

煤矿智能化重构人与煤空间关系研究

范京道^{1,2,3,4*}, 金智新⁵, 王国法⁶, 李川^{2,4,7}, 刘渭^{4,7}, 闫振国^{3,4}

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司, 西安 710075; 2. 应急管理部煤矿智能化开采技术创新中心, 陕西黄陵 727307;
3. 西安科技大学安全科学与工程学院, 西安 710054; 4. 陕西省煤矿智能化工程研究中心, 西安 710075;
5. 太原理工大学安全与应急管理工程学院, 太原 030024; 6. 中煤科工开采研究院有限公司,
北京 100013; 7. 陕西延长石油矿业有限责任公司, 西安 710075)

摘要: 人与煤的空间关系是煤炭安全高效生产的重要因素, 研究煤矿智能化技术对于人与煤空间秩序的重构过程将为煤炭行业高质量发展提供核心技术支持。本文系统论述了人与煤空间关系的演进历程与研究进展, 论证提出了在煤矿工业化生产中利用空间融合可以突破传统二元空间结构制约的观点, 据此建立了煤矿智能化人-物理-信息(HPC)空间之间虚实互动的三元空间形态; 进一步阐述了煤矿智能化可改变煤矿生产要素的物理空间位置和生产相对运动状态, 将重构新生产力三要素、一体化的智能生产管理、矿工的社会价值发展空间, 从而支持构建万物互联的煤矿生产工业场景并实现人由煤中向人在煤外的重大转变; 剖析了智能化采煤、智能化建井案例, 揭示了煤矿智能化建设对于变革人与煤空间关系的实践价值。研究建议, 以煤矿智能化HPC空间理论为基础, 以人的解放及全面发展为核心目标, 建立新一代技术与现代煤矿相融合的发展模式, 以安全高效、智能绿色发展推动煤炭行业整体升级。

关键词: 煤矿智能化; 空间关系; HPC空间; 虚实融合; 生产力要素

中图分类号: TD67; TD82 **文献标识码:** A

Reconstructing Human–Coal Space Relationship Through Coalmine Intellectualization

Fan Jingdao^{1,2,3,4*}, Jin Zhixin⁵, Wang Guofa⁶, Li Chuan^{2,4,7}, Liu Wei^{4,7}, Yan Zhenguo^{3,4}

(1. Shaanxi Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. Innovation Center of Intelligent Mining Technology in Coal Mine, Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, Huangling 727307, Shanxi, China; 3. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. Shaanxi Engineering Research Center for Intelligent Coal Mine, Xi'an 710075, China; 5. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 6. CCTEG Coal Mining Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 7. Shaanxi Yanchang Petroleum and Mining Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: The human–coal space relationship is significant for the safe and efficient production of coalmines. Reconstructing the human–coal space order using intelligent technologies in coalmines will provide a core technical support for the high-quality development of the coal industry. This study examines the evolution and research progress of the human–coal space relationship and proposes a human–physical–information (HPC) space form to break constraints from the traditional human–physical space structure

收稿日期: 2022-12-03; **修回日期:** 2023-01-28

通讯作者: *范京道, 陕西延长石油(集团)有限责任公司正高级工程师, 研究方向为煤矿智能化技术; E-mail: ycmctx@163.com

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3104200); 中国工程院咨询项目“煤炭工业数字化发展关键技术需求研究”(2022-XZ-28), “双碳目标下能源高质量发展战略与规划研究”(2022-GDZK-08)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

of coalmines. We find that coalmine intellectualization can change the physical locations and relative motions of coalmine production factors; it can reconstruct the three major factors of production, establish an integrated intelligent production management mode, and improve the development space of miners' social values, thereby achieving an interconnection-of-everything production scene and liberating human from underground mining. Moreover, the study analyzes intelligent coal-mining and intelligent well-construction cases and reveals the practical values of coal mine intellectualization for the change of the human-coal space relationship. We suggest that a development mode integrating new-generation technologies and modern coalmines should be established based on the intelligent HPC space theory of coalmines and by targeting human liberation and comprehensive development. This will promote the safe, efficient, intelligent, and green development and thus the overall upgrading of the coal industry.

Keywords: coalmine intellectualization; spatial relationship; human-physical-information space; virtual-real fusion; production factors

一、前言

空间在不同时期都受到学者们的高度关注，有关空间的研究也是随着生产力和科技进步而发展的^[1-5]。空间理论在学理上的逐步发展，为当前处理人与社会、人与自然的关系确立了基础^[6]。随着自然科学和社会科学的发展，研究者将社会生产的需求同自然空间的物质属性统一起来，建立了基于人-物理二元空间的生产力和生产关系；传统煤炭工业产业的开发，正是基于此结构建立的。煤炭是人类社会生存发展的能源资源和原料，但复杂危险的生产过程受限于传统二元空间关系的制约，即人始终处于煤中，导致产能优化“下井苦”、增量提升“入地难”等问题一直得不到根本性解决。

在当今世界，空间是容纳各种生产力和生产关系的场所，物理、社会、信息层面的生产和生活秩序可在其中实现关联互动。新一代信息技术为煤炭行业创新发展提供了契机，驱动人工智能（AI）、工业物联网、云计算、大数据、机器人、智能装备等与现代煤炭开发利用的深度融合^[7-9]，推动煤炭行业数字化转型并提升智能生产水平，进而支撑煤炭行业高质量发展。

本文主要阐述人与煤空间关系的演进历程及研究进展，分析煤矿复杂危险的生产过程在突破传统二元空间关系方面的迫切性，提出煤矿智能化建设所需，具有广泛连接、虚实结合、数据驱动、动态协同特征的“人-信息-煤”三元空间形态理念。新的空间形态能够重构煤矿生产的物理空间、人类社会空间及信息空间，为新一代智能化煤矿建设确立理论基础，也可据此深化智能化煤矿理论体系和技术路径研究，探讨智能化采煤、智能煤矿建设、智能化建井应用模式；力求根本性化解产能优化“下井苦”、增量提升“入地难”等问题，促进人由煤中向人在煤外的重大转变。

二、人与煤空间关系的演进历程及研究进展

（一）人与煤空间关系的演进历程

煤矿开采是人类社会为了扩大发展空间，从地表向地下深处不断获取资源的工业生产活动。我国煤炭开发和使用历史悠久，煤矿开采技术发展经历了人工、炮采、普采、综采、智能化开采等发展阶段^[10,11]；整个历程表现为物理空间、人类社会及信息空间的逐步融合演进，可分为3个主要阶段。

