

A Parameter Design of a Single Point Buoy Type Mooring System near Shallow Sea

Caiqiao Yi¹, Haibing Sun^{2*}, Yahan Yang¹, Bin Li³, Xia Wang¹

¹School of Management, Sichuan Light Chemical University, Zigong Sichuan

²College of Mathematics and Statistics, Sichuan Light Chemical University, Zigong Sichuan

³College of Mechanical Engineering, Sichuan Light Chemical University, Zigong Sichuan

Email: 940020798@qq.com, *2637967215@qq.com

Received: May 5th, 2019; accepted: May 20th, 2019; published: May 27th, 2019

Abstract

This paper focuses on the studies of mooring system parameters' design. Firstly, the force analysis and torque analysis of the anchor chain, steel drum and heavy ball, steel pipe and buoy in the mooring system are carried out respectively. And the force balance equation and the moment balance equation are established. Then the buoy depth and the anchor chain are obtained, and the two expressions related to the horizontal angle of the left end tangent are finally obtained by MATLAB. The following results are obtained when the sea surface wind speed is 36. The inclination angle of the steel drum is 7.8566, the inclination angles of the four sections are 7.6962, 7.6557, 7.6156 and 7.5759, the draught-depth of the buoy is 0.7810 meters, and the area is 951.246. In addition, it is also discussed how to adjust the weight of the heavy ball such that the tilt angle of the steel drum is less than 5.

Keywords

Mooring System, Torque Balance, Catenary, Single Factor Control

近浅海单点浮筒式系泊系统的部分参数设计

易采桥¹, 孙海冰^{2*}, 杨雅涵¹, 李 滨³, 王 霞¹

¹四川轻化工大学, 管理学院, 四川 自贡

²四川轻化工大学, 数学与统计学院, 四川 自贡

³四川轻化工大学, 机械工程学院, 四川 自贡

Email: 940020798@qq.com, *2637967215@qq.com

收稿日期: 2019年5月5日; 录用日期: 2019年5月20日; 发布日期: 2019年5月27日

*通讯作者。

摘要

研究了系泊系统参数的设计问题。首先对系泊系统中锚链、钢桶和重物球、钢管、浮标这四个部分单独进行受力分析与力矩分析，建立受力平衡方程与力矩平衡方程；然后得出浮标深度和锚链左端点切线的水平夹角相关的两个表达式；最后利用matlab软件编程求出：海面风速为36 m/s时，钢桶的倾斜角为 7.8566° ，四段钢管的倾斜角度分别为： 7.6962° ， 7.6557° ， 7.6156° ， 7.5759° ，浮标吃水深度为0.7810米，游动区域的面积为 951.246 m^2 。此外，还讨论了如何对重物球质量进行调节可以使得钢桶的倾斜角小于 5° 。

关键词

系泊系统，力矩平衡，悬链线，单因素控制

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海洋作为战略性的资源基地，其中蕴含着极其丰富的资源，然而这些资源的探测、开采和运输都要用到海洋平台以及各类船舶。要使这些海洋结构物安全地生产，必须要有可靠的系泊系统来为它们定位，这就促使系泊动力分析成为一项重要的技术领域([1] [2] [3] [4] [5])。本文分析船舶在系泊系统作用下的动力特征，再据此讨论系泊系统的参数设计。

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([6] [7])，如图1。

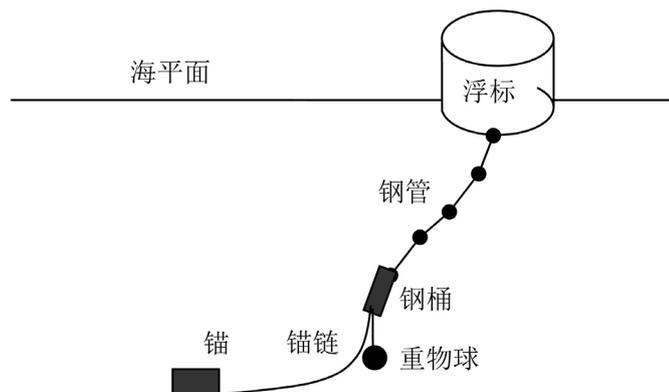


Figure 1. Schematic diagram of the transmission node

图1. 传输节点示意图

浮标系统可简化为圆柱体(本文假设底面直径2 m、高2 m，浮标的质量为1000 kg)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(本文假设锚的质量为600 kg，锚链选用II型无档普通链环，钢管共4节，每节长度1 m，直径为50 mm，每节钢管的质量为10 kg)。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固定度数，否则锚会被拖行，致使节点移位丢失(见文献[8] [9] [10] [11])。

