

闸门反向挡水时封闭梁格方案 对启门力降低效果的研究

倪 春¹, 黄先北^{2*}, 仇宝云², 孙 涛¹, 于贤磊¹

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210029;
2. 扬州大学 电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要:垂直提升式钢闸门反向挡水时, 闸门的梁系结构朝向上游侧, 由于水流的冲击作用, 易导致启闭机的启门力严重不足。为了降低启门力, 提出封闭梁格方案, 基于 CFD 方法计算进行了分析, 结果表明: 闸门底部主梁上下表面压差形成的垂直作用力占水流总垂直作用力的 85% ~ 97%, 封闭下部梁格与封闭全部梁格方案相比原方案的启门力分别降低 15.5% 与 19.5%, 原因在于避免了水流对底部主梁的冲击, 降低了水流的垂直作用力。

关键词:反向挡水闸门; 启门力; CFD; 封闭梁格

中图分类号:TV663 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2020)12-0052-04

Study on effect of closed beam grillage scheme on the reduction of opening force by reverse retaining gate

NI Chun¹, HAUNG Xianbei^{2*}, QIU Baoyun², SUN Tao¹, YU Xianlei¹

(1. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project Jiangsu Water Source Co., Ltd., Nanjing 210094, China; 2. College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: When the vertical lifting steel gate is blocking the water in reverse, the beam structure of the gate is towards the upstream side. Due to the impact of the water flow, the opening force of the gate hoist is likely to be seriously insufficient. In order to reduce the opening force, a closed beam grillage scheme was proposed and analyzed based on CFD method calculations. The results showed that the vertical force formed by the pressure difference between the upper and lower surfaces of the main beam at the bottom of the gate accounted for 85% to 97% of the total vertical force of the water flow. The opening force of the closed lower girder and the closed all girders were reduced by 15.5% and 19.5% respectively compared with the original scheme. The reason was to avoid the impact of the water flow on the bottom main beam and reduce the vertical force of the water flow.

Key words: reverse retaining gate; opening force; CFD; closed beam grillage

平面钢闸门是水利工程中常用的闸门形式。随着社会经济的发展, 越来越多的闸门需满足双向挡水要求^[1-2]。现有双向挡水闸门主要关注双向密封问题, 大部分仍使用单面板形式。然而, 单面板

形式的闸门在正向挡水时, 面板朝向上游侧, 与普通单向闸门工作方式一致; 而当反向挡水时, 闸门的梁系结构朝向上游侧, 由于水流的冲击作用, 往往易导致启门力过大, 可能出现启闭机系统失压及

收稿日期: 2020-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(51909231, 51679208); 江苏省南水北调工程科技创新项目(SSYXZ-2019-JF68)

作者简介: 倪春(1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水利工程管理工作。E-mail: 492864090@qq.com

通信作者: 黄先北(1991—), 男, 讲师, 博士, 主要从事水利工程相关研究。E-mail: znhuang@1613.com

启门力超过设计值的问题。由此可见, 闸门反向挡水时, 受力更加复杂且明显增大, 单面板闸门无法满足双向挡水需求。

随着计算机技术的发展, 计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 广泛应用于工程中的流动分析^[3-5]。本文以节制闸为研究对象, 针对垂直提升式平面钢闸反向挡水时启门力在一定开高时增大的情况, 采用 CFD 方法模拟闸门附近压力场, 分析启门力增大的原因, 并研究封闭梁格方案对降低启门力是否有效。

1 水闸参数与过流流动数值计算方法

1.1 水闸结构参数

以闸站枢纽节制闸采用垂直提升式液压平板钢闸门进行研究, 水闸与底板相关参数为: 闸门高度 4.5 m, 闸前平直段长 18 m, 闸后 2.9 m 为斜坡, 坡角 38°, 坡长 7 m。为保证数值计算中流动充分发展, 闸前延长至距离闸门 30 m, 闸后延长至距离闸门 20 m 处。

