



移动扫码阅读

毛明仓,张孝斌,张玉良.基于透明地质大数据智能精准开采技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(1):286-293. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.01.026

MAO Mingcang, ZHANG Xiaobin, ZHANG Yuliang. Research on intelligent and precision mining technology based on transparent geological big data [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 286-293. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.01.026

基于透明地质大数据智能精准开采技术研究

毛明仓^{1,2}, 张孝斌^{1,2}, 张玉良^{1,2}

(1. 陕西陕煤黄陵矿业有限公司, 陕西 黄陵 727307; 2. 应急管理部 煤矿智能化开采技术创新中心, 陕西 黄陵 727307)

摘要:透明工作面是目前智能化开采的重要研究方向,是实现无人化开采的重要途径。针对记忆割煤应用效果较差、传感器精度低、大数据融合应用率低、无法根据工作面地质条件变化进行自主感知、决策和调整等问题,开展了基于透明地质大数据智能精准开采的研究与实践应用。通过钻探、巷道测量和槽波勘探等物探手段来构建较精准的透明工作面三维模型,提前规划截割模板,再联合应用惯性导航技术、雷达定位技术和大数据分析决策技术,来不断修正截割模板,最后通过井下精准控制中心来完成对采煤机和液压支架的精准控制。该技术将当前基于记忆截割的“智能开采 1.0”阶段升级为基于透明地质规划截割的“智能开采 3.0”阶段,实现由传统的记忆割煤向三维空间感知和自动截割的技术跨越,具有很强的适应性和实用性。

关键词:透明地质;智能分析决策;精准开采;三维地质模型

中图分类号:TD67

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)01-0286-26

Research on intelligent and precision mining technology based on transparent geological big data

MAO Mingcang^{1,2}, ZHANG Xiaobin^{1,2}, ZHANG Yuliang^{1,2}

(1. Shaanxi Huangling Mining Co., Ltd, Huangling 727307, China; 2. Coal Mine Intelligent Mining Technology

Innovation Center of Emergency Management Department, Huangling 727307, China)

Abstract: Transparent working face is currently an important research direction of intelligent mining and an important way to realize unmanned mining. Aiming at problems such as poor application effect of memory cutting, low sensor accuracy, low application rate of big data fusion, and it is unable to make independent perception, decision-making and adjustment according to the changes in the geological conditions of working face. Therefore, on the basis of the continuous progress of coal mine geological exploration means and exploration accuracy and the continuous progress of coal science and technology equipment level, the application of “intelligent and accurate mining based on transparent geological big data” technology has been explored to further improve the company’s intelligent mining technology level. Through geophysical exploration methods such as drilling, roadway surveying and groove wave exploration and other geophysical means to build a more accurate three-dimensional model of the transparent working face, plan the cutting template in advance, and then jointly apply the inertial navigation technology, radar positioning technology and big data analysis and decision-making technology to continuously correct the cutting template, and finally complete the precise control of the shearer and hydraulic support through the underground precision control center. This technology upgrades the current “intelligent mining 1.0” stage based on memory cutting to “intelligent mining 3.0” stage based on transparent geological planning cutting, realizing the technological leap from traditional memory cutting to three-dimensional spatial perception and automatic cutting, which has strong adaptability and practicability.

Key words: transparent geology; intelligent analysis and decision-making; precise mining; three dimensional geological model

0 引言

2014 年,陕西陕煤黄陵矿业有限公司(以下简

称黄陵矿业公司)联合中国煤炭科工集团、西安煤矿机械有限公司等单位在一号煤矿率先完成了中厚煤层智能化开采技术与探索,首次实现了地面

收稿日期:2020-09-20;责任编辑:李金松

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804309);陕西省自然科学基金基础研究计划-陕煤联合基金资助项目(2019JLM-10)

作者简介:毛明仓(1963—),男,陕西安康人,正高级工程师,现任陕西陕煤黄陵矿业有限公司总工程师。

远程操控采煤作业的常态化,成果达到了国际领先水平。2016年,在中厚煤层成功实践的基础上,黄陵矿业公司在二号煤矿开展了大采高(厚煤层)智能化开采技术研究,集中攻克了制约大采高智能开采普遍面临的煤壁片帮、底软拉架等技术难题,实现了智能化开采技术在大采高煤层和复杂地质条件下的常态化应用。2017—2018年,黄陵矿业公司又成功将该技术推广应用在双龙煤层和瑞能煤层,至此实现了智能化开采技术在薄煤层、中厚煤层以及大采高的全覆盖应用^[1-2]。2020年2月,国家发展改革委、国家能源局、应急管理部、国家矿山安全监察局等8个部门共同印发的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,明确要求进一步加快推进我国煤矿智能化发展的进程。

