

平板闸门闭门卡阻原因分析及解决对策

盛传明^{1,2,3}, 练继建², 刘 昉², 李 蕾³

(1. 河北工程大学水利水电学院; 2. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室;
3. 天津大学前沿技术研究院有限公司)

摘要:为研究平板闸门闭门卡阻的原因,采用物理模型试验和 CFD 数值模拟相结合的方法,分析了自由出流下平板闸门动水闭门的水动力性能。研究表明,在上游压力水头的作用下,上游水封的平板闸门水推力较大,水重力对闭门作用不显著,此时闸门主要依靠自身重力闭门;闸门运行一段时间后,摩擦系数过大是闸门闭门卡阻的重要原因;自由出流下,平板闸门的许用摩擦系数主要与闸门自重、上下游水头差和水推力作用面积有关;减小支承材料摩擦系数、增加配重、减小上下游水头差、减小水推力作用面积和适当关闭弧形闸门有利于平板闸门关闭。
关键词:平板闸门;闭门卡阻;自由出流;摩擦系数;支承材料

Analysis of causes and countermeasures for plane gate jamming in closing process//Sheng Chuanming^{1,2,3}, Lian Jijian², Liu Fang², Li Lei³ (1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University; 3. The Frontier Technology Research Institute Limited Company of Tianjin University)

Abstract: To investigate the causes of plane gate jamming in the closing process, a combined approach of physical model experiments and CFD numerical simulations was employed to examine the hydrodynamic characteristics of plane gates during dynamic closure under free-flow conditions. The results show that under the upstream pressure head, plane gates equipped with upstream seals experience significant hydrodynamic thrust forces with minimal contribution from water-induced gravitational forces, rendering gate closure primarily dependent on self-weight. After a period of gate operation, excessive friction coefficient is identified as a significant cause of closing jamming. Under free-flow conditions, the permissible friction coefficient of the plane gate is mainly governed by the gate self-weight, the upstream-downstream head difference, and the effective area subjected to water thrust. Five countermeasures were proposed to facilitate the successful closure of the plane gate: reducing the friction coefficient of supporting materials, increasing counterweights, decreasing the upstream-downstream head difference, reducing the water thrust action area, and appropriately closing the radial gate.
Key words: plane gate; closing jamming; free flow; friction coefficient; supporting material

闸门是水利工程中用于控制水流的关键设施,广泛应用于水库、河道、渠道、船闸等工程中。近年来,国内外陆续报道了多起平板闸门闭门卡阻事故,如万安^[1]、小浪底^[2]、密云^[3]、上利^[4]、泗阳^[5]及美国的 Wanapum^[6]和委内瑞拉的 Guri^[7]等水利工程。闸门在关闭过程中受到多种作用力的影响。在竖直方向上,主要作用力包括闸门自重、水柱压力和水流经过闸门时产生的下吸力或上托力;在水平方向上,则主要受水推力的作用,该力会引发摩擦阻力,阻碍闸门关闭。模型试验是研究平板闸门流场和受力特性的常用手段。例如:Naudascher 等^[8-9]研

究发现闸门体型和闸门开度对闸门闭门力具有显著影响,这些变量在闸门启闭过程中起到了关键的作用;Markovic-Brankovic 等^[10-16]通过模型试验方法,研究了平板闸门闭门过程中的受力特征,发现闸门体型、闭门方式和水流流态等均会影响闭门力,若闸门体型设计不良,会引起闭门力不足,最终阻碍闸门顺利关闭。当前研究主要聚焦于如何增大闭门力,未建立闸门受力与闭门卡阻的关系,也未提出促使闸门完全关闭的方法。除物理模型试验外,计算流体力学(CFD)技术被日益广泛地用于闸门水动力性能的研究。数值模

拟可克服模型与原型之间的比尺效应,也可在任意狭小区域提取数据,从而为物理模型试验提供补充。例如:Amorim 等^[17-23]使用 CFD 方法,研究了平板闸门闭门过程中的压力分布;高训宇等^[3,24-28]使用 CFD 方法,研究了不同工况下闸门受到的闭门力,研究表明,闸门受力与闸门开度、闸门体型和水流条件密切相关,通过控制相关变量可增大闭门力。当前数值模拟以流场展示为主,没有将流场压力分布与闸门受力相关联,也没有从受力角度解释闸门闭门卡阻现象。

本文以某泄洪洞内平板闸门为研究对象,使用模型试验与 CFD 数值模拟相结合的方法,重点分析了自由出流下平板闸门闭门卡阻的原因,并提出了相应的解决对策,以期为解决此类工程问题提供思路,并为高水头平板闸门的优化设计提供参考。

1 工程概况

某水利枢纽工程位于黄河干流,泄洪洞采用有压洞接无压洞布置型式,洞内布置一扇平板闸门和一扇弧形闸门,分别作为事故闸门和工作闸门使用。平板闸门孔口宽 6 m、高 12 m,设计水头 100 m,弧形闸门孔口宽 7.0 m、高 6.5 m,底板高程均为 3 175 m。平板闸门底缘采用后倾角型式,定轮支承,动水闭门。平板闸门自重 112.5 t,当上下游水头差为 50 m 时,平板闸门下落到距离底板 10.4 m 处卡住,当上游水头降至 25 m 时,平板闸门下落到距离底板 4.8 m 处卡住。水质较清澈,几乎无泥沙,门槽底槛处无异物阻挡,当平板闸门开度较小时,无明显振动发生,可排除泥沙、异物和流激振动影响。

