



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102433867 A

(43) 申请公布日 2012. 05. 02

(21) 申请号 201110319567. 1

(22) 申请日 2011. 10. 20

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15 号

(72) 发明人 李家春 张会琴

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所 (普通合伙) 11390

代理人 胡剑辉

(51) Int. Cl.

E02B 17/00 (2006. 01)

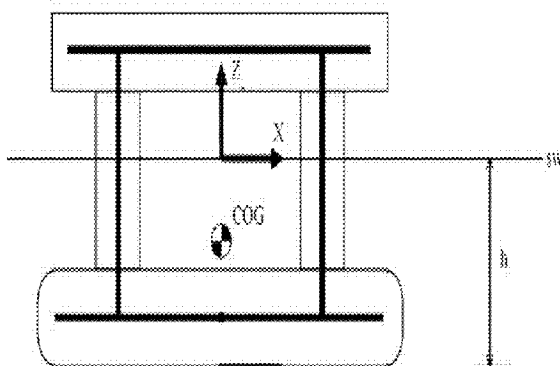
权利要求书 1 页 说明书 10 页 附图 9 页

(54) 发明名称

深水半潜式钻井平台或采油平台设计方法

(57) 摘要

本发明公开了一种深水半潜式钻井平台或采油平台设计方法,包括如下步骤:1) 在立柱吃水深度给定下,对立柱群和下浮体不同的体积分配,根据垂荡固有频率公式得到不同体积配置因子下的垂荡固有频率曲线;2) 根据平台所服役海域的波浪主频率,参照步骤 1) 中的垂荡固有频率与体积配置因子的关系曲线,调整下浮体和立柱群之间的体积分配,确定典型体积配置因子范围,使在此范围内所得的平台垂荡固有频率尽可能远离波浪主频;3) 根据步骤 2) 确定的垂荡体积配置因子区间,运用纵摇固有频率公式,调整立柱中心轴纵向间距;运用横摇固有频率公式,调整立柱中心轴横向间距,使平台的纵摇和横摇固有频率均远离波浪主频,从而确定立柱中心轴纵向间距和横向间距。



1. 一种深水半潜式钻井平台或采油平台设计方法,包括如下步骤:

1) 在立柱吃水深度给定下,对立柱群和下浮体不同的体积分配,根据垂荡固有频率公

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{g}{L} \left(\frac{1}{1 + (1 + \kappa_3) \frac{\phi}{1 - \phi}} \right)^{\frac{1}{2}}} \text{ 得到不同体积配置因子 } \phi \text{ 下 } (0 < \phi < 1) \text{ 的垂荡固有频}$$

率曲线;

2) 根据平台所服役海域的波浪主频率,参照垂荡固有频率与体积配置因子关系曲线,调整下浮体和立柱群之间的体积分配,确定体积配置因子范围,使在此范围内所得的平台垂荡固有频率尽可能远离波浪主频;

3) 根据步骤 2) 确定的垂荡体积配置因子区间,根据纵摇固有频率公式

$$\omega_5 = \sqrt{\frac{g}{1 + \kappa_5 \phi} \left(\frac{1 - \phi}{L} - \frac{GB}{r_{55}^2} \right)}, \text{ 调整立柱中心轴纵向间距 } d_z \text{ (公式 (12)) 从而改变纵摇惯性}$$

半径 r_{55} ; 根据横摇固有频率公式 $\omega_4 = \sqrt{\frac{g}{1 + \kappa_4 \phi} \left(\frac{1 - \phi}{L} - \frac{GB}{r_{44}^2} \right)}$, 调整立柱中心轴横向间距

d_H 从而改变横摇惯性半径 r_{44} , 使平台的纵摇和横摇固有频率均远离波浪主频, 进一步确定平台的主尺度参数, 即立柱中心轴纵向间距和横向间距;

其中, 所述 ω_3 为垂荡固有频率, ω_5 为纵摇固有频率, ω_4 为横摇固有频率, g 为重力加速度, L 为立柱群的吃水高度, ϕ 为体积配置因子, GB 为结构物浮心和重心之间的距离, κ_3 为下浮体垂荡附加质量系数, κ_5 为下浮体纵摇附加质量矩系数, κ_4 为下浮体横摇附加质量矩系数, r_{55} 为纵摇惯性半径, r_{44} 为横摇惯性半径。

深水半潜式钻井平台或采油平台设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及深水油气开发系统中深海浮式平台的设计方法。

背景技术

[0002] 深水油气开发是一项科技含量高、所处海洋环境条件恶劣、浮式平台系统受力状况复杂的海洋工程。我国的深水海洋油气资源开发起步较晚，受技术水平和装备能力所限，我国的海洋石油开发长期以来只能在 300 米水深以内的近海进行。十一五期间，3000 米深水半潜式钻井平台设计建造技术攻关列入了 863 计划和国家科技重大专项，以推进我国的深水平台的研制工作，填补我国在深水装备上的空白，也标志着我国海洋石油工业的自主创新能力有了重要进展。

[0003] 为了对海洋石油进行经济、安全和高效率的开采，深水浮式平台的选型与概念设计是重要的一步。迄今为止，张力腿平台 (TLP)、Spar 平台和半潜式平台是比较典型的三类深水平台型式，至今仍成功应用于世界各海域的深水油气开采。在概念选型阶段，需要依据当地海况条件（如，水深、波浪主频等参数）提供平台的结构类型，而给定型式后具体平台的主尺度优化则是工程设计的第二步，在这个阶段，我们应该详细分析同一型式平台下不同结构形式（如立柱与下浮体的体积分配、结构主尺度、几何参数等）对其流体动力性能的影响。

[0004] 在平台方案选型或设计的初期阶段，必须首先根据所服役海域的海况条件，设计出固有摇荡频率 / 周期远离常见波浪主频率 / 周期的结构物，从而避免发生相对较大的运动响应，是判断平台运动性能优劣的关键因素。对于这一问题，研究方法多半局限于数值模拟计算，直观和普适性的结论较少。本专利从理论分析入手，给出适用于不同平台型式的一般性结论，从而为减少工作量、缩短设计周期，并进一步开展平台的详细设计提供技术储备。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于一种深水半潜式钻井平台或采油平台设计方法，能够定量确定平台关键主尺度参数，在平台的初期概念设计阶段，提高工作效率。

[0006] 本发明的一种深水半潜式钻井平台或采油平台设计方法包括如下步骤：

[0007] 1) 在立柱吃水深度给定下，对立柱群和下浮体不同的体积分配，根据垂荡固有频率公式

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{g}{L} \left(\frac{1}{\kappa_3} \frac{\phi}{1} \right)^{\frac{1}{*2}}} \quad \text{得到不同体积配置因子下的垂荡固有频率曲线；}$$

[0008] 2) 根据平台所服役海域的波浪主频率，参照垂荡固有频率与体积配置因子关系曲线，调整下浮体和立柱群之间的体积分配，确定体积配置因子范围，使在此范围内所得的平

台垂荡固有频率尽可能远离波浪主频；

[0009] 3) 根据步骤 2) 确定的垂荡体积配置因子区间, 根据纵摇固有频率公式

$$\omega_5 \odot \sqrt{\frac{g}{1J \kappa_5 \phi} \left(\frac{1}{L} \int \phi \int \frac{GB}{r_{55}^2} \right)},$$

调整立柱中心轴纵向间距从而改变纵摇惯性半径 r_{55} ; 运用横

$$\text{摇固有频率公式 } \omega_4 \odot \sqrt{\frac{g}{1J \kappa_4 \phi} \left(\frac{1}{L} \int \phi \int \frac{GB}{r_{44}^2} \right)},$$

调整立柱中心轴横向间距从而改变横摇惯

性半径 r_{44} , 使平台的纵摇和横摇固有频率均远离波浪主频, 进一步确定平台立柱中心轴纵向间距和横向间距这两个关键主尺度参数。

[0010] 其中, 所述 ω_3 为垂荡固有频率, ω_5 为纵摇固有频率, ω_4 为横摇固有频率, g 为重力加速度, L 为立柱群的吃水高度, ϕ 为体积配置因子, GB 为结构物浮心和重心之间的距离, κ_3 为下浮体的垂荡附加质量系数, κ_5 为下浮体的纵摇附加质量矩系数, κ_4 为下浮体的横摇附加质量矩系数, r_{55} 为纵摇惯性半径, r_{44} 为横摇惯性半径。

