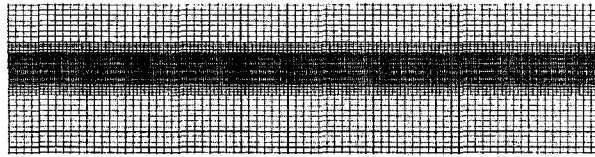
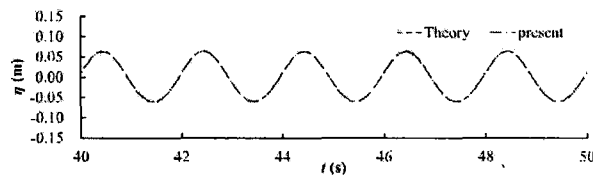


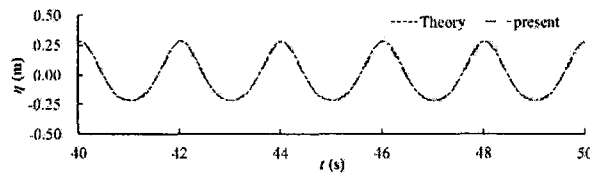
图5 计算网格划分

本文对表 1 中的目标波进行了数值模拟,并记录了水池中部的波高变化情况。图 6(a)、(b)将规则波 A、B 的数值模拟结果与 Stokes 二阶波理论解进行了比较,显示了良好的计算精度。造波边界给定的是线性波条件,但可以看到,当波陡较大时,规则波在传播过程中仍会发生非线性演化,获得的波面具有陡尖的波峰和较平坦的波谷。

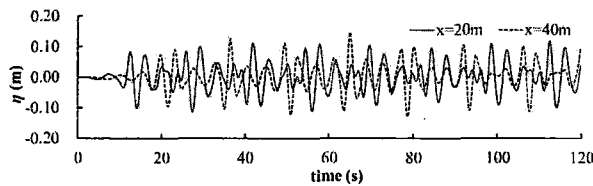
图 6(c)所示为数值模拟得到的水池中部 $X=20\text{m}$ 和 $X=40\text{m}$ 处记录的不规则波波高的历时曲线。图 5(d)将 $X=20\text{m}$ 处的不规则波的能量谱和目标波的能量谱相比较,两者吻合的较好。



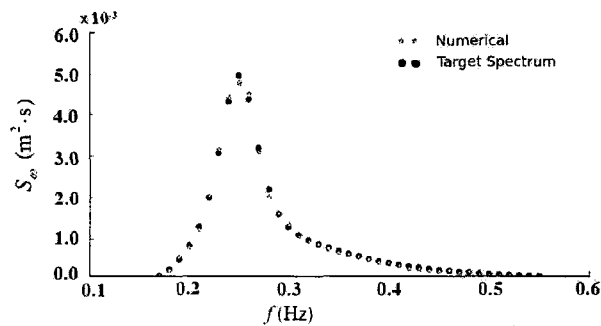
(a) 规则波 A 波高历时曲线 ($H=0.125\text{m}$, $T=2\text{s}$)



(b) 规则波 B 波高历时曲线 ($H=0.50\text{m}$, $T=2\text{s}$)



(c) 不规则波波高历时曲线 ($H_s=0.20\text{m}$, $T_p=4\text{s}$)



(d) 不规则波频谱 ($H_s=0.20\text{m}$, $T_p=4\text{s}$)

