

钱思蓉, 许靖航. 调蓄池门式冲洗系统水流条件优化[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 167–172, 179.

QIAN S R, XU J H. Optimization of water flow conditions of gate flushing system of storage tank[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(5): 167–172, 179.

调蓄池门式冲洗系统水流条件优化

钱思蓉^{1,2,*}, 许靖航¹

(1. 上海城建市政工程<集团>有限公司, 上海 200065; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

摘要 【目的】为研究调蓄池门式冲洗构筑物内的水力冲洗流动特性,改善冲洗时不良流态,提高蓄水建筑物的冲洗效率,【方法】基于重整化群(RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型对上海市某雨水调蓄池建筑物内门式冲洗水流流态进行数值模拟。为便于具象化调蓄池冲洗效率,在最大冲洗流速和有效冲洗时间的基础上提出了冲洗效率的综合评价指标。以综合评价指标(F)为目标参量,优化廊道结构设计。【结果】控制门式冲洗闸门开度能有效提高廊道冲洗效率,控制闸门开度为 60° ,相比于传统的闸孔自由出流,其平均有效冲洗时间增加了28%,为1.36 s, F 提高了12%,为0.28;调蓄池廊道靠近闸门端采用“导流坡”的整流措施可以有效地改善闸门底部三角跌水区回流、漩涡等不良流态,通过模拟不同坡度导流坡冲洗过程得出,在导流坡坡度为 60° 时,平均有效冲洗时间最长,为6.95 s,平均最大冲洗流速最快,为4.06 m/s, F 为0.90。【结论】研究提出了针对门式冲洗闸门和调蓄池廊道设计的优化对策,建议通过控制门式冲洗闸门开度和增设导流坡的措施,提升调蓄池门式冲洗系统的清洗效果,减少人工清洗次数,节约运行成本,减少安全隐患。研究为调蓄池门式冲洗系统的设计及管理提供了理论依据与实践指导。

关键词 调蓄池 门式冲洗系统 水流流态 数值模拟 水力冲洗

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)05-0167-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.018

Optimization of Water Flow Conditions of Gate Flushing System of Storage Tank

QIAN Sirong^{1,2,*}, XU Jinghang¹

(1. Shanghai Urban Construction Municipal Engineering <Group> Co., Ltd., Shanghai 200065, China;

2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract [Objective] In order to study the hydraulic flushing flow characteristics in gate flushing building of the storage tank, improve the adverse flow pattern during flushing and flushing efficiency of water storage buildings, [Methods] the gate flushing flow pattern in the rainwater storage tank building of Shanghai was numerically simulated in this study based on the the renormalization group (RNG) $k-\varepsilon$ turbulence model. In order to facilitate the visualization of the flushing efficiency of the storage tank, a comprehensive evaluation index of the flushing efficiency was proposed on the basis of the maximum flushing flow rate and the effective flushing time. Taking the comprehensive evaluation index (F) as the target parameter, the optimal corridor structure design parameters were obtained. [Results] Controlling the opening degree of the portal flushing gate can effectively improve the efficiency of corridor flushing. When the gate opening was 60° , the average effective flushing time was increased by 28% to 1.36 s, and F was increased by 12% to 0.28, compared with the traditional gate free outflow. The rectification measures of "diversion slope" near the gate end of the regulating reservoir gallery can effectively improve the adverse flow patterns such as backflow and vortex in the triangular water drop area at the bottom of the gate. By simulating the flushing process of diversion slope with different slopes, it was concluded that when the slope of diversion slope was 60° , the average effective flushing time was the longest, which was 6.95 s, the average maximum flushing velocity was the fastest, which was 4.06 m/s, and the F was 0.90. [Conclusion] The research puts forward the optimization countermeasures for the design of the portal flushing gate and the storage tank corridor. It is suggested that the cleaning effect of the gate flushing system of the storage tank should be improved by controlling the opening degree of the gate flushing gate and adding the

[收稿日期] 2023-11-07

[通信作者] 钱思蓉(1996—),女,硕士研究生,研究方向为水环境与水生态、水力学等,E-mail: qsirong@foxmail.com。

diversion slope, so as to reduce the number of manual cleaning, save the operation cost and reduce the safety hazards. The research provides theoretical basis and practical guidance for the design and management of the gate flushing system of the storage tank.