[0011] 本发明通过对平台固有频率这一决定海洋结构物运动性能优劣的关键参数的理论分析, 结合商用水动力软件 WAMIT 的验证的方式, 能够在平台设计初期根据服役海域海况条件确定深水浮式平台的关键主尺度设计参数范围, 使得深水浮式平台在设计的过程中更加科学、合理、经济、简捷。

附图说明

[0012] 图 1 为半潜式平台剖面图。

[0013] 图 2 为半潜式平台立柱和下浮体中轴线间立柱纵向间距 d_z 和横向间距 d_H 。

[0014] 图 3 垂荡固有周期 ($\phi = 0.84$)。

[0015] 图 4 垂荡固有周期 ($\phi = 0.82$)。

[0016] 图 5 垂荡固有周期 ($\phi = 0.79$)。

[0017] 图 6 垂荡固有周期 ($\phi = 0.76$)。

[0018] 图 7 不同体积配置因子下的垂荡固有周期。

[0019] 图 8 ϕ 与垂荡固有周期关系曲线与相应数值结果 (图 3-7) 比较。

[0020] 图 9 半潜式平台纵稳性示意图。

[0021] 图 10 纵摇固有周期 ($\phi = 0.84$)。

[0022] 图 11 纵摇固有周期 ($\phi = 0.79$)。

[0023] 图 12 纵摇固有周期 ($\phi = 0.76$)。

[0024] 图 13 ϕ 与纵摇固有周期关系曲线与相应数值结果 (图 10-12) 比较。

[0025] 图 14 纵向柱间距 65、70 和 75m 下垂荡固有周期。

[0026] 图 15 纵向柱间距 65、70 和 75m 下纵摇固有周期。

具体实施方式

[0027] 1、设计原理

[0028] ①垂荡 (Heave) 固有频率的估算：

[0029] 半潜式平台的无阻尼垂荡响应控制方程为

[0030]

$$M + A_{33} \left| \frac{d^2 \eta_3}{dt^2} + \rho g A_w \eta_3 - F_3(t) \right| \quad (1)$$

[0031] 式中, M——结构物的质量;

[0032] A_{33} ——垂荡附加质量;[0033] A_w ——水线面面积;[0034] ρ ——水体质量密度;[0035] g ——重力加速度;[0036] η_3 ——平台垂荡运动幅度;[0037] $F_3(t)$ ——平台所受到的垂向波浪力。[0038] 根据 (1) 式, 垂荡固有频率 ω_3 可写为

[0039]

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{\rho g A_w}{M + A_{33}}} \quad (2)$$

[0040] 对半潜式平台来说, 考虑到立柱群的垂荡附加质量与双下浮体的垂荡附加质量相比较小, 可以忽略, 并且忽略不计构成平台的水下组成部件, 即立柱群和双下浮体之间的流体动力的相互干扰, 式 (2) 可近似表达如下,

[0041]

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{\rho g A_w}{\rho V + \kappa_3 \rho V_p}} \quad (3)$$

[0042] 式中, V ——整个平台的排水体积 (m^3);[0043] V_p ——下浮体的排水体积 (m^3);[0044] κ_3 ——下浮体的垂荡附加质量系数。

[0045] 现引入体积配置因子 ϕ , 其定义为下浮体的排水体积 V_p 与整个平台的排水体积 V 之比, 具体表达式如下,

[0046]

$$\phi = \frac{V_p}{V} \quad (4)$$

[0047] 这里 $0 < \phi < 1$ 。

[0048] 式 (3) 进一步化简为,

[0049]

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{g}{L} \frac{1}{(1 + \kappa_3) \phi}} \quad (5)$$

[0050] 式中, L ——立柱群的吃水高度。

[0051] ②纵摇 (Pitch) 和横摇 (Roll) 固有频率的估算:

[0052] 半潜式平台的无阻尼纵摇响应控制方程为

[0053]

$$I_5 \int A_{55} \left| \frac{d^2 \eta_5}{dt^2} \right| \rho g V \overline{GM}_L \eta_5 \odot F_5 \int t \quad (6)$$

[0054] 式中, I_5 ——结构物的纵摇惯性矩;[0055] A_{55} ——纵摇方向上的附加质量矩;[0056] η_5 ——平台纵摇运动幅度;[0057] \overline{GM}_L ——纵稳性高度;[0058] $F_5(t)$ ——平台所受到的纵摇波浪力矩.[0059] 根据 (6) 式, 纵摇固有频率 ω_5 可写为

[0060]

$$\omega_5 \odot \sqrt{\frac{\rho g V \overline{GM}_L}{I_5 \int A_{55}}} \quad (7)$$

[0061] 如图 9 所示, 纵稳性高度:

[0062]

$$\overline{GM}_L \odot \overline{BM}_L \int BG ,$$

[0063] 而,

[0064]

$$\overline{BM}_L \odot \frac{A_w r_{55}^2}{V}$$

[0065] 又, 对纵摇惯性矩 I_5 和附加质量矩 A_{55} , 同垂荡情形同样的处理办法,

[0066]

$$I_5 \odot \rho V r_{55}^2 ,$$

$$A_{55} \odot \kappa_5 \rho V_p r_{55}^2$$

[0067] 式 (7) 进一步化简为,

[0068]

$$\omega_5 \odot \sqrt{\frac{g}{1 \int \kappa_5 \phi} \left(\frac{1 \int \phi}{L} \int \frac{GB}{r_{55}^2} \right)} \quad (8)$$

[0069] 式 (8) 主要给出了半潜式平台的纵摇固有频率 ω_5 (或周期) 与体积配置因子 ϕ 、结构物浮心和重心之间的距离 GB 、纵摇附加质量矩系数 κ_5 以及纵摇惯性半径 r_{55} 的关系。更进一步, r_{55} 的确定方法如下:

[0070] 对沉没于水下的立柱群和下浮体而言, 立柱群 (以半径 R , 高 L 的圆柱为例) 绕 y 轴的转动惯量 I_{cy} 和下浮体 (以长 P_L 、宽 P_w 、高 P_H 的长方体近似) 绕 y 轴的转动惯量 I_{py} 分别为 (坐标系见图 2):

[0071]

$$I_{cy} \odot 4 \left(\frac{1}{12} m_c (3R^2 \int L^2) \int \frac{1}{4} m_c d_z^2 \right) \quad (9)$$

$$I_{py} \odot 2 \left(\frac{1}{12} m_p (p_L^2 \int p_H^2) \right) \quad (10)$$

[0072] 沉没于水下部件的绕 y 轴的总转动惯量 I_y 为：

[0073]

$$I_y \odot I_{cy} \int I_{py} \odot m_c \left(\frac{1}{3} (3R^2 \int L^2) \int d_z^2 \right) \int \frac{1}{6} m_p (p_L^2 \int p_H^2) \quad (11)$$

[0074] 由纵摇惯性半径 r_{55} 与整个平台总转动惯量的关系，有

[0075]

$$r_{55} \odot \sqrt{\frac{I_y \int I_{up-y}}{M}} \odot \sqrt{\frac{m_c \left(\frac{1}{3} (3R^2 \int L^2) \int d_z^2 \right) \int \frac{1}{6} m_p (p_L^2 \int p_H^2)}{M} \int \frac{I_{up-y}}{M}} \odot \sqrt{\frac{1}{3} (1 \int \phi) (3R^2 \int L^2) \int \frac{1}{6} \phi (p_L^2 \int p_H^2) \int (1 \int \phi) d_z^2 \int \frac{I_{up-y}}{M}} \quad (12)$$

