

浮体驱动式双叶对向水力自控闸门研究

尚子善¹, 张晓东², 王春堂¹

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东泰安城市管理综合服务中心, 山东 泰安 271018)

【摘要】传统闸门由外动力控制, 而闸门本身自重大, 水压力大, 所需提升力大, 电能消耗大。浮体驱动式双叶对向水力自控闸门以上游水源为动力, 通过调节进水阀和放水阀, 控制浮体室内水位的升降, 进而控制浮体的升降, 控制闸门转动, 实现水力自控。且无电力消耗, 无需配套设施。通过模型试验, 确定浮体室水位上升高度与闸门开度的关系。分析闸门前后的水流流态, 探究不同流量及不同闸门开度条件下, 上下游水深及流速特性, 为实际应用提供理论依据。

【关键词】 闸门; 浮体驱动; 水力自控

【中图分类号】 TV698

【文献标志码】 A

【文章编号】 1009-6159(2025)-11-0052-05

Research on Floating Body-Driven Double-Leaf Opposed Hydraulic Self-Controlled Gate

SHANG Zishan¹, ZHANG Xiaodong², WANG Chuntang¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China;

2. Comprehensive Urban Management Service Center of Tai'an Municipality, Tai'an 271018, Shandong, China)

Abstract: Traditional gates are controlled by external power. However, the gates themselves are heavy, subject to large water pressure, requiring large lifting force and resulting in high power consumption. The floating body-driven double-leaf opposed hydraulic self-controlled gate uses upstream water as power. By adjusting the water inlet valve and drain valve, it controls the rise and fall of the water level in the floating chamber, thereby driving the floating body to lift or lower and controlling the rotation of the gate to achieve hydraulic self-control. It has no power consumption and does not require supporting facilities. Through model tests, the relationship between the water level rise in the floating chamber and the gate opening is determined. The flow patterns around the gate are analyzed, and the water depth and velocity characteristics upstream and downstream under different flow rates and gate openings are explored, providing a theoretical basis for practical applications.

Key words: Gate; Floating body drive; Hydraulic self-control

闸门可用以拦截水流, 控制水位、调节流量, 是水利工程中必不可少的一部分^[1]。目前闸门按照启闭方式主要分为机械操作启闭闸门和利用水压力变化控制启闭的水力自控闸门^[2]。传统闸门启闭由外动力控制, 需要配置启闭机等配套装置, 启闭机在设计选型上存在适用性低、启闭耗时高的问题。浮体驱动式双叶对向水力自控闸门的运行充分利用水能资源, 方便野外与临时工作, 减少人力及物力投入, 具有较好的生态效益和经济效益, 易于推广使用, 具有良好的市场前景。

1 模型试验

1.1 结构组成

浮体驱动式双叶对向水力自控闸门系统包括闸墩、工作闸、浮体室、第一传动系统、第二传动系统、水动力系统结构。闸门模型及其所在试验渠道为 PVC 材质硬板, 闸板由一块矩形板组成, 闸门的宽度, 高度均为 400 mm, 在中间固定闸门轴, 渠道断面为矩形断面, 宽、高均为