原始采煤时代。在古代，开发煤炭依靠人工作业，对煤所处的煤岩空间进行朴素的利用和改造。劳动者依靠手工、简易工具，在地表或地下煤岩体中构筑简单工程来开辟作业空间，处于缺乏安全技术、工程弱安全管理的作业模式；相应采煤技术从独立原始人力工具向畜力、自然力专业工具演进^[12,13]。该阶段处于经验性、描述性的二元空间秩序（见图1）。

工业化时代。煤炭开采经历了从人工到炮采、普采、综采的技术变革^[14]，利用现代工具在地下岩体中构筑了相对复杂、较为安全的井巷空间。安全技术装备与工程受三次工业革命驱动而不断进步，煤炭生产实现了强安全管理的作业模式，煤矿在计算机技术辅助下逐步实现了矿井生产的信息化。该阶段处于利用知识进行预测（定性定量结合）的二元空间秩序。

智能化时代。在第五代移动通信（5G）、物联网、AI等信息技术变革工业模式的背景下，智能化开采、智能化建井、智能化煤矿建设在多个方向取得突破，推动煤矿迈向系统智能化甚至达到智能系统化。煤炭生产由原先的二元空间转入了融合信息空间的三元结构新阶段，表现为基于地质透明化、现场数据持续反馈/迭代的自主决策型三元空间生产秩序。

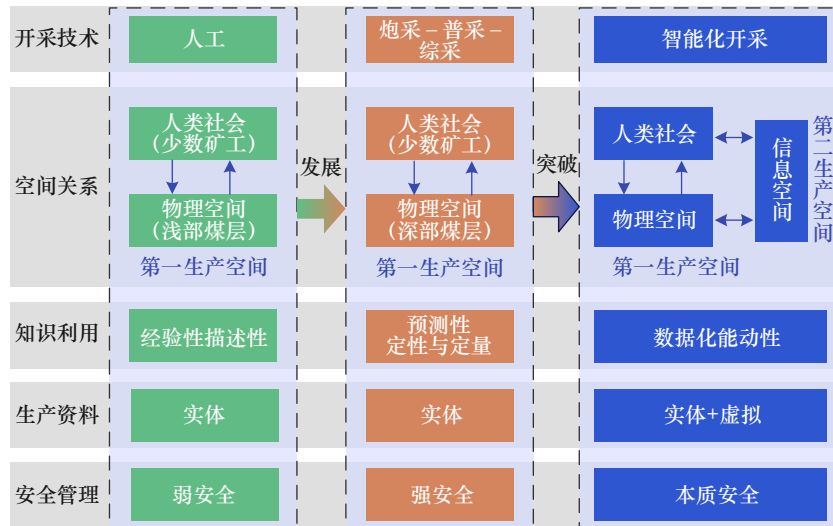


图1 煤矿开采空间发展历程

(二) 人与煤二元空间关系的制约

煤炭在我国主体能源中发挥着“稳定器”“压舱石”作用，如2021年原煤产量为 4.13×10^9 t，在能源消费总量中的占比为56%^[15]。然而自近代以来，煤炭工业长期粗放式发展，生产过程中人处于煤中、处于物理和信息空间的“孤岛”；煤矿安全事故频发、作业环境恶劣，从业者社会地位低、人才流失严重，对生态环境的破坏效应加剧。这是由煤炭生产模式的二元结构秩序所导致的。

二元空间结构的属性决定了人与煤之间的生产关系以实体-实体的方式构建。在知识层面，仅是通过对现象、过程的经验性描述以及现场数据分析，提出对应的矿井建设与生产方案、决策及措施，进而完善“采-掘-机-运-通”等生产系统^[7,14]，导致相关的工业生产运行机制具有缺陷与欠完备性，难以从根本上进行安全、高效、绿色生产。煤矿地下空间的复杂性和不确定性，决定了开采必须依赖人主动建构技术工程的秩序关系，将“自然空间”改变为“人化的自然空间”^[2]。为了追求快速获取资源，大量矿工直接处于煤层中的第一生产空间（见图1），“脏累苦险”“傻大黑粗”成为矿工的写照，人的社会价值发展空间严重不足，具体表现在：在现实世界中，难以快速在地下开辟安全第一生产空间；在生产的运动状态上，开采的危险性、环境的复杂性都决定了矿工随煤层的自然延伸和开采的持续变化进行高强度作业，安全可控性差；在社会关系上，劳动者处于长期封闭的

环境内，造成社会发展空间严重不足；在管理上，传统二元空间关系的工程管理模式脱离了主流工业领域的多场景融合管理趋势。整体来看，传统二元空间关系无法满足煤炭资源快速开发的现实需要。

煤矿生产建设的复杂性和不确定性也决定了需要突破传统二元空间关系。从现实世界、生产的运动状态、社会关系、管理等角度着手来变革煤炭的生产模式，改变传统社会生产稳固的物理-人类社会空间关系，充分利用空间的重组及融合潜力，在两个实物空间之外寻求第二生产空间；利用新型的空间形态，改变煤炭生产方式，化解人与煤的空间矛盾，突破煤炭生产与建设空间秩序。

(三) 空间理论研究新进展

在人类认识空间、改造空间的实践中，经历了来自直接观察的经验性第一范式、以自然理论模型为特征的第二范式、基于数值计算的第三范式；当前正在经历数据密集型科学发现的第四范式^[16]，即收集、存储、处理大量数据来建立新的科学认知与方法模式。4种科学研究范式推动社会演进，各类新兴科学技术催生社会生产方式的新变革，支持学者对空间的研究进入新阶段。

早期的空间研究受时代和技术局限性的影响，多为理论探讨，无法实现人类社会生产活动与其他空间的联合及互动。近年来，研究者提出了虚实两个空间平行的五度空间社会物理信息系统^[17]概念、人类社会逐步进入由“物理空间-人类社会-信息

空间”所组成的三元空间^[18]观点，相关认识论已从技术、方法、科学、哲学甚至文化等层面影响社会发展。这其中，煤矿智能化是科学研究第四范式深入发展的产物，成为引领多元空间融合的重要载体。

三、煤矿智能化融合重构煤炭工业空间形态

(一) 煤矿智能化

智能化是新型工业数字空间、工业互联网系统、数字经济、实体经济融合发展的重要手段^[19]。煤矿智能化将信息技术与传统煤炭工业深度融合，形成具有全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、协同控制特征的智能系统，支持生产、经营、管理等过程的智能化运行^[20,21]。例如，我国自2014年首次实现煤矿智能化开采以来，已有500多个煤矿、1019个采掘工作面实现了智能化采掘，70个煤矿正在进行智能化示范煤矿建设^[22]。煤矿智能化立足技术、工程、产业、示范等方面，就煤炭工业领域的空间融合进行了先导性实践。

