

矿山“互联网+”技术研究与应用专题

【编者按】矿山“互联网+”技术是移动互联网、物联网、云计算、大数据、人工智能等与矿山“人、机、环”等的深度融合。随着2015年3月5日李克强总理在十二届全国人大三次会议的政府工作报告中首次提出“互联网+”行动计划,以及2015年12月16—18日第二届世界互联网大会的召开,我国掀起了“互联网+”的发展热潮。为了推动“互联网+”技术在矿山领域的综合应用,促进学术交流,我刊于2016年第7期策划了“矿山‘互联网+’技术研究与应用”专题,邀请行业知名专家、高级技术人才撰稿,系统报道了物联网、云计算、大数据等关键技术应用研究情况,以及采煤机械智能化、人员定位、智能救援、瓦斯抽采监测、冲击矿压灾害监测、废弃煤矿隐蔽灾害监测、矿井通风智能调控等技术在“互联网+”背景下的研究现状与发展趋势,以期有效促进我国矿山“互联网+”技术的进步,为实现我国煤炭安全高效绿色智能化开采和清洁高效低碳集约化利用服务。在此,特别感谢丁恩杰教授在专题组稿方面给予的大力支持与帮助,同时对所有积极为本刊撰稿的专家学者表示衷心的感谢!

互联网+采煤机智能化关键技术研究

葛世荣^{1,2}, 王忠宾^{1,2}, 王世博^{1,2}

(1. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏徐州 221116; 2. 江苏省智能采掘装备协同创新中心, 江苏徐州 221008)

摘要:为实现煤矿无人化综采作业,根据智能化采煤机的作业要求,研究了采煤机智能感知、智能控制、智能截割、远程可视化监控以及综采机组物联网技术,实现了采煤机组的无人操作、远程监控。通过在煤矿现场的应用试验,可实现采煤机作业过程中的自主定位、自动调高、自我诊断、自适应牵引、远程可视化监控,为建设无人化综采工作面奠定了重要基础。

关键词:煤矿综采; 无人综采工作面; 智能化采煤机; 综采机组物联网; 互联网+

中图分类号: TD421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)07-0001-09

Study on key technology of internet plus intelligent coal shearer

Ge Shirong^{1,2}, Wang Zhongbin^{1,2}, Wang Shibo^{1,2}

(1. School of Electromechanical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center of Intelligent Mining and Excavation Equipment, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to replace the manual operation of the coal shearer in the coal mine and realize the unmanned fully-mechanized coal mining operation, according to the operation requirements of the intelligent coal shearer, the paper had study on the intelligent perception of the coal shearer, intelligent control, intelligent cutting, remote visualized monitoring and the internet technology of things for the fully-mechanized coal mining unit. The unmanned operation and remote monitoring of the coal mining unit were realized. With the site application test in the coal mine, an automatic positioning, automatic height-adjustment, self diagnosis, self-adaptive haulage and remote visualized monitoring could be realized in order to set up the important base to build the unmanned fully-mechanized coal mining face.

Key words: fully-mechanized coal mining; unmanned fully-mechanized coal mining face; intelligent coal shearer; fully-mechanized coal mining unit with internet of things; internet plus

收稿日期: 2016-03-11; 责任编辑: 赵瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.07.001

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2014CB046301)

作者简介: 葛世荣(1963—)男,浙江天台人,教授,博士,现任中国矿业大学校长。E-mail: gesr@cumt.edu.cn

引用格式: 葛世荣,王忠宾,王世博.互联网+采煤机智能化关键技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):1-9.

Ge Shirong, Wang Zhongbin, Wang Shibo. Study on key technology of internet plus intelligent coal shearer [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 1-9.

0 引言

井工开采是我国煤炭生产的主要方式,2015年我国煤炭井工采出量约为33亿t,井工煤矿约有1.05万处,有300多万名矿工在井下恶劣、危险环境下从事煤炭开采作业。受到瓦斯爆炸、顶板垮塌、井下突水等灾害的威胁,每年有数百名矿工失去生命。因此,实现综采机组自动化智能化运行,构建少人化或无人化综采工作面,可大幅减少矿工伤亡。综采工作面装备中,采煤机直接作用于待采煤岩,刮板输送机与液压支架服务于采煤机,实现煤岩截割及装煤。采煤机底板截割轨迹决定了刮板输送机的姿态,顶板截割轨迹确定了液压支架的支护空间,运行轨迹反映了刮板输送机的推移直线程度。因此,采煤机是综采工作面的核心装备。实现综采机组智能化的关键是实现采煤机智能化,即使采煤机能够根据自身状态、煤岩界面和煤层地质条件的变化自适应地调整工作状态。采煤机状态感知及其智能控制技术是采煤机智能化关键技术。采煤机状态感知技术包括采煤机故障感知、位置感知、煤岩界面感知、煤层地质状态感知等。采煤机智能控制技术包括采煤机截割控制、姿态控制、牵引速度控制等技术。