2 研究方法

2.1 初步受力分析

平板闸门下落时,在上游水头的作用下,闸门受力情况如图 1 所示。图中, F_n 、 F_p 、 G_g 、 F_b 分别为水推力、绳索拉力、闸门自重和水重力,其中水重力包括水柱压力、下吸力或上托力, $P_{前}$ 、 $P_{后}$ 、 $P_{上}$ 和 $P_{下}$ 分别为面板上游压力、面板下游压力、梁板上表面压力和梁板下表面压力。

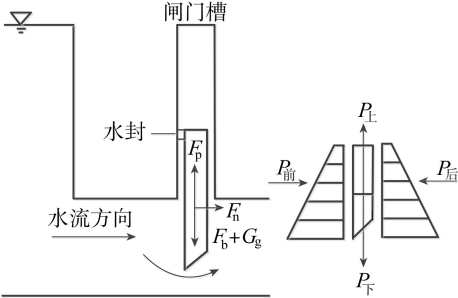


图 1 平板闸门受力示意图

和梁板下表面压力。

闸门闭门过程中受力满足:

$$G_g + F_b - F_p - \mu F_n = 0 \tag{1}$$

式中: μ 为摩擦系数。 μF_n 代表摩擦力,来源于水封及支承材料的预紧力。

水推力和水重力分别满足^[24]:

$$F_n = \int (P_{前} - P_{后}) dA_1 \tag{2}$$

$$F_b = \int (P_{上} - P_{下}) dA_2 \tag{3}$$

式中: A_1 为水推力作用面积; A_2 为水重力作用面积。

闸门自重可由闸门质量计算,水推力和水重力可通过压力传感器测量得到,水推力作用面积和水重力作用面积可通过闸门体型和水封位置得到,当闸门卡阻时,绳索拉力为 0,此时摩擦系数可通过式(1)计算。

本文重点研究闸门自由出流情况,此时 $P_{后}=0$ 。

2.2 模型试验

按照重力相似准则,建立 1 : 25 试验模型,主要包括水库、引水口、有压洞身、平板闸门、闸门槽、弧形闸门、尾水渠和尾水堰等。模型主体、平板闸门和弧形闸门均使用有机玻璃制作,尾水渠使用灰塑料板制作^[29],平板闸门使用铅块进行配重,整体试验模型如图 2 所示。

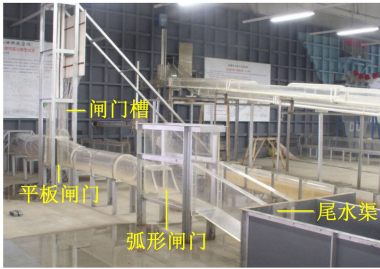


图 2 整体试验模型

试验中,上游水位使用水位测针测量,流量使用矩形堰测量,平板闸门开度使用电机驱动卷扬机控制,弧形闸门开度通过手动控制。闸门结构及传感器布置如图 3 所示。面板压力使用 3 对压力传感器(1 号、2 号和 3 号)测量,分别布置在上游面板的不同高度,梁板压力使用 1 对压力传感器(4 号)测量,布置在底主横梁的上下表面。使用中国水利科学研究所的 DJ800 压力测量分析系统进行数据采集及处理,采样频率为 100 Hz,采样时间为 60 s,传感器误差为 0.01 m。

2.3 数值模拟

参考物理模型及设计资料,建立 1 : 1 三维数值模型,数值模型主要包括水库、引水口、闸门井、平板闸门、弧形闸门和有压洞身等,如图 4 所示。

应用 GAMBIT 软件,使用域动网格更新技术和

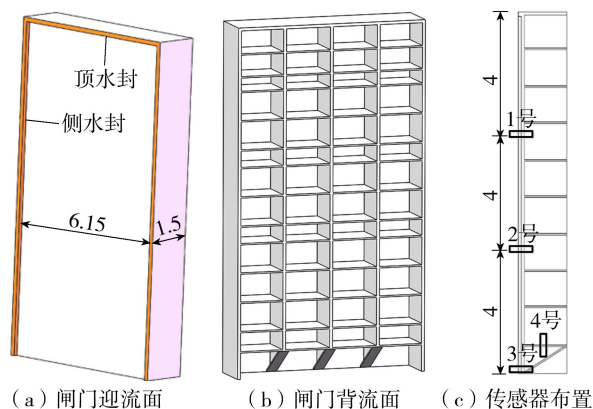


图3 闸门结构及传感器布置(单位:m)

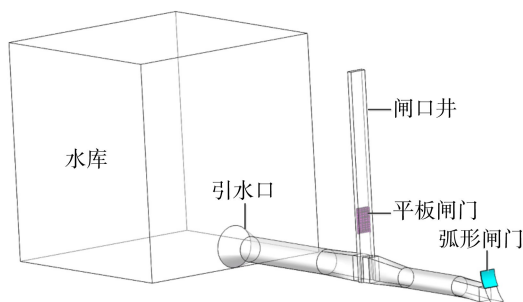


图4 三维数值模型

动态分层方法对数值模型进行网格划分。将门槽内部区域设置为运动区域,将门槽外部区域设置为静态区域,运动区域与静态区域的分界面为变形边界,闸门上下界面为刚性运动边界,通过调整分层和缩减系数,在闸门运动边界附近动态增加或减少网格层数,可有效避免动网格变形产生负体积,提高计算精度。平板闸门网格采用三角形网格,流体域网格采用四面体网格,使用标准壁面函数,对闸门处网格进行加密,闸门网格起始步长为 0.1 m ,增长率为 1.12 。开展网格无关性分析,分别生成3种流体域体网格,网格尺寸分别为 0.35 、 0.5 、 1 m ,对应网格总数分别为 $3\ 868\ 704$ 、 $1\ 960\ 021$ 、 $1\ 103\ 815$,如图5所示。