图6 规则波和不规则波的模拟结果

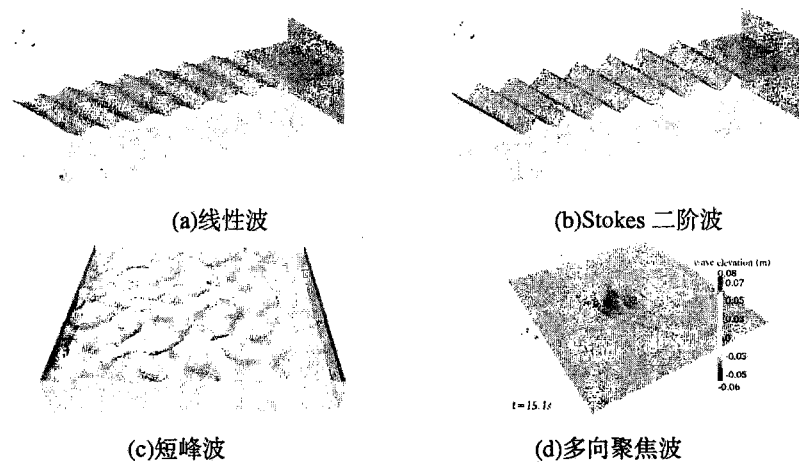


图7 不同类型波浪的瞬时自由面

图7(a)、(b)所示为模拟得到的线性波和 Stokes 二阶波的瞬时波面。可以看到，在水池中部形成稳定的周期波；在水池右端的消波区内，波幅逐渐被消减至水平面，从而避免了在出口边界形成反射干扰。

在真实海洋环境中的波浪是三维不规则的，本文方法可以对三维多向不规则波进行模拟，也就是所谓的短峰波，如图7(c)所示。

近年来，人们越来越关注海洋环境中的一种突然出现的极限波浪--畸形波。许多学者通过采用波浪聚焦的方式研究畸形波的产生和演化机理。本文在所构建的数值波浪水池中也对三维多向聚焦波进行了数值模拟生成，如图7(d)所示，数值模拟较好的在指定的位置生成了具有畸形波特征的聚焦波浪。对短峰波和聚焦波的模拟进一步显示了本文构建的数值波浪水池具有完善的造波功能模块。

4.2 浮体的运动响应模拟

4.2.1 计算模型

本文对二维浮体在规则波中的运动响应情况进行数值模拟预报。所采用的计算模型如图8所示，与 Zhao&Hu (2012)^[25]文献中的试验模型相同，便于与其实验值进行比较。

数值模拟过程与试验相同，限制浮体沿水池长度方向的移动，仅模拟浮体升沉和横摇两个自由度运动。数值水池长 12.3m，初始时刻水深 0.4m，消波区长度 2.3m。浮体中心位置距离左侧造波边界 7.0m，浮体参数如表 2 所列。入射规则波的波高为 $A=0.062\text{m}$ ，周期为 $T=1.0\text{s}$ 。采用速度入口边界条件生成入射波。计算时间步长为 $\Delta t = T/2000$ 。由于浮体的干舷仅为 0.023m，小于入射波波高，因此在波物相互作用过程中，一定会发生甲板上浪现象。

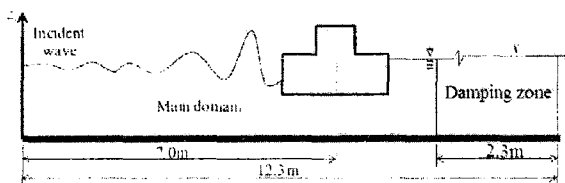


图8 浮体运动响应计算模型示意图

表2 浮体模型参数

| 展向长度 | 宽度 | 吃水 | 干舷 | 惯性半径 | 重心位置 |
|-------|-------|-------|--------|---------|---------------|
| 0.29m | 0.50m | 0.10m | 0.023m | 0.1535m | 距浮体底部 0.0796m |

4.2.2 网格划分

使用 OpenFOAM 提供的网格划分工具 snappyHexMesh 和 extrudeMesh 进行网格划分, 在浮体周围和自由面处对网格进行加密, 保证对自由面的精确捕捉以及对浮体受力的精确计算。计算网格如图 9 所示。

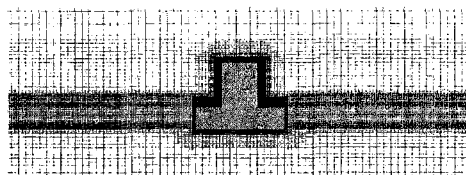


图 9 计算网格划分

4.2.3 计算结果

图 10(a)、(b)所示为浮体在规则波条件下升沉和横摇运动历时曲线。可以看到, 数值模拟结果与 Zhao & Hu^[25]文章中给出的试验值吻合的较好, 但数值模拟得到的升沉和横摇值仍略小于试验值。在距离造波边界 5.1m 处的波面高度历时曲线如图 10(c)所示, 与试验数据吻合的很好。

