



# 复杂条件下掘锚一体化远程智能快速掘进控制系统

王孟 朱科强 王强 路龙波

“十三五”以来，在国家相关政策的大力支持下，巷道掘进理论、技术、装备等方面的相关研究已取得较多成果，研发的快速掘进成套装备实现了掘进、支护、运输并行连续作业，且实现了远程监测监控，有效地提高了掘进效率和自动化程度；此外，还研发了掘、支、运“三位一体”的巷道掘进方法。然而，相较于我国初具智能化的综采成套装备，掘进装备智能化发展水平明显滞后，效率较低，导致煤炭开采过程中“采掘矛盾”日益突出。

陕西陕煤黄陵矿业有限公司二号煤矿（以下简称黄陵二号煤矿）积极响应煤炭行业“机械化换人、自动化减人”的号召，坚持掘进装备成套化、系统化和智能化的发展思路，于2021年8月搭建了以掘锚一体机EJM304/4-2、运锚机MZHB6-1200/20、可弯曲带式转载机Y100/160/135、迈步式自移机尾DWZY1000/1500和带式输送机为核心的智能快速掘进成套装备，并在井下掘进工作面安装应用，积极探索掘进智能化技术。

## 建设目标

以缓解采掘进度失衡，减少井下作业人员数量，降低工作人员作业强度，提高掘进工作面智能化水平为目标，开发建设一条小于100 m的高速、可靠、稳定传输通道，构建各个单机设备的感知网络，实现掘进工作面各个单机设备采、掘、运、除尘、排水、供电的智能化，控制集中化，操作少人化，信息可视化，故障诊断系统化，显示动态化，电液控制曲线化，设备维护远程化，系统运行决策

化，以及一键启停、自动截割、自主定位、自动锚护，并最终形成一套智能快速掘进智控系统。

## 关键技术

智能快速掘进控制系统解决了传统掘进模式中遇到的看不清、断不明、掘不快、修不了等实际问题，通过感知煤层赋存和围岩特性，采用自动截割、智能导航、自主行走、远程集控等技术将工作面各种设备和环境有机地统一起来，实现生产过程“机器决策为主，人工干预为辅”的目的。

## 自动截割技术

全宽截割技术不仅解决了传统悬臂式掘进机截割效率低的难题，同时也降低了截割的自动化控制难度。悬臂式掘进机的自动截割主要包含定向截割、自适应截割和记忆截割3个方面内容，所涉及的关键技术包括机身姿态求解、截割轨迹规划、循迹跟踪控制及断面成形误差分析与修正等。基于掘锚一体机截割工艺和机械结构特点，其自动截割控制相对容易，主要表现在：截割面成形工艺简单（升刀、扫顶、下切、扫底、复位等）、截割轨迹相对单一、截割控制涉及控制变量相对较少（掏槽油缸和截割升降油缸）。悬臂式掘进机自动截割技术路线如下：

（1）确定掘锚一体机自动截割上下断面成形的控制方法，明确控制截割边界的关键动态参数，设计掘锚一体机自动截割边界成形的控制算法。

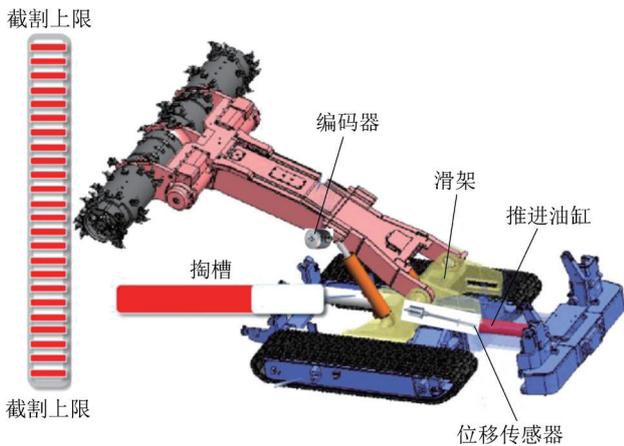


图1 掘锚一体机自动截割示意

(2) 寻找掘锚一体机截割过程中截割负荷的变化规律，以截割电机工作电流为输入量，结合截割臂旋转角度、掏槽位移实时监测的传感数据，以截割臂垂直升降速度、掏槽油缸伸缩速度为输出量，建立截割油缸速度与截割功率的模糊关系模型。

(3) 采用模糊控制理论，实现截割过程的调速控制，进一步提高系统的截割精度和边界的形成质量。掘锚一体机自动截割如图1所示。

### 掘进导航

由于煤矿井下无GPS、北斗等导航系统，如何实现掘进系统的精确定位定向已成为井下掘进的关键问题。为实现掘进装备智能导航，需要深入研究以惯导为核心的多传感器信息融合精确定位定向方法和智能导航控制方法。掘进导航技术主要解决3类问题：①掘进定向问题。保证成型巷道在空间位置上满足使用要求，确保综采工作面的顺利布置和高效开采，掘进定向问题的解决需要将掘进系统的导航信息与三维动态地质模型进行有效融合；②掘进机定位问题。保证掘进机和成型巷道的相对位姿，为自动截割控制提供精确位姿信息，保证巷道成型质量；③掘进系统协同作业问题。保证掘进机与后配套设备自动跟机作业。