提取闸门前后面板水头差作为评判指标,并与模型试验结果进行对比, 0.35 、 0.5 、 1 m 网格计算误差分别为 0.1% 、 1.7% 、 8.2% , 0.35 m 网格和 0.5 m 网格计算误差接近。考虑计算精度和计算效率,后

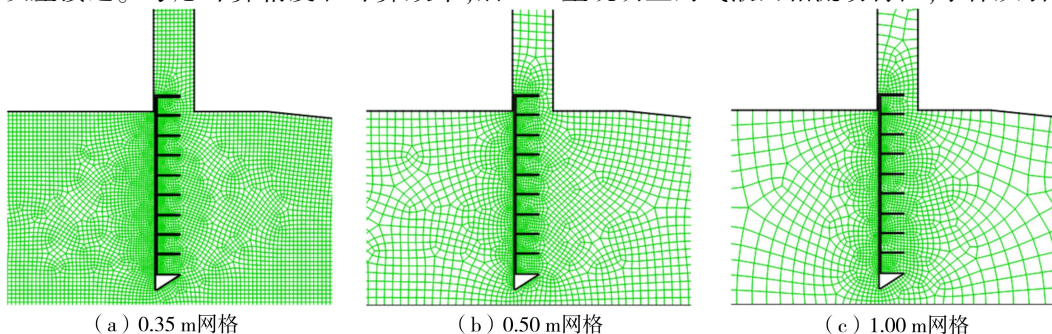


图5 模型网格划分

续使用 0.5 m 网格模型进行数值模拟分析。网格质量指标包括:最大单元挤压值为 0.727 ,最大单元偏斜度为 0.785 ,最大纵横比为 162 。

使用FLUENT软件对离散模型进行水动力性能分析^[30],使用VOF二相流模型计算空气和水的体积分率,空气为主相,水为次相,入口采用压力入口,出口采用压力出口,闸门井上表面采用空气入口,闸门设置为移动边壁,通过自定义函数(UDF)实现闸门关闭,闭门速度与原型闸门一致,其余边界均为固壁。控制方程包括雷诺平均纳维-斯托克斯方程,湍流模型使用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[31],使用分离式SIMPLE(压力耦合方程半隐式方法)进行压力-速度耦合计算,时间步长为 0.01 s ,确保计算结果具有良好的收敛性。

2.4 模型验证

不同闸门开度(e)下,4个压力传感器测点的压强对比如图6(a)~(c)所示;3号测点在不同闸门开度下的压强分布如图6(d)所示;当闸门开度为 1 m 时,3号测点在不同上下游水头差(H)和弧形闸门开度(A)下的压强对比如图6(e)~(f)所示。

使用平均绝对相对误差(MARE)^[32]对计算结果进行分析。由图6可知,当闸门开度为 4 、 1 、 0.2 m 时,测点压强的MARE值分别为 2.1% 、 7.2% 、 2.6% ;对于3号测点,不同平板闸门开度、不同上下游水头差和不同弧形闸门开度下,压强的MARE值分别为 3.3% 、 6.2% 和 3.6% 。误差值均小于 8% ,误差可能来源于试验过程和网格质量。数值模拟计算值与模型试验测量值结果接近,表明CFD方法能够较精确地捕捉并反映实际工程的水动力特性。

