



缅甸周边深水海域 航标锚泊系统的计算与设计

邢佩旭¹, 程万里¹, 张继明²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001)

摘要: 为了计算在深水环境下航标的活动范围, 建立了航标锚泊系统的理论模型, 并根据悬链线方程, 推导了锚系在不同状态下航标活动范围的计算公式。针对深水环境下航标活动范围过大的问题, 提出了航标双点系泊的方式, 大大减小了航标的活动范围。结合一个实例, 计算了航标在不同水深下的各个参数, 计算结果满足工程的精度要求, 表明该方法具有一定的工程参考价值。

关键词: 航标; 锚系; 悬链线; 双点系泊

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0090-04

Calculation and design of navigation marks' mooring system in deepwater surrounding Myanmar

XING Pei-xu¹, CHENG Wan-li¹, ZHANG Ji-ming²

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China)

Abstract: To calculate the range of motion of navigation marks in the deep water, a theoretical model of navigation marks' mooring system is established and the formulas of navigation marks' range of motion in different mooring states are derived according to the catenary equation. For the excessive range of motion of navigation mark in the deepwater environments, the two-point mooring mode of navigation marks is proposed, which reduces greatly the navigation marks' range of motion. This paper calculates various parameters of navigation marks in different water depths combining an example. The results meet the accuracy requirements of the project, and it indicates that the method has certain reference value in the engineering.

Key words: navigation mark; mooring system; catenary; two-point mooring

近年来, 随着海洋事业的不断发展, 海洋结构物越来越多, 海上航道的安全日益重要。为了保证航道的安全, 航标的应用必不可少。航标是一种系泊浮体, 依靠锚链或缆索系留在航道两侧。计算航标的活动范围对于航道安全至关重要。

目前, 国内航标大多布放在内河或者近海航道上, 水深较浅, 锚系也比较短, 在进行锚系设计时, 主要根据悬链线理论^[1-3]估算在某一水深下

所需的锚链长度。本文以中缅原油码头航道工程项目所使用的航标为例, 推导了在深水环境下航标锚系的计算公式, 提出了航标双点系泊的方法, 解决了狭窄航道中航标运动范围过大的问题。

1 航标锚系的受力分析

在风、浪、流的共同作用下, 航标及其锚系构成一个复杂的物理系统。该系统受到的环境载

收稿日期: 2013-10-26

作者简介: 邢佩旭(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事海外工程的研究、开发及管理工作。

荷包括重力、浮力、风载荷、流载荷、波浪载荷以及海底对锚的约束载荷。流载荷分为作用在航标水下部分的力和作用在锚链上的力两部分, 其中, 作用在锚链上的力通常分解为沿锚链方向的切向力和垂直于锚链的法向力。波浪载荷分为一阶波浪力和二阶波浪力, 其中, 一阶波浪力是一个周期性的力, 使航标产生波频运动, 在计算航标锚系的静态特性时可以忽略; 二阶波浪力, 即漂移力会使航标产生一个慢变的漂移运动, 可视为一个恒定载荷, 其影响不可忽略。根据《海上移动平台入级规范 (2012)》中的经验公式^[4], 便可计算航标所受的风载荷、流载荷以及波浪载荷。

在航标及锚系组成的系统中, 航标与锚系之间存在一个相互作用的拉力。为了计算锚系的静态特性, 需要将锚链单独分析。为此, 将作用在航标上的风、浪、流载荷转化为航标对锚链的水平拉力, 航标因系泊作用而提供的额外浮力转化为航标对锚链的垂直拉力。航标锚系的受力分析如图 1 所示。

