

# 不均匀可拉伸单锚链系统的静力分析

郝春玲, 滕 斌

(大连理工大学, 大连 116024)

**摘 要:** 提出了水流作用下锚链静力分析的一种数值计算方法, 同时给出了相应的计算程序流程图。对于不可拉伸单锚链, 本方法与悬链线理论的计算结果吻合得很好。通过计算得到了锚链顶端位移与锚链顶端水平和垂直分力呈非线性关系的结论。

**关键词:** 锚链; 水流力; 钢索的弹性模量

**中图分类号:** O316

**文献标识码:** A

## 1 引言

随着海洋工程的不断开发, 移动式海洋结构物, 特别是移动式海洋石油钻井、采油平台用得越来越多, 为了满足作业的需求, 必须对其进行定位<sup>[1]</sup>。在现有的定位中, 锚链定位系统应用最为广泛, 随着港口建设的发展, 大型船舶的水流力和锚链受力的计算问题日渐重要, 对锚链系统的研究也逐渐深入, 不再局限于简单形式。

本文叙述不均匀可拉伸钢索组成的单锚链系统在水流力作用下的静力分析。如图 1 设一锚链底端固定于海底, 顶端受一水平力作用。其中钢索的长度、水深  $H$  和顶点水平力  $T_x$  已知, 水流的流速随水深变化。着重分析了顶端水平力  $T_x$  变化对锚链偏移量的影响, 建立了锚链顶端位移与锚链拉力的关系曲线。

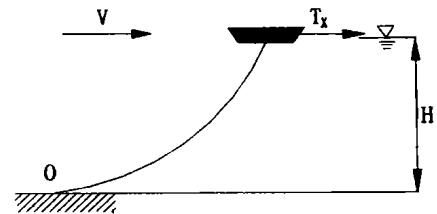


图 1 锚链示意图

## 2 基本方程

锚链底端固定于海底, 顶端受到漂浮结构物施加的水平拉力, 图 1 是锚链工作状态时的示意图, 如在锚链上任取一微段, 可得到这一微段在工作状态时的受力图(图 2), 建立静平衡方程得:

$$(T + dT)\cos d\theta - T - Pd\sin\theta + F(1 + \epsilon)ds = 0 \quad (1)$$

$$(T + dT)\sin d\theta - Pd\cos\theta - D(1 + \epsilon)ds = 0 \quad (2)$$

其中:  $T$  为锚链受到的拉力;  $P$  为单位长度锚链的重量;  $\theta$  为拉力  $T$  与水平方向的夹角;  $D$  和  $F$  分别为单位长度上锚链所受的切向和法向水流力;  $ds$  为微段的长度;  $dT$  和  $d\theta$  分别为拉力和角度的变化量;  $\epsilon$  为锚链单位长度的伸长, 定义为

$$\epsilon = \frac{\Delta S}{S} = \frac{T}{EA} \quad (3)$$

$E$ : 钢索的弹性模量;  $A$ : 钢索的横截面积。

忽略二阶无穷小量后可得<sup>[2]</sup>:

收稿日期: 2003-01-13

作者简介: 郝春玲(1973-), 女, 硕士生。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50025924)

$$\frac{dT}{ds} = P \sin \theta - F(1 + \epsilon) \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{T} [P \cos \theta + D(1 + \epsilon)] \quad (5)$$

式(1)和(2)中  $D, F$  按下列公式来计算:

$$D = \frac{1}{2} \rho C_{DN} d V^2 \sin^2 \theta \quad (6)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho \gamma C_{DN} \pi d V^2 \cos^2 \theta \quad (7)$$

其中,  $V$  为水流速度;  $C_{DN}$  和  $\gamma C_{DN}$  分别为法向和切向阻力系数;  $\rho$  为水的密度。式(4)和(5)即为所要求解的控制方程。

