



正常靠泊下趸船位移及锚链张力的简单估算

徐俊杰, 俞武华

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 浮码头趸船靠泊位移和锚链张力的确定十分困难, 目前尚无行之有效的办法。结合悬链线经典理论, 运用物理及力学方法, 通过分析浮码头正常靠泊情况下能量的传递途径推算趸船的运动幅度和锚链张力, 以供类似工程参考。

关键词: 靠泊能量; 趸船位移; 锚链张力

中图分类号: U 653. 2 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)04-0102-04

Estimation of pontoon's displacement and anchor chain's tension in normal berthing

XU Jun-jie, YU Wu-hua

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: At present, it is still very difficult to determine the pontoon's displacement and anchor chain's tension. This article applies the method of physics and mechanics to analyze the energy transmission in normal berthing with the theory of catenary and estimate the pontoon's displacement and anchor chain's tension.

Keywords: berthing energy; pontoon's displacement; anchor chain's tension

浮码头是我国内河广泛使用的一种简易的码头形式, 其基本结构由趸船、锚系及接岸引桥等组成。趸船的锚系通常由 4~8 根锚链组成, 分为外八锚、内八锚、领水锚和艏锚, 而近岸布置的趸船内八锚则常常采用岸边块体系缆代替, 见图 1、2。

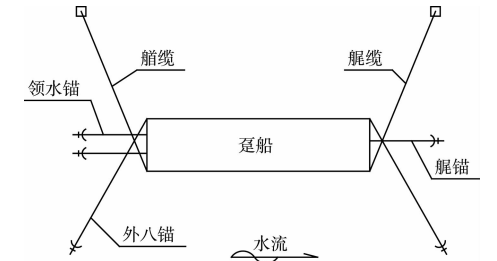


图 1 趸船锚链布置

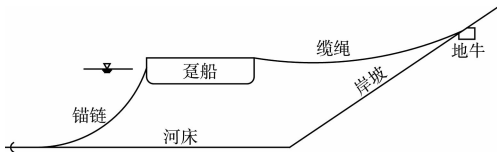


图 2 趸船系留侧视图

随着经济发展和航运市场的变化, 船舶大型化趋势日益显著。三峡蓄水后, 长江干线航道条件得到极大改善, 深水航道向上延伸, 3 000 吨级以上船舶可由宜昌上溯至重庆。而内河浮式码头设计吨位普遍小于 3 000 吨级, 大型船只靠泊浮式码头是否安全主要取决于趸船的运动幅度和锚系结构的受力。为此, 本文拟运用物理和力学方法对正常靠泊下趸船的位移及锚链张力进行计算和分析。

1 基本假定

船舶碰撞过程十分复杂, 精确分析船舶的碰撞效应需要进行复杂的数值仿真。鉴于正常靠泊情况下, 船体运动方向明确且速度较小, 为满足工程设计需要, 本文对靠泊过程进行简化, 提出如下假定:

- 1) 靠泊过程中, 靠泊船只和趸船均只作横向平移运动。
- 2) 趸船处于平静水流, 且水流方向与趸船长

收稿日期: 2014-06-26

作者简介: 徐俊杰 (1974—), 男, 高级工程师, 从事港口及航道设计工作。

度方向平行, 碰撞过程中水流力不做功。

3) 锚链长度足够, 趸船运动中锚链保持部分躺底, 锚不产生上拔力。

4) 碰撞过程中缆绳位能变化忽略不计。

2 悬链线基本方程

根据经典悬链线理论, 在图3所示坐标系中, 有下方程:

$$y = a \left\{ \operatorname{ch} \left[\frac{x}{a} + \ln(\tan \alpha + \sec \alpha) \right] - \sec \alpha \right\} \quad (1)$$

