

## 国家重点研发计划“煤矿智能开采安全技术与装备研发”专题

**【编者按】**煤矿智能化无人开采已成为我国煤炭开采的重要发展方向,国家“十三五”规划提出要加快推进煤炭无人开采技术研发和应用,国家煤矿安全监察局开展了“机械化换人、自动化减人”科技强安专项行动,大力提高企业安全生产科技保障能力。目前在地质条件简单的煤层采用人工远程干预的智能控制模式已取得了一定进展,但在地质条件复杂的工作面,存在工作面生产及环境状态不透明、装备适应性差、巷道超前支护难度大等问题,现有技术无法实现智能开采,亟需研发新技术和装备解决这些难题。

“煤矿智能开采安全技术与装备研发”项目是国家科技部 2017 年度国家重点研发计划“公共安全风险防控与应急技术装备”重点专项之一,项目由 10 个课题组成,涉及到智能感知、智能控制和示范应用 3 个方面。目前已取得了阶段性成果。为总结、宣传和集中报道国家重点研发计划“煤矿智能开采安全技术与装备研发”项目取得的科技成果,促进我国煤矿智能化无人开采技术发展,提升我国煤矿开采效能和安全保障能力,《煤炭科学技术》于 2019 年第 10 期组织策划出版了国家重点研发计划“煤矿智能开采安全技术与装备研发”专题,刊登论文 11 篇,报道了智能化开采技术发展现状与趋势、工作面巡检机器人和顶板来压预警技术等方面的研究进展。

在此衷心感谢各位作者为此专题撰稿,特别感谢北京天地玛珂电液控制系统有限公司、天地科技股份有限公司开采设计事业部、中国矿业大学(北京)、北京大学、神华神东煤炭集团有限责任公司、陕西陕煤黄陵矿业有限公司、中信重工开诚智能装备有限公司在专题组稿和撰稿等方面给予的大力支持与帮助!



移动扫码阅读

李首滨.智能化开采研究进展与发展趋势[J].煤炭科学技术,2019,47(10):102-110. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.10.012

LI Shoubin. Progress and development trend of intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019,47(10):102-110. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.10.012

## 智能化开采研究进展与发展趋势

李首滨<sup>1,2</sup>

(1.中国煤炭科工集团有限公司 中央研究院,北京 100013;2.北京天地玛珂电液控制系统有限公司,北京 100013)

**摘要:**我国煤炭工业逐步进入智能化开采阶段,智能化开采是分阶段逐步实现的,从技术到装备的进步是促进煤矿智能化开采的重要保障。描述了我国煤矿智能化开采技术及设备的发展历程,给出了我国在智能化开采领域的典型示范工程应用,通过分析归纳总结了智能化开采分为 4 个阶段,分别定义为智能化开采 1.0、智能化开采 2.0、智能化开采 3.0 和智能化开采 4.0,并对每个阶段进行了阐释,给出了其典型特点和技术概要。分析了智能化开采应用存在的 3 点主要制约因素,即成套装备的稳定性、可靠性差;智能化开采技术适应性不强;智能化开采观念、思想、管理模式有待提升等,针对这些制约因素提出了相应的技术及管理对策。对智能化开采各个阶段进行了评述,提出一种智能自适应开采技术模式下的控制理论模型,对三维激光扫描技术、随采物探装备技术、机器人技术等智能化开采关键技术进行了展望。分析认为,目前智能化开采已经在向智能化开采 3.0 阶段过渡,仍须在管理观念、投入力度、研发团队建设等多方面下大工夫。随着各种先进技术的逐步推广应用,终将实现智能化开采的更高阶段目标。

**关键词:**智能化开采;智能自适应;机器人技术;智慧矿山

**中图分类号:**TD67

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-2336(2019)10-0102-09

收稿日期:2019-05-22;责任编辑:赵 瑞

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804304,2017YFC0804306)

作者简介:李首滨(1968—),男,辽宁法库人,研究员,现任中国煤炭科工集团有限公司中央研究院矿山大数据研究院院长,北京天地玛珂电液控制系统有限公司总工程师。E-mail:shoubin@tdmarco.com

# Progress and development trend of intelligent mining technology

LI Shoubin<sup>1,2</sup>

(1. Central Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Beijing 100013, China;

2. Beijing Tiandi-Marco Electro-Hydraulic Control System Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** China's coal industry has gradually entered the stage of intelligent mining, which is gradually realized in stages. The advancement from technology to equipment is an important guarantee for promoting intelligent mining of coal mines. The development history of intelligent mining technology and equipment in China was described, and the typical demonstration engineering application in the field of intelligent mining in China was given. Through analysis and summary, the intelligent mining was divided into four stages, which were defined as intelligent mining 1.0, intelligent mining 2.0, intelligent mining 3.0 and intelligent mining 4.0, and a brief explanation of each stage and its typical characteristics and technical overview were also provided. The three main constraints of intelligent mining application were analyzed: the stability and reliability of complete sets of equipment were poor; the adaptability of intelligent mining technology was not strong; the concept, thinking and management mode of intelligent mining still needs to be improved and other. The corresponding technical and management countermeasures were proposed. The various stages of intelligent mining were reviewed. A control theory model under the intelligent adaptive mining technology mode was proposed. The key technologies of intelligent mining such as 3D laser scanning technology, geophysical exploration equipment technology and robot technology were prospected. According to the analysis, the current intelligent mining had been in the transition to intelligent mining 3.0 stage. Countless efforts must be given in management aspects, investment, R & D team building and other aspects. With the gradual popularization and application of various advanced technologies, the higher stage goal of intelligent mining would eventually be achieved.

