

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目：海上浮式观测平台上浪和运动
稳定性分析

学生姓名：姜 鲁

学生学号：5080109215

专 业：船舶与海洋工程

指导教师：万德成 教授

学院(系)：船舶海洋与建筑工程学院

上海交通大学

本科生毕业设计（论文）任务书

课题名称： 海上浮式观测平台上浪和运动稳定性分析

执行时间： 2012 年 2 月 至 2012 年 6 月

教师姓名： 万德成 职称： 教授

学生姓名： 姜鲁 学号： 5080109215

专业名称： 船舶与海洋工程

学院(系)： 船舶海洋与建筑工程学院

毕业设计（论文）基本内容和要求：

本课题计算分析对象为小型海上浮式观测平台。由于平台上布置雷达等设备的需要，平台需要保持较高的运动稳定性。

平台甲板面积给定，现需要对平台下浮体进行选型优化。学生须首先对下浮体结构形式进行适当选型，分别对各种结构形式进行分析计算，得到多种海况下的横摇、升沉、纵摇等结果并进行比较，得出下浮体结构优化选型使平台获得较高稳定性。

在完成平台下浮体选型优化后，学生须对锚链系统进行考虑。考虑如何确定锚链力，并将锚链力加入方程进行分析计算，提出优化锚链布置方式的方案，使平台可以获得更高的稳定性。

毕业设计（论文）进度安排：			
序号	毕业设计（论文）各阶段内容	时间安排	备 注
1	资料查阅	1 至 2 周	
2	平台选型与建模分析计算	3 至 8 周	
3	锚链系统分析	9 至 15 周	
4	成果汇总，完成设计（论文）	15 至 18 周	
课题信息：			
课题性质：设计 论文			
课题来源*：国家级 省部级 校级 横向 预研			
项目编号 1072154			
其他_____			
指导教师签名：_____			
年 月 日			
学院（系）意见：			
院长（系主任）签名：_____			
年 月 日			
学生签名：_____			
年 月 日			

上海交通大学

毕业设计（论文）学术诚信声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：姜鲁

日期： 2011 年 5 月 20 日

上海交通大学

毕业设计（论文）版权使用授权书

本毕业设计（论文）作者同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本毕业设计（论文）的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本毕业设计（论文）。

保密□，在____年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密。

（请在以上方框内打“√”）

作者签名：刘远传

指导教师签名：万德成

日期：2011 年 6 月 14 日

日期：2011 年 6 月 15 日

海上浮式观测平台上浪和运动稳定性分析

摘要

海上浮式观测平台作为高频地波雷达等观测设备的载体,在海洋观测领域有着十分重要的作用。本毕业论文主要通过对三种海上浮式观测平台的平台形式,即三体浮标形式、三立柱式半潜式平台形式、四立柱式半潜式平台形式,进行运动的数值模拟,分析比较三种平台形式的运动稳定性,为海上浮式观测平台的设计提供参考。本文工作主要基于开源代码 OpenFOAM,通过有限体积法数值离散求解流体控制方程,采用 VOF 方法处理自由面,采用 PISO 算法处理速度压力耦合,并使用动态变形网格技术模拟平台的运动。首先对三种平台形式进行模型的建立,并选取适合的工况进行计算。进而得出三种平台形式各自的运动情况,随后比较三者之间的运动稳定性,最终得出何种平台形式更为适合的结论。

关键词: 浮式观测平台, 平台形式, 运动稳定性, 数值模拟, OpenFOAM

Numerical Analysis of Green Water and Motion Stability of Floating Observation Platform on the Sea

ABSTRACT

As the supporter of equipment like high frequency ground wave radar, floating observation platform on the sea is of great importance in the field of sea observation. In this paper, motion of three types of floating observation platforms are investigated through numerical method, which are three-hull buoyancy, three column semisubmersible platform and four column semisubmersible platform respectively, and motion stability between them is compared. This comparison is a reference of design of floating observation platform. All the work is based on the open source code OpenFOAM. The Finite Volume Method is applied to discretize the governing equations to solve them numerically, and the free surface is tracked by the Volume of Fluid method. PISO algorithm is applied to solve velocity pressure coupling, and moving mesh method is applied to simulate motion of platform. To develop the simulation, calculating model of three types of platforms are generated, and reasonable working states are chosen. After finishing the simulation, motion of three platforms are firstly analyzed separately and secondly compared. Finally, conclusion of the best type of platform is drawn.

Key words: floating observation platform, type of platform, motion stability, numerical simulation, OpenFOAM

目录

第一章	绪论	1
1.1	课题研究背景及意义	1
1.2	OpenFOAM 简介	1
1.3	课题研究主要内容	2
第二章	数值模拟的基本理论与方法	3
2.1	控制方程	3
2.1	数值方法	3
2.1.1	方程的离散	3
2.1.2	自由表面处理	6
2.1.3	速度压力耦合求解	7
2.1.4	动态变形网格	8
2.2	本章小结	9
第三章	计算模型及计算工况	10
3.1	平台形式的选取	10
3.2	平台模型的建立	10
3.2.1	平台模型建立的要求	10
3.2.2	三体浮标平台形式的计算模型	10
3.2.3	三立柱式半潜式平台形式的计算模型	11
3.2.4	四立柱式半潜式平台形式的计算模型	13
3.3	计算工况	14
3.4	造波方法	14
3.5	六自由度运动	15
3.6	计算网格	15
3.7	本章小结	16
第四章	数值模拟结果及分析	17
4.1	横摇与垂荡运动耦合的验证	17
4.2	三体浮标形式数值模拟结果	18
4.2.1	三体浮标形式在 1m 波高下的数值模拟结果	18
4.2.2	三体浮标形式在 2m 波高下的数值模拟结果	25
4.3	三立柱式半潜式平台形式数值模拟结果	31
4.3.1	三立柱式半潜式平台形式在 1m 波高下的数值模拟结果	31
4.3.2	三立柱式半潜式平台形式在 2m 波高下的数值模拟结果	42
4.4	四立柱式半潜式平台形式数值模拟结果	52
4.4.1	四立柱式半潜式平台形式在 1m 波高下的数值模拟结果	52
4.4.2	四立柱式半潜式平台形式在 2m 波高下的数值模拟结果	59
4.5	三种平台形式数值模拟结果比较	66
4.5.1	1m 波高下的平台运动情况比较	66
4.5.2	2m 波高下的运动情况比较	69
4.6	结果分析	71
4.7	本章小结	72
第五章	总结与展望	73

5.1 总结.....	73
5.2 展望.....	73
参考文献.....	75
谢辞.....	76

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

海洋是地球特有的产物, 21 世纪是海洋科学的新世纪, 是人类进入开发利用海洋的新世纪。中国是个陆地大国, 但同时拥有长达 18000 多 km 的大陆海岸线, 含海岛岸线的总长度约 32000km。根据《联合国海洋法公约》, 中国的可管辖海域约为 300 万 km^2 ^[1]。因此, 如何跟好地开发利用海洋的资源对我国具有十分重要的现实意义。

美国、加拿大等海洋强国不断强化海洋监测体系, 开发新的海洋检测技术^[2]。海洋监测对我国也有着防灾抗灾、开发资源等重要作用^[3]。作为重要的监测手段的高频地波雷达^[4], 已经在我国海岸线陆地上有着广泛的应用。浮标式高频地波雷达的研制突破传统地波雷达在布置地区的限制, 能够通过接受天地混合路径回波, 将探测范围扩展至远海区, 大大增强雷达部署系统的灵活性。

装载高频地波雷达的海上浮标观测平台需要保证良好的抗风浪稳定性, 以满足数据采集、存储、处理及实时传输等需要, 保证设备的正常使用。这就需要在浮标平台的设计阶段选取良好的平台结构形式, 而如何判断选取平台结构形式, 就需要知道各种平台结构在波浪中的运动幅度。

随着计算机硬件与计算技术的发展, 数值计算逐渐成为了水池模型试验之外, 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对船舶与浮式结构物的运动作预报越来越普遍。传统的计算方法通常基于势流理论, 由于方法相对简单而且可以有效地粗估运动性能, 这些方法得到了广泛的应用。例如, 切片法^[5]、三维频域方法以及三维时域方法等。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。近年来, 计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 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^[6]。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, 一种三体浮标^[7]等的发展给海上浮标观测平台提供了良好的平台结构形式的设计思路。此外, 半潜式平台^[8], 包括三立柱式、四立柱式等, 以其优越的稳定性, 已在海洋工程领域有着广泛的实际应用, 可以作为探索海上浮标式观测平台结构形式的选择。

1.2 OpenFOAM 简介

应用计算流体力学进行数值模拟, 有很多的软件可以选用^[9], 如在世界上广为应用的 FLUENT^[10]等。作为众多 CFD 软件中的后起之秀, OpenFOAM^[11]有着优越的性能与鲜明的特点。本课题是基于 OpenFOAM 对海上浮标观测平台进行数值模拟, 因此需对 OpenFOAM 进行介绍。

OpenFOAM 是一个开源的 CFD 软件包, 其前身为 FOAM (Field Operation and Manipulation 的简写)。OpenFOAM 是一个完全由 C++编写的面向对象的 CFD 类库, 将偏微分方程有限体积离散化, 支持多面体网格, 能有处理复杂的几何外形, 并且支持大型并行计算等。作为开源软件, 其源代码对公众开放, 因此软件的使用、修改等不受许可的限制, 这使得 OpenFOAM 被不断地完善开发, 使其拥有了日益强大的功能, 从而受到更多的青睐。

此外, OpenFOAM 还具有如下的功能和特点:

- (1) 支持用户为特定问题自行修改或编写程序
- (2) 可以自动生成网格;
- (3) 可以模拟 拉格朗日粒子追踪及射流

- (4) 支持滑移网格层消等;
- (5) 提供各种样的工具箱, 包括 ODE 求解器、ChemKIN 接口等;
- (6) 具备网格转换工具, 支持多种网格接口, 可以转换多种网格形式为 OpenFOAM 可以处理的网格形式。

1.3 课题研究主要内容

本课题以探究平台形式对于海上浮标观测平台运动稳定性的影响为目的, 基于 OpenFOAM 对三种平台形式进行数值模拟, 分析其在波浪中的运动幅度以及受力情况。三种平台形式即三体船形式(原定的形式)、四立柱式半潜式平台形式和三立柱式半潜式平台形式。

本文的主要内容可分为如下部分:

首先在第二章中对数值模拟所涉及的基本理论做出较为详细的介绍, 包括所建立的控制方程以及求解中用到的一些数值方法。

第三章中对计算中建立的三种平台模型、计算工况以及计算网格等进行介绍。

第四章中对三种平台形式分别在 1m 波高和 2m 波高的情况下的数值模拟的结果, 即其运动及受力情况进行介绍, 并进行比较分析。

第五章中对上述工作进行总结, 并分别从几个方面对后续工作进行展望。

第二章 数值模拟的基本理论与方法

要用数值方法解决浮式观测平台在波浪中运动的问题,首先需要建立符合其问题物理现象本质的数学模型,亦即能够反映问题所涉及的物理量之间的关系的微分方程,即控制方程。在建立了控制方程后,为求解这些微分方程,需要应用一些数值对方程进行相应处理。本章主要对本课题所应用到的控制方程以及数值方法进行介绍。

2.1 控制方程

在本课题涉及的数值模拟中,水面波动问题涉及到水和空气两种不同态的物质,属于气液两相流问题。通常可将水看作不可压缩流体;对于空气来说,由于其流速较低,也将其视为不可压缩流体。因此,本问题即为求解非定常、不可压粘性流的气液两相流问题。为了求解该问题,本文选择的控制方程为 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 方程,也称为雷诺时均 N-S 方程。控制方程如下^[12]:

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

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

其中: $\bar{\mathbf{U}}$ 为速度场; $\bar{\mathbf{U}}_g$ 为网格移动速度; $p_d = p - \rho \bar{\mathbf{g}} \cdot \bar{\mathbf{x}}$ 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; $\bar{\mathbf{g}}$ 为重力加速度向量; $\mu_{eff} = \rho(\nu - \nu_t)$ 称为有效动力粘性,式中 ν 和 ν_t 分别称为运动粘度和涡粘度,后者由湍流模型求解而得,本例中不考虑湍流。 f_σ 为两项模型中的表面张力项,在 2.2.2 节将做出进一步说明。

对于这类问题,由于流体域存在一个不能事先预知其形状与位置的自由边界,即所谓的自由面,如何处理这个自由面就相当关键,具体的处理方法在后面小节将有介绍。

2.1 数值方法

2.1 节给出了针对非定常、不可压缩粘性流的气液两相流问题的控制方程。对于这样一个非线性二阶偏微分方程组,要想通过理论求解得到解析解,一般来说是非常困难的,因此对方程组进行数值求解就具有很重要的现实意义。在数值就求解是,会用到一些数值对方程组进行处理。下面将对本文用到的一些数值方法进行介绍。

2.1.1 方程的离散

2.1.1.1 方程离散化的目的

理论上来说,建立在求解域内的偏微分方程是有解析解的。但是,由于方程本身的复杂性以及复杂的边界条件等原因,得到方程的解析解显得十分困难。因而,得到方程的数值解就显得十分具有实际意义。要求得方程的数值解,就需要通过数值方法将计算域内的有限数量个点上的因变量当作未知量处理,建立关于这些未知量的代数方程组,求解代数方程组后,的到这些有限个点上的节点值,而计算域内其他位置上的值就通过这些节点值来确定。

因此,求偏微分方程的数值解的方法可以归纳为两个步骤:

(1) 通过划分网格的方式将连续的计算域划分为有限个离散点的集合,并通过适当的数值方法建立这些有限个离散点上的代数方程组,即离散方程组;

(2) 运用计算机求解离散方程组, 得到节点上的解, 再根据插值得到计算域内的近似解。

2.1.1.2 方程离散化的方法

数值方法经过多年发展, 由于应变量在节点之间的分布假设以及推到离散方程的方法不同, 就形成了有限差分法 (Finite Difference Method, 简称为 FDM), 有限元法 (Finite Element Method, 简称为 FEM) 和有限体积法 (Finite Volume Method, 简称为 FVM) 等多种不同类型的离散化方法。

其中, 有限体积法有着思路易于理解、计算效率较高等优点, 并且本课题所涉及的 OpenFOAM 是给予有限体积法编写的, 因此本文中着重介绍有限体积法的基本理论。

有限体积法有称为控制体积法 (Control Volume Method, 简称为 CVM)。其基本思路是: 首先需要将计算区域划分为不同的网格区域, 并使每个网格点周围都有一个互不重复的控制体积; 然后将待求解的微分方程对每一个控制体积积分, 这样就得到一组离散方程, 其中的未知数就是网格点上的因变量。为了求出控制体积的积分, 必须假定因变量值在网格点间的变化规律。从积分区域的选取方法来看, 有限体积法属于加权余量法中的子域法; 从未知解的近似方法来看, 有限体积法属于采用局部近似的离散方法。

下面列举一个关于二维瞬态对流-扩散问题的例子来具体地说明离散过程^[13]。

图 2-1 表示了该问题中所应用的计算网格。其中, 网格中实线的交点是计算节点, 由虚线围成的方格为控制体积。控制体积的界面设置在两个节点中间, 这样, 每一个计算节点就由一个由虚线围成的控制体积所包围。

现考虑图中的节点 P, 并分别用大写的 E、W、S 和 N 来表示与之相邻的东、西、南和北四个方位的节点, 再用小写的 e、w、s 和 n 来表示控制体积相应方位的界面, 与节点对应的控制体积也用表示该节点的字母来表示。例如, 图中所示的阴影部分即为节点 P 对应的控制体积 P。 Δx 和 Δy 分别表示控制体积在 x 与 y 方向的宽度, 体积值 $\Delta V = \Delta x \times \Delta y$, 而节点 P 到 E、W、S 和 N 各个节点的距离分别用 $(\delta x)_e$ 、 $(\delta x)_w$ 、 $(\delta y)_s$ 和 $(\delta y)_n$ 表示。

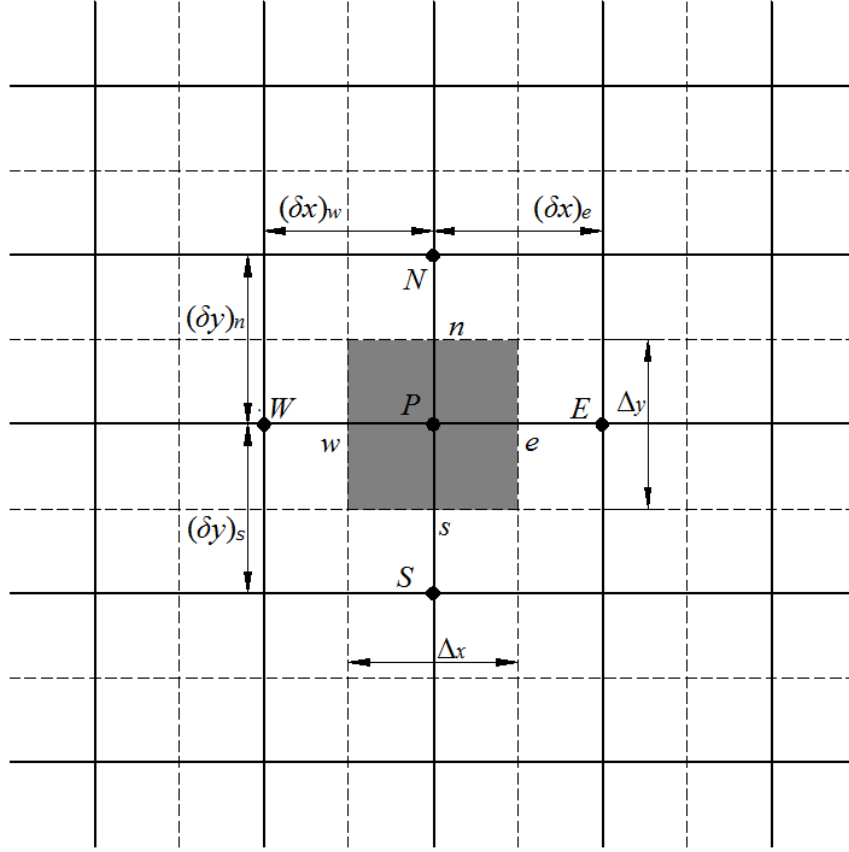


图 2-1 二维瞬态对流-扩散问题的计算网格与控制体积

控制方程的通用形式为：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S \quad (3)$$

其中， ρ 是密度， ϕ 是广义变量， \vec{u} 是速度矢量， Γ 是广义扩散系数， S 是广义源项。

方程（2-5）左边第一项为时间导数项，也可称为瞬态项，左边第二项为对流项；方程右边第一项为扩散项，右边第二项为源项。对于动量方程中的压力梯度项，也将其放到广义源项中。

针对图 2-1 所给的网格，对方程（2-5）从控制体积 P 的体积值和时间段 Δt （时间从 t 到 $t + \Delta t$ ）到上积分，可以得到：

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) dV dt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} S dV dt \end{aligned} \quad (4)$$

下面针对方程（2-6）中的各项说明如何进行积分计算处理。

对于瞬态项来说，假定整个控制体积 P 上变量的值 ϕ_p 均具有节点 P 处变量的值 ϕ 的值，

并且假定密度在时间段 Δt （时间从 t 到 $t + \Delta t$ ）上的变化量极小，则方程（2-6）中的瞬态项可变为：

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV dt = \int_{\Delta V} \left[\int_t^{t+\Delta t} \rho \frac{\partial\phi}{\partial t} dt \right] dV = \rho(\phi_P - \phi_P^t) \Delta V \quad (5)$$

对于源项，可以用局部线性化的方法对其进行处理。假定在未知量微小的变动范围内，源项 S 可以表示为该未知量的线性函数：

$$S = S_C + S_P \phi_P \quad (6)$$

其中， S_C 是常数部分， S_P 是 S 随变化的曲线在 P 点的斜率。

这样，方程 (2-6) 中的源项可变为：

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} S dV dt = \int_t^{t+\Delta t} (S_C + S_P \phi_P) \int_{\Delta V} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} (S_C \Delta V + S_P \phi_P \Delta V) dt \quad (7)$$

对于对流项，应用 Gauss 散度定理，将体积分转变为面积分，即有：

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) dV dt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} [(\rho u \phi A)_e - (\rho u \phi A)_w + (\rho v \phi A)_n - (\rho v \phi A)_s] dt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} [(\rho u)_e A_e \phi_e - (\rho u)_w A_w \phi_w + (\rho v)_n A_n \phi_n - (\rho v)_s A_s \phi_s] dt \end{aligned} \quad (8)$$

其中， A 为控制体积界面处的面积值。

至于扩散项，同样应用 Gauss 散度定理，将体积分转变为面积分；同时，对于界面上的值，使用中心差分格式做离散处理，可得：

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV dt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w + \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_s \right] dt \\ &= \int_t^{t+\Delta t} \left[\Gamma_e A_e \frac{\phi_E - \phi_P}{(\delta x)_e} - \Gamma_w A_w \frac{\phi_P - \phi_W}{(\delta x)_w} + \Gamma_n A_n \frac{\phi_N - \phi_P}{(\delta y)_n} - \Gamma_s A_s \frac{\phi_P - \phi_S}{(\delta y)_s} \right] dt \end{aligned} \quad (9)$$

现在得到了方程 (2-6) 经过处理后各项的表达式，另外还需要做以下两方面工作：

1) 对流项 (2-10) 中界面上的值，需要引入特定的离散格式，由节点的物理量表示，就和 (2-11) 所做的一样；

2) 在对流项、扩散项和源项中引入全隐式的时间积分方案，例如

$\int_t^{t+\Delta t} \phi_P dt = \phi_P \Delta t$ 。这样，方程 (2-6) 就转化为：

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + b \quad (10)$$

这就是全隐式时间积分方案下得到的二维瞬态对流-扩散问题的离散方程，式中的系数 a_W 、 a_E 、 a_S 和 a_N 取决于在对流项中引入的离散格式的特定形式。

2.1.2 自由表面处理

2.1 节中提到，本课题的内容属于气液两相流问题，因此，对于自由表面的处理就显得十分关键。随着计算流体力学的不断发展，已经产生了不同的处理自由面问题的数值方法。按照处理自由面方式的不同，可以将这些方法分为界面追踪法 (Interface Tracking Method) 和界面捕捉法 (Interface Capturing Method) 两大类。其中，应用广泛的 Volume Of Fluid (简

称VOF)方法就属于界面捕捉法^{[14][15]}。本课题正是基于OpenFOAM使用VOF进行自由面的追踪与捕捉。下面对VOF进行简单的介绍^{[16][17][18]}。

VOF法的输运方程可以定义为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\bar{U} - \bar{U}_g)\alpha] + \nabla \cdot [\bar{U}_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (11)$$

其中 α 为体积分数,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:

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气中} \\ \alpha = 1 & \text{水中} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{两相交界} \end{cases} \quad (12)$$

通过体积分数 α ,我们可以将密度 ρ 和动力粘度 μ 分别定义为:

$$\rho = \alpha\rho_l + (1 - \alpha)\rho_g \quad (13)$$

$$\mu = \alpha\mu_l + (1 - \alpha)\mu_g \quad (14)$$

其中:下脚标 g 和 l 分别代表气体和液体。

则方程(2)中的表面张力项可以定义为:

$$f_\sigma = \sigma\kappa\nabla\alpha \quad (15)$$

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

在方程(11)中,等号左边前两项为质量守恒方程中的体积分数项,第三项为考虑自由液面存在的可压项。

本文通过求解方程(11)来确定自由液面。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。

2.1.3 速度压力耦合求解

在RANS方程中,速度不仅出现在连续性方程(1)中,而且同时出现在动量方程中(2)。不仅如此,动量方程中又有压力项的出现,这就导致了速度与压力耦合在一起,使直接求解变得十分困难,这就需要解决这种速度压力耦合的方法。

通常,解决这类速度压力耦合问题,有耦合式解法(coupled method)和分离式解法(segregated method)两种方法。耦合式解法需要同时离散化控制方程组,并联立求解各个变量,因而需要建立一个十分庞大的代数方程组,使得计算量巨大,占用时间较长且效率较低。相比之下,分离式解法是逐个、按顺序地求解各个变量的代数方程组,这样就有了相对较高的效率,也使得分离式解法有着更为广泛的应用。目前应用最为广泛的分离式解法有SIMPLE、SIMPLEC、SIMPLER以及PISO^[19]等。本课题中所应用的解法为PISO,下面对PISO算法进行简单的介绍。

压力的隐式算子分割算法(Pressure Implicit with Splitting of Operators,简称PISO),是由Issa于1986年最先提出,最早是针对非定常可压流动问题的无迭代计算而建立,后来在定常的流动问题中也得到了广泛应用。

PISO算法包含了一个预测步和两个修正步,先使用一个预估的速度或压力值,求解出相应的压力或速度值,然后再通过两次修正,得到满足精度的物理量。由于其使用了预测—修正—再修正的步骤,可以加快单个迭代步中的收敛速度,其具体的步骤方法如下^{[20][21]}:

- (1) 预测步：利用假定或上一时刻计算得到的压力场 p^* ，求解动量离散方程，得到当前时刻的速度分量 u^* 和 v^* ；
- (2) 第一修正步：定义压力修正值 p' ，速度修正值 u' 、 v' ，求解压力修正方程，要求与 p' 相应的速度修正值 u' ， v' 能使 $(u^* + u')$ 和 $(v^* + v')$ 满足连续性方程，得到经修正后的 p^{**} 、 u^{**} 和 v^{**} ；
- (3) 第二修正步：类似于上一步，定义二次压力修正值 p'' ，求解二次压力修正方程，得到 p'' ，进而得到经二次修正的压力场：

$$p^{***} = p^{**} + p'' = p^* + p' + p'' \quad (16)$$

通过 p^{***} ，可得到经二次修正的速度场 u^{***} 和 v^{***} 。

通常认为经过两次修正后得到的速度场和压力场已经满足精度要求，可以作为初值代入下一时刻计算。

2.1.4 动态变形网格

本课题采用动态变形网格技术模拟海上浮式观测平台的运动情况。在求解过程中，网格之间的拓扑关系不发生变化，而只通过单元的拉伸、压缩等变形运动来用不断变形的网格来模拟船体的运动情况。图2-2表示了一种二维圆柱运动问题的三角形动态变形网格，从各图中可以清晰的看出当圆柱处在不同的位置是，网格会随之产生变形以适应圆柱的运动。

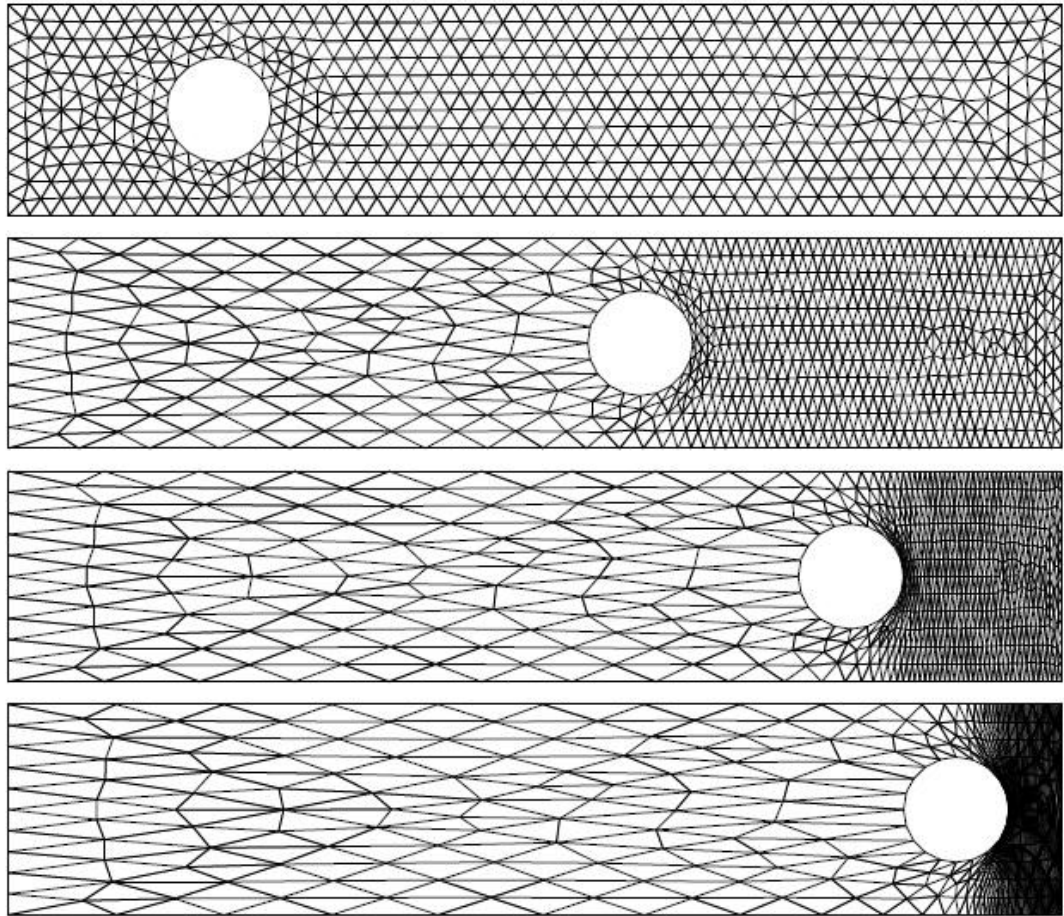


图2-2 二维圆柱运动问题的动态网格

整个流场中网格节点的位置通过求解以下Laplace方程获得：

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \bar{U}_g) = 0 \quad (17)$$

其中： γ 为diffusivity field，与网格单元中心到平台表面边界的距离有如下关系：

$$\gamma = \frac{1}{r^2} \quad (18)$$

2.2.5 数值计算的流程

数值计算需要有一个清晰的流程，作为计算迭代过程的根据。本课题采用的数值模拟计算流程如下：

- (1) 通过上一步预测得到的船模速度求解动态网格节点位置方程，如果是计算的第一步，则通过设定初值的方式来处理。
- (2) 求解VOF方程；
- (3) PISO内迭代求解速度压力耦合；
- (4) 求解当前时间步中平台各自由度下船模所受力和力矩；
- (5) 求解当前时间步中平台的加速度场；
- (6) 求解当前时间步中平台的速度场；
- (7) 通过当前时间步的速度场预测下一时间步的速度场，并将其作为方程(17)的边界条件；
- (8) 返回步骤 1，进入下一个时间步的计算。

2.2 本章小结

本章主要对采用计算流体力学方法模拟海上浮式观测平台运动的基本理论和方法进行了介绍。首先介绍了该问题的基本方程，即控制方程。求解控制方程组的解析解十分困难，从而考虑采用数值方法。随后通过结合一个二维瞬态-对流问题介绍了使用有限体积法离散方程的过程。介绍了在处理两相流问题中捕捉追踪自由面的 VOF 方法。为了将流场内速度和压力解耦，又对 PISO 算法进行了介绍。最后对整个计算流程做了介绍。

第三章 计算模型及计算工况

为了保证高频地波雷达等海上浮式观测平台所载设备的正常运转,较高平台的运动稳定性就有着十分重要的意义。这就使得如何选择平台的结构形式成为了重要的课题。本章主要介绍平台结构形式的选取,所建立的计算模型以及计算工况。

3.1 平台形式的选取

在绪论中已经提到,近年来,三体浮标等的发展给海上浮标观测平台提供了良好的平台结构形式的设计思路。而半潜式平台,包括三立柱式、四立柱式等,以其优越的稳定性,已在海洋工程领域有着广泛的应用,可以作为探索海上浮标式观测平台结构形式的选择。

事实上,本课题作为浮标式高频地波雷达课题的组成部分之一,需要配合其整体的设计思路。在该课题的研发当中,已经有了一种三体浮标的平台设计思路,即一种类似三体船形式的平台形式。再加上近年来三体浮标等的发展及应用,本课题首先选取的平台形式就是三体浮标形式。

于此同时,半潜式平台由于拖曳便利、运动稳定性高以及甲板面积较大等优势,已经在海洋工程界有着十分广阔的应用。正是由于半潜式平台在运动稳定性上的良好性能,符合本课题对于海上浮式观测平台运动稳定性上的要求,本课题选取半潜式平台作为浮式观测平台的平台形式选择之一。而半潜式平台的具体形式有许多,如三立柱式、四立柱式、五立柱式等等。鉴于本课题研究时间有限,并且如果只采用一种半潜式平台形式对于探究平台形式对于海上浮式观测平台的运动稳定性并不十分有效,因此选择三立柱式半潜式平台形式以及五立柱式半潜式平台形式作为选择对象。

综上所述,在本课题的研究当中,选择已有思路中的三体浮标形式,以及参考海洋工程领域的三立柱式半潜式平台形式和五立柱式半潜式平台形式作为研究对象。通过比较他们在相同工况中的运动稳定性来探究何种平台形式适用于浮标式高频地波雷达的平台设计。

3.2 平台模型的建立

3.2.1 平台模型建立的要求

在浮标式高频地波雷达的原有设计思路中,已经给出了对于海上浮式观测平台一些参数的基本要求,现列举如下:

- (1) 为适应甲板上装置的布置,平台的甲板面积约为 51m^2 ;
- (2) 平台的排水量不低于 27 m^3 ;
- (3) 平台的气隙约为 2m 。

基于以上的基本要求,在三种平台模型的建立阶段需要保证平台形式的协调、平台的浮性、平台的稳性等等。

3.2.2 三体浮标平台形式的计算模型

建立三体浮标平台计算模型时参考了原设计思路中的非硬性指标,如三体浮标的长、宽的范围,参考现有的三体浮标的形式,并保证甲板面积、排水量、气隙符合要求。该种三体浮标平台形式类似于三体船,下浮体由一个大浮筒以及两个小浮筒组成,甲板形状再考虑了原有思路中的长、宽限制,以及原有思路中对甲板形式的描述,设计成五边形形式。事实上,在考虑海上浮式观测平台的运动稳定性的数值计算中,甲板对于计算的影响十分之小,可以

忽略不计，因此采用五边形的甲板形式仅是在初步设计阶段给出一种可行的思路，并不对海上浮式观测平台的运动稳定性分析造成影响。

最后综合以上考虑，得到本课题中三体浮标的具体参数如下：

主要参数	单位	取值
长度	m	14
宽度	m	10
甲板面积	m ²	51
气隙	m	2
大圆筒直径	m	2
小圆筒直径	m	1.4
排水量	m ³	28.975
横摇转动惯量	kg·m ²	317377.5
纵摇转动惯量	kg·m ²	255561.264

