

系泊系统的设计

摘要

本报告以近海观测网点的系泊系统为主要研究对象，在忽略风载和水流力产生的波频振荡和低频振荡以及锚链弹性伸缩的情况下，对系泊系统的静平衡问题进行了研究。首先，综合考虑风载、水流力等影响，对系统中各个物体分别列写平衡方程，并运用数值迭代的办法得到了满足理想工况约束的系统状态。其次，在模型建立过程中，通过遍历搜索得到了各种极限情况下的系统状态。再次，通过控制变量的方法，得到了各单一因素对浮标吃水深度、钢桶倾角以及锚链在锚点处与海床夹角的影响关系。最后通过比较，指出采用 V 型锚链时，浮标游动区域最小，是系泊系统设计中较理想的选择。本报告在建模分析过程中原理简单，计算较快，计算结果较为精确，可作为系泊系统设计时的参考。

关键词：系泊系统，静平衡，遍历搜索，控制变量

1. 研究背景、意义及问题重述

海洋中拥有丰富的生物、化学、矿产等资源，其开发利用潜力巨大，前景广阔，为实现人类社会的可持续发展提供了必要的物质基础^[1]。各沿海国家纷纷把目光投向海洋，加快了对海洋的研究开发和利用，将其视为解决陆地资源短缺、人口膨胀、环境恶化等问题的出路。我国海洋资源虽然丰富，但开发利用的程度很低^[2]，向海洋进军，合理开发利用海洋资源，对我国经济的发展具有重要意义。

为了实现对海洋资源的可持续利用，各个国家都加强了对近海海洋环境的监测^[3]。以在岸边和近海区域的岸基台站和浮标为主要观测平台、单要素和多要素结合对海环境实施观测^[4]。近浅海观测网的传输节点由浮标系统、系泊系统和水声通讯系统组成，具体如

图 1 所示。各系统的正常工作对锚链末端与海床的夹角以及钢桶的倾斜程度有一定的要求。具体而言，锚链末端与锚的链接处的切线方向与海床的夹角不应超过 16 度，否则锚会被拖行，致使节点移位丢失；钢桶竖直时，水声通讯设备的工作效果最佳。若钢桶倾斜，则影响设备的工作效果。钢桶的倾斜角度（钢桶与竖直线的夹角）超过 5 度时，设备的工作效果较差。因此，系泊系统的设计问题归结为确定锚链的型号、长度和重物球的质量，使得浮标的吃水深度和游动区域及钢桶的倾斜角度尽可能小。

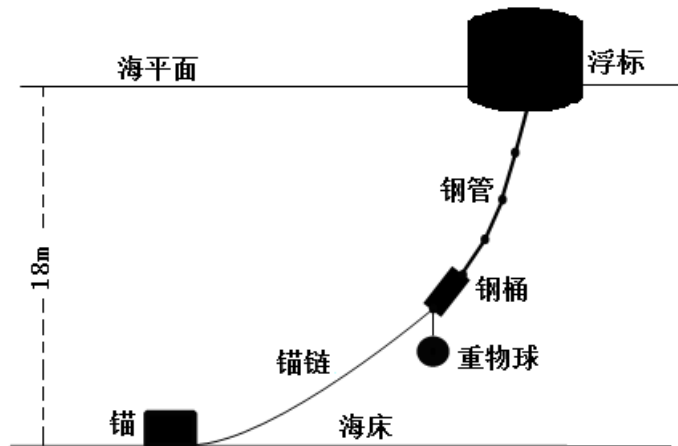


图 1 传输节点示意图

具体地，有以下几个问题：

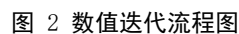
1. 固定重物球以及海水静止情况下，钢桶和各节钢管的倾斜角度、锚链形状、浮标的吃水深度和游动区域的建模分析和计算；
2. 通过调节重物球质量，满足各系统正常工作的工况要求；

本报告将通过分析、简化传输节点，并建立数学模型对系泊系统设计开展研究，并逐一回答上述问题。

本题目为悬链线锚泊系统，几何特征为锚泊系统的锚泊线沿水平向展开。浮标受风、浪、流的作用，在平均流力、风力影响下达到静平衡，并产生平均静位移。同时，系统在风浪、海流作用下还会产生振荡。因而，整个系统运动是浮标运动与锚泊系统的运动相耦合，静位移运动、波频振荡运动和低频振荡运动相迭加的一个极其复杂的运动过程。在本题研究过程中，忽略波频振荡运动和低频振荡运动的影响，只考虑静位移运动，即锚泊系统在海流力、风向载荷、重力、浮力、海底拉力的作用下达力平衡和力矩平衡。具体的求解过程包括以下三个阶段：

先假定吃水深度,由上至下列写浮标、钢管、钢桶的静平衡方程和力矩平衡方程^[5]。同时对锚链中各链环进行受力分析,使各链环达到平衡状态。因而得到各系统状态用吃水深度表示的函数表达式。

由于系统受到锚链长度，海水深度，以及各系统正常工作时工况要求的约束，将整个问题的求解转化为有约束条件下的数值迭代过程，并通过迭代计算找到满足约束条件的可行解。具体的迭代流程图如图 2 所示。



(3) 反向确定系统状态

从锚和锚链末端开始，将通过迭代求解得到的满足约束条件的系统状态代入，即可确定锚链形状，钢桶、钢管倾角，浮标吃水深度和游动区域，进而完成问题求解。

3. 模型假设与约定

- 1) 海流力方向和风向荷载方向均为水平；
- 2) 浮标保持竖直状态，不倾斜；
- 3) 锚泊线不考虑弹性伸长，密度均匀；
- 4) 浮标与钢管、各个钢管之间、钢管与钢桶、钢桶与锚链之间的连接均为铰接；
- 5) 锚链和重物球是铸钢材料，密度为 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ ，便于计算求浮力；
- 6) 重物球竖直悬挂在钢桶下方，且不考虑重物球受到的海水力；
- 7) 不考虑系统的波频振荡运动和低频振荡运动，只考虑静位移运动。

4. 符号说明及名词定义

表 1 符号说明及名词定义

含义	符号	含义	符号
浮标	f	浮标吃水深度	h
钢管	g	拉力	T
钢桶	t	风力	F
重物球	q	水流力	F_s
锚链	l	浮力	F_f
重力	G	锚链微段	$d\theta$
链与水平面的角度	θ	直径	D
物体在风向法平面的投影面积	S	风速	v
水流速度法平面的投影面积	S_s	水速	v_s

5. 模型的建立与求解

根据第 2 小节给出的分析思路和求解办法，将在系统受到水平方向恒定的风力荷载、水流力，重力、浮力、海底锚对锚链的拉力，分别对各部分列静力平衡方程和力矩平衡方程。假定浮标吃水深度为 h ，则系统各状态参量可描述为 h 的函数表达式 $f(h)$ 。

在给定浮标吃水深度 h ，假设重物球和锚链材质均为铸钢的情况下，得到浮标在风向法平面的投影面积 S 和水流力法平面的投影面积 S_s 分别为：

$$\begin{cases} S = D_f(h_f - h) \\ S_s = D_f h \end{cases} \quad (0-1)$$

其中 D_f 和 h_f 分别为浮标底面直径和高度。

在各自投影面积作用下，得到在给定风速 v 和海水流速 v_s 情况下的风载 F 和水流力 F_s 分别为

$$\begin{cases} F = 0.625 \times S v^2 \\ F_s = 374 \times S_s v_s^2 \end{cases} \quad (0-2)$$

浮标、第 i 节钢管、钢桶、重物球和锚链的排水体积 V_f 、 V_{gi} 、 V_t 、 V_q 和 V_l 可分别表示为：

$$\begin{cases} V_f = \frac{\pi D_f^2}{4} h \\ V_{gi} = (L_{gi} \times \frac{\pi D_{gi}^2}{4}) \\ V_t = L_t \times \frac{\pi D_t^2}{4} \\ V_q = \frac{m_q}{\rho} \\ V_l = \frac{m_l L_l}{\rho} \end{cases} \quad (0-3)$$

