

海上观测平台运动特性的数值模拟

刘远传, 沈志荣, 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

摘要: 海上观测平台长期在海上作业, 对抵抗海浪的能力有较高要求, 研究海上观测平台的运动特性可为其设计提供重要参考。本文对一艘三体式海上观测平台在不同入射波作用下的运动进行数值模拟, 得到了平台运动特性和所受载荷时历曲线, 并对运动和所受载荷幅值随入射波波高和波长的变化情况进行了比较分析。本文计算均使用基于 OpenFOAM 自主开发的 naoe-Foam-SJTU 求解器完成, 通过有限体积法数值离散流体控制方程, 采用 VOF 方法处理自由面, 应用 PISO 算法对速度和压力解耦, 并通过动网格技术来模拟平台的运动情况。

关键词: 海上观测平台, 运动特性, 数值模拟, naoe-Foam-SJTU

1 引言

海上观测平台在波浪上运动性能与其安全性和执行作业的有效性密切相关。对于需要长期在海上作业的海上观测平台来说, 过大的运动幅度不仅会对结构安全产生影响, 更会无法为装载的仪器设备的正常运转提供良好的工作环境。如果能准确预报海上观测平台的运动性能, 就可以在海上观测平台设计过程中对设计方案进行改进。因此对海上观测平台在波浪上的运动性能进行研究具有重要意义。

随着计算机硬件与计算技术的发展, 数值计算逐渐成为了物理水池模型试验之外, 对结构物在波浪中的运动性能进行研究的另一种选择, 采用数值计算的方法预报船舶与浮式结构物的运动越来越普遍。传统的数值计算方法通常基于势流理论, 由于计算速度快而且可以相对有效地粗估运动性能, 这些方法得到了广泛的应用。例如, 二维切片法[1]、三维频域方法[2]以及三维时域方法[3]等。但是这些方法也有其局限性, 比如, 并未考虑粘性影响, 无法考虑非线性因素等。另一方面, CFD 不仅可以充分考虑流体的粘性作用, 还可以将流体的非线性因素计及在内, 因而可以得到相对准确的结果。近年来, CFD 的方法被越来越多地用来解决船舶与浮式结构物在波浪上的运动问题。吴乘胜等人[4]对规则波中顶浪前进的 Wigley 船模运动进行了数值模拟, 得到的结果与模型试验符合较好。Shen Zhirong 等人[5]基于开源代码进行了一系列数值船模试验, 建立了标准数据库。杨波等人[6]实现了 DTMB 5512 船模在 2 种不同波高规则波中顶浪运动时的垂荡及纵摇耦合运动数值模拟, 并求取了垂荡及纵摇运动的响应幅值算子。

本文对一艘三体式海上观测平台在不同入射波作用下的运动进行数值模拟, 得到了平台的垂荡、纵摇以及横摇等运动特性和所受作用力和力矩的时历曲线, 并对运动和所受载荷幅值随入射波波高和波长的变化情况进行了比较分析。本文中所有算例的计算均采用基于开源的 CFD 求解工具 OpenFOAM[7]自主开发的求解器 naoe-Foam-SJTU 完成。该求解器已经在前期的数值波浪水池造波

和消波[8]、流体绕过圆柱数值模拟[9]以及孤立波与固定式平台作用[10]等工作中得到了应用和验证,保证了结果具有较高的可信度。本文采用有限体积法求解雷诺时均 N-S (RANS)方程,应用 VOF 法对自由液面进行捕捉。在对速度压力耦合问题的处理上,采用了 PISO 算法。在计算平台的运动时,使用了六自由度运动方程。此外,为了准确模拟平台的运动情况,本文还应用了动网格技术。

2 数学模型及数值方法

控制方程

为了求解非定常、不可压粘性流体,本文选择 RANS 方程,即雷诺时均 N-S 方程作为控制方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla(\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu + f_\sigma \quad (2)$$

其中: \mathbf{U} 为速度场; \mathbf{U}_g 为网格移动速度; $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 为流体动压力,等于总压力减去静水压力; ρ 为液体或者气体的密度; \mathbf{g} 为重力加速度向量; μ 称为动力粘度; f_σ 为两相流动模型中的表面张力项,在 2.1 节将作进一步说明。

2.1 VOF 法

本文采用 VOF 法[11]来捕捉自由液面的变化,这种方法的优点是可以控制数值扩散并拥有较高的自由液面捕捉精度。VOF 法的输运方程可以定义为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r(1-\alpha)\alpha] = 0 \quad (3)$$

其中,等号左边前两项为质量守恒方程中的体积分项,第三项为考虑自由液面存在的可压项。方程中的 α 为体积分,代表每一个单元网格中液体部分所占体积的百分比,因此在所有单元中, α 的值介于 0 和 1 之间:

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气中} \\ \alpha = 1 & \text{水中} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{两相交界} \end{cases} \quad (4)$$

通过体积分 α , 可以将密度 ρ 和动力粘度 μ 分别定义为:

$$\rho = \alpha \rho_l + (1-\alpha)\rho_g \quad (5)$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1-\alpha)\mu_g \quad (6)$$

其中:下脚标 g 和 l 分别代表气体和液体。方程(2)中的表面张力项可以定义为:

$$f_\sigma = \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (7)$$

其中 σ 代表表面张力,在本文中取 $\sigma = 0.07 \text{ kg/s}^2$; $\kappa = -\nabla \cdot (\nabla \alpha / |\nabla \alpha|)$ 为自由液面的曲率大小。

