

系泊系统设计

摘要

本文针对近浅海观测网的传输节点的原理分析,依据题目所给的设计情景和限制条件,求解并确定锚链的型号、长度和重物球的质量,以维持浮标的吃水深度和游动区域及钢桶的倾斜角度尽可能小,达到海洋观测的作用。

本文首先定性分析了系泊系统各部分的受力情况,将系泊系统进行分块处理,利用离散方法建立钢管及锚链链环的刚性杆模型,并进行定量求解,将所有未知量均用浮标的吃水量来表示。在此过程中,利用弦截法求解一元非线性方程,从而求出吃水量。在此基础上,对各部分的限制条件通过控制变量的方法进行运算,并从物理角度分析并说明了不同变量因素对实际浮标的吃水深度、游动区域及钢桶的倾斜角度的影响差异。在考虑系泊系统设计时,将多目标优化问题通过赋权的方法转换为单一目标优化的求解,并利用遗传算法筛选出最优系泊系统。最后,对模型进行灵敏度分析与稳定性分析并进行模型推广。

针对问题一,将系泊系统进行分块处理,通过对每个模型的静力平衡方程分析,将各个系统所受拉力及所求角度转化为关于浮标吃水量的一元函数。利用浮标吃水量,钢管、钢桶、锚链链环的长度及海水深度,将整个问题转换为长度之和的求解问题。在此过程中,钢管视为刚性杆,利用刚性杆模型处理。由于传统的悬链线方法对于锚链链环是否拖地考虑不当。因此,锚链链环采用离散方法,利用刚性杆模型求解。在此过程中,刚性杆模型里用到了迭代算法。而为了方便方程的求解,本文采用弦截法求解未知量。本文根据实际情况,考虑了重物球的体积即其浮力问题,假设重物球为钢性材料,求得,当海面风速为 12m/s 浮标的吃水深度为 0.68997m ,当海面风速为 24m/s 时浮标的吃水深度为 0.70353m ,进而求出不同风速时的钢桶和各节钢管的倾斜角度、锚链形状和游动区域。

在对问题一的结果进行分析时,风速为 12m/s 时锚链拖地,风速为 24m/s 时,底部锚链链环已离地。利用这一发现检验问题二的求解。对于问题二,利用问题一中的模型和结论,得出当风速为 36m/s 时,浮标吃水量为 0.725702m ,但此时,钢桶的倾斜角度为 9.32° ,锚链末端与海床的夹角为 18.82° 。通过控制变量的方法,研究钢桶的倾斜角度、锚链末端与海床夹角与重物球质量的关系,通过分析图像与数据处理,发现当重物球质量大于 2046.1kg 时,钢桶的倾斜角度条件与锚链末端与海床夹角条件才可同时满足。

针对问题三,基于前两问的分析求解,将问题 1 中的系泊系统受力模型根据海水速度影响情况进行改进与优化。之后,通过控制变量的方法推导出海水深度、海水速度、风速分别对浮标的吃水深度、游动区域、锚链末端倾角及钢桶的倾斜角度的影响。给定风速、海速、海水深度及锚链型号,将浮标吃水深度、游动区域、钢桶的倾斜角表示成关于锚链长度及重物球质量的函数,之后将多目标优化问题转换为单一目标求解。在筛选最优解过程中,利用遗传算法将过程简化处理。对于找出的最优解,通过改变锚链型号,寻找最优的系泊系统设计。最后,分析挑选出的最优系泊系统在不同情况时的钢桶、钢管的倾斜角度、锚链形状、浮标的吃水深度和游动区域。

关键字 系泊系统、弦截法、多目标优化选择、遗传算法

一、 问题重述

1.1 问题背景

近年来,随着社会和经济的高速发展,海洋资源和海洋权益愈发收到全球的关注,如何对近浅海进行实时的观测成为研究的热门[1]。现代海洋观测已进入从空间、海面、水下到海床基的立体观测时代。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共同组成,而其中的核心问题之一就是系泊系统的设计问题,系泊系统设计的关键在于确定锚链的型号、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,以提升传输节点的可操作性,减小观测结果的实际误差。

1.2 问题重述

系泊系统的条件限制

- a) 浮标系统简化为底面直径 2m、高 2m 的圆柱体,其质量为 1000kg。
- b) 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。钢管共 4 节,每节长度 1m,直径为 50mm,每节钢管的质量为 10kg。
- c) 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。
- d) 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。
- e) 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。
- f) 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。

问题 1 选用 II 型电焊锚链 22.05m,重物球质量为 1200kg,水深 18m、海床平坦、海水密度为 $1.025 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。假设海水静止,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 2 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。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 3 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。根据风力、水流力和水深情况,设计系泊系统,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、模型假设与约定

- 1) 假设浮标无论是在近海风载荷还是在近海水流力的影响下始终处于水平状态即无任何倾角;
- 2) 假设重物球的材质为钢,密度为 $7.9 \times 10^3 \text{kg/m}^3$;
- 3) 假设锚链链环及钢管所受到的近海水流力很小,可以忽略;

- 4) 假设钢管、钢桶、锚链等材料均无弹性变形；
- 5) 假设风的方向为单一方向；
- 6) 刚性杆（锚链链环、钢管）相连处均为铰接；
- 7) 海平面、海床均平坦且二者平行；
- 8) 钢桶的质心位于钢桶的几何中心，锚链链环及钢管的密度均匀，质心均位于几何中心；

三、符号说明

F_0	浮标所受到的浮力；
$F_{\text{风}}$	浮标所受到的近海风荷载；
G_0	浮标的重力；
F_1	浮标受到第一个钢管的拉力；
F_i	第 i 个钢管上端所受到的拉力（ $i=1,2,3,4$ ）；
F_{i+1}	第 i 个钢管下端所受到的拉力（ $i=1,2,3,4$ ）；
F_j	第 j 节锚链链环上端所受到的拉力；
F_{j+1}	第 j 节锚链链环下端所受到的拉力；
G_i	第 i 个刚性杆的重力；
θ_i	第 i 个刚性杆上端所受拉力与竖直方向的夹角；
θ_{i+1}	第 i 个刚性杆下端所受拉力与竖直方向的夹角；
α_i	第 i 个刚性杆倾斜角度与水平方向的夹角；
$G_{\text{桶}}$	钢桶的重力；
$G_{\text{球}}$	重物球的重力；
m	重物球的质量；
$F_{\text{浮桶}}$	钢桶所受到的浮力；
$F_{\text{浮球}}$	重物球所受到的浮力；

四、模型的分析、建立与求解

本文首先对系泊系统进行分块处理，通过对每个模型的静力平衡方程分析，将各个系统所受拉力及所求角度转化为关于浮标吃水量的一元未知量。利用浮标吃水量，钢管、钢桶、锚链链环的长度及海水深度，将整个问题转换为长度之和的求解问题。在此过程中，刚性杆模型里用到了迭代算法。而为了方便方程的求解，本文采用弦截法求解未知量。

4.1 系泊系统受力分析

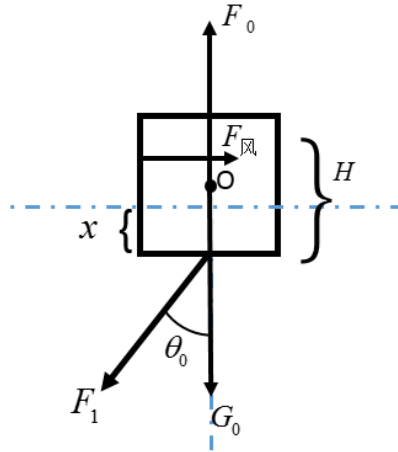
为方便问题分析，本文将系泊系统分成三块分析，即：浮标模型、刚性杆模型、钢桶+重物球模型。通过受力平衡及力矩平衡，得到锚泊线的静力平衡方程。由于本题中每节锚链链环的长度不可忽略，本文改进了传统的悬链线方程法[1]，通过将每节链环视为刚性杆，采用钢管的刚性杆模型，用离散的方法，使问题分析整体化、系统化。

4.1.1 浮标模型

首先设浮标的吃水量为 x ，则，浮标所受浮力为：

$$\begin{aligned} F_0 &= \rho g v \\ &= \rho g x \pi \frac{d^2}{4} \\ &= 1.025 \times 10^3 \times 9.8 \times 3.14 x \end{aligned} \quad (4.1)$$

根据浮标的受力平衡，如图一所示，



图一：浮标受力分析

可得：

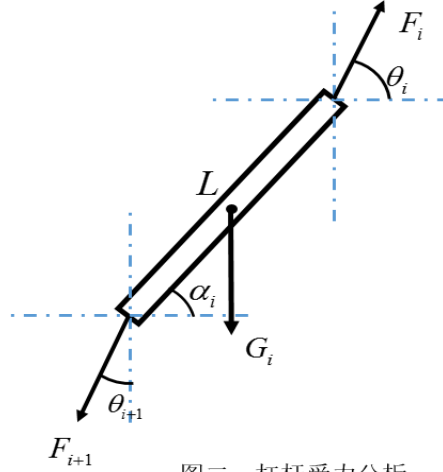
$$\begin{aligned} F_0 &= F_1 \cos \theta_0 + G_0 \\ F_{\text{风}} &= F_1 \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

其中 $F_{\text{风}} = 0.625 \times S v^2 (\text{N})$ 计算，其中 S 为物体在风向法平面的投影面积，

$S = d \times (2 - x) \text{ (m}^2\text{)}$ ， v 为风速(m/s)。其中 d 为浮标的直径。

4. 1. 2 刚性杆模型

将钢管与锚链链环均视为刚性杆，刚性杆两端由于相互间拉扯受到拉力，此外每节刚性杆均有重量，如图二所示：



图二：杠杆受力分析

由受力平衡可得：

$$\begin{aligned} F_i \sin \theta_i &= F_{i+1} \sin \theta_{i+1} \\ F_i \cos \theta_i &= F_{i+1} \cos \theta_{i+1} + G_i \end{aligned} \quad (4.3)$$

对刚性杆重心取矩，由力矩平衡可得：

$$F_i \sin \theta_i \frac{L}{2} \sin \alpha_i - F_i \cos \theta_i \frac{L}{2} \cos \alpha_i + F_{i+1} \sin \theta_{i+1} \frac{L}{2} \sin \alpha_i - F_{i+1} \cos \theta_{i+1} \frac{L}{2} \cos \alpha_i = 0 \quad (4.4)$$

解得：

$$\begin{aligned} F_{i+1} &= \sqrt{(F_i \sin \theta_i)^2 + (F_i \cos \theta_i - G_i)^2} \\ \tan \theta_{i+1} &= \frac{F_i \sin \theta_i}{F_i \cos \theta_i - G_i} \\ \tan \alpha &= \frac{F_i \cos \theta_i + F_{i+1} \cos \theta_{i+1}}{F_i \sin \theta_i + F_{i+1} \sin \theta_{i+1}} \end{aligned} \quad (4.5)$$

对于钢管的刚性杆模型， $i=1,2,3,4$ ，分别代表 4 个钢管，其中 L 表示每个钢管的长度；

对于锚链链环的刚性杆模型，亦可得：

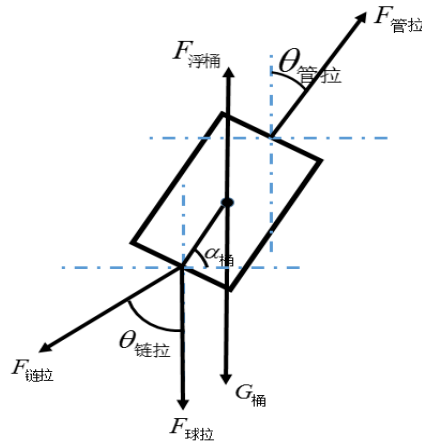
$$\begin{aligned}
F_j \sin \theta_j &= F_{j+1} \sin \theta_{j+1} \\
F_j \cos \theta_j &= F_{j+1} \cos \theta_{j+1} + G_j \\
F_j \sin \theta_j \frac{L}{2} \sin \alpha_j - F_j \cos \theta_j \frac{L}{2} \cos \alpha_j + F_{j+1} \sin \theta_{j+1} \frac{L}{2} \sin \alpha_j - F_{j+1} \cos \theta_{j+1} \frac{L}{2} \cos \alpha_j &= 0
\end{aligned} \tag{4.6}$$