(二) 煤矿智能化人-物理-信息(HPC)三元空间

“万物同宇而异体”表明，多元、差异化的系统可以处于同一空间^[4]。按照认识论，从一种生产方式转向另外一种生产方式，需要产生新的空间^[4]。随着数字化变革、智能化时代的到来，人类生活的世界已由传统的以人类社会-物理空间为主的二元空间，逐步转入了人类社会-物理空间-信息空间所构成的HPC三元空间(见图2)。以密集劳动、采掘加工为主要特征的传统煤炭工业，在利用多元空间融合连接实物、行为、关系之后，逐渐形成煤炭生产的HPC新空间形态。煤矿智能化的HPC空间不断迭代并深入融合，推动了煤炭工业的数字化

转型和高质量发展。

煤矿智能化的HPC空间以系统论、信息论、控制论为指导，以物理空间-人类社会-信息空间为基础，运用新时期的各类智能化技术，构建煤矿生产中的实-实传递、虚-实交互、实-虚-实融合等新形态(见图2)。人类社会、物理空间在二元结构的融合背景下，驱动矿工、矿井等生产资料的全面数字化，人与煤在所依存的物理空间由直接的互动关系转向虚拟的信息空间；智能工具也变成“为我所用之物”^[23]，据此预判并适应具有多场耦合特征的采煤环境的复杂变化，实现安全、绿色、高效、智能的工业过程。信息空间深入影响传统煤矿生产的各个环节(探矿-建矿-采矿-选矿-运销)，将生产资料数据化；而人可以利用信息空间对物理空间进行管控，通过虚实互动、虚实融合形成第二生产空间，实现人与煤空间关系的改变和优化。

四、煤矿智能化重构人与煤空间关系

(一) 改变煤炭生产物理空间

煤矿智能化重构人与煤空间关系，基础在于物理空间的改变。从HPC空间关系视角看，煤矿智能化建立的一系列技术、方法、体系，根本性改变了工业生产的物理空间：改变劳动者、劳动资料所处物理空间位置；物理空间、信息空间融合产生新的智能工具及虚拟劳动资料，替代人在地下空间进行生产。

1. 改变物理空间关系

最初的煤炭开采活动建立了人与煤的自然生产关系，引起了生产空间的双重变化：①原有自然生态空间的相对平衡关系被打破，加速了地球物理空间的熵增；②煤作为劳动对象开始进入人类社会，人与煤之间形成了生产力与生产关系。这表明，人类首次实现了对人与煤的物理空间关系的改变。

当前，人类社会开始进入工业4.0阶段。在煤炭生产中，基于工业社会对时间的偏好，借助信息空间构建煤矿智能化运行体系，加速生产的空间运动，催生劳动要素、生产秩序的改变，第二次实现了对人与煤的物理空间关系的改变。具体而言，物理空间的劳动资料发生了变化(见图2)，兼有实体的劳动资料、虚拟的劳动资料(如智能平台、数据信息、智能决策分析算法等)，新的生产要素与原

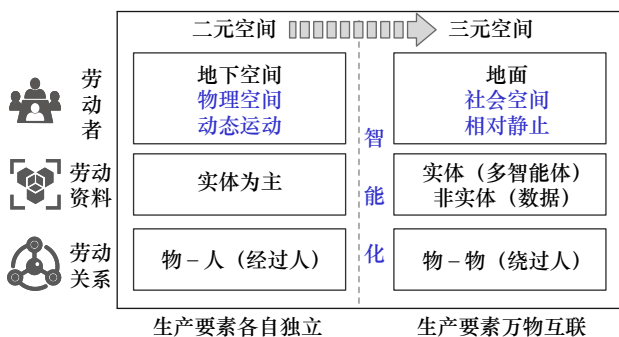


图2 二元向三元空间关系转换

有的生产要素融合并激发了价值的指数级效应；生产资料可以与劳动者互动，也可绕过劳动者进行独立互动^[24,25]，通过识别、分析、处理、应用虚拟生产资料，强化新的生产力要素作用，实现对数据生产资料的本质利用。

2. 改变生产相对运动状态

利用信息空间对劳动资料的管控，可改变劳动者物理空间的运动状态。在常规的工业化生产中，劳动资料处于静止状态，劳动对象随着劳动资料相对运动，生产资料的安全空间可控。对于煤炭开采活动，原煤在深部空间处于静止状态，劳动者、劳动资料随着煤炭开采的推进而在不断发生空间运动，也就导致劳动者的物理空间安全控制性变差。

智能化改变了煤矿生产资料之间的相对运动状态。应用与网络、硬件终端融合的智能生产系统，智能机器人可替代劳动者在井下发生空间运动。通过信息空间延伸了人脑、人手功能，让劳动者在井上直接控制井下采煤，从而实现物理空间位置的改变、构建生产要素之间的互动互联关系。这一过程客观上改变了劳动者的物理空间运动状态，在劳动者、劳动对象之间建立了安全且能高效利用的空间，实现了生产本质安全。近年来，随着智能工作面数量的增加，煤矿百万吨死亡率呈下降趋势（见图3）^[26]，这表明劳动者从危险的地下工作环境中解放出来，从主要依靠体力、脑力转向主要依靠知识，实质性改善了劳动者的安全风险。

（二）重构人类社会空间

煤矿智能化重构人与煤空间关系，核心在于改变人类社会空间，涵盖生产管理模式、现实生产力、矿工社会价值发展空间、社会心理等，有利于实现人的解放和全面发展。

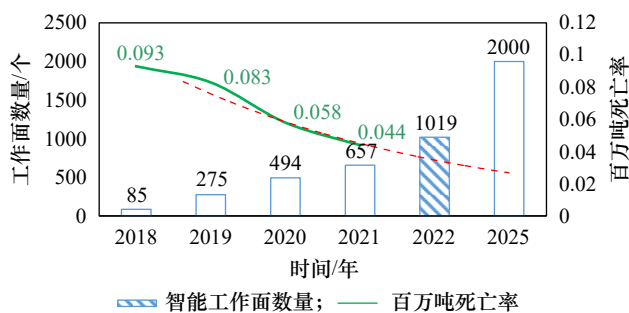


图3 煤矿百万吨死亡率和智能工作面数量的变化趋势

注：2025年的数据为预计值；虚线表示前述年份数值的拟合曲线。

1. 重构生产管理模式

生产过程管理存在两重性^[2,27]：生产自身管理的自然属性，与生产关系相关管理的社会属性。智能化变革煤矿的生产方式，在HPC三元空间交互和迭代发展，促进了生产管理模式、信息空间的融合及升级。智能化运行过程重新配置了劳动者、劳动工具、劳动对象、信息数据，使煤矿生产的计划、组织、协调、控制等方式出现深刻变化。