本文假设固定度数为 16° ，水声通讯系统安装在一个长 1 m、外径 30 cm 的密封圆柱形钢桶内，设备和钢桶总质量为 100 kg。钢桶的倾斜角度(钢桶与竖直线的夹角)超过 5° 时，设备的工作效果较差。

问题：某型传输节点每节链环长度：105 mm，单位长度质量：7 kg/m，锚链总长：22.05 m，重物球质量：1200 kg。将该型传输节点放在水深 18 m、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，海面风速为 36 m/s，求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。若要求钢桶的倾斜角度不超过 5° ，锚链在锚点与海床的夹角不超过 16° ，如何调节重物球的质量？

2. 传输节点受力分析

假设锚链、钢桶、钢管都由刚性物质组成，不会被压缩或拉伸。海面为平面且风力与水流力的方向都平行于海面。

2.1. 传输节点的整体水平受力分析如图 2

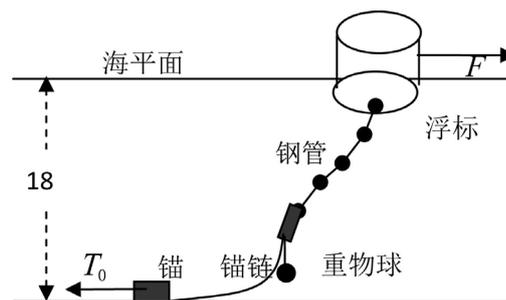


Figure 2. Schematic diagram of the overall force of the transmission node
图 2. 传输节点整体受力示意图

浮标所受的近海风荷载 F 与锚链所受的水平分力 T_0 为一对平衡力，即：

$$T_0 = F \quad (1-1)$$

近海风荷载可通过近似公式计算为：

$$F = 0.625 \times S v^2 \quad (\text{单位：牛}) \quad (1-2)$$

其中， S 表示浮标在风向量的平面投影面积，单位 m^2 ； v 表示风速，单位 (m/s) 。又因为浮标受到重力和钢管拉力的作用，会有一部分浸没在水中，所以浮标在风向量的平面投影面积 S ：

$$S = D \times (H - h) \quad (1-3)$$

其中， D 表示圆柱体浮标的底面直径； H 表示圆柱体浮标的高度； h 表示浮标沉浸在水中的深度，即浮标的吃水深度。

将式(1-3)带入式(1-2)中，求解得到近海风荷载 F 的表达式为：

$$F = 0.625 v^2 D (H - h) \quad (1-4)$$

2.2. 单位悬链线静力矩分析及静力分析

以每一小节悬链线的几何中心为力矩中心，由于悬链线处于稳定状态，则各个力的力矩之和必定为零。受力分析如图 3：从而可以从 x, y 两个方向建立力矩平衡关系式：

$$\begin{cases} F(T + dT, x) * L(T + dT, x) = F(T, x) * L(T, x) \\ F(T + dT, y) * L(T + dT, y) = F(T, y) * L(T, y) + G(T, y_T) * L(T, y_T) \end{cases} \quad (1-5)$$

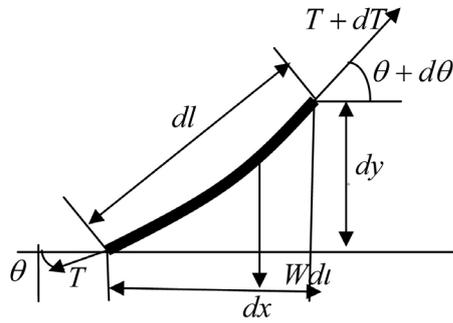


Figure 3. Static diagram of the unit catenary
图 3. 单位悬链线的静力图

其中， W 表示单位悬链线的重量； dl 表示单位悬链线的长度； T 表示单位悬链的张力； dT 表示增加一小段 dl 后增加的张力； θ 表示张力 T 与水平方向的夹角； $d\theta$ 表示增加一小段 dl 后增加的角度。

建立单位悬链线在水平方向和竖直方向上的长度方程：

$$\begin{cases} dx = \cos \theta dl \\ dy = \sin \theta dl \end{cases} \quad (1-6)$$

