

# 煤矿井下水仓清淤机器人的研发与应用

刘佳

煤矿井下水仓是保证安全生产、防止矿井水害的重要部位。随着矿井开采深度的延伸,矿井用水量逐渐增大,水仓清淤泵不能及时排往地面的涌水会不断积存在井下水仓中。由于大量涌水会携带固体颗粒物进入水仓,使得井下水仓有效蓄水容积减小,必须定期对水仓内淤积的固体物进行清理。井下水仓工作条件恶劣,工作空间有限,淤积物中含水量大,清淤劳动强度大,工作效率低,清淤周期长,影响安全生产,并给煤矿生产带来安全隐患和巨大的持续性经济消耗。因此实时化、自主化、最大效率化的水仓清淤机器人成为矿井水仓清淤的新研究方向,采用水仓清淤机器人对井下水仓煤泥进行清理,不仅可以解决水仓清淤作业存在的痛点难点,还能大幅提高水仓清淤方式的智能化水平。

## 煤矿井下水仓清淤机器人

煤矿井下水仓清淤机器人本体结构如图1所示,主要由循环铲斗、行走装置、卷扬系统、液压动力系统、环境感知系统、无线遥控电气系统等组成,基于井下水仓环境机器人高精度定位导航技术,可自主规划路径进行清仓作业。水仓清淤机器人采用全液压驱动方式,整个系统采用开式回路,具备清淤装置控制油路、负载反馈式比例多路阀组成的油路。其中,负责行走的液压部分采用负载敏感控制技术能够实现机器人的精准稳定控制,避免清淤机器人在行走时出现不受控制的大幅度动作现象。此外,水仓清淤机器人通过搭载激光传感器+双目视觉传感器,后部配置监控摄像机与超声波避障传感器,可有效实现与清淤机器人清淤装置的联动控制,其视频画面可集成到控制软件内,具备遇到障碍能够自动调整或停机的能力。

煤矿井下水仓清淤机器人的工作原理:清淤机器人启动后,螺旋马达带动集料螺旋叶片开始旋转收集物料,由于集料螺旋机构上螺旋形为对称布置,旋转过程中在螺旋齿面的推动下,将集料螺旋装置所能触及范围内的煤泥卷向其正前方中部,随提斗装置运送到机载储料箱中;泵送机构的2组油缸相互交替配合工作,一侧带动夹管阀装置从储料箱带出煤泥,另一侧带动泵送输出管将煤泥排入到高压管中,高压管负责将煤泥输送到距离清淤机器人1 000 m以外的沉淀池或某个指定地点。在清淤机器人的水仓清理工作中,各部分机械结构相互协调配合工作。

煤矿井下水仓清淤工艺复杂,涉及水仓煤泥性质、水仓结构等因素。结合国能宁夏煤业有限责任公司红柳煤矿的水仓实际情况,中煤科工机器人科技有限公司提出一种水仓清淤高效作业工艺流程,具体如下:①由于矿井水流经采煤工作面、掘进工作面及巷道时会携带大量煤粉、煤粒和杂物汇入水仓,因此首先针对煤泥密度进行探析,测定水仓内煤泥密度,判定煤泥性质,为机器人泵送装置参数控制提供依据;②机器人装载机下到仓底后,进行仓内地图构建并规划清淤路径,机器人按照路径行进,避免出现清理盲区,同时循环铲斗开始工作;



图1 煤矿井下水仓清淤机器人本体结构



③将煤泥泵送到水煤泥处理系统，实现泥水粗分离；  
④粗分完成后，煤泥进入双工位压滤机，装载淤泥运输到漏斗组件卸料，干料直接掉落到刮板输送机运走，稀料滑落到集水箱，通过冲洗设备冲至污水箱中，再次通过渣浆泵输送到泥水离心机进行泥水分离，干料落到刮板输送机运输，清水流到副水箱。整套工艺流程可以实现煤泥饼水分含量小于20%，沿途运输无污染。

## 煤矿井下水仓清淤机器人关键技术

煤矿井下水仓清淤机器人关键技术主要集中于模块化的清淤结构、高可靠的液压控制和高分辨探测系统，通过攻克机器人自适应柔性清淤、避障安全机制、清淤量自动识别等痛点难题，可解决现有水仓清理需排空水作业、效率低及清仓周期长、清理效果差等问题，具体如下。