2.2 离散方法

本文中, RANS方程和VOF输运方程通过有限体积法(Finite Volume Method)进行离散化处理。在对方程的各项进行离散化处理时, 计算域被划分为一系列单元, 流场的各个物理特征量储存在每个单元的中心, 再通过插值计算获得每个单元面上的物理量信息, 最后通过面上物理量上的值与所在单元面的面积积分获得整个计算域的物理量值。方程(2)中对流项采用二阶迎风离散格式, 粘性项采用二阶中心离散格式; 方程(3)采用Van Leer scheme方法; 而时间导数项的离散则采用欧拉格式。

速度压力耦合方程求解

本文通过PISO(Pressure-Implicit-Split-Operator)算法对速度和压力解耦。PISO意为压力的隐式算子分割法[12], 起初是针对非稳态可压流动的无迭代计算所建立的一种压力速度计算程序, 后来在稳态不可压流动问题的迭代计算中也广泛使用。PISO 算法分预测——修正——再修正三步完成。

2.3 六自由度运动

为了计算平台的运动, 本文引入了六自由度计算求解器[13]。在求解运动的过程中, 共使用了两个坐标系[14]: 地球坐标系(EFS)和平台坐标系。地球坐标系的原点位于平台正浮时水线的最前端, X轴正向指向平台尾部, Z轴正向垂直向上, Y轴正向由右手定则确定。当平台处于正浮状态时, 平台坐标系与地球坐标系完全重合。关于六自由度运动的求解具体过程可见参考文献^[15, 16]。

2.4 动网格技术

本文通过动网格技术来模拟平台的运动情况。在求解过程中, 网格单元之间的拓扑关系不发生变化, 但会发生平移、拉伸、扭转等变形运动。整个流场中网格节点的位置通过求解以下Laplace方程获得:

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla U_g) = 0 \quad (8)$$

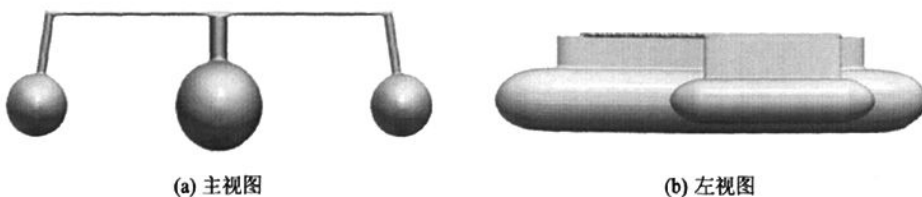
其中, γ 与网格单元中心到平台表面边界的距离 r 有如下关系:

$$\gamma = \frac{1}{r^2} \quad (9)$$

3 计算模型及工况

3.1 计算模型

3.2 本文的计算模型是一个三体式海上观测平台, 其三维视图及三视图参见图1。该平台主要由一大、两小筒形结构, 甲板以及连接筒形结构和甲板的方形平板构成。在静水环境中, 圆筒的中心线位于自由液面上。



(a) 主视图

(b) 左视图

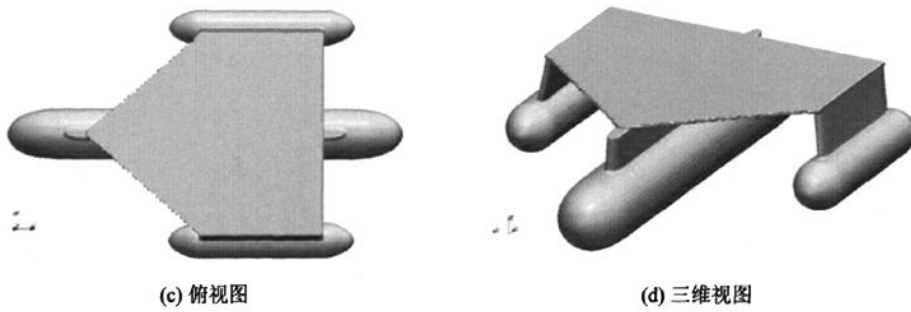


图1 平台三维视图及三视图

平台的主要参数列于下表1中:

表1 平台主要参数

主要参数	单位	取值
长度	m	14
宽度	m	10
穿高	m	2
大圆筒直径	m	2
小圆筒直径	m	1.4
排水量	m ³	28.975

3.3 计算工况

3.4 本文一共考虑了4种波浪入射的情况,并计算了每种工况下考虑纵摇及垂荡耦合和仅考虑横摇两种自由度的平台运动。各工况的波浪参数列于下表2:

表2 波浪参数

工况编号	波长 λ (m)	波高 H(m)	周期 T(s)
1	14	0.5	3
2	14	1	3
3	35	1	4.7
4	35	2	4.7

4 计算网格

4.1 本文中的网格由OpenFOAM提供的snappyHexMesh网格生成工具生成。网格生成方法是先使用三维建模软件建立模型,再生成笛卡尔坐标系下的背景网格,然后通过分割背景网格来得到最后的计算网格。

4.2 对于纵摇和垂荡耦合的情况,考虑到几何形状和运动形式的对称性,仅对一半的平台和计算区域进行网格划分以减少计算量。该种情况下网格布置形式可参见下图2。波浪从水池左侧沿着平台纵向方向(即X正方向)传播。为了提升计算结果的精度和可靠性,特别对自由液面及平台所在区域进行了网格加密处理。最终得到整个计算域的网格数量在80万左右。