3 结果与分析

3.1 水动力性能

闸门闭门过程中,不同闸门开度下的流场流速分布和压力分布如图7和图8所示。

由图7可知,闸门在自由出流闭门过程中,流场呈现明显的气液两相流动特征,水体从引水口进入,

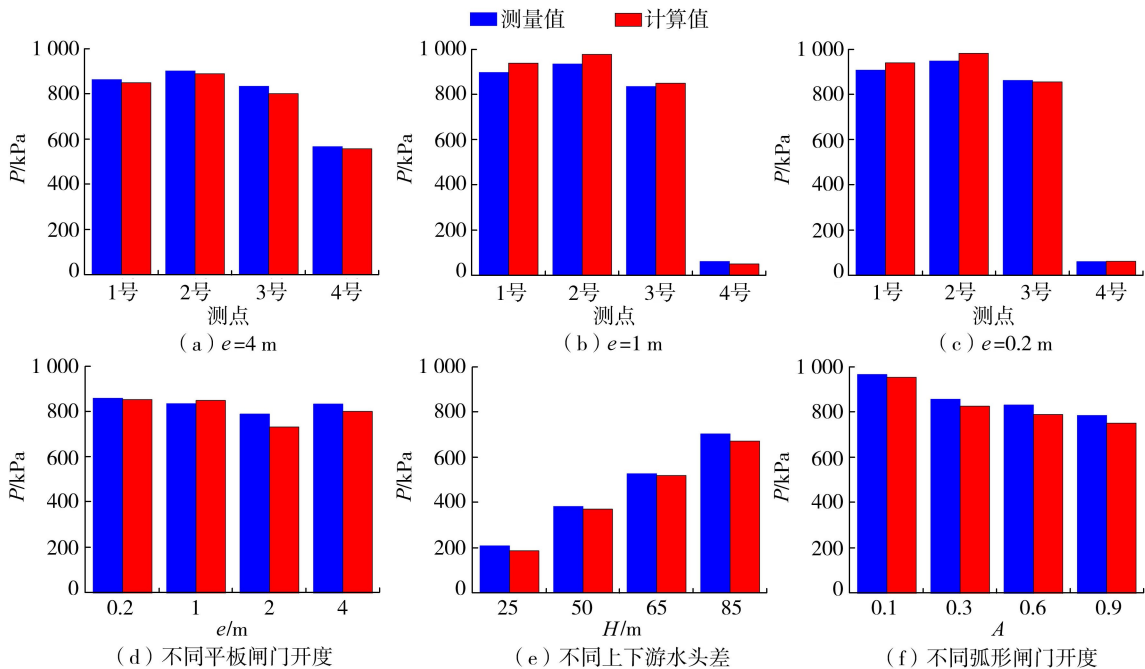


图6 不同情况下压强测量值与计算值对比

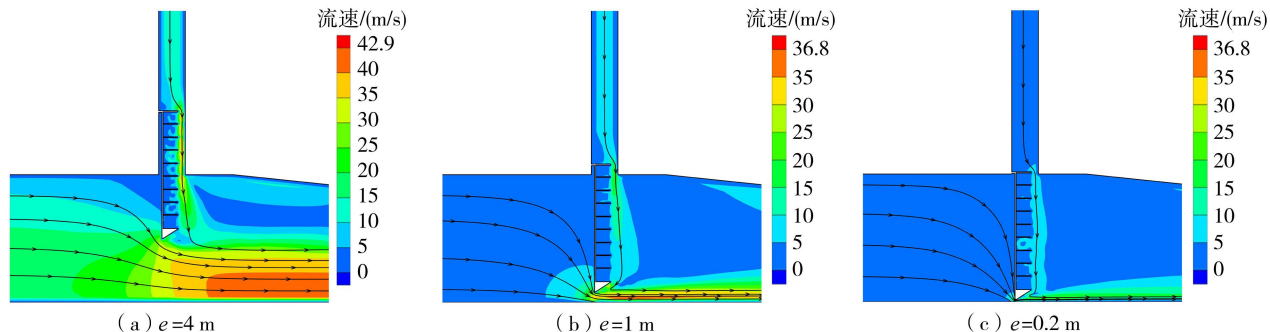


图7 不同闸门开度下的流速分布

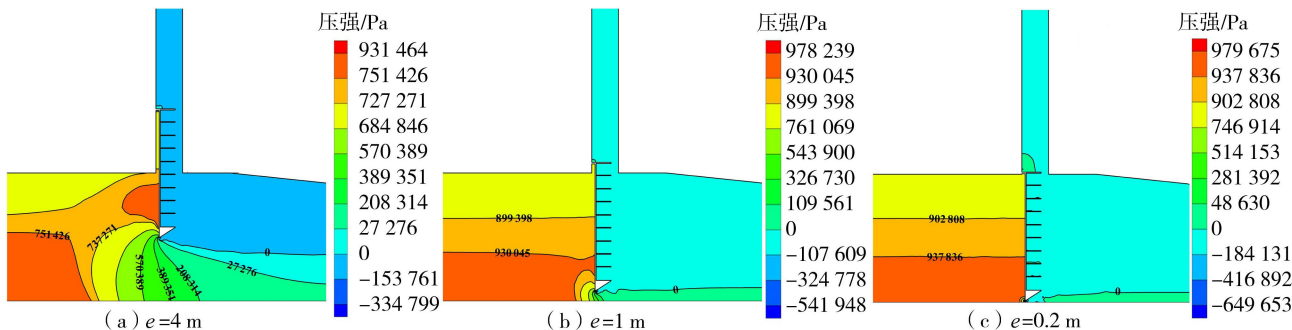


图8 不同闸门开度下的流场压力分布

空气从闸门井进入,小开度时水流如同射流,流场中几乎未见明显涡流。数值方面,随着闸门开度减小,水流速度并未相应降低。

由图8可知,高压区主要集中在闸门上游,下游压力近乎为零,在闸门底部过流边缘处可见显著的压力梯度,表明闸门只受上游单向水头作用。梁板上下表面压力相近,几乎不受水重力影响。闸门闭门过程中,闸门上游压力持续增大,下游压力仍然为零,表明闸门受到的水推力逐渐增大,而水重力变化较小。

3.2 闭门卡阻

不同开度下闸门受到的水重力和水推力如图9所示。由图9可知,随着闸门开度减小,闸门受到的水推力显著增大,而水重力变化较小,数值比水推力小两个量级,说明当水封位于闸门上游时,水重力对闸门动水闭门的贡献较小。

闸门闭门卡阻时,绳索拉力为0,此时式(1)可写为:

$$\mu_p = (G_g + F_b - F_p)/F_n \approx G_g/F_n = G_g/\rho gh_n A_1 \quad (4)$$

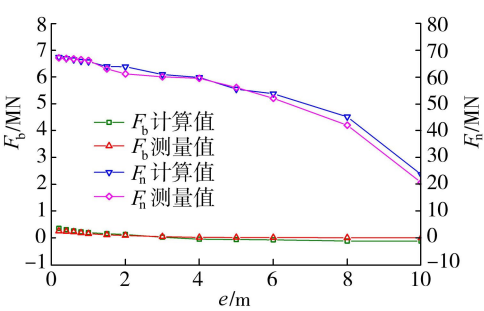


图9 不同开度下闸门受到的水重力和水推力

式中: μ_p 为许用摩擦系数; ρ 为密度; g 为重力加速度; h_n 为闸门前后水头差。

由式(4)可知,自由出流下,当水封位于闸门上游时,闸门自重、面板挡水面积均为定值,作用于闸门的水压力最大值为设计水头 100 m,因此闸门存在最小摩擦系数,即闸门可完全关闭时的许用摩擦系数。水推力作用面积 $A_1 = 73.8 \text{ m}^2$,计算可知许用摩擦系数为 0.047,即当闸门摩擦系数小于 0.047 时,闸门可实现完全关闭。

