



中国科技核心期刊  
华东地区优秀期刊

ISSN 1004-8820  
CODEN YDZGFR

# 烟台大学学报

自然科学与工程版

**JOURNAL OF YANTAI UNIVERSITY**  
Natural Science and Engineering Edition

[ 3 ]

2017

第30卷 Vol.30

ISSN 1004-8820



9 771004 882176

[期刊基本参数] CN 37-1213/N\* 1988\* q\* A4\* 96\* zh\* P\* ¥10.00\* 1000\* 16\* 2017-07

目 次

水流影响下系泊系统设计的数学模型 ..... 李 斐,吕 文,李 琴(173)

质量 - 弹簧 - 阻尼系统的随机跟踪控制 ..... 耿良超,吴昭景(180)

Banach 空间中渐近非扩张型映象 Reich-Takahashi 迭代序列的收敛性 ..... 林 媛,张树义,李 丹(185)

基于 NCBI 核酸数据库资源的产黄青霉微卫星序列的筛选  
..... 李瑶瑶,刘云国,刘凌霄,刘 军,张 亮,王敏强(191)

干旱胁迫对皱叶酸模相关生理指标的影响 ..... 郎晓冰,艾丽花,姜夕雷,陈世华,尹海波,郭善利(197)

亲水作用色谱法测定左卡尼汀注射液含量及杂质 A ..... 耿银银,许丽晓,方会超,王 莉,刘万卉(202)

麦角甾醇类化合物 G10-10A 体外抗胃癌细胞 MKN45 生长作用的研究  
..... 解晓霞,王洪波,张静文,杨延婷,韩俊杰,刘宏伟,赵 烽,傅风华(207)

单环刺螠对刺参养殖池塘底质的影响 ..... 刘晓玲,王增猛,邵明瑜,崔龙波,杨学宋(214)

人工注射催产激素对半滑舌鳎卵巢发育的影响 ..... 张玉祥,杜荣斌,姜海滨,吴艳庆,刘立明(220)

成形方法对多孔钨组织和性能的影响 ..... 周 兵,刘海波,张尚洲(227)

景观构筑物的特征解析 ..... 王 瑜,陈 震(232)

新型分体柱受剪性能试验研究 ..... 徐汇宾,刘继良,初明进(237)

ACS800 直接转矩控制在汽车检测控制系统中的应用 ..... 姜玉萍,李宝顺,赵高鹏,高 璐,王俊达(244)

几株异养硝化细菌与好氧反硝化细菌的分离与鉴定 ..... 刘万鑫,杜荣斌,由翠荣,付学军,梁丽琨(249)

应用技术

主题网络爬虫技术在高速公路信息采集中的应用 ..... 张 芳,王培进(255)

复合因素联合作用下混凝土硫酸盐侵蚀损伤特性试验 ..... 田立宗,逯静洲,邵艳明,朱孔峰,刘 亚(261)

# 水流影响下系泊系统设计的数学模型

李斐, 吕文, 李琴

(烟台大学数学与信息科学学院, 山东烟台 264005)

**摘要:** 通过对系泊系统的受力分析和力矩平衡, 对水流影响下的系泊系统形态建立了差分方程组模型. 并分别在水速为 0 m/s、1.0 m/s 且与风力成 0°、45°、90° 和 180° 的情况下, 确定了 210 节链环的 II 型锚链的形态. 最后利用该模型解决了给定条件下, 锚链型号、长度和重物球质量的选择和确定问题, 即系泊系统设计问题. 给出了在海水速度最大 1.5 m/s, 风速最大 36 m/s, 水深 16 ~ 18 m 下锚链型号、长度和重物球质量的最优解.

**关键词:** 系泊系统设计; 差分方程组; 多目标规划

中图分类号: O29

文献标志码: A

## 1 问题的提出

系泊系统有多种形式<sup>[1]</sup>, 其中最为普遍的就是单点系泊系统(SPM). 大多数文献<sup>[2-3]</sup>研究的单点系泊系统是由锚链和锚组成, 其中锚链形态的确定主要是通过悬链线法<sup>[4-5]</sup>, 集中质量法和有限元方法<sup>[6]</sup>来研究. 而本文是以文献[7]中的系泊系统为研究对象(图1), 该系统更为复杂, 包括钢管、钢桶、重物球、电焊锚链和抗拖移锚组成. 为了保证锚不被拖行和钢桶中的水声设备正常工作, 要求锚链末端与锚的连接处的切线方向与海床的夹角不超过 16°, 且钢桶的倾斜角(钢桶与竖直线的夹角)不超过 5°.