目前,国内外对智能化采煤机的研究重点是采煤机记忆截割技术和采煤机定位技术。美国的7LS6、德国SL500、EL3000型采煤机均已实现了记忆截割功能,并在煤层稳定、顶底板比较平整的综采工作面得到初步应用^[1]。通过国家“863计划”重点项目研究和国家智能装备制造专项支持,国内的一些大型采煤机已实现了记忆截割功能,在山西斜沟煤矿、平顶山天安煤业股份有限公司六矿、红柳林煤矿进行了智能化综采工程示范,取得了良好的应用成效。但是,采煤机的动态定位、煤岩识别、自动调高、自主纠偏、远程监控等智能化关键技术仍未成熟,有待深入研究^[2-3]。基于此,笔者介绍了上述采煤机智能化关键技术的研究进展,并提出了新的解决方法和技术途径。

1 采煤机状态感知技术

1.1 采煤机定位技术

采煤机的行走轨迹是刮板输送机导轨空间走向,直接影响液压支架的自动调直控制,决定着工作面煤壁的截割直线度,也是截割滚筒自动调高的参考基准。因此,采煤机在地质空间的三维定位是实

现智能综采工作面的关键技术。目前,可用于采煤机的定位原理包括红外线定位^[4-5]、无线传感网定位^[6-7]、里程计定位^[8-9]、激光定位^[10]、超声波定位^[11]、惯性导航定位^[12-17]。

中国矿业大学率先提出了基于地理信息系统(GIS)的采煤机定位定姿新方法,技术原理如图1所示。利用安装于采煤机机身的具有自动寻北功能的惯性导航装置测量采煤机机身的行走方位与姿态,利用安装于摇臂与机身铰接轴的轴编码器测量摇臂相对于采煤机机身的旋转角度,利用安装于采煤机行走部的轴编码器测量采煤机的行走速度与距离(标量,行走方向由惯性导航装置确定)。

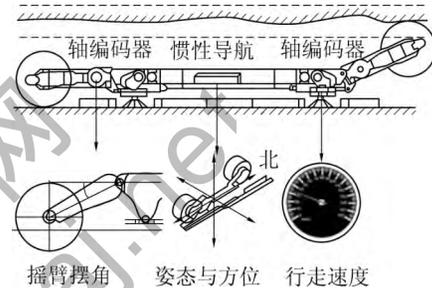


图1 采煤机定位定姿技术原理

Fig. 1 Positioning and orientation technology principle of shearer

在某矿综采工作面试验中,证明采煤机定位方法可基于采煤机行走位置,在工作面煤层数据库中读取运行位置所处的顶底板数据,并嵌入大地坐标系,进而得到采煤机运行轨迹、截割轨迹与工作面顶底板的三维位置关系。截割轨迹与GIS顶底板曲线的误差约为0.2m,经过消差处理可小于0.05m。

1.2 煤岩界面感知

煤层的自然成藏边界很不规则,经常出现顶板岩石下陷、底板岩石上升或者煤层夹持岩块的情况,如不能自动识别煤岩界面的变化,就难以彻底实现无人化采煤作业。迄今已提出了10余种煤岩界面识别的方法,主要是煤层厚度探测原理,如 γ 射线探测^[18-20]、雷达探测^[21-23];煤岩表面检测原理,如红外测温^[24]、激光探测^[25]、表面图像分析^[26-27];切削力检测原理,如振动频谱^[28]、截齿测力^[29]、驱动电流^[30]。近些年在综采工作面实际运行效果较好的方法是澳大利亚联邦科学院CSIRO研发的红外测温方法,通过岩层的热成像条带感知而确定煤层走向^[31]。

中国矿业大学研发成功多参数协同感知方法。该方法通过在线检测采煤机的滚筒转矩、摇臂振动、支撑油缸压力、驱动电流及截割噪声等状态参数,利用径向基函数神经网络(RBF)对各传感器的识别结

果进行融合,从而得出准确的煤岩判别结果。

1.3 采煤机故障感知

由于恶劣工作环境、超重负载工况和超长工作时间,使得采煤机在工作过程中故障频发,且故障类型呈现多样性和随机性的特点。传统的采煤机故障诊断方法一般依赖于现场维修人员的专业知识和经验,通常具有滞后性和不确定性。为此,通过现代智能感知技术建立的采煤机故障感知模型如图2所示。主要包括采煤机状态向量空间和采煤机故障检测器。在采煤机工作过程中,可能发生 n 种故障或非正常截割状态,统称为非正常工作状态。将不同故障或非正常截割状态下的系统所处的不同状态称为 S_1, S_2, \dots, S_n 。当采煤机处于状态 S_i 时,对应的可测量特征向量 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$,定义 X_i 为故障检测器,一个故障可能对应多个故障检测器。由于故障状态并非绝对的,有一定的模糊性和预测性,因此,故障检测器中每个向量的特征值应该具有一定的变动范围,在这种情况下,采煤机故障诊断就成为根据故障检测器匹配采煤机故障类型或对特征向量进行状态的模式识别问题。在对采煤机故障诊断的过程中,采煤机运行状态参数的取值是连续的,这些状态表征的故障类型也不是唯一的。因此对每个故障类型的最终判断,必须综合考虑各个相关运行状态参数。

