

一种重力传感的智能环中环沉沙排沙装置的研发与应用

薛敏¹ 屈瑾^{2,3} 袁古城^{2,3} 程伟伟^{2,3} 毛海涛^{2,3} (通讯)

1. 山西省水利发展中心 山西太原 030000; 2. 山西农业大学城乡建设学院 山西晋中 030801;

3. 山西省智慧节水技术创新中心 山西晋中 030801

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16094

[摘要] 针对山西引黄灌区泥沙颗粒细, 悬移质多的特性提出“连续引水、分级沉沙、智能排沙”的理念, 设计出一种新型的智能环中环沉沙排沙装置。该装置基于异重流沉沙原理设计出“倒锥形坡+U形顺坡斜槽”的双环分级沉沙结构; 并提出重力传感智能控制的多组联动分环冲沙排沙系统; 从而实现以智能化沉沙排沙装置解决引黄灌区泥沙淤积问题。数值模拟与模型试验结果表明, 该装置在处理粒径 0.005-10mm 的泥沙时表现优异; 在含沙量 2-10kg/m³ 的工况下, 平均截沙率达 96.7%, 排沙耗水率仅 2.6%, 并根据泥沙沉积情况实现间歇式智能精准排沙。

[关键词] 双环结构、多组联动冲沙排沙、智能重力感应控制系统、U形顺坡槽

1. 引言

为了改善上述问题本产品针对山西省引黄灌区黄河水沙两相性, 本装置结合国内外针对泥沙二级处理的研究, 通过数值模拟和模型实验的方法, 提出了一种基于“连续引水—分级沉沙—智能排沙”理念的新型沉沙排沙装置。该装置通过“倒锥形坡+U形顺坡斜槽”的双环分级沉沙结构和重力传感智能控制的多组联动分环冲沙排沙系统, 实现高效沉沙、低能排沙的智能净水目标。凭借高效沉沙、低能排沙的特性, 该设备能广泛适配引黄灌区渠首、山区水库和工业取水口等多元场景, 为攻克高含沙、水资源低效难题开辟新路径。

模型试验是在原型的基础上, 根据原型初始条件、边界条件、动力学条件, 通过照相准则搭建水工模型, 借助模型试验, 研究整体或局部水工建筑物在不同工况时水流特性, 解决理论分析难以解决的问题^[1]。在新型沉沙池装置上, 相关学者对传统沉沙池^[2]、河水滴灌重力沉沙过滤池^[3]和长流道直线型沉沙池^[5]进行了相关研究。在圆中环装置上, 众多研究者通过模型试验的方法初步探明了圆中环沉沙排沙过滤池沉沙排沙和过滤的机理^[4]。以上研究采用模型试验的方法测量数据真实可靠, 应用广泛; 但由于模型搭建时工作量大、费用高、试验周期长, 受试验条件和场地限制有其局限性。

相关研究者^[5]采用标准 k 紊流模型和标准 k 双方程紊流模型^[13]对微灌用新型沉沙池池内水流流态和斜板式沉沙池内水流流态进行了二维模拟计算, 结果表明加装斜板后进口上方回流区减小, 大部分板间水流呈层流状态^[7]。众多研究者通过以一维模型模拟的水沙作为二维模型输入条件, 采用 RNG-k 湍流模型和 VOF 方法对排沙漏斗清水流场进行了三维数值模拟计算, 从而探明了排沙漏斗的二次流排沙原理和关

键原因。数值模拟存在模型因假设简化、参数不确定及验证难有误差, 计算量大耗时久, 结果处理对专业要求高易致偏差的弊端。

2. 设计原理

2.1 设计思路

针对上述传统二级泥沙处理装置占地面积大、沉沙效率低, 本作品根据“连续引水、分级沉沙、智能排沙”的理念, 设计出基于异重流沉沙原理的“倒倒锥形坡+U形顺坡斜槽”的双环分级沉沙结构和重力传感智能控制的多组联动分环冲沙排沙系统, 实现以智能化沉沙排沙装置解决引黄灌区泥沙淤积问题。具体内容如下:

2.1.1 结构优化方面

该装置采用直径分别为 R=180mm 和 R=430mm 的同心双环结构, 使水流流速两次降低, 实现不同粒径泥沙分级沉降。水流从中心出水环呈辐射状进入内环, 过水断面面积迅速扩大, 在水位上升过程中, 流速显著降低, 水流挟带泥沙能力减弱, 粗颗粒泥沙逐渐沉积; 当水位达到内环溢流堰高度时, 水从溢流堰顶进入外环, 流速再次降低, 水流挟带泥沙能力再次减弱, 细颗粒泥沙逐渐沉积。经过两次沉沙溢流, 实现不同粒径泥沙分级沉降。

在内环和外环设置坡度相同的倒锥形底坡, 并在距离各环内径水平距离为 30mm 范围内设置三组相同的冲沙排沙 U 形顺坡斜槽。在内环中心, 设置了中心出水环, 直径 D=30mm, 出水口距内环倒锥底坡顶部 d=30mm, 外接倒锥形底坡, 该底坡坡度为 74.5%。内环底部为冲沙槽, 冲沙槽坡度 i=0.11, 并且在底部冲沙槽平均设置 3 组冲沙排沙孔, 每组冲沙排沙孔宽度为 30mm, 以保障泥沙清理的效果。而外环同样设有倒

锥形底坡，坡度为 42%，底部为冲沙槽，冲沙槽坡度 $i=0.06$ ，底部沙槽也平均设置 3 组冲沙排沙孔，每组冲沙排沙孔宽度为 30mm，从而确保整个“环中环”结构在引水过程中，能有效地进行泥沙处理，维持渠道水流的顺畅。

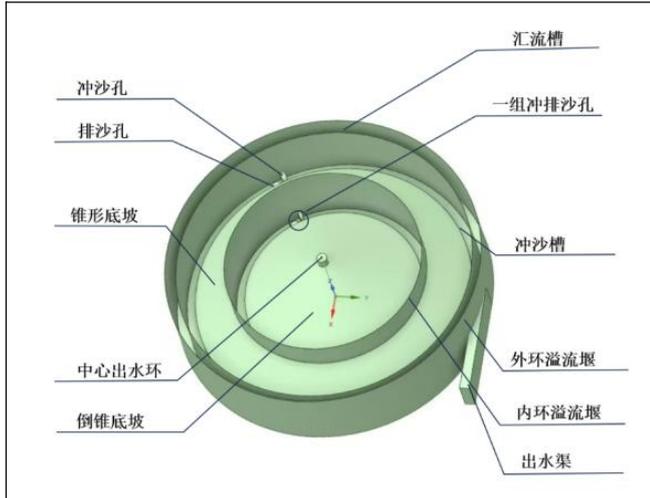


图 2.1 结构形式

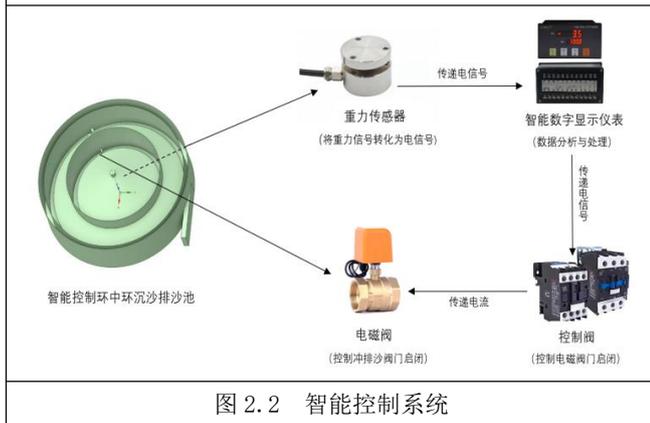


图 2.2 智能控制系统

2.1.2 智能冲沙排沙系统

在环中环底部设置三个重力传感器，并通过上下限仪表将重力信号转换为电信号，进而控制内环和外环的冲沙排沙口常闭型电磁阀的开闭，进而实现依据重力感应的智能冲沙排沙。将传统的排沙口过渡为重力传感、智能控制排沙口。通过环中环底部设置的重力传感器，将重力信号转换为电信号，经内置算法进行结果分析，通过传递电流控制电磁阀的启闭，进而实现冲沙排沙阀门的精准开关操作，形成从数据采集、分析到执行的完整闭环控制流程。