**Key words:** intelligent mining; intelligent adaptive; robot technology; smart mine

## 0 引 言

煤炭行业自实现综合机械化开采以来,已经逐渐普及自动化开采,并逐渐进入智能化开采阶段,同时,智慧煤矿和智能化矿井概念逐步清晰,标准规范逐步完备,为大规模推广应用奠定了基础。

近年来,我国相继发布了《全国矿产资源规划(2016—2020年)》《煤炭工业发展“十三五”规划》《安全生产“十三五”规划》《能源技术创新行动计划(2016—2030年)》《关于新一代人工智能发展规划的通知》《煤矿机器人重点研发目录》等相关规划,设定了煤矿智能化开采目标,为煤矿智能化开采指明了发展方向。

在标准层面,2013年,山东省率先发布了《智慧矿山建设规范》(DB37/T 2322—2013)<sup>[1]</sup>,2017年国家标准的《智慧矿山信息系统通用技术规范》(GB/T 34679—2017)<sup>[2]</sup>发布,2018年,国家标准的《煤炭工业智能化矿井设计规范》(GB/T 51272—2018)<sup>[3]</sup>发布,智慧矿山物联网开放平台(RED-IOT®)研发成功并应用,这些规范标准的发布实施,为煤矿智能化开采的实施创造了条件。

我国陆续建立了一系列创新联盟,智慧矿山产业技术创新战略联盟(简称:智慧矿山产业联盟)、煤矿智能化开采技术创新中心、中国智慧矿山协同创新联盟(简称中国智慧矿山联盟)、中国矿业大学(北京)智慧矿山与机器人研究院、“煤矿机器人协同推进中

心、山东省煤矿智能开采工程实验室、煤矿智能化创新联盟等单位相继建立,为我国煤炭行业智能化开采技术推广和智能化矿井建设起到积极推动作用。

国内学者对智能开采进行了大量研究。方新秋等<sup>[4]</sup>进行了高度自动化与传统综采工艺相结合的无人工作面研究,基于科学采矿理念,提出高度自动化与传统综采工艺相结合的无人工作面的概念和系统模型,构建了无人工作面的技术框架,分析了需要解决的关键技术,包括采煤机自动调高、采煤机自主定位与导航系统、煤岩界面自动识别、井上-井下双向通信、采煤工艺智能化、工作面组件式软件和模型及数据库技术,指出了应用状况。张良等<sup>[5]</sup>针对煤矿综采工作面无人化开采的内涵与实现等进行探讨,提出综采工作面无人化开采的内涵,并阐明工作面无人化与工作面智能化、自动化等内在联系与区别;分析了影响无人化开采的技术因素和非技术因素,并提出无人化开采需经历遥控型无人开采和智能型无人化开采2步走的技术路线。2018年以来,王国法院士团队<sup>[6]</sup>针对智能化开采进行了多方面的深入研究,提出了智能化综采的概念与内涵,并指出在地质条件简单的煤层中基本能够实现人工远程干预的智能开采模式,复杂地质条件下仍存在技术瓶颈,有限条件下的无人化是智能化开采的切实发展目标;基于数字矿山技术发展现状,结合生产系统智慧化特征及要求,给出了智慧矿山概念及内涵<sup>[7]</sup>,指出到2025年,实现煤矿单个系统智能化向

多系统智慧化方向发展,建立智慧生产、智慧安全及智慧保障系统的基本运行框架,初步形成空间数字化、信息集成化、设备互联化、虚实一体化和控制网络化的智慧煤矿第二阶段目标,实现矿井开拓、采掘、运通、分选、安全保障、生态保护、生产管理等全过程智能化运行;提出了以“自主感知与控制-信息传输系统-操作平台-井下系统平台-生产经营管控平台”为主线的智慧煤矿建设主体架构<sup>[8]</sup>,通过底层的自主感知系统对井下的“人-机-环-管”信息进行全面感知,并对感知信息的数据格式、通信协议、存储方式等进行统一,构建了井下多源异构大数据共享平台,实现了井下各子系统之间的数据统一管理与信息共享。

笔者结合典型应用案例的使用情况,指出智能化开采应用现状及存在的不足;根据煤炭行业发展的特点,将智能化开采划分为4个阶段,分别为智能化开采1.0—智能化开采4.0阶段,阐释了各阶段的特点和任务,最后对智能化开采关键技术及发展趋势进行了展望。

## 1 智能化开采发展及应用现状

智能化开采的底层设备是电液控制系统。在20世纪90年代,我国先后于1991年和1996年进行研发投入,分别由北京煤机厂和郑州煤机厂、煤炭科学研究总院太原分院进行电液控系统的研发,虽取得一定的成绩,但是由于各种原因没有进行大规模推广应用。2001年7月,北京天地玛珂电液控制系统有限公司成立,从最初为国外公司提供售后服务,到逐步走向自主研发,于2005年完成电液控制系统控制器研制,2008年,完成整套工业性试验并通过鉴定<sup>[9]</sup>;2007年,四川省神坤装备股份有限公司的电液控制系统研制项目验收合格;2009年,郑州煤矿机械集团股份有限公司的电液控制系统完成井下工业性试验并于2009年11月通过技术鉴定;2009年10月,平阳广日机电有限公司也完成液压支架电液控制系统研制。

