

四级海况下锚泊浮体的水动力和运动特性分析

邬明

(宜昌测试技术研究所,湖北宜昌 443003)

摘要:针对自由液面跟踪无法准确预测锚泊系统运动特性和水动力特性的问题,采用基于全六面体非结构形网格动网格技术和自由液面捕捉法的 FINETM/Marine 商用软件,对锚泊浮体在四级海况下的流场和水动力和水运动特性进行分析,并采用 BRICS 离散格式进行自由液面运动方程离散。研究表明,该方法可以很好地预测锚泊浮体的运动特性和水动力特性。

关键词:四级海况;锚泊浮体;自由液面捕捉法;全六面体非结构网格;FINETM/Marine

本文引用格式:邬明. 四级海况下锚泊浮体的水动力和运动特性分析[J]. 兵器装备工程学报,2016(2):48-52.

Citation format: WU Ming. Analysis of Hydrodynamic and Motion Characteristics of Moored Floating-Body Under Sea Conditions of Degree 4[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2016(2):48-52.

中图分类号: TJ762.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2016)02-0048-05

Analysis of Hydrodynamic and Motion Characteristics of Moored Floating-Body Under Sea Conditions of Degree 4

WU Ming

(Yichang Research Institute of Testing Technology, Yichang 443003, China)

Abstract: As to the fact that free surface fitting method cannot precisely predict the characteristics of motion and hydrodynamics of moored floating-body, FINETM/Marine software based on free-surface capturing method was used to simulate and analyze wave-induced motion and hydrodynamics of moored floating-body under sea condition of degree 4. BRICS discretization scheme was discretized by free surface motion equation in the simulation and analysis. The results indicate that the method can efficiently predict the characteristics of motion and hydrodynamics of moored floating-body.

Key words: sea condition of degree 4; moored floating-body; free surface capturing method; unstructured full hexahedron mesh; FINETM/Marine

船舶和海洋平台在波浪中运动和载荷的数值分析,具有重要的理论意义和工程价值。目前对于锚泊浮体的计算,大多采用悬链线方法,该方法是一种简单的解析方法,由于其采用了过多的假设,造成了计算结果精度偏低。为了锚泊系统的安全,锚泊系统设计者不得不在计算结果上乘以一个比较大的权数,以保证实际锚泊系统满足设计要求。

随着计算技能的快速提高和计算数学理论不断发展完善,数值方法已经成为研究问题和解决问题的重要手段之一,它不仅在理论研究领域得到普遍应用,而且在工程实际

中也被广泛使用。本研究采用数值仿真的方法,在确定的锚泊条件下,模拟了四级海况下浮体的水动力特性与运动特性。

1 计算模型

计算采用 FINE/Marine 软件,软件包括全六面体非结构网格生成器 HEXPRESS、求解器 ISIS-CFD 和后处理器 CF-View。采用非结构形网格动网格技术在等温条件下求解不

可压缩黏性雷诺平均 N-S 方程来模拟多相流复杂流场结构^[3];质量和动量守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho (\vec{U} - \vec{U}_d) \cdot \vec{n} ds = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_i (\vec{U} - \vec{U}_d) \cdot \vec{n} ds = \\ \int_S (\tau_{ij} I_j - p I_i) \cdot \vec{n} ds + \int_S \rho g_i dV \end{aligned} \quad (2)$$

其中: V 是控制体; S 是围成控制体的面积; \vec{U}_d 是 S 上 \vec{n} 方向的速度; \vec{U} 和 p 分别是速度和压力。

湍流模型采用 $k-\omega$ (SST-Menter) 湍流模型^[4-7]。其湍动能 k 和湍流耗散频率 ω 运输方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j K - (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial K}{\partial x_j}) = \\ \tau_{ij} S_{ij} - \beta^* \rho \omega K \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) = \\ P_\omega - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial K}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (4)$$

其中

辅助函数

$$F_1 = \tan h \left(\left[\min \left\{ \max \left\{ \frac{\sqrt{K}}{0.09 d \omega}, \frac{500 \mu}{\rho d^2 \omega} \right\}, \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{kw} d^2} \right\} \right]^4 \right)$$

$$P_\omega \equiv 2 \gamma \rho (S_{ij} - \omega S_{nm} \sigma_{ij} / 3) \equiv \gamma \rho \Omega^2$$

