



移动扫码阅读

贺雁鹏,黄庆享,曹健.可视化矿山的发展现状及关键技术[J].煤炭科学技术,2019,47(4):32-37. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.04.006

HE Yanpeng, HUANG Qingxiang, CAO Jian. Development status and key technology of visual mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 32-37. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.04.006

## 可视化矿山的发展现状及关键技术

贺雁鹏<sup>1,2</sup>,黄庆享<sup>1,2</sup>,曹健<sup>1,2</sup>

(1.西安科技大学 能源学院,陕西 西安 710054;2.西安科技大学 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室,陕西 西安 710054)

**摘要:**可视化矿山的建设是智慧煤矿的重要组成部分。通过总结目前可视化矿山的国内外发展现状,分析了可视化矿山建设存在的若干问题,结合模拟仿真、多场智能监测监控、大数据处理、物联网与互联网+等先进技术手段,提出了可视化矿山的建设应包括数据可视化、模型可视化、场景可视化和沉浸式(CAVE)可视化4个方面。同时,提出了以采矿模拟仿真的可视化矿山建设为基础,自动化和信息化建设为手段,智能化开采为目标的新型采矿研究体系,设计了由设备感知层、网络数据处理层、关键技术应用层和协同管理层构成的系统总体架构,形成了“一个核心(可视化矿山建设为核心)、多类数据库(数据库是可视化的载体)、一个标准平台(多信息融合)和一个服务目标(协同管理与决策)”的技术框架,基于2类3种(文档型和关系型2类,结构化、半结构化和非结构化3种)数据的处理和信息展现,实现4A式(Anyone、Anytime、Anywhere和Anydevice)关联互动平台。根据煤矿生产实践环节,针对矿山作业环境的特殊性和复杂性、安全隐患的不确定性、生产数据多样性与容量巨大性等实际问题,提出8个可视化矿山建设的关键应用技术:三维立体仿真模型、开拓和开采方案设计、矿井风量风速配置、专家决策、动态处理、危险源辨识与预警以及建立数字化集成操作平台,实现各生产环节的信息融合和智能化协同生产,促进煤炭资源的安全绿色开采。

**关键词:**可视化矿山;智能化开采;模拟仿真;大数据;物联网

中图分类号:TD41

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)04-0032-06

### Development status and key technology of visual mine

HE Yanpeng, HUANG Qingxiang, CAO Jian

(1.School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2.Key Laboratory of Western Mine

Exploitation and Hazard Prevention of the Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The construction of visual coal mine is an important part of the intelligent coal mine. Through summarizing the present development of the present visualization of the mine, the paper analyzed the mining simulation visualization several main problems of mine construction, and combined with some advanced technologies such as modern simulation, several intelligent monitoring, big data processing, Internet of Things and Internet + etc. Visualization of mine construction includes four aspects: data visualization, model visualization, scene visualization and immersion (CAVE) visualization. At the same time, the paper put forward a new mining research system based on the construction of visual mines for mining simulation, automation and information construction as the means, a new type of mining research system based on intelligent mining. The paper also designs the overall architecture of the system including device perception layer, network data processing layer, key technology application layer and collaborative management layer. And “a core (visual mine construction as the core), multi-class databases (the databases are the carrier of visualization), a standard platform (multiple information fusion) and a service target (implement collaborative management and decision making)” are proposed. The technical framework is based on the data processing and information presentation of two types and three kinds (document type and relational type; structured, semi-structured and unstructured), and realizes the 4A-type (Anyone, Anytime, Anywhere and Anydevice) multi-terminal associa-

收稿日期:2018-12-02;责任编辑:赵瑞

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674190)

作者简介:贺雁鹏(1991—),男,陕西神木人,博士研究生。E-mail:898476820@qq.com

tion interactive platform. According to the practice of coal mine production, for such problems that the mining operation environment has specialty and complexity, uncertainty of safety hazards, diversity of production data and huge capacity, which the safe production of coal mines. Eight key application technologies for visual mine construction are proposed: three-dimensional simulation model, mine development and mining scheme design, mine wind volume and speed configuration, expert decision-making, dynamic processing, hazard identification and early warning, and establishment of digital integrated operation platform, in order to realize multi-information fusion and intelligent collaborative production of each production link, and promote safe and green mining of coal resources.