Keywords storage tank gate flushing system flow pattern numerical simulation hydraulic flushing

城市初期雨水对河道造成的污染是各国城市水体污染的重要原因之一。近年来,调蓄池在治理初期雨水污染方面得到了广泛应用。雨水调蓄池在调蓄洪峰流量的同时,也可以通过工程措施和管理措施控制污染严重的初期雨水排至污水处理厂,避免污染物流入河湖污染源^[1-3]。在雨水调蓄池实际运行过程中,由于初期雨水中携带了道路和雨水管道内的污物杂质,在调蓄池存放一定时间后,杂质易沉积在调蓄池底部,若不及时清理,容易变质产生异味,长期处于半封闭状态甚至会产生含硫氰化物和含氧化合物,危及运行管理人员的生命。同时,底部淤泥及沉积物也减少了调蓄池的有效容积。因此,初雨调蓄池建设过程中必须考虑对底部污泥及沉积物的冲洗清理。冲洗过程应满足水流顺畅、流速均匀和不产生涡流等要求。目前比较常用的冲洗方式有水力冲洗翻斗、水射器冲洗、门式自冲洗系统等^[4]。

门式冲洗系统是利用水力学和机械结构原理的节能型冲洗方式^[5]。其主要运行方式是:在调蓄池廊道前端设储水池,在储水池底部设置闸门,当调蓄池排空储水池储满后,控制闸门瞬间开启,储水池的存水急速外泄,形成一股强力的波浪式冲击波,将廊道底污泥和垃圾卷起冲到廊道末端集水渠,从而起到冲洗的效果。门式冲洗系统因操作简单、冲洗效果好、无需外供水而得到了广泛的应用。

目前门式冲洗系统,存在调蓄池廊道前端及末端少许区域冲洗效果不佳、污泥杂物冲洗不净的现象。调蓄池廊道前端形成U形冲洗盲区,尤其是距离储水池壁20 cm范围内冲洗效果差,闸门两侧存在较多泥沙残留,主要是由于目前冲洗廊道设计中廊道底部与闸门底部成直角,闸门打开后水流瞬间释放形成水舌而导致廊道前端有冲洗盲区。调蓄池廊道末端泥沙残留,主要原因是:冲洗前期冲洗波强大,足以卷起廊道底部泥沙,为有效冲洗,冲洗后期冲洗波强度小,流速下降,流速已不足以卷起廊道末端黏附于池底的泥沙。清除剩余泥沙最常采用人工清洗法,该方法费时费力,效率低下,且存在安全隐患。

在调蓄池结构设计的设计过程中,不同的廊道坡度、廊道形状、冲洗闸门开度和存水高度等对冲洗效果都有影响。因此,评价调蓄池在不同结构设计下的冲洗效果是十分必要的。Guo等^[6]通过冲洗装置物理模型试验,研究了调蓄池污泥含水量、闸门开度及储水池水深对冲洗效果的影响,指出,较大的闸门开度加大了冲洗流速,从而加大了冲洗切应力,但减少了冲洗时间,冲洗流速与冲洗历时之间存在一定关系。Pisano等^[7]提出调蓄池末端冲洗水流速度 ≥ 1 m/s时,则冲洗波可以清除大部分沉积物。刘波^[8]通过调蓄池冲洗门水利测试,在保证冲洗廊道尽头时流速度为1.4 m/s,确保冲洗波在离出口5 m处的高度大于250 mm,至廊道尽头时大于200 mm的情况下,水力冲洗系统的运行工况与设备的设计值一致,符合设计及规范的要求,对无机沉积物冲洗效果满足运行要求。刘波^[8]在实际调试过程中还发现,进水流量较大时,冲洗门的冲击力较大,在长时间的反复直接冲击下,可能会影响到设备本身的安全,建议在此门上设置阻流设施。徐乾轲等^[9]研究了不同闸孔高度下最大冲洗流速随时间变化规律,研究结果表明,孔高越小的体型冲洗流速越大,最远冲洗距离越大,但是孔口处的冲洗盲区会相应增加。该研究关注了闸孔出流导致廊道前端冲洗盲区,指出闸孔孔高可以设置尽量较小,这样会提升冲洗效果。同时在冲洗廊道孔口处可以考虑单独设置冲洗设施,解决冲洗盲区的问题。在上述研究基础上,本文基于某一实际雨水调蓄池工程,针对目前廊道前端及末端泥沙残留,并且闸门下部直角区出现不良流态的问题进行研究,提出了控制闸门开度、增设导流坡以提高冲洗效率,以期在综合评价指标(F)达到最优时,得到最佳的廊道结构设计参数。