[0076] 式中， I_{up-y} 为平台水上部分的纵摇转动惯量，由于我们调整的是水下部件的立柱群和下浮体，因此为常数。

[0077] 式 (12) 给出了纵摇惯性半径 r_{55} 与平台主尺度（包括立柱群的纵向轴向间距 d_z ）的关系。

[0078] 同样的处理办法，横摇固有频率 ω_4 的推导过程如下：

[0079] 半潜式平台的无阻尼横摇响应控制方程为，

[0080]

$$\int I_4 \int A_{44} \left| \frac{d^2 \eta_4}{dt^2} \int \rho g V \overline{GM}_T \eta_4 \odot F_4 \right| t \quad (13)$$

[0081] 式中， I_4 ——结构物的横摇惯性矩；

[0082] A_{44} ——横摇方向上的附加质量矩；

[0083] η_4 ——平台横摇运动幅度；

[0084] \overline{GM}_T ——横稳性高度；

[0085] $F_4(t)$ ——平台所受到的横摇波浪力矩。

[0086] 根据 (13) 式，横摇固有频率 ω_4 可写为，

[0087]

$$\omega_4 \odot \sqrt{\frac{\rho g V \overline{GM}_T}{I_4 \int A_{44}}} \quad (14)$$

[0088] 与纵摇情形类似，简化后的横摇固有频率为，

[0089]

$$\omega_4 \odot \sqrt{\frac{g}{1 \int \kappa_4 \phi} \left(\frac{1 \int \phi}{L} \int \frac{GB}{r_{44}^2} \right)} \quad (15)$$

[0090] 式 (8) 和 (15) 中， r_{44} ——横摇惯性半径；

[0091] r_{55} ——纵摇惯性半径；

[0092] κ_4 ——下浮体的横摇附加质量矩系数；

[0093] κ_5 ——下浮体的纵摇附加质量矩系数。

[0094] 同纵摇惯性半径 r_{55} 的确定方法类似,立柱群和下浮体的横摇转动惯量分别为

[0095]

$$I_{cx} \odot 4\left(\frac{1}{12}m_c(3R^2 \text{ J } L^2)\right) \text{ J } \frac{1}{4}m_c d_H^2 \quad (16)$$

$$I_{px} \odot 2\left(\frac{1}{12}m_p(p_w^2 \text{ J } p_H^2)\right) \text{ J } \frac{1}{4}m_p d_H^2 \quad (17)$$

[0096] 水下部件绕 x 轴的总转动惯量为:

[0097]

$$I_x \odot I_{cx} \text{ J } I_{px} \quad (18)$$

$$\odot m_c\left(\frac{1}{3}(3R^2 \text{ J } L^2)\right) \text{ J } d_H^2 \text{ J } m_p\left(\frac{1}{6}(p_w^2 \text{ J } p_H^2)\right) \text{ J } d_H^2$$

[0098] 由横摇惯性半径 r_{44} 与整个平台总转动惯量的关系,有

[0099]

$$r_{44} \odot \sqrt{\frac{I_x \text{ J } I_{up_x}}{M}} \quad (19)$$

$$\odot \sqrt{\frac{m_c\left(\frac{1}{3}(3R^2 \text{ J } L^2)\right) \text{ J } d_H^2 \text{ J } m_p\left(\frac{1}{6}(p_w^2 \text{ J } p_H^2)\right) \text{ J } d_H^2}{M} \text{ J } \frac{I_{up_x}}{M}}$$

$$\odot \sqrt{\frac{1}{3}(1 \text{ f } \phi)(3R^2 \text{ J } L^2) \text{ J } \frac{1}{6}\phi(p_w^2 \text{ J } p_H^2) \text{ J } d_H^2 \text{ J } \frac{I_{up_x}}{M}}$$

[0100] 式中, I_{up_x} 为平台水上部分的横摇转动惯量,为常数。

[0101] 式 (19) 同样给出了横摇惯性半径 r_{44} 与平台主尺度 (包括立柱群的横向轴向间距 d_H) 的关系。

[0102] 式 (12) 和 (19) 中:

[0103] d_H , 立柱中心轴横向间距;

[0104] d_z , 立柱中心轴纵向间距;

[0105] p_L, p_w, p_H , 下浮体长、宽和高;

[0106] R , 立柱半径;

[0107] L , 立柱吃水深度;

[0108] m_c , 单立柱质量;

[0109] m_p , 单下浮体质量。

[0110] 式 (5)、(8) 和 (15) 给出了半潜式平台在垂荡 (ω_3)、纵摇 (ω_5) 和横摇 (ω_4) 三个方向上的固有频率 / 周期与体积配置因子 ϕ 以及平台主尺度参数的关系。依据式 (5)、(8) 和 (15), 在满足其它如稳性等方面的条件下, 我们可以通过直观地调整体积配置因子, 即下浮体和立柱群之间的体积占有比例, 以及下浮体中心轴横向间距和同一下浮体上两立柱中心轴间纵向间距等主尺度参数来使平台的固有频率尽可能避开常见波浪频率, 从而避免波浪和平台之间共振现象的发生。

[0111] 符号含义:

[0112] G , 结构物重心坐标

- [0113] B, 结构物浮心坐标
 [0114] GB, 结构物浮心和重心之间的距离
 [0115] B_1 , 结构物倾斜后浮心移动后的新坐标
 [0116] M_L , BG 所在直线与通过 B_1 的竖直方向所在直线的交点
 [0117] θ , 倾斜角度
 [0118] WL, 倾斜后水线面
 [0119] W_1L_1 , 静平衡水线面
 [0120] 2、设计步骤和方法

[0121] 无锚泊约束的半潜式平台主体结构在波浪上具有垂荡、纵摇和横摇三个自由度方向上的自身固有恢复频率。由于平台在作业时立管一端固定在平台上, 与纵摇和横摇方向的运动相比, 平台在垂荡响应上只具有很小的灵活性, 过大的垂荡响应会严重影响作业条件和立管寿命。因此, 垂荡对半潜平台的运动响应最为关键。但横摇和纵摇的影响也不可忽视, 尤其是波浪谱峰周期与摇动的固有周期接近时。概念设计时, 一般把平台的垂荡响应作为首要的考虑因素, 其次再考虑纵摇和横摇响应。如果垂荡固有周期可设计为远离波浪能量峰值区域, 将会受到工业界的欢迎。

[0122] 第一步, 在立柱吃水深度给定下, 对立柱群和下浮体不同的体积分配, 忽略双下浮体附加质量系数的微小变化, 根据理论表达式 (5), 便可得到不同体积配置因子下的垂荡固有频率曲线 (图 8)。

[0123] 第二步, 根据平台所服役海域的波浪主频率, 参照垂荡固有频率与体积配置因子关系曲线, 调整下浮体和立柱群之间的体积分配, 确定典型体积配置因子范围, 使在此范围内所得的平台垂荡固有频率尽可能远离波浪主频。

[0124] 第三步, 根据第二步确定的垂荡最优体积配置因子区间, 运用纵摇固有频率估算式 (8), 在垂荡体积配置因子范围内, 通过纵摇惯性半径 r_{55} 与平台主尺度的关系式 (12) 调节下浮体中心轴纵向间距 d_z 从而改变 r_{55} , 来改变纵摇固有频率, 达到纵摇固有频率远离波浪主频的目的。横摇固有频率同样的处理办法, 运用横摇固有频率估算式 (15) 和横摇惯性半径 r_{44} 与平台主尺度的关系式 (19), 调节下浮体中心轴横向间距 d_H 从而改变 r_{44} , 来改变横摇固有频率, 达到横摇固有频率远离波浪主频的目的。最终确定出适合所服役海域的具有合理体积配置因子和关键主尺度参数的半潜式平台。

[0125] 补充说明:

[0126] 为了使半潜式平台具有良好的运动响应特性, 在满足垂荡、纵摇和横摇固有频率的体积配置因子区间内以及合理的平台主尺度参数范围内, 立柱和下浮体的设计还应兼顾自身足够的强度和在各种漂浮工况下所提供平台的稳性:

[0127] 1、控制水线面的设计思想

[0128] 在甲板面积允许条件下, 尽可能增加立柱的横向和纵向间距。只有增加立柱间的距离, 才能获得较大的恢复力, 从而可以获得一个较大的初稳心高度; 另一方面, 相同的立柱排水体积下, 可以通过调整水线面来调节响应频率, 水线面小, 恢复力小, 响应周期长, 立柱高度就会较大, 从而能使下浮体潜到水面以下一定深度, 而避开海面波浪的主要作用区, 同时, 也可以使空气气隙满足要求。但是, 大尺寸立柱 (立柱剖面尺寸和立柱高度) 也有其优势, 一方面可以在立柱中划分更多的压载水舱, 有利于平台在起重作业中调整平台的稳

性；另一方面使得立柱对上层平台的支撑面积增大，立柱的垂向承载能力增强。

[0129] 2、立柱和下浮体的形状

[0130] 为减少波浪力的影响，立柱多采用圆截面设计，但由于立柱的截面尺寸比较大，圆截面加工在工艺上存在困难，因此立柱多采用方形截面设计，在截面的拐角处采用圆弧进行过渡。就下浮体而言，半潜式平台大部分浮力一般由下浮体提供，下浮体排水量约占总排水量的 2/3 左右。由于浮体须承担平台的大部分浮力，其结构尺寸较大，设计时通常靠浮体向首尾两端延伸来增大浮体的排水量。

[0131] 3、根据当地海域水深、波浪等级等海况，综合考虑目标油气田工程开发中钻井和作业以及维护的要求、平台设计性能及特点、陆上和海上施工方案、运行和操作特点、投资及费用等相关内容，最终选择结构形式，并确定工程概念设计的基础数据和设计参数。

[0132] 3、理论验证

[0133] 以即将服务于某海域的第六代某半潜式平台的简化模型为例，分别将垂荡固有频率公式 (5) 和纵摇固有频率公式 (8) 所得理论曲线和水动力学 WAMIT 软件所得相应数值模拟结果进行了比较。表 1 中的平台编号 1 为半潜式平台主尺度参数，平台编号 1a 和 1b 为相同体积配置因子 0.84 下的平台主尺度参数，其余平台编号所示说明类同。所有平台排水体积均相同。

[0134] 表 1 半潜式平台结构的主要参数

[0135] (在平台 2 基础上，保持吃水 ($L = 19\text{m}$) 和总排水量参数不变，选取 12 种典型的立柱和下浮体结构型式，5 组体积配置因子，对其固有周期 / 频率的理论估算和数值模拟结果进行了比较。平台 2a 为每一下浮体上三立柱平台，其余均为每一下浮体上两立柱平台。)

[0136]

平台编号	下浮体长 (m)	下浮体宽 (m)	下浮体高 (m)	立柱半径 (m)	体积配置因子 ϕ
1	114.07	20.12	8.81	7.5	0.84
1a	114.07	20.69	8.54	7.5	
1b	117.03	20.12	8.54	7.5	
2	114.07	20.12	8.54	8.0	0.82
2a	114.07	20.12	8.54	6.53	
3	114.07	20.12	8.23	8.5	0.79
3a	114.07	19.52	8.54	8.5	
3b	110.91	20.12	8.54	8.5	
4	114.07	20.12	7.88	9.0	0.76
4a	114.07	18.88	8.54	9.0	
4b	107.57	20.12	8.54	9.0	
5	100.0	23.0	6.05	11.0	0.57

[0137] 3.1 垂荡估算理论的验证

[0138] 图3至图6给出了体积配置因子 ϕ 分别在 0.84、0.82、0.79 和 0.76 下的垂荡 RAO，其中每个 ϕ 值下又有几个不同算例，分别表示下浮体不同的长、宽和高等尺度参数，详细参数见表 1。我们这里首先重点关注每一个体积配置因子情形下垂荡的固有周期，即，图 3 至图 6 中垂荡 RAO 最大幅值所对应的入射波周期。

[0139] 从图 3 可以看出， $\phi = 0.84$ 时，Case 1、1a 和 1b 下的半潜式平台其固有周期基本相同，均约为 28s；同样图 4 中， $\phi = 0.82$ 时 Case 2 和 2a 下半潜式平台的固有周期也都基本在 26s 附近；图 5 和 6 中的情况类似，不过这两种体积配置因子 ϕ 下所对应固有周期更小，分别在 24s 和 22s 附近。

[0140] 这说明，对表 1 所列的各种不同结构主尺度下的半潜式平台，同一 ϕ 值的半潜式平台具有基本相同的固有周期，而不同 ϕ 值则具有不一样的固有周期。不同 ϕ 值下的固有周期比较见图 7。

[0141] 既然同一 ϕ 值具有相同的固有周期而受其它因素影响很小，这与式 (5)，即，半潜式平台的垂荡固有频率（或周期）主要依赖于体积配置因子，是一致的。

[0142] 下面考察垂荡固有频率（周期）理论表达式 (5) 与数值模拟结果图 3 至图 6 在预报固有周期大小上的一致性。既然同一 ϕ 值具有相同的固有周期，为了方便比较，任取每一 ϕ 值中的一个算例，见图 7，它们在体积配置因子 0.84、0.82、0.79、0.76 和 0.57 下的固有周期大约分别为 28、26、24、22 和 18s。这些离散体积配置因子对应的固有周期与理论表达式 (5) 预报的固有周期曲线图（同算例相同的吃水深度 $L = 19\text{m}$ ；垂荡附加质量系数 $\kappa_3 = 1.95$ ；重力加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$ ）同时绘于图 8。

[0143] 从图 8 可看出，理论曲线与 WAMIT 给出的数值模拟结果较吻合。图 8 中的理论曲线，即，式 (8)，还是很好地预报了平台固有周期随体积配置因子的变化趋势。对于较高的 ϕ 值，两者吻合更好。

[0144] 3.2 纵摇估算理论的验证

[0145] 同垂荡情形类似，图 10 至图 12 给出了体积配置因子 ϕ 分别在 0.84、0.79 和 0.76 下的纵摇 RAO，这里未考虑平台立柱的纵向间距和横向间距。以图 10 为例， $\phi = 0.84$ 时，与垂荡情形不同，下浮体不同尺度下平台的固有周期略有偏差，这是由于纵摇固有周期不单由体积配置因子决定，还跟平台惯性半径，进一步平台的主尺度参数（式 (12)），重心和浮心之间的距离等有关。但在原有模型结构尺寸大体确定来微小调整具体尺寸这一大前提下，体积配置因子基本决定了平台固有周期。图 13 给出了体积配置因子 ϕ 与纵摇固有周期关系曲线与相应数值结果（图 10-12）比较，结果同样吻合良好。这表明纵摇固有频率理论预测 (8) 同样可靠。

[0146] 另外，确定纵摇固有周期的另一关键因素是立柱的纵向间距（图 2），这一点从式 (8) 中的纵摇惯性半径 r_{55} 及确定它的式 (12) 可看出。根据纵摇惯性半径 r_{55} 与整个平台总转动惯量的关系式 (12)， r_{55} 随立柱中心轴纵向间距 d_z （图 2）的减小而减小，再根据纵摇固有频率估算式 (8)， ω_5 亦减小，从而纵摇固有周期 T_5 随 d_z 的减小而增大，这与数值结果图 15 一致（ d_z 为 75m 时， T_5 大约 33s； d_z 为 70m 时， T_5 大约 41s； d_z 为 65m 时， T_5 大约 55s）。图 14 再一次表明了垂荡固有周期主要由体积配置因子决定，与立柱间距离无关。

[0147] 对横摇固有频率理论表达式 (15) 有类似的验证过程。这里不详述。

[0148] 4、工程实例

[0149] 所拟设计平台立柱吃水为 19 米,建成后将服役于中国南海。表 2 给出了中国南海表面波的海况条件。我们关注其中的表面波周期范围大约在 7-12 秒范围。

[0150] 表 2 中国南海表面波的海况条件

南海, 东部, 台风环境				
平均跨零周期	风 (m/s)		波	
	1min	1 hour	有义波高 Hs (m)	周期 Ts (s)
1 年一遇	33.2	28.4	7.4	9.4
10 年一遇	42	35.8	9.1	10.6
50 年一遇	47.5	41	11.4	11.8
100 年一遇	50.3	42.9	11.9	12.2
南海, 西部, 台风环境				
平均跨零周期	风 (m/s)		波	
	1min	1 hour	有义波高 Hs (m)	周期 Ts (s)
1 年一遇	34.6	28.9	6.5	9.5
10 年一遇	39.9	33.3	8.8	10.9
50 年一遇	45.7	38.1	11.1	12.2
100 年一遇	48.3	40.2	11.8	12.7