对于问题 1, 锚链总长为 22.05m, 即选用 II 型电焊锚链链环 210 个($j=1, 2 \dots 210$)。

4. 1. 3 钢桶+重物球模型

对钢桶进行分析处理, 将钢桶与重物球视为一个整体。由于题中, 重物球的体积、密度均未告诉, 但结合日常实际情况, 先将重物球视为由钢组成, 即密度视为 $7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 以便代入数据处理。

钢桶的受力分析如图三所示:



图三：钢桶受力分析

由钢桶的受力平衡可得：

$$\begin{aligned}
F_{\text{管拉}} \sin \theta_{\text{管拉}} &= F_{\text{链拉}} \sin \theta_{\text{链拉}} \\
F_{\text{管拉}} \cos \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{浮桶}} + F_{\text{浮球}} &= F_{\text{链拉}} \cos \theta_{\text{链拉}} + G_{\text{桶}} + F_{\text{球拉}}
\end{aligned} \tag{4.7}$$

$$F_{\text{球拉}} + F_{\text{浮球}} = G_{\text{球}} \tag{4.8}$$

其中, $F_{\text{管拉}}$ 为第 4 根钢管拉钢桶的拉力, $\theta_{\text{管拉}}$ 为 $F_{\text{管拉}}$ 与竖直方向的夹角;

$F_{\text{链拉}}$ 为第 1 节锚链链环拉钢桶的拉力, $\theta_{\text{链拉}}$ 为 $F_{\text{链拉}}$ 与竖直方向的夹角;

$F_{\text{球拉}}$ 为重物球拉钢桶的拉力, $F_{\text{浮球}}$ 为重物球所受到的浮力, $G_{\text{球}}$ 为重物球的重力。

根据作用力及反作用力,

$$\begin{aligned}
F_{\text{管拉}} &= F_i, i = 4+1; \quad \theta_{\text{管拉}} = \theta_i, i = 4+1; \\
F_{\text{链拉}} &= F_j, j = 1; \quad \theta_{\text{链拉}} = \theta_j, j = 1
\end{aligned} \tag{4.9}$$

对钢桶重心取矩，由力矩平衡可得：

$$F_{\text{管拉}} \sin \theta_{\text{管拉}} \frac{L}{2} \sin \alpha_{\text{桶}} - F_{\text{管拉}} \cos \theta_{\text{管拉}} \frac{L}{2} \cos \alpha_{\text{桶}} + F_{\text{链拉}} \sin \theta_{\text{链拉}} \frac{L}{2} \sin \alpha_{\text{桶}} - F_{\text{链拉}} \cos \theta_{\text{链拉}} \frac{L}{2} \cos \alpha_{\text{桶}} - F_{\text{球拉}} \frac{L}{2} \cos \alpha_{\text{桶}} = 0 \quad (4.10)$$

解出：

$$F_{\text{链拉}} = \sqrt{(F_{\text{管拉}} \sin \theta_{\text{管拉}})^2 + (F_{\text{管拉}} \cos \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{浮桶}} + F_{\text{浮球}} - G_{\text{球}} - G_{\text{桶}})^2}$$

$$\tan \theta_{\text{链拉}} = \frac{F_{\text{管拉}} \sin \theta_{\text{管拉}}}{F_{\text{管拉}} \cos \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{浮桶}} + F_{\text{浮球}} - G_{\text{球}} - G_{\text{桶}}} \quad (4.11)$$

$$\tan \alpha_{\text{桶}} = \frac{F_{\text{管拉}} \cos \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{链拉}} \cos \theta_{\text{链拉}} + G_{\text{球}} - F_{\text{浮球}}}{F_{\text{管拉}} \sin \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{链拉}} \sin \theta_{\text{链拉}}}$$

4.2 长度关系

由吃水量+钢管在竖直方向的投影+钢桶在竖直方向的投影+各节锚链链环在竖直方向的投影=海水水深。（锚链底部松弛时，求得的底部拖地的锚链链环与水平的夹角为 0。即：拖地的那些锚链链环 $\alpha_j=0$ 。）可得：

$$x + L_{\text{钢管}} \sum_{i=1}^4 \sin \alpha_i + 0.105 \sum_{j=1}^{210} \sin \alpha_j + L_{\text{钢桶}} \sin \alpha_{\text{钢桶}} = 18 \quad (4.12)$$

其中， $L_{\text{钢管}}=L_{\text{钢桶}}=1m$ 。

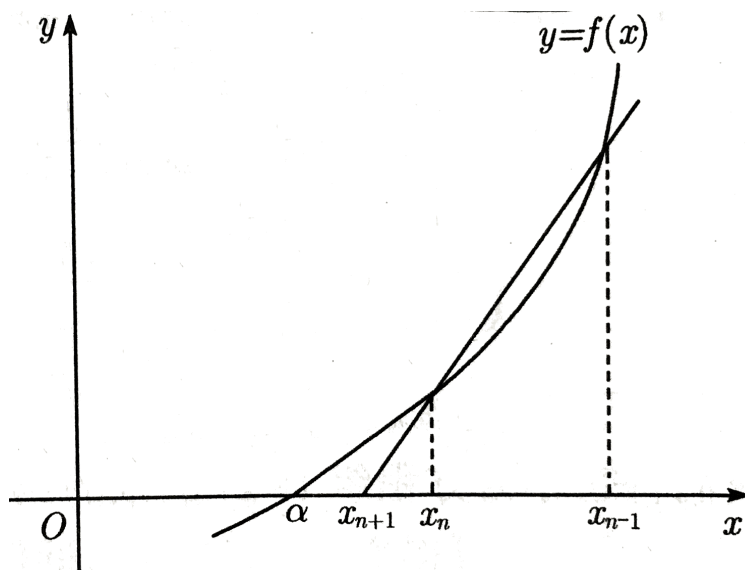
注：4.12 式中的 0.105，210 是在问题 1 及问题 2 中成立的数值，及在选用 II 型电焊锚链 22.05m 时才成立，在问题 3 中，这两个数值将发生变化。

根据上述推导，所有力与角度均由浮标的吃水量来确定，解公式 4.12，实际是解关于浮标吃水量 x 的一元方程。但由于方程较复杂，本文采用弦截法求解。

4.3 弦截法

弦截法[4]是用直线代替曲线求根的近似值方法，弦截法超线性收敛，其收敛的阶为 $p=1.618$ ，具有较高的收敛速度，此外不要求函数的导数，因此相比二分法和牛顿迭代法[5]更适合本题的求解。

设 x_{n-1}, x_n 是 $f(x)=0$ 的两个近似根，过两点 $(x_{n-1}, f(x_{n-1}))$ 和 $(x_n, f(x_n))$ 作直线，将直线与 x 轴交点的横坐标 x_{n+1} 作为 $f(x)=0$ 的新近似根，如图所示：



图四：弦截法

过两点 $(x_{n-1}, f(x_{n-1}))$ 和 $(x_n, f(x_n))$ 的直线方程为

$$y = f(x_n) + \frac{f(x_n) - f(x_{n-1})}{x_n - x_{n-1}}(x - x_n) \quad \text{令 } y = 0, \text{ 则}$$

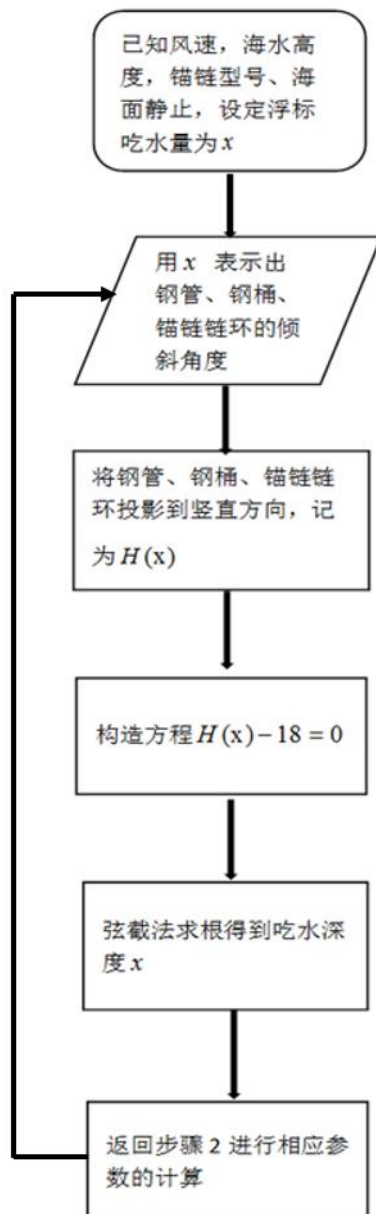
$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f(x_n) - f(x_{n-1})}(x_n - x_{n-1})。$$

利用上面的递推关系迭代便可求出高精度的根。

4.4 问题一求解

本题算法流程如下图所示：

问题 1 算法流程



通过计算, 选取弦截法的初始值为 $x_0 = 0.4, x_1 = 1.4$ 。用 MATLAB 编程求解, 得出如下结果:

海风风速为 12m/s 时:

浮标吃水深度: 0.688997m

浮标游动半径: 14.355685m

钢管 1 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角): 1.136627°

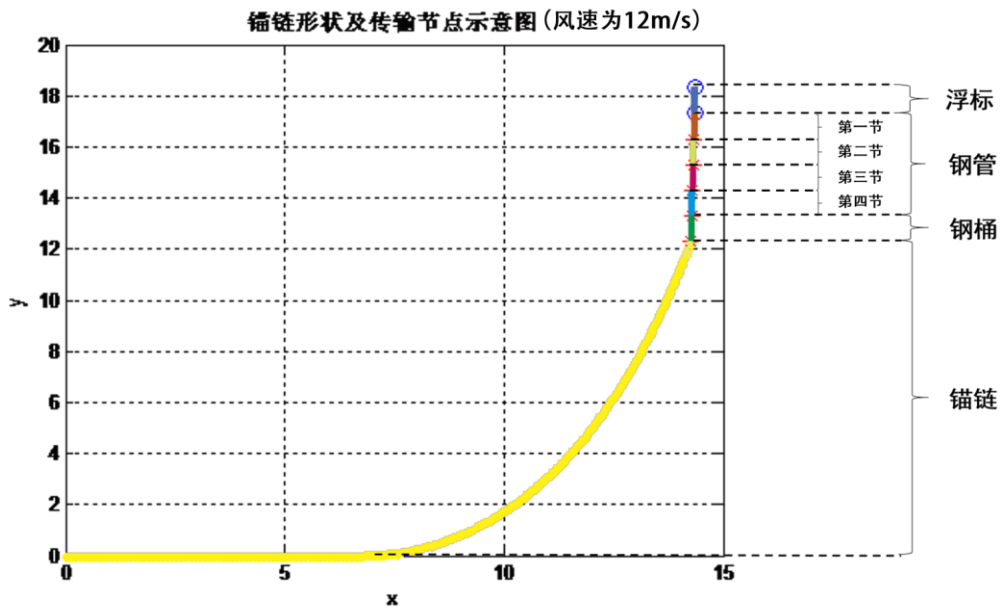
钢管 2 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角): 1.146068°

