

(19)中华人民共和国国家知识产权局



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111222292 A

(43)申请公布日 2020.06.02

(21)申请号 202010017954.9

(22)申请日 2020.01.08

(71)申请人 大连理工大学

地址 116024 辽宁省大连市甘井子区凌工
路2号

(72)发明人 王科 张犀 贺大川 信晗

(74)专利代理机构 大连理工大学专利中心
21200

代理人 温福雪 侯明远

(51)Int.Cl.

G06F 30/28(2020.01)

G06F 30/17(2020.01)

G06F 113/08(2020.01)

G06F 119/14(2020.01)

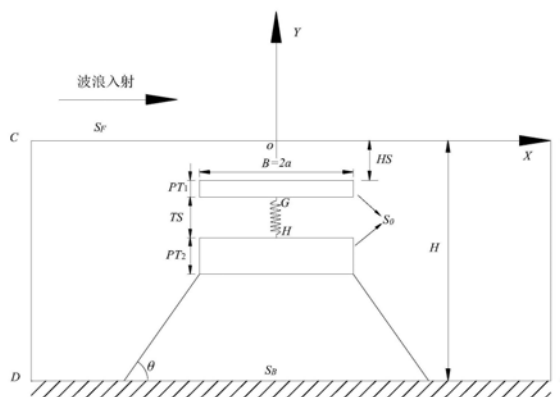
权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54)发明名称

浮标减震系统水动力计算方法

(57)摘要

本发明属于水中构筑物波浪水动力计算技术领域,公开了一种浮标减震系统水动力计算方法。本方法将边界元方法以及多浮体水动力分析应用到锚泊浮标的水动力性能研究中,提出了在浮标下方通过弹簧连接一个减震体的结构,在有限水深条件下,依据波浪的辐射和绕射理论,建立了能够求解出任何复杂结构运动响应方程的边界元数学模型,进而分析该结构透反射系数、受到的波浪力及运动响应等内容。



CN 111222292 A

1. 一种浮标减震系统水动力计算方法,其特征在于,步骤如下:

浮标减震系统形式如下:在二维的直角坐标系下,坐标原点被选取在水和空气临界的自由表面上,x轴与水平面重合,y轴垂直x轴向上为正;入射波沿着x轴的正方向向右传播,波浪表面为 S_F ,物体表面为 S_0 ,水底面为 S_B ,结构物的潜深即结构物上表面距离水面的距离为 H_S ;

双浮体浮标减震系统结构物分为上下两个部分,上部为浮标,下部为减震系统,浮标和减震系统相连接,下部减震系统通过锚链连接到海床;上部浮标厚度为 PT_1 ,下部减震系统厚度为 PT_2 ,浮标与减震系统垂直间距即浮标下表面与减震系统上表面的距离为 TS ,上部浮标的板长为 B_1 ,上部浮标的半板长为 a_1 ,下部减震系统的板长为 B_2 ,上部浮标的半板长为 a_2 ;

计算方法如下:

基于有限水深条件,水深为 H ,法向导数方向定义为指向流体域外为正,辐射时运动模态分为三种:垂荡即只沿y方向上的平动,横荡即只沿x方向上的平动和横摇即只绕结构体重心的定轴转动;

物体运动方程为:

$$[m] = \ddot{\bar{x}}_j [F] \quad (1)$$

其中:[m]为双浮体浮标减震系统的质量矩阵, \bar{x}_j 为浮标运动幅值,[F]为浮标所受外力,包括散射波浪力、辐射波浪力和静水恢复力;

整理后形成运动方程式:

$$\{-\omega^2([m]+[a])-i\omega[b]+[C_{rs}]+[S_{tkm}]+[K]\}\{\bar{x}_j\}=\{F_{3j}\} \quad (2)$$

其中: ω 为波浪圆频率,[m]为双浮体浮标减震系统的质量矩阵,[a]为附加质量矩阵,[b]为阻尼系数矩阵,[C_{rs}]为静水恢复力矩阵,[S_{tkm}]为锚链力矩阵,[K]为弹簧弹性系数矩阵, \bar{x}_j 和 F_{3j} 分别为各浮体运动幅值以及散射波浪力;