国内各高校、研究单位^[3-7]纷纷开展了智能开采的相关研究。王国法院士^[8-11]解析了综采工作面自动化、智能化和无人化的主要技术难题、制约因素及目前发展存在的主要问题,探讨了其发展方向和技术途径,并提出4种煤矿智能化开采模式。葛世荣团队^[12]提出智能化采煤装备的“三个感知、三个自适”技术架构,展望了其相关的关键技术研究。马宏伟团队^[13]在煤矿综采设备故障智能诊断、煤矿巷道虚拟现实以及惯性导航技术等方面研究较深。张科学等^[14]提出基于实时推进度监测的综采智能化工作面调斜控制技术。马洪礼等^[15]运用采煤机滚筒接触到不同煤层时截割电机负载及滚筒调高油缸前后腔压力变化的新型煤岩识别技术,记忆截割技术以及井下数据传输技术等。黄陵矿业公司“可视化远程干预型”智能化开采技术^[16-19]主要依靠“液压支架自动跟机+采煤机记忆截割+可视化远程干预控制”来全过程监控采煤作业,但存在着远程干预控制频繁、记忆截割应用率低等问题。究其根本原因,仍存在以下智能化开采关键技术难题尚未攻克:①煤岩识别技术尚不成熟,虽然目前国内外产学研单位不同程度地开展了采煤机煤岩识别技术探索,也取得了一些理论研究成果,但存在辨识度差、分辨速度慢、井下复杂恶劣环境下抗干扰能力差等问题,无法实现煤岩识别技术在实际生产应用过程中常态化应用;②关键传感器精度和可靠性不高,目前国内外传感技术虽然已经实现较高精度的监测,但因其应用环境差,地质条件变化较大,极易造成监测数据误差较大或数据严重不准确现象,无法实现对数据进行分析、纠偏,达不到指导人机精准控制要求;③综采工作面大数据融合应用率低,智能化综采工作面设备繁多,数据庞大,现有监控系统无论在硬

件还是软件配置上,均无法满足大数据的采集、融合、分析、处理和决策。

鉴于当前的技术和装备水平现状,亟需采取新的技术路径,才能解决当前智能控制水平低、自主分析决策能力差等问题。因此,黄陵矿业公司开展了“基于透明地质大数据智能精准开采”的技术研究与探索。通过地面钻探、井下钻探、巷道测量与写实、槽波勘探等物探手段来构建透明工作面三维初始模型;再联合应用惯性导航技术、雷达定位技术和大数据分析决策技术修正模型,实现工作面前方范围的地质透明;最后通过井下精准控制中心完成了对采煤机和液压支架的精准控制。

1 智能开采面临的技术难题

1.1 整体技术水平较低

当前智能化开采技术普遍采用“液压支架自动跟机+采煤机记忆截割”模式进行智能化生产。该技术更适用于煤层地质条件好、变化小的矿井,且在实际应用过程中普遍会出现无法连续自动推进、自主调整能力差等问题。对于地质条件复杂的矿井,能够实现自动跟机拉架已属不易。因此,当前智能化开采技术水平仍处于低级阶段。

1.2 记忆截割技术普遍无法常态化精准应用

记忆截割是指采煤机按照学习和记忆的示范刀运行参数进行自动导航、自动截割、自动清浮煤、自动斜切进刀等工艺。其原理是:采煤机在示教过程中,实时采集工作面相应位置上的采高、倾角、俯仰角、速度、方向等信息,并以5 cm为间隔做一一映射,同时将映射数据发送到控制器的数据存储区,并生成截割曲线模型;完成1个循环后切换到自动运行模式,采煤机以控制器存储的曲线模型为依据进行自动导航、自动截割、自动清浮煤、自动斜切进刀等工艺流程。记忆截割技术只有在采煤机采高及位置传感器监测数据绝对精准,且采煤机位姿始终处于不变的情况下才能实现精准控制。显然对于井下复杂多变的工作环境,工作面采煤机机身位姿会始终随着煤层底板变化及人为干预控制调整而发生变化,因此,采煤机实际监测的采高和位置数据均会与记忆的曲线数据发生横向和纵向2个方向上的位移变化,而且该种变化会随着工作面推进而累积,这就导致记忆截割技术无法实现对采煤机的精准控制,更无法常态化应用。

