

系泊系统的设计

摘要

针对问题一，我们首先对浮标，钢管和钢桶进行受力分析，得出所有的力和角度都和浮标的吃水深度有关。对锚链分析我们采用悬链线方程描述锚链受力状态以及形态特征。在给定锚链长度，水深，重物球质量的情况下，我们以系统整体受力平衡为约束条件，以钢桶竖直方向上受力平衡，即以钢桶竖直方向上向上和向下所受到的力误差最小为目标函数，我们利用遗传算法可以得到浮标的吃水深度的最优解，进而通过力学关系可以求出问题一中所需要求解的相关量。

针对问题二，我们首先利用问题一的模型求解出第一问的解。对于第二问我们首先建立确定自悬链和约束链分界点的模型，得出一个重物球浮重量的值作为锚链是否为自悬链的分界点。我们选定步长，对此浮重量的值向左和向右进行搜索，利用问题一的模型，从而可以求解出满足条件的重物球浮重量的取值范围，进而得出重物球质量的取值范围。

针对问题三，在考虑海水流速的情况下，我们同样对浮标，钢管和钢桶进行受力分析。由于受到水流力作用我们对锚链的受力情况和形态特征采用分段外推法进行分析。通过相关文献我们确定系泊系统的设计理念，即在极限状态下锚链为自悬链，且钢桶倾角，浮标吃水深度和游动区域尽可能小。我们建立模型分别求解五种型号的锚链在极限状态下，以钢桶倾角最小，浮标吃水深度最小为目标函数，锚链为自悬链情况下受力平衡为约束条件，求解出锚链长度和重物球质量的最优解。通过比较五种型号锚链此时的各项指标，我们选取型号 V 的锚链作为我们所设计的系泊系统的锚链。在系泊系统锚链的型号、长度和重物球质量确定下来后，我们通过改变水深，风速和海水流速，分析不同情况下此系泊系统各指标量的变化。

关键词：悬链线方程；遗传算法；分段外推法

一、问题重述

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(如图1所示)。某型传输节点的浮标系统可简化为底面直径 2m、高 2m 的圆柱体,浮标的质量为 1000kg。系泊系统由钢管、钢桶、重物球、电焊锚链和特制的抗拖移锚组成。锚的质量为 600kg,锚链选用无档普通链环,题中给出了近浅海观测网的常用型号及其参数(见附录一)附表一。钢管共 4 节,每节长度 1m,直径为 50mm,每节钢管的质量为 10kg。要求锚链末端与锚的链接处的切线方向与海床的夹角不超过 16 度,否则锚会被拖行,致使节点移位丢失。水声通讯系统安装在一个长 1m、外径 30cm 的密封圆柱形钢桶内,设备和钢桶总质量为 100kg。钢桶上接第 4 节钢管,下接电焊锚链。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。为了控制钢桶的倾斜角度,钢桶与电焊锚链链接处可悬挂重物球。

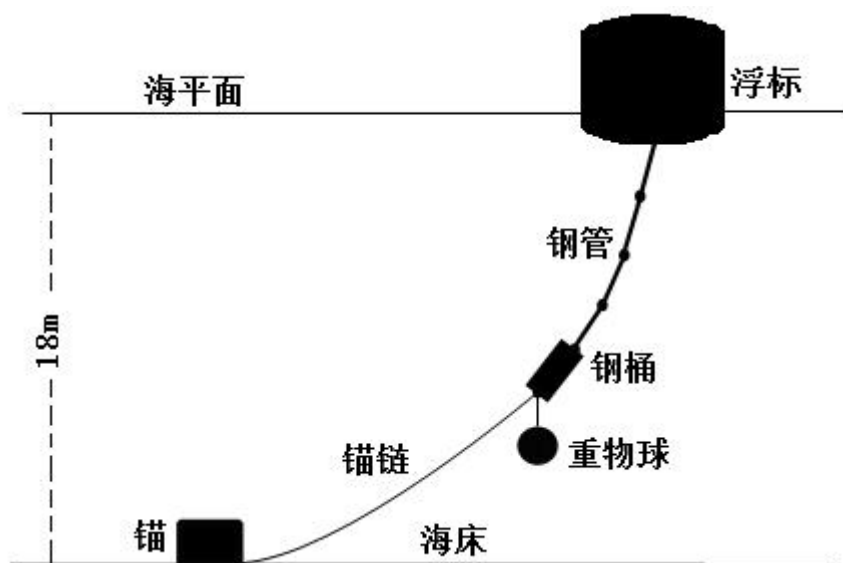


图1 传输节点示意图(仅为结构模块示意图,未考虑尺寸比例)

系泊系统的设计问题就是确定锚链的型号、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。现要求通过数学建模的方法,解决以下问题:

问题一: 某型传输节点选用 II 型电焊锚链 22.05m,选用的重物球的质量为 1200kg。现将该型传输节点布放在水深 18m、海床平坦、海水密度为 $1.025 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 的海域。若海水静止,分别计算海面风速为 12m/s 和 24m/s 时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。

问题二: 在问题 1 的假设下,计算海面风速为 36m/s 时钢桶和各节钢管的倾斜角度、锚链形状和浮标的游动区域。请调节重物球的质量,使得钢桶的倾斜角度不超过 5 度,锚链在锚点与海床的夹角不超过 16 度。

问题三: 由于潮汐等因素的影响,布放海域的实测水深介于 16m~20m 之间。布放点的海水速度最大可达到 1.5m/s、风速最大可达到 36m/s。请给出考虑风力、水流力和水深情况下的系泊系统设计,分析不同情况下钢桶、钢管的倾斜角度、锚链形状、浮标的吃水深度和游动区域。

二、问题假设

- 1、由于重物球质量过大，忽略水流对重物球的作用力；
- 2、忽略浅海区不同水深位置水流速度的差异；
- 3、忽略波浪对系泊系统的影响；

三、问题分析

问题一：

首先，在静力平衡条件下，分别求出浮标、四个钢管和钢桶的水平方向的力和垂直方向的力。再由可进行转动的杆的力方向一定是沿着杆，得出倾角和水平方向力和垂直方向力的关系。接着对锚链进行悬链线理论方程建模，可以得出锚链任意一点的横纵坐标和张力的关系，又得出自悬链方程和约束链方程的二种形式。最后锚链顶端作用在钢桶车的力和钢桶受到其他力的合外力为零。列出关于锚链高度 h 和浮标吃水深度 h_0 的一元二次方程组。由于方程过于复杂，无法得到准确的解析解，于是我们其中一组方程作为约束条件，另外一组方程作为目标方程的相似解的误差最小值，利用遗传算法，即可以得出海面风速为 12m/s 和 24m/s 时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。

问题二：

我们首先利用问题一的模型求解出第一问的解。对于第二问我们首先建立确定自悬链和约束链分界点的模型，以系统整体受力平衡且锚链成自悬链，卧链为 0 的状态为约束条件，同样以钢桶竖直方向上向上和向下所受到的力误差最小，即钢桶受到锚链和钢管的拉力以及自身重力在竖直方向上平衡为目标函数。给定浮标吃水深度和重物球浮重量的取值范围，利用遗传算法，求出浮标吃水深度和重物球浮重量的最优解。得出一个重物球浮重量的值作为锚链是否为自悬链的分界点。我们选定步长，对此浮重量的值向左和向右进行搜索，利用问题一的模型，在重物球浮重量已知的情况下可以求解出钢桶倾角和锚链与海床的夹角。从而可以得到满足条件的重物球浮重量的取值范围，得出重物球质量的取值范围。

问题三：

在考虑海水流速的情况下，我们同样对浮标，钢管和钢桶进行受力分析。由于锚链受到水流力作用，我们对锚链的受力情况和形态特征采用分段外推法进行分析。通过相关文献我们确定系泊系统的设计理念，在极限状态下，取水深，风速，海水速度为最大值时锚链为自悬链，且钢桶倾角，浮标吃水深度和游动区域尽可能小。我们建立模型在锚链型号已知的情况下，在极限状态下，以钢桶倾角最小，浮标吃水深度最小为目标函数，锚链为自悬链情况下受力平衡为约束条件，利用遗传算法求解出锚链长度和重物球质量的最优解。利用模型对五种型号的锚链分别进行求解，通过比较五种型号锚链此时的各项指标，我们选取型号 V 的锚链作为我们所设计的系泊系统的锚链。在系泊系统锚链的型号、长度和重物球质量确定下来后，我们可以通过改变水深，风速和海水流速，分析不同情况下此系泊系统各指标量的变化。

四、符号说明

符号	符号说明
h_0	浮标的吃水深度
ω_0	浮标的浮重力
ω_1	单个钢管的浮重力
ω_2	钢桶的浮重力
ω_3	重物球的浮重力
θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4	钢管 1、2、3、4（从上到下）的倾角
θ_5	钢桶的倾角
F	近海风荷载
T_1	浮标与钢链 1 之间的相互作用力
T_2	钢链 1 与钢链 2 之间的相互作用力
T_3	钢链 2 与钢链 3 之间的相互作用力
T_4	钢链 3 与钢链 4 之间的相互作用力
T_5	钢链 4 与钢桶之间的相互作用力
T_6	钢桶底端所受的作用力
l_0	卧链长度
l_1	钢管的长度
l_2	钢桶的长度
T_v	锚链垂向力
p	锚链在水中单位长的重量

∂_1	锚链上端切线倾角
∂_2	锚链下端切线倾角
S	链长

五、模型的建立与求解

5.1 问题一

5.1.1 理论基础与原理

(1) 遗传算法^[1]