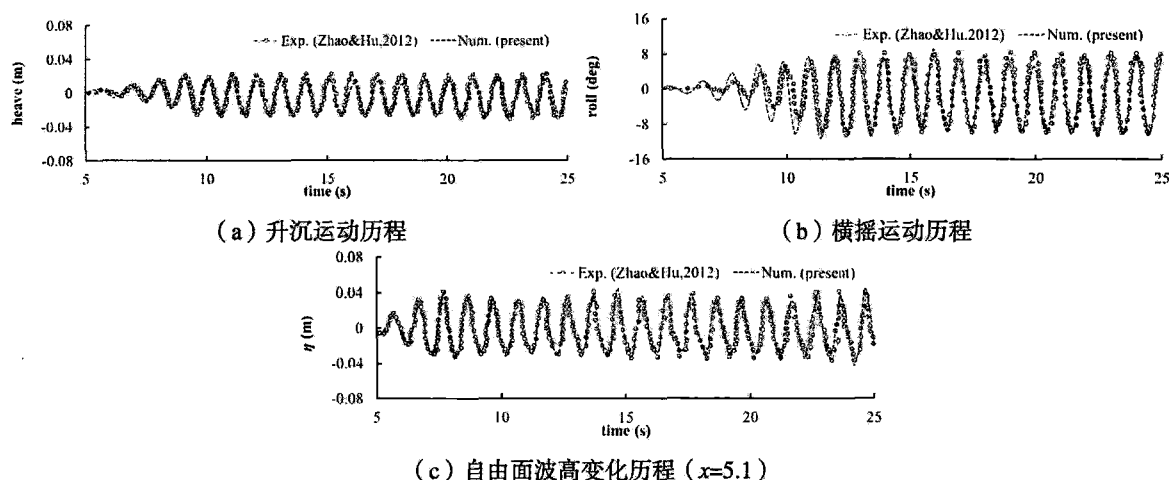


图 10 浮体运动响应及自由面历时曲线

可以看到, 浮体在给定的规则波作用下, 升沉和横摇周期与入射波周期基本相同。升沉和横摇的平均值均小于 0, 说明浮体位置整体向下移动, 且向左侧转动的角度更大。这主要是因为浮体左侧有甲板上浪现象发生, 越上甲板上的水体对浮体有向下的作用力, 使浮体平衡位置向下移动, 且增加了向左侧旋转的转矩, 使向左转动角度变大。

图 11 所示为浮体运动的瞬时姿态和自由面情况。可以清晰的看到波浪越上甲板、沿甲板流动、冲击上层结构物、沿上层结构物爬高、翻卷、反向流下甲板的整个过程。并且数值模拟得到的自由面情况、浮体位置情况均与物理模型试验照片吻合的很好。

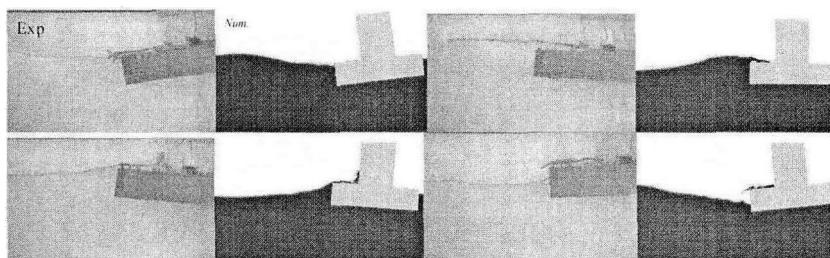


图 11 标准试验系统结果曲线

图 12 所示为浮体在规则波作用下运动时, 其周围形成的涡量场。其中, 颜色表示其主要涡量分量 ω_y 的大小。在浮体运动过程中, 漩涡在浮体下方的两个侧壁和底部形成, 之后被甩入流场中。由于浮体做升沉和横摇的往返运动, 在两个角落处形成的漩涡成对出现。成对出现的漩涡具有相反的旋转方向, 同时漩涡旋转方向总是与浮体的转动方向相反。由于规则波在浮体左侧发生甲板上浪现象, 并有空气被卷入水中, 致使自由面处的流动变得非常复杂。可以看到, 在浮体左侧前方自由面附近也有漩涡形成。流场中的漩涡逐渐远离向自由面或向浮体表面, 并在移动过程中因能量耗散而逐渐变小、消失。