1.3 基于电液控技术的自动跟机作业不精准

液压支架电液控制技术的应用成功替代了手动液压控制技术,增加的电磁阀控制也为自动化控制

的实现奠定了基础。虽然当前电液控制技术实现了液压支架自动跟随采煤机拉架、推移刮板输送机,但精度尚待提高。影响精准控制的原因:①供水系统易堵塞,高质量恒压供水能力不够,容易出现跟机作业时拉架不及时和丢架现象;②液压支架推移杆与带式输送机溜槽连接处存在活动间隙,很难实现精准推移;③精准推移控制主要参考的推移行程数据往往因传感器不可靠而造成误差,而这种误差会不断累积加大;④液压支架和采煤机之间数据融合应用率低,机架协同控制和自动调整难度大。因此,当前电液控制技术也无法实现常态化连续精准控制。

1.4 三角煤区域自动化精准割煤作业难度大

三角煤区域不仅需要采煤机割通煤墙的顶和底,而且要为下一刀煤做好斜切进刀准备。因此,该区域自动割煤相较于中部自动割煤的精准度和协同性要求更高,至今大部分智能化综采工作面无法实现三角煤区域常态化自动化割煤作业。主要原因如下:①三角煤区域增加了采煤机斜切进刀、往返扫煤等工序,此阶段需要精准控制采煤机滚筒的高度,确保浮煤扫清,顶底板割通、割齐;②液压支架和采煤机要精准协同控制,即采煤机和液压支架要互相协调感知当前工序是否执行到位,如果一方未执行到位时,另一方需要等待其执行到位后再一同触发下

一道工序,在此过程中还需时刻保证中部液压支架的护帮板和端头支架前探伸缩梁的伸、收精准控制;③随着工作面的自动化推进,一旦出现上窜下滑及工作面直线度差等问题,采煤机和液压支架相对于煤壁的位置会发生上下和左右方向上的位移,这将导致设定好的煤壁斜切进刀位置与设定好的自动跟机液压支架、采煤机自动割煤位置发生错位,从而打乱预设的自动割煤工序和割煤精度。

1.5 煤岩识别等关键技术难题尚未攻克

近年来,国内外知名院校和科研单位均在开展煤岩识别技术研究,包括基于有效介质理论的煤岩识别、基于多传感器数据融合技术的煤岩识别、基于截齿截割红外热成像的煤岩识别、基于采煤机截割力响应的煤岩识别、基于扭振测量的煤岩识别、基于探地雷达检测的煤岩识别等,但这些技术均处于理论研究阶段,尚无成功应用的案例。因此,必须另辟蹊径采用新的技术路径来解决煤矿井下综采工作面动态复杂环境下及煤层变化不规则等条件下的智能精准开采问题。