收稿日期: 2025-01-23

作者简介: 尚子善(2002—), 男, 本科生

400 mm, 渠道底坡为 1/2000。浮体驱动式双叶对向水力自控闸门正视图、俯视图如图 1、图 2 所示。

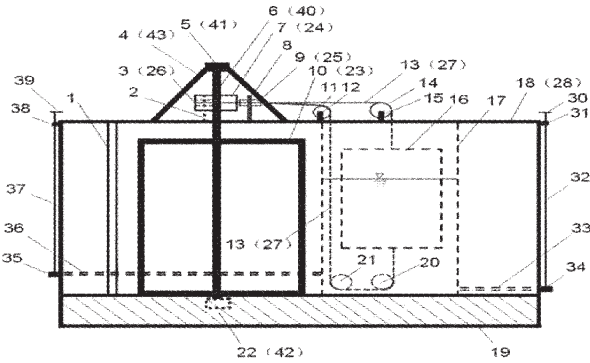


图 1 装置正视图

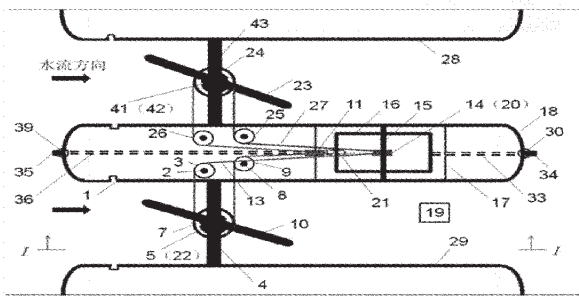


图 2 装置俯视图

注: 1. 检修闸门槽; 2. 第一滑轮的轮轴; 3. 第一滑轮; 4. 支架 I; 5. 第一轴承; 6. 门轴 I; 7. 第二滑轮; 8. 第三滑轮的轮轴; 9. 第三滑轮; 10. 闸门 I; 11. 第四滑轮; 12. 第四滑轮的轮轴; 13. 第一拉绳; 14. 第五滑轮; 15. 第五滑轮的轮轴; 16. 浮体; 17. 浮体室; 18. 中墩; 19. 闸底板; 20. 第六滑轮; 21. 第七滑轮; 22. 第二轴承; 23. 闸门 II; 24. 第八滑轮; 25. 第九滑轮; 26. 第十滑轮; 27. 第二拉绳; 28. 左边墩; 29. 右边墩; 30. 放水阀手柄; 31. 固定件 I; 32. 连杆 I; 33. 放水管; 34. 放水阀; 35. 进水管; 36. 进水管; 37. 连杆 II; 38. 固定件 II; 39. 进水管手柄; 40. 门轴 II; 41. 第三轴承; 42. 第四轴承; 43. 支架 II

闸门主要由矩形闸门、闸门轴组成。将闸门轴设置在矩形闸门中间轴线位置, 是利用闸门轴两侧的水压力相互平衡的原理, 以减小闸门启闭力。

对于双叶闸门, 两闸门通过绕线连接, 打开方式为对向双开式。使得各自闸门上产生的力矩再次自行平衡, 最大限度减少闸门启闭力, 闸门及浮体室正视图如图 3 所示。

浮体室靠近上游水源一侧设置供水管和进水阀, 内部设置浮体, 底部设置排水阀。浮体室及限位板装置详图如图 4 所示。浮体室的水位控制, 在上游水位较低时, 可用水泵供水控制, 此泵可兼做浮体室排水泵使用。浮体室内限位板由限

位槽室、连通管、限位槽、限位板、限位板固定架等组成。通过限位板调节限位槽内水位的高低, 利用连通管原理, 以控制浮体室内水位, 从而可以控制浮体的升降高度。

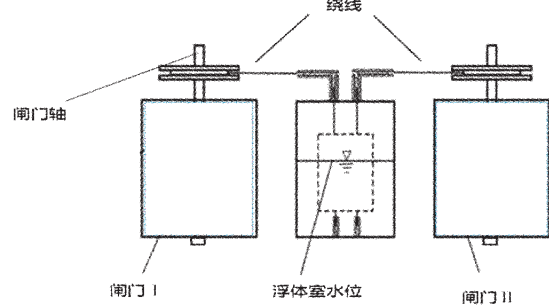


图 3 闸门及浮体室正视图

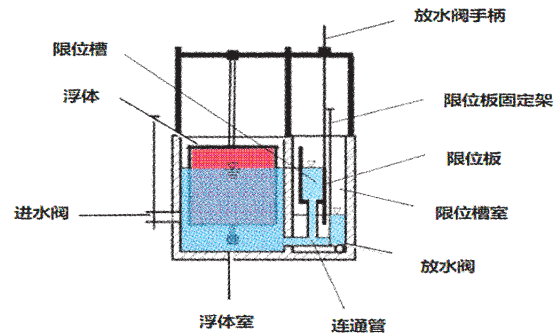


图 4 浮体室及限位板装置图

传动系统由 7 个滑轮及各自对应的轮轴组成, 详图如图 5 所示。传动系统将浮体竖直方向的浮力以及重力转变为水平方向的闸门启闭力。设置第七滑轮, 使拉绳对第六滑轮的包角减小, 减小摩擦力, 同时也有效避免浮体与拉绳干涉。