在国外,自20世纪90年代开始,德国、美国、澳大利亚等国家都先后提出了相应的智能化开采技术方案<sup>[10]</sup>,依赖工业自动化基础,结合远程可视化监控,实现对采煤机、液压支架、刮板输送机等装备的控制。1990年,德国推出了以“装备程序化控制”为特点的综采电液控制自动化系统;2000年之后,澳大利亚联邦科学与工业组织(CSIRO)开发了LASC长壁自动化系统,该系统以设备定位技术为核心;同时,美国JOY公司推出虚拟采矿方案,实现地面远

程监控;德国艾柯夫公司对采煤机防碰撞、智能控制、截割模板等功能的智能煤机进行研发。

电液控制系统仅是为实现综采工作面液压支架的自动化控制提供便利,综采工作面的采煤机、刮板输送机、转载机、破碎机、带式输送机等均需要实现由手动控制至自动化控制。经过国内同行的努力,这些单机设备的自动化与集控水平实现较大的提升,已经具备整个工作面综采自动化的基本要求。

综采自动化系统是在综采工作面单机设备自动化基础上,建立一套以监控中心为核心,工作面视频、以太网、音频、远控为基础的集中自动化控制系统。把人的视觉、听觉延伸到工作面,将工人从危险的工作面采场解放到相对安全的巷道监控中心,实现在巷道监控中心对系列综采设备进行远程操控。

2011年,北京天地玛珂电液控制系统有限公司的SAM综采自动化系统取得安标,并开始推广应用,至今已推广应用150余套,大幅促进了智能化开采技术的创新发展。2017年9月,郑州煤矿机械集团股份有限公司的综采自动化系统开始工业性试验应用。

2013年,国家“863计划”项目“煤炭智能化掘采技术与装备(二)”立项,其课题“综采智能控制技术与装备”,自主创新研究综采工作面的智能控制技术和研制智能控制装备,重点突破综采设备姿态定位、综采设备安全感知防碰撞、工作面自动找直控制、视频图像拼接处理等综采智能关键技术,重点开发一套集检测、控制,视频、音频、通信于一体的综采工作面智能控制装备,形成综采智能化技术体系。

2017年,国家重点研发计划项目“煤矿智能开采安全技术与装备研发”项目获批,围绕智能化开采及安全生产,开展工作面开采条件实时预测与处置技术、煤岩界面实时识别技术、地理信息系统和设备定位技术与装置、智能开采控制技术及装备、工作面智能化超前支护装备及辅助作业平台、无人工作面巡检机器人、基于大数据的智能开采效能和安全分析决策系统的研究,并在高瓦斯、薄及中厚煤层、大采高工作面3类典型地质条件下开展智能开采安全技术集成与示范。

2018年,国家重点研发计划项目“千万吨级特厚煤层智能化综放开采关键技术及示范”项目获批,揭示特厚煤层自动化放煤与采放协调控制机理,提出群组放煤理论与智能放煤方法,开发煤矸精准识别技术与装置、智能化放煤控制技术与装备,系统集成并在示范矿井进行试验<sup>[11]</sup>。

截至目前,国内智能化开采实现了“液压支架电液控制系统、采煤机记忆截割与可视化远程干预



控制”,攻克了液压支架自适应控制、工作面“三机”协调联动、自动化放煤等关键技术,建设了一批智能化开采示范项目。智能化开采先后在神东煤炭集团、宁夏煤业集团、中煤集团、陕西煤业化工集团、大同煤矿集团、阳泉煤业集团、平顶山煤业集团、晋城煤业集团、峰峰集团、新集口孜东等 40 多个矿区进行试验与生产。

1) 示范项目一:滨湖煤矿薄煤层。2016 年以来,滨湖煤矿先后在 16108、16115、12210 等工作面,采用 SAC 型支架电液控制系统、TDECS 采煤机记忆截割系统与工作面视频监测系统,实现了薄煤层条件下综采自动化结合远程可视化干预的智能开采。以 16108 工作面为例<sup>[12]</sup>,煤厚 1.25~1.50 m,采高为 1.35 m,工作面倾斜长度 139 m、走向长度 953 m。通过将液压支架电液控制系统、采煤机记忆截割系统、工作面视频监测系统采集到的数据和影像上传到位于巷道的监控中心,使操作人员能够在控制中心内实现对工作面回采的远程控制,月均生产原煤 10.5 万 t,工作面生产人员由原来的“2 名采煤司机跟机操作、6 名支架工分段跟机拉架”变成“1 人远程操控、2 人工作面巡视”。达到单班日平均进 7 刀以上生产能力。

2) 示范项目二:黄陵中厚煤层简单地质条件。2014 年,黄陵一号煤矿 1001 工作面率先应用综采智能控制系统(SAM)开始智能化开采,至今保持少人常态化运行<sup>[13-14]</sup>。1001 工作面煤层厚度为 1.10~2.75 m,平均采高为 2.22 m,为中厚偏薄煤层,工作面长度为 235 m、走向长度为 2 280 m。控制系统配套使用液压支架电液控制系统(SAC 型)和采煤机自动化控制系统,实现了“无人操作、1 人巡视”可视化远程干预型智能化开采,达到了“工作面运输巷监控中心 2 人可视化远程干预控制,工作面内 1 人巡视”常态化运行的效果,月产量达 17.03 万 t,年生产能力达 200 万 t 以上,生产效率提高了 25%,工作面内生产作业人员由 11 人递减至 3 人,年节约人工成本 700 多万元,安全生产水平获得较大提升。黄陵井下工作面巷道监控中心工作现场如图 1 所示。