其中， D_f 为浮标地面直径； L_g 和 D_g 分别为单节钢管长度和钢管底面直径； L_t 和 D_t 分别为钢桶的长度和底面直径； m_q 为重物球质量； m_l 和 L_l 分别为单位长度质量和锚链长度； ρ 为铸钢密度，取值为 $\rho = 7800 \text{ kg} / \text{m}^3$ 。

系统受到的浮力 F_f ：

$$F_f = \rho_s g (V_f + \sum_{i=1}^4 V_{gi} + V_t + V_q + V_l) \quad (0-4)$$

ρ_s 为海水密度。

系统重力 G ：

$$G = g(m_f + 4m_g + m_t + m_q + m_l L_l) \quad (0-5)$$

5.1. 问题 1 的求解

5.1.1 问题 1 的建模分析

根据力平衡和力矩平衡原理，分别对浮标、钢管、钢桶和锚链分别进行受力分析，得到各相应的平衡方程。

I. 对浮标受力分析有：

对浮标的受力分析如图 3 所示。其中 F_{ff} 为浮标受到的浮力， G_f 为浮标受到的重力， F 为浮标受到的横向风载荷， T_f 为浮标受到的钢管的作用力，其与水平面的夹角为 φ_f 。对浮标列写平衡方程有：

$$\text{水平方向： } T_f \cos \varphi_f = F$$

$$\text{竖直方向： } T_f \sin \varphi_f = F_{ff} - G_f$$

解得：

$$\begin{cases} \varphi_f = \arctan \frac{F_{ff} - G_f}{F} \\ T_f = \sqrt{(F_{ff} - G_f)^2 + F^2} \end{cases} \quad (1-1)$$

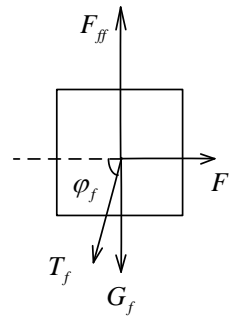


图 3 浮标受力分析

II. 对单个钢管受力分析有：

对第 i 个钢管受力分析如图 4 所示。 $T_{g(i-1)}$ 为第 $i-1$ 根钢管对第 i 根钢管的作用力（对第一根钢管，其为浮标对该钢管的作用力），其与水平面的夹角为 $\theta_{g(i-1)}$ ； T_{gi} 为第 $i+1$ 根钢管对第 i 根钢管的作用力（对第四根钢管，其为锚链和重物对该钢管的作用力），其与水平面的夹角为 θ_{gi} ； G_{gi} 为该根钢管所受到的浮重，即物体的重力和浮力之差，其计算表达式为：

$$G_{gi} = m_{gi} g - \rho_s g V_{gi}$$

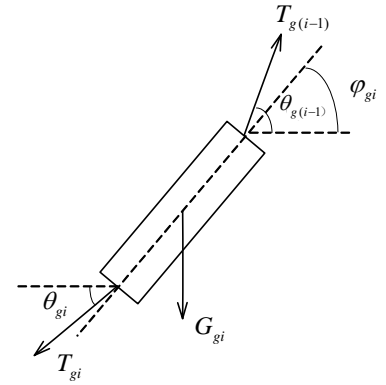


图 4 第 i 个钢管受力分析

对该钢管列平衡方程有：

$$\text{水平方向： } T_{g(i-1)} \cos \theta_{g(i-1)} = T_{gi} \cos \theta_{gi}$$

$$\text{竖直方向： } T_{g(i-1)} \sin \theta_{g(i-1)} = G_{gi} + T_{gi} \sin \theta_{gi}$$

$$\text{力矩平衡： } T_{g(i-1)} \sin(\theta_{g(i-1)} - \varphi_{gi}) = T_{gi} \sin(\varphi_{gi} - \theta_{gi})$$

对上式求解得：

$$\begin{cases} T_{gi} = \sqrt{(T_{g(i-1)} \cos \theta_{g(i-1)})^2 + (T_{g(i-1)} \sin \theta_{g(i-1)} - G_{gi})^2} \\ \theta_{gi} = \arctan \frac{T_{g(i-1)} \sin \theta_{g(i-1)} - G_{gi}}{T_{g(i-1)} \cos \theta_{g(i-1)}} \\ \varphi_{gi} = \arctan \frac{T_{g(i-1)} \sin \theta_{g(i-1)} + T_{gi} \sin \theta_{gi}}{T_{gi} \cos \theta_{gi} + T_{g(i-1)} \cos \theta_{g(i-1)}} \end{cases} \quad (1-2)$$

III. 对钢桶受力分析有：

对钢桶受力分析如图 5 所示。 T_{g4} 为第 4 根钢管对钢桶的作用力，其与水平面的夹角为 θ_{g4} ； T_t 为锚链对钢桶的作用力，其与水平面的夹角为 θ_t ；钢桶与水平面的夹角为 φ_t ， G_q 和 G_t 分别为重物球和钢桶的浮重，其表达式为：

$$\begin{cases} G_q = m_q g - \rho_s g V_q \\ G_t = m_t g - \rho_s g V_t \end{cases}$$

对钢管列写力和力矩平衡方程有：

$$\text{水平方向：} T_{g4} \cos \theta_{g4} = T_t \cos \theta_t$$

$$\text{坚直方向：} T_{g4} \sin \theta_{g4} = T_t \sin \theta_t + G_q + G_t$$

$$\text{力矩平衡：} T_{g4} \sin(\theta_{g4} - \varphi_t) = T_t \sin(\varphi_t - \theta_t)$$

求解得到：

$$\begin{cases} T_t = \sqrt{(T_{g4} \cos \theta_t)^2 + (T_{g4} \sin \theta_t - G_t - G_q)^2} \\ \theta_t = \arctan \frac{T_{g4} \sin \theta_{g4} - G_t - G_q}{T_{g4} \cos \theta_{g4}} \\ \varphi_t = \arctan \frac{T_t \sin \theta_t + T_{g4} \sin \theta_{g4} + G_q}{T_{g4} \cos \theta_{g4} + T_t \cos \theta_t} \end{cases} \quad (1-3)$$

IV. 对锚链第*i*节受力分析有：

对第*i*节锚链进行受力分析如图 6 所示。 T_{i-1} 为第*i*-1节锚链对第*i*节锚链的作用力（对第一节锚链，其为钢桶和重物球对其的作用力），其与水平面的夹角为 θ_{i-1} ； T_i 为第*i*+1节锚链对第*i*节锚链的作用力，其与水平面的夹角为 θ_i ^[6]， G_i 为单节锚链的浮重，其表达式为：

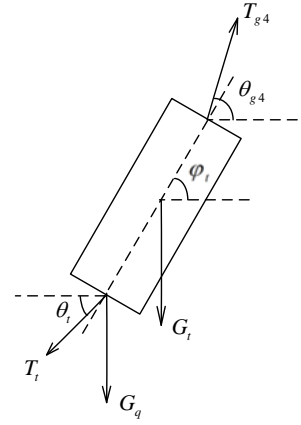


图 5 钢桶受力分析

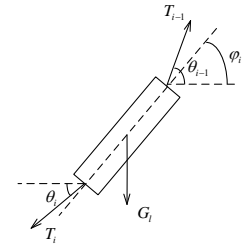


图 6 第*i*节锚链受力分析

$$G_l = m_l g - \rho_s g V_l$$

其中， m_l 为单节锚链的质量， V_l 为单节锚链排水量。

对单节锚链列写力和力矩平衡方程有：

$$\text{水平方向： } T_{i-1} \cos \theta_{i-1} = T_i \cos \theta_i$$

$$\text{竖直方向： } T_{i-1} \sin \theta_{i-1} = T_i \sin \theta_i + G_l$$

$$\text{力矩平衡： } T_{i-1} \sin(\theta_{i-1} - \varphi_i) = T_i \sin(\varphi_i - \theta_i)$$