建立单位悬链线在水平方向和竖直方向上的力平衡方程[1]：

$$(T + dT)\cos(\theta + d\theta) - T\cos\theta = 0 \quad (1-7)$$

$$(T + dT)\sin(\theta + d\theta) - T\sin\theta - Wdl = 0 \quad (1-8)$$

2.3. 完整悬链线静力分析与静力矩分析

参考文献[12]，对完整的悬链线进行受力分析，得到力矩平衡方程和力平衡方程。根据受力分析可以绘制出完整悬链线的静力图，并建立直角坐标系，如图4所示：

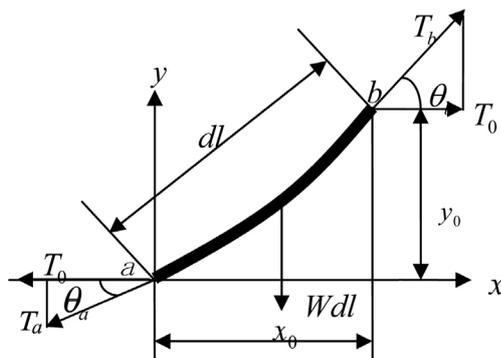


Figure 4. Static diagram of the entire catenary
图 4. 整条悬链线的静力图

结合完整悬链线的受力分析和 T_a 、 T_b 、 T_0 三个力的平衡条件以及静力矩，可以得到张力 T_a 、 T_b 与水平分力 T_0 的关系式和力矩关系式：

$$\begin{cases} T_0 = T_a \cos \theta_a = T_b \cos \theta_b \\ T_{bx} * L_{bx} = T_{ax} * L_{ax} \\ T_{by} * L_{by} = T_{ay} * L_{ay} + G * L \end{cases} \quad (1-9)$$

其中, T_a 表示锚对锚链的张力; T_b 表示锚链对铁桶的张力; $T_{ax}, T_{ay}, T_{bx}, T_{by}$ 分别表示锚对悬链在水平与竖直方向的分力和钢桶对悬链在水平与竖直方向的分力; θ_a 和 θ_b 表示 T_a 和 T_b 与水平方向的夹角; T_0 表示锚链的张力沿水平方向的分力; $L_{ax}, L_{ay}, L_{bx}, L_{by}$ 分别表示锚对悬链在水平与竖直方向的径向矢量和钢桶对悬链在水平与竖直方向的径向矢量; 锚链的总长度 $l = 22.05$ 米。

对式(1-6)~式(1-9)联立求解, 计算出整条悬链线的参数方程:

$$x = \frac{T_0}{W} \left[\sinh^{-1}(\tan \theta_b) - \sinh^{-1}(\tan \theta_a) \right] \quad (1-10)$$

$$y = \frac{T_0}{W} \left(\sqrt{1 + \tan^2 \theta_b} - \sqrt{1 + \tan^2 \theta_a} \right) \quad (1-11)$$

其中, x 表示悬链线由 a 到 b 的水平距离, y 表示悬链线由 a 到 b 的竖直距离。

2.4. 悬链线方程求解

令 $t_a = \sinh^{-1}(\tan \theta_a)$, $t_b = \sinh^{-1}(\tan \theta_b)$ 。将 t_a , t_b 带入式(1-10)和式(1-11)中化简得到:

$$x = \frac{T_0}{W} (t_b - t_a) \quad (1-12)$$

$$y = \frac{T_0}{W} (\cosh t_b - \cosh t_a) \quad (1-13)$$

再对式(1-12)进行变形, 得到 t_b 关于 x 的关系式为:

$$t_b = \frac{xW}{T} + t_a \quad (1-14)$$

将式(1-14)带入式(1-13)进行化简, 求解出悬链线方程为:

$$y = \frac{T_0}{W} \left[\cosh \left(\frac{Wx}{T} + t_a \right) - \cosh t_a \right] \quad (1-15)$$

2.5. 悬链线水平长度随浮标吃水深度变化规律

在悬链线上取单位长度的曲线, 这段曲线可视为线段, 满足 $ds^2 = dx^2 + dy^2$ 。利用曲线积分的思想将完整的悬链线分成数量无穷大, 长度无穷小的线段。利用勾股定律 $ds^2 = dx^2 + dy^2$ 求得每一段线段的长度, 在将所有的线段长度依次相加得到悬链线的总长度。

在图2所示的直角坐标系中, 悬链方程 $y = \frac{T_0}{W} \left[\cosh \left(\frac{Wx}{T} + t_a \right) - \cosh t_a \right]$ 在 $[0, x_0]$ 区间中的长度为:

$$l = \int_0^{x_0} \sqrt{1 + (y')^2} dx \quad (1-16)$$

悬链线方程 $y = \frac{T_0}{W} \left[\cosh \left(\frac{Wx}{T} + t_a \right) - \cosh t_a \right]$ 对 x 进行求导, 得到 y' 的表达式为:

$$y' = \sinh \left(\frac{Wx}{T} + t_a \right) = \tan \theta_b \quad (1-17)$$

代入式(1-17), 得到悬链线长度的表达式为:

$$l = \frac{T_0}{W} \sinh \left(\frac{Wx}{T} + t_a \right) \Big|_0^{x_0} \quad (1-18)$$

将式(1-4)带入式(1-18)整理得到悬链线长度方程:

$$l = \frac{0.625v^2 D(H-h)}{W} \left[\sinh \left(\frac{Wx_0}{0.625v^2 D(H-h)} + t_a \right) - \sinh(t_a) \right] \quad (1-19)$$