提取闸门卡阻时的自重、水重力和水推力等参数,反推当前摩擦系数,如表 1 所示。

表 1 闸门实际摩擦系数计算结果

工况	e/m	G_g/kN	F_b/kN	总竖向力/ kN	F_n/kN	μ
1	4.8	1 102	17.3	1 119.3	10 271	0.109
2	10.4	1 102	-57.6	1 044.4	10 203	0.101

通过计算得知,当闸门开度为 4.8、10.4 m 时,实际摩擦系数均约为 0.1,远大于许用摩擦系数 0.047。实际工程中,闸门经过一段时间应用,滑轮、滑块和导轨都会出现不同程度的磨损锈蚀,导致摩擦系数较设计值明显增大,如班多水电站的闸门设计摩擦系数为 0.06,实测值为 0.196^[2];密云水库的闸门设计摩擦系数为 0.11,实测值为 0.27^[5];泗阳节制闸的闸门设计摩擦系数为 0.15,实测值为 0.3^[7];万安水电站的闸门设计摩擦系数为 0.11,实测值为 0.2^[33];柘林水电站的闸门设计摩擦系数为 0.11,实测值为 0.28^[34];小江水库的闸门设计摩擦系数为 0.12,实测值为 0.3^[35];黄壁庄水库的闸门

设计摩擦系数为 0.1,实测值为 0.264^[36]。当摩擦力过大,闸门自重和水重无法克服摩擦力时,闸门出现卡阻现象,最终导致闭门失效。因此,摩擦系数过大是平板闸门闭门卡阻的重要原因。

4 解决对策

4.1 支承材料

闸门支承材料随着使用时间的延长日趋老化,材料的硬度、弹性模量、抗压强度、润滑效果都发生变化,摩擦系数逐渐增大,承载能力相应降低,从源头上降低摩擦系数是解决闸门闭门卡阻的有效方法。

针对支承材料的老化特性,在使用一定时间后要及时更换,在施工安装和运行期间应尽量减少阳光直射,加强材料表面的清洁和保养,尽量减缓老化速度。同时,应提升滑道的加工与安装工艺,提高滑道的光洁度,并消除错牙、扭曲等缺陷,从而避免安装缺陷引发的刨削、犁沟等异常磨损,并降低运行摩擦力。应急启闭时,可在滑道表面涂抹一定比例的润滑材料,如二硫化钼和酚醛清漆汽油混合液,降低支承材料的摩擦系数^[37-38]。另外,开发抗磨、减摩和抗震特性的新型支承材料,代替传统的胶木、铸铁等材料,是延长其服务周期、减少维护频次的重要方向,也是闸门优化设计的趋势。

4.2 闸门自重

通过式(4)可知,当摩擦系数为 0.109 时,若想实现闸门完全关闭,闸门自重需为 847 t。虽然足量配重可使闸门完全关闭,但过大的重量会对闸门自身结构安全造成影响,另外,当摩擦系数增大时,需额外增加配重。因此,当闸门摩擦系数较小时,可考虑适当增加配重来关闭闸门;当闸门摩擦系数较大时,增加配重在现实中难以实现。

4.3 上下游水头差

当闸门开度为 1 m 时,不同上下游水头差下流场压力分布和闸门受力如图 10 和图 11 所示。由图 10 可知,改变上下游水头差时,闸门下游压力为

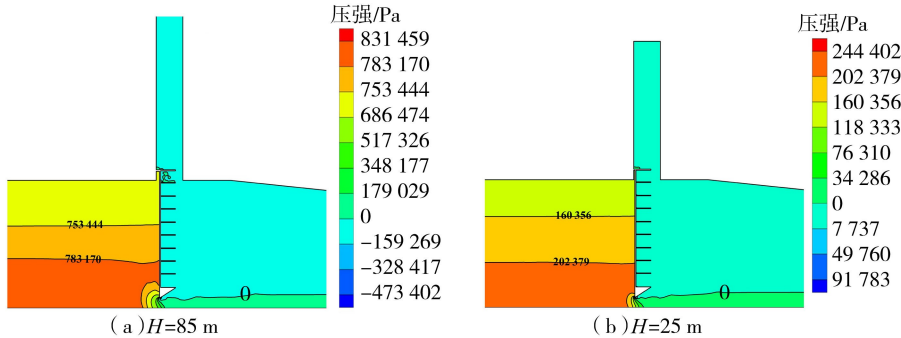


图 10 不同上下游水头差下的流场压力分布

零,上游压力呈现明显变化。由图 11 可知,随着水头差降低,作用在面板上游的压力减小,此时摩擦力降低,而水重力与闸门自重的合力变化较小。因此,当闸门发生卡阻事故时,通过泄洪来降低上下游水头差,或者在下游出口设置尾水结构,将尾水壅高,减小作用在闸门上的摩擦力,可促进闸门关闭。