模型中的常数

$$\alpha_1 = 0.31, \beta^* = 0.09, k = 0.41, \sigma_k = 1.00,$$

$$\sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta = 0.0828, \gamma_2 = 0.440$$

自由液面的处理采用自由液面捕捉法,即把空气和水当作单一流体同时计算,该单一流体的性能(比重、黏性系数)在空间的变化取决于一个构成函数 c 。在自由液面计算中,该构成函数 c 在空气中取值 0,在水中取值 1。通过求解以下运动方程来确定构成函数 c

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V c dV + \int_S c (\vec{U} - \vec{U}_d) \cdot \vec{n} ds = 0 \quad (5)$$

与文献上普遍采用自由液面跟踪法相比,自由液面捕捉法具有更大的灵活性和适应性,可以较好地处理破碎波等复杂的自由液面。对于波浪模拟,采用 FINE/Marine 软件的 Stocks 数值波浪模型,可以用来模拟海面波浪对飞行器的动力特性影响规律。

数值方法:微分方程离散采用隐式有限体积法,具有二阶空间和时间精度。动量方程离散采用 AVLSMART 格式,自由液面捕捉采用 BRICS 离散格式,可压缩型离散格式 BRICS 可以减小自由液面附近构成函数的数值扩散。

2 边界条件设置及网格划分

2.1 边界设置

根据模型及相应的流动条件(见图 1),确定相应计算

域: $95 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 30 \text{ m}$;

在整个数值模拟过程中,需要指定弹体的运动速度、波浪生成条件、计算域外边界条件以及物面条件。具体边界条件设置如下:

浮体重力方向的两个外边界面仍旧设为 Prescribed pressure,水平方向航行器上游边界面设为 Wave generate,其他 3 个外边界面设为 Far field,飞行器的表面设置为壁函数求解。波浪参数来自中央气象局。四级海况:波浪平均周期 $T = 3.9 \text{ s}$,波高 $H = 5.49 \text{ m}$ 。

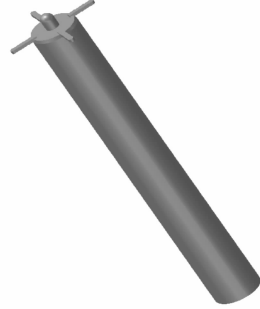
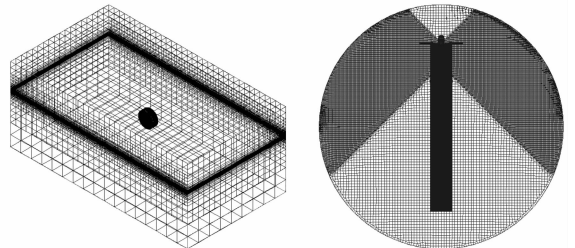


图 1 模型示意图

2.2 网格划分

计算网格的质量直接影响数值计算的可行性、收敛性及计算精度。本研究采用 FINE/Marine 的前处理器 HEXPRESS 全六面体非结构网格生成器进行网格制作。全六面体非结构网格克服了四面体网格固有的使离散格式精度退化、黏性计算速度慢等弊端。该网格生成器采用了先进的由体到面的网格生成技术,在物面附近网格被适当细化并投影到物面上,从而形成贴体网格。网格单元基本按照笛卡尔坐标方向排列,在计算域中的绝大部分区域网格单元都接近于长方体,且正交性高于 80° 的网格单元可以占其总数的 80% 以上^[8]。

由于浮体较大的摆动幅度,故采用滑移网格方法,网格总数约 500 万。如图 2 给出了模型在四级海况下网格部分示意。



(a) 整个计算域网格图示

(b) 滑移网格图示

图 2 模型网格

3 数值计算结果及分析

给定四级海况(波浪平均周期 $T = 3.9 \text{ s}$,波高 $H = 0.549$

m) 初始波浪初场, 浮体底部设有锚泊, 锚泊链无初始预应力, 锚泊链刚度 $1\ 000\ 000\ \text{M/m}$, 如图 3 所示, 锚泊在模型底部中心。进行六自由度抗浪特性模拟。

