



推荐阅读：

[智能化煤矿分类、分级评价指标体系](#)

[煤矿智能化标准体系框架与建设思路](#)

[煤矿智能化\(初级阶段\)研究与实践](#)

[综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践](#)

[煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望](#)

[智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术](#)

[虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望](#)

[德国工业4.0与中国煤机装备智能制造的发展](#)

[智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向](#)

[智能矿井安全生产大数据集成分析平台及其应用](#)

[基于TOA压缩感知的矿井分布式目标定位方法](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[煤矿井孔钻进技术及发展](#)

[2311m顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术](#)

[我国煤矿区钻进技术装备发展与应用](#)

[煤矿井下人员精确定位方法](#)

[智慧矿山建设架构体系及其关键技术](#)

[矿山工程信息物理系统研究及挑战](#)

[智能化无人开采系列关键技术之——综采智能化工作面调斜控制技术研究](#)



移动扫码阅读

吴群英,蒋林,王国法,等.智慧矿山顶层架构设计及其关键技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7):80-91.doi:10.13199/j.cnki.est.2020.07.007  
WU Qunying, JIANG Lin, WANG Guofa, et al. Top-level architecture design and key technologies of smart mine [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 80-91. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.07.007

## 智慧矿山顶层架构设计及其关键技术

吴群英<sup>1</sup>,蒋林<sup>2</sup>,王国法<sup>3</sup>,叶鸥<sup>2</sup>,蒋泽军<sup>4</sup>,董立红<sup>2</sup>,郭建军<sup>2</sup>,符立梅<sup>2</sup>,史晓楠<sup>2</sup>,习晓<sup>1</sup>,薛忠新<sup>5</sup>

(1.陕西陕煤陕北矿业有限公司,陕西榆林 719000;2.西安科技大学,陕西西安 710054;3.中煤科工开采研究院

有限公司,北京 100013;4.西北工业大学,陕西西安 710072;5.陕西陕煤陕北张家峁矿业公司,陕西神木 719300)

**摘要:**智慧矿山建设目标是在工业互联网技术的基础上,能够完成对矿山“人、机、环”数据进行精准化采集、网络化传输、规范化集成,从而实现可视化展现、自动化操作和智能化服务的矿山智慧体。目前,智慧矿山的建设主要以单一的业务逻辑为基础,较少从数据运营、技术服务和业务逻辑等多方面,深入研究智慧矿山的体系架构问题,难以实现通用性和扩展性较强的智慧矿山建设目标。为解决上述问题,基于已有智慧矿山的基本概念及内涵,在对国内外智慧矿山研究现状分析的基础上,提出智慧矿山的基本内涵及其建设原则,并引入数据标准化、网络协同化、系统一体化和技术智能化的建设理念。提出智慧矿山顶层架构体系及其关键技术。该顶层架构体系主要包括智慧矿山总体架构、业务逻辑架构、技术架构和数据架构4个部分,从总体设计、业务分析、技术实现和数据流转的不同角度,可以较为综合和全面地构建智慧矿山。之后,探讨和研究了智慧矿山顶层架构体系建设过程中涉及到的智能控制技术、通信网络技术、三维可视化技术、空间信息技术、大数据分析与挖掘技术、物联网技术、机器学习理论方法、媒体智能技术等关键智能技术。最后,在总结智慧矿山顶层架构设计及关键技术内容的基础上,指出了未来智慧矿山建设过程中需要解决的一些关键理论问题及系统设计、优化问题,为不断完善智慧矿山顶层架构的设计和智慧矿山的深入发展明确了研究方向和实现目标。

**关键词:**智慧矿山;顶层架构;业务逻辑;技术服务;数据运营;煤矿智能化

**中图分类号:**TD67      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2020)07-0080-12

### Top-level architecture design and key technologies of smart mine

WU Qunying<sup>1</sup>, JIANG Lin<sup>2</sup>, WANG Guofa<sup>3</sup>, YE Ou<sup>2</sup>, JIANG Zejun<sup>4</sup>, DONG Lihong<sup>2</sup>,  
GUO Jianjun<sup>2</sup>, FU Limei<sup>2</sup>, SHI Xiaonan<sup>2</sup>, XI Xiao<sup>1</sup>, XUE Zhongxin<sup>5</sup>

(1. Northern Shaanxi mining Co., Ltd., Yulin 719000, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

3. Coal Mining Research Institute, China Coal Technology Engineering Group, Beijing 100013, China; 4. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 5. Shenmu Zhangjiaomo Mining Co., Ltd., Shenmu 719300, China)

**Abstract:**The goal of intelligent mine construction is to be able to complete the precise collection, network transmission and standardized integration of mine “human, machine and environment” data on the basis of industrial Internet technology, so as to realize the mine intelligence of visual display, automatic operation and intelligent service. At present, the construction of intelligent coal mines is mainly based on a single business logic, less in-depth research on the system architecture of intelligent coal mine from data operations, technical services, business logics and other aspects, so it is difficult to achieve a goal of intelligent coal mine with strong versatility and scalability. In order to address the above issues, the basic connotations and construction principles of intelligent mines were first proposed, based on the concepts, connotations and analysis of the current status of intelligent mine research at home and abroad, and the construction concept of data standardization, network coordination, system integration and technology intelligence were introduced. Secondly, this paper proposed the top-level architecture system of intelligent coal mines and key technologies. The top-level architecture system mainly includes four parts: the overall architecture, the business logic architecture, the technical architecture and the data architecture of intelligent coal mine.

收稿日期:2020-04-12;责任编辑:赵瑞

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61834005);陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2019JLM-11, 2018JQ5095)

作者简介:吴群英(1968—),男,陕西韩城人,正高级工程师,博士研究生,现任陕西陕煤陕北矿业有限公司董事长。E-mail: wuqunying68@

163.com

From different perspectives of overall design, business analysis, technical implementation and data transfer, the approach can build a more integrated and comprehensive intelligent coal mine. After that, this paper discussed and studied the intelligent control technology, communication network technology, three-dimensional visualization technology, spatial information technology, big data analysis and mining technology, Internet of Things technology, machine learning theoretical methods, media intelligent technologies and other key intelligent technologies involved in the construction of the top-level architecture system of intelligent coal mine. Finally, on the basis of summarizing the top-level architecture design and key technical content of intelligent coal mine, this paper pointed out some key theoretical problems, system design and optimization problems that need to be addressed in the future construction process of intelligent coal mine, and clarified the research direction and realization goal for the continuous improvement of the top-level architecture design and the in-depth development of intelligent coal mine.

**Key words:** smart mine; top-level architecture; business logic; technical services; data operation; coal mine intelligence

## 0 引言

长期以来,煤炭作为我国的主体能源,是保障国家经济发展的重要矿产资源。随着我国国民经济由高速增长阶段转向高质量发展阶段,煤炭的需求增速放缓、产能过剩以及煤炭工业结构性调整等问题<sup>[1]</sup>凸显,依靠资源要素投入、规模扩张的粗放式发展已经难以为继,如何在深度“两化融合”的形势下,促进煤矿企业转型升级,加大创新驱动力已经成为煤炭行业新的发展主题<sup>[2-3]</sup>。

近年来,随着信息化技术的快速发展,云计算、大数据、人工智能、物联网、虚拟现实、三维可视化和智能采矿等领域的理论方法和先进技术已经开始逐步应用于煤矿行业,为数字化矿山转向智能化矿山提供了理论支撑和技术支持。将智能化理论方法及相关技术与煤矿行业传统技术装备、管理方式和网络建设等方面相结合,已成为煤炭行业越来越重要的发展趋势和研究热点<sup>[4]</sup>。在此背景下,智慧矿山的概念被广泛提出。通过智慧矿山建设理念,采用智能化理论方法可以提升煤矿企业的信息化和智能化水平,从而为推动传统矿业的可持续发展提供源动力,也可以在日益激烈的国际市场竞争中保持核心的竞争力。