锚链力矩阵[S_{tkm}]按照下面方式求解:

在单体情况下:

$$[S_{tkm}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$S_{11} = \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0}{L} + 2K \cos^2 \theta_0$$

$$S_{13} = S_{31} = K \sin 2\theta_0 a - 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G) - \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)}{L} - \frac{T_0 \sin 2\theta_0 a}{L}$$

$$S_{22} = \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0}{L} + 2K \sin^2 \theta_0 + 2\rho g a$$

$$S_{33} = 2T_0 \cos \theta_0 a + 2T_0 \sin \theta_0 (b + z_G) + 2K \sin^2 \theta_0 a^2 + 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G)^2 - 2K \sin 2\theta_0 a (b + z_G) + \frac{2T_0 \sin 2\theta_0 a (b + z_G)}{L} + \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0 a^2}{L} + \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)^2}{L} + \frac{2}{3} \rho g a^3 + 4\rho g a b (z_B - z_G) \quad (4)$$

其中, K 是锚链线的刚度, ρ 是流体密度, a 为半板长(针对各个浮体, 半板长不同, 这里统一用 a 表示, 每个浮体需要单独计算锚链力阵), b 为PT2, L 是锚链的长度, z_B 是物体的浮心, T_0 是锚链预张力, θ_0 是锚链与水平面的夹角, z_G 为物体重心; $S_{12} = S_{21} = S_{23} = S_{32} = 0$;

由于在运动方程中已经考虑到了静水恢复力, 因此该锚链力矩阵各系数方程应该去掉静水恢复力部分:

$$S_{11} = \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0}{L} + 2K \cos^2 \theta_0$$

$$S_{13} = S_{31} = K \sin 2\theta_0 a - 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G) - \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)}{L} - \frac{T_0 \sin 2\theta_0 a}{L}$$

$$S_{22} = \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0}{L} + 2K \sin^2 \theta_0$$

$$S_{33} = 2T_0 \cos \theta_0 a + 2T_0 \sin \theta_0 (b + z_G) + 2K \sin^2 \theta_0 a^2 + 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G)^2 - 2K \sin 2\theta_0 a (b + z_G) + \frac{2T_0 \sin 2\theta_0 a (b + z_G)}{L} + \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0 a^2}{L} + \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)^2}{L} ;$$

在多体情况下:

$$[STKM] = \begin{bmatrix} [STKM^{(1)}] & & & \\ & [STKM^{(2)}] & & \\ & & \ddots & \\ & & & [STKM^{(N)}] \end{bmatrix}$$

对于双体中一体系泊结构:

$$[STKM] = \begin{bmatrix} [STKM^{(1)}] \\ 0 \end{bmatrix}$$

算法核心是弹性系数矩阵的求解, 本计算方法将上部浮标与下部减震系统的连接视为弹簧连接, 如果是刚性连接即视为弹性系数无穷大的弹簧, 使全部浮体单元均纳入弹性系数矩阵中;

弹簧弹性系数矩阵 $[K]$ 求解方法如下: 结合锚链力矩阵的推导过程, 去掉锚链力方程中的预张力, 由于在此之前已经考虑了静水恢复力, 因此在弹簧弹性系数矩阵 $[K]$ 中也要去掉静水恢复力, 得出:

对于单体:

(1) 垂向弹簧：

$$[K]_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(2) 横向弹簧：

$$[K]_2 = \begin{bmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对于多体：

$$[K] = \begin{bmatrix} [K^{(1)}] & & & \\ & [K^{(2)}] & & \\ & & \ddots & \\ & & & [K^{(N)}] \end{bmatrix}。$$

浮标减震系统水动力计算方法

技术领域

[0001] 本方法将边界元方法以及多浮体水动力分析应用到锚泊浮标的水动力性能研究中,提出了在浮标下连接一个浮体,用于给浮标减震的系统,并提出了该浮标减震系统水动力计算方法,同时该方法可以应用于各类水下多浮体系统的水动力计算。