**Key words:** visual coal mine; intelligent mining; simulation; big data; internet of things

## 0 引言

我国是煤炭开采和消费大国,近年煤炭产量约达世界总产量的50%,煤炭消费量约占国家能源消费总量的60%<sup>[1]</sup>。目前我国已能够自主设计、研发和生产大型煤矿综采工作面的成套机械设备,采矿理论和技术的发展,促使我国由矿业大国向矿业强国转变。信息化和智能化逐步成为我国采矿技术提升的重要领域,部分矿区已实现少人(无人)化开采。由于煤层赋存和工作面作业环境的特殊性、复杂性和安全隐患的不确定性,数据采集具有多样性,难以直观、有效、及时反映综采和综掘状况;井下传感器数据源复杂、数据量庞大、数据交换的频繁性,导致数据具有异构、冗余、时间序列、高维等特点,使得大数据的收集、处理、可视化的展现和分析存在一定难度,预警系统尚不完善,不同程度的安全事故仍有发生;矿井单机设备智能化程度不一,忽视采场的“支架-围岩”关系,使得设备自动化和信息化利用率较低。因此,信息化和数据可视化是实现智能化开采面临的主要问题<sup>[2-5]</sup>。

基于此,笔者从模拟仿真的可视化矿山建设入手,结合数字化、自动化和信息化的多元化系统,建立了可视化矿山建设和开采系统框架,提出了可视化矿山建设的关键应用技术,丰富了智能化开采技术。

## 1 可视化矿山研究现状

### 1.1 国内外研究现状

模拟仿真是利用模型再现实际系统中发生的本质过程,一种特别有效的矿山开采研究手段。基于物联网收集得到“5V”型的大数据,利用大数据技术达到数据可视化和模型可视化,实现模拟仿真<sup>[2,6]</sup>。而可视化的概念最早由 G Robertson S Card 与 J Mackinlay 在 1989 年 ACM 会议中提出,主要是对高维度、非时空性质的大规模数据分析处理,通过可视化技术生成易于理解、交流、获取洞察的视觉图像<sup>[7]</sup>。澳大利亚和芬兰相继从 1992 年开始制定关

于智能采矿技术的研究方案,对采矿涉及各个方面进行专题研究。陈昌彦等<sup>[8]</sup>研发出边坡工程地质信息三维可视化软件系统;吴立新等<sup>[9-10]</sup>提出数字化矿山,阐明了数字化矿山的内涵及提出了其六大特征;贾明涛等<sup>[11]</sup>研发设计出了矿山动态模拟系统,利用可视化、数字化、信息化、智能化技术,调整回采过程的工序和工艺,取得了良好的经济效益;陈建宏<sup>[12]</sup>等提出关于新世纪采矿 CAD 技术的发展主流方向为可视化、集成化和智能化;过江等<sup>[13]</sup>对矿山核心部位采场的区域智能化采矿方案进行了探究;文献[14-15]提出矿山地质、矿床模型、开采模拟自动控制与决策管理系统的4个数字矿山的建设。文献[16]将计算机仿真技术、空间结构学等结合起来,构建出了矿山虚拟可视化仿真系统,提出了地球地理信息系统在矿山生产中的应用分析。

### 1.2 发展中存在的问题

随着大数据时代的到来,许多国家已经开始对大数据应用研究做出了重大部署,比如:德国“工业4.0”、美国“AMP2.0”、中国制造“2025”战略<sup>[17-19]</sup>的先后提出。国内神东煤炭集团研发了以矿井水源识别为核心的信息系统平台,淮南矿业集团研发了采煤沉陷区地质生态环境信息系统,开滦集团研发的煤矿井下灾变应急通信系统。国外 IBM、Oracle、Google、Amazon、Facebook 等跨国公司是发展大数据处理技术的主要推动者。可视化是引导科学研究的导航仪,笔者提出的可视化矿山的建设,包括数据可视化、模型可视化、场景可视化和沉浸式(CAVE)可视化4个方面,利用仿真模型,结合采矿理论模型,提出预警指标,构建数字化集成操作平台;从矿井设计、回采、生产调度等方面实现矿山可视化开采。目前,可视化矿山建设过程存在以下问题:

1) 现有的三维立体模型均是体现局部的可视化,即局部真实性可视化或示意性可视化,仅是将煤矿开采过程物理性空间的展示或重现,多用于教学示范,不能满足千万吨矿井的实际生产需求。笔者认为要实现矿山可视化建设和智能化开采,应该将数据可视化、模型可视化、场景可视化和沉浸式可视