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. 要解决该问题需确定系泊系统的形态, 特别是锚链的形态, 上述文献均把锚链看成柔性绳索, 体现不出锚链型号的差异(不同型号的锚链单个链环的长度不同). 而本研究的一个重要问题就是确定锚链型号, 故采用悬链线或有限元方法并不适合. 本文采用构造差分方程组的方法, 通过建立给定风速、水速下的系泊系统形态的数学模型, 解决了系泊系统的设计问题. 其中浮标、钢管、钢桶的长度、半径和重量、重物球的重量、五种锚链的链环长度、单位质量等已知.

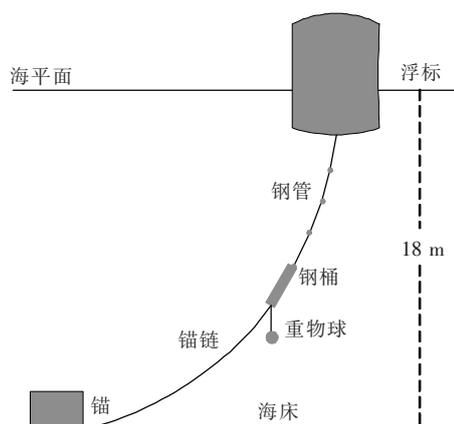


图1 系泊系统

Fig. 1 The mooring system

## 2 模型建立

考虑到风力仅作用在海面上的浮标部分, 而水流力作用在海面下的浮标部分、钢管、钢桶、重物球, 特别是水流力对锚

收稿日期: 2016-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61503318); 山东省高校科研计划项目(J13LI06).

作者简介: 李斐(1982-), 女, 山东烟台人, 讲师, 博士, 研究方向为多元统计方向.

链的影响不可忽略<sup>[8]</sup>. 因风力和水流力可能成一定的夹角, 导致整个系泊系统在三维空间内偏转, 故建立三维坐标系(图2).

其中:  $xO$  方向为水流方向,  $Oy$  方向是与水流垂直的方向,  $A_1(x_1, y_1, z_1)$  为浮标底端的坐标,  $A_i(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=2, 3, 4, 5$ ) 为四节钢管的末端的坐标,  $A_6(x_6, y_6, z_6)$  为钢桶底部的坐标,  $A_i(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=7, 8, 9, \dots$ ) 为每节链环底端的坐标.

将整个系泊系统分成4个部分, 即浮标、钢管、铁桶和链条, 分别对这4个部分进行受力分析并建立差分方程, 确定锚链的形态、拖地长度、与海底的夹角等.

对浮标进行受力分析(图3), 此处不考虑浮标的倾斜. 其中  $f_{\text{标}}, g_{\text{标}}$  为浮标的浮力和重力,  $f_{\text{风}}, f_{\text{水}}$  分别为浮标受到的风力和水流力, 二者的夹角为  $\alpha$ .  $T_1$  为第一节钢管对浮标的拉力, 与  $z$  轴的夹角  $\gamma_1$ , 在  $xOy$  平面上的投影与  $y$  轴的夹角为  $\beta_1$ .  $f_{\text{标}}, f_{\text{风}}, f_{\text{水}}$  都由浮标吃水深度  $h$  确定.

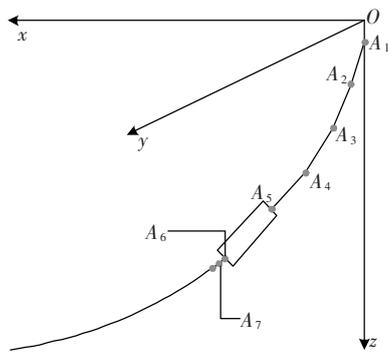


图2 系泊系统坐标系

Fig. 2 Coordinate system of the mooring system

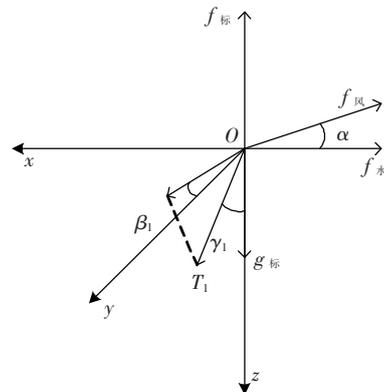


图3 浮标的受力分析

Fig. 3 The force analysis of buoy

建立方程组(1),

$$\begin{cases} T_1 \cos \gamma_1 = f_{\text{标}}, \\ f_{\text{风}} \cos \alpha + f_{\text{水}} = T_1 \sin \gamma_1 \sin \beta_1, \\ f_{\text{风}} \sin \alpha = T_1 \sin \gamma_1 \cos \beta_1. \end{cases} \quad (1)$$

