

浮标锚系稳定性计算与分析

秦艳丹，钟军

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 锚泊系统合理性、稳定性是保障浮标可靠性的关键因素。通过建立悬链线方程, 推导出浮标锚链长度的计算方法, 给出处于自悬链状态的临界值, 通过锚系状态的判断以及锚驻力的计算分析锚泊稳定性。以长江口深水航道某水域航标设置情况为例, 按此法对锚泊稳定性进行分析, 并提出改变系泊方式、合理配置系链长度、增加锚驻力等措施增加浮标锚泊稳定性, 为航标设计提供参考。

关键词: 浮标; 锚链长度; 悬链线方程; 锚系稳定性

中图分类号: U 644

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0123-04

Stability calculation and analysis of buoy anchor system

QIN Yan-dan, ZHONG Jun

(CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The rationality and stability of mooring system are the key factors to ensure the reliability of buoy. We establish the catenary equation to deduce the calculation method of buoy chain length, give the critical value in the state of nature catenary, and analyze the anchoring stability by judging the state of the anchor system and calculating the anchoring force. Taking the setting of buoy in the Yangtze Estuary deepwater channel as an example, we analyze the stability of the mooring by this method, and propose the measures of increasing the mooring stability of buoy such as changing the mooring mode, reasonably configuring the chain length, and increasing the anchor force. The results can provide the references for the design of buoy.

Keywords: buoy; length of anchor chain; catenary equation; stability of mooring system

浮标由锚泊系统(主要为锚链和锚碇)固定后, 抛设于需要的标位上。由于浮标的工作环境恶劣, 在实际工作过程中, 锚泊系统经常会出现断裂、损坏、离位的情况, 造成漂失、移位等现象。据上海辖区航标失常报告统计: 2017 年航标失常 152 次, 2018 年航标失常次数为 185 次, 其中浮标分别漂失 19、16 起, 占各年失常总数的 12.5%、8.6%, 分别移位 20、36 起, 占各年失常总数的 13.2%、19.5%^[1]。受大潮汛、台风气候的影响, 1、8、10 月是失常事件的高发期。浮标的

漂失、移位对过往船舶通行带来了极大的安全隐患。锚泊系统的合理性、可靠性成为浮标性能指标的决定性因素。以往国内锚泊设计多以经验为主, 其锚链长度与水深基本成正比: 有掩护的海港取 2.0~2.5 倍水深, 开敞海域取 3~4 倍水深^[2]。国际航标协会(IALA)有关资料显示, 水深小于等于 50 m 时, 锚链布设长度不得小于水深的 2 倍; 水深超过 50 m 时, 不得小于水深的 1.5 倍^[3]。

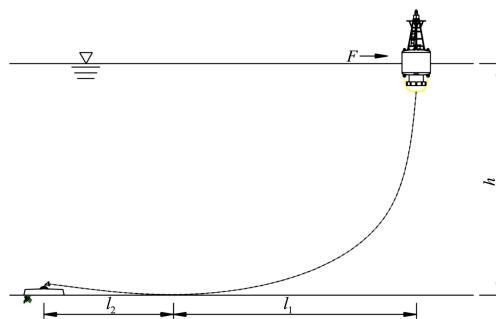
随着港口智能化的发展、智能船舶的涌现, 浮标锚系设计受到重视, 相关的研究工作也陆续

开展。张志江等^[4]分析不同环境因素对布设航标锚链长度的影响程度, 得出风速最为敏感、水深次之、流速影响较小的结论; 程鑫^[5]结合航标实时状态监测, 提出在洪水、中水、枯水季分别设置不同锚链长度, 进而控制航标漂移量。刘志强等^[6]运用数字技术对深海工程船锚泊系统进行模拟仿真, 得到船舶位移和锚链长度、环境荷载之间的数学响应模型。陈麒龙^[7]利用乘积季节模型预测长江口深水航道灯浮标的偏移距离, 方便对航标管理者进行移位预警。