[0152] 第一步,根据垂荡理论表达式 (5),取立柱吃水深度 L 为 19m,从图 8 得到 ϕ 与垂荡固有周期关系曲线。

[0153] 第二步,根据表 2 给出的中国南海表面波波浪主频率,所设计平台垂荡固有周期必须远离 7-12 秒的范围,结合图 8 给出的曲线, ϕ 大约 0.5 时,固有周期大约为 15 秒,为保守起见,一般取 0.7 以上,垂荡固有周期约为 20 秒。

[0154] 第三步,在体积配置因子 ϕ 确定前提下,根据纵摇固有频率估算式 (8) 以及纵摇惯性半径 r_{55} 与整个平台总转动惯量的关系式 (12),纵摇固有周期 T_5 随 d_z 的减小而增大,再参考数值结果图 15(d_z 为 75m 时, T_5 大约 33s ; d_z 为 70m 时, T_5 大约 41s ; d_z 为 65m 时, T_5 大约 55s)。因此,从避开波浪周期的角度看,立柱中心轴纵向间距 d_z 尽可能小为好,建议取 60m 左右较恰当,此时纵摇固有周期约 50s 左右。

[0155] 第四步,横摇固有频率与纵摇情形类似。体积配置因子确定后,横摇固有频率的调整同纵摇类似,从调整横摇惯性半径 r_{44} 着手,进而调整立柱横向间距 d_H ,一般取值为 60m 左右为宜,此时横摇固有周期亦约 50s。

