

宝应站清污机的优化设计和应用实践

祁 洁¹, 刘 军¹, 王彦军², 刘 菁¹, 杨红辉¹, 张少卿²

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210000; 2. 曲阜恒威水工机械有限公司, 山东 济宁 272000)

摘要:宝应站作为南水北调东线一期工程第一级抽水站,自2005年建成以来发挥了抽水、排涝等功能。泵站地处里下河地区,水草量巨大,清污机长期高负荷运行导致故障。总结分析历年的改造维修和运行管理经验,结合现场实际情况,研究宝应站清污机整体强度、牵引力、功率、链条、齿耙结构、轨道、格栅、材质等方面优化设计方案。根据设计完成制造安装,通过在南水北调宝应站调水运行过程中实际应用,清污效果及运行稳定性均达到预期效果。

关键词:宝应站; 清污机; 原因分析; 优化设计

中图分类号:TV675

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2024)03-0049-0005

Optimization design and application practice of the sewage cleaning machine at Baoying Station

QI Jie¹, LIU Jun¹, WANG Yanjun², LIU Jing¹, YANG Honghui¹, ZHANG Shaoqing²

(1. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 2. Qufu Hengwei Hydraulic Machinery Co., Ltd., Jining 272000, China)

Abstract: As the first stage pumping station of the first phase of the eastern route of south to north water diversion project, Baoying Station has played the functions of pumping and drainage since its completion in 2005. The pumping station is located in the Lixia River area, the amount of water grass is huge, and the long-term high load operation of the sewage cleaning machine has caused malfunctions. Summarize and analyze the experience of renovation, maintenance, and operation management over the years, combined with actual situation on site, research the optimization design plan for the overall strength, traction, power, chain, tooth rake structure, track, grid, material and other aspects of Baoying Station cleaning machine. According to the design, the manufacturing and installation have been completed. Through practical application in the water transfer operation of Baoying Station in the south to north water diversion project, the cleaning effect and operation stability have achieved the expected results.

Key words: Baoying Station; sewage cleaning machine; cause analysis; optimization design

1 概 述

南水北调宝应站工程位于宝应县汜水镇境内,作为南水北调东线一期工程,其主要作用是与江都站共同组成第一级抽水站,以满足南水北调东线一期工程抽江水北送的要求,并可抽排里下河地区涝

水。宝应站抽水能力为 $100\text{ m}^3/\text{s}$,设置清污机桥长75.8 m,共计14孔,中间10孔布置回转式清污机10台,孔口宽度4.35 m,中间孔垂直安装高度9.8 m(清污机底栅至清污桥板)。宝应站自2005年建成,多次参加调水及排涝运行,由于地处里下河腹地,沿线河道内水草较多,尤其是夏秋两季草量巨大,设

收稿日期: 2023-08-19

作者简介:祁洁(1979—),女,高级工程师,硕士,主要从事水利工程管理工作。E-mail: 83783111@qq.com

备经多年连续长时间各工况运行,发生了不同程度的故障,清污机性能和清污效果有待改进。

2 原清污机存在问题及原因分析

2.1 工程基本情况和运行工况

宝应站前池设计最高水位 2.25 m(黄海高程),最低水位为 0.00 m,出水池设计最高水位 8.23 m,最低水位为 7.60 m,泵站设计水泵叶轮淹没深度 3.00 m。2019 年 5-7 月,宝应站满负荷抽水抗旱,泵站进水池平均水位 0.11 m,平均扬程 6.75 m,平均抽水流量为 $132 \text{ m}^3/\text{s}$ 。2021 年 7-8 月排涝期间,进水池平均水位 2.78 m,扬程 4.60 m,平均流量 $105 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.2 清污机存在问题和改造情况

(1)荷载过大。拦截大量水草时相互缠结、吸水过重、耙齿较长,清污机齿耙提升污物时往往会过载,超过部件材料的许用应力,则会造成断裂、变形、脱轨等故障。

(2)部件磨损严重。宝应站内清污机齿耙管两端立板磨损严重,立板螺栓孔磨损严重,水下部分链轨磨损严重,链条易脱轨。

(3)清污效率低。清污机打捞大团水草时易打滚脱落,只能打捞上数根水草,打捞效率低。宝应站下游河道中水草多为扁担草,极易缠绕在栅条上,大量水草聚集在清污机前,如不能及时清除,将导致清污机栅前后水位差增大,运行时水泵叶轮淹没深度不能满足叶片汽蚀要求,难以清除附着于单根栅条上的细小水草,易造成拦污栅堵塞,增大拦污栅前后水位差,减小流量,需要人工乘船清污,工作量大,危险程度高。宝应站拦污栅前水草大量拥堵时,超出清污机工作能力,清污机过载,需停机反冲、逐步清理或吊机吊起拦污栅,清理水草才能使清污机正常运行。

