

三河闸摩阻型拦船设施应用研究

周和平, 李 欣, 陆美凝

(江苏省洪泽湖水利工程管理处, 江苏 淮安 223100)

摘要: 为防止三河闸泄洪时船舶在水流作用下意外撞击闸门发生事故, 需要在上游引河适当位置设置可靠的拦船设施。摩阻型拦船设施结构简单, 投资不大, 拦截能力强, 适用于三河闸, 它由摩阻机、摩阻机基础、钢丝绳和浮桶组成。针对三河闸水面较宽、流速较大的特点, 基于动力学原理, 采用微分法计算, 最终确定了钢丝绳型号、长度以及摩阻机参数。

关键词: 水利工程; 拦船设施; 防撞; 摩阻机; 水流力

中图分类号: TV698.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2017) 12-0031-06

Research on the application of the friction type ship blocking facilities in Sanhe Sluic

ZHOU Heping, LI Xin, LU Meining

(Hongze Lake Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Huaian 223100, Jiangsu)

Abstract: In order to prevent ship accidentally impact on the gate under the action of water flow when the Sanhe Sluice releases floods, a reliable ship blocking facilities needs to be set up at proper place in the upstream of the river. The friction type ship blocking facilities have the advantages of simple structure, small investment and strong interception ability, which is suitable for Sanhe Sluice. It consists of a friction machine, a friction machine foundation, a steel wire rope and a floating bucket. According to the characteristics of wide water surface and large flow velocity of Sanhe Sluice, based on the principle of dynamics, differential method is adopted to calculate and finally determine the type, length and friction machine parameters of wire rope.

Key words: hydraulic engineering; ship blocking facilities; collision avoidance; friction machine; water flow force

1 概述

三河闸位于江苏省淮安市, 是淮河入江水道控制口门, 建成于 1953 年 7 月, 共 63 孔, 每孔净宽 10 m, 闸身总宽 697.75 m, 设计流量 12000 m³/s。三河闸上游为洪泽湖, 湖区各类船舶众多, 泄洪时, 若船舶误入上游引河, 在水流作用下易发生撞击水闸事故, 需在上游引河设置拦船设施。但由于三河闸上游水面开阔, 设置拦船设施存在一定困难, 目前仅设置了警示标牌和禁行红灯, 尚存在较

大安全隐患。

拦船设施种类繁多: 江苏常用的直线型拦船设施^[1]拦截能力较差, 不能拦截洪泽湖常见的千吨船舶; 折线型拦船设施^[2]虽然具有较大的拦截能力, 但每个浮桶下方均需配置较大拖锚, 造价较高, 遭受船舶撞击后恢复困难; 国内外另有采用液压系统特制的拦船设施^[3-6], 但造价不菲。近年来, 摩阻型拦船设施^[7-8]研究取得成功并在一定范围内推广应用, 适用于三河闸。

收稿日期: 2017-10-13

作者简介: 周和平 (1964-), 男, 本科, 研究员级高级工程师, 主要从事水利工程管理工作。

2 摩阻型拦船设施梗概

2.1 组成

摩阻型拦船设施由摩阻机、摩阻机基础、钢丝绳和浮桶组成,在水面呈直线布置(见图1)。两台摩阻机相对安装在两岸钢筋混凝土基础上,钢丝绳架设在浮桶上,两端预绕设计长度于两台摩阻机上。

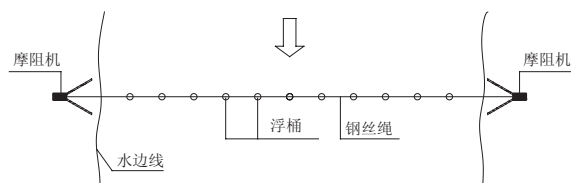


图1 摩阻型拦船设施平面布置示意图

摩阻机由机架、绳鼓、钢丝绳、摩阻装置、传动装置以及滑轮组等组成(见图2)。其中绳鼓用于收放钢丝绳,摩阻装置用于产生摩阻力,传动装置用于将摩阻力放大后传递给钢丝绳,滑轮组用于调整钢丝绳方向。