在实际工程设计中, 锚链的长度通常取水深的3倍。然而随锚链富余长度的增加, 浮标可漂移距离越大。以长江口深水航道为代表的航道, 自身通航压力较严峻, 要求浮标布设时兼顾锚固稳定性和可漂移量(回旋半径)。本文借助悬链线方程, 推导出浮标锚系稳定性的判别方法, 结合长江口深水航道航标设置情况, 按此法对浮标放链长度以及锚泊稳定性进行分析, 为生产实践的需要提供参考。

1 锚链长度分析

浮标在外力F的作用下将产生漂移, 但由于锚索的系留作用, 必处于某一静平衡状态, 在此状态下, 作用于浮标上的力及力矩均达到平衡。其静力计算方法可归为悬链线方程, 见图1。



注: F 为外力; h 为水深; l₁、l₂ 分别为卧链长度、悬链水平投影长度。

图1 浮标工作状态

1.1 悬链线方程的推导

锚泊线在空间的轮廓形状可以用直角坐标系xoz表示(x及z轴在锚泊线所在平面内), 即锚索

上任一点可用坐标(x, z)表示, 见图2。

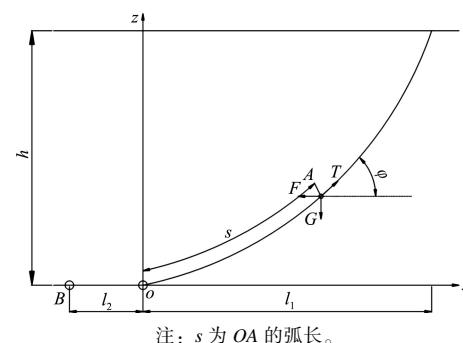


图2 悬链线

A点由锚链在水中的重力G、水平力F、轴力T组成静力平衡, φ 为T与x轴的夹角, 有以下关系:

$$\tan\varphi = \frac{dz}{dx} = \frac{G}{F} \quad (1)$$

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{1}{F} \cdot \frac{dG}{ds} \cdot \frac{ds}{dx} \quad (2)$$

锚链在水中单位长度重力为 ω , 由 $\omega = \frac{dG}{ds}$ 和 $ds = \sqrt{dx^2 + dz^2}$ 得:

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{\omega}{F} \sqrt{1+z'^2} \quad (3)$$

令 $q = \frac{\omega}{F}$, 取o点的 $x=0$ 、 $z=0$ 、 $\frac{dz}{dx}=0$ 代入式(3)中得悬链线方程:

$$z = q \operatorname{ch} \frac{x}{q} - q \quad (4)$$

当水深为h处时, 有:

$$l_1 = q \operatorname{arcch} \left(\frac{h}{q} + 1 \right) \quad (5)$$

由 $s = \int_0^x \sqrt{1+z'^2} dx$, 可推导出:

$$s = q \operatorname{sh} \frac{x}{q} \quad (6)$$

由式(4)(6)可得出:

$$s^2 = z^2 + 2qz \quad (7)$$

1.2 自悬链与约束链的判别

已知h、F时, 根据式(5)(6)可推导出自悬链的最小长度:

$$s_{\min} = \max \left\{ q \operatorname{sh} \left[\operatorname{arcch} \left(\frac{h}{q} + 1 \right) \right], \sqrt{h^2 + 2qh} \right\} \quad (8)$$

当放链长度 $s_0 \geq s_{\min}$ 时为自悬链, 相应的卧链长度 $l_2 = s_0 - s_{\min}$; 当 $s_0 < s_{\min}$ 时为约束链。

1.3 约束链的计算

锚链处于约束链状态时, A 点的系泊力与锚驻力处于不平衡状态。为便于计算, 将约束链向下方延长至 o 点, 以 o 点为原点建立坐标系, 此时 A 点坐标为 (x_A, z_A) , B 点坐标为 (x_B, z_B) , 见图 3, 可按自悬链方程式(7)得出新的方程^[8]:

$$z_A^2 = s_1^2 + q^2 \quad (9)$$

$$z_B^2 = s^2 + q^2 \quad (10)$$

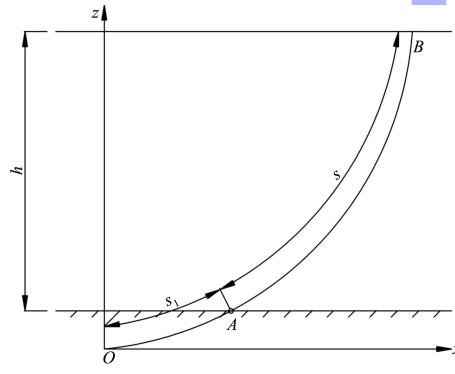
$$z_B = z_A + h \quad (11)$$

结合以上方程组可得出:

$$z_A = s \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{q^2}{s^2 - h^2}} - \frac{h}{2} \quad (12)$$

当水深为 z_A 时, $x_A = q \operatorname{arcch} \frac{z_A}{q}$, 得出 A 点坐标后, 即可按悬链方程进行计算:

$$z = q \operatorname{ch} \frac{(x+x_A)}{q} - q - z_A \quad (13)$$



注: s_1 为下延后 OA 的弧长。

图 3 约束链

2 浮标受力分析

2.1 风浪流的计算

海面上的浮标主要受风荷载、水流荷载、波浪力等外力作用。为保证浮标正常使用, 考虑工况最大受力情况, 风、浪、流均同方向作用于浮标。水平方向浮标受到的总荷载为 F , 风对浮标的作用力 F_w , 水流对浮标的作用力 F_c , 波浪对浮标的作用力 F_v , 则有:

$$F = F_w + F_c + F_v \quad (14)$$

风对浮标的作用力公式为:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_w g C_w v_w^2 A_w \quad (15)$$

式中: F_w 为风的压力(kN); ρ_w 为空气密度(kg/m^3), 取 $1.23 \text{ kg}/\text{m}^3$; C_w 为风压系数, 取 1.0 ; v_w 为最大风速(m/s); A_w 为受风面积(m^2)。

水流对浮标的作用力公式为:

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_c g C_c v_c^2 B_c \quad (16)$$

式中: F_c 为水流压力(kN); ρ_c 为海水密度(kg/m^3), 取 $1025 \text{ kg}/\text{m}^3$; C_c 为流压系数, 取 1.0 ; v_c 为水流速度(m/s); B_c 为浮体吃水线下与水流垂直面上的投影面积(m^2)。

浮标在漂浮状态时的波浪力计算较为复杂, 本文波浪对浮标的作用力参考《海港工程设计手册》的计算方法:

$$F_v = \frac{\sinh\left(2\pi \frac{h}{L}\right) - \sinh\left(2\pi \frac{h-d}{L}\right)}{4 \cosh\left(2\pi \frac{h}{L}\right)} \pi D_w^2 \rho_c g H \quad (17)$$

式中: F_v 为波浪力(kN); h 为水深(m); d 为吃水(m); D_w 为浮体波浪方向垂直面的投影宽度(m); L 为水深 h 时的入射波长(m); H 为入射波高(m)。

2.2 锚驻力的计算

自悬链状态下, 一般锚碇及相应的卧底链产生锚驻力 P 可由下式简单计算^[9]:

$$P = K_a W + K_c \omega l_2 \quad (18)$$

式中: K_a 为系碇摩擦力系数, 一般取 $0.35 \sim 0.45$; W 为锚碇在水中的重力(kN); K_c 为系链摩擦力系数, 取 $0.35 \sim 0.45$; ω 为锚链在水中的单位长度重力(kN/m)。

约束链状态下还应考虑锚链拉力等对锚碇力的折减。

3 锚系稳定性判别

浮标锚系有 3 种类型: 松弛型、过渡型和张紧型。松弛型锚系是锚链处于自悬链状态, 有卧链, 浮标回旋半径较大; 过渡型锚系是锚链处于

自悬链与约束链临界状态，悬链线下端正好与沉块水平相切，无卧链，浮标回旋半径比较小；张紧型锚系是锚链处于约束链状态，悬链线下端向上拉紧，与沉块在水平方向有一定角度，回旋半径比过渡型锚系更小。

