

采煤机自动化关键技术在鲍店煤矿的应用研究

徐开亚

兖矿能源集团股份有限公司鲍店煤矿, 山东 济宁

收稿日期: 2025年8月26日; 录用日期: 2025年9月18日; 发布日期: 2025年9月26日

摘要

随着煤矿智能化与工业互联网的快速发展, 采煤机自动化已成为提升综采工作面安全性、生产效率与资源回收率的核心技术。本文以鲍店煤矿为研究对象, 围绕73_下11综采面与7306综放面的旋转开采实践, 系统研究了采煤机自动化系统的架构设计、关键技术与应用效果。论文构建了基于工业互联网的三级系统架构, 实现了设备接入、数据融合与智能决策的闭环控制; 并针对复杂地质条件下的安全风险、精准截割、设备协同与远程监测等需求, 提出了多项关键技术方案, 包括三维惯性定位与姿态调控、全双工调制通信、智能化记忆截割、在线监测与远程诊断等。实际应用结果表明, 该系统在断层及俯采条件下显著改善了顶底板管控水平, 提升了支架稳定性与协同效率, 资源回收率和生产效率均明显提高, 为煤矿采煤机自动化与智能化升级提供了可行路径和实践参考。

关键词

采煤机自动化, 工业互联网, 综采工作面, 旋转开采, 鲍店煤矿

Application Research of Key Technology of Coal Mining Machine Automation in Baodian Coal Mine

Kaiya Xu

Baodian Coal Mine, Yankuang Energy Group Co., Ltd., Jining Shandong

Received: August 26, 2025; accepted: September 18, 2025; published: September 26, 2025

Abstract

With the rapid advancement of intelligent coal mining and industrial internet technologies, automation of coal mining machines has become a core technology for enhancing safety, production efficiency, and resource recovery rates in fully mechanized mining faces. This study focuses on the

Baodian Coal Mine, systematically investigating the architectural design, key technologies, and application outcomes of automated coal mining machine systems through rotational mining practices at the 73 Xi 11 fully mechanized mining face and 7306 fully mechanized caving face. The research establishes an industrial internet-based three-tier system architecture that achieves closed-loop control through equipment integration, data fusion, and intelligent decision-making. To address safety risks, precise cutting, equipment coordination, and remote monitoring challenges in complex geological conditions, multiple innovative solutions are proposed, including 3D inertial positioning with attitude control, full-duplex communication modulation, intelligent memory cutting, and online monitoring with remote diagnostics. Field applications demonstrate that this system significantly improves roof/bottom plate control under faulted and overcutting conditions, enhances support stability and coordination efficiency, while achieving substantial increases in resource recovery rates and production output. These advancements provide a viable road map and practical reference for upgrading coal mining automation and internationalization in coal mines.

Keywords

Coal Mining Machine Automation, Industrial Internet, Comprehensive Mining Face, Rotary Mining, Baodian Coal Mine

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

采煤机在综采工作面中处于核心地位，其运行状况直接关系到煤矿生产的安全水平、经济效益和连续作业能力。传统模式下的采煤机依赖人工经验操作，存在一系列问题，主要表现为：安全隐患突出、生产效率不稳定以及设备磨损严重。

(1) 安全隐患突出：人工操作受到操作员技能和反应速度的限制，当遇到断层、顶板破碎或瓦斯涌出等复杂地质条件时，极易出现误判，从而引发冒顶、片帮、瓦斯超限乃至采煤机卡阻等危险事件。

(2) 生产效率不稳定：人工控制截割精度偏低，推进过程难以保持平稳，经常因煤机走偏、底板不均或支架推移不及时而被迫停机，导致整体生产效率波动较大，难以维持长时间连续作业。

(3) 设备磨损严重：缺乏智能监控与精准控制时，采煤机滚筒截割深度及角度常出现不均匀，容易造成滚筒过载、截齿磨损加剧以及牵引系统承受过大冲击，从而缩短设备使用寿命并增加维护成本。

