

# 煤矿综采工作面数据建模与产能提升机制分析

文 | 胡振明 柳亮 高振

煤炭作为我国基础能源，其开采效率与安全水平直接关系国家能源安全。综采工作面长期受人工决策依赖、数据利用率低、开机率不足等瓶颈制约。数字孪生、人工智能等技术为破解难题提供了路径，通过构建虚实交互的智能化数据模型，实现对采煤全流程的精准感知与动态优化，已成为提升综采产能的关键方向。

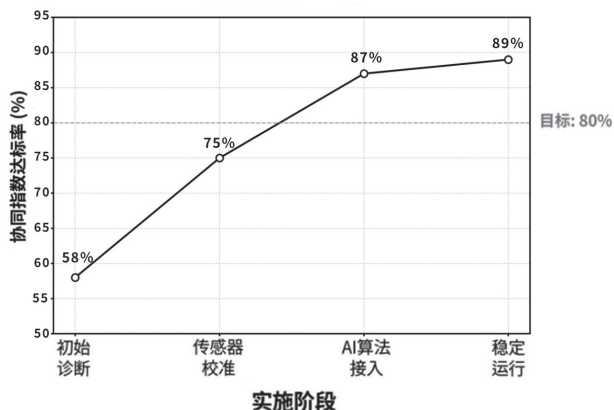
## 煤矿综采工作面采用智能化数据建模架构

综采工作面智能化数据建模架构以数字孪生技术为核心，构建了涵盖物理层、感知层、孪生层、应用层、控制层的五层协同体系。其中物理层包含综采配套设备、井下人员、煤层煤料等生产要素；感知层通过红外发射器、倾角传感器、编码器、压力传感器等多类型传感器实现数据采集与协议转换功能；孪生层基于 Unity3D 引擎，采用 C# 编程语言实现系统资源的组织管理，将采煤机、液压支架、刮板输送机等设备的三维结构模型与仿真模型进行动态更新，并精准映射实体状态与行为；应用层依托地质建模、智能截割、虚实映射、安全预警等功能，实现综采工作面的实时跟踪与可视化展示；控制层则通过分析异常数据及时给予干预指令，实现虚实联动的精准调控，最终形成全要素数字化描述与智能化决策支持的完整架构体系。

### 大数据驱动的产能提升机制

#### 1. 设备智能协同优化

通过对数据进行建模处理，识别液压支架跟机作业中的不同步现象，以及运输机堵塞等各类停机因素，并在此基础上构建完善的量化指标评估体系，最终实现设备间的协同优化。



来源：山东裕隆矿业集团有限公司唐阳煤矿

图1 设备协同指数分阶段变化曲线

如图1所示，设备协同指数达标率的优化进程，从初始诊断阶段的58%起步，在部署电液控系统数据采集模块时，

发现有21台支架压力传感器偏差超出10%阈值，之后迅速转入传感器校准阶段，该阶段推动指标快速提升至75%。在AI算法接入阶段，通过引入预测算法，实现运输机堵塞风险提前5秒预警，有效降低18%的停机时间，从而推动协同指数上升至87%，最终在稳定运行阶段达到89%的目标值，以此确保了设备群协同作业的持续可靠性。该曲线的技术路径基于历史截割轨迹数据与液压支架姿态数据构建截割模型，融合惯导定位与激光点云扫描技术生成采煤机截割预测三维曲线，将预测曲线前置下发至采煤机，约束其前后滚筒调整量，使设备协同指数计算模型，能够精准量化煤机速度、支架移动速度及刮板机负载率的匹配关系（理想区间是0.8至1.2）。

#### 2. 生产大数据调度决策

生产大数据调度决策机制依托实时数据湖技术，达成传感器数据的秒级采集，并通过数据压缩技术对存储资源高效管理，该机制借助人工智能决策引擎，通过深度挖掘历史事故数据，构建事故率分析模型，将人的不安全行为、设备故障风险及环境隐患，分别赋予60%、30%和10%的量化权重，以此实现对安全风险的科学评估。系统可以综合考量煤层厚度变化与设备运行工况等多元参数，实时优化采煤机的截割轨迹与工作参数，同时建立配套设备协同效率模型，精准分析截煤效率、滚筒转速、煤层硬度等关键指标的耦合规律，并且每10秒动态调整输送设备运行速率，确保各作业单元的高效协同。移动端监控平台采用多层级数据钻取技术，直观展示矿区安全态势综合评分，当评分触发预警阈值时，系统自动启动专业化诊断流程，精准识别问题设备及故障点位，现场管理人员收到异常工单后，通过上传带有时效戳的影像资料与设备运行参数截图，可实现问题处置的闭环管理。

#### 3. 安全智能风险管控

安全智能风险管控机制依托激光瓦斯传感器搭建浓度-流量-压力三维预警体系，一旦监测数据超出标准差阈值3倍，系统就会在2秒内把工作面电源切断，有效规避瓦斯超限带来的危险，通过对50万张井下作业图像进行分析，构建起违规行为识别模型，该模型可自动检测未系安全带、带