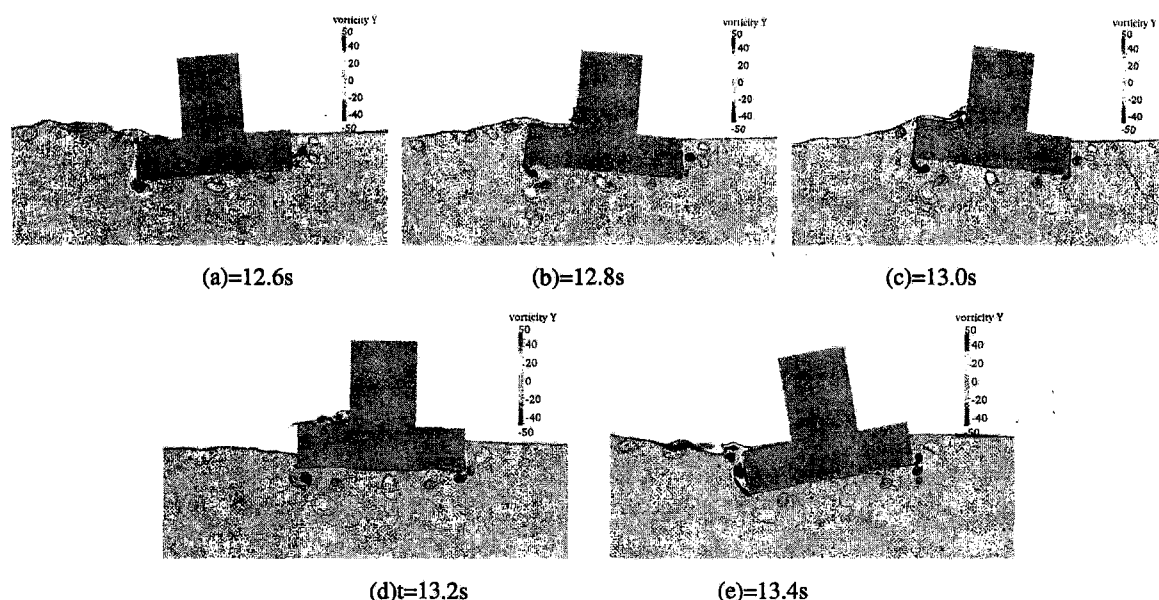


图 12 浮体附近的涡量场云图

在规则波条件下, 浮体运动响应的数值模拟结果与物理试验结果吻合的较好, 表明求解器 naoe-FOAM-SJTU 可以有效的模拟自由浮体运动, 对浮体运动响应给出合理的预报。甲板上浪是具有强非线性特征的波物相互作用问题, 且包含非常复杂的自由液面演化过程。本文能够较好的模拟再现甲板上浪过程, 再次说明了求解器 naoe-FOAM-SJTU 在处理强非线性波物相互作用问题、复杂自由面演化问题的能力和强大优势。

5 结论

本文介绍了基于开源程序库 OpenFOAM 集成开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU, 并在所构建的三维粘性数值波浪水池中进行造波, 验证了其波浪模拟功能的有效性, 展示了模拟不同类型波浪条件的能力, 为深入研究波物相互作用问题奠定了基础。本文对浮体运动响应问题的数值模拟研究结果表明, 求解器 naoe-FOAM-SJTU 有能力处理复杂波物相互作用问题, 可以有效的捕捉复杂自由面的演化过程, 可以对浮体的运动情况给出可靠的预报。同时, 本文方法可以给出复杂流场细节信息, 能够为深入研究波物相互作用问题的物理机理提供信息参考。目前, 求解器 naoe-FOAM-SJTU 正致力于提供更可靠的结果、更多的功能, 为船舶海洋工程结构物的设计和优化提供服务和支持。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目 (11072154, 51379125, 11272120)、上海高校特聘教授