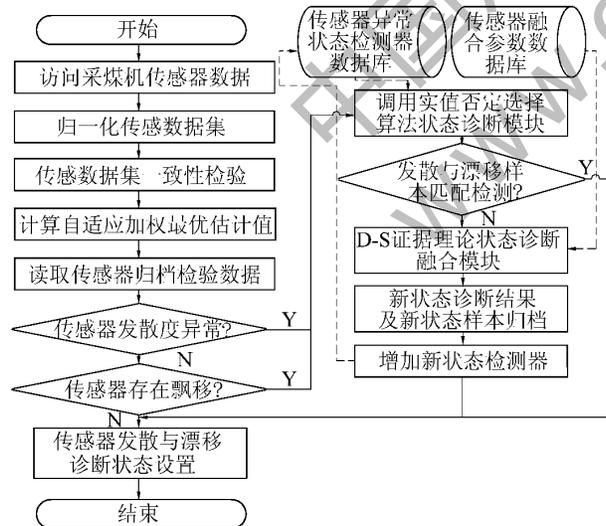


图2 采煤机故障诊断模型

Fig. 2 Fault diagnosis model of shearer

2 采煤机智能控制模型

有限状态机是表示有限个状态以及在这些状态之间的转移和动作等行为的数学模型。利用有限状

态机可以准确描述采煤机截割控制状态、姿态控制状态以及截割滚筒调高控制状态的动态变化过程,从而建立采煤机的智能控制模型。

2.1 截割控制状态机

采煤机依靠左右截割部和破碎部实现煤壁截割和大块煤破碎,其电动机运行的基本信号仅包括停机和运行2个状态。根据截割与破碎电动机的连锁控制要求,为逻辑传感器增加了电动机的启动保护、启动连锁和停机连锁等状态,并从整体上设置了截割与破碎单元的运行状态。采煤机3个主电动机的逻辑状态迁移如图3所示。

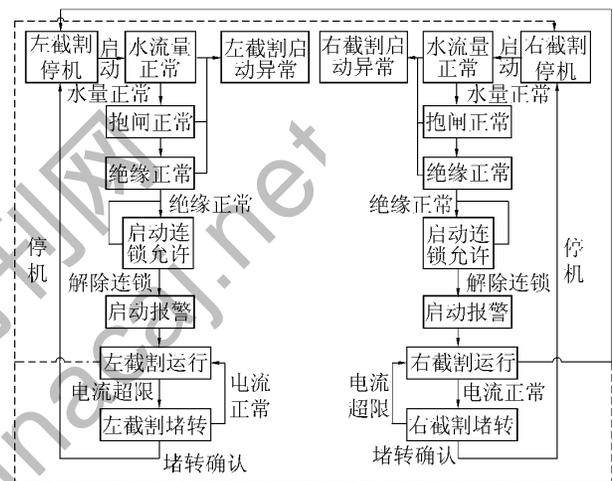


图3 采煤机截割单元逻辑传感器状态迁移

Fig. 3 State transfer of logic sensor for shear cutting unit

为了保障采煤机中的截割电动机安全运行,除了严格按照状态图的状态迁移进行控制以外,还需要对电动机运行的电流、温度、振动等传感器信息进行融合,获取截割电动机的运行良好程度,实现故障的诊断与预警功能。根据逻辑传感器八元组定义,分别定义了截割与破碎单元的各个组成部分。

2.2 姿态控制状态机

电牵引采煤机通常使用记忆截割来实现滚筒高度的调节。当截割滚筒需要调节时,通常需要改变牵引速度,而牵引速度本身与牵引调节能力和牵引调节余量紧密相关,也与采煤机的行程姿态紧密联系,牵引速度的调节也受到液压支架架速度的限制。为了解决这些问题,建立单独的采煤机行程姿态逻辑传感器,并给出了它的状态空间、值函数、附加特征和附加约束,给出了支持截割路径调节与牵引变频控制的接口。

尽管可以建立采煤机行程姿态的数学模型,但该模型的有效性直接依赖于煤岩参数的变化,因此

需要煤岩界面识别感知信息。记忆截割是按照记忆的位置-速度对应关系来调节采煤机的牵引行程姿态。结合采煤机行程姿态控制的过程和外部约束,其逻辑传感器的转移如图4所示。