智慧矿山的相关理念最早可追溯到 20 世纪 90 年代美国 IBM 公司提出的“智慧地球”的概念<sup>[5]</sup>。此后,加拿大、英国和澳大利亚等国家也纷纷提出相关的智能采矿技术,并进一步推出了采矿设计、测绘图像等方面的矿用产品化软件工具。例如,2001 年,澳大利亚利用 VRML 和 Java 编程语言实现了采矿数据的四维可视化功能,可以用于煤矿井下瓦斯、水文和矿压等方面数据的可视化展示,有利于煤矿井下的数据分析和数据挖掘。MAPTEK 公司开发了 Vulcan 软件,利用地质统计学方法进行采矿设计和生产。2018 年澳大利亚 Koodaideri 矿启动了“纯智能化矿山”项目<sup>[6]</sup>。此外,英国矿山计算公司开

发了 Datamine 软件系统,可解决地质勘探数据分析和矿山调度等问题。Surpac 公司通过开发三维交互式图形软件系统,可进行地表测量数据和地质勘探数据的分析<sup>[6]</sup>。在理论研究方面,CHEN 等<sup>[7]</sup>提出一种基于非线性规约的动态模型,用于煤矿数据的宏观分析。文献[8]提出一种粗糙集与支持向量机分类器相结合的 RS-SVM 模型,用于煤矿安全的风险预测。近年来,日本、美国和新加坡等国家也在通过开发智能采掘系统等带有智能化的信息系统不断深入智慧煤矿的建设工作。由于国外采矿技术和计算机理论研究的起步较早,在智慧矿山领域的理论研究和技术应用较为领先。

在我国国内,20 世纪末开始智慧煤矿的相关研究。文献[9]提出采用智能化等技术加速从劳动密集型产业转向技术密集型产业的煤矿行业发展之路。此后,孟磊等<sup>[10]</sup>通过开发的智慧煤矿信息平台进行数据融合,并在此基础上提出利用机器学习和数据挖掘的理论方法分析融合的静态和动态信息,进行煤矿井下的突水预警。在文献[11]中,提出利用可视化三维场景仿真和数据编码管理等方法实现煤矿的遥感式无人智能开采和综合智慧通信。文献[12]通过元数据的自动抽取,可实现煤层气的数据管理工作。文献[13]提出构建整合煤矿采、掘、提、运等环节数据的大数据处理,为智慧煤矿建设提供大数据技术的支撑。李树刚等<sup>[34]</sup>将射频识别技术、Zigbee 网络协议和定位系统相结合,通过云数据中心的构建,对煤矿底层数据进行挖掘,为改善煤矿安全提供理论依据<sup>[14]</sup>。文献[15]通过利用大数据、云计算和人工智能等理论方法研究和分析了人员安全感知、姿态监控和防碰撞等煤矿生产中的问题。文献[4]利用信息技术优化物质流、控制流和知识流,构建了复杂的智慧矿山系统。文献[16]结合煤矿信息化与智能化的特点,从通信层、安全生产管理层和决策支持层面构建煤矿智能化的基本框架和建设思路。此外,国内研发的 DIMINE、3DMINE 和 GIS

等采矿设计软件也为推动我国的智慧矿山建设提供了技术支持<sup>[6]</sup>。通过上述研究可知,我国正在借助各种智能化理论方法和技术不断完善智慧矿山的建设。

总的来说,针对智慧矿山建设的研究是一个综合性的研究领域,涉及多学科交叉融合的理论方法,具有较强的理论性和实践性。目前,国内外针对智慧矿山建设的研究还处于起步阶段,并没有对智慧矿山的概念、框架设计和技术方案等具有统一和完整的科学认知。此外,已有研究还存在以下 3 个方面问题:①目前智慧矿山架构设计主要以业务逻辑为基础。然而,由于煤矿企业之间业务的差异性,造成所提架构的通用性和扩展性会受到一定的局限;②已有研究较少从数据运营、技术服务和业务逻辑等多方面,深入研究智慧矿山的体系架构问题,造成单一架构设计难以满足技术和数据等不同维度的设计要求;③已有研究较少考虑以智慧矿山架构设计的标准化为着力点,推动通用一体化的智慧矿山建设问题。

鉴于此,笔者在分析已有智慧矿山建设理论的基础上,通过引入数据标准化、网络协同化、系统一体化和技术智能化的建设理念,探讨和研究智慧矿山的顶层架构设计及其关键技术。

## 1 智慧矿山基本内涵

目前,尽管针对智慧矿山的理解并没有得到统一的认识,但是研究人员已经从不同角度针对智慧矿山进行了深入研究。文献[2]以数字化矿山建设为基础,提出智慧矿山是利用各种信息化技术全面感知煤矿中的事物,并在此基础上实现智能化煤矿安全生产和管理的全过程<sup>[17-18]</sup>。文献[19]从智慧生产系统的角度,提出将多种智能技术进行融合,形成矿山感知、互联、分析、自学习等具有完整智能的矿山系统,可实现智能化煤矿安全生产管理和环境保护的全过程。文献[20]基于现代智慧理念,提出将各种智能化技术与现代煤矿开发技术深入融合,通过自主学习和动态预测等功能实现矿区完整的智慧系统和全面的智能运行。文献[21]将已有的智慧矿山概念进行对比分析,并针对信息孤岛和系统架构不清等问题提出智慧矿山建设的总体技术架构。文献[22]从大数据应用的角度,提出了智能矿山大数据的相关概念。此外,文献[6]从露天矿山生产要素角度考虑,提出智慧露天矿山可通过各种信息化手段实现矿山生产管理的智能感知、记忆、分析和决策评估等功能,最终达到矿山无人化或少人化。

化的绿色开采。

通过上述研究可知,从不同的角度针对智慧矿山具有不同的理解,并且智能化方法是构建智慧矿山的核心要素之一。然而,因多源异构数据造成的信息孤岛问题、因网络协议不兼容造成的通信问题、因多系统叠加造成的功能冗余问题和因不同矿区情况造成智能化方法的泛化问题等是制约智慧矿山建设的重要因素。如果不能解决上述问题,会影响到智慧矿山建设的深入发展和智能化技术的深入应用。为此,在建立智慧矿山时,需要引入数据标准化、网络协同化、系统一体化和技术智能化的综合性建设理念。

1) 数据标准化是智慧矿山建设的基本要求。针对数据冗余、数据孤岛和多源异构数据的分布式存储等问题,只有利用如数据编码、数据纠错和数据清洗等方法进行数据的标准化处理,才能从数据模式层消除冗余或者孤立的数据属性,进而减少甚至消除实例层的数据孤岛问题。

2) 网络协同化是智慧矿山建设的通信保障。由于不同的网络通信协议之间缺乏良好的兼容性,造成实际应用过程中因网络协议的兼容性问题,使得部分设备或技术较难直接应用,不利于数据共享和智能化技术的深入应用。通过将不同网络协议接口进行标准化处理和协同化管理,可实现对外访问的统一网络接口平台,进而减少网络兼容性问题对系统应用层的影响。

3) 系统一体化是智慧矿山建设的实现方式。目前煤矿企业业务系统之间存在兼容性低、功能耦合度高的问题,容易产生因信息系统堆叠造成的功能冗余问题,影响数据访问和存储等功能。此外,已有智慧矿山仍以数据获取为核心架构,而不是以数据利用为核心架构<sup>[18,23]</sup>,因此需要通过系统一体化的建设,加强系统间的兼容性,并减少系统内功能模块的耦合度。

4) 技术智能化是智慧矿山建设的核心要素。智慧矿山建设必须借助机器学习、神经网络等智能化理论方法及相关技术,才能实现业务系统的智能化管理、分析、预测和决策等功能,从而真正从数字矿山转向智慧矿山。

