

系泊浮体受碰撞时系泊链的冲击力计算

陈德春, 范自明

(河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 依据能量守恒和功能互换原理, 研究系泊浮体受碰撞时的运动速度和系泊链的冲击力的计算方法. 算例表明: 系泊浮体受到碰撞而产生冲击力, 可导致断链或走锚事故, 在设计中应予考虑.
关键词 系泊浮体 系泊链 冲击力速度 弹簧系数
中图分类号 :U653.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2001)03-0080-04

河流及海洋工程中系泊浮体是常见的一种工程结构, 如浮码头中的系泊囤船, 系泊的浮式装卸平台和采油平台, 浮桥等等. 这类工程在营运过程中常发生工程事故, 主要表现为航行的船舶对系泊浮体的碰撞, 使系泊浮体的系泊链产生很大的冲击力, 引起断链、走锚或浮体碰损等事故. 如南通港内的“滨海”号单点系泊装卸码头和锚地内浮码头的系泊囤船都曾发生过断链事故, 浙江大榭跨海浮桥也曾发生过类似问题.

系泊浮体被碰撞的问题涉及许多因素, 如浮体吨位、航速、水深、链结构, 系泊浮体的系泊状态等. 关于浮体的碰撞, 曾受到有关学者和工程界的关注, 但是他们的研究工作, 主要是针对航船对桥墩或码头的碰撞^[1], 其中有的研究也涉及浮体相互碰撞^[2].

过去对系泊浮体设施研究和设计, 除了静力计算外, 对系泊浮体的动力, 仅限于研究自然环境条件下系泊浮体的动力特性, 对于具有瞬时冲击的碰撞问题没有引起重视, 但在实践中却不断出现. 本文基于能量守恒和功能互换原理, 对系泊浮体受到瞬时冲击进行了研究, 根据计算公式对实例进行了验算, 证实了计算方法可用于实际工程中.

1 计算方法

1.1 系泊浮体被碰撞后的运动速度

质量为 M_S 的浮体, 以速度 u_1 运动, 碰撞到质量为 M_P 的系泊浮体. 后者因系泊锚链的锚碇, 其速度 $u_2 = 0$. 碰撞后, 运动浮体的运动速度改变为 V_1 , 受碰后的系泊浮体的速度为 V_2 , 见图 1.
根据动量守恒定理, 即^[3]

$$M_S u_1 = M_S V_1 + M_P V_2 \tag{1}$$

根据碰撞定理, 物体碰撞前和碰撞后相对速度之比为恢复系数, 即

$$e = \frac{V_2 - V_1}{u_1} \tag{2}$$

$$V_2 = eu_1 + V_1 \qquad V_1 = V_2 - eu_1 \tag{3}$$

将式(3)代入式(1), 可得

$$V_1 = \frac{M_S - eM_P}{M_S + M_P} u_1 \qquad V_2 = \frac{(1 + e)M_S}{M_S + M_P} u_1 \tag{4}$$

令 $R = M_P/M_S$, 式(4)可成为

$$V_1 = \frac{1 - eR}{1 + R} u_1 \qquad V_2 = \frac{1 + e}{1 + R} u_1 \tag{5}$$

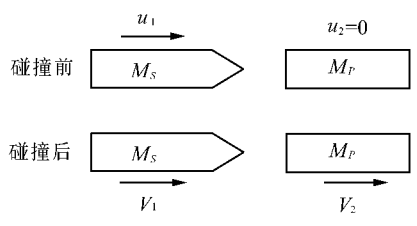


图 1 浮体碰撞前后的速度
Fig.1 The Speed of floating body before and after collision

恢复系数 e , 介于 0 和 1 之间, 对于钢质浮体, 可取 $e = 0.5$.

从式(5)可见有下列特点:

(a) 当 $M_P \gg M_S$ 时, 说明质量小的运动浮体与质量大的系泊浮体相碰撞时, 质量小的运动浮体向相反方向运动, 而质量大的系泊浮体运动甚微, 甚至保持静止不动. (b) 当 $M_S \gg M_P$, 说明质量大的运动浮体和质量小的系泊浮体相碰撞后, 质量很大的运动浮体按原方向运动, 其速度变化甚微. 而质量小的系泊浮体以大于运动浮体的原速度向前运动. (c) 当 $M_S = M_P$ 时, 运动浮体与系泊浮体相碰撞后, 两浮体的运动方向相同, 其值取决于恢复系数 e .