通过以上参数建立三体浮标平台的计算模型，图 3-1 为建立后的平台计算模型。

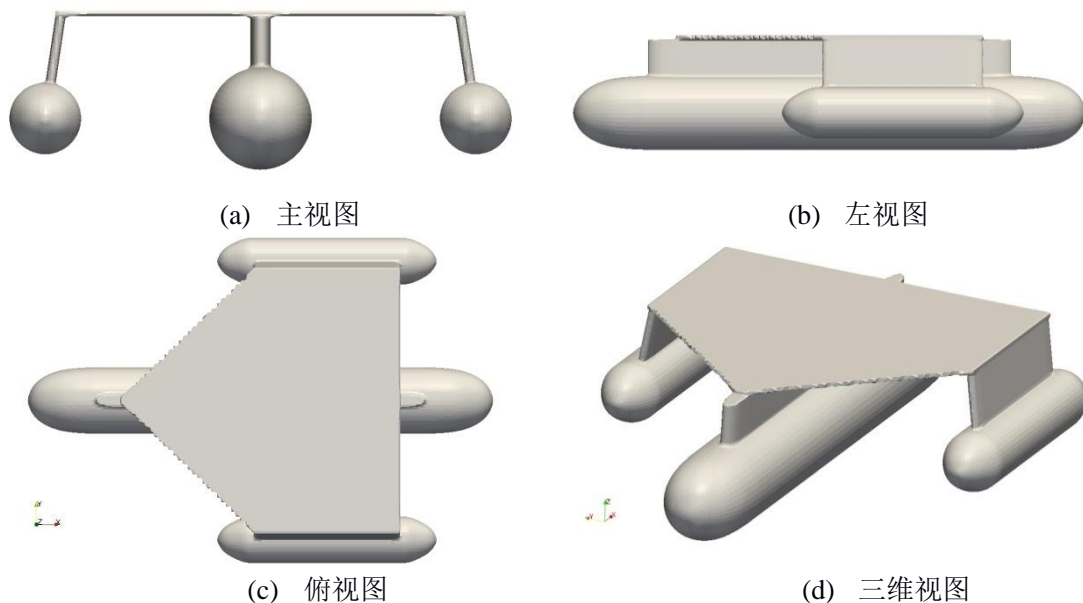


图 3-1 三体浮标形式计算模型

3.2.3 三立柱式半潜式平台形式的计算模型

对于三立柱式半潜式平台形式的模型建立，主要参考现阶段海洋工程领域的某些三立柱式半潜式平台。然而，由于浮标平台的尺度较小，并且有诸如 3.2.1 节所给出的要求，需要在现有的三立柱式半潜式平台的基础上进行适当调整，如增大立柱以及浮筒的相对大小，以提升平台模型的浮性、稳性等。甲板形状采取常规的三角形形式，并保证所要求甲板面积。通常这类平台在立柱之间会有加强结构，但是这些结构主要是为了平台的结构性能考虑，本课题所涉及的平台尺寸较小且主要关心平台的运动情况，即流体性能，同时，如果考虑这些较小的加强结构，会极大的增加网格数量，是运算量大大提高，效率降低，因此，在计算模型的建立方面，不考虑立柱间的加强结构。

综上因素，得到本课题中三立柱式半潜式平台形式的具体参数如下：

主要参数	单位	取值
甲板边长	m	10.94

甲板面积	m^2	51
气隙	m	2
立柱直径	m	2.5
立柱高度	m	2.6
下浮筒直径	m	5
下浮筒高度	m	1
排水量	m^3	67.448
横摇转动惯量	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	1326500
纵摇转动惯量	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	1326400

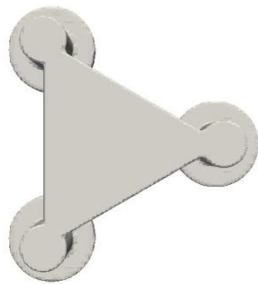
通过以上参数建立三立柱式半潜式平台的计算模型，图 3-2 为建立后的平台计算模型。



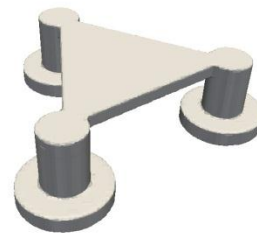
(a) 主视图



(b) 左视图



(c) 俯视图



(d) 三维视图

图 3-2 三立柱式半潜式平台形式计算模型

3.2.4 四立柱式半潜式平台形式的计算模型

与 3.2.3 节所介绍的三立柱式半潜式平台形式的模型建立相同，四立柱式半潜式平台形式同样参考了现有的海洋工程领域应用的四立柱式半潜式平台，如海洋石油 981 平台【】。同样，由于尺寸的限制以及 3.2.1 节所给的一些要求，需要对模型进行适当调整，如调整模型气隙以使其符合要求。与三立柱式半潜式平台一样，四立柱式半潜式平台同样在立柱及浮筒间会有加强的结构。由于这种加强结构主要是出于对平台结构性能的考虑而非流体性能，且如果在计算中考虑会大大增加网格量，增加计算时间，降低计算效率，在建立四立柱式半潜式平台形式的计算模型是，同样不考虑这些加强结构。

进而，可以得到本课题中四立柱式半潜式平台形式的具体参数如下：

主要参数	单位	取值
甲板长	m	7.2
甲板宽		7.2
甲板面积	m ²	51
气隙	m	2
立柱边长	m	1.68
立柱高度	m	2.6
下浮筒长	m	11.04
下浮筒宽	m	1.95
下浮筒高度	m	0.83
排水量	m ³	42.40
横摇转动惯量	kg·m ²	370900
纵摇转动惯量	kg·m ²	447660

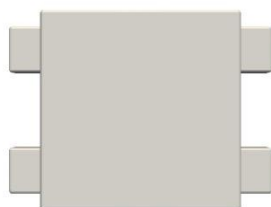
通过以上参数建立四立柱式半潜式平台的计算模型，图 3-3 为建立有的平台计算模型。



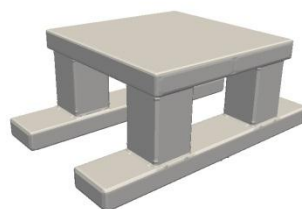
(a) 主视图



(b) 左视图



(c) 俯视图



(d) 三维视图

图 3-3 四立柱式半潜式平台形式计算模型

3.3 计算工况

由于本课题所探究的海上浮式观测平台需要在深水区域工作，且需要应对各种海况，因此需要选取适合的计算工况。对于 0 级至 2 级海况来说，由于波高很小，因此对于平台运动稳定性的影响很小，如果从这些海况级别开始计算，会大大增加不必要的计算量。而且本课题的研究目的是探究平台形式对于其运动稳定性的影响，需要比较的是在相同海况下的平台运动情况，因此计算工况从 3 级海况开始选取。本文主要探究的是平台在 3 级海况和 4 级海况下的运动情况。

3 级海况为轻浪，波高 0.5m 至 1.25m；4 级海况为中浪，波高 1.25m 至 2.5m。本课题分别选取这两种海况中的一种典型波高进行计算分析，即波高 1m 和 2m。由于本课题主要关注的是平台形式对其运动稳定性的影响，而且非规则波较规则波相比计算更为复杂，计算量更大，因此主要选取规则波进行计算。

由于海上浮式观测平台是在深水中使用，计算是只将波考虑为深水波。对于波的选择，主要关注的波浪要素是波高 h ，波长 λ 以及波的周期 τ 。其中，波高 h 已经选定，分别为 1m 和 2m。

波陡 h/λ 为表征波浪的平均斜率的参数。在有限振幅波理论中，当波陡大于 0.142 时，波浪发生破碎，因此，需要控制波长 λ 在适合的范围内。在本课题中，对应 1m 波高的波长取 14m，对应 2m 波高的波长取 28m。

这样，通过深水波的色散关系就可以得到波的周期 τ 。根据公式：

$$\omega^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} \quad (19)$$

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega} \quad (20)$$

其中， ω 为波浪的圆频率。这样可以计算出对应 1m 波高、14m 波长的波的周期为 2.99s；对应 2m 波高、28m 波长的波的周期为 4.237s。

综上，本课题主要针对海上浮式观测平台在以下两种深水规则波中的运动情况进行计算，即：

- (1) 波高 1m，波长 14m，周期 2.99s；
- (2) 波高 2m，波长 28m，周期 4.237s。

3.4 造波方法

本课题通过在计算域入口指定造波边界条件的方法来制造指定波浪。本文 4 种工况下的入射波浪均为规则余弦波。造波的数学模型表示如下式所示：

$$\xi(x, t) = a \cos(kx - \omega t) \quad (21)$$

$$U(x, y, z, t) = a\omega \cos(kx - \omega t) \quad (22)$$

$$W(x, y, z, t) = a\omega \sin(kx - \omega t) \quad (23)$$

其中： $\xi(x,t)$ 为自由液面上各点在任意时刻的垂向位置； $U(x,y,z,t)$ 和 $W(x,y,z,t)$ 分别为流体中各点在任意时刻水平方向和垂直方向的速度分量； a 为各工况下的波幅； ω 为波浪的自然频率，由 $\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}}$ 确定； λ 为波浪的波长； k 为波数。在 $t=0$ 时刻，波浪的第一个波峰到达 $x=0$ 位置。

3.5 六自由度运动

海上浮式观测平台在波浪中的运动为六自由度运动，再计算时，需要考虑针对哪些自由度的计算时有意义的，来确定何种运动成为计算的对象。

3.2 节所给出的模型尺寸，我们可以看到，所建立的三种海上浮式观测平台模型均有长、宽尺度十分接近的特点，这就与普通船舶船长明显大于船宽的情况不同。下面定义船长方向：三体浮标平台形式中，按照顺浮筒轴线的方向为船长方向；三立柱式半潜式平台形式中，按照顺等边三角形一对称轴（亦即等边三角形的一个高）的方向为船长方向；四立柱式半潜式平台形式中，按照顺浮筒轴线的方向为船长方向。这样，就可以按照船舶的六自由度运动一样分别定义海上浮式观测平台的横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡、垂荡六种运动形式。

在船舶的六自由度运动计算^{[22][23][24][25]}中，艏摇、横荡、纵荡不是主要考虑对象，主要的研究对象为横摇以及纵摇与垂荡耦合运动两种运动形式。同船舶的六自由度运动计算一样，本课题中暂不考虑艏摇、横荡、纵荡三种运动形式，考虑纵摇与垂荡耦合的运动形式。然而，与船舶的六自由度运动计算不同的是，由于本课题所研究的海上浮式观测平台的尺度较小，并且所给的波的波长较船长、船宽来说很大，波高较模型高度来说较大，在考虑横摇运动的同时，必然伴随着幅度较大的垂荡运动。因此，本课题在研究纵摇与垂荡运动的同时，考虑横摇与垂荡的运动形式。

在后文 4.1 节，通过数值模拟单独考虑横摇与同事考虑横摇与垂荡运动的结果，验证了考虑横摇与垂荡运动耦合的必要性。

3.6 计算网格

本课题采用的 OpenFOAM 使用的是基于网格方法的有限体积法，因此在进行计算之前需要对计算网格进行划分。

在建立计算网格时采用的是 OpenFOAM 提供的网格生成工具 snappyHexMesh。其生成网格的思路是：先在笛卡尔坐标系下生成均匀的结构化背景网格；再通过调整控制参数的方法在背景网格中划分加密，生成所需的非结构网格。

计算网格的质量与数量对于计算的精度以及计算的效率有着非常大的影响，因此在保证网格质量的同时，需要考虑尽量减少网格的数量，以提高计算效率。减少网格数量主要从以下方面考虑：

- 1) 加密的程度适当，在保证网格质量的前提下减少网格的加密量；
- 2) 使用对称方法。由于三种平台模型均有轴对称的特性，在可以应用轴对称的情况下只计算对称轴的一侧，对另一侧使用对称处理，这样可以将计算量减少一半。

按照以上的考虑，最终建立的就算各平台形式在不同运动形式下的网格数量如下表所示：

平台形式	纵摇垂荡运动网格量	横摇垂荡运动网格量
三体浮标形式	52 万	92 万

三立柱半潜式平台形式	55 万（单柱迎浪）	94 万
	55 万（双柱迎浪）	—
四立柱半潜式平台形式	54 万	58 万

从网格数量来看，计算网格量处在 50 万至 90 万之间，网格数量适中。实际计算结果表明，使用 16 节点并行计算每个算例计算时间在 24h 左右，可以保证良好的计算效率。同时，可以看到，计算三体浮标形式与三立柱式半潜式平台形式的横摇垂荡运动的网格量是纵摇垂荡运动网格量的将近 2 倍，这是由于这两种模型在计算横摇垂荡运动的时候，无法使用对称，因而网格量是使用了对称时的将近 2 倍。

图 3-4 为三体浮标形式在计算纵摇垂荡运动中所使用的网格示意图。

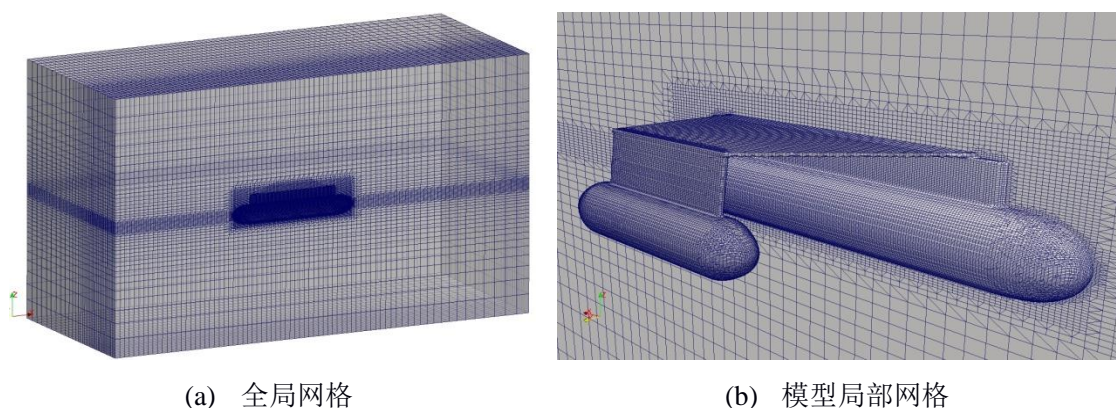


图 3-4 三体浮标形式纵摇垂荡运动计算网格

3.7 本章小结

本章主要对本课题中的计算对象进行了介绍，给出了建模的要求与建立模型的结果。随后介绍了所选取的计算工况与造波的方法，分析了在平台六自由度运动的计算中，需要选取何种自由度进行计算。最后，给出了计算网格的情况。

第四章 数值模拟结果及分析

通过第三章的讨论,得到了所要进行数值模拟的平台形式,即三体浮标形式、三立柱式半潜式平台形式以及四立柱式半潜式平台形式。同时,确定了进行数值模拟的工况,确定了造波的波浪要素。在生成了适当的计算网格后,就是数值模拟的计算分析。本章主要介绍针对三种平台形式的数值模拟结果,并进行分析讨论。

对于每种平台,分别模拟了其在 1m 和 2m 波高下的横摇垂荡运动以及纵摇垂荡运动。首先得出每种平台运动的结果,分析后再将三种平台的结果进行比较,进而有助于得出三种平台中最佳的平台形式。

4.1 横摇与垂荡运动耦合的验证

通常,在船舶六自由度运动的计算当中,横摇是单独考虑,而纵摇是与垂荡耦合进行计算的。然而,由于本课题所研究的平台尺寸较小,单独考虑横摇可能导致在横浪过程中相对于平台较大的波在垂向的作用没有考虑到,而这种垂向作用会对横摇产生一定的影响。图 4-1 为三体浮标模型 1m 波高下单独考虑横摇与考虑横摇垂荡耦合两种情况下,横摇运动的时历曲线图。

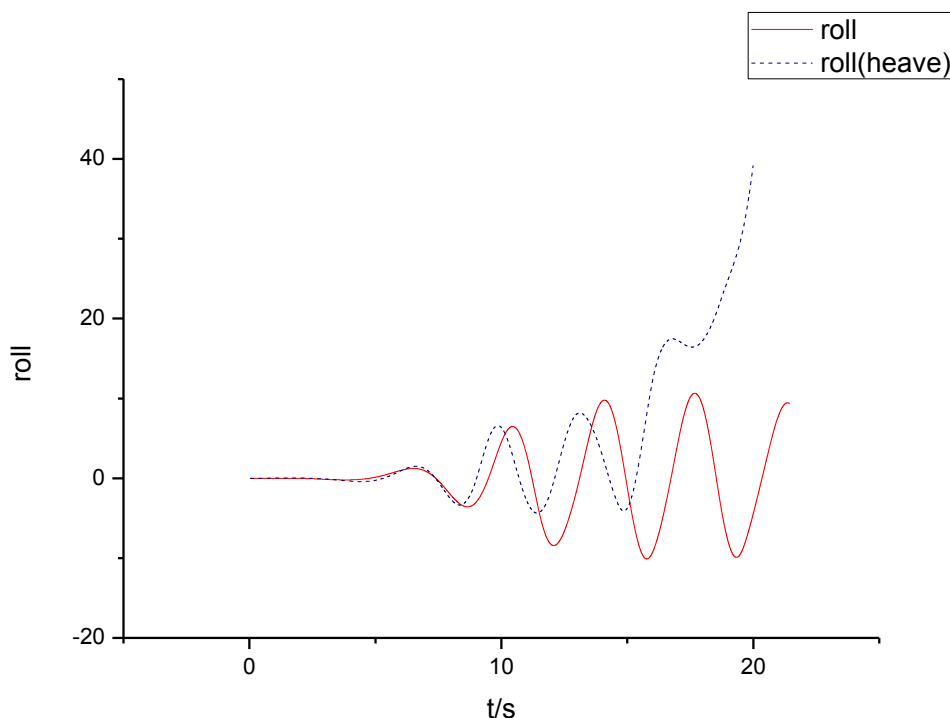


图 4-1 横摇与垂荡耦合运动验证

图中,实线为单独考虑横摇时的情况,虚线为考虑横摇垂荡耦合后的情况。从图中可以清晰的看出,单独考虑横摇时,平台成很好的周期性运动,其运动稳定性保持十分良好。然而考虑横摇与垂荡耦合后,平台的运动有了显著的变化,从 8s 后与单独考虑横摇的曲线开始出现差异,且在 17s 后平台趋于倾覆,平台运动稳定性不好。这就表明,垂荡运动在本课题的研究中对横摇运动有着相当大的影响,考虑横摇垂荡耦合才能够真正表现平添的运动稳

定性能，是十分有必要的。

4.2 三体浮标形式数值模拟结果

4.2.1 三体浮标形式在 1m 波高下的数值模拟结果

4.2.1.1 纵摇垂荡运动

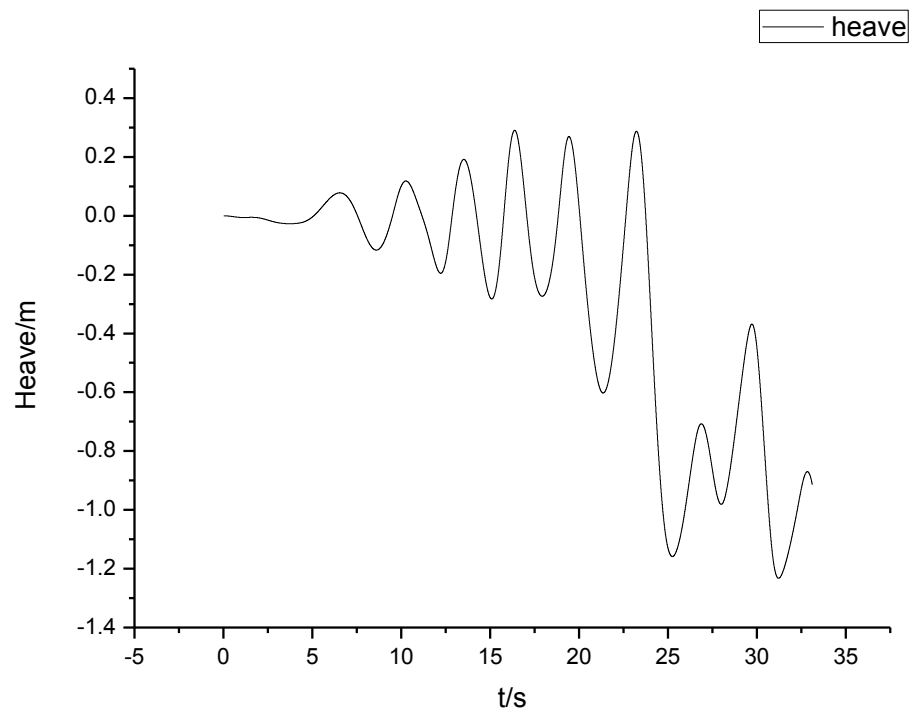


图 4-2-1-1 垂荡时历曲线

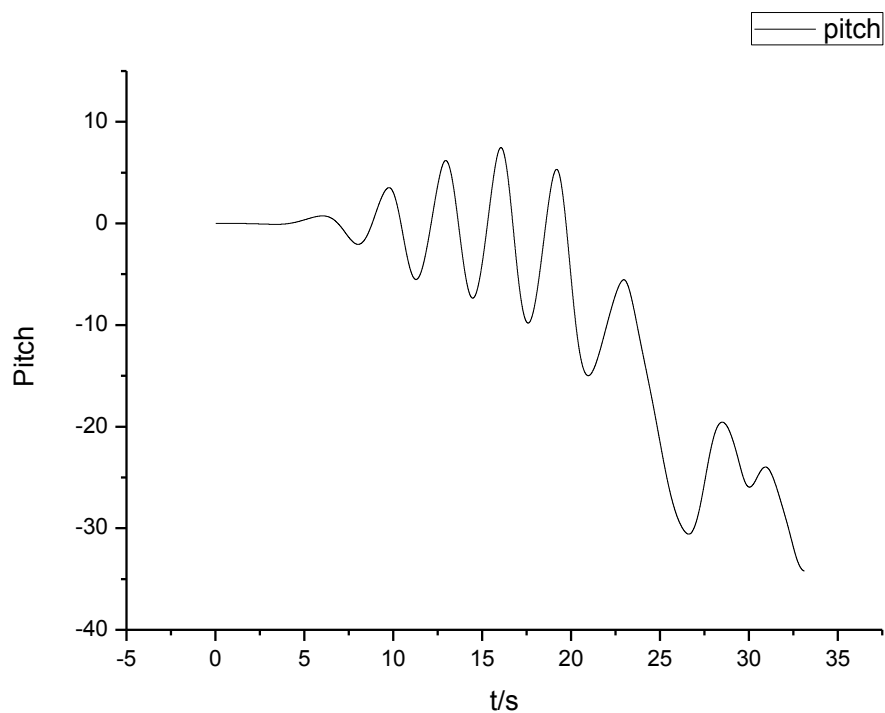


图 4-2-1-2 纵摇时历曲线

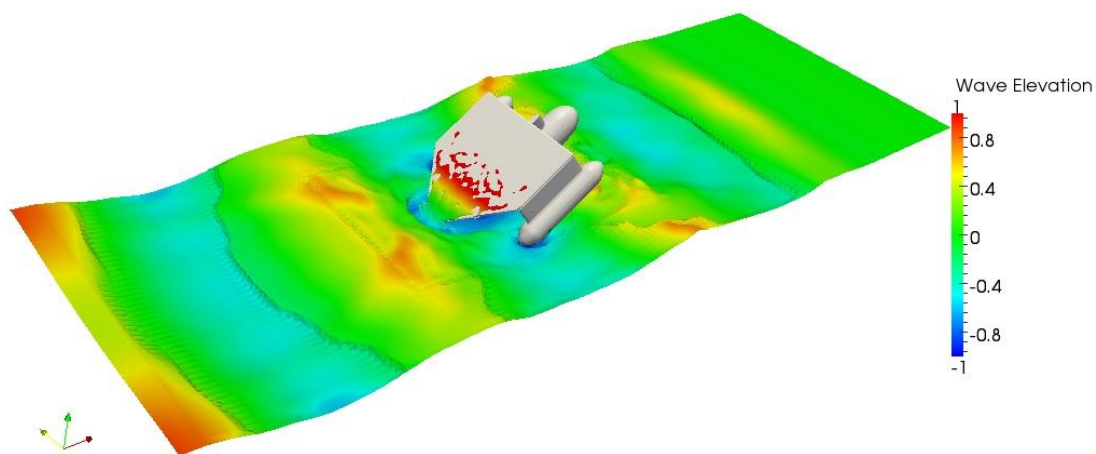


图 4-2-1-3 运动示意图

图 4-2-1-1 与图 4-2-1-2 分别为该算例下的垂荡与纵摇时历曲线。图 4-2-1-3 为平台最后倾覆的示意图。本算例平台最终倾覆。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动。从垂荡曲线上看，22.5s 前，平台的垂荡运动较为稳定；然而，在 22.5s 后，垂荡运动有着一个向下的突变。同样，纵摇运动在 22.5s 前较为稳定，22.5s 后也是有一个向下的突变。原因是由于平台的运动幅度较大，在 22.5s 左右甲板上浪，使得其稳定性恶化，最终加速了平台的倾覆。

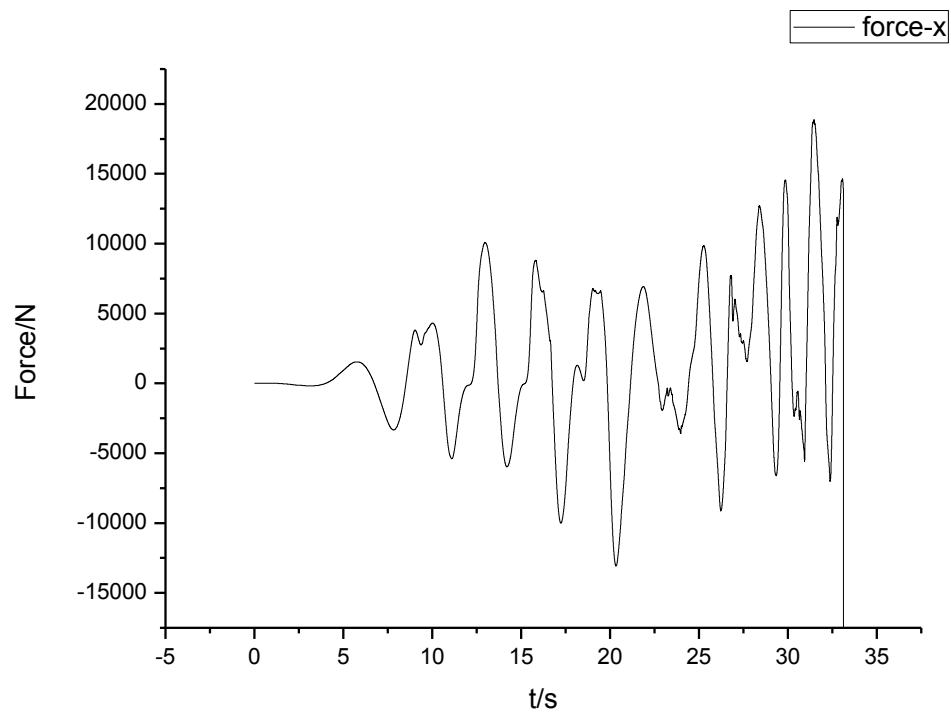


图 4-2-1-4 x 方向受力曲线

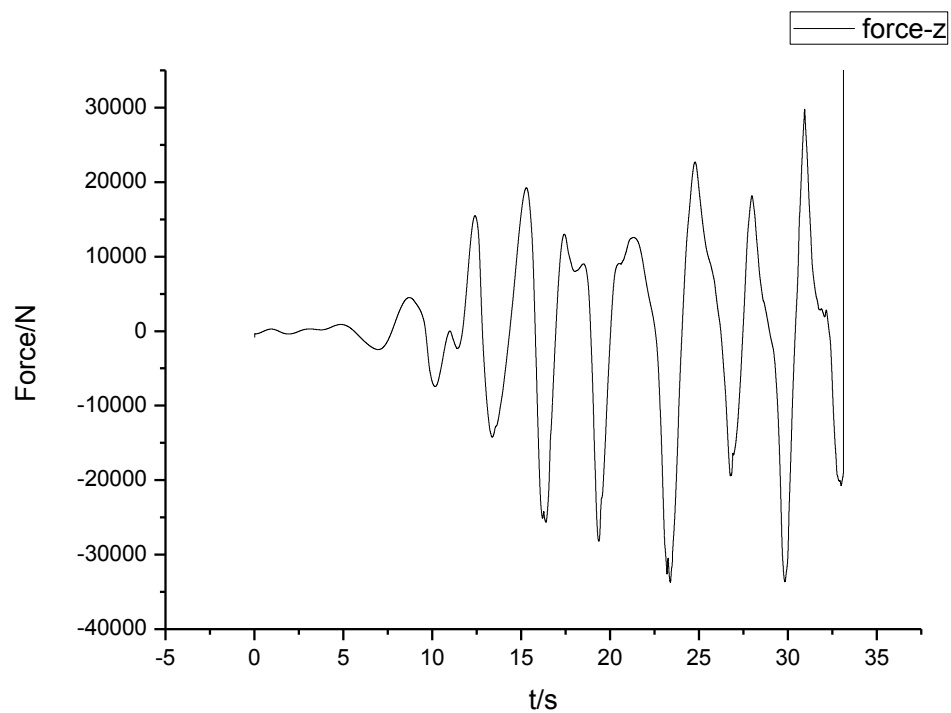
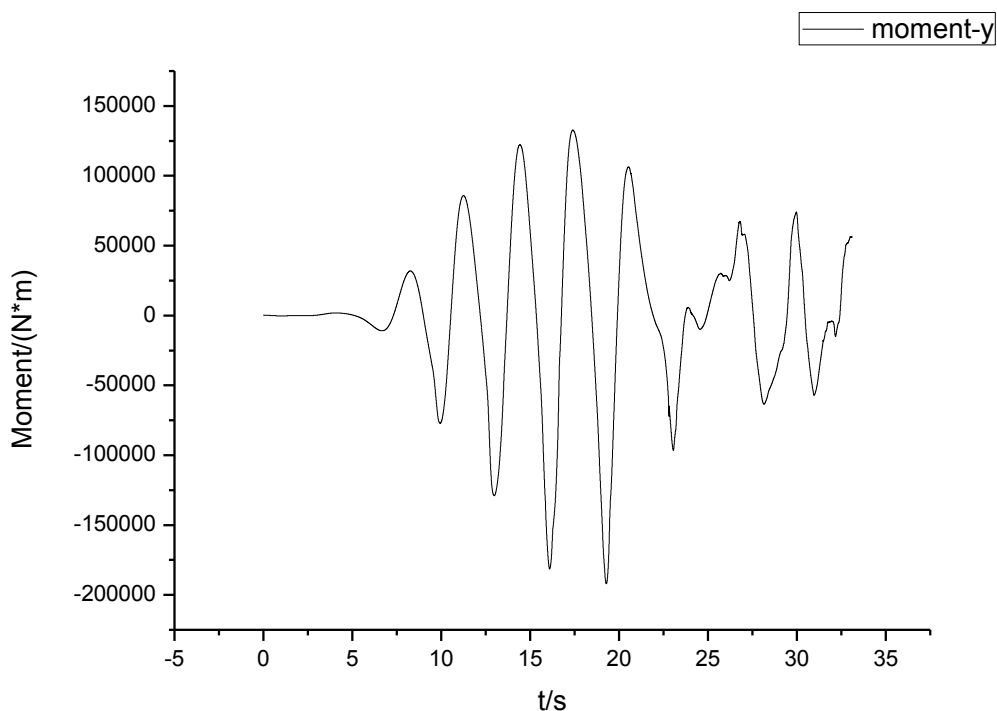


图 4-2-1-5 z 方向受力曲线



4-2-1-6 力矩曲线

图 4-2-1-4、图 4-2-1-5 和图 4-2-1-6 分别为平台运动的纵向受力、垂向受力和所受力矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。然而，纵向、垂向受力以及力矩的振幅是不断变化的，原因是平台在运动过程中其姿态是不断变化的。在 22.5s 后，平台的受力明显的产生不稳定，这就说明甲板上浪导致了平台受力的显著变化，使得平台趋于并且最终倾覆。

