

# 煤矿智能采煤工作面协同控制系统设计与实现

谭小兵

乐矿能源集团(山西)矿业公司 山西 太原 030032

**摘要:** 随着煤炭工业向智能化、安全化和高效化方向发展,传统采煤作业模式已难以满足现代矿山对安全生产、资源利用效率及人员安全保障的更高要求。本文针对当前煤矿综采工作面设备分散控制、信息孤岛严重、协同能力弱等问题,提出一种基于多源信息融合与分布式协同控制架构的智能采煤工作面协同控制系统。系统采用“云-边-端”三级架构,集成惯性导航、激光雷达、红外热成像、液压支架压力传感、采煤机位置姿态感知等多模态传感器数据,构建高精度数字孪生模型;通过边缘计算节点实现本地实时决策,并结合云端大数据分析优化全局调度策略;设计基于事件触发机制的协同控制算法,实现采煤机、液压支架、刮板输送机三大核心装备的动态自适应联动。

**关键词:** 智能采煤; 协同控制; 数字孪生; 边缘计算; 多源信息融合; 综采工作面

## 引言

近年来,国家大力推进煤矿智能化建设,《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》明确提出到2035年基本实现各类煤矿智能化的目标。在此背景下,构建高度自动化、智能化的采煤工作面成为实现煤矿本质安全与高效生产的关键突破口。综采工作面是煤矿井下最核心的生产单元,主要由采煤机、液压支架、刮板输送机(俗称“三机”)构成。传统控制方式中,“三机”各自独立运行,依赖人工经验进行协调,存在响应滞后、动作不同步、能耗高等问题。尤其在复杂地质条件下,如断层、褶皱或煤层厚度突变区域,缺乏实时感知与自适应调整能力,极易导致设备损坏或生产中断。因此,亟需构建一个能够实现“感知—决策—执行”闭环的智能协同控制系统,打通设备间的信息壁垒,实现全流程自主协同作业。

## 1 系统总体架构设计

### 1.1 设计原则

本系统的设计立足于煤矿安全生产的实际需求,充分考虑井下环境的特殊性和综采工艺的复杂性,确立了“安全优先、数据驱动、分层协同、弹性扩展”的核心设计原则。安全优先意味着所有控制逻辑必须以保障人员生命安全和设备运行稳定为最高准则,系统内置多重冗余保护机制,确保在任何异常工况下都能迅速响应并采取安全措施。数据驱动则强调以多维度、高频率的现场感知数据为基础,支撑上层的智能决策,避免依赖主观经验判断<sup>[1]</sup>。分层协同通过将控制功能合理分布在不同层级,既保证关键环节的毫秒级响应能力,又支持全局层面的优化调度。弹性扩展则体现在系统采用模块化、标准化接口设计,便于未来接入更多新型智能装备,如巡

检机器人、智能锚杆监测装置等,从而持续提升工作面整体智能化水平。

### 1.2 “云-边-端”三级架构

为实现上述设计原则,系统采用了“云-边-端”三级协同架构:

#### 1.2.1 端层(设备层)

部署于采煤机、液压支架、刮板输送机等设备上的各类传感器与执行器,包括:(1)采煤机:惯性测量单元(IMU)、激光雷达、红外热像仪、截割电机电流/温度传感器;(2)液压支架:立柱压力传感器、位移传感器、倾角传感器、电液控阀组;(3)刮板输送机:链条张力传感器、电机振动监测、中部槽磨损检测装置。端层负责原始数据采集与底层控制指令执行,具备本地闭环控制能力(如支架自动跟机)。

#### 1.2.2 边缘层(边缘计算节点)

部署于工作面顺槽的防爆边缘服务器,承担以下功能:多源数据融合与预处理;实时状态估计与异常检测;基于规则或轻量模型的本地协同决策(如采煤机位置触发支架推移);与端层设备通过工业以太网或CAN总线通信,延迟控制在50ms以内。

#### 1.2.3 云层(地面智能管控中心)

位于地面调度室,集成大数据平台与AI引擎,主要功能包括:构建全工作面数字孪生模型;基于历史数据与实时工况的长期调度优化(如截割路径规划、能耗优化);远程监控、故障诊断与专家系统支持;与矿井其他系统(如通风、排水、人员定位)联动。