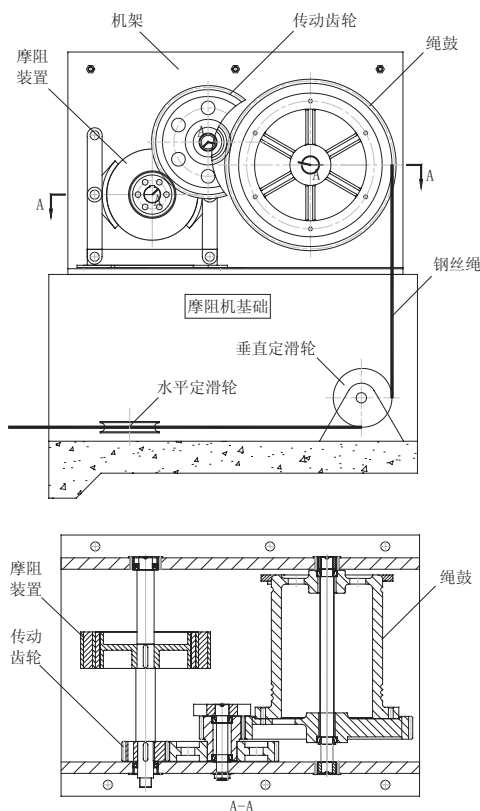


图2 摩阻机构造与安装图

2.2 原理

摩阻型拦船设施的工作原理:当船舶撞击拦

船设施时,钢丝绳张紧、延伸,当其内力达到设计值,摩阻机转动释放钢丝绳,同时摩阻装置产生摩阻力做功消耗船舶动能并克服水阻力,船舶逐渐减速并最终停止,钢丝绳呈V形拦截船舶(见图3)。

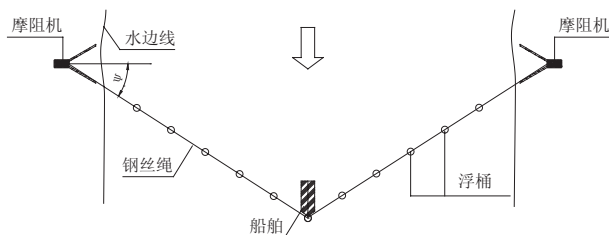


图3 摩阻型拦船设施拦截船舶示意图

摩阻机的工作原理:当船舶撞击拦船设施时,钢丝绳在摩阻机绳鼓切线方向产生拉力,通过齿轮组(传动装置)传动,摩阻装置的闸瓦与刹鼓间产生摩擦力。若撞击力较小,钢丝绳内力未达到设计值,则该摩擦力为静摩擦力,起到阻止摩阻机转动的作用;若撞击力较大,钢丝绳内力达到设计值,那么摩阻机转动,该摩擦力为滑动摩擦力,传递给钢丝绳,起到拦阻船舶作用。

摩阻机的滑动摩擦力由设计确定,通过调节弹簧压力使其达到设计值,它与钢丝绳内力呈增函数关系,由于该滑动摩擦力相对稳定,所以钢丝绳内力基本恒定。

2.3 效果

摩阻型拦船设施具有以下几方面有益效果:

(1) 利用摩阻机做功渐渐消耗“船舶动能+水流力功”,最终钢丝绳在水面呈V形拦阻船舶,此工作原理使其具有强大的拦截能力;

(2) 船舶撞击拦船设施后,摩阻机转动,钢丝绳受到的张力基本恒定,钢丝绳在逆水流向的合力逐渐增大,对船舶渐进加力,冲击较小,能降低沉船风险;

(3) 从船舶撞击拦船设施至船舶被拦截,历时数分钟以致数小时之久,有利于安全救援;

(4) 解除危险后,船舶驶离,摩阻机收回钢丝绳,回到待机状态,拦船设施无损伤;

(5) 结构简单,钢丝绳直径较小,造价较低,有利于推广应用。

3 选址及选型

三河闸上游引河平顺段长度仅约300 m,通

过约 650 m 长喇叭口与湖面连接 (见图 4)。可供备选的拦船设施位置有 3 个: 一是近闸位置方案一, 二是湖口位置方案二, 三是介于闸前和湖口之间的方案三。方案一距闸身约 300 m, 水面宽度约 780 m; 方案二距闸身约 1000 m, 水面宽度约 1300 m; 方案三水面宽度约 1000 m。