1 试验材料和方法

1.1 试验模拟系统

雨水调蓄池冲洗系统模型包括储水室、闸门、冲洗廊道及集水室。图1为1个标准雨水调蓄池示意图。储水室长为2.7 m,宽为4.2 m,本数值模拟中储水高度为2 m,储水室底部为坡度为20%的斜坡。储水室底部设门式冲洗闸门,闸门底部距离冲洗廊

道底板为 0.64 m, 闸门开口长为 2.8 m, 宽为 0.4 m。冲洗廊道长为 18 m, 宽为 4.2 m, 坡度为 1%。冲洗廊道末端为集水室, 用以收集冲刷污水泵送至市政污水管网。图 2 为闸门底部带“导流坡”的雨水调蓄池示意图, 导流坡坡度为 30%。

数据监测特征点布置如图 1~图 2 所示, 在廊道中线上等间距布置 4 个特征点, 可基本反映廊道内水流特点。

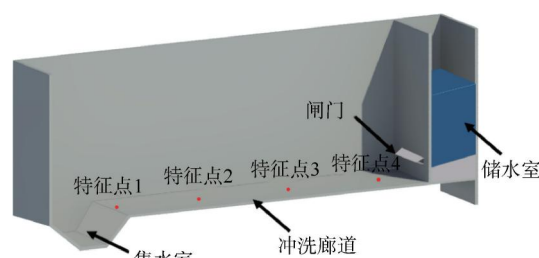


图 1 雨水调蓄池

Fig. 1 Rainwater Storage Tank

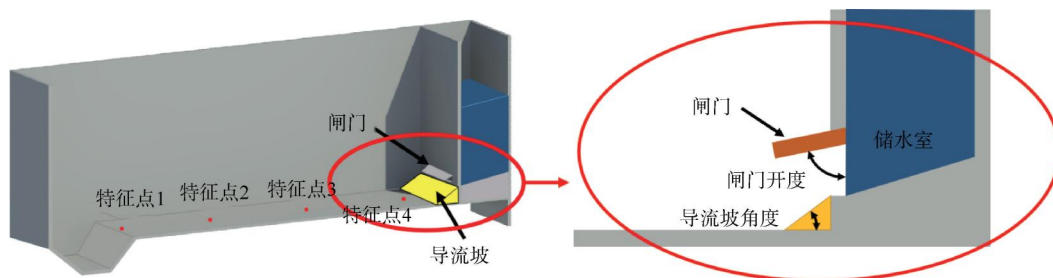


图 2 带导流坡雨水调蓄池

Fig. 2 Rainwater Storage Tank with Diversion Slope

COMSOL Multiphysics® 软件因其计算能力强、效率高, 被广泛应用于工程及科研领域, 其中计算流体动力学(CFD)模块用于执行计算流体力学仿真。本文研究调蓄池冲洗过程, 水流通常处于湍流状态, 冲洗廊道内往往存在旋涡、回流等不良流态, 遂选用 CFD 模块中重整化群(renormalization group, RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型, 依据上海市某雨水调蓄池建筑物构建模型进行数值模拟。

根据已建立的调蓄池几何模型, 对其进行网格剖分, 采用四面体网格划分。本模型储水池闸门处水流较为复杂, 遂在局部区域对网格单元进行加密处理, 以提升模型计算精度。网格单元的划分直接影响流体模型试验的结果精度和运算速度。网格剖分越细密结果越准确可靠, 但是过复杂的网格剖分会导致大量的计算消耗, 不利于研究进展。本模型经对比验证最终网格数为 257 万(标准雨水调蓄池)和 269 万左右(带导流坡雨水调蓄池), 经检查网格质量良好。

1.2 综合评价指标

调蓄池冲洗廊道的优化常采用最大冲洗流速和有效冲洗时间^[9]作为评价指标。为便于具象化调蓄池冲洗效率, 引入 F , 使 2 个评价指标结合为 1 个评价指标。本研究取各特征点处最大冲洗流速的平