背景技术

[0002] 鉴于海洋环境和资源的重要战略地位,海洋浮标便应运而生。海洋浮标既可以作为一种海洋环境的监测系统,又可以对海洋波浪潮流能源加以利用,是利用率极高的海洋设备。在环境监测方面,海洋浮标具备自动性、长期性、连续性等诸多优点,即使条件十分恶劣,在其他监测手段无法实施的情况下,海洋浮标仍然能够有效地开展工作,不仅对海洋表层水文以及海面气象得以观测,也可以对深海环境、生物信息,以及全球海平面等内容进行研究;在海洋能源利用方面,海洋浮标发电系统具有结构简单、转换效率高、环境适应性强的特点,可以有效地将波浪能转化为电能。按照浮体的大小,可以将海洋浮标分为大型浮标、中型浮标以及小微型浮标三类;按照功能分,海洋浮标有水文气象浮标、波浪浮标、海洋导航浮标、光学浮标、海冰浮标以及声呐浮标等;按照是否锚泊,可以将海洋浮标分为锚泊浮标和漂流浮标。在锚泊式浮标中,根据潜浮状态,又可以分为浮式浮标和潜式浮标。

发明内容

[0003] 本发明提出了在浮标下方连接一个减震体的结构。在有限水深条件下,依据波浪的辐射和绕射理论,建立了能够求解该浮标减震系统的运动响应方程的边界元数学模型,计算和评估其减震效果。建立的计算方法可以求解出任何水下多浮体系统的运动响应方程,进而分析该结构透反射系数、受到的波浪力及运动响应等内容。

[0004] 本发明的技术方案:

[0005] 一种浮标减震系统水动力计算方法,步骤如下:

[0006] 浮标减震系统形式如下:在二维的直角坐标系下,坐标原点被选取在水和空气临界的自由表面上,x轴与水平面重合,y轴垂直x轴向上为正;入射波沿着x轴的正方向向右传播,波浪表面为 S_F ,物体表面为 S_0 ,水底面为 S_B ,结构物的潜深即结构物上表面距离水面的距离为 H_S ;

[0007] 双浮体浮标减震系统结构物分为上下两个部分,上部为浮标,下部为减震系统,浮标和减震系统相连接,下部减震系统通过锚链连接到海床;上部浮标厚度为 PT_1 ,下部减震系统厚度为 PT_2 ,浮标与减震系统垂直间距即浮标下表面与减震系统上表面的距离为 TS ,上部浮标的板长为 B_1 ,上部浮标的半板长为 a_1 ,下部减震系统的板长为 B_2 ,上部浮标的半板长为 a_2 ;

[0008] 计算方法如下:

[0009] 基于有限水深条件,水深为 H ,法向导数方向定义为指向流体域外为正,辐射时运动模态分为三种:垂荡即只沿y方向上的平动,横荡即只沿x方向上的平动和横摇即只绕结

构体重心的定轴转动；

[0010] 物体运动方程为：

$$[0011] \quad [m] = \ddot{\bar{x}}_j [F] \quad (1)$$

[0012] 其中： $[m]$ 为双浮体浮标减震系统的质量矩阵， \bar{x}_j 为浮标运动幅值， $[F]$ 为浮标所受外力，包括散射波浪力、辐射波浪力和静水恢复力；

[0013] 整理后形成运动方程式：

$$[0014] \quad \{-\omega^2([m]+[a])-i\omega[b]+[C_{rs}]+[S_{tkm}]+[K]\}\{\bar{x}_j\}=\{F_{3j}\} \quad (2)$$

[0015] 其中： ω 为波浪圆频率， $[m]$ 为双浮体浮标减震系统的质量矩阵， $[a]$ 为附加质量矩阵， $[b]$ 为阻尼系数矩阵， $[C_{rs}]$ 为静水恢复力矩阵， $[S_{tkm}]$ 为锚链力矩阵， $[K]$ 为弹簧弹性系数矩阵， \bar{x}_j 和 F_{3j} 分别为各浮体运动幅值以及散射波浪力；