(4)结构与安装问题。清污机运行一段时间后链条易松导致脱轨,需及时调整保证紧度。清污机安装精度不高时,轴头、轴套易磨损。链条无限位装置,或限位装置不可靠,易脱轨。

(5)其他问题。宝应站清污机停止运转时,拦污栅在一定水位会出现振动。

针对上述故障和存在问题,陆续采用减速电机增大功率,更换并优化齿耙,维修或更换链条,实施轨道、栅体、不锈钢防脱链条和降速器等配套设备改造,但清污效果仍待提高,需进一步降低故障率。

3 改造技术方案要点

本次技术改造,针对清污机存在问题,吸收以往维修改造经验,进一步分析故障成因,研究改造技术方案。

3.1 增加清污机设备功率

影响清污机的主要因素为齿耙的负载,根据清污机的工况和故障来看,宝应站的污物量较多,过栅流速较高,因此齿耙负载较大,且出现齿耙轴变形弯曲现象。增加清污机的功率可以相应提高过载保护、链条、齿耙轴等强度,从而降低故障率。

宝应站中间 4 孔清污机,孔口宽度 4.35 m,垂直安装高度 9.80 m,齿耙长度 4.06 m。齿耙间隔 2.5 m,按 4 道齿耙承载清污,包括将污物与栅条脱开并捞起时所有阻力,载荷依次为 1.0 t、1.0 t、0.6 t、0.6 t 计算,则总载荷为 3.2 t。以齿耙上输送污物为研究对象,从能量转换角度考虑,在单位时间内有 3.2 t 污物被输送到高度 12 m 处,同时又有同样多的污物从静止状态变为一定速度的运动,其中清污机设计线速度为 0.1 m/s。考虑到清污机运转速度较慢,可视为匀速运动,运行时间为 120 s 时求得清污有效功率为 3.136 kW。

因宝应站污物量远大于设计量,考虑清污机实际运行状态存在各种摩擦阻力及运行的非连续性和实际情况,安全系数按 1.6 取值。清污机设备功率为 5.02 kW,选择减速机功率 5.5 kW,减速比 127.68,则输出扭矩为 4 690 nm。

3.2 改进主轴支撑减少设备功率损耗

滑动轴承一般适用于低速重载工况的设备,清污机大轴转速较低,径向负载较大,滑动轴承适用于清污机,但是对设备的维护和保养要求较高。当 2 个轴座距离较远时,同轴度要求较高,因此 2 个轴承座在调整链条节距时必须一致。滑动轴承相对滚动轴承来说摩擦力稍大,滚动轴承可以选择双列调心滚子轴承,在保证其负载能力的前提下,2 个轴承座的同轴度要求降低。

3.3 优化牵引链条增加抗拉能力

升级传动链条、链轮和过载保护,牵引链条将大轴扭矩转化为齿耙的清污力,加大链板厚度和销轴直径可以提高清污机的清污能力,减低链板断裂风险,提高链条耐磨性。

原清污机链条采用 125 mm 节距,5 mm 链板,16 mm 销轴,使用过程出现链板拉伸变形、断裂,安装齿耙的销轴易折断等情况,问题在于牵引链条负

载超过链板强度,而发生塑性变形,使链板拉长。安装齿耙的销轴不仅承受齿耙的自身重力、污物重力、齿耙摩擦力及污物拉力,还承受齿耙反转扭矩,其他链节的销轴起到连接链板的作用。