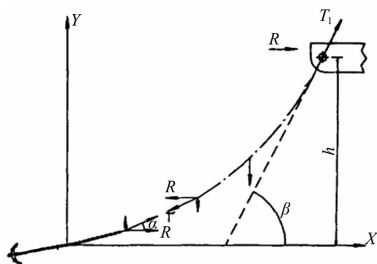


图3 锚链悬链线

当锚链保持躺底时, $\alpha = 0$, 上式简化为:

$$y = a \left(\operatorname{ch} \frac{x}{a} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: $a = R/w$, w 为锚链单位重力。

通常水深 h 已知, 求其反函数即可确定锚链躺底的最小抛锚距离:

$$x = a \ln \left[1 + \frac{h}{a} + \sqrt{\left(1 + \frac{h}{a} \right)^2 - 1} \right] \quad (3)$$

悬链长度:

$$l = a \operatorname{sh} \frac{x}{a} \quad (4)$$

锚链重心高度:

$$\bar{y} = \frac{2x + a \operatorname{sh} \frac{2x}{a}}{4 \operatorname{sh} \frac{x}{a}} - a \quad (5)$$

挂链点张力:

$$T = R \operatorname{ch} \frac{x}{a} \quad (6)$$

3 附随水体的附加质量

船舶运动中会挟带部分水体一起运动, 即附随水体, 它的大小取决于相撞船舶的型线特征、

碰撞历程等, 精确计算相当复杂和困难, 附随水体的作用通常以附加质量密度的形式附加到撞击船体上。目前, 附加质量通常采用经验法确定, 不仅方便、简单, 精度也能满足一般计算要求。

对于横飘运动的船体附加质量, V. U. Minorsky 曾假定:

$$m_{yy} = 0.4m \quad (7)$$

式中: m 为船体质量。

Motoa 等就横飘运动的附加质量进行一系列模型试验和水动力分析, 发现附加质量在碰撞过程中是不断变化的, 其变化范围为: $m_{yy} = (0.4 \sim 1.3)m$ 。

碰撞时间持续越长, 附加质量就越大。如果碰撞时间非常短, 则与 Minorsky 的假定一致^[1]。

对于正常靠泊的船只来说, 由于其质量远大于趸船, 碰撞后速度降低有限, 且趸船一般离岸布置, 水体雍高效应较弱。因此, 可近似认为靠泊船只的附随水体在碰撞后仍保持原速向岸运动, 其能量衰减忽略不计, 因而在碰撞能量体系中其影响可不予考虑。

对于趸船, 由于为松散固定漂浮物, 吃水小, 碰撞即可产生运动, 持续时间较短。因此, 可取趸船附随水体的附加质量系数为 0.4。

4 碰撞能量

船舶靠泊趸船时, 靠泊船只以法向靠岸速度碰撞趸船, 其具有的能量由靠把压缩变形, 趸船及其附随水体运动, 船壳弹性变形, 船舶与水体挤升以及振动、摩擦、发热等所耗散。以上能量消耗中, 靠把吸收的能量可以在碰撞后释放, 自身消耗很小; 船壳弹性变形所吸收的能量也由于靠泊速度小、产生的挤压效应弱而十分有限。因而, 靠泊船只的撞击能量主要由于其自身及趸船(含附随水体)运动和水体震荡所吸收, 前者与全部撞击能量之比称为有效撞击能量系数。理论确定有效撞击能量系数十分困难, 行之有效的方法是通过实船试验测量碰撞前后船舶速度变化推算, 目前尚无有效资料查证。

5 初次碰撞

两船初次碰撞，趸船由静止而运动，水体也开始运动，但无震荡，靠泊船只碰撞能量基本由趸船及其附随水体运动吸收，损失的能量很小。因而，可推测初次碰撞有效撞击能量系数应在 95% 左右。