图 2 为浮体碰撞后, 两浮体质量与浮体运动速度变化关系曲线.

浮体碰撞引起的能量损失

$$\Delta E = \frac{1}{2} M_S u_1^2 - \left[\frac{1}{2} M_S V_1^2 + \frac{1}{2} M_P V_2^2 \right]$$

简化为

$$\Delta E = \frac{1}{2} M_S u_1^2 \left[\frac{R(1 - e^2)}{1 + R} \right]$$

这部分能量由浮体的变形所吸收.

1.2 系泊浮体的冲击力计算

系泊浮体被碰撞受到突然冲击, 以速度 V_2 运动, 在冲击力作用下, 系泊链与系泊浮体联接的上端随浮体产生位移 X , 其端部的水平张力为

$$P = P_0 + P_d$$

式中: P_0 ——系泊浮体静止时的水平力; P_d ——系泊浮体受碰后的冲击力. 冲击力所作的功为

$$W = \frac{1}{2} P_d X = \frac{1}{2} P_d^2 K$$

系泊浮体受碰后的动能

$$E_0 = \frac{1}{2} C_m M_P V_2^2$$

根据功能互换原理,

$$E_0 = W$$

$$P_d = V_2 \sqrt{C_m M_P / K} = V_2 \sqrt{C_m M_P C} \tag{6}$$

对于多链系泊浮体, 每锚所分配的能量

$$E = \beta \frac{E_0}{n}$$

式(6)改写为

$$P_d = V_2 \sqrt{\frac{\beta}{n} C_m M_P C}$$

以上各式中: C_m ——系泊浮体的质量系数, $C_m = 1 + 0.6(T/d)^2$, T ——系泊浮体的吃水深度, m; d ——水深, m; K ——系泊链上端的刚度系数, m/kN; C ——系泊链上端的弹簧系数, kN/m, $C = 1/K$; n ——受力方向系泊链的数目; β ——动能分配不均匀系数, $\beta = 1.5 \sim 2.0$.

式(6)中的链端弹簧系数, 可依据悬链线理论求得

$$C = \frac{q \operatorname{sh} B}{B \operatorname{sh} B - 2(\operatorname{ch} B - 1)}$$
$$B = \frac{q L_0}{P_0} \quad L_0 = \frac{P_0}{q} \operatorname{sh}^{-1} \frac{q s_0}{P_0}$$

有关符号见图 3, q ——链在水中单位长度重量, kg/m, $q = 0.87 q_0$; q_0 ——链在空气中单位长度重量, kg/m. 由式(6)可见影响系泊链的冲击力的主要因素是系泊浮体的运动速度 V_2 和质量 M_P , 以及系泊链的弹簧系数 C .

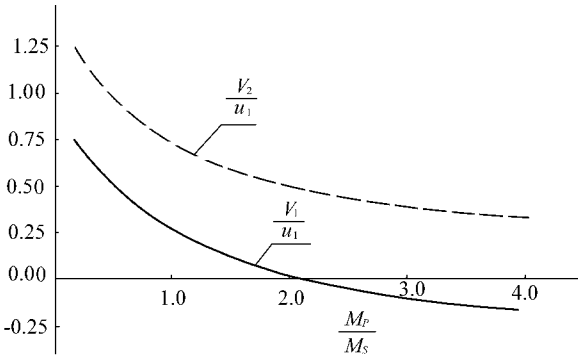


图 2 质量比和速度比关系曲线
Fig.2 Mass ratio vs. velocity ratio

2 分析与算例

2.1 分析

a. 在实践中,如船舶系靠浮码头囤船时,常产生碰撞,囤船的系泊链受到冲击力的作用.又如运动船舶系靠码头或囤船,在系导缆时,由于受到操纵或环境条件的原因,使系靠船舶受到突然出现过大的后退速度,产生冲击使导缆或系泊链拉断或走锚事故.此外,锚地内的系泊浮筒等等.类似以上这些受到冲击的工况,都可按上述方法进行计算或校核.