由于清污机是通过传动链条将减速机的功传到大链轮中,由大链轮对大链条牵引。当清污机在正常运转情况下,牵引链轮处的链条是受到拉力最大的地方。单侧链条受力包括多支齿耙的自重、齿耙上的污物质量、单边链条的自重、污物由于水压而附着在清污机栅条上对齿耙产生的阻力及摩擦力等,其中前3项作为计算的依据。根据单片链板的受力与最大危险面的面积比值计算出链板的拉应力,工况系数选取1.2,安全系数 ≥ 4 时为满足要求^[1-2],根据计算结果初步选定8 mm链板。安装齿耙销轴的设计参考齿耙自重、单耙最大污物量为主要计算依据,并附加工况系数,按照剪应力来校核,满足安全系数 ≥ 4 可视为满足要求。通过初步计算选定18 mm销轴,其余栅节的销轴直径相同。

原传动链条采用31.75 mm节距精密套筒滚子链,过载保护采用剪断销保护,链条和剪断销都与原减速机功率配套。功率提高以后,加大了传动链条直径,过载保护剪断销由14 mm调整为17 mm,增加了齿耙的抗负荷能力,从而系统地提高清污机综合机械强度、操作方便性及可靠性。

3.4 优化栅体框架结构及栅条栅架固定方式

原栅体采用2道边梁、3道横梁框架结构,成中心对称,上下2道横梁距离边梁顶端300 mm,单节栅体宽4 622 mm,长3 200 mm,栅条采用卡栓锁定在横梁上,栅条与上下横梁悬臂300 mm。新栅体结构仍采用2道边梁、3道横梁框架结构,横梁与顶梁齐平。栅体宽度4 620 mm,长度调整为2 800 mm,以便于汽车运输。栅条采用焊接方式焊接到3道横梁上,取消卡栓,可以保证齿耙的最大插栅深度。取消栅条悬臂部分,保证2节栅体的栅条上下对齐,减少因栅条间距偏差导致清理污物的额外阻力。拦污栅体按设计水头差1.0 m进行校核,栅体采用实腹式梁,主横梁使用工字钢,材质Q235B,清污机主横梁受力分析按简支梁考虑。通过刚性校核,可认为清污机主梁已经满足刚度要求。

同时,加高加厚栅条截面并更换材质,在保证栅条稳定性的同时减少栅条横向支撑,防止水草悬挂在横向支撑上。原栅条采用扁钢材质Q235B,新清污机栅体扁钢材质采用不锈钢304。栅条加高,可以保证齿耙内齿的更大插栅深度,从而更便于清

理附着于栅条上的水草、污物等。栅条加厚主要是为了取消横向卡栓后保证栅条的横向稳定性,强度和稳定性都满足要求。

3.5 优化组合清污耙齿

清污机运行无水草阻水时,理论过栅流速等于平均抽水总流量除以理论过流面积,理论过流面积根据宝应站清污机不同底坎高程测算为107.6 m²,求得理论过栅流速为1.22 m/s。当泵站前池运行水位降低到0.1 m,栅条堵塞面积为50%时,过栅流速增大为2.5 m/s。考虑到部分清污机的底部辅助栅基本无法过流,实际过栅流速可能会更高一些,通过增加插栅深度,可以提高清污效率。在栅条高度增加的情况下,在齿耙设计和制作时可以控制齿耙内齿的插栅深度,从而将2条栅条之间的水草、污物清理上来。

设计采用组合齿耙形式,合理布置各种齿耙形式^[3-4],充分发挥每种齿耙的清理效果,达到系统化清理栅体。目前回转式清污机的齿耙形式多样化,主要有常规齿耙、双内齿梳栅齿耙、异形板梳栅齿耙、橡胶板梳栅齿耙、勾型齿耙、开刃齿耙等,每种齿耙针对性清理特定污物。宝应站水草较多,其中扁担草比例较高,草体成面条状狭长,很容易挂到栅条上,单纯的常规齿耙无法清理干净栅条紧贴的水草。

采用多种齿耙组合形式:第一道采用常规齿耙,清理超过栅条间距较大的污物;第二道采用双内齿梳栅齿耙,可以清理部分挂在栅条上的水草,由于其内齿距离栅条仍为6~10 mm,部分紧贴栅条上的水草还会有残余;第三道齿耙可以采用橡胶板梳栅齿耙,橡胶板与栅条没有间距,可以对栅条进一步清理。另外,开刃齿耙,将栅条之间的水草切断,防止清污机过载,勾型齿将大团的水草扯拉分开清理。通过几道齿耙的逐级清理,栅面可以清理干净,而且清污机的负载也最小。