钢管 3 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角): 1.155667°

钢管 4 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角): 1.165427°

钢桶倾斜角度(钢桶与竖直线的夹角): 1.184204°

锚链形状如下：



图像分析：

海面风速为 12m/s 时，锚链底端拖地，及底端锚链链环的水平夹角为 0° 。

海风风速为 24m/s 时：

浮标吃水深度：0.703534m

浮标游动半径：17.521165m

钢管 1 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角)： 4.321477°

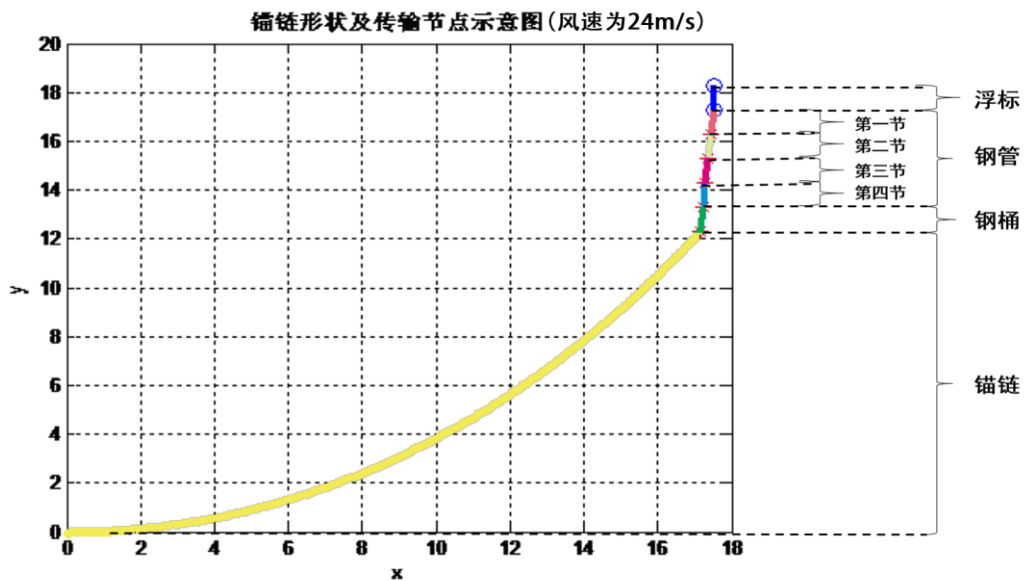
钢管 2 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角)： 4.355903°

钢管 3 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角)： 4.390881°

钢管 4 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角)： 4.426424°

钢桶倾斜角度(钢桶与竖直线的夹角)： 4.494726°

锚链形状如下：

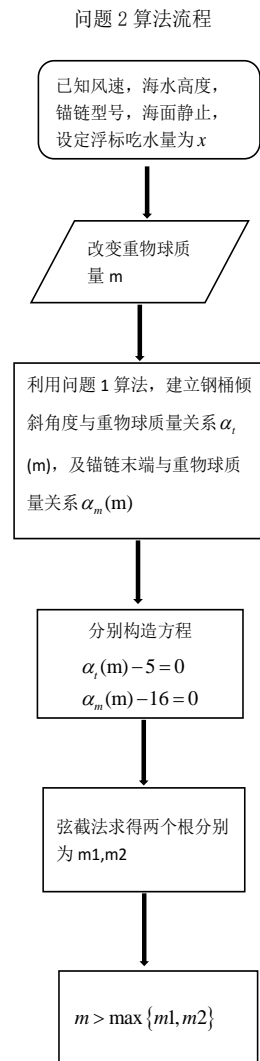


图像分析：

海面风速为 24m/s 时，从图像看锚链底端近似拖地，但通过计算发现，及底端锚链链环的水平夹角为 0.26° ，即此时锚链已离地。

4.5 问题二求解

本题算法流程如下图所示：



在问题一的假设下，利用之前的模型和算法求得：

海面风速为 36m/s 时：

浮标吃水深度：0.725702m

浮标游动半径：18.799289m

钢管 1 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角)： 8.987579°

钢管 2 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角)： 9.054449°

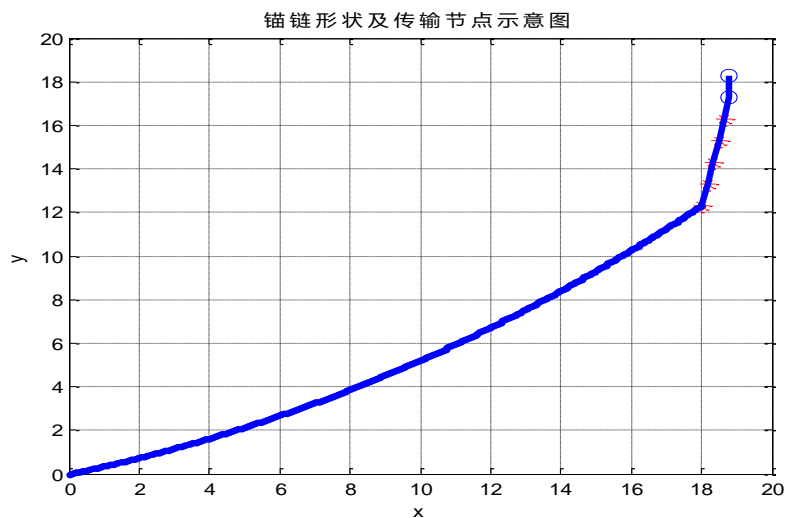
钢管 3 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角)： 9.122313°

钢管 4 倾斜角度(钢管与竖直线的夹角)： 9.191193°

钢桶倾斜，角度(钢桶与竖直线的夹角)： 9.323330°

锚链末段与海床的夹角： 18.825366°

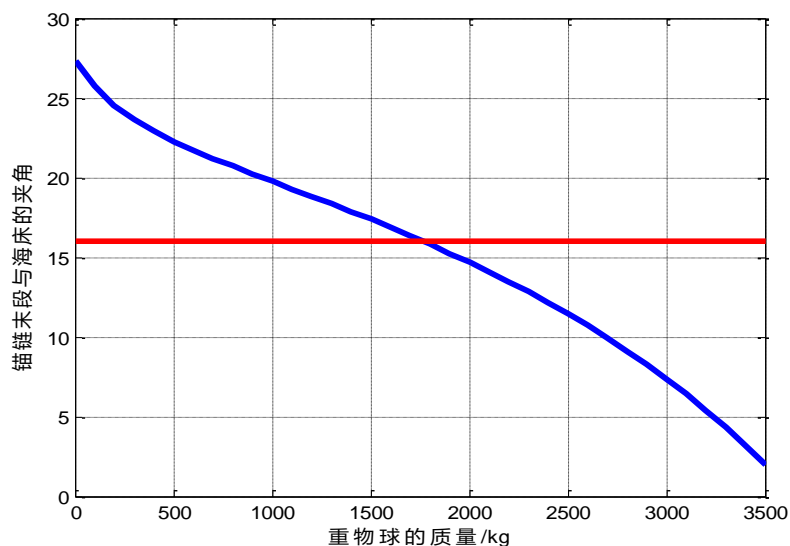
锚链形状如下图所示：



分析：钢桶的倾斜角度及锚链末段与海床的夹角均大于题中的限制条件，因此改变重物球质量，控制钢桶的倾斜角度及锚链末段与海床的夹角在合理范围内。

利用之前模型及 **MATLAB** 画图分析研究重物球质量对于钢桶倾斜角度及锚链末端倾斜角度的影响。

重物球与锚链末段与海床的夹角的关系：



交点坐标（1766.1, 16）

重物球质量为 1766.0kg 时：

钢桶倾斜角度(钢桶与竖直线的夹角)： 6.053869°

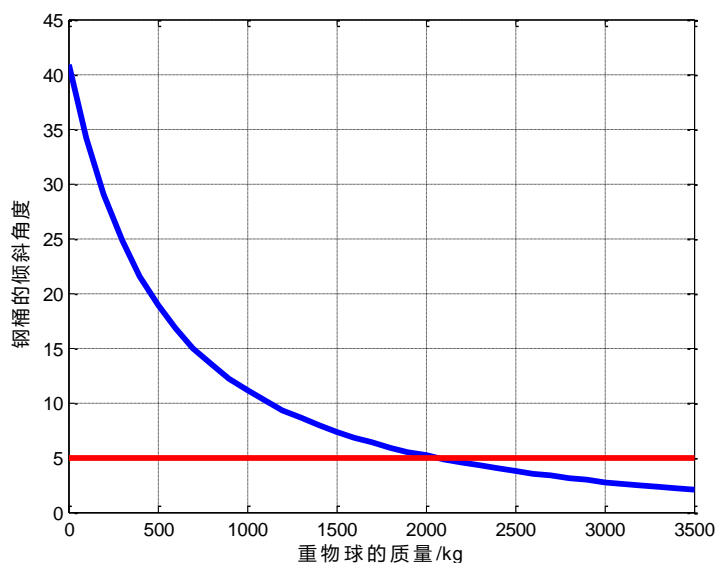
锚链末段与海床的夹角： 16.000398°

重物球质量为 1766.2kg 时：

钢桶倾斜角度(钢桶与竖直线的夹角)： 6.053018°

锚链末段与海床的夹角：15.999320°

重物球质量与钢桶的倾斜角度关系：



交点坐标 (2046.1, 5)

综上为满足题设要求，重物球质量应大于 2046.1kg

当重物球质量为 2046.0kg 时：

钢桶倾斜角度(钢桶与竖直线的夹角)：5.000450°

锚链末段与海床的夹角：14.415544°

当重物球质量为 2046.2kg 时：

钢桶倾斜角度(钢桶与竖直线的夹角)：4.999785°

锚链末段与海床的夹角：14.414353°

注：若不考虑重物球的浮力，解得当重物球质量大于 1850kg 时才能满足题设限制。分析原因：当球的质量越大时，体积也就越大，重物球所受的浮力相应也就越大，对整体系统分析越大，因此不能忽略重物球浮力的影响。

重物球质量的上限情况：

当钢桶不受锚链拉力时，根据受力平衡知：

$$\begin{aligned}
 G_{\text{浮}} + G_{\text{桶}} + G_{\text{球}} &= F_{\text{浮}} + F_{\text{浮桶}} + F_{\text{浮球}} \\
 (1000 + 100 + m) \times g &= \rho g (V_1 + V_2 + V_3) \\
 &= \rho g (6.28 + 0.07065 + \frac{m}{\rho_{\text{重物球}}})
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

解出重物球质量为 6215.10kg.

4.6 问题三求解

总体思路：

首先由于海水速度的影响，将问题 1 中的系统受力模型进行改进；接着通过

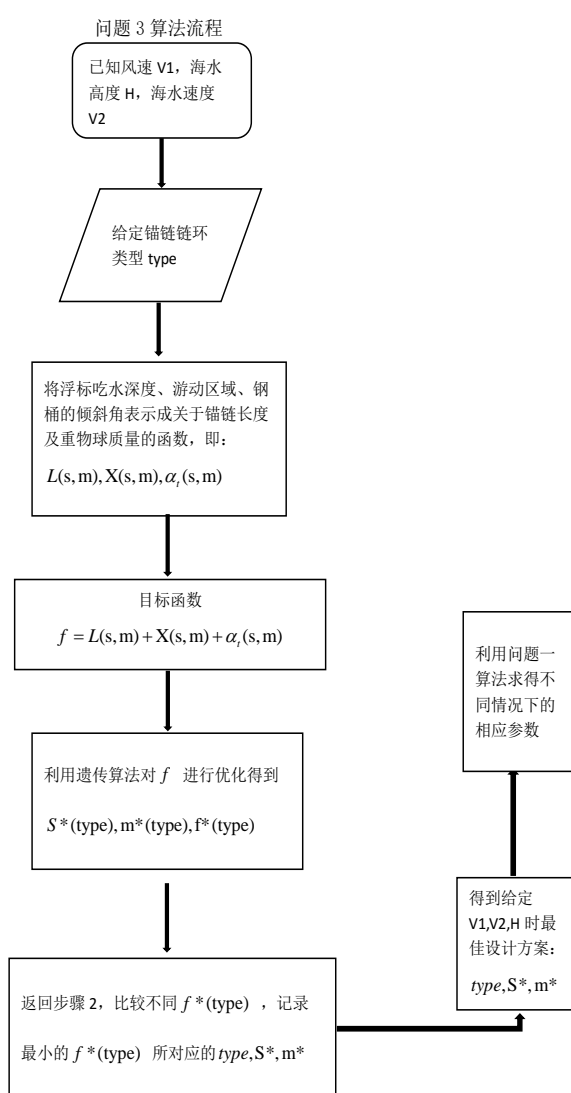
控制变量的方法，给定锚链型号、锚链长度、重物球质量，分别找出海水深度、海水速度、风速对浮标吃水深度、游动区域、锚链末端倾角及钢桶的倾斜角度的影响。

