

自动捞渣机在径流式水电站中的结构优化与应用研究

谭金权

大唐重庆分公司渝能（集团）有限责任公司，重庆 408500

[摘要] 本论文研究了自动捞渣机在径流式水电站中的应用，重点探讨了其在提高清污效率、降低人工捞渣成本、提升水电站管理效能方面的关键作用。通过对大溪河三级站取水口的现有清污问题进行详细分析，设计了一种基于全自动回转式清污机的系统，该系统通过优化结构与自动化控制技术，实现了高效清污与无人化操作。研究表明，该技术的应用不仅显著提升了清污效率，减少了停机时间，还有效降低了人工干预和作业安全风险，对水电站的经济效益和安全管理水平起到了重要促进作用。

[关键词] 自动捞渣机；径流式水电站；结构优化；清污效率；无人化管理

DOI: 10.33142/hst.v8i8.17358

中图分类号: TV76

文献标识码: A

Research on Structural Optimization and Application of Automatic Slag Removal Machine in Runoff Hydropower Station

TAN Jinquan

Datang Chongqing Branch, Yuneng (Group) Co., Ltd., Chongqing, 408500, China

Abstract: This paper studies the application of automatic slag removal machine in runoff hydropower stations, focusing on its key role in improving cleaning efficiency, reducing manual slag removal costs, and enhancing the management efficiency of hydropower stations. Through a detailed analysis of the existing cleaning problems at the water intake of the Daxi River third level station, a system based on a fully automatic rotary cleaning machine was designed. The system achieved efficient cleaning and unmanned operation through optimized structure and automation control technology. Research has shown that the application of this technology not only significantly improves cleaning efficiency and reduces downtime, but also effectively reduces manual intervention and operational safety risks, playing an important role in promoting the economic benefits and safety management level of hydropower stations.

Keywords: automatic slag removal machine; runoff hydropower station; structural optimization; cleaning efficiency; unmanned management

引言

径流式水电站取水口的清污作业长期以来依赖人工捞渣，这一过程不仅效率低下，而且存在较高的作业风险，尤其是在汛期和高水位时，人工捞渣更是难以高效进行。为此，本研究着重探讨自动捞渣机在水电站中的应用，并对其进行了结构优化，以期提高清污效率，降低人力成本，确保设备的稳定运行及安全性。大溪河三级站取水口是研究的重点，其取水口清污自 2003 年投入使用以来，面临着频繁堵塞、清理效率低和人员安全隐患等问题。通过引入自动化清污技术，可以有效解决这些问题，推动水电站向无人化、智慧化管理迈进。

1 研究背景与现有问题

大溪河三级站取水口的拦污栅自 2003 年投入使用以来，已经连续运行超过 22 年。尽管该设施在初期的运行中发挥了拦截漂浮物的基础作用，但由于未配备专门清污设备，清污作业完全依赖人工完成，随着运行时间的延长，人工捞渣的弊端日益凸显，主要表现为效率低、风险高以及劳动强度大。每年，由于取水口的堵塞问题，电站需停机捞渣约 18 次，每次停机需长达 24h，这不仅浪费了大量的时间，还造成了约 400 万 kW·h 的年发电量损失。尤其是在汛期高水位情况下，人工捞渣几乎无法及时完成，

进一步加剧了电站的运行压力。

此外，人工操作过程中存在较大的安全隐患，尤其是在临水作业时，工作人员容易发生落水等安全事故，威胁到人员生命安全。而在环保方面，漂浮物的清理往往不及时，可能导致环境污染，进而引发社会舆论问题，损害电站的社会形象。这些问题迫切需要通过引入先进的自动捞渣技术来解决，从而提升清污效率，减少人工风险，并有效保证环保合规，确保电站的长期安全稳定运行。