遗传算法是一种基于自然群体遗传演化机制的高效搜索算法，它摒弃了传统的搜索方式，模拟自然界生物进化过程，采用人工进化的方式对目标空间进行随机化搜索。它将问题域中的可能解看作是群体的一个个体或染色体，并将每一个个体编码成符号串形式，模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程，对群体反复进行基于遗传学的操作（遗传、交叉和变异），根据预定的目标适应度函数对每个个体进行评价，依据适优化群体中的最优个体，求得满足要求的最优解。

遗传算法主要是用来寻优，它具有很多优点：它能有效避免局部最优现象，有及其顽强的鲁棒性。并且在寻优过程中，基本不需要任何搜索空间的知识和其他辅助信息等。利用遗传算法，可以解决很多标准优化算法解决不了的优化问题，其中包括目标函数不连续、不可微、高度非线性或随机的优化问题。

(2) 海水中单位长度锚链重力估算^[2]

在海水中，锚链将会受到浮力作用，所以其单位长度的重量也会减轻，则锚链在海水中单位长度的重量为：

$$\omega_{\text{水}} = k\omega_{\text{空}}$$

式中： k ——系数；

$\omega_{\text{空}}$ ——锚链在空气中单位长度重量；

$\omega_{\text{水}}$ ——锚链在海水中单位长度重量；

其中：

$$k = \frac{\omega_{\text{水}}}{\omega_{\text{空}}} = \frac{\rho_{\text{钢}}gV - \rho_{\text{海水}}gV}{\rho_{\text{钢}}gV} = \frac{7.85 - 1.025}{7.85} = 0.8694$$

于是

$$\omega_{\text{水}} = 0.8694\omega_{\text{空}}$$

5.1.2 模型的建立

1、浮标受力模型的建立

Step1:对浮标进行受力分析，画出浮标的受力分析图，如下图所示：

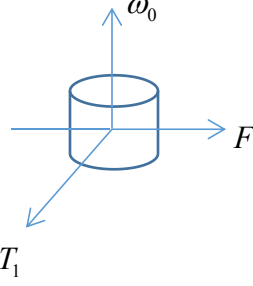


图 1.1 浮标的受力分析图

Step2:根据图 1.1 列出浮标分别在竖直方向、水平方向的受力方程，从而得出浮标的受力模型如下所示：

$$\begin{cases} T_{1x} = F = 0.625 \times S v_f^2 \\ S = d_1 \times (2 - h_0) \\ T_{1y} = \omega_0 \\ \omega_0 = \rho_{\text{海水}} g V_{\text{排}} - M_{\text{浮标}} g = \rho_{\text{海水}} g \pi (d_1/2)^2 h_0 - M_{\text{浮标}} g \end{cases} \quad (1.1)$$

Step3:根据上述模型可得出钢管 1 的倾斜角度 θ_1 满足 $\tan \theta_1 = \frac{T_{1y}}{F}$ 。 (1.2)

2、钢管受力模型的建立

观察图 1，为区分各节钢管，不妨假设 4 节钢管从上至下分别为钢管 1、钢管 2、钢管 3、钢管 4。设下述各 T_i 在水平方向的分量为 T_{ix} ，在竖直方向的分量为 T_{iy} 。

Step1:对钢管 i 进行受力分析，画出钢管 i 的受力分析图，如下图所示：

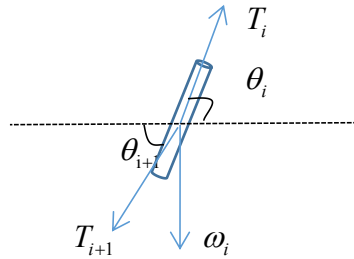


图 1.2 钢管 i 的受力分析图

Step2:根据图 1.2 列出钢管 i 分别在竖直方向、水平方向的受力方程，从而得出钢管 1 的受力模型如下所示：

$$\begin{cases} T_{(i+1)x} = T_{ix} = F \\ T_{(i+1)y} = T_{iy} - \omega_i = \omega_0 - (i-1)\omega_1 \\ \omega_i = M_{\text{钢管}} g - \rho_{\text{海水}} g V_{\text{排}} = M_{\text{钢管}} g - \rho_{\text{海水}} g \pi (d_2/2)^2 l_i \end{cases} \quad (1.3)$$

Step3:根据上述模型可得出钢管 i+1 的倾斜角度 θ_{i+1} 满足 $\tan \theta_{i+1} = \frac{T_{(i+1)y}}{F}$ 。 (1.4)

3、钢桶受力模型的建立

Step1:对钢桶进行受力分析,画出钢桶的受力分析图,如下图所示:

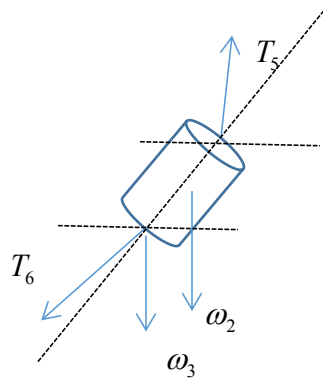


图 1.3 钢桶的受力分析图

Step2:根据图 1.3 列出钢桶分别在竖直方向、水平方向的受力方程,从而得出钢桶的受力模型如下所示:

$$\begin{cases} T_{6x} = T_{5x} = F \\ T_{6y} + \omega_2 + \omega_3 = T_{5y} \\ T_6 = \sqrt{T_{6x}^2 + T_{6y}^2} \\ \omega_2 = M_{\text{铁桶}}g - \rho_{\text{海水}}gV_{\text{排}} = M_{\text{铁桶}}g - \rho_{\text{海水}}gl_2\pi(d_3/2)^2 \\ \omega_3 = M_{\text{重物球}}g - \rho_{\text{海水}}gV_{\text{重物球}} \\ V_{\text{重物球}} = \frac{M_{\text{重物球}}}{\rho_{\text{重物球}}} \end{cases} \quad (1.5)$$

Step3:根据上述模型可得出钢桶的倾斜角度 θ_5 满足:

$$\tan \theta_5 = \frac{T_{6y}}{F} = \frac{T_{5y} - \omega_2}{F} = \frac{\omega_0 - 4\omega_1 - \omega_2}{F} \quad (1.6)$$

4、锚链上任意点的坐标或距离模型的建立^[3]

目前国内外用悬链线方程解决锚泊系统锚链上任意点的坐标或距离时,通常采用的计算方法之一为下式:

$$y = a \left(ch \frac{x}{a} - 1 \right) \quad (1.7)$$

式中:

$$a = \frac{Th}{p} \quad (1.8)$$

Th 为锚链顶端水平力, p 为锚链在水中单位长的重量。

Step2:坐标系的建立。

(1) 自悬链坐标系的建立

对应方程 (1.7) 的坐标系的坐标原点固定在海底,在此将坐标系原点做了改进,将原来坐标原点下移距离 a ,从而使计算得到简化,坐标系如图 1.4 所示。同时 (1.7) 式变为:

$$y = ach \frac{x}{a} \quad (1.9)$$

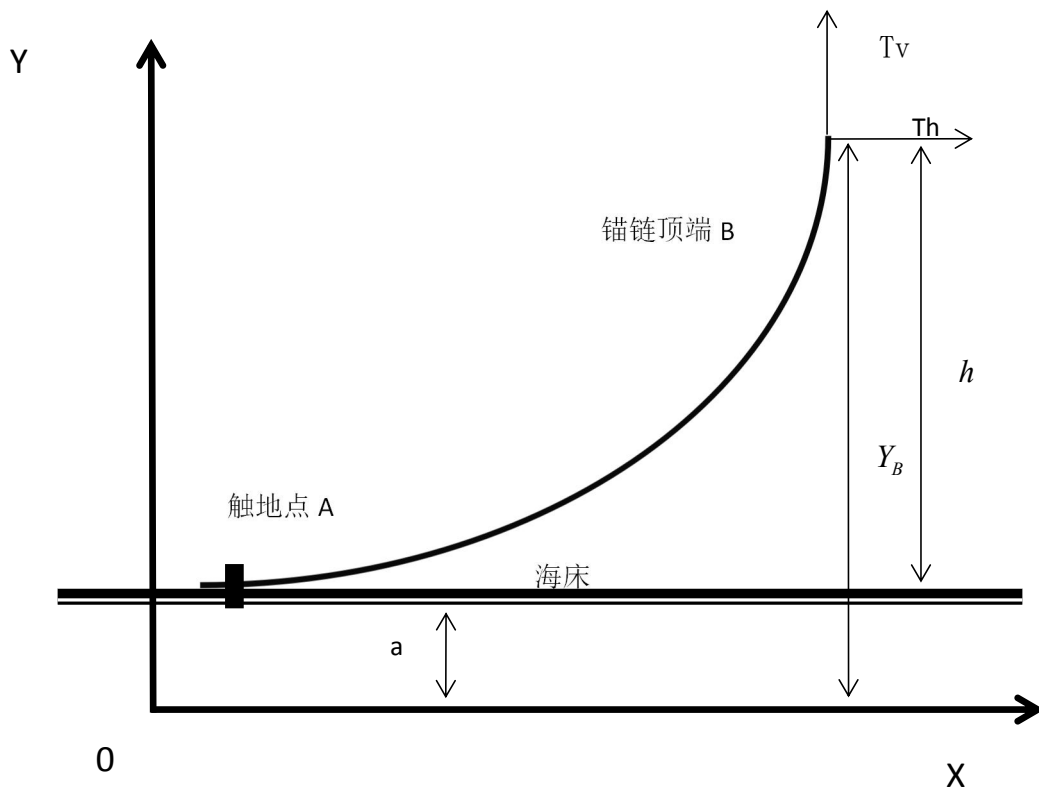


图 1.4 悬链线理论计算图

(2) 约束链坐标系的建立:

当悬链定点 $\theta_A \geq 0$ 时, 锚链为约束链, 此时锚链已不具有自悬链链型特点, 而成为约束链状态。假定将这端约束链长 S_0 向下方延长, 令其约束链成为自悬链的一部分, 即令延伸至 A_0 点的链切角 $\theta_{A_0} = 0$, 则约束链长 S_0 是假想自悬链的一部分。所建坐标系如下图所示:

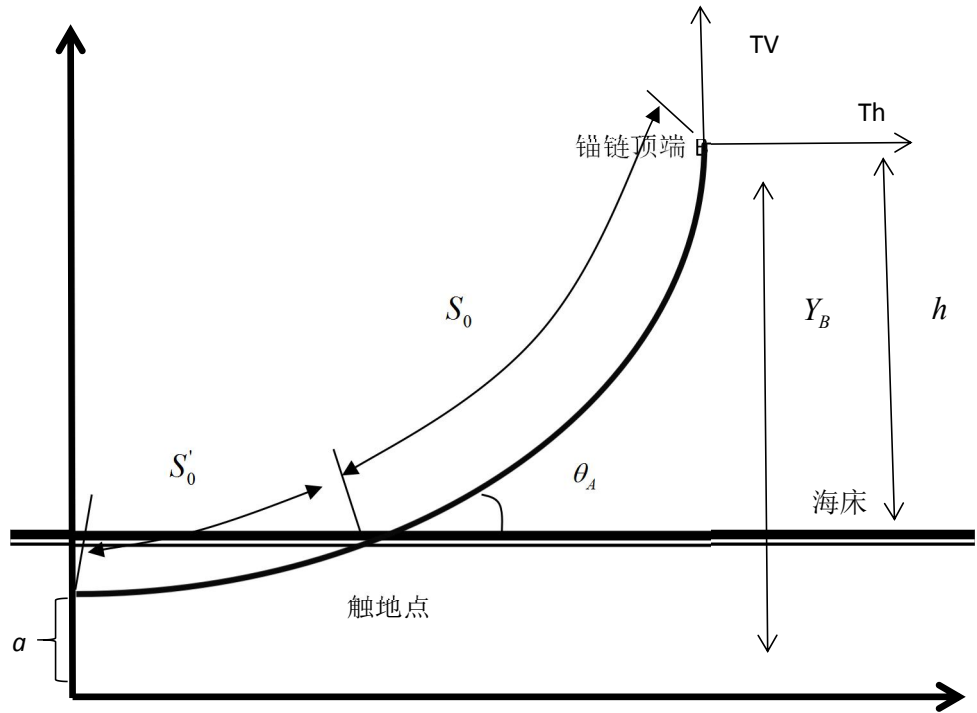


图 1.5 约束链定义图

Step3:锚链模型方程的建立。

(1) 自悬链方程

利用式 (1.10) 可以推导出悬链上任一点的力学和几何方程。

$$\text{斜率: } \tan \theta = y' = sh \frac{x}{a} \quad (1.10)$$

$$\text{链长: } S = \int_0^x \sqrt{1 + y'^2} dx = a \cdot sh \frac{x}{a} \quad (1.11)$$

$$\text{将上式两边平方, 整理后: } S = \sqrt{y^2 - a^2} \quad (1.12)$$

$$\text{垂向力: } Tv = kpS \quad (1.13)$$

整理后可得自悬链方程如下:

$$\begin{cases} x_B = a \cdot sh^{-1}(\frac{S_m}{a}) \\ \tan \partial_1 = sh \frac{x}{a} \\ Tv = kpS_m \\ \partial_2 = 0 \end{cases} \quad (1.14)$$

(2) 约束链方程

按照建立方程时的假想, 只要能求出已知约束链长度 S_0 及 $A(x_A, y_A)$ 和 $B(x_B, y_B)$ 在这条假想自悬链中的位置, 便可应用自悬链方程求出 A 点全部几何、力学的特征值。

为了方便计算,先求出 A 点坐标,设虚链长 S_0 延伸至 A_0 点,便可按照假想自悬链方程 (1.14) 式得出新的悬链方程:

$$\begin{cases} y_A^2 = S_0^{*2} + a^2 \\ y_B^2 = (S_0^* + S_0)^2 + a^2 \\ y_B = y_A + h \end{cases} \quad (1.15)$$

接上述联立方程组后,可消去 S_0 项,则约束点 A 点几何坐标 $A(x_A, y_A)$:

$$y_A = S_0 \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{a^2}{S_0^2 - h^2}} - \frac{h}{2} \quad (1.16)$$

根据方程 $x = a \cdot ch^{-1} \frac{y}{a}$ 可得:

$$x_A = a \cdot ch^{-1} \frac{y_A}{a} \quad (1.17)$$

整理后可得约束链方程如下:

$$\begin{cases} y_A = S_0 \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{a^2}{S_0^2 - h^2}} - \frac{h}{2} \\ x_A = ach^{-1} \frac{y_A}{a} \\ \tan \partial_2 = sh \frac{x_A}{a} \\ y_B = y_A + h \\ x_B = ach^{-1} \frac{y_B}{a} \\ \tan \partial_1 = sh \frac{x_B}{a} \\ Tv = F \tan \partial_1 = Fsh \frac{x_B}{a} \end{cases} \quad (1.18)$$

Step1:根据自悬链和约束链判别式判断出链型;

对浮筒而言,系泊力 Th 、锚链悬挂高度 H 一定时,锚链形成自悬链的最小长度 S_m 的计算式为:

$$\begin{cases} y_B^2 = S_{AB}^2 + a^2 \\ y_B = h + a \end{cases} \quad (1.19)$$

解联立方程,可得出悬链最小长度 S_m :

$$S_m = S_{AB} = \sqrt{h^2 + 2ah} \quad (1.20)$$

当放链长 $S_0 \geq S_m$, 其悬链为自悬链,相应卧链长度为 $l_0 = S_0 - S_m$

当放链长 $S_0 < S_m$, 其悬链为约束链,表明悬链定点 $\theta_A > 0$, 出现锚驻力减低或者锚固不稳定。

5.1.2 模型的求解

设浮标的吃水深度为 h_0 , S 为浮标在风向法平面的投影面积, v 为风速。

则: 近海风荷载 $F = 0.625 * Sv^2 = 0.625 * d_1 \cdot (2 - h_0)v^2$ (1.21)

将 $d_1 = 2m$ 代入上式，并分别计算：

海面风速 v 为 $12m/s$ 时， $F = 180 * (2 - h_0)$ ；

海面风速 v 为 $24m/s$ 时， $F = 720 * (2 - h_0)$ 。

1、对浮标受力模型的求解：

将 $\rho_{海水} = 1.025g/ml$ ， $d_1 = 2m$ ， $M_{浮标} = 1000kg$ ， $g = 9.8m/s^2$ 代入式 (1.1) 中可得
 $T_{1y} = (1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3$

将上式代入式 (1.2) 中即可得：

$$\text{当海面风速 } v \text{ 为 } 12m/s \text{ 时， } \tan \theta_1 = \frac{(1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3}{180 * (2 - h_0)}；$$

$$\text{当海面风速 } v \text{ 为 } 24m/s \text{ 时， } \tan \theta_1 = \frac{(1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3}{720 * (2 - h_0)}$$

2、对钢管受力模型的求解：

(1) 钢管 1

将 $\rho_{海水} = 1.025g/ml$ ， $d_1 = 50mm$ ， $M_{钢管} = 10kg$ ， $g = 9.8m/s^2$ 代入式 (1.3) 中可得
 $T_{2y} = (1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - (10 - 0.640625\pi) * 9.8$

将上式代入式 (1.4) 中即可得：

$$\text{当海面风速 } v \text{ 为 } 12m/s \text{ 时， } \tan \theta_2 = \frac{(1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - (10 - 0.640625\pi) * 9.8}{180 * (2 - h_0)}；$$

$$\text{当海面风速 } v \text{ 为 } 24m/s \text{ 时， } \tan \theta_2 = \frac{(1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - (10 - 0.640625\pi) * 9.8}{720 * (2 - h_0)}$$

(2) 钢管 2

将 $\rho_{海水} = 1.025g/ml$ ， $d_1 = 50mm$ ， $M_{钢管} = 10kg$ ， $g = 9.8m/s^2$ 代入式 (1.3) 中可得
 $T_{3y} = (1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - 2 * (10 - 0.640625\pi) * 9.8$

将上式代入式 (1.4) 中即可得：

$$\text{当海面风速 } v \text{ 为 } 12m/s \text{ 时， } \tan \theta_3 = \frac{(1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - 2 * (10 - 0.640625\pi) * 9.8}{180 * (2 - h_0)}；$$

$$\text{当海面风速 } v \text{ 为 } 24m/s \text{ 时， } \tan \theta_3 = \frac{(1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - 2 * (10 - 0.640625\pi) * 9.8}{720 * (2 - h_0)}$$

(3) 钢管 3

将 $\rho_{海水} = 1.025g/ml$ ， $d_1 = 50mm$ ， $M_{钢管} = 10kg$ ， $g = 9.8m/s^2$ 代入式 (1.3) 中可得
 $T_{4y} = (1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - 3 * (10 - 0.640625\pi) * 9.8$