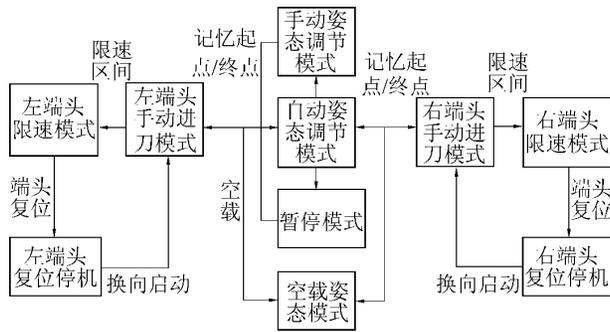


图4 采煤机姿态逻辑传感器状态转移

Fig. 4 State transfer of logic sensor for shearer gesture

2.3 牵引控制状态机

利用现场总线技术,实现采煤机变频牵引控制系统与采煤机机载控制器连接;采用主从控制方式,通过给定主变频器转速,从变频器以跟随方式运行。变频牵引控制单元的工作模式分为恒功率截割牵引与截割路径规划连续调节牵引2种。

在牵引变频单元的I/O控制模式下,通过外部I/O端子实现变频器的启停和加减速控制。在远程控制系统中,变频牵引控制单元通过PPO Type5消息模式控制主从变频器;通过PPO Type5协议设定控制字实现变频器的状态转换、变频器参数状态查询、变频器参数设置和牵引电动机转速等任务。同时还配备电牵引电动机电流、温度等传感器获取牵引电动机状态。上述功能的牵引控制状态迁移如图5所示。

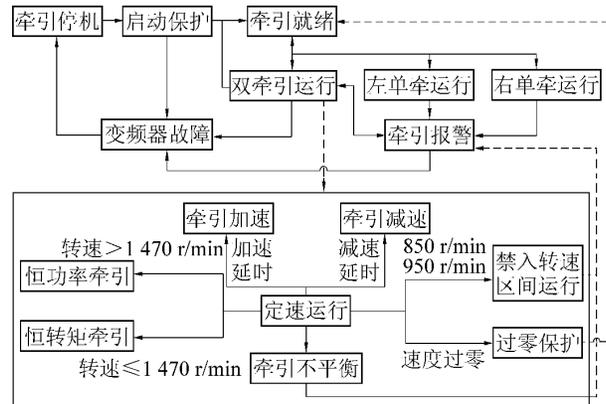


图5 采煤机变频牵引单元逻辑传感器状态迁移

Fig. 5 State transfer of logic sensor for shearer variable frequency haulage

2.4 截割滚筒调高控制状态机

为了实现电牵引采煤机截割滚筒高度的控制,在调高油缸中配置了位移传感器,摇臂上配置倾角传感器测量截割滚筒的当前位置。由于倾角传感量和位移传感量与截割滚筒高度之间存在非线性的映射关系,需要通过控制器实现高度调节的动态补偿。由于截割滚筒和摇臂自重的影响,需要根据截割滚筒不同的上调速度和下调速度进行控制。

在截割滚筒高度调节过程中,截割滚筒高度的调节量与调节时机受到截割路径曲线、机身位置、牵引速度和截割电动机电流的影响,因此在截割滚筒的调节控制中引入上述传感量。在逻辑传感器中增加调高驱动电动机的时间积分、调节高度积分、调节时间积分、油缸位移微分、摇臂倾角微分、牵引速度及其模糊状态、截割电流及其模糊状态等附加特征和相关的附加约束,设置调节高度与调节时间的报警及保护逻辑算子,设置调节高度的位置、方向、时间、调节能力等值函数来反映该单元的逻辑状态。采煤机截割滚筒高度调节逻辑传感器的状态迁移如图6所示。

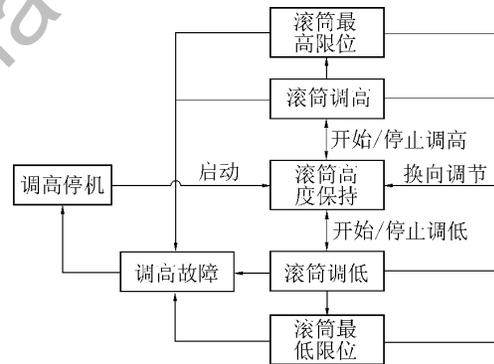


图6 采煤机截割滚筒高度调节逻辑传感器状态迁移

Fig. 6 State transfer of logic sensor for shearer cutting drum's height adjustment

3 采煤机智能截割技术

通过研发相应模块实现采煤机基于记忆截割的自动化工作,利用综采工作面的无线网络系统实现采煤机巷道和地面的远程监控,并通过巷道控制系统实现采煤机与液压支架和刮板输送机的协同集中监控。为了实现采煤机工作状态的准确判断,需要对采煤机的工况参数进行采集,然后利用二次传感和融合技术,实现采煤机工作状态的准确判断,从而实现采煤机的可靠远程监控。