对钢管进行受力分析, 并建立差分方程, 以第一节钢管的受力分析和力矩平衡分析为例(图4和图5).

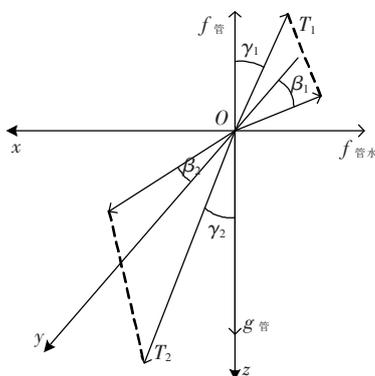


图4 第一节钢管的受力分析

Fig. 4 The force analysis of the first steel pipe

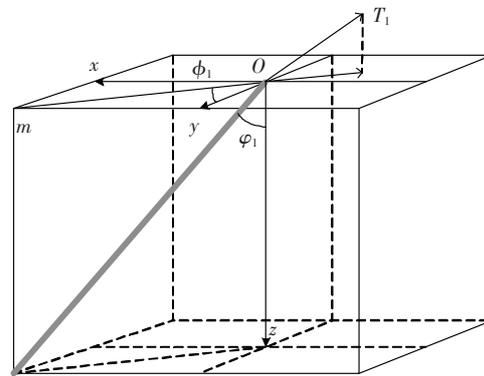


图5 第一节钢管的力矩分析

Fig. 5 The moment balance of the first steel pipe

其中:  $f_{\text{管}}, g_{\text{管}}$  为钢管的浮力和重力,  $f_{\text{管水}}$  分别为钢管受到的水流力,  $T_1$  为浮标对第一节钢管的拉力,  $T_2$  为第二节钢管对第一节钢管的拉力, 与  $z$  轴的夹角  $\gamma_2$ , 在  $xOy$  平面上的投影与  $y$  轴的夹角为  $\beta_2$ . 在第一节钢管所在平面  $mOz$  上对钢管建立力矩平衡方程, 且垂直于  $mOz$  平面作用在钢管上的分力也需建立力矩平衡方程.  $\phi_1$  为第一节钢管与  $z$  轴的夹角,  $\varphi_1$  为第一节钢管在  $xOy$  平面上的投影与  $y$  轴的夹角, 建立方程组(2):

$$\begin{cases} T_1 \cos \gamma_1 + f_{\text{管}} = T_2 \cos \gamma_2 + g_{\text{管}}, \\ T_1 \sin \gamma_1 \sin \beta_1 + f_{\text{水}} = T_2 \sin \gamma_2 \sin \beta_2, \\ T_1 \sin \gamma_1 \cos \beta_1 = T_2 \sin \gamma_2 \cos \beta_2, \\ T_1 \sin \gamma_1 \sin(\phi_1 - \beta_1) = T_2 \sin \gamma_2 \sin(\beta_2 - \phi_1), \\ T_1 \cos \gamma_1 \sin \varphi_1 - T_1 \sin \gamma_1 \cos(\phi_1 - \beta_1) \cos \varphi_1 = \\ - T_2 \cos \gamma_2 \sin \varphi_1 + T_2 \sin \gamma_2 \cos(\beta_2 - \phi_1) \cos \varphi_1. \end{cases} \quad (2)$$

并建立差分方程组(3):

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + l_{\text{管}} \sin \varphi_1 \sin \phi_1, \\ y_2 = y_1 + l_{\text{管}} \sin \varphi_1 \cos \phi_1, \\ z_2 = z_1 + l_{\text{管}} \cos \varphi_1. \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\phi_1, \varphi_1$  满足式(2). 同理可对其它3节钢管建立类似的差分方程组(4):