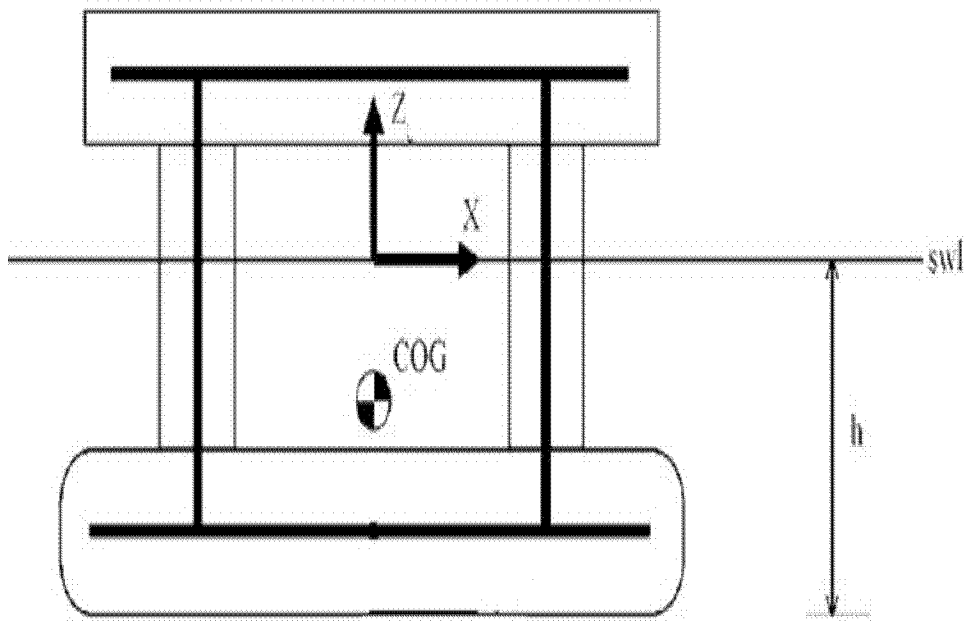


图 1

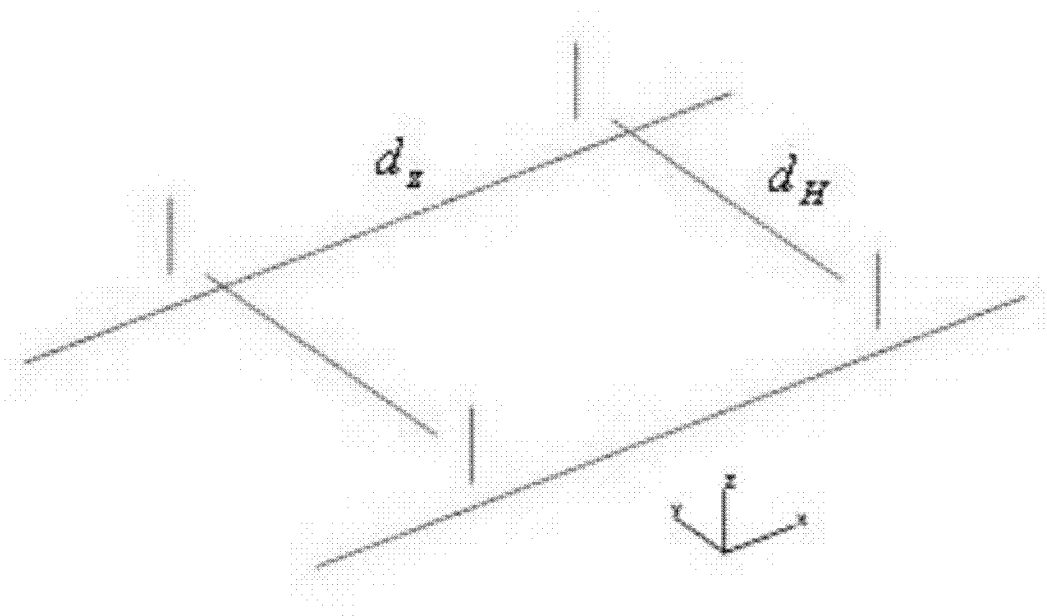


图 2

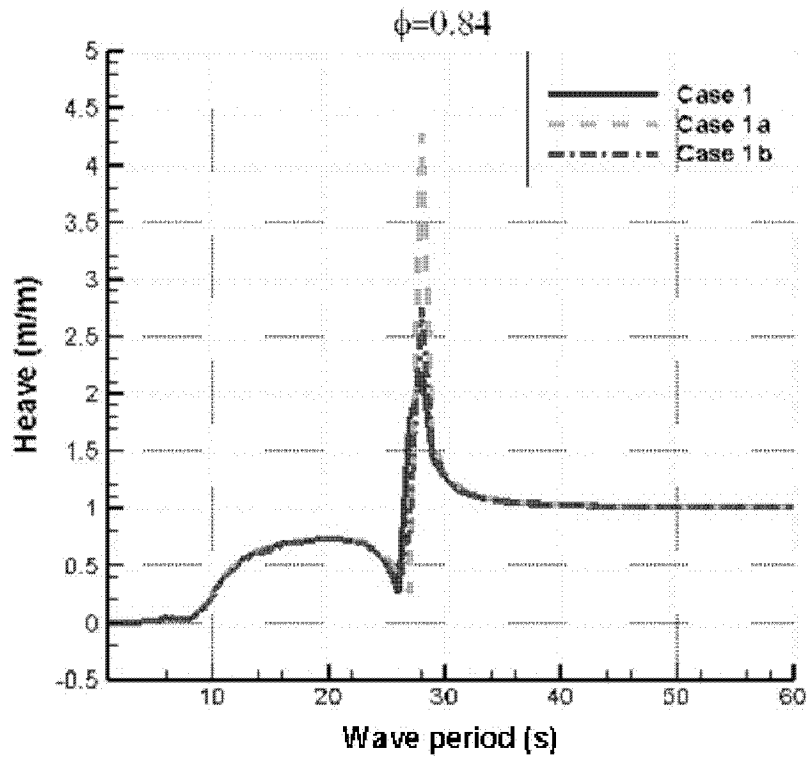


图 3

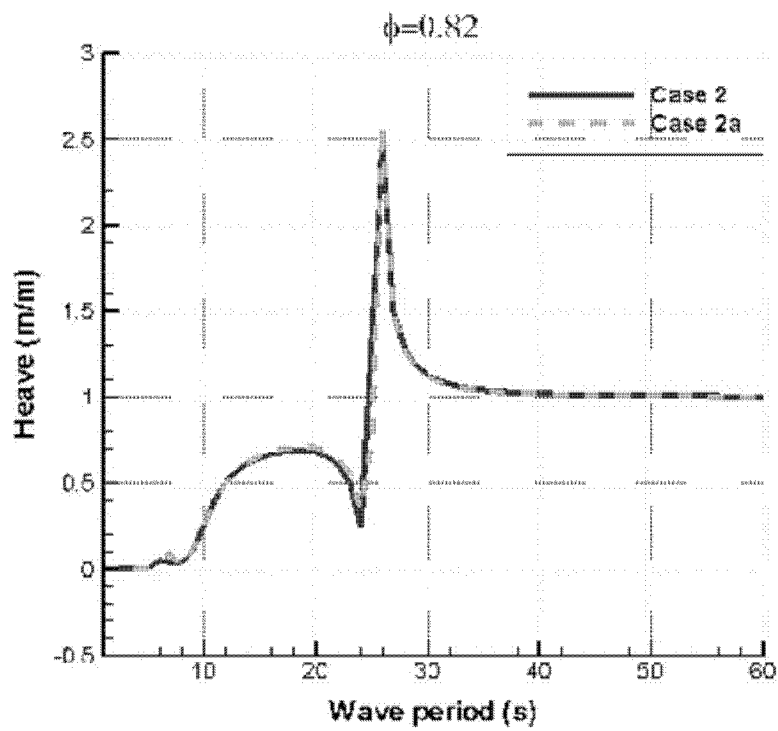


图 4

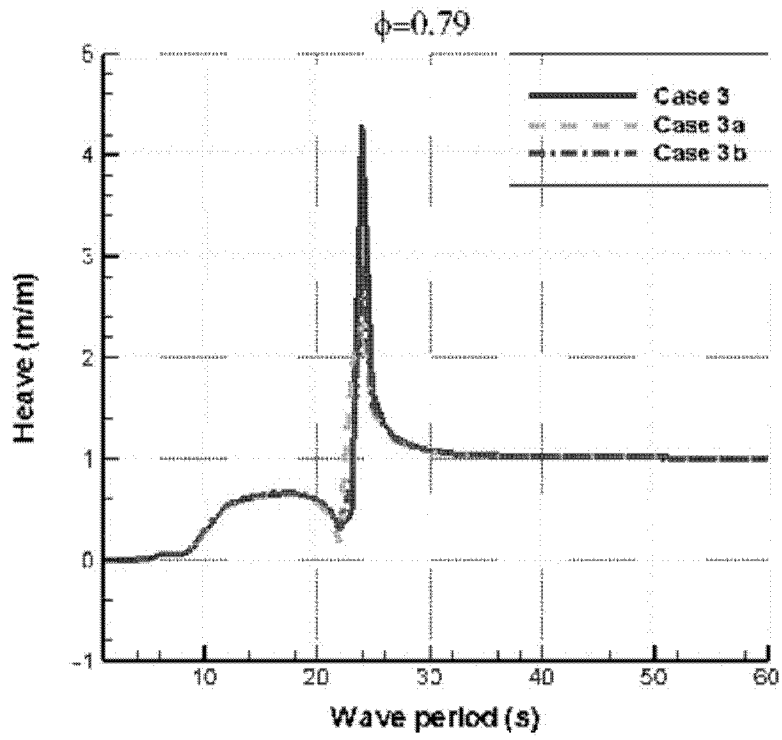


图 5