2 智能精准开采关键技术

基于透明地质大数据智能精准开采是通过勘探、巷道测量和槽波勘探等物探手段来构建较精准

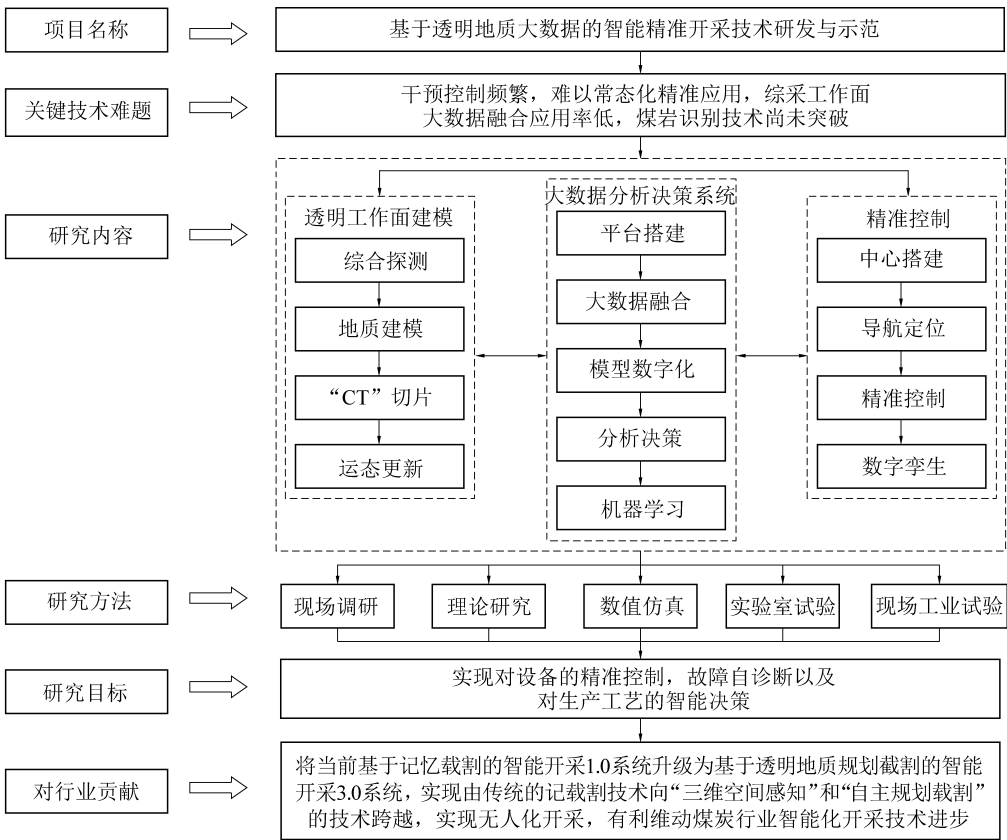


图 1 透明地质大数据智能开采技术路线

Fig.1 Intelligent mining technology roadmap of transparent geological big data

的透明工作面三维模型,提前规划截割模板,再联合应用惯性导航技术、雷达定位技术和大数据分析决策技术,来不断修正截割模板,最后通过井下精准控制中心来完成对采煤机和液压支架的精准控制。实现透明地质大数据的智能开采主要分为以下 4 个步骤,技术路线如图 1 所示。

1)透明工作面三维地质模型构建技术。主要通过巷道测量与写实、瓦斯抽放钻孔测井技术、孔中雷达探测技术、三维地震资料再解释、槽波地震勘探等手段获取到构造、起伏等地质信息,利用多源数据融合技术生成高精度透明工作面模型。三维地质模型构建技术路线如图 2 所示。

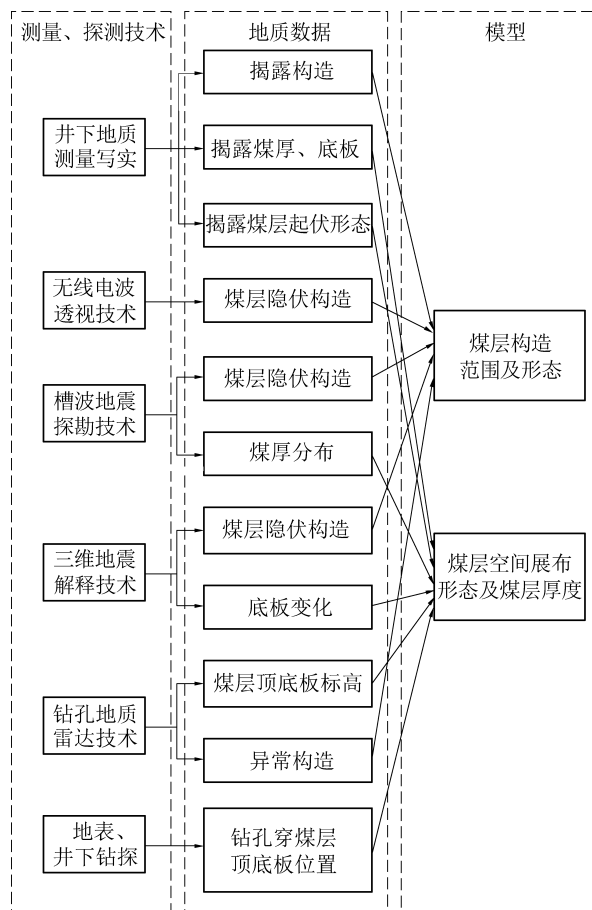


图 2 工作面三维地质模型构建技术

Fig.2 Construction technology of 3D geological model of working face

整合工作面地质探测工程资料,采用中煤科工集团西安研究院有限公司 TIM-3D 建模软件构建工作面初始静态模型,如图 3 所示。模型中蓝色部分表示槽波地震勘探预测的煤层中砂岩冲刷带。结合回采剖面实证,与预测范围相差不大,剖面砂岩冲刷体如图 4 所示。

2)工作面地质模型自动切割技术。利用透明工作面数字孪生系统,结合当前工作面的位置,在地

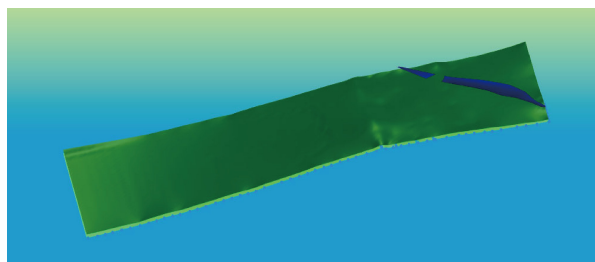


图 3 初始工作面静态模型

Fig.3 Static model of initial working face



图 4 工作面回采实证砂岩体

Fig.4 Mining demonstration of sandstone body in working face 质模型中切割出煤层的顶底板曲线,得到 20 cm 等间隔点的俯仰角、倾角、采高等信息。模型切片示意如图 5 所示。结合激光雷达技术测得巷道两侧的推进距离,进一步确定当前回采剖面的位置;在采煤机上安装惯性导航系统,实时记录采煤机横滚角、航向角俯仰角等姿态信息;通过采煤机摇臂采高传感器获得当前剖面的采高。通过以上数据可以实时定位当前切片完整的位置、姿态和采高等地质信息。整合当前切片地质数据,重新导入地质模型当中,可实现模型的动态更新。结合回采实测煤厚数据对模型精度进行了评定,结果表明:工作面前方 8 m 范围内平均绝对误差小于 15 cm,15 m 范围内平均绝对误差小于 30 cm,基本可满足 1 d 智能化开采的任务量。