化,应用于井工开采所研究的三维地质模型、工作面机械设备工况模型及数据处理等系统,还原井工开采的虚拟现实环境的全部流程,在数据可视化的基础上,科学地反馈和指导生产。

2)目前模拟仿真的可视化模型不能根据工种和研究方向,进行不同视角和不同区域特定分析,即实现场景可视化的切换与沉浸式可视化的无限制漫游,仍采用摄像头来达到可视化的目的。沉浸式可视化在煤矿中的应用前景极其广泛,可最大限度地还原煤炭开采的全部过程;按照设想的理念,构建虚拟应急通风演练或矿井其他灾害模式下的人员疏散及应急预案的优化。

3)目前的采矿模拟仿真模型只是单一地实现示意性的虚拟仿真,并未最大限度地体现出现实仿真(现实仿真是指:科学化的体现仿真模型本身的物理与力学结构特性、几何尺寸等),使得模型的真实化水平较低;现有的智能化矿井的模拟仿真,不能将作业环境温度、人员体感温度、风量风速、瓦斯浓度、强矿压位置等在模型中实现直观展现,仍是采用数据、图表等传统单一的展现方式,未能实现模拟仿真的人机交互式可视化。

4)随着煤炭在浅部和深部开采,煤岩体会出现不同的动力灾害<sup>[1]</sup>,智能化设备只能提供探测、监

测技术,对于特定的赋存条件围岩结构和来压机理的智能分析判断,还缺乏专家系统支持。此外,现有智能化矿井的数据采集、动态处理系统和手段较为落后,忽略大数据的潜在能力,不能够对现有的数据深度挖掘;设备智能化缺乏科学化的引导,数据间的传输和处理兼容性有待提高,影响了数据处理和反馈,数据可视化展现方式单一,且数据计算和可视化模型的深度结合需要进一步加强。

针对目前模拟仿真的可视化矿山建设与智能化开采的研究成果及不足,在煤矿开采的大数据基础上,利用物联网、数据可视化,结合模拟仿真,以经济化、精细化、信息化管理,立体化、多层次、全方位地加快智慧矿山的建设进程。

## 2 可视化矿山建设内容的主体

可视化矿山建设是在大数据分析基础上,运用仿真模拟、智能化、现代互联网技术、信息化等手段对煤矿开采、信息化管理、协同决策等实现有组织的、有体系的可视化建设、信息化管理和服务,以满足现代采矿的管理需求。模拟仿真的可视化矿山研究的基本框架如图1所示,主体包括以下4个方面。