3.1 记忆截割路径规划

在采煤机自动控制过程中,遇到的最大难题就是如何使采煤机滚筒高度自动适应煤层起伏变化,即采煤机截割滚筒自动调高问题。该问题的解决关键是如何准确判断顶板煤层厚度或者识别煤岩界面。为了准确判断顶板煤层厚度或者煤岩识别,国内外先后提出 20 余种煤岩分界的方法,但目前实际应用的是记忆截割技术。

自适应记忆截割控制流程主要包括路径记忆及数据处理、自适应调高和人工修正 3 个阶段。路径记忆和数据处理阶段实现截割参数的采集、记忆和处理。在自动截割阶段,采煤机根据记忆的工作路径进行自动行走和截割运动,当煤层地质条件发生变化,造成实际的煤层参数和记忆的截割参数不一致时,将基于人工免疫理论实现采煤机截割滚筒的自适应调高,以适应煤层地质条件的变化。为了保证安全生产,当煤层地质条件变化非常剧烈,采煤机无法正确地自适应处理时,操作人员可以远程引导采煤机的截割运动,对其运动轨迹进行人工修正。采煤机记录下本次修正结果,当再次运行到该位置时,将采用记忆的截割高度和截割参数进行工作。

在采煤机的记忆截割过程中,首先由操作工人操作采煤机沿工作面进行第 1 次截割,采煤机记忆行走路线以及相应位置的截割参数。采煤机根据记忆的工作位置以及相应的截割参数进行自动截割。在人工示教过程中,记忆位置被分为常规点和关键点,采煤机每隔 1 m 对各传感器采样 1 次,记录下相关信息并添加到记忆集中,这些位置被称为常规点。由于采煤机路径记忆过程中所采集的数据量大,因此不可能也没有必要记录下截割路径中所有点的数据,而只是相隔一段距离采集 1 次数据,这些被采集的点称之为关键点。当操作人员发现采煤机截割到岩石时,必须采取相应的操作,升高或降低截割滚筒的高度,这些位置被定义为关键点,如图 7 所示。采取常规点和关键点相结合进行记忆的策略,可以提高记录的精度,为后续的记忆截割过程提供可靠的数据。

采集到的关键点都是离散的,必须处理为连续曲线以便于引导采煤机行走。因此就需要对采煤机的记忆路径进行拟合,并且要求该路径可以根据实际的运行情况进行修正。例如,图 7 中当采煤机按照记忆路径(实线表示)截割煤层,当运行到 A 点和 B 点时截割到了岩层,因此需要降低摇臂的高度。

此时,应根据新的离散点数据重新规划出采煤机的截割路径。

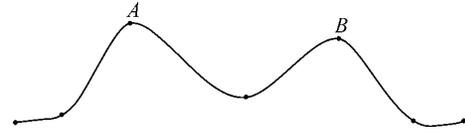


图 7 采煤机记忆截割的关键点

Fig. 7 Memory of cutting key points of shearer

从采煤机的截割路径自动控制看,这是截割路径规划的一个优化问题。从自动控制系统角度看,截割路径规划是与变频牵引、液压调高、行走姿态控制、截割负载等单元相关的非线性系统控制模型,需要综合考虑牵引单元、液压调高机构、行走姿态和截割负载等方面的变化对截割路径规划的影响。

3.2 自适应调高控制技术

当煤层地质条件发生变化时,如果仍然采用记忆的位置会导致截割滚筒截割到顶板岩石、夹矸或者断层,致使采煤机截割部损害,或者带来严重的生产事故。为了解决此问题,文献[32-33]提出了基于人工免疫模型的采煤机截割滚筒自动调高技术,将人工免疫理论与记忆截割相结合,实现采煤机截割滚筒的自适应调高,其控制模型如图 8 所示。

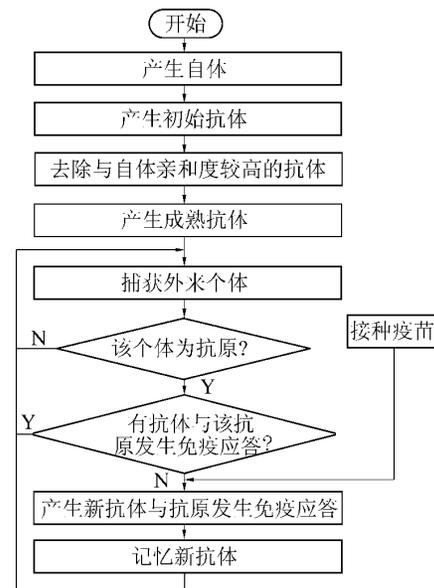


图 8 基于人工免疫的自适应截割控制流程

Fig. 8 Adaptive cutting control process based on artificial immune

在路径记忆与数据处理阶段,由人工操作采煤机沿工作面截割 1 次,采煤机在每个记录点处记录采煤机的当前位置、调高油缸位移、摇臂倾角、行走

速度、左右截割电动机电流和温度、左右截割部行星头温度、左右牵引电动机电流和温度、左右牵引变频器温度、破碎电动机电流和温度以及泵电动机温度等传感器信息。试验表明,基于人工免疫的滚筒调高控制能够较好地拟合所记忆的截割路径,当煤层条件发生变化时,能够自适应地调整截割滚筒高度。图9是在某矿综采工作面实际工作的采煤机记忆截割控制曲线,可见截割滚筒跟踪煤岩界面变化的精度非常高。