岗位跟踪计划(2013022), 国家重点基础研究发展计划(2013CB036103), 工信部高技术船舶科研项目, 上海交通大学高性能计算中心, 以及英国劳氏船级社基金会(LRF)教育基金的资助, 在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] Wang Yongxue, Numerical Wave Channel with Absorbing Wave-maker[J], Chinese Journal of Hydrodynamics, 1994, 9(2), P205-214 (Ch).
王永学, 无反射造波数值波浪水槽[J], 水动力学研究与进展, 1994, 9(2), P205-214.
- [2] Park, J.-C., Kim, M.-H., Miyata, H. Three-dimensional numerical wave tank simulations on fully nonlinear wave-current-body interactions[J]. J. Mar. Sci. Technol., 2001, 6, 70-82.
- [3] Zhou qinjun, Wang Benlong, Lan Yamei, Liu Hua, Numerical Simulation of Wave Overtopping over Seawalls[J], Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(4), P629-633 (Ch).
周勤俊, 王本龙, 兰雅梅, 刘桦, 海堤越浪的数值模拟[J]. 力学季刊, 2005, 26(4), P629-633.
- [4] Li Shengzhong, Study on 2-D Numerical Wave Tank Based on the Software FLUENT[D], Harbin, Harbin Institute of Technology, 2006 (Ch).
李胜忠, 基于 FLUENT 的二维数值波浪水槽研究[D], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [5] Li Ling, Li Zhaowei, You Yunxiang, Miao Guoping, The Numerical Wave Flume of the Viscous Fluid Based on the Momentum Source Method[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2007, 22(1), P76-82 (Ch).
李凌, 林兆伟, 尤云翔, 缪国平, 基于动量源的黏性流数值波浪水槽[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2007, 22(1), P76-82.
- [6] Dong Zhi, Zhan Jiemin, Comparison of Existing Methods for Wave Generating and Absorbing in VOF-based Numerical Tank[J], Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2009, 24(1), P15-21 (Ch).
董志, 詹杰民, 基于 VOF 方法的数值波浪水槽已经造波、消波方法研究[J], 水动力学研究与进展 A 辑, 2009, 24(1): 15-21.
- [7] Liang Xiufeng, Yang Jianmin, Li Jun, Xiao Longfei, Li Xin, Numerical Wave Tank for the Application in Ocean Engineering[J], Scientia Sinica Phys, Mech & Astron, 2011, 41(2), P112-122 (Ch).
梁修锋, 杨建民, 李俊, 肖龙飞, 李欣, 面向海洋工程应用的数值波浪水池[J], 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2011, 41(2): 112-122.
- [8] Xu Shaokun, A Numerical Wave Tank Based on OpenFOAM and Its Application[D]. Tianjin, Tianjin University, 2008 (Ch).
徐少鲲. 基于开源软件 OpenFOAM 的数值波浪水槽建立及应用[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [9] Li, Y., Lin, M. Regular and irregular wave impacts on floating body[J]. Ocean Engineering, 2012, 42: 93-101.
- [10] Zha Jingjing, Wan Decheng, Numerical Wave Generation and Absorption Based on OpenFOAM[J], The Ocean Engineering, 2011, 29(3): 1-12
查晶晶, 万德成, 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波[J], 海洋工程, 2011, 29(3): 1-12.
- [11] Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R., Fredsøe, J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM®[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 70(9): 1073-1088.
- [12] Kim, C., Clement, A., Tanizawa, K. Recent research and development of numerical wave tanks-a review[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1999, 9(4): 241-256.