船舶初次碰撞过程可简化为以下物理模型，见图 4。

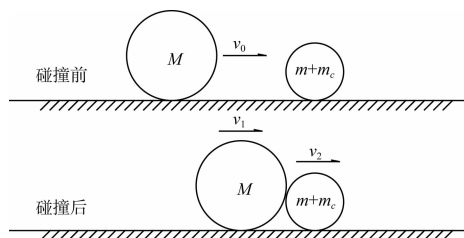


图 4 碰撞模型

假定靠泊船只质量为 M ，趸船质量为 m ，趸船附加质量为 m_c 。碰撞前，靠泊船只以法向靠泊速度 v_0 运动，碰撞后速度降低为 v_1 ，趸船及其附随水体则获得初速 v_2 ，初次碰撞有效撞击能量系数为 ρ 。根据运动物体能量及动量守恒原理，可建立以下方程：

$$\frac{\rho}{2} M v_0^2 = \frac{1}{2} M v_1^2 + \frac{1}{2} (m + m_c) v_2^2 \quad (8)$$

$$M v_0 = M v_1 + (m + m_c) v_2 \quad (9)$$

令 $a = \frac{m + m_c}{M}$ ，联立上述方程求解，可得：

$$v_1 = \frac{1 - \sqrt{a^2 - (a^2 + a)(1 - \rho)}}{a + 1} v_0 \quad (10)$$

$$v_2 = \frac{a + \sqrt{a^2 - (a^2 + a)(1 - \rho)}}{a^2 + a} v_0 \quad (11)$$

$$\left(a > \frac{1 - \rho}{\rho} \right)$$

碰撞后，趸船及其附随水体均具有向岸运动的初始速度 v_2 ，趸船的启动动能为 $E_m = \frac{1}{2} m v_2^2$ 。随着趸船的运动，外侧锚链逐渐被拉起，趸船能量也随之转化为锚链的位能和锚链拉力做功所消耗。当趸船速度减小到 0 时，趸船达到初次碰撞

的最大位移，此时两船间距也达到最大。在该状态下，可得如下能量方程：

$$E_m = \Delta E_a + W \quad (12)$$

式中： ΔE_a 为锚链位能变化； W 为锚链拉力做的功。

如图 5，设碰撞前锚链着地点距离为 x_0 ，链长为 l_0 ，锚链与趸船夹角为 θ ，重心高度为 y_0 ，则锚链具有的位能为 $w l_0 y_0$ ，此为状态 0。碰撞后，设趸船最大位移为 δ ，由于锚链长度远大于趸船位移，锚链与趸船夹角 θ 运动中可认为基本不变，则锚链着地点距离为 x_1 ，链长为 l_1 ，重心高度为 y_1 ，锚链具有的位能为 $w l_1 y_1$ ，此为状态 1。则有：

$$\Delta E_a = \sum w l_1 y_1 - \sum w l_0 y_0 \quad (13)$$

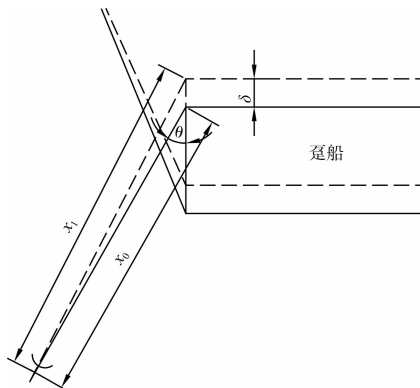


图 5 趸船位移

计算过程中，由于领水链和艃链与趸船运动方向垂直，长度变化很小，可忽略不计。因而碰撞能量转换主要由外侧锚链承担。外侧锚链拉力所做的功为：

$$W = \sum \bar{R} \delta \cos \theta \quad (14)$$

在锚链初始状态已知的情况下，将 ΔE_a 和 W 代入式(12)中联立式(3)即可求解趸船初次碰撞最大位移 δ ，亦即两船碰撞最大间距。

6 碰撞结束

趸船初次碰撞运动到达静止后，在外侧锚链拉力下离岸运动复位，与运动中的靠泊船只再次发生碰撞，并消耗部分能量，碰撞后又获得能量

向岸运动。经过多次震荡碰撞, 两船速度最后趋于一致, 同步向岸运动, 直至达到趸船最大位移处静止, 此为状态 2。此时, 系统有效能量全部转化为锚链拉力做功和锚链位能, 碰撞结束。