近年来，伴随工业互联网、大数据、人工智能等技术在煤矿行业的深入应用，采煤机自动化成为实现综采工作面智能化的重要突破口[1]。学者们针对采煤机自动化关键技术进行了大量研究。闫书浩等[2]为探索采煤机垂直进刀工艺在大倾角薄煤层工作面应用的技术要点，对垂直进刀采煤工艺实施过程和效果进行探析，使大倾角薄煤层工作面对应的采煤工作效率以及煤料回收率均得以提高。谭晨[3]等以基于记忆切割技术的滚筒式采煤机调高系统为研究对象，利用 AMESim 仿真软件，对滚筒在承受重载条件下的升降过程进行时间特性分析，结果表明在 10~13 m/s 的速度区间内，调高系统的自动化性能达到最优状态。

在鲍店煤矿的 73 下 11 综采面及 7306 综放面的实际生产过程中，矿方引入了自动化采煤机系统，并将其与旋转开采工艺、综合防灭火手段以及多设备协同控制相结合，从而实现了资源的高效回收与生产过程的安全可控，为煤矿智能化建设提供了具有代表性的实践样本。

因此, 可以认为, 对采煤机自动化关键技术的深入研究与推广应用, 不仅对保障煤矿安全生产具有现实价值, 同时也有助于提高资源回收效率, 并进一步推动矿井向智能化方向发展。

2. 采煤机自动化需求分析

鲍店煤矿综采工作面的地质条件较为复杂, 断层发育、顶板稳定性差、煤层倾角变化显著, 因此对采煤机自动化提出了更高的要求, 其主要体现在以下几个方面:

(1) 安全风险控制: 在采煤机运行过程中, 必须对顶板压力、瓦斯浓度、温度以及电气参数进行实时监测, 这对于保障安全尤为关键。系统应能够具备断层识别、顶板压力实时预警与瓦斯超限自动停机等功能, 以降低冒顶、片帮和瓦斯灾害等事故发生的可能性。同时, 还需支持在断层或复杂区域的自动截割策略, 实现对异常地质条件的主动响应。在设备配置上, 通常会采用瓦斯传感器、支架压力监测装置、温度传感器、红外热成像设备以及矿用本安型可编程控制器(PLC)等关键硬件, 以构建完善的安全监测与联动控制体系。

(2) 精准截割与姿态调控: 在旋转采煤、俯采等复杂工况条件下, 采煤机需要保持稳定的截割高度与倾角控制, 以避免形成台阶状底板或出现不规则煤壁。相关的可视化组态软件, 如 MCGS、CitectSCADA, 可用于实现采煤机姿态的实时展示以及截割轨迹的历史回放。

(3) 设备联动与数据共享: 采煤机应能够与液压支架、刮板输送机实现高效协同作业, 从而提升推进效率并减少人工操作干预。为此, 通常采用 PROFINET、CANopen、OPC UA 等通信协议, 实现采煤机与支架电液控制系统之间的数据交换与信息共享。

(4) 生产效率与资源回收优化: 自动化控制系统需结合实时地质参数, 对截割路径和推进策略进行动态调整, 以降低遗煤率并减少设备空转。数字孪生平台(如 AVEVA、Bentley)可用于构建工作面三维可视化模型, 实现对生产参数的优化与动态分析。

(5) 远程监测与智能诊断: 依托工业互联网平台, 可以对采煤机的运行状态、能耗水平及关键部件磨损情况进行实时监测与预警[4]。WebSCADA 以及云端可视化工具(如 Grafana、Power BI)能够为远程运行状态展示和生产报表分析提供支持。

综上所述, 采煤机的自动化[5]需求不仅涵盖安全保障、效率提升和资源回收, 还依赖多种组态工具、通信协议与智能化设备的有机融合。通过工业互联网的应用, 可以实现设备间的互联互通、数据共享以及远程管控, 从而推动综采工作面的智能化升级。

3. 煤矿综采工作面智能化系统结构

采煤机自动化系统依托工业互联网构建了三级架构体系, 即接入层、平台层和应用层。这种分层结构不仅实现了多类设备的互联互通, 还确保了数据从采集到分析再到决策执行的高效流动与闭环管理。

(1) 接入层: 该层主要负责采煤机、液压支架和刮板输送机等核心设备的电控系统接入, 同时配置倾角、速度、位移、压力等多类型传感器, 以实现关键运行数据的实时采集和边缘计算。在此基础上, 系统能够连续获取采煤机的姿态、位置、截割深度、支架受力、输送机负荷以及瓦斯浓度等信息, 为上层的数据处理与决策模块提供完整而可靠的输入。