b. 根据悬链线理论,静止的系泊浮体受到冲击力作用后,其系泊链的悬链长度改变,长度增加,系泊链的着地点向后移动(见图3),图4为冲击力变化与悬链线长度关系,冲击力愈大,所需系泊链长度也愈长.为保证系泊浮体的安全,链长除了适应外力需要部分的长度外,还应有部分长度卧于地面,其目的:一是利用链卧地增加系泊浮体的锚碇力;二是外力若增大可以补充所需的悬链长度和缓和冲击力.

c. 长期处于水中的系泊链,除了锈蚀外,经常受到大小不等的冲击力的作用,其材料产生疲劳,强度降低.因此,在设计计算中应考虑材料疲劳的影响,或降低强度,或增大安全系数,以策安全.

2.2 算例

例1 某港浮码头,囤船为单点系泊,并兼临时转运仓库,囤船尺寸为 $195.16\text{ m} \times 24.36\text{ m} \times 15.38\text{ m} \times 11.12\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 型深 $\times$ 满载吃水(空载吃水)),空载时为1万t,满载时为3.3万t,链径为100mm,破断强度为3950kN,水深13m,潮流速度 $V = 2.1\text{ m/s}$.当3.05万t船舶系靠时,导缆挂好,船受水流作用产生 0.5 m/s 的后退速度,产生冲击,带动囤船运动引起导缆和系泊链拉断,导缆为 $\varnothing 58\text{ mm}$ 尼龙绳,断裂强度为550kN.

根据上述计算方法,分别对导缆和系泊链进行校核.

a. 导缆强度校核

利用上述公式,求得 $C_m = 1.6$, $M_S = 3\,112\text{ t}\cdot\text{s}^2/\text{m}$, $C = 147\text{ kN/m}$, $V_2 = 0.5\text{ m/s}$.

冲击力 $P_d = 1\,352\text{ kN} > 550\text{ kN}$,可见系靠船舶因突然后退产生的冲击力 P_d 大于导缆断裂强度,必然出现断缆事故.

b. 系泊链强度校核

囤船为空载,在潮流作用下的水流力 P_0 为590kN,在系靠船舶的后退带动下,受到突然冲击,其冲击力可按上述计算: $C_{ms} = 1.6$, $M_S = 3\,112\text{ t}\cdot\text{s}^2/\text{m}$, $C_{mp} = 1.13$, $M_P = 1\,020\text{ t}\cdot\text{s}^2/\text{m}$, $C = 950\text{ kN/m}$,其冲击力 $P_d = 3\,816\text{ kN}$,系泊链承受的总力 $P = P_0 + P_d = 590 + 3\,816 = 4\,406 > 3\,950\text{ kN}$,系泊链承受的总力大于其破断强度.

例2 船队2.55万t系靠浮码头囤船,囤船两端各有4根 $\varnothing 48\text{ mm}$ 链系泊,导缆挂好,船队突然后退,导缆拉断,系泊链安全.导缆为58mm尼龙绳,破断强度为550kN.

a. 导缆承受的冲击力

经计算, $C_{ms} = 1.1$, $M_S = 2\,602\text{ t}\cdot\text{s}^2/\text{m}$, $C = 170\text{ kN/m}$, $P_d = 882\text{ kN} > 550\text{ kN}$,导缆拉断.

b. 系泊链承受冲击力

经计算, $C_{ms} = 1.1$, $M_S = 2\,602\text{ t}\cdot\text{s}^2/\text{m}$, $C_{mp} = 1.0$, $M_P = 51\text{ t}\cdot\text{s}^2/\text{m}$, $C = 40\text{ kN/m}$,链长为125m.冲击力

$$P_d = 0.4 \sqrt{\frac{\beta}{n} (C_{ms} M_S + C_{mp} M_P) C} = 270\text{ kN} < 850\text{ kN}$$

系泊链安全.系泊链全长125m,在冲击力作用下需悬链长度为105m,仍有20m卧地链.

例3 系泊浮体每侧用两根链径 $\varnothing 32\text{ mm}$ 链系泊,浮体尺寸为 $48\text{ m} \times 9\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 吃水),潮流速度 $V_0 = 2.5\text{ m/s}$,水深15m,运动浮体 $W = 300\text{ t}$,航速 $u_1 = 3.0\text{ m/s}$ 与系泊浮体发生碰撞,系泊链断裂.