2.2 实验与模拟

2.1 工作原理

水流从中心进水口进入内环，粗颗粒泥沙逐渐沉积；当水位达到内环溢流堰高度时，水从溢流堰顶进入外环，细颗粒泥沙逐渐沉积。经过两次沉沙溢流，实现不同粒径泥沙分级沉降。随着内外环沉沙质量的增加，环中环整体重量持续

增加，当达到重力传感器所设置的上限值时，智能控制系统会同步打开内外双环的冲沙闸和排沙闸，启动排沙工作；随着排沙进行，环中环重量逐步下降，当降至重力传感器设定的外环排沙结束阈值时，系统自动关闭外环冲沙闸和排沙闸，外环排沙结束；此后重量继续下降，待达到传感器预设的下限值，系统关闭内环冲沙闸和排沙闸，至此整个排沙过程结束。

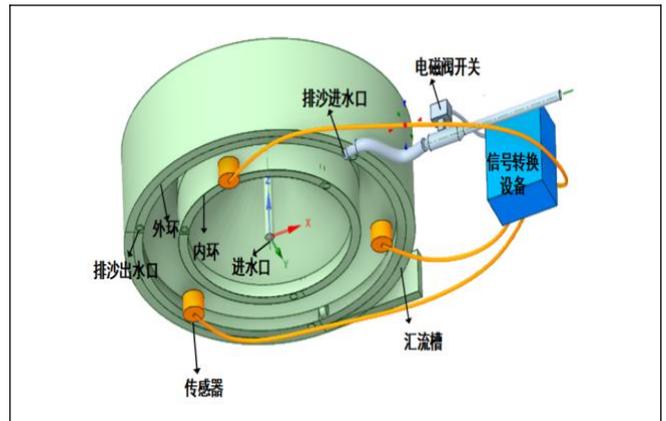


图 2.3 工作原理图

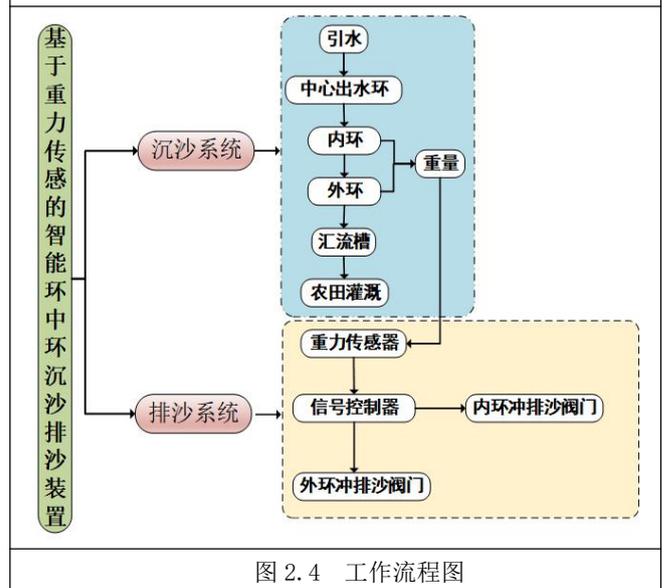


图 2.4 工作流程图

2.2 实验方案设计

装置在多种工况数值模拟的基础上完成双环结构的设计，并进行模型实验研究，形成数值模拟和实验研究相结合的实验方案。

2.2.1 数值模拟

通过 ANSYSFLUENT 软件模拟不同内外径组合工况。选择 VOF 模型并合理设置边界条件与求解算法，以流速、湍流强度、不同位置含沙量等参数进行量化，从而选取沉沙排沙较优的环中环结构。最终选取的内环高度为 250mm，半径为 180mm；外环高度为 230mm，半径为 430mm 的双环结构形式。