给定风速、海速、海水深度，对于特定锚链型号，则浮标吃水深度、游动区域、钢桶的倾斜角是关于锚链长度及重物球质量的函数 $L(s, m), X(s, m), \alpha_t(s, m)$ 。

将多目标优化问题转换为单一目标优化函数 $f = \frac{1}{10} L(s, m) + X(s, m) + \alpha_t(s, m)$

通过遗传算法寻找满足目标函数最优的锚链长度及重物球质量；比较 5 种锚链型号的解，得到最优的系泊系统设计；最后利用上面的设计计算得到钢桶、钢管的倾斜角度、锚链形状、浮标的吃水深度和游动区域。

本题算法流程如下图所示：



4. 6. 1 模型改进

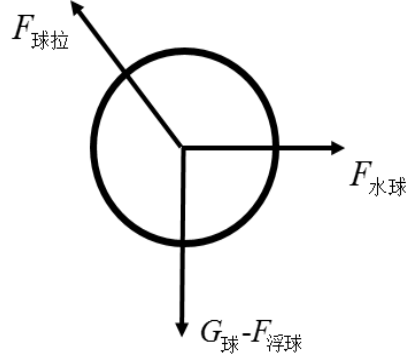
由假设知，在近海风载荷及近海水流力的影响下，浮标仍按水平状态处理，由浮标的受力分析可知：

$$\begin{aligned} F_0 &= F_1 \cos \theta_0 + G_0 \\ F_{\text{水}} + F_{\text{风}} &= F_1 \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

其中, $F_{\text{水}} = 374 \times S \times v^2 = 374 \times 2 \times 1.5^2 x$

假设钢管和锚链链环不受近海水流力的影响, 则问题 1、问题 2 中的刚性杆模型依然使用。

对于重物球, 由于受到近海水流力的影响, 平衡状态发生改变, 如图五所示:

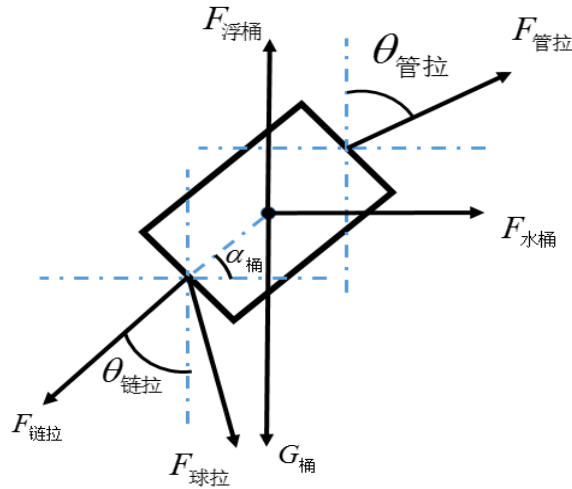


图五: 重物球受力分析

根据重物球的重力及密度, 可求重物球的横截面积:

$$\begin{aligned} mg &= \rho \times \frac{4}{3} \pi r^2 \\ r &= \sqrt[3]{\frac{3mg}{4\pi\rho}} \\ s &= \pi r^2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

对于钢桶, 因受到近海水流力的影响, 平衡状态也发生改变, 如图六所示:



图六: 钢桶的受力分析

平衡公式变为：

$$\begin{aligned} F_{\text{管拉}} \sin \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{水桶}} + F_{\text{水球}} &= F_{\text{链拉}} \sin \theta_{\text{链拉}} \\ F_{\text{管拉}} \cos \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{浮桶}} + F_{\text{浮球}} &= F_{\text{链拉}} \cos \theta_{\text{链拉}} + G_{\text{桶}} + G_{\text{球}} \end{aligned} \quad (4.16)$$

其中， $F_{\text{水桶}}$ 为钢桶所受到的近海水流力， $F_{\text{水球}}$ 为重物球所受到的近海水流力。

对钢桶的重心取矩，则钢桶的重力及所受到的浮力对重心的力矩为 0.

$$\begin{aligned} &F_{\text{管拉}} \sin \theta_{\text{管拉}} \frac{L}{2} \sin \alpha_{\text{桶}} - F_{\text{管拉}} \cos \theta_{\text{管拉}} \frac{L}{2} \cos \alpha_{\text{桶}} \\ &+ F_{\text{链拉}} \sin \theta_{\text{链拉}} \frac{L}{2} \sin \alpha_{\text{桶}} - F_{\text{链拉}} \cos \theta_{\text{链拉}} \frac{L}{2} \cos \alpha_{\text{桶}} \\ &- F_{\text{水球}} \frac{L}{2} \sin \alpha_{\text{桶}} - (G_{\text{球}} - F_{\text{浮球}}) \frac{L}{2} \cos \alpha_{\text{桶}} = 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

为简化问题的求解，

$$F_{\text{桶}} = 374 \times S v^2 = 374 \times d_{\text{桶}} \times L_{\text{桶}} \times \sin \alpha_{\text{桶}} \times v^2 \approx 374 \times d_{\text{桶}} \times L_{\text{桶}} \times v^2 \quad (\alpha_{\text{桶}} \approx 90^\circ)$$

则求得：

$$\begin{aligned} F_{\text{链拉}} &= \sqrt{(F_{\text{管拉}} \sin \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{水桶}} + F_{\text{水球}})^2 + (F_{\text{管拉}} \cos \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{浮桶}} + F_{\text{浮球}} - G_{\text{球}} - G_{\text{桶}})^2} \\ \tan \theta_{\text{链拉}} &= \frac{F_{\text{管拉}} \sin \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{水桶}} + F_{\text{水球}}}{F_{\text{管拉}} \cos \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{浮桶}} + F_{\text{浮球}} - G_{\text{球}} - G_{\text{桶}}} \\ \tan \alpha_{\text{桶}} &= \frac{F_{\text{管拉}} \cos \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{链拉}} \cos \theta_{\text{链拉}} + G_{\text{球}} - F_{\text{浮球}}}{F_{\text{管拉}} \sin \theta_{\text{管拉}} + F_{\text{链拉}} \sin \theta_{\text{链拉}} - F_{\text{水球}}} \end{aligned} \quad (4.18)$$

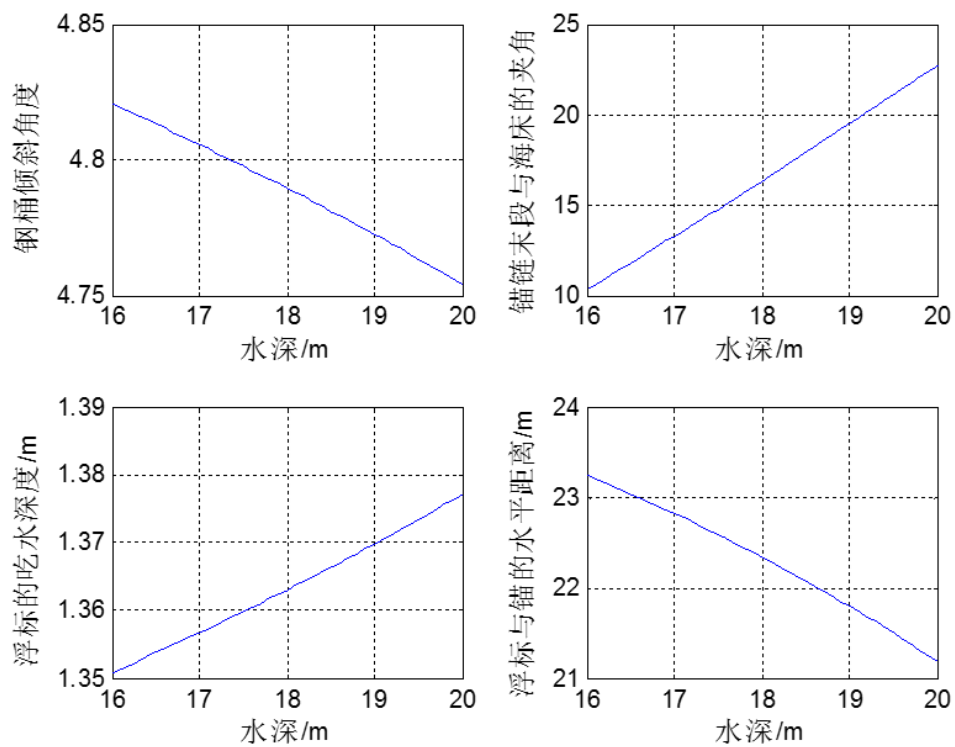
由于钢桶的倾斜角度超过 5° 时，设备的工作效果差，因此规定目标优化钢桶的倾斜角度不超过 5° 。而在 85° 到 90° 这个微小的区间内，正弦和余弦函数的数值都非常地平稳，分别近似趋近于 1 和 0，简化模型，认为在倾斜角度小于 5° 的情况下，倾斜角度对于力的求解影响较小。

4.6.2 控制变量

通过控制变量的方法分别研究海水深度、海水速度、风速对浮标的吃水深度、游动区域、锚链末端倾角及钢桶的倾斜角度的影响。

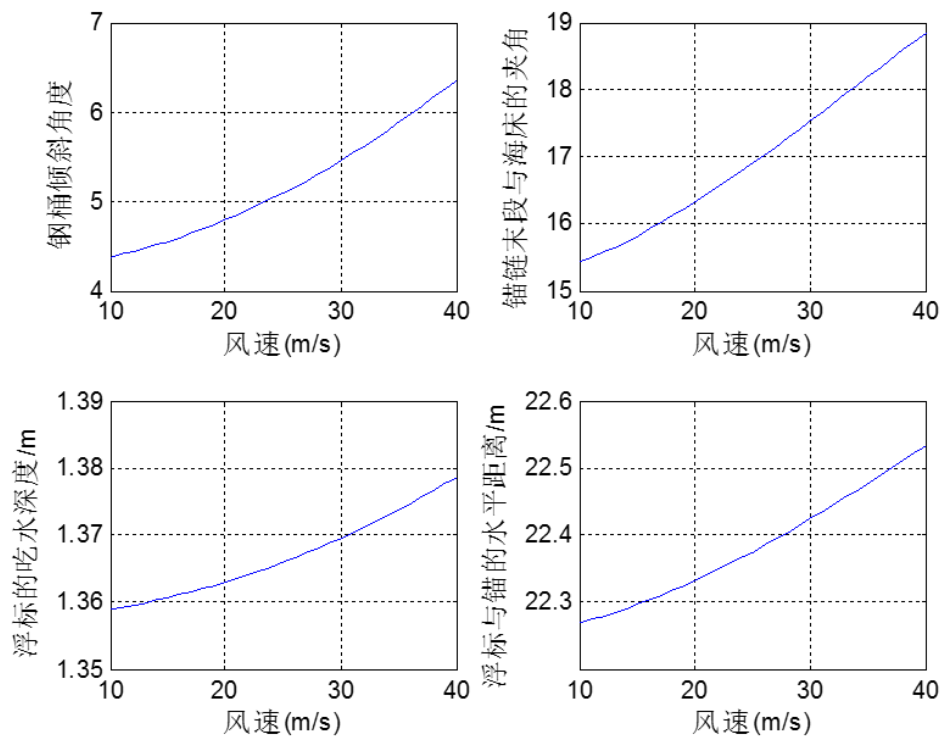
a) 海水深度对钢桶的倾斜角度、锚链末端倾角、浮标的吃水深度、游动区域的影响

$$V1=36; V2=1.5; \text{type}=2; s=25; m=3500; h0=16:0.1:20;$$



分析：由图可以看出，海水深度对 4 个量的影响情况。而在考虑最优系泊系统设计时应考虑极限承受情况，但海水与 4 个量的关系既有递增、又有递减。因此，为选定最优系统的海水深度条件限制，将这 4 个量，结合实际情况进行赋权和量化处理，最终选定海水深度为 18m。