考虑到流动沿水闸宽度方向的中心线为对称分布, 取闸门的一半进行 CFD 分析研究, 见图 1。

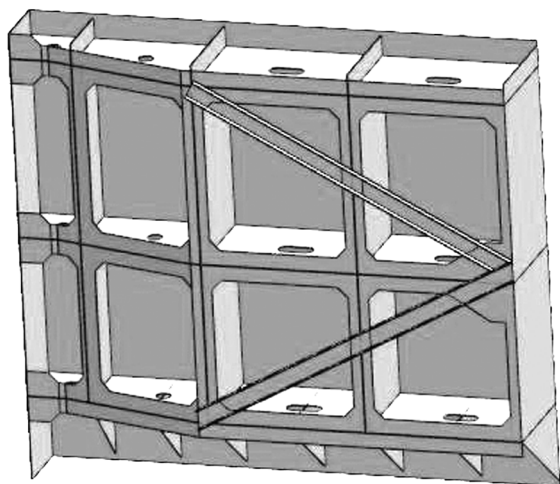


图 1 闸门原方案的三维模型

1.2 数值模拟边界条件

本文采用雷诺时均 N-S 方法求解湍流场, 选择常用的标准 k-ε 模型^[6-7]。过闸流动是典型的水气两相流, 本文采用均相流模型^[7-8]。

计算域以及相应的边界条件如图 2 所示, 采用边界条件如下: (1) 水域进口, 流量进口条件, 水的体积分数设置为 1, 空气体积分数为 0; (2) 水域出口, 流量出口条件; (3) 面板宽度方向的中线所在面, 对称边界; (4) 空气域上表面, Opening 边界 (开敞边界), 压力设置为 0, 且水的体积分数为 0, 空气

体积分数为 1; (5) 空气域与水域之间交界面, General Connection。未标注的边界均使用无滑移固壁条件。

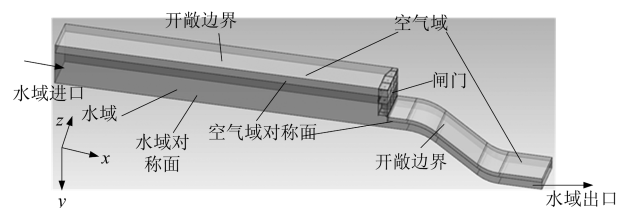


图 2 闸门反向挡水时计算域网格与边界条件设置
($H=1.65\text{ m}$)

1.3 闸门启门力计算

启门时闸门受重力 G 、水流垂直作用力 F_y 、水流水平作用力 F_x 、摩擦力 F_m 、门槽对闸门滚轮的水平反力 F_w 、启门力 F_l 的共同作用。

(1) 重力

为闸门 (包括滚轮) 重力以及液压缸活塞杆的自重:

$$G = G_{\text{闸}} + G_{\text{杆}} \quad (1)$$

根据闸门设计参数, $G = 1.862 \times 10^5\text{ N}$ 。

(2) 水流作用力

闸门所受 F_x 与 F_y 可根据 CFD 结果计算获得。

(3) 摩擦力

摩擦力一方面是门侧止水橡皮与门槽的摩擦力:

$$F_{\text{mp}} = \gamma_1 F_{x1} \quad (2)$$

式中, F_{x1} 为水流水平作用力 F_x 作用在侧止水橡皮上的力, 根据设计资料为 2 200 N; γ_1 为橡皮与门槽摩擦系数, 门槽为钢, 系数取为 0.5。