3)工作面三维地质可视化技术。在地质模型建立完成后,需要对其进行虚拟现实可视化,即将数据构成的工作面转化为三维可视化模型,对地质模型需要进行三维重建。利用虚拟现实可视化技术对工作面地质情况,工作场景进行建模,包括场景、设备以及人物进行建模,让监视和管理人员有更真实的体验感。工作面三维可视化效果如图 6 所示。

4)三维地质模型与“三机”智能化交互技术。透明工作面模型还需要与三机进行智能化交互,将截割曲线发送至采煤机指导采煤作业;同时综采设备运行过程中的实时工况数据需要向上反馈,

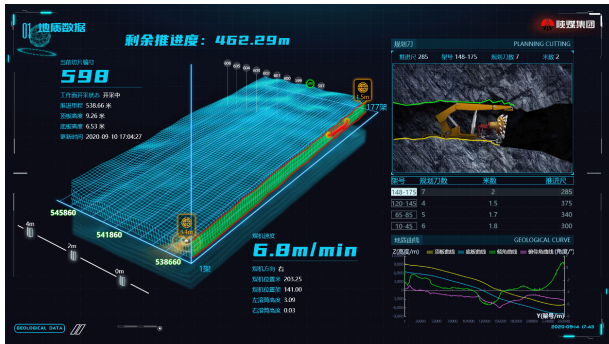


图 5 工作面地质模型

Fig.5 Geological model of working face

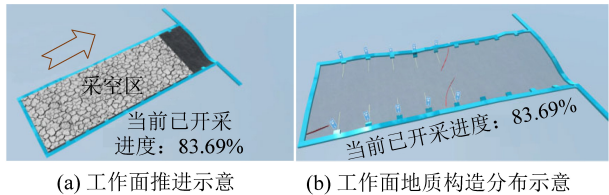
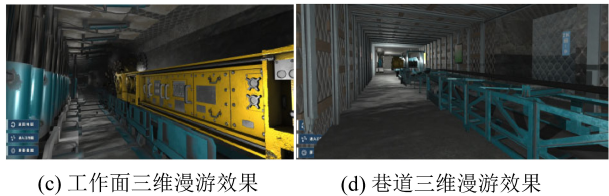


图 6 工作面三维可视化效果

Fig.6 3D visualization effect of working face



他各点的绝对坐标依次与它校准,地质模型坐标布置及网格化效果如图 7 所示。然后根据转换后的绝对坐标,提取生成具有煤层采高、挖底、推进度和俯仰角度等信息的数据化开采模型。最后基于透明地质网格化数据,通过各设备实时开采数据和驱动脚本,实现数据驱动工作面设备三维模型的协同开采。数据驱动与综采工作面设备协同控制逻辑如图 8 所示。

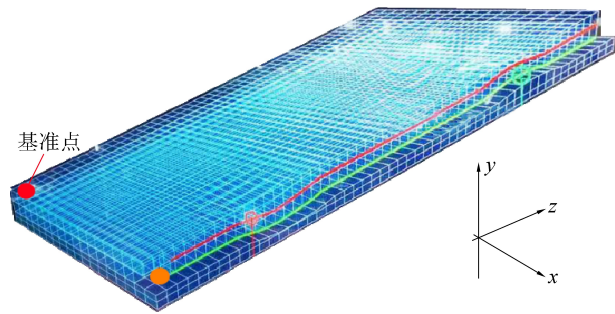


图 7 地质模型坐标布置及网格化效果

Fig.7 Coordinate layout and gridding effect of geological model

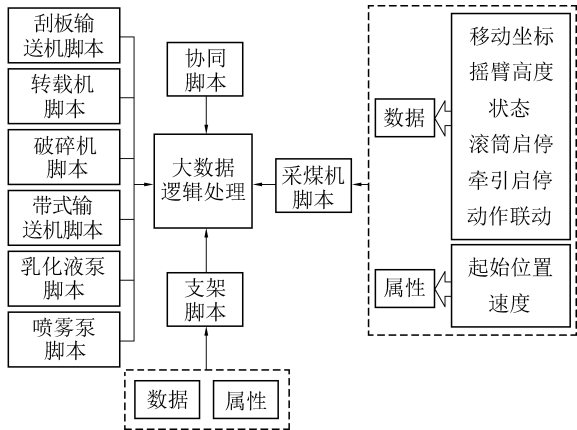


图 8 数据驱动与综采工作面设备协同控制逻辑

Fig.8 Data driven and fully mechanized working face equipment collaborative control logic