将上式代入式 (1.4) 中即可得：

$$\text{当海面风速 } v \text{ 为 } 12m/s \text{ 时， } \tan \theta_4 = \frac{(1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - 3 * (10 - 0.640625\pi) * 9.8}{180 * (2 - h_0)}；$$

$$\text{当海面风速 } v \text{ 为 } 24m/s \text{ 时， } \tan \theta_4 = \frac{(1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - 3 * (10 - 0.640625\pi) * 9.8}{720 * (2 - h_0)}$$

3、对铁桶受力模型的求解：

将 $\rho_{\text{海水}} = 1.025 \text{ g/ml}$, $d_1 = 50 \text{ mm}$, $M_{\text{钢管}} = 10 \text{ kg}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 代入式 (1.3) 中可得

$$T_{6y} = (1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - 4 * (10 - 0.640625\pi) * 9.8 - (10 - 1.5375\pi) * 9.8$$

将上式代入式 (1.4) 中即可得：

当海面风速 v 为 12 m/s

$$\tan \theta_5 = \frac{(1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - 4 * (10 - 0.640625\pi) * 9.8 - (10 - 1.5375\pi) * 9.8}{180 * (2 - h_0)};$$

当海面风速 v 为 24 m/s 时，

$$\tan \theta_5 = \frac{(1.025\pi h_0 - 1) * 9.8 * 10^3 - 4 * (10 - 0.640625\pi) * 9.8 - (10 - 1.5375\pi) * 9.8}{720 * (2 - h_0)}$$

4、对锚链上任意点的坐标模型的求解：

$$\text{由图 1.4 可知 } H_0 = h_0 + h + \sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin \theta_3 + \sin \theta_4 + \sin \theta_5 \quad (1.22)$$

由附录一中的附表可知 II 型电焊锚链 $p = 7 \text{ kg/m}$, 代入式 (1.14)、式 (1.18) 以及锚链任意点坐标方程中可得锚链端点坐标和端点处切线倾角与浮标吃水深度 h_0 的关系式。

5、游动区域方程的求解

$$L = \begin{cases} (S_0 - S_m) + x_B + (\cos \theta_1 + \cos \theta_2 + \cos \theta_3 + \cos \theta_4)l_1 + l_2 \cos \theta_5 (S_0 \geq S_m) \\ x_B - x_A + (\cos \theta_1 + \cos \theta_2 + \cos \theta_3 + \cos \theta_4)l_1 + l_2 \cos \theta_5 (S_0 < S_m) \end{cases}$$

整理上述求解过程，可得出所求结果均与浮标的吃水深度 h_0 有关。

由式 (1.6) 得知： $T_{5y} - \omega_2 = Tv + \omega_3$

我们以 $|T_{5y} - Tv - \omega_2 - \omega_3| = 0$ 为目标函数，将问题转化成求解最优解的模型进行求解可得模型如下：

$$\min \{ |T_{5y} - Tv - \omega_2 - \omega_3| \} \quad (1.23)$$

自悬链 ($S_0 \geq S_m$) :

$$s.t. \begin{cases} 0 \leq h_0 \leq 2 \\ T_{5y} = \omega_0 - 4\omega_1 \\ Tv = kpS_m \\ \omega_2 = M_{\text{铁桶}}g - \rho_{\text{海水}}gV_{\text{排}} \\ \omega_3 = M_{\text{重物球}}g - \rho_{\text{海水}}gV_{\text{重物球}} \end{cases} \quad (1.24)$$

约束链 ($S_0 < S_m$) :

$$s.t. \begin{cases} 0 \leq h_0 \leq 2 \\ T_{5y} = \omega_0 - 4\omega_1 \\ Tv = Hsh \frac{x_B}{a} \\ \omega_2 = M_{\text{铁桶}}g - \rho_{\text{海水}}gV_{\text{排}} = M_{\text{铁桶}}g - \rho_{\text{海水}}gl_2\pi(d_3/2)^2 \\ \omega_3 = M_{\text{重物球}}g - \rho_{\text{海水}}gV_{\text{重物球}} \end{cases} \quad (1.25)$$

对于上述模型，我们采用遗传算法设置 h_0 初始种群为 $[0,1]$ ，求出浮标的吃水深度 h_0 的最优解。

通过公式可得出钢桶和钢管的倾斜角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 的值以及锚链的形状。

当海面风速为 12m/s 时，链型为自悬链；吃水深度 0.6850m；钢管一夹角 1.1486 度；钢管二夹角 1.1563 度；钢管三夹角 1.1641 度；钢管四夹角 1.1719 度；钢桶夹角 1.2083 度；锚链高度 12.3161m；锚的链接处的切线方向与海床的夹角 0 度；锚链上端与水平面夹角 76.2245 度；卧链长度：6.3497m；游动区域 14.5877m。

当海面风速为 24m/s 时，链型为约束链；吃水深度 0.6988m；钢管一夹角 4.3764 度；钢管二夹角 4.4045 度；钢管三夹角 4.4045 度；钢管四夹角 4.4617 度；钢桶夹角 4.5945 度；锚链高度 12.3163m；锚的链接处的切线方向与海床的夹角 3.5332 度；锚链上端与水平面夹角 56.4689 度；游动区域 17.7270m。

5.2 问题二

5.2.1 第一问求解

对第一问的求解我们采用与问题一同样的方法，得到的值如下：

当海面风速为 36m/s 时，链型为约束链。吃水深度 0.7214m；钢管一夹角 9.0836 度；钢管二夹角 9.1379 度；钢管三夹角 9.1928 度；钢管四夹角 9.2484 度；钢桶夹角 9.5043 度；锚链高度 12.3434m；锚的链接处的切线方向与海床的夹角 20.4378 度；锚链上端与水平面夹角 45.7710 度；游动区域 18.8568m。

5.2.2 模型的建立与求解

调节重物球质量模型的建立

Step1:为使得钢桶的倾斜角度不超过 5 度，锚链在锚点与海床的夹角不超过 16 度，先大致确定重物球的质量范围。

(1) 根据 5.2.3 中对本题第一问的求解结果，得知在重物球质量为 1200kg 时，钢桶的倾斜角度为 9.5043，锚链在锚点与海床的夹角为 20.4378，均不满足上述要求。因此，若想满足题目要求初步可以确定 $\omega_3 > 10234N$ ；

(2) 对传输节点整体进行受力分析，在竖直方向上可得下式：

$$F_{\text{浮}} = G + 4\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 \quad (2.1)$$

进而得出：

$$[F_{\text{浮}}]_{\text{max}} > G + 4\omega_1 + \omega_2 + \omega_3$$

$$\text{即} \quad \omega_3 < [F_{\text{浮}}]_{\text{max}} - G - 4\omega_1 - \omega_2 \quad (2.2)$$

代入相应数值得出 $\omega_3 < 52699N$

综合 (1) (2) 可得重物球的浮重力 ω_3 大致范围如下: $10234N < \omega_3 < 52699N$ 。

Step2: 我们首先求出重物球浮重力的自悬链和约束链的分界点。即重物球浮重力取值多少时使得锚链 $S_m = S_0$ 。

将问题转化为求解最优解模型可建立模型如下:

$$\min \{T_{sy} - Tv - \omega_2 - \omega_3\} \quad (2.3)$$

$$s.t. \begin{cases} S_m = S_0 \\ 0 \leq h_0 \leq 2 \\ 10234 < \omega_3 < 52699 \end{cases} \quad (2.4)$$

使用遗传算法求得满足上述条件的 h_0 和 ω_3 的最优解。其值为 $h_0 = 1.4475, \omega_3 = 33937.0$ 。

Step3: 在求得上述模型结果的基础上, 以步长为 1, 对求出的重物球浮重力值向左和向右搜索满足“使得钢桶的倾斜角度不超过 5 度, 锚链在锚点与海床的夹角不超过 16 度”这一条件的取值。进而确定满足条件的重物球质量的取值。得出结果浮重力范围 $[18058, 51950]$, 从而重物球质量范围为 $[2117.38\text{kg}, 6091.35\text{kg}]$ 。

5.3 问题三

5.3.1 模型的准备

1、系泊系统设计^[2]:

系泊泊系统的设计的核心问题是系统能提供与外力平衡的回复力, 兼顾经济性。

因为系泊系统的主要任务是能提供平衡外力的系统回复力, 所以首先取张力为极限状态的锚线作为锚泊线组成成分确定的标准。

锚泊系统能提供足够的回复力与外部环境力作用相平衡。

选择合适的链长, 要求当外载荷达到最大时张力最大的锚链未完全被拉起, 仍有一定长度的躺链平铺于海底, 避免“走锚”现象发生。

所以我们系泊系统设计理念为:

(1) 在极限状态下, 即风速为 36m/s, 海洋流速为 1.5m/s, 水深为 20m 时, 我们设计的锚链为 $S_m = S_0$ 的悬链线。

(2) 在极限状态下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。

2、经查阅资料以及结合附录一中附表可得知锚链常用型号及参数表如下表所示:

表 3.1 锚链型号和参数表

型号	长度(mm)	宽度 (mm)	单位长度的质量 (kg/m)
I	78	45	3.2

II	105	63	7
III	120	73	12.5
IV	150	93	19.5
V	180	108	28.12

表注：长度是指每节链环的长度。

5.3.2 模型的建立

设浮标受风力为 F ，水流力为 $H_{\text{水}}$ ，浮标的吃水深度为 h_0 。

$$F = 0.625 \times (2 - h_0) \times 2 \times v_f^2 \quad (3.1)$$

$$H_{\text{水}} = 374 \times h_0 \times 2 \times v_s^2 \quad (3.2)$$

1、浮标受力模型的建立

对浮标进行受力分析

水平方向：

$$T_{1x} = F + H_{\text{水}} \quad (3.3)$$

竖直方向：

$$T_{1y} = \omega_0 = F_{\text{浮}} - G \quad (3.4)$$

2、钢管和钢桶受力模型的建立

对钢管和钢桶进行受力分析

设四个钢管（从上至下）、钢桶的上端点所受的垂直方向的力分别为 $T_{1y}, T_{2y}, T_{3y}, T_{4y}, T_{5y}$ ；水平方向的力分别为 $T_{1x}, T_{2x}, T_{3x}, T_{4x}, T_{5x}$ ；倾角分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ ；所受的水流力分别为 H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 。由受力分析可以得出：

$$\text{竖直方向：} \quad \begin{cases} T_{1y} = \omega_0 \\ T_{2y} = \omega_0 - \omega_1 \\ T_{3y} = \omega_0 - 2\omega_1 \\ T_{4y} = \omega_0 - 3\omega_1 \\ T_{5y} = \omega_0 - 4\omega_1 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\text{水平方向：} \quad \begin{cases} T_{1x} = F + H_{\text{水}} \\ T_{2x} = F + H_{\text{水}} + H_1 \\ T_{3x} = F + H_{\text{水}} + H_1 + H_2 \\ T_{4x} = F + H_{\text{水}} + H_1 + H_2 + H_3 \\ T_{5x} = F + H_{\text{水}} + H_1 + H_2 + H_3 + H_4 \end{cases} \quad (3.6)$$

倾角:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{T_{1y}}{T_{1x}} \\ \theta_2 = \arctan \frac{T_{2y}}{T_{2x}} \\ \theta_3 = \arctan \frac{T_{3y}}{T_{3x}} \\ \theta_4 = \arctan \frac{T_{4y}}{T_{4x}} \\ \theta_5 = \arctan \frac{T_{5y} - \omega_2}{T_{5x}} \end{cases} \quad (3.7)$$

水流力:

$$\begin{cases} H_1 = 374 \times d_1 l_1 \sin \theta_1 v_s^2 \\ H_2 = 374 \times d_1 l_1 \sin \theta_2 v_s^2 \\ H_3 = 374 \times d_1 l_1 \sin \theta_3 v_s^2 \\ H_4 = 374 \times d_1 l_1 \sin \theta_4 v_s^2 \\ H_5 = 374 \times d_2 l_2 \sin \theta_5 v_s^2 \end{cases} \quad (3.8)$$

由钢桶受力平衡可得:

$$\begin{cases} T_{z1} = \omega_0 - 4\omega_1 - \omega_2 - \omega_3 \\ T_{x1} = H_{\text{风}} + H_{\text{水}} + H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 \\ H_0 = h + h_0 + (\sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin \theta_3 + \sin \theta_4) l_1 + \sin \theta_5 \cdot l_2 \end{cases} \quad (3.9)$$

3、锚链受力模型的建立

采用分段外推法^[5,6]对单根锚泊线的静力问题进行求解,首先要进行单元的划分,按照水深可以将其划分 n 段。各单元重量及外荷载均集中在单元的中心上,作用于单元中心的外荷载有重力和海流力。对任意单元 i 进行受力分析,可以得到单元 i 上的平衡方程。

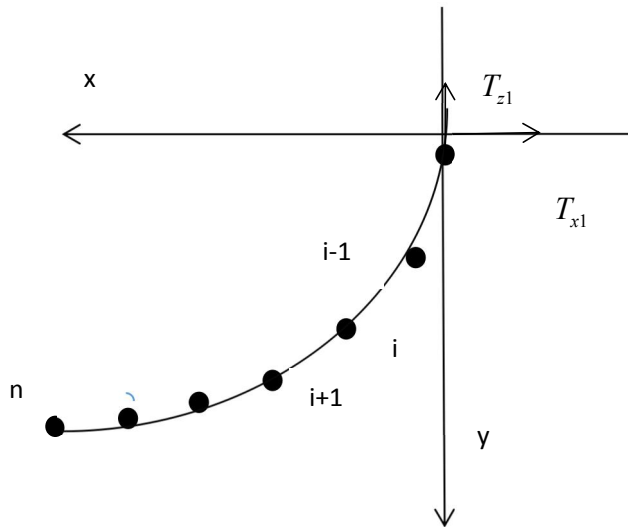


图 3.1 锚链划分单元图

各质点受力如图所示：

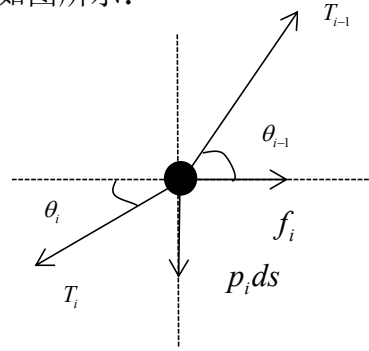


图 3.2 单元受力图

设锚链长为 s_0 ，这 n 段的锚链受到的水流力为 f_i ，每节链环与水平面的夹角为 $\beta_i (i=1,2,\dots,n)$ ，我们取每节链环长度为微元 ds ，且同种型号锚链的每节链环长度 ds 为定值。

每段链环受到的水流力为：

$$f_i = 374 \times S_i v_{\text{水}}^2 = 374 \times ds \times B \sin \beta_i v_{\text{水}}^2 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3.10)$$

第 i 段链环受力关系：

$$\begin{cases} T_{X_{i+1}} = T_{X_i} + f_i \\ T_{Z_{i+1}} = T_{Z_i} - p_i ds \\ X_{i+1} = X_i + ds \cdot \cos \beta_i \\ Z_{i+1} = Z_i + ds \cdot \sin \beta_i \\ \tan \beta_i = \frac{T_{Z_i}}{T_{X_i}} \\ s_0 = n \cdot ds \end{cases} \quad (3.11)$$

4、极限状态下系泊系统模型的建立

按照系泊系统的涉及理念，在极限状态下，即我们给定风速为 36m/s, 海洋流速为 1.5m/s, 水深为 20m 进行求解。

Step1: 目标函数的确定。

由于 $0 < h_0 < 2$ ， $0 \leq 90 - \theta_5 \leq 5$ ，我们取 $\min\{\frac{h_0}{2} + \frac{90 - \theta_5}{5}\}$ 为我们系泊系统确定的目标函数。

Step2: 将问题转化为求解最优解，所得求解最优解模型如下所示：

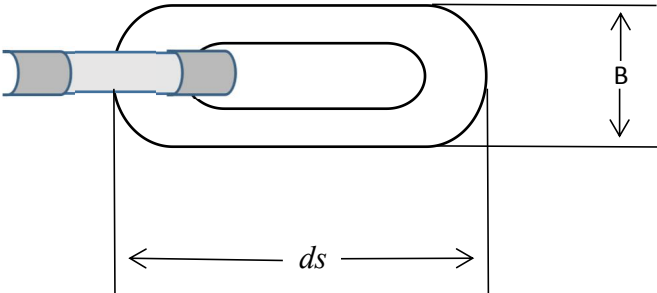
$$\begin{aligned} & \min \left\{ \frac{h_0}{2} + \frac{90 - \theta_5}{5} \right\} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} 0 < h_0 < 2 \\ 0 \leq 90 - \theta_5 \leq 5 \\ 10234 < \omega_3 < 52699 \\ h = H_0 - h - (\sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin \theta_3 + \sin \theta_4)l_1 - \sin \theta_5 \cdot l_2 \\ T_{Z_n} = 0 \\ Z_n = h \end{cases} \end{aligned} \quad (3.12)$$

5、非极限状态下（即不同情况下）系泊系统的建立

分析不同情况下钢桶、钢管的倾斜角度、锚链形状、浮标的吃水深度和游动区域。

$$\begin{aligned} &\min \{ |h - Z_n| \} \\ &\text{s.t.} \begin{cases} 0 < h_0 < 2 \\ h = H_0 - h - (\sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin \theta_3 + \sin \theta_4)l_1 - \sin \theta_5 \cdot l_2 \\ T_{Z_n} = 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{3.13}$$

5.3.3 模型的求解



1、极限状态下系泊系统模型的求解

利用遗传算法，我们可以求解出五种锚链型号分别对应的 h_0 和 ω_3 的最优解。将求解出的 h_0 和 ω_3 代入到公式中，我们可以得到如下表中的数据。

表 3.1 五种锚链型号 h_0 和 ω_3 的最优解表

锚链型号	重物球质量 (kg)	锚链长度(m)	游动区域(m)	铁桶与垂直向上方向夹角 (度)
I	5538.78	59.5140	58.1479	4.1240
II	5526.11	41.3700	39.2789	4.0630
III	5398.36	33.0000	29.9995	4.0645
IV	5262.37	27.9000	24.1518	4.0657
V	5134.77	24.6600	19.0262	3.6691

从上表中，我们通过比较五种型号锚链浮标的吃水深度和游动区域及钢桶的倾斜角度，我们选取锚链长度最小且游动范围最小的型号V锚链作为我们设计的系泊系统的锚链。从而我们设计的系泊系统为型号五的锚链 24.66m, 重物质量 5134.77kg。

