

智能化露天矿的核心概念与建设战略

孙健东^{1,2}, 张瑞新¹, 白润才³, 李慧智⁴, 刘光⁵,
孙效玉⁶, 王忠鑫⁴, 赵奎⁷, 陈结⁸

(1. 华北科技学院, 河北省矿山智能化开采技术重点实验室, 河北 廊坊 065201; 2. 北京中矿露天科学技术研究院, 科技研发中心, 北京 100083; 3. 辽宁工程技术大学, 矿业学院, 辽宁 阜新 123032; 4. 煤炭科学研究总院, 沈阳露天采矿技术研究分院, 辽宁 沈阳 110066; 5. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710065; 6. 东北大学, 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110167; 7. 江西理工大学, 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 8. 重庆大学, 资源与安全学院, 重庆 404100)

摘要: 从信息论、系统论、控制论角度, 对智能化露天矿的概念与定义进行了阐述, 提出智能化露天矿的核心在于基于信息技术获取量化数据的规律, 并据此做出科学决策、进而对大系统进行精准的控制。针对传统的露天矿信息化建设中“信息化、数字化、自动化、智能化”等关键术语给出了定义, 对其逻辑关系进行了剖析。提出露天矿“数字化、自动化、智能化”同步建设原则, 归纳了各阶段主要建设内容。提出智能化露天矿建设应采取“应用一代、布局一代、探索一代”的发展战略, 当前矿山企业在整体投入比重上, 要确保“应用一代>布局一代>探索一代”。

关键词: 露天矿; 智能化; 基础概念; 建设原则; 发展战略

中图分类号: TD 824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2024)01-0023-11

The key concepts and construction strategy of intelligent surface mines

SUN Jiandong^{1,2}, ZHANG Ruixin¹, BAI Runcai³, LI Huizhi⁴, LIU Guang⁵,
SUN Xiaoyu⁶, WANG Zhongxin⁴, ZHAO Kui⁷, CHEN Jie⁸

(1. Hebei Key Laboratory of Mine Intelligent Unmanned Mining Technology, North China Institute of Science and Technology, Langfang, Hebei 065201, China; 2. Technology R&D Center, Beijing Sino-mine Surface Mining Institute of Science and Technology, Beijing 100083, China; 3. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123032, China; 4. Open-pit Mining Technology Research Branch, China Coal Research Institute, Shenyang, Liaoning 110066, China; 5. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China; 6. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110167, China; 7. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 8. School of Resources and Safety, Chongqing University, Chongqing 404100, China)

Abstract: From the perspective of information theory, systematic theory, and cybernetics, the concept and definition of intelligent surface mine were expounded. proposed that the core of intelligent surface mine is to obtain quantitative data based on information technology, Based on

收稿日期: 2022-10-27 修回日期: 2023-03-27 DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20220585

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702327, 41867033); 廊坊市科技支撑计划项目(2022011002); 华北科技学院高等教育研究所教育研究基金项目(HKJYGH202205)

通信作者: 张瑞新(1964—), 男, 内蒙古自治区固阳县人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事露天矿山开采工艺优化、露天开采装备智能化等方面的研究。

E-mail: zhangrx@ncist.edu.cn Tel: 18910130588

引用格式: 孙健东, 张瑞新, 白润才, 等. 智能化露天矿的核心概念与建设战略[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(1): 23-33.

SUN Jiandong, ZHANG Ruixin, BAI Runcai, et al. The key concepts and construction strategy of intelligent surface mines [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(1): 23-33.

this, scientific decisions were made, and scientifically control the large system. The basic concepts of key terms such as “informatization, digitization, automation, and intelligence” in the construction of intelligent surface mines were given, and the logical relationship between key concepts was analyzed. Based on the logical relationship of “digitization, automation and intelligence”, the principle of “digitization, automation and intelligence” synchronous construction of surface mines was proposed, and the main construction directions of three stages were induced. the synchronous development strategy of “application generation, layout generation, and exploration generation” for intelligent surface mines was proposed. It is pointed out that in terms of the overall investment proportion of the current mining enterprises, it is necessary to ensure “application generation > layout generation > exploration generation”.

Key words: surface mine; intelligence; basic concept; construction principle; development strategy

目前智能化露天矿建设工作整体上处于研究与探索阶段,建设工作的诸多参与方对于智能化露天矿认识、理解程度并不深刻,尤其是部分承建单位及矿山企业在一定程度上高估了当前技术水平的成熟程度、放大了实际建设工作中取得的成效,对其他矿山企业造成了一定的误导.因此,在智能化露天矿建设工作中,无论是高校、科研院所、行业协会还是矿山企业,从业者都必须先形成理性的科学分析与推理方法,才能有效地推动智能化露天矿建设工作.