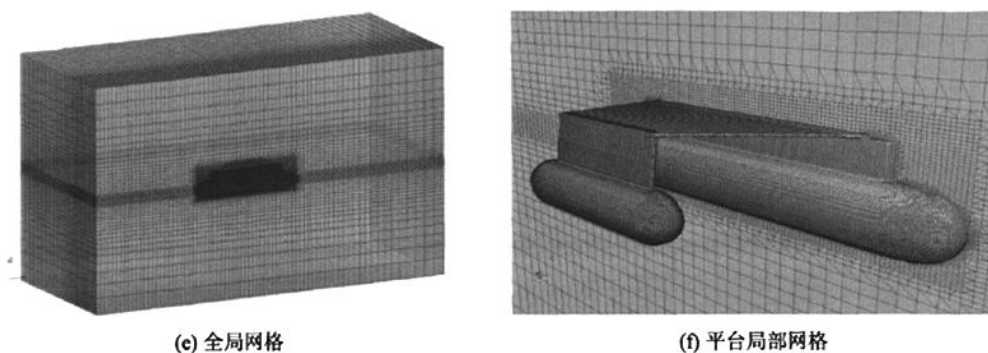


图2 纵摇与垂荡耦合运动的计算网格

对于仅考虑横摇的情况，由于平台在横向并无对称性，因而需要对整个平台划分网格并计算，计算域的网格数量也因此加倍至160万左右。需要说明的是，为了考察平台的横摇运动特性，波浪沿着平台的横向方向(即Y正方向)传播，故网格布置与图2中有一些差别：缩减了X方向的计算域长度，同时增加了Y方向的长度。该种情况下网格布置形式可参见下图3。

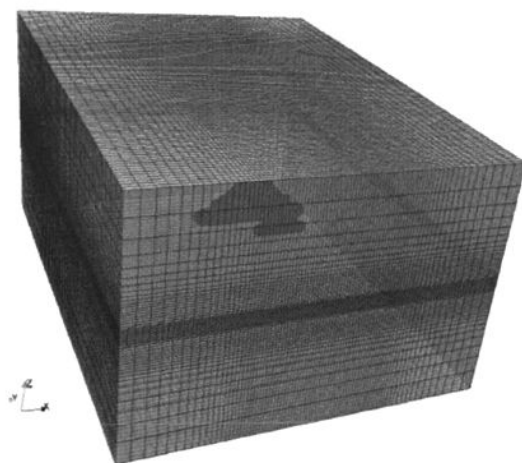


图3 横摇计算网格

5 数值计算结果

5.1 数值造波试验

对各种工况下平台与波浪相互作用进行数值模拟之前，应当先进行数值造波试验，以验证入射波浪是满足工况要求的。这里仅给出工况4下，即入射波长为35m、波高为2m时，平台首部所在位置处的试验结果，见下图4。

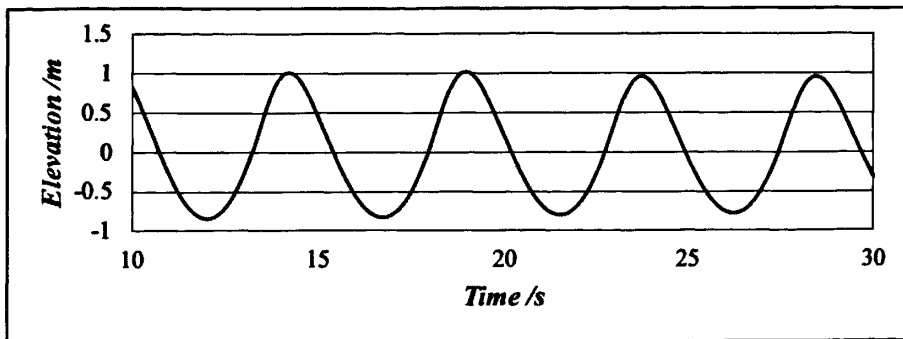


图4 波长为35m、波高为2m工况下的造波试验结果

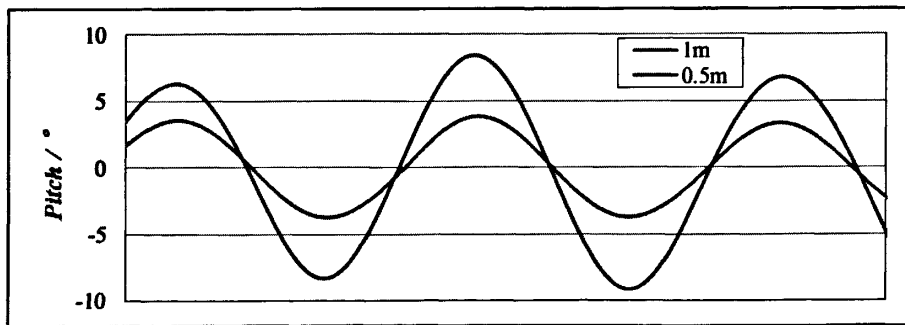
从图4中可以看出，波浪波峰值约为1m，波谷值略低于1m，且略微平坦，基本满足工况要求，可进行下一步运动模拟。

5.2 纵摇与垂荡耦合运动

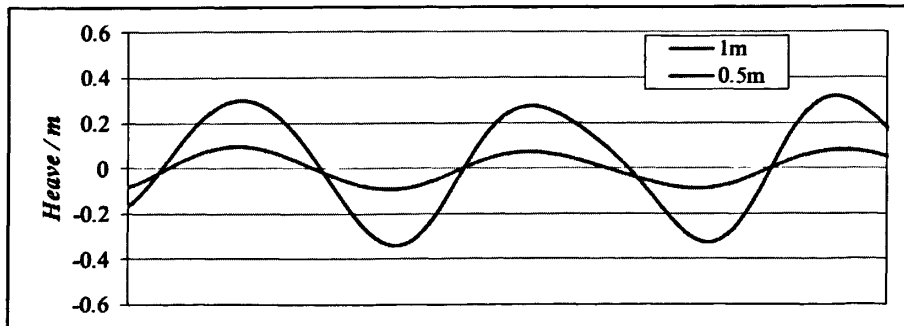
工况可根据所选取入射波浪的参数分为两类：相同波长、不同波高，以及相同波高、不同波长。本文将对这两种情况下的纵摇和垂荡幅值、Z方向的作用力以及绕Y轴的作用力矩分别进行比较。