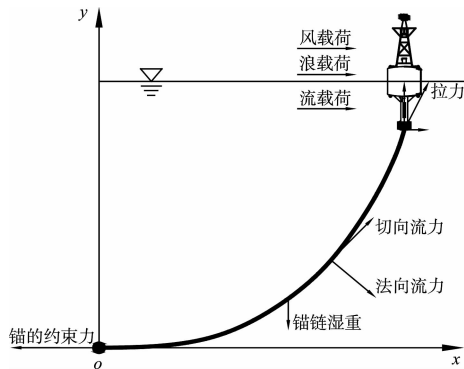


图 1 航标锚系受力分析

2 悬链线模型

对于各点处单位长度、质量相同的一段锚系, 如果忽略弹性变形以及作用在锚系上的流体动力, 整个锚系可以简化成悬链线形式^[5]。对本项目中的航标锚系而言, 锚链在拉力作用下会产生弹性变形, 但该变形与系链点的位移相比, 可以忽略不计。由于本项目所处海域的海流随着海水深度的增加而迅速减弱, 海流作用在锚链的力也可以忽略不计。因此, 本项目中的航标锚系可以简化为悬链线模型。

根据锚链在海底是否有卧链段, 可以将锚链

分为松弛状态和张紧状态, 运用悬链线理论分别推导锚链静态特性的计算公式。

2.1 松弛状态的锚链

对于海底有卧链的锚系, 锚链在水中是一段完整的悬链线。设锚链的总长为 l , 水深为 h , 单位长度锚链在水中的质量为 w , 航标对锚系的水平拉力即为航标在水平方向的外载荷 Q (图 2)。

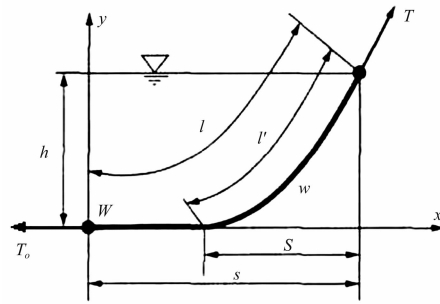


图 2 完整悬链线分析

根据悬链线方程^[6], 锚链悬在水中的悬链线长度 l' 可以表示为:

$$l' = \sqrt{h^2 + 2ah} \quad (1)$$

式中: $a = Q/(wg)$, g 为重力加速度。

悬链线 l' 对应的水平距离 S 可以表示为:

$$S = a \ln \frac{l' + \sqrt{l'^2 + a^2}}{a} \quad (2)$$

锚链在航标系链点处的拉力 T 可以表示为:

$$T = Q + hwg \quad (3)$$

航标距锚定点的水平距离 s 即为卧链的长度与悬链线对应的水平距离之和, 计算公式为:

$$s = l - l' + S = l - \sqrt{h^2 + 2ah} + a \ln \frac{\sqrt{h^2 + 2ah} + h + a}{a} \quad (4)$$

2.2 张紧状态的锚链

对于张紧状态的锚链, 海底没有卧链, 且锚链与海底之间存在一定夹角。此时, 锚链在水中是一段不完整的悬链线。为了计算该状态下锚链的静态特性, 将悬链线延长至完整长度, 并建立一个虚拟坐标系。通过求解虚拟悬链线长度, 计算得到真实锚链的各项参数。设锚链的虚拟总长为 L , 虚拟水深为 H , 单位长度锚链在水中的质量为 w , 航标对锚系的水平拉力为 Q (图 3)。