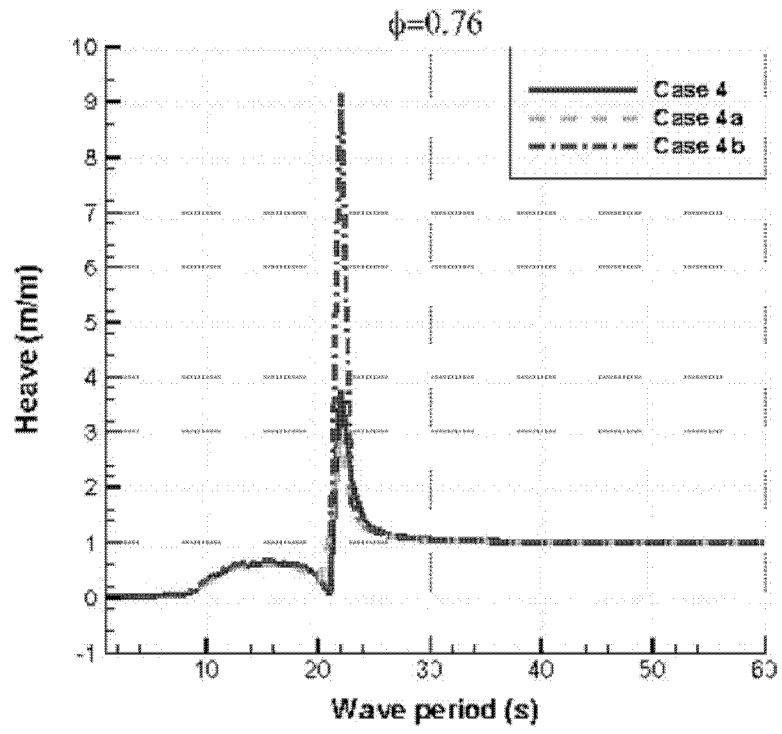


图 6

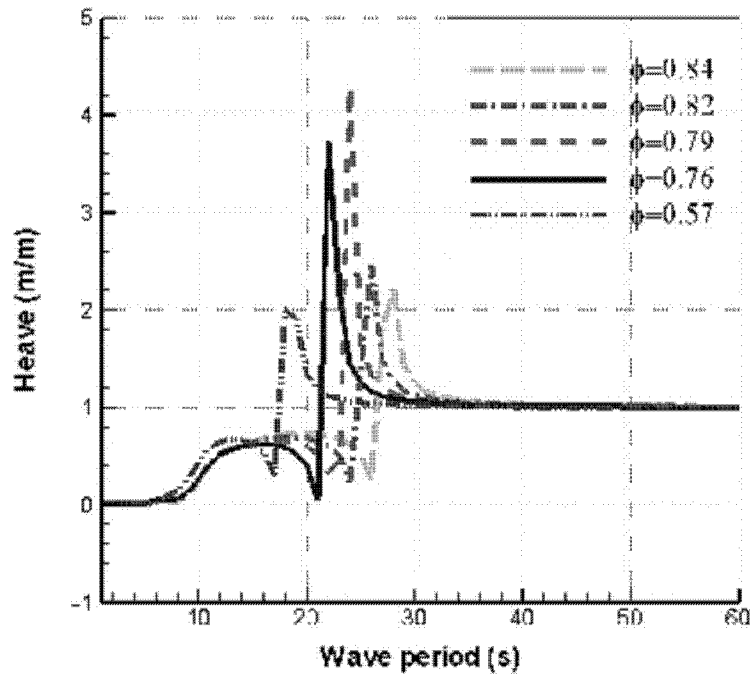


图 7

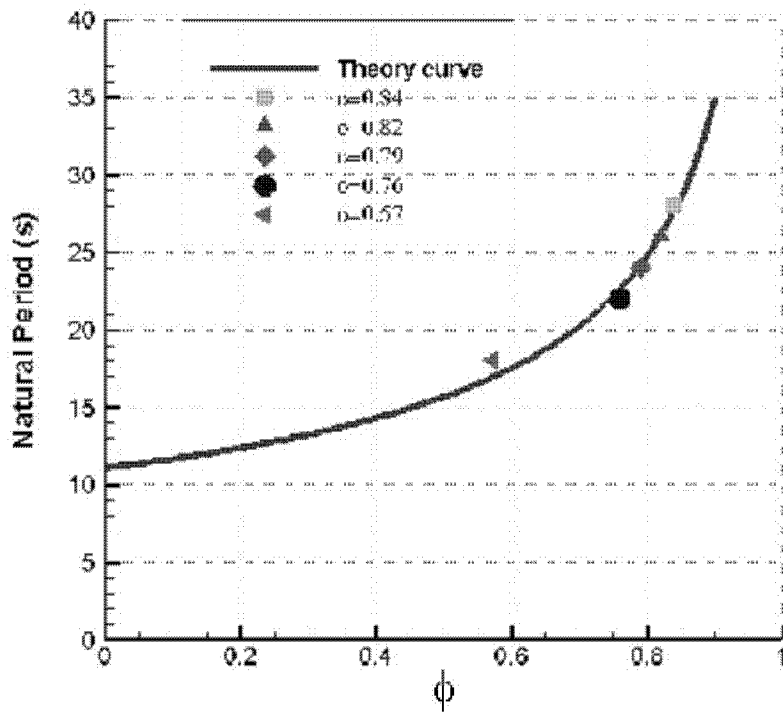


图 8

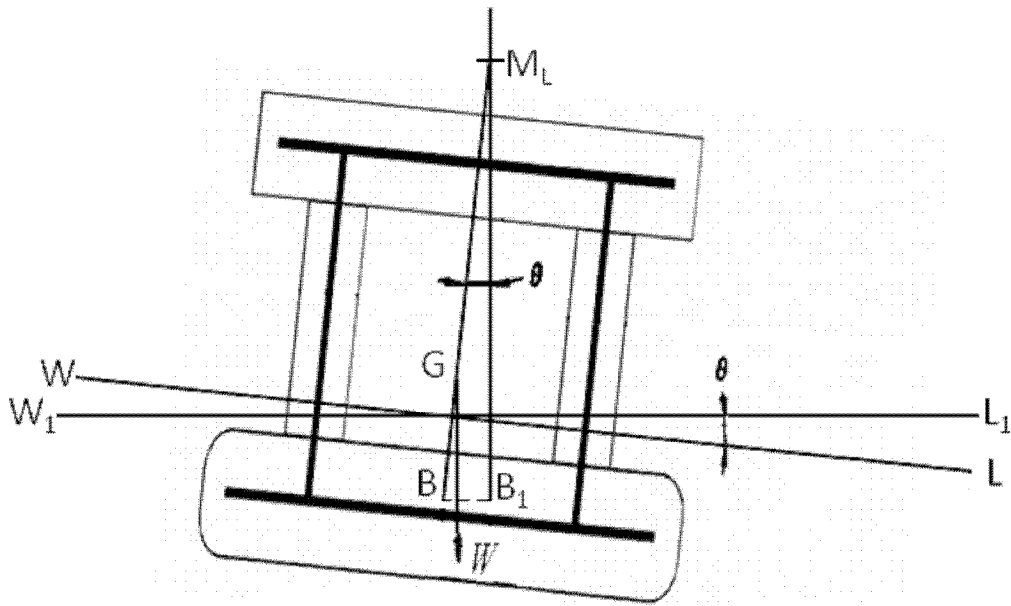


图 9

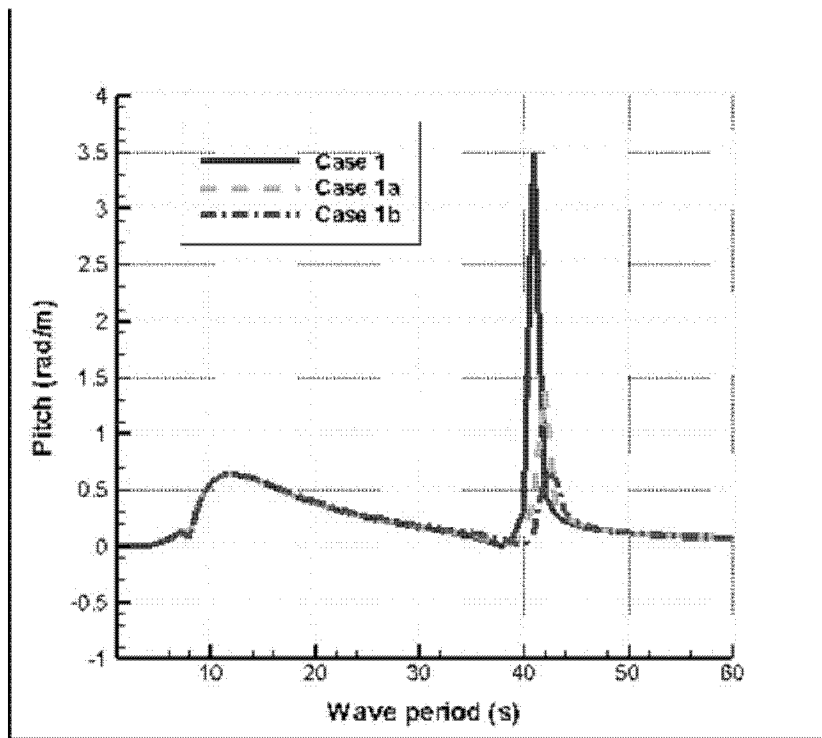


图 10