基于HPC三元空间的协同发展需求，驱动了煤炭工程、系统工程、AI等多学科技术与管理理论的深入结合，支持构建涵盖决策支持、政策评估、风险评估、事件预测等能力在内的工程理论体系（见图4）。相关体系能够消除理性不对称、智力不对称管控差别，形成一体化、多层次的煤矿智能化管理模式，实现煤矿生产组织、经营管理、安全生产、企业决策、社会监督全过程的高效运行。这类管理模式可视为基于大数据的方法论，丰富人类社会的科学研究案例，促进智能决策、知识决策的发展，推动管理科学与实践的变革。

2. 重构现实生产力

进入工业时代后，工程技术开发了物理空间，从依赖地表资源的农业发展到依赖地下资源的工业，但传统工业的开发利用方式逐步触碰了环境空间的承载力底线。而在智能化时代，基于HPC三元空间的信息化和AI技术，逐渐消除了煤矿生产的信息及知识不对称，变革了工业经济模式，有利于工业生产方式、生态环境、人类发展需求之间的适宜发展^[28]。

煤矿智能化技术及其应用，改变了传统的生产要素分布，催生了新的生产者、智能生产工具，进而在第二生产空间形成新的生产力类别（数据生产力）；通过传统与新生产要素的融合，激发了现实生产价值的指数级增长。在实际生产中，以数字化为支撑，应用高效技术、工艺、装备来构建智能化生产场景，如煤炭生产方式的改变推动了生产运行过程达到综合熵减，革新了传统煤炭行业的产业模式，实现安全、高效、绿色、智能的协同发展。

3. 重构矿工社会价值发展空间

“人是目的”，即实现人的价值是工程活动的出发点。从工业时代到信息时代再到智能时代，人类始终在生产中拥有主体地位，工业进步的本质是改变和实现了劳动者的解放和全面发展。基于煤矿智能化HPC关系的融合，不仅开辟了物理空间资源，

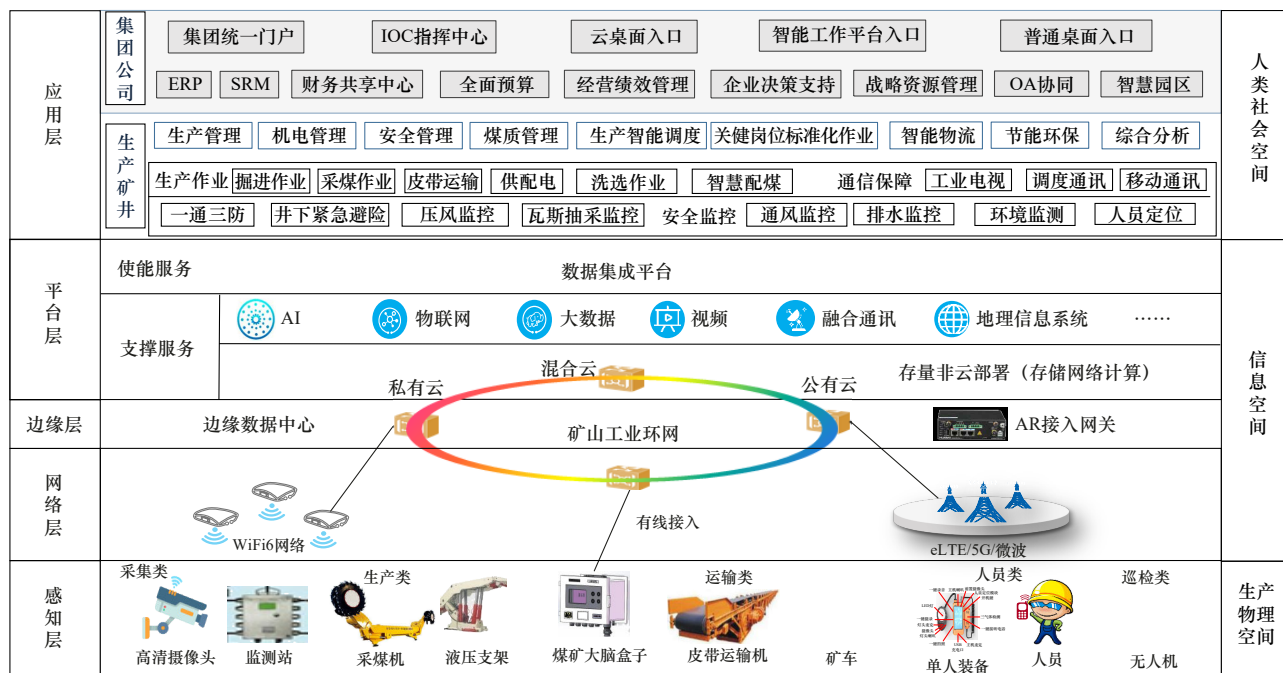


图4 智能煤矿生产管理架构

注：IOC表示智能运行中心；ERP表示企业资源计划；SRM表示供应商关系管理；OA表示办公自动化；AR表示增强现实；WiFi6表示第六代无线网络技术；eLTE表示企业无线通信。

而且创建了资源、信息、知识的共享平台，使劳动者（矿工）成为实体管理系统、数据价值链的重要组成部分。

在煤矿智能化引领智能工业生产的诸多场景中，人负责智能生产系统、智能机器人、智能平台等的管理和维护，从管理机器提升为管理知识、管理“虚拟机器人员工”；矿工从劳动密集型向知识密集型转变，成为社会知识价值链的主流职业，为矿工的多元、综合发展提供广阔空间。煤矿智能化将处于地下“脏累苦险”空间的矿工转变为地面工作的“白领”，促进了人的解放和发展，提升了矿工的安全感、获得感、幸福感。矿工自身的社会价值发展空间获得了重新构建，有关经济、社会、文化等地位也随之发生了深刻改变。

4. 转换心理空间关系

从石器时代一直到信息时代，煤炭推动了人类社会的发展进程。尽管矿难频发、高强度开发带来了明显后果，人类对煤炭“爱恨交织”，但在可以预期的未来还是离不开煤。传统煤炭开采活动将人置于煤中，与煤“近”而共处；随着社会对于全面发展的价值追求，人要从物理空间上“远”离煤，但二元空间的专业性分工、人机分工都难以实现。重构虚实分工的生产模式或是解决上述矛盾的一种方式。