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + l_{\text{管}} \sin \varphi_i \sin \phi_i, \\ y_{i+1} = y_i + l_{\text{管}} \sin \varphi_i \cos \phi_i, \\ z_{i+1} = z_i + l_{\text{管}} \cos \varphi_i. \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\phi_i, \varphi_i (i=1, 2, 3, 4)$  满足式(5):

$$\begin{cases} T_i \cos \gamma_i + f_{\text{管}} = T_{i+1} \cos \gamma_{i+1} + g_{\text{管}}, \\ T_i \sin \gamma_i \sin \beta_i + f_{\text{水}} = T_{i+1} \sin \gamma_{i+1} \sin \beta_{i+1}, \\ T_i \sin \gamma_i \cos \beta_i = T_{i+1} \sin \gamma_{i+1} \cos \beta_{i+1}, \\ T_i \sin \gamma_i \sin(\phi_i - \beta_i) = T_{i+1} \sin \gamma_{i+1} \sin(\beta_{i+1} - \phi_i), \\ T_i \cos \gamma_i \sin \varphi_i - T_i \sin \gamma_i \cos(\phi_i - \beta_i) \cos \varphi_i = \\ - T_{i+1} \cos \gamma_{i+1} \sin \varphi_i + T_{i+1} \sin \gamma_{i+1} \cos(\beta_{i+1} - \phi_i) \cos \varphi_i. \end{cases} \quad (5)$$

同理对钢桶进行分析. 此时注意到重物球由于受到水流力的影响, 对钢桶的拉力并不是垂直向下, 而是与  $z$  轴成一定的夹角, 可通过对重物球的受力平衡建立方程, 确定拉力大小和与  $z$  轴的夹角. 对钢桶建立差分方程组(6):

$$\begin{cases} x_6 = x_5 + l_{\text{桶}} \sin \varphi_5 \sin \phi_5, \\ y_6 = y_5 + l_{\text{桶}} \sin \varphi_5 \cos \phi_5, \\ z_6 = z_5 + l_{\text{桶}} \cos \varphi_5. \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\varphi_5, \phi_5$  满足式(7):

$$\begin{cases} T_5 \cos \gamma_5 + f_{\text{桶}} = T_6 \cos \gamma_6 + g_{\text{桶}} + T_{\text{球}} \cos \theta_{\text{球}}, \\ T_5 \sin \gamma_5 \sin \beta_5 + f_{\text{桶水}} + T_{\text{球}} \sin \theta_{\text{球}} = T_6 \sin \gamma_6 \sin \beta_6, \\ T_5 \sin \gamma_5 \cos \beta_5 = T_6 \sin \gamma_6 \cos \beta_6, \\ T_5 \sin \gamma_5 \sin(\phi_5 - \beta_5) = T_6 \sin \gamma_6 \sin(\beta_6 - \phi_5), \\ T_5 \cos \gamma_5 \sin \varphi_5 - T_5 \sin \gamma_5 \cos(\phi_5 - \beta_5) \cos \varphi_5 = \\ - T_6 \cos \gamma_6 \sin \varphi_5 - T_{\text{球}} \sin \varphi_5 + T_6 \sin \gamma_6 \cos(\beta_6 - \phi_5) \cos \varphi_5. \end{cases} \quad (7)$$

同理对每一个链环建立差分方程组(8):

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + l_{\text{链环}} \sin \varphi_i \sin \phi_i, \\ y_{i+1} = y_i + l_{\text{链环}} \sin \varphi_i \cos \phi_i, \\ z_{i+1} = z_i + l_{\text{链环}} \cos \varphi_i. \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $\varphi_i, \phi_i (i=6, 7, \dots)$  满足式(9):

$$\begin{cases} T_i \cos \gamma_i + f_{\text{链环}} = T_{i+1} \cos \gamma_{i+1} + g_{\text{链环}}, \\ T_i \sin \gamma_i \sin \beta_i + f_{\text{链环水}} = T_{i+1} \sin \gamma_{i+1} \sin \beta_{i+1}, \\ T_i \sin \gamma_i \cos \beta_i = T_{i+1} \sin \gamma_{i+1} \cos \beta_{i+1}, \\ T_i \sin \gamma_i \sin(\phi_i - \beta_i) = T_{i+1} \sin \gamma_{i+1} \sin(\beta_{i+1} - \phi_i), \\ T_i \cos \gamma_i \sin \varphi_i - T_i \sin \gamma_i \cos(\phi_i - \beta_i) \cos \varphi_i = \\ - T_{i+1} \cos \gamma_{i+1} \sin \varphi_i + T_{i+1} \sin \gamma_{i+1} \cos(\beta_{i+1} - \phi_i) \cos \varphi_i. \end{cases} \quad (9)$$