## 2 多源信息融合与数字孪生建模

### 2.1 多模态感知体系

要实现精准的协同控制,首要前提是构建一个全面、

准确、实时的感知体系。井下环境复杂，单一传感器难以满足需求，因此本系统构建了一个覆盖“空间—设备—环境”三维维度的多模态感知网络。在空间定位方面，由于GPS信号无法穿透岩层，系统采用了UWB（超宽带）与惯性测量单元（IMU）的组合定位技术。UWB提供相对精确的距离测量，而IMU则在信号遮挡或干扰时提供连续的姿态与位移推算，二者通过卡尔曼滤波进行融合，最终实现了采煤机定位精度优于 $\pm 5$ 厘米、支架群定位误差小于10厘米的性能指标<sup>[2]</sup>。在煤岩界面识别方面，系统创新性地融合了激光雷达点云与红外热成像数据。激光雷达能够快速扫描煤壁表面，获取高分辨率的三维形貌信息，清晰展现煤层起伏与构造特征；而红外热像仪则捕捉截割过程中因煤与岩石导热性能差异所导致的温升分布。通过将这两类异构数据输入预先训练好的卷积神经网络（CNN）模型，系统能够在线、实时地识别出煤岩分界线，识别准确率达到92.3%，为采煤机自动调高提供了可靠依据。此外，针对关键设备部件，如采煤机摇臂轴承、支架立柱密封圈等，系统部署了振动、温度、压力等多参数传感器，并利用长短期记忆网络（LSTM）对时序数据进行分析，实现对潜在故障的早期预警，将事后维修转变为事前预防。

## 2.2 数字孪生模型构建

基于上述多源感知数据，系统在云端构建了一个高保真的工作面数字孪生体。这个数字孪生体并非简单的三维可视化模型，而是一个集几何、物理、行为与数据于一体的综合仿真环境。其几何模型精确还原了巷道轮廓、设备布局以及煤层的空间形态；物理模型则通过力学方程模拟了采煤机截割时的反作用力、液压支架对顶板的支撑力以及刮板输送机在不同煤流负荷下的动态响应。行为模型定义了设备间的逻辑关系与动作规则，例如“采煤机前移至某位置后，触发后续若干支架依次执行降—移—升操作”。数据模型则作为桥梁，将物理世界中的实时运行参数源源不断地映射到虚拟模型中，确保虚实同步。这一数字孪生体的价值远不止于监控展示。它首先作为一个强大的仿真验证平台，允许工程师在虚拟环境中测试新的控制策略或应对预案，而无需在真实工作面进行高风险试验<sup>[3]</sup>。其次，它可以作为协同控制算法的决策依据，通过在虚拟空间中预演不同控制方案的效果，选择最优解下发至物理设备执行。最后，它还能用于人员培训，新员工可以在沉浸式的虚拟环境中熟悉复杂的综采工艺流程，大幅提升培训效率与安全性。可以说，数字孪生是连接物理世界与信息世界的中枢，是实现真正意义上智能协同控制的核心使能技术。

## 3 协同控制算法设计

### 3.1 控制目标

协同控制的根本目的在于打破“三机”各自为政的局面，使其成为一个有机联动的整体。具体而言，系统需要达成三个层面的协同：在时间上，确保各设备的动作严格按序、无缝衔接，避免因等待或冲突造成的效率损失；在空间上，保证采煤机的截割轨迹、支架的支护位置与输送机的运煤通道始终保持最佳匹配，尤其是在煤层起伏或地质构造变化区域；在动作上，则要实现设备动作的平滑、高效与节能，例如输送机应根据实际煤流量动态调整运行速度，既防止堆煤堵塞，也避免空载浪费电能。这些目标的实现，依赖于一套科学、鲁棒且自适应的协同控制算法。

### 3.2 基于事件触发的协同机制

传统的周期性轮询控制方式，无论工作面状态是否发生变化，都按固定频率发送控制指令，这不仅浪费宝贵的通信带宽，而且在面对突发工况时响应不够及时。为此，本文提出了一种基于事件触发的协同控制（Event-Triggered Cooperative Control, ETCC）机制。该机制的核心思想是“按需响应”，即只有当特定的、有意义的“事件”发生时，才启动相应的协同控制流程。这些事件可以是空间事件，例如当采煤机行进至某台液压支架前方预设的触发距离（通常为15至20米）时，系统便判定该支架需要开始准备跟机动作；也可以是状态事件，例如当红外与激光融合算法检测到前方煤层厚度发生突变，或刮板输送机的负荷传感器读数急剧上升时，系统会立即触发相应的自适应调整策略。一旦事件被检测到，边缘计算节点便会从预设的协同策略库中调用匹配的控制方案。这个策略库包含了多种工况下的标准操作程序，如适用于薄煤层的“快速跟机模式”、穿越断层时的“避让缓进模式”等。为了处理可能出现的多事件并发冲突，系统还设计了优先级仲裁机制，明确将涉及人员或设备安全的事件置于最高优先级，确保在任何情况下都能首先保障安全。