3. 钢桶受力分析

3.1. 钢桶静力矩分析

由于钢桶在力的作用下是静止作用, 因此钢桶的静力矩和为零, 因此可以建立静力矩方程式:

$$\begin{cases} F_{2x} * L_{2x} = T_{cx} * L_{cx} \\ F_{2y} * L_{2y} = T_{cy} * L_{cy} + G * L \end{cases} \quad (2-1)$$

3.2. 钢桶受力分析

在悬链线受力不变的情况下, 对钢桶进行受力分析, 分别建立钢桶关于水平方向, 竖直方向和力矩的平衡方程式。根据受力分析, 可以绘制出钢桶的静力图如图5所示:

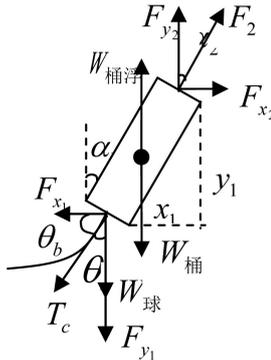


Figure 5. Static analysis of steel drum
图 5. 钢桶的静力分析

首先根据钢桶的静力分析, 建立钢桶沿水平方向和竖直方向的力平衡方程:

$$\begin{cases} F_2 \sin \alpha_2 = T_c \sin \theta_c \\ F_2 \cos \alpha_2 + W_{浮} = W_{桶} + T_c \cos \theta_c + W \end{cases} \quad (2-2)$$

其中, F_2 表示钢管1对钢桶的拉力; α_2 表示钢管1倾斜的角度; T_c 表示锚链对钢桶的拉力, T_c 与式(3-9)中的 T_b 为一对相互作用力; θ_c 表示 T_c 与竖直方向的夹角; $W_{桶}$ 表示钢桶的重力; $W_{浮}$ 表示钢桶的浮力; $W_{球}$ 表示选用重物球的重力。由于钢桶不转动, 则有:

$$\sum M = \sum (F \times d) = 0 \quad (2-3)$$

其中, α_1 表示钢桶倾斜的角度; l 表示钢桶的长度。求解得到: $x_1 = l \cdot \sin \alpha_1$, $x_2 = l \cdot \cos \alpha_2$ 。又因为钢桶的力矩保持平衡, 可列出方程:

$$-l \cdot F_{y_2} \cdot \sin \alpha_1 + l \cdot F_{x_2} \cdot \cos \alpha_1 + \frac{1}{2} W_{重浮} \cdot \sin \alpha_1 = 0 \quad (2-4)$$

其中, F_{x_2} 和 F_{y_2} 分别表示 F_2 沿水平方向和竖直方向的分力; α_1 表示钢桶的倾斜角度; 将式(2-2)求解出的结果带入式(2-3)得到:

$$l_{桶} \sin \alpha_1 \cdot F_2 \cos \alpha_2 + l_{桶} \cos \alpha_1 \cdot F_2 \sin \alpha_2 + \frac{1}{2} W l_{桶} \sin \alpha_1 = 0 \quad (2-5)$$

将式(2-2)带入式(2-5)中，消去拉力 F_2 ，在式两边同时除以 $l \cdot \cos \alpha_1$ ，通过化简得到：

$$\tan \alpha_1 = \frac{-T_c \cdot \sin \theta_c}{\frac{3}{2}(W_{桶} - W_{浮}) + W_{球} - T_c \cdot \cos \theta_c} \quad (2-6)$$

3.3. 钢管静力矩分析

由于钢管在力的作用下是静止作用，因此钢管的静力矩和为零，因此可以建立静力矩方程式：

$$\begin{cases} F_{(n-1,x)} * L_{(n-1,x)} = T_{(n+1,x)} * L_{(n+1,x)} \\ F_{(n-1,y)} * L_{(n-1,y)} + F_{浮n} * L = T_{(n+1,y)} * L_{(n+1,y)} + G_n * L \end{cases} \quad (2-7)$$

3.4. 钢管受力分析

在钢桶受力不变的情况下，对钢管1~钢管4进行受力分析，分别建立钢管1~钢管4关于水平方向，竖直方向的力平衡方程。根据受力分析，可以绘制出钢管1~钢管4的静力图如图6：