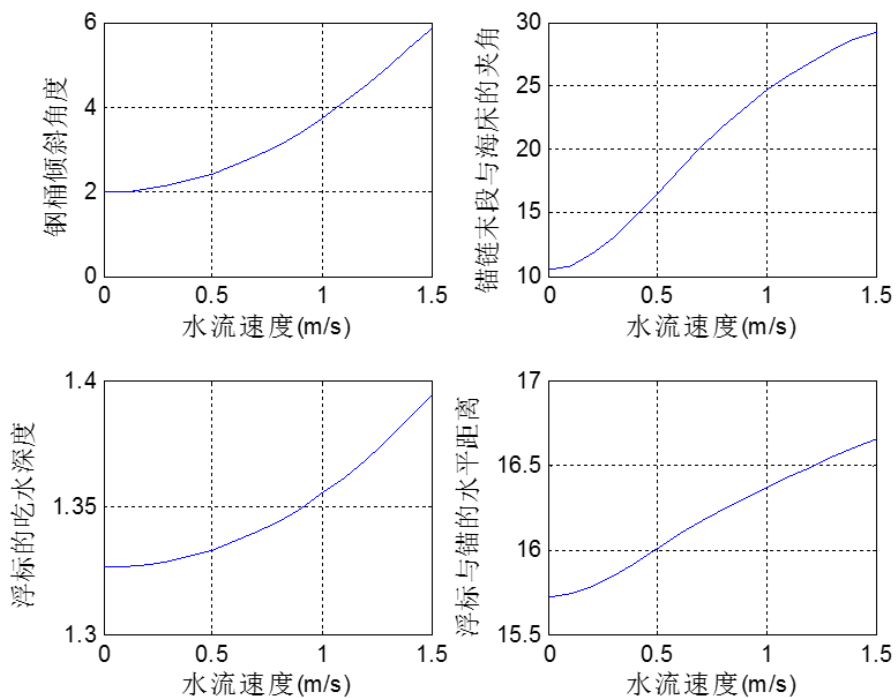
- b) 风速对钢桶的倾斜角度、锚链末端倾角、浮标的吃水深度、游动区域的影响
 $V_2=1.5$; $type=2$; $s=25$; $h_0=18$; $m=3500$; $V_1=10:1:40$;



分析：由图可以看出，风速对 4 个量的影响情况。而最优的系泊系统应承受住这 4 个的量的极限情况，因此，在考虑最优系统时，设定的风速为 36m/s.

c) 海水速度对钢桶的倾斜角度、锚链末端倾角、浮标的吃水深度、游动区域的影响

$V1=36; type=2; s=20; h0=18; m=3500; V2=0:0.1:1.5;$



分析：由图可以看出，水流速度对 4 个量的影响情况。而最优的系泊系统应承受住这 4 个的量的极限情况，因此，在考虑最优系统时，设定的水流速度为 1.5m/s。

4.6.3 用遗传算法处理目标优化

为方便问题的求解，将多目标优化问题[6]转换为单一目标优化问题，优化目标=Min(吃水深度)+Min(游动区域)+Min(钢桶的倾斜角)。根据实际情况，对各优化量进行权重分配，并进行量化处理，得到目标函数为：

$$f = \frac{1}{10}L(s, m) + X(s, m) + \alpha_i(s, m)。$$

根据 4.6.2 分析，设定风速为 36m/s、海水速度为 1.5m/s、海水深度 18m。

4.6.4 选择锚链型号

分别对 5 种锚链型号进行优化选择，得到每种型号在目标函数最优时的锚链长度及重物球质量，如下表所示：

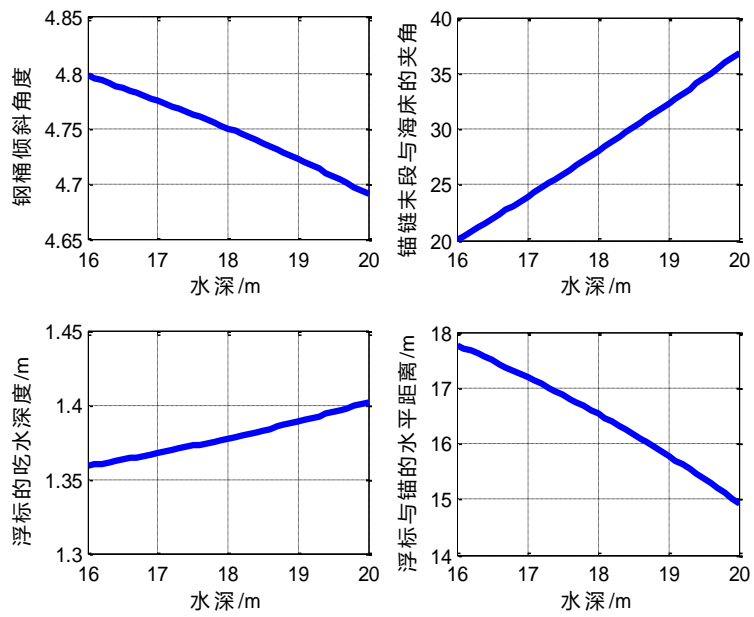
型号	(s, m)	钢桶的倾斜角度	吃水深度	浮标游动区域	目标函数值
1	(36,5274)	4.227432	1.819500	34.443054	9.491237
2	(26,5450)	4.020512	1.898826	23.644375	8.283775
3	(23,5320))	4.035241	1.892903	20.130651	7.941209
4	(20,5280)	3.976448	1.916815	16.575821	7.550845
5	(19,5160)	3.970708	1.719188	15.101030	7.399999

分析结果，选择目标函数最小的锚链型号，即型号 5。

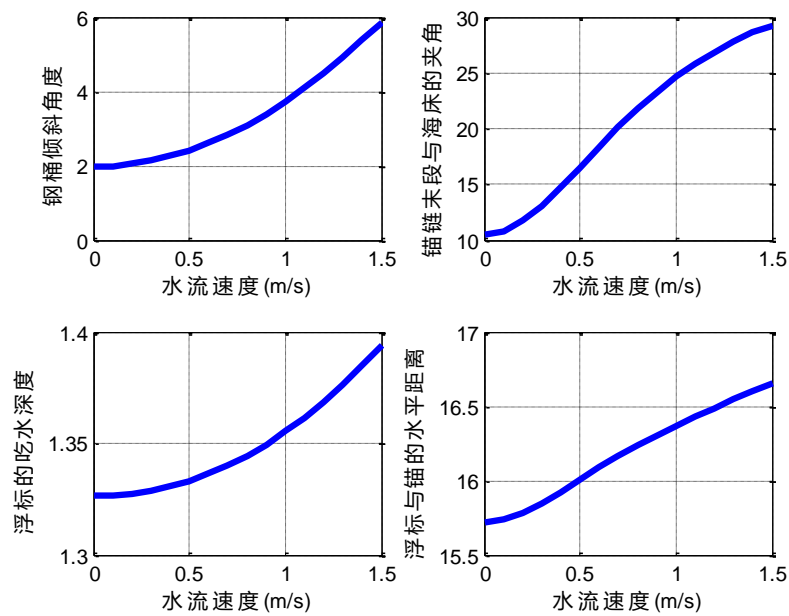
4.6.5 情况分析

系泊系统的设计为：选择型号 5 锚链，锚链长度 19m, 重物球质量 5160kg. 下面考虑此系统在不同情况下的吃水深度、游动区域及钢桶的倾斜角度。

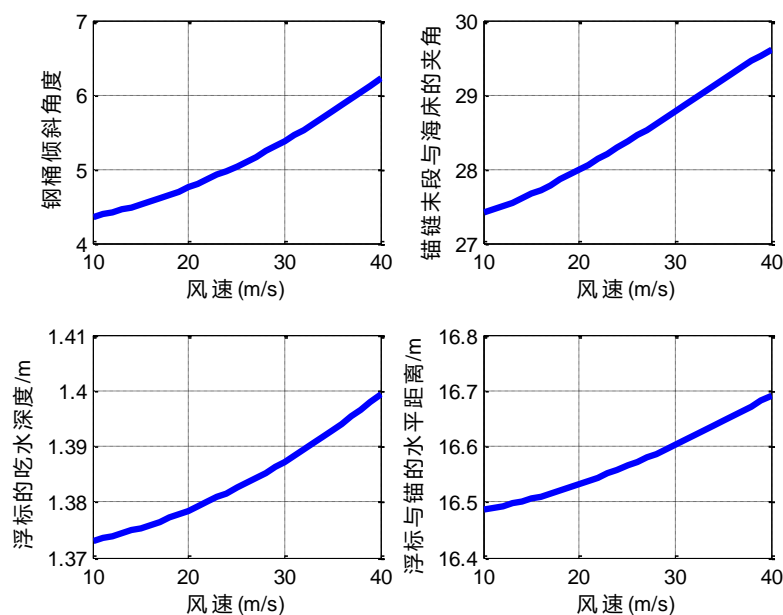
- 1) 当海水深度改变时，得海水深度与浮标的吃水深度、游动区域及钢桶的倾斜角度的关系曲线分别如下：



- 2) 当海水速度改变时,得海水深度与浮标的吃水深度、游动区域及钢桶的倾斜角度的关系曲线分别如下:



- 3) 当风速改变时,得海水深度与浮标的吃水深度、游动区域及钢桶的倾斜角度的关系曲线分别如下:



六. 模型验证

在选定条件时,通过控制变量法分析各个因素的影响。如考虑海水水深对目标量的影响时,风速设定为 36m/s,海水速度设定为 1.5m/s,而通过改变风速、海水速度,发现钢桶的倾斜角度、锚链末端倾角、浮标的吃水深度、游动区域随海水深度变化的趋势仍与 4.6.2 中的 a) 类似,验证了方法的正确性。

对于锚链链环不拖地情况,如问题一中风速为 24m/s 的情况,用悬链线的方法求解浮标吃水量 0.81,得出的结果与本文结果 0.70 相差不是太大,验证了模型的准确性。

在研究变量对目标函数影响时,小范围改变变量参数,对模型进行灵敏度分析。如对重物球质量进行小范围变化,发现,当重物球质量变化 10kg 时结果没有明显变化,而当质量变化 20kg 时,结果才有明显变化。此外,在方案评价中进行灵敏度分析,确定当评价条件发生变化时备选方案的价值是否会发生变化或变化多少。在进行评价时,需要确定每一个分目标的权重系数,这中间或多或少地存在当事人的主观意识,不同的人可能会有截然不同的价值观念。因此考虑当分配的权重系数在某一个范围内变化时,最终的优化结果变化。通过运算发现,当权重改变时,最终的优化解差异很大。

七、模型评价

7.1 优点

- 在解关于浮标吃水量的一元非线性方程时采用弦截法,算法收敛速度较快;
- 在处理多目标优化问题时,没有完全采用遍历算法,采用遗传算法优化,全局搜索能力较强,极大减少了电脑运行结果的时间;
- 在对重物球进行处理时,并没有忽略体积,这与实际情况相符,而先将重物球视为钢,方便后来方程的代入求解。此外,若实际情况中知道重物球的密度,只需将模型中的 $7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 换成重物球的密度,对模型处理并没有

太大影响；

- d) 在考虑重物球体积是否可以忽略时，分别计算了考虑体积及忽略体积的情况，以问题 2 为例，分别求得两种情况分别为 2046kg, 1850kg，结果有一定的相差量，验证了实际情况中重物球体积的重要性。

7.2 缺点

- a) 在选择设计最优系统时的海水深度限制时，由于已知关于吃水深度、游动区域及钢桶的倾斜角度、锚链末端倾斜角度的参考文献较少，对于各部分的赋权不是特别精准，虽进行了量化处理，但在现实选择中，应根据实际情况重新赋权；
- b) 本文在处理目标优化时直接将浮标的吃水深度、游动区域及钢桶的倾斜角度相加转换为单一目标处理，但实际情况，各目标对系泊系统的重要影响程度可能不同。改进方法：可以根据实际情况，对这 3 个量的重要程度进行分析，并进行量化处理，对这 3 个量分别附一定权重，再转换为单目标问题；
- c) 遗传算法容易陷入“早熟”。

八、模型推广

- a) 本文提出的系泊系统设计模型对于不同海水情况，风速情况具有较高的使用推广价值，而且算法时间、复杂度都不高，很容易开发成系泊系统设计选择软件，较高效率地解决系泊问题。
- b) 本文提出的优化算法可以推广到更为复杂的情况，知道影响因素的权重取值，只需改变各部分的参数设置便可模拟出不同情况下的海水情况，此外系泊系统受力分析、锚链离散处理等步骤也具有较强的普适性，使得模型有很强的灵活性和鲁棒性。
- c) 系泊系统除了如题中所说，运用在近浅海观察网中，还可以运用到海上油气田开发中的浮式生产系统。

九、参考文献

- [1] 刘超，海洋工程锚泊系统计算与分析，武汉理工大学硕士学位论文，2007.
- [2] 马巍，锚泊系统非线性动力分析，上海交通大学硕士研究生论文，1989
- [3] 何静，FPSO 悬式锚腿系泊系统的锚系设计研究，武汉理工大学学位论文，2007.
- [4] 苏慧娟，江新华. 牛顿弦截法预估校正迭代格式的收敛阶[J]. 数学的实践与认识，2006，36（4）：164-168.
- [5] 于明明，张研. 牛顿迭代法与几种改进格式的效率指数[J]. 数学的实践与认识，2008，38（18）：155-159.
- [6] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京：国防工业出版社，2006：6-10，12.
- [7] 玄光男，程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京：清华大学出版社，2004：79-82.