### (1) 高集成度模块化清淤机器人结构

基于矿用装载机式系统，综合考虑系统设计全流程，包括机器人的需求分析、本体有效载荷确定、动力设计、外形设计、机器人内部总体合理布局、静力学分析和控制系统设计等，设定性能指标的安全裕量，自顶向下完成各分系统和设备选型，最后通过系统仿真、测试试验等对设计结果进行校核验证。集料装置（图2）将煤泥进行搅拌、集料、装运至送料斗，其组成包括链条、双侧螺旋、铲斗、机架本体、防护架等，采用模块化设计，可根据水仓巷道宽度进行增减模块，清淤时做到一次前进即

可清理完水仓，提高清淤效率。

### (2) 井下水仓高精度定位导航系统

传统的自主导航方法是在导航传感器安装偏角标定完成的基础上，采用周期性地采集到的机器人位姿信息，通过导航方程进行在线推算。但是机器人作业过程存在加减速和转弯机动等非匀速运动特殊情况，频繁的机动会导致导航误差变大。在周期性的采集导航数据特别是多普勒数据周期较长的情况下，不同导航传感器获取信息的时间戳是不一样的，大幅影响了导航精度。因此，笔者提出基于三维激光雷达的视觉SLAM导航定位方法：首先，借助机器视觉、激光雷达SLAM、传感器信息融合等技术，构建出机器人作业所需的高精度三维场景地图；其次，建立基于视觉与激光雷达的松耦合SLAM算法框架，完成三维地图与机器人位姿在时间、空间上的坐标统一；最后，建立层次化的混合地图导航方法，实现非结构化环境下水仓清淤机器人的高精度自主定位行走。

此外，自主避障是水仓清淤机器人的必备功能之一，然而受限于井下水仓暗黑、复杂地形等恶劣环境，常导致机器人避障失效，笔者创新性地在机器人前端及两侧安装超声波传感器，完成高精度局部环境探测和在线全局地图构建相结合的路径规划，实现水仓清淤机器人的自主行走，保障水仓作业安全，煤矿水仓清淤机器人路径规划方法如图3所示。

### (3) 开放式高可靠性液压控制系统

煤矿水仓清淤机器人液压控制系统如图4所示，由液压油箱总成、主电机泵组、举升油缸、卷缆马达、多组控制阀及液压管路等组成，电机驱动液压泵1、液压泵2、液压泵3同时旋转，分别将压力油输送给阀组1、阀组2、阀组3。其中，液压泵1和阀组1用于控制混凝土泵主缸、左右行走；液压泵2和阀组2用于控制混凝土泵摆缸、搅拌马达及进料给料马达；液压泵3和阀组3用于控制卷缆马达和举升油缸。为进一步提高液压系统对不同复杂地形适应性，笔者提出一种进料集料装置地面自适应柔性清淤技术，将进料集料装置举升机构采用液压油