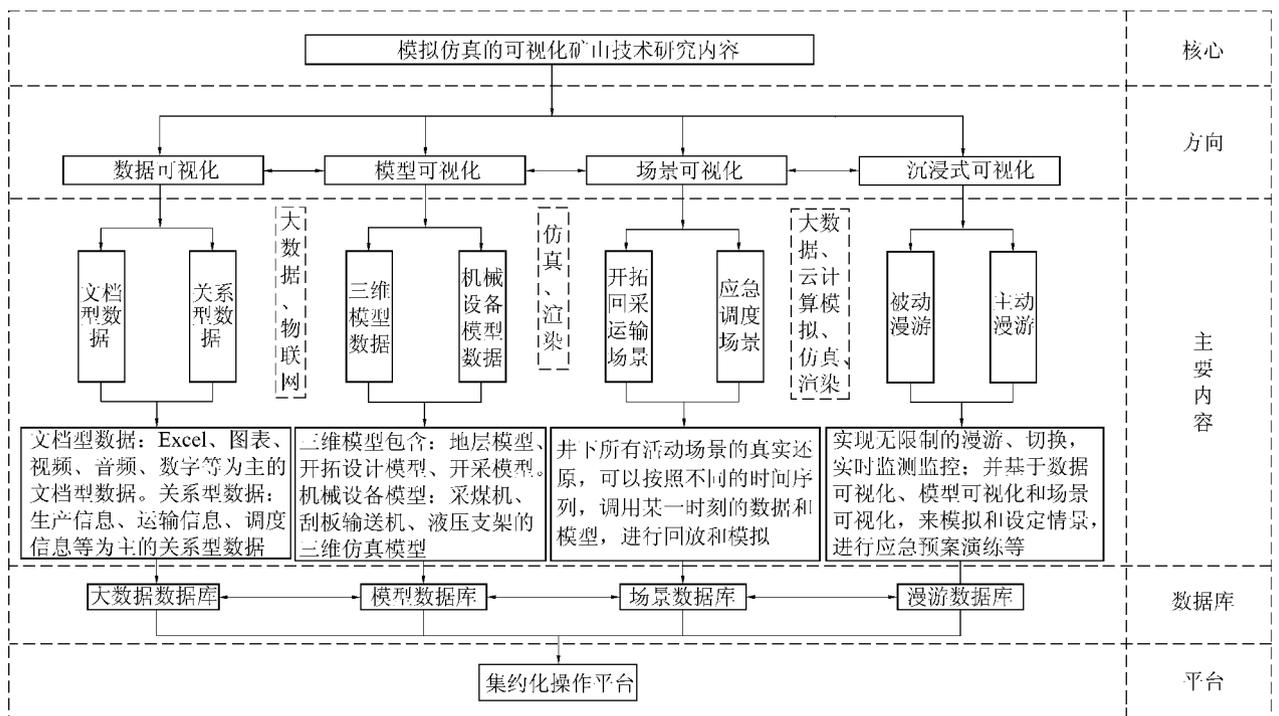


图1 可视化矿山建设的基本框架

Fig.1 Basic framework of visualization mine construction

1)一个核心:以可视化矿山建设为核心,以数据可视化为基础,在物联网、大数据和云计算等先进

技术手段背景下,结合模拟仿真实现矿井相关的三维立体模型的展现,即实现模型可视化;基于真实性

三维可视化模型的建立,通过粒子流渲染、重点区域颜色划分、云计算等方式,尽可能地模拟实际开采的场景,从模型可视化实现场景可视化;最后达到沉浸式可视化,将物体和场景由数据组合展现出来,实现无限制漫游、场景还原和模拟。

2) 多类数据库:对矿井设计到开采各个环节的数据进行采集,形成多类数据库,包括矿井基本信息数据库、钻孔数据库、煤岩体物理力学参数数据库等。数据可视化是可视化矿山建设的根基,多类数据库是数据可视化的核心与载体,数据的分类、存储、转移和利用也是关键。

3) 一个标准平台:打破信息孤岛,将各地域、各类别的开采信息软件统合在一个标准平台,配合集团领导监管和分配任务,服务广大工程技术人员,连接不同工种、不同级别的技术人员,实现矿区共同管理。

4) 一个服务目标:积累、总结现有可视化矿山建设的经验,分门别类、取长补短、优化组合。实现采矿过程的实时控制、实时管理和实时处理,提升智能化管理水平。

根据目前可视化矿山建设存在的不足,从数据资源、信息展现形式和管理内容3个方面进行分析,构建合理的技术框架。

数据资源采集与处理:数据可视化是矿山可视化建设的基础。通过对矿山现有数据的分析,数据主要分为2类3种,一类是以 excel、视频、音频、图片等为主的文档型数据,另一类是生产信息、运输信息和调控信息为主的关系型数据;结构化、半结构化和非结构化3种数据。数据库应该兼顾2类3种数据的交叉管理,同时考虑到系统的数据量大、类型复杂、响应实时等特点,应参照大数据分析技术模式对数据进行处理。

信息展现形式:以用户为中心,以业务为目标,以服务为宗旨,实现可视化模型与大数据深度挖掘相互统一。有效组织与充分利用各种资源,依据终端设备,将正确的信息置于正确的时间、场合和设备之上,根据情境推送合适的内容。

管理内容主要分为煤矿开采管理、公共信息和应急管理3个部分。由于人员与位置分布的离散性和区域性、应急事件的偶发性等特性,本系统拟打造一个4A情境式多终端关联互动平台,使任何工程技术人员(Anyone)、在任何时间(Anytime)、任何地点(Anywhere)通过任何终端(Anydevice)都可以接收到平台发送的消息,提高管理平台的广泛性和时效性。