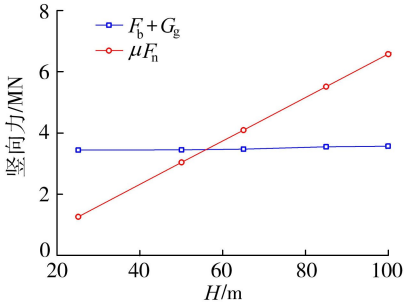


图 11 不同上下游水头差下的闸门受力

4.4 分段闸门

将整体闸门设计成分段形式,两段闸门分别下落,当下半段落地后,上半段开始下落。分段长度 $l=6\text{ m}$ 时的闸门流场如图 12 所示,不同分段长度下闸门受力如图 13 所示。由图 12 可知,下半段闸门下落时,水流从闸门上下两侧流向下游,压力在上下两侧过流处均呈梯度变化,闸门下游面压力基本为零。上半段闸门下落时,流场压力分布与整体闸门下落时几乎相同,在闸门下侧过流处呈现梯度变化。由图 13 可知,随着闸门长度减小,水重力与闸门自重的合力变化较小,而摩擦力显著减小,因为分段闸门减小了水推力作用面积。因此,将整体闸门设计成分段形式分别下落,可有效减小摩擦力,在较大的

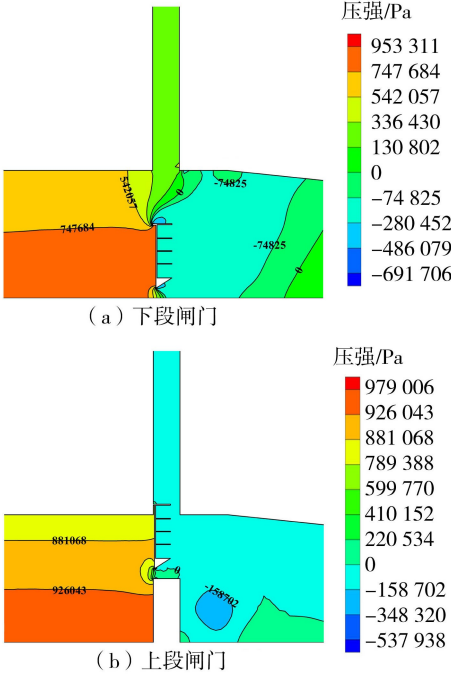


图 12 分段闸门压力分布

摩擦系数下仍可实现闸门关闭。

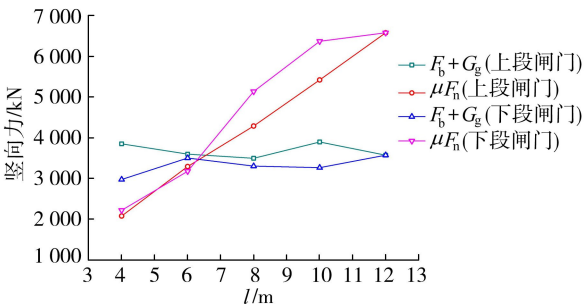


图 13 不同分段长度下的闸门受力

4.5 弧形闸门开度

当闸门开度为 1 m 时,改变弧形闸门开度,流场压力分布和闸门受力如图 14 和图 15 所示。

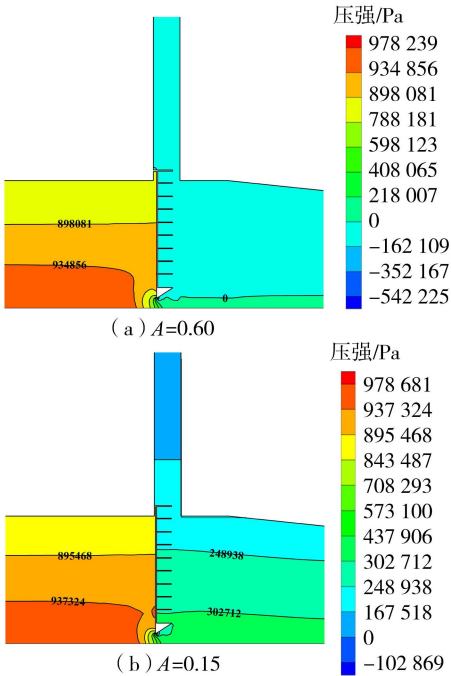


图 14 不同弧形闸门开度下的流场压力分布

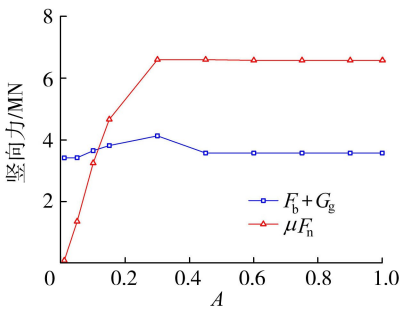


图 15 不同弧形闸门开度下的闸门受力

由图 14 可知,不同弧形闸门开度下,闸门上游压力基本一致,下游压力变化明显,小开度时下游压力升高,主要因为弧形闸门影响过闸流量及作用在平板闸门上的压力水头。由图 15 可知,随着弧形闸门开度减小,闸门水重力与自重的合力基本不变,而摩擦力初期保持稳定,后期逐渐减小,当弧形闸门开度小于 0.15 时,水重力与自重的合力大于摩擦力,