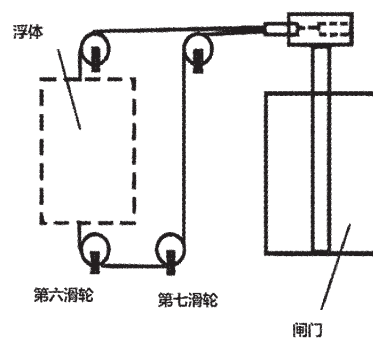


图 5 传动装置图

1.2 工作原理

1) 闸门的开启。如图 1、图 2 所示, 打开进水阀, 关闭放水阀, 浮体室内水位不断上升, 当浮体室内充入一定水量后, 浮体在水的浮力作用下开始逐渐上升, 浮体带动传动系统运作, 带动第一

拉绳和第二拉绳转动。闸门 I 和闸门 II 的开度大小是由限位板的高低控制的, 从而可以调节浮体室内水位的高低, 控制浮体的升降高度, 通过第一传动系统和第二传动系统, 调节闸门 I 和闸门 II 的开度。限位槽溢流出来的水流到限位槽室内, 再由排水管排出; 限位槽室起到保护限位槽、收集限位槽溢流出来的水的作用。

2) 闸门的关闭。如图 1、图 2 所示, 关闭进水阀, 打开放水阀, 浮体室内水位下降, 当浮体室内放出一定水量后, 浮体开始逐渐下沉, 浮体带动传动系统运作, 带动第一拉绳和第二拉绳转动, 达到关闭闸门的目的是。

2 模型试验

2.1 浮体室水位上升高度与闸门开度试验

探究浮体室内水位上升高度与闸门开度的关系, 闸门开度图如图 6 所示。设置闸门开度为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° , 测量此时浮体室水位的上升高度, 为实际应用提供理论依据。多次试验后得出数据, 分析试验结果, 整合数据后绘制拟合曲线, 浮体室水位上升高度与闸门开度拟合曲线图如图 7 所示。浮体室水位上升高度 (cm) 为 y 轴, 闸门开度 ($^\circ$) 为 x 轴, 得出 $y=0.5046x-0.2733$, 相关系数为 0.967, 相关拟合度较高, 二者之间有较强的相关性。

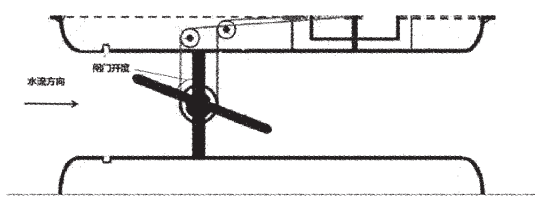


图 6 闸门开度图

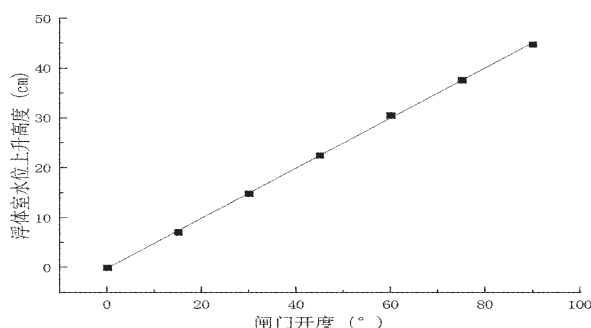


图 7 浮体室水位上升高度与闸门开度拟合曲线

2.2 闸门前后水流形态

观察通过闸门前后的水流流态, 整个过程分为 3 个阶段: 1) 闸门未开启时对应的水流流态。此时模型处于蓄水状态, 水流因受到闸门的阻挡, 闸前水流形态发生急剧变化而形成涡流, 上游水位不断增高, 下游无水流。2) 闸门开启时, 下游水流形态变化。闸门旋转过程中, 属于明渠非恒定非均匀急变流, 闸门后两侧闸墩处紊动强烈, 出现大量漩涡。3) 闸门开度最大时对应的水流流态。上游来水稳定, 水流流态平稳, 没有出现回流等不良流态, 上游水流在闸门及两侧闸墩处出现局部水位壅高, 下游呈现稳定的菱形波纹, 为明渠恒定非均匀急变流。