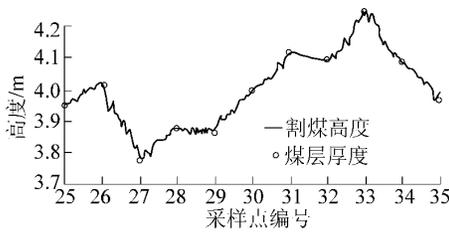


图9 采煤机记忆截割的工业性试验曲线

Fig. 9 Industrial test curve of shearer memory cutting

3.3 自适应牵引控制技术

采煤机的自适应牵引控制是当截割环境、截割阻力或者截割状态发生变化时,通过自适应调节采煤机的牵引速度,使采煤机稳定工作,并保证滚筒有足够的时间和空间进行高度调节,从而更好地适应截割条件变化。司垒等^[32-33]提出一种基于粒子群算法与T-S云推理相结合的采煤机自适应牵引控制方法,将采煤机左/右牵引电流、采煤机左/右截割电流、刮板输送机机头电流、刮板输送机机尾电流、采煤机运行状态等参数作为采煤机调速效果的指标,通过这种算法获得最优规划速度,如图10所示。

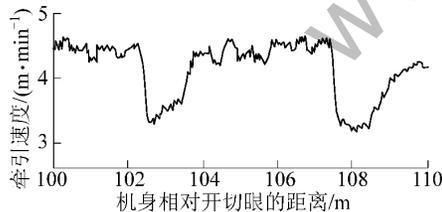


图10 最优牵引速度曲线

Fig. 10 Optimal traction speed curve

3.4 采煤机自动纠偏技术

基于地理信息系统(GIS)的采煤机定位定姿新方法,提出了采煤机自动纠偏控制技术,分为以下4个步骤。

1) 建立局部地理坐标系下采煤机截割轨迹的数学模型与工作面煤层断层、褶皱等复杂地质构造的数学描述模型。

2) 利用3次样条曲线插值算法得到褶皱顶底板煤岩界面曲线,以获得的顶底板曲线为参照,利用循环坐标变换法对采煤机的截割路径进行规划,可以获得煤机每一刀挖底量的调整量和俯仰采角度的计算方法。

3) 将断层地质构造的特征参数作为输入量,准确表示断层带的整体构造,以实现最大回采率和最少割岩量为研究目标,综合考虑设备的通过能力、前后2刀截割的连续性等约束条件,对采煤机截割轨迹进行规划。

4) 根据采煤工艺要求,建立基于插补算法和循环坐标变换算法的采煤机理论规划路径的修正方法,由此实现采煤机在复杂地质构造下的自动纠偏。

4 远程可视化监控技术

在煤矿井下危险环境下,需要建立可视化的远程监控技术,以确保采煤机无人控制作业的安全性。因此,完成了井下防爆型摄像机和防爆型多路视频服务器研制,开发了图像增强以及防抖动软件、视频采集、压缩和转换软件、3DVR数字化平台等。

4.1 采煤机远程控制系统架构

采煤机远程控制功能包括采煤机状态远程监测、电动机启停控制、采煤机参数化控制、截割路径规划、采煤机传感信息融合和本地远程控制器同步互锁等。远程监测功能实现各控制单元的运行参数、保护、报警事件的监测。采煤机控制原理如图11所示。

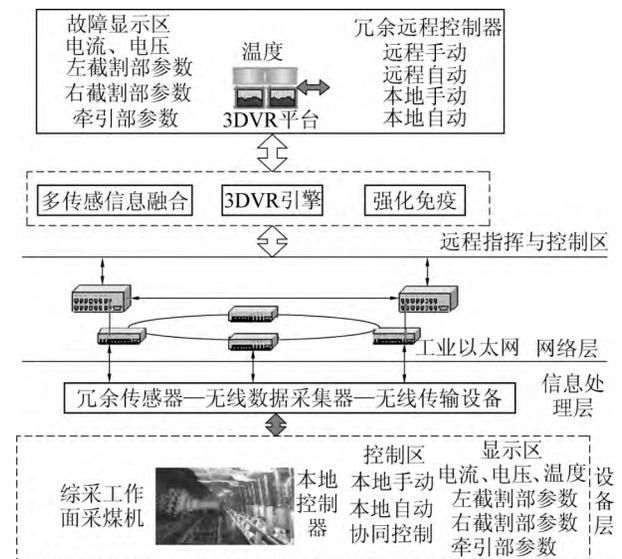


图11 采煤机远程控制原理

Fig. 11 Remote control principle of shearer

5.2 综采机组物联网监控系统

综采机组物联网结构如图15所示,它由地面监控中心、巷道监控中心、工作面工业以太网、巷道集中控制系统和现场设备监控系统等部分组成。其中,地面监控中心和巷道监控中心通过煤矿已经建设的井下工业以太网连接。