3) 示范项目三:红柳煤矿中厚煤层复杂地质条件。2017 年以来,红柳煤矿先后在 I010305、I040301、I010403 等工作面实施中厚煤层复杂地质条件的智能化开采应用。以 I010305 工作面为例<sup>[15]</sup>,通过国产电液控制系统结合 LASC 系统,实现了综采工作面直线度控制,达到了智能化连续开采。该工作面煤层最大厚度 3.8 m、最小厚度 2.7 mm,平均厚度 3.38 m,最大采高 3.8 m,最小采高 2.7



图 1 黄陵井下工作面巷道监控中心

Fig.1 Roadway monitoring center of working face in Huangling underground mine

m,工作面倾斜长 220 m、走向长 1 910 m。采煤机通过 SPMS 系统实现 2~3 cm 精度的三维空间定位,综合钻孔地质勘测与掘进数据实现采煤机截割滚筒高度的自动或远程人工干预调整。利用 LASC 系统进行工作面直线度检测,检测精度达到 10 cm。电液控制系统对工作面直线度进行控制,工作面直线度平均偏差小于 424 mm。工作面直线度控制与视频监控、集中控制等技术相结合,实现复杂地质条件下“以采煤机记忆截割+支架全工作面跟机自动化+工作面自动找直控制为主;2~3 人巡视,1 人远程指挥为辅”的常态化生产模式。

4) 示范项目四:巴彦高勒厚煤层大采高综采。自 2014 年以来,巴彦高勒煤矿先后在 311101、311103、311102<sup>[16]</sup>、11201 等工作面实施大采高智能化开采,该矿工作面涌水量大、顶底板破碎,采用国产成套装备,实现了从传统开采方式每班 12 人以上,转变为“采煤机司机 2 人、支架工 1 人、巡检工 1 人、远程监控 1 人”的生产方式,减少作业人数 7 人以上,作业人数减少 60%。巴彦高勒煤矿大采高综采工作面现场如图 2 所示。



图 2 巴彦高勒煤矿大采高综采工作面现场

Fig.2 Fully-mechanized working face with large mining height in Bayan Gaole Coal Mine

## 2 智能化开采阶段

根据煤炭行业发展的特点,结合 2030 年重点煤

矿区基本实现工作面无人的智能化开采目标,将智能化开采划分为以下4个阶段(图3):

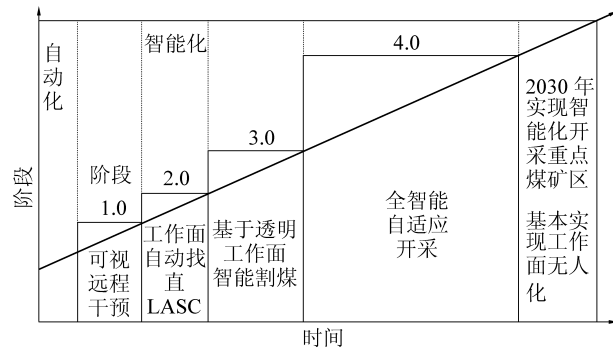


图3 智能化开采的阶段划分

Fig.3 Stage division of intelligent mining

1)智能化开采 1.0:以“可视化远程干预”为特点,这一阶段攻克了可视化远程采煤等技术难题,提出了“自动控制+远程干预”的智能开采模式,以采煤机记忆截割、液压支架自动跟机及可视化远程监控为基础,以生产系统智能化控制软件为核心,实现在地面(巷道)综合监控中心对综采设备的智能监测与集中控制,确保工作面割煤、推移刮板输送机、移架、运输、灭尘等智能化运行,达到工作面连续、安全、高效开采。

2)智能化开采 2.0:以工作面自动找直为特点,这一阶段,采用引进的 LASC 技术研发了设备运行轨迹检测技术,以此为基础,可实现综采工作面直线度的有效控制,为综采工作面的连续顺利推进创造条件,随着控制精度的提高,依托惯导特性的采煤机具有更高的控制精度,可在复杂条件下实现工作面自动化生产模式常态化运行。

3)智能化开采 3.0:以透明工作面为特点,这一阶段通过精准地质信息的应用,实现地球物理数据和综采工作面回采数据的自动采集、处理和解释,建立精准四维动态地质,基于透明工作面,综采工作面所有运行设备全息信息展示于一张图上,综采工作面智能开采系统具备自动分析优化回采方案,具备根据相关信息动态调整综采工作面产量能力。

4)智能化开采 4.0:全智能自适应开采阶段,这一阶段各项技术提升至全新的水平,通过感知技术形成对环境、装备状态的全面认知,通过系统集成控制技术达成对执行装备的操控。基于透明工作面条件下的智能化开采大数据,通过不断进行深度学习,形成“感知-分析-决策-控制”全智能化开采策略,采用机器视觉、多源信息融合与三维物理仿真等技术对所采集数据进行智能分析,使系统能够自主认知并理解工作面环境与装备的实际状态,在此基础