当上游来水量不变而闸门开度增加时, 由于闸门自重对闸门轴的力矩减小, 使闸门开启需要的启闭力减小, 闸门开度变大, 下游泄流量明显增加; 当闸门开度不变而上游来水量增加时, 由于闸前水流对闸门的作用力增加, 使上游水压力对闸门轴的力矩增大, 同样产生下游泄量增加的效果。闸门未开启时对应的水流流态如图 8 所示, 闸门开启时水流流态如图 9 所示, 闸门开度最大时对应的水流流态如图 10 所示。

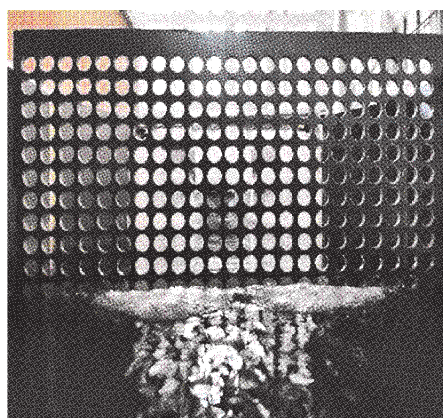


图 8 闸门未开启时闸前水流流态

2.3 不同流量与闸门开度上下游水深与特性

1) 试验方案。测量不同流量及闸门开度条件下的上下游水深及流速。综合考虑试验设备材料性质与模型尺寸, 在试验渠道上沿垂直渠道方向设置 2 个试验断面, 分别位于闸门上、下游处, 距离闸门的距离均为 200 mm, 且每个断面上设置 5 个测点, 试验以闸门开度和流量为变量, 闸门开度设置为 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° , 流量设置为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $75 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $125 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 、

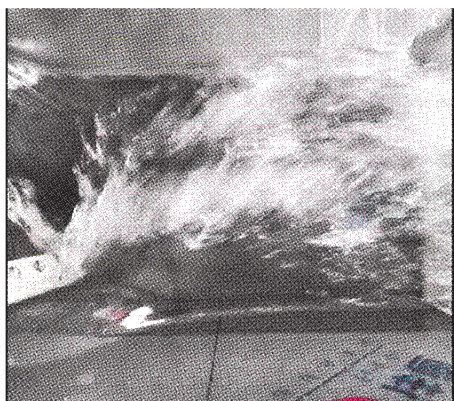


图9 闸门开启时闸后水流流态

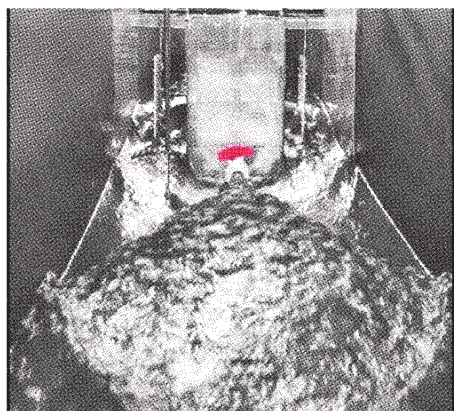


图10 闸门最大开度时水流流态

175 m³/h、200 m³/h,同时观测水流流态、绘制相关图表并分析数据,探讨不同流量及闸门开度条件下的上下游水深及流速,具体试验方案见表1。

2) 不同流量及闸门开度条件下上下游水深特征。在各组试验方案中,闸门在稳定工作状态时,不同流量及闸门开度条件下的上下游水深特征数据表见表2、表3,不同流量及闸门开度条件下的上下游水深特征图如图13、图14所示,分析图表可得出结论:上下游水深随来水量增加而提高。当Q=50~150 m³/h时,在同一流量条件下,上游水深随闸门开度增加呈现下降趋势,流量越大斜率越大;下游水深则随闸门开度增加呈现上升趋势,流量越大斜率越小。当Q=175~200 m³/h,在同一流量条件下,上下游水位基本稳定。不同流量及闸门开度条件下上游水深数据表见表2,不同流量及闸门开度条件下下游水深数据表见表3,不同试验方案下的上游水深如图11所示,不同试验方案下的下游水深如图12所示。