利用以上公式,求得 $M_P = 13.2\text{ t}\cdot\text{s}^2/\text{m}$, $M_S = 30.6\text{ t}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ 系泊浮体被碰后的运动速度 $V_2 = 3.16\text{ m/s}$, $C_m = 1.0$,弹簧系数 $C = 213\text{ kN/m}$,将各参数代入式(6),可得系泊浮体系泊链的冲击力 $P_d = 530\text{ kN} > 380\text{ kN}$,冲击力大于链的破断强度.

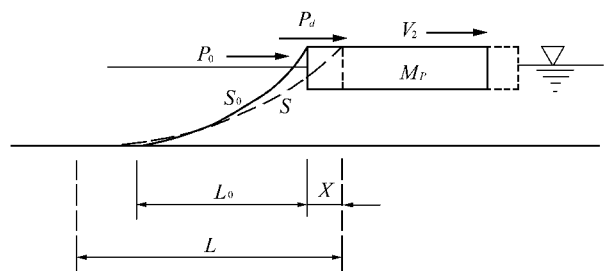


图3 悬链线示意图

Fig.3 Schematic diagram of catenary

以上诸例证明本文所述的方法,对于计算系泊浮体被碰撞产生的冲击力是适用的.

3 结 论

- a. 长期以来,对于系泊浮体的设计仅限于静力分析和计算,由于碰撞而产生的冲击力这种工况往往被忽视,因而在系泊浮体工程中常出现断链或走锚事故,今后在设计中应作为一种特殊工况处理.
- b. 运动中的浮体(特别是航船),在临近系泊浮体工程或系靠码头,必须降低航速,减小因碰撞而产生的冲击力,以保证安全.
- c. 由图 4 可见系泊链的悬链部分的长度随冲击力的增加而增长,悬链部分的垂度逐渐减小,位移也相应减小,但冲击力却愈大,见图 5. 当链长不足时,锚碇结构承受系泊链的上拔力,减少了稳定性,甚至引起走锚事故.

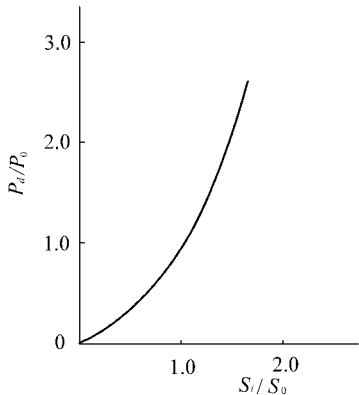


图 4 冲击力与悬链线长关系曲线

Fig.4 Impact force vs. the length of catenary

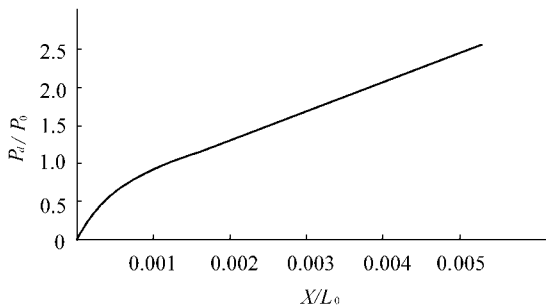


图 5 冲击力与位移关系曲线

Fig.5 Impact force vs. displacement

参考文献：

[1] 杨渡军. 桥梁的防冲保护系统及其设计 [M]. 北京 : 人民交通出版社, 1990. 29 ~ 40.
[2] Minorsky V U. An analysis of ship collision with reference to protection nuclear power plants[J]. T of Ship Research, 1959. 11 ~ 14.
[3] 华东水利学院工程力学教研室. 理论力学 [M]. 北京 : 人民教育出版社, 1987. 355 ~ 362.

Impact Forces Calculation for Mooring Chains
as Mooring Floats in Collision

CHEN De-chun, FAN Zi-ming

(College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract Based on the theory of energy conservation and the transformation of kinetic energy and work, calculation methods are studied of the impact velocity of mooring floats as in collisions and of the impact forces of mooring chains. The calculation methods show that impacts generated by collision between mooring floats in practice often lead to accidents of chains broken or anchor dragged, which should be considered in design.

Key words mooring float ; mooring chain ; impact speed ; elastic coefficient