在此基础上,笔者认为智慧矿山是指以煤炭开采的相关领域知识为基础,利用数据标准化、网络协同化、系统一体化和技术智能化的综合性建设理念,借助人工智能、数据科学、物联网等领域的理论方法及技术,通过高度集成化的信息系统,实现矿山生产和管理的智能感知、分析预测和智能决策等功能,最

终达到少人化或无人化的智能化绿色矿山开采。

## 2 智慧矿山建设原则

智慧矿山建设应该按照“总体规划、分布实施、因地制宜、效益优先”的整体要求,遵循前瞻性、先进性、可靠性、实用性和开放性相结合的总体设计原则,实现分布式统一架构的智能化系统体系架构设计模式。具体建设原则如下:

1)标准先行原则。在充分整合已有信息资源的基础上,结合实际煤矿生产和管理的业务需求,通过数据标准化和系统开发流程标准化等标准化建设,实现各信息系统之间的高度集成和数据共享的目的。具体的标准化工作首先需要满足《国家标准化体系建设发展规划(2016—2020年)》和《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》等相关文件提出的要求;其次,基于实际的发展现状,借助前沿的理论方法、先进的科学技术、标准体系的主体架构和管理模式,遵循标准化的主要原则、制定范围、修订期限等程序,从数据运营、技术服务和业务逻辑等方面综合考虑,分别制定数据标准化、接口标准化、通信网络标准化和架构标准化等具体方案;最后,在实践过程中迭代细化和完善标准化建设的具体工作。

2)先进性原则。在满足煤矿企业信息化系统建设的前提下,应利用人工智能和数据科学等领域的最新理论方法和先进技术,不断提高系统的整体智能化水平,并同时能够保障系统运行的可靠性和稳定性。

3)一体化原则。智能矿山建设不仅是各个子系统或专业系统的建设,而是各系统与硬件的高度集成和扩展应用。此外,各子系统建设要满足一体化系统框架设计的要求,尽可能地减少冗余功能模块的开发,最大程度上实现各系统“高内聚、低耦合”的特性,并满足智慧矿山架构的可扩展性。

4)网络协同性原则。针对煤矿企业具有的不同网络,需要利用网络协同组网策略进行网络的综合协同管理。此外,针对不同接口的网络通信协议,需要建立对外访问的统一接口,以便在应用层减少网络通信协议的兼容性问题。

5)分步实施原则。由于智慧矿山是一个综合性很强的多学科交叉领域,也是集管理控制、决策处理和数字虚拟于一体,并与智能化方法高度结合的产物。因此,较难一次实施完成,需要分步对其进行建设。具体需从系统的体系结构设计总体目标出发,把任务逐步向下分解。在具体实施过程中,按照由底向上的原则,先考虑底层的实现,再逐步向中层

与高层推进,这样做信息来源有保证,信息处理有依据。

6)安全性原则。智慧矿山建设中各系统的安全性涉及到煤矿设备安全、网络安全和软件应用安全等多方面内容。煤矿井下使用的相关设备必须要符合《煤矿安全规程》的要求,达到本质安全或防爆安全要求;通用型网络和软件产品必须配备完善的安全保密措施,以保证系统安全稳定地运行。

## 3 智慧矿山顶层架构设计

笔者以上述数据标准化、网络协同化、系统一体化和技术智能化的综合性智慧矿山建设理念为指导,以前瞻性、先进性、可靠性、实用性和开放性相结合的总体设计为原则,从数据运营、技术服务和业务逻辑等多方面,深入研究智慧矿山的顶层架构建设问题,并分别提出智慧矿山的总体架构、业务逻辑架构、数据架构和技术架构,如图1—图4所示,从不同的角度可以较为综合和全面地构建智慧矿山。

如图1所示,智慧矿山的总体架构基于云计算架构体系,主要包括基础设施服务层(IaaS, Infrastructure as a Service)、平台服务层(PaaS, Platform as a Service)和软件服务层(SaaS, Software as a Service)。此外,该架构支持大数据分析能力和边缘计算的能力,并且融合“1+4”体系结构,即:1个数据中心和4类业务场景下的软件服务综合体系结构。

在智慧矿山的总体架构中,基础设施服务层主要针对数据中心、调度中心、网络中心等其他部门,提供与大数据分析、信息安全和边缘计算相关的网络资源、计算资源、存储资源及其他硬件设备资源,并可实现上述资源的智能部署、管理和运维等相关服务。

平台服务层主要由业务中台、数据中台和技术中台3个部分组成。其中,技术中台主要包含与智慧矿山建设相关的底层技术平台,例如可视化应用平台、物联网应用平台、针对不同智能化服务需要的算法模型平台和与智慧矿山其他应用相关的支撑平台,可以起到技术支撑的作用;在数据中台中,主要针对智慧矿山建设中涉及到的主数据、基础数据、多媒体数据、元数据和大数据等不同类型数据,进行与各系统业务逻辑相关的数据操作和管理;在业务中台中,主要围绕档案中心、项目中心和人员中心等服务中心,进行业务逻辑的统一管理,并提供与业务逻辑相关的边缘计算能力,包括设备接入、协议解析和边缘数据处理能力等。