掘进导航技术路线：确定采用惯性导航与全

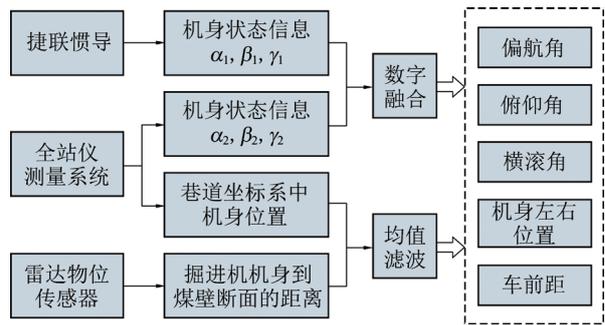


图2 双履带掘锚机机身位姿测量原理

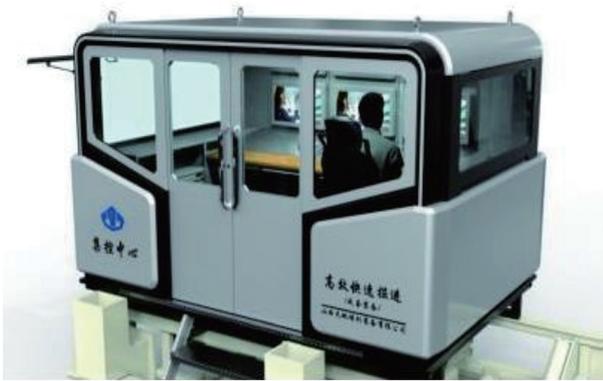
自动全站仪组合方法检测掘锚一体机的机身位姿，双履带掘锚机机身位姿测量原理如图2所示。图2中 $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\gamma_1$ 分别为捷联惯导对装备俯仰角、横滚角和航向角的解析值。 $\alpha_2$ 、 $\beta_2$ 、 $\gamma_2$ 分别表示捷联惯导对装备俯仰角、横滚角和航向角的解析值。

惯导组合导航系统包括捷联惯导、全自动全站仪、两平行指向仪、雷达物位传感器和数据分析仪等装置。惯导组合导航系统基于掘锚一体机三维数字模型，解析多源感知数据获得掘锚机机身准确位姿。

### 自主行走

掘锚一體機的主要動作可分為截割作業、錨護作業和設備行走，其中設備具備自主行走功能是掘進設備自動化和智能化的關鍵技術之一。黃陵二號煤礦為實現掘進裝備井下自主行走，結合慣性導航系統的航向及姿態數據，完成了對掘錨一體機航向、姿態及定位數據的精確測量，同時實現了對慣性導航系統的校準，為掘錨一體機的遠程控制及行走自動控制提供了精確的航向及姿態數據。

自主行走技術路線：首先，由於掘錨機採用雙履帶行走機構，採用差分驅動方式作為行走規劃與控制的主要方法；其次，對比液壓牽引驅動與變頻機牽引驅動的優劣，選擇較為合適的一種牽引驅動方式；最後，確定適應性強、擬合度高的行走控制模型，以獲得良好的行走位姿控制精度。



(a) 外观



(b) 内部操作台

图3 井下掘进工作面集控中心

## 远程集控

掘进机器人的控制方式包括井下离机视距、井下离机任意距离超视距和地面远程可视化控制3种。在设备无线接入井下环网的基础上,实现地面控制室对掘进机器人的工况环境可视化,机身状态可视化,以及实时手动操控的功能。

### (1) 井下掘进工作面集控中心研制

结合快速掘进成套装备作业工序和系统构成,设计应用于快速掘进工作面的集中控制平台,按照程序自动、远控、就地、检修多种控制模式,研制了集中控制平台的硬件和控制软件,实现了快速掘进工作面设备的集中控制。井下掘进工作面集控中心如图3所示。

### (2) 井上调度中心集控平台研制

井上调度中心集控平台通过光纤网络布设,将矿井环网延伸到快掘工作面,通过光纤接入井下集控中心,井上集控中心可实现井下集控中心的全部功能,井下集控中心设备风格按黄陵二号煤矿调度中心整体布局风格设计。井上调度中心集控平台如图4所示。

### (3) 井下以太网环网至快掘工作面的布置

将矿井环网延伸到快掘工作面,通过光纤接入井下集控中心,工作面网络建设是实现快速掘进装备地面自动化集控的基础。通信网络构成如图5所示。

### (4) 快速掘进工作面视频动态跟机监控

掘锚机控制网络延伸扩展,掘锚机安装WiFi



图4 井上调度中心集控平台

或4G/5G无线终端,通过无线方式融合掘锚机视频及控制信息,采用信息融合和可视化技术,实现了掘锚机井下、井上远程控制和截割场景的异地实时再现。井上调度室视频监控如图6所示。