5.2.1 不同波高情况

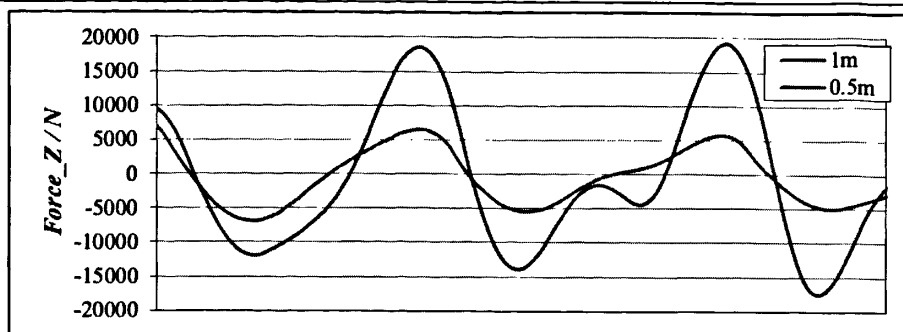
对于工况1和工况2，两种工况下入射波浪的波长均为14m，波高分别为0.5m和1m。将波浪传播一段时间，平台运动趋于稳定后的结果绘成曲线，如下图5所示。由于两种工况下的相位略有差别，图中所示均进行过相位平移处理。这时，横轴代表的时间没有标出，但应该注意到所有曲线均为随时间变化的，后面若有类似情况将不再单独说明。



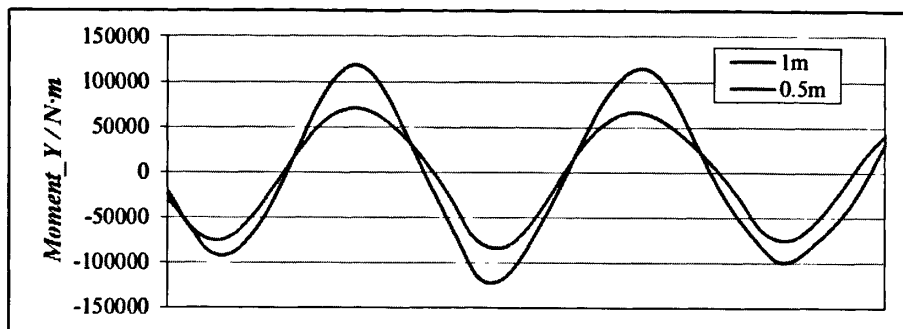
(g) 纵摇运动变化曲线



(h) 垂荡运动变化曲线



(i) Z方向受力变化曲线



(j) 绕Y轴力矩变化曲线

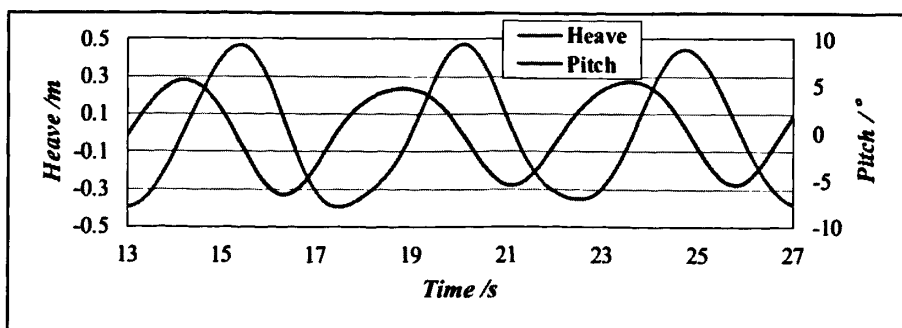
图5 波长一定、不同波高的波浪入射情况下，平台纵摇及垂荡运动与载荷随时间变化曲线

图5中，红线代表波高为1m的情况，蓝线代表波高为0.5m的情况。从图中可以看出，0.5m时纵摇和垂荡幅值分别约为 3.5° 和0.08m；当波高增大至1m时，二者的值也分别增大为约 7° 和0.3m。纵摇幅值约增加了一倍，而垂荡幅值则增加得更多一些。这可以说明，相对于纵摇运动，垂荡运动对波高的变化更敏感。对于平台所受作用力和力矩，绕Y轴方向作用力矩约增加一倍，而Z方向作用力则有较大增加，这与上面提到的运动变化有类似的规律。

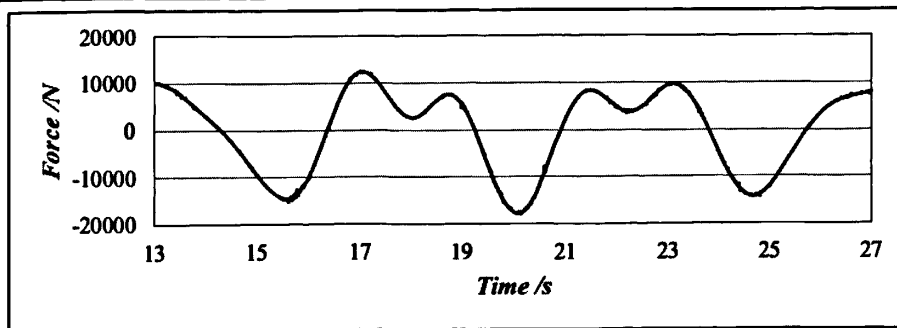
此外，仔细观察平台的纵摇和垂荡曲线，可以发现二者之间存在相位的差别。换句话说，当平台达到垂荡最大值时，纵摇还并未达到最大幅度。位移与受力以及转角与所受力矩之间亦均存在半个周期的相位差，这与物理中的位移和受力关系特性也是吻合的。