2、不同情况下系泊系统模型的求解

在锚链型号，长度和重物球质量给定的情况下可以通过分别改变风速，海水速度和水深，通过遗传算法对本模型进行求解，求出最优解 h_0 ，进而可以分析不同情况下钢桶、

钢管的倾斜角度、锚链形状、浮标的吃水深度和游动区域。

(1) 海水速度，风速取定值，改变水深对相关量的影响

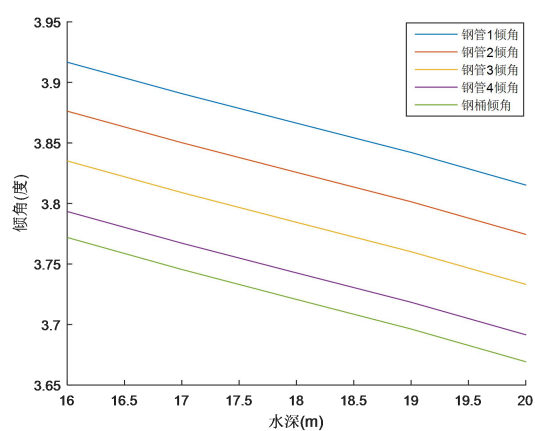


图 3.3 倾角变化图

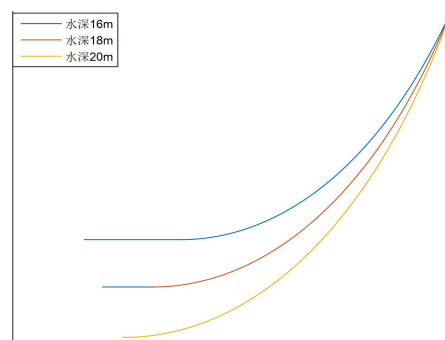


图 3.4 水深变化图

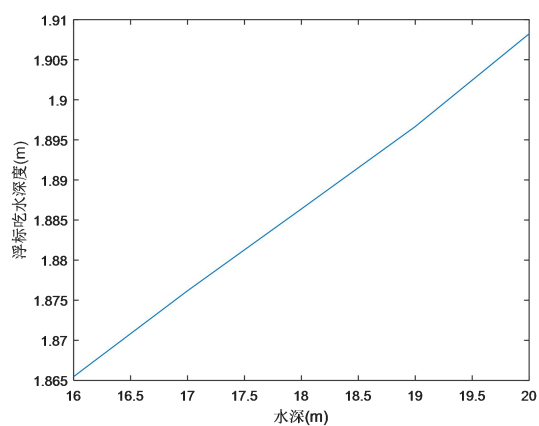


图 3.5 浮标吃水深度变化图

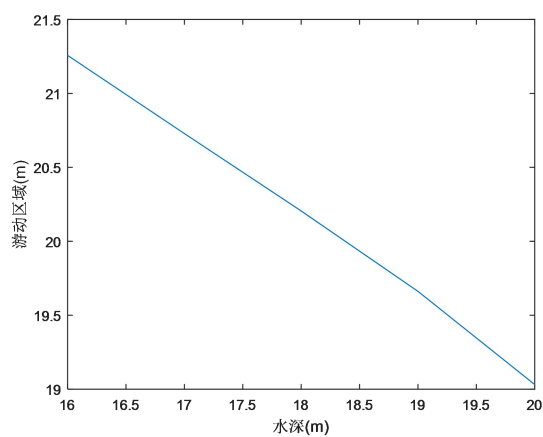


图 3.6 浮标游动区域变化图

(2) 水深，风速取定值，改变海水速度对相关量的影响

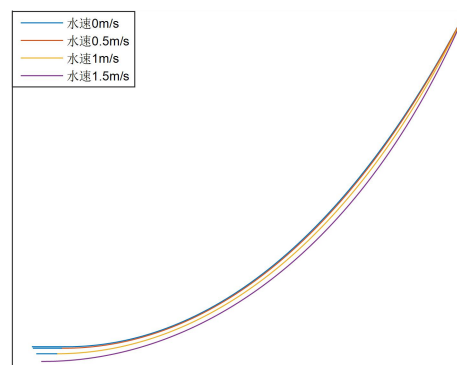
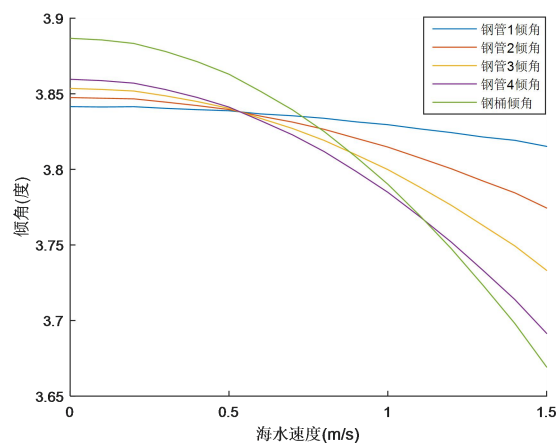


图 3.7 倾角变化图

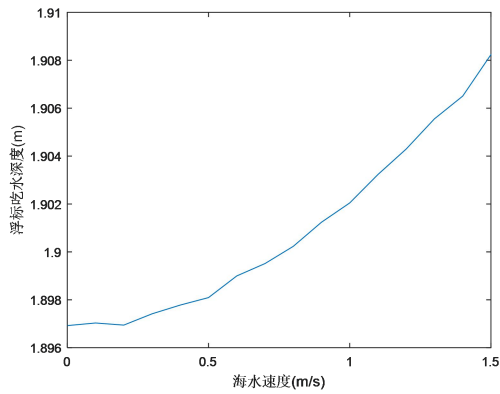


图 3.9 浮标吃水深度变化图

图 3.8 水深变化图

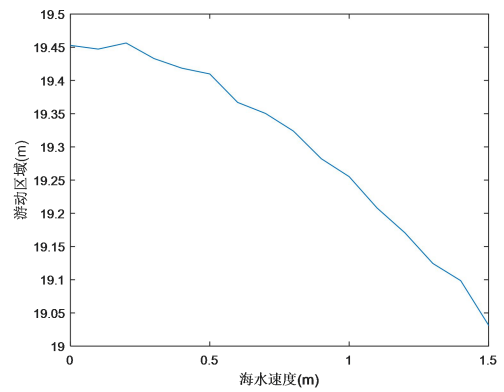


图 3.10 浮标游动区域变化图

(3) 水深, 海水速度取定值, 改变风速对相关量的影响

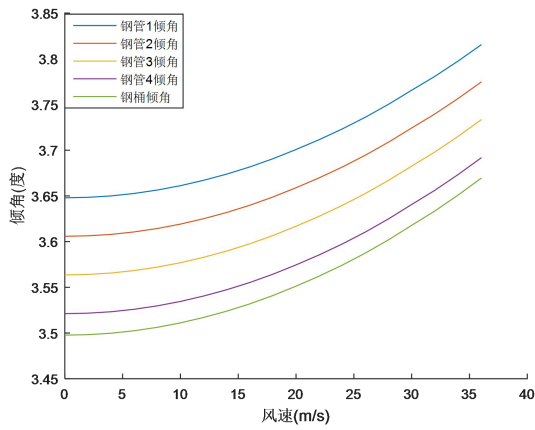


图 3.11 倾角变化图

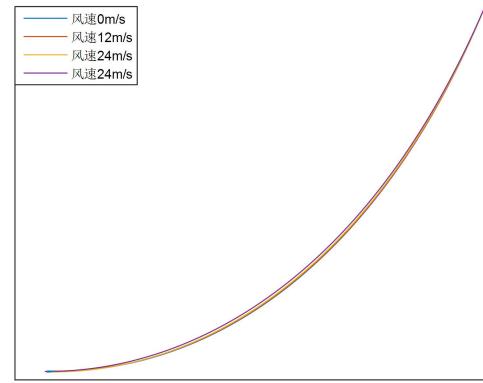


图 3.12 水深变化图

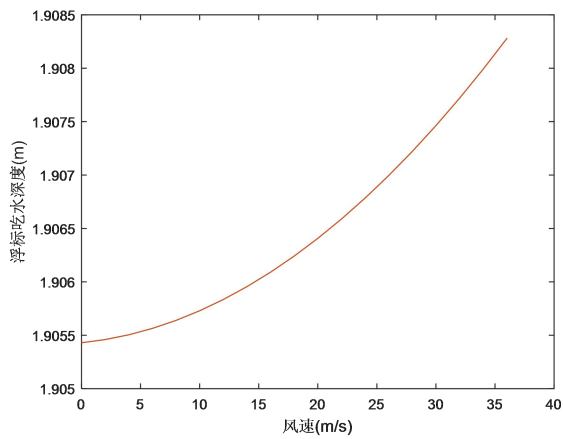


图 3.13 浮标吃水深度变化图

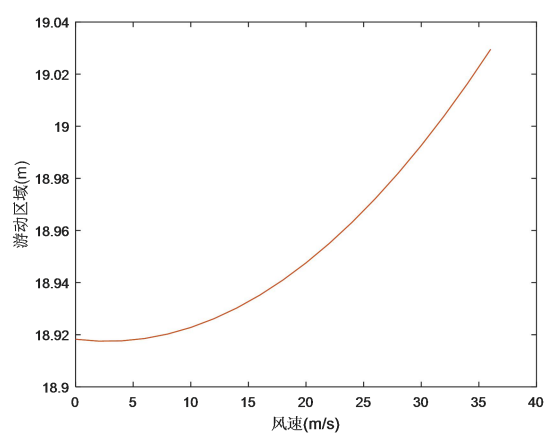


图 3.14 浮标游动区域变化图

六、模型的评价与改进

优点:

- 1、针对锚链受力情况的不同采用悬念线方程和分段外推法进行分析，针对性强且误差较小；
- 2、第三问中考虑了水流力对锚链的作用，使结果更为准确；
- 3、对问题的求解中，将复杂的方程转化成求解线性约束的问题，求解更为简单。

缺点:

- 1、在对锚链投影面积的求解可能存在一定的误差；
- 2、在设计系泊系统选取锚链是未考虑锚链的最大张力。

七、参考文献

- [1]卓金武,李必文,等. MATLAB 在数学建模中的应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011.
- [2]洪礼康. 漂浮式液压海浪发电装置锚泊系统研究[D]. 山东: 山东大学, 2014.
- [3]汤小霞. 波浪作用下锚泊系统动力响应的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [4]陈晕鹤, 赵晶. 考虑水流力作用的锚链力计算方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2016, 17 (2): 116-120.
- [5]郝春玲, 张亦飞, 滕斌, 等. 流速分布及锚链自身刚度对弹性单锚链系统变形和受力的影响[J]. 海洋学研究, 2006, 24 (3): 90-95.
- [6]樊天慧, 乔东生, 欧进萍. 深水悬链锚泊系统等效截断水深优化设计[J]. 船舶力学, 2015, 19 (5), 518-525.
- [7]无档锚链.
http://wenku.baidu.com/link?url=0KfT4aebVBfCAuMieRkxUbEkXjKv0y4vkH1bnPD0g7a9VuR1N7m5BmR_xmxgCeayDkfuWLw68fX77cJ3ye0KPqf4bBeQ-qDjd1VD0xwmPmC. 2016. 09. 11.