(2) 平台层: 承担数据存储、处理、建模与服务功能。平台内部集成了采煤机姿态调控模型、断层识别模型以及设备健康度诊断算法, 可实现对多源异构数据的融合、统一处理与智能分析。通过该层的支撑, 可逐步形成动态更新的“采煤机数字孪生体”, 为应用层提供基于模型和算法的实时决策依据。

(3) 应用层: 面向生产与管理端, 主要包括数字孪生系统、自动截割控制系统和安全预警平台等应用模块。该层不仅实现了综采工作面的三维可视化监控与自动化运行控制, 还支持多终端访问与远程展示,

从而提高矿井的智能化管理水平。

总体而言，基于工业互联网的采煤机自动化系统通过“接入层-平台层-应用层”的三重架构，形成了涵盖数据采集、传输、融合、分析与执行的完整闭环控制体系，如图1所示。

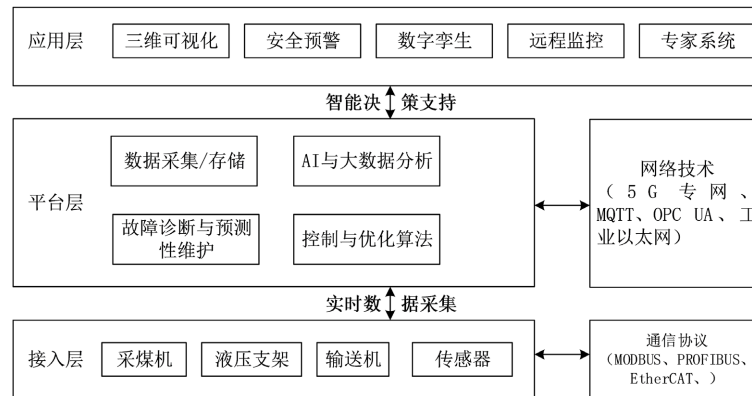


Figure 1. Architecture
图1. 系统结构

4. 综采工作面智能化关键技术研究

采煤机自动化关键技术涉及到 LASC 三维惯性定位测量反馈控制系统、采煤机至顺槽稳定高速全双工调制通信、机载视频监控摄像系统、参数化、智能化记忆截割系统、故障在线监测及智能化保护、远程工作状态监测和故障诊断[6]。采煤机专用分布嵌入式控制系统如图2所示。

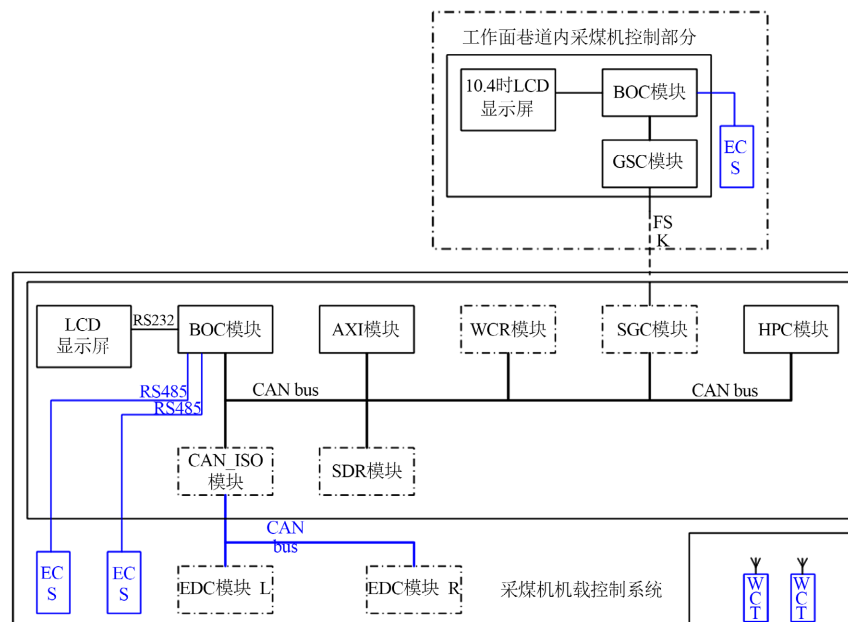


Figure 2. Shows the distributed embedded control system for coal mining machine
图2. 采煤机专用分布嵌入式控制系统