平板闸门可继续关闭。因此,当突遇紧急情况需要切断流道,而平板闸门无法迅速关闭时,可适当减小弧形工作闸门开度来促使平板闸门关闭,这在紧急事故时可作为一种备用选项。

5 结 论

- a. 自由出流下,平板闸门上游压力呈静压分布,下游压力为零,此时平板闸门受单向水推力作用,当水封位于闸门上游时,梁板几乎不受水重力。
- b. 对于运行在自由出流下上游水封的平板闸门,许用摩擦系数与闸门自重、水推力作用面积和上下游水头差有关。闸门运行一段时间后,滑块、滑轮和滑轨等会出现不同程度的老化生锈,引起摩擦系数增大,当实际摩擦系数大于许用摩擦系数时,平板闸门出现卡阻现象,摩擦系数过大是平板闸门闭门卡阻的重要原因。
- c. 更换老旧的支承材料,做好润滑保养工作,开发高性能支承材料来代替传统材料,降低支承材料的摩擦系数,有利于平板闸门关闭。当摩擦系数较小时,适当增加配重有利于平板闸门关闭,当摩擦系数过大时,增加配重难以实现闸门关闭。减小上下游水头差可减小作用于闸门的水推力,有利于闸门关闭。闸门分段下落可减小水推力作用面积,水重力基本不变,摩擦力明显减小,有利于闸门关闭。适当关闭弧形闸门可减小作用于平板闸门的水推力,水重力基本不变,摩擦力明显减小,有利于平板闸门关闭。

参考文献:

[1] 董志伟. 水电站进水口闸门未正常闭门分析及处理 [J]. 水电与新能源,2024,38(5):40-44. (Dong Zhiwei. Analysis and treatment of an abnormal closing fault of a water intake gate in a hydropower station[J]. Hydropower and New Energy,2024,38(5):40-44. (in Chinese))

[2] 王志刚,洪羽. 小浪底水库低水位、高含沙水流对闸门运用的影响[J]. 河南科技,2021,40(7):57-59. (Wang Zhigang,Hong Yu. A brief analysis of the influence of low water level and high sediment flow on gate operation in Xiaolangdi Reservoir[J]. Journal of Henan Science and Technology,2021,40(7):57-59. (in Chinese))

[3] 高训宇. 潮河人防隧洞进口事故门胶木滑道的运行隐患及处理措施[J]. 北京水务,2018(5):49-52. (Gao Xunyu. Safety hidden danger and treatment plan of bakelite chute of entrance emergency gate to civil defense tunnel of Chao River in Miyun Reservoir [J]. Beijing Water,2018(5):49-52. (in Chinese))

[4] Qi Huijun, Li Tongchun, Liu Xiaoqing, et al. Study on failure of an ecological tunnel gate caused by jet-flow from air vents [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79:

1043-1057.

[5] 刘须朋,王卫,刘厚爱,等. 泗阳节制闸闸门启闭卡阻原因分析 [J]. 山西水利科技, 2013 (4) : 21-23. (Liu Xuping,Wang Wei,Liu Houai,et al. Analyzing the causes of blocking the lifting and lowering of gate of Siyang regulation sluice[J]. Shanxi Hydrotechnics,2013(4):21-23. (in Chinese))

[6] Sheng Chuanming, Liu Fang, Ma Chao, et al. Application of CFD to predict the sluice gate jammed [J]. Journal of Hydraulic Research,2023,61(5):686-702.

[7] 陈林. 高水头平面闸门闭门失效与结构破坏机理研究 [D]. 天津:天津大学,2020.

[8] Naudascher E, Kobus H E, Rao R P R. Hydrodynamic analysis for high-head leaf gates [J]. Journal of the Hydraulics Division,1964,90(3):155-192.

[9] Naudascher E, Rao P V, Richter A, et al. Prediction and control of downpull on tunnel gates [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1986,112(5):392-416.

[10] Markovic-Brankovic J,Drobier H. New high head leaf gate form with smooth upstream face[J]. TEM Journal,2013,2(1):3-12.

[11] 杨敏,牛利敏,陈林,等. 长输水隧洞中段有压平面闸门启闭力及稳定性试验[J]. 水利水电科技进展,2016,36(3):41-46. (Yang Min, Niu Limin, Chen Lin, et al. Experimental study on hoisting force and stability of pressured plane gate located in Middle of long water delivery tunnel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(3):41-46. (in Chinese))

[12] Ameen S,Taher T,Ahmed T M. Effects of geometrical and flow rates on the prediction of bottom pressure coefficients of tunnel lift gate of dams[J]. Journal of the Institution of Engineers(India):Series A,2018,99(4):741-749.

[13] 刘昉,谷欣玉,李文胜,等. 动水关闭的平面事故闸门门体型优化试验研究 [J]. 农业工程学报,2019,35(12):142-149. (Liu Fang, Gu Xinyu, Li Wensheng, et al. Structural optimization of emergency plate gate for closure in moving water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (12) : 142-149. (in Chinese))

[14] 肖志乔,孙嘉华,盛军. 金汇港南闸中孔大宽高比平面直升门的振动特性分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(5):74-79. (Xiao Zhiqiao, Sun Jiahua, Sheng Jun. Analysis of vibration characteristics of planar vertical-lift gate with large aspect ratio in middle hole of Jinhui Harbor South Gate [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(5):74-79. (in Chinese))

[15] Wang Yanzhao, Xu Guobin, Liu Zhicheng, et al. Experimental study on the slip-stick vibration of plane gate [J]. Water,2024,16(6):912.

[16] 王延召. 平面闸门闭门振动及对持住力影响的研究 [D]. 天津:天津大学,2022.

