

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221199

沉沙池 S 型集沙涵结构优化研究

何彦利^{1,2}, 牧振伟^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 沉沙池是农业灌溉工程中的重要水利设施之一,对降低水流含沙量、提高水流利用率有着重要作用。为提高沉沙池排沙效率,在渭干河干渠 S 型沉沙池结构基础上设计了直线型集沙涵结构,通过原型观测试验结果,与物理模型试验和数值模拟相结合,明确了 S 型和直线型集沙涵水流水力特性。试验结果表明,Fluent 软件可有效模拟局部沉沙池运行过程,由于 S 型集沙涵末端水流流速较小,导致集沙涵内泥沙出现淤积,直线型结构则能有效提高集沙涵内整体水流流速,集沙涵末端廊道内水流流速从 0 m/s 提升至 0.4~0.7 m/s,从而提高沉沙池排沙效率。该研究可为优化沉沙池结构、提高沉沙池排沙效率提供科学依据和技术支撑。

关键词: 沉沙池; 厢型集沙涵; 数值模拟; 水力特性

中图分类号: TV131.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0143-04

1 概况

克孜尔水库作为渭干河上游最大的控制性水利枢纽工程,近 60 年(1959~2015 年)入库水沙呈阶段性缓慢上升趋势^[1]。由于水库冲沙及山区降雨,渭干河含沙量较大,因而设置沉沙池。沉沙池由进水明渠、20 个厢型集沙涵单元结构、20 个排沙闸、末端雍水折型堰组成,其中每个单元结构包含 35 个翻板闸门。沉沙池长 277.8 m,底宽 36.8 m,池深 4.3 m,末端雍水折型堰高 2.5 m。厢型集沙涵内部类似于“S”型结构,集沙涵单元长 36.8 m,宽 10.3 m,深 1.5 m。目前,对沉沙池结构及其运行方式已进行了大量研究。如胡松可等^[2]研究了有无调流板和调流板角度对池内水沙运动规律的影响;WANG K 等^[3]设计了一种低成本且能高效去除细沙的重力沉沙池;韩其为^[4]开发了一维非均匀沙不平衡输沙模型;侯佩瑾等^[5]研究了引水渠与多厢式沉沙池之间的连接型式;刘进等^[6]改善了厢型沉沙池泥沙冲洗措施。目前厢型沉沙池研究主要是在工程原型基础上,优化传统直线型厢型沉沙池结构、改善泥沙冲洗措施,少有对多个弯道结构集沙涵的研究。鉴此,本文针对沉沙池泥沙淤积等问题,根据原型观测

数据,设计模型试验对 S 型集沙涵进行研究,分析集沙涵内水流水力特性,优化集沙涵结构形成三道直线型集沙涵结构;同时采用 Fluent 软件对集沙涵进行局部流场数值模拟,利用模型试验验证数值模拟结果,确定优化后集沙涵对水流流速影响规律,旨在为沉沙池结构优化提供科学依据。

2 材料与方 法

2.1 模型试验装置

按照重力相似准则,取沉沙池两个单元以几何比尺 1:15 构建物理模型(图 1),其中一个单元为 S 型集沙涵结构,另一单元为优化后直线型集沙涵结构(图 2)。试验装置包括上游水箱、沉沙池、厢型集沙涵、排沙闸、排沙渠、量水堰。沉沙池段模型长 3.2 m、宽 4.0 m。沉沙池部分采用有机玻璃制成,进口水箱和量水堰采用 PVC 材质制成,流速量测采用毕托管。在沉沙池模型中布置测点,将一个单元集沙涵内分为 A、B、C 三条廊道,每条廊道包含 12 组翻板闸门孔,共计 36 个测点(图 3)。

2.2 模型试验工况

考虑到沉沙池运行需要,针对两种集沙涵结

收稿日期: 2022-06-07, **修回日期:** 2022-07-06

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2020A01002-1)

作者简介: 何彦利(1996-),男,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: 8052346678@qq.com

通讯作者: 牧振伟(1973-),男,教授、博导,研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: xjmzw@163.com