2 自动捞渣机的设计与应用

2.1 设备选型与安装

为了解决大溪河三级站取水口现有的人工捞渣效率低、作业风险高以及人工成本高的问题，项目前期对比了 3 种主流清污技术：抓斗式清污机（单次清污量 5t，但需间歇作业，适应水深 $\geq 5\text{m}$ ）、液压式清污机（清污效率 15t/h，但维护成本高）、全自动回转式清污机（连续作业，适应水深 2~10m）。结合大溪河三级站“水深 3~6m、漂浮物持续流入”的特点，最终选择 2 套 HQN7m \times 12.7m-80°全自动回转式清污机（每套含 2 台单机，共 4 台），其连续作业能力可避免间歇停机导致的漂浮物堆积。这些设备的选型旨在通过自动化技术提高清污效率，减少人工干预，确保设备长期稳定运行，并显著降低人工成本。

该清污机的设计具有以下优势:

清污能力: 每台清污机的设计清污能力为 20~30t/h, 能够持续高效地清理漂浮物, 避免了传统人工捞渣过程中因停机捞渣而导致的发电量损失。清污机的全过水断面设计进一步提升了清污效率, 确保没有清污盲区。这种设计使得清污作业能够覆盖取水口的整个水面, 彻底清除漂浮物, 有效避免堵塞现象, 保障水流畅通。

结构设计: 该设备采用一体双机式设计 (每套含 2 台单机), 并内置减速机, 具备无障碍型结构。这种设计消除了外部设备干扰造成的故障风险, 设备结构紧凑且稳定, 能够适应复杂水域的作业环境。设备每台配备高强度牵引链条与回转齿耙系统, 齿耙可以精确插入栅条, 深度适宜, 能够高效带离附着的漂浮物。设计中的高强度牵引链条确保了设备在长时间运行中的可靠性与稳定性。针对大溪河三级站取水口漂浮物 (以树枝、塑料为主) 和水流冲击特点, 对清污机核心结构进行了针对性优化:

(1) 齿耙结构优化: 将原有标准齿耙的间距从 10cm 调整为 8cm, 齿尖角度从 30° 增至 45°, 并在齿耙末端增加 0.5cm 厚耐磨橡胶层——优化后对细小漂浮物的抓取率提升 30%, 且减少齿耙与栅条的刚性碰撞磨损;

(2) 牵引链条张紧度自适应调节: 在链条传动系统中增加压力传感器, 当漂浮物负载过大时 (超过 50kg/齿耙), 自动调节张紧度并降低运行速度, 避免链条断裂——解决了传统设备因瞬时过载导致的停机问题。

智能控制: 该设备配备基于 PLC (可编程逻辑控制器) 的智能控制系统, 配套开关电源、网络通讯模块 (支持以太网通讯) 及人机交互界面, 实现三大核心功能:

(1) 远程控制与监控: 通过电站中控室平台可远程启停设备、调整运行参数, 并实时查看清污状态 (如齿耙运行速度、清污量统计);

(2) 信号与故障判断: 内置电流、温度等传感器, 可自动识别链条卡滞、电机过载等故障, 触发声光报警并上传故障代码;

(3) 灵活切换模式: 支持手动 (现场操作)、自动 (按水位自适应)、定时 (预设时段运行) 三种模式无缝切换, 满足不同工况需求。

该设备安装于取水口拦污栅下游侧, 通过齿耙与拦污栅的精准对接实现全过水断面覆盖。清污机的回转半径和齿耙长度根据取水口宽度 (12m) 设计, 确保从水面到水底的漂浮物均能被有效抓取, 配合连续运行模式, 显著提升了清污效率, 减少了传统人工捞渣方法所带来的停机时间和人工成本, 为大溪河三级站的高效运行提供了技术保障。