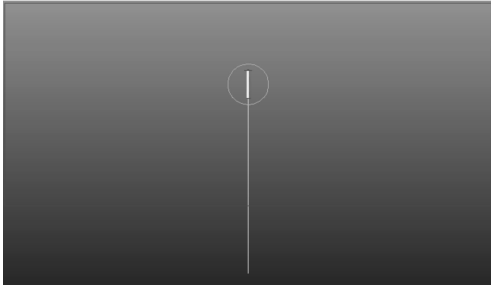


图 3 锚泊示意图

3.1 浮体运动和动力特征

计算约 6 个入射波周期。图 4 ~ 图 6 给出了四级海况下模型的水平、侧向和垂直的位移变化, 图 7 ~ 图 9 给出了浮体的侧滑角、俯仰角和滚转角的变化。可以看出, 由于波浪向确定的方向传播, 水平位移变化与波浪传播方向一致, 这与三级浪的变化特性一致; 侧向位移变化甚微; 沉降出现周期性规律变化, 质心在水下 $1.7678 \sim 2.04\ \text{m}$ 之间周期性变化。3 个图表明侧滑角和滚转角都较小, 俯仰较大, 约在 $5.172 \sim 28.283^\circ$ 之间周期性变化。

图 10 ~ 图 11 给出水平速度和垂直方向速度变化, 图 12 给出了俯仰角速度随时间的变化曲线, 图 13 ~ 图 15 给出了水平加速度、垂直方向加速度以及俯仰角加速度随时间的变化, 图 16 ~ 图 17 给出了水平力和垂直方向力随时间的变化规律。

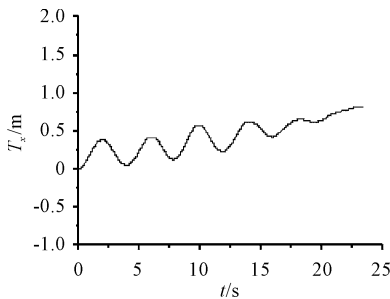


图 4 水平位移变化曲线(质心 X 坐标随时间变化)

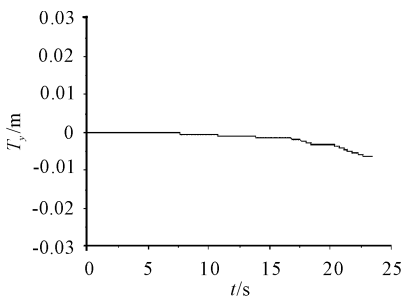


图 5 侧向位移变化曲线(质心 Y 坐标随时间变化)

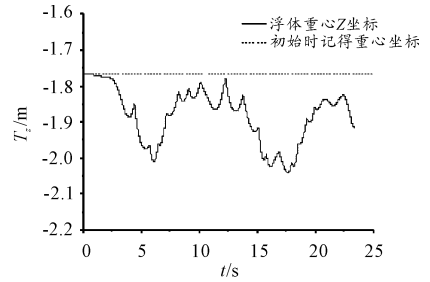


图 6 水平位移变化曲线(质心 Z 坐标随时间变化)

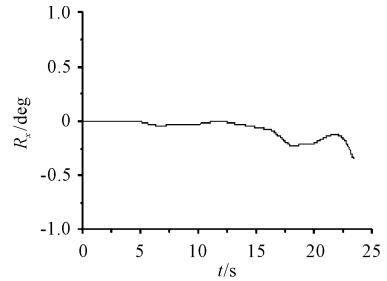


图 7 侧滑角变化曲线(浮体绕 X 轴旋转变)

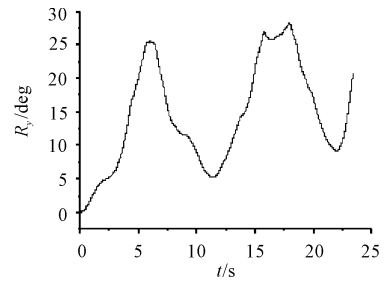


图 8 俯仰角变化曲线(浮体绕 Y 轴旋转变)

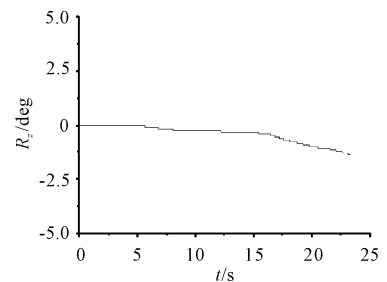


图 9 滚转角变化曲线(浮体绕 Z 轴旋转变)