附录

附录一 附表

附录二 问题一

```
options=gaoptimset('PopInitRange',[0;2],'Generations',500,'StallGenLimit',500);
[h0,f]=ga(@lbw,1,options);
h0      %吃水深度
w1=10*9.8-1025*9.8*3.14*(0.05/2)^2;
w2=(100)*9.8-1025*9.8*(3.14*0.15^2);
w3=1200*9.8-1025*9.8*(1200/7900);
s0=22.05;
p=0.8964*7*9.8;
H=0.625*2*(2-h0)*12*12;%第一间中修改风速
w0=31541.3*h0-9800;
b1=atand((w0)/H);90-b1%钢管 1 角度
b2=atand((w0-w1)/H);90-b2%钢管 2 角度
b3=atand((w0-2*w1)/H);90-b3%钢管 3 角度
b4=atand((w0-3*w1)/H);90-b4%钢管 4 角度
T5=w0-4*w1;
b5=atand((T5-w2)/H);90-b5%钢桶角度
h=18-h0-sind(b1)-sind(b2)-sind(b3)-sind(b4)-sind(b5)
a=H/p;
sm=sqrt(h^2+2*a*h);
if sm<=22.05
    a2=0 %锚的链接处的切线方向与海床的夹角
    xB=a*asinh(sm/a);
    a1=atand(sinh(xB/a)) %锚链上端与水平面夹角
    L=(s0-sm)+xB+cosd(b1)+cosd(b2)+cosd(b3)+cosd(b4)+cosd(b5) %游动区域
    l1=s0-sm %卧链长度
else
    yA=s0*sqrt(1/4+(a^2)/(s0*s0-h*h))-h/2;
    xA=a*acosh(yA/a);
    a2=atand(sinh(xA/a))
    yB=yA+h;
    xB=a*acosh(yB/a);
    a1=atand(sinh(xB/a))
    L=xB-xA+cosd(b1)+cosd(b2)+cosd(b3)+cosd(b4)+cosd(b5) %游动区域
end

//////////

options=gaoptimset('PopInitRange',[0;2],'Generations',500,'StallGenLimit',500);
[h0,f]=ga(@lbw,1,options);
h0      %吃水深度
w1=10*9.8-1025*9.8*3.14*(0.05/2)^2;
w2=(100)*9.8-1025*9.8*(3.14*0.15^2);
w3=1200*9.8-1025*9.8*(1200/7900);
s0=22.05;
p=0.8964*7*9.8;
H=0.625*2*(2-h0)*12*12;%第一间中修改风速
w0=31541.3*h0-9800;
```

```

b1=atand((w0)/H)%钢管 1 角度
b2=atand((w0-w1)/H)%钢管 2 角度
b3=atand((w0-2*w1)/H)%钢管 3 角度
b4=atand((w0-3*w1)/H)%钢管 4 角度
T5=w0-4*w1;
b5=atand((T5-w2)/H)%钢桶角度
h=18-h0-sind(b1)-sind(b2)-sind(b3)-sind(b4)-sind(b5)
a=H/p;
sm=sqrt(h^2+2*a*h);
if sm<=22.05
    a2=0 %锚的连接处的切线方向与海床的夹角
    xB=a*asinh(sm/a);
    a1=atand(sinh(xB/a))%锚链上端与水平面夹角
    L=(s0-sm)+xB+cosd(b1)+cosd(b2)+cosd(b3)+cosd(b4)+cosd(b5)%游动区域
else
    yA=s0*sqrt(1/4+(a^2)/(s0*s0-h*h))-h/2;
    xA=a*acosh(yA/a);
    a2=atand(sinh(xA/a))
    yB=yA+h;
    xB=a*acosh(yB/a);
    a1=atand(sinh(xB/a))
    L=xB-xA+cosd(b1)+cosd(b2)+cosd(b3)+cosd(b4)+cosd(b5)%游动区域
end
//////////

```

附录三 问题二

```

function f= lbw2( x )
if (x(1)<=0|x(1)>=2|x(2)<10234|x(2)>52699)
    f=inf;
else
    w1=10*9.8-1025*9.8*3.14*(0.05/2)^2;
    w2=(100)*9.8-1025*9.8*(3.14*0.15^2);
    p=0.8964*7*9.8;
    H=0.625*2*(2-x(1))*36*36;
    w0=31541.3*x(1)-9800;
    b1=atan((w0)/H);
    b2=atan((w0-w1)/H);
    b3=atan((w0-2*w1)/H);
    b4=atan((w0-3*w1)/H);
    T5=w0-4*w1;
    b5=atan((T5-w2)/H);
    h=18-x(1)-sin(b1)-sin(b2)-sin(b3)-sin(b4)-sin(b5);
    a=H/p;
    sm=sqrt(h^2+2*a*h);
    if abs(sm-22.05)>0.5
        f=inf;
    else
        f=p*sm-T5+w2+x(2);
    end
    f=abs(f);
end

//////////
options=gaoptimset('PopInitRange',[0,10000;2,50000],'Generations',500,'StallGenLimit',500);
[h0,f]=ga(@lbw2,2,options);

```

```
f
vpa(h0,5)
```

附录四 问题三

```
function f= lbw3( x )
if (x(1)<=0|x(1)>=2|x(2)<10234|x(2)>52699)
    f=inf;
else
    vf=36;
    vs=1.5;
    H0=20;
    hf=0.625*(2-x(1))*2*vf*vf;
    hs=374*x(1)*2*1.5*1.5;
    w1=10*9.8-1025*9.8*3.14*(0.05/2)^2;
    w2=(100)*9.8-1025*9.8*(3.14*0.15^2);
    p=0.8964*28.12*9.8;%单位长质量
    w0=31541.3*x(1)-9800;
    b1=atan((w0)/(hf+hs));
    h1=374*sin(b1)*0.05*vs*vs;
    b2=atan((w0-w1)/(hf+hs+h1));
    h2=374*sin(b2)*0.05*vs*vs;
    b3=atan((w0-2*w1)/(hs+hf+h1+h2));
    h3=374*sin(b3)*0.05*vs*vs;
    b4=atan((w0-3*w1)/(hf+hs+h1+h2+h3));
    h4=374*sin(b4)*0.05*vs*vs;
    T5=w0-4*w1;
    b5=atand((T5-w2)/(hf+hs+h1+h2+h3+h4));
    h5=374*sin(b5)*0.3*vs*vs;
    h=H0-x(1)-sin(b1)-sin(b2)-sin(b3)-sin(b4)-sind(b5);
    TZ=zeros(1);
    TX=zeros(1);
    TZ(1)=T5-w2-x(2);
    TX(1)=hs+hf+h1+h2+h3+h4+h5;
    n=1;
    ds=0.180;%每节链长
    d=0.108;%链宽
    Z=0;
    while TZ(n)>0
        C=atan(TZ(n)/TX(n));
        n=n+1;
        TX(n)=TX(n-1)+374*d*ds*sin(C)*vs*vs;
        TZ(n)=TZ(n-1)-p*ds;
        Z=ds*sin(C)+Z;
    end
    if abs(h-Z)>0.5
        f=inf;
    elseif abs(90-b5)>5
        f=inf;
    else
        f=x(1)/2+(90-b5)/5;
    end
end
end
/*****/
options=gaoptimset('PopInitRange',[0,10000;2,50000],'Generations',500,'StallGenLimit',500);
[x,f]=ga(@lbw3,2,options);
f
vpa(x,6)
```



```

vf=36;
vs=1.5;
H0=20;
hf=0.625*(2-x(1))*2*vf*vf;
hs=374*x(1)*2*1.5*1.5;
w1=10*9.8-1025*9.8*3.14*(0.05/2)^2;
w2=(100)*9.8-1025*9.8*(3.14*0.15^2);
p=0.8964*28.12*9.8;%单位长质量
w0=31541.3*x(1)-9800;
b1=atan((w0)/(hf+hs));
h1=374*sin(b1)*0.05*vs*vs;
b2=atan((w0-w1)/(hf+hs+h1));
h2=374*sin(b2)*0.05*vs*vs;
b3=atan((w0-2*w1)/(hs+hf+h1+h2));
h3=374*sin(b3)*0.05*vs*vs;
b4=atan((w0-3*w1)/(hf+hs+h1+h2+h3));
h4=374*sin(b4)*0.05*vs*vs;
T5=w0-4*w1;
b5=atan((T5-w2)/(hf+hs+h1+h2+h3+h4));
h5=374*sin(b5)*0.3*vs*vs;
h=20-x(1)-sin(b1)-sin(b2)-sin(b3)-sin(b4)-sin(b5);
TZ=zeros(1);
TX=zeros(1);
TZ(1)=T5-w2-x(2);
TX(1)=hs+hf+h1+h2+h3+h4+h5;
n=1;
ds=0.180;%每节链长
d=0.108;%链宽
Z=0;
X=0;
while TZ(n)>0
    C=atan(TZ(n)/TX(n));
    n=n+1;
    TX(n)=TX(n-1)+374*d*ds*sin(C)*vs*vs;
    TZ(n)=TZ(n-1)-p*ds;
    Z=ds*sin(C)+Z;
    X=ds*cos(C)+X;
end
sm=n*ds,%链长
X+cos(b1)+cos(b2)+cos(b3)+cos(b4)+cos(b5),%游动区域
90-b5*180/pi,%钢桶倾角

/*****/
function f=lbw4(x)
if (x<=0|x>=2)
    f=inf;
else
    vf=36;%风速
    vs=1.4;%洋流
    H0=19;%深度
    hf=0.625*(2-x)*2*vf*vf;
    hs=374*x*2*1.5*1.5;
    w1=10*9.8-1025*9.8*3.14*(0.05/2)^2;
    w2=(100)*9.8-1025*9.8*(3.14*0.15^2);
    w3=43791.8;%重物球浮重力
    p=0.8964*28.12*9.8;
    w0=31541.3*x-9800;
    b1=atan((w0)/(hf+hs));