5.2.2 不同波长情况

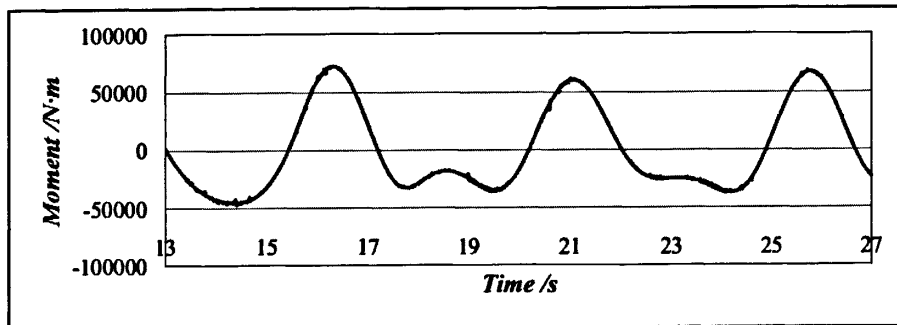
对于工况2和工况3，入射波的波高均为1m，而波长则分别为14m和35m。将工况3的结果绘出，如下图6所示：



(k) 纵摇和垂荡运动变化曲线



(l) Z方向受力变化曲线



(m) 绕Y轴力矩变化曲线

图6 波长为35m、波高为1m时，平台纵摇及垂荡运动与载荷随时间变化曲线

图6中有一点值得注意，Z向受力和绕Y轴力矩均出现了所谓“二次波峰”的现象。

为方便比较，计算两种工况下各条曲线在数周期内的平均幅值，单独列于下表进行比较：

表3 工况2和3下纵摇与垂荡结果比较

项目	单位	$\lambda=14\text{m}$	$\lambda=35\text{m}$
垂荡	m	0.3	0.45
纵摇	°	6.9	5.3
Z方向作用力	kN	18.8	12.3
绕Y轴方向所受力矩	MN·m	0.11	0.064

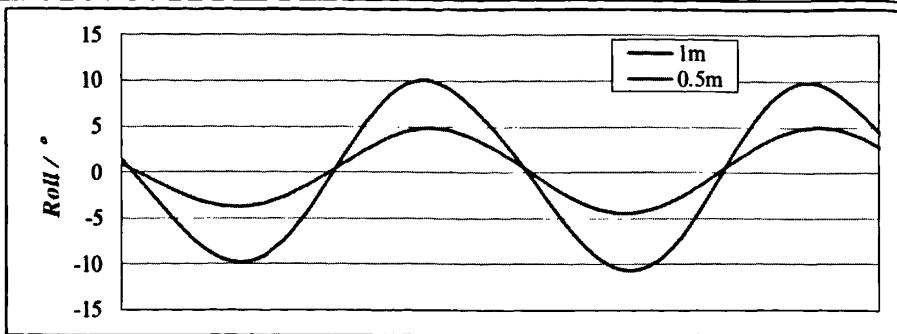
从表3中可以看出，工况3下，当入射波波长大于平台特征长度时，各参数的值出现了不同趋势的变化：垂荡运动的幅值有所增加，而纵摇和其余两个量则减小了。

5.3 横摇运动

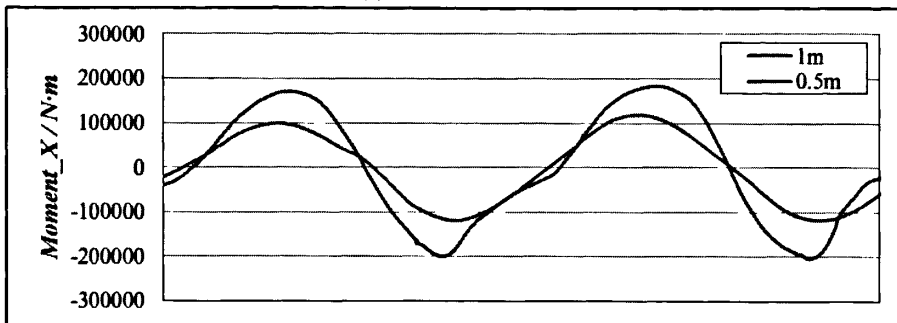
与前面类似，对于横摇运动的讨论也将按两部分展开。值得注意的是，对于横摇运动，入射波浪的传播方向调整为Y方向，考察的参数也相应变为横摇角度和绕X轴方向作用力矩。