[0016] 锚链力矩阵 $[S_{tkm}]$ 按照下面方式求解：

[0017] 在单体情况下：

$$[0018] \quad [S_{tkm}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0019] 其中：

$$[0020] \quad S_{11} = \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0}{L} + 2K \cos^2 \theta_0$$

$$[0021] \quad S_{13} = S_{31} = K \sin 2\theta_0 a - 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G) - \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)}{L} - \frac{T_0 \sin 2\theta_0 a}{L}$$

$$[0022] \quad S_{22} = \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0}{L} + 2K \sin^2 \theta_0 + 2\rho g a$$

$$[0023] \quad \begin{aligned} S_{33} = & 2T_0 \cos \theta_0 a + 2T_0 \sin \theta_0 (b + z_G) + 2K \sin^2 \theta_0 a^2 + 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G)^2 \\ & - 2K \sin 2\theta_0 a (b + z_G) + \frac{2T_0 \sin 2\theta_0 a (b + z_G)}{L} + \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0 a^2}{L} \\ & + \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)^2}{L} + \frac{2}{3} \rho g a^3 + 4\rho g a b (z_B - z_G) \end{aligned} \quad (4)$$

[0024] 其中， K 是锚链线的刚度， ρ 是流体密度， a 为半板长（针对各个浮体，半板长不同，这里统一用 a 表示，每个浮体需要单独计算锚链力阵）， b 为PT2， L 是锚链的长度， z_B 是物体的浮心， T_0 是锚链预张力， θ_0 是锚链与水平面的夹角， z_G 为物体重心； $S_{12}=S_{21}=S_{23}=S_{32}=0$ ；

[0025] 由于在运动方程中已经考虑到了静水恢复力，因此该锚链力矩阵各系数方程应该去掉静水恢复力部分：

$$[0026] \quad S_{11} = \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0}{L} + 2K \cos^2 \theta_0$$

$$[0027] \quad S_{13} = S_{31} = K \sin 2\theta_0 a - 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G) - \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)}{L} - \frac{T_0 \sin 2\theta_0 a}{L}$$

$$[0028] \quad S_{22} = \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0}{L} + 2K \sin^2 \theta_0$$

$$[0029] \quad \begin{aligned} S_{33} = & 2T_0 \cos \theta_0 a + 2T_0 \sin \theta_0 (b + z_G) + 2K \sin^2 \theta_0 a^2 + 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G)^2 \\ & - 2K \sin 2\theta_0 a (b + z_G) + \frac{2T_0 \sin 2\theta_0 a (b + z_G)}{L} + \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0 a^2}{L} \\ & + \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)^2}{L} \end{aligned} ;$$

[0030] 在多体情况下：

$$[0031] \quad [STKM] = \begin{bmatrix} [STKM^{(1)}] & & & \\ & [STKM^{(2)}] & & \\ & & \ddots & \\ & & & [STKM^{(N)}] \end{bmatrix}$$

[0032] 对于双体中一体系泊结构：

$$[0033] \quad [STKM] = \begin{bmatrix} [STKM^{(1)}] & \\ & 0 \end{bmatrix}$$

[0034] 算法核心是弹性系数矩阵的求解，本计算方法将上部浮标与下部减震系统的连接视为弹簧连接，如果是刚性连接即视为弹性系数无穷大的弹簧，使全部浮体单元均纳入弹性系数矩阵中；

[0035] 弹簧弹性系数矩阵 [K] 求解方法如下：结合锚链力矩阵的推导过程，去掉锚链力方程中的预张力，由于在此之前已经考虑了静水恢复力，因此在弹簧弹性系数矩阵 [K] 中也要去掉静水恢复力，得出：

[0036] 对于单体：

[0037] (1) 垂向弹簧：

$$[0038] \quad [K]_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[0039] (2) 横向弹簧：

$$[0040] \quad [K]_2 = \begin{bmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[0041] 对于多体：

$$[0042] \quad [K] = \begin{bmatrix} [K^{(1)}] & & & \\ & [K^{(2)}] & & \\ & & \ddots & \\ & & & [K^{(N)}] \end{bmatrix}。$$