按几何关系可以得到:

$$dx = (1 + \epsilon) \cos \theta ds \quad (8)$$

$$dy = (1 + \epsilon) \sin \theta ds \quad (9)$$

根据式(8)、(9)就可以求出锚链上任意一点的坐标值  $(x, y)$ 。

### 3 求解方法

将锚链分成若干个单元, 如图 3 所示, 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力有水流力和重力<sup>[3]</sup>。对任意单元  $i$  进行受力分析, 如图 4 所示, 根据式(4)和(5)可得到单元  $i$  上有下面的平衡方程:

$$T_{Xi+1} = T_{Xi} - F_i \cos \theta_i (ds + \epsilon ds) - D_i \sin \theta_i (ds + \epsilon ds) \quad (11)$$

$$T_{Zi+1} = T_{Zi} - F_i \sin \theta_i (ds + \epsilon ds) + D_i \cos \theta_i (ds + \epsilon ds) + P_i ds \quad (12)$$

$$T_{i+1} = \sqrt{T_{Xi+1}^2 + T_{Zi+1}^2} \quad (13)$$

$$x_{i+1} = (ds + \epsilon ds) \cos \theta_i + x_i \quad (14)$$

$$y_{i+1} = (ds + \epsilon ds) \sin \theta_i + y_i \quad (15)$$

式中:  $T_{Xi}, T_{Xi+1}$  为第  $i, i+1$  单元的水平力;  $T_{Zi}, T_{Zi+1}$  为第  $i, i+1$  单元的竖直力;  $F_i, D_i, F_{i+1}, D_{i+1}$  分别为第  $i, i+1$  单元的切向和垂向单位长度的水流力。

以上公式可以变换成下面的形式:

$$T_{xi} = Q_x - \sum_{k=1}^i F_{(x,k)} \quad (16)$$

$$T_{zi} = Q_z - \sum_{k=1}^i (F_{(z,k)} - P_k) \quad (17)$$

$$T_i = \sqrt{(Q_x - \sum_{k=1}^i F_{(x,k)})^2 + (Q_z - \sum_{k=1}^i (F_{(z,k)} - P_k))^2} \quad (18)$$

式中,  $Q_x, Q_z$  为锚链第一个单元受力在  $x, y$  方向的分量;  $F$  为水流力。

求解过程用迭代方法, 图 5 为计算流程图, 计算过程如下:

- (1) 假设一个锚泊线顶端和水平方向的夹角  $\theta$ ;
- (2) 把不均匀锚链分别划分成若干个单元, 将每个单元上的重力和水流力都简化到单元的中心上;
- (3) 把前一段锚链的末端点作为下一段锚链的起点;
- (4) 根据式(14)、(15)、(18)求出锚链上各段的受力  $T$  和各点的坐标值  $(x, y)$ ;
- (5) 验证水深边界条件(也就是最后一点坐标  $y = H, H$  为水深), 如果满足这个边界条件, 则结束

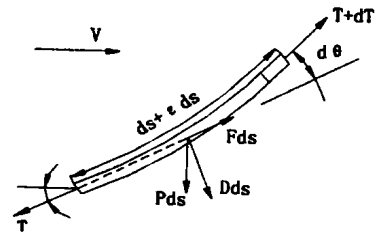


图 2 锚链上任意一微段  $ds$  的受力图

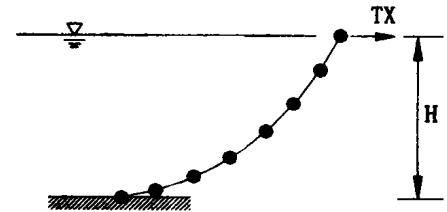


图 3 锚链划分单元图

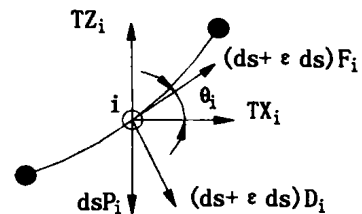


图 4 单元受力图

计算, 否则返回(1), 直到满足一定精度为止。

本方法先对锚链分段, 对每一段求解, 然后外推, 最后求解最终的结果, 所以称为分段外推法。

#### 4 计算结果及分析

##### 4.1 与解析解进行比较

为了验证本方法的可用性, 本文先对不可拉伸锚链在无水流力作用下进行数值计算, 然后将计算结果与悬链线理论的解析解进行了比较。

根据悬链线理论, 不可拉伸锚链在无水流作用下的解析解为:

$$T = \sqrt{T_0^2 + (Ps)^2} \quad (19)$$

$$x = \frac{T_0}{P} \sinh^{-1} \left( \frac{Ps}{T_0} \right) \quad (20)$$

$$y = \frac{T_0}{P} \left[ \cosh \left( \frac{Px}{T_0} \right) - 1 \right]$$

其中:  $T_0$  为初始的水平方向的分力;  $P$  为单位长度锚链的重量;  $(x, y)$  为锚链任意点的坐标值;  $s$  为锚链的长度。

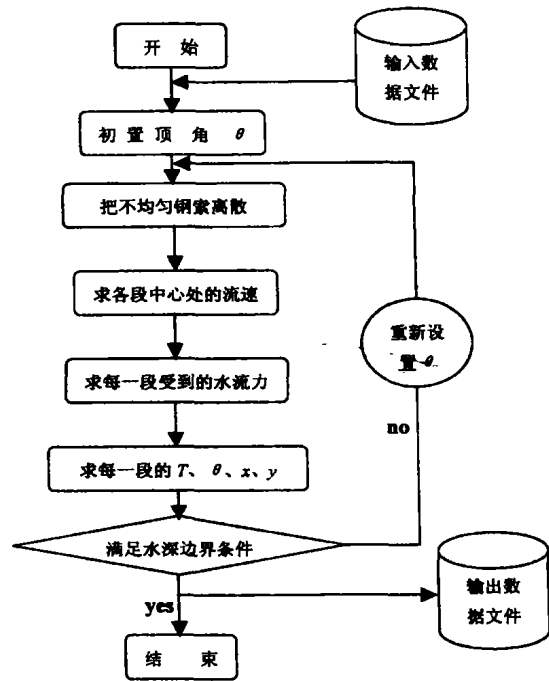


图5 计算程序流程图

根据本文方法和悬链线方程得到的锚链形状比较图如图6, 可见两种方法得到的锚链形状曲线基本重合, 说明本文提出的方法具有较高的精度。图7为本文方法得到的锚链受力与悬链线方程所得结果的比较图, 两种方法所得的受力基本吻合。由上面的计算可见分段外推法在计算锚链形状和受力时是一种可行的方法。