附录

问题一

1、浮标节点: FuBiao.m

```
function [F, theta] = FuBiao( L ,v)
%L:吃水深度
%v:风速

rho=1.025*10^3;
g=9.8;
s=pi;
G=1000*g;
F1=0.625*2*(2-L)*v^2;
F2=rho*g*s*L-G;
F=sqrt(F1^2+F2^2);
theta=atan(F1/F2);
end
```

2、钢桶节点: GangTong.m

```
function [F, theta, alfa] = GangTong( Fi, thetai )
%Fi:输入力的大小
%thetai:输入力的方向

rho=1.025*10^3;
g=9.8;
%重球浮力
Ff_q=rho*g*1200/(7.86*10^3);
%刚桶浮力
Ff_t=rho*g*1*pi*0.09/4;
G_q=1200*g;
G_t=100*g;

F1=Fi*sin(thetai);
F2=Fi*cos(thetai)+Ff_q-G_q+Ff_t-G_t;
F=sqrt(F1^2+F2^2);
theta=atan(F1/F2);
alfa=atan((Fi*cos(thetai)+F*cos(theta)+G_q-Ff_q)/(Fi*sin(thetai)+F*sin(theta)));

end
```

3、杆节点: gan.m

```
function [ F, theta, alfa ] = gan( Fi, thetai, Gi )
%Fi:输入力的大小
```

```

%thetai:输入力的方向
%Gi:杆重力

F1=Fi*sin(thetai);
F2=Fi*cos(thetai)-Gi;
F=sqrt(F1^2+F2^2);
theta=atan(F1/F2);
alfa=atan((Fi*cos(thetai)+F*cos(theta))/(Fi*sin(thetai)+F*sin(theta)));

end

```

弦截法求根:

```

clear;clc;
r=Secant('myfun1',12,18, 0.4,1.4)

```

```

function h = myfun1(L,V ,h0)

```

```

%L:吃水深度

```

```

%V:风速

```

```

%h0:水深

```

```

%链环个数

```

```

%n=210;

```

```

[F0,theta0]=FuBiao(L,V);

```

```

F=zeros(5,1);

```

```

theta=zeros(5,1);

```

```

alfa=zeros(4,1);

```

```

F(1)=F0;

```

```

theta(1)=theta0;

```

```

%钢管重量

```

```

G=10*9.8;

```

```

for i=2:5

```

```

    F_temp=F(i-1);

```

```

    theta_temp=theta(i-1);

```

```

    [ F(i), theta(i), alfa(i-1) ] = gan( F_temp, theta_temp, G );

```

```

end

```

```

[F_t, theta_t, alfa_t] = GangTong( F(5), theta(5) );

```

```

F_=zeros(211,1);

```

```

theta_=zeros(211,1);

```

```

alfa_=zeros(210,1);

```

```

F_(1)=F_t;

```

```

theta_(1)=theta_t;

```



```

%锚链重量
G=0.105*7*9.8;
for i=2:211
    F_temp=F_(i-1);
    theta_temp=theta_(i-1);
    [ F_(i), theta_(i), alfa_(i-1) ] = gan( F_temp, theta_temp, G );
    if alfa_(i-1)>1.57
        alfa_(i-1)=0;
        break;
    end
end

h1=L;
h2=0;
for i=1:4
    h2=h2+1*sin(alfa(i));
end
h3=1*sin(alfa_t);
h4=0;
for i=2:211
    h4=h4+0.105*sin(alfa_(i-1));
end
h=h1+h2+h3+h4;
h=h-h0;

end

function r = Secant(fun,v,h0, x0,x1, ftol, dftol, maxit)
%割线法迭代
    if nargin < 7
        ftol = 5e-10;
    end
    if nargin < 8
        dftol = 5e-10;
    end
    if nargin < 9
        maxit = 200;
    end

    x = [x0 x1];
    p1=v;
    p2=h0;
    k = 0;
    while k <= maxit

```

```

    k = k + 1;
    y0 = feval(fun, x(1), p1, p2);
    y1 = feval(fun, x(2), p1, p2);
    dfdx = (y1-y0)/(x(2)-x(1));

    if abs(dfdx) < dftol
        r = [];
        warning('dfdx is too small!');
        return;
    end

    dx = y1/dfdx;
    x(1) = x(2);
    x(2) = x(2) - dx;
    %找特定区间的根
    if x(1)<0.4
        x(1)=0.4;
    end
    if x(1)>1.4
        x(1)=1.4;
    end
    if x(2)<0.4
        x(2)=0.4;
    end
    if x(2)>1.4
        x(2)=1.4;
    end

    if abs(y1) < ftol
        r = x(2);
        return;
    end

    r = [];

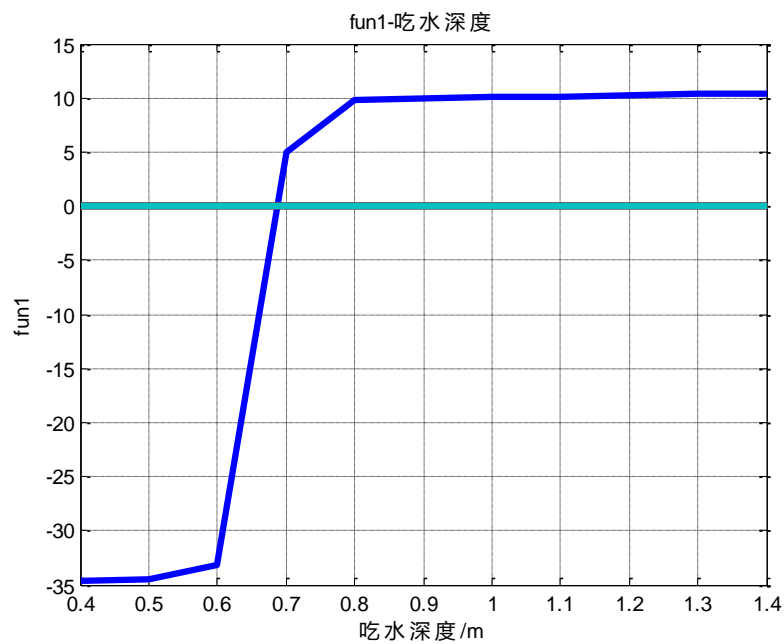
    %绘制出风速为12m/s时fun1示意图，其零点即为所求吃水深度
    x=0.4:0.1:1.4;
    y=zeros(length(x));
    for i=1:length(x)
        y(i)=myfun1(x(i), 12, 18);
    end
    plot(x,y);
    grid on;

```

```

xlabel('吃水深度/m');
ylabel('fun1');
title('fun1-吃水深度');

```



问题二

1、钢桶倾斜角度、锚链末端与海床夹角及吃水深度与质量的函数关系

```
function [alfa_t, alfa_m, L] = myfun2( mq )
```

```
%mq: 重球质量
```

```
%海风速度
```

```
V=36;
```

```
h0=18;
```

```
%吃水深度
```

```
L=Secant('myfun1', V, h0, mq, 0.4, 1.4);
```

```
%链环个数
```

```
%n=210;
```

```
[F0, theta0]=FuBiao(L, V);
```

```
F=zeros(5, 1);
```

```
theta=zeros(5, 1);
```

```
alfa=zeros(4, 1);
```

```
F(1)=F0;
```

```
theta(1)=theta0;
```

```
%钢管重量
```

```
G=10*9.8;
```

```
for i=2:5
```

```

    F_temp=F(i-1);
    theta_temp=theta(i-1);
    [ F(i), theta(i), alfa(i-1) ] = gan( F_temp, theta_temp, G );
end

[F_t, theta_t, alfa_t] = GangTong( F(5), theta(5) ,mq);
alfa_t=pi/2-alfa_t;

F_=zeros(211,1);
theta_=zeros(211,1);
alfa_=zeros(210,1);
F_(1)=F_t;
theta_(1)=theta_t;
%锚链重量
G=0.105*7*9.8;
for i=2:211
    F_temp=F_(i-1);
    theta_temp=theta_(i-1);
    [ F_(i), theta_(i), alfa_(i-1) ] = gan( F_temp, theta_temp, G );
    if alfa_(i-1)>1.57
        alfa_(i-1)=0;
        break;
    end
end
alfa_m=alfa_(end);

```

end

2、绘制钢桶倾斜角度、锚链末端与海床夹角及吃水深度随重物球质量改变的变化曲线：myplot.m

```

clear;clc;
mq=0:100:3500;
alfa_t=zeros(length(mq),1);
alfa_m=zeros(length(mq),1);
L=zeros(length(mq),1);
for i=1:length(mq)
    [alfa_t(i), alfa_m(i), L(i)]=myfun2(mq(i));
end
alfa_t=alfa_t*180/pi;
alfa_m=alfa_m*180/pi;
figure(1);
plot(mq, alfa_t); hold on;
lc=5*ones(length(mq),1);

```

```

plot(mq, lc, 'r');
grid on;
xlabel('重物球的质量/kg');
ylabel('钢桶的倾斜角度');
figure(2);
plot(mq, alfa_m);hold on;
xlabel('重物球的质量/kg');
ylabel('锚链末段与海床的夹角');
lc=l6*ones(length(mq),1);
plot(mq, lc, 'r');
grid on;
figure(3);
plot(mq, L);
xlabel('重物球的质量/kg');
ylabel('吃水深度');
grid on;

```

2、割线法求钢桶倾斜角度随重物球质量变化曲线与5度的交点:Secant_alfa_t.m

```
function r = Secant_alfa_t(fun, alfa_t0, x0, x1, ftol, dftol, maxit)
```

```
%割线法迭代
```

```

    if nargin < 8
        ftol = 5e-10;
    end
    if nargin < 9
        dftol = 5e-10;
    end
    if nargin < 10
        maxit = 200;
    end

    x = [x0 x1];
    p1=alfa_t0;

    k = 0;
    while k <= maxit
        k = k + 1;
        y0 = feval(fun, x(1), p1);
        y1 = feval(fun, x(2), p1);
        dfdx = (y1-y0)/(x(2)-x(1));

        if abs(dfdx) < dftol
            r = [];
            warning('dfdx is too small!');
            return;
        end
    end