另一方面是启门时在滚轮的轴承处形成, 写为

$$F_{\text{ml}} = \gamma_2 (F_x - F_{x1}) \quad (3)$$

式中, γ_2 为摩擦系数, 本例采用的为滑动轴承, 摩擦系数取为 0.05。

(4) 启门力

根据受力分析可知, 启门力为

$$F_l = G + F_y + F_m = G + F_y + F_{\text{ml}} + F_{\text{mp}} \quad (4)$$

2 CFD 启门力计算验证

由 CFD 计算结果获得闸门所受 F_x 与 F_y , 并根据 1.3 章节受力分析计算闸门启门力, 与现场测试结果进行对比, 如图 3 所示。

显然, 从启门力的变化来看, CFD 与实测结果一致, 均为先增大后减小, 随后再增大最后减小的规律, 其中开高 1.65 m 与 2.05 m 时启门力高于其

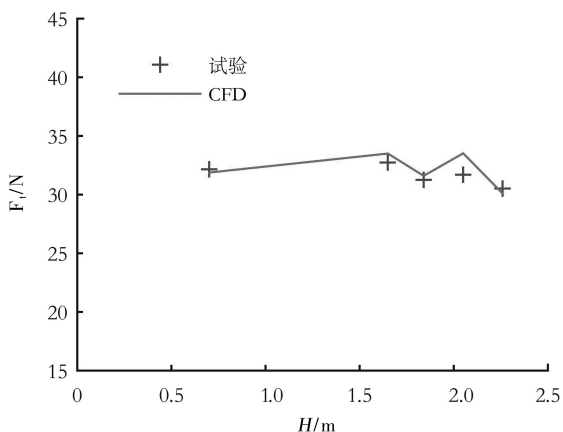


图3 计算与实测启门力对比

余情况。CFD 与试验值的偏差最大为 5.5%, 说明本文采用的计算方法是可靠的。

3 启门力降低方案

闸门提升过程中,底部主梁下方流速较高,从而在下表面易形成负压,产生下吸力。此外,反向挡水时由于梁系结构朝向上游,水流将冲击底部主梁,从而在主梁上表面形成高压,进一步增大启门力。由此可见,主梁上下表面的压力差是导致启门力增大的关键。为分析压力差对启门力的影响,取主梁上下表面的平均压力差,该压力差乘以主梁面积即为压差作用下形成的垂直方向作用力。图4所示为压力差形成的垂直作用力以及水流总的垂直作用力随闸门开高的变化,压差形成的垂直作用力占水流总作用力的 85%~97%,且变化规律保持一致。

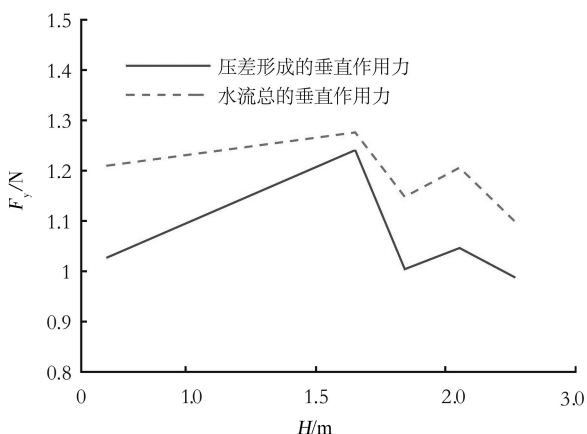


图4 压差形成的垂直作用力与水流总的垂直作用力随开高的变化

因此,若封闭部分或全部梁格,则有望大幅降低水流冲击导致的压力差,从而降低启门力。为此,本文提出 2 种方案:(1)封闭下部梁格(见

图5),即封闭底部主梁至第二主梁(中间)之间的梁格;(2)封闭全部梁格,即封闭底部主梁至第一主梁(上主梁)之间的全部梁格。对于本文所研究闸门,宽度 10.12 m,面板厚度 10 mm,下部相邻两排工字钢垂直距离约为 1.5 m。因此,方案(1)需增加的钢材总量为 1 192 kg,重量 1.17×10^4 N,方案(2)需增加的钢材总量为 2 384 kg,重量 2.34×10^4 N。

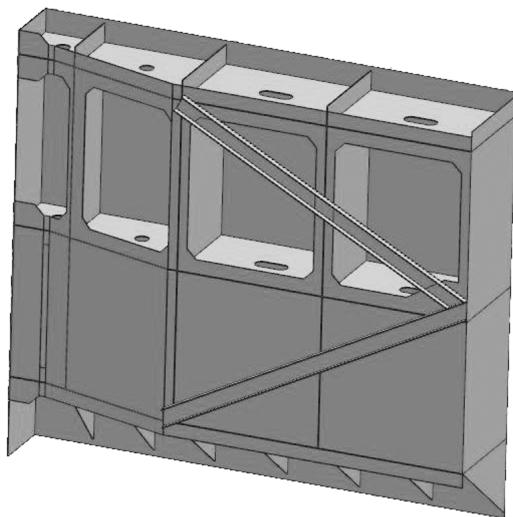


图5 封闭下部梁格方案(方案1)

根据上文分析,最大启门力发生在闸门开高 1.65 m 时,因此,基于该开高进行 CFD 计算。对于方案(1),由于下部梁格被封闭,水流在中间主梁上方存在壅高,部分空气从排水孔进入闸门下部水腔,导致中间主梁与底部主梁之间存在明显水气混合情况,闸门内平均水面应在中间主梁与底部主梁中间,距中间主梁 0.8 m 处;对于方案(2),由于梁格全部封闭,第二主梁上方不形成壅高,且门体内水从排水孔排出,远低于上游水位。

实际启门时由于闸门匀速上升时梁格内水体因重力作用通过横梁排水孔下泄流动引起的阻力。因此,需计算密封梁格内水体通过下方横梁排水孔排出时的阻力——即排水对横梁向下的冲击力对启门力的影响,该影响表现为排水阻力引起的密封梁格内水面的升高值。根据孔口流动计算公式:

$$q = C_d A_T \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (5)$$

则通过孔口的压差为

$$\Delta p = \frac{\rho q^2}{2 C_d^2 A_T^2} \quad (6)$$

式中, C_d 为流量系数取为 0.5456, $A_T = 0.0325 \text{ m}^2$ 为孔的面积, ρ 为水的密度, $q = 0.03705 \text{ m}^3/\text{s}$ 为通过排水孔的流量。据此可算得水头损失为 0.22 m,