2.2 土建工程与配套设施

在自动捞渣机设备安装过程中, 土建工程的设计与改造同样至关重要。为了确保设备的长期稳定运行, 并保障后续与维护与操作安全, 项目不仅在设备安装时进行了周密

的规划, 还同步进行了土建工程的建设和配套设施的完善。

首先, 底板基础是整个系统稳定运行的基础。本项目浇筑了长 16m、宽 6m、厚 0.6m 的钢筋混凝土底板基础 (C30 混凝土, 内置 $\Phi 20$ mm 螺纹钢网格, 间距 15cm), 为清污设备及配套传输系统提供了坚实的支撑。这一基础的设计充分考虑了水流冲击力 (最大 1.2kN/m^2)、设备自重 (单套清污机约 8t) 及漂浮物瞬时负载, 通过有限元分析验证, 可承受长期复合荷载, 基础沉降量控制在 $\leq 2\text{mm}$ /年, 有效避免了设备运行中的震动或位移。

其次, 针对 4 台清污机的安装稳定性需求, 项目在底板基础上浇筑了 2 道钢筋混凝土承重墙 (高 3.5m、厚 0.8m、长 12m), 墙体与底板基础整体浇筑, 内部植入 $\Phi 25$ mm 竖向钢筋 (间距 20cm)。清污机通过预埋螺栓固定在承重墙上, 螺栓嵌入墙体深度 $\geq 50\text{cm}$, 确保设备运行时的径向和轴向稳定性, 彻底解决了单纯立柱支撑的结构薄弱问题。

再次, 项目在施工过程中同步建设了传输平台与垃圾堆放平台, 以确保清理后的污物能够顺利输送和集中存放。传输带平台 (长 20m、宽 1.5m) 采用钢结构支架与混凝土面板组合设计, 与清污机出料口精准对接, 确保污物通过皮带输送机系统高效转移至垃圾堆放平台。垃圾堆放平台 (长 10m、宽 8m、高 1.2m) 采用混凝土围挡设计, 容量满足 3 天清污量存放需求, 平台底部设置排水孔避免积水, 为后续污物外运提供便利。

最后, 项目配套建设了设备操作间 (长 4m、宽 3m), 内置控制柜、电源柜及应急操作装置, 操作间采用防水设计, 确保电气系统不受潮湿环境影响。

这些土建工程不仅为清污设备的安装提供了坚实的基础, 还确保了整个清污系统在运行过程中高效、稳定地运作, 为设备的长期稳定性和安全性提供了必要的保障。

2.3 施工技术与实施方案

为了确保自动捞渣机设备的顺利安装与土建施工的高效进行, 本项目采用了多项先进的施工技术和实施方案, 确保了施工过程中的稳定性和安全性。

首先, 由于施工区域位于水域环境中, 为了避免水流对施工进度的干扰, 项目采用了围堰截流技术。该技术通过使用黏土沙袋围堰 (高 2m、顶宽 1.5m), 配合防渗膜铺设, 成功隔离了施工区域的水流, 使施工区域保持干燥, 确保了基础开挖和混凝土浇筑能够顺利进行。通过这一技术, 施工团队能够在不受水流影响的情况下完成底板基础和承重墙的建设, 为设备的稳固安装提供了理想的环境。

在设备吊装与安装方面, 为了确保 4 台清污机能够精准对接承重墙, 本项目选用了 50t 吊车进行吊装 (考虑设备自重及安装高度)。通过钢索吊装带与平衡梁的配合, 将清污机缓慢吊至安装位置, 利用激光水平仪校准垂直度 (误差 $\leq 0.5^\circ$), 再通过预埋螺栓固定。安装过程中重点控制相邻清污机的齿耙衔接间隙 ($\leq 5\text{cm}$), 避免出现清

污盲区。

最后,电气系统调试是本项目的关键步骤之一。项目组通过精确的线路铺设(动力线与信号线分开穿管,避免干扰)、控制柜安装和设备与控制系统的连接,完成了设备的电气系统调试工作。调试内容包括:

(1) 通讯测试:验证 PLC 与中控室的信号传输稳定性,确保远程控制指令响应时间 $\leq 1s$;

(2) 功能测试:模拟不同故障(如链条卡滞、水位突变),验证报警系统和自动保护功能;