### 3 可视化矿山建设的关键技术

可视化矿山建设是结合现代仿真、多场智能监测监控、大数据、物联网与“互联网+”等先进技术手段来实现智能采矿。基于物联网的数据传输与数据可视化,模拟仿真模型和场景构建采用的技术是:将每一个子单元或结构事先定义为块模型;利用 GIS、GPS、3DModel 技术将矿井的空间数据存储、计算与管理;通过命令栏赋参实现模型的组建;最终将微观数据宏观展现;通过渲染和添加粒子流等方式,将煤矿开采的固液气不同的形态都呈现出来,实现模拟仿真的可视化矿山模型。构建的主要内容及目标如图2所示,拟解决矿井开采主要涉及的8大关键应用技术。

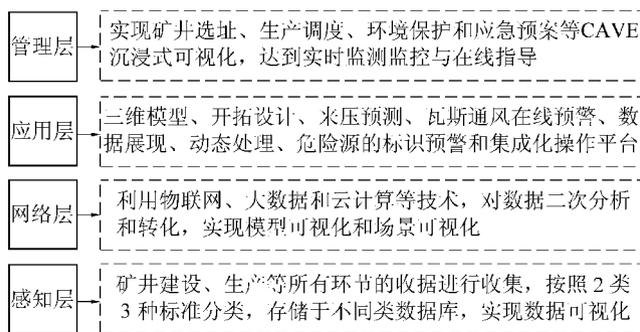


图2 可视化矿山建设的内容

Fig.2 Construction content of visualization mine

1) 三维立体矿井仿真模型。三维立体矿井仿真模型的构建,是实现模拟仿真可视化矿山与科学采矿的基础。根据矿区地质地形数据库的勘探资料,模拟矿区的地形地貌,建立真实三维可视化地层仿真模型,建立可视化的矿井及采掘工作面,描述开采的时序动态仿真模拟过程;将所需要的各个部分,事先在计算机定义为块体结构,通过输入块体结构的三维坐标数据,实现开采模型可视化,开采过程可视化,以及科学化生产。三维立体矿井仿真模型构建包括:通过视角的切换和地点的选择,呈现最佳效果,可以用于科研、教学和专业人员培训等方面。以煤层群开采为例,煤层间距、过煤柱、过空巷等具体位置及尺寸等,当前煤层群开采工作面的位置及开采状况均可以直观展示。

2) 开拓设计方案选择。在矿井三维仿真模型基础上,提供可视化的开拓部署编辑程序,利用定义的模块,通过参数设定实现可视化的矿井开拓,即在三维地层模型中呈现井筒的大小、位置等基本信息。借助 GR、GIS 等先进的地测手段,形成地测数据库,提高地测和开拓设计的精确度。同时,根据矿井地质报告、钻孔资料,设计规范及相关标准,进行科学

化的开拓方案设计,井巷工程的部署,在设计过程中实时对比相关规程,当不符合规范时推送比对方案,对设计中各项经济技术指标,实时进行方案对比。通过矿井仿真,矿井的区域构建、整体规划、开拓方案等可视化呈现,为决策者提供经济化和科学化的矿区构建和煤炭开采决策指标。

3) 开采方案的设计。工作面合理的开采顺序、接替顺序和采掘部署,在开采过程中都需要不断规划和调整,在千万吨现代化矿井显得至关重要。合理的采掘接替可以有效地提高资源回收率和搬家效率,保障日产量的稳定性。在模拟仿真的矿井可视化模型中,可以通过定量化的计算和成图直观分析,可视化地展现当前的生产进度,并对于调整方案予以推送,满足生产的精细化管理需要。此外,可以通过颜色划分、显示或者隐藏已回采完毕的工作面、正在回采工作面和接续工作面的情况。通过将井工开采的采掘布置动态可视化呈现,为科学化和精细化管理提供依据。

4) 矿井风量风速配置。从矿井通风安全的角度出发,将矿井风量风速通过粒子流的形式展现,通过通风网络图、通风节点、等积孔等标准来调配;可以对现有的通风方案、通风系统和措施进行科学优化,对矿井开拓巷道、回采大巷、工作面巷道及工作面的风量风速进行可视化的调配,保证人员设备的安全。此外,对于特定区域(高瓦斯区域)特殊标识,特殊分析,实时监测。可在通风困难时期、采空区着火或工作面着火后,通过粒子流的模拟来实现火灾的蔓延趋势,根据智能探测器的预警,判定着火点的位置,实时推送风压风量的调控及救灾线路,为人员设备的安全提供保障。同时,将人体外围温度,根据工作服的温度传感器进行反馈,用颜色区分标识。