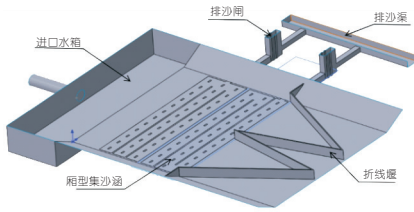


图 1 模型试验装置图

Fig. 1 Model test setup diagram

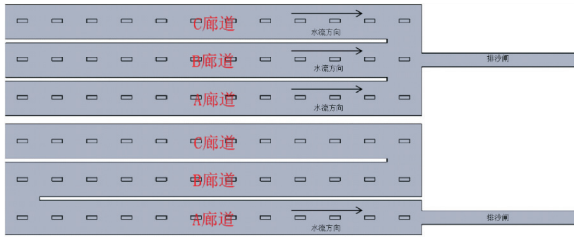


图 2 结构优化图

Fig. 2 Structural optimization diagram

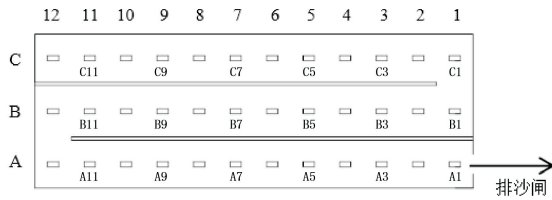


图 3 测点布置

Fig. 3 Survey point layout

构(S型集沙涵(方案 1)、直线型集沙涵(方案 2))进行试验方案设计,采用两种沉沙池进口流量 Q 、三种排沙闸开度作为变量。试验方案见表 1。

表 1 试验方案

Tab. 1 Test plan

方 案	工 况	沉沙池进口流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	排沙闸开度/m	方 案	工 况	沉沙池进口流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	排沙闸开度/m
1	1	20	0.7	2	7	20	0.7
	2		0.9		8		0.9
	3		1.1		9		1.1
	4	40	0.7		10	40	0.7
	5		0.9		11		0.9
	6		1.1		12		1.1

2.3 数值模拟

在模型试验装置基础上,利用 Solidworks 软件对沉沙池进行三维建模;使用 ICEM 软件对沉沙池模型进行 Part 创建、非结构化网格划分。为确保计算精度,对集沙涵区域和排沙闸区域网格进行局部加密。通过计算不同网格数量,最终确定网格为 73×10^4 个左右。在模拟计算中采用 VOF 法对沉沙池自由液面进行追踪计算,考虑到翻板闸孔位置会出现漩涡结构,模型选取 RNG κ - ϵ 湍流模型,速度压力耦合采用 Simple 算法。边界条件设置进口为流速入口,排沙闸出口、末端折线堰出口均为压强出口(大气压),壁面为无滑移壁面,水面为自由边界。

2.4 控制方程

RNG κ - ϵ 湍流模型控制方程中紊动能 κ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho\epsilon \quad (1)$$

耗散率 ϵ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}^*}{\kappa} G_\kappa - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \kappa^2 / \epsilon \quad (3)$$

$$G_\kappa = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3} \quad (5)$$

$$\eta = \sqrt{G_\kappa / \rho C_\mu \epsilon} \quad (6)$$

其中 $C_\mu = 0.0845$; $C_{1\epsilon} = 1.42$;

$$C_{2\epsilon} = 1.68; \beta = 0.012; \eta_0 = 4.38$$

式中, t 为时间; ρ 为体积平均密度; μ 为动力粘滞系数; μ_t 为紊动黏滞系数; u_i, x_i 分别为速度分量、空间位置分量 ($i=1, 2, 3$); $C_\mu, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, \beta, \eta_0$ 均为常数。

2.5 模型验证

利用模型验证数值模拟结果的可靠性,是分析、评估数值模拟过程的关键步骤。依据沉沙池物理模型试验所得各监测点水力特性,通过 Fluent 软件对 S 型集沙涵结构进行模拟计算。选取进口流量 $20 m^3/s$,排沙闸开度 $0.7 m$ 工况,提取数值模拟经典断面(A1、A3、A5、A7、A9)结果与模型试验结果进行对比,结果见表 2。由表 2 可看出,物理模型试验结果和数值模拟结果相对误差在 10% 以内,表明所建模型合理有效。

表 2 模型试验和数值模拟结果流速对比

Tab. 2 Velocity comparison between model test and numerical simulation results

断面位置	物理模型/ $(m \cdot s^{-1})$	数值模拟/ $(m \cdot s^{-1})$	相对误差/%
A1	0.70	0.71	1.43
A3	0.62	0.57	8.06
A5	0.54	0.51	5.55
A7	0.49	0.45	8.16
A9	0.44	0.40	9.09

3 试验结果分析

3.1 原型沉沙池观测试验

沉沙池工作原理为高含沙量水流经进排水明渠

进入沉沙池,泥沙沉降后经翻板闸孔进入集沙涵内部,清水由雍水折型堰溢流。排沙时,开启排沙闸,翻板闸门依靠水力作用依次自动关闭,泥沙由排沙闸排出集沙涵,排沙结束后,随着排沙闸关闭,翻板闸门依靠自身重力作用自动开启。