(1) LASC 三维惯性定位测量反馈控制系统

1) LASC 系统：基于高精度传感器开发的智能化工作面监控系统，可以实时监测采煤机三维姿态，

实现工作面自动调直，开采水平控制，远程监测与控制等功能。

2) 三维姿态实时监测：采用精度达 1.0×10^{-3} rad 的惯性定位装置来实时检测采煤机的三维姿态，得到精确的工作面倾角、俯仰采角度等信息，用于指导采煤机等工作面三机的动作执行。

3) 工作面直线度控制：基于高精度惯性定位装置开发的采煤机三维导航定位技术，实现精确到 50 mm 工作面对齐调直控制。

4) 开采水平控制：以提前物探所获得的数据提炼开发的“截割模型”为基础，通过光学、红外等手段实时修正模型，从而使采煤机沿工作面走向方向始终在煤层中进行。

(2) 采煤机至顺槽稳定高速全双工调制通信

采用高抗干扰的 FSK 调制通信方式，传输距离超过 800 米，采煤机工作数据顺槽实时显示上传且全面支持顺槽遥控操作与监视。在技术指标方面，从顺槽到采煤机内部，指令传输延迟 11 mS，延时抖动小于 1 mS；基于优先级的操作监控延时控制与保障，总延迟控制在 50~200 mS。通信机构示意图如图 3。

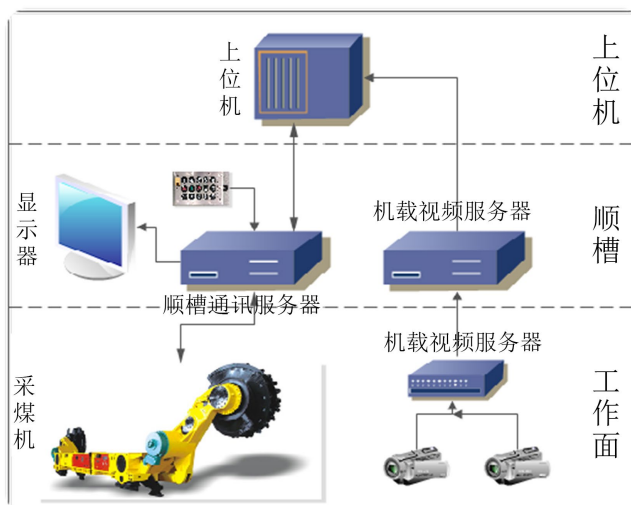


Figure 3. Communication structure diagram
图 3. 通信结构示意图

(3) 机载视频监控摄像系统

在可视化方面，我们采用 3 路超低照度、高解析度摄像头；另外配备清洗装置，这样可以远程控制开启。可以呈现多路低延时(180 mS)图像，并且成像清晰。机载画面如图 4 所示。



Figure 4. Airborne video footage
图 4. 机载视频画面

(4) 参数化、智能化记忆截割系统

该系统有三点特色技术突破，第一点适应性强。基于工艺规则与参数表格形式的逐次切入型记忆截割适用于复杂的截割条件，可同时存储 4 条完整的曲线，每条曲线可包含的工序数可达 31 个，支持工作面长度到 640 m。第二点精度高。行走位置检测分辨力 1 cm，典型位置控制精度优于 ± 5 cm，记忆截割典型采高重复误差优于 ± 2.5 cm，采高记忆曲线位置分辨力为 10 cm，具有线性插值、采高精度与牵引速度的自适应调节与预期控制等。第三点操作灵活。可在本地和远程上位机实现学习记忆、自动操作、自动过程的在线学习修正、无限制的中断与恢复等。实现常态化的记忆截割，采煤机记忆截割技术相关信息如表 1 所示。