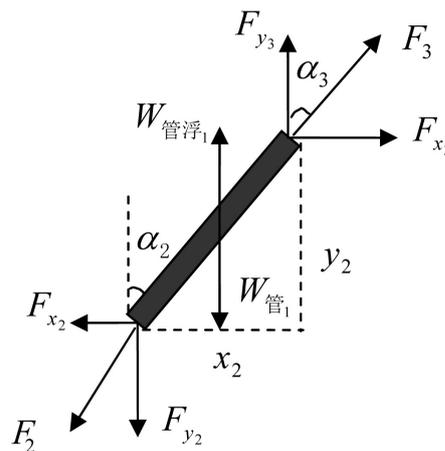


Figure 6. Static analysis of steel pipe 1
图 6. 钢管 1 的静力分析

首先根据钢管1的静力分析，建立钢管1沿水平方向和竖直方向的力平衡方程：

$$\begin{cases} F_3 \sin \alpha_3 = F_2 \sin \alpha_2 \\ F_3 \cdot \cos \alpha_3 = F_2 \cdot \cos \alpha_2 + W_{管1} - W_{浮1} \end{cases} \quad (2-8)$$

其中， F_3 表示钢管2对钢管1的拉力； α_3 表示钢管2的倾斜角度； $W_{管1}$ 表示钢管1的重力； $W_{浮1}$ 表示钢管1所受的浮力。对式(2-8)进行平方后相加，得到方程：

$$F_3^2 = F_2^2 + (W_{管1} - W_{浮1})^2 + 2(W_{管1} - W_{浮1}) \sqrt{F_1^2 - T_0^2} \quad (2-9)$$

再同理对钢管2~钢管4进行静力分析，整理后得到方程：

$$F_2^2 = T_c^2 + (W_{桶} - W_{桶浮} + W_{球})^2 + 2T_c \cdot \cos \theta_c (W_{桶} - W_{桶浮} + W_{球}) \quad (2-10)$$

其中， $W_{管i}$ ($i=1,2,3,4$) 表示钢管1~钢管4的重力； $W_{浮i}$ ($i=1,2,3,4$) 表示钢管1~钢管4所受的浮力； T_c 表示

锚链对钢桶的拉力。

4. 浮标受力分析

4.1. 浮标静力矩分析

建立静力矩方程式：

$$\begin{cases} F_{(4,x)} * L_{(4,x)} = F_{\text{风}} * L \\ F_{(4,y)} * L_{(4,y)} + G * L = F_{\text{浮}} * L \end{cases} \quad (3-1)$$

4.2. 浮标受力分析

考虑浮标在风向量法平面的投影面积，由图7得到浮标受近海风荷载的影响公式为：

$$F = 0.625 \times D(H - h)v^2 \quad (3-2)$$

其中 D 表示浮标底面直径； H 表示浮标的高度； h 表示浮标吃水的深度； v 表示海面风速。

在钢管4受力不变的情况下，对浮标4进行静力分析，绘制出浮标的静力图(如图8)。分别建立浮标关于水平方向和竖直方向的力平衡方程：

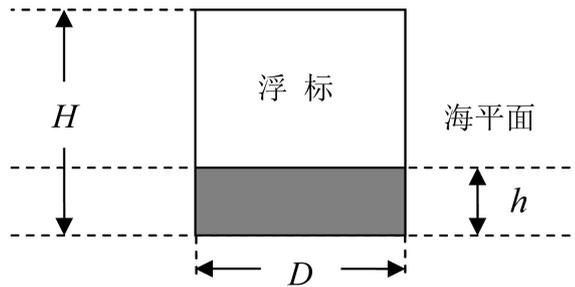


Figure 7. Schematic diagram of the buoy on the projection plane
图 7. 浮标在投影平面的示意图

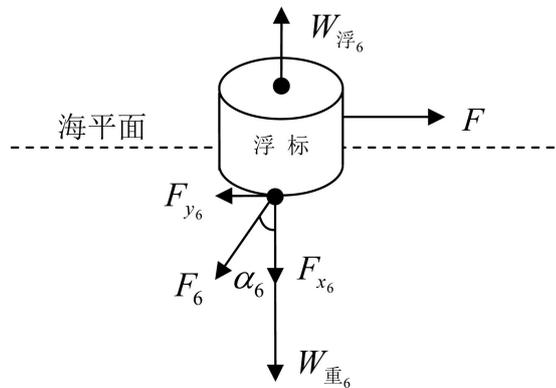


Figure 8. Static analysis of the buoy
图 8. 浮标的静力分析

$$\begin{cases} F = F_6 \sin \alpha_6 = 0.625D(H - h)v^2 \\ F_6 \cos \alpha_6 + W_{\text{重}_6} = W_{\text{浮}_6} = \frac{1}{4} \rho gh\pi D^2 \end{cases} \quad (3-3)$$

5. 系泊系统整体分析

5.1. 系泊系统受力分析

对系泊系统整体进行受力分析，由作用力等于反作用力的条件：

$$\begin{cases} F = F_6 \sin \alpha_6 \\ F_6 \sin \alpha_6 = F_5 \sin \alpha_5 \\ F_5 \sin \alpha_5 = F_4 \sin \alpha_4 \\ F_4 \sin \alpha_4 = F_3 \sin \alpha_3 \\ F_3 \sin \alpha_3 = F_2 \sin \alpha_2 \\ F_2 \sin \alpha_2 = T_c \sin \theta_c \\ T_c \sin \theta_c = T_0 \end{cases} \quad (4-1)$$