```

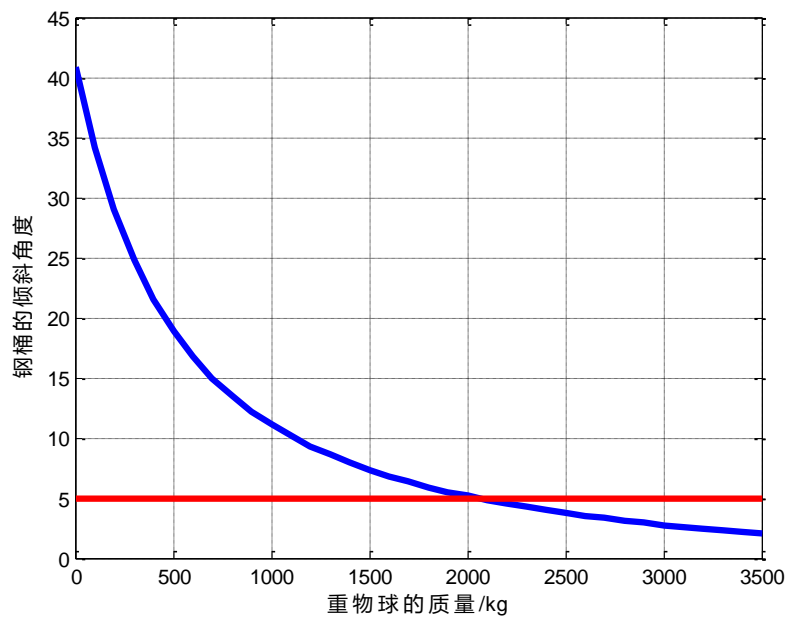
```

end

dx = y1/dfdx;
x(1) = x(2);
x(2) = x(2) - dx;
if abs(y1) < ftol
    r = x(2);
    return;
end
end
end

r = [];

```



3、割线法求锚链末端与海床夹角随重物球质量变化曲线与16度的交点：
Secant_alfa_m.m

```

function r = Secant_alfa_m(fun, alfa_m0, x0, x1, ftol, dftol, maxit)
%割线法迭、代
    if nargin < 8
        ftol = 5e-10;
    end
    if nargin < 9
        dftol = 5e-10;
    end
    if nargin < 10
        maxit = 200;
    end

    x = [x0 x1];

```

```

p1=alfa_m0;

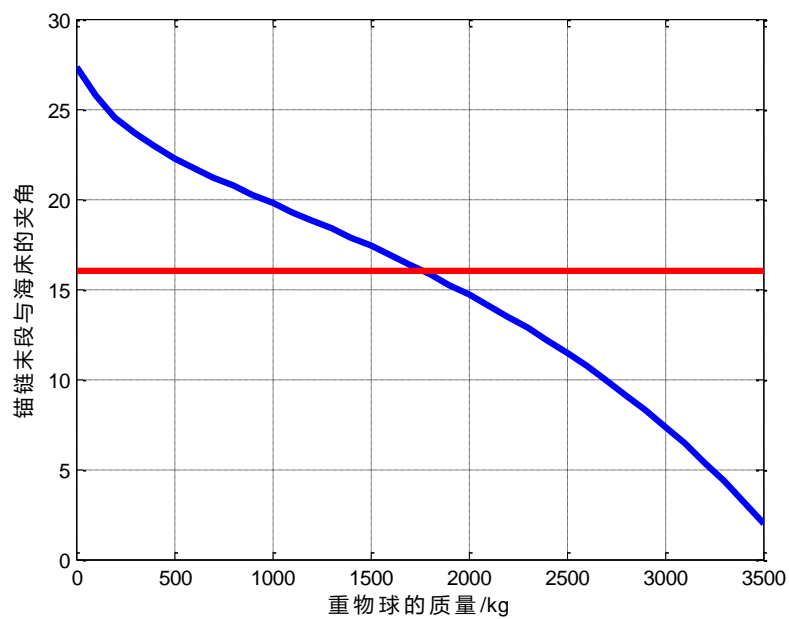
k = 0;
while k <= maxit
    k = k + 1;
    y0 = feval(fun,x(1),p1);
    y1 = feval(fun,x(2),p1);
    dfdx = (y1-y0)/(x(2)-x(1));

    if abs(dfdx) < dftol
        r = [];
        warning('dfdx is too small!');
        return;
    end

    dx = y1/dfdx;
    x(1) = x(2);
    x(2) = x(2) - dx;
    if abs(y1) < ftol
        r = x(2);
        return;
    end
end

r = [];

```



4、绘制与给定风速对应的传输节点示意图: main1.m

```

clear;clc;
%海风速度

```

```

V=24;
h0=18;
mq=1200;
%吃水深度
L=Secant('myfun1',V,h0,mq, 0.4,1.4);
%链环个数
%n=210;
[F0,theta0]=FuBiao(L,V);
F=zeros(5,1);
theta=zeros(5,1);
alfa=zeros(4,1);
F(1)=F0;
theta(1)=theta0;
%钢管重量
G=10*9.8;
for i=2:5
    F_temp=F(i-1);
    theta_temp=theta(i-1);
    [ F(i), theta(i), alfa(i-1) ] = gan( F_temp, theta_temp, G );
end
[F_t, theta_t, alfa_t] = GangTong( F(5), theta(5) ,mq);

F_=zeros(211,1);
theta_=zeros(211,1);
alfa_=zeros(210,1);
F_(1)=F_t;
theta_(1)=theta_t;
%锚链重量
G=0.105*7*9.8;
flag=0;
for i=2:211
    F_temp=F_(i-1);
    theta_temp=theta_(i-1);
    [ F_(i), theta_(i), alfa_(i-1) ] = gan( F_temp, theta_temp, G );
    if alfa_(i-1)>1.57
        alfa_(i-1)=0;
        flag=i;
        break;
    end
end
end

h1=L;
h2=0;
for i=1:4

```



```

        h2=h2+1*sin(alfa(i));
end
h3=1*sin(alfa_t);
h4=0;
for i=2:211
    h4=h4+0.105*sin(alfa_(i-1));
end
h=h1+h2+h3+h4

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%画图
%锚链段
x=zeros(211,1);y=zeros(211,1);
x(1)=0;y(1)=0;
for i=2:211
    x(i)=x(i-1)+0.105*cos(alfa_(212-i));
    y(i)=y(i-1)+0.105*sin(alfa_(212-i));
end
plot(x,y,'.');hold on;
plot(x(end),y(end),'r*','markersize',8);hold on;

%刚桶段
x1=x(211)+1*cos(alfa_t);
y1=y(211)+1*sin(alfa_t);

%刚管段
x2=zeros(5,1);y2=zeros(5,1);
x2(1)=x1;y2(1)=y1;
for i=2:5
    x2(i)=x2(i-1)+1*cos(alfa(6-i));
    y2(i)=y2(i-1)+1*sin(alfa(6-i));
end
x2_1=x2(1:4,:);
y2_1=y2(1:4,:);
plot(x2_1,y2_1,'r*','markersize',8);hold on;
plot(x2(end),y2(end),'o','markersize',8);hold on;
x3=x2(end);
y3=y2(end)+1;

plot(x3,y3,'o','markersize',8);hold on;

X=[x;x2;x3];
Y=[y;y2;y3];
plot(X,Y,'linewidth',3);grid on;

```

```

xlabel('x');
ylabel('y');
title('锚链形状及传输节点示意图');

```

```

fprintf(' 钢管1倾斜角度(钢管与竖直线的夹角) : %f\n',90-alfa(1)*180/pi);
fprintf(' 钢管2倾斜角度(钢管与竖直线的夹角) : %f\n',90-alfa(2)*180/pi);
fprintf(' 钢管3倾斜角度(钢管与竖直线的夹角) : %f\n',90-alfa(3)*180/pi);
fprintf(' 钢管4倾斜角度(钢管与竖直线的夹角) : %f\n',90-alfa(4)*180/pi);
fprintf(' 钢桶倾斜角度(钢桶与竖直线的夹角) : %f\n',90-alfa_t*180/pi);
fprintf(' 锚链末段与海床的夹角: %f\n',alfa_(end)*180/pi);
fprintf(' 浮标吃水深度: %f\n',L);
fprintf(' 浮标游动半径: %f\n',X(end));

```

问题三

1、遗传算法主函数: Genetic.m

```

%% 清空环境
clc
clear

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

V1=36;V2=1.5;h0=18;type=3;
bound=[15 20;0 2000]; %变量s,mq范围

%% 遗传算法参数
maxgen=100; %进化代数
sizepop=100; %种群规模
pcross=[0.6]; %交叉概率
pmutation=[0.01]; %变异概率
lenchrom=[1 1]; %变量字符串长度

%% 个体初始化
individuals=struct('fitness',zeros(1,sizepop), 'chrom',[]); %种群结构体
avgfitness=[]; %种群平均适应度
bestfitness=[]; %种群最佳适应度
bestchrom=[]; %适应度最好染色体
% 初始化种群
for i=1:sizepop
    individuals.chrom(i,:)=Code(lenchrom,bound); %随机产生个体
    x=individuals.chrom(i,:);
    individuals.fitness(i)=fun(x,V1,V2,h0,type); %个体适应度
end

%找最好的染色体
[bestfitness bestindex]=min(individuals.fitness);

```

```

bestchrom=individuals.chrom(bestindex,:); %最好的染色体
avgfitness=sum(individuals.fitness)/sizepop; %染色体的平均适应度
% 记录每一代进化中最好的适应度和平均适应度
trace=[];

%% 进化开始
for i=1:maxgen

    % 选择操作
    individuals=Select(individuals,sizepop);
    avgfitness=sum(individuals.fitness)/sizepop;
    % 交叉操作
    individuals.chrom=Cross(pcross,lenchrom,individuals.chrom,sizepop,bound);
    % 变异操作
    individuals.chrom=Mutation(pmutation,lenchrom,individuals.chrom,sizepop,[i
maxgen],bound);

    % 计算适应度
    for j=1:sizepop
        x=individuals.chrom(j,:);
        individuals.fitness(j)=fun(x,V1,V2,h0,type);
    end

    %找到最小和最大适应度的染色体及它们在种群中的位置
    [newbestfitness,newbestindex]=min(individuals.fitness);
    [worestfitness,worestindex]=max(individuals.fitness);
    % 代替上一次进化中最好的染色体
    if bestfitness>newbestfitness
        bestfitness=newbestfitness;
        bestchrom=individuals.chrom(newbestindex,:);
    end
    individuals.chrom(worestindex,:)=bestchrom;
    individuals.fitness(worestindex)=bestfitness;

    avgfitness=sum(individuals.fitness)/sizepop;

    trace=[trace;avgfitness bestfitness]; %记录每一代进化中最好的适应度和平均适应度
end
%进化结束

%% 结果显示
[r c]=size(trace);
figure
plot([1:r]',trace(:,1),'r-',[1:r]',trace(:,2),'b--');

```

```

title(['函数值曲线' '终止代数=' num2str(maxgen)], 'fontsize', 12);
xlabel('进化代数', 'fontsize', 12); ylabel('函数值', 'fontsize', 12);
legend('各代平均值', '各代最佳值', 'fontsize', 12);
disp('函数值' '变量');
ylim([-0.5 8])
grid on
% 窗口显示
disp([bestfitness bestchrom]);

```

2、遗传算法适应度函数: fun.m

```

function f = fun(X, V1, V2, h0, type)
% X:锚链长度及重物球质量
% V1:风速
% V2:水速
% h0:水速
% type:锚链型号

s=X(1);
mq=X(2);

%吃水深度
L=Secant('myfun1', V1, V2, type, s, h0, mq, 0.4, 1.6);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%链环个数
ml_lc=[0.078;0.105;0.12;0.15;0.18];
ml_mc=[3.2;7;12.5;19.5;28.12];
ml_l=ml_lc(type);
ml_m=ml_mc(type);
n=floor(s/ml_l);

[F0, theta0]=FuBiao(L, V1, V2);
F=zeros(5, 1);
theta=zeros(5, 1);
alfa=zeros(4, 1);
F(1)=F0;
theta(1)=theta0;
%钢管重量
G=10*9.8;
for i=2:5
    F_temp=F(i-1);
    theta_temp=theta(i-1);
    [ F(i), theta(i), alfa(i-1) ] = gan( F_temp, theta_temp, G );
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%钢桶
[F_t, theta_t, alfa_t] = GangTong( F(5), theta(5), mq, V2);
alfa_tt=pi/2-alfa_t;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
F_=zeros(n+1,1);
theta_=zeros(n+1,1);
alfa_=zeros(n,1);
F_(1)=F_t;
theta_(1)=theta_t;
%锚链重量
%G=0.105*7*9.8;
G=ml_l*ml_m*9.8;
for i=2:(n+1)
    F_temp=F_(i-1);
    theta_temp=theta_(i-1);
    [ F_(i), theta_(i), alfa_(i-1) ] = gan( F_temp, theta_temp, G );
    if (alfa_(i-1)>1.57) || (alfa_(i-1)<0)
        alfa_(i-1)=0;
        break;
    end
end
alfa_m=alfa_(end);

%求x
%锚链段
x=zeros(n+1,1);
x(1)=0;
for i=2:(n+1)
    x(i)=x(i-1)+ml_l*cos(alfa_(n+2-i));
end
%刚桶段
x1=x(n+1)+1*cos(alfa_t);
%刚管段
x2=zeros(5,1);
x2(1)=x1;
for i=2:5
    x2(i)=x2(i-1)+1*cos(alfa(6-i));
end
x3=x2(end);
x=x3;

%适应度函数
f=alfa_tt+x/10+L;