[17] Amorim J C C,De Andrade J L. Numerical analysis of the

- hydraulic downpull on vertical lift gates [C]// Waterpower' 99: Hydro's Future: Technology, Markets, and Policy. Las Vegas: American Society of Civil Engineers, 1999: 1-9.
- [18] Kim D G. Numerical analysis of free flow past a sluice gate [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2007, 11 (2) : 127-132.
- [19] Kostecki S W. Numerical analysis of hydrodynamic forces due to flow instability at lift gate [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2011, 11 (4) : 943-961.
- [20] Ma Chao, Sheng Chuanming, Lian Jijian, et al. Failure analysis of a leaf gate jammed in closing process [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 110: 104391.
- [21] 马江霞. 平面闸门启闭过程中过闸水流水力特性数值模拟研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [22] 邵园园, 薛海朋, 薛铮, 等. 平板闸门闭门过程水流流态数值模拟研究 [J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9 (1) : 14-18. (Shao Yuanyuan, Xue Haipeng, Xue Zheng, et al. Numerical simulation of flow pattern in the process of bulkhead gate closing [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2023, 9 (1) : 14-18. (in Chinese))
- [23] 高志伟, 冯慧慧, 谢丽生, 等. 抽水蓄能电站尾水事故闸门-门槽流固耦合动力特性研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35 (6) : 139-148. (Gao Zhiwei, Feng Huihui, Xie Lisheng, et al. Dynamic characteristics of fluid-structure coupling of emergency gate-gate slot in pumped storage power stations [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35 (6) : 139-148. (in Chinese))
- [24] Aydin I, Telci I T, Dundar O. Prediction of downpull on closing high head gates [J]. Journal of Hydraulic Research, 2006, 44 (6) : 822-831.
- [25] Uysal M A. Prediction of downpull on high head gates using computational fluid dynamics [D]. Ankara: Middle East Technical University, 2014.
- [26] 刘昉, 赵梦丽, 冷东升, 等. 不同底缘形式的平板闸门水力特性数值模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (5) : 46-50. (Liu Fang, Zhao Mengli, Leng Dongsheng, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of plain gate with different types of bottom edges [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (5) : 46-50. (in Chinese))
- [27] Koken M, Aydin I, Sahin A. Application of computational fluid dynamics to predict hydrodynamic downpull on high head gates [J]. Engineering Computations, 2017, 34 (4) : 1191-1203.
- [28] Wang Yanzhao, Xu Guobin, Liu Fang. Holding force and vertical vibration of emergency gate in the closing process: physical and numerical modelling [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (18) : 8440.
- [29] 孟万尚, 李琳, 赵帅杰. 梯形闸门出流流动特性研究 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (1) : 32-38. (Meng Wanshang, Li Lin, Zhao Shuaijie. Research on flow characteristics of trapezoidal sluice gate discharge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (1) : 32-38. (in Chinese))
- [30] 盛传明, 练继建, 刘昉, 等. 深水水库下泄低温水治理挡水幕布受力研究 [J]. 水利学报, 2016, 47 (12) : 1548-1557. (Sheng Chuanming, Lian Jijian, Liu Fang, et al. Force analysis on water barrier curtain for released flow with low temperature from deep reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (12) : 1548-1557. (in Chinese))
- [31] 王树杰, 盛传明, 袁鹏, 等. 潮流能水平轴水轮机湍流模型研究初探 [J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44 (5) : 95-100. (Wang Shujie, Sheng Chuanming, Yuan Peng, et al. A study on turbulence models of horizontal axis tidal current turbines [J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44 (5) : 95-100. (in Chinese))
- [32] Ma Chao, Sheng Chuanming, Lian Jijian, et al. Solidification sludge as a scour countermeasure in ocean engineering [J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110423.
- [33] 曾文英, 刘万平. 万安水电厂进水口事故闸门滑块改造 [J]. 西北水电, 2012 (增刊 1) : 224-228. (Zeng Wenying, Liu Wanping. Renovation of slide blocks of emergency gate at power intake, Wan'an Hydropower Plant [J]. Northwest Hydropower, 2012 (S1) : 224-228. (in Chinese))
- [34] 李贵谋, 谢宝楠. TS-70A 滑道在柘林水电厂泄洪放空洞工作闸门的运用与原型观测 [J]. 华中电力, 1998 (2) : 2-5. (Li Guimou, Xie Baonan. Application and prototype observation of TS-70A slide tracks in service gates of spillway tunnels at Zhelin Hydropower Station [J]. Central China Electric Power, 1998 (2) : 2-5. (in Chinese))
- [35] 向定汉, 李新福, 李贵谋. 钢闸门支承滑道研究进展 [J]. 广西水利水电, 1997 (1) : 23-26. (Xiang Dinghan, Li Xinfu, Li Guimou. Study progress of steel sluice gate bearing slidingway [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 1997 (1) : 23-26. (in Chinese))
- [36] 张黎明. 几种水工闸门启门力摩擦系数原型观测成果分析 [J]. 水力发电, 1987 (8) : 35-40. (Zhang Liming. Analysis of prototype observation results on friction coefficients for opening force of hydraulic gates [J]. Water Power, 1987 (8) : 35-40. (in Chinese))
- [37] 顾蕴诚. 摩擦特性和闸门的安全运用 [J]. 水利建设与管理, 2001, 21 (6) : 44-46. (Gu Yuncheng. Friction characteristics and safe operation of gates [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2001, 21 (6) : 44-46. (in Chinese))
- [38] 王延召, 徐国宾. 平面闸门爬行振动物理模型试验研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (5) : 37-44. (Wang Yanzhao, Xu Guobin. Experimental study on physical model of slip-stick vibration of plane gate [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5) : 37-44. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-04-05 编辑: 俞云利)