3) 不同流量及闸门开度条件下上下游流速特征。在各组试验方案中,闸门在稳定工作状态

表1 浮体驱动式双叶对向水力自控闸门试验方案

| 闸门开度/° | 流量 1/ (m ³ ·h ⁻¹) | 流量 2/ (m ³ ·h ⁻¹) | 流量 3/ (m ³ ·h ⁻¹) | 流量 4/ (m ³ ·h ⁻¹) | 流量 5/ (m ³ ·h ⁻¹) | 流量 6/ (m ³ ·h ⁻¹) | 流量 7/ (m ³ ·h ⁻¹) |
|--------|--|--|--|--|--|--|--|
| 30 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 |
| 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 |
| 50 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 |
| 60 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 |
| 70 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 |
| 80 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 |

表2 不同流量及闸门开度条件下上游水深数据表

| 闸门开度/° | 流量 1 上游水深/cm | 流量 2 上游水深/cm | 流量 3 上游水深/cm | 流量 4 上游水深/cm | 流量 5 上游水深/cm |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 30 | 12.28 | 14.16 | 15.67 | 16.27 | 17.04 |
| 40 | 12.18 | 13.55 | 15.55 | 15.54 | 16.61 |
| 50 | 12.09 | 13.32 | 14.56 | 15.5 | 15.87 |
| 60 | 12.01 | 13.25 | 13.95 | 15.1 | 15.34 |
| 70 | 11.89 | 13.07 | 13.14 | 14.89 | 14.92 |
| 80 | 11.85 | 12.24 | 12.95 | 14.85 | 14.88 |

表3 不同流量及闸门开度条件下下游水深数据表

| 闸门开度/° | 流量 1 下游水深/cm | 流量 2 下游水深/cm | 流量 3 下游水深/cm | 流量 4 下游水深/cm | 流量 5 下游水深/cm |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 30 | 7.4 | 9.61 | 12.1 | 12.63 | 14.88 |
| 40 | 8.32 | 10.25 | 12.27 | 13.34 | 14.47 |
| 50 | 8.62 | 9.77 | 12.41 | 13.49 | 14.79 |
| 60 | 9.34 | 10.48 | 12.43 | 13.72 | 14.83 |
| 70 | 9.97 | 11.39 | 13.06 | 13.21 | 14.27 |
| 80 | 10.61 | 11.52 | 13.24 | 13.33 | 14.89 |

时,不同流量及闸门开度条件下的上下游水流流速数据表见表4、表5,不同流量及闸门开度条件下的上下游的水流流速图如图15、图16所示,分析图表得出结论:上下游流速都随流量增大而增加;在同一流量条件下,上游流速受闸门影响较小,

基本保持稳定状态;流量较小时(Q=50~150 m³/h),下游流速随闸门开度增加呈现下降趋势,流量较大时(Q=175~200 m³/h),下游流速受闸门开度影响较小,基本保持稳定状态。不同流量及闸门开度条件下上游水深数据表见表4,不同流量及闸