之上通过煤机滚筒自适应调高、直线度控制与上窜下滑控制等智能决策控制技术进行开采决策与执行控制,从而实现真正的智能化开采。

### 3 智能化开采存在的问题

#### 3.1 智能化开采的制约因素

系统总结国内智能化开采现状及应用情况,分析认为智能化开采的主要制约因素如下:

1)成套装备的稳定性、可靠性有待进一步提升。在执行层、感知层、装备层、系统层4个层面上,成套装备的稳定性、可靠性均存在一定的限制,对综采智能化开采的支撑不够,造成了当前智能化开采项目问题暴露较多、实际效果参差不齐。

2)智能化开采技术适应性问题。围岩结构和矿压显现规律不清楚,无有效实时预测与处置技术,不能保障安全连续推进。煤岩层空间信息不精准,无实时高精度感知方法和手段,不能实现精确控制。综采装备控制与煤层信息不关联,无法及时响应煤层动态变化,不能自适应割煤。

3)智能化开采观念、思想、管理模式有待进一步提升。对综采自动化、智能化开采的发展趋势要有清晰、明确的认知:当前正处在建设智慧矿山的进程中,自动化是基础、智能化是核心、无人化是目标。对于智能化开采仍缺少统一标准,继续加强智能化开采技术顶层设计势在必行。

矿方、区队在综采智能化项目管理模式上要由过去粗放型向精细化模式转变,同时综采智能化项目需要知识型、技能型、创新型人才作为支撑,高素质队伍建设需求迫切。

#### 3.2 智能化开采对策

针对智能化开采的制约因素,给出解决这些制约因素的建议如下:

1)对智能化开采进行顶层设计,对装备提出明确要求。针对智能化开采项目进行总体设计,以智能化开采为目标,进行成套化设计,“三机配套”逐步转变为包含智能化开采系统的“四机配套”。在设备制造层面,要实现主体装备与关键传感元件的一体化设计,实现液压系统特性匹配,以满足以智能化开采产能与效率为目标的总体装备动力系统设计。

2)逐步突破应用各项关键技术,提升设备信息化程度。通过近年来的研发,形成以智能控制软件为核心,通过采煤机记忆截割、液压支架跟机自动化与可视化远程干预,煤流负荷反馈采煤控制,实现了开采人员在地面或巷道监控中心对综采装备的远程智能监控,确保开采工艺中割煤、推移刮板输送机、



移架、运输、降尘等操作智能化运行,实现了工作面连续、安全的高效开采。

液压支架是综采工作面与围岩相互作用的主要设备,进行液压支架姿态自适应技术完善,通过安装护帮板行程传感器实现对护帮姿态的检测,检测护帮在打出时是否到位,实现对煤壁护帮的有效作用,防止或减少工作面片帮;安装倾角传感器实现支架姿态检测,保证工作面支架姿态正常,实现支架对顶板的有效支撑;安装测高传感器实现对支架高度精准测量,避免支架顶梁错茬咬架,对工作面采高进行有效监控;通过对平衡千斤顶的动作监测与控制,进行适时调整,保证支架姿态与围岩特性相匹配。

采煤机是综采工作面的落煤装备,基于工作面地质探测数据以及惯性导航、三维激光扫描等技术应用,实现工作面开采条件感知,构建工作面开采模型。基于透明工作面模型,进行数字化割煤,采煤机智能调高,实现工作面无人巡视、远程干预作业的探索。通过安装惯导装置,建立工作面高精度惯性导航系统,实现基于惯性导航装置对工作面直线度进行检测,达到对工作面三平两直状态的有效评估及反馈控制,实现对工作面直线度控制。

建立辅助巡检平台,搭载巡检机器人,承担综采工作面巡检职责,可为综采“无人巡视、无人操作”的智能化生产模式提供强有力技术支撑;巡检机器人作为搭载平台,可集成三维激光扫描设备、惯性导航设备、红外成像仪、高清摄像仪等装置,为智能化开采控制提升提供运载平台。

建立千兆工业以太网通信平台及标准协议,工作面工业以太网具备1 000 MB带宽通信能力,可实现视频、数据高速传输;建立覆盖工作面的无线通信网络平台,可实现工作面内移动终端设备快速、稳定无线接入;统一的网络型控制器及针对矿山机电设备建立标准EtherNet/IP传输协议,实现综采工作面各装备间的无缝网络协议转换。

3)贯彻“理念先行、全员参与、管理到位”的实施理念。

**理念先行:**统一思想、坚定信念。在生产单位动员宣传实施智能化生产的重大意义和紧迫性,消除职工顾虑,扫清思想障碍,把实现智能化无人开采作为优先工程。

**全员参与:**上至实施智能化开采所在生产单位的集团公司,下至生产单位区队职工都需积极参与,尤其要充分发挥一线职工的创造性和能动性。

**管理到位:**摆脱原有煤矿管理经验的束缚,

将管理重心由劳动密集型向人才技术密集型转变。

## 4 智能化开采发展展望

### 4.1 智能化开采阶段评述

从严格意义上讲,智能化开采1.0并未完全实现工作面无人化开采,工作面综采自动化结合远程可视化干预的技术模式为无人化开采提供了一条切实可行的技术途径<sup>[17]</sup>。监控中心远程采煤成为现实,可以常态化生产;地面采煤成为可能,在条件许可的情况下间歇式连续生产;工作面内可以做到无人操作,必要时,人员进入工作面巡视。在智能化开采1.0阶段,可达到以下2点效果:一是将工人从操作工变成巡检工,由设备的自动化替代人工劳动,大幅降低了工人的劳动强度;二是将工人从危险的工作面采场解放到相对安全的巷道监控中心,在监控中心对设备进行远程操控,提高了工人的安全系数。