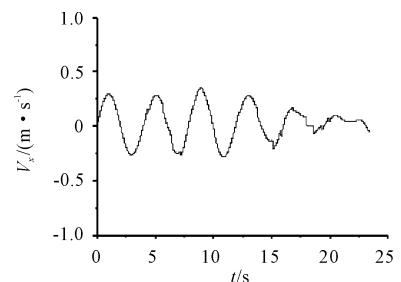


图 10 质心水平速度随时间变化曲线

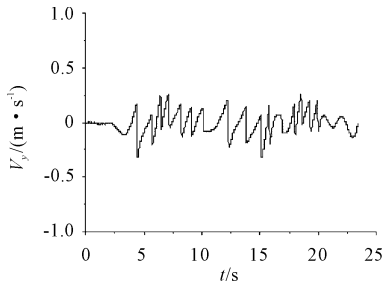


图 11 质心垂直方向速度随时间变化曲线

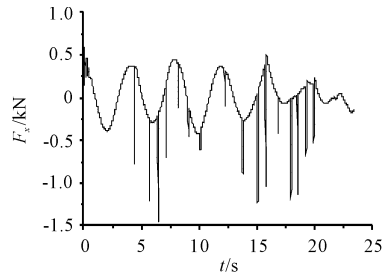


图 16 水平力随时间变化曲线

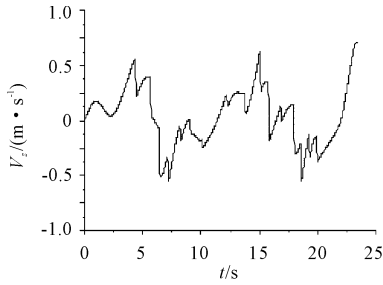


图 12 质心俯仰角速度随时间变化曲线

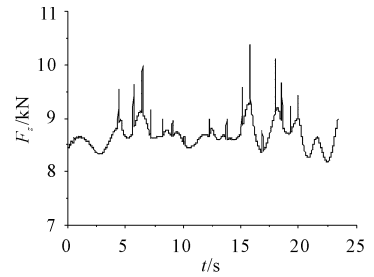


图 17 垂直方向力随时间变化曲线

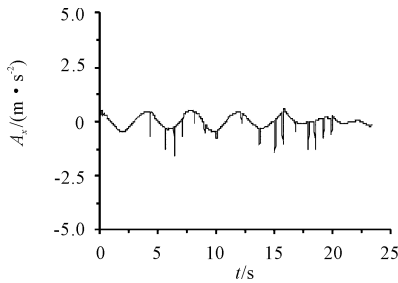


图 13 质心水平加速度随时间变化曲线

3.2 锚泊张力变化

图 18 给出了四级海况下,模型锚泊链 3 个方向的张力随时间的变化曲线。可以看出,在浮体发生较大俯仰情况下,锚泊链作用力较为明显,水平力最大值 160.34 N,垂直方向力最大至 8 365 N(拉力)。浮体侧向运动较小,侧向力也较小,可以忽略。

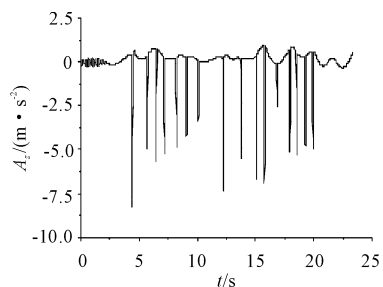
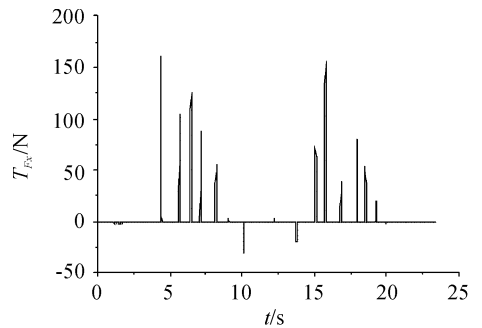
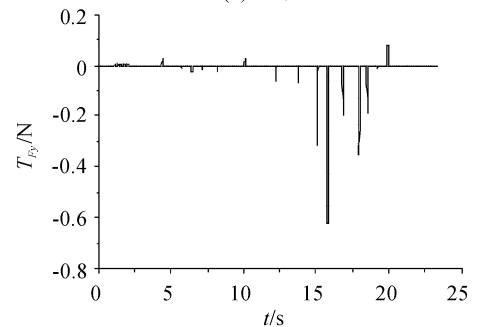