(3) 联动测试:测试清污机与传输带的协同运行,确保污染物输送顺畅。

通过这些先进的施工技术和实施方案,本项目顺利完成了清污设备的安装与调试,为后期设备的高效、稳定运行奠定了坚实的基础,并为类似项目的实施提供了宝贵的经验。

3 自动捞渣机的技术路线

3.1 关键技术与技术难点

本研究的关键技术包括一体双机回转式清污机的集成应用、适配性土建施工与设备安装技术,以及高效运行与智能控制技术。每项技术都针对现有问题提出了有效的解决方案,以确保清污设备在不同工况下都能稳定高效地运行。

一体双机回转式清污机:该技术通过集成化设计,实现了拦污与清污一体化操作。传统的清污设备往往存在拦污栅与清污机之间的衔接问题,而一体双机回转式清污机通过将拦污栅和清污功能融为一体,避免了传统模式中的设备连接问题,减少了设备间协调的复杂性,提高了清污效率。

土建基础适配性:由于设备安装的位置及现场环境的复杂性,土建基础的设计需要确保设备的稳定性和长期运行的可靠性。为此,项目采用了精确的土建工程设计和施工,通过浇筑钢筋混凝土基础以及设备吊装时的精准定位,确保了清污机设备的稳定性,避免了安装过程中可能出现的位移或不稳定问题。

智能控制系统:本项目设计的智能控制系统包括手动、自动和定时三种模式,并通过水位传感器与电气控制系统的配合,确保设备能够在不同水位条件下稳定运行。传统的人工捞渣方式容易受到水位变化的影响,导致清污工作中断,而本系统通过实时监测水位并自动调整设备的运行参数,保证了设备在枯水期和汛期等不同水位条件下的稳定清污能力。

3.2 技术难点的解决方案

在实际应用过程中,自动捞渣机面临着多个技术难点,尤其是水位变化对清污效率和设备稳定性带来的挑战。为了有效解决这些技术问题,本研究提出了精确的解决方案,并结合实际工况进行优化,以确保设备在复杂水文环境下

仍能高效、稳定地运行。

水位适应性:水位变化是影响清污效率的重要因素,尤其是在枯水期和汛期时,水位波动较大,往往会导致清污效率显著下降。传统的清污方式无法有效应对这种变化,因此水位的自适应控制成为本项目的关键技术难点。为了应对这一挑战,本项目设计了水位自适应控制机制。该机制通过实时监测水位的变化,自动调整清污机的运行参数。例如,当水位较低时,系统会自动增强拦污功能,以捕捉更多的漂浮物,确保即使水流较小,也能达到最佳的清污效果;而在水位较高时,设备则会增加清污频率,确保能够及时清理更多的漂浮物,避免因漂浮物堆积而影响水流通畅。这一设计有效地保证了设备能够在不同水位条件下高效稳定地清污,解决了传统手动清污过程中因水位变化导致的清污中断问题。通过这种灵活调整的机制,自动捞渣机能够应对各种水位变化,维持稳定的工作状态,大大提升了清污效率和设备的适应性。

设备稳定性:设备在长期运行过程中需要承受较大的水压力和负载,因此保证设备长期稳定性是项目成功的关键因素之一。在设计过程中,我们特别注重了设备基础的稳固性和长期承载能力。本项目采用了高强度钢筋混凝土基础,确保设备可以承受长期水流冲击和重负荷作业的压力。通过精确的施工管理,确保了基础的平整度和稳定性,避免了由于基础不稳导致的设备震动或位置偏移,从而保证设备的长期稳定运行。设备的底板和平台的建设也采用了严谨的技术标准,确保每个环节都达到设计要求,特别是在水流压力较大的情况下,设备仍能保持精确稳定的运行。

精准安装与定位:为了进一步确保设备的稳定性,项目采用了精准的吊装技术。在设备吊装过程中,使用了高精度测量工具和仪器,确保清污设备的每个部件都能够精确安装到预定位置。通过钢索和支撑架结构的结合,设备得以稳固吊装,并确保了安装过程中的垂直度和稳定性。设备安装时的精确定位确保了设备与基础平台之间的配合默契,减少了设备运行过程中因安装误差导致的偏移或震动。