5.3.1 不同波高情况

各条曲线如下所示：



(n) 横摇运动变化曲线

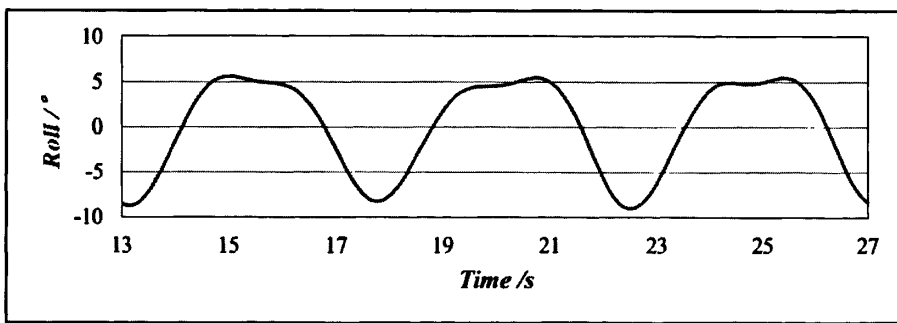


(o) 绕 X 轴力矩变化曲线

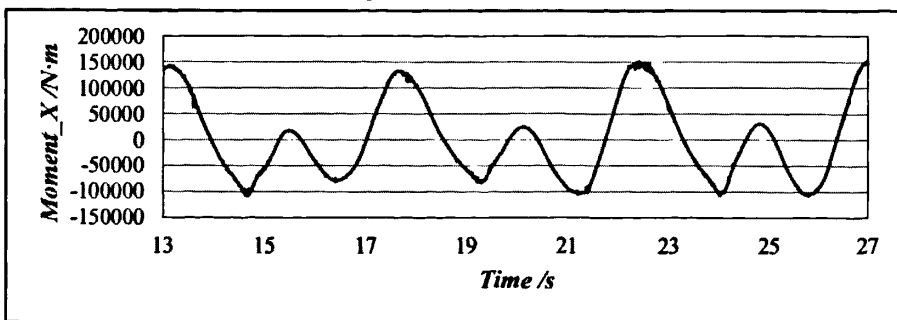
图 7 波长一定、不同波高的波浪入射情况下，平台横摇运动与所受力矩随时间变化曲线从图 7 中可以看出，当波高线性增加时，横摇幅值也相应从 5° 变大为 10°。

5.3.2 不同波长情况

与前面类似，仅将工况 3 的结果绘出，如下图 8 所示。从图 8 中可以看出，横摇曲线的峰值处变得很平坦，力矩曲线的“二次峰值”现象也很明显。



(p) 横摇运动变化曲线



(q) 绕 X 轴力矩变化曲线

图 8 波长为 35m、波高为 1m 时，横摇运动与所受力矩随时间变化曲线同样，将两种工况下各条曲线数周期的平均幅值，单独列于下表进行比较：

表 4 两种工况下横摇结果比较

项目	单位	$\lambda=14\text{m}$	$\lambda=35\text{m}$
横摇	°	10	5.4
绕 X 轴方向所受力矩	MN·m	0.176	0.141

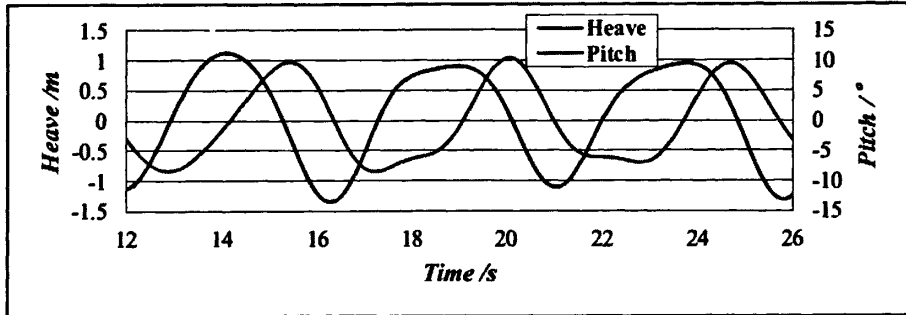
表 4 显示两个量均有不同程度的下降，横摇幅值更是几乎下降一半，这说明波长对横摇有较大影响。波长越接近平台的特征长度，横摇幅度越大。