在智能化开采2.0阶段,积极开展装备顶层设计,提升成套性能;自主开发、攻克薄煤层工作面高效生产技术;引进高端采煤机,自主开发与之配套的刮板输送机、液压支架和自动化系统;通过引入工作面直线度检测技术,为“可视化远程干预型”无人化开采模式提供了更加有效的综采工作面管控手段。这一阶段,开始重视智能供液系统一体化设计,实现成套装备的水处理、冷却系统、喷雾系统与介质清洁度保障系统一体化设计,攻克了630 L/min电磁卸荷阀、适用于纯水介质的高强度整体式不锈钢泵头、陶瓷柱塞等关键元部件技术瓶颈,打破了国外的技术垄断;成功研制出国内首台具有自主知识产权的630 L/min、40 MPa五柱塞乳化液泵站<sup>[18]</sup>。逐步推广应用千兆工业以太网通信平台及标准协议,建立了覆盖工作面的无线通信网络平台。

在智能化开采3.0阶段,从以工作面自动找直技术为关键技术的设备为代表的自适应智能化开采阶段,向基于透明工作面的智能化开采阶段发展,这一阶段,许多新技术被引入应用,许多新装置进行研发应用。依托国家重点研发计划项目“煤矿智能开采安全技术与装备研发”,开展基于“透明工作面”的智能开采技术与装备的研制,实现“透明采煤”目标。煤矿智能化无人开采技术与装备研发的关键内容包括:①工作面装备位姿检测及多信息驱动的三维场景实时再现;②围岩-装备耦合自适应协同控制系统研发;③智能装备关键元部件及可靠性技术研发;④煤流及两巷辅助作业智能化系统研发。

在智能化开采4.0阶段,随着各项先进技术的

应用,制约智能化开采的各项技术逐步解决,智能化开采在更大范围内实现深度应用。

目前,正处于向智能化开采3.0阶段过渡的过程中。

#### 4.2 智能化开采技术展望

根据多年来对业界智能化无人开采技术的持续

关注,笔者提出一种智能自适应开采技术模式下的控制理论模型,如图4所示。

智能自适应无人开采控制模型以综采成套装备为执行系统,通过大量传感器感知综采装备的工作状态;以激光扫描、可见光/热红外视频、瓦斯传感器、随采物探等多种传感手段,辅以钻孔、地质勘探、

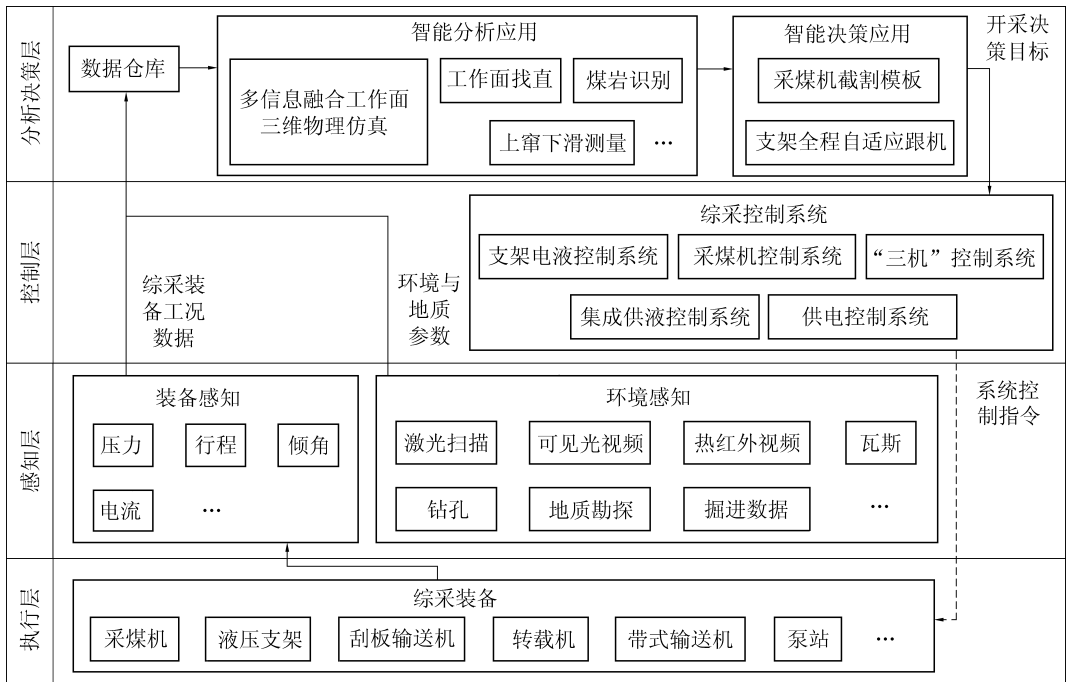


图4 智能自适应无人开采控制模型

Fig.4 Unmanned mining control model with intelligent adaptive

掘进数据,形成对工作面地质环境状态的感知;将大量的传感数据汇集存储到统一的数据仓库中,通过多源信息融合与三维物理仿真的手段在计算机空间内为工作面建立三维物理模型,使机器认知并理解工作面环境与装备的实际状态;在此基础上应用机器视觉、三维物理计算等智能化方法有针对性地煤岩识别、工作面找直、上窜下滑量测量等关键问题进行智能化分析;在分析结果之上,通过人工智能机器学习的方法自主决策制定采煤机截割模板与液压支架全程自适应跟机计划;最后,通过系统集成控制技术,将控制指令下发给各综采装备控制系统,监控生产开采过程,形成“感知-分析-决策-控制”闭环<sup>[19]</sup>。