方案三虽然比方案二水面宽度窄 300 m, 但相对闸身方向倾斜, 感观不佳, 加之节省经费不多, 技术上没有优势, 故不予考虑。以下仅就方案一与方案二进行技术比较。

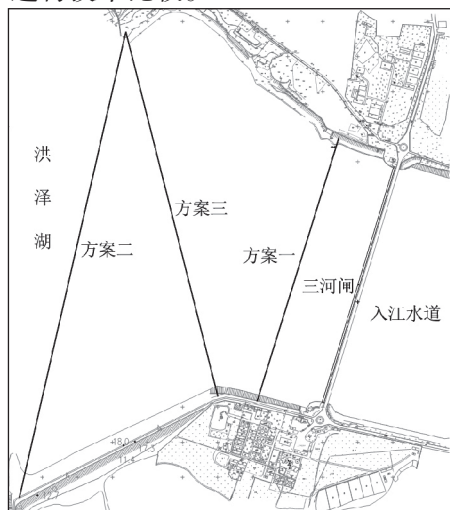


图 4 三河闸上游引河地形图

3.1 水流速度计算

观测方案一和方案二位置处河床断面, 推算两个断面水位分别为 12.5 m、13.0 m、13.5 m、14.0 m、14.5 m 时泄放最大流量, 以及水位为 16.0 m 时泄放设计流量 12000 m³/s 共 6 种工况下的平均水流速度, 计算成果见表 1。表中可见, 方案一处最大平均流速为 1.78 m/s, 方案二处最大平均流速为 1.26 m/s。

表 1 典型水位下泄放最大流量时断面平均流速对比

方案	方案一						方案二					
水位 (m)	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	16.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	16.0
流量 (m ³ /s)	5748	6631	7555	8519	9521	12000	5748	6631	7555	8519	9521	12000
断面面积 (m ²)	3906	4306	4708	5112	5518	6748	4900	5500	6100	6800	7550	9950
流速 (m/s)	1.47	1.54	1.60	1.67	1.73	1.78	1.17	1.19	1.24	1.25	1.26	1.20

3.2 选址

方案一处流速较大, 对拦船设施要求较高, 需采用较粗钢丝绳, 装置较大摩阻机, 造价较高, 且距闸身过近, 安全性较低; 方案二处流速较小, 在平原地区河道属正常略偏大流速, 适宜装置常规摩阻型拦船设施, 造价较低, 且距闸身较远, 安全性较高。因此, 决定选用方案二。

3.3 摩阻机选型与浮桶配置

洪泽湖船舶排水量一般不超过 1000 t, 拦船设施按拦截单船 1000 t 设计。综合水流速度 1.26 m/s, 选配 MZJ-21.5 型摩阻机, 两岸各装配 1 台, 选用 6×37 型 Φ21.5 镀锌钢丝绳。选配直径 50 cm、长度 70 cm 聚乙烯浮桶, 按每个 13 m 计, 需浮桶 100 个。

4 安全核算

鉴于拦船设施基本布置在水平面上, 浮桶和船舶受到的水压力、钢丝绳的牵引力 (合力) 以及它们的运动方向基本都平行于水流方向, 因此建立直线运动数学模型。

4.1 浮桶水压力分析

三河闸泄洪时, 拦船设施的浮桶受到水压力作用, 每个浮桶受到的水压力为^[9]:

$$F_m = C_m \frac{\rho}{2} V^2 A \quad (1)$$

式中:

F_m 为浮桶受到的水压力 (kN), C_m 为浮桶水流阻力系数, ρ 为水密度 ($t \cdot m^{-3}$), V 为浮桶与水流的相对速度 ($m \cdot s^{-1}$), A 为浮桶水下部分垂直于水流方向的投影面积 (m^2)。