同时考虑，单节锚链的水平 and 纵向位移 dx 和 dy 分别为：

$$\begin{cases} dx = \cos \varphi_i ds \\ dy = \sin \varphi_i ds \end{cases} \quad (1-4)$$

则锚链的水平 and 垂直位移 x_l 和 H_l 分别为：

$$\begin{cases} x_l = \sum_{i=1}^{210} dx_i \\ H_l = \sum_{i=1}^{210} dy_i \end{cases} \quad (1-5)$$

根据系统几何约束，总高度应为浮标吃水深度、钢管垂直高度、钢桶垂直高度以及锚链垂直高度之和，即

$$H = h + \sum_{i=1}^4 H_{gi} + H_t + H_l \quad (1-6)$$

其中，第 i 节钢管的高度为 $H_{gi} = L_g \sin \varphi_{gi}$ ，即单节钢管长度在垂直方向的投影。当满足系统几何约束要求时，总高度应该为海水深度，即 $H = 18m$ 。

在计算水平位移时，总的水平伸展为锚链的水平位移、钢桶的水平位移和钢管的水平位移之和：

$$x_{all} = \sum_{i=1}^4 |x_{gi}| + |x_t| + |x_l| \quad (1-7)$$

其中， $x_{gi} = L_g \cos \varphi_{gi}$ ， $x_t = L_t \cos \varphi_t$ ， L_t 为钢桶长度。

5.1.2 问题 1 的求解结果

根据数值迭代思路，当吃水深度从 0 到 $2m$ 的过程中，求取得到的最小吃水深度即为本题所要求的最优解。特别需要注意的是，在本题求解过程中，存在锚链不完全伸展的状况，故部分锚链将叠在一起，从而形成一定的浮标变化区域。假设有 m 节锚链处于完全伸展状况，则锚链水平长度将在如下的最大值 x_{l_max} 和最小值 x_{l_min} 之间变化，相应

的计算公式为:

$$\begin{cases} x_{l_max} = \sum_{i=1}^m dx_i + (210-i)ds \\ x_{l_min} = \sum_{i=1}^m dx_i \end{cases} \quad (1-8)$$

求解本题的状态参量条件如下表 2 所示:

表 2 状态参量条件

状态参量	参量值	状态参量	参量值
浮标直径	$D_f = 2m$	钢桶直径	$D_t = 30cm$
浮标长度	$H_f = 2m$	钢桶长度	$L_t = 1m$
浮标质量	$m_f = 1000kg$	钢桶质量	$m_t = 100kg$
钢管直径	$D_g = 50mm$	锚链长度	$L_l = 22.05m$
钢管长度	$L_g = 1m$	锚链单位长度	$ds = 105mm$
每节钢管质量	$m_g = 10kg$	锚链单位长度质量	$m_l = 7kg / m$

根据上述条件, 求解得到在海风速度分别为 $v_1 = 12m/s$ 和 $v_2 = 24m/s$ 情形下的仿真结果如表 3 所示:

表 3 问题 1 仿真结果

参数	v_1 作用	v_2 作用
L_c (锚链沉底长度)	7.7953m	208
h (锚链吃水深度)	0.6825m	0.6966m
φ_{g1} (第一节钢管倾角)	1.1613°	4.419°
φ_{g2} (第二节钢管倾角)	1.1691°	4.4475°
φ_{g3} (第三节钢管倾角)	1.1771°	4.4765°
φ_{g4} (第四节钢管倾角)	1.1851°	4.5058°
φ_t (钢桶倾斜角度)	1.2032°	4.5718°
θ_i (锚点与海床的夹角)	9.7552°	5.573°
x_{all_min} (静平衡最小位移)	7.7953m	17.5586m
x_{all_max} (静平衡最小位移)	14.6203m	17.7686m

为方便描述锚链形状, 沿海平面建立坐标系, 取浮标质心为坐标原点, y 轴垂直海平面向上, x 轴正方向为锚在海平面投影点指向浮标的方向。在该坐标系下, 系统如下

图 7 和图 8 所示：

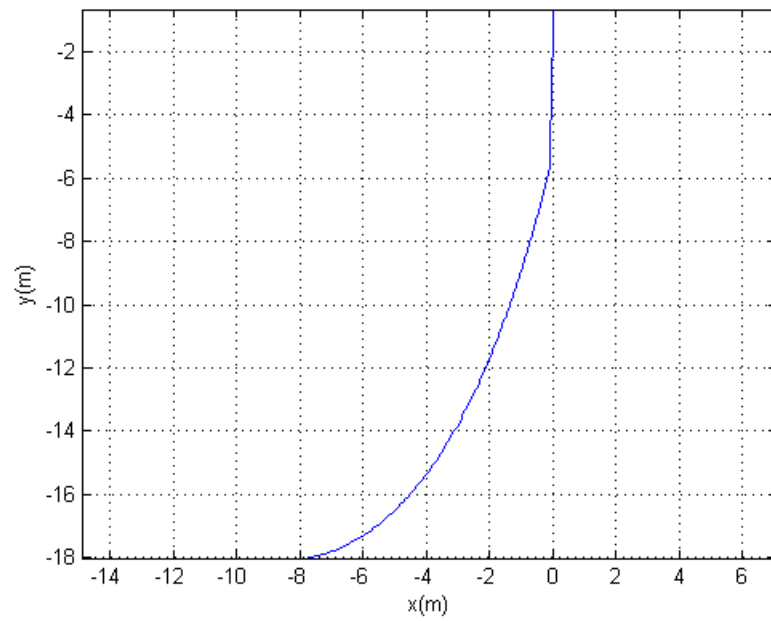


图 7 $12m/s$ 风速作用下系统形状

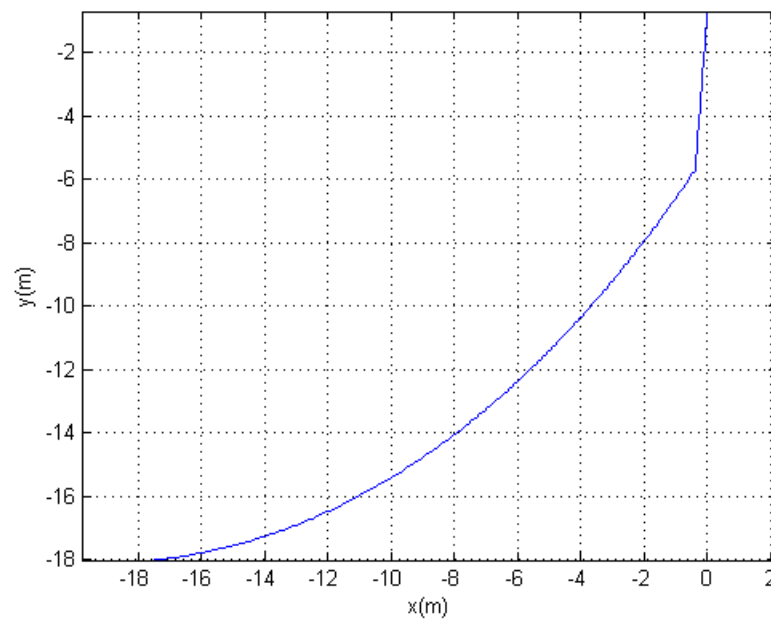


图 8 $24m/s$ 风速作用下系统形状

由图 7 可见， $12m/s$ 风速作用下，锚链水平延展约为 $8m$ ，而图 8 指出 $24m/s$ 风速作用下水平延展达到约 18 米，与实际情况相吻合。

5.2. 问题 2 的求解.