5) 专家决策系统。借助信息化、自动化、模拟仿真等手段不断提升矿井智能化水平,但在开采过程中遇到技术问题时仍需要专家立项研究。因此,建立专家决策系统,对矿山开采所有环节涉及的不同研究领域,依据层次分析法对可能的影响因素进行权重划分。以矿业工程为例,将当前工作面实际开采的参数,如埋深、采高、倾角、支架工作阻力、来压步距等综合影响因素按照权重高低,对主要因素在已有数据库中检索,系统综合推送适配度最高的解决方案,以及时指导工作面的安全生产。

6) 动态处理系统。动态处理系统分为大数据处理系统和调配系统。大数据处理系统是对生产时间内产生的所有数据的收集、分析和处理,利用大数

据的理念和计算方法,提高三维建模、矿压预测、支护设计和应急等数据的准确度;通过数据网格化和数据融合等方法,可以实现数据的情境式管理,提高数据推送的准确性和高效性。不断提高可视化矿山建设的水平;调配系统是针对不同地质构造阶段,液压支架的初撑力自适应匹配;通风阻力的调节和风量的调配;日产煤量和运输能力的调控;割煤阻力与煤体块度的大小,进行支架阻力阈值的反馈。各系统数据的动态调配,科学化地指导日常生产,创造更高的生产效益。

7) 危险源的辨识及预警。煤矿危险源的种类较多,需在特殊矿井的工作面内、巷道及大巷布置先进的监测、监控设备,如红外成像仪、瓦斯粉尘监测仪及通风监测设备等,依据煤矿安全手册的规程设置预警标准,实时监测。矿井高性能多源监测设备的应用,可以监测采场空间的温度场、应力场、电磁场及裂缝场等多场数据,深度挖掘采场多场数据的相关关系。根据各类传感器所收集的实时大数据,通过云计算进行数据处理,调用类数据库资源,对于危险区域重点预警预报。

8) 建立数字化集成操作平台。对于上述数据的收集、储存、处理、推送,综合监控调度,安全隐患预警及对策。根据工种按优先级分级处理和推送适配度最高的危险源预警,通过通信设备,实现预案推送及处理措施,降低事故发生的概率,不断提高我国当前的可视化矿山、智能化矿山建设和科学采矿的进程。数字集成操作平台主要设计原则及技术特性主要包括安全性和可靠性:系统能保证数据安全一致,高度可靠,可提供多种检查和处理手段,保证系统的准确性。针对各层次制定相应的安全策略和可靠性策略保障系统的安全性和可靠性;采用成熟的基于SOA组件化的技术架构,使用XML规范作为信息交互的标准,充分吸收国际厂商的先进经验,并且采用先进、成熟的软硬件支撑平台及相关标准作为系统的基础;系统能够支持硬件、系统软件、应用软件多个层面的可扩展性,能够实现快速开发/重组、参数配置、功能二次开发等多个方面使得系统可以支持未来不断变化的特征。

## 4 结 论

1) 可视化矿山的建设,是以煤矿生产建设所有环节的大数据为背景,以大数据处理、物联网与云计算为技术手段,实现数据可视化、模型可视化、场景可视化和沉浸式(CAVE)可视化。