加厚齿耙轴和齿耙连接板,增强清污耙抗弯能力,采用不锈钢材质,有效减少锈蚀,新齿耙采用加厚管壁的无缝管,提高其刚度增加抗负载能力。齿耙挡板是齿耙安装到链条销轴的连接板,同时也是齿耙在左右轨道之间的定位板。原齿耙挡板为Q235B材质,链条销轴为不锈钢材质,齿耙挡板的安装孔和销轴存在一定的相对运动。碳钢材质由于氧化腐蚀,安装孔在长期锈蚀和受力作用下磨损较快,导致两者之间间隙变大,使齿耙角度变化影响清污机效果。改用不锈钢材质可以有效减少锈蚀,

同时厚度增加到12 mm,从而更好地保持齿耙性能。

3.6 优化轨道结构

清污机轨道是控制牵引链条运动轨迹的部件,弯段轨道迫使牵引链条发生变形,受力较大。此外,轨道还是控制齿耙清污角度的部件,因此承受齿耙对轨道的反转扭矩和压力。

首先对齿耙进行力学分析,根据力的平衡可以看出,下轨道底板受力要大于轨道上底板受力。根据转矩平衡进行转矩计算,在确定单耙最大清污量和齿耙自重后,可以依据轨道底板受力对轨道底板进行校核计算。通过对底板校核计算选定轨道底板,同时由于链轮对轨道的碾压,漆层破坏锈蚀较重,因此在轨道加装不锈钢垫板在一定程度上保护了底板,提高轨道耐磨性,延长使用寿命。另外,对于弯段部分轨道下底板受力较大,应考虑多增加下底板支撑和防变形加强筋板,以保证轨道的整体强度。

3.7 降低清污机辅助栅高度

以泵站中间4台清污机为例,原清污机辅助栅较高约1.6 m,在实际使用过程中,这部分空间将被污物、水草堵满,不能过水。宝应站前池设计最低水位为高程0.00 m,其清污机底槛高程-5.00 m,1台清污机过流高度5.0 m,辅助栅高度1.6 m,约占总过

流面的32%,可见低水位运行时对整个过流影响还是较大的。

新清污机设计时尽可能考虑降低辅助栅高度,减少固定阻水面,改善过流条件,从而降低过栅流速,也有利于减轻清污机负载,提高清污机的可靠性。新型清污机相对于原设计的改进项目见表1。

4 宝应站应用评价

通过优化设计改造的新型回转式清污机,2021年11月安装在宝应站4#孔位。试运行时将清污机底板长期堆积的污物夹杂的污泥等顺利清捞,降低辅助栅高度起到显著效果,紧密形橡胶梳栅板,完全能够将挂在栅条上的水草、塑料袋等进行梳理并清捞上来。2022年宝应站北延应急供水和抗旱运行时,改造后的4#清污机对附着于单根栅条上细小水草清理效果好,清污能力、清污效率、整机机械强度、运行可靠性均达到改造效果。横向比较其他未改造的清污机,4#清污机运行平稳、燥声最小、电流稳定,清污机栅前和栅后无明显水位差。由此可见,相关设计改造可满足低水位工况下正常运行,改进提高清污效能,保障低水位引水条件下泵站主机稳定运行。

表1 清污机相对于原设计的改进项目

主要项目		原设计	优化改造
动力和传动部分	功率	4.0 kW	5.5 kW
	主轴支撑	铜合金滑动轴套	调心滚子轴承
	传动链条、链轮	20 A	24 A
	过载保护	单孔位安装安全销、行程开关	多孔位配合装安全销、接近开关
牵引链条		链板厚5 mm,销轴 $\varnothing 16$ mm	链板厚度8 mm,销轴 $\varnothing 18$ mm,轴套外径 $\varnothing 28$ mm,滚子直径 $\varnothing 70$ mm,链条无定位,材质为不锈钢304
齿耙		无缝钢管	增加插栅深度至50 mm,延用栅条左右短齿梳栅经验,常规短齿迎污面成切刀装,延用梳栅板结构,增设橡胶梳栅板齿,钢板为骨架,橡胶紧帖栅条,材质为不锈钢304
链轨道轨道		槽形轨道,有不锈钢垫板,使用后期有变形和脱轨,圆弧轨变形和脱轨较严重	轨道角钢和底板加厚扁钢,轨道磨擦面增厚5 mm不锈钢,轨道槽加深,轨道材质Q355B和不锈钢202,对机头圆弧段轨道增设加强筋
栅条和栅架		栅距中心距120 mm,拉筋和卡栓固定,栅条有悬臂,影响耙齿插入栅面清污	栅条焊接在栅架横梁上,栅条间距不变,栅条截面加厚加高,栅架增设端梁,栅条不悬臂,栅条材质为不锈钢304
辅助栅		4~7#清污机中孔辅助栅高1.6 m,其他清污机中孔辅助栅高为0 m	清污深度降低