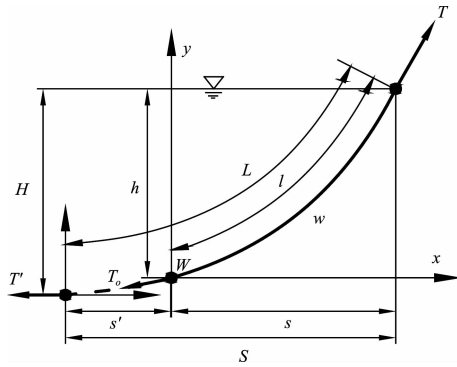


图3 不完整悬链线分析

根据悬链线方程可知：

$$L = \sqrt{H^2 + 2aH} \quad (5)$$

设虚拟悬链线的长度为 l' ，则 l' 可以表示为：

$$l' = \sqrt{(H-h)^2 + 2a(H-h)} \quad (6)$$

由于锚链的实际长度 $l = L - l'$ ，那么 l 可以表示为：

$$l = \sqrt{H^2 + 2aH} - \sqrt{(H-h)^2 + 2a(H-h)} \quad (7)$$

在已知锚链长度 l 和水深 h 的前提下， H 的值可以计算。然后，再将 H 代入式 (5) 即可得 L 的值。

锚链在航标系链点处的拉力 T 可以表示为：

$$T = Q + Hwg \quad (8)$$

航标距锚定点的水平距离 s 即为悬链线总长对应的水平距离 S 与悬链线虚拟段对应的水平距离 s' 之差，计算公式可以表示为：

$$s = S - s' = a \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + a^2}}{a} - a \ln \frac{L - l + \sqrt{(L-l)^2 + a^2}}{a} \quad (9)$$

3 双点系泊

在推导了锚链静态特性的计算公式之后，单点系泊航标的活动范围便可获得。在风、浪、流方向不固定的条件下，航标在以锚定点在水面投影为圆心的圆形范围内移动，圆的半径即为航标距锚定点的水平距离 s ，见图4。

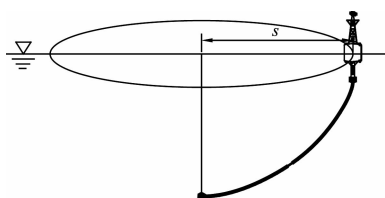


图4 单点系泊航标活动范围

在深水环境下，为了保证航标具有足够的剩余浮力以及锚链张力不超过其安全限值，锚链必须具有足够的长度，相应的航标的活动范围就很大，不能满足航道安全的要求。针对这种情况，根据海洋工程的设计经验，对航标采用双点系泊的设计，使航标的活动范围约束在两个圆形范围的重合区域，大大减小了航标的活动范围（图5）。

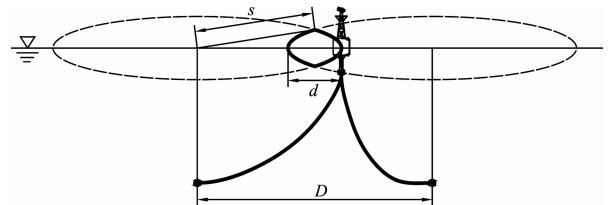


图5 双点系泊航标活动范围

设双点系泊航标的两条锚链长度相等，两锚链的海底锚定点的距离为 D ，忽略两点间的深度差。在已知锚链长度 l 和海水深度 h 的条件下，根据上节计算公式，可得航标在单点系泊下的移动半径 s ，则航标在双点系泊下沿两锚定点连线方向的移动距离 d 为：

$$d = 2(s - D/2) \quad (10)$$

4 算例

以中缅原油码头工程中所使用的航标为例进行实际计算。航标的布放水深范围是 15 ~ 80 m，要求航标布放基点距离航道 50 m，在垂直于航道方向上的偏移距离不大于 25 m。根据以上条件，计算在各水深下的航标锚链长度以及锚链在系链点处的拉力。

4.1 海域特点

中缅原油管道工程（缅甸段）原油码头工程港址位于缅甸西海岸中部的皎漂，该水域四周有岛屿环绕，掩护条件很好。原油码头位于马德岛，通过潮沟与外海相通，潮沟大部分水域不需要浚深即能满足 30 万吨级油船航行。

本航道工程东起马德岛的 30 万吨级原油码头的港池，西至皎漂主岛北侧的天然深水区，为充分利用天然潮沟呈“Z”型布置，包括马德岛航道、月牙岛航道和外航道，总长近 40 km。分为 3 段，

第1段为外航道,长26.4 km,有效宽度320 m;第2段为月牙岛航道,长6.5 km,有效宽度360 m;第3段为马德岛航道,长5.3 km,有效宽度360 m。

4.2 海况参数

根据近1 a的水文资料统计结果,缅甸港口附近水域的海流速度小于2 m/s,风速小于55 m/s,波浪波高小于5.5 m,周期小于10 s。取上述参数为计算航标及其锚系静态特性的极限海况。