为明确原型沉沙池运行状况及试验初始条件,原型观测试验在沉沙池内部选取多个特征经典断面,对沉沙池各部位流量及含沙量进行测定,并在集沙涵 A、C 廊道顶部安装泥沙传感器监测泥沙淤积,进行冲沙试验。结果表明沉沙池泥沙沉降效果较好,但沉沙池内泥沙出现淤积,翻板闸门无法自动启闭;泥沙传感器监测数据显示集沙涵 A 廊道在冲沙过程中泥沙淤积厚度明显降低,但 C 廊道泥沙淤积厚度无明显变化;由图 4 可看出,运行结束后沉沙池内泥沙出现淤积,B、C 廊道淤积较多,A 廊道可以正常运行。



图 4 沉沙池图

Fig. 4 Drawing of sedimentation basin

由于翻板闸门问题,泥沙无法有效排出沉沙池内部。若对翻板闸门进行改造,可提高排沙效率,但翻板闸门组数多,改造难度大且不经济。而通过对 S 型集沙涵结构优化以提高排沙效率的方法则更为简易且经济。

3.2 S 型集沙涵流场流速分析

由于原沉沙池翻板闸门无法利用水力作用实现自动启闭,模型试验模拟了无翻板闸门装置的情况。利用量水堰量测沉沙池进口流量 Q ,在保证进口流量 Q 不变的情况下,量测不同排沙闸开度下集沙涵水流流速,试验工况见表 1。通过模型试验对集沙涵水流流速的量测,得到集沙涵内水流流速变化规律(图 5)。

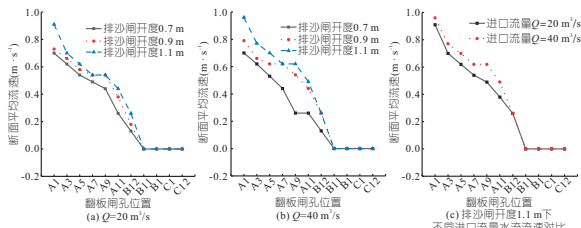


图 5 S 型结构流速变化图

Fig. 5 Velocity variation diagram of S-shaped structure

由图 5 可知,集沙涵近排沙闸一端至末端水

流流速逐渐减小,在 S 型集沙涵结构 B、C 廊道水流流速基本为零,流速变小,水流挟沙能力减弱,泥沙无法有效排出,最终导致沉沙池内泥沙淤积,无法正常运行;随着排沙闸开度增加,集沙涵 A 廊道水流流速随之增大,但对集沙涵末端水流流速无影响;同样,增大沉沙池进口流量的方法只对 A 廊道水流流速影响较小,末端水流流速无变化。

采用 Fluent 数值模拟软件,对直线型和 S 型结构集沙涵进行模拟计算。图 6 为沉沙池进口流量 $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ 、排沙闸开度 0.7 m 工况下直线型和 S 型结构速度云图。由图 6(b)可知,S 型结构集沙涵 B、C 廊道内水流流速较小。为了提高集沙涵内水流流速,从而提高排沙效率,将集沙涵结构设计为直线型结构(图 6(a)),能有效提升集沙涵末端水流流速,增大水流挟沙能力,三条集沙廊道水流更为平顺,有利于泥沙运移。

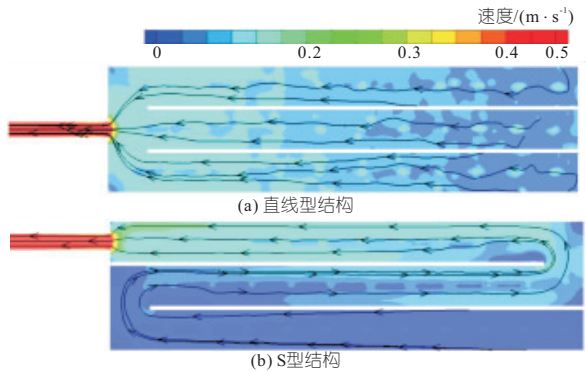


图 6 沉沙池速度云图

Fig. 6 Sedimentation pond velocity cloud map

3.3 直线型集沙涵流场流速分析

S 型集沙涵模型试验结果表明,其 B、C 廊道内水流较小是导致泥沙淤积的原因。利用数值模拟对直线型集沙涵结构计算,发现直线型结构能使集沙涵水流更为平顺且流道距离大幅缩短,能有效提高集沙涵末端水流流速。针对直线型集沙涵结构,设计模型试验,直线型结构模型试验同 S 型集沙涵结构试验工况一致(表 1),保证进口流量 Q 不变,对不同排沙闸开度下集沙涵内水流流速进行量测,得到直线型集沙涵内水流流速变化规律(图 7)。

图 7(a)为沉沙池进口流量 $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ 、排沙闸开度 0.7 m 工况下,直线型结构和 S 型结构水流流速对比。由图 7(a)可知,直线型结构相比 S 型结构在靠近排沙闸一端水流流速有所降低,这是由于 S 型结构靠近排沙闸一端翻板闸孔数较少,而直线型结构孔数较多,但在集沙涵末端 B、C 廊道水流流速有显著提升,从 0 m/s 提高到 0.5 m/s 左右;图 7(b)为控制排沙闸开度不变情