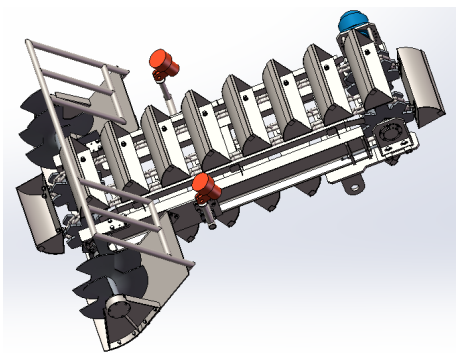


图2 集料装置

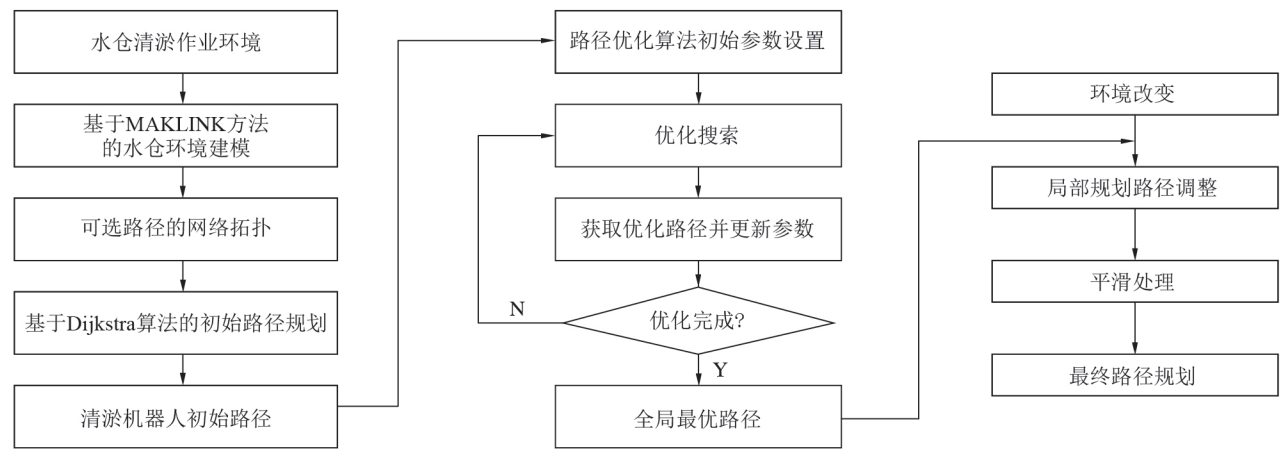


图3 煤矿水仓清淤机器人路径规划方法

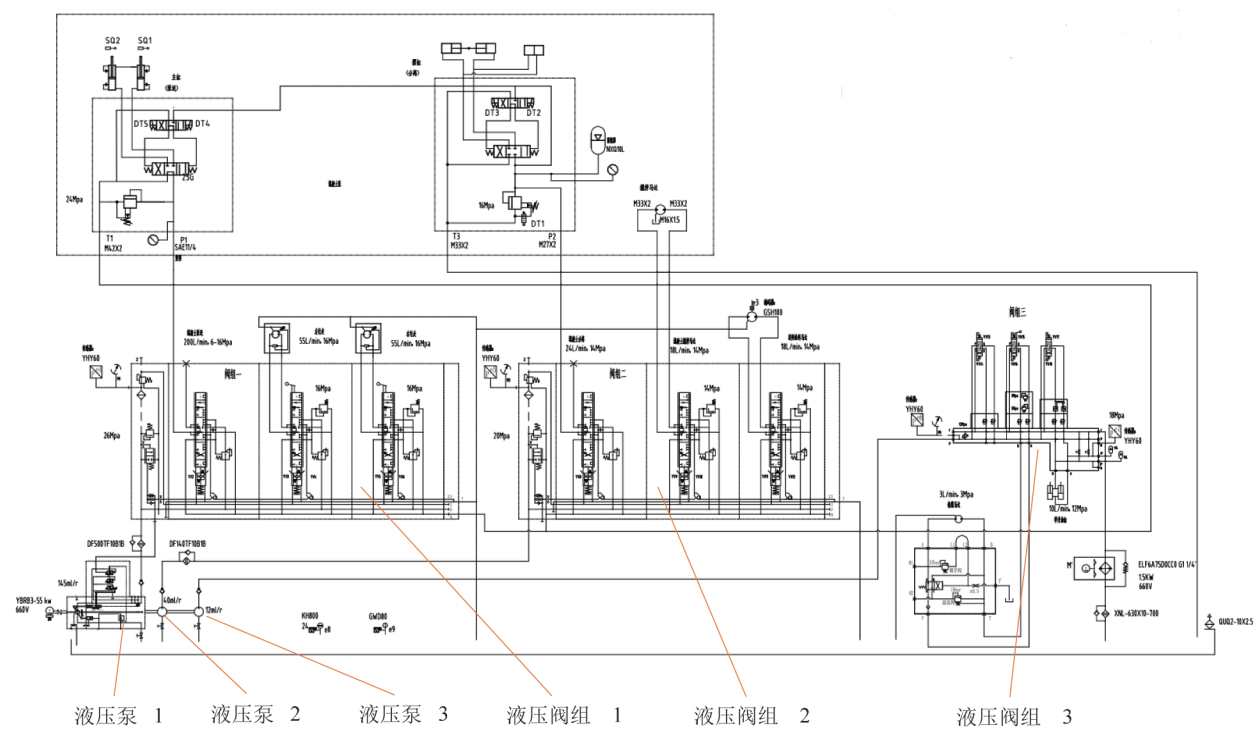


图4 水仓清淤机器人液压系统原理

缸控制,在液压换向阀处于中位时,通过对液压油缸串联蓄能器,来承担进料集料装置随地面起伏导致的油缸被动伸缩,溢出的液压油通过蓄能器储能,从而使进料集料装置能够根据水仓底部凹凸形态自适应浮动调整举升幅度,避免进料集料装置因突遇水仓底部凸起而卡住损坏,以保证清淤工作的顺利执行。