5.4 工况 4 结果

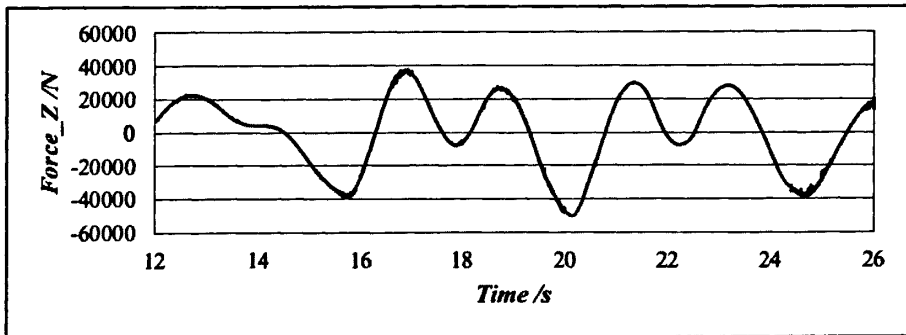
工况 4 下，入射波的波长和波高分别为 35m 和 2m。

5.4.1 纵摇与垂荡耦合运动

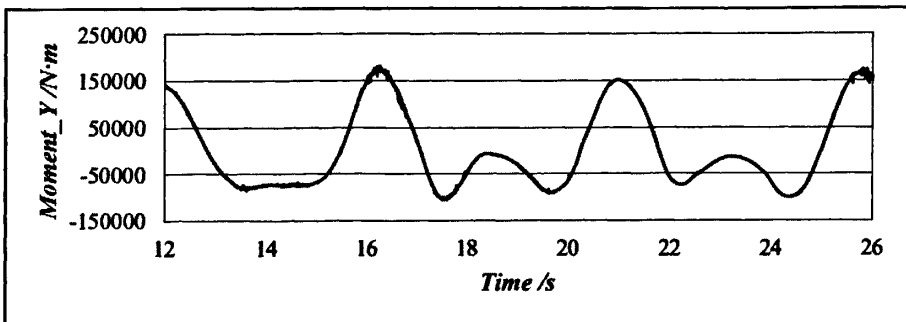
对于纵摇与垂荡耦合运动，结果曲线如下所示：



(r) 纵摇和垂荡运动变化曲线



(s) Z 方向受力变化曲线



(t) 绕 Y 轴力矩变化曲线

图 9 波高 2m 入射波作用下纵摇和垂荡运动与载荷随时间变化曲线

从图 9 中可以看出，运动相当剧烈，垂荡和纵摇幅度分别达到了 1m 和 10°，力和力矩的值也都有很大的增加。

下面一组图片形象地展示了工况 4 下平台一周期内的大幅纵摇和垂荡运动：

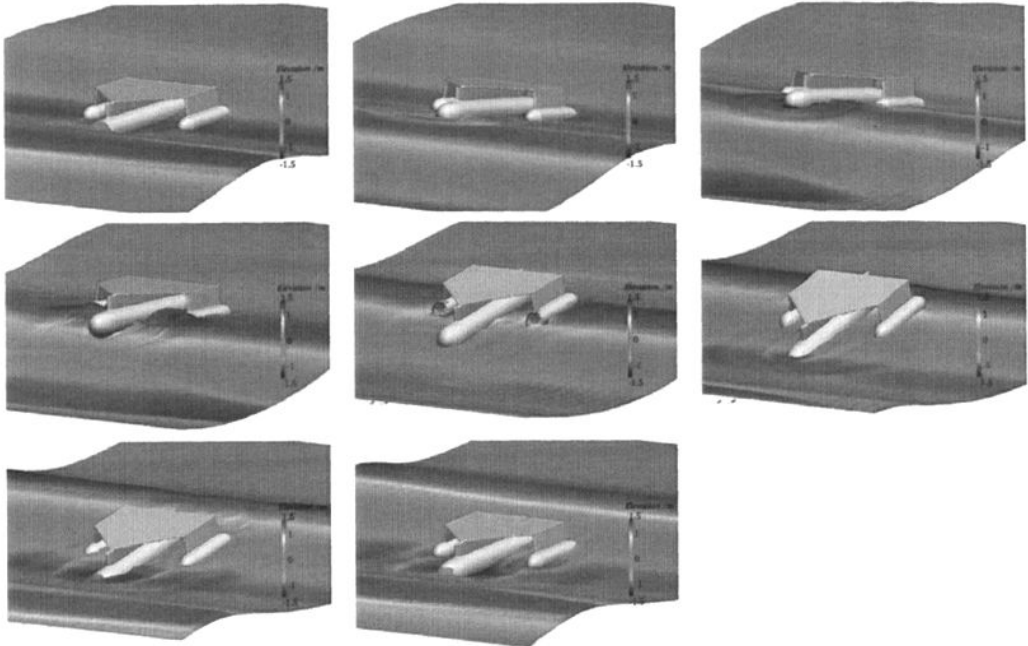
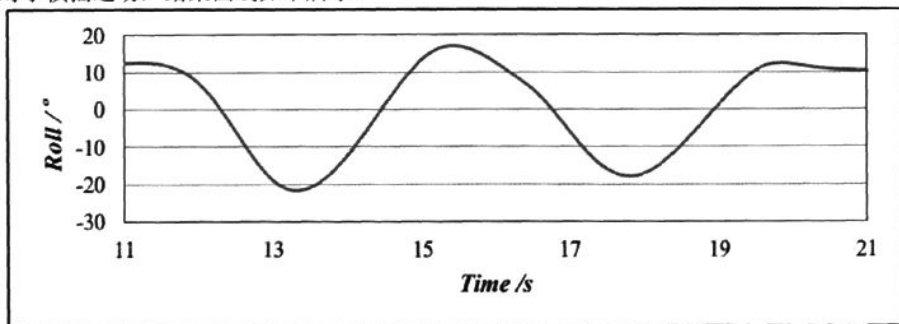


图 10 大幅纵摇和垂荡运动一个周期内数值模拟示意图

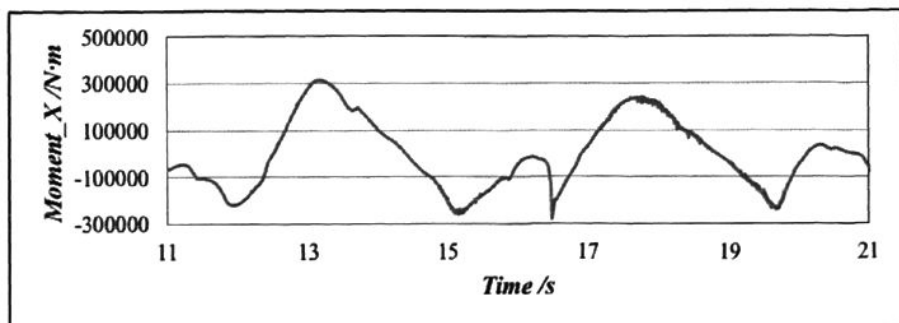
图 10 中的颜色代表了波面的高度，红色意味着该处波面较高，蓝色则相反。从图中可以清楚地看到平台的“埋首”现象，而且平台对波浪也产生了影响，使波面出现了约 0.5m 的抬升。