煤矿智能化利用数字化、网络化技术，依托大数据、大模型、大算力，形成虚实分工的运行模式。使用“人化”“智能化”工具来服务人类社会，引导人与煤的物理空间从“近”而共处转向“远”亦可控，从而建立煤矿智能化生产运行体系，实现资源开采过程中人与煤运动状态的转变，使煤更易融入人类智能社会的发展进程，拉“近”人与煤的心理空间关系。煤矿智能化以绿色、安全、高效为价值目标，是近期利益、长远利益的辩证统一；我国已制定了煤矿智能化发展的三阶段规划，当前尚处初级阶段。煤层赋存条件具有多样性、复杂性，在处理近期利益、长远诉求方面需保持平衡，为实现更高水平的智能化发展筑牢基础。

(三) 构建煤矿智能化信息空间

煤矿智能化重构人与煤空间关系，关键在于构建信息空间。信息空间可融合物理空间、人类社会需求，通过学习和优化，建立与实际工业系统相对应的虚拟世界；围绕HPC空间关系，形成煤矿生产中的虚-实融合空间形态以及基于第四范式的方法论，更好构建万物互联的工业场景。

1. 融合信息空间

自工业化时代以来，人类针对社会需求建立的

生产模式通过不断改变空间来“压缩时间”，使得实体生产资料在空间运动的速度越来越快；当实体空间被压缩到极致，就出现了空间维度上虚拟、时间维度上真实的信息空间^[28,29]。

信息空间以网络化、数字化为基础，进行HPC三元空间融合。对于煤矿工业生产场景，将信息变为新的虚拟生产资料^[30]，不断通过实体生产资料影响工业化生产；利用数字化获得社会和物理大数据，利用网络化实现人机互联、物物互联，又通过管理科学与技术装备反馈于物理空间和人类社会；最终在HPC空间实现了从人与机器联动、人机互联到“人机物”互联，使得人类社会可以利用信息空间来管理和控制物理空间。煤矿智能化即通过信息空间，将煤炭与人进行二次连接，实现煤炭工业领域的人、虚拟空间、物理空间融合。

2. 构建万物互联场景

在从物理空间、人类社会演化到信息空间的背景下，世界的网络形态从交通网、能源网发展到信息网、互联网，再演进到以数字化、信息化为基础，融合HPC空间的智联网，驱动经济、社会、能源的革新。

近年来，在历经炮采、普采、综采等煤矿发展阶段后，基于5G技术构建了人与人、人与物、物

与物互联互通的多类应用场景。将“人机物”有机融于数字生态系统，基于HPC三元空间互联关系，依托云计算、大数据、智能计算等信息技术，构建了智能探测、智能掘进、智能开采、智能通风、智能洗选、智能调度等典型空间应用场景^[14]；煤的生产过程万物互联（见图5），智能监测、分析、预警、联动、调度、控制、决策等能力齐备，使得煤矿“人机环管”在统一、和谐的智能综合体中高度自主运行。

3. 基于数据研究的方法论

信息空间是物理空间到数字世界的映射（或数字机制函数）。煤矿智能化按照人类社会需求来构建数字世界，以数字的形式模拟并再现煤矿开采过程，实现对物理空间背后科学技术规律的数字化再认识。在二元空间体系中，人类认识和改造世界的一般方法论是基于第二范式、第三范式的“实践-认识-再实践-再认识”过程。然而在智能时代，构建多元融合的HPC空间工业化生产体系，亟待提供一种基于数据的科学研究新范式。

煤矿生产的信息空间提供了另外一种认识世界的方式。在虚拟空间中实验并创造以数字孪生等为主的人工系统、计算实验与平行执行系统，实现理论（抽象）在模拟中的“实践”。“实践-抽象-模

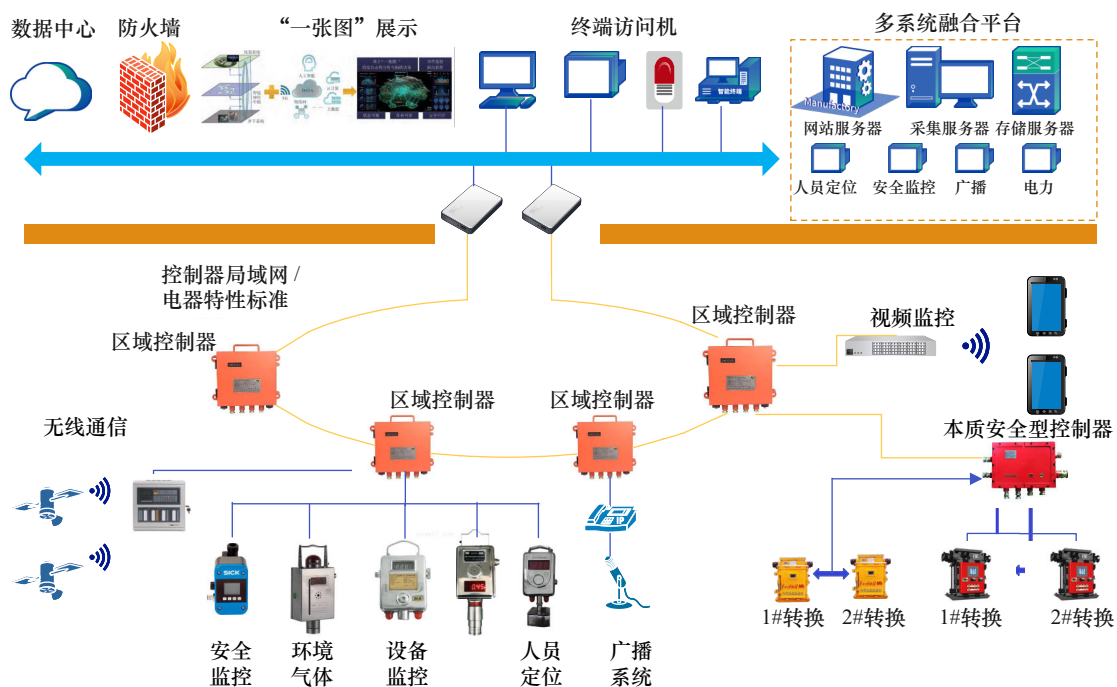


图5 煤矿万物互联框架图

拟-数据”过程将显著提升实践中的环境适应能力、变化预判能力，这是智能时代认识和改造世界的高级文化形式。基于煤矿智能化生产，可通过模拟来预见自然和社会规律，推动认识从“存在”到“变化”再到“相信”的发展过程^[17]；人可自主掌控各项决策并优选最佳方案，避免潜在危机；通过技术迭代，推动三元空间体系完善，加速认识和改造空间进程，促进人类社会可持续发展。