## 智能快掘控制系统技术方案

采用现场调研、优化设计、元部件试验、系统地面联调、井下工业性试验相结合的综合研究方法,依托黄陵二号煤矿的煤层条件和快速掘进成套装备应用经验,针对掘锚一体机、锚杆装载机、柔性带式输送机等设备,基于无线通信网络搭建了掘进工作面多机械群的远程可视化控制平台。黄陵二号煤矿快速掘进智能控制系统实施总体技术路线如图7所示。

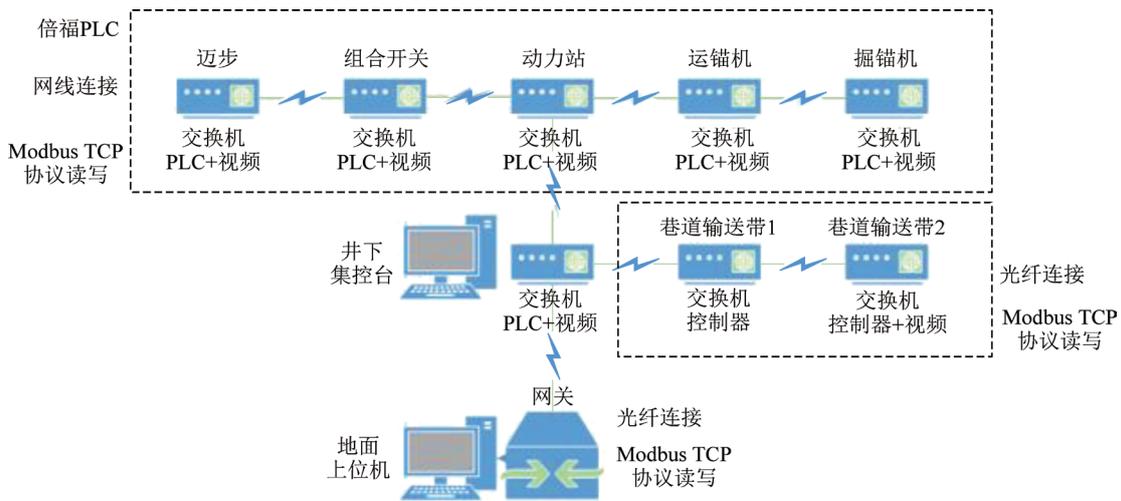


图5 通信网络构成



图6 井上调度室视频监控

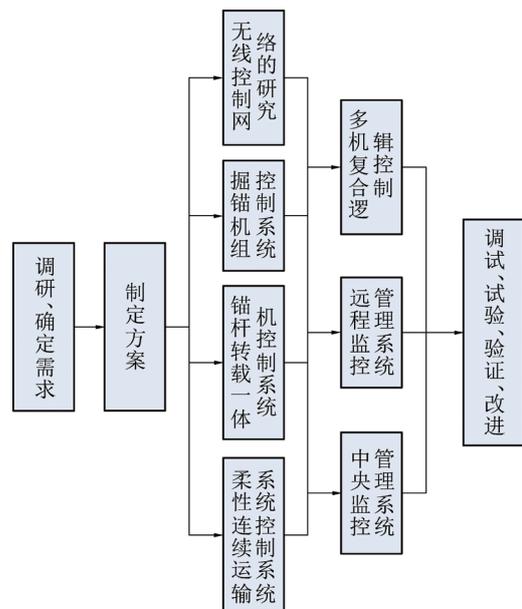


图7 黄陵二号煤矿快速掘进智能控制系统实施总体技术路线

### 结语

黄陵二号煤矿针对中等复杂地质条件，在充分论证水、瓦斯、油型气、油气井等7害俱全的施工条件基础上，研发了地面远程智能快速掘进控制系统，应用集群设备多信息融合网络控制技术，实现了一键启停、自动截割、组合导航、自护行走、自动锚护和设备运行参数的远程实时监测等功能，工作面共5人作业(锚杆支护5人)，掘进工效提高了2倍。

此外，黄陵二号煤矿亦在探寻更高水平的智能掘进技术，为掘进工作面远程管控平台综合赋能，计划集成各类智能探测模块，掘进过程同步采集工作面地理坐标、煤层状态、瓦斯含量、地质水文等数据，全部数据汇总至综采工作面地理信息系

统，并细化透明工作面模型，以保障智能综采的精确运行。

■ 责任编辑：李艾毓

#### 作者简介：

第一作者：王孟，高级工程师，主要从事机电设备管理方面的工作。E-mail: 853708684@qq.com

作者单位：陕西陕煤黄陵矿业有限公司