5.2. 系泊系统竖直长度分析

系泊系统竖直长度 Y 为海平面到海床平面的距离，由锚链竖直方向的长度、钢桶竖直方向的长度、钢管 1~钢管 4 竖直方向的长度、浮标的吃水深度组成。即：

$$Y = y_0 + l_{\text{桶}} \cos \alpha_1 + l_{\text{管}} \cos \alpha_2 + l_{\text{管}} \cos \alpha_3 + l_{\text{管}} \cos \alpha_4 + l_{\text{管}} \cos \alpha_5 + h \quad (4-2)$$

5.3. 浮标游动区域的确定

浮标游动的区域由锚链水平方向的长度、钢桶水平方向的长度、钢管 1~钢管 4 水平方向的长度 6 部分组成，即：

$$\begin{cases} L = x_0 + l_{\text{桶}} \sin \alpha_1 + l_{\text{管}} \sin \alpha_2 + l_{\text{管}} \sin \alpha_3 + l_{\text{管}} \sin \alpha_4 + l_{\text{管}} \sin \alpha_5 \\ S = \pi L^2 \end{cases} \quad (4-3)$$

其中， L 表示系泊系统水平长度； S 表示浮标游动的区域面积；

6. 模型求解

[13][14][15]

step1: 将锚链左下端切线与海床的夹角 θ_a 和锚链水平长度 x_0 带入(1-17)，计算出锚链对钢桶张力的方向与水平线的夹角 θ_b 。

step2: 由图 4 可知 θ_b 与 θ_c 互余，求得 θ_c ；根据(1-6)可以求得 T_b 。因为 T_b 与 T_c 为一对相互作用力，可计算出 T_c 的值。

step3: 将 T_c 和 θ_c 带入(2-5)，(2-12)，分别计算出钢桶倾斜角度 α_1 和 F_2 。

step4: 将 T_c ， θ_c 和 F_2 带入式(3-3)，计算出钢管 1 的倾斜角度 α_2 ，钢管 2 的倾斜角度 α_3 ，钢管 3 的倾斜角度 α_4 ，钢管 4 的倾斜角度 α_5 ，锚链张力沿水平方向分力 T_0 。

step5: 将 θ_a 和 T_0 带入(1-11)，求得悬链线方程；利用 Matlab 做出锚链的形状图。

step6: 将锚链水向长度 x_0 ，钢管 1~钢管 4 的倾斜角 $\alpha_2 \sim \alpha_4$ 带入(4-3)，求解出系泊系统水平长度 L ，浮标游动的区域面积 S 。即系泊系统浮标的游动区域是以锚为原点，半径为 L 的圆，浮标游动区域面积为 S 。

通过 Matlab (R2010a)编程实现上述步骤，计算出系泊系统各个参数的值和锚链方程，画出锚链图像，并最终确定浮标的游动区域。

将重物球质量 $W_{\text{ball}} = 1200$ ，海面风速 $v = 36 \text{ m/s}$ 带入问题建立的模型进行求解结果如表 1 所示：

Table 1. Tilt angle of steel drum and each section of steel pipe when sea surface wind speed is 36 (unit: °C), buoy draft depth (unit: m)

表1. 海面风速为36 m/s时钢桶和各节钢管的倾斜角度(单位: 度)、浮标吃水深度(单位: 米)

钢桶倾斜角 α_1''	钢管 1 倾斜角 α_2''	钢管 2 倾斜角 α_3''	钢管 3 倾斜角 α_4''	钢管 4 倾斜角 α_5''	浮标吃水深度 h''
7.8566	7.6962	7.6557	7.6156	7.5759	0.7810

通过 Matlab (R2010a)软件编程得到锚链形状图像如图 9:

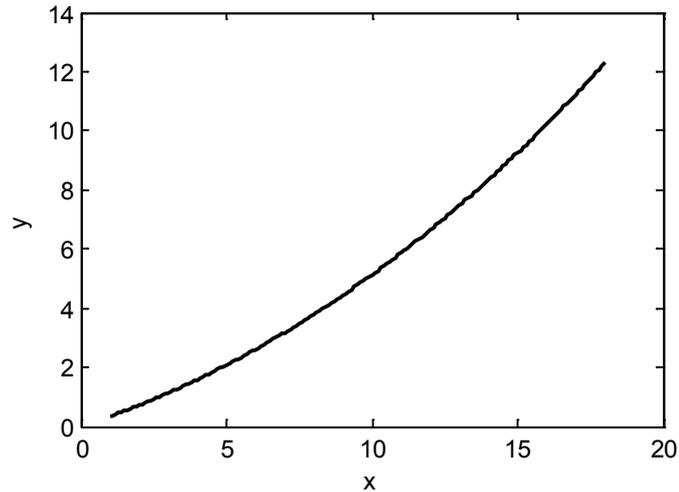


Figure 9. Anchor chain shape when the sea surface wind speed is 36
图 9. 海面风速为 36 m/s 时的锚链形状