电检修等 21 类违规行为，其识别精度可达 98%，实现对人员行为的智能监管。借助瞬变电磁仪数据建立起地质数字孪生模型，并且构建出老空水威胁指数评估体系，该指数融合了积水体积、工作面距离倒数及岩层渗透率等关键参数，当指数值突破 80 时，系统会自动激活探放水机器人开展预防性作业。毫米波雷达以  $\pm 2\text{cm}$  的精度实时监测巷道变形情况，结合地应力数据构建顶板风险预测模型，能够提前 72 小时预报冒顶事故发生的概率，为应急处置预留充足的时间。

4. 资源精准动态配置

依托数据驱动的模式，构建吨煤安全成本精细化分解框架，将瓦斯抽采电耗、防尘水耗、支护材料损耗等 27 项核心参数纳入动态管控范围，运用实时数据采集与智能分析技术搭建起全方位的成本监测网络，每天生成成本分布热力图，锁定能耗最高的前五环节，并实施重点改进方案。设备综合效能管理体系规定主通风机、提升机等核心设备，运行率要保持在 92% 以上的标准，建立覆盖设备全生命周期的健康档案与预判性维护体系，当设备效能跌破 85% 阈值时，启动三级应急响应，要求维修队伍在 1 小时内到达现场进行处置，若 4 小时内无法恢复正常运行，就立即切换至备用设备，以维持 30% 的产能冗余保障生产流程持续稳定。智能安全帽配备高精度九轴传感装置，持续传输作业人员生理状态数据，当检测到作业人员心率连续 30 分钟超过 110 次 / 分钟且位移速度低于 0.5 米 / 秒时，系统将自动判定为疲劳状态并触发警报。构建人员能力数字模型，融合培训记录、应急响应时效、隐患排查数量等多维数据，生成能力评估图谱，结合岗位胜任力指标与动态排班算法，实现人力与岗位的最优配置，优化人力资源结构，提升整体作业效能。

数据建模对产能提升的效果分析

1. 生产效率智能化指标评估

基于数据建模的智能化协同管控方法，可借助多维度指标体系对综采工作面生产效能进行精确衡量评估。

如表 1 所示，智能化数据建模通过构建设备协同指数

表 1 综采工作面生产效率智能化指标统计

| 效率指标类型        | 优化前数值 | 优化后数值  | 提升幅度      |
|---------------|-------|--------|-----------|
| 设备开机率 (%)     | 65    | 89     | 24%       |
| 回采工效 (万吨 / 人) | 4. 49 | 6. 25  | 39. 2%    |
| 综采队人员配置 (人)   | 78    | 58     | 减少 25. 6% |
| 矿井数据利用率 (%)   | -     | 提升 50% | 50%       |
| 综合管理效率 (%)    | -     | 提升 40% | 40%       |
| 安全监管效率 (%)    | -     | 提升 65% | 65%       |

来源：山东裕隆矿业集团有限公司唐阳煤矿

计算模型及三机配套效率模型，有效解决了液压支架跟机不同步及运输机堵塞等传统生产瓶颈问题，使设备开机率从优化前的 65% 显著提升到了 89%。在生产效益方面，回采工效从 4. 49 万吨 / 人增长到了 6. 25 万吨 / 人，与此同时，综采队人员配置从 78 人精简到了 58 人，成功实现了少人化生产的目标。矿井数据利用率提高 50%、综合管理效率提升 40%、安全监管工作效率提高 65% 等数据，充分印证了基于 5G 的数字孪生智能生产协同管控技术，在实现透明化管理、集中化管控、远程化操作及自动化割煤等方面的突出优势。

2. 综合效益大数据量化测算

智能化协同管控体系通过合理调配人力、提升资源再生效率，为企业带来了显著的经济回报，综采队通过优化人员结构，从原来的 78 人精简到现在的 58 人，每年能节约开支 1230 万元，资源回收率提高后每年能额外获取 8. 9 万吨原煤，从而实现增收 4450 万元。设备有效运行时间占比从 65% 大幅提升到 89%，相当于新增 30 万吨原煤的年生产能力，依托数据分析与决策支持系统优化开采方案，既提升了开采效率和作业速度，又加速了煤炭产出并减少了资源损耗。基于 5G 构建的数字孪生智能生产协同管控技术，实现了生产流程的可视化监控、集中调度、远程操控和自主截割作业，将传统依赖经验判断的模式，转变成基于数学模型的精准决策机制，形成了从数据采集到模型构建，再到智能决策、协同控制和迭代优化的完整管理闭环，通过上述系列举措，综采工作面年度综合收益达到 5680 万元，该数据充分证明了数据建模对产能提升的量化作用，以及智能化协同管控技术在减少人员投入、保障安全生产、提升作业效率方面带来的多重效益。

结束语

综采工作面数据建模和产能提升机制分析显示，依托数字孪生的智能化协同管理模式，有效破解了传统作业方式的固有缺陷，通过构建包含多维度参数的数据模型，实现了对综采全流程要素的精确复现工作。依托大数据技术的四大增效路径，构建起设备运行、生产调度、安全保障和资源调配的一体化优化框架，实证数据表明，该数据建模方法对提升生产效能和创造经济价值有明显推动作用。随着边缘计算与人工智能技术的有机融合，综采工作面正朝着全流程可视化、人员配置精简化、作业决策智能化的方向持续发展，为煤炭产业转型升级提供了可推广的参考样板。

作者简介：胡振明 柳亮 高振 山东裕隆矿业集团有限公司唐阳煤矿

责任编辑：王子祺 投稿邮箱：zhouhl@staff. ccidnet. com