4.2.1.2 横摇垂荡运动

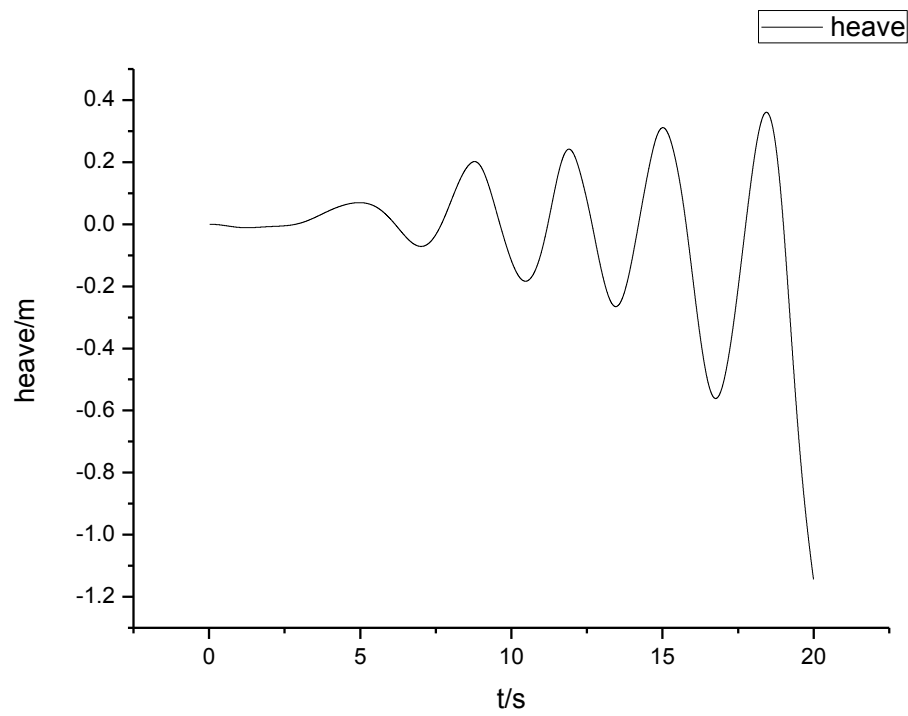


图 4-2-1-7 垂荡时历曲线

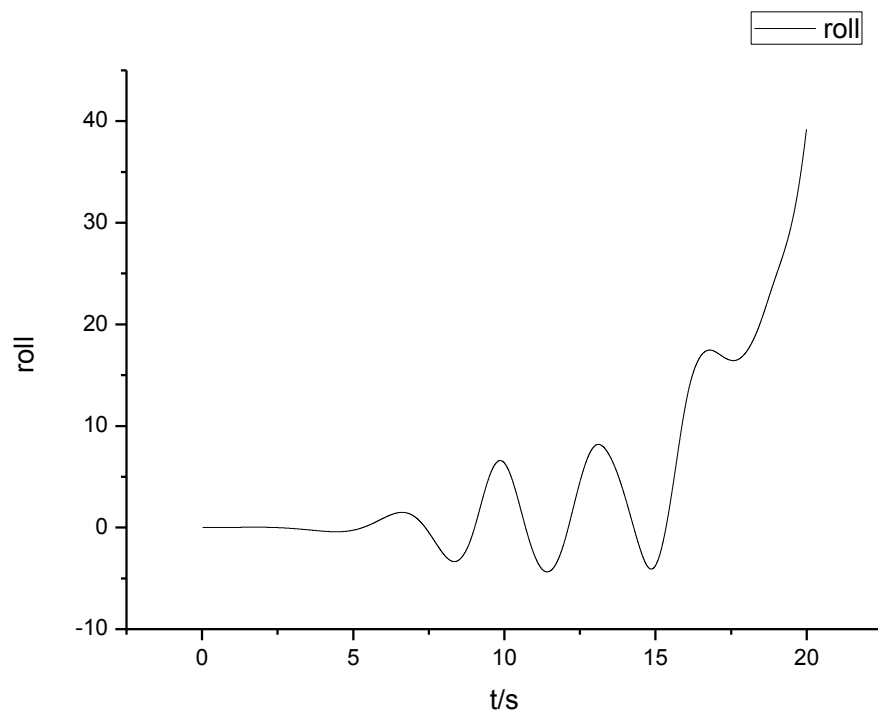


图 4-2-1-8 横摇时历曲线

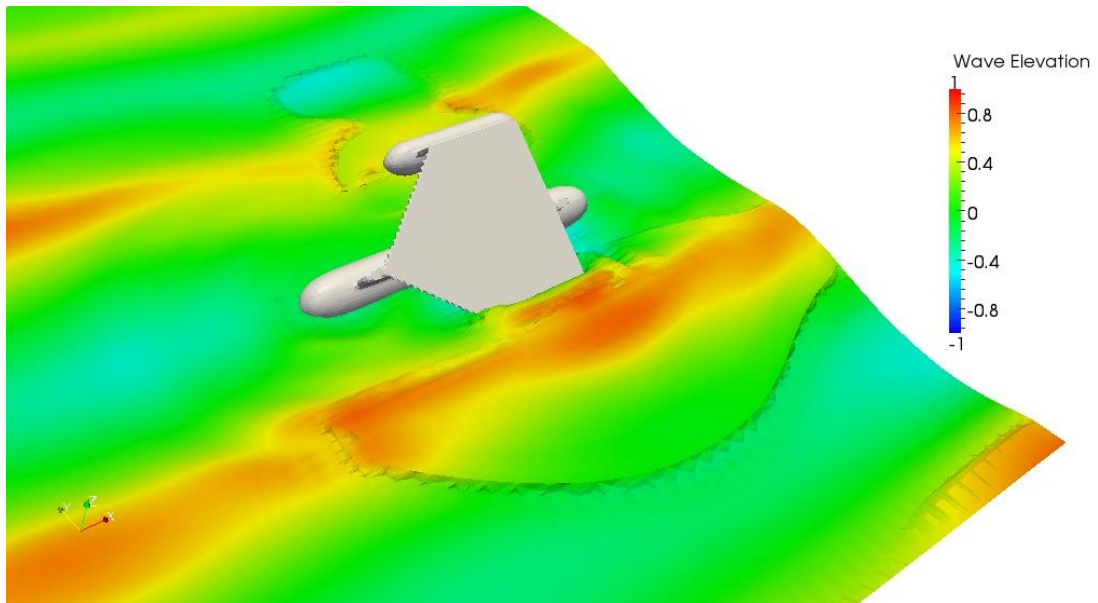
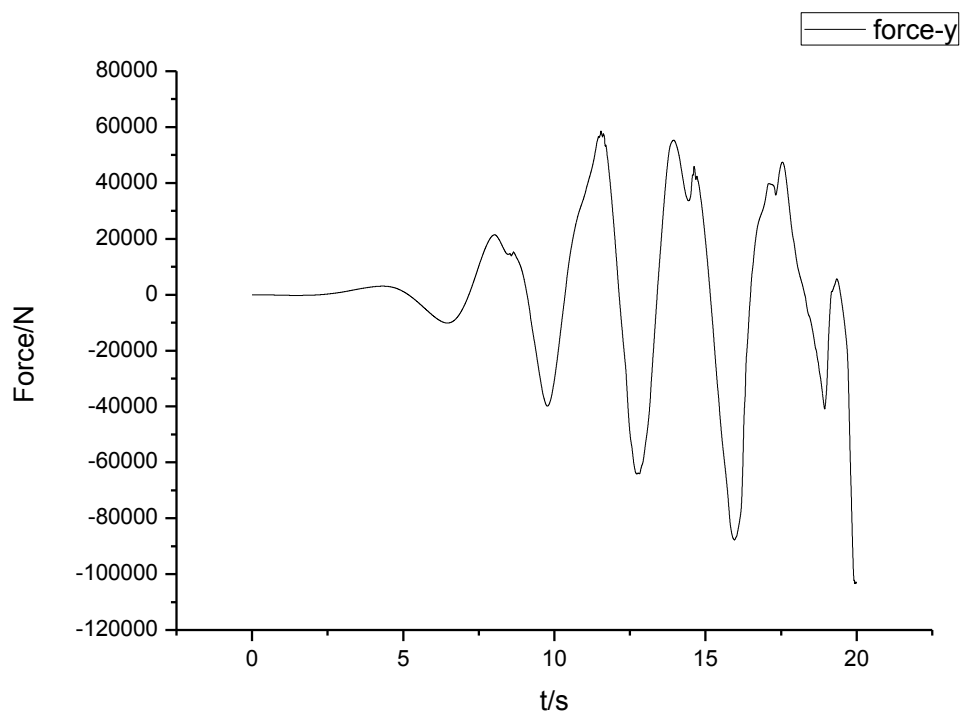
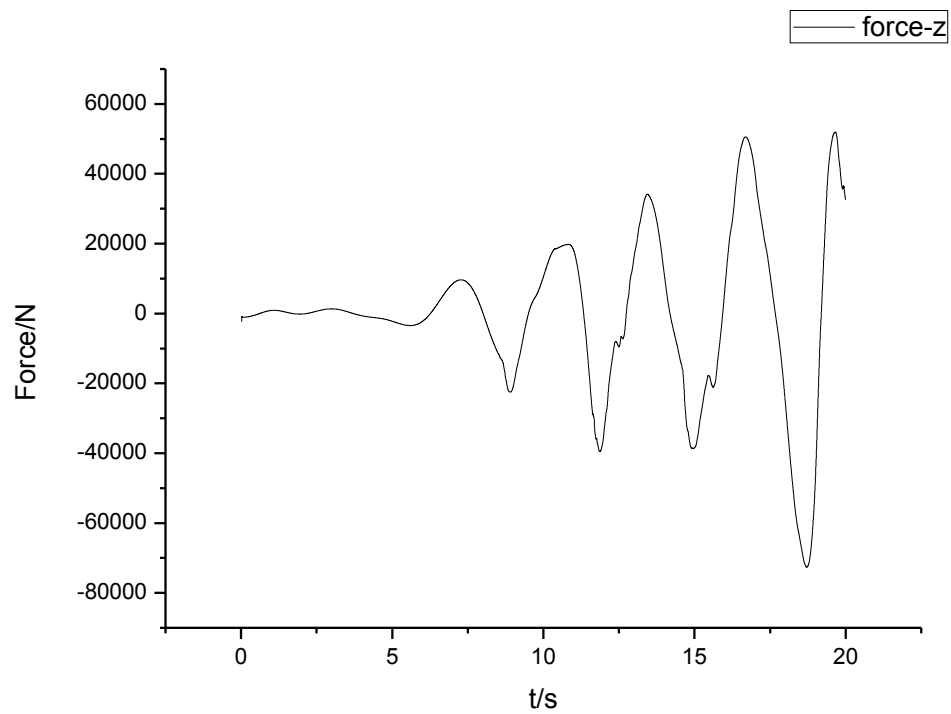


图 4-2-1-9 运动示意图

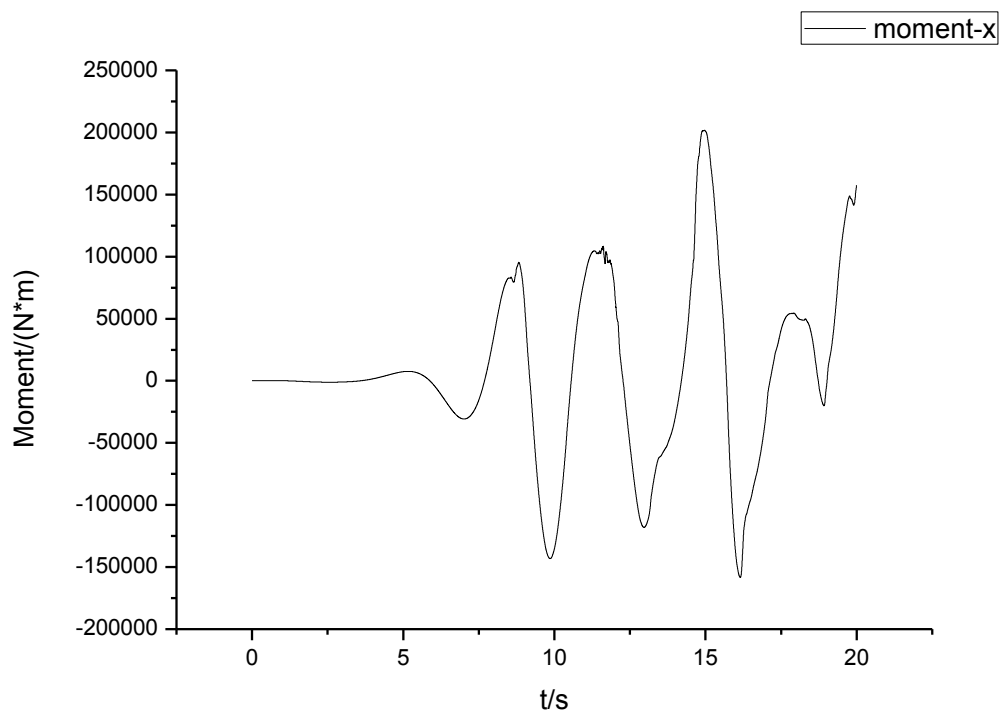
图4-2-1-7与图4-2-1-8分别为该算例下的垂荡与横摇时历曲线。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动，但运动幅度不断变大。在 16s 时平台并没有出现回复趋势，而是继续向倾覆方向运动，并最终倾覆。原因可能是平台运动幅度过大导致，且平台两侧的结构形式不利于平台的平滑受力。同时由于与垂荡运动耦合计算，使得垂荡对于平台的横摇运动有着较大的影响。图 4-2-1-9 为平台最终倾覆的示意图。



4-2-1-10 y 方向受力曲线



4-2-1-11 z 方向受力曲线



4-2-1-12 力矩曲线

图 4-2-1-10、图 4-2-1-11 和图 4-2-1-12 分别为该算例下的受力和力矩曲线。平台的受力基本是按照波浪的周期呈周期状。但 16s 后，平台的受力有了显著的变化，尤其是力矩，原因是平台运动幅度过大使其姿态变化过大，导致受力变化明显。受力的变化也导致了平台没

有足够的回复能力，最终倾覆。

4.2.2 三体浮标形式在 2m 波高下的数值模拟结果

4.2.2.1 纵摇垂荡运动

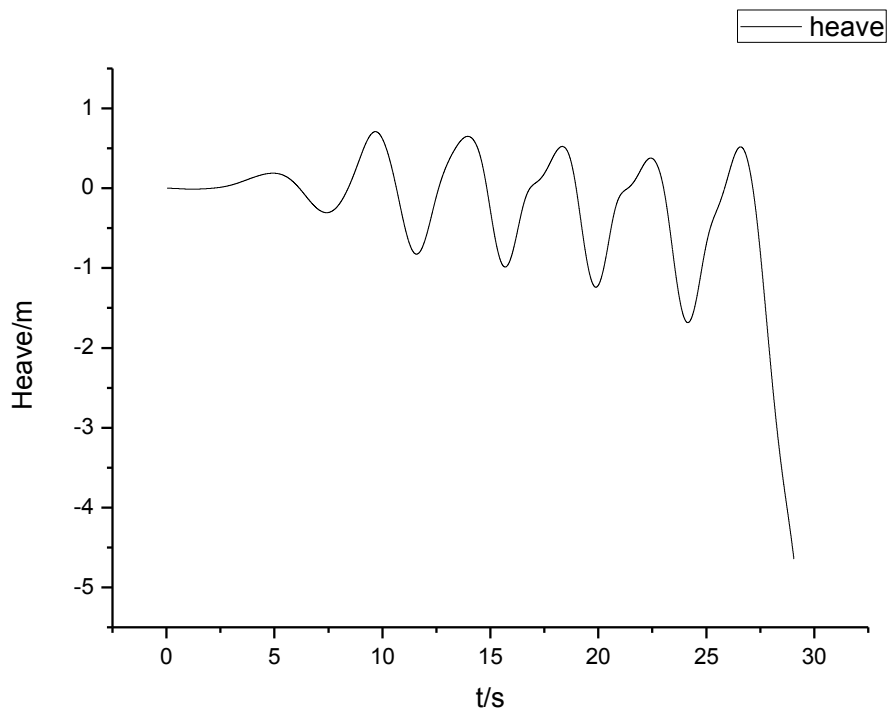


图 4-2-2-1 垂荡时历曲线

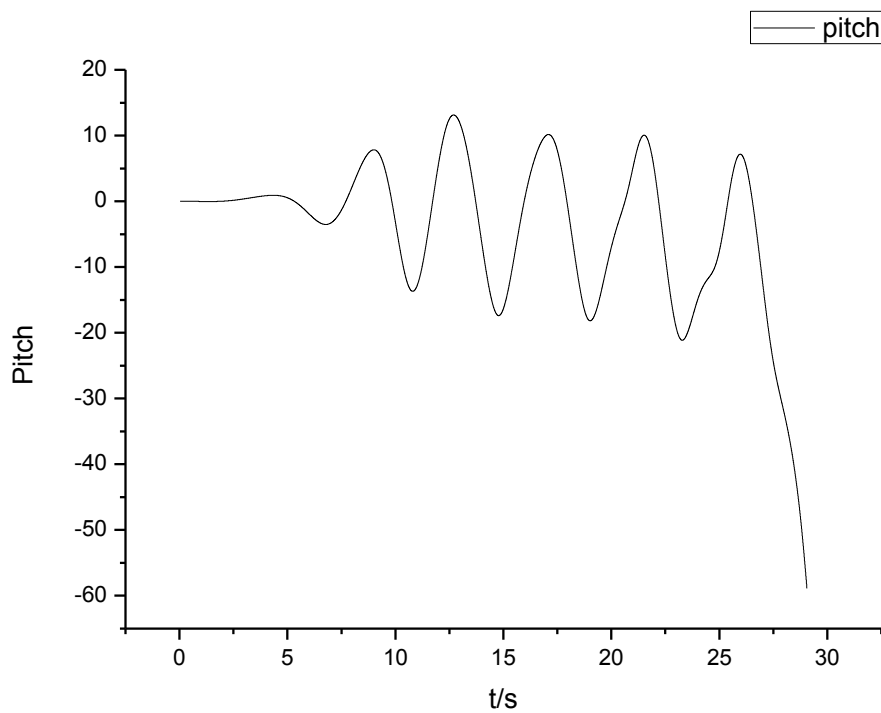


图 4-2-2-2 纵摇时历曲线

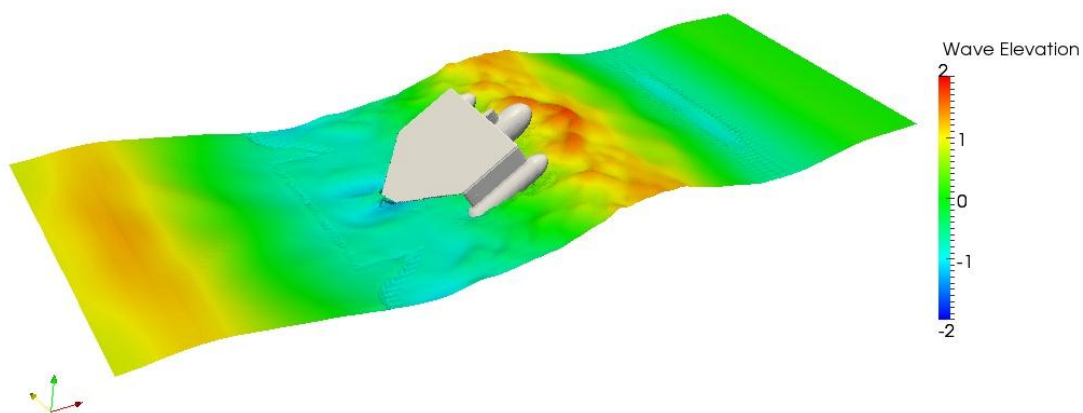


图 4-2-2-3 运动示意图

图 4-2-2-1 与图 4-2-2-2 分别为该算例下的垂荡与纵摇时历曲线。图 4-2-2-3 为平台最后倾覆的示意图。本算例平台最终倾覆。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动,并且在 25s 之前，运动相当稳定。然而，在 25s 之后，无论从纵摇运动还是垂荡运动来看，平台运动并没有得到回复，而是继续倾覆。原因可能是平台的运动导致了其出水部分过多，使得受力变化，导致平台倾覆。

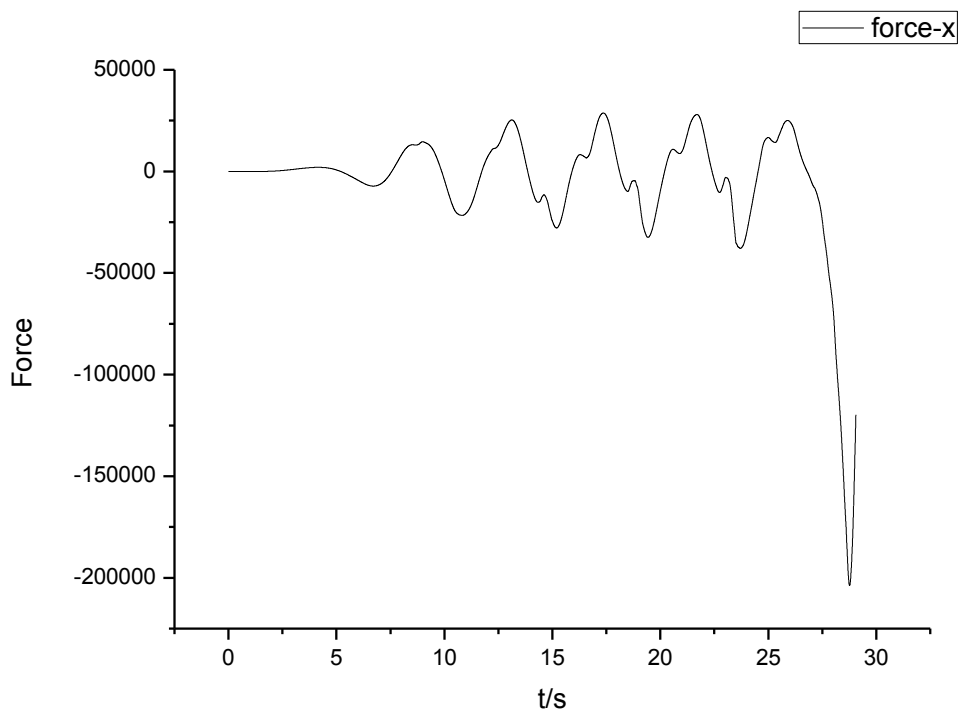


图 4-2-2-4 x 方向受力曲线

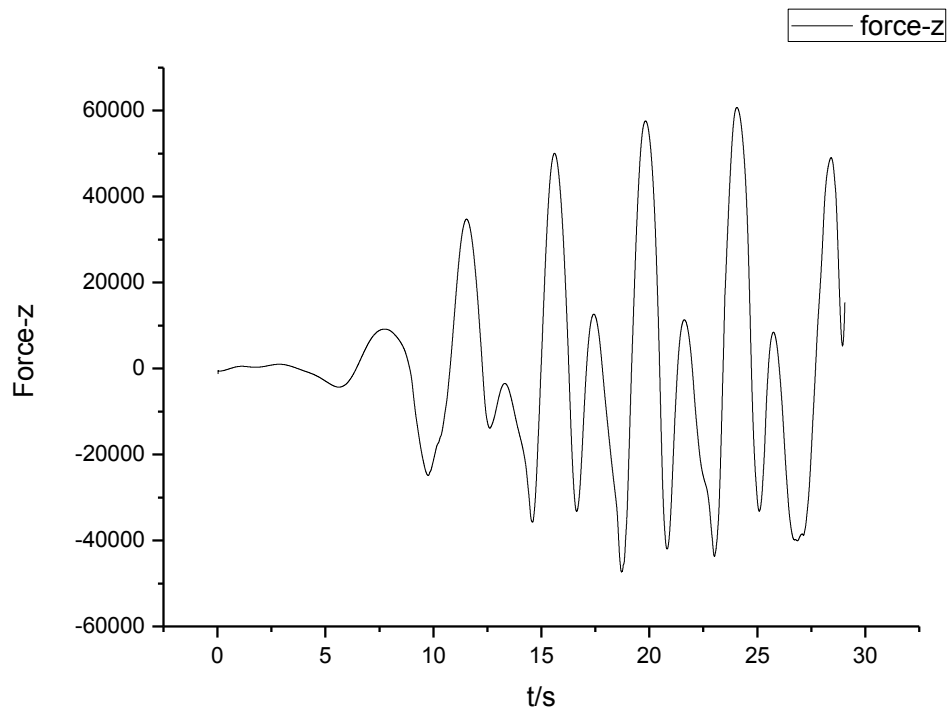


图 4-2-2-5 z 方向受力曲线

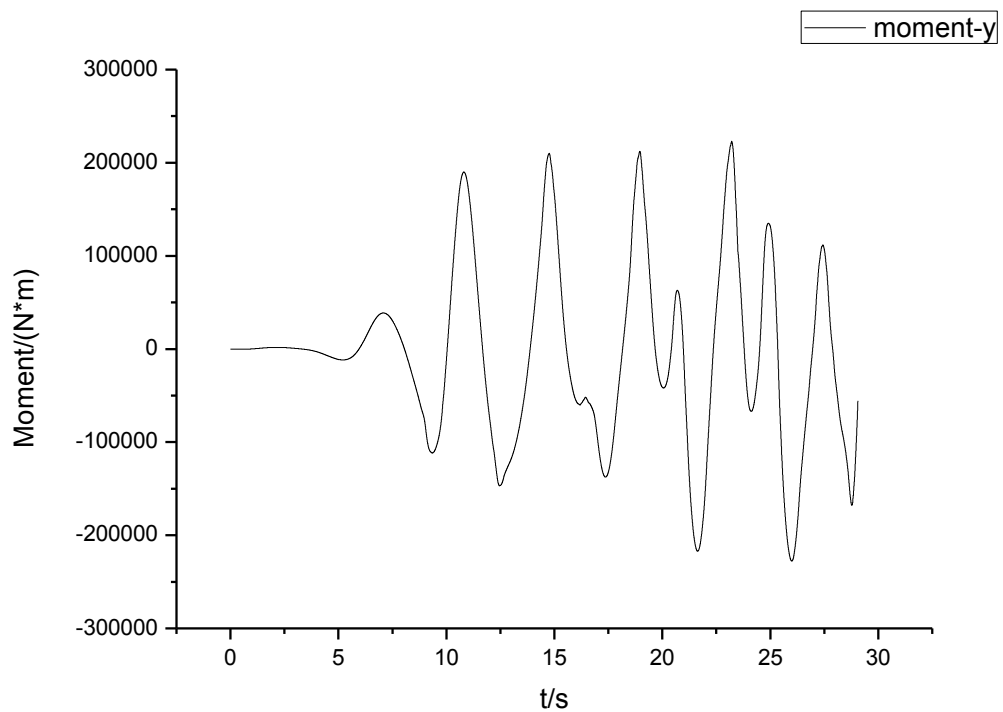
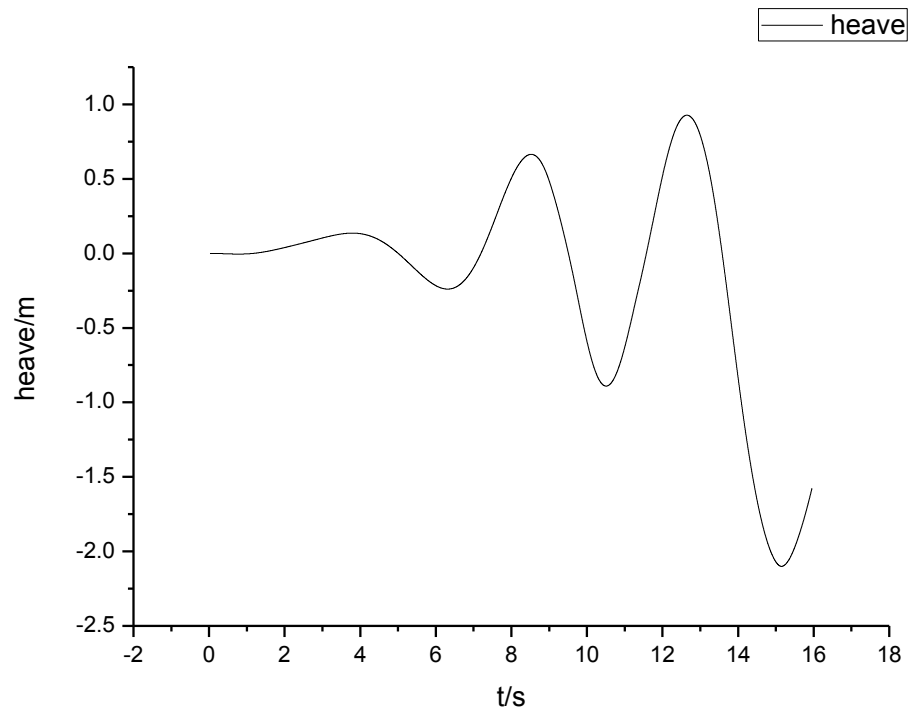


图 4-2-2-6 力矩曲线

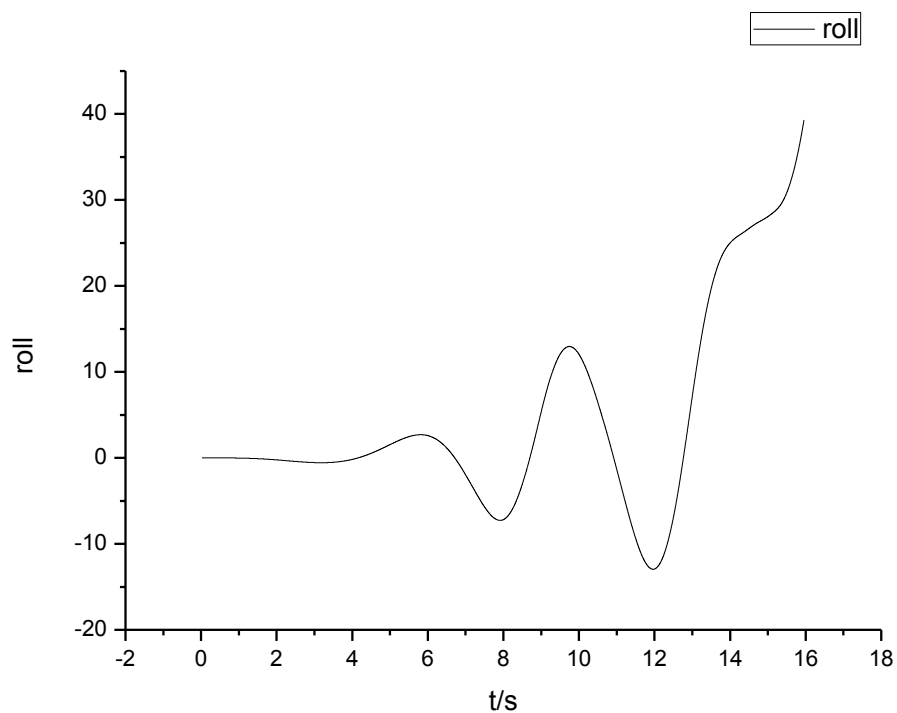
图 4-2-2-4、图 4-2-2-5 和图 4-2-2-6 分别为平台运动的纵向受力、垂向受力和所受力矩

的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。并且在 25s 之前相当稳定。这也保证了平台在 25s 前的运动的稳定性。然而，25s 后，受力发生了急剧的变化。原因是平台运动导致出水部分过多，受力不稳等等。

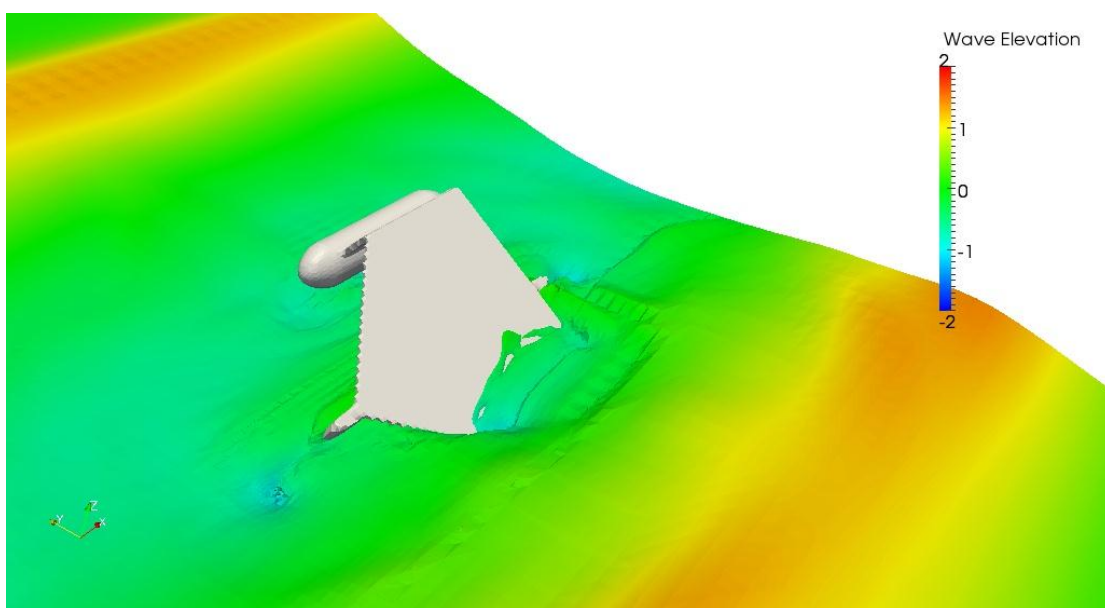
4.2.2.2 横摇垂荡运动



4-2-2-7 垂荡时历曲线

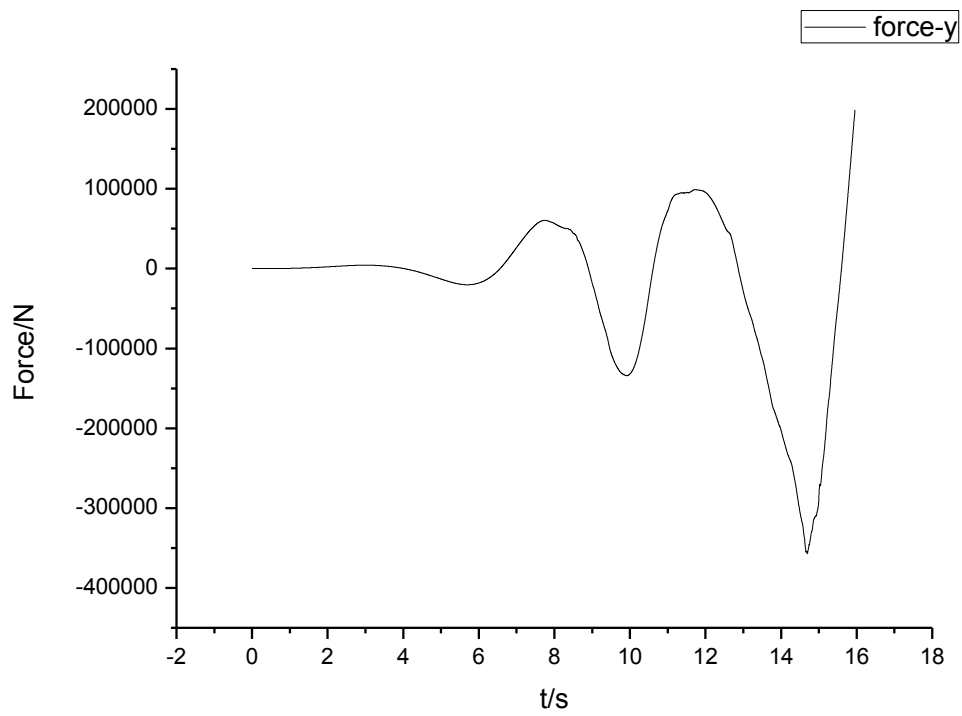


4-2-2-8 横摇时历曲线

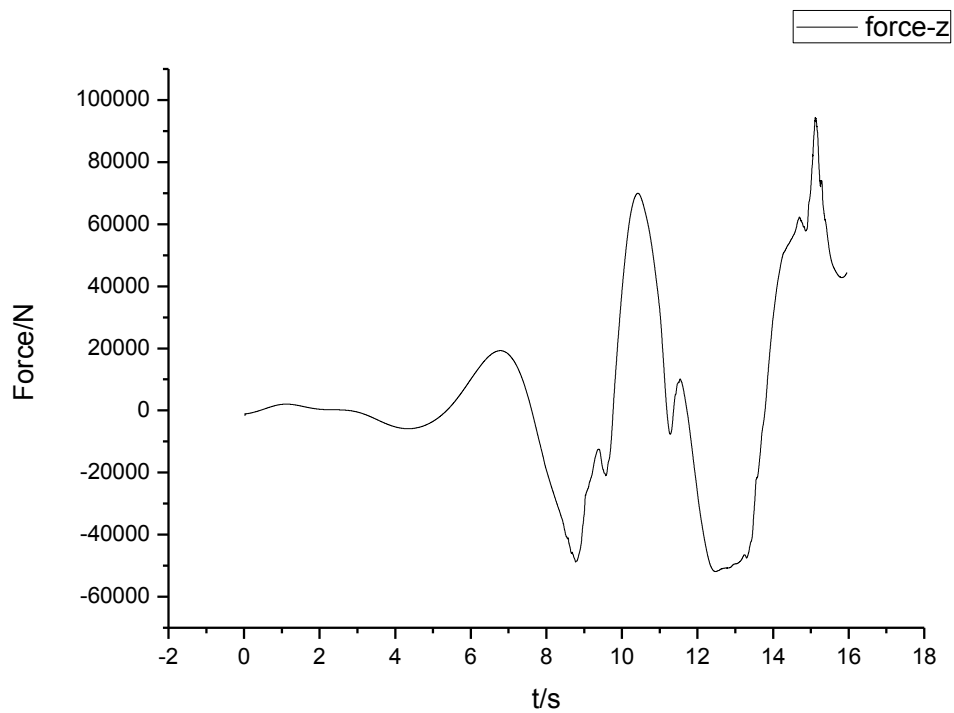


4-2-2-9 运动示意图

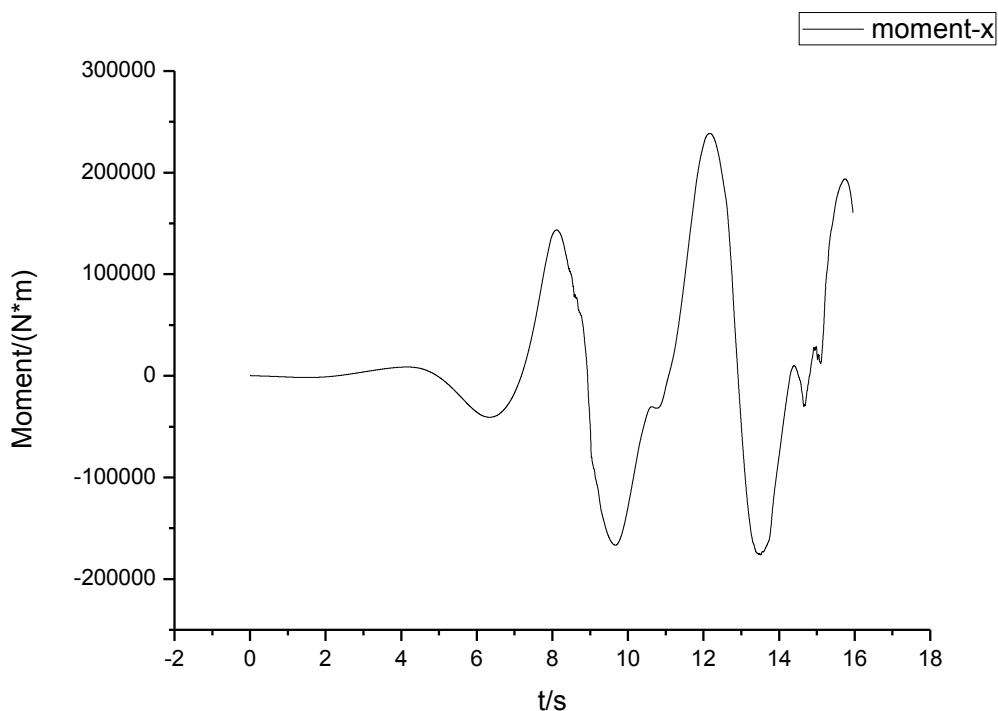
图4-2-2-7与图4-2-2-8分别为该算例下的垂荡与横摇时历曲线。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动，但运动幅度不断变大。在 13s 时平台并没有出现回复趋势，而是继续向倾覆方向运动，并最终倾覆。原因可能是平台运动幅度过大导致，且平台两侧的结构形式不利于平台的平滑受力。同时由于与垂荡运动耦合计算，使得垂荡对于平台的横摇运动有着较大的影响。图 4-2-2-9 为平台最终倾覆的示意图。