锚链方程为:

$$y_3 = \frac{1974.8}{7} \left[\cosh \left(\frac{7x}{1974.8} + 0.3171 \right) - 1.0507 \right] \quad (5-1)$$

浮标的游动区域是以锚为原点, 半径为 18.6721 米, 游动区域面积为 1095 m²。当海面风速为 36 m/s 时, 锚链末端与锚的链的接处的切线与海床的夹角 $\theta_a = 17.8711$ 度。 $\theta_a > 16^\circ$, 锚会被拖行。

列出与重物球相关的方程组

$$\begin{cases} W_{重} = F_2 \cos \alpha_2 + W_{浮} - W_{桶} - T_c \cos \theta_c \\ F_2 \cos \alpha_2 = \sqrt{F^2 - F^2 \sin^2 \alpha_2} = \sqrt{F_2^2 - T_0^2} \\ \frac{1}{\tan \theta_c} = \tan \theta_b = \sinh \left(\frac{Wx_0}{T} + t_a \right) \end{cases} \quad (5-2)$$

通过联立求解, 得到关于重物球重量的方程:

$$W_{重} = \sqrt{F_2^2 - T_0^2} + W_{浮} - W_{桶} - \frac{T_0}{\tan \theta_c} \quad (5-3)$$

根据重物球重量调节模型, 利用 Matlab 编程求解得到: 锚链末端与锚的链接处的切线方向与海床夹角 θ_a 在一定范围内, 随着重物球的重量增加而减小; 钢桶的倾斜角 α_1 在一定范围内, 随着重物球的重量增加而减小。如图 10 所示

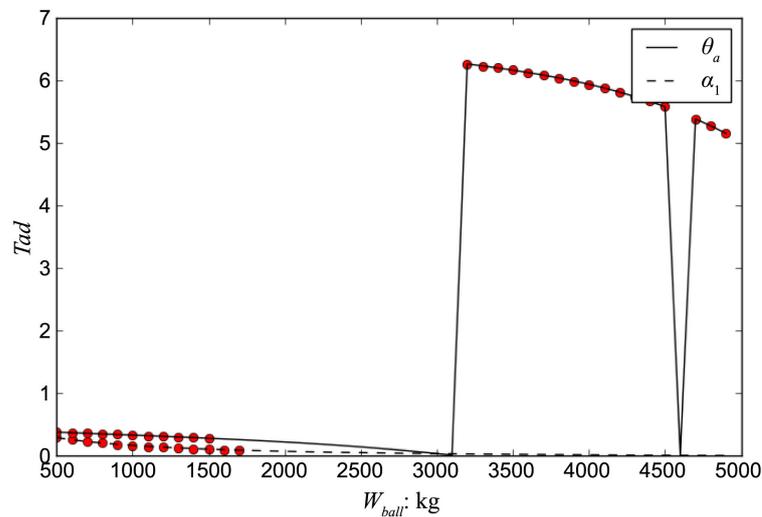


Figure 10. α_1 and θ_a the variation of the weight of the weight ball F_w
图 10. α_1 和 θ_a 随重物球重量 F_w 的变化示意图

红色圆点表示不符合题目要求的角度，黑色圆点表示符合。由图9可知，当海面风速为36 m/s时，重物球质量在1700 kg~3200 kg可满使得钢桶倾斜角度不超过5°；锚链末端与锚的连接处的切线方向与海床夹角 θ_a 小于16°。

7. 结果分析

通过海域深度 H ，海水速度 u ，风速度 V 对锚链形状影响探讨，可知随着海域深度的增加，水流速度与风速度固定时，锚链中部略微下垂，但影响不大；随着 u 增加，在 H 与 V 固定的情况下，锚链左端与水平相切角在增大，锚链的曲率半径在减小；随着 V 的增加，在 H 与水流速度固定的情况下，锚链左端与水平切向角由负角慢慢变为正角，说明在此深度与水速下，锚链存在一定拖尾现象，随着 V 的增加，拖尾现象消失，锚链的曲率半径随着水速的增大而增大。