5 结语

根据南水北调宝应站的实际情况,从运行工况影响、清污机结构等角度分析原清污机存在问题,研究成因,进行系统性设计,全面提升清污机综合性能。在动力和传动方面,采用增加清污机设备功率,升级传动链条、链轮和过载保护,改进主轴支撑减少设备功率损耗等设计,增加了清污机整体强度。在结构改进方面,加固牵引链条以增加抗拉能力,优化栅体框架结构、栅条栅架固定方式、轨道结构以进一步增加强度,设计新型橡胶梳栅板齿以解决水草品种细软问题,采用组合清污耙齿以提高清污能力。宝应站4#清污机试点实施,达到预期效

果,为回转式清污机在不同工况下的高效应用,为水草较多、水草品种细软的泵站清污选型,提供相关依据和参考。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 泵站设计规范: GB 50265—2010[S]. 北京:中国计划出版社,2010.
- [2] 谢晓勇. 大坝安全监测设计与施工技术的分析研究[J]. 珠江水运,2020(7):40-42.
- [3] 虞晓峰. 排涝泵站回转式清污机清污能力不足的改造[J]. 浙江水利科技,2010(4):108-110.
- [4] 高亮,龙俊,马士磊,等. 石港泵站回转式清污机优化及其应用[J]. 江苏水利,2017(7):4-8.

(上接第32页)

$$\text{植被覆盖度} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{植被选取区域像素值}}{\sum_{i=1}^n \text{照片总像素值}} \times 100 \quad (2)$$

式中: n 为无人机航拍点位数。

4.3 验证分析

用此方法得到天宁区植被覆盖度为34.69,与植被覆盖指数法得到的植被覆盖度35.53差值为0.84,差值率2.36%。像素算法比植被指数法选取范围更加精准,但两种方法计算结果相差较小,说明植被指数法在测算苏南运河植被覆盖度过程中精度可以得到一定的保证。

5 结论和讨论

本次测算结果仅作为研究参考,可为苏南运河健康评估、幸福河湖建设成效评估、生态修复、岸线开发利用等提供一定的参考。同时,对于其他河道的植被覆盖度测算也具有参考性。

本次采用的植被覆盖指数法(NDVI)虽然可以计算大面积、长时间序列植被覆盖度的变化,但也存在局限性:一是通过NASA官网下载的MOD13数据存在时间限制,对研究成果时效性有一定影响;

二是MOD13数据的空间分辨率为250 m、时间分辨率为16 d,受遥感监测精度限制,测算范围选取的是河岸外延1 km,可运用无人机结合像素计算分析方法,选取河段进行验证;三是像素计算分析法也存在一定的误差,主要是源于特定颜色选取的精准度。

参考文献:

- [1] 胡玉福,邓良基,刘宇,等. 基于RS和GIS的大渡河上游植被覆盖时空变化[J]. 林业科学,2015(7):49-59.
- [2] 秦伟,朱清科,张学霞,等. 植被覆盖度及其测算方法研究进展[J]. 西北农林科技大学学报,2006(9):163-169.
- [3] 左德鹏,韩煜娜,徐宗学,等. 气候变化对雅鲁藏布江流域植被动态的影响机制[J]. 水资源保护,2022,38(6):1-8.
- [4] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):515-520.
- [5] 李鹏傲,姜永涛,戚鹏程,等. 南水北调中线工程水源区植被时空演化特征[J]. 长江科学院院报,2022(9):49-55.
- [6] 魏显虎,赵彦利. 基于MOD13Q1数据的大湄公河次区域植被覆盖时空变化分析[J]. 北京测绘,2021(6):759-764.