4-2-2-10 y 方向受力曲线



4-2-2-11 z 方向受力曲线



4-2-2-12 力矩曲线

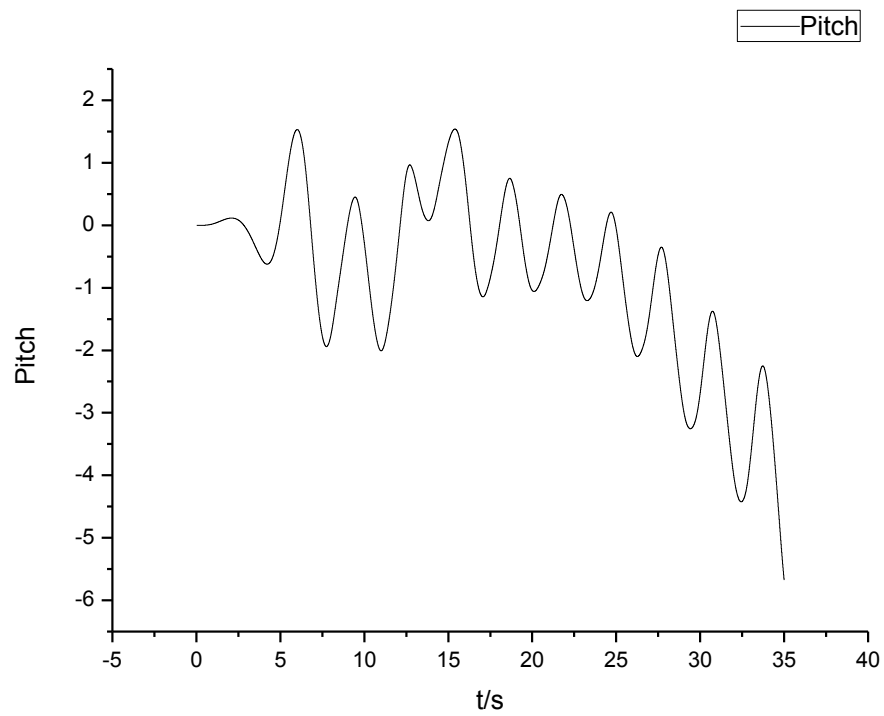
图 4-2-2-10、图 4-2-2-11 和图 4-2-2-12 分别为该算例下的受力和力矩曲线。平台的受力基本是按照波浪的周期呈周期状。但 13s 后，平台的受力有了显著的变化，尤其是力矩，原因是平台运动幅度过大使其姿态变化过大，导致受力变化明显。受力的变化也导致了平台没有足够的回复能力，最终倾覆。观察 14.5s 的平台横向受力的变化，更加能够说明平台由于过大的运动导致的受力变化情况。

4.3 三立柱式半潜式平台形式数值模拟结果

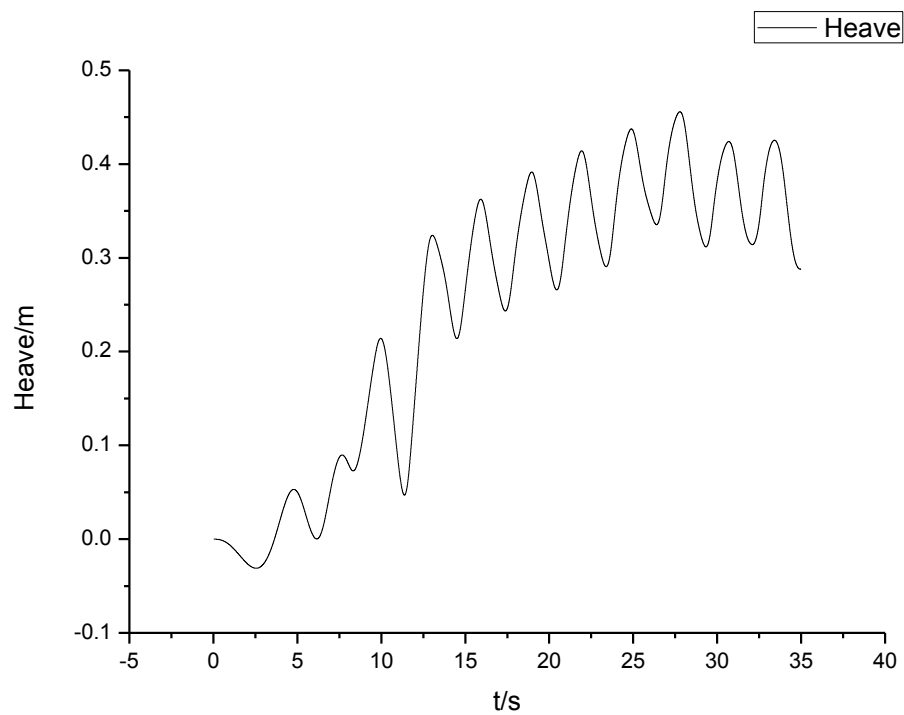
由于三立柱式半潜式平台形式同三体浮标形式和四立柱式半潜式平台形式不同，考虑其纵摇垂荡运动时，一个立柱迎浪和两个立柱迎浪的受力及运动不同，因此将这两种情况分别考虑。

4.3.1 三立柱式半潜式平台形式在 1m 波高下的数值模拟结果

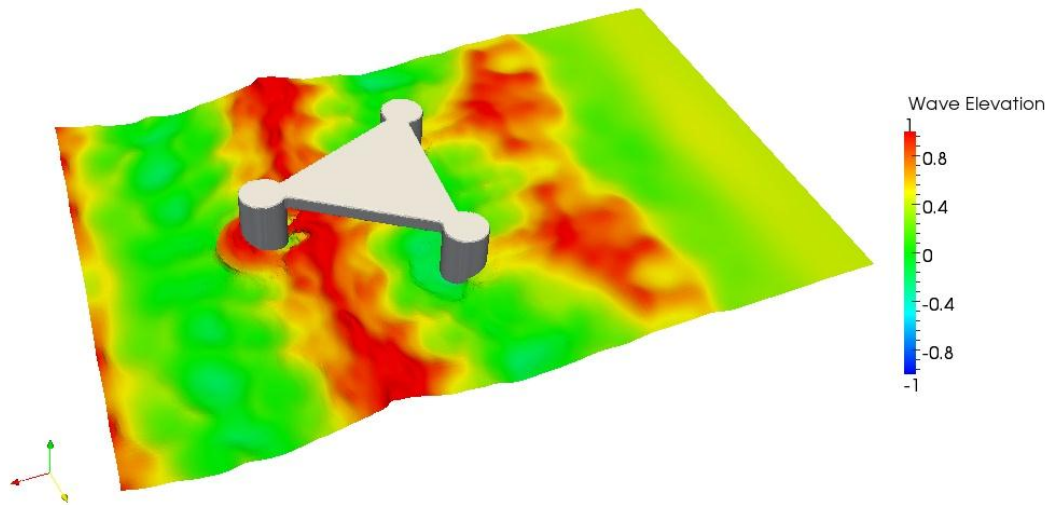
4.3.1.1 单立柱迎浪的纵摇垂荡运动



4-3-1-1 纵摇时历曲线



4-3-1-2 垂荡时历曲线



4-3-1-3 运动示意图

图4-3-1-1与图4-3-1-2分别为该算例下的纵摇与垂荡时历曲线。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动。从纵摇时历曲线图上看，曲线有一个明显的下降趋势，然而，从纵摇的幅度来看，在 6° 以内，如果纵摇运动能够控制在这个范围之内，则运动稳定性很好的满足要求。从垂荡时历曲线来看呢，垂荡运动在15s时刻后趋于稳定，且其平衡位置位于0.35m左右。从垂荡运动幅度来看，能够保持在0.5m以内，可以保证垂荡运动的稳定性。图4-3-1-3为35s时刻平台在波浪中运动的示意图。

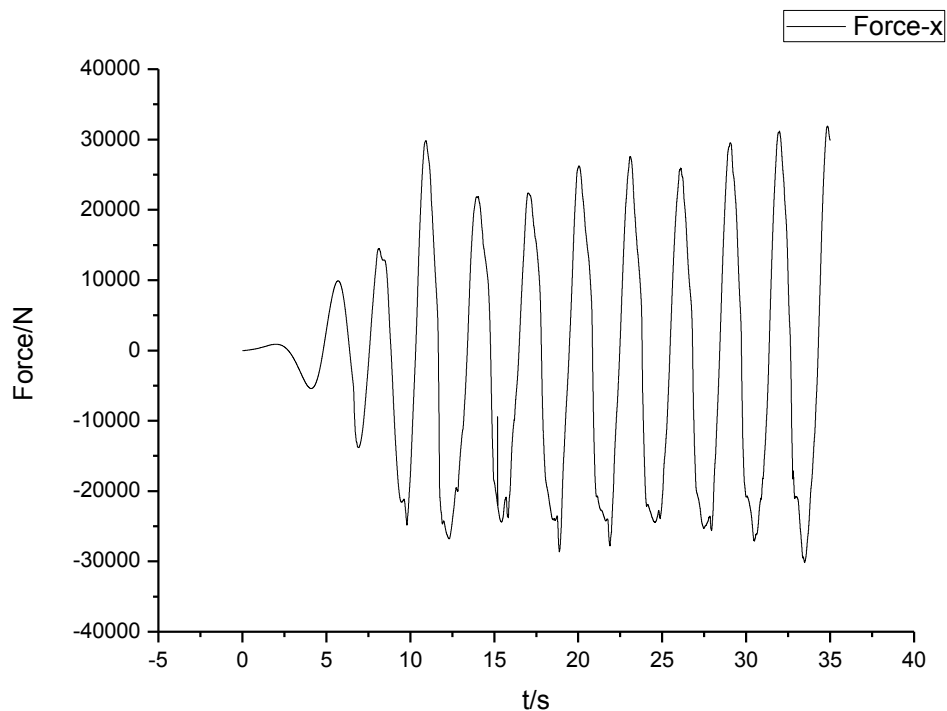


图 4-3-1-4 x 方向受力曲线

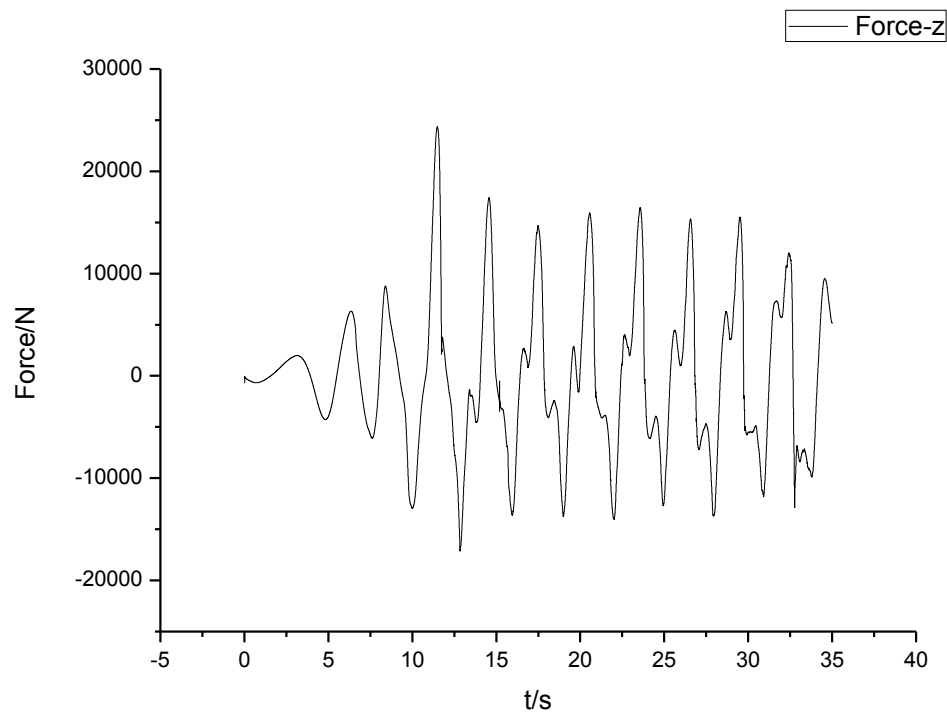


图 4-3-1-5 z 方向受力曲线

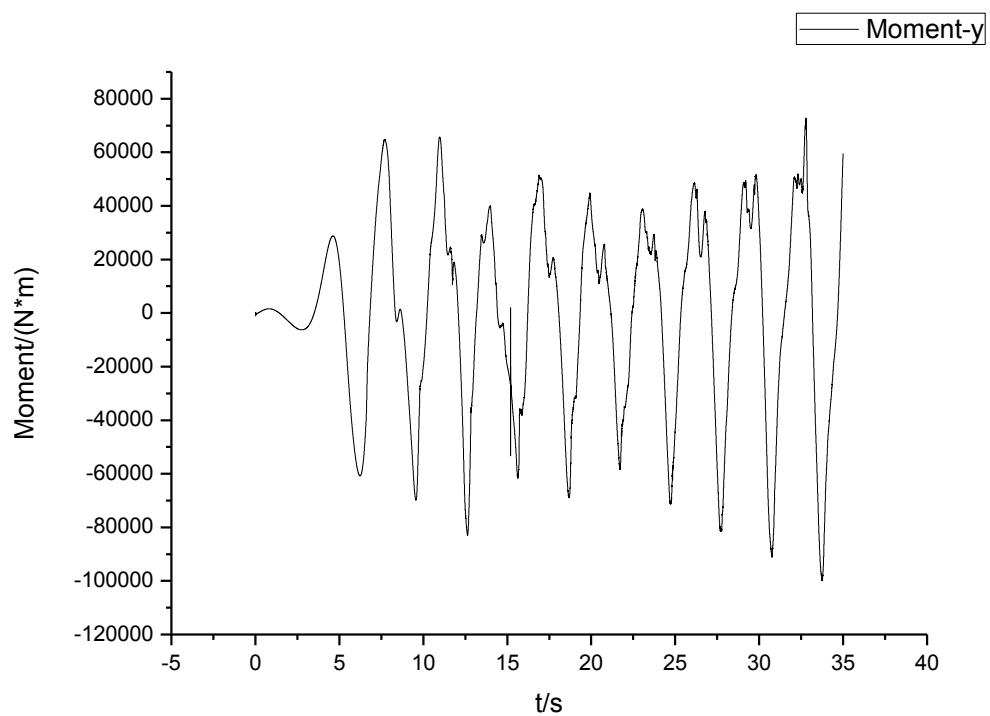


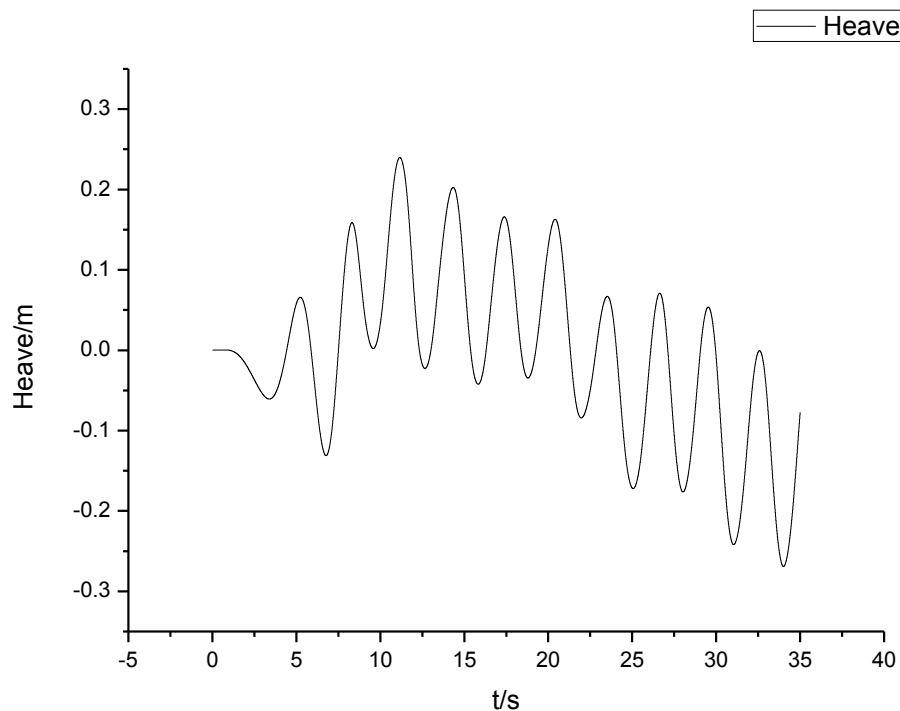
图 4-3-1-6 力矩曲线

图 4-3-1-4、图 4-3-1-5 和图 4-3-1-6 分别为平台运动的纵向受力、垂向受力和所受力矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。然而，纵向、

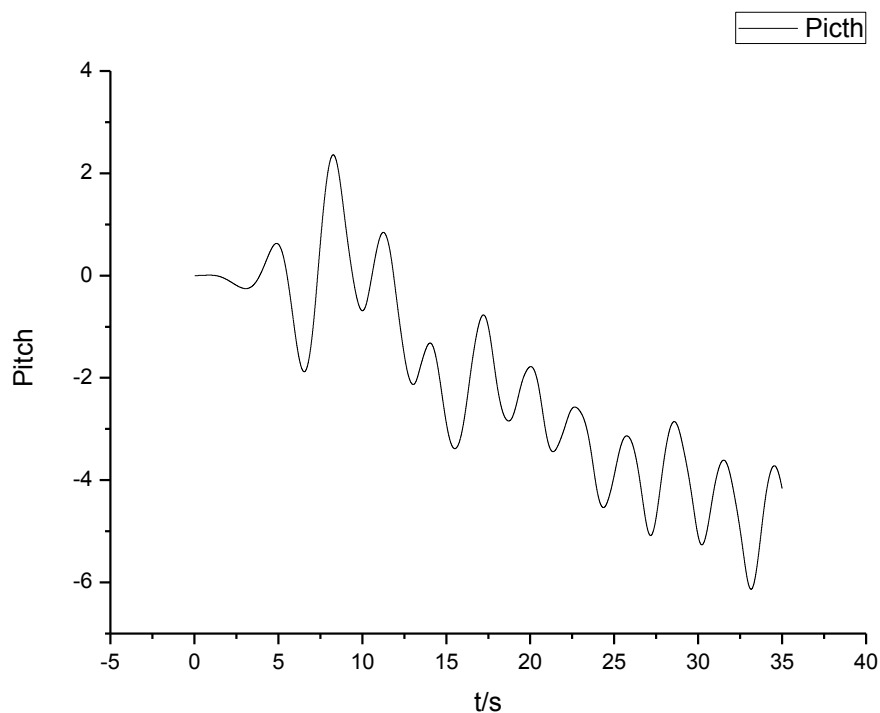
垂向受力以及力矩的振幅是不断变化的，原因是平台在运动过程中其姿态是不断变化的，导致其受力的幅度有所变化。平台所受垂向力以及力矩在峰值附近会伴随一个小的极值点，原因可能是在平台运动过程中，平台立柱上产生波浪爬高，使平台受力突变；同时，粘性的作用也可能导致平台受力的不稳定。

总之，平台受力是在可以接受的周期性变化范围内，这就表明平台运动的周期性不明显并不是数值模拟方法的错误，而是由如粘性、垂荡纵摇的耦合运动等原因引起的。

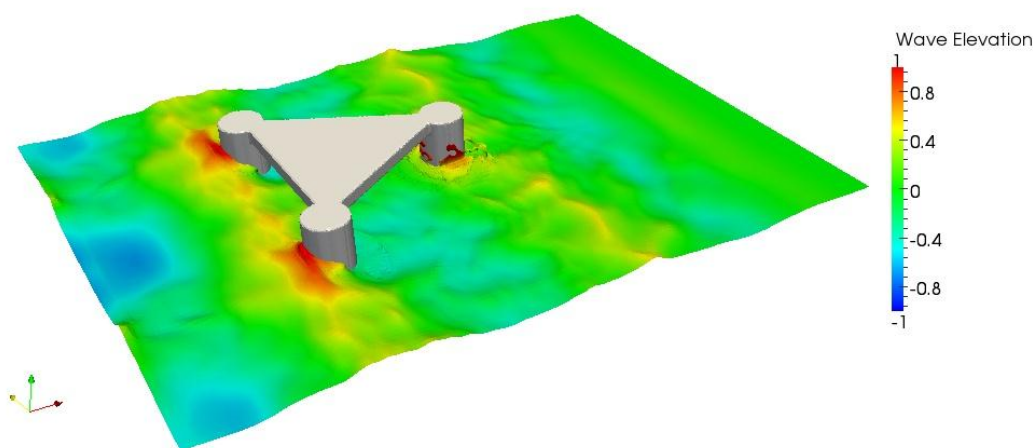
4.3.1.2 双立柱迎浪的纵摇垂荡运动



4-3-1-7 垂荡时历曲线

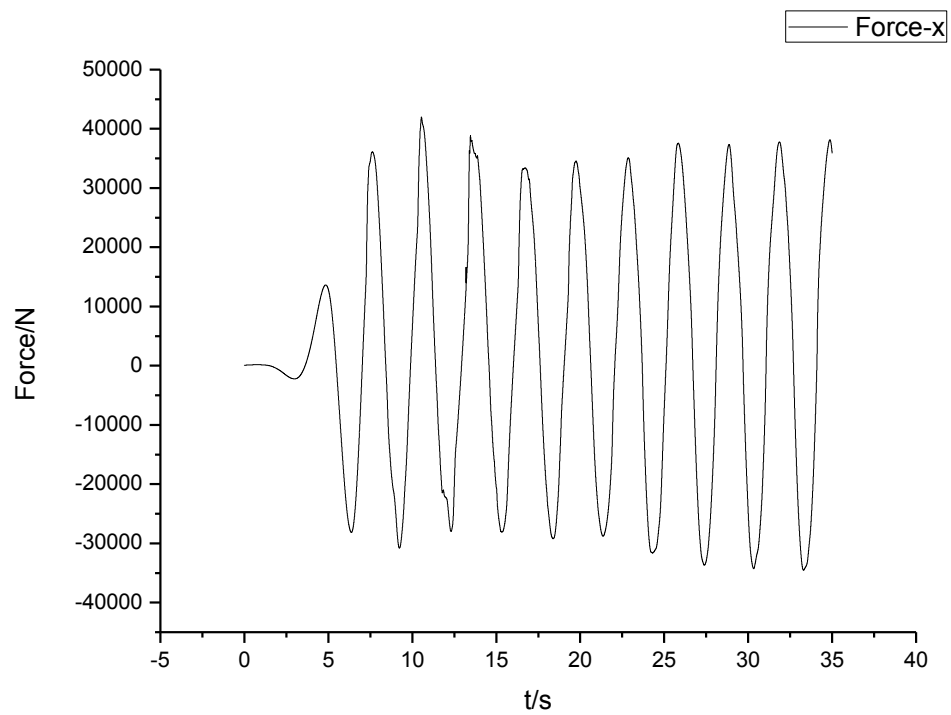


4-3-1-8 纵摇时历曲线

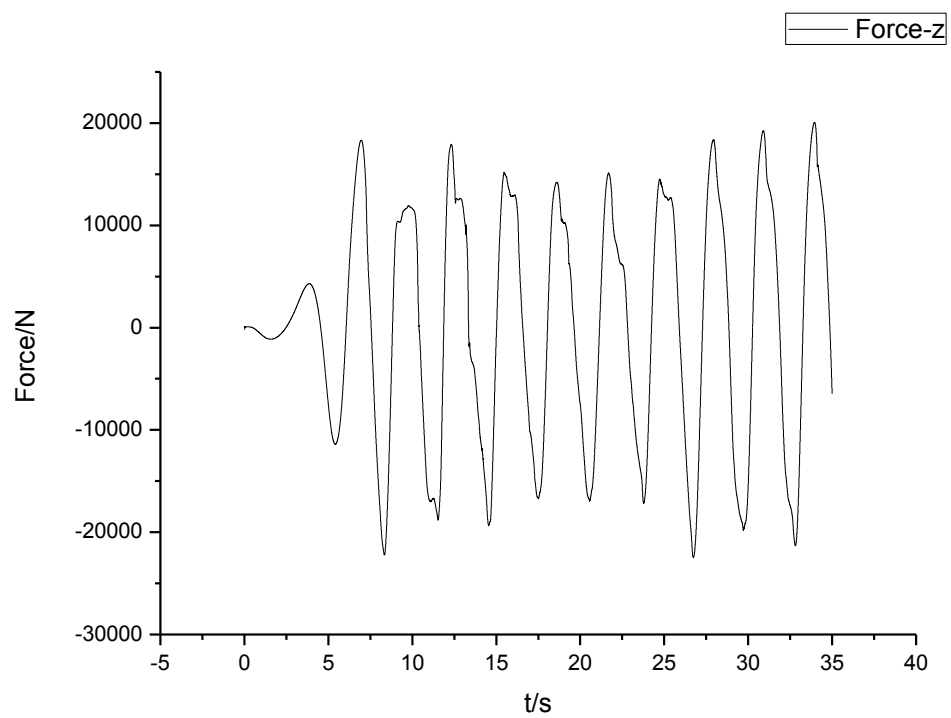


4-3-1-9 垂荡时历曲线

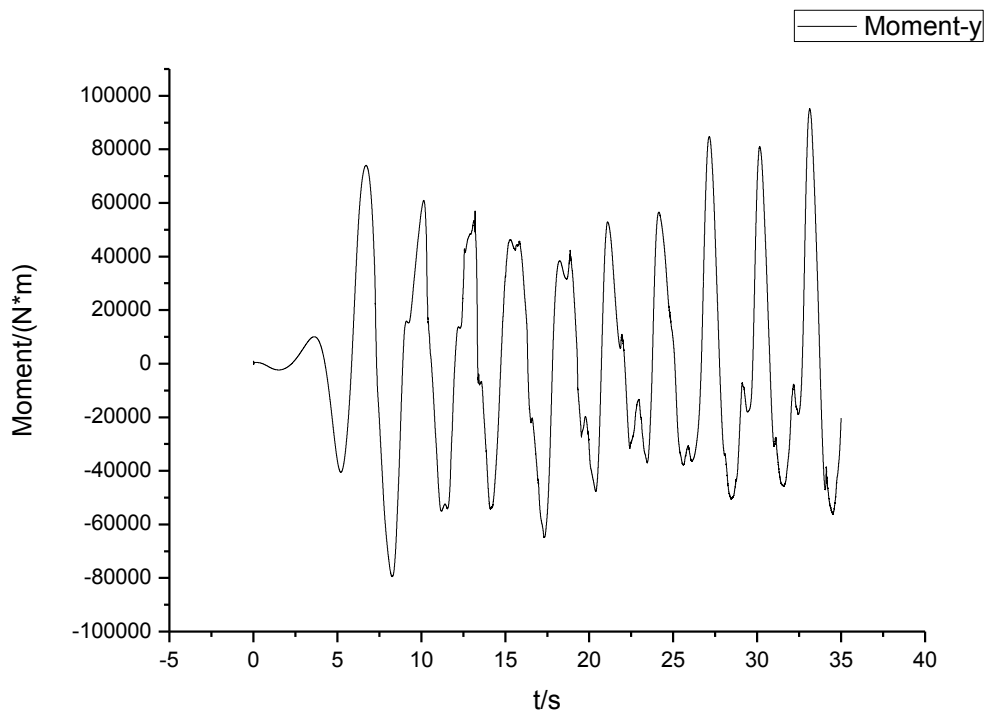
图4-3-1-7与图4-3-1-8分别为该算例下的垂荡与纵摇时历曲线。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动。从纵摇时历曲线图上看，曲线同单立柱迎浪的算例一样，有一个明显的下降趋势，然而，从纵摇的幅度来看，仍是在 6° 以内，如果纵摇运动能够控制在这个范围之内，则运动稳定性很好的满足要求。从垂荡时历曲线来看呢，垂荡运动在较为稳定，从垂荡运动幅度来看，能够保持在 0.3m 以内，可以保证垂荡运动的稳定性。图4-3-1-9为35s时刻平台在波浪中运动的示意图。



4-3-1-10 x 方向受力曲线



4-3-1-11 z 方向受力曲线

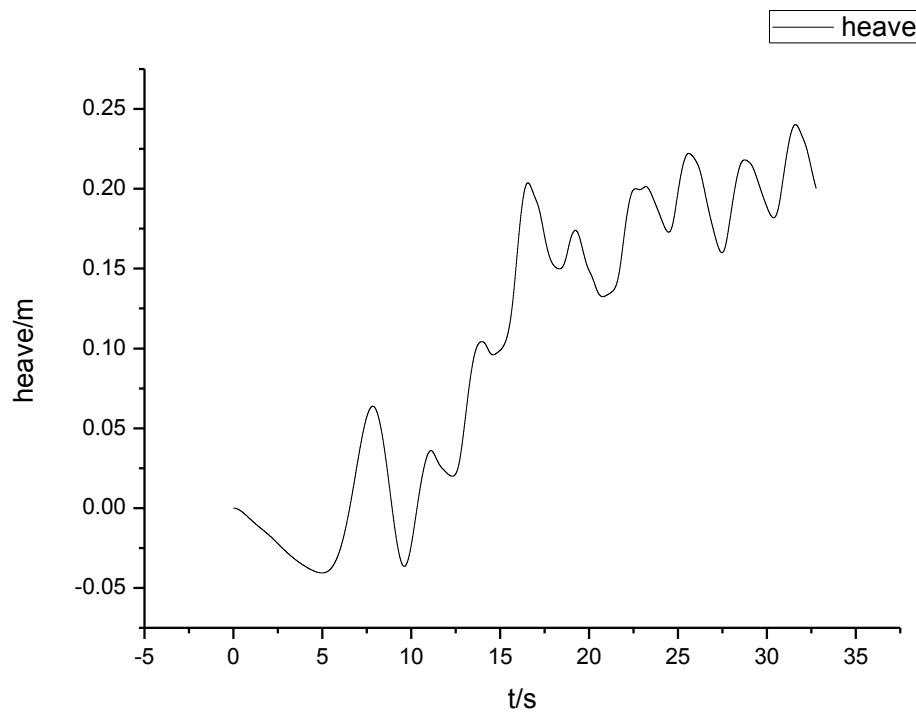


4-3-1-12 力矩曲线

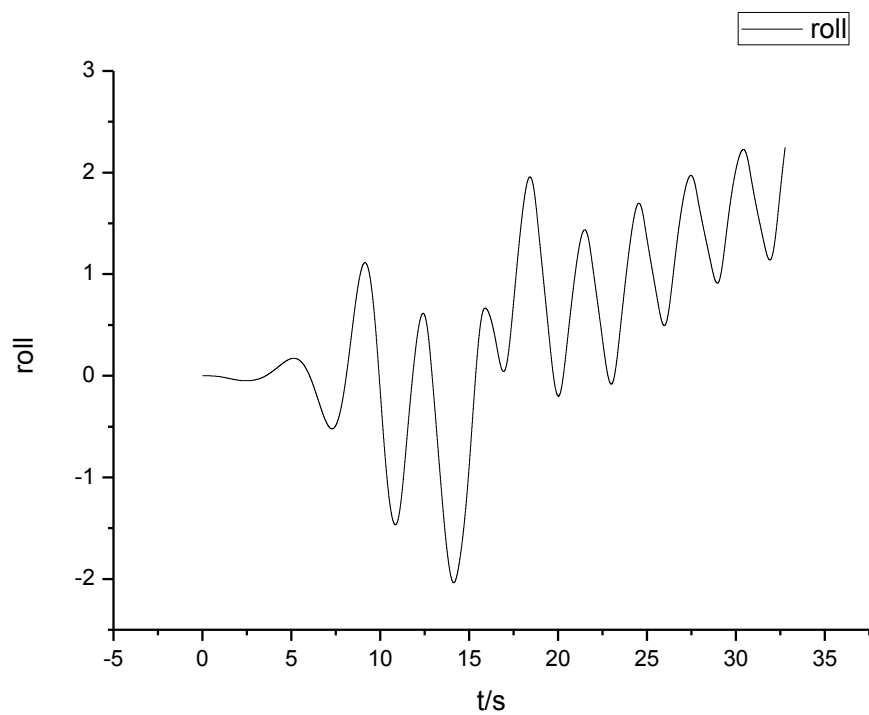
图 4-3-1-10、图 4-3-1-11 和图 4-3-1-12 分别为平台运动的纵向受力、垂向受力和所受力矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。其中，垂向受力以及力矩的振幅是不断变化的，原因是平台在运动过程中其姿态是不断变化的，导致其受力的幅度有所变化。从纵向受力的时历曲线可以看出，平台在纵向很好地按照周期性进行受力，这就说明平台的运动稳定性保持的很好，使得纵向受力十分稳定。平台所受垂向力以及力矩在峰值附近会伴随一个小的极值点，原因可能是在平台运动过程中，平台立柱上产生波浪爬高，使平台受力突变；同时，粘性的作用也可能导致平台受力的不稳定。