Table 1. Memory cutting technology of coal mining machine

表 1. 采煤机记忆截割技术

技术保障	采煤机行走位置、速度及方向主要通过安装在牵引驱动轴上的高精度编码器来进行检测，检测精度可以达到相对刮板输送机 ± 2 cm 定位和 0.01 m/min 测速。并且可以长时间无需校正
	两截割滚筒当前采高的检测，以摇臂相对机身的旋转角位移传感器和电控箱内部安装的两维倾角传感器检测与修正，采高精度为 $\pm 3\%$
主要特点	可以根据需要灵活配置循环深度和控制策略 同时可以方便的在线修正运行姿态 工作面长度及高度变化时，可以在线针对变化点进行修改，记忆及自动过程可以随时中断/恢复 控制接口全面开放，可在顺槽主机实施采高、牵引速度、方向的直接设定或实施截割模板控制

(5) 故障在线监测及智能化保护

遍布采煤机的传感器，实时监测传动、冷却喷雾、液压、电气状态，对整机实施在线检测及保护。总线通讯、各控制模块自身运行状态的实时检测与智能化的保护与故障提示，对一些非关键故障实行自动屏蔽与降级运行。

(6) 远程工作状态监测和故障诊断

可以将电脑、手机等终端与采煤机控制系统连接，实时监控采煤机的运行状态和故障信息。这样不仅可以方便客户管理人员及时了解设备的运行情况，而且设备厂家可以第一时间了解设备状态和故障信息，指导检修、维护人员处理现场状况。

5. 平台应用案例

本文研究的采煤机自动化关键技术是基于天地科技股份有限公司上海分公司的软硬件资源，正在鲍店煤矿的两项工程下进行建设和应用，分别是 73_下11 综采面与 7306 综放面。

(1) 73_下11 综采面

73_下11 综采工作面于 2025 年 4 月 13 日组织回采，于 2025 年 4 月 27 日顺利完成旋转开采。采用机尾定心旋转开采，旋转角度 10°，弧长 54 m，通过自动截割与支架协同控制，成功回收煤炭资源 5.5 万吨，在断层区域动态调整采高至 3.5 m \pm 0.1 m。在 73_下11 工作面旋转开采过程中，受断层及煤层条件影响，机头顶板破碎、煤壁片帮明显，支架拉移及调架效率受限，底板不平整及刮板输送机管控难度加大。针对上述问题，采取精细化截割控制(刀幅 $\leq 2^\circ$ /班累积 $\leq 4^\circ$)、支架偏差严格管控(50 mm 以内)及刮板输送机与顶板破碎区域协同管理(拉超前、伸插板、打护帮)等措施，实现了顶板管控优化、支架稳定支护及采煤机安全连续运行的有效保障。图 5 为 73_下11 工作面布置图，图 6 为 73_下11 工作面旋转开采示意图。

(2) 7306 综放面

在生产过程中采用了机头定心的旋转开采方式，旋转角度为 39.5° ，弧线长度达到 203 m。结合自动化截割控制策略以及支架同步调控技术，共计回收煤炭 39 万吨。与传统切眼对接方式相比，额外增加了 16 万吨的资源回收量。在变坡区域，利用单向锁实现对支架间距的精确控制，有效避免了支架咬架和歪架等运行故障。图 7 展示了 7306 工作面的布置情况，图 8 则给出了旋转开采的示意图。

在 73_下11 与 7306 两个工作面中，均依托工业互联网平台实现了采煤机与液压支架、运输机等设备之间的实时数据交互和协同控制。同时，瓦斯超限自动停机、防灭火钻孔路径的自动规划、设备运行参数的远程监测等功能得到应用，使工作面的安全保障和生产效率均显著提升。