### 3.3 自适应跟机控制算法

液压支架的自动跟机是协同控制中最关键也是最复杂的环节之一。其核心挑战在于如何根据采煤机的动态位置，精确、平稳地控制支架群完成一系列连贯动作。本系统设计了一套自适应跟机控制算法。该算法首先实时计算采煤机当前位置与各支架之间的相对距离。当某一支架与采煤机的距离小于预设的触发阈值时，算法便启动该支架的动作序列。这个序列通常包括降柱、推移和升柱三个阶段。在降柱阶段，系统控制电液阀组将立

柱压力降至允许移动的水平；在推移阶段，推移千斤顶动作，推动支架向前移动一个标准步距（通常为0.865米）；最后在升柱阶段，立柱重新建立初撑力，以有效支撑顶板。为了使升柱过程更加平稳，避免对顶板造成冲击载荷，系统引入了模糊PID控制器。该控制器能够根据顶板压力的实时反馈，动态调整升柱的速度和力度，实现柔性支护。此外，算法还充分考虑了工作面倾角对支架稳定性的影响<sup>[4]</sup>。当系统感知到工作面倾角超过10度时，会自动启用防倒防滑控制策略。在这种模式下，相邻的支架不再同步动作，而是采用交错式推进，即一部分支架先行移动并稳固后，再带动相邻支架跟进，从而有效防止支架在大倾角条件下发生倾倒或下滑，极大地提升了复杂地质条件下的作业安全性与可靠性。

## 4 通信与安全机制

### 4.1 工业通信网络

为满足智能协同控制对高带宽、低时延、高可靠性的需求，本系统构建了一个“光纤环网+5G专网”的混合通信架构。其中，万兆光纤环网作为主干网络，贯穿整个工作面顺槽，连接各个边缘计算节点与地面管控中心，为高清视频回传、数字孪生模型同步等大数据量业务提供坚实的传输通道。同时，在工作面内部，部署了基于5GUDN（超密集组网）技术的无线专网，其基站密度经过精心规划，确保了从机头到机尾的全覆盖。该5G网络能够为端层的移动设备（如采煤机）和分布式传感器提供低于20毫秒的端到端时延和高达99.999%的可靠性，完美支撑了实时控制指令的下发。对于液压支架群内部这种对同步性要求极高的场景，则继续沿用成熟的CAN总线技术，以其高实时性和抗干扰能力，确保电液控指令在支架之间精准同步。

### 4.2 安全冗余设计

本系统在设计之初就将安全冗余理念贯穿始终。在供电方面，所有关键节点均配备了双路电源输入，并辅以不间断电源（UPS）和备用电池，在主电源故障时可无缝切换，保障系统持续运行。在控制权限上，系统设

置了清晰的分级模式：在正常工况下，系统全自动运行；一旦检测到异常或需要人工介入，操作员可在工作面本地、顺槽集控室或地面调度中心任一位置，一键切换至手动或远程控制模式，确保控制权始终掌握在可靠方手中。网络安全同样不容忽视，系统在网络边界部署了工业级防火墙和入侵检测系统，并对所有关键通信链路采用国密SM4算法进行加密，有效防范网络攻击与数据窃取。最为重要的是，系统构建了一条贯穿“三机”的紧急停机链，任何一台设备上的传感器（如瓦斯探头、人员定位标签、急停按钮）一旦检测到危险信号，均可瞬间触发全线设备的紧急制动，将事故风险降至最低。

## 5 结语

本文设计并实现了煤矿智能采煤工作面协同控制系统，通过“云-边-端”架构、多源信息融合、事件触发协同控制等关键技术，有效解决了传统综采工作面设备协同性差、响应滞后等问题。未来工作将聚焦于引入强化学习，使系统具备在线学习与策略优化能力，以适应更复杂多变的地质条件；进一步扩展数字孪生的应用场景，如用于虚拟培训和应急预案的数字化推演；并最终将单个工作面的智能体融入矿井级的智能集群，实现采、掘、运、通等多系统间的全局协同优化。随着人工智能、5G、数字孪生等前沿技术的深度融合，煤矿智能化必将迈向更高阶的“自主决策、无人干预”新阶段，为我国能源安全与绿色低碳转型提供坚实支撑。

## 参考文献

- [1]呼玉平.智能采煤技术在现代煤矿中的实践应用[J].能源与节能,2025,(12):327-329+333.
- [2]宋明明.煤矿智能无人采煤工作面开采技术探讨[J].能源与节能,2025,(12):187-189.
- [3]杜安超.煤矿综采工作面无人化采煤智能监控系统的应用[J].自动化应用,2024,65(01):208-210.
- [4]刘志文.关于数字化智能采煤提高煤矿安全水平的研究进展[J].现代工业经济和信息化,2023,13(08):249-251.