总之，平台受力是在可以接受的周期性变化范围内，这就表明平台运动的周期性不明显并不是数值模拟方法的错误，而是由如粘性、垂荡纵摇的耦合运动等原因引起的。

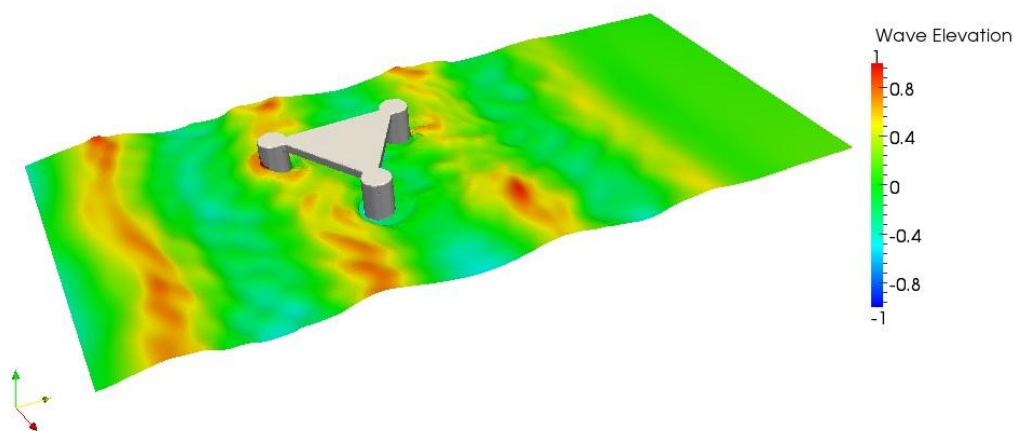
4.3.1.3 横摇垂荡运动



4-3-1-13 垂荡时历曲线

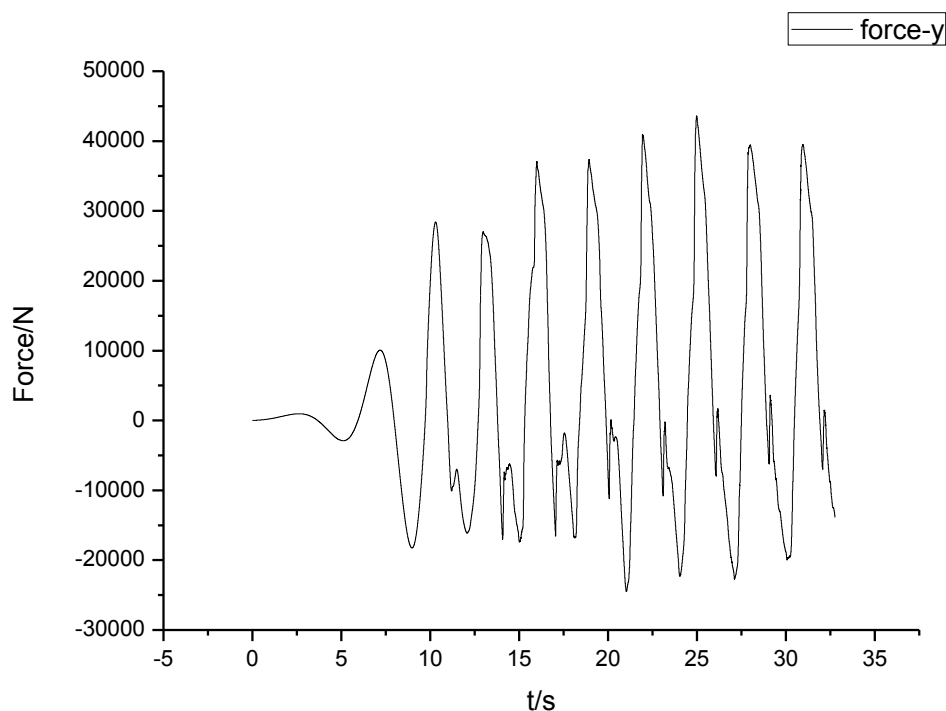


4-3-1-14 横摇时历曲线

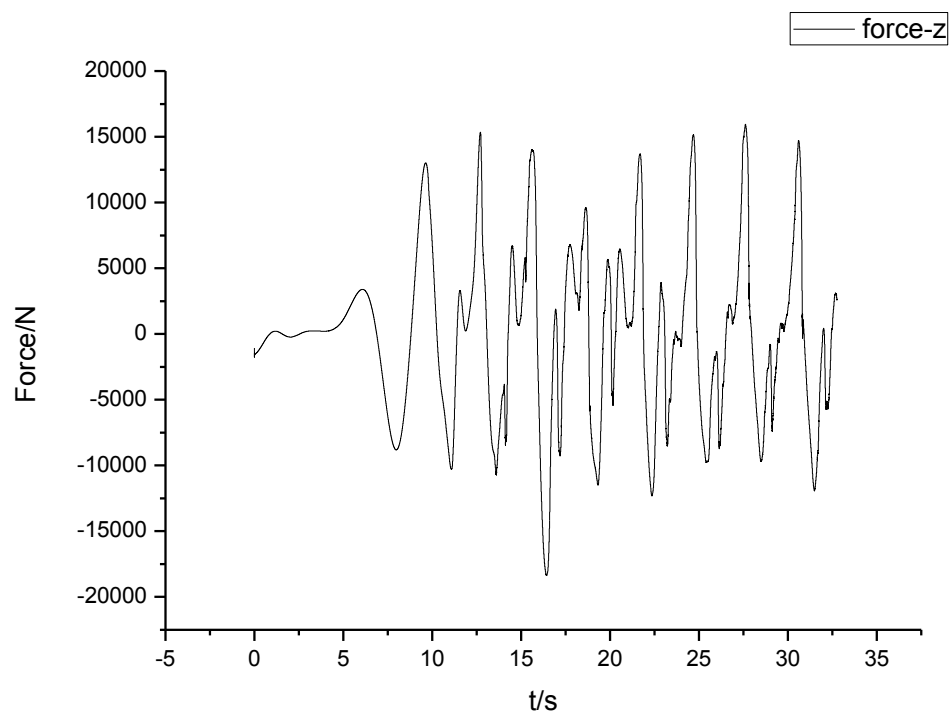


4-3-1-15 运动示意图

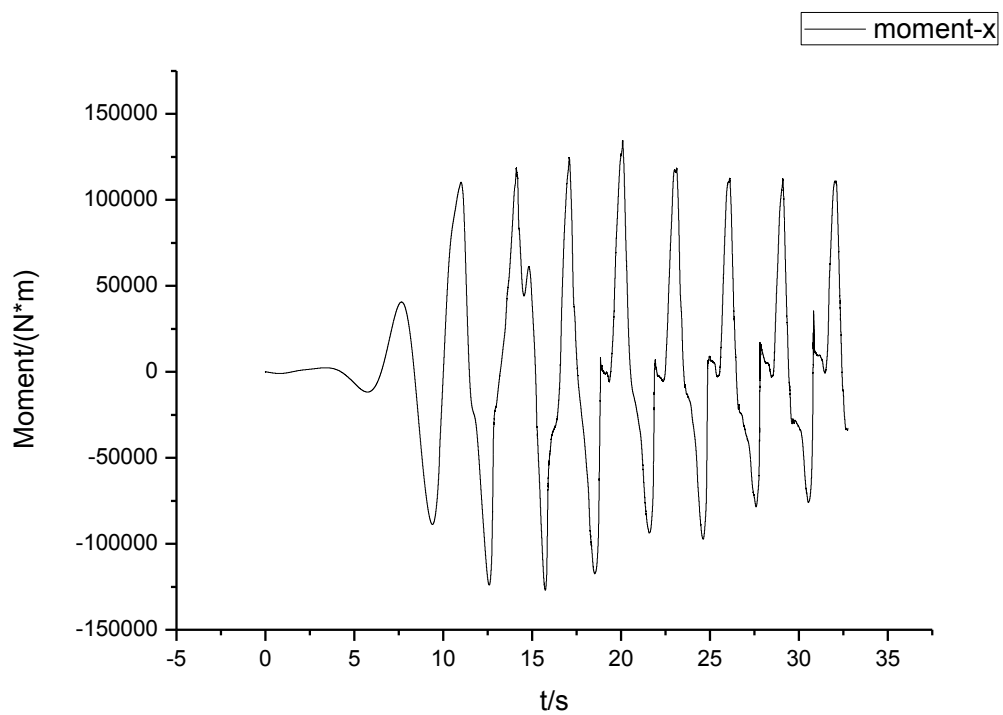
图 4-3-1-13 与图 4-3-1-14 分别为该算例下的垂荡与横摇时历曲线。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动。从垂荡时历曲线图上看，15s 后曲线趋于稳定，其平衡位置处在 0.2m 附近。从垂荡幅度来看，能够保持在 0.25m 以内，运动稳定性可以很好的满足要求。从横摇时历曲线来看呢，横摇运动在较为稳定，从横摇运动幅度来看，能够保持在 3° 以内，可以非常好的保证横摇运动的稳定性。图 4-3-1-15 为 35s 时刻平台在波浪中运动的示意图。



4-3-1-16 y 方向受力曲线



4-3-1-17 z 方向受力曲线



4-3-1-18 力矩曲线

图 4-3-1-16、图 4-3-1-17 和图 4-3-1-18 分别为平台运动的横向受力、垂向受力和所受力矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。然而，横向

受力、垂向受力以及力矩的振幅是不断变化的，原因是平台在运动过程中其姿态是不断变化的，导致其受力的幅度有所变化。平台所受横向力、垂向力以及力矩在极值点附近会伴随一个小的极值点，原因可能是在平台运动过程中，平台立柱上产生波浪爬高，使平台受力突变；同时，粘性的作用也可能导致平台受力的不稳定。

总之，平台受力是在可以接受的周期性变化范围内，这就表明平台运动的周期性不明显并不是数值模拟方法的错误，而是由如粘性、横摇垂荡的耦合运动等原因引起的。

4.3.2 三立柱式半潜式平台形式在 2m 波高下的数值模拟结果

4.3.2.1 单立柱迎浪的纵摇垂荡运动

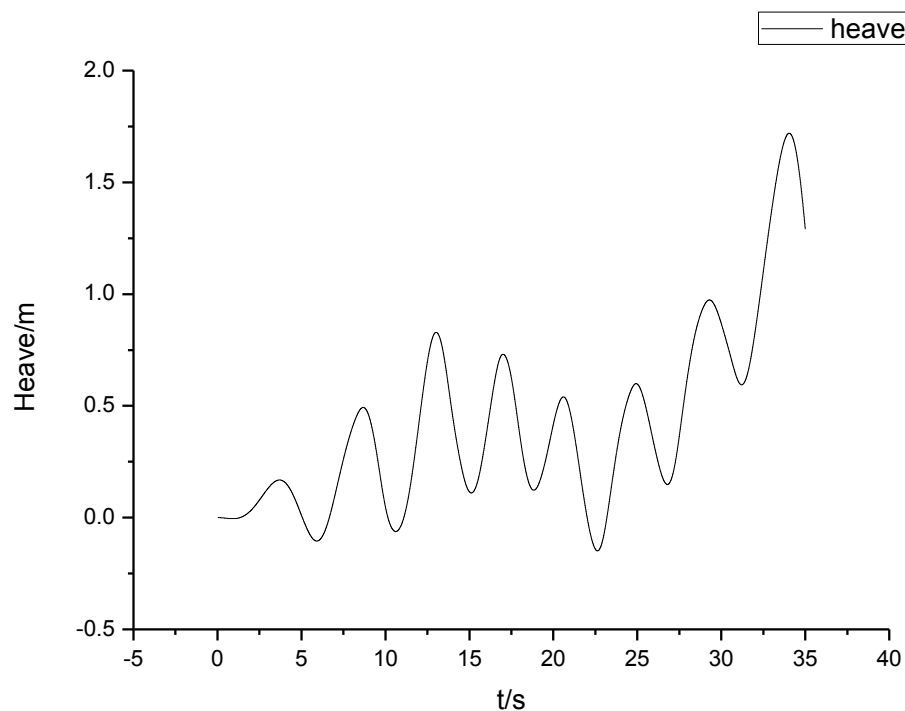


图 4-3-2-1 垂荡时历曲线

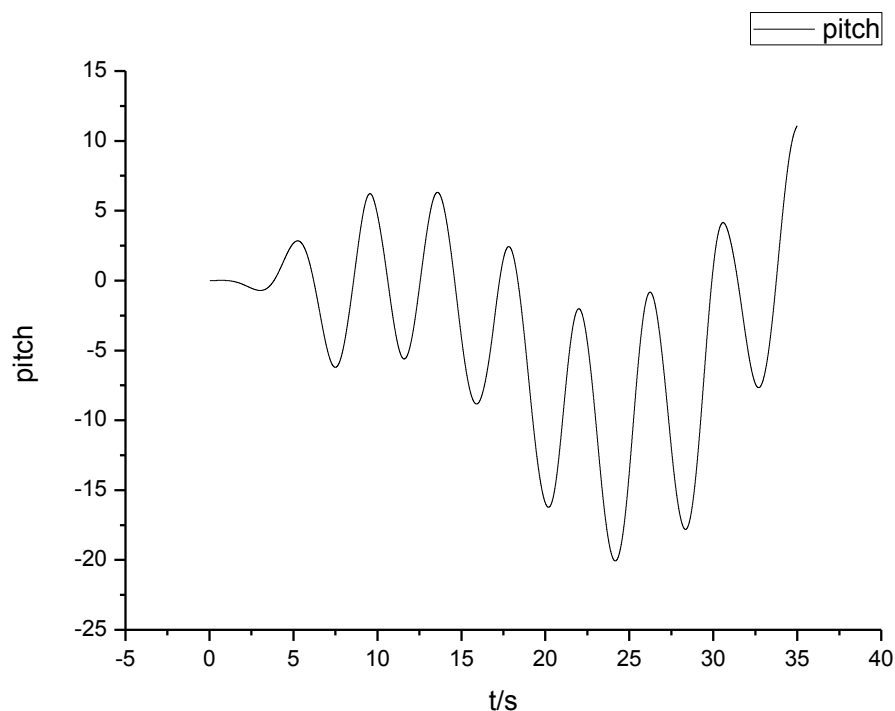


图 4-3-2-2 纵摇时历曲线

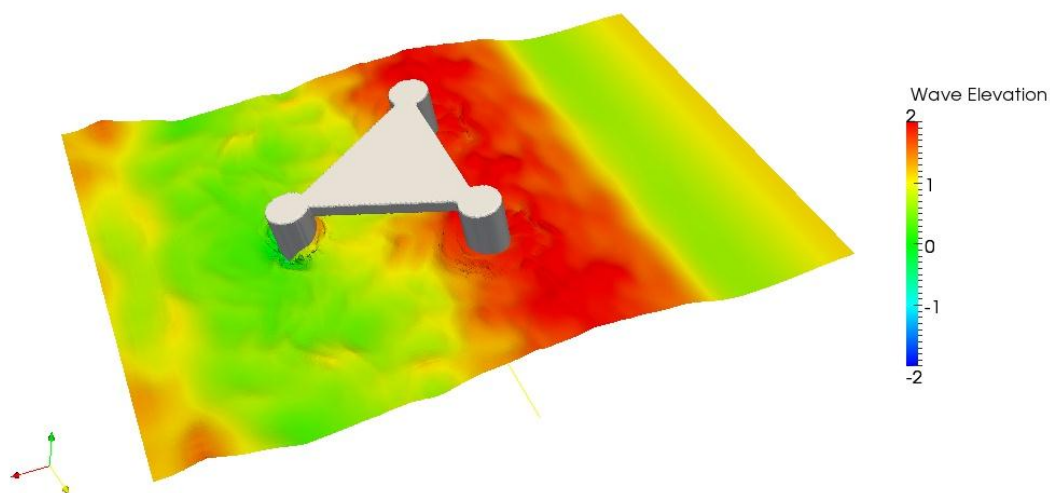


图 4-3-2-3 运动示意图

图4-3-2-1与图4-3-2-2分别为该算例下的垂荡与纵摇时历曲线。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动。从垂荡时历曲线图上看，曲线有一个明显的上升趋势，从垂荡的幅度来看，最高达到 1.7m，运动较为剧烈。这是由于波高与相对平台来讲较大，是平台垂荡运动剧烈。从纵摇时历曲线来看，纵摇运动在 0 点往复，然而纵摇幅度较大，这也是由于波高、波长对平台来说相对较大的原因。然而纵摇能够保持在 20°以内，可以保证一定的运动稳定性。图4-3-2-3为35s时刻平台在波浪中运动的示意图。

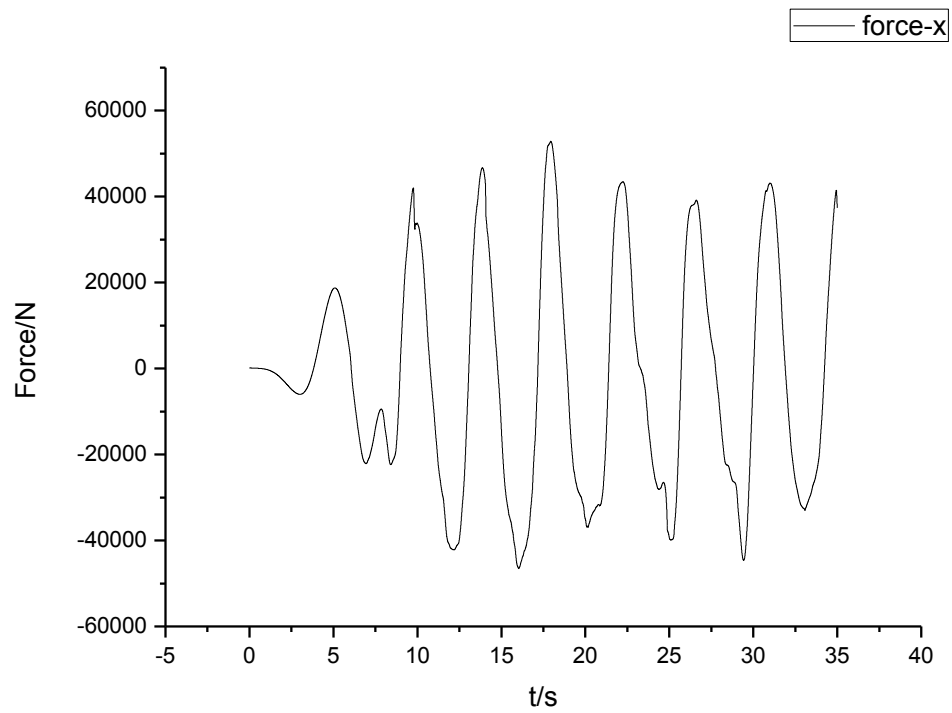


图 4-3-2-4 x 方向受力曲线

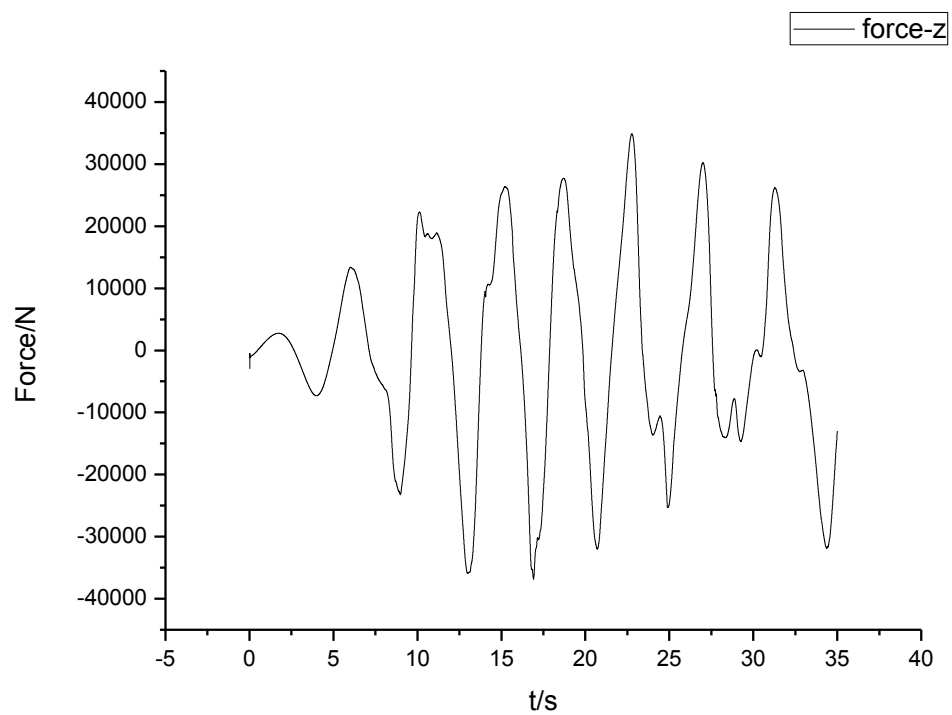


图 4-3-2-5 z 方向受力曲线

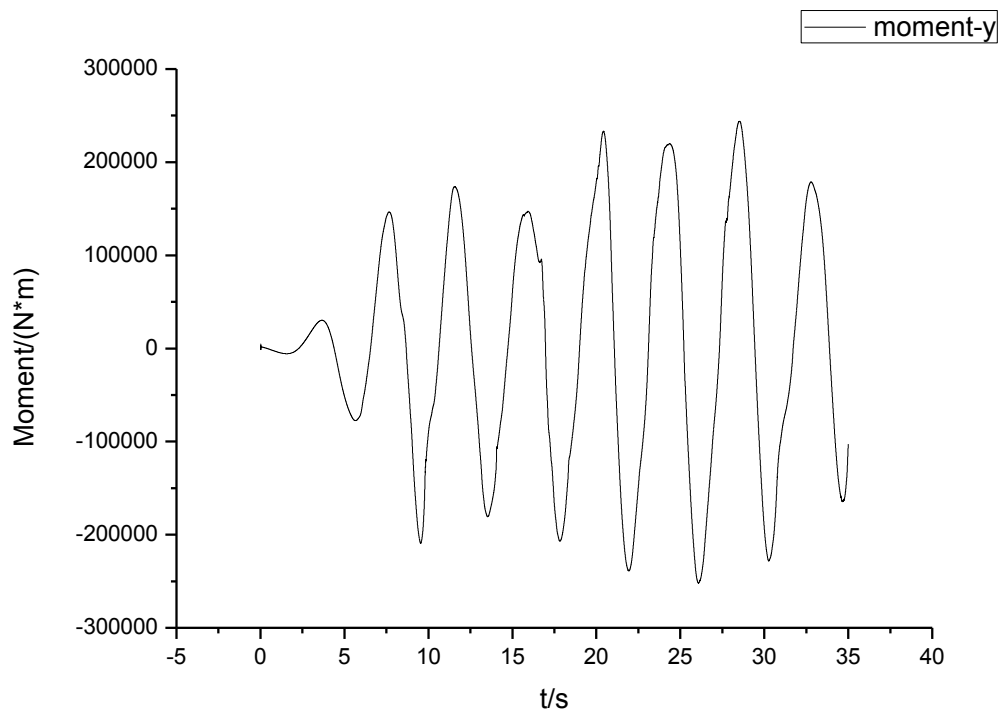


图 4-3-2-6 力矩曲线

图 4-3-2-4、图 4-3-2-5 和图 4-3-2-6 分别为平台运动的纵向受力、垂向受力和所受力矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。然而，纵向、垂向受力以及力矩的振幅是不断变化的，原因是平台在运动过程中其姿态是不断变化的，导致其受力的幅度有所变化。平台所受垂向力在峰值附近会伴随一个小的极值点，原因可能是在平台运动过程中，平台立柱上产生波浪爬高，使平台受力突变；同时，粘性的作用也可能导致平台受力的不稳定。而平台所受力矩较为平滑，说明平台的纵摇运动能够保证一定的稳定性。

总之，平台受力是在可以接受的周期性变化范围内，这就表明平台运动的周期性不明显并不是数值模拟方法的错误，而是由如粘性、垂荡纵摇的耦合运动等原因引起的。

4.3.2.2 双立柱迎浪的纵摇垂荡运动

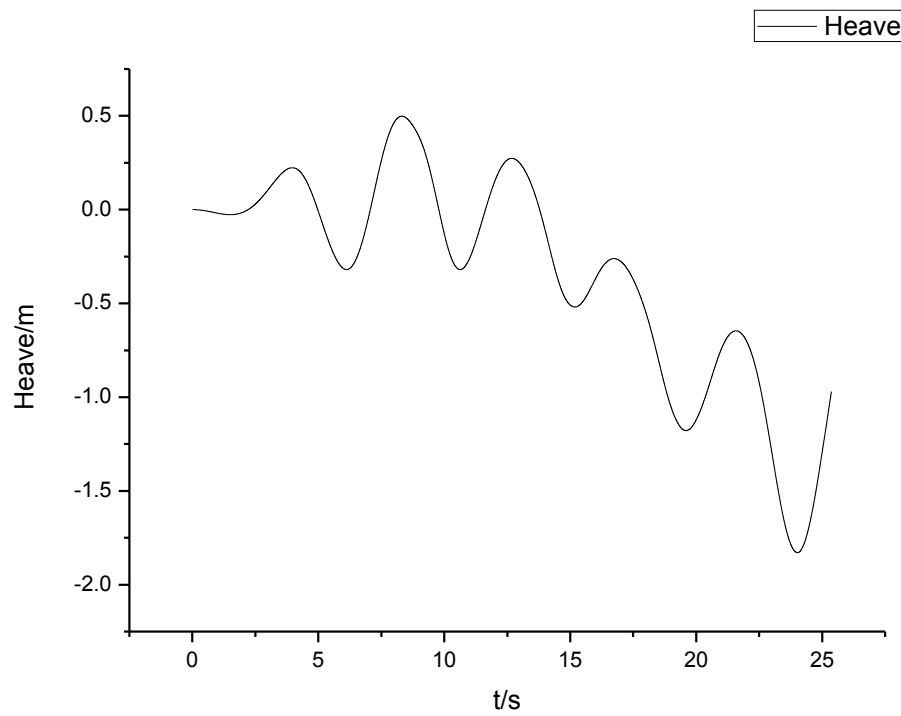


图 4-3-2-7 垂荡时历曲线

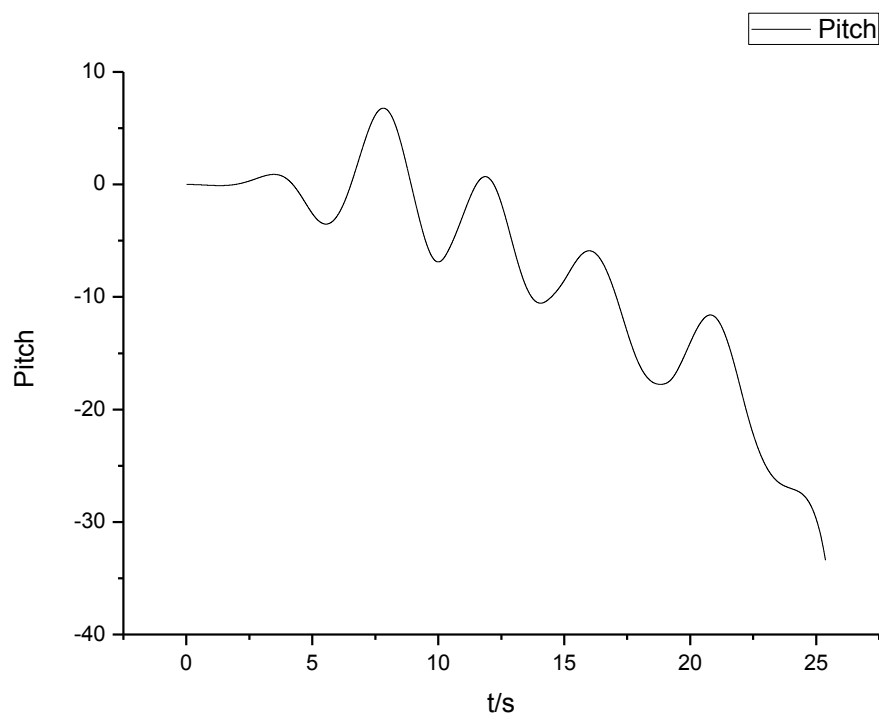


图 4-3-2-8 纵摇时历曲线

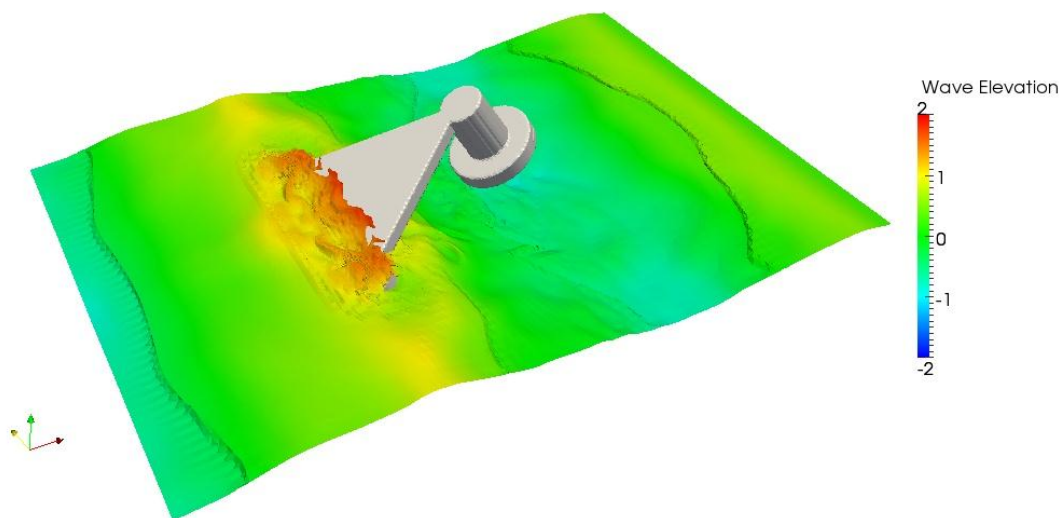


图 4-3-2-9 运动示意图

图【1】与图【2】分别为该算例下的垂荡与纵摇时历曲线。图【3】为平台最后倾覆的示意图。本算例平台最终倾覆。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动。垂荡基本稳定，且保持在 1.5m 内。然而，纵摇有着明显的下降趋势，并且在 22s 后，平台并没有回复的趋势而是倾覆。这与单立柱迎浪的状态有着显著的差异，说明该种三立柱式半潜式平台形式需要考虑到平台对于浪向的选择。显然，单立柱迎浪是明显优于双立柱迎浪的。