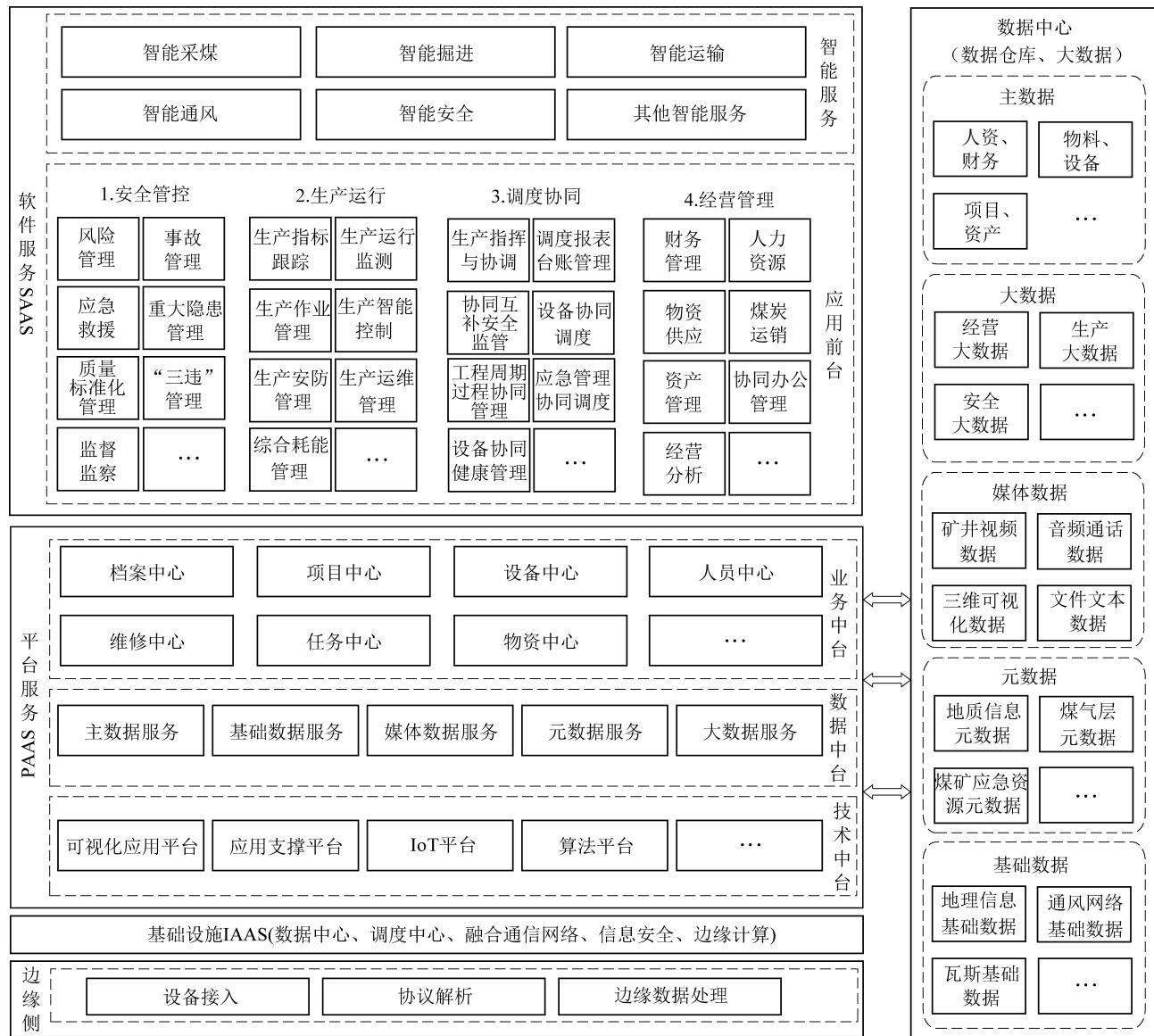


图 1 智慧矿山总体架构

Fig.1 Overall architecture of smart mine

软件服务层主要实现智慧矿山的应用服务功能。其中,在应用前台,主要实现煤矿企业中4类业务场景下(安全管控、生产运行、调度协同和经营管理)不同软件系统的功能模块,并以统一接口的形式对不同具体功能模块进行封装和管理。此外,该部分功能模块和接口设计可满足系统一体化和技术智能化的服务方式。在此基础上,通过对外统一的软件服务接口,针对具体不同的业务场景和应用需求,可提供智能采煤、智能挖掘、智能安全和智能通风等智能化软件服务,最终实现智慧矿山的深入应用。

此外,由于传统数据和大数据在数据存储、数据访问和数据读写等方面具有明显的差异性,因此在数据中心,分别针对不同类型的传统规模数据和大

数据,进行数据存储、访问、读写和保护等与数据管理、数据运营和数据维护相关的具体服务。

上述智慧矿山总体架构是一种粗粒度的体系架构,较难细粒度地描述智慧矿山建设中业务逻辑关系等信息。为此,笔者在智慧矿山总体架构的基础上,通过业务场景的划分,建立智慧矿山的业务逻辑架构,如图2所示。智慧矿山的业务逻辑架构主要描述的是智慧矿山不同业务场景下各信息化系统之间的业务逻辑关系。

由图2可见,该架构以云计算和大数据平台为基础,通过实现一体化的综合管控业务功能,以便减少因系统互操作、标准化不健全和缺乏统一的标准平台等因素引起的数据孤岛和信息烟囱问题,最终实现智慧矿山的智能化管控服务。具体在生产运

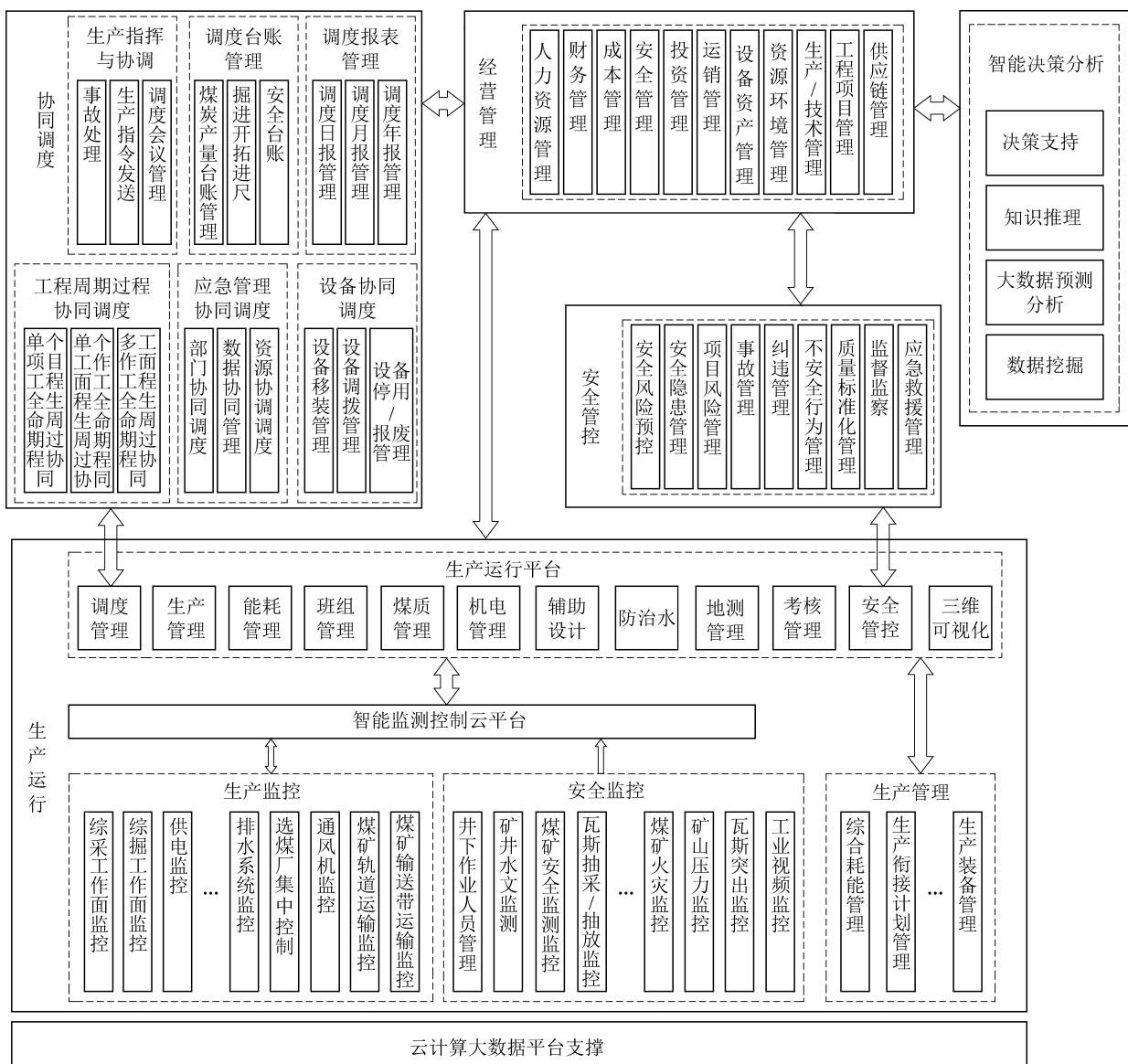


图2 智慧矿山的业务逻辑架构

Fig.2 Business logic architecture of smart mine

行业务场景下,主要涵盖2类信息化系统平台:智能监测控制云平台和生产管理系统平台。其中,智能监测控制云平台主要包括生产监控系统和安全监控系统。前者侧重于监测监控煤炭生产的全过程,主要包括综采工作面监控系统、煤矿输送带运输监控系统、综掘工作面监控系统等;后者侧重于监测监控有关煤矿生产的安全信息,主要包括井下水文监测系统、煤矿火灾监控系统和瓦斯突出监控系统等。生产管理系统平台涵盖与生产和安全监控相关的管理类信息系统,主要包括综合耗能管理系统、生产衔接计划管理系统和生产装备管理系统等。在此基础上,通过建立综合性的生产运行平台可以实现生产管理、机电管理和地测管理等方面有关生产运行的具体业务。

为了能够协同调度生产运行过程中的各种资

源,保障煤矿安全生产的顺利进行,需要建立协同调度业务场景下的各类信息化系统平台,主要包括生产指挥与协调系统平台、调度台账管理信息系统平台、调度报表管理信息系统平台、工程周期过程协调调度系统平台、应急管理协调调度系统平台和设备协调调度系统平台等。通过实现上述不同方面的业务功能,可以实现生产运行过程中各类资源和安全应急等方面的协调调度与管理。