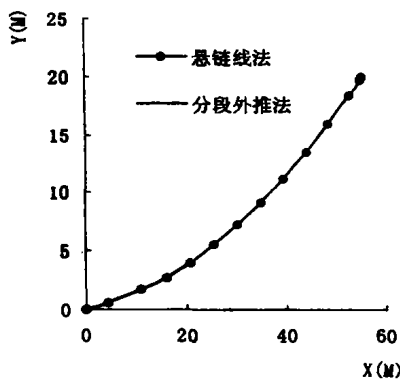


图6 两种方法形状比较图

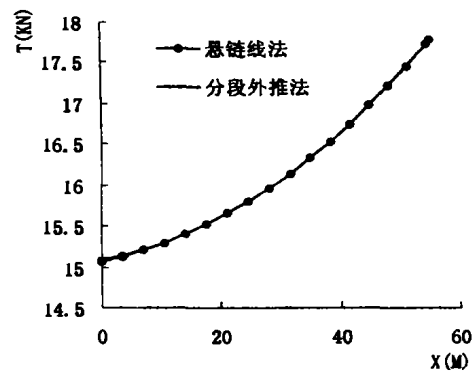


图7 两种方法受力比较图

##### 4.2 算例与分析

利用上面的数值模型分别对均匀锚链和不均匀锚链在水流作用下的形状和受力情况进行了计算。锚链各参数如表所示, 其中编号1为均匀锚链, 编号2为不均匀锚链。这两种锚链用于固定海洋漂浮结构物, 结构物给锚链施加的水平拉力  $T_x = 1.5 \text{ t}$ , 水深 20m, 水的密度为  $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 水表层流速 1.2m/s, 流速随水深呈抛物线分布 ( $v = ky^2$ ), 垂向阻力系数  $C_{DN} = 1.2$ , 切向阻力系数  $\gamma C_{DN} = 0.024$ 。

从两条锚链的形状图8和角度图10中可以看到均匀锚链比不均匀锚链形状光滑, 在锚链连接处角度有一个折点。图9是两条锚链的受力图, 从图中看到不均匀锚链的下端锚链受力比均匀锚链大, 而上端却比均匀锚链受力小得多, 并且在锚链连接处受力有明显的折点。

表 锚链的参数

编号	长度 (m)	单位长度重量 (kg/m)	直径 (mm)	弹性模量 (MPa)
1	59.2	13.535	38	$5.5109 \times 10^4$
2	下端锚链 38	13.535	38	$5.5109 \times 10^4$
	上端锚链 21.2	4.05	25	$5.5109 \times 10^4$

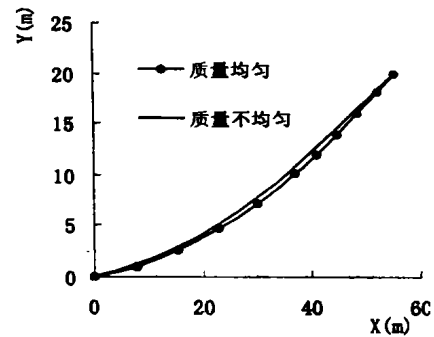


图 8 锚泊线的形状图

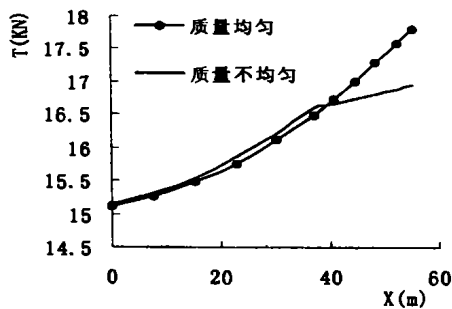


图 9 锚泊线上各点的受力图

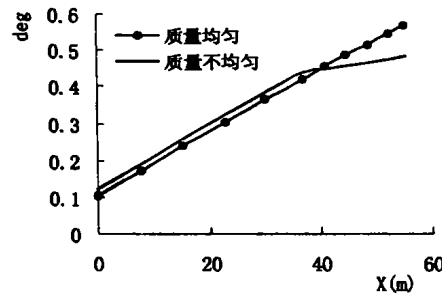


图 10 锚泊线各点处的倾角

对锚链顶点位移和受力的关系进行分析,图 11 是顶端水平力  $T_x$  由 10kN 变化到 20kN 的过程中锚链顶端位移  $XP$  的变化曲线,可以看出顶端位移的变化与顶端的水平力有关,两者成非线性关系。图 12 是相应的竖直力  $T_z$  与位移  $XP$  的关系曲线。