通过以上一系列技术方案的实施,成功解决了水位变化对清污效率的影响以及设备稳定性的问题,不仅提升了自动捞渣机的适应性和可靠性,还为电站的持续稳定运行提供了强有力的技术保障。这些技术创新确保了清污系统能够高效运行,显著提高了水电站的运行效率,并为未来类似项目提供了宝贵的技术经验。

4 项目实施与预期成果

4.1 技术指标

本项目的核心目标是提升清污效率,并确保设备的长期稳定运行,达到显著的技术指标。根据项目设计方案,清污机的清污能力将提升至 20~30t/h,能够在取水口实现全过水断面的连续清污作业。这一改进能够有效避免由

于人工捞渣的低效率导致的停机时间,确保电站运行的连续性和高效性。通过自动化设备替代人工操作,不仅能够提高清污效率,还能大幅减少停机时间,保障了电站的正常发电。

经济效益方面,项目预计每年将增加约 400 万 kW·h 的发电量,相较于人工捞渣系统所造成的能源损失,显著提升了发电效益。同时,采用自动捞渣技术后,每年可以节省约 5 万元的人工捞渣成本,这部分节省的费用将为电站提供更好的经济回报。考虑到项目的总投资为 149.72 万元,预计该项技术改造将在 2 年内收回投资,体现了其优越的投资回报率。

4.2 管理与环保目标

在管理层面,本项目的最大创新在于实现了清污作业的无人化,避免了传统人工操作的安全隐患。人工捞渣作业存在临水临边的安全风险,尤其是在高水位时,操作人员容易发生落水事故。通过引入全自动化清污系统,所有操作均由设备自动完成,消除了人工干预,确保了作业环境的安全性。这不仅提高了工作效率,还为电站创造了更加安全、健康的工作环境。

在环保方面,项目也做出了积极的贡献。通过自动捞渣机的持续高效清污,浮动物能够及时被清理,避免了漂浮物在水域内的积聚,减少了对水体的污染。由于清污效率的提升,电站避免了环保舆情事件的发生,进一步提高了电站的环保合规性。项目的环保合规目标不仅满足了国家环保要求,还提升了电站在社会公众中的形象和信誉度。

综上所述,本项目不仅在技术上实现了清污作业的自动化升级,在经济效益、管理安全和环保合规方面也带来

了显著的改善。通过技术创新与管理优化,项目为电站的可持续发展提供了强有力的支持。

5 结论

通过引入自动捞渣机技术,径流式水电站的取水口清污作业效率得到了显著提升。自动化控制系统(含 PLC 及远程监控功能)不仅解决了人工捞渣效率低、风险高等问题,还通过优化的土建结构(如承重墙、加厚底板)保障了设备稳定性,最终实现了降低人工成本、增加发电量的目标。该技术的成功应用为水电站的智能化提供了实践经验,也为类似电站的清污技术改造提供了宝贵的参考。未来,随着技术的不断优化,自动捞渣机将在更多电站中得到广泛应用。

[参考文献]

- [1]陈洪波.捞渣机器人轨迹规划及跟踪控制研究[D].甘肃:兰州交通大学,2021.
- [2]刘慧敏,王燕龙,关志成.浅析捞渣机转速自动控制在 330MW 机组的应用[J].电力设备管理,2021(6):88-89.
- [3]孙建国,石家魁,孙殿承,等.火电机组 GBL 型捞渣机系统的优化改造策略[J].自动化仪表,2020,41(12):34-37.
- [4]张效源.典型捞渣机的可靠性提升技术分析[J].集成电路应用,2021,38(10):222-223.
- [5]王顺.基于视觉引导的捞渣机器人系统开发与应用研究[D].北京:冶金自动化研究设计院,2021.

作者简介:谭金权(1980.12—),男,毕业院校:中央广播电视大学,所学专业:行政管理,当前就职单位:渝能(集团)有限责任公司小水电管理中心,职务:小水电管理中心专责,职称级别:中级电气工程师。