此外,在安全管控业务场景下,通过安全风险预控系统、安全隐患管理系统、事故管理系统和纠违管理系统等有关应急救援和安全质量管理方面的信息化系统,可实现煤矿生产的安全管控。

最后,在经营管理业务场景中,主要通过人力资源管理系统、财务系统、成本管理系统和设备资产管

理系统等可实现煤矿企业的资源管理和商业运营等相关业务。其中,需要借助智能决策分析模型实现系统的决策支持、知识推理、大数据分析及数据挖掘等智能化功能,最终实现智慧矿山建设中各种业务的智能化管控。

为了能够实现上述智慧矿山的业务逻辑,需要进一步明确智慧矿山建设的技术需求,并在此基础上,组织和构建智慧矿山的技术架构。为此,在已有智慧矿山总体架构和业务逻辑架构的基础上,建立了智慧矿山的技术架构,如图3所示。

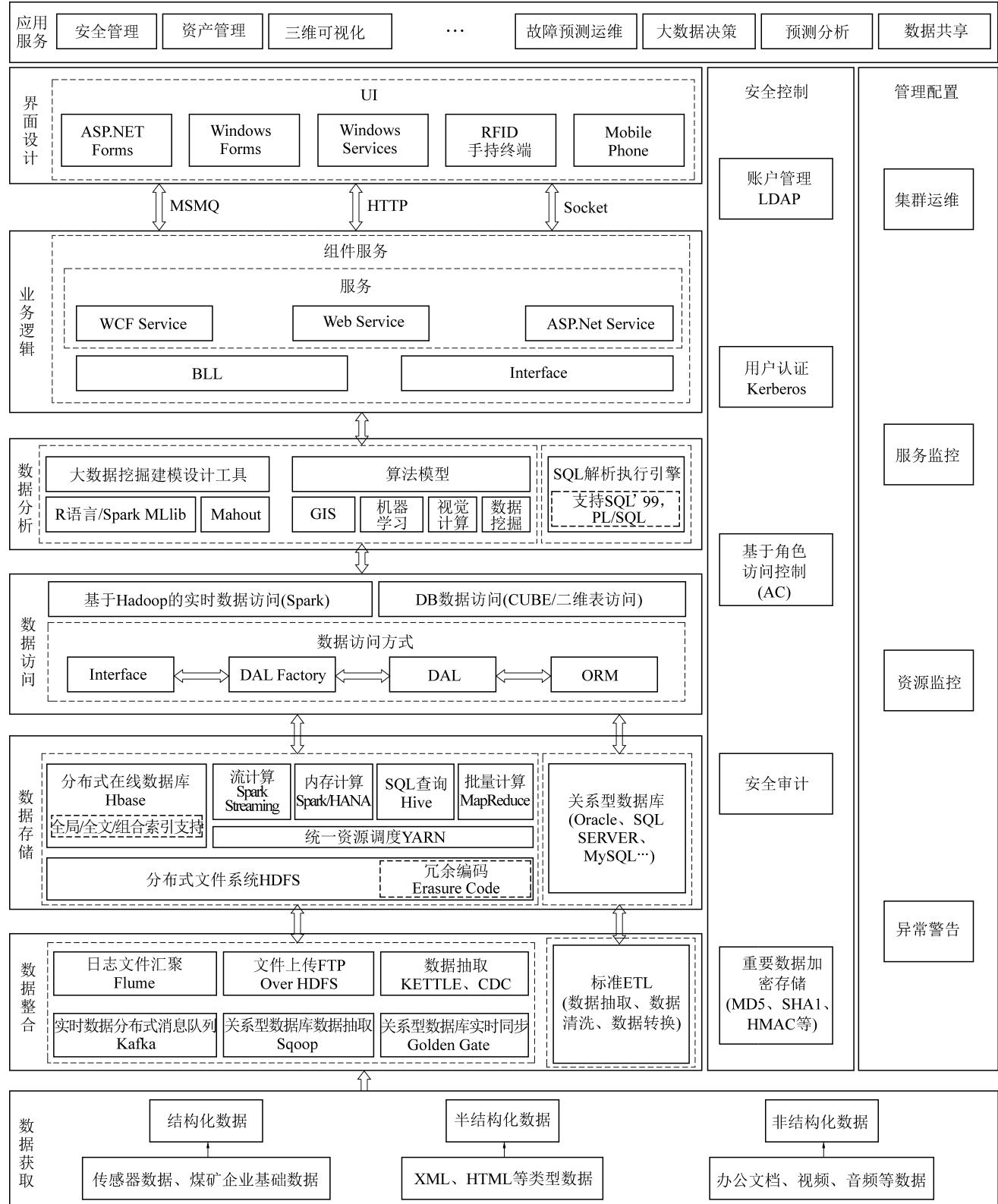


图3 智慧矿山的技术架构

Fig.3 Technical architecture of smart mine

该技术架构主要包括 7 个部分:数据获取层、数据整合层、数据存储层、数据访问层、数据分析层、业务逻辑层和应用表示层。此外,还包括安全控制和管理配置等相关技术。

1)由图 3 可见,数据获取层主要负责从传感器等设备或者其他输入端获取多源异构的数据。这些数据类型不同,可分为结构化数据、半结构化数据和非结构化数据。其中,结构化数据主要包括传感器获取的数值数据和煤矿企业信息化系统中的关系型基础数据。半结构化数据主要包括 XML 文件数据、HTML 脚本文件数据等其他相关的具有层次结构或者树形结构类型的非关系型数据。非结构化数据主要包括煤矿企业的办公文件数据、监控视频数据、语音通话数据等多媒体类型数据。

2)数据整合层主要负责对获取的多源异构数据进行数据标准化和数据清洗等预处理操作。由于传统规模数据与大数据无论在存储方式、数据规模或是数据管理等方面具有差异性,可将数据整合层主要分为大数据的数据整合和传统规模数据的数据整合 2 个部分。在大数据的数据整合过程中,需要利用 Flume 服务实现大数据日志文件的汇聚,利用 Over HDFS 文件系统管理 FTP 的文件上传,通过融合 KETTLE 和 CDC 技术服务,实现非结构化大数据的数据抽取和数据清洗过程,借助 Kafka 服务可完成实时数据的消息队列管理。此外,通过 Sqoop 和 Golden Gate 等技术服务可实现关系型大数据的抽取与同步实时处理等功能。针对传统规模数据,主要利用标准化 ETL (Extract–Transform–Load) 技术可实现数据抽取、数据清洗和数据转换,完成数据整合的工作。

3)在数据存储层,针对大数据的存储问题,主要利用 HDFS 分布式文件系统和 NoSQL 等分布式数据库进行大数据的分布式存储和统一管理,并通过 YARN 服务进行统一的资源调度。此外,通过 Spark Streaming、HANA 等技术服务可支持大数据的计算。针对大数据的检索、挖掘和分析,需要借助 Hive 和 MapReduce 和 Erasure Code 等的技术支撑。对于传统规模数据,可通过关系型数据库(例如 Oracle 和 SQL SERVER 等)进行数据的存储。

4)在数据访问层,主要负责对存储的数据进行读写访问等相关具体操作。对于大数据的访问需要基于 Hadoop 或者 Spark 分布式系统平台,可实现实时数据或者非实时数据的读写访问。对于传统关系型数据,主要利用关系型二维表或者 Cube 数据立方体的形式实现数据的读写访问。具体的访问方式主要包括 Interface 服务接口访问、DAL Factory 工厂模

式访问、DAL 基本增加、删除、修改和查询访问和 ORM 对象关系映射访问。

5)在数据分析层,主要负责数据的进一步挖掘和分析工作。具体包括 3 个部分内容:大数据挖掘与分析建模平台、算法模型服务平台和 SQL 解析执行引擎平台。在大数据挖掘与分析建模平台中,主要利用 Spark 的大数据机器学习 MLlib 库和 Hadoop 的 Mahout 大数据机器学习库,实现实时大数据和非实时大数据的数据挖掘功能。在算法模型服务平台,主要利用传统机器学习算法模型、视觉计算算法模型、数据挖掘算法模型和 GIS 空间信息技术等算法模型,实现煤矿传统规模数据的挖掘与分析。此外,通过支持 SQL' 99 和 PL/SQL 等执行引擎机制可实现 SQL 数据的解析。