来进一步对模型进行辅助分析,真实展现综采设备运行动作,并在虚拟化场景中进行展示。

3 大数据及智能精准开采技术

3.1 综采工作面大数据智能分析决策技术

基于透明地质信息,融合应用开采工艺和综采自动化控制技术、惯性导航技术、雷达测距技术和大数据分析决策技术,建立 1 套完整的可自主分析预测和预判预控的综采工作面大数据智能分析决策中心,实时采集生产过程中各系统传感器的海量监测数据,并对数据进行筛选和分析处理,来不断对开采模型、截割模板等精准决策信息进行修正更新。该部分设计主要包含 4 项内容。

1) 基于地质模型的开采工艺研究。在认真研究采煤机规划截割工艺和液压支架自动跟机工艺的基础上,对照地质模型研究采煤机开采工艺和电液控制自动化跟机工艺的开采参数模型,实现自适应地质模型最优的开采工艺。

2) 建立基于地质模型的开采模型。在自动切割后的网格化地质模型中,选取绝对坐标基准点,并对所有的设备数据模型进行绝对坐标系转换。基准点(0,0,0)设在综采工作面进风巷煤层底角处,工作面其

3) 基于地质模型及设备增强感知的开采模型修正技术。基于地质模型,结合雷达、惯导监测技术来增强感知数据内容,通过大数据融合算法对开采模型进行优化修正。工作面设备增强感知数据主要有视频监视画面、雷达测距数据、惯导三维姿态数据;主要修正的模型为液压支架电液控开采模型、采煤机开采模型、刮板输送机开采模型。

3.2 工作面综采设备空间导航定位及精准控制技术

在透明地质数据、工作面实时监测数据的基础上,结合雷达测距数据和惯性导航三维姿态监测数据,通过大数据分析后得出的决策数据,来对采煤机截割曲线和液压支架自动跟机拉架、推移刮板输送机行程等关键数据进行修正更新,从而

达到动态生产过程中对综采设备精准控制和连续推进的目的。

1) 基于工作面三维地质模型的设备空间导航技术。基于光纤陀螺仪惯性导航技术集成多元惯导形成阵列,将惯导系统的煤机行进路线曲线计算结果,与预切割路线进行比对,对预切割曲线进行加权修正,并实现工作面校直、水平控制等功能。同时惯性导航 x 、 y 、 z 三个方向的位移变化,将能实时反映当前采煤机的三维位姿状况,通过位姿的变化情况,来进一步修正更新截割模板中的采高数据,达到进一步精准控制的目的。

雷达定位技术通过在刮板输送机机头和机尾安装激光雷达,实时监测输送机机头和机尾与进、回风两端头巷帮的距离,从而得出工作面输送机上窜下滑的位移,为精准控制提供决策依据。同时在进、回风巷两巷帮等距离安装激光反射板,实时监测工作面面向前推进距离,从而实现精准定位,为下一刀煤的精准控制奠定了基础。工作面雷达布置如图 9 所示。

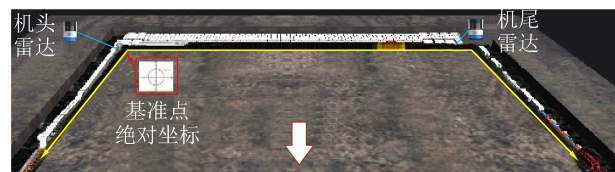


图 9 工作面雷达布置

Fig.9 Radar layout of working face

2) 基于大数据智能分析决策的工作面设备精准控制与协调推进技术。在井下建立精准控制中心,建立综采工作面的集中控制系统,使各设备通过集控系统实现各设备间的信息交互和序列化控制。通过井下工业环网采集综采工作面各设备的运行数据,然后将采集到的数据通过以太网传输到大数据智能分析决策中心,大数据智能分析决策中心依据相关算法生成对应的精准控制开采模型。最后将开采模型下发到井下精准控制中心,从而实现对井下设备的远程精准控制。基于大数据精准控制技术路线如图 10 所示。

4 现场试验

以黄陵矿业公司一号煤矿 810 综采工作面为研究对象,开展了基于透明地质的大数据精准开采研究。810 智能化综采工作面位于井田八盘区西翼,工作面可采长度 950 m,宽度 261 m,煤层厚度 1.3~3.0 m,平均厚度 2.72 m。通过 3 个阶段的现场试验,绘制了试验过程中工作面割煤循环曲线如图 11 所示。