5.2.1 问题 2 的建模分析

根据问题 1 的分析和仿真结果可知,重物球质量越大,钢桶的倾斜角度越小,锚链在锚点与海床的夹角越小;当重物球质量很大时,必然有一部分锚链沉底。通过问题 1 的计算可知,当重物球质量为 $m_q = 1200kg$ 时,钢桶的倾斜角度 $\varphi_t > 5^\circ$,锚链在锚点与海床的夹角 $\theta > 15^\circ$,系统处于非理想工作状态。在此题中,应通过逐渐增加重物球质量,找到使系统各部分达到最优工作状态的临界质量 m_{ij} ,从而在重物球质量满足 $m_q > m_{ij}$ 时,系统各部分工作良好。

具体的求解思路如下:

I. 风速变为 $v = 36m/s$ 时,其余已知条件及假设不变,仍然对浮标、4 个钢管、钢桶、锚链进行静力学方程的列写与求解,具体过程参照 5.1.1 问题 1 的建模分析。

II. 在求解重物球临界质量过程中,逐渐增加重物球质量,判断钢桶的倾斜角度和锚链在锚点处与海床的夹角是否满足要求,直至找出临界质量 m_{ij} ,具体的迭代仿真思路参照图 2。

5.2.2 问题 2 的求解结果

(1). 在问题 1 的条件下,不改变重物球质量,风速变为 $v_3 = 36m/s$ 时,仿真结果如下表 4 所示:

表 4 风速为 $36m/s$ 时系统状态参数	
参数	v_3 作用
L_c (锚链沉底长度)	0m
h (锚链吃水深度)	0.7194m
φ_{g1} (第一节钢管倾角)	9.1618°
φ_{g2} (第二节钢管倾角)	9.2169°
φ_{g3} (第三节钢管倾角)	9.2728°
φ_{g4} (第四节钢管倾角)	9.3292°
φ_t (钢桶倾角)	9.4562°
θ_i (锚点与海床的夹角)	21.0532°
x_{all} (静平衡点位移)	18.8615m

由表格可知,锚链的所有节链环都悬浮在水中,系统没有游动区域,静平衡点的位移 $x_{all} = 18.8615m$ 。在此种情况下,系统伸展状况如下图 9 所示:

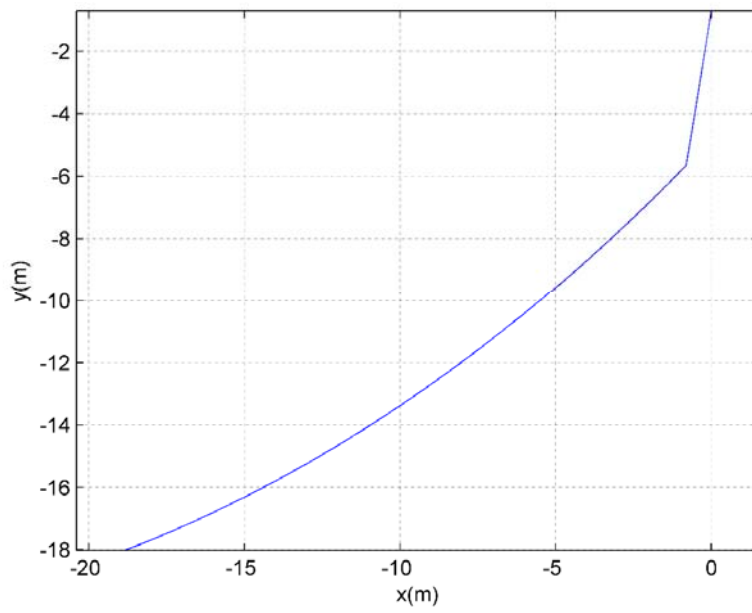


图 9 36m/s 风速作用下系统形状

(2). 由表 4 可知，锚链在锚点处与海床的夹角 $\theta_i > 16^\circ$ ，钢桶的倾斜角度 $\varphi_i > 5^\circ$ ，不满足系统正常工作时角度要求。连续增加重物球质量，增加原来质量的 0.88 倍时得到临界质量，即 $m_{ij} = 2250.28\text{kg}$ 。此时锚底与海床的夹角为 15.99° ，钢桶的倾斜角度为 4.418° 。

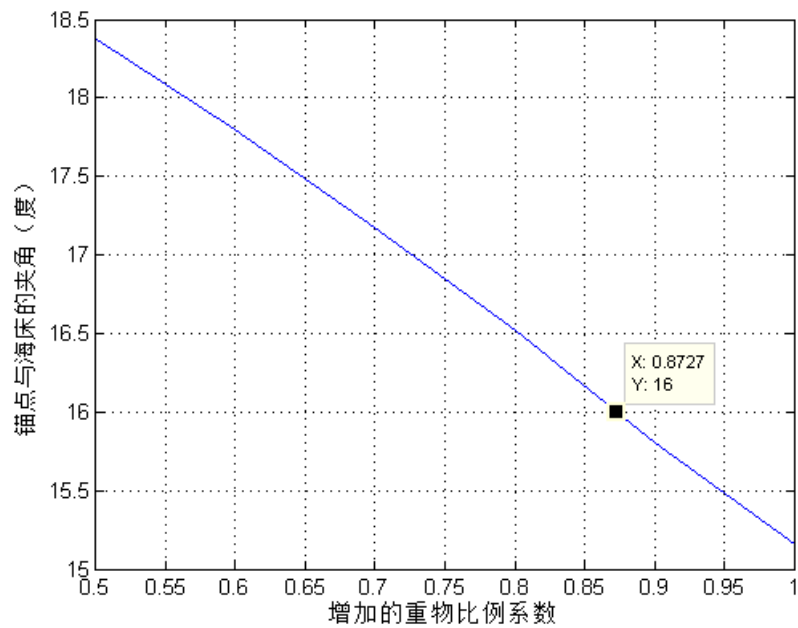


图 10 锚底处锚链与海床夹角与增加重物比例系数的关系

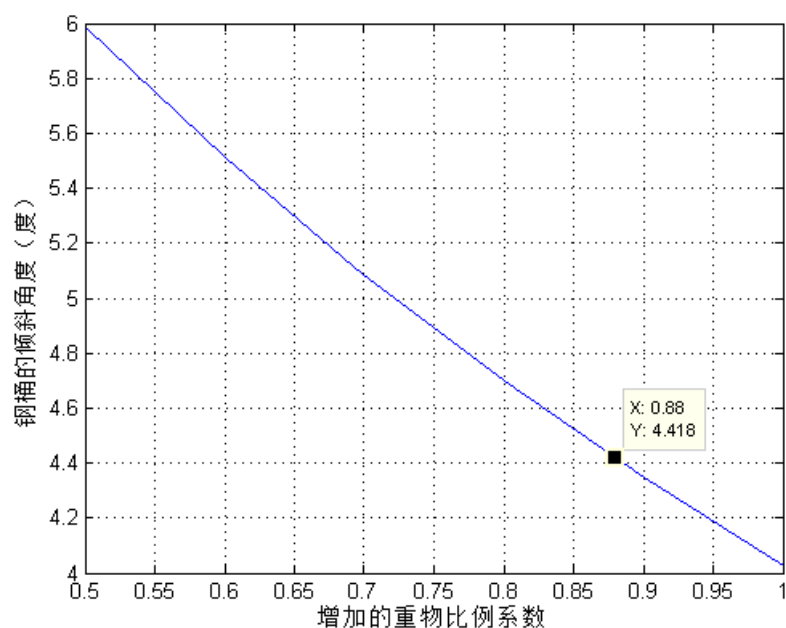


图 11 钢桶的倾角与增加的重物比例系数的关系

5.3. 问题 3 的求解

5.3.1 问题 3 的建模分析

受到潮汐等因素的影响时，不同的环境条件需要设计不同的重物球质量、锚链型号和长度使得系统满足角度要求。这些变化的环境条件包括：介于 16m~20m 实测水深、海水速度、风速。由问题 1 和问题 2 得：