```

```
end
```

3、利用已知参数得到结果: main1.m

%计算给定情况下（V1, V2, h0, type, s, mq均已知）钢桶、钢管的倾斜角度，浮标的吃水深度、游动半径、绘制传输节点示意图

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clear;clc;
```

```
%海风速度
```

```
V1=36;V2=1.5;h0=18;type=5;s=22;mq=5474;
```

```
V1=36;V2=0.6;type=5;s=19;h0=18;mq=5161;
```

```
%吃水深度
```

```
L=Secant('myfun1',V1,V2,type,s,h0,mq, 0.4,1.6);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%通过计算高度H验算L是否正确
```

```
%链环个数
```

```
ml_lc=[0.078;0.105;0.12;0.15;0.18];
```

```
ml_mc=[3.2;7;12.5;19.5;28.12];
```

```
ml_l=ml_lc(type);
```

```
ml_m=ml_mc(type);
```

```
n=floor(s/ml_l);
```

```
[F0,theta0]=FuBiao(L,V1,V2);
```

```
F=zeros(5,1);
```

```
theta=zeros(5,1);
```

```
alfa=zeros(4,1);
```

```
F(1)=F0;
```

```
theta(1)=theta0;
```

```
%钢管重量
```

```
G=10*9.8;
```

```
for i=2:5
```

```
    F_temp=F(i-1);
```

```
    theta_temp=theta(i-1);
```

```
    [F(i),theta(i),alfa(i-1)]=gan(F_temp,theta_temp,G);
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%钢桶
```

```
[F_t,theta_t,alfa_t]=GangTong(F(5),theta(5),mq,V2);
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
F_=zeros(n+1,1);
theta_=zeros(n+1,1);
alfa_=zeros(n,1);
F_(1)=F_t;
theta_(1)=theta_t;
%锚链重量
%G=0.105*7*9.8;
G=ml_l*ml_m*9.8;
for i=2:(n+1)
    F_temp=F_(i-1);
    theta_temp=theta_(i-1);
    [ F_(i), theta_(i), alfa_(i-1) ] = gan( F_temp, theta_temp, G );
    if (alfa_(i-1)>1.57) || (alfa_(i-1)<0)
        alfa_(i-1)=0;
        break;
    end
end

h1=L;
h2=0;
for i=1:4
    h2=h2+l*sin(alfa(i));
end
h3=l*sin(alfa_t);
h4=0;
for i=2:(n+1)
    %h4=h4+0.105*sin(alfa_(i-1));
    h4=h4+ml_l*sin(alfa_(i-1));
end
h=h1+h2+h3+h4

%绘制图形
%锚链段
x=zeros(n+1,1);y=zeros(n+1,1);
x(1)=0;y(1)=0;
for i=2:(n+1)
    x(i)=x(i-1)+ml_l*cos(alfa_(n+2-i));
    y(i)=y(i-1)+ml_l*sin(alfa_(n+2-i));
end
plot(x,y,'.');hold on;

%刚桶段

```

```

x1=x(n+1)+1*cos(alfa_t);
y1=y(n+1)+1*sin(alfa_t);

%刚管段
x2=zeros(5,1);y2=zeros(5,1);
x2(1)=x1;y2(1)=y1;
for i=2:5
    x2(i)=x2(i-1)+1*cos(alfa(6-i));
    y2(i)=y2(i-1)+1*sin(alfa(6-i));
end
plot(x2,y2,'r. ');hold on;

x3=x2(end);
y3=y2(end)+1;

plot(x3,y3,'* ');

%求x
%锚链段
x=zeros(n+1,1);
x(1)=0;
for i=2:(n+1)
    x(i)=x(i-1)+m1_l*cos(alfa_(n+2-i));
end
%刚桶段
x1=x(n+1)+1*cos(alfa_t);
%刚管段
x2=zeros(5,1);
x2(1)=x1;
for i=2:5
    x2(i)=x2(i-1)+1*cos(alfa(6-i));
end
x3=x2(end);
x=x3

fprintf(' 钢管1倾斜角度(钢管与竖直线的夹角) : %f\n',90-alfa(1)*180/pi);
fprintf(' 钢管2倾斜角度(钢管与竖直线的夹角) : %f\n',90-alfa(2)*180/pi);
fprintf(' 钢管3倾斜角度(钢管与竖直线的夹角) : %f\n',90-alfa(3)*180/pi);
fprintf(' 钢管4倾斜角度(钢管与竖直线的夹角) : %f\n',90-alfa(4)*180/pi);
fprintf(' 锚链末段与海床的夹角: %f\n',alfa_(end)*180/pi);
if alfa_(end)*180/pi>=16 || (90-alfa_t*180/pi)>=5
    fprintf(' 无效\n');
else
    fprintf(' 有效\n');

```



```

    fprintf(' 钢桶倾斜角度(钢桶与竖直线的夹角) : %f\n', 90-alfa_t*180/pi);
    fprintf(' 浮标吃水深度: %f\n', L);
    fprintf(' 浮标游动半径: %f\n', x);
    fprintf(' fitness: %f\n', 90-alfa_t*180/pi+L+x/10);
end
3.2
1、水深的影响: test_H.m
%只改变水深, 研究水深对alfa_t, alfa_m, L, x影响
clear;clc;
V1=36;V2=1.5;type=5;s=19;mq=5161;
h0=16:0.1:20;
n=length(h0);
alfa_t=length(n);
alfa_m=length(n);
L=length(n);
x=length(n);
for i=1:n
    [alfa_t(i), alfa_m(i), L(i), x(i)] = myfun_zb(V1, V2, type, s, h0(i), mq );
end
alfa_t=alfa_t*180/pi;
alfa_m=alfa_m*180/pi;

subplot(2,2,1);
plot(h0, alfa_t);
xlabel(' 水深/m');
ylabel(' 钢桶倾斜角度');grid on;
subplot(2,2,2);
plot(h0, alfa_m);
xlabel(' 水深/m');
ylabel(' 锚链末段与海床的夹角');grid on;
subplot(2,2,3);
plot(h0, L);
xlabel(' 水深/m');
ylabel(' 浮标的吃水深度/m');grid on;
subplot(2,2,4);
plot(h0, x);
xlabel(' 水深/m');
ylabel(' 浮标与锚的水平距离/m');grid on;

% figure(1);
% plot(h0, alfa_t);
% title(' 钢桶倾斜角度—水深');
% xlabel(' 水深/m');

```

```

% ylabel('钢桶倾斜角度');grid on;
% figure(2);
% plot(h0, alfa_m);
% title('锚链末端与锚链接处的切线方向与海床的夹角—水深');
% xlabel('水深/m');
% ylabel('锚链末段与海床的夹角');grid on;
% figure(3);
% plot(h0, L);
% title('浮标的吃水深度—水深');
% xlabel('水深/m');
% ylabel('浮标的吃水深度/m');grid on;
% figure(4);
% plot(h0, x);
% title('浮标与锚的水平距离—水深');
% xlabel('水深/m');
% ylabel('浮标与锚的水平距离/m');grid on;

```

2、风速的影响: test_V1.m

%只改变风速, 研究风速对alfa_t, alfa_m, L, x影响

```

clear;clc;
V2=1.5;type=5;s=19;h0=18;mq=5161;
V1=10:1:40;
n=length(V1);
alfa_t=length(n);
alfa_m=length(n);
L=length(n);
x=length(n);
for i=1:n
    [alfa_t(i), alfa_m(i), L(i), x(i)] = myfun_zb(V1(i), V2, type, s, h0, mq );
end
alfa_t=alfa_t*180/pi;
alfa_m=alfa_m*180/pi;

subplot(2,2,1);
plot(V1, alfa_t);
%title('钢桶倾斜角度—风速');
xlabel('风速(m/s)');
ylabel('钢桶倾斜角度');grid on;

subplot(2,2,2);

```

```

plot(V1, alfa_m);
%title(' 锚链末端与锚链接处的切线方向与海床的夹角—风速');
xlabel(' 风速(m/s)');
ylabel(' 锚链末段与海床的夹角');grid on;

subplot(2,2,3);
plot(V1,L);
%title(' 浮标的吃水深度—风速');
xlabel(' 风速(m/s)');
ylabel(' 浮标的吃水深度/m');grid on;

subplot(2,2,4);
plot(V1,x);
%title(' 浮标与锚的水平距离—风速');
xlabel(' 风速(m/s)');
ylabel(' 浮标与锚的水平距离/m');grid on;

% figure(1);
% plot(V1, alfa_t);
% title(' 钢桶倾斜角度—风速');
% xlabel(' 风速(m/s)');
% ylabel(' 钢桶倾斜角度');grid on;
% figure(2);
% plot(V1, alfa_m);
% title(' 锚链末端与锚链接处的切线方向与海床的夹角—风速');
% xlabel(' 风速(m/s)');
% ylabel(' 锚链末段与海床的夹角');grid on;
% figure(3);
% plot(V1,L);
% title(' 浮标的吃水深度—风速');
% xlabel(' 风速(m/s)');
% ylabel(' 浮标的吃水深度/m');grid on;
% figure(4);
% plot(V1,x);
% title(' 浮标与锚的水平距离—风速');
% xlabel(' 风速(m/s)');
% ylabel(' 浮标与锚的水平距离/m');grid on;

```

3、水流速度的影响: test_V2.m

```

%只改变水速, 研究水速对alfa_t, alfa_m,L,x影响
clear;clc;
%V1=36;V2=1.5;type=5;s=20;h0=18;mq=3500;

```

```

V1=36; type=2; s=20; h0=18; mq=3500;
V2=0:0.1:1.5;
n=length(V2);
alfa_t=length(n);
alfa_m=length(n);
L=length(n);
x=length(n);
for i=1:n
    [alfa_t(i), alfa_m(i), L(i), x(i)] = myfun_zb(V1, V2(i), type, s, h0, mq );
end
alfa_t=alfa_t*180/pi;
alfa_m=alfa_m*180/pi;

subplot(2,2,1);
plot(V2, alfa_t);
xlabel(' 水流速度(m/s)');
ylabel(' 钢桶倾斜角度'); grid on;
subplot(2,2,2);
plot(V2, alfa_m);
xlabel(' 水流速度(m/s)');
ylabel(' 锚链末段与海床的夹角'); grid on;
subplot(2,2,3);
plot(V2, L);
xlabel(' 水流速度(m/s)');
ylabel(' 浮标的吃水深度'); grid on;
subplot(2,2,4);
plot(V2, x);
xlabel(' 水流速度(m/s)');
ylabel(' 浮标与锚的水平距离'); grid on;

% figure(1);
% plot(V2, alfa_t);
% title(' 钢桶倾斜角度—水流速度');
% xlabel(' 水流速度(m/s)');
% ylabel(' 钢桶倾斜角度'); grid on;
% figure(2);
% plot(V2, alfa_m);
% title(' 锚链末端与锚链接处的切线方向与海床的夹角—水流速度');
% xlabel(' 水流速度(m/s)');
% ylabel(' 钢桶倾斜角度'); grid on;
% figure(3);
% plot(V2, L);
% title(' 浮标的吃水深度—水流速度');
% xlabel(' 水流速度(m/s)');

```

```
% ylabel('钢桶倾斜角度');grid on;  
% figure(4);  
% plot(V2,x);  
% title('浮标与锚的水平距离—水流速度');  
% xlabel('水流速度(m/s)');  
% ylabel('钢桶倾斜角度');grid on;
```