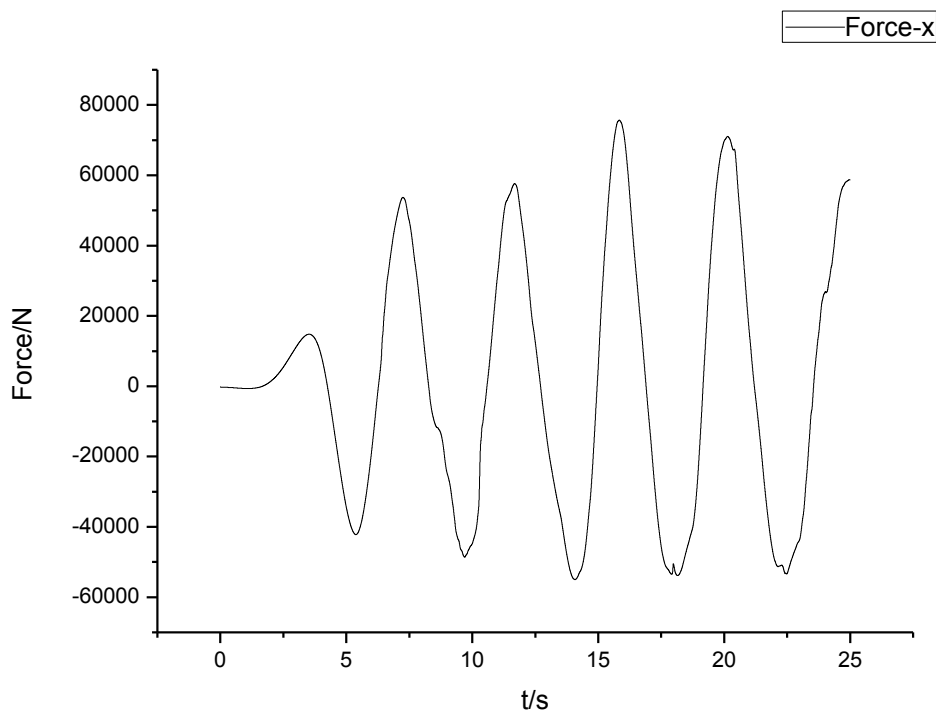


图 4-3-2-10 x 方向受力曲线

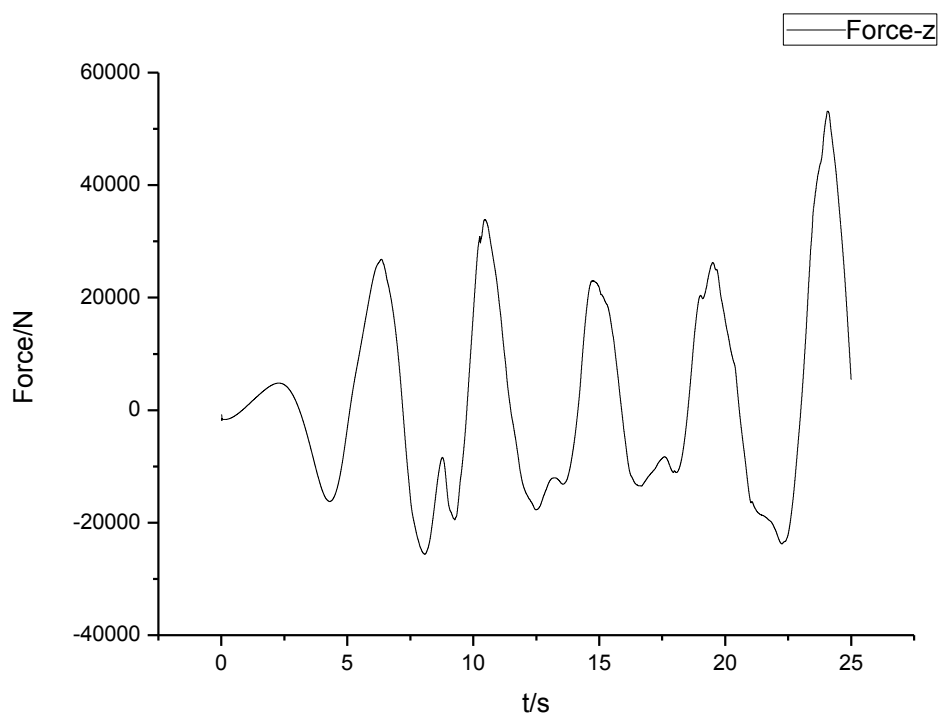


图 4-3-2-11 z 方向受力曲线

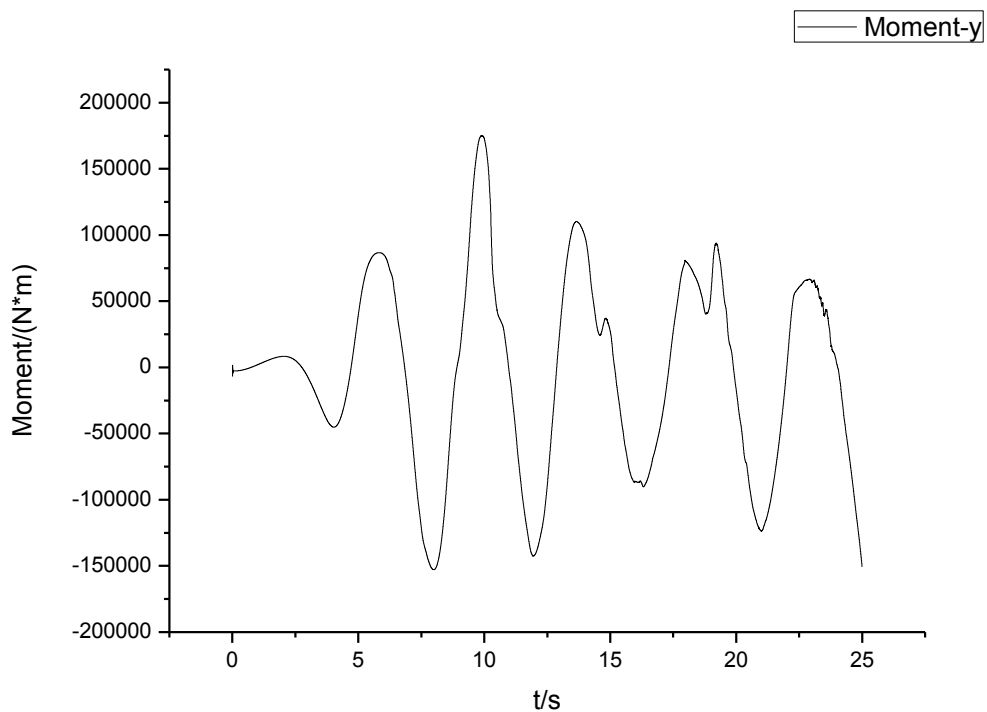


图 4-3-2-12 力矩曲线

图 4-3-2-10、图 4-3-2-11 和图 4-3-2-12 分别为平台运动的纵向受力、垂向受力和所受力

矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到,平台的受力是按照周期性变化的。然而,纵向、垂向受力以及力矩的振幅是不断变化的,原因是平台在运动过程中其姿态是不断变化的,导致其受力的幅度有所变化。平台所受垂向力在峰值附近会伴随一个小的极值点,原因可能是在平台运动过程中,平台立柱上产生波浪爬高,使平台受力突变;同时,粘性的作用也可能导致平台受力的不稳定。在平台 25s 时刻倾覆之前,垂向力与力矩的变化较大,说明由于平台的剧烈运动,导致受力的不稳定,使回复力矩不足,导致平台倾覆。此外,平台固有频率与波浪频率接近,也可能是平台倾覆的原因。然而,由于没有进行进一步的频域分析,由于频率的因素还不能确定。

4.3.2.3 横摇垂荡运动

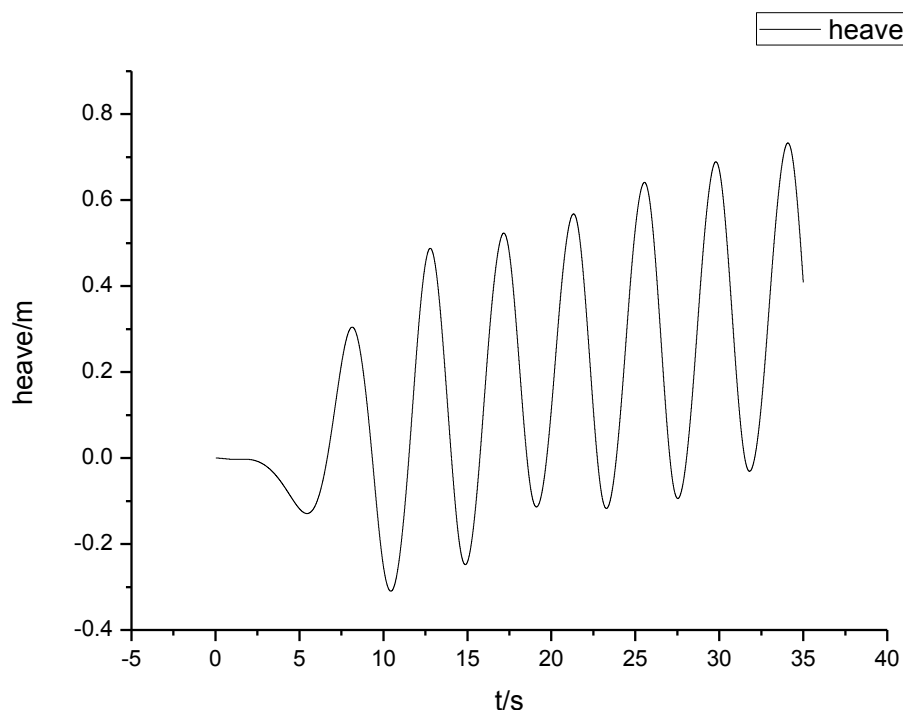


图 4-3-2-13 垂荡时历曲线

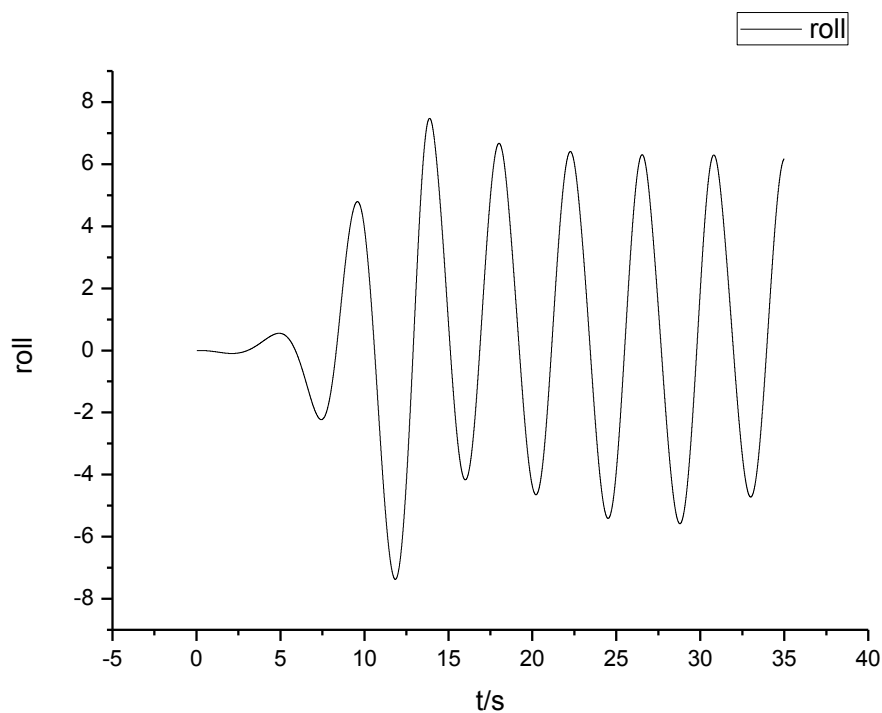


图 4-3-2-14 横摇时历曲线

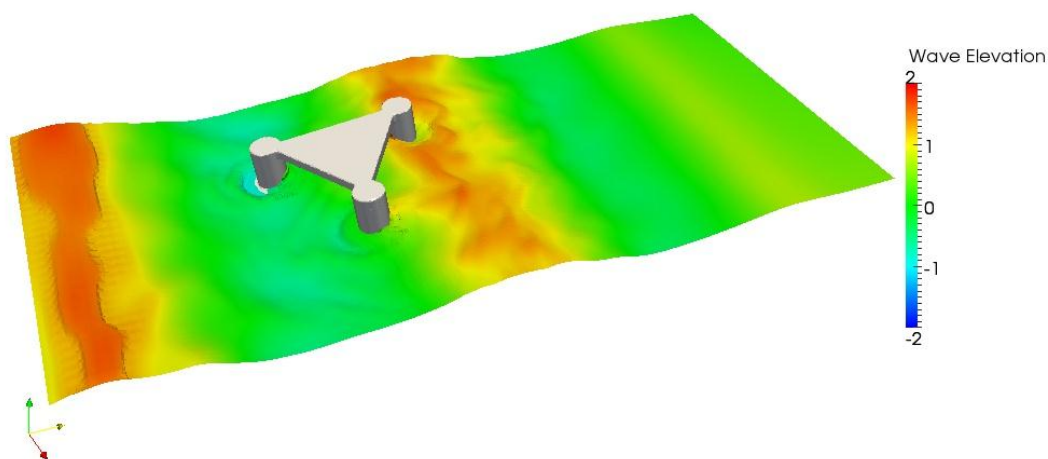


图 4-3-2-15 运动示意图

图 4-3-2-13 与图 4-3-2-14 分别为该算例下的垂荡与横摇时历曲线。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动，并且非常稳定。从垂荡时历曲线图上看，曲线有略微上升的趋势，然而从垂荡幅度来看，能够保持在 0.8m 以内，运动稳定性可以很好的满足要求。从横摇时历曲线来看，横摇运动十分稳定，从横摇运动幅度来看，能够保持在 8° 以内，可以非常好的保证横摇运动的稳定性。图 4-3-2-15 为 35s 时刻平台在波浪中运动的示意图。

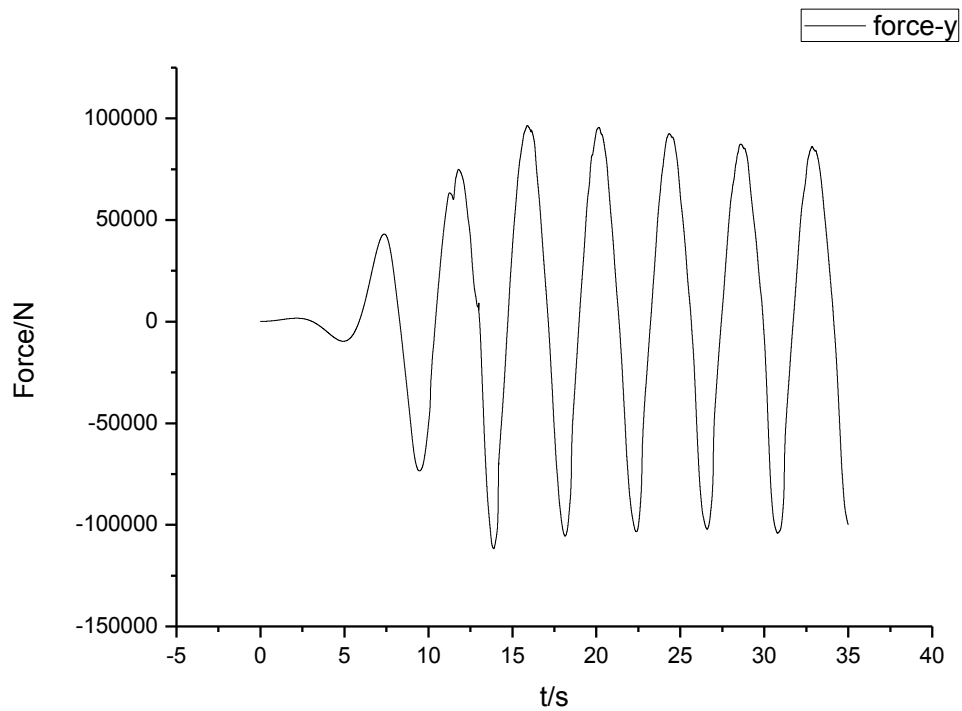


图 4-3-2-16 y 方向受力曲线

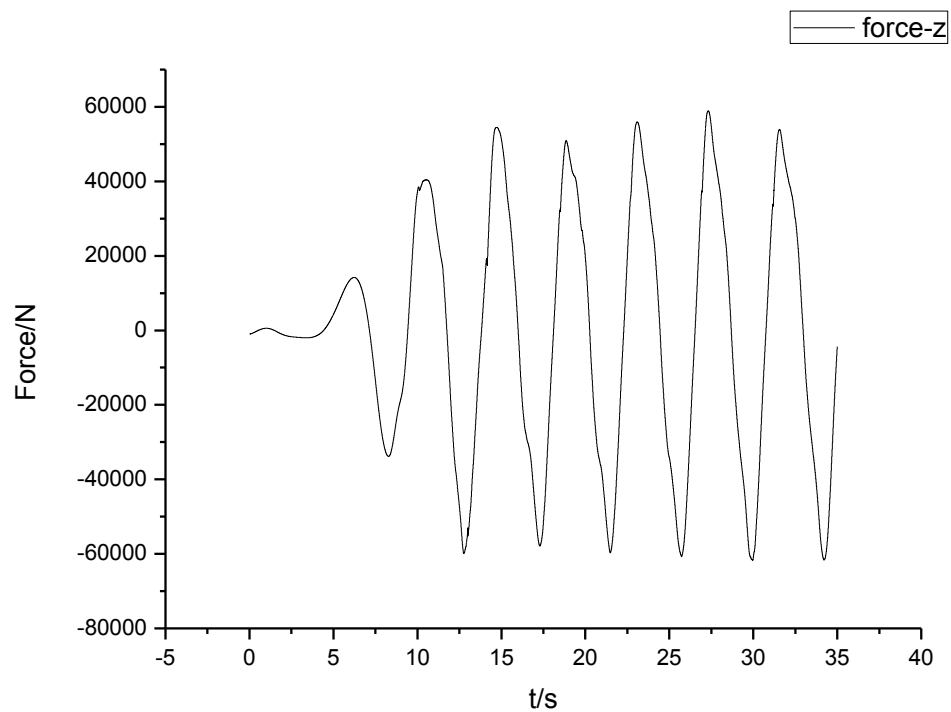


图 4-3-2-17 z 方向受力曲线

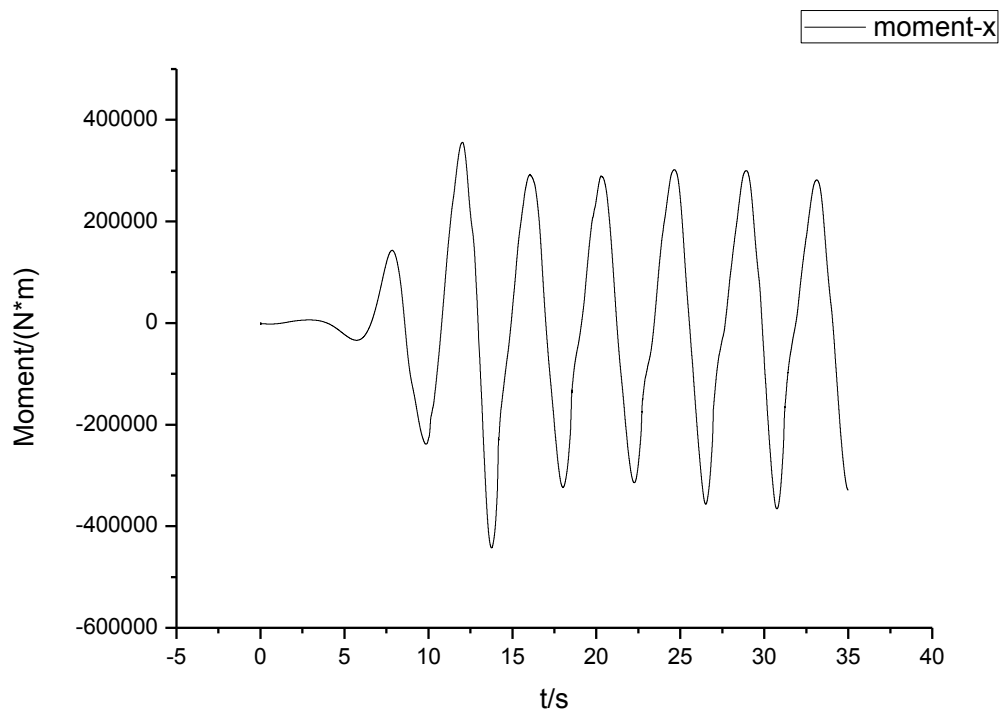


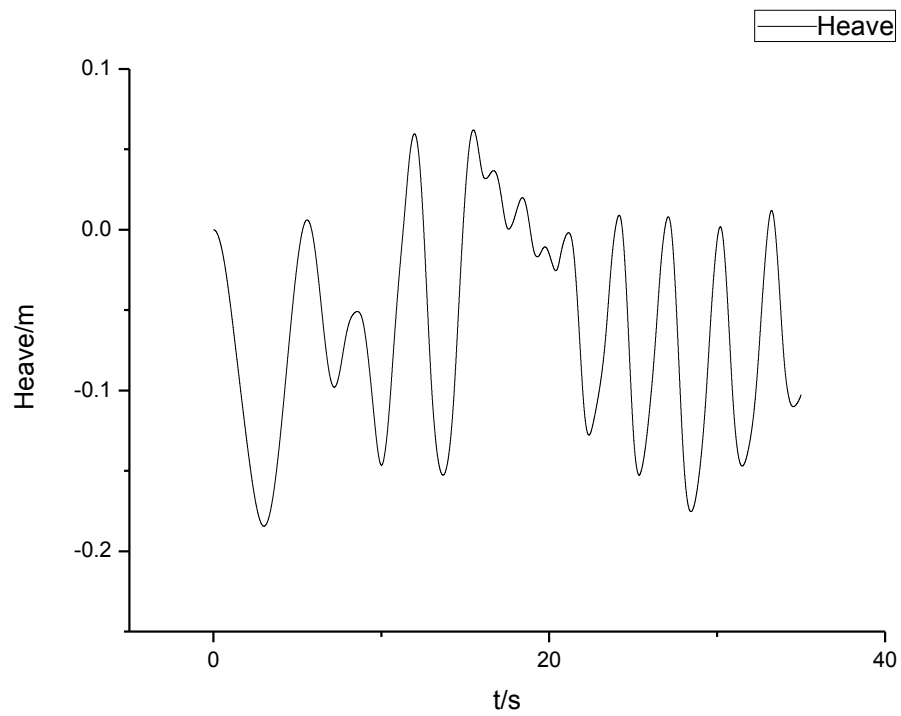
图 4-3-2-18 力矩曲线

图 4-3-2-16、图 4-3-2-17 和图 4-3-2-18 分别为平台运动的横向受力、垂向受力和所受力矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。并且受力十分稳定，呈现出很好的周期性质。这是与平台较小的运动相关的。平台运动幅度小，使受力稳定，进而稳定的受力保证了运动的稳定性。

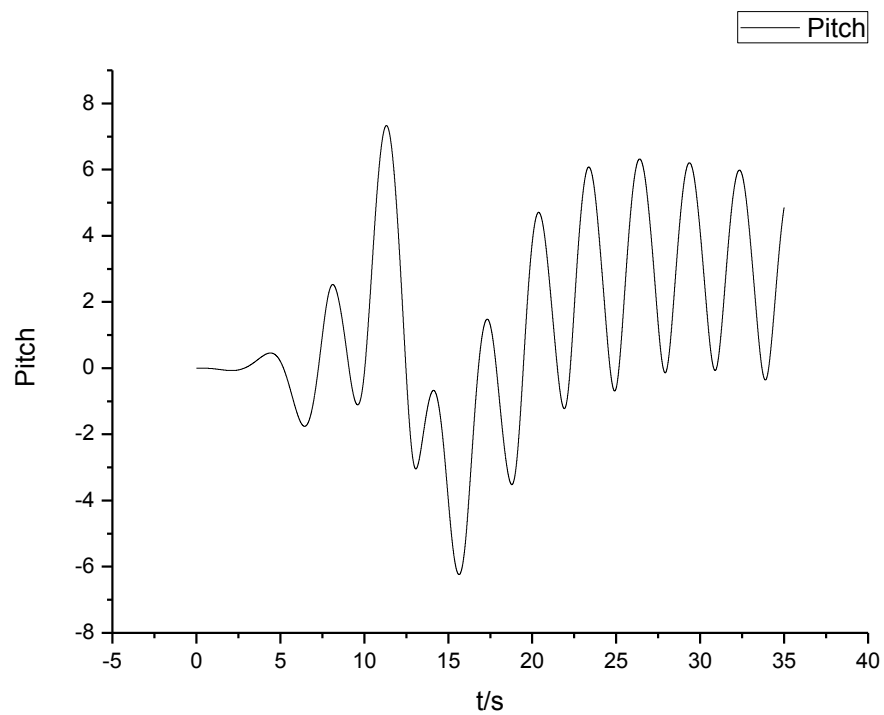
4. 4 四立柱式半潜式平台形式数值模拟结果

4. 4. 1 四立柱式半潜式平台形式在 1m 波高下的数值模拟结果

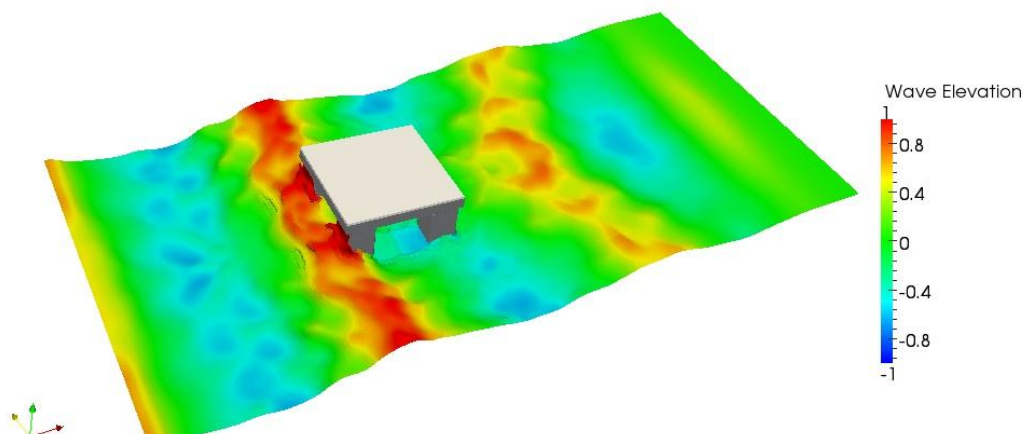
4. 4. 1. 1 纵摇垂荡运动



4-4-1-1 垂荡时历曲线



4-4-1-2 纵摇时历曲线



4-4-1-3 运动示意图

图4-4-1-1与图4-4-1-2分别为该算例下的垂荡与纵摇时历曲线。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动，而运动在22s后处于稳定状态。从垂荡时历曲线图上看，垂荡在22s前处于不稳定状态，22s后趋于稳定，在-0.05m左右做周期性运动。而从垂荡幅度来看，纵摇幅度在0.2m之内，可以说保持了很好的运动稳定性。从纵摇时历曲线来看，纵摇同样在22s前处于不稳定状态，在22s后趋于稳定。纵摇幅度在8°以内，可以说保持了很好的运动稳定性。图4-4-1-3为35s时刻平台在波浪中运动的示意图。

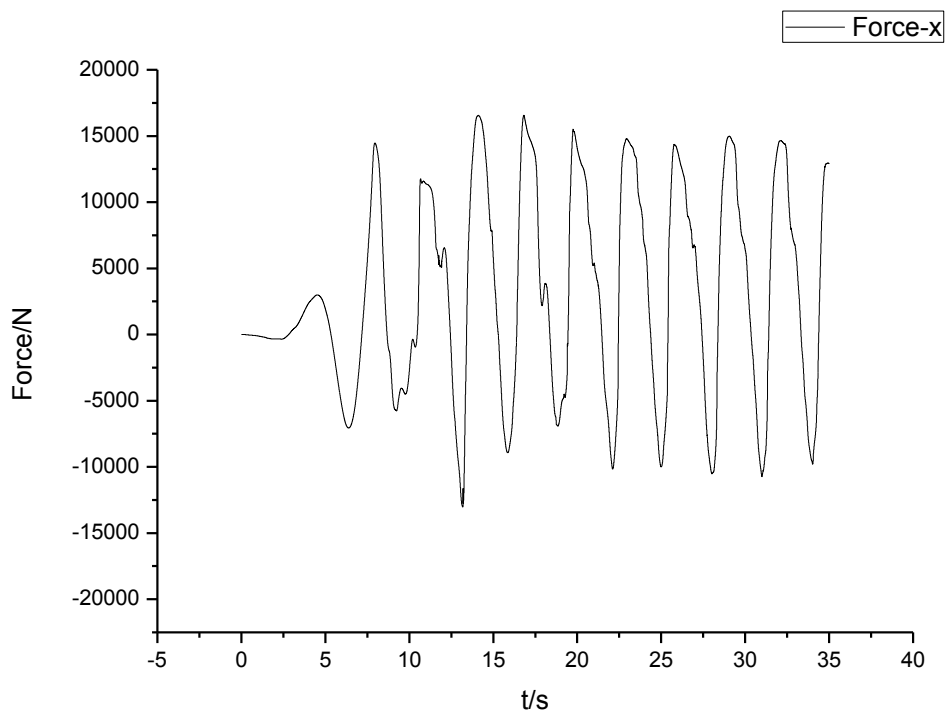


图 4-4-1-4 x 方向受力曲线

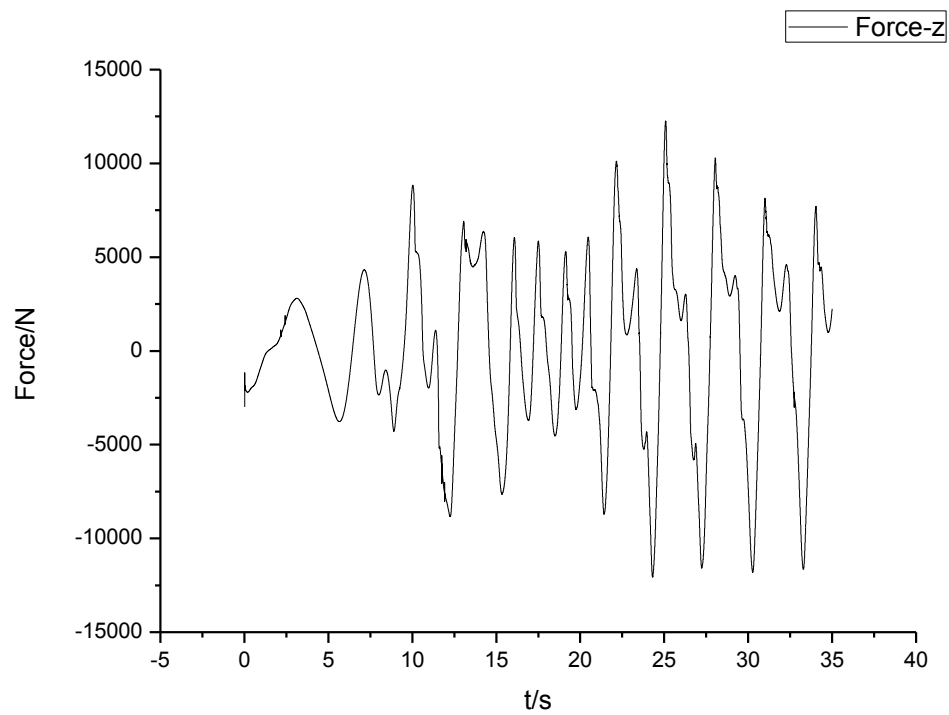


图 4-4-1-5 z 方向受力曲线

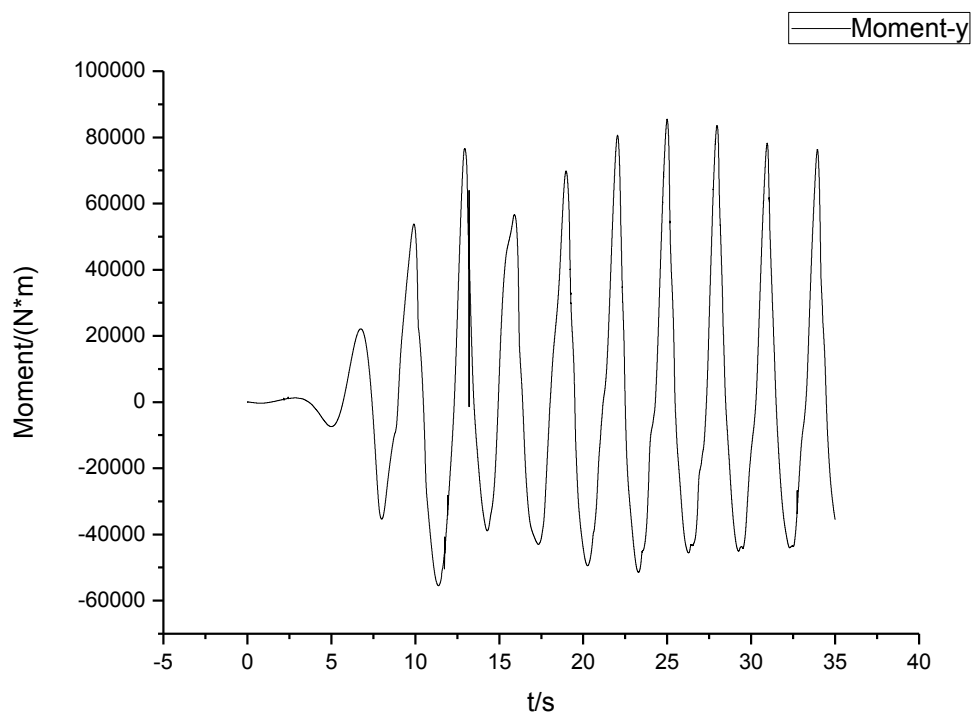


图 4-4-1-6 力矩曲线

图 4-4-1-4、图 4-4-1-5 和图 4-4-1-6 分别为平台运动的纵向受力、垂向受力和所受力矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。然而，纵向、垂向受力以及力矩的振幅是不断变化的，原因是平台在运动过程中其姿态是不断变化的，导致其受力的幅度有所变化。平台所受垂向力以及力矩在峰值附近会伴随一个小的极值点，原因可能是在平台运动过程中，平台立柱上产生波浪爬高，使平台受力突变；同时，粘性的作用也可能导致平台受力的不稳定。