[0043] 本发明的有益效果：

[0044] (1) 本发明提出了一种针对浮标的减震系统，通过在浮标下方连接一个浮体形成一个系统，形成减震效果。在工程中有利于浮标在恶劣海况下发挥功能。

[0045] (2) 本发明给出了浮标减震系统的水动力特性求解方法，该算法可完成减震系统设计与水动力特性计算。

[0046] (3) 同时该算法可扩展应用于任何水下多浮体系统的水动力特性计算。

附图说明

[0047] 图1是浮标减震系统示意图。

具体实施方式

[0048] 以下结合附图和技术方案，进一步说明本发明的具体实施方式。

[0049] 第一步，将浮标减震系统，按照计算方法的说明，分解为多个单浮体，使用各浮体的几何、物理参数，代入本计算方法中，形成各系数矩阵。

[0050] 第二步，通过物体运动方程，计算得到速度势函数。

[0051] 第三步，通过流体力学基本公式，由速度势函数，得到浮标减震系统的透射系数、反射系数、波浪力、运动响应等水动力参数。

[0052] 一种浮标减震系统水动力计算方法，步骤如下：

[0053] 在二维的直角坐标系下，坐标原点被选取在水和空气临界的自由表面上，x轴与水平面重合，y轴垂直x轴向上为正；入射波沿着x轴的正方向向右传播，波浪表面为 S_F ，物体表面为 S_0 ，水底面为 S_B ，结构物的潜深即结构物上表面距离水面的距离为HS；

[0054] 双浮体浮标减震系统结构物分为上下两个部分，上部为浮标，下部为减震系统，浮标和减震系统通过弹簧连接，下部减震系统通过锚链连接到海床；上部浮标厚度为PT1，下部减震系统厚度为PT2，浮标与减震系统垂直间距即浮标下表面与减震系统上表面的距离为TS，上部浮标的板长为 B_1 ，上部浮标的半板长为 a_1 ，下部减震系统的板长为 B_2 ，上部浮标的半板长为 a_2 ；

[0055] 基于有限水深条件，水深为H，法向导数方向定义为指向流体域外为正，辐射时运动模态分为三种：垂荡即只沿y方向上的平动，横荡即只沿x方向上的平动和横摇即只绕结构体重心的定轴转动；

[0056] 物体运动方程为：

$$[0057] \quad [m] = \ddot{\bar{x}}_j [F] \quad (5)$$

[0058] 其中： $[m]$ 为双浮体浮标减震系统的质量矩阵， \bar{x}_j 为浮标运动幅值， $[F]$ 为浮标所受

外力,包括散射波浪力、辐射波浪力和静水恢复力;

[0059] 整理后形成运动方程式:

$$[0060] \quad \{-\omega^2([m]+[a])-i\omega[b]+[C_{rs}]+[S_{tkm}]+[K]\}\{\bar{x}_j\}=\{F_{3j}\} \quad (6)$$

[0061] 其中: ω 为波浪圆频率, $[m]$ 为双浮体浮标减震系统的质量矩阵, $[a]$ 为附加质量矩阵, $[b]$ 为阻尼系数矩阵, $[C_{rs}]$ 为静水恢复力矩阵, $[S_{tkm}]$ 为锚链力矩阵, $[K]$ 为弹簧弹性系数矩阵, \bar{x}_j 和 F_{3j} 分别为各浮体运动幅值以及散射波浪力;

[0062] 系统质量矩阵形式如下:

$$[0063] \quad [m]=\begin{bmatrix} [m^{(1)}] & & & \\ & [m^{(2)}] & & \\ & & \ddots & \\ & & & [m^{(N)}] \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0064] 其中, $[m^{(m)}]$ ($m=1,2,\dots,N$)为各浮体m的质量矩阵,表示为:

$$[0065] \quad [m^{(m)}]=\begin{bmatrix} m_c^m & & \\ & m_c^m & \\ & & I_z^m \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0066] 式中, m_c^m 为浮体m的质量, I_z^m 为浮体m的转动惯量;