4.3 结果及分析

根据水深的不同,航标的尺寸及锚链的粗细有所不同,航标所受到的水平方向外载荷也不同(表1)。

表1 航标及锚链参数

航标直径/m	锚链直径/mm	适用水深/m	单位长度锚链质量/(kg·m ⁻¹)	水平方向外载荷/kN
2.4	34	15~30	26.4	14
3.0	38	30~45	33.0	16
3.5	42	45~80	40.0	19

按照上节推导的公式,计算不同水深处航标锚链的长度以及锚链在系链点处的拉力。本文以 $\phi 2.4$ m航标为例,单点系泊情况下,计算了在全水深范围内的锚链长度和拉力,计算结果以虚线表示(图6,7)。对 $\phi 2.4$ m, $\phi 3.0$ m航标和 $\phi 3.5$ m航标,在双点系泊情况下,计算了在相应水深范围内的锚链长度和拉力,计算结果以实线表示(图6,7)。

由以上计算结果可知,在水深不大于30 m的海域中,航标采用单点系泊方式,通过适当减小锚链长度,锚链在系链点处的拉力变化不大,在安全范围以内,因此,能够满足航标对偏移距离的要求;在水深大于30 m的海域中,锚链在系链点处的拉力随着海水深度的增加而迅速增大,为了确保锚链具有足够的强度,航标不能再采用单点系泊,只能采用双点系泊的方式,以满足航标对偏移距离的要求。由图7可以看出,在水深大于30 m的海域中,双点系泊下的锚链在系链点处的拉力比单点系泊下的张力大大减小,基本与在水深小于30 m的海域锚链拉力的计算结果保持在同一量级。

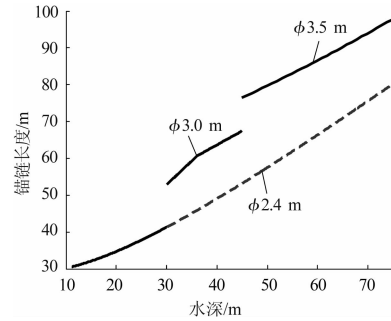


图6 锚链长度计算

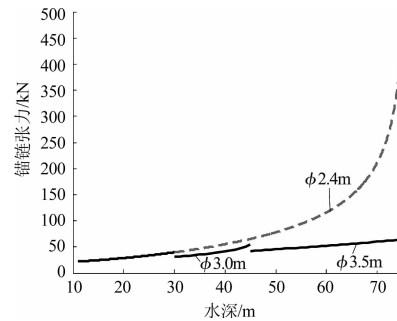


图7 锚链张力计算结果

5 结语

针对深水条件下航标的活动范围过大的问题,本文提出了双点系泊的方式,并推导了航标移动距离的计算公式。对中缅原油码头航道工程项目中的航标进行实例计算,结果分析可知:双点系泊方式大大减小了锚链内的张力,同时有效控制了航标的活动范围。计算结果满足实际工程精度要求,为航标的锚系设计提供了理论支持,确保了航道的安全畅通。在后续工作中,可以进一步细化分析模型,提高该方法的计算精度。

参考文献:

- [1] 陈徐均,施杰,于群力,等.水流作用下锚泊浮体平衡位置及姿态的求解方法[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2007(4):60-65.
- [2] 潘甜,刘家新.索链组合锚泊线静力分析[J].船海工程,2011,40(2):52-55.
- [3] 张火明,范菊,杨建民.深水系泊系统静力特性快速计算方法研究[J].2007(2):70-74.
- [4] 中国船级社.海上移动平台入级规范[S].2012:24-27.
- [5] 刘书胜,王勇.悬链线方程在FPSO锚系相关计算中的应用[J].中国造船,2011,52(1):115-122.
- [6] 王肇庚,龚昌奇.运输船舶设备与系统[M].北京:人民交通出版社,2001:76-77.

(本文编辑 武亚庆)