影响锚系稳定性的主要判别条件为：1)当锚链处于约束链状态后，水中锚碇受到锚链侧向拉力作用，会产生 2 种运动趋势，其一是克服最大静摩擦力的水平移动，其二是沉块的侧向翻转，造成跑标或者锚链缠绕现象，此种状况会出现锚驻力降低或者锚系不稳定的情况。2)当锚驻力 $P \geq F$ 时，锚泊系统是平衡稳定的；当锚驻力 $P < F$ 时，锚泊系统不稳定，易发生跑标现象。故锚驻力是锚泊系统稳定性的主要影响因素。

4 工程应用

4.1 工程概况

长江口深水航道治理工程于 1997 年批准实施，航道工程分三期逐步增深到 8.5、10.0 和 12.5 m。案例对某段水域两侧布设浮标进行分析，见图 4。

表 1 极限工况的锚泊系统稳定性分析结果

s_0/m	s_{\min}/m	$s_0 - s_{\min}$	l_1/m	l_2/m	P/kN	F/kN	$P-F/kN$
22.83	30.12	<0, 约束链	-	0	601.93	629.06	<0, 不稳定
30.44	30.12	>0, 自悬链	25.76	0.32	1 095.07	629.06	466.01
38.05	30.12	>0, 自悬链	25.76	7.93	1 168.13	629.06	539.07
45.66	30.12	>0, 自悬链	25.76	15.54	1 241.18	629.06	612.12

4.3 计算结论

1) 在长江口极限工况条件下，当浮标锚链长度取 2.0、2.5、3.0 倍水深时，锚驻力富余量较大，此时锚链处于自悬链状态，锚系稳定性较好；当浮标锚链长度取 1.5 倍水深时，锚链处于约束链状态，锚驻力显著下降，浮标存在跑标的可能。

2) 在长江口极限工况条件下，当浮标锚链长度取 2.5、3.0 倍水深时，卧链具有一定长度，锚系稳定性较好；当浮标锚链长度取 2.0 倍水深时，卧链部分较短，锚链底部易磨损。

3) 在相同工况条件下，处于自悬链状态下的浮标具有更好锚驻力，对于海况恶劣、经常走锚的海域，应考虑适当增加锚链长度，使浮标锚系

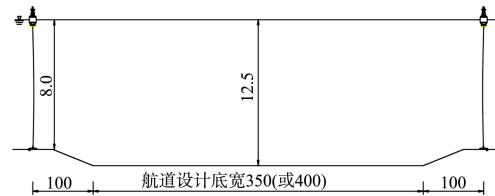


图 4 浮标抛设 (单位: m)

航道两侧设置有直径 2.4 m 钢制浮标，浮标属性为：高度 5.7 m，吃水 1.72 m，静止于海平面时迎风面积 5.6 m²、迎流面积 4.72 m²，采用单点系泊方式。浮标的极限工况条件为：25 a 一遇 NNE 向波浪，波高 3.2 m，波长 39.9 m，波浪周期 7.76 s，流速 3.1 m/s，风速 33 m/s。

浮标抛设于水深 8 m 处，结合工程海域条件，在极限工况条件下，设标点实际水深约 15.22 m。锚碇选取 5 t 混凝土沉石，在水中质量为 2.73 t。锚链直径 37 mm，水中单位长度质量为 24 kg/m。

4.2 受力计算

按实际水深的 1.5、2.0、2.5、3.0 倍即 22.83、30.44、38.05、45.66 m 的放链长度进行分析，结果见表 1。

设备始终处于自悬链状态，从而保证浮标的锚驻力。

5 结语

1) 本文验证了长江口深水航道浮标系链长度按 2.5、3.0 倍水深配置是合理的。浮标设置于黄金水道或者通航需求高的航道上时，可适当压缩系泊锚链的长度或采用多点系泊方式减少浮标可偏移距离，保证通航流量；浮标设置于对通航宽度影响小的水域时，系泊锚链可放得足够长。浮标布设时，通航需求和锚泊稳定性如何平衡，需要依据工程实际情况进行取舍。