煤矿水仓清淤机器人液压控制系统具有本地控制和自动控制2种模式,自动控制模式通过液压油缸、液压马达、液压油箱等位置安装的行程、转速、液位和温度等传感器来实现;本地控制则用于煤矿

水仓清淤机器人紧急情况下,采用液压阀上的液压手柄进行操作指令控制;此外,水仓清淤机器人安装有甲烷传感器,可以实时检测水仓内甲烷浓度,当甲烷浓度超限时,控制系统对真空电磁启动箱进行自动断电保护,以确保工作人员的安全。

#### (4) 多传感器融合高分辨率探测系统

采用地层剖面仪、水平测距扫描仪、垂直测距扫描仪和前视多波束等多种传感器,基于多传感器数据融合技术,探测机器人周围水环境和淤积环境数据,并与机器人定位导航数据进行融合滤波,实



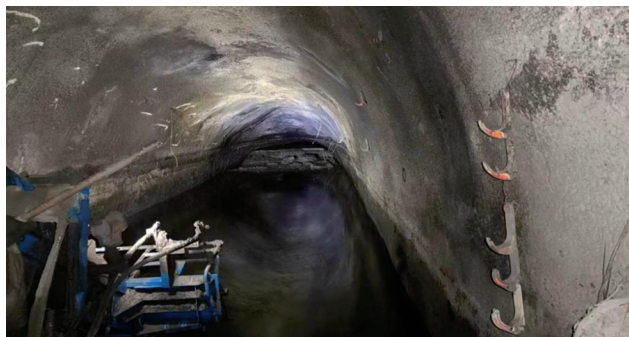


图6 水仓清淤机器人井下应用



现煤矿井下水仓环境的三维场景构建和淤积层实时测量,指导集料系统的抬起高度,同时监控淤泥含水量,从而自动调节集料口稀释煤泥装置,统一淤泥浓度,为后续机器人全局路径规划和局部路径规划提供数据支撑。水下高精度地形探测结果如图5所示。

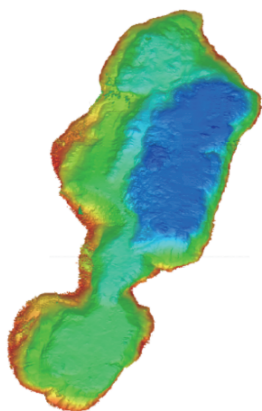


图5 水下高精度地形探测结果

## 煤矿井下水仓清淤机器人应用

煤矿水仓清淤机器人已在红柳煤矿、枣泉煤矿等多个煤矿进行了实际应用,主要解决了矿井水仓周期性清淤导致水仓有效蓄水量减少、矿井水仓手动式或半机械化清淤导致清淤效率严重不足和常规水仓清淤大量人工及安全性等问题。如图6所示,在红柳煤矿14采区880水仓试运行期间,水仓清淤机器人的煤泥淤积测量精度为4.5 cm,行走定位精度为7.6 cm,在0.8 m/min的行走速度下,实现了煤泥处理量可达24.5 m<sup>3</sup>/h。特别是水仓清淤机器人采用履带式底盘以增强地面适应性,采用顶置式粗分

机以减小占地面积,采用光纤信号传输以避免噪声干扰等,使得该机器人在替代人工高效完成清淤作业的同时,实现了清淤工作由7~8人减至2~3人,大幅节约了煤矿企业的运维成本,减人增安提效效果显著。

## 结 语

煤矿井下水仓清淤机器人直接解决了暗黑、场景退化条件下的机器人一体化结构、高精度定位及自适应清理等技术难题,可以为煤矿水仓清淤机器人实际应用与未来推广提供重要的技术支撑。煤矿井下水仓清淤机器人通过代替人工作业,有效地解决了现有作业设备遥控操作、效率低等作业难题,提升了煤矿安全生产智能化管理水平,提高了煤矿企业的劳动生产率,降低了工人的劳动强度。

未来,将针对性地开发不同淤泥条件的水仓清淤机器人,以满足砂石、淤泥等不同场景下的高效清淤需求。同时,深度攻关面向复杂清淤任务的自主识别、自主分析及自主决策等关键技术,探究机器人的新构型与轻量化本体结构,探索机器人的优化运动控制算法,实现快速且稳定的清淤作业,进一步提升水仓清淤机器人的智能化水平。

■ 责任编辑:李金松

### 作者简介:

刘佳,高级工程师,主要从事煤矿智能化装备研发工作。E-mail: 499137590@qq.com

作者单位:中煤科工机器人科技有限公司