对系泊系统建立式(4)、(6)、(8)联立的差分方程组模型,其中的未知参数满足式(5)、(7)、(9)联立的方程组.我们称此模型为系泊系统形态模型(简称形态模型).初值为 $x_1 = y_1 = 0, z_1 = h$ ,其中 $h$ 为浮标吃水深度.一旦给定 $h$ 和锚链的型号,利用形态模型迭代法求解<sup>[9-10]</sup>,即可确定出整个系泊系统的形态,包括钢管、钢桶和每节链环的两端坐标;钢管、钢桶和每节链环的倾角;钢管、钢桶和每节链环的两端拉力的大小方向等.

### 3 模型求解

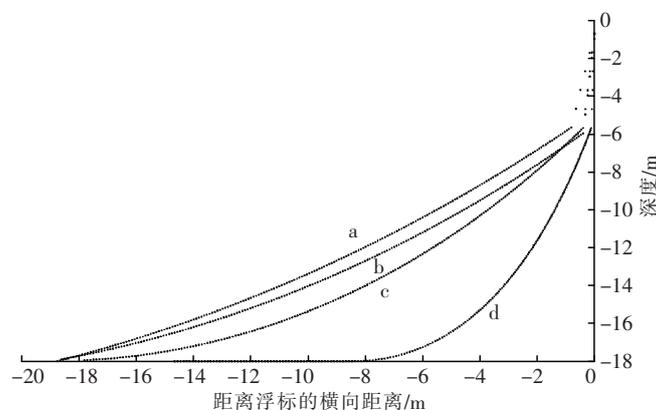
#### 3.1 水速为0 m/s

求解在水深为18 m时,22.05 m的II型电焊锚链在风速分别为12 m/s、24 m/s、36 m/s下锚链的形状及吃水深度等.22.05 m的II型电焊锚链约为210个链环,我们采用定步长的方法寻找吃水深度 $h$ .利用形态模型给定一个 $h$ 初值,可计算210节链环底部的 $z$ 轴坐标 $z_i, i=7, \dots, 216$ .记 $z_{\max} = \max(z_7, \dots, z_{216})$ ,若 $z_{\max} < 18$ ,则增加 $h$ ,当 $z_{\max} = 18$ 即为所求的吃水深度.此时 $z_{\max}$ 对应的是第 $n$ 节链环底部的纵坐标.当 $n = 210$ ,锚链在海底无拖地,当 $n < 210$ ,则第 $n$ 节后的 $(210 - n)$ 个链环拖地.

经Matlab编程计算,风速12 m/s时,吃水深度为0.683 0 m,钢桶的倾斜角度为 $1.201 2^\circ$ ,有15.75 m锚链悬浮,有6.3 m(60节链环)拖在海底.风速为24 m/s时,吃水深度为0.697 0 m,钢桶的倾斜角度为 $4.566 0^\circ$ ,最后一节链环与海底夹角为 $4.359 3^\circ$ .风速为36 m/s时,吃水深度为0.720 0 m,钢桶的倾斜角度为 $9.408 2^\circ$ ,最后一节链环与海底夹角为 $21.803 8^\circ$ .这时不符合系泊系统的设计要求,可以增加重物球的重量以减少钢桶的倾斜和锚链与海底的夹角.建立如下的规划问题:

$$\begin{aligned} \min &= g_{\text{球}}, \\ \text{s. t.} &\begin{cases} \varphi_{215} \leq 84, \\ \varphi_5 \leq 5. \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

利用定步长搜索到钢球至少增加到2 190 kg才能满足设计要求.此时,钢桶的倾斜角度为 $4.603 2^\circ$ ,最后一节链环与海底夹角为 $15.806 6^\circ$ .各种情况下的系泊系统形态如图6.