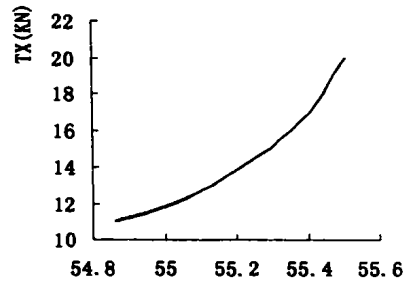


图 11 水平拉力  $T_x$  与顶端位移  $X$  关系图

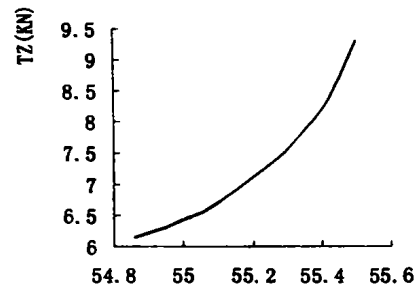


图 12 竖直拉力  $T_z$  与顶端位移  $X$  关系图

## 5 结束语

本文提出不均匀可拉伸钢索组成的单锚链系统在水流和顶端水平力作用下静力分析的一种方法(分段外推法)。用悬链线理论对其进行验证,结果吻合得很好,证明该方法是可行的。通过分析可以得到以下结论:

- (1)水深一定时锚链顶端的位移与拉力呈非线性关系。
- (2)拉力越大位移越大,非线性也越大。
- (3)顶端位移随着水平拉力的变化而变化的规律和顶端位移与竖直拉力的变化而变化的规律基本相同。

本文进行的计算是针对锚链系统的初步设计问题,所以采用的方法是静力分析方法,编写的程序是考虑锚泊线弹性伸长和水流力作用的静力分析程序。

[下转第 33 页]



及挤压应力,以防止折断或变形,同时,在其非受力面,要考虑到适当大的坡度,防止棘爪卡住。

#### 4 后语

综观该套移运系统的安装就位及调试过程可知:

- 1) 要特别重视液压系统的清洗、投油及液压油的污染度控制;
- 2) 两油缸同步阀件在组装前,应先进行流量测试,以提高其同步精度;
- 3) 底座及滑块上的导向块要布置合理,充分考虑到现场施工可能达到的精度,同时又要满足移动要求;
- 4) 由于悬壁梁移动距离较长,因此,对高压软管要合理布置,最好采用托架,并分段。

#### 参考文献

- [1] 雷天觉. 液压工程手册[M]. 机械工业出版社,1993
- [2] 李正吾、汤德忠. 机电一体化技术及应用[M]. 机械工业出版社,1988.
- [3] 机电一体化技术手册编委会. 机电一体化技术手册[M]. 机械工业出版社,1994

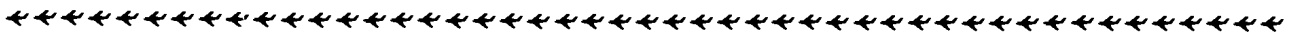
### A Study on the Cantilever & Moving System of Shengli No. 3 Workover Platform

Chang Xiao-you

(Shengli Oil Field, Dongyin, 257000, China)

**Abstract:** In respect of cantilever, hydraulic system and pawl mechanism, the research and design of cantilever and moving system of Shengli No. 3 work-over platform are introduced,

**Key words:** Offshore platform, cantilever, hydraulic system, pawl mechanism.



[上接第 21 页]

#### 参考文献

- [1] 徐兴平, 方华灿. 锚链弹性系数研究[J]. 海洋学报, 1994, (7).
- [2] 潘斌, 高捷, 陈小红, 陈家鼎. 浮标系泊系统静力计算[J]. 重庆交通学院学报, 1997, (3).
- [3] 于定勇. 水下锚泊系统计算[J]. 青岛海洋大学学报, 1995, (12).

### Static Analysis for a Non-uniform Flexible Mooring Cable System

Hao Chun-ling, Teng Bin

(Dalian University of Technology, Dalian, 116024, China)

**Abstract:** A numerical method for static analysis of a mooring cable with some sections of different masses and elasticity under the action of current is developed. The corresponding calculation approach and program flowchart are described. This approach gives good agreement with the calculation result by Catenary theory for uniform mooring cable without elasticity. Numerical examination is carried out on the displacement of the mooring cable and the horizontal and vertical forces at the top end of the mooring cable. The non-linear relationship between them has been found.

**Key words:** mooring cable, current force, Young's module of steel cable