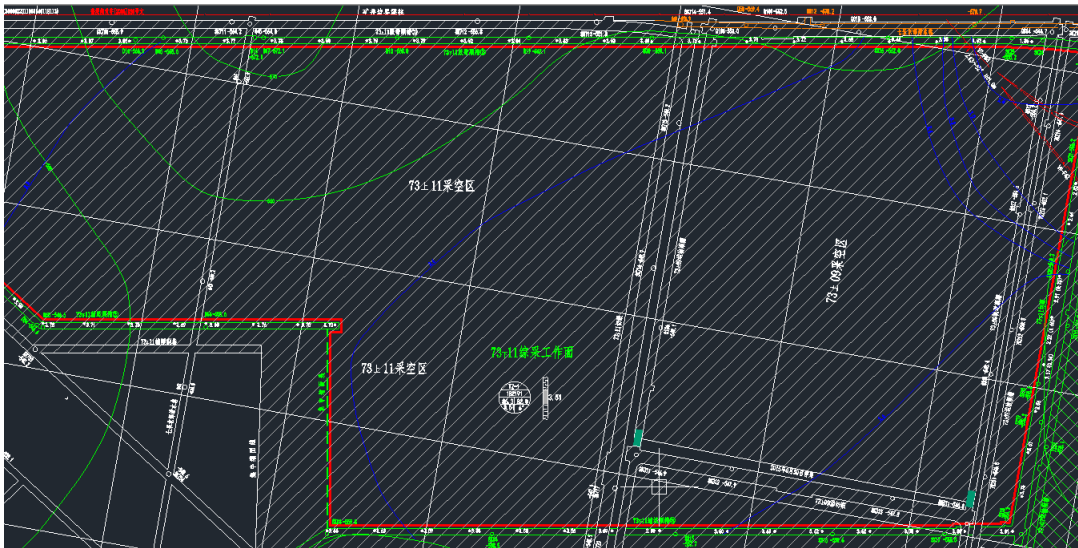


Figure 5. 73-11 working face layout
图 5. 73_下11 工作面布置图

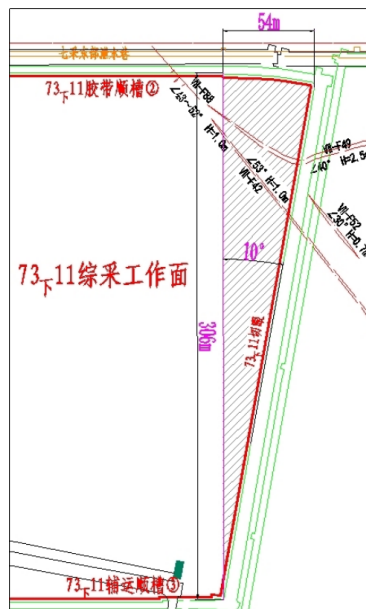


Figure 6. 73 schematic diagram of rotary mining in lower 11 working face
图 6. 73_下11 工作面旋转开采示意图