[0067] 当物体浮在水面上时,其静水恢复力 $[C_{rs}]$ 用如下公式表示:

$$[0068] \quad [C_{rs}]=\begin{bmatrix} [C_{rs}^{(1)}] & & & \\ & [C_{rs}^{(2)}] & & \\ & & \ddots & \\ & & & [C_{rs}^{(N)}] \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[0069] \quad [C_{rs}^{(m)}]=\rho g \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{wp}^m & -(x_f^m-x_c^m)A_{wp}^m \\ 0 & -(x_f^m-x_c^m)A_{wp}^m & (y_b^m-y_c^m)V^m+(x_k^m)^2 A_{wp}^m \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0070] 式中, A_{wp}^m 为浮体m的水线面积, x_f^m 为浮体m水线漂心坐标, y_b^m 为浮体m浮心坐标, (x_c^m,y_c^m) 为浮体m重心坐标, x_k^m 为水线面 A_{wp}^m 绕x轴的转动半径, V^m 为浮体m排水体积, ρ 为液体密度, g 为重力加速度;

[0071] $(x_k^m)^2 A_{wp}^m$ 通过下式进行计算:

$$[0072] \quad \int_{S_m} (x-x_c^m)^2 \cdot n_2^m ds = (x_k^m)^2 A_{wp}^m \quad (11)$$

[0073] 其中 n_2^m 为浮体m在y方向上的向量,对于潜体而言: $A_{wp}^m = 0, x_k^m = 0$;

[0074] 锚链力 $[S_{tkm}]$ 按照下面方式求解:

[0075] 在单体情况下:

$$[0076] \quad [S_{tkm}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0077] 其中:

$$[0078] \quad S_{11} = \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0}{L} + 2K \cos^2 \theta_0$$

$$[0079] \quad S_{13} = S_{31} = K \sin 2\theta_0 a - 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G) - \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)}{L} - \frac{T_0 \sin 2\theta_0 a}{L}$$

$$[0080] \quad S_{22} = \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0}{L} + 2K \sin^2 \theta_0 + 2\rho g a$$

$$[0081] \quad \begin{aligned} S_{33} = & 2T_0 \cos \theta_0 a + 2T_0 \sin \theta_0 (b + z_G) + 2K \sin^2 \theta_0 a^2 + 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G)^2 \\ & - 2K \sin 2\theta_0 a (b + z_G) + \frac{2T_0 \sin 2\theta_0 a (b + z_G)}{L} + \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0 a^2}{L} \\ & + \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)^2}{L} + \frac{2}{3} \rho g a^3 + 4\rho g a b (z_B - z_G) \end{aligned} \quad (13)$$

[0082] 其中,K是锚链线的刚度, ρ 是流体密度,a为半板长(针对各个浮体,半板长不同,这里统一用a表示,每个浮体需要单独计算锚链力阵),b为PT2,L是锚链的长度, z_B 是物体的浮心, T_0 是锚链预张力, θ_0 是锚链与水平面的夹角, z_G 为物体重心; $S_{12} = S_{21} = S_{23} = S_{32} = 0$;

[0083] 由于在运动方程中已经考虑到了静水恢复力,因此该锚链力矩阵各系数方程应该去掉静水恢复力部分:

$$[0084] \quad S_{11} = \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0}{L} + 2K \cos^2 \theta_0$$

$$[0085] \quad S_{13} = S_{31} = K \sin 2\theta_0 a - 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G) - \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)}{L} - \frac{T_0 \sin 2\theta_0 a}{L}$$

$$[0086] \quad S_{22} = \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0}{L} + 2K \sin^2 \theta_0$$

$$[0087] \quad \begin{aligned} S_{33} = & 2T_0 \cos \theta_0 a + 2T_0 \sin \theta_0 (b + z_G) + 2K \sin^2 \theta_0 a^2 + 2K \cos^2 \theta_0 (b + z_G)^2 \\ & - 2K \sin 2\theta_0 a (b + z_G) + \frac{2T_0 \sin 2\theta_0 a (b + z_G)}{L} + \frac{2T_0 \cos^2 \theta_0 a^2}{L} \\ & + \frac{2T_0 \sin^2 \theta_0 (b + z_G)^2}{L} \end{aligned} ;$$