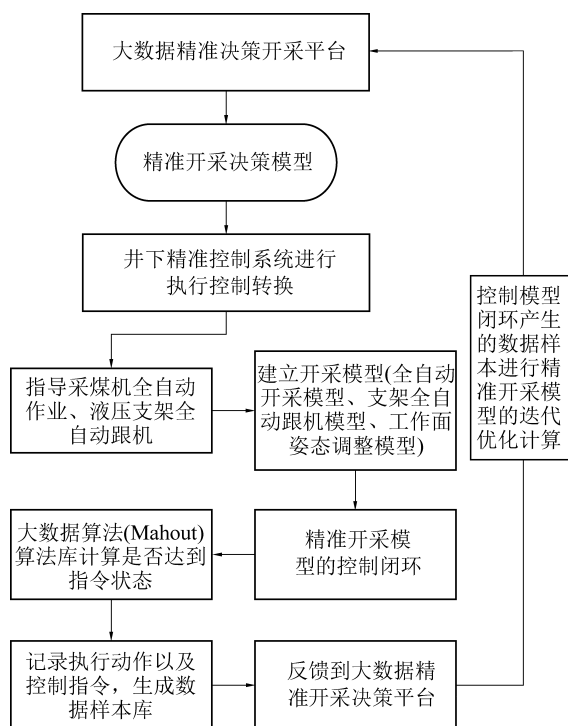


图 10 基于大数据精准控制技术路线

Fig.10 Precise control technology route based on big data

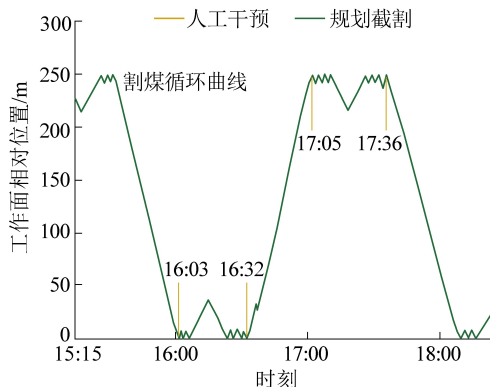


图 11 工作面割煤循环曲线

Fig.11 Coal cutting cycle curve of working face

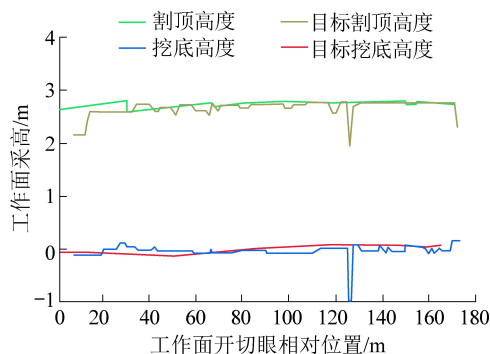


图 12 实际截割曲线与规划截割曲线对比

Fig.12 Comparison between actual cutting curve and planned cutting curve

工业试验阶段仅在工作面两端端头进行了短暂人工干预。通过基于地质大数据的精准智能开采能够实现全工作面高效自主规划截割,实际截割曲线(由实际割顶高度和挖底高度生成)和规划曲线(由目标割顶高度和挖底高度生成)已基本一致(图12)。工作面实现无人开采,全工作面规划截割采煤工艺的高效自主执行,全程无人工干预。

5 结 论

1)构建了透明工作面初始静态模型和回采工作面动态模型,准确地反映了工作面煤层厚度及构造信息。研发隐式迭代建模、动态更新算法,大幅提高了已有地质数据的利用率,实现了静态地质模型的动态更新。

2)采煤机按规划截割曲线自主进行全工作面截割,无需人工干预,可自主完成22道工艺段的阶段切换、方向转换、速度控制、姿态转换、机架协同。液压支架按照14道规划控制工艺自动执行跟机、移架、推溜。惯性导航系统实时测量采煤机在三维(x, y, z)方向的位移变化,并将数据反馈至大数据智能分析决策中心,实现对截割模型的动态修正,并指导工作面找直。

3)结合综采设备的工况监测数据,根据透明地质模型和开采工艺,利用大数据机器学习、数据聚合、插值、补偿、无界流等算法对规划截割模型进行实时修正,形成了高精度的截割模型。

4)按照“获取地质数据—获取切片(10刀)数据—导入规划截割模型—规划启停设备”的规划截割启动顺序,完成了各系统、设备的地面“规划”启动功能,并将截割模型转换为命令行下发至各设备,实现工作面设备精准控制功能。