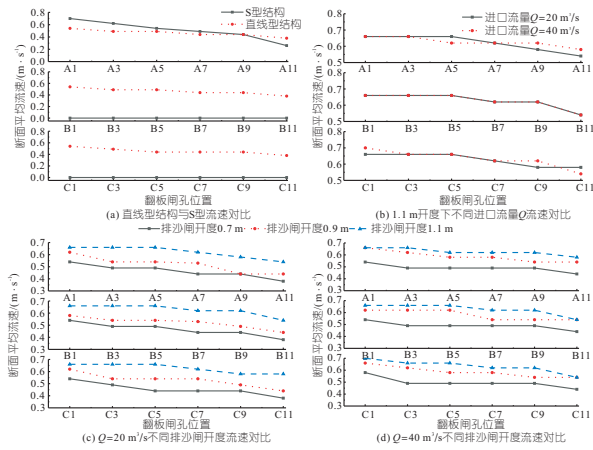


图7 直线型结构流速变化图

Fig. 7 Velocity variation diagram of linear structure

况下,增大沉沙池进口流量 Q ,集沙涵内水流流速变化不大,说明沉沙池进口流量 Q 对集沙涵内水流流速影响较小,由于进口流量 Q 为 $20、40 \text{ m}^3/\text{s}$ 时沉沙池内水深变化不大,所以增大进口流量 Q 对集沙涵内水流流速影响不大;控制沉沙池进口流量 Q 不变,随着排沙闸开度增大,集沙涵内整体水流流速随之增大(图 7(c)、(d))。排沙闸开度对集沙涵内水流流速影响较大,在最大排沙闸开度 1.1 m 下,水流流速能够提高到 0.6 m/s 左右。试验结果表明,直线型集沙涵结构相较于 S 型结构对末端水流流速提升有显著作用,排沙闸开度对集沙涵内水流流速影响较大,通过控制排沙闸开度能进一步提升集沙涵内水流流速。

Research on Optimization of S-type Sand Collection Culvert Structure of Sedimentation Basin

HE Yan-li^{1,2}, MU Zhen-wei^{1,2}

- College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
- Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: sedimentation basin is one of the important water conservancy facilities to reduce the sand content of water flow in agricultural irrigation projects, which plays an important role in reducing the sand content of water flow and improving the utilization rate of water flow. In order to improve the efficiency of sand sedimentation basin discharge, a linear sand collection culvert structure was designed based on the S-type structure of the sedimentation basin in the Weigan River dry canal. The hydraulic characteristics of the S-type and linear sand collection culvert water flow were clarified by combining the experimental results of prototype observation with physical model tests and numerical simulations. The experimental results show that Fluent software can effectively simulate the operation process of local sand traps; Due to the low flow velocity at the end of the S-type sand trap, the sediment accumulation in the sand trap is caused, while the linear structure effectively increases the overall flow velocity in the sand trap, and the flow velocity in the corridor at the end of the sand trap is increased from 0 m/s to $0.4 \text{ m/s} \sim 0.7 \text{ m/s}$, thus improving the sand discharge efficiency of the sand trap. This study can provide scientific basis and technical support for optimizing the structure of the sand sink and improving the sand discharge efficiency of the sedimentation basin.

Key words: sedimentation basin; box-type set sand culvert; numerical simulation; hydraulic characteristics

4 结论

S 型集沙涵结构内水流流速较小导致泥沙淤积,直线型结构将 S 型弯道结构优化为三条直线结构,优化后直线型结构 A 廊道首端流速略有减小,但集沙涵整体水流流速有显著提升,水流更为平顺,流场速度分布均匀,且随着排沙闸开度的增大,水流流速随之增大。直线型结构可有效解决水流流速问题,从而提高集沙涵排沙性能。

参考文献:

- 刘思海,侍克斌,张宏科,等. 近 60 年渭干河上游克孜尔水库水沙变化趋势及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(8): 153-160.
- 胡松可,李文昊,杨广,等. 长流道式直线型沉沙池结构优化与数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(6): 67-71.
- WANG K, LI Y, REN S, et al. A case study on settling process in inclined-tube gravity sedimentation tank for drip irrigation with the Yellow River Water[J]. Water, 2020, 12(6): 1685.
- 韩其为. 非均匀悬移质不平衡输沙的研究[J]. 科学通报, 1979(17): 804-808.
- 侯佩瑾,胡青勉. 禹门口引黄抽水站引水渠与多箱式沉沙池连接型式的试验研究[J]. 水利水电技术, 1988(3): 40-44, 35.
- 刘进,马旭东,楚志腾,等. 某厢型沉沙池首部侧向扩散段排沙方案研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 113-116.