(1). 对于给定链长的某型锚链，在最大风速下若稳定且满足角度要求，则小于最大风速的情况下也满足要求。

(2). 选择 30.45m 长的 II 型链、水深 16m，由下图得：当风速最大时，随水流速度的增加，钢桶的倾斜角度 φ_l 越大，浮标至锚点的水平位移 x 越大，浮标的吃水深度 h 越大；锚底与海床的夹角越小。

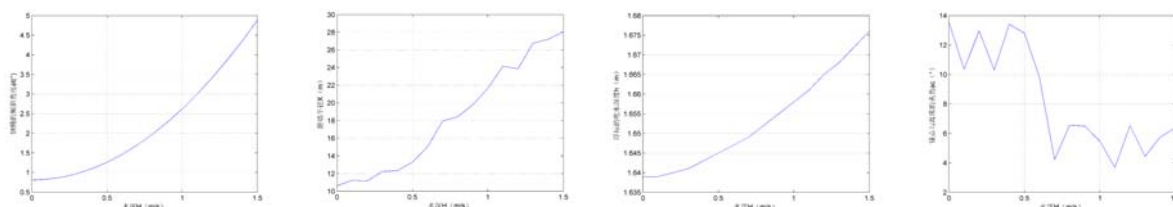


图 12 钢桶倾角、浮标吃水深度，水平位移锚底和海床的夹角与水流速度的关系

解决思路：首先讨论在最大水速和最大风速下，不同水深和不同锚链链型下；判断锚底与海床的夹角恰小于 16° ，得到接近的链长；当水深为 16m 时，使钢桶的倾斜角

度恰小于 5° ，得到最小重物质量；当水深为 20m 时，使浮标的吃水深度恰小于 2m（浮标的高度），得到最大重物质量；验证分别在水深 16m 和 20m 时，验证海水的速在 0 到 1.5m/s 时，锚底和海床的夹角是否小于 16° ，如果不满足，则增大最小重物质量，或者减小最大重物质量再次验证，如此一直满足锚底和海床的夹角即可。

根据题目，对最大风速 $36m/s$ 和最大水速 $1.5m/s$ 下的系统进行静力平衡分析。

I. 浮标受力分析与 5.1.1 中分析方法相同，水平力由单纯的横向风载变为横向风载和水流力之和，即 $F + F_{sf}$

II. 对钢管受力分析：

钢管受到海水力 F_{sg} 、第 $i-1$ 个钢管对它的拉力 $T_{g(i-1)}$ 、第 $i+1$ 个钢管对它的拉力 T_{gi} 、以及浮重 G_{gi} 。具体受力分析如图 13 所示，列写平衡方程并求解有：

$$\begin{cases} T_{gi} = \sqrt{(T_{g(i-1)} \cos \theta_{g(i-1)} + F_{sg})^2 + (T_{g(i-1)} \sin \theta_{g(i-1)} - G_{gi})^2} \\ \theta_{gi} = \arctan \frac{T_{g(i-1)} \sin \theta_{g(i-1)} - G_{gi}}{T_{g(i-1)} \cos \theta_{g(i-1)} + F_{sg}} \\ \varphi_{gi} = \arctan \frac{T_{g(i-1)} \sin \theta_{g(i-1)} + T_{gi} \sin \theta_{gi}}{T_{gi} \cos \theta_{gi} + T_{g(i-1)} \cos \theta_{g(i-1)}} \end{cases}$$

III. 对钢桶受力分析：

由于钢桶与重物球连接，为简化问题，假设重物球竖直悬挂在钢桶下方，且不考虑重物球受到的水流力（重物球受到的海水力 F_{sq} 对桶产生力矩，且力矩与悬挂重物球悬线长度有关），具体的受力分析如图 14 所示。同时，水流力为均匀分布力，其等效作用点在物体质心，不产生力矩，物体的倾斜角度没有影响；虽然水流力对单个物体产生的力矩为零，但会对重物球产生横向载荷，进而影响系统的形状。

在上述假设条件下，通过求解得到：

$$\begin{cases} T_t = \sqrt{(T_{g4} \cos \theta_{g4} + F_{st})^2 + (T_{g4} \sin \theta_{g4} - G_t - G_q)^2} \\ \theta_t = \arctan \frac{T_{g4} \sin \theta_{g4} - G_t - G_q}{T_{g4} \cos \theta_{g4} + F_{st}} \\ \varphi_t = \arctan \frac{T_{g4} \sin \theta_{g4} + T_t \sin \theta_t}{T_t \cos \theta_t + T_{g4} \cos \theta_{g4}} \end{cases}$$

IV 对锚链受力分析

由于锚链的倾斜角度很小，拉力在水平方向的投影值远大于水流力，因而水流力对

锚链的影响可以忽略不计。那么对锚链的受力分析与 5.1.1 中分析方法相同。

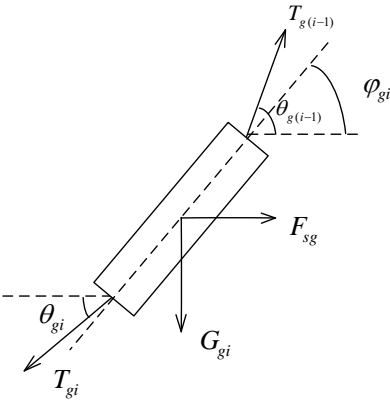


图 13 水水力作用下第 i 根钢管受力分析

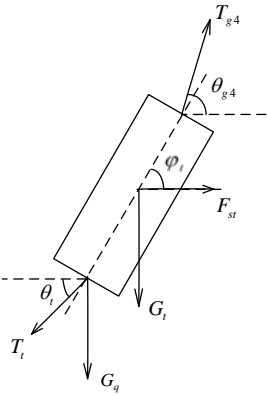


图 14 水水力作用下钢桶受力分析

5.3.2 问题 3 的求解

在该问题求解过程中，充分考虑锚底与海床夹角小于 16 度，钢桶的最大倾斜角不超过 5 度、浮标的最大吃水深度不超过 2m（浮标高度）的物理约束，对最大风速和水流速度情况下五种链型的系统状态进行了研究。研究海水深度在 16~20m 时的重物球临界质量，并分别求出在重物质量最大和最小时每种典型链长所对应的浮标最大吃水深度、钢桶最大倾斜角度、浮标最大游动半径及锚底与海床最大夹角。

考虑两种极限情况，即情形一：风速 $v_3 = 36m/s$ 、水流速度 $v_s = 1.5m/s$ ，水深 16m；情形二： $v_3 = 36m/s$ 、水流速度 $v_s = 1.5m/s$ ，水深 20m。两种情形下的数值仿真结果如下表 5 所示

表 5 两种极限情形下仿真结果

参数	情形一	情形二
L_c （锚链沉底长度）	1.8m	0m
h （锚链吃水深度）	1.7996m	1.8412m
φ_{g1} （第一节钢管倾角）	4.1108°	4.0025°
φ_{g2} （第二节钢管倾角）	4.1688°	4.0587°
φ_{g3} （第三节钢管倾角）	4.2270°	4.1152°
φ_{g4} （第四节钢管倾角）	4.2854°	4.1718°
φ_t （钢桶倾斜角度）	4.4814°	4.3621°
θ_i （锚点与海床的夹角）	1.4237°	14.4857°
x_{all} （静平衡位移）	16.3814m	15.9210m