从两船碰撞开始至碰撞结束, 系统能量逐渐衰减, 损失的能量主要为船体变形和水体震荡所吸收, 其大小难以估算。现假定此过程综合有效撞击能量系数为 ρ' , 根据能量守恒原理有:

$$\frac{\rho'}{2}Mv_0^2=\Delta E_a+W$$

(15)

ΔE_a 与 W 意义和计算方法同上。同理, 可求得趸船运动的最大位移和锚链最大张力。

7 算例

某浮码头设计靠泊 3 000 DWT 货船 (满载排水量为 4 750 t), 趸船尺度为 75 m × 15 m × 2.4 m × 1.6 m, 根据经验公式估算, 趸船质量约 380 t。趸船艏开链径为 ϕ 48 mm, 其水下单位重力为 $w_a=0.505$ kN/m, 艉开链径为 ϕ 42 mm, 水下单位重力为 $w_b=0.386$ kN/m, 它们与趸船夹角均为 $\theta=35^\circ$, 初始绞锚力均为 $R_0=100$ kN。已知水深 $h=45$ m, 船舶法向靠泊速度 $v_0=0.2$ m/s, 初次碰撞有效撞击能量系数 $\rho=0.95$, 综合有效撞击能量系数 $\rho'=0.7$, 趸船附加质量系数取 0.4。求趸船位移和锚链张力。

运用悬链线方程(3)、(4)、(5)可求得锚链主要参数 (表 1)。

表 1 初始状态锚链参数				
模式	锚着点距离 x_0/m	链长 l_0/m	重心高度 y_0/m	位能 E_0/kJ
艏开链	131.09	140.88	15.62	1 111.4
艉开链	150.57	159.19	15.49	951.5
合计				2 062.9

1) 初次碰撞。

根据碰撞方程, 可求得初次碰撞后靠泊船只和趸船速度分别为 0.166 m/s 和 0.307 m/s, 趸船运动的起动动能为 $E_m=17.96$ kJ。

当趸船运动至最大位移处即达到状态 1, 此

时, 趸船速度为 0, 起动动能全部转化为锚链拉力做功和锚链位能。

假设趸船最大位移为 δ , 此时链长度为 $x_1=x_0+\delta\cos\theta$, 水平张力为 R_1 , 参数 $a=R_1/w$, 由(4)、(5)式可知, 锚链位能:

$$E_a=wly=\frac{1}{4}\left(2ax+a^2\text{sh}\frac{2x}{a}-4a^2\text{sh}\frac{x}{a}\right)$$

(16)

$$\Delta E_a=E_a-E_0$$

(17)

又碰撞过程中锚链拉力做功可近似为:

$$W=\frac{1}{2}(R_0+R_1)\delta\cos\theta$$

(18)

代入式(12)中, δ 、 R_1 为未知, 联立式(3)即可求解。经计算, 状态 1 下趸船最大位移 $\delta=10.3$ cm, 锚链水平张力 $R_1=100.1$ kN。

2) 碰撞结束。

当靠泊船只与趸船同步运动至最大位移处即达到状态 2, 此时两船速度均为 0, 系统有效能量全部转换为锚链拉力做功和锚链位能。同上计算方法, 可得趸船最大位移为 38.2 cm, 锚链张力为 100.4 kN。

8 结语

根据悬链线理论, 锚链保持躺底情况下, 趸船小幅度运动产生的锚链位能和张力变化均较小, 趸船能量基本由锚链张力做功所转化。另一方面也说明, 正常靠泊情况下锚链拉力不会急剧增加。

由上述计算过程可知, 趸船碰撞的最大位移与有效撞击能量系数 ρ 及质量比 α 并不敏感, 但随靠泊速度 v_0 近似呈二次变化, 因此控制趸船位移的有效办法是控制靠泊船只的靠泊速度和锚链初始张力。

参考文献:

[1] 王自力, 蒋志勇, 顾永宁. 船舶碰撞数值仿真的附加质量模型[J]. 爆炸与冲击, 2002(2): 322-323.