5.4.2 横摇运动

对于横摇运动，结果曲线如下所示：



(u) 横摇运动变化曲线



(v) 绕 X 轴力矩变化曲线

图 11 波高 2m 入射波作用下横摇运动与力矩随时间变化曲线

从图 11 中可以看出，在 2m 波高入射波作用下，平台的横摇运动已经相当剧烈，最大横摇幅度

已经超过 20° ，而所受力矩也较 1m 的情况增大了数倍。

下面一组图片形象地展示了工况 4 下平台一周期内的大幅横摇运动：

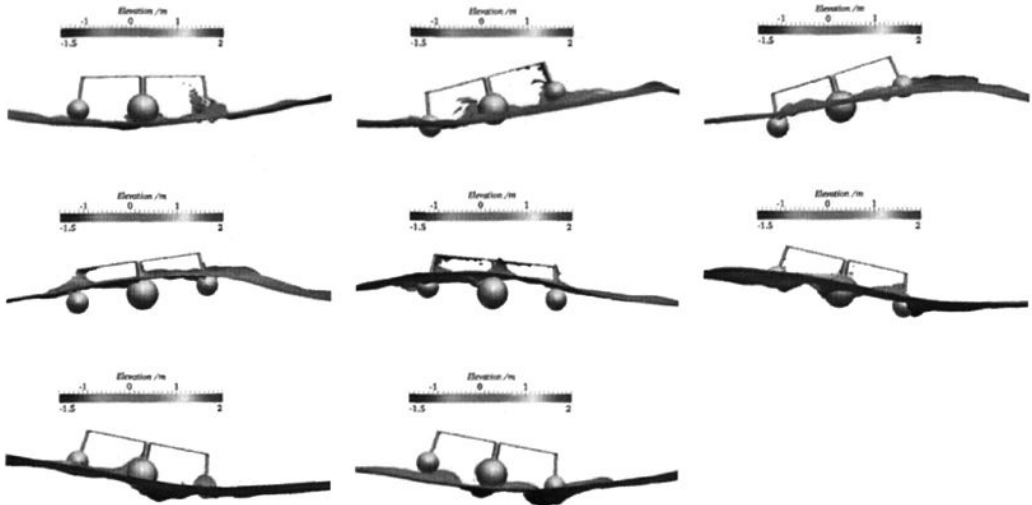


图 12 大幅横摇一个周期内数值模拟示意图

从图 12 中可以看到出现了液体飞溅、液体砸击下甲板、平台大部分出水等现象，足见运动幅度之大。此外，这些现象可以部分解释图 11 中力矩曲线出现的剧烈变化。

6 总结与展望

本文利用基于 OpenFOAM 开发的 naoeFoam 求解器，首先进行了数值造波试验，得到了满足工况条件的波形，验证了方法的可行性。随后对三体式海上观测平台的纵摇与垂荡耦合运动以及横摇运动分别从波高和波长两方面进行了计算和比较分析，得到了各种情况下的运动、受力和所受力矩曲线，并得出：垂荡运动对波高变化较敏感，以及波长越接近三体式海上观测平台特征长度，横摇幅度越大等结论。通过对 2m 波高的入射波与三体式海上观测平台相互作用的数值模拟，得到了大幅运动的运动和载荷曲线，还捕捉到了诸如液体飞溅、液体砸击下甲板以及三体式海上观测平台大部分出水等强非线性现象，体现了 CFD 在处理强非线性问题上的优势。

下一步，在前面工作的基础上，可以对更恶劣工况下的平台运动进行模拟，对于诸如斜浪、孤立波等入射波着手尝试；此外，还可以通过修改平台形式进行对比计算，分析平台运动响应的变化规律，反馈给平台设计，以期提升平台抵抗风浪的能力。

7 致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(11072154, 50739004)，海洋工程国家重点实验室自主研究课题基金 (GKZD010053-11)，上海东方学者人才计划基金(2008007)和英国劳氏船级社教育基金 (LRET)的资助。

参考文献

- [1]. 贺五洲, 周正全, 程军. 水面舰船迎浪航行时大幅运动预报的切片算法[J]. 中国造船, 1998, (01): 42-51.
- [2]. 陈小邹. 船舶在波浪中频域分析[J]. 舰船科学技术, 2011, (02): 24-27.
- [3]. Jingpu Chen, Dexiang Zhu. Numerical simulations of wave-induced ship motions in time domain by a Rankine panel method[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22 (3): 373-380.
- [4]. 吴乘胜, 朱德祥, 顾民. 数值波浪水池中船舶顶浪运动模拟研究[J]. 船舶力学, 2008, (05): 692-696.
- [5]. Zhirong Shen, Lu Jiang, Sha Miao, Decheng Wan, Chi Yang. RANS Simulations of Benchmark Ships Based on Open Source Code[A]. In Proceedings of the Seventh International Workshop on Ship Hydrodynamics[C], Shanghai, China, September 16-19, 2011; 76-82.
- [6]. 杨波, 石爱国, 吴明. 基于 CFD 方法的舰船顶浪运动响应幅值算子计算[J]. 船舶工程, 2011, (S2): 32-35.
- [7]. OpenFOAM website. <http://www.openfoam.com/>
- [8]. 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.
- [9]. Hongjian Cao, Decheng Wan. Application of OpenFOAM to simulate 3-D flow past single and two tandem circular cylinder[A]. In The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference[C], Beijing, China, June 20-25, 2010; 702-709.
- [10]. Hongjian Cao, Yuanchuan Liu, Decheng Wan, Chi Yang. Numerical simulation of solitary wave impact on fixed offshore platform[A]. In The 7th International Workshop on Ship Hydrodynamics[C], Shanghai, China, September 16-19, 2011; 138-143.
- [11]. Henrik Rusche. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions[D]. PhD, Imperial College of London 2002.
- [12]. RI Issa. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62 (1): 40-65.
- [13]. Zhirong Shen, Decheng Wan. Numerical simulation of sphere water entry problem based on VOF and dynamic mesh methods[A]. In Proceedings of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference[C], Maui, Hawaii, USA, June 19-24, 2011; 695-702.
- [14]. P.M. Carrica, R.V. Wilson, R.W. Noack, F. Stern. Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids[J]. Computers & Fluids, 2007, 36 (9): 1415-1433.
- [15]. R.V. Wilson, P.M. Carrica, F. Stern. Unsteady RANS method for ship motions with application to roll for a surface combatant[J]. Computers & Fluids, 2006, 35 (5): 501-524.
- [16]. P.M. Carrica, H. Fu, F. Stern. Computations of self-propulsion free to sink and trim and of motions in head waves of the KRISO Container Ship (KCS) model[J]. Applied Ocean Research, 2011.