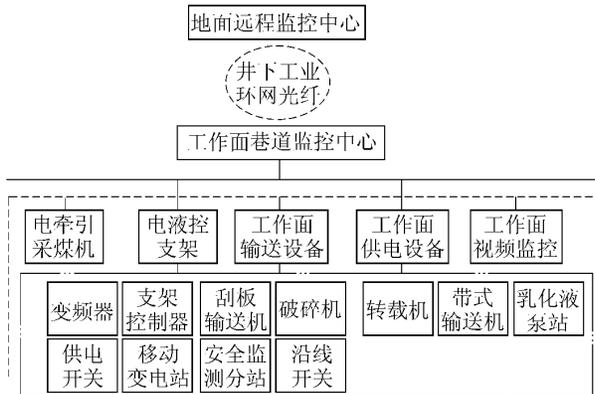


图15 综采机组物联网结构

Fig. 15 Internet of things structure for fully-mechanized coal mining unit

综采机组物联网系统由现场总线网、无线网状网和工业以太网组成,以环网交换机为通信中心,构建了覆盖整个综采工作面范围的通信网络。其中,以矿用隔爆型移动变电站和低压真空馈电开关为主要组成部分的综采工作面供电系统,通过现场总线网和串口服务器与巷道集控中心实现通信,实现串口数据在以太网中的双向透明传输;采煤机、刮板输送机、转载机、破碎机通过无线网状网与巷道集控中心进行通信;乳化液泵站和电液控主机通过以太网接入环网交换机。

6 结 论

1) 智能化采煤机是一种井下无人驾驶综采核心装备,它融合了自主定位、自主纠偏、煤岩自主感知、截割自动调高、故障自主诊断等高新技术,是未来无人化采煤技术革命的基础。

2) 基于地理信息系统(GIS)的采煤机定位定姿技术是智能化采煤机的核心技术突破,它嵌入多参数融合的煤岩界面识别技术之后,成为井下无人驾驶采煤机的自适应导航系统。

3) 构建井下综采机组物联网是煤矿无人化综采工作面的关键技术构架,目前在感知层上仍然存在薄弱技术环节,亟需协同创新予以突破。

参考文献(References):

- [1] 陈惠英,田慕琴,陆秀芬,等.基于多传感器信息融合的煤岩界面识别[J].煤矿机电,2008(3):75-76.
Chen Huiying, Tian Muqin, Lu Xiufen, et al. Coal-rock interface recognition based on multi-sensor information fusion [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2008(3): 75-76.
- [2] 葛世荣.智能化采煤装备的关键技术[J].煤炭科学技术,2014,42(9):7-11.
Ge Shirong. Key technology of intelligent coal mining equipment [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 7-11.
- [3] 葛世荣,苏忠水,李昂,等.基于地理信息系统的采煤机定位定姿技术研究[J].煤炭学报,2015,40(11):2503-2508.
Ge Shirong, Su Zhongshui, Li Ang, et al. Study on the positioning and orientation of a shearer based on geographic information system [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2503-2508.
- [4] 刘清,魏文艳.基于红外检测装置的采煤机定位算法研究[J].机械工程与自动化,2013(6):157-159.
Liu Qing, Wei Wenyang. The research on localization algorithm of shearer based on infrared detection device [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013(6): 157-159.
- [5] 安美珍.采煤机运行姿态及位置监测的研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2009.
- [6] Zhou Lijuan, Chen Guangzhu. Location strategy of shearer based on wireless sensor network [C]//The 2010 International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis Proceeding, Chengdu, 2010.
- [7] 田丰,秦涛,刘华艳,等.煤矿井下线型无线传感器网络节点定位算法[J].煤炭学报,2010,35(10):1760-1764.
Tian Feng, Qin Tao, Liu Huayan, et al. Nodes localization algorithm for linear wireless sensor network in underground coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1760-1764.
- [8] 樊后世,张会,尹丽娜.采煤机位置检测装置:中国, CN201805340U [P]. 2011-04-20.
- [9] 夏护国.采煤机位置监测装置的原理与应用[J].矿山机械,2007,28(11):43-45.
Xia Huguo. Principles and applications of shearer position monitoring device [J]. Mining & Processing Equipment, 2007, 28(11): 43-45.
- [10] Donna L A. Laser tracking and tram control of a continuous mining machine [R]. US: USBM, 1990.
- [11] Strickland W H, King R H. Characteristics of ultrasonic ranging sensors in an underground environment [R]. US: USBM, 1993.
- [12] 李昂.采煤机采区绝对定位定姿技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [13] Michael K. Longwall automation a new approach [C]//Third International Symposium "High Performance Mine Production", Aachen, 2003.
- [14] Mark T D. 2012 high accuracy inertial navigation for underground mining machinery [C]//Automation Science and Engineering (CASE), 2012 IEEE International Conference on IEEE. [sl],