参考文献(References):

- [1] 袁 亮.煤炭精准开采科学构想[J].煤炭学报,2017,42(1):1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of coal precision mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.
- [2] 唐恩贤,张玉良,马 骋.煤矿智能化开采技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2019,47(10):111-115.
TANG Enxian, ZHANG Yuliang, MA Cheng. Current status and prospects of research on intelligent mining technology in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 111-115.
- [3] 卢新明,阚淑婷.煤炭精准开采地质保障与透明地质云计算技术[J].煤炭学报,2019,44(8):2296-2305.
LU Xinming, KAN Shuting. Geological guarantee for precise coal mining and transparent geological cloud computing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2296-2305.
- [4] 程建远,朱梦博,王云宏,等.煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J].煤炭学报,2019,44(8):2285-2295.
CHENG Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, et al. The cascade construction of geological model of coal intelligent precision mining face and its key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2285-2295.
- [5] 袁 亮.煤及共生资源精准开采科学问题与对策[J].煤炭学报,2019,44(1):1-9.
YUAN Liang. Scientific problems and countermeasures of precision mining of coal and associated resources[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 1-9.
- [6] 方新秋,梁敏富,李 爽,等.智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术[J].煤炭学报,2020,45(1):493-508.
FANG Xinqiu, LIANG Minfu, LI Shuang, et al. Key technologies for multi-parameter accurate sensing and safety decision-making in intelligent working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 493-508.
- [7] 袁 亮,张平松.煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J].煤炭学报,2019,44(8):2277-2284.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Development status and prospect of geological support technology for precision mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2277-2284.
- [8] 王国法,刘 峰,孟祥军,等.煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J].煤炭科学技术,2019,47(8):1-36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Coal mine intelligence (primary stage) research and practice[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1-36.
- [9] 王国法,杜毅博.智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J].煤炭科学技术,2019,47(1):1-10.
WANG Guofa, DU Yibo. The development direction of smart coal and intelligent mining technology [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1-10.
- [10] 王国法,王 虹,任怀伟,等.智慧煤矿2025情景目标和发展路径[J].煤炭学报,2018,43(2):295-305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. Smart coal mine 2025 scenario goal and development path [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.
- [11] 王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J].煤炭学报,2019,44(1):34-41.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, REN Huaiwei. Analysis of key core technologies of smart coal mines and smart mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 34-41.
- [12] 葛世荣,郝尚清,张世洪,等.我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7):28-46.
GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, et al. Current status of my countr's intelligent coal mining technology and key technologies to be broken through[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 28-46.
- [13] 马宏伟,王 岩,杨 林.煤矿井下移动机器人深度视觉自主导航研究[J].煤炭学报,2020,45(6):2193-2206.
MA Hongwei, WANG Yan, YANG Lin. Research on autonomous

- navigation of depth vision for mobile robot in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2193-2206.
- [14] 张科学, 王晓玲, 何满潮, 等. 智能化无人开采工作面适用性多层次模糊综合评价研究 [J]. 采矿与岩层控制工程学报: 2021, 3(1): 47-56.
- ZHANG Kexue, WANG Xiaoling, HE Manchao, *et al.* Multi-level fuzzy comprehensive evaluation of the suitability of intelligent unmanned mining face [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering: 2021, 3(1): 47-56.
- [15] 马洪礼, 司凯文, 吕东跃. 无人工作面智能化采煤机监控系统的研发 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(9): 67-71.
- MA Hongli, SI Kaiwen, LYU Dongyue. Research and development of intelligent monitoring system for coal shearer in unmanned face [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 67-71.
- [16] 范京道, 徐建军, 张玉良, 等. 不同煤层地质条件下智能化无人综采技术 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 43-52.
- FANJingdao, XU Jianjun, ZHANG Yuliang, *et al.* Intelligent unmanned fully mechanized mining technology under different coal seam geological conditions [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 43-52.
- [17] 唐恩贤. 黄陵矿业公司智能化开采核心技术及其应用实践 [J]. 中国煤炭, 2019, 45(4): 13-18, 113.
- TANG Enxian. The core technology of intelligent mining in Huangling Mining Company and its application practice [J]. China Coal, 2019, 45(4): 13-18, 113.
- [18] 张玉良. 大采高智能化综采装备关键技术研究 [J]. 工矿自动化, 2019, 45(5): 35-39.
- ZHANG Yuliang. Research on the key technology of large mining height intelligent fully mechanized mining equipment [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(5): 35-39.
- [19] 张学亮, 刘清, 郎瑞峰, 等. 厚煤层智能放煤工艺及精准控制关键技术研究 [J]. 煤炭工程, 2020, 52(9): 1-6.