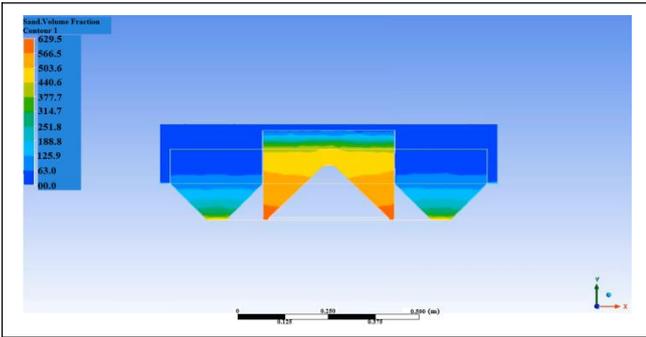


图 2.5 不同位置含沙率

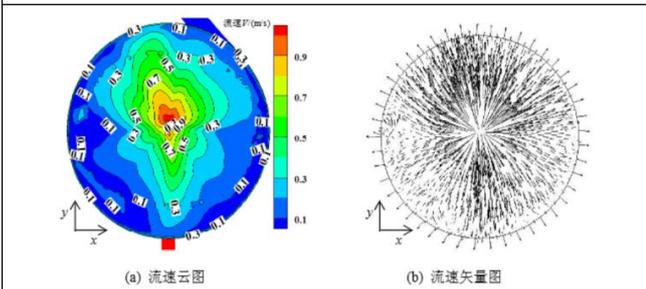


图 2.6 流速云图和矢量图

2.3.2 模型试验

根据黄河中游支流粒径特征和黄河每月含沙量,在五种进水含沙量(2kg/m³、4kg/m³、6kg/m³、8kg/m³、10 kg/m³)下,分别设置了三种中心出水环流速(0.08m/s, 0.12m/s, 0.16m/s)进行实验研究。



图 2.4 实验室模型实验

2.2.3 实验结果

经过实验模型的测试数据如表 1 和经过参考文献得到的截沙率和耗水率如表 2 所示

表格 1 不同流速和不同含沙量组合下双环结构截沙率

含沙量	流速		
	0.08m/s	0.12m/s	0.16m/s
2kg/m ³	96.61%	95.13%	94.17%
4kg/m ³	95.80%	94.52%	93.89%
6kg/m ³	95.91%	94.56%	93.56%
8kg/m ³	95.03%	94.83%	92.77%
10kg/m ³	94.88%	94.40%	92.28%

表格 2 双环结构和其他水工建筑物的最大截沙率和对
应耗水率的对比

	排沙漏斗	排沙涡管	条渠沉沙	双环沉沙
粒径范围 (mm)	[0.5, 40]	[0.03, 40]	[0.2, 40]	[0.05, 10]
截沙率	92.2%	92.9%	87.4%	96.7%
耗水率	4.53%	4.53%	4.55%	2.60%

通过表 1 和表 2 分析可知:双环结构的沉沙粒径最小是 0.05mm,远小于其他结构最小沉降粒径;其截沙率以及耗水率等关键指标也优于其他传统沉沙装置。

3 结语

改进后的沉沙排沙池在结构、排沙方式与智能控制等方面优化,经本装置处理后的出水浊度显著降低,为解决传统沉沙排沙池沉沙效率低等问题提供了方案,实现高效沉沙、及时排沙与精准智控,水沙分离效果好。从实际应用看,该装置适用于引黄灌区渠首、山区水库和工业取水口等多场景,可有效减少引黄灌区渠道泥沙淤积,该技术的推广对解决黄河灌区节水灌溉具有重要的现实意义。

[参考文献]

[1] Garde R J, Ranga Raju K G, Sujudi A W R, Design of settling basins[J]. Journal of hydraulic research. 1990, 28(1):81-91.

[2] 宗全利, 刘焕芳, 吴心蓉. 沉沙池水流流场分布均匀化改进研究[J]. 人民黄, 2007, 260(4):73-75.

[3] 戚印鑫, 耿凡坤, 刘亚丽, 等. 重力沉沙过滤池模型试验研究[J]. 泥沙研究, 2016(6):19-24.

[4] 叶茂, 伍超, 陈云良, 等. FLUENT 软件在水利工程中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2006(3):78-81.

[5] 刘宝星, 侍克斌, 李玉建, 等. 圆中环沉沙排沙过滤池水工模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4):82-87.

[6] 华根福, 刘焕芳, 汤骅, 等. 沉沙池中水流流态的数值模拟[J]. 石河子大学学报:自然科学版, 2009, 29(4):482-486.

基金项目: 山西省水利技术推广与应用项目(2025ZF02、2025GM36); 山西省人才引进(SXBYKY202010); 山西农业大学博士引进项目(2021BQ65)。