五、煤矿智能化重构人与煤空间关系的代表性案例

(一) 智能化开采

位于陕西省延安市的黄陵矿区属典型的侏罗纪煤田，资源赋存条件复杂，水、火、瓦斯、煤尘、顶板等灾害严重。在传统井工煤矿的生产过程中，人与煤从属于传统的二元空间关系，始终是“近”煤共处；煤矿企业延续着工业3.0的生产建设管理模式，安全发展水平、生产效率等与柔性供给、绿色低碳等需求不相匹配^[11]。从长期的工程实践中认识到，煤炭行业对机器替代人具有迫切需求。信息技术为实现机器替代人、井下少人乃至无人确立了基础条件，只有通过融合信息空间进行煤矿的建设、生产、管理组织，才能使煤炭行业契合安全、绿色、高效的发展目标。

从改变生产空间关系的哲学思辨角度出发，运用本质安全管理理念，按照“让机器去做人做的事、让机器去做人类做不到的事”的工作思路，构建了HPC三元空间技术方法体系、生产模式、发展要素、价值链。2014年建成的黄陵一号煤矿1001较薄煤层工作面，是我国第一个智能化无人开采工作面，实现了智能化无人开采从无到有的突破、煤

炭人地面采煤的梦想，颠覆了井工煤矿生产必须下井作业的生产方式。以此为基础，先后实现了针对中厚煤层、厚煤层的智能化开采技术全面应用。地面远程采煤的成功实践，使矿工从井下危险的作业环境中解放出来、从高强度劳动中解放出来，提高了矿工的安全感、获得感、幸福感；显著改善了煤矿企业的社会形象，提高了煤炭工业的装备技术水平，以劳动生产效率提高（68%）促进了经济效益。行业主管部门许可相关企业组建煤矿智能化开采技术创新中心，面向全国推广智能化开采的“黄陵模式”。

智能化采煤生产系统以HPC三元空间关系为基础，构建了智能化生产和控制技术体系，建立了“五流一体”智能化管理模式，实现了工作面常态化无人（少人）作业；在人与煤之间建立了由地下到地面的安全空间，创建了随劳动对象运动的智能生产系统及装备，从根本上实现了对人与煤的空间关系的改变；采煤数据用于信息空间的试验和模拟，采煤过程虚与实交互融合（见图6），减少了生产过程对物理空间、自然空间的破坏效应。据统计，2014—2021年全国井下作业人员减少了37万人^[22]，而同期全国煤矿死亡人数由946人减少至178人，百万吨死亡率下降了82.4%^[26]。

(二) 智能化建井

位于陕北地区毛乌素沙漠南缘的可可盖煤矿（10 Mt/a）是正在建设的超大型矿井，主采煤层埋深超过500 m，工程地质与水文地质条件复杂。若按照传统钻爆法、综掘法工艺进行矿井开拓，需要依靠人向地下深部开辟生产作业空间，施工难度大、劳动强度大、作业环境恶劣、安全性差、工期长；人与矿井建设是二元结构秩序，将不再适应安全高效的建井需要。

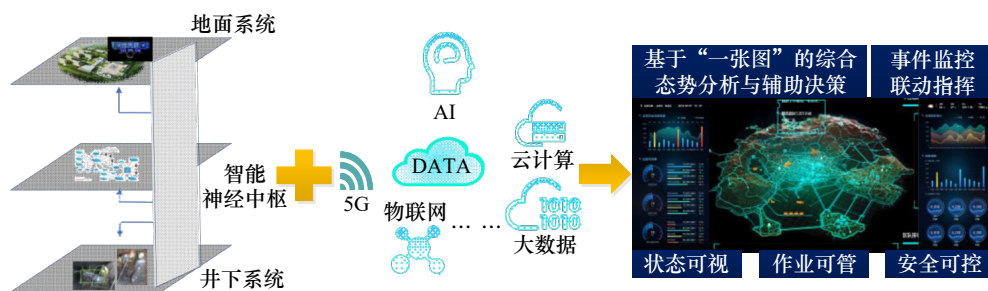


图6 基于“一张图”的智能决策模式
注：DATA表示煤矿生产和管理数据。

基于煤矿智能化开采的前期实践,提出了“智能化建井、建智能矿井”的技术理念,形成了煤矿建井HPC三元空间技术体系(见图7)。联合研制了智能化的全断面敞开式掘进机技术装备,创造了40 m²断面斜井月进尺812.6 m的斜井施工世界纪录;相应掘进速度分别是传统钻爆法、综掘法施工的3倍、5倍以上,将建井工期由53个月压缩至17个月,建设期内节约投资超过10亿元/年;首次在西部地区采用竖井钻井法建井,直径8.5 m、垂深538.5 m的立井一年即可揭煤。相关智能化建井成果代表了我国煤矿智能化建井基础理论、技术装备、工程实践的新突破,为西部地区煤炭资源的高效开发建设提供了工程示范。

利用智能化技术装备(替代人)向地下深处开辟空间,探索了“打井不下井、智能化建井”的新模式,实现人在地表远程控制井下施工,取得建井技术装备领域的新突破。基于HPC三元空间融合,集成5G-四维-地理信息系统-信息模型技术群,在信息空间形成第二生产空间,实现井下物理空间管控、设备联动、“人机物”互联、虚-实空间互动融合。以智能化建井方式革新了传统的人与煤二元空间关系,创造性地解决了煤炭资源安全开采、高效利用的复杂问题。

六、研究结论与发展建议

(一) 研究结论

辨析了空间的概念与本质,即物理、社会、信

息层面的生产与生活秩序可实现关联互动。梳理了人与煤空间关系的演进历程,认为以“人”与煤融合的信息空间可突破传统二元空间结构的制约,构建新的空间生产技术体系。基于三元空间融合理念,提出了煤矿智能化构建工业生产实-实传递、虚-实交互、实-虚-实融合的新型三元空间形态。这一三元空间形态改变了传统空间秩序,实现生产要素在三元空间内的动态融合与持续优化,成为煤矿智能化建设的理论基础。

提出了HPC体系下重构人与煤空间关系的理念,认为物理空间的改变是基础,人的解放和全面发展是核心,以信息空间为桥梁的第二生产空间是关键。煤矿智能化建立了一种与人、自然、社会可持续发展目标相匹配的全新生产方式,为推动数字化转型、能源革命及柔性供给等提供了有益借鉴;实现了人由煤中向人在煤外的转变,为井下生产“减人”“无人”提供了重要依托。具体而言,煤矿智能化改变了劳动者、劳动资料的物理空间位置,而物理空间在与信息空间融合后产生新的智能工具和虚拟劳动资料;改变生产要素的互动关系,变革工业生产的管理模式,减少人类社会活动对自然生态环境的熵增,改善了矿工社会价值发展空间及社会心理;在信息空间建立对应于实际工业系统的虚拟世界,在虚拟世界形成生产的第二空间,据此构建了煤矿生产中的虚-实融合空间形态、煤矿万物互联工业场景。