6)在业务逻辑层,针对煤矿企业不同系统的业务逻辑实现问题,以 BLL 动态链接库和 Interface 服务接口为基础,利用 WCF Service、Web Service 和 ASP.NET Service 不同类型的服务方式,将各系统之间相对独立的业务逻辑以 Web 服务的形式进行封装和统一管理,并以组件服务的形式部署和运行具有不同功能的软件服务,由此可实现系统一体化管理和服务的机制。

7)在应用表示层主要通过 MSMQ 消息队列管理、HTTP 脚本技术和 Socket 协议机制,利用 Web 端或移动端等终端的界面展示具体的应用服务。其中,针对用户界面设计的主要技术包括 ASP.NET 表单、Windows 表单、Windows 服务及其他终端设备相关技术。由此,可向用户提供安全管理、三维可视化、大数据决策和预测分析等应用服务,实现智慧矿山的软件智能服务。

8)此外,智慧矿山建设需要考虑安全控制和管理配置等问题。为此,可利用账户管理 LDAP、用户认证 Kerberos、角色访问(AC)、安全审计和 MD5 加密等技术手段实现智慧矿山系统的安全控制。针对管理配置问题,可通过集群运维技术、服务监控技术、资源监控技术和异常警告技术等方式,实现智慧矿山各系统之间的综合管理配置功能。

在构建业务逻辑架构和技术架构的基础上,为了能够更好地挖掘和利用数据,提供智能化服务,需要改变以数据获取为核心的架构方式,构建以数据利用为核心的智慧矿山数据架构,如图 4 所示。该架构主要包括数据的基础建设、系统运维、数据应用、数据管理和规划与部署 5 个部分。

在数据的基础建设方面,需要借助通信网络传播数据,通过服务器、磁盘和硬盘等硬件设备存储数据,

利用数据库和操作系统等软件访问数据。此外,虚拟

化技术可以有效改善不同设备之间数据整合问题。

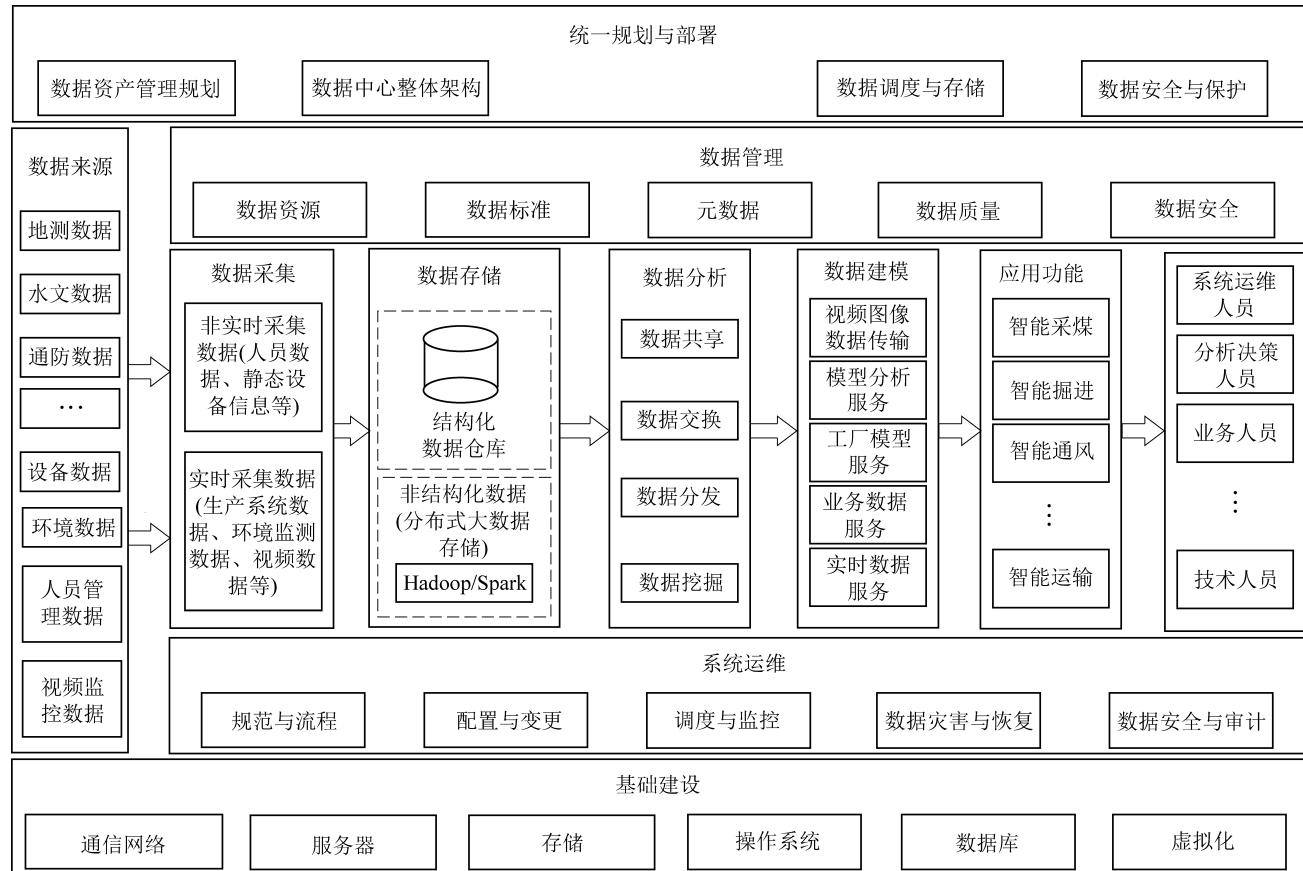


图4 智慧矿山的数据架构

Fig.4 Data architecture of smart mine

在此基础上,通过基础建设所获得的不同数据来源可以作为数据流向的起始点。这些煤矿企业和运营等过程中产生的多源异构数据主要包括地测数据、水文数据、通防数据、环境数据和人员管理数据等业务数据。按照数据规模分类,可以将上述数据划分为传统规模数据和大数据。

在获得数据来源的基础上,需要经过数据采集、数据存储、数据分析和数据建模等阶段对数据进行处理和应用。其中,在数据采集阶段可将数据分为实时数据采集和非实时数据采集2类。实时采集的数据主要包括生产系统数据、视频数据、井下环境监测数据和人员定位数据等。非实时采集的数据主要包括基本工作人员信息数据、静态设备信息数据等。在此基础上,根据数据的结构化,可将结构化数据和半结构化数据存储在数据仓库或者关系型数据库中,而将非结构化数据保存在分布式数据库中,可通过Hadoop和Spark平台进行大数据访问。在数据存储的基础上,可通过数据分析阶段进行数据的进一步挖掘和处理。其中,常见的数据处理方式包括数据共享、数据分发、数据交换和数据挖掘。利用数据分析的方法可以针对不同的应用需求进行数据建

模,并以软件服务的形式对建模方法进行封装。常见的数据建模及服务内容包括视频图像数据传输、模型分析服务、工厂模型服务、业务数据服务和实时数据服务等。通过上述不同类型的软件服务,利用接口可以实现智能采煤、智能掘进、智能通风和智能运输等智能化应用功能,服务于系统运维人员、业务人员和行政人员等具有不同角色和权限的用户。

除了上述数据应用部分,还需要解决数据管理的问题。针对该问题,需要从数据资源、数据标准、元数据构建、数据质量和数据完全等不同方面,对智慧矿山产生的多源异构数据进行统一的调度和管理,才能保障数据的正常应用。