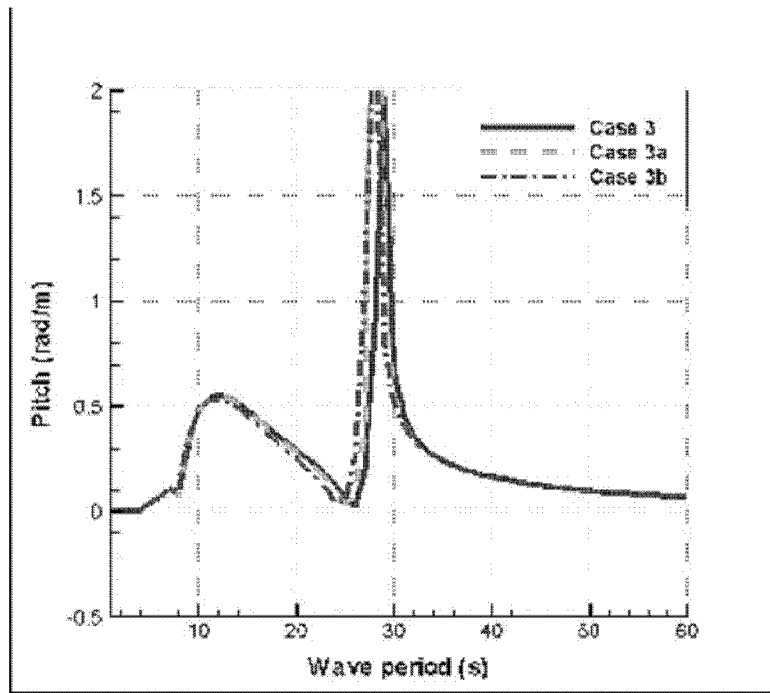


图 11

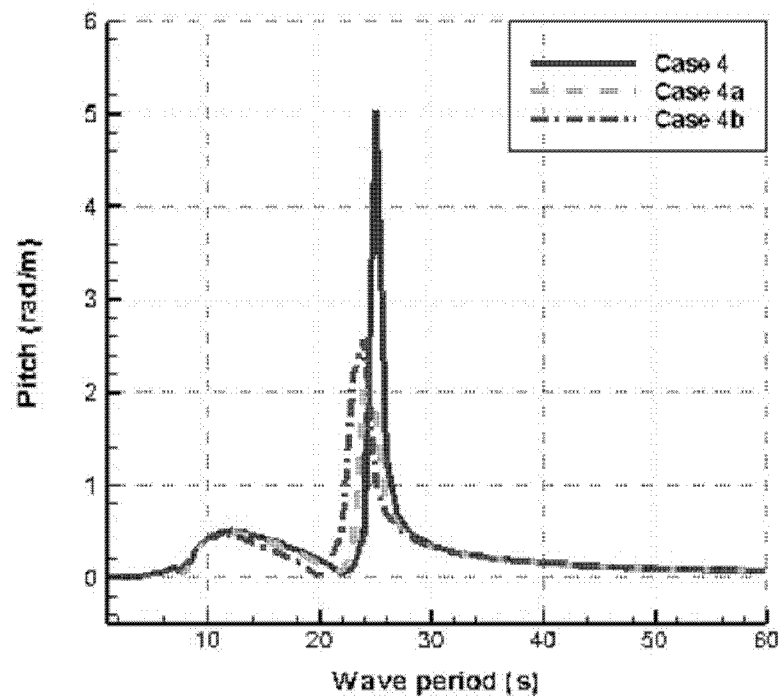


图 12

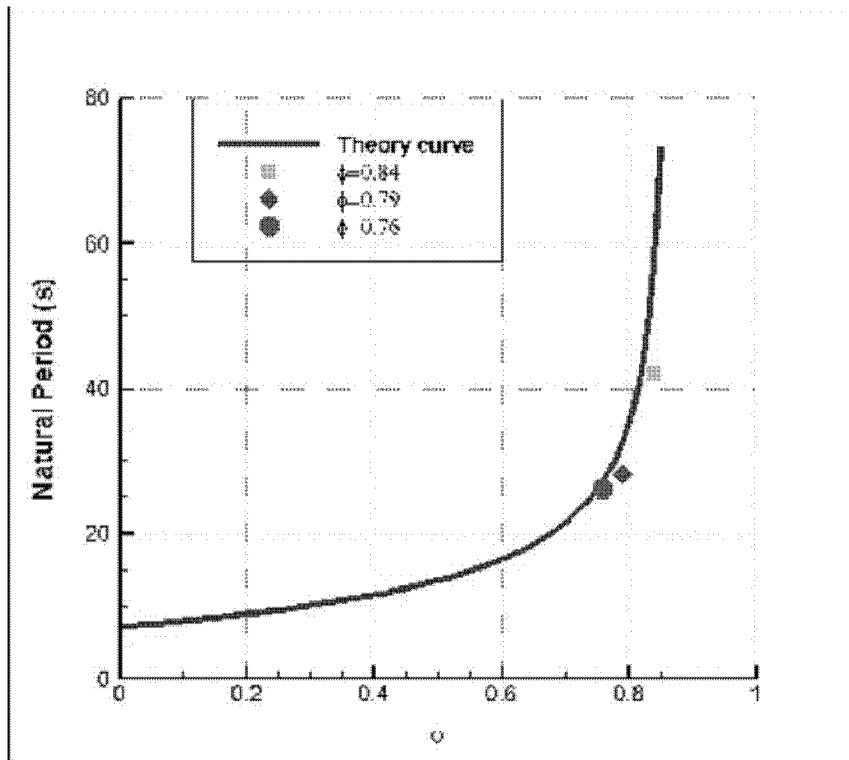


图 13

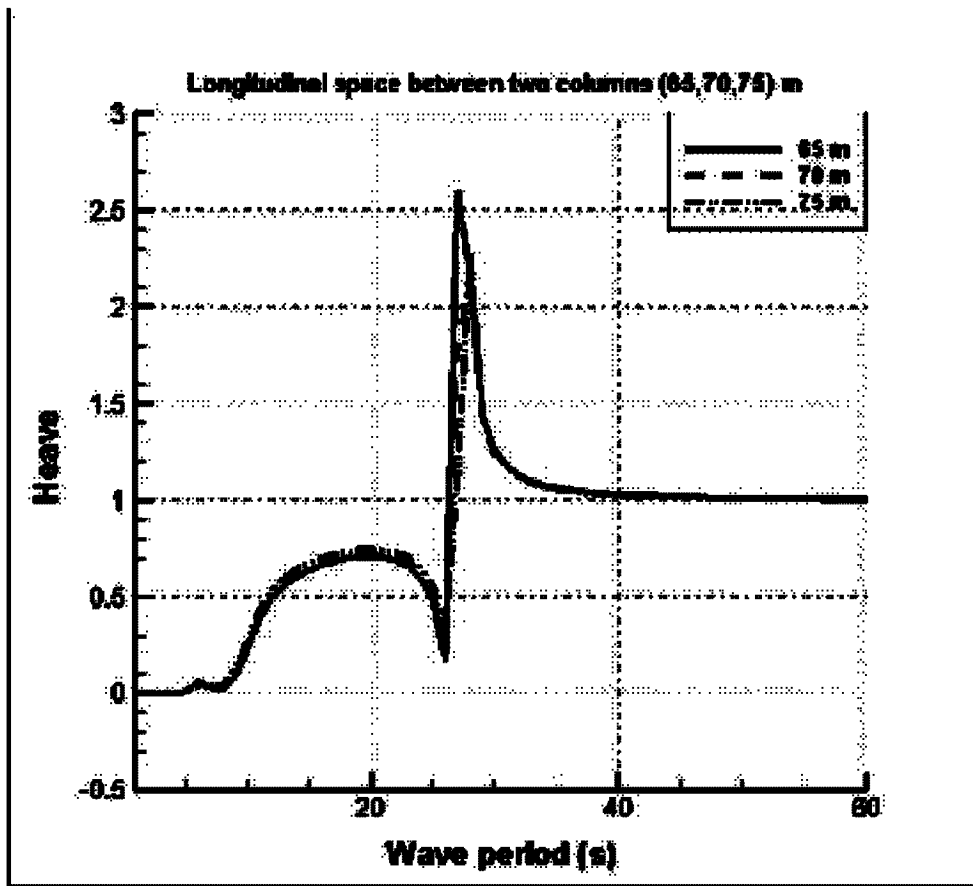


图 14

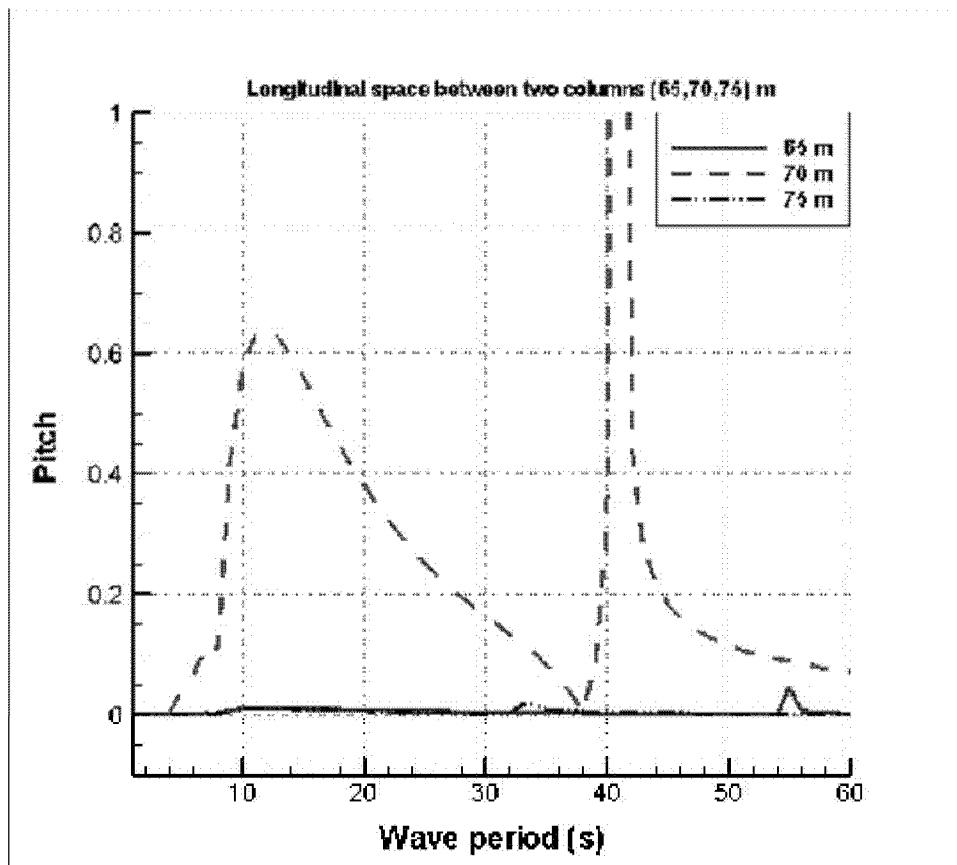


图 15