4.2 船舶水压力分析

船舶顺流而下时, 速度接近水速, 受到的水压力较小; 船舶受到拦截后, 速度下降, 与水的相

对速度增大, 受到的水压力增大; 船舶停止时与水流的相对速度最大, 等于水的流速, 受到的水压力

最大。船舶下漂时或横或斜,型态不定,但遭到拦截后倾向于横压在拦船设施上,考虑最不利状况,按船舶横在河道中计算。船舶横在河道中受到的水流力为

$$F_{yc} = C_{yc} \frac{\rho}{2} V_i^2 A_{xc} \quad (2)$$

式中:

F_{yc} 为船舶受到的水流力(kN); C_{yc} 为水流力纵向分力系数; V_i 为船舶与水的相对速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); A_{xc} 为船舶水下部分垂直于水流方向的投影面积(m^2)。其中:

$$C_{yc} = a_2 \frac{\pi \theta}{180} + b_2 \quad (3)$$

式中:

a_2 、 b_2 为系数,与水深相关, $\theta = 90^\circ$ 。

4.3 钢丝绳作用力分析

船舶撞击拦船设施的撞击点不确定,但是,船舶在偏左(右)岸位置撞击拦船设施后,将受到水流力和钢丝绳的共同作用,这两个力的合力指向偏右(左)前方,船舶具有向河中心滑移的倾向,在没有人为控制的情况下,船舶一般将滑向河道中央,且此状况下船舶受到的水流力较大。考虑最不利状况,按船舶撞击在拦船设施中点计算。

钢丝绳在逆水流方向的合力为

$$F_{sh} = 2F \sin \psi \quad (4)$$

式中:

F_{sh} 为钢丝绳在逆水流方向的合力(kN); F 为钢丝绳的内力(kN); ψ 为图3中主索与河道横断面的夹角。

图5反映了钢丝绳逆水流向合力随着船舶位移的增大而增大,但增速逐渐衰减。

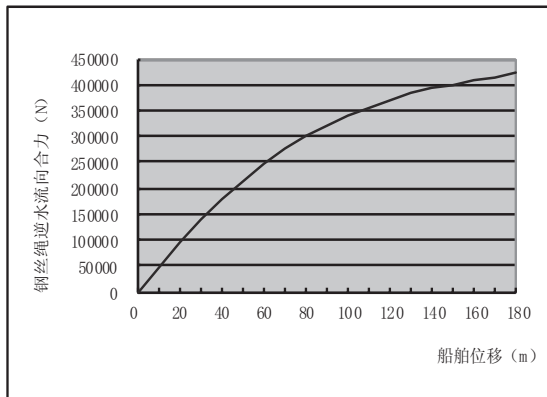


图5 钢丝绳逆水流向合力与船舶位移关系图

4.4 功与动能的转换分析

(1) 摩阻做功

船舶撞击拦船设施引起摩阻转动时,拦船设施钢丝绳内力恒定为 F , 该力阻止船只下滑, 所做的功为

$$W_1 = \int_0^{S_0} 2F \sin \psi ds = \int_0^{S_0} 2F \frac{s}{\sqrt{s^2 + (B/2)^2}} ds \quad (5)$$

$$= 2F \left[\sqrt{S_0^2 + (B/2)^2} - B/2 \right]$$

式中:

S_0 为船舶撞击拦船设施至被拦截停止的总位移(m); s 为船舶位移(m); B 为河道的计算宽度(m), 取为两岸摩阻水平滑轮“中一中”距离。

(2) 浮桶水流力做功

浮桶始终受到水流力, 停止于水中时受到的水流力最大, 在船舶撞击拦船设施的瞬间水流力下降, 随着船速的下降水流力又逐渐增大。由于浮桶相对于船舶来说, 受到的水流力很小, 为简便并偏安全计, 取最大值, 浮桶位移平均取为 $\frac{S_0}{2}$, 那么浮桶水流力做功为

$$W_2 = \frac{1}{2} n F_m S_0 = \frac{1}{2} n C_m \frac{\rho}{2} V^2 A S_0 = \frac{1}{4} n C_m \rho V^2 A S_0 \quad (6)$$