对应的水体重量 $F_G = 2.13 \times 10^4 \text{ N}$ 。

不同方案下的启门力如表1所示($H = 1.65 \text{ m}$)。

表1 闸门不同方案下的启门力对比 单位: 10^4 N

方案	G	F_G	F_y	F_m	F_t
原方案	18.62	0	12.76	1.35	32.73
方案(1)	19.79	2.13	4.51	1.23	27.66
方案(2)	20.96	2.13	1.97	1.28	26.34

由表1可见,原方案水流产生的垂直作用力约占启门力的39%,而对于方案(1),下部梁格的封闭使水流垂直作用力下降约65%,方案(2)则下降约85%。2种方案的水流垂直作用力下降比例不同的原因在于,方案(1)尽管阻止了水流对底部主梁的冲击,但对中部主梁的壅高产生了额外的垂直作用力;方案(2)封闭了全部梁格,基本消除了水流冲击作用,因此水流垂直作用力主要为下吸力引起。

对比不同方案下的启门力可知,方案(1)相比原方案降低了约15.5%,方案(2)相比原方案降低约19.5%。由此可见,封闭梁格方案可有效降低启门力,且封闭全部梁格方案效果更好。

4 结 论

本文针对垂直提升式平面钢闸门反向挡水时启门力增大的问题,采用CFD方法模拟闸孔过流流动,提出封闭梁格方案,并分析了不同方案下的启门力,得到如下主要结论:

(1)闸门底部主梁上下表面压差形成的垂直作用力占水流总垂直作用力的85%~97%,且其变化

规律与启门力的变化规律一致,开高1.65 m时达到最大。

(2)封闭下部梁格与封闭全部梁格均可有效降低启门力,原因在于避免了水流对底部主梁的冲击,降低了水流的垂直作用力。

参考文献:

- [1] 杨艳军. 某双向挡水节制闸工程的方案设计分析[J]. 水科学与工程, 2011(5):43-44.
- [2] 刘国瑞. 广西郁江调水工程大雾坪输水渠双向挡水工作闸门设计[J]. 水电站设计, 2011(2):29-34.
- [3] 罗灿, 刘超. 多机组泵站侧向进水特性模拟和改进研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(1):207-214.
- [4] 林伟栋, 赵西增, 叶洲腾, 等. 涌潮运动的CFD模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2017(6):696-703.
- [5] HUANG X B, YANG W, LI Y J, et al. Review on the sensitization of turbulence models to rotation/curvature and the application to rotating machinery[J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 341:46-69.
- [6] DEMIREL E. Measured and simulated flow downstream of the submerged sluice gate[J]. Water and Environment Journal, 2015(29):446-455.
- [7] 黄先北, 郭婧, 仇宝云. FBM模型在典型分离流动预测中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7):52-56.
- [8] ALBADAWI A, DONOGHUE D B, ROBINSON A J, et al. Influence of surface tension implementation in volume of fluid and coupled volume of fluid with level set methods for bubble growth and detachment[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 53:11-28.

(上接第51页)

参考文献:

- [1] DE SORTIS A, PAOLIANI P. Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring[J]. Engineering Structures, 2007, 29(1):110-120.
- [2] 潘家铮. 断裂力学在水工结构设计中的应用[J]. 水利学报, 1980(1):45-59.
- [3] 晏良佳. 基于压电陶瓷的多腔钢管混凝土柱损伤监测研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
- [4] 秦婧文. 基于压电陶瓷传感器的震动防盗报警电路的应用[J]. 科技经济导刊, 2016(9):60.
- [5] 张兢, 徐霞, 张志文. 基于压电陶瓷的结构损伤检测技术[J]. 压电与声光, 2006(3):350-352.
- [6] 张东, 吴科如, 李宗津. 水泥基压电机敏复合材料的逆压电效应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(3):312-317.
- [7] 张瑜琰, 王本民, 陈桂馨, 等. 锆钛酸铅(PZT)陶瓷的应用与发展[J]. 化学进展, 1992(2):37-45.
- [8] 林书玉. 双激励源压电陶瓷超声换能器的共振频率特性分析[J]. 电子学报, 2009, 37(11):2504-2509.
- [9] 赵晓燕, 李宏男. 基于压电陶瓷的混凝土裂缝损伤监测[J]. 压电与声光, 2009, 31(3):437-439.