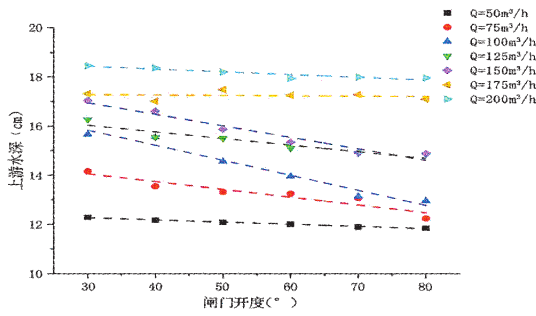


图 11 不同试验方案下上游水深

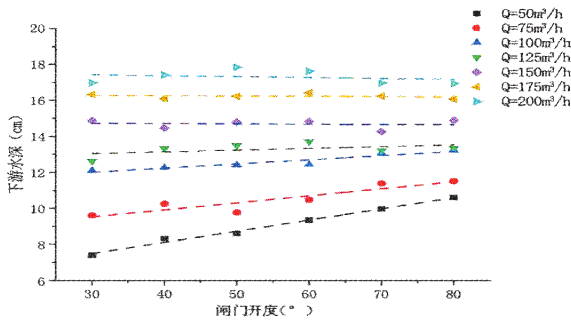


图 12 不同试验方案下下游水深

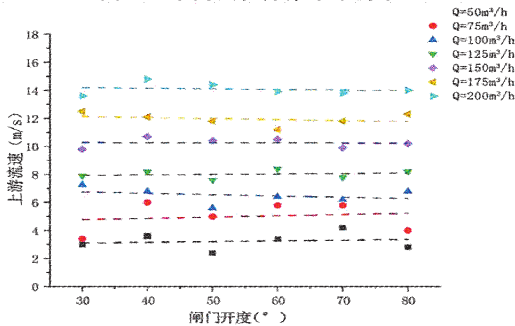


图 13 不同试验方案下上游流速

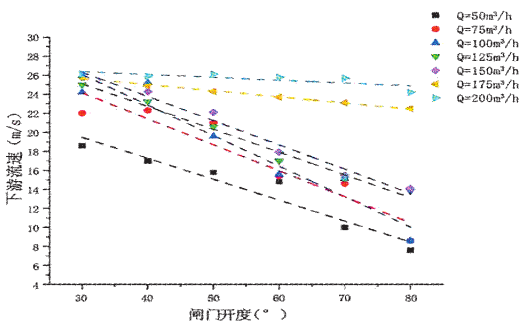


图 14 不同试验方案下下游流速

门开度条件下下游水深数据表见表 5, 不同试验方案下的上游水深如图 13 所示, 不同试验方案下的下游水深如图 14 所示。

3 结论

1) 浮体室水位上升高度与闸门开度之间存

表 4 不同流量及闸门开度条件下上游流速数据表

| 闸门开度/° | 流量 1 上 游水深/cm | 流量 2 上 游水深/cm | 流量 3 上 游水深/cm | 流量 4 上 游水深/cm | 流量 5 上 游水深/cm |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 30 | 3 | 3.4 | 7.26 | 7.9 | 9.8 |
| 40 | 3.6 | 6 | 6.8 | 8.2 | 10.7 |
| 50 | 2.4 | 5.0 | 5.6 | 7.6 | 10.4 |
| 60 | 3.4 | 5.8 | 6.4 | 8.4 | 10.5 |
| 70 | 4.2 | 5.8 | 6.2 | 7.8 | 9.9 |
| 80 | 2.8 | 4 | 6.8 | 8.2 | 10.2 |

表 5 不同流量及闸门开度条件下下游流速数据表

| 闸门开度/° | 流量 1 上 游水深/cm | 流量 2 上 游水深/cm | 流量 3 上 游水深/cm | 流量 4 上 游水深/cm | 流量 5 上 游水深/cm |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 30 | 18.6 | 22 | 24.2 | 25 | 25.8 |
| 40 | 17 | 22.3 | 25.2 | 23.2 | 24.3 |
| 50 | 15.8 | 21 | 19.6 | 20.6 | 22.1 |
| 60 | 14.8 | 15.4 | 15.6 | 17 | 17.9 |
| 70 | 10 | 14.6 | 15.1 | 15.1 | 15.5 |
| 80 | 7.6 | 8.6 | 8.6 | 13.8 | 14.1 |

在较好的相关性, 闸门开度随浮体室水位的上升而增大。

2) 在各组试验方案中, 闸门在稳定工作状态时, 上下游水深随来水量增加而增加, 在同一流量条件下, 上游水深随闸门开度增加呈现下降趋势; 在同一流量条件下, 下游水深随闸门开度增加呈现上升趋势。

3) 在各组试验方案中, 闸门在稳定工作状态时, 上下游流速都随流量增大而增加。在同一流量条件下, 上游流速受闸门影响较小, 基本保持稳定状态; 流量较小时, 下游流速随闸门开度增加呈现下降趋势, 流量较大时, 下游流速受闸门开度影响较小。

参考文献

- [1] 张政. 对开斜立轴式水力自控闸门水流特性研究[D]. 山东农业大学, 2020.
- [2] 王妮娜. 浮移式水力自控闸门水力特性研究[D]. 山东农业大学, 2019.
- [3] 申林, 徐丹, 王肇优等. 水利水电工程闸门启闭机的设计选型研究[J]. 中国设备工程, 2021, 479(16): 76.77.
- [4] 刘腾. 水力自控倾斜闸门水流特性实验研究[D]. 山东大学, 2018.

(责任编辑 张玉燕)