图 14 质心垂直方向加速度随时间变化曲线



(a) 水平力



(b) 垂直力

图 18 锚泊张力随时间的变化曲线

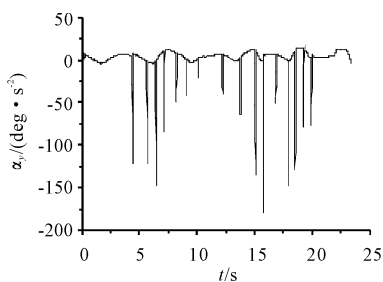


图 15 质心俯仰角加速度随时间变化曲线

3.3 流场变化特征

图 19 给出了四级海况典型时刻模型 I 的姿态以及自由

液面的变化特征,由图 19 可以更加直观看到浮体的姿态变化。

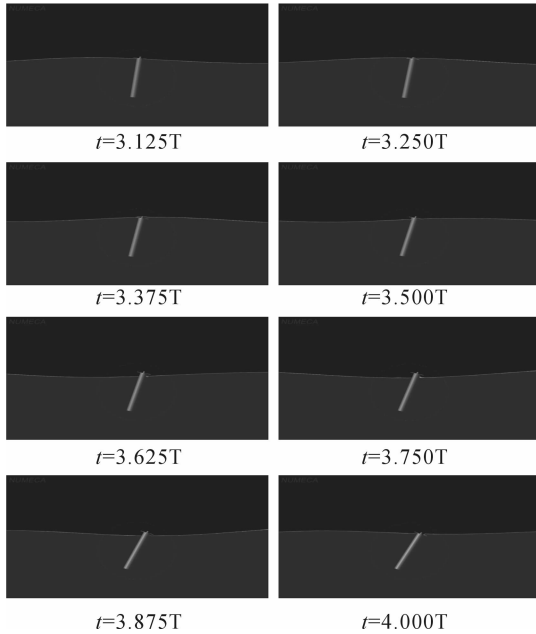


图 19 典型时刻模型姿态和自由液面

4 结论

对模型底部锚泊链固定,四级海况的浮体抗浪特性进行了模拟。模拟结果表明:浮体的升沉和俯仰具有明显的周期性变化特征,其他自由度变化幅度较小。四级海况下,质心约在水下 1.7678 ~ 2.04 m 之间周期性变化,俯仰较大约在 5.172 ~ 28.283° 之间周期性变化。另外,从锚泊链的受力分析可以看出,锚泊链对浮体的抗浪特性起到了较好地抑制作用。

参考文献:

- [1] 崔乃刚,曹春泉,韦常柱. 潜射导弹水下运动过程仿真分析[J]. 弹道学报,2009(2):95-99.
- [2] 刘曜. 波浪对运载器出水姿态角的影响[J]. 舰船科学技术,2005,27(3):32-34.
- [3] NUMECA. NUMECA International User Manual FINE/Marine v3.1[Z].
- [4] Ecole Centrale de Nantes. Equipe Dynamique des Systèmes Propulsifs Marins, Theoretical Manual ISIS - CFD v3.1 [Z]. Ecole Centrale de Nantes, France.
- [5] KAM W. Ng. Overview and Future Research Directions of Undersea Weapon Design & Optimization[C]//9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. [S. l.]:[s. n.],2002:12-14.
- [6] HALSMER D M, MINGOFI D L. Nutational Stability and Passive Control of Spinning Rockets with Internal Mass Motion[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1995, 18(5):2-4.
- [7] YAM Y, MINGON D L. Stability of a Spinning Axisymmetric Rocket with Dissipative Internal Mass Motion[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1997, 20(2):6-9.
- [8] LAN YAMEI, LIU HUA, XUE LEIPING, et al. An Experimental Study on Vertical Hydrodynamic Force on A Circular Slab Near Free Surface by Water Waves[J]. Journal of hydrodynamics, 2006, 18(2):184-191.

(责任编辑 周江川)