- 2012.
- [15] David C R. Shearer guidance: a major advance in longwall mining [R]. Australia: CSIRO Exploration and Mining, 2006.
- [16] David C R. A practical inertial navigation solution for continuous miner automation [C]//Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australia, 2012.
- [17] 郝尚清, 王世博, 谢贵君, 等. 长壁综采工作面采煤机定位定姿技术研究[J]. 工矿自动化, 2014(6): 21-25.
Hao Shangqing, Wang Shibo, Xie Guijun, et al. Research of determination technologies of position and attitude of shearer on longwall fully mechanized coal mining face [J]. Industry and Mine Automation, 2014(6): 21-25.
- [18] Stolarczyk L G, Stolarczyk G L, Perry K L. Horizon sensor for advanced coal extraction (ACE) [C]//National Mining Association, MINExpo, Las Vegas, 1996.
- [19] Bessinger S L, Nelson M G. Remnant roof coal thickness measurement with passive gamma ray instruments in coal mines [J]. Industry Applications, IEEE Transactions, 1993, 29(3): 562-565.
- [20] 王增才, 孟惠荣, 张秀娟. 自然 γ 射线煤岩界面识别研究[J]. 煤矿机械, 1999, 20(6): 16-18.
Wang Zengcai, Meng Huirong, Zhang Xiujuan. The research on identification of coal-rock interface based on natural γ radiation [J]. Coal Mine Machinery, 1999, 20(6): 16-18.
- [21] Robert L Chufo, Walter J Johnson. A radar coal thickness sensor [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1993, 29(5): 834-840.
- [22] Gerald L Stolarczyk, Larry G Stolarczyk. Ground-penetrating imaging and detecting radar: USA, US006522285B2 [P]. 2003-02-18.
- [23] Andrew D Strange, Jonathon C Ralston, Vinod Chandran. Near-surface interface detection for coal mining applications using bispectral features and GPR [J]. Subsurface Sensing Technology and Applications, 2005, 6(2): 125-149.
- [24] Ralston J C, Strange A D. Developing selective mining capability for longwall shearers using thermal infrared-based seam tracking [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(1): 47-53.
- [25] 吴婕萍, 李国辉. 煤岩界面自动识别技术发展现状及其趋势[J]. 工矿自动化, 2015(12): 44-49.
Wu Jieping, Li Guohui. Development status and tendency of automatic identification technologies of coal-rock interface [J]. Industry and Mine Automation, 2015(12): 44-49.
- [26] Sun J, Su B. Coal-rock interface detection using digital image analysis technique [C]//Electrical, Information Engineering and Mechatronics, London, 2012.
- [27] 孙继平. 基于图像识别的煤岩界面识别方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(2): 77-79.
Sun Jiping. Study on identified method of coal and rock interface based on image identification [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(2): 77-79.
- [28] 任洁, 刘頔. 基于采煤机振动时域特性的煤岩识别方法研究[J]. 煤炭工程, 2016(3): 106-109.
Ren Jie, Liu Di. Recognition method of coal-rock interface based on time-domain vibration characteristics of coal cutter [J]. Coal Engineering, 2016(3): 106-109.
- [29] 廉自生, 刘混举. 基于切割力响应的煤岩界面识别技术研究[J]. 山西机械, 1999(2): 25-27.
Lian Zisheng, Liu Hunju. Study on the coal/rock interface recognition based on the responses of shearer's cutting force [J]. Shanxi Machinery, 1999(2): 25-27.
- [30] 任芳, 杨兆建. 国内外煤岩界面识别技术研究动态综述[J]. 煤, 2001, 10(4): 54-55.
Ren Fang, Yang Zhaojian. The review of domestic and foreign coal rock interface recognition technology [J]. Coal, 2001, 10(4): 54-55.
- [31] Ralston Jonathon R D, Hargrave Chad, Hainsworth David. Sensing for advancing mining automation capability: a review of underground automation technology development [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(5): 305-310.
- [32] Si Lei, Wang Zhongbin, Tan Chao, et al. A novel approach for coal seam terrain prediction through information fusion of improved D-S evidence theory and neural network [J]. Measurement, 2014, 54(4): 140-151.
- [33] Si Lei, Wang Zhongbin, Liu Xinhua, et al. A novel adjustment method for shearer traction speed through integration of T-S cloud inference network and improved PSO [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2014, 35(11): 1-13.