式中:

n 为浮桶数量。

(3) 船舶水流力做功

船舶受到拦截后速度下降, 同时受到水流力, 随着与水流相对速度的增大, 受到的水流力也逐渐增大, 该力推动船只下滑, 所做的功为

$$W_3 = \int_0^{S_0} C_{yc} \frac{\rho}{2} V_i^2 A_{xc} ds \quad (7)$$

(4) 船舶动能

船舶动能为

$$W = \frac{1}{2} m V^2 \quad (8)$$

式中:

m 为船舶质量(kg); V 为船舶初始速度, 取为水流速度。

(5) 功与动能的转换

假定船舶以速度 V 下滑, 撞击拦船设施发生位移 S_0 后停止, 据动能定理得

$$W_1 - W_2 - W_3 = \frac{1}{2} m V^2 \quad (9)$$

即

$$2F\left[\sqrt{S_0^2 + (B/2)^2} - B/2\right] - \frac{1}{4}nC_m\rho V^2 S_0 \quad (10)$$

$$-\int_0^{S_0} C_{yc} \frac{\rho}{2} V_i^2 A_{xc} ds = \frac{1}{2} m V^2$$

4.5 “船舶动能+水流力功”核算

式(10)中 V_i 是变量 s 的函数,随着 s 的增大, F_{sh} 、 V_i 、 F_{yc} 都增大, F_{sh} 倾向于使 V_i 增大, F_{yc} 倾向于使 V_i 减小, F_{yc} 又是 V_i 的函数,此过程有关参数都在变化并相互影响, $V_i=f(s)$ 是一个未知的复杂函数,拟合较为繁琐,这里采用微分法求解。

单只浮桶受到的最大水流力约为 0.01 kN, 100 只浮桶计 1 kN, 简单计入船舶受到的水流力中。排水量 1000 t 船舶, 水下部分垂直于水流方向的投影面积约 $A_{xc}=100 \text{ m}^2$, 最大水流力为 151.615 kN。MZJ-21.5 型摩阻机配用钢丝绳为 $6 \times 37 - \phi 21.5$, 其破断力为 238792 N。拦船设施计算宽度取为 $B=1300 \text{ m}$, 安全系数取为 $k_e=2.0$ 。设定初始状态时船舶位移为 0.005 m, 设定时间步长 $\Delta t=1 \text{ s}$ (Δt 越小, 计算成果越精确)。由初始状态开始逐步演算, 认为每一步长内船舶恒为 V_{ij} 。

任一步长时, 船舶下行总位移为

$$S_i=S_{i-1}=V_i\Delta t \quad (11)$$

钢丝绳在逆水流向合力为

$$F_{shi}=2F\sin\psi_i/k=2FS_i/k/\sqrt{[S_i^2+(B/2)^2]} \quad (12)$$

船舶受到的水流力为

$$F_{yci} = C_{yc} \frac{\rho}{\gamma} V_i^2 A_{xc} \quad (13)$$

浮桶受到的水流力(认为不变,误差不大)为

$$F_m = nC_m \frac{\rho}{\gamma} V^2 A \quad (14)$$

加速度为

$$a_i = (F^i - F_{vci} - F_m) / m \quad (15)$$

下一步长内船速为

$$V_{i+1}=V_i+a_i\Delta t \quad (16)$$

绳做功为

$$W_{1i}=W_{1i-1}+F_{shi} \times V_i \times \Delta t \quad (17)$$

水流力做功为

$$W_{2i}=W_{2i-1}+(F_{vci}+F_m)\times V_i\times \Delta t \quad (18)$$

船舶剩余动能为

$$W_{3i} = \frac{1}{2} m \times V_i^2 \quad (19)$$

钢丝绳克服船舶动能和水流力做功瞬时结果

(功能转换)为

表 2 拦船设施拦阻运行过程参数表

[illegible]

$$W_{li}-W_{2i}-\frac{1}{2}m \times V^2 \quad (20)$$

计算结果见表2。

表2显示,船舶撞击拦船设施后,速度、动能等逐渐下降,位移、水流力、绳合力等逐渐增大,加速度先递增后递减。2000 s时功能转换基本完成;4244 s时船速下降到0.01 m/s,位移526.01 m;7500 s时船速下降到0.001 m/s,位移538.70 m。此后,船舶将以更低的速度下滑,直到钢丝绳逆水流向合力等于最大水流力(下一节计算)。