```

```

h1=374*sin(b1)*0.05*vs*vs;
b2=atan((w0-w1)/(hf+hs+h1));
h2=374*sin(b2)*0.05*vs*vs;
b3=atan((w0-2*w1)/(hs+hf+h1+h2));
h3=374*sin(b3)*0.05*vs*vs;
b4=atan((w0-3*w1)/(hf+hs+h1+h2+h3));
h4=374*sin(b4)*0.05*vs*vs;
T5=w0-4*w1;
b5=atan((T5-w2)/(hf+hs+h1+h2+h3+h4));
h5=374*sin(b5)*0.3*vs*vs;
h=H0-x-sin(b1)-sin(b2)-sin(b3)-sin(b4)-sind(b5);
TZ=zeros(1);
TX=zeros(1);
TZ(1)=T5-w2-w3;
TX(1)=hs+hf+h1+h2+h3+h4+h5;
n=1;
ds=0.180;
d=0.108;
Z=0;
while TZ(n)>0
    C=atan(TZ(n)/TX(n));
    n=n+1;
    TX(n)=TX(n-1)+374*d*ds*sin(C)*vs*vs;
    TZ(n)=TZ(n-1)-p*ds;
    Z=ds*sin(C)+Z;
end
f=abs(h-Z);
end
end
/*****8
options=gaoptimset('PopInitRange',[0;2],'Generations',500,'StallGenLimit',500);
[x,f]=ga(@lbw4,1,options);
vf=36;
vs=1.5;
H0=19;
hf=0.625*(2-x)^2*vf*vf;
hs=374*x^2*1.5*1.5;
w1=10*9.8-1025*9.8*3.14*(0.05/2)^2;
w2=(100)*9.8-1025*9.8*(3.14*0.15^2);
w3=43791.8;%重物球浮重力
p=0.8964*28.12*9.8;
w0=31541.3*x-9800;
b1=atan((w0)/(hf+hs));
h1=374*sin(b1)*0.05*vs*vs;
b2=atan((w0-w1)/(hf+hs+h1));
h2=374*sin(b2)*0.05*vs*vs;
b3=atan((w0-2*w1)/(hs+hf+h1+h2));
h3=374*sin(b3)*0.05*vs*vs;
b4=atan((w0-3*w1)/(hf+hs+h1+h2+h3));
h4=374*sin(b4)*0.05*vs*vs;
T5=w0-4*w1;
b5=atan((T5-w2)/(hf+hs+h1+h2+h3+h4));
h5=374*sin(b5)*0.3*vs*vs;
h=H0-x-sind(b1)-sind(b2)-sind(b3)-sind(b4)-sind(b5);
TZ=zeros(1);
TX=zeros(1);
TZ(1)=T5-w2-w3;
TX(1)=hs+hf+h1+h2+h3+h4+h5;
n=1;
ds=0.180;

```

```

d=0.108;
Z=zeros(1);
X=zeros(1);
while TZ(n)>0
    C=atan(TZ(n)/TX(n));
    n=n+1;
    TX(n)=TX(n-1)+374*d*ds*sin(C)*vs*vs;
    TZ(n)=TZ(n-1)-p*ds;
    Z(n)=ds*sin(C)+Z(n-1);
    X(n)=ds*cos(C)+X(n-1);
end
L=X(n)+(24.66-n*ds)+cosd(b1)+cosd(b2)+cosd(b3)+cosd(b4)+cosd(b5);
%cs1(4)=90-b1;%ch1(15)=90-b1;%cf1(18)=90-b1;%
%cs2(4)=90-b2;%ch2(15)=90-b2;%cf2(18)=90-b2;%
%cs3(4)=90-b3;%ch3(15)=90-b3;%cf3(18)=90-b3;%
%cs4(4)=90-b4;%ch4(15)=90-b4;%cf4(18)=90-b4;%
%cs5(4)=90-b5;%ch5(15)=90-b5;%cf5(18)=90-b5;%
%ss(4)=x;%sh(15)=x;%sf(18)=x;%
%ls(4)=L;%lh(15)=L;%lf(18)=L;%
%zh3=Z; xh3=X;
%zs2=Z; xs2=X;
%xf3=X; zf3=Z;

/*****/
figure(1)
l=[16:1:20];
hold on
plot(l,cs1);
plot(l,cs2);
plot(l,cs3);
plot(l,cs4);
plot(l,cs5);
xlabel('水深(m)');
ylabel('倾角(度)');
legend('钢管 1 倾角','钢管 2 倾角','钢管 3 倾角','钢管 4 倾角','钢桶倾角');
figure(2)
hold on;plot(xs1,zs1);plot(xs2,zs2);plot(xs3,zs3);
line([xs1(106),xs1(106)+(137-106)*0.18],[zs1(106),zs1(106)]);
line([xs2(121),xs2(121)+(137-121)*0.18],[zs2(121),zs2(121)]);
legend('水深 16m','水深 18m','水深 20m');
set(gca,'xtick',[])
set(gca,'ytick',[])
figure(3)
plot(l,ss);
ylabel('浮标吃水深度(m)');
xlabel('水深(m)');
figure(4)
plot(l,ls);
ylabel('游动区域(m)');
xlabel('水深(m)');
figure(5)
l=[0:0.1:1.5];
hold on
plot(l,ch1);
plot(l,ch2);
plot(l,ch3);
plot(l,ch4);
plot(l,ch5);
xlabel('海水速度(m/s)');

```

```

ylabel('倾角(度)');
legend('钢管 1 倾角','钢管 2 倾角','钢管 3 倾角','钢管 4 倾角','钢桶倾角');
figure(6)
hold on;plot(xh1,zh1);plot(xh2,zh2);plot(xh3,zh3); plot(xh4,zh4);
line([xh1(129),xh1(129)+(137-129)*0.18],[zh1(129),zh1(129)]);
line([xh2(130),xh2(130)+(137-130)*0.18],[zh2(130),zh2(130)]);
line([xh3(132),xh3(132)+(137-132)*0.18],[zh3(132),zh3(132)]);
legend('水速 0m/s','水速 0.5m/s','水速 1m/s','水速 1.5m/s');
set(gca,'xtick',[])
set(gca,'ytick',[])
figure(7)
plot(l,sh);
ylabel('浮标吃水深度(m)');
xlabel('海水速度(m/s)');
figure(8)
plot(l,lh);
ylabel('游动区域(m)');
xlabel('海水速度(m)');
figure(9)
l=[0:2:36];
hold on
plot(l,cf1);
plot(l,cf2);
plot(l,cf3);
plot(l,cf4);
plot(l,cf5);
xlabel('风速(m/s)');
ylabel('倾角(度)');
legend('钢管 1 倾角','钢管 2 倾角','钢管 3 倾角','钢管 4 倾角','钢桶倾角');
figure(10)
hold on;plot(xf1,zf1);plot(xf2,zf2);plot(xf3,zf3); plot(xf4,zf4);
line([xf1(135),xf1(135)+(137-135)*0.18],[zf1(135),zf1(135)]);
line([xf2(135),xf2(135)+(137-135)*0.18],[zf2(135),zf2(135)]);
line([xf3(136),xf3(136)+(137-136)*0.18],[zf3(136),zf3(136)]);
legend('风速 0m/s','风速 12m/s','风速 24m/s','风速 24m/s');
set(gca,'xtick',[])
set(gca,'ytick',[])
figure(11)
p1=polyfit(l,sf,2);
y1=polyval(p1,l);
plot(l,y1,l,y1);
ylabel('浮标吃水深度(m)');
xlabel('风速(m/s)');
figure(12)
p1=polyfit(l,lh,3);
y1=polyval(p1,l);
plot(l,y1,l,y1);
ylabel('游动区域(m)');
xlabel('风速(m/s)');

```