a. 风速36 m/s; b. 重物球2 190 kg 风速36 m/s; c. 风速24 m/s; d. 风速12 m/s

图6 不同风速下的系泊系统形态

Fig.6 The shapes of mooring system with different wind speeds

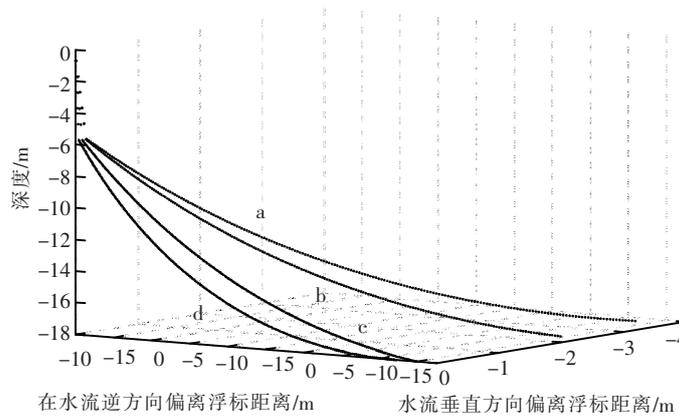
#### 3.2 考虑水动力

仍然采用上述的求解方法,取水速为1.0 m/s,计算水流方向与风向的夹角为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 时系泊系

统形态,见表1、图7.其中夹角为风向与水流方向的夹角.

表1 流速1.0 m/s,风速12 m/s下不同夹角下的系泊系统形态  
Tab.1 The shape of mooring system with water flow speed 1.0 m/s, wind speed 12 m/s

夹角/(°)	x 坐标/m	y 坐标/m	钢桶倾角/(°)	与海底夹角/(°)	吃水深度/m
0	17.941 4	0	4.629 9	10.894 8	0.703 85
45	17.703 9	2.385 3	4.386 1	9.935 7	0.702 70
90	17.195 5	3.793 9	3.717 8	7.050 8	0.699 75
180	16.840 1	0	2.421 6	0(一节链环拖地)	0.694 76



a. 夹角90°风速12 m/s 流速1.0 m/s; b. 夹角45°风速12 m/s 流速1.0 m/s;  
c. 夹角0°风速12 m/s 流速1.0 m/s; d. 夹角180°风速12 m/s 流速1.0 m/s

图7 不同水流方向下的系泊系统形态

Fig.7 The shapes of mooring system with different wind's directions

### 4 系泊系统设计问题

由于潮汐等因素的影响,布放海域的实测水深介于16~20 m之间.布放点的海水速度最大可达到1.5 m/s,风速最大可达到36 m/s.考虑风力,水流力和水深情况下,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.考虑极端情况,即风速、水速、水深达到最大,且风力与水流力夹角为0°.在此情况下,计算了不同型号链条在不同重物球质量时需要的最短锚链长度(也是锚链与海底的夹角接近16°),数据如表2.

表2 不同型号链条在不同重物球质量下的数据  
Tab.2 The data with different types of anchor chain and different quality of the ball

	重物球质量/kg	吃水深度/m	活动半径/m	钢桶倾角/(°)	与海底夹角/(°)	链长/m
I型链	5 300	1.842 0	33.070 4	4.922 8	15.803 9	35.33
	5 400	1.869 0	33.077 3	4.846 1	15.765 1	35.33
	5 500	1.899 0	33.084 2	4.771 9	15.726 7	35.33
	5 600	1.923 0	33.091 1	4.700 2	15.688 7	35.33
II型链	5 200	1.844 1	27.294 5	4.909 1	15.909 9	30.135 0
	5 300	1.871 2	27.296 7	4.832 5	15.900 5	30.135 0
	5 400	1.898 3	27.298 9	4.758 4	15.957 8	30.135 0
	5 500	1.925 4	27.301 3	4.686 8	15.948 7	30.135 0