理论上,只要摩阻机拦截能力足够,应在某一时刻某一位置船速为零,同时,钢丝绳做功抵消“船舶动能+水流力功”。表2中7500 s时船舶即将停止,但功能转换计算值为1.6 kJ,这是初始边界条件设置不准确造成的误差,不影响定性分析。

4.6 最大水流力抵御能力核算

浮桶受到的最大水流力合计为1 kN,船舶受到的最大水流力为151.615 kN。6×37型Φ21.5钢丝绳破断力为238792 N, $k_c=2.0$,令钢丝绳逆水流向合力等于最大水流力,即

$$2 \times 238792 \sin \psi / k_c = 152615 \quad (21)$$

求得: $\sin \psi = 0.639$, $\psi = 39.72^\circ$,船舶下滑距离为540.02 m,此时船舶停止下滑,与微分法计算的钢丝绳克服“船舶动能+水流力功”结果一致。

5 摩阻机设计方案

为更好地发挥摩阻机功效,设定 $\psi = 45^\circ$,即船舶下滑650 m时被拦截,此时安全系数为

$$k_c = 2 \times 238792 \sin 45^\circ / 152615 = 2.21 \quad (22)$$

钢丝绳长538.5 m,定为540 m,每个摩阻机

三河闸河面较宽,流速较大,上游船舶众多,没有可靠的拦船设施存在较大安全隐患。引入摩阻型拦船设施,选用Φ21.5钢丝绳,设计拦截1000 t船舶,考虑船舶撞击拦船设施后下滑650 m被拦截,基于动力学原理,采用微分法计算,得出安全系数为2.21,历时超2 h。整套装置造价40万元,目前已安装就位。

摩阻型拦船设施的设计,着眼于用较小的力在较长的行程上做功,逐渐消耗船舶动能,能避免剧烈撞击,赢得较长救援时间。同时,由于船舶设计下滑位移一般超过1/2河道宽度,钢丝绳在水面呈V形拦截船舶,受力合理,拦阻能力较强,使用钢丝绳较细,锚墩相应较小,全套装置造价较低。摩阻型拦船设施适用于各种流速、不同宽度河道,在高流速河道上推广应用,对维护工程与航运安全,具有较大的经济效益与社会效益。

参考文献:

- [1] 周和平,李璟.运东闸上游拦船设施改造方案简析[J].水利水电科技进展,2001(12):52-53.
- [2] 孙猛,周和平,严凯.后置式拦船设施的动力学分析与工程应用[J].扬州大学学报,2014,35(2):24-28.
- [3] 邹明.英国曼彻斯特运河船闸的拦船装置[J].水运工程,1979(3):48.
- [4] 建江,胡涛勇,任涛,等.苏州河河口水闸水上安全防撞设施设计[J].水利水电科技进展,2007(1):79-81.
- [5] 陈国虞,倪步友,张澄,等.跨海湾(河湾)桥梁非通航孔柔性拦船防撞装置[J].广东造船,2011(1):31,38-41.
- [6] 谢远宏,李志忠.杭州湾跨海大桥非通航孔桥船舶拦截体系施工技术[J].施工技术,2011(3):1-4.
- [7] 孙猛,严凯,周和平.阻尼机式拦船装置:中国,ZL

表3 三河闸拦船设施摩阻机主要技术指标表

单船总重 (t)	绳直径 (mm)	预绕绳长 (m)	绕绳 层数	绳鼓直径 (m)	有效绳鼓长 度(m)	绳设计张力 (kN)	安全 系数
1000	21.5	270	5	0.648	0.524	108.05	2.21

绳鼓上需预绕270 m。设计摩阻机绳鼓直径64.8 cm,有效长度52.4 cm,那么在每个绳鼓上预绕钢丝绳近5层。此款摩阻机需专门设计制造,主要技术指标见表3,型号确定为MZJ-21.5-270。

6 结语

201420008832.3[P].2014-01-08.

- [8] 钱福军,周和平,夏卫中.长江感潮段闸站工程摩阻型拦船设施应用[J].排灌机械工程学,2016(4):313-320.
- [9] 中华人民共和国交通运输部.JTS 144-1-2010 港口工程荷载规范[S].北京:人民交通出版社,2010.

(责任编辑:徐丽娜)