均值为 $V_{\max}$, $V_{\max}$ 取值为 0~5 m/s, 取各特征点处有效冲洗时间的平均值为 T_a , T_a 取值为 0~7 s, 为统一 F 的取值范围, 通过数学关系得出 $V_{\max}/10 + T_a/14$ 的取值为 0~1, 当 F 的取值越接近 1, 表明各特征点处 $V_{\max}$ 越接近 5 m/s 以及各特征点处 T_a 越接近 7 s。因此, 可用 F 评判冲洗效率, 其公式如式(1)。

$$F = \frac{V_{\max}}{10} + \frac{T_a}{14} \quad (1)$$

2 结果与分析

2.1 不同闸门开度下的冲洗结果与分析

目前冲洗闸门结构为自冲洗模式, 闸门由水流瞬间重开, 开度不可控制, 导致冲洗前期流速过大, 冲洗时间短。为研究不同闸门开度下的冲洗效果, 探索固定闸门开度对冲洗效率的提升, 在其他条件相同的情况下设置闸门开度为 30°、40°、50°、60°、70°、80°、90°, 分别建立冲洗模型进行冲洗模拟, 模型闸门开度示意图如图 2 所示。以各特征点处流速 ≥ 1 m/s 的时间为有效冲洗时间^[4]。

在闸门开度为 50° 的情况下, 4 个特征点处流速随时间变化如图 3 所示。同一闸门开度下, 冲洗廊道内特征点 4、3、2、1 处最高流速分别为 2.02、1.92、1.69、1.62 m/s, 基本满足距离储水池越近, 最高流速越大的规律。这是因为越靠近闸门处, 水流

冲刷力越强,随水流冲洗廊道,流速衰减。

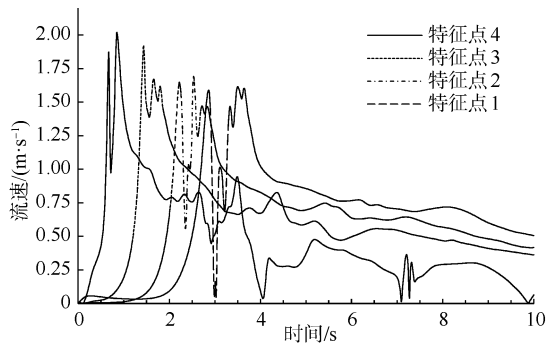


图3 闸门开度 50°各特征点处冲洗水流流速

Fig. 3 Flow Velocity of Each Characteristic Point at the Gate Opening of Degree 50°

不同闸门开度下,4个特征点处有效冲洗时长如图4所示,试验方案及结果如表1所示。7种不同闸门开度下,当闸门开度为30°时, $V_{\max}$ 和 T_a 2个指标皆最小,出流断面面积过小导致流速过小,更小的闸门开度只会使得冲洗效果更差。闸门开度大于30°且小于60°时,各特征点 T_a 随闸门开度的增大而加长;在闸门开度为60°时, T_a 最长,其中在特征点1处 T_a 最长,为1.36 s, F 也最接近1,为0.28。当闸门开度大于60°时,各特征点 T_a 随闸门开度的增

大而减小, $V_{\max}$ 变化幅度同样不大且无线性关系。这是因为在储水室水量相同的情况下,闸门开度越大,过流面积越大,冲洗流量变大,在冲洗断面不变的情况下,理论上增大了冲洗流速,但也会使得水量消耗更快,出口流速和冲洗流速的变化趋势不一致,导致总有效冲洗时间未继续增加。有效冲洗时间同时受流速及总冲洗时间影响,两者形成交互作用。 $V_{\max}$ 与闸门开度无线性关系,当闸门开度为80°时,最大冲洗流速为1.75 m/s,仅比闸门开度为60°时增大了0.6%。