两种情形下的系统形状分别如图 15 和图 16 所示：

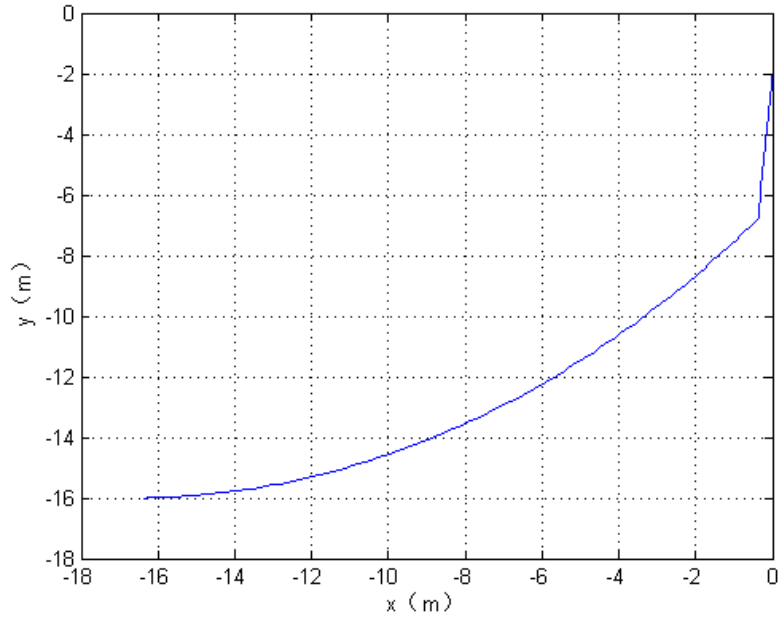


图 15 情形一时的系统状态

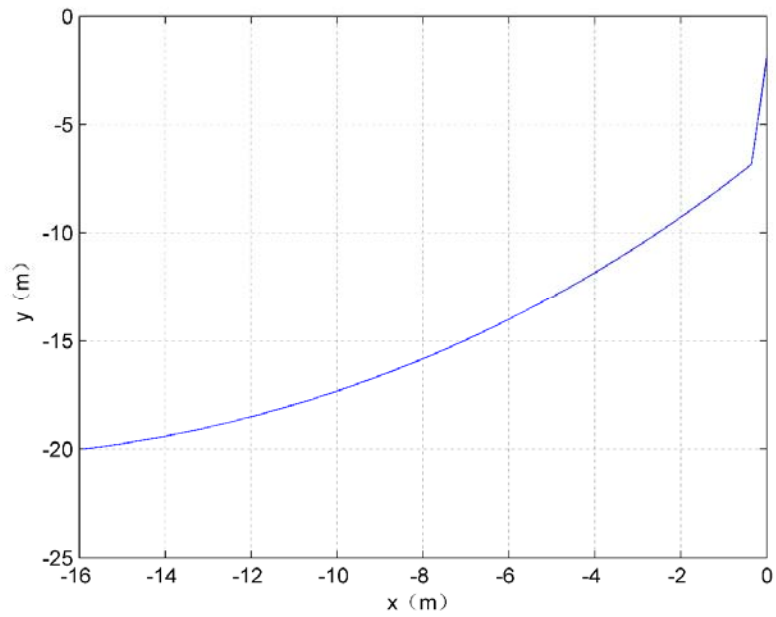


图 16 情形二时的系统状态

根据表 5 计算结果，得到情形一下锚链的部分链环沉在水底，该段锚链长度为 1.8m；情形二时锚链的所有节链环都悬浮在水中，系统没有游动区域，静平衡点的位移 $x_{all} = 15.9210m$ 。

其余更多情形下的系统状态参数见下页表。

锚链型号	锚链长度 L_f /m	重物质量 m_q /kg		浮标的最大吃水深度 $h_{f,max}$ /m		钢桶的最大倾斜角度 φ_i		浮标的最大游动半径 x_{all} /m		锚链末端与锚的链接处的切线方向与海床的最大夹角 θ_i	
		最大值	最小值	重物质量最大	重物质量最小	重物质量最大	重物质量最小	重物质量最大	重物质量最小	重物质量最大	重物质量最小
I	36.66	3504	4752	1.661	2	5°	4.005°	35.01	35.13	15.15°	14.18°
	39.39	3504	4764	1.658	2	5°	4.000°	37.79	38.31	12.51°	12.19°
	42.12	3504	4776	1.657	2	5°	3.993°	40.42	40.75	11.52°	10.94°
II	30.45	3420	4668	1.664	2	5°	4.009°	28.62	28.48	15.32°	14.53°
	32.55	3420	4668	1.661	2	5°	4.012°	30.47	30.87	11.80°	11.28°
	34.65	3420	4680	1.660	2	5°	4.005°	32.54	32.35	10.42°	8.97°
III	26.40	3336	4560	1.671	2	5°	4.021°	23.91	23.88	14.62°	13.60°
	27.60	3336	4560	1.669	2	5°	4.021°	25.06	24.71	11.88°	10.66°
	28.80	3336	4572	1.668	2	5°	4.014°	26.26	25.56	10.10°	8.21°
IV	23.25	3228	4428	1.675	2	5°	4.045°	19.70	19.86	14.10°	12.83°
	24.00	3228	4440	1.674	2	5°	4.038°	21.04	20.39	12.20°	10.46°
	24.75	3228	4440	1.673	2	5°	4.038°	21.52	20.59	10.65°	8.53°
V	20.88	3120	4296	1.685	2	5°	4.062°	17.01	17.24	15.59°	13.65°
	21.60	3120	4296	1.683	2	5°	4.062°	17.01	17.24	12.84°	11.33°
	22.32	3120	4308	1.681	2	5°	4.055°	18.20	17.79	8.75°	8.86°

从上页表中数据得知,对于任何链型,不论链长如何变化,取重物质量最大时,浮标的最大吃水深度变化范围为 1.657~1.685m;取重物质量最小时,钢桶的倾斜角度变化范围为 $3.993^{\circ} \sim 4.062^{\circ}$,可见浮标的最大吃水深度和钢桶的倾斜角度变化幅度不明显。但是,浮标的游动区域随链型的变化有很大的改变,从表中数据可知,当选择链型 V 的时候,浮标的游动区域最小。因此,选择链型 V 来获得最小的浮标游动区域,对整体的系泊系统设计方案是有利的。

同时,通过比较链型 V 的三种典型链长,可以发现,当考虑浮标的游动区域限制时,我们应该选择较短的锚链,此时锚链长度为 20.88m,重物的质量范围为 3120~4296kg;考虑到浮标的最大吃水深度和钢桶的最大倾斜角度应留出足够的设计裕度,我们取重物质量的中间值,即 3708kg。

6. 模型评价与改进

总结本报告在研究过程中所采用的方法,其主要优点包括:

1. 在研究设计过程中,充分考虑了系泊系统设计的复杂性及其可能的多项影响因素,如风速、海水速度、水深、链长、链型、重物球的重量等。通过控制变量的方法,从单个因素入手,得到了单个因素对系统设计的影响规律。

2. 本文在对每节钢管和每节锚链分析过程中,考虑到它们的受力状态相似,采用的模型也形同,极大地简化了整个系泊系统的总体模型,使模型求解简易高效。

3. 整个系统在迭代计算过程中采用了遍历搜索的方法,通过控制变量的方法得到的各个影响因素间的嵌套作用关系,进而分析不同因素对系泊系统状态的综合影响结果。在适当减小计算效率的情况下,得到更精确的模型结果。

4. 对于给定的系泊系统外界环境,针对不同的链型,分析了不同链长情况下,系泊系统各个部分的状态,得到了不同的设计方案。通过对吃水深度,钢桶的倾斜状态,游动区域做出比较,选择出不同环境条件下最优的系泊系统设计方案。

当然,本文在研究过程中未充分考虑各因素间的相互作用以及各影响因素的相对权重,因而不能对单个因素影响的重要程度进行判断,需要更好的模型或者其他适宜的分析方法得到各因素影响程度的相对大小。

此外,本文的研究方案还可从以下两个方面进行改进:

A. 考虑在外力矩作用下,浮标的倾斜。当考虑到浮标的倾斜状态时,模型在处理风荷载和水流力的作用时能得到更精确的结果,同时更接近于真实情况的系泊系统状态。

B. 本文在迭代过程中采用了遍历搜索的办法，其效率较低。因而在对数据精度影响较小的情况下，可寻找更加高效的搜索办法，节省搜索时间和系统设计时间。

7. 参考文献

- [1] 肖乐, 郝向举. 加快海洋生物资源高效利用 服务海洋强国战略[J]. 中国水产, 2013(6):9-12.
- [2] 杨盼盼. 我国海洋资源开发中存在的问题及对策[J]. 对外经贸, 2015(3):145-146.
- [3] Grimaccia F, Mussetta M, Zich R E. Evolutionary techniques for sensor networks energy optimization in marine environmental monitoring[J]. Proceedings of Spie, 2012, 8539(4):85390H-85390H-8.
- [4] 李立立. 基于海洋台站和浮标的近海海洋观测系统现状与发展研究[D]. 中国海洋大学, 2010.
- [5] 潘斌, 高捷, 陈小红,等. 浮标系泊系统静力计算[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 1997(1):68-73.
- [6] 闫俊, 乔东生, 欧进萍. 深水悬链锚泊线串联浮筒系统静力特性分析[C]// 中国海洋. 2013.