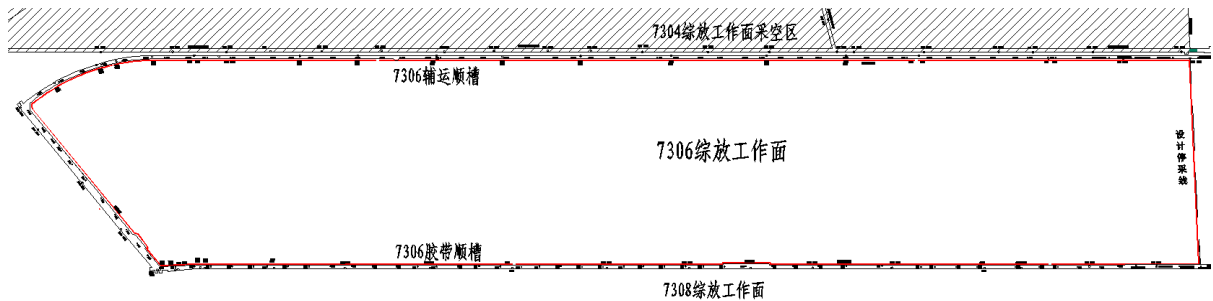


Figure 7. 7306 working face layout

图 7. 7306 工作面布置图

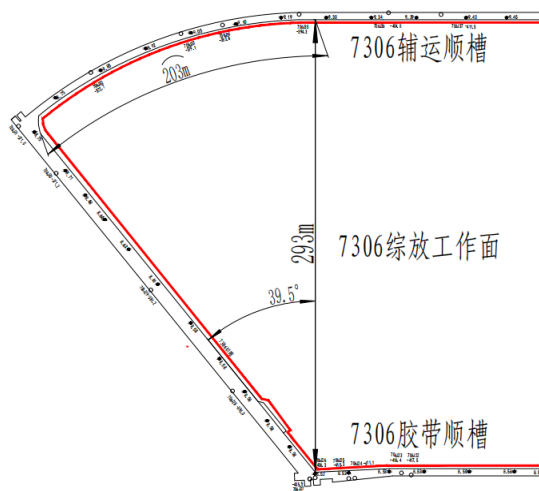


Figure 8. Schematic diagram of rotating mining in 7306 working face

图 8. 7306 工作面旋转开采示意图

6. 讨论

(1) 传感器漂移与长期稳定性

问题：IMU 长期运行存在累计漂移；温度变化与振动会引起偏置漂移。

已采取/建议措施：采用在线偏置估计(滤波器态变量包含偏置项)、周期性零速/零角更新、编码器与激光/视觉观测进行周期性校正；建立温度 - 偏置标定表或使用自适应偏置模型。

(2) 复杂地质突变下的模型适应性：

问题：突发断层、瓦斯涌出或煤壁不稳定可能使记忆曲线失效。

应对：构建异常检测模块(基于负载、振动、声发射等指标)，触发保守模式并实时上报；在曲线库中存储带标签的特殊段以便未来检索与迁移学习；结合地质勘探数据(物探、钻芯)与数字孪生进行离线仿真以扩展曲线库多样性。

(3) 通信与延迟问题：

问题：顺槽 - 工作面链路存在抖动或瞬时丢包，影响实时控制指令的确定性。

应对：采用带优先级的实时通信协议(如基于 PROFINET/TSN 的专网方案)、边缘计算在本地完成实时闭环控制以降低对远端指令的依赖，并构建冗余链路。

(4) 系统局限性

对未见地质构造的识别能力有限：尽管异常检测可触发保守策略，但对于完全未见过的复杂地质

模式，系统仍依赖人工判断与现场处置。

对前期地质勘探数据依赖较大：系统性能在很大程度上受益于高质量的地质与物探数据，勘探不足时需要更频繁的在线学习与保守策略。

推广与成本问题：完整自动化系统的部署涉及软硬件与运维成本，部分中小矿井可能受限于资金与技术人员能力。

7. 结语

鲍店煤矿的实践结果表明，将采煤机自动化与工业互联网深度融合，能够在复杂地质条件下显著提升作业安全性、生产稳定性与资源回收效率。通过多源感知、智能决策与设备协同控制的综合应用，不仅实现了综采工作面的数字化与可视化运行，还有效优化了断层区、俯采区等复杂工况下的顶底板管控水平，为煤矿智能化建设提供了可借鉴的工程范例。

未来，采煤机自动化仍具有广阔的发展空间。一方面，可进一步引入具备自主学习与自适应能力的算法，实现截割工艺与推进策略的动态优化；另一方面，随着 5G 专网、大数据和数字孪生等新兴技术的推广，其在井下实时感知、超低延时通信及全生命周期管控等方面将发挥更大作用[7]。同时，关键部件的智能运维与寿命预测将有助于建立高效、可持续的设备管理体系。综上，采煤机自动化的持续发展不仅是提升煤矿本质安全与效益的重要途径，也是推动矿井向智能化、绿色化转型的必然方向。

参考文献

- [1] 范京道, 黄克军, 李川, 等. 我国煤矿智能化技术十年发展与实践[J]. 煤炭技术, 2025, 53(7): 1-24.
- [2] 闫书浩. 大倾角薄煤层工作面垂直进刀采煤工艺的应用[J]. 能源与节能, 2025(8): 324-326.
- [3] 谭晨. 滚筒采煤机调高系统自动化性能研究[J]. 机械管理开发, 2025, 40(6): 12-13, 16.
- [4] 刘虎, 王永峰, 张德弦, 等. 复杂环境下远程协控煤矿智能化开采技术研究[J]. 资源信息与工程, 2025, 40(3): 80-83.
- [5] 周凯, 付洪海. 自动化控制在煤矿采煤机电控系统中的应用[J]. 冶金管理, 2025(5): 64-66, 70.
- [6] 秦艳凯. 智能化综采工作面采煤机自动监控系统设计[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(5): 39-41.
- [7] 王海玲. 浅谈煤矿采煤机的自动化与智能化技术[J]. 能源与节能, 2025(5): 152-155.