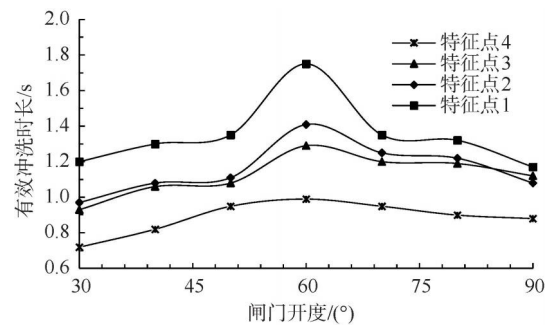


图4 不同闸门开度下各特征点处有效冲洗时长

Fig. 4 Effective Flushing Time of Each Characteristic Point under Different Gate Opening

表1 试验方案及结果(不同的闸门开度)

Tab. 1 Experimental Plans and Results (Different Gate Opening Degree)

指标	闸门开度						
	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$V_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.66	1.84	1.76	1.83	1.74	1.75	1.79
T_a/s	0.96	1.07	1.12	1.36	1.19	1.16	1.06
F	0.23	0.26	0.26	0.28	0.26	0.26	0.25

通过研究7种不同闸门开度下水流冲洗情况,闸门开度对廊道冲洗效果有影响,相比于传统的闸孔自由出流,控制闸门开度为60°时, T_a 增加了28%, F 提高了12%,为0.28,通过控制闸门开度的方式对廊道冲洗效率有一定程度的提升。

2.2 不同导流坡坡度下冲洗结果与分析

在标准调蓄池运维过程中,常见闸门下部淤泥不净、有泥沙残留的现象,尤其是廊道前端呈现U形冲洗盲区^[9],给运维管理单位造成一定工作负担,清运过程也有一定的安全风险。本文结合相关工程经验,考虑并通过增设导流坡的方法对标准调蓄池进行精细化设计。为分析不同导流坡角度的冲

洗效果,在其他条件相同的情况下设置导流坡角度为30°、45°、60°、75°与不带导流坡工况进行对比,分别建立冲洗模型进行冲洗模拟,导流坡角度如图2所示。以各特征点处流速 $\geq 1 \text{ m/s}$ 的时间为有效冲洗时间^[4]。

调蓄池冲洗过程中水的体积分数变化数值模拟结果如图5所示。在不带导流坡的情况下,闸门开启后1 s,即闸门开启初始阶段,部分冲洗水流冲出储水室以“水舌”的形态射入冲洗廊道,另一部分在闸门竖壁和廊道底板之间产生回流现象,并产生大量气泡,伴有能量转换。这是因为闸门底部距离廊道底板有一定的高差,使得来流在垂向扩散