煤矿智能化HPC三元空间是工业数字空间、工业互联网与实体经济融合发展的新型载体,通过相

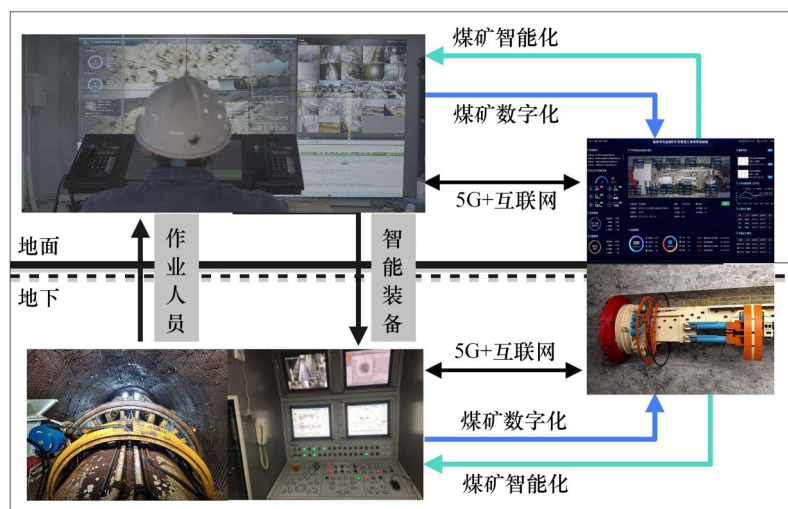


图7 智能化建井HPC三元空间关系

应空间内工业经济活动的互动优化、虚实协同、迭代升级,成为工业4.0、工业互联网2.0深化应用的实践案例;有利于在巨大差异的时空尺度上对物理相应空间内、人类社会进行再认识以及进一步的精准革新,切实提升复杂科学和社会问题的解决能力。

(二) 发展建议

把握并利用数字化、网络化、智能化发展契机,建立并完善与现代煤炭开发利用相融合,涉及AI、工业物联网、云计算、大数据、机器人、智能装备等内容的发展模式,支持攻克煤炭产能优化“下井苦”、增量提升“入地难”等重大难题。深化煤矿智能化HPC空间理论技术体系研究,构建与之匹配的工业管理体系,优化组织、资源、制度、知识、信息、技术等要素的配置;拓展煤矿工业互联网系统的构建及运行范围,强化新生产要素与传统生产要素的互动,提升煤炭全空间、全过程的智能化建设水平。以多元协同、系统融合来优化煤矿智能化的工程与应用,推动煤炭开发和利用的数字化转型升级。

坚持以人为核心,确立安全高效、绿色智能的煤炭行业发展目标,注重跨学科人才培养,实现劳动者的全面发展。深化以人为主体的煤矿数字技术研究,发挥工业生产中智能系统及装备对矿工的替代作用,进一步优化劳动者和劳动资料的空间关系。突破矿井作业人员的物理空间、信息空间壁垒,实现煤炭生产中人与煤空间的彻底分离,促进生产“少人、无人则安”,将人从井下危险环境和高强度体力劳动中解放出来。发挥知识、技术、信息对人的塑造作用,提高煤矿智能化与教育体系的融合度,着力培育矿业、机电、信息、管理等学科的创新人才、团队、梯队;引导矿井作业人员朝着跨学科、复合型人才方向发展,促进其社会价值提升、劳动地位提高。

煤矿智能化发展仍处初级阶段,宜立足当前并顾及长远,推动煤炭行业的整体升级。协同管理部门、企业、科研机构,制定发展扶持政策、保障科技创新投入,构建煤矿智能化技术的市场导向机制。建立煤炭行业新兴技术的“产学研用”协同体系,支持龙头企业构建跨领域、智能化的共性技术共享平台,同步加强工业数据中心、5G等新型基础设施建设。构建煤矿智能化标准体系,攻关煤矿

智能化开采和建设的基础共性与关键技术,实施智能化采煤、智能化煤矿建设、智能化建井等示范工程。加强煤矿工业互联网、工业数字孪生、工业元宇宙等技术的前瞻布局,激发数据融合价值,促进煤炭数字经济的高质量发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 3, 2022; **Revised date:** January 28, 2023

Corresponding author: Fan Jingdao is a professor-level senior engineer from the Shaanxi Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd. His major research field is coalmine Intellectualization. E-mail: wangjun20220101@126.com

Funding project: National Key R&D Program Project (2022YFB3104200); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Key Technology Requirements for the Digital Development of the Coal Industry” (2022-XZ-28) and “Research on High-quality Energy Development Strategy and Planning under the Dual Carbon Goals” (2022-GDZK-08)

参考文献

- [1] 王中江. 关系空间、共生和空间解放 [J]. 中国高校社会科学, 2017 (2): 82-91.
Wang Z J. Relational space, symbiosis and space liberation [J]. Social Sciences in Chinese Higher Education Institutions, 2017 (2): 82-91.
- [2] 李维意. 马克思空间哲学的研究对象、内容结构和出场方式 [J]. 深圳大学学报(人文社会科学版), 2019, 36(2): 122-129.
Li W Y. Research object, content structure and appearance mode of Marx's space philosophy [J]. Journal of Shenzhen University (Humanities and Social Sciences), 2019, 36(2): 122-129.
- [3] 陈晓明, 罗龙祥. 新马克思主义的空间哲学范式及理论迷误 [J]. 江海学刊, 2021 (6): 50-56.
Chen X M, Luo L X. Paradigm of neo-Marxism's spatial philosophy and its theoretical misunderstanding [J]. Jianghai Academic Journal, 2021 (6): 50-56.
- [4] 边馥苓, 王金鑫. 现实空间、思维空间、虚拟空间——关于人类生存空间的哲学思考 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(1): 4-8.
Bian F L, Wang J X. Material space, thinking space and cyberspace: Some thinkings about human living space [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(1): 4-8.
- [5] Lefebvre H, Castree N, Kitchin R. The production of space [M]. Oxford: Oxford University Press, 1991.
- [6] 单志广, 徐清源, 马潮江, 等. 基于三元空间理论的数字经济发展评价体系及展望 [J]. 宏观经济管理, 2020 (2): 42-49.
Shan Z G, Xu Q Y, Ma C J, et al. Evaluation system and prospect of digital economy development based on three-dimension space theory [J]. Macroeconomic Management, 2020 (2): 42-49.
- [7] 王国法, 杜毅博, 任怀伟, 等. 智能化煤矿顶层设计研究与实践 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1909-1924.
Wang G F, Du Y B, Ren H W, et al. Top level design and practice