总之，平台受力是在可以接受的周期性变化范围内，这就表明平台运动的周期性不明显并不是数值模拟方法的错误，而是由如粘性、垂荡纵摇的耦合运动等原因引起的。

4. 4. 1. 2 横摇垂荡运动

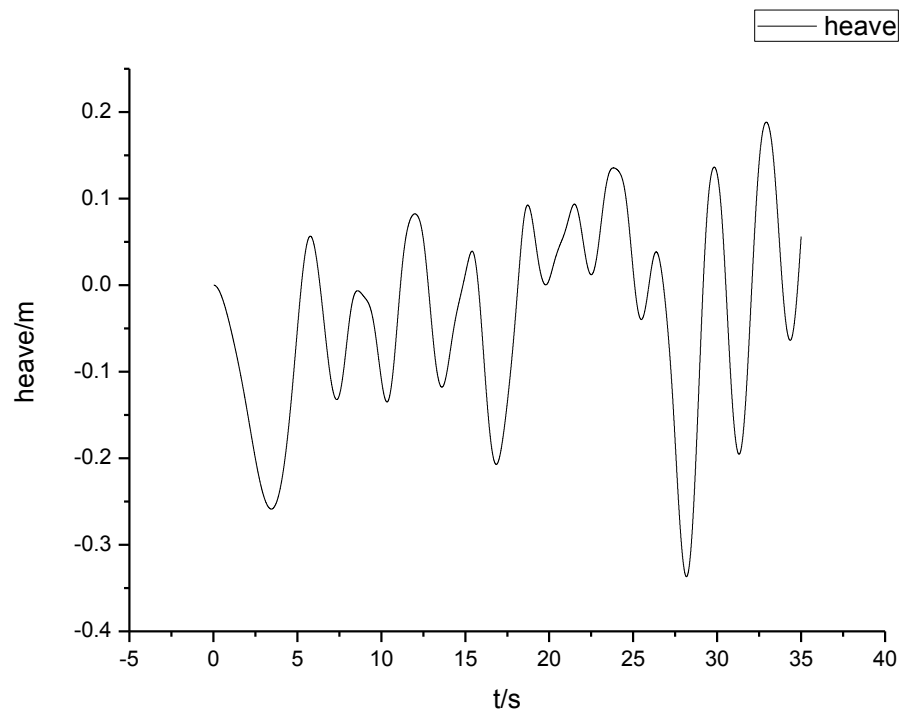


图 4-4-1-7 垂荡时历曲线

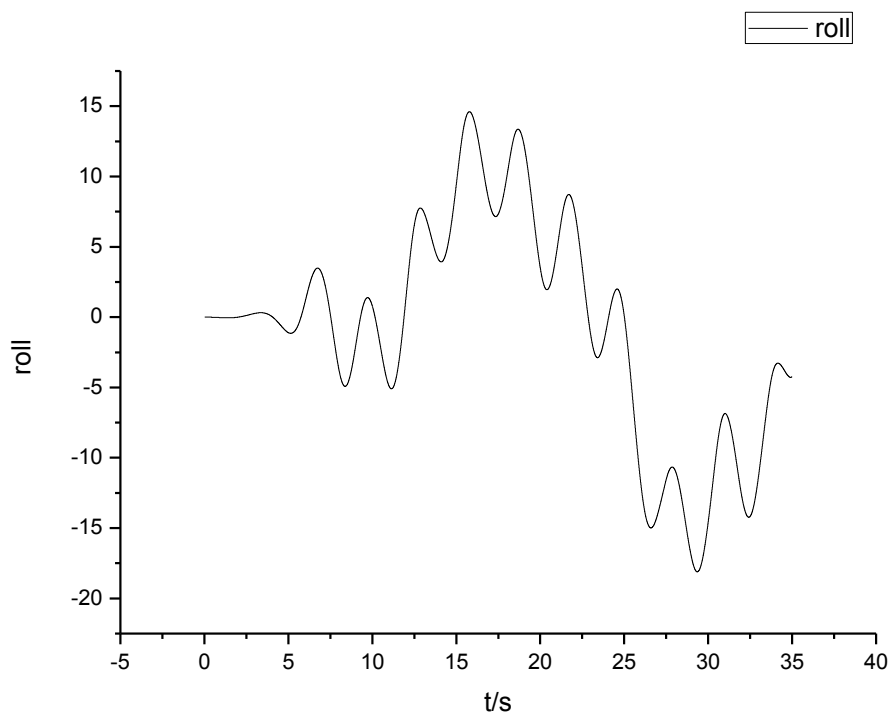


图 4-4-1-8 横摇受力曲线

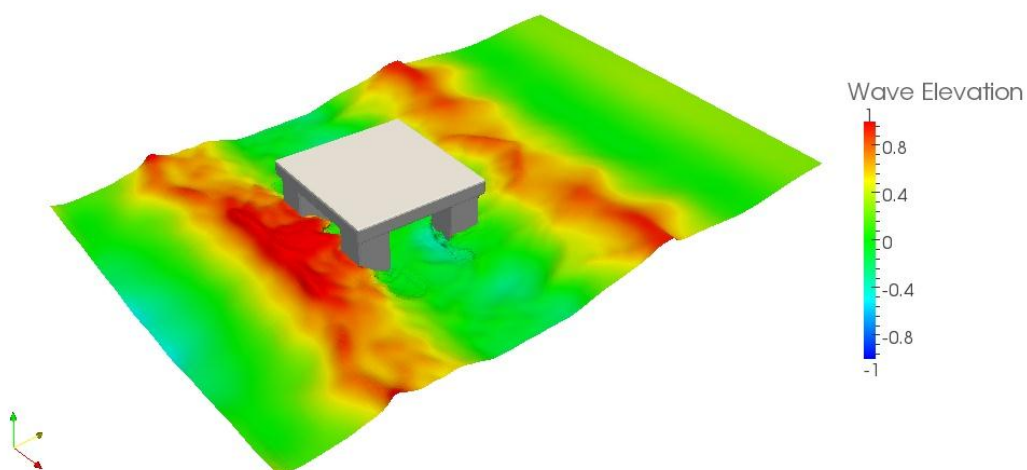


图 4-4-1-9 运动示意图

图【1】与图【2】分别为该算例下的垂荡与横摇时历曲线。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动。从垂荡幅度来看，能够保持在 0.35m 以内，运动稳定性较可以满足要求。从横摇时历曲线来看呢，横摇运动在较为不稳定，从横摇运动幅度来看，横摇幅度最大可以达到 20°左右，运动稳定性并不是特别良好。图【3】为 35s 时刻平台在波浪中运动的示意图。

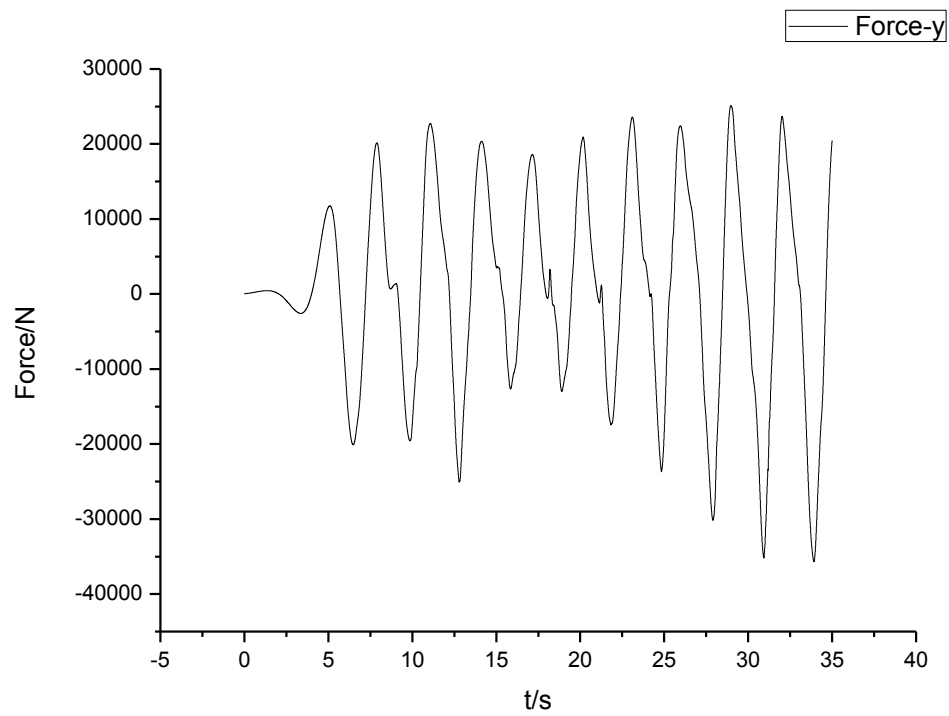


图 4-4-1-10 y 方向受力曲线

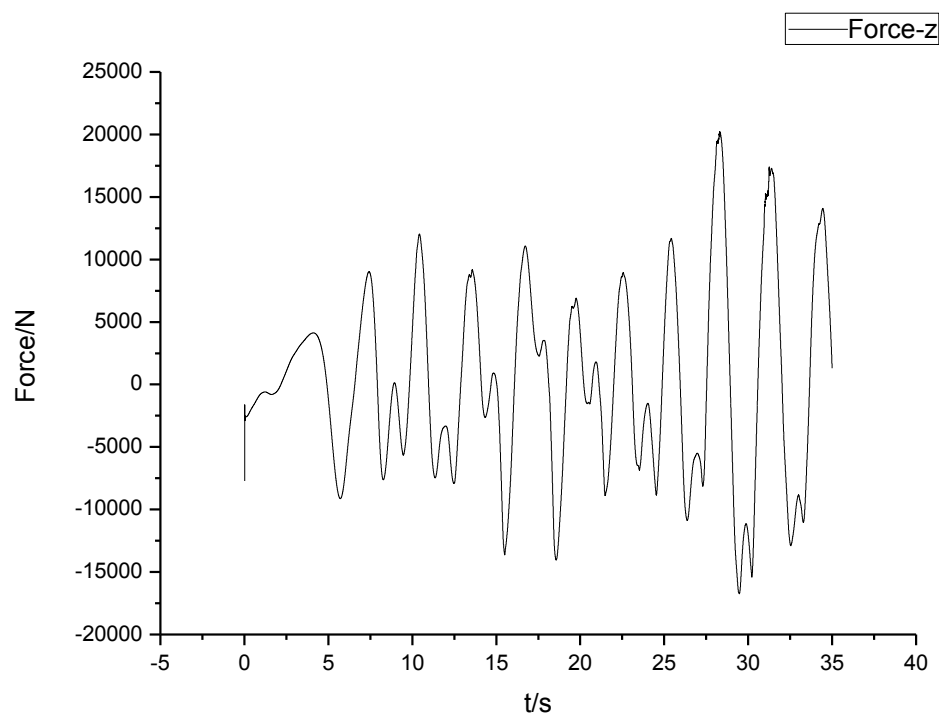


图 4-4-1-11 z 方向受力曲线

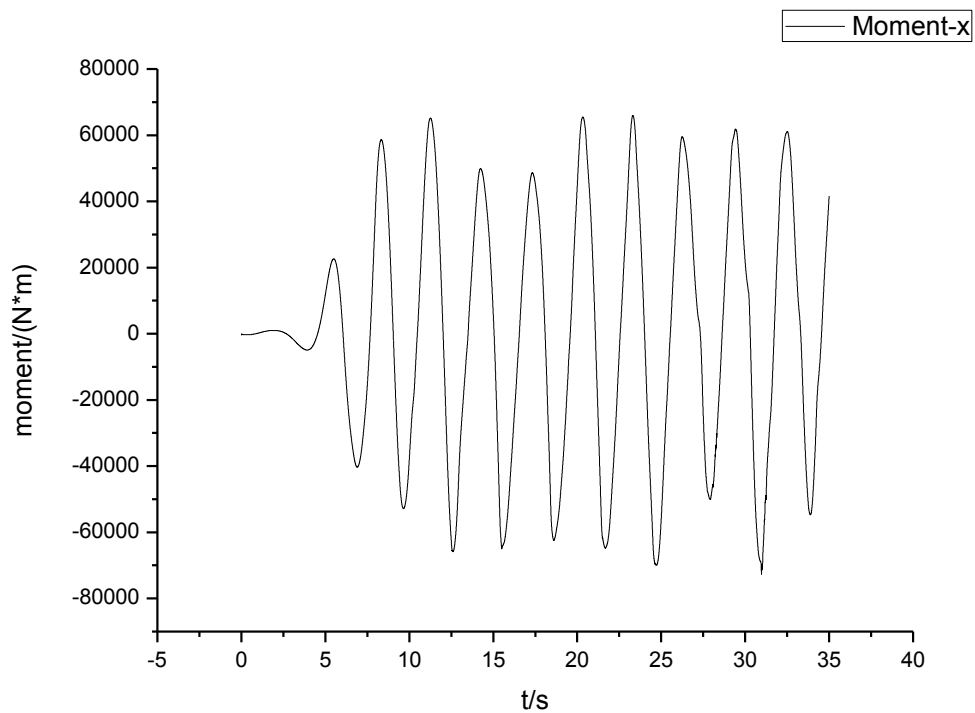


图 4-4-1-12 力矩曲线

图 4-4-1-10、图 4-4-1-11 和图 4-4-1-12 分别为平台运动的横向受力、垂向受力和所受力矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。然而，横向受力、垂向受力以及力矩的振幅是不断变化的，原因是平台在运动过程中其姿态是不断变化的，导致其受力的幅度有所变化。平台所受垂向力在极值点附近会伴随一个小的极值点，原因可能是在平台运动过程中，平台立柱上产生波浪爬高，使平台受力突变；同时，粘性的作用也可能导致平台受力的不稳定。

总之，平台受力是在可以接受的周期性变化范围内，这就表明平台运动的周期性不明显并不是数值模拟方法的错误，而是由如粘性、横摇垂荡的耦合运动等原因引起的。

4.4.2 四立柱式半潜式平台形式在 2m 波高下的数值模拟结果

4.4.2.1 纵摇垂荡运动

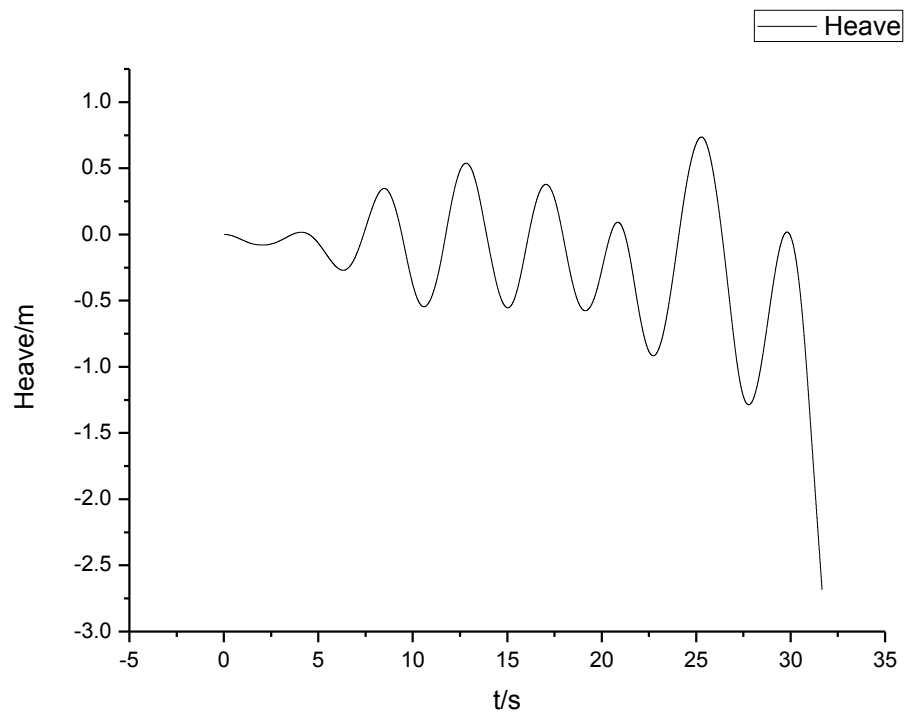


图 4-4-2-1 垂荡时历曲线

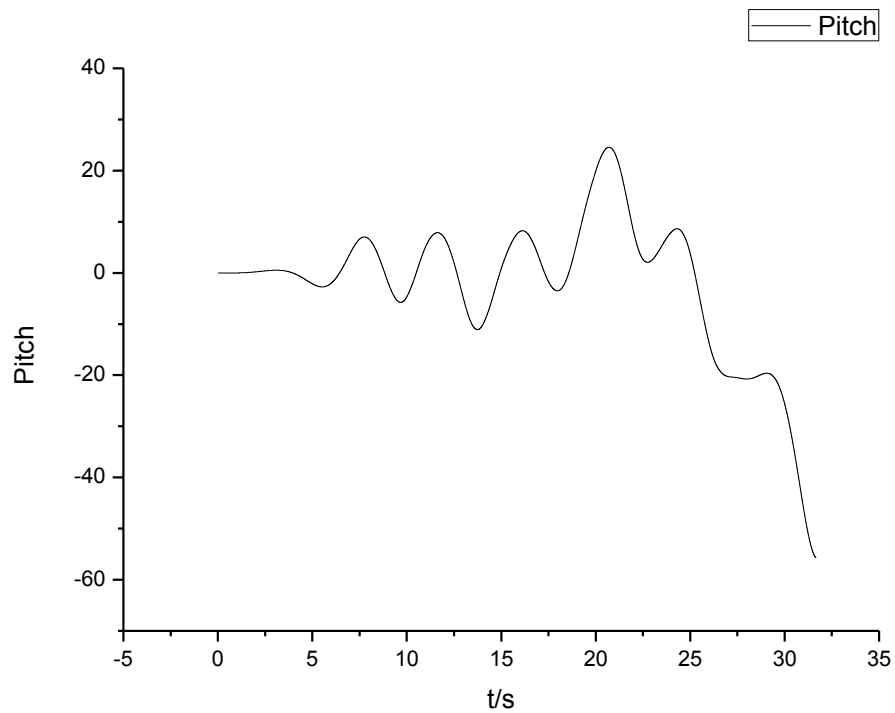


图 4-4-2-2 纵摇时历曲线

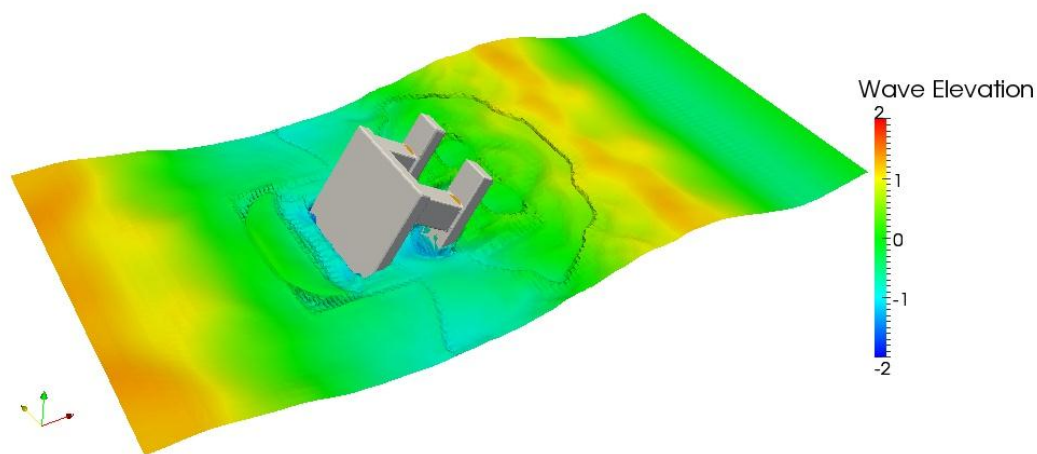


图 4-4-2-3 力矩曲线

图【1】与图【2】分别为该算例下的垂荡与纵摇时历曲线。图【3】为平台最后倾覆的示意图。本算例平台最终倾覆。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动。垂荡与纵摇在 22s 之前相对稳定。然而 22s 后，垂荡与纵摇有着明显的下降趋势，并且在 32s 左右突变，平台并没有回复的趋势而是倾覆。说明平台稳定性不能满足要求。

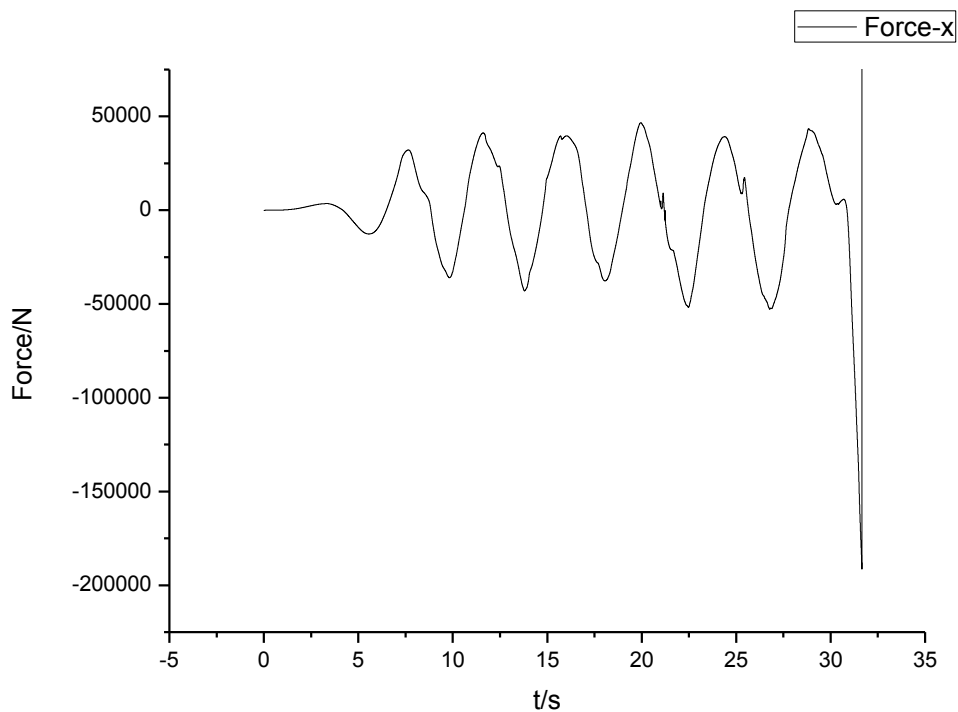


图 4-4-2-4 x 方向受力曲线

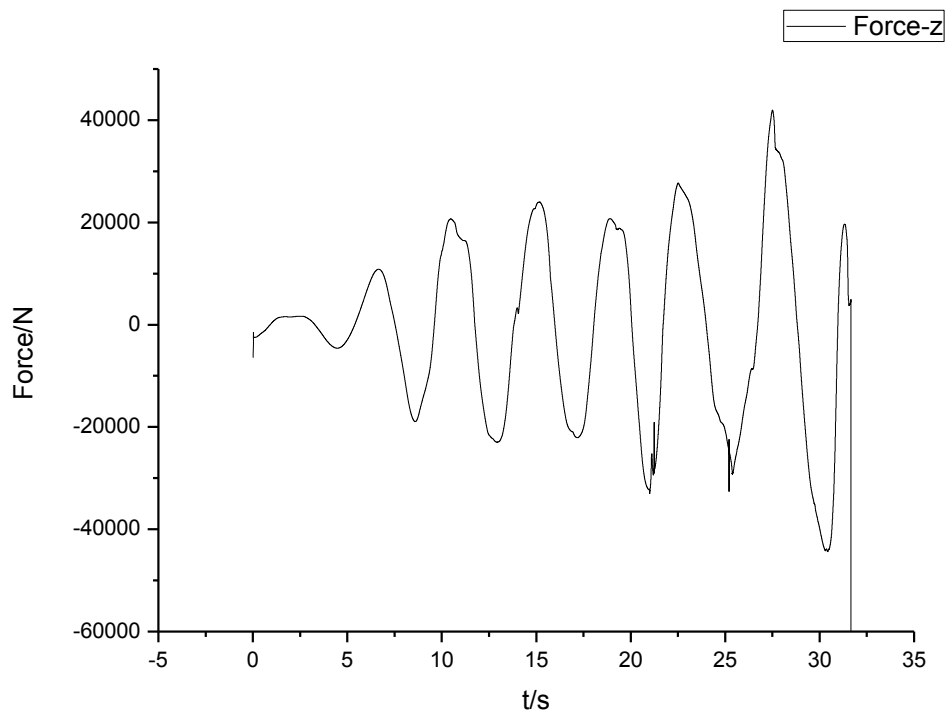


图 4-4-2-5 z 方向受力曲线

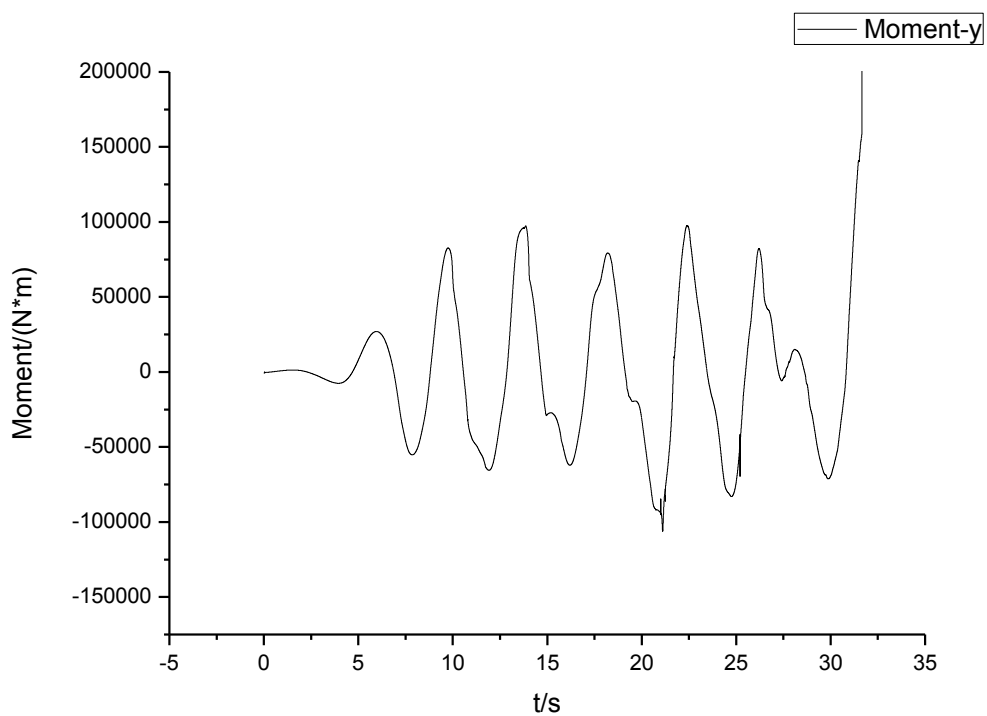


图 4-4-2-6 力矩曲线

图 4-4-2-4、图 4-4-2-5 和图 4-4-2-6 分别为平台运动的纵向受力、垂向受力和所受力矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。然而，在平台

倾覆前，纵向、垂向受力以及力矩的振幅是不断变化的，原因是平台在运动过程中其姿态是不断变化的，导致其受力的幅度有所变化。平台所受垂向力在峰值附近会伴随一个小的极值点，原因可能是在平台运动过程中，平台立柱上产生波浪爬高，使平台受力突变；同时，粘性的作用也可能导致平台受力的不稳定。在平台 32s 时刻倾覆之前，纵向力、垂向力与力矩的变化极大，产生非常的突变，说明由于平台的剧烈运动，其姿态趋于倾覆，受力已经不能满足回复条件，导致平台最终倾覆。

4.4.2.2 横摇垂荡运动

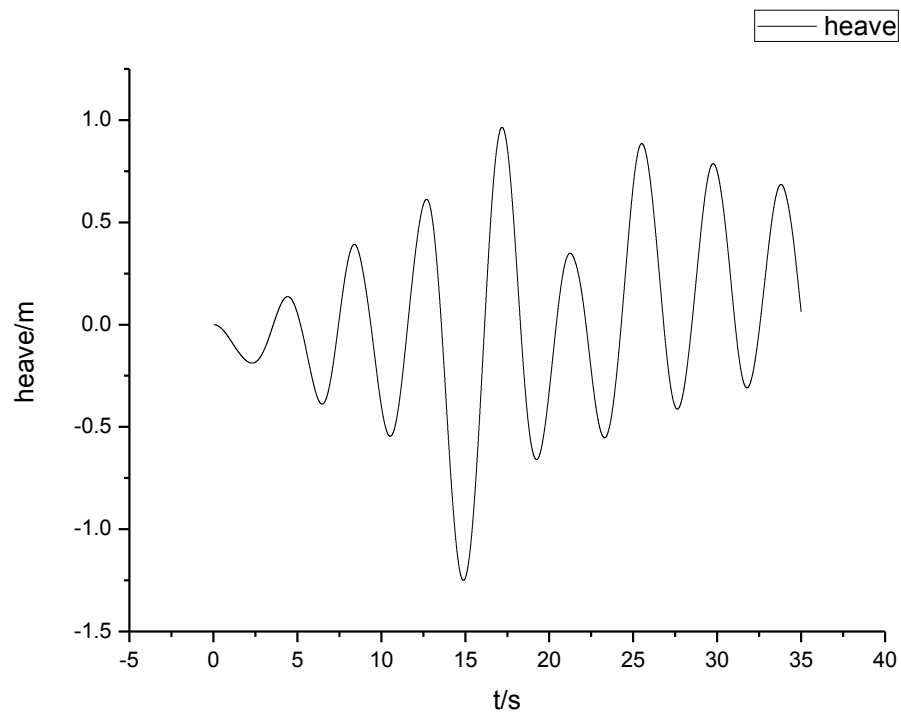


图 4-4-2-7 垂荡时历曲线

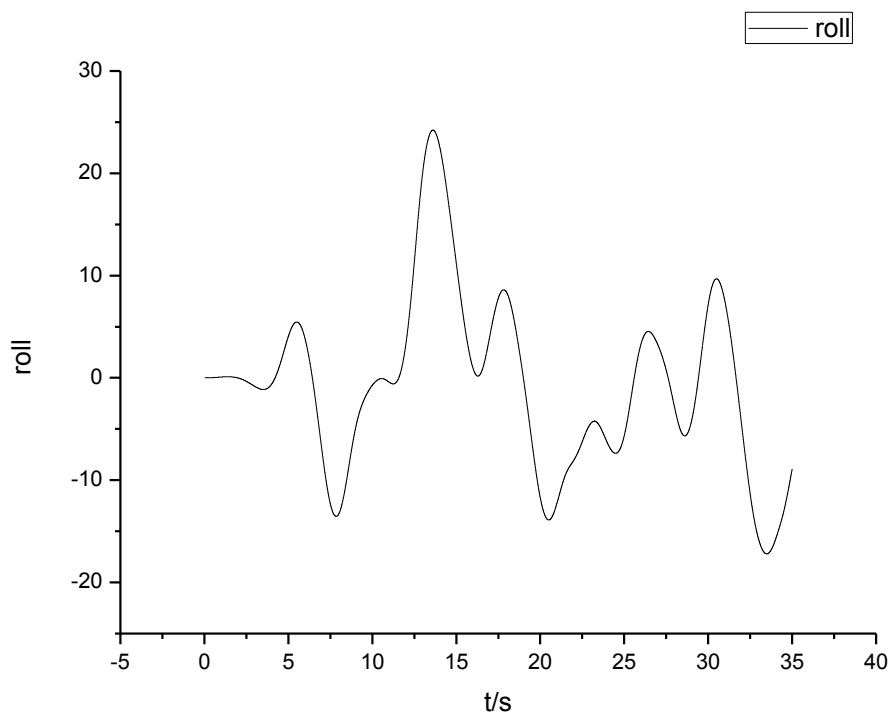


图 4-4-2-8 纵摇时历曲线

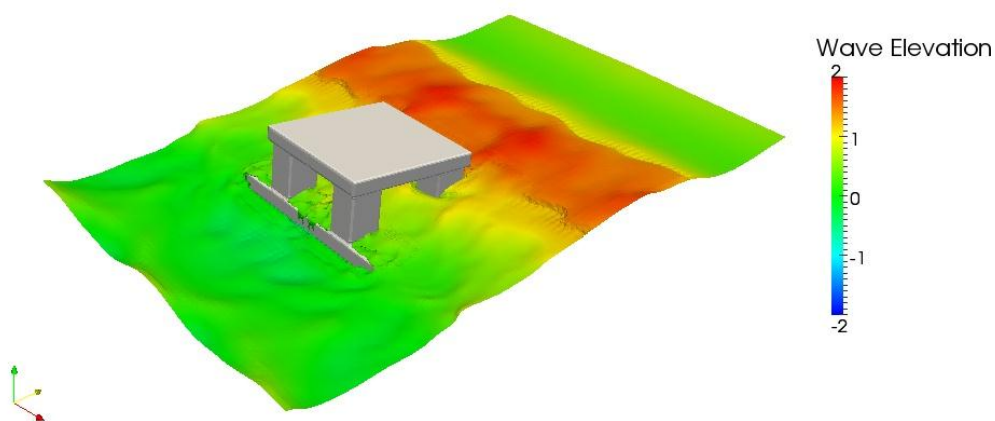


图 4-4-2-9 运动示意图

图 4-4-2-7 与图 4-4-2-8 分别为该算例下的垂荡与横摇时历曲线。从曲线中我们可以看出，平台的运动基本上是按照波浪的周期进行类周期性的运动。从垂荡时历曲线图上看，25s 后曲线趋于稳定，其平衡位置处在 0.25m 附近。从垂荡幅度来看，能够保持在 1m 以内，运动稳定性可以很好的满足要求。从横摇时历曲线来看，横摇运动在较为不稳定，从横摇运动幅度来看，幅度最大可以达到 25°，运动稳定性并不是特别的良好。图 4-4-2-9 为 35s 时刻平台在波浪中运动的示意图。