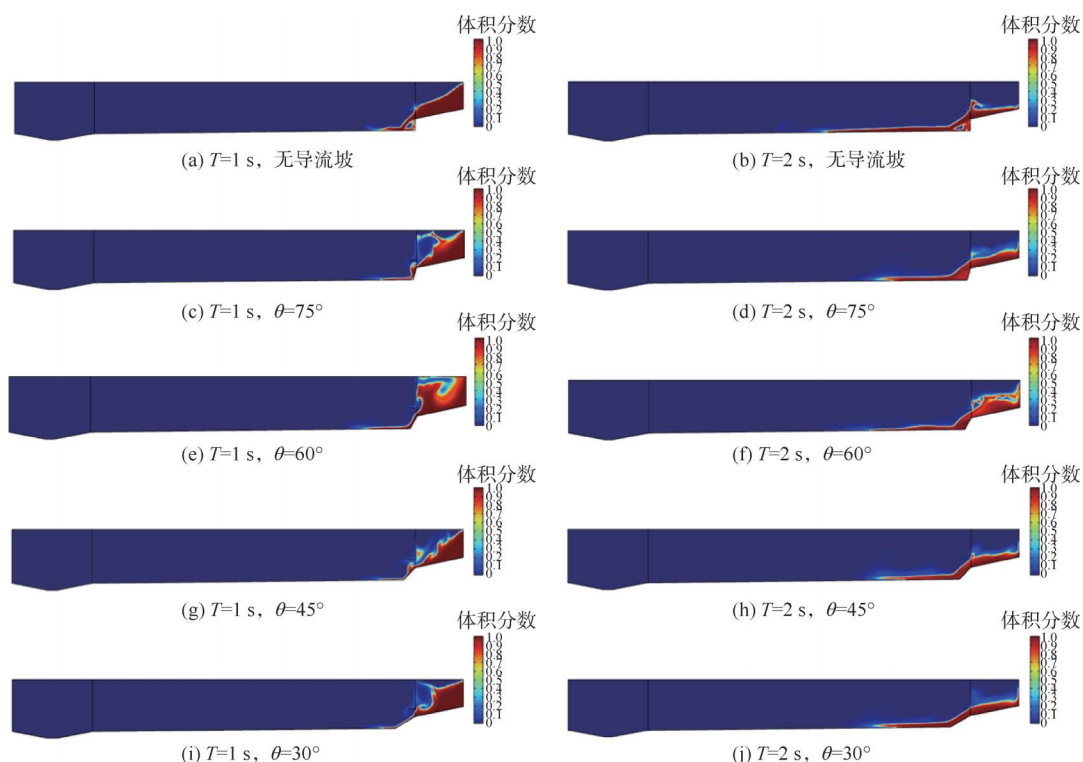


图5 各导流坡度下冲洗流态分布云图

Fig. 5 Distribution Cloud Diagram of Flushing Flow Pattern under Each Diversion Slope

不充分,进而出现了壁面分离的现象。三角回流区域的存在,使得冲洗能量减弱,流速不均匀,影响冲洗效果。

当导流坡为 75° 时,闸门开启后,可以观察到储水室内水流基本沿导流坡流动,廊道内基本不存在大范围的漩涡,也无明显回流及水舌现象,整体水流较为流畅,但仍伴有少量气泡,闸门开启后 2 s,闸门底部产生轻微回流现象,流速不均匀。

导流坡坡度为 60° 及以下时,闸门开启后,储水室内水流沿导流坡流动,经导流坡流入冲洗廊道,整体水流流畅,基本顺直流入廊道内,各时间段皆无明显不良流态,廊道进流条件良好,水损较少。

不同导流坡工况下各特征点处冲洗水流流速随时间变化曲线如图 6 所示。冲洗过程中大部分时间里,带导流坡工况的冲洗流速大于无导流坡的工况。无导流坡时,各特征点处最高冲洗流速为 $1.62 \sim 2.26 \text{ m/s}$,带导流坡的各特征点最高冲洗流速为 $2.94 \sim 4.90 \text{ m/s}$,设置导流坡对最高冲洗流速影响较大。另外,还可以发现距离储水池越远,冲洗流速受导流坡坡度影响越小。结合图 5 的流态分布云

图,与无导流坡的工况相比,增设导流坡能起到较好的导流作用,明显减少回流、漩涡等不良流态,减少水力损失。

各工况及结果如表 2 所示,相较于无导流坡的工况带导流坡的 T_a 显著增加,导流坡角度为 75° 、 60° 、 45° 、 30° , T_a 各增加了 5.01、5.59、4.30、3.53 s,这是因为导流坡使出流均匀,水损少,在储水量不变的情况下能够有效延长有效冲洗时间。在导流坡坡度为 60° 时, T_a 最长,增加了 5.59 s 当导流坡坡度继续变小趋于与廊道平接时, T_a 减少,这是因为此时流线更为平顺,其瞬时流速变大,储水量不变,时间便相应减少。相较于无导流坡的工况带导流坡的 $V_{\max}$ 也有明显增大,导流坡角度为 75° 、 60° 、 45° 、 30° , $V_{\max}$ 各提高了 2.08、2.23、1.93、2.1 m/s,结合图 5 的流态云图可知,导流坡解决了无导流坡时剧烈的回流和漩涡,使得流态得到了显著改善,但导流坡趋于与廊道平接时,这种改善作用会逐渐减小。 F 也在导流坡坡度为 60° 时最接近 1,为 0.9。