- [13] Tanizawa, K. The state of the art on numerical wave tank[C]. Proceedings of 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, Osaka, Japan, 2000: 95-114.
- [14] Brorsen, Larsen. Source generation of nonlinear gravity waves with the boundary integral equation method[J]. Coastal Engineering, 1987, 11(1): 93-113.
- [15] Orlanski, I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows[J]. Journal of Computational Physics, 1976, 21(3): 251-269.
- [16] Baker, G.R., Meiron, D.I., Orszag, S.A., Applications of a generalized vortex method to nonlinear free surface flows[C]. Proceedings of the Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Paris, France, 1981, 179-191.
- [17] Ohya, T., Nadaoka, K. Development of a numerical wave tank for analysis of nonlinear and irregular wave field[J]. Fluid Dynamics Research, 1991, 8: 231-251.
- [18] Clement. Coupling of two absorbing boundary conditions for 2-D time domain[J]. Journal of Computational Physics, 1996, 126: 139-151.
- [19] Shen, Z., Cao, H., Ye, H., Liu, Y., Wan, D. C. Development of CFD solver for ship and ocean engineering flows[C]. 8th International OpenFOAM Workshop, Jeju, Korea, 2013.
- [20] Issa, R.I. Solution of the implicitly of discretized fluid flow equations by operator-splitting[J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62(1), 40-65.
- [21] Usell, F., Dean, R.G., Yu, Y.S. Forced small-amplitude waters: a comparison of theory and experiment[J]. Fluid Mechanics, 1959.
- [22] Madsen, O.S. On the generation of long waves[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(36), 8672-8683.
- [23] Carrica, P.M., Wilson, R.V., Noack, R.W., et al. Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids[J], Computer & Fluids, 2007, 36(9), 1415-1433
- [24] Jasak, Tukovic. Automatic mesh motion for the unstructured finite volume method[J]. Transactions of FAMENA, 2007, 30(2): 1-18.
- [25] Zhao, X., Hu, C. Numerical and experimental study on a 2-D floating body under extreme wave conditions[J]. Applied Ocean Research, 2012, 35, P1-13.
- [26] Zhirong Shen, Hongjian Cao, Haixuan Ye and Decheng Wan. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU, Technical Report for Solver Manual, Shanghai Jiao Tong University (2012).
- [27] Zhirong Shen and Decheng Wan. RANS computations of added resistance and motions of ship in head waves, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 23(4) (2013),263-271
- [28] Yuanchuan Liu and Decheng Wan, Numerical simulation of motion response of an offshore observation platform in waves. Journal of Marine Science and Application, 12(2) 2013, 89-97.
- [29] Cao, H., Wan D. C. and Yang C. Numerical simulation of violent flow of 3-D dam-breaking waves around square cylinder. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(4) : 414-422
曹洪建, 万德成, 杨驰, 三维溃坝波绕方柱剧烈流动的数值模拟,水动力学研究与进展, 2013, 28(4): 414-422
- [30] Cao, H., Wan, D. C. Development of Multidirectional Nonlinear Numerical Wave Tank by naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. International Journal of Ocean System Engineering. 2014, 4(1): 52-59.
- [31] Cao, H., Wang, X., Liu, Y., Wan, D. C. Numerical Prediction of Wave Loading on a Floating Platform Coupled with a Mooring System. In The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference. Anchorage, Alaska, USA. 2013: 582-589.

- [32] Cao, H., Zha, J., Wan, D. C. Numerical simulation of wave run-up around a vertical cylinder. In Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA. 2011b: 726-733.

Development of Numerical Wave Tank Based on OpenFOAM and Its Application

CAO Hongjian, WAN Decheng*

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China)

Abstract

This paper presents a numerical wave tank established based on the CFD solver named naoe-FOAM-SJTU, which is developed based on the open source codes of OpenFOAM aiming at dealing with the hydrodynamic problems involved in ship and ocean engineering. This solver is achieved by solving Navier-Stokes or RANS equations, and uses the VOF method for capturing the free surface. The numerical wave tank is achieved by generating the incident waves by a moving wave-maker or an inlet wave boundary and damping waves with application of wave damping zone. Different types of wave can be generated in present numerical wave tank by using the wave theories library that includes wave theories of regular wave, irregular wave, solitary wave, short crest wave, multidirectional focusing wave and etc. The wave-structures interactions are also simulated in present work. The floating body motion response under regular wave is predicted and compared with corresponding experimental data. Good agreement indicates the efficiency of the naoe-FOAM-SJTU solver. The green water phenomenon and complicated free surface evolution are also presented and analyzed. All the numerical results show that the solver naoe-FOAM-SJTU has the potential for dealing with complicated hydrodynamic problems in ship and ocean engineering.

Keywords: OpenFOAM; numerical wave tank; naoe-FOAM-SJTU; floating body; motion response