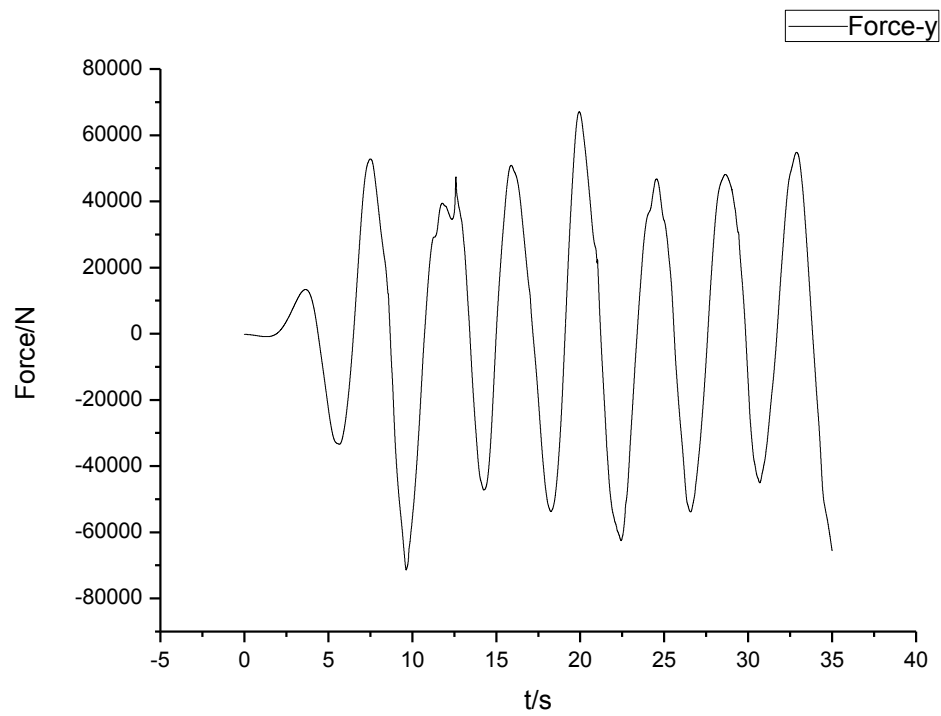


图 4-4-2-10 y 方向受力曲线

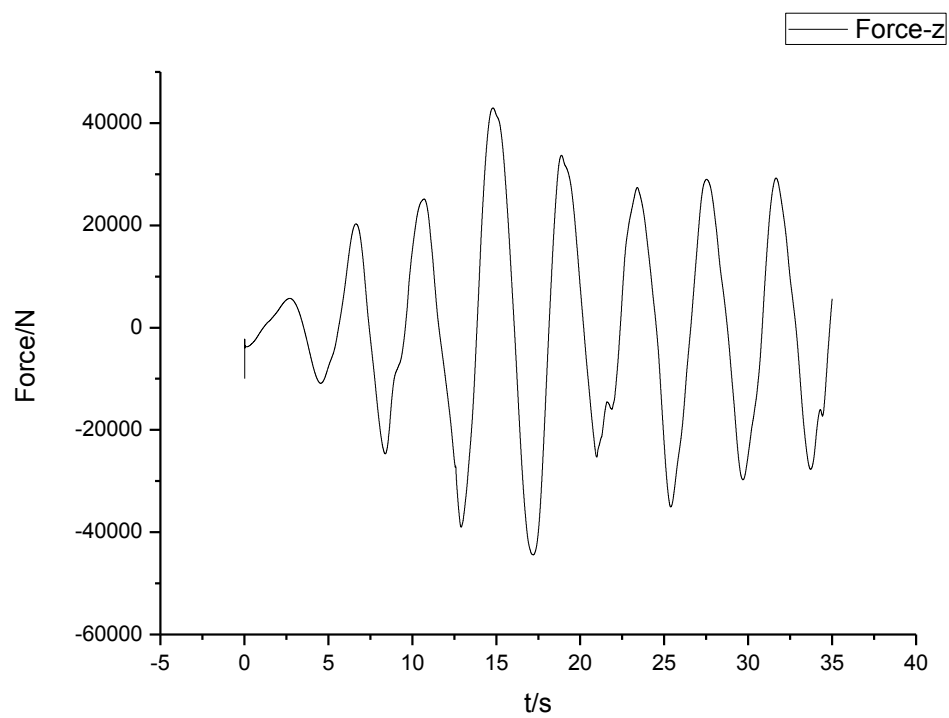


图 4-4-2-11 z 方向受力曲线

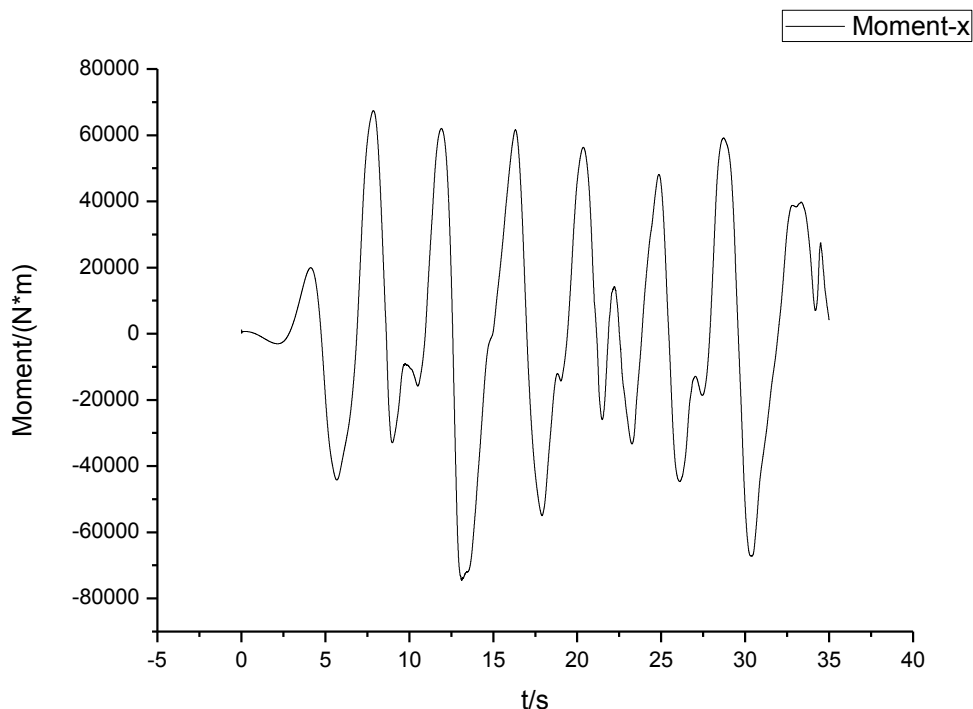


图 4-4-2-12 力矩曲线

图 4-4-2-10、图 4-4-2-11 和图 4-4-2-12 分别为平台运动的横向受力、垂向受力和所受力矩的时历曲线图。从三张受力图中可以看到，平台的受力是按照周期性变化的。然而，横向受力、垂向受力以及力矩的振幅是不断变化的，原因是平台在运动过程中其姿态是不断变化的，导致其受力的幅度有所变化。平台所受力矩在极值点附近会伴随一个小的极值点，原因可能是在平台运动过程中，平台立柱上产生波浪爬高，使平台受力突变；同时，粘性的作用也可能导致平台受力的不稳定。

总之，平台受力是在可以接受的周期性变化范围内，这就表明平台运动的周期性不明显并不是数值模拟方法的错误，而是由如粘性、横摇垂荡的耦合运动等原因引起的。

4.5 三种平台形式数值模拟结果比较

4.5.1 1m 波高下的平台运动情况比较

图 4-5-1-1、图 4-5-1-2、图 4-5-1-3 和图 4-5-1-4 分别为三种平台在 1m 波高下的垂荡（与纵摇耦合）、纵摇、垂荡（与横摇耦合）以及横摇运动的时历曲线。其中图例中，three hull 代表三体浮标；three column 代表三立柱式半潜式平台，其后面的 1 和 2 分表代表单立柱迎浪和双立柱迎浪；four column 代表四立柱式半潜式平台。

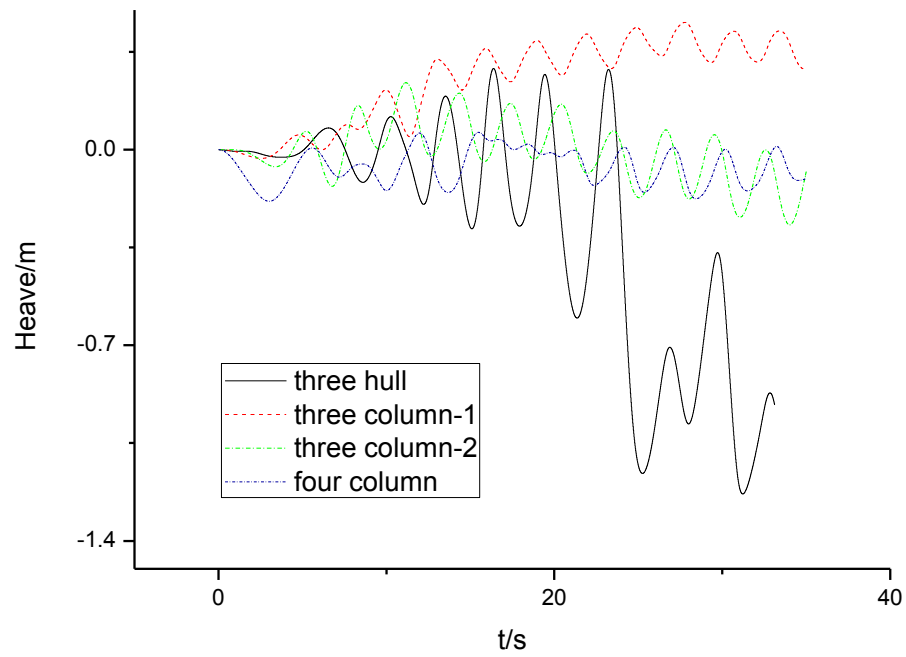


图 4-5-1-1 垂荡（纵摇耦合）时历曲线

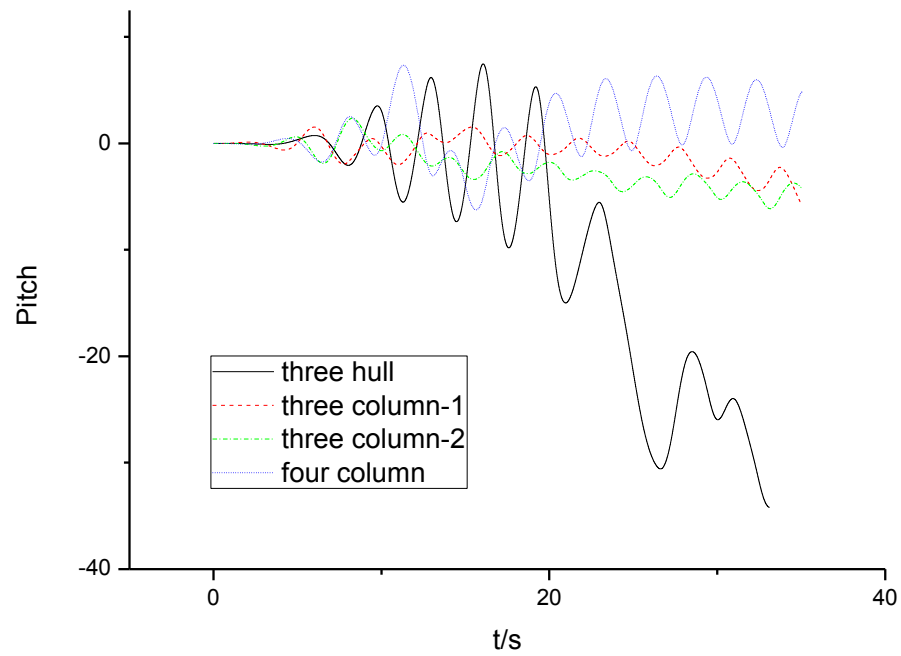


图 4-5-1-2 纵摇时历曲线

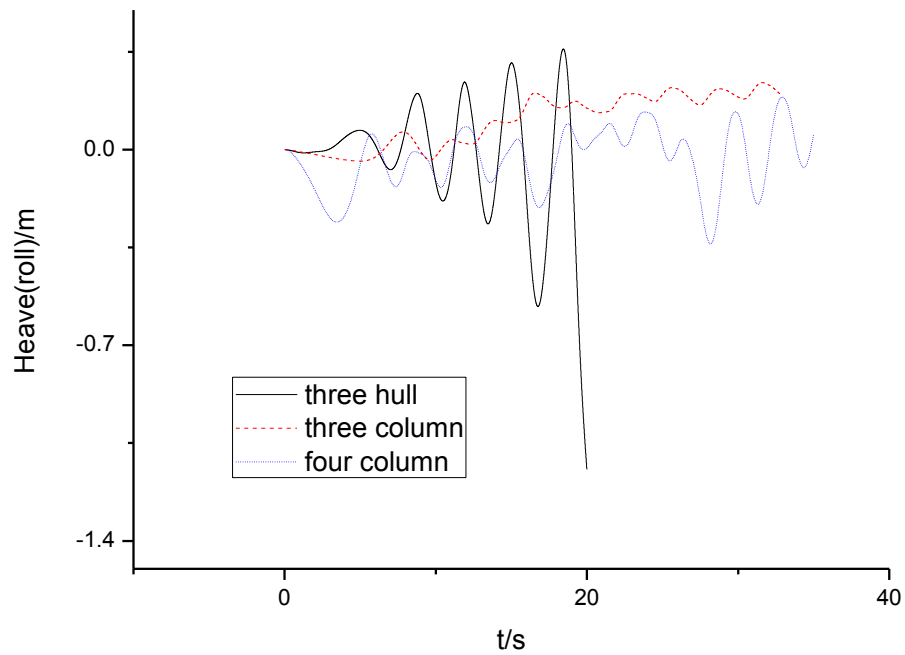


图 4-5-1-3 垂荡（横摇耦合）时历曲线

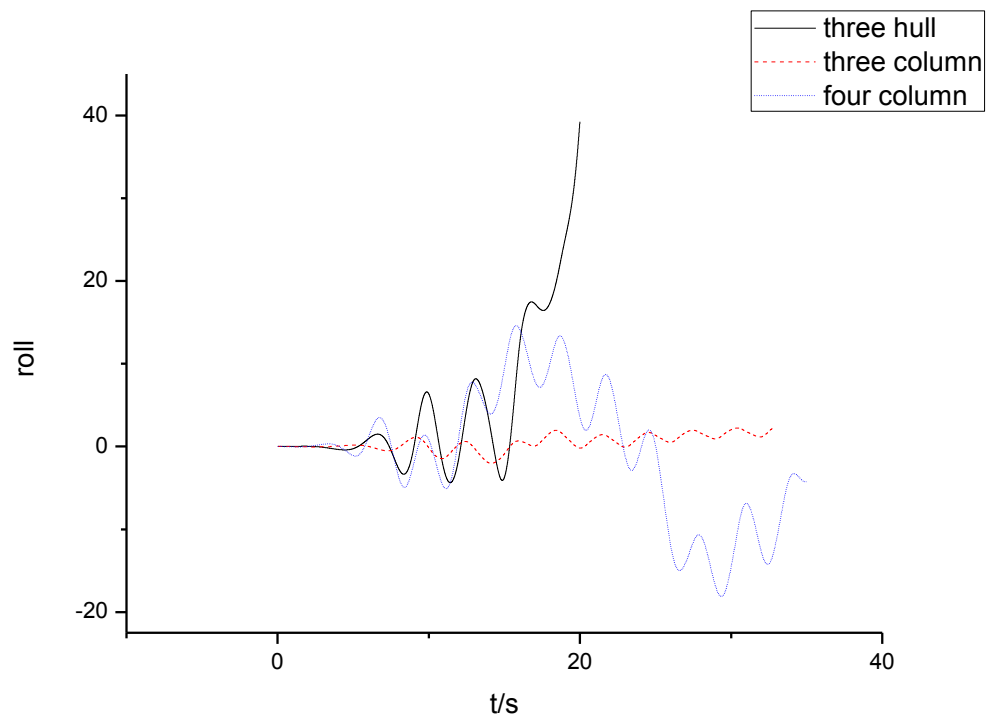


图 4-5-1-4 横摇时历曲线

从上述图中可以看到，在 1m 波高下，三体浮标平台运动极不稳定，是最容易发生倾覆的。而三立柱式半潜式平台和四立柱式半潜式平台的运动较为稳定，并且幅度在适当范围内。

对于两种半潜式平台形式来说，三立柱式要比四立柱式的运动幅度小。此外，三立柱式中单立柱迎浪的运动稳定性比双立柱迎浪的运动稳定性要好。从上述结果来看，三立柱式半潜式平台的运动稳定性最好。

4.5.2 2m 波高下的运动情况比较

图 4-5-2-1、图 4-5-2-2、图 4-5-2-3 和图 4-5-2-4 分别为三种平台在 2m 波高下的垂荡（与纵摇耦合）、纵摇、垂荡（与横摇耦合）以及横摇运动的时历曲线。其中图例中，three hull 代表三体浮标；three column 代表三立柱式半潜式平台，其后面的 1 和 2 分表代表单立柱迎浪和双立柱迎浪；four column 代表四立柱式半潜式平台。

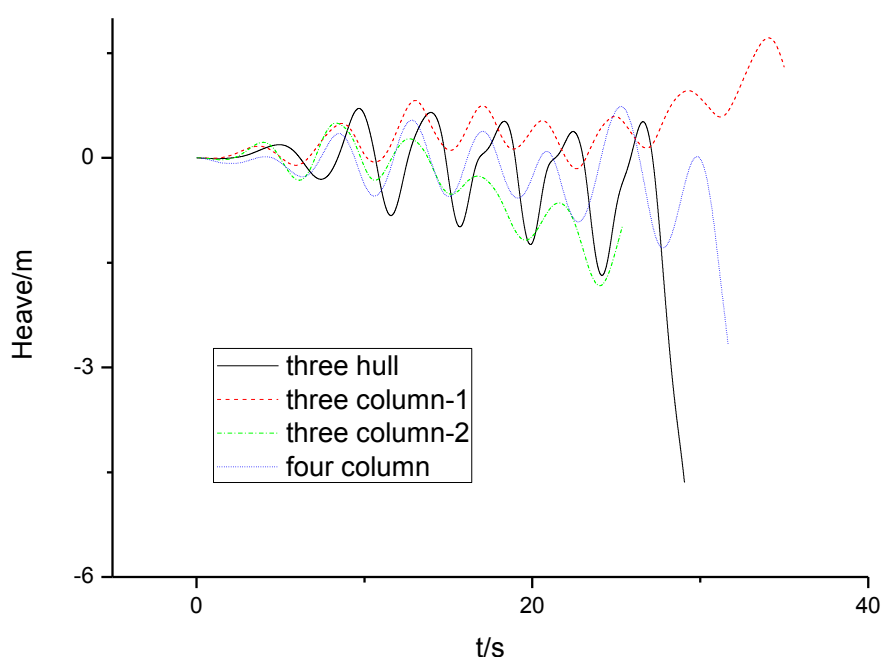


图 4-5-2-1 垂荡（纵摇耦合）时历曲线

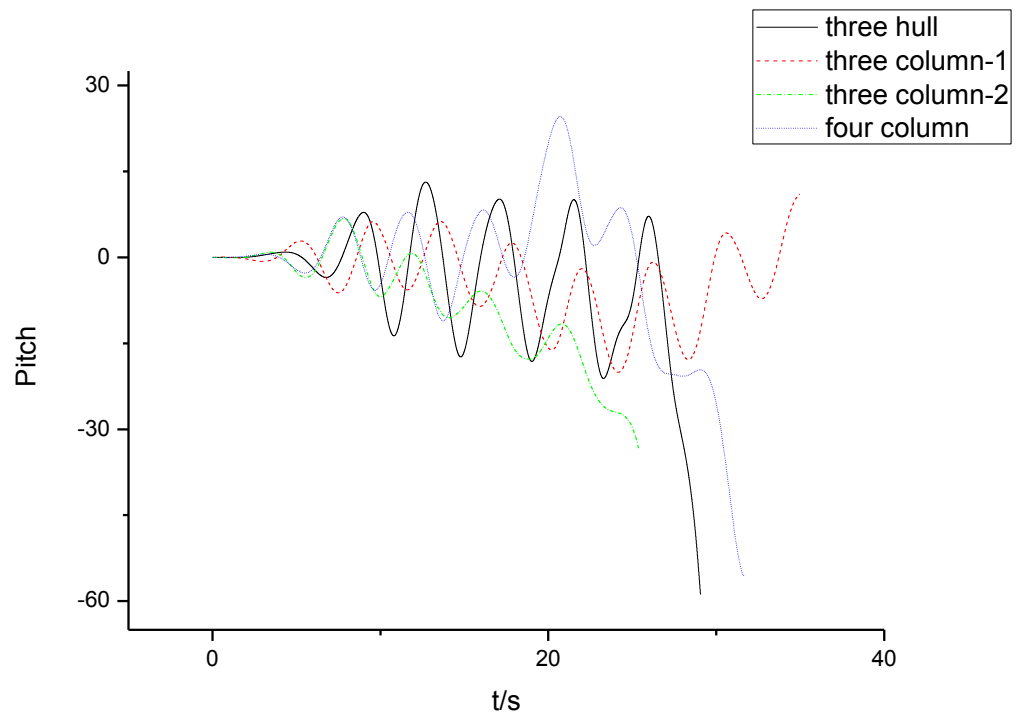


图 4-5-2-2 纵摇时历曲线

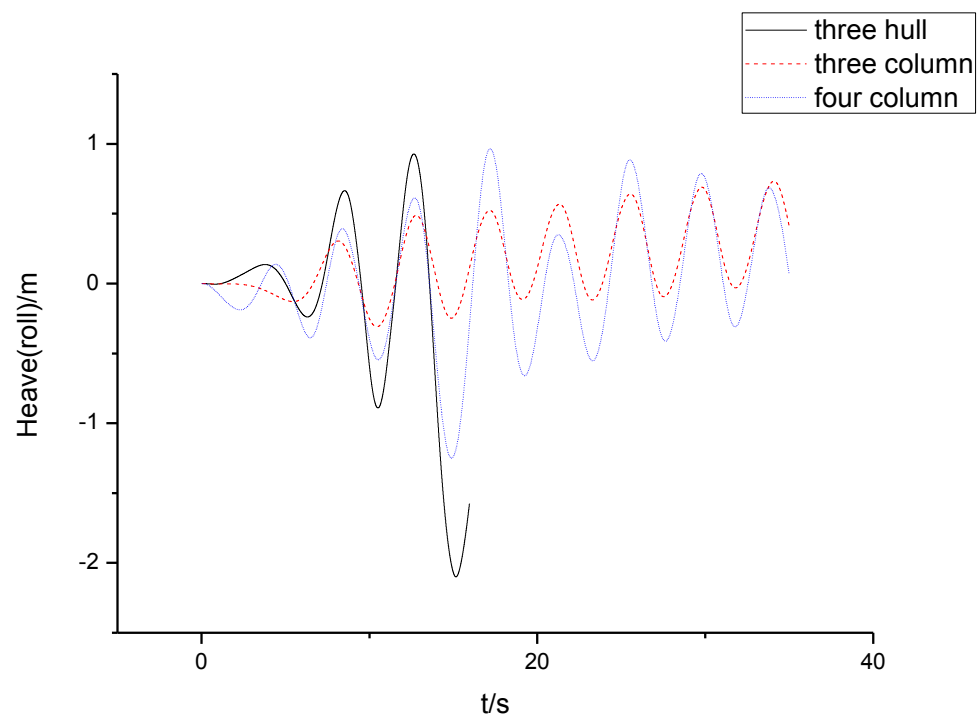


图 4-5-2-3 垂荡（横摇耦合）时历曲线

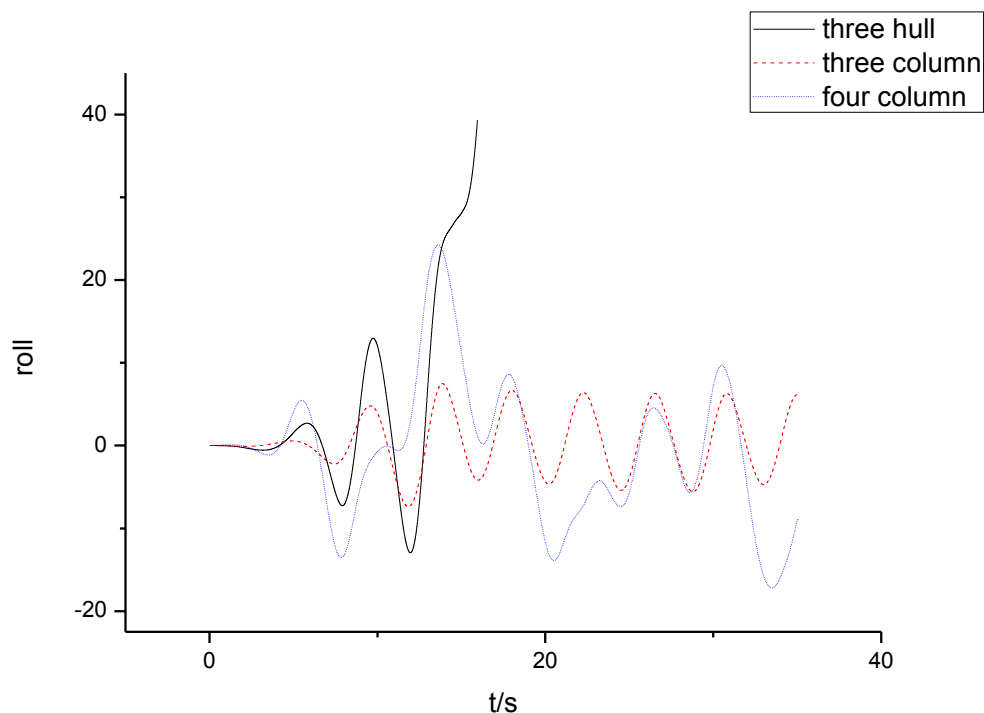


图 4-5-2-4 横摇时历曲线

从上述图中可以看到，在 1m 波高下，三体浮标平台运动极不稳定，是最容易发生倾覆的。四立柱式半潜式平台与三立柱式半潜式平台双立柱迎浪两种垂荡纵摇的算例中，都发生了倾覆，而三立柱式半潜式平台单柱迎浪的垂荡纵摇并没有发生倾覆，且运动稳定性较好。对于横摇垂荡运动来说，三立柱式半潜式平台与四立柱式半潜式平台均具有良好的稳定性，并且三立柱式的运动幅度比四立柱式小。从上述结果来看，三立柱式半潜式平台的运动稳定性最好。

4.6 结果分析

从上述结果来看，三立柱式半潜式平台形式的运动稳定性要好于三体浮标形式与四立柱式半潜式平台形式。从 3.2 节的平台参数中，我们可以发现，三立柱式半潜式平台的排水量与转动惯量要比其他两种平台为大。这样，在相同的工况下，三立柱式半潜式平台形式的运动幅度就较小，发生甲板上浪的机会也就较小。

在保证甲板面积相同的前提下，建立的三种平台形式模型会有这种差异，是平台形式本身造成的。对于三立柱式半潜式平台形式，其下浮筒分散在三角形的三个顶点处，并且其钢料等材料作用较多，使得其排水量较大并且三个浮筒浮力的作用线远离平台中心。这样，平台的质量、转动惯量较大并且回复力矩较大，使得平台运动相对稳定。然而，在同样的甲板面积下，三体浮标形式和四立柱式半潜式平台的用料较少，排水量较小，并且浮筒在甲板下较为集中，使得浮力作用线较平台中心较近，使得平台的转动惯量与回复力矩较小，导致了平台运动的不稳定。

由此可见，平台的结构形式对于其运动稳定性的影响很大，在设计阶段需要慎重地选择平台的结构形式。

4.7 本章小结

本章主要介绍了对于三种平台在 1m 和 2m 波高中的运动以及受力的数值模拟结果。首先分别介绍了每一个算例中平台的运动与受力情况,分析了平台运动和受力的特征,以及出现某些现象的原因。进而将三种平台的数值模拟结构进行了比较,得出三立柱式半潜式平台形式的运动稳定性在三种平台形式中最好的结果。

第五章 总结与展望

5.1 总结

本毕业设计课题基于开源代码 OpenFOAM 对海上浮式观测平台的运动稳定性进行了数值模拟分析。

本课题以连续性方程和动量方程为控制方程,通过有限体积法对方程进行离散,采用 VOF 方法处理气液两相流问题中的自由面,利用 PISO 算法处理速度压力耦合求解问题,同时应用动态变形网格技术模拟平台的运动。采用 OpenFOAM 中的 snappyHexMesh 非结构化网格方法对计算网格进行生成。

在平台形式的选取上,选择了原有海上高频地波雷达设计思路中的三体浮标形式,以及在海洋工程领域得到广泛应用的三立柱式半潜式平台形式和四立柱式半潜式平台形式,并再其基础上,针对平台较小的特点进行了一定的改进。计算工况选取为 3 级海况和 4 级海况,波高分别选为 1m 和 2m,并控制波陡小于 0.142,保证波浪不发生破碎。

在进行了求解运算有,得到各平台分别在 1m 和 2m 波高下的运动情况。其中,平台会随着波的周期进行类似周期性的往复运动,大多数平台的运动幅度并不是周期变化的;平台的受力是随着波浪的周期呈周期形式的,并且在峰值之外还会出现某些极致点。这是与粘性作用以及波浪爬高等因素相关的。此外,在某些算例当中,如三体浮标形式算例,平台出现倾覆,并且在倾覆之前,受力变化剧烈。这是与平台运动幅度过大与产生甲板上浪相关的。

在比较三种平台的运动后发现,三体浮标平台的运动稳定性最差。三立柱式半潜式平台与四立柱式半潜式平台稳定性较三体浮标为好,而三立柱式半潜式平台的运动幅度与稳定性好于四立柱式半潜式平台。同时在纵摇垂荡问题上,三立柱式半潜式平台单柱迎浪的稳定性比双柱迎浪的稳定性好。这是与平台形式所决定的排水量与转动惯量等有关的。可以得出的结论是,在这三种平台形式中,三立柱式半潜式平台形式的运动稳定性最好。

产生这种结果是平台自身的结构形式造成的。在保证相同甲板面积的前提下,三立柱式半潜式平台形式的排水量、转动惯量、回复力矩比其他两种平台形式大,使得其运动更为稳定。因而,选择良好的平台形式在平台的设计阶段是十分重要的。

由于时间原因,本文中并未加入锚链的影响。在海上浮式观测平台的实际工作中,锚链是重要的因素,在今后的研究中,需要加入锚链的影响,以全面反映平台的稳定性能力。

5.2 展望

由于时间等的限制,本课题对于海上浮式观测平台的上浪和运动稳定性的分析还有更多的工作要做:

- (1) 选取更多的平台形式,不局限于三体浮标形式和半潜式平台形式,并对其进行优化进行数值模拟计算;
- (2) 在方程中加入锚链力,并将锚链力写入计算程序,探究锚链力对平台稳定性的影响以及如何优化锚链的布置形式;
- (3) 选取更多工况进行计算,从 3 级海况和 4 级海况向更高的海况发展,全面模拟平台在实际问题中的运动稳定能力;
- (4) 在同一海况中选取对个频率的波进行数值模拟,并进行频域分析,探究频域下运动相应对平台稳定性的影响;
- (5) 选取非规则波进行模拟,探究平台在更为复杂的波浪情况下的运动稳定性;

-
- (6) 将甲板上所载设备的影响添加到计算中，模拟实际情况下平台运动、甲板上浪等对仪器设备的影响。

参考文献

- [1] 曾一非.海洋工程环境 [M].上海:上海交通大学出版社, 2008.1.
- [2] 惠绍棠. 海洋监测高技术的需求与发展[J]. 海洋技术 [1003-2029], 2000, 19(1). 1.
- [3] 朱光文.我国海洋监测技术研究和开发的现状和未来发展 [J]. 海洋技术 [1003-2029], 2002, 21(2).27.
- [4] Ye Chunming, Lu Yan. Development Trend and Analysis of HF Ground Wave Radar [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, Issue 1.27-30 (in Chinese).
- [5] Thor I. Fossen and Øyvind N. Smogeli, Nonlinear Time-Domain Strip Theory Formulation for Low-Speed Manoeuvring and Station-Keeping [J]. Modeling, Identification and Control, 2004, Vol. 25, No. 4, pp. 201-221.
- [6] O. Faltinsen and T. Svensen, Incorporation of Seakeeping Theories in CAD [C]. Proceedings of the International Symposium on CFD and CAD in Ship Design, Maritime Research Institute Netherlands, Wageningen, The Netherlands, September 1990.
- [7] 杜月中,申志和,陈材侃等. 一种三体浮标. [P] 中国:03235366.9, 2004.
- [8] Takarada, N, Obokata, J. The Stability on Semi-submersible Platform in Waves(on the Capsizing of Moored Semi-submersible Platform) [J]. Proceedings of the 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Tokyo, 24-29 Oct. 1982, No.4, p.49.
- [9] 翟建华.计算流体力学(CFD)的通用软件[J]. 河北科技大学学报, 2005, 26(2). 160-165.
- [10] <http://www.fluent.com/>
- [11] <http://www.openfoam.org/>
- [12] 吴望一. 流体力学(上) [M]. 北京:北京大学出版社, 2004:1-29.
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:54-57.
- [14] Berberović, E., van Hinsberg, N., Jakirlić, S., etc. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution[J]. Phys Rev E, 2009, 79 (3).
- [15] Rusche, H. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions[D]. PhD Thesis, Imperial College 2003.
- [16] 王志东,汪德燿. VOF 方法中自由液面重构的方法研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2003,(01):52-56.
- [17] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics,1981,39(1):201-225.
- [18] Henrik R. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions[D]. London: University of London, 2003.
- [19] Issa, R. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. J Comput Phys, 1986, 62 (1): 40-65.
- [20] 王彤,谷传纲,杨波等. 非定常流动计算的 PISO 算法[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2003,(02):233-239.
- [21] 王为术,徐维晖,翟肇江等. PISO 算法的实现及与 SIMPLE,SIMPLER,SIMPLEC 算法收敛性的比较[J]. 华北水利水电学院学报,2007,(04):33-36.
- [22] Wilson, R. V.,Carrica, P. M.,Stern, F. Unsteady RANS method for ship motions with application to roll for a surface combatant[J]. Comput Fluids, Jun, 2006, 35 (5): 501-524.
- [23] Carrica, P. M.,Fu, H.,Stern, F. 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, 33 (4): 309-320.
- [24] Tahara, Y.,Wilson, R. V.,Carrica, P. M., etc. RANS simulation of a container ship using a single-phase level-set method with overset grids and the prognosis for extension to a self-propulsion simulator[J]. J Mar Sci Technol, 2006, 11 (4): 209-228.
- [25] Carrica, P. M.,Wilson, R. V.,Stern, F. Unsteady RANS simulation of the ship forward speed diffraction problem[J]. Computers and Fluids, 2006, 35 (6): 545-570.

谢辞

光阴荏苒，白驹过隙，转眼间四年的大学生活走到了尾声。此时，我已完成了毕业论文，完成了在大学期间最后的任务，可以为我的大学生活画上一个句点。在这四年，尤其是最后一年完成毕业设计的时光中，我付出了汗水，体会了辛酸，也得到了不少收获。当然，这与我得到的许多帮助时分不开的。

首先，感谢我的父母。感谢你们的养育之恩，将我培养成人。感谢你们无论我想要做什么都会不遗余力的支持我，默默的奉献、默默的付出。

感谢万德成老师。万老师在我完成毕业设计的过程中给予了非常关键的指导，为我完成毕业论文指明了道路。万老师同时对学生十分关心，经常关心学生的生活，教导大家锻炼身体。万老师的谆谆教诲令我在这段时光中受益良多。

感谢刘远传师兄，沈志荣师兄以及万老师小组中的师兄师姐，以及与我跟着万老师做毕业设计的同学。你们在我完成设计的过程中给了我非常大的帮助。刘远传师兄在我进行数值模拟的过程中给了我十分重要的指导，帮助我改正算例配置当中的错误，帮助我顺利完成计算任务。沈志荣师兄在我学习 CFD 的过程中给了我很大的帮助，帮我弄懂了很多困惑的问题。

最后，感谢所有关系我的家人、同学、朋友。你们的关怀是我前进道路上不竭的动力。