在实际工程中,导流坡坡度越大,需填筑的混凝土越少,对调蓄池储水量影响越小。遂增设导流坡

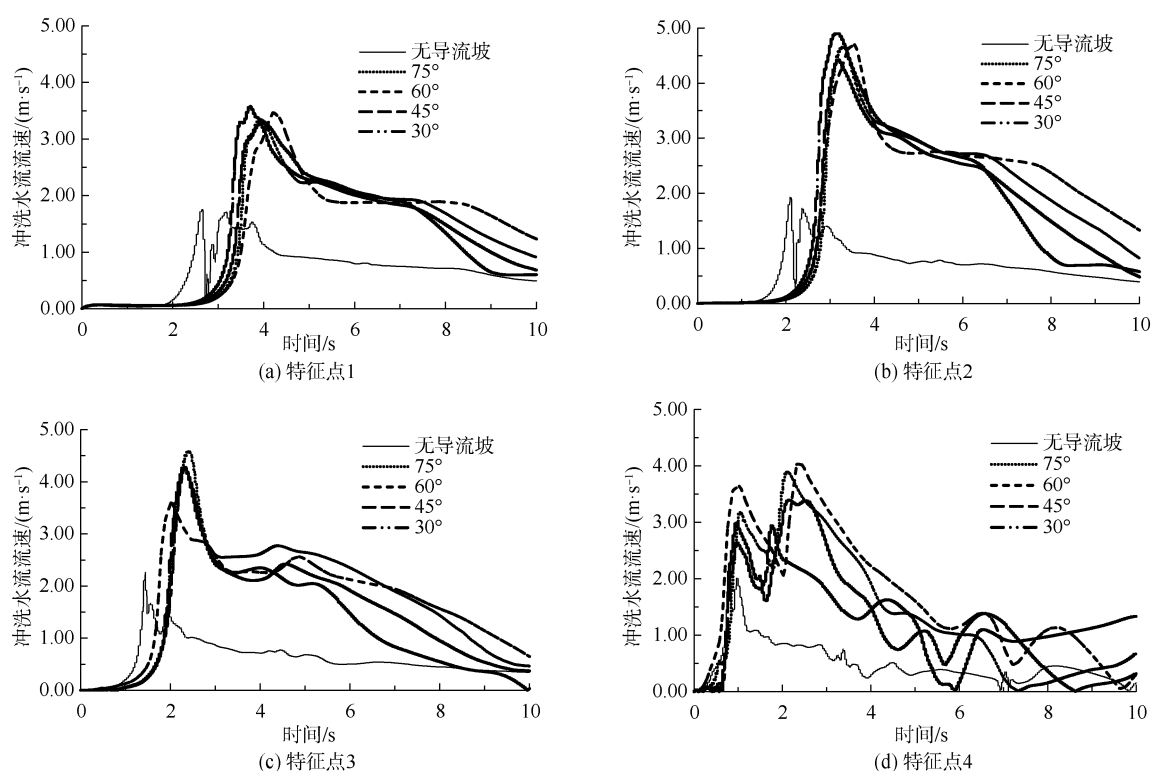


图 6 各特征点处冲洗水流流速
Fig. 6 Flow Velocity of Each Characteristic Point

表 2 试验方案及结果(导流坡)
Tab. 2 Experimental Plans and Results (Diversion Slope)

指标	导流坡坡度				
	无导流坡	75°	60°	45°	30°
$V_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.83	3.91	4.06	3.76	3.93
T_a/s	1.36	6.37	6.95	5.66	4.89
F	0.28	0.85	0.90	0.78	0.74

的方式施工简单且能显著改善水流流态,明显提高冲洗效率,在导流坡坡度为 60°时, T_a 最长, F 最接近 1, 冲洗效果最好, 且占用调蓄池储水容积较少。

3 结论

通过 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对调蓄池门式冲洗过程进行数值模拟, 研究了门式冲洗闸门开度对冲洗效果的影响并探索了针对闸门底部污泥残留的整流办法。主要得到以下结论。

(1) 通过数值模拟计算验证了控制闸门开度可以达到阻流作用, 控制冲洗水流流速, 延长平均有效冲洗时间, F 也有所改善。结果表明, 控制门式冲洗

闸门开度为 60°, 在廊道冲洗过程中 T_a 增加了 28%, F 提高了 12%, 为 0.28, 在调蓄池冲洗闸门设计中建议增加可控制闸门开度的装置。

(2) 目前廊道冲洗过程中闸门底部三角跌水区容易出现回流、漩涡等不良流态, 造成泥沙淤积、冲洗不到位, 影响门式冲洗效果及运行安全, 利用本文所提出的增设“导流坡”整流措施可以显著改善综合评价指标, 在导流坡坡度为 60°时, T_a 增加了 5.59 s, F 为 0.90。建议调蓄池廊道设计中增设“60°导流坡”, 以减少人工清洗次数, 节约运行成本, 减少安全隐患。

(下转第 179 页)