下面检验锚链末端与锚的连接处的切线方向与海床夹角 θ_a ，铁桶倾斜角 α_1 随着重物球质量的变化规律。

从图 11 分析可知，锚链在锚点与海床的夹角 θ_a 随着重物球的质量增加而缓慢地增加，说明锚链所受的张力在逐渐增大，且满足夹角 $\theta_a \leq 16^\circ$ ；在 500 kg~1700 kg 的范围内，铁桶倾斜角度 α_1 随着重物球的质量增加而逐渐减小，且满足倾斜角度 $\alpha_1 \leq 5^\circ$ ，说明重物球的质量增加可以使得铁桶中水声通讯设备的工作效果较好。通过对铁桶、重物球和锚链所构成的系统受力分析，以上分析符合系统力学平衡变化(参见文献[13] [14] [15])。

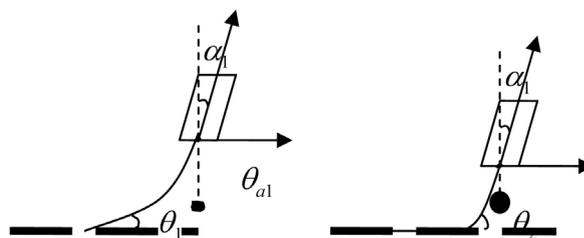


Figure 11. Schematic diagram of the catenary of different weight balls
图 11. 不同重物球的悬链示意图

本文模型的优点在于：1) 在求解问题的过程中，采用了逐层分析思想，依次对锚链、钢桶、钢管、浮标进行受力分析，思路清晰，环环相扣，具有很好的可读性。2) 本文运用较多的受力分析图，可以形象直观地反映出物体在水平和竖直方向上的受力关系，解题思路清晰明了。3) 通过单因素控制变量法，简化模型但又不失去本质，较好地解决本题。缺点在于：1) 在考虑海面风对浮标的影响时，忽略了风力在竖直方向的作用；2) 在海水静止时，忽略了海水阻力对浮标的影响。此外，在对基本模型的推导过程中，忽略了水的阻力对浮标的作用。当海面风作用于浮标时，会产生一个水平方向的力 F ，与海水对浮标的阻力 f 为一对力偶。当风速 v 较大时，水平分力 F 和阻力 f 会使浮标的重心发生偏移。结合风速，可以大致判断出求解得到的钢桶和各节钢管的倾斜角度比实际值要小，但因为浮标的重力较大，重心偏移的角度非常微小，误差可以忽略不计。

基金项目

四川省大学生创新创业训练计划项目(201710622060, 201810622025)。

参考文献

- [1] 李玉龙, 于定勇, 李翠琳, 常梅. 防风单点系泊系统系泊力试验研究[J]. 海岸工程, 2008, 27(2): 17-25.
- [2] 王领, 刘生法. 深水大型浮台系泊系统水动力计算分析[J]. 广东造船, 2018(5): 16-18.
- [3] 孙传耀, 汤鸣晓. 基于 MATLAB 的系泊系统的设计及其动力分析[J]. 电子技术与软件工程, 2017(6): 62-63.
- [4] 李继锁, 朱克强, 孙培军, 王晨. 船舶系泊系统动力分析[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(10): 64-67.
- [5] 刘文玺, 周其斗, 张纬康, 纪刚. 浮体与系泊系统的耦合动力分析[J]. 船舶力学, 2014, 18(8): 940-957.
- [6] 马巍巍, 范模. 极浅水单点系泊系统的设计研究[J]. 船舶工程, 2013, 35(2): 92-95.
- [7] 金伟锋, 吴思佳, 章春豪, 徐嘉琦, 徐俊康, 金书玉. 近浅海环境监测系泊系统的设计研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2017, 30(1): 7-10.
- [8] 罗晓健, 张爱霞, 李斌. 单点系泊系统设计思路及原则[J]. 中国海洋平台, 2013, 28(2): 19-23+56.
- [9] 袁梦, 范菊, 缪国平, 朱仁传. 系泊系统动力分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2010, 25(3): 285-291.
- [10] 夏运强, 唐筱宁, 蒋凯辉, 王绿卿. 防风单点系泊系统系泊力理论计算公式研究[J]. 水运工程, 2010(4): 58-62.
- [11] 李淑一, 王树青. 基于多体分析的浅水 FPSO 和 水下软钢臂系泊系统运动特性研究[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(9): 95-102.
- [12] 王瀚, 解德. 悬链线构件的有限元方法[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(6): 34-38.
- [13] 唐友刚, 张若瑜, 庄茁. 深海系泊系统模态分析[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 233-239.
- [14] 刘建成, 李润培, 顾永宁, 张剑波. 一种简易单点系泊系统的可行性研究[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(1): 132-136.
- [15] 谭丰林, 许海城, 谏子民, 唐西林. 基于模拟退火的近浅海系泊系统仿真[J]. 现代电子技术, 2018, 41(2): 1-5.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2324-7991，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aam@hanspub.org