- of smart coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1909–1924.
- [8] Zhou J, Zhou Y H, Wang B C, et al. Human–cyber–physical systems(HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing [J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 624–636.
- [9] 王柏村, 臧冀原, 屈贤明, 等. 基于人–信息–物理系统(HCPS)的新一代智能制造研究 [J]. *中国工程科学*, 2018, 20(4): 29–34. Wang B C, Zang J Y, Qu X M, et al. Research on new-generation intelligent manufacturing based on human–cyber–physical systems [J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(4): 29–34.
- [10] 雷承锋. 新中国煤炭地下开采技术发展简析 [J]. *科学技术哲学研究*, 2013, 30(3): 104–108. Lei C F. Exploration into the development of underground mining technology in new China [J]. *Studies in Philosophy of Science and Technology*, 2013, 30(3): 104–108.
- [11] 吴晓煜. 中国古代煤矿史的基本脉络和煤炭开发利用的主要特征 [J]. *中国矿业大学学报(社会科学版)*, 2010, 12(3): 91–98. Wu X Y. Basic historical context of coal mines in ancient China and main features of coal development and utilization [J]. *Journal of China University of Mining & Technology(Social Sciences)*, 2010, 12(3): 91–98.
- [12] 周岩, 胡茹. 中国近代煤炭开采技术发展及其影响因素 [J]. *中国矿业大学学报(社会科学版)*, 2011, 13(1): 89–93. Zhou Y, Hu R. Development of China's modern coal mining technology and influencing factors [J]. *Journal of China University of Mining & Technology(Social Sciences)*, 2011, 13(1): 89–93.
- [13] 罗承选. 中国煤矿史研究的意义与方法 [J]. *煤炭高等教育*, 2010, 28(5): 103–105. Luo C X. Significance and method of coalmines history research in China [J]. *Meitan Higher Education*, 2010, 28(5): 103–105.
- [14] 范京道, 李川, 闫振国. 融合5G技术生态的智能煤矿总体架构及核心场景 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 1949–1958. Fan J D, Li C, Yan Z G. Overall architecture and core scenario of a smart coal mine incorporating 5G technology ecology [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1949–1958.
- [15] 中国能源大数据报告(2022) [R]. 北京: 中能传媒能源安全新战略研究院, 2022. China energy big data report(2022) [R]. Beijing: China Energy Media New Strategy Research Institute for Energy Security, 2022.
- [16] 邓仲华, 李志芳. 科学研究范式的演化——大数据时代的科学研究第四范式 [J]. *情报资料工作*, 2013 (4): 19–23. Deng Z H, Li Z F. The evolution of scientific research paradigm: The fourth paradigm of scientific research in the era of big data [J]. *Information and Documentation Services*, 2013 (4): 19–23.
- [17] 王飞跃. 平行哲学: 智能产业与智慧经济的本源及其目标 [J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 308–318. Wang F Y. Parallel philosophy: Origin and goal of intelligent industries and smart economics [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 308–318.
- [18] Pan Y H. Heading toward artificial intelligence 2.0 [J]. *Engineering*, 2016 (4): 51–61.
- [19] 李伯虎. 工业元宇宙的三重内涵 [EB/OL]. (2022-08-30)[2022-12-15]. http://epaper.cena.com.cn/content/2022-08/30/node_6.htm. Li B H. Triple Connotation of industrial metaverse [EB/OL]. (2022-08-30)[2022-12-15]. http://epaper.cena.com.cn/content/2022-08/30/node_6.htm.
- [20] 范京道. 智能化无人综采技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017. Fan J D. Intelligent unmanned fully mechanized Mining Technology [M]. Beijing: China Coal Industry Press, 2017.
- [21] 范京道. 煤矿智能化开采技术创新与发展 [J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(9): 65–71. Fan J D. Innovation and development of intelligent mining technology in coal mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(9): 65–71.
- [22] 中华人民共和国应急管理部. 矿山智能化建设取得新进展 [EB/OL]. (2022-03-15)[2022-12-15]. <http://www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=10&id=137257>. Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. New progress has been made in the construction of intelligent mines [EB/OL]. (2022-03-15)[2022-12-15]. <http://www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=10&id=137257>.
- [23] Wang B C, Tao F, Fang X D, et al. Smart manufacturing and intelligent manufacturing: A comparative review [J]. *Engineering*, 2021, 7(6): 738–757.
- [24] 徐宗本, 赵彦云, 朱利平, 等. 数字技术赋能国家统计现代化建设 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(12): 1738–1744. Xu Z B, Zhao Y P, Zhu L P, et al. Digital technology enables construction of national governance modernization [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(12): 1738–1744.
- [25] 文军, 黄锐. “空间”的思想谱系与理想图景: 一种开放性实践空间的建构 [J]. *社会学研究*, 2012 (2): 35–59. Wen J, Huang R. The intellectual genealogy and ideal prospect of space: The construction of an open practical space [J]. *Sociological Research*, 2012 (2): 35–59.
- [26] 高玉洁. 煤矿智能化进入快速发展阶段 [EB/OL]. (2023-01-10)[2023-01-20]. <http://www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=82&id=145126>. Gao Y J. Intelligent coal mines have entered a stage of rapid development [EB/OL]. (2023-01-10)[2023-01-20]. <http://www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=82&id=145126>.
- [27] 孙全胜. 空间哲学的历史沿革 [J]. *中共宁波市委党校学报*, 2016, 38(2): 36–46. Sun Q S. Historical evolution of space philosophy [J]. *Journal of the Party School of CPC Ningbo Municipal Committee*, 2016, 38(2): 36–46.
- [28] 张学文, 陈凯华. 数字时代的开放科学: 理论探索与未来展望 [J]. *科学学研究*, 2022, 40(2): 203–208. Zhang X W, Chen K H. Open science in the digital age: Theoretical exploration and future outlook [J]. *Studies in the Science of Science*, 2022, 40(2): 203–208.
- [29] 李彬, 关琮严. 空间媒介化与媒介空间化——论媒介进化及其研究的空间转向 [J]. *国际新闻界*, 2012, 34(5): 38–42. Li B, Guan C Y. Medialization of space and spatialization of media: On media evolution and space shift [J]. *Chinese Journal of Journalism & Communication*, 2012, 34(5): 38–42.
- [30] Tao F, Qi Q L, Wang L H, et al. Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison [J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 653–661.
- [31] Talele, S, Traylor C, Arpan L, et al. Energy modeling and data structure framework for sustainable human–building ecosystems (SHBE): A review [J]. *Frontiers in Energy*, 2018, 12: 314–332.