在智能化开采3.0阶段,许多新技术将被引入并进行应用,提升智能化开采技术水平。

1) 三维激光扫描技术。三维激光扫描技术可以被作为井下环境与装备的三维轮廓感知与定位的重要手段。北京天地玛珂电液控制系统有限公司已经与澳大利亚联邦科学与工业组织就井下三维激光扫描设备——ExScan在井下的应用研究展开合作,

该项技术将在井下环境建模与定位测量领域发挥至关重要的作用。井下巷道点云图像如图5所示。



图5 井下巷道点云图像

Fig.5 Image of underground mine roadway point cloud

2) 随采物探装备技术。UWB地质雷达等随采物探装备技术,将广泛用于开采阶段的工作面地质环境感知,以作为指导煤机滚筒截割的重要支撑数据来源,也可作为综采工作面煤岩分界的一种辅助手段,UWB地质雷达因结构小巧灵活的井下环境适应性,成为了随采地质收集装备的首选。目前天地玛珂电液控制系统有限公司正在研制相关产品并展开井下工业性试验,有望在随采物探领域取得突破。

3) 机器人技术<sup>[20]</sup>。机器人技术将广泛应用于井下工作面巡检与数据采集,以形成重要的感知平

台。煤矿井下机器人将广泛搭载基于惯性导航与无线定位技术相结合的复合导航定位技术,但在此前,信号干扰、基站移动重定位等核心问题仍待解决。目前天地玛珂电液控制系统有限公司在第一代巡检机器人的基础上,正在研制井下工作面轨道式巡检机器人并展开工业性试验,该机器人运行在刮板电缆槽一侧的轨道上,能够搭载惯导装置、三维激光扫描装置、高清/红外摄像头等多种传感器,实现工作面快速巡检与跟机作业。

此外,还有许多其他重要技术也能够被用于智能化开采。大量基于人工智能的计算技术也将应用于智能自适应开采模式中,如通过机器视觉分析工作面煤壁高清图像以获取煤层分界线的煤岩识别技术;通过热红外与可见光图像融合的机器视觉分析技术用于采煤机滚筒截割过程分析,为开采过程中滚筒的自适应在线控制提供重要决策依据;而机器学习则能够被广泛应用于各种开采操作与故障、事故分析决策场景中。

## 5 结 论

1)智能化开采是分阶段逐步实现的,从技术到装备的进步是促进煤矿智能化开采的重要保障。通过总结分析并给出4个智能化开采领域的典型示范工程应用,说明我国现阶段智能化开采发展正处于从典型示范到全面推广的过渡阶段。

2)通过分析归纳总结了智能化开采分为4个阶段,分别定义为智能化开采1.0、智能化开采2.0、智能化开采3.0和智能化开采4.0,并对每个阶段进行了简要阐释,给出了其典型特点和技术概要。

3)给出智能化开采应用存在的3点主要制约因素,即成套装备的稳定性、可靠性差;智能化开采技术适应性不强;智能化开采观念、思想、管理模式有待提升等。针对这些制约因素提出了相应的技术及管理对策。

4)通过对智能化开采各个阶段进行评述,提出一种智能自适应开采技术模式下的控制理论模型,并对三维激光扫描技术、随采物探装备技术、机器人技术等智能化开采关键技术进行了展望。

5)目前智能化开采已经在向智能化开采3.0阶段过渡,仍须在管理观念、投入力度、研发团队建设等多方面下大功夫。但笔者相信,随着各种先进技术的逐步推广应用,智能化开采必将在不久的将来达到新的高度。

### 参考文献(References):

[1] DB37/T 2322—2013,智慧矿山建设规范[S].