当出现设备异常、人员操作异常和软件系统异常等问题时,会影响数据的正常流转和智慧矿山的智能化应用。为此,在管理数据的同时,需要对与数据处理相关的信息化系统进行维护。系统运维主要保障信息化系统的正常运行,具体内容涉及到数据操作的规范与流程、数据配置与变更、数据调度与监控、数据灾害与恢复、数据安全与审计等。

在上述基础上,通过建立数据资产管理规划、数据中心整体架构、数据调度与存储策略和数据安全

与保护机制,统一规划和部署智慧矿山的智能化应用系统,实现智慧矿山中数据的深入应用。

## 4 智慧矿山建设中的关键技术

智慧矿山建设是一个综合性的研究领域,涉及多学科交叉融合的理论方法,具有较强的理论性和实践性。目前,针对智慧矿山建设中的关键技术已经进行了深入的研究。笔者在智慧矿山顶层架构设计的基础上,分析并研究了智慧矿山建设中涉及到的一些关键技术,具体如下。

1)智能控制技术。智能控制技术是实现煤矿企业综合自动化管控平台的一类重要技术。目前,该类技术已广泛应用于智能综采工作面、综掘工作面、智能主运输系统等智能控制系统,可有效解决煤炭安全生产过程中设备控制及安全预测等问题。智能控制技术的实现是以 PLC 可编程逻辑控制器和 DCS 控制系统为基础,利用软件完成 I/O 的逻辑控制、PWM(Pulse Width Modulation)数据信号处理和通信的交互,进而通过人工智能理论、最优化理论和控制论等理论模型实现设备的智能控制。由于矿井设备之间存在兼容性等问题,可利用 CAN 总线协议、RS485、RS232 现场总线协议、ZigBee 协议等不同的通信协议,实现软硬件系统之间的通信交互。此外,通过调用已有的库函数和开发包含智能化理论的算法模型可实现不同方式的智能化应用。

2)通信网络技术。通信网络技术是实现智慧矿山各个系统之间互联互通的重要技术,可广泛应用于智慧矿山的网络互联、标识解析和应用支撑等方面。目前,无论是基于煤矿企业内部环网网络拓扑结构,或是基于不同煤矿企业层级间的星型网络拓扑结构,都可以通过 WIFI、4G/5G 等通信技术实现各系统之间网络数据的无障碍传输及获取能力。此外,工业互联网标识解析技术主要包括标识注册、协议解析、标识搜索、标识查询、标识认证、报文格式响应和通信协议等内容,可用于数据的高效传递和共享。随着工业互联网和物联网的深入应用,利用 OPC UA TSN 通信技术,可以有效解决语义互操作的问题,实现语义互操作的标准规范,加快 IT 和 OT 深度融合。

3)空间信息技术。空间信息技术已广泛应用于煤矿企业,可以有效解决人员定位、地质测量和工作面管理等问题。以 GIS 系统为例,目前煤矿企业主要以 CAD 矿图作为 GIS 系统的底层图,在此基础上构建矢量化地图,并可实现基于矢量化地图的数据编辑、查询和分析等操作功能。此外,已有的 GIS

系统可以实现空间数据库和关系型数据库之间的数据连接、数据同步和数据融合等功能,使得空间信息可以与关系型数据信息进行交互,由此便可利用空间信息技术实现智慧矿山的数据实时采集、融合分析和智能决策,形成空间信息数据与其他类型信息数据融合统一的信息管理机制,服务于智慧矿山的建设。

4)物联网技术。物联网技术可以利用传感器设备,按照约定的协议,通过互联网实现物与物(人)之间的互联互通。目前,该技术已经在煤矿生产中的信息监控、煤矿供电、安全隐私及感知矿山等方面得到了广泛的应用。物联网感知的关键技术主要包括传感器技术、RFID(Radio Frequency Identification)射频识别技术、二维码技术、ZigBee 技术和蓝牙技术等。其中,传感器技术对于智慧矿山的智能感知起到重要的作用,也对于安全生产起到重要的监测作用;RFID 射频技术和二维码技术可以在设备管理和人员管理等方面起到智能监管的作用;ZigBee 技术已广泛应用于煤矿井下网络数据的传播与通信;蓝牙技术可在物联网感知层解决短距离的数话音/数据接入的无线传输,简化设备与因特网之间的通信,迅速高效地实现数据传输。总体来说,上述物联网技术可有助于智慧矿山的综合监控。

5)大数据分析与挖掘技术。大数据分析与挖掘技术主要涉及分布式协调服务、分布式存储、大数据分析、大数据的数据仓库、分布式日志数据聚合和分布式锁服务等技术服务。以 Hadoop 2.0 大数据处理平台为例,需要采用 HDFS 文件系统进行大数据的分布式存储;通过 MapReduce 技术进行大数据的分布式处理;利用 Flume、Avro、Chukwa 和 Sqoop 进行大数据的传输;借助 Mahout、Giraph、Hama 和 RHadoop 等机器学习库可实现大数据的分析。此外,在大数据处理的过程中,利用 ZooKeeper 技术可提供分布式的协调服务;利用 Apache Hive 数据仓库可实现大数据的数据挖掘;通过 Apache HCatalog 技术服务可实现基于 Hadoop 的数据表存储。总体来说,大数据分析与挖掘技术可实现智慧矿山的智能化数据分析。

6)机器学习理论方法。机器学习理论是人工智能理论的核心,该理论涉及统计学、逼近理论、神经网络、优化理论、类脑科学和系统辨识等内容,可以广泛应用于智慧矿山建设。其中,统计学理论中的贝叶斯模型、马尔可夫模型和逻辑回归模型等方法可用于智慧矿山的基础数据分析;系统辨识理论和逼近理论中的分类预测和决策模型(例如支持向

量机模型、随机森林算法、神经网络模型、决策树算法和近邻聚类算法模型等)可用于智能识别煤矿安全生产中的不安全行为、突水事故等异常事件,也可预测开采沉陷、钻机寿命,并可智能规划逃生路径,提供决策信息;神经网络模型、类脑科学方法和优化理论相结合,可用于煤矿安全形势预测分析、煤矿液压支架的智能控制等智能化分析和控制工作。总体来说,通过利用机器学习理论方法,可以实现智能化的矿山建设。

7)媒体智能技术。目前,在煤矿企业多媒体数据不断涌现,例如文档文件、监控视频数据和语音通话数据。这些数据都属于非结构化数据,并且数据自身蕴含着大量的语义信息。通过智能化挖掘这些多媒体数据的语义信息,可有助于人们深入认知和理解视频、文本和音频的多媒体数据,为智慧矿山的建设提供更加智能化的技术手段。已有多媒体智能技术主要包括人脸检测与识别、行人再识别及分析、不安全行为的视频异常检测、井下运输场景分析,空间影像数据分析、故障诊断发现和文本检索与舆情监测等。针对上述不同类型的多媒体数据,研究人员已经在自然语言处理、视频图像处理、跨媒体检索与语义分析等方面开展了深入地研究。在人工智能领域中的这些重要研究方向所产生的媒体智能技术及理论成果将有助于不断完善和丰富智慧矿山建设的智慧化技术手段。

8)三维可视化技术。三维可视化技术是以数据模拟仿真的方式,显示描述和理解井下诸多地质现象特征和事物特征的一类技术。该类技术利用三维模型构建和模拟仿真方法、视觉渲染方法、视觉标定方法和视觉绘制等方法,可实现虚拟现实和增强现实。三维可视化技术可以应用于矿井三维场景的虚拟仿真、基于虚拟现实技术的岗位培训、基于三维点云场景下的语义分割和多媒体内容理解等方面。总的来说,利用三维可视化技术可以有助于工作人员更加直观和深入地了解煤炭生产工作状况及相关信息,为智慧矿山的建设提供更加丰富的智能化技术手段。