续表2

	重物球质量/kg	吃水深度/m	活动半径/m	钢桶倾角/(°)	与海底夹角/(°)	链长/m
III 型 链	5 000	1.824 2	23.053 1	4.957 9	15.969 7	26.52
	5 100	1.851 2	23.062 6	4.879 8	15.932 8	26.52
	5 200	1.878 3	23.066 6	4.804 1	15.923 5	26.52
	5 300	1.905 3	23.076 1	4.731 1	15.887 1	26.52
	5 400	1.935 2	23.074 8	4.66	15.905 4	26.52
IV 型 链	4 800	1.807 9	19.921 6	4.996 1	15.866 6	24
	4 900	1.835 0	19.926 7	4.912 6	15.857 1	24
	5 000	1.861 9	19.946 6	4.840 0	15.767 9	24
	5 100	1.888 8	19.956 7	4.765 8	15.732 4	23.85
	5 200	1.916 0	19.812 8	4.693 5	15.983 7	23.85
V 型 链	4 700	1.822 6	17.330 1	4.938 9	15.555 7	22.14
	4 800	1.849 7	17.509 5	4.862 9	15.547 9	22.14
	4 900	1.876 4	17.532 5	4.788 7	15.435 1	22.14
	5 000	1.903 7	17.352 3	4.719 4	15.893 2	21.96
	5 100	1.931 0	17.354 2	4.644 1	15.910 1	21.96

在这些可行解里,为了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,建立多目标规划模型(11):

$$\begin{aligned} \min &= \lambda_1 h + \lambda_2 r + \lambda_3 \theta, \\ \text{s. t.} & \begin{cases} \theta \leq 5, \\ \gamma \leq 16. \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

其中:  $h$  为吃水深度,  $r$  为活动半径,  $\theta$  为钢桶倾斜角,  $\gamma$  为锚链与海底的夹角, 取  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1/3$ , 将上述可行解的吃水深度、活动半径、倾斜角3列数据标准化后代入模型(11), 可得到V型链, 重物球4 700 kg, 链长约为22.14 m时最优. 此时绘制系泊系统形态如图8, 其中自上而下依次为风力与水流力的夹角为  $\pi i/16$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, 8$  时的形态. 图9为风力与水流力的夹角为  $\pi i/16$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, 16$  时锚链底端在  $xOy$  平面上的投影.

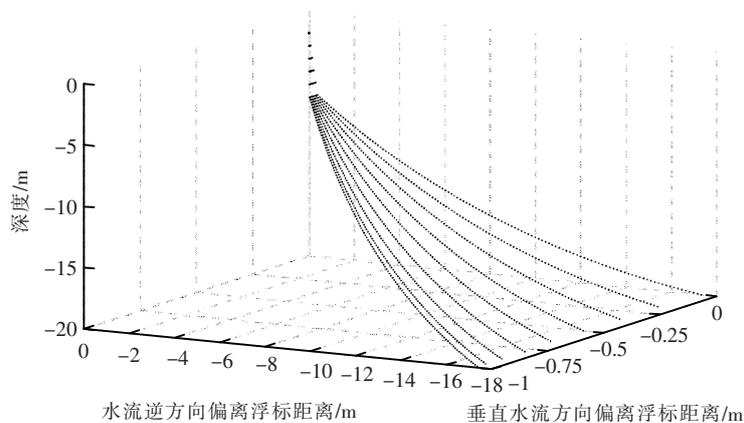
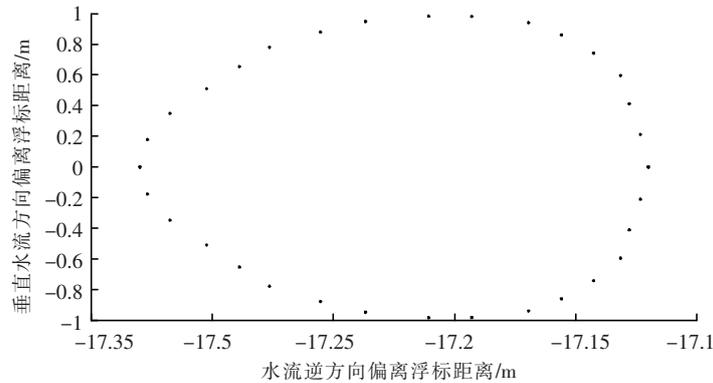