8. 附录

8.1. 函数 1:

```
function force101()  
%此函数用于计算问题1中风速为12m/s时，系泊系统的各节钢管和钢桶的倾斜角度、浮标的吃水  
深度、浮标的游动半径、锚点与海床的夹角、悬浮的锚链的链环数和锚链形状  
h=0:0.0001:2; %浮标的吃水深度 (m)  
v=12; %风速 (m/s)  
k=0.625*2*v^2; %浮标受到的风荷载 (N)  
gs=0*10213; %不改变重物球的质量时，增加的重物球的比例  
系数取0  
for u=1:20001 %遍历找出浮标的吃水深度h(m)  
    flag=0;  
    op=h(u);  
    [xm ym]=force102(op, v, gs); %迭代求出钢管，钢桶的下端所受的拉力t2，角  
    度theta2，位置x, y  
    t2=((31557.3*op-20593.021-gs).^2+k^2*(2-op).^2).^0.5;  
    theta2=atan((31557.298*op-20593.021-gs)/k./(2-op));  
    for i=1:210 %迭代求出每节锚链的下端所受的拉力t2，角度  
        theta2，位置x, y  
        temp1=t2;  
        temp2=theta2;  
        t2=((t2*cos(theta2))^2+(t2*sin(theta2)-6.2565)^2).^0.5;  
        theta2=atan((temp1*sin(theta2)-6.2565)/temp1/cos(theta2));  
  
    phy2=atan((temp1*sin(temp2)+t2*sin(theta2))/(t2*cos(theta2)+temp1*cos(temp2)));  
    xm(i+6)=xm(i+5)-0.105.*cos(phy2);  
    ym(i+6)=ym(i+5)-0.105.*sin(phy2);  
    if (ym(i+6)<=-18) %判断锚链是否有接触海床的部分  
        f=i;
```

```

        flag=1;
        break;
    end
end
if(flag==1)
    break;
end
end
if(flag==1)
    for i=1:5
        90-atan((ym(i+1)-ym(i))/(xm(i+1)-xm(i)))/pi*180
    end
    figure(5)
    plot(xm,ym);
    xlabel('x(m)'); %画出系泊系统的图形
    ylabel('y(m)');
    grid;shg

    figure(6)
    plot(xm,ym);
    xlabel('x(m)'); %钢管的形状
    ylabel('y(m)');
    axis([-1 0 -6 0]);
    axis equal;
    title('24m/s风速下钢管和钢桶形状');
    grid;shg

    h=op %浮标的吃水深度 (m)
    X=-xm(f+6) %浮标的游动半径 (m)
    phit=atan((ym(f+6)-ym(f+5))/(xm(f+6)-xm(f+5)))/pi*180 %锚点与海床的夹角(度)
    nlx=f %悬浮的锚链的链环数
end

```

8.2. 函数 2:

```
function [x y]=force102(h,v,gs)
```

```
%此函数用于计算各节钢管和钢桶的位置
```

```
Gf=9800; %浮标的重力
Ff=1.025*10^3*9.8*pi*h; %浮标受到的浮力
F=0.625*(2-h)*2*v^2; %浮标受到的风荷载
```

```
%浮标下端受到的拉力Tp1和角度thetap1
```

```
Tp1=sqrt((Ff-Gf)^2+F^2);
thetap1=atan((Ff-Gf)/F);
```

```
%每节钢管Gp1, 钢球Gs, 钢桶Gt的浮重
```

```
Gp1=78.3118;
Gs=10213+gs;
Gt=266.8050;
```

```
%浮标下端的位置
```

```
x(1)=0;y(1)=-h;
```

```
%迭代求出每节钢管的下端所受的拉力Tp1, 角度thetap1, 位置x,y
```

```
for i=1:4
    temp=Tp1;
    temp2=thetap1;
    Tp1=sqrt((Tp1*cos(thetap1))^2+(Tp1*sin(thetap1)-Gp1)^2);
    thetap1=atan((temp*sin(thetap1)-Gp1)/(temp*cos(thetap1)));
```

```
phipl=atan((temp*sin(temp2)+Tp1*sin(thetap1))/(Tp1*cos(thetap1)+temp*cos(temp2)));
    x(i+1)=x(i)-l*cos(phipl);
```



```

ddg=(7800-1025)*9.8*dg*d1/7800; %每节链环浮重 (N)
for yu=1:6
    flag=0;
    for u=1:2001
        op=h(u);
        [t2 theta2 xm ym]=force202(op,v,gs(yu),Vw); %计算每节钢管和钢桶底部受到
                                                    的拉力, 角度, 位置
        for i=1:290 %计算每节铁链底部受到的拉
                                                    力, 角度, 位置
            temp1=t2;
            temp2=theta2;
            t2=((t2*cos(theta2))^2+(t2*sin(theta2)-ddg)^2)^0.5;
            theta2=atan((temp1*sin(theta2)-ddg)/temp1/cos(theta2));

            phy2=atan((temp1*sin(temp2)+t2*sin(theta2))/(t2*cos(theta2)+temp1*cos(temp2)));
            xm(i+6)=xm(i+5)-d1.*cos(phy2);
            ym(i+6)=ym(i+5)-d1.*sin(phy2);
            if(ym(i+6)<=-20) %判断锚链是否有沉底的部分
                f=i;
                flag=1;
                break
            end
        end
    end
    if(flag==1)
        break
    end
end
if(flag==1)
    yu1(yu)=atan((ym(f+6)-ym(f+5))/(xm(f+6)-xm(f+5)))/pi*180; %得到锚点与海床
                                                    的夹角
    yu2(yu)=90-atan((ym(6)-ym(5))/(xm(6)-xm(5)))/pi*180; %得到钢桶的倾斜

```


角度

```
c(yu)=op;
end
end
figure(1);
plot(gsratio,yu1) %小于16度
xlabel('重物球的比例系数');ylabel('锚点与海床的夹角\phic (°)');
grid;shg;
figure(2);
plot(gsratio,yu2) %小于5度
xlabel('重物球的比例系数');ylabel('钢桶的倾斜角度\phit(°)');
grid;shg;
figure(3);
plot(gsratio,c) %小于2m
xlabel('重物球的比例系数');ylabel('浮标的吃水深度h (m)');
grid;shg;
```