## 5 结论与展望

笔者在已有智慧矿山基本概念和内涵的基础上,引入了以数据标准化、网络协同化、系统一体化和技术智能化为理念的智慧矿山顶层架构设计及其关键技术,具体内容主要包括以下3个方面。

1)提出智慧矿山的基本内涵:基于智慧矿山已有基本概念及内涵,从“数据标准化是智慧矿山建

设的基本要求”、“网络协同化是智慧矿山建设的通信保障”、“系统一体化是智慧矿山建设的实现方式”和“技术智能化是智慧矿山建设的核心要素”4个方面分别阐述了智慧矿山建设需要具备的不同要素,并提出了智慧矿山的基本内涵及建设原则。

2)笔者从数据运营、技术服务和业务逻辑等多方面,深入研究智慧矿山的顶层架构建设问题,并分别提出智慧矿山的总体架构、业务逻辑架构、数据架构和技术架构。总体来说,以智慧矿山总体架构为主,分别从业务逻辑、数据流转和技术实现的不同角度,完善和深化了智慧矿山体系架构的建设工作。

3)以上述智慧矿山顶层架构为基础,总结并提出了智慧矿山建设的一些关键技术,主要包括智能控制技术、通信网络技术、空间信息技术、物联网技术、大数据分析与挖掘技术、机器学习理论方法、媒体智能技术和三维可视化技术。通过将关键技术与煤矿应用场景相结合,分析并指出了这些关键技术的具体功能及应用范围,进而总结了不同关键技术对智慧矿山建设起到的不同作用。

4)目前智慧矿山建设中很多智能化方法仅是应用于煤炭生产管理等环节,该理论方法的泛化性较弱,技术的可扩展性受到一定的局限。因此,如何针对跨学科、跨领域、跨媒体和跨模态的智能化方法研究是智慧矿山建设未来需要研究的重点内容之一,这就需要进一步研究跨媒体和跨模态智能化理论方法及相关技术。

5)尽管针对智慧矿山的架构理论已经进行深入的研究,但是针对智慧矿山顶层架构的设计及优化问题较少有研究成果。因此,如何在已有智慧矿山建设框架的基础上,能够利用最优化理论等方法实现智慧矿山体系架构的优化问题也是未来需要研究的重点问题之一,为此需要将最优化理论与系统控制理论相结合进行进一步研究。

6)由于各煤矿企业和管理具有一定的差异性,已有的标准化建设和管理机制不一定适用于煤炭行业内所有企业,这会给智慧矿山建设带来一定的困难。因此,如何完善标准化建设的普适性是智慧矿山建设需要解决的一个基本问题。为此,需要进一步研究针对大数据预处理和大数据质量的理论方法及相关技术。

### 参考文献(References):

- [1] 陈晓晶,何敏.智慧矿山建设架构体系及其关键技术[J].煤炭科学技术,2018,46(2):208-212,236.  
CHEN Xiaojing, HE Min. Framework system and key technology

- of intelligent mine construction [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2):208–212, 236.
- [2] 罗香玉,李嘉楠,郎丁.智慧矿山基本内涵、核心问题与关键技术[J].工矿自动化,2019,45(9):61–64.  
LUO Xiangyu, LI Jianan, LANG Ding. Basic connotation, core problems and key technologies of wisdom mine [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9):61–64.
- [3] 李梅,杨帅伟,孙振明,等.智慧矿山架构与发展前景研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1):121–128.  
LI Mei, YANG Shuaiwei, SUN Zhenming, et al. Study on framework and development prospects of intelligent mine [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1):121–128.
- [4] 徐静,谭章禄.智慧矿山系统工程与关键技术探讨[J].煤炭科学技术,2014,42(4):79–82.  
XU Jing, TAN Zhanglu. Smart mine system engineering and discussion of its key technology [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(4):79–82.
- [5] 马荣华,黄杏元,蒲英霞.数字地球时代“3S”集成的发展[J].地理科学进展,2001,20(1):89–96.  
MA Ronghua, HUANG Xingyuan, PU Yingxia. Development on the integrating of “3S” in the era of digital earth [J]. Progress in Geography, 2001, 20(1):89–96.
- [6] 张瑞新,毛善君,赵红泽,等.智慧露天矿山建设基本框架及体系设计[J].煤炭科学技术,2019,47(10):1–23.  
ZHANG Ruixin, MAO Shanjun, ZHAO Hongze, et al. Framework and structure design of system construction for intelligent open-pit mine [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47 (10):1–23.
- [7] CHEN J, YANG Y, CAO Q. Analysis and application about coal mine system dynamics model based on non-linear regression [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 675:1473–1478.
- [8] WANG Y, JIANG G. Coal mine safety risk prediction by RS-SVM combined Model [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(2):423–429.
- [9] 李仲学.面向知识经济与可持续发展的矿业观[J].中国矿业,1999,8(6):18–30.  
LI Zhongxue. Outlook on mining facing knowledge-based economy and sustainable development [J]. China Coal, 1999, 8(6):18–30.
- [10] 孟磊,丁恩杰,吴立新.基于矿山物联网的矿井突水感知关键技术研究[J].煤炭学报,2013,38(8):1397–1403.  
MENG Lei, DING Enjie, WU Lixin. Research on key technologies of water inrush perception based on mine IoT [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8):1397–1403.
- [11] 霍中刚,武先利.互联网+智慧矿山发展方向[J].煤炭科学技术,2016,44(7):28–33, 63.  
HUO Zhonggang, WU Xianli. Development tendency of internet plus intelligent mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7):28–33, 63.
- [12] 李梅,邹学森,毛善君.互联网+煤层气元数据管理系统关键技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):80–85.  
LI Mei, ZOU Xuesen, MAO Shanjun. Study on key technology of internet plus coalbed methane metadata management system [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7):80–85.
- [13] 张科利,王建文,曹豪.互联网+煤矿开采大数据技术研究与实践[J].煤炭科学技术,2016,44(7):123–128.  
ZHANG Keli, WANG Jianwen, CAO Hao. Study and practice on big data technology of Internet plus coal mining [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7):123–128.
- [14] 李树刚,马莉,杨守国.互联网+煤矿安全信息化关键技术及应用构架[J].煤炭科学技术,2016,44(7):34–40.  
LI Shugang, MA Li, YANG Shouguo. Key technology and application framework of internet plus mine safety informationization [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7):34–40.
- [15] 王国法,李占平,张金虎.互联网+大采高工作面智能化升级关键技术[J].煤炭科学技术,2016,44(7):15–21.  
WANG Guofa, LI Zhanping, ZHANG Jinhu. Key technology of intelligent upgrading reconstruction of internet plus high cutting coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44 (7):15–21.
- [16] 孙继平.煤矿信息化与智能化要求与关键技术[J].煤炭科学技术,2014,42(9):22–25, 71.  
SUN Jiping. Requirement and key technology on mine informationalization and intelligent technology [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9):22–25, 71.
- [17] 杨韶华,周昕,毕俊蕾.智慧矿山异构数据集成平台设计[J].工矿自动化,2015,41(5):23–26.  
YANG Shaohua, ZHOU Xin, BI Junlei. Design of heterogeneous data integration platform of smart mine [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(5):23–26.
- [18] 张旭平,赵甫胤,孙彦景.基于物联网的智慧矿山安全生产模型研究[J].煤炭工程,2012,44(10):123–125.  
ZHANG Xuping, ZHAO Fuyin, SUN Yanjing. Study on safety production model of intelligent mine base on Internet of Things [J]. Coal Engineering, 2012, 44(10):123–125.
- [19] 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.
- [20] 王国法,赵国瑞,任怀伟,等.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, et al. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1):34–41.
- [21] 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.
- [22] 崔亚仲,白明亮,李波.智能矿山大数据关键技术与发展研究[J].煤炭科学技术,2019,47(3):66–74.  
CUI Yazhong, BAI Mingliang, LI Bo. Key technology and development research on big data of intelligent mine [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3):66–74.