图8 不同水流方向下的系泊系统形态

Fig. 8 The shapes of mooring system with different water flow's directions

图 9 不同水流方向下锚链底端在  $xOy$  平面上的投影Fig. 9 The projection of the anchor on  $xOy$ 

## 参考文献:

- [1] 吕立功, 景勇, 温宝贵, 等. FPSO 系泊系统设计上的考虑 [J]. 中国造船, 2005, 46: 348-356.
- [2] 潘斌, 高捷, 陈小红, 等. 浮标系泊系统静力计算 [J]. 重庆交通学院学报, 1997, 16(1): 69-73.
- [3] 沈琪, 徐召利. 海洋工程中单点系泊系统的应用探讨 [J]. 船舶标准化与质量, 2015, 6: 5-8.
- [4] 王丹, 刘家新. 一般状态下悬链线方程的应用 [J]. 船海工程, 2007, 36(3): 26-28.
- [5] 胡灵斌, 唐军. 悬链线方程求解及其应用 [J]. 船舶, 2004, 1: 17-20.
- [6] 唐友刚, 张若瑜, 刘利琴, 等. 深海系泊系统动张力有限元计算 [J]. 海洋工程, 2009, 27(4): 10-15.
- [7] 2016 年高教社杯全国大学生数学建模竞赛题目 A 题. (2016-09-12) [http://www.mcm.edu.cn/html\\_cn/node/6d026d84bd785435f92e3079b4a87a2b.html](http://www.mcm.edu.cn/html_cn/node/6d026d84bd785435f92e3079b4a87a2b.html).
- [8] 李世谟. 船舶阻力 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [9] 韩中庚. 数学建模方法及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [10] 赵静, 但琦, 严尚安. 数学建模与数学实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.

## Mathematical Model of Mooring System Design with Water Flow Impact Pressure

LI Fei, LÜ Wen, LI Qin

(School of Mathematics and Information Sciences, Yantai University, Yantai 264005, China)

**Abstract:** By analyzing the force and the moment balance of the system, we build a difference equation system for the mooring system's shape with water flow impact pressure. We get the shape of the anchor chain when the water flow speed is 0 m/s, or 1.0 m/s with the angle to the wind force of degree 0, 45, 90 and 180 respectively. At last, we determine the type and the length of the anchor chain, the quality of the ball under some given conditions, and as an example, give our findings corresponding to the maximum water flow speed 1.5 m/s, the maximum wind speed 36 m/s and the depth of water 16-18 m.

**Key words:** mooring system design; difference equation system; multi-objective programming

(责任编辑 李春梅)

## 本刊为下列检索期刊及数据库刊源

- 美国《化学文摘》(CA)
- 美国《数学评论》(MR)
- 美国《剑桥科学文摘:网络版/材料信息》(CSA: MI)之
  - 《电子与通讯文摘》(ECA)
  - 《工程材料文摘》(EMA)
  - 《机械与运输工程文摘》(MTEA)
  - 《腐蚀文摘》(Corr A)
  - 《计算机信息系统文摘》(CISA)
  - 《土木工程文摘》(CEA)
  - 《固体与超导体文摘》(SSSA)
- 俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)
- 德国《数学文摘》(ZBI MATH)
- 《中国学术期刊文摘数据库》(CSAD)
- 《中国数学文摘》
- 《中国物理文摘》
- 《中国无机分析化学文摘》
- 《中国生物学文摘》
- 《中国水产文摘》
- 《中国化学化工文摘》
- 《中国光学与应用光学文摘》
- 《中国期刊网》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》
- 《中国学术期刊(光盘版)》
- 《万方数据——数字化期刊群》
- 《中国科技论文统计源期刊》
- 《中文科技期刊数据库》

## 烟台大学学报

(自然科学与工程版)

Yantai Daxue Xuebao

(Ziran Kexue yu Gongcheng Ban)

(季刊 1988年创刊)

第30卷 第3期(总第110期) 2017年7月15日

主管单位 山东省教育厅  
主办单位 烟台大学  
编辑出版 烟台大学学报编辑部  
主 编 郭善利  
地 址 山东省烟台市莱山区  
邮 政 编 码 264005  
邮 箱 xuebao@ytu.edu.cn  
网 址 http://xuebao.ytu.edu.cn  
印 刷 烟台大学印刷厂  
发 行 单 位 烟台大学学报编辑部

## JOURNAL OF YANTAI UNIVERSITY

(Natural Science and Engineering Edition)

(Quarterly, Started in 1988)

Vol.30 No.3 (Serial.110) 2017-07-15

**Authorized** by Shandong Provincial Education Department  
**Sponsored** by Yantai University  
**Edited and Published** by Editorial Office of Journal of Yantai University  
**Chief Editor** GUO Shan-li  
**Address** Laishan District, Yantai 264005, Shandong, P.R.China  
**Distributed** by Editorial Office of Journal of Yantai University  
**E-mail** xuebao@ytu.edu.cn

ISSN 1004-8820  
CN 37-1213/N

定价: 10.00元