[0088] 在多体情况下:

$$[0089] \quad [STKM] = \begin{bmatrix} [STKM^{(1)}] & & & \\ & [STKM^{(2)}] & & \\ & & \ddots & \\ & & & [STKM^{(N)}] \end{bmatrix}$$

[0090] 对于双体中一体系泊结构：

$$[0091] \quad [STKM] = \begin{bmatrix} [STKM^{(1)}] & \\ & 0 \end{bmatrix}$$

[0092] 弹簧弹性系数矩阵 $[K]$ 求解方法如下：结合锚链力矩阵的推导过程，去掉锚链力方程中的预张力，由于在此之前已经考虑了静水恢复力，因此在 $[K]$ 矩阵中也要去掉静水恢复力，得出：

[0093] 对于单体：

[0094] (1) 垂向弹簧：

$$[0095] \quad [K]_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[0096] (2) 横向弹簧：

$$[0097] \quad [K]_2 = \begin{bmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[0098] 对于多体：

$$[0099] \quad [K] = \begin{bmatrix} [K^{(1)}] & & & \\ & [K^{(2)}] & & \\ & & \ddots & \\ & & & [K^{(N)}] \end{bmatrix}。$$

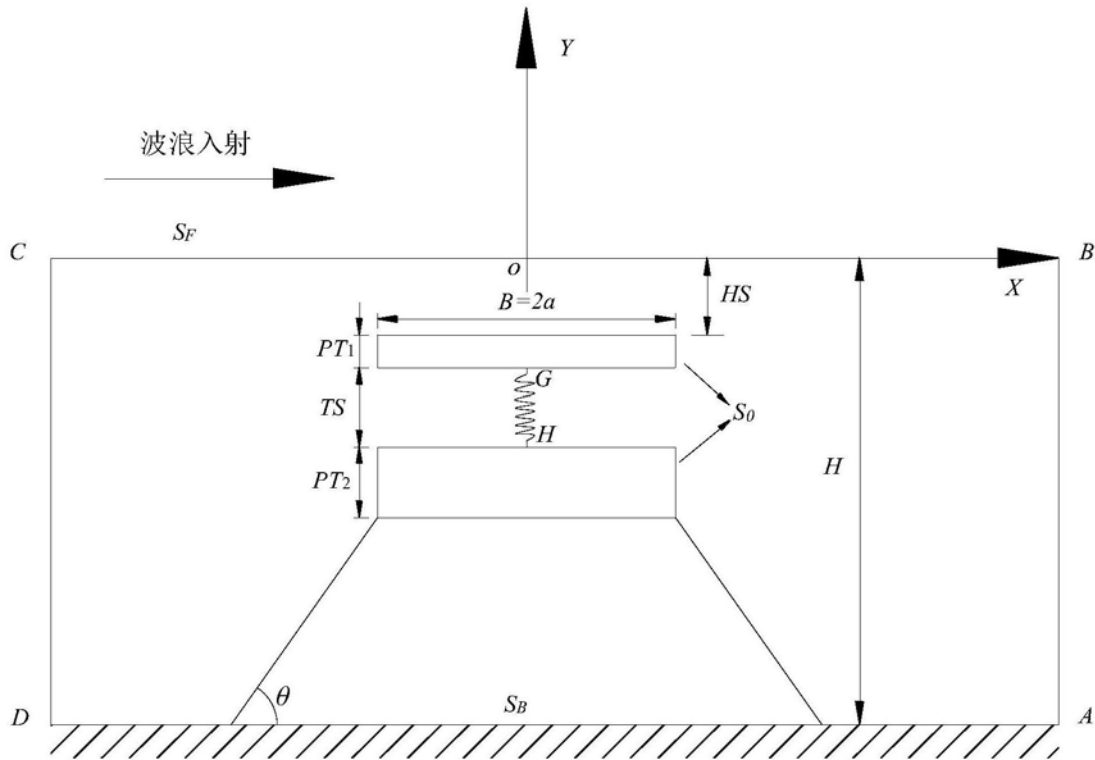


图1