- [2] GB/T 34679—2017,智慧矿山信息系统通用技术规范[S].
- [3] GB/T 51272—2018,煤炭工业智能化矿井设计规范[S].
- [4] 方新秋,何杰,郭敏江,等.煤矿无人工作面开采技术研究[J].科技导报,2008(9):56-61.  
FANG Xinqiu, HE Jie, GUO Minjiang, et al. Study on unmanned workplace mining technology [J]. Science & Technology Review, 2008(9):56-61.
- [5] 张良,李首滨,黄曾华,等.煤矿综采工作面无人化开采的内涵与实现[J].煤炭科学技术,2014,42(9):26-29,51.  
ZHANG Liang, LI Shoubin, HUANG Zenghua, et al. Definition and realization of unmanned mining in fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9):26-29, 51.
- [6] 王国法,张德生.煤炭智能化综采技术创新实践与发展展望[J].中国矿业大学学报,2018,47(3):459-467.  
WANG Guofa, ZHANG Desheng. Innovation practice and development prospect of intelligent fully mechanized technology for coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3):459-467.
- [7] 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. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2):295-305.
- [8] 庞义辉,王国法,任怀伟.智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术[J].煤炭科学技术,2019,47(3):35-42.  
PANG Yihui, WANG Guofa, REN Huaiwei. Main structure design of intelligent coal mine and key technology of system platform construction [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3):35-42.
- [9] 李首滨.国产液压支架电液控制技术现状[J].煤炭科学技术,2010,38(1):53-56.  
LI Shoubin. Technical status of domestic electronic-hydraulic control system for hydraulic powered support [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1):53-56.
- [10] 王国法.煤矿综采自动化成套技术与装备创新和发展[J].煤炭科学技术,2013,41(11):1-5.  
WANG Guofa. Innovation and development on automatic completed set technology and equipment of fully-mechanized coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11):1-5.
- [11] 于斌,徐刚,黄志增,等.特厚煤层智能化综放开采理论与关键技术架构[J].煤炭学报,2019,44(1):42-53.  
YU Bin, XU Gang, HUANG Zhizeng, et al. Theory and its key technology framework of intelligentized fully-mechanized caving mining in extremely thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1):42-53.
- [12] 单天琦,靳远志,姜辉.薄煤层综采自动化设备在滨湖煤矿的研究与应用[J].山东工业技术,2017(1):52.  
SHAN Tianqi, JIN Yuanzhi, JIANG Hui. Research and application of automatic equipment for fully mechanized mining of thin coal seam in Binhu Coal Mine [J]. Shandong Industrial Technology, 2017(1):52.
- [13] 王国法,范京徐,徐亚军,等.煤炭智能化开采关键技术创新进展与展望[J].工矿自动化,2018,44(2):5-12.



- WANG Guofa, FAN Jingdao, XU Yajun, *et al.* Innovation progress and prospect on key technologies of intelligent coal mining[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(2):5-12.
- [14] 范京道, 王国法, 张金虎, 等. 黄陵智能化无人工作面开采系统集成设计与实践[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(1):84-87.  
FAN Jingdao, WANG Guofa, ZHANG Jinhu, *et al.* Design and practice of integrated system for intelligent unmanned working face mining system in Huangling Coal Mine [J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(1):84-87.
- [15] 杨成龙. 构建煤矿安全绿色智能化生产新模式的探索研究[J]. *神华科技*, 2018, 16(5):7-9, 25.  
YANG Chenglong. Exploration on the construction path of Shenhua Ningxia Coal Intelligent Mining Area [J]. *Shenhua Science and Technology*, 2018, 16(5):7-9, 25.
- [16] 候西华, 季成, 赵善坤, 等. 具有冲击危险性区段煤柱合理宽度研究[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(9):190-193.  
HOU Xihua, JI Cheng, ZHAO Shankun, *et al.* Study on reasonable width of section coal pillar with rock burst risk[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(9):190-193.
- [17] 黄曾华. 可视远程干预无人化开采技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(10):131-135, 187.
- HUANG Zenghua. Study on unmanned mining technology with visualized remote interference [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(10):131-135, 187.
- [18] 李然. 大采高工作面高压大流量乳化液泵的研制及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(12):145-149.  
LI Ran. Research and development as well as application of high pressure and high flow emulsion pump to high cutting coal mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(12):145-149.
- [19] 李首滨. 煤炭智能化无人开采的现状与展望[J]. *中国煤炭*, 2019, 45(4):5-12.  
LI Shoubin. Present situation and prospect on intelligent unmanned mining at work face [J]. *China Coal*, 2019, 45(4):5-12.
- [20] 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. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1):1-10.



李首滨(1968—),男,辽宁法库人,研究员,硕士。1990年毕业于北京邮电学院计算机通信专业,获学士学位,1993年毕业于煤炭科学研究总院北京开采研究所,获采矿工程专业硕士学位,同年入职煤炭科学研究总院工作至今,工作期间获得美国怀特州立大学工商管理硕士。现任中国煤炭科工集团有限公司中央研究院矿山大数据研究院院长,北京天地玛珂电液控制系统有限公司总工程师。兼任中国煤炭工业技术委员会委员、煤炭行业安全标准化技术委员会防爆技术设备分会副主任委员,中国煤炭科工集团技术委员会装备分会主任。

李首滨研究员一直从事煤矿智能无人化开采技术的研究和攻关工作,主持承担了“综采智能控制技术与装备”、“无人工作面巡检机器人”、“煤炭综采成套装备智能系统”等国家“863计划”、国家重点研发计划、国家智能制造发展专项等国家重大科技攻关项目6项,开发完成国内首套自主知识产权的电液控制系统、综采智能无人化控制系统等国际先进的产品,首创了“智能+远程干预”的采煤新模式,实现了我国“有人巡视、无人操作”的采煤新方法,促进了我国智能无人化采煤技术的发展。

李首滨研究员先后获得国家科技进步二等奖2项,省部级科技进步特等奖和一等奖6项,中国专利优秀奖1项,授权国家发明专利26项,出版学术著作3部,发表学术论文20余篇,其中Ei检索2篇。2015年获国务院“享受政府特殊津贴”自然科学研究专家称号,2017年入选国家百千万人才工程,获得“国家有突出贡献的中青年专家”称号,2018年以李首滨为团队负责人的“煤炭智能化无人开采创新团队”被国家科技部列为“国家创新人才推进计划——重点领域创新团队”。