2) 可视化矿山的建设对煤炭资源的勘探、设

计、开采、销售等所有可控环节可视化、信息化和智能化管理,实现统筹规划、资源共享、绿色创新、协同发展的时代理念。

3) 可视化矿山建设的关键应用技术,可提高煤炭的精准、安全、高效和绿色开采水平,对促进煤炭资源智能化开采具有重要意义和广阔前景。

#### 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 precision coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1):1-7.
- [2] 方 巍, 郑 玉, 徐 江. 大数据: 概念、技术及应用研究综述[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2014, 6(5): 405-419.  
FANG Wei, ZHEN Yu, XU Jiang. Big data: conceptions, key technologies and application[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 6(5):405-419.
- [3] 吴立新, 汪云甲, 丁恩杰, 等. 三论数字矿山—借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 357-364.  
WU Lixin, WANG Yunjia, DING Enjie, et al. Thirdly study on digital mine; serve for mine safety and intellimine with support from IoT[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 357-364.
- [4] 韩建国. 神华智能矿山建设关键技术研发与示范[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3181-3189.  
HAN Jianguo. Key technology research and demonstration of intelligent mines in Shenhua Group[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3181-3189.
- [5] 王金华, 汪有刚, 傅俊皓. 数字矿山关键技术研究及示范[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1323-1331.  
WANG Jinhua, WANG Yougang, FU Junhao. Crucial technology research and demonstration of digital mines [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1323-1331.
- [6] 曾 鸿, 张均东, 何治斌, 等. 船舶轮机模拟器 CAVE 系统设计与关键技术研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(1): 123-127.  
ZENG Hong, ZHANG Jundong, HE Zhibin, et al. Marine engine room simulator CAVE Design and key technologies research [J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(1): 123-127.
- [7] 方毅芳. 煤炭企业安全管理可视化方式研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
- [8] 陈昌彦, 张菊明, 杜永康, 等. 边坡工程地质信息的三维可视化及其在三峡船闸边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 20(4): 1-6.  
CHEN Changyan, ZHANG Juming, DU Yonglian, et al. 3-D visualization of geo information in slope engineering and its application to the permanent ship lock slope in the Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 1-6.
- [9] 吴立新, 殷作如, 邓智毅, 等. 论 21 世纪的矿山: 数字矿山[J]. 煤炭学报, 2000, 25(4): 337-342.

WU Lixin, YIN Zuoru, DENG Zhiyi, et al. Research to the mine in the 21st century: digital mine [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(4): 337-342.

- [10] 吴立新, 殷作如, 钟亚平, 等. 再论数字矿山: 特征、框架与关键技术[J]. 煤炭学报, 2003, 28(1): 1-7.  
WU Lixin, YIN Zuoru, ZHONG Yaping, et al. Restudy on digital mine; characteristics, framework and key technologies [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(1): 1-7.
- [11] 贾明涛, 潘长良, 王李管. 地下矿大规模开采过程动态模拟系统[J]. 煤炭学报, 2003, 28(3): 235-240.  
JIA Mingtao, PAN Changliang, WANG Liguan. The dynamic simulation system of the exploring procedure for underground deposit [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(3): 235-240.
- [12] 陈建宏, 周科平, 古德生. 新世纪采矿 CAD 技术的发展: 可视化、集成化和智能化[J]. 科技导报, 2004, 28(3): 235-240.  
CHEN Jianhong, ZHOU Keping, GU Desheng. Mining CAD technology in the 21 th century: visualization, integration and intelligent [J]. Science and Technology Review, 2004, 28(3): 235-240.
- [13] 过 江, 古德生, 罗周全. 区域智能化采矿方案探究[J]. 金属矿山, 2006, 36(10): 13-16.  
GUO Jiang, GU Desheng, LUO Zhouquan. Tentative study on regional intelligent mining scheme [J]. Metal Mine, 2006, 36(10): 13-16.
- [14] 吴立新, 古德生. 数字矿山技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009: 49-50, 83-84.
- [15] 骆 力. 数字矿山特征及建设探析[J]. 金属矿山, 2009(5): 36-39.  
LUO Li. Discussion on the characteristics and construction of digital mine [J]. Metal Mine, 2009(5): 36-39.
- [16] 徐雪战. 基于三维可视化与虚拟仿真技术的综采工作面生产仿真研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [17] 王 安, 杨 真, 张 农, 等. 矿山工业 4.0 与“互联网+矿业”: 内涵、架构与关键问题[J]. 中国矿业大学学报, 2017(2): 54-60.  
WANG An, YANG Zhen, ZHANG Nong, et al. Connotation, framework and critical issues of mine industry 4.0 and Internet plus mining [J]. Journal of China university Mining & Technology, 2017(2): 54-60.
- [18] 张 申, 丁恩杰, 徐 钊, 等. 物联网与感知矿山专题讲座之二: 感知矿山与数字矿山、矿山综合自动化[J]. 工矿自动化, 2010, 36(11): 129-132.  
ZHANG Shen, DING Enjie, XU Zhao, et al. Part II of lecture of internet of things and sensor mine: sensor mine, digital mine and integrated automation of mine [J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(11): 129-132.
- [19] 马小平, 胡延军, 缪燕子. 物联网、大数据及云计算技术在煤矿安全生产中的应用研究[J]. 工矿自动化, 2014, 40(4): 5-9.  
MA Xiaoping, HU Yanjun, MIAO Yanzi. Application research of technology of Internet of things, big data and cloud computing in coal mine safety production [J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(4): 5-9.