- (3): 52-56.
- [6] 梅艺锋, 李楠. 人工湿地工艺研究现状及影响因素分析[J]. 节能与环保, 2023(6): 43-46.
- MEI Y F, LI N. Research status and influencing factors analysis of artificial wetland technology [J]. Energy Saving and Environmental Protection, 2023(6): 43-46.
- [7] 杨新萍, 周立祥, 戴媛媛, 等. 潜流人工湿地处理微污染河道水中有机物和氮的净化效率及沿程变化[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2177-2182.
- YANG X P, ZHOU L X, DAI Y Y, et al. Removal efficiency of C and N in micro-polluted river through a subsurface horizontal flow constructed wetlands[J]. Environmental Science, 2008, 29(8): 2177-2182.
- [8] 石彬, 李志今. 表面流人工湿地群提升河流水质的工程实践[J]. 给水排水, 2023, 49(3): 54-59.
- SHI B, LI Z J. Engineering practice of surface flow constructed wetlands to improve water quality of inlet river of andromeda lake [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(3): 54-59.
- [9] 翟俊, 翟豪冲, 马宏璞, 等. 多级人工湿地对生活污水中磷素的去除规律[J]. 中国给水排水, 2020, 36(21): 75-79.
- ZHAI J, ZHAI H C, MA H P, et al. Mechanism of phosphorus removal from domestic sewage by multi-stage constructed wetland [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(21): 75-79.
- [10] 孙健, 杨明, 贺珊珊, 等. 沸石和页岩陶粒对沉积物营养盐释放的抑制效果试验[J]. 净水技术, 2023, 42(2): 140-146.
- SUN J, YANG M, HE S S, et al. Inhibitive effect test of nutrients release from sediments by zeolite and shale ceramics [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(2): 140-146.

(上接第 172 页)

参考文献

- [1] 何慧彬, 黄紫龙. 流域水环境治理中初雨调蓄池的功能及应用[J]. 水利规划与设计, 2022(2): 64-67, 118, 124.
- HE H B, HUANG Z L. Function and application of initial rain regulation and storage tank in river basin water environment management [J]. Water Resources Planning and Design, 2022(2): 64-67, 118, 124.
- [2] 吕炎, 史静雯, 马晓雨, 等. 北方某新建城区初期雨水调蓄池设计案例分析[J]. 环境工程, 2023, 41(s1): 257-261.
- LÜ Y, SHI J L, MA X Y, et al. Case study on the design of initial rainwater detention tank in a new-built northern city [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(s1): 257-261.
- [3] 夏加华. 全地下式处理设施与溢流污染控制的设计与运行[J]. 净水技术, 2023, 42(2): 169-176.
- XIA J H. Design and operation of full-underground treatment facilities and overflow pollution control [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(2): 169-176.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城镇雨水调蓄工程技术规范: GB 51174—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical code for urban stormwater detention and retention engineering: GB 51174—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.
- [5] 肖艳, 徐建初. 世博浦东园区雨水泵站初期雨水调蓄池冲洗方式设计[J]. 给水排水, 2009, 35(3): 50-52.
- XIAO Y, XU J C. Design of flushing method for initial rainwater storage tank of rainwater pumping station in pudong park of expo [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(3): 50-52.
- [6] GUO Q Z, FAN C Y, RAGHAVEN R, et al. Gate and vacuum flushing of sewer sediment: Laboratory testing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(5): 463-466.
- [7] PISANO W C, O' RIORDAN O C, AYOTTE F J, et al. Automated sewer and drainage flushing systems in Cambridge, Massachusetts [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(4): 260-266.
- [8] 刘波. 新宛平调蓄池设备安装、调试及技术改进探讨[J]. 价值工程, 2019, 38(1): 125-127.
- LIU B. Discussion on equipment installation, commissioning and technical improvement of Xinwanping storage tank [J]. Value Engineering, 2019, 38(1): 125-127.
- [9] 徐乾轲, 张力方, 张建民. 雨水调蓄池体型优化数值模拟研究[J]. 水利规划与设计, 2023(3): 69-74.
- XU Q K, ZHANG L F, ZHANG J M. Numerical simulation study on shape optimization of rainwater storage tank [J]. Water Resources Planning and Design, 2023(3): 69-74.