8.4. 函数 4:

```
function [t2 theta2 x y]=force202(h,v,gs,Vw)
%此函数用于计算各节钢管和钢桶底端受到的拉力，角度，位置
%h为浮标的吃水深度（m），v为风速，gs为增重后的重物球重量，Vw为海水的速度
Gf=9800;

Fwf=374*Vw^2*2*h; %浮标、每节钢管、钢桶受到的近海水流力（N）
Fwp=374*Vw^2*0.05;
Fwt=374*Vw^2*0.3;

Ff=1.025*10^3*9.8*pi*h; %浮标受到的浮力Ff，浮标受到的风荷载和水流
%力F(N)
F=0.625*(2-h)*2*v^2+Fwf;
```

```

Tp1=sqrt((Ff-Gf)^2+F^2); %浮标受到的钢管的拉力Tp1(N)和拉力的角度
                             thetap1(°)

thetap1=atan((Ff-Gf)/F);

Gp1=78.3118; %每节钢管的浮重Gp1, 钢球的浮重Gs, 钢桶的浮
              重Gt(N)

Gs=10213+gs;
Gt=266.8050;

x(1)=0;y(1)=-h; %浮标底部的位置

%计算每节钢管底部受到的拉力, 角度, 位置
for i=1:4
    temp=Tp1;
    temp2=thetap1;
    Tp1=sqrt((Tp1*cos(thetap1)+Fwp)^2+(Tp1*sin(thetap1)-Gp1)^2);
    thetap1=atan((temp*sin(thetap1)-Gp1)/(temp*cos(thetap1)+Fwp));

    phipl=atan((temp*sin(temp2)+Tp1*sin(thetap1))/(Tp1*cos(thetap1)+temp*cos(temp2)));
    x(i+1)=x(i)-l*cos(phipl);
    y(i+1)=y(i)-l*sin(phipl);
end

%计算钢桶底部受到的拉力, 角度, 位置
t2=sqrt((Tp1*cos(thetap1)+Fwt)^2+(Tp1*sin(thetap1)-Gt-Gs).^2);
theta2=atan((Tp1*sin(thetap1)-Gt-Gs)./(Tp1*cos(thetap1)+Fwt));
phi2=atan((Tp1*sin(thetap1)+t2*sin(theta2)+Gs)./(Tp1*cos(thetap1)+t2*cos(theta2)));
;
x(:,6)=x(5)-l*cos(phi2);
y(:,6)=y(5)-l*sin(phi2);

```

8.5. 函数 5:

```
function force301()

%此函数用来计算，当给定链型和链长时，在不同的水深16-20m情况下，得到浮标的吃水深度、
钢桶的倾斜角度、浮标的游动半径和锚点与海床的夹角

%本次函数链型为II型链，链环数为290

H=16:0.4:20;                                %遍历水深16-20m
h=0:0.001:2;                                %浮标的吃水深度(m)
v=36;                                        %风速 (m/s)
Vw=1.5;                                    %海水的速度 (m/s)
k=0.625*2*v^2;                              %近海风载 (N)
gs=3.89*10213;                              %悬挂重物球的质量
dl=0.105;                                  %每节链环长度m
dg=7;                                       %每节链环单位长度的质量
ddg=(7800-1025)*9.8*dg*dl/7800;            %每节链环浮重 (N)

for yu=1:11
    flag=0;
    for u=1:2001
        op=h(u);
        [t2 theta2 xm ym]=force202(op,v,gs,Vw);    %计算每节钢管和钢桶底部受到的拉
                                                    力, 角度, 位置
        for i=1:290                                %计算每节铁链底部受到的拉力, 角
                                                    度, 位置

            temp1=t2;
            temp2=theta2;
            t2=((t2*cos(theta2))^2+(t2*sin(theta2)-ddg)^2)^0.5;
            theta2=atan((temp1*sin(theta2)-ddg)/temp1/cos(theta2));

            phy2=atan((temp1*sin(temp2)+t2*sin(theta2))/(t2*cos(theta2)+temp1*cos(temp2)));

            xm(i+6)=xm(i+5)-dl.*cos(phy2);
            ym(i+6)=ym(i+5)-dl.*sin(phy2);
```

```

        if (ym(i+6)<=-H(yu))                                %判断锚链是否有沉底的部分
            f=i;
            z=u;
            flag=1;
            break
        end
    end
    if(flag==1)
        break
    end
end
if(flag==1)
    yu1(yu)=atan((ym(f+6)-ym(f+5))/(xm(f+6)-xm(f+5)))/pi*180;    %得到锚点与海
                                                                    床的夹角
    ch(yu)=h(u);
    yu2(yu)=90-atan((ym(6)-ym(5))/(xm(6)-xm(5)))/pi*180;        %得到钢桶的倾
                                                                    斜角度
    maxx(yu)=-xm(f+6);
end
end
figure(6);
plot(H, ch)
xlabel('水深H (m/s) ');ylabel('浮标的吃水深度h (m) ');
grid;shg;
figure(7);
plot(H, yu2)
xlabel('水深H (m/s) ');ylabel('钢桶的倾斜角度\phit(^{\circ}) ');
grid;shg;
figure(8);
plot(H, maxx)
xlabel('水深H (m/s) ');ylabel('游动半径X (m) ');

```

```

grid;shg;
figure(9);
plot(H,yu1)
xlabel('水深H (m/s)');ylabel('锚点与海床的夹角\phic (°)');
grid;shg;

```

8.6. 函数 6:

函数6:

```
function force401()
```

%此函数用来计算，分别在水深16m和20m时，验证海水的速在0到1.5m/s时，满足要求。

%本次函数链型为II型链，链环数为290，验证的水深是16m

```
H=16;
```

```
h=0:0.001:2; %浮标的吃水深度(m)
```

```
v=36; %风速 (m/s)
```

```
Vw=0:0.1:1.5; %遍历海水的速度 (m/s)
```

```
k=0.625*2*v^2; %近海风载 (N)
```

```
gs=2.9*10213; %悬挂重物球的质量
```

```
d1=0.105; %每节链环长度m
```

```
dg=7; %每节链环单位长度的质量
```

```
ddg=(7800-1025)*9.8*dg*d1/7800; %每节链环浮重 (N)
```

```
for yu=1:16
```

```
    flag=0;
```

```
    for u=1:2001
```

```
        op=h(u);
```

```
        [t2 theta2 xm ym]=force202(op,v,gs,Vw(yu)); %计算每节钢管和钢桶底部受到的拉力, 角度, 位置
```

```
        for i=1:290 %计算每节铁链底部受到的拉力, 角度, 位置
```

```
            templ=t2;
```

```
            temp2=theta2;
```

```

t2=((t2*cos(theta2))^2+(t2*sin(theta2)-ddg)^2)^0.5;
theta2=atan((templ*sin(theta2)-ddg)/templ/cos(theta2));

phy2=atan((templ*sin(temp2)+t2*sin(theta2))/(t2*cos(theta2)+templ*cos(temp2)));

xm(i+6)=xm(i+5)-dl.*cos(phy2);
ym(i+6)=ym(i+5)-dl.*sin(phy2);
if(ym(i+6)<=-H) %判断锚链是否有沉底的部分
    f=i;
    z=u;
    flag=1;
    break
end
end
if(flag==1)
    break
end
end
if(flag==1)
yul(yu)=atan((ym(f+6)-ym(f+5))/(xm(f+6)-xm(f+5)))/pi*180; %得到锚点与海
床的夹角

ch(yu)=h(u);
yu2(yu)=90-atan((ym(6)-ym(5))/(xm(6)-xm(5)))/pi*180; %得到钢桶的倾
斜角度

maxx(yu)=-xm(f+6);
end
end
figure(6);
plot(Vw,ch)
xlabel('水深H (m/s)');ylabel('浮标的吃水深度h (m)');
grid;shg;
figure(7);

```

```
plot(Vw, yu2)
xlabel('水深H (m/s) ');ylabel('钢桶的倾斜角度\phit(^{\circ})');
grid;shg;
figure(8);
plot(Vw, maxx)
xlabel('水深H (m/s) ');ylabel('游动半径X (m) ');
grid;shg;
figure(9);
plot(Vw, yu1)
xlabel('水深H (m/s) ');ylabel('锚点与海床的夹角\phic (^{\circ}) ');
grid;shg;
```