当前智能化露天矿建设工作整体上处于研究与探索阶段,文献[1]提出了智能露天矿山定义,智能露天矿山层次间关系、智能露天矿山建设原则和分期建设的“1+4”智能化系统;文献[2-3]提出了工艺为本、分级建设、价值导向、有序推进和虚实共生的智能化露天煤矿总体设计策略;文献[4-5]详细论述了智能露天矿山的总体架构、关键技术;文献[6-7]总结了我国露天煤矿智能化发展现状,建设中存在的问题、归纳了建设的目的与用途等.

大量文献调研工作显示,当前围绕露天矿山的基本概念与术语在一定程度上模糊不清.然而科学术语是科学分析与推理的前提,没有严谨定义的科学术语,就难以形成知识;没有知识,建设工作中基本的表达与交流就会陷入混乱与无序,更无法对新兴事物及外部信息形成科学严谨的研判思维与逻辑.为此,本文针对智能化露天矿的基础概念开展分析,剖析关键概念之间的逻辑关系,阐释智能化建设方向与建设内容的整体规划思路,目的是重塑认识、统一思想、形成共识,进而为我国露天矿的智能化建设提供科学可行的方向.

1 智能化露天矿的定义

1.1 智能化露天矿概念的提出

上世纪初发展成型的信息论、系统论、控制论是智能化露天矿建设的核心指导思想,为露天开采行业乃至其他行业的智能化发展奠定了理论基础.深刻理解这一整套理论需要庞大的知识体系以及逻辑思维能力作为基础支撑,但科学本身存在信息高度不对等,加上受众的知识体系、理解方式乃至理解能力都存在着较大区别,因此科普宣传过程中,大量复杂的理论与思想不断被简化,最终用一两个简单的形象化的概念去替代复杂的背景知识.这种概念简化对于激起大众兴趣、提高产业关注度、提高学术辨识度、促进行业转型发展起到了重要的作用.

近几十年来,信息科学技术的发展突飞猛进,在光通信、光学信息处理、以及相关的电子信息科学、计算机科学等信息技术领域取得了一系列重大应用突破.在这一过程中,矿业领域与计算机科学技术、电子通信及自动控制技术等不断交叉融合,反过来使得概念不断推陈出新.例如近 20 年来出现的“数字矿山”“感知矿山”“矿山物联网”“互联网+矿山”“矿山两化融合”“工业 4.0+矿山”“矿山信息物理系统”“智能化矿山”等等,其实上述概念本质上都是信息论、系统论、控制论思想的外延,即将以往矿山生产、管理、经营中经验驱动的粗放性决策控制变为数据驱动的精细化决策控制,进而提高人类对复杂大型系统的决策与控制能力.

另一方面,随着我国经济的发展,各行各业对生态文明建设的重视程度不断加大,安全、高效、绿色、可持续等等诸多理念不断融合入矿山开采

的理念之中,最终就形成了更为宏观的概念“智慧矿山”。“智慧矿山”是一个泛化的概念,是“智能化矿山”“本质安全型矿山”“高产高效矿山”“绿色矿山”等诸多概念的综合。

由于采矿行业自身的特殊性,与互联网等行业相比,矿业近几十年来在信息化建设上发展较为缓慢,2000年左右开始的“数字矿山”建设至今尚处于初级阶段,整体上距智能化建设目标还比较远。

1.2 智能化露天矿的概念与定义

明确智能化露天矿的概念与定义是行业智能化建设工作中统一思想、凝聚共识的重要前提。严谨的来看,概念指“所感知的事物共同本质特性的抽象”,定义指“对于事物本质特征或概念的内涵和外延的确切而简要的说明,通过列出对象的基本属性来描述或规范概念的意义。”

考虑到“智能化露天矿”本身是大量复杂理论与思想的简化,因此为避免产生误解与歧义,在给出定义时候,必须用不同视角下的“逻辑”定义“概念”,而非用“名词”定义“概念”,同时应遵循“如无必要,勿增实体”的基本原则,避免语言滥用而引起的认识和思想混乱。鉴于此,我们基于信息物理系统理论、信息论、系统论、控制论,对智能化露天矿给出较为科学严谨的定义如下:

智能化露天矿生产中,通过现代通信、物联网、大数据等信息技术的应用,使生产、经营及管理中人、机、物、环、管等诸多关键要素得以精准采集,大系统内外部各种现象的内在因果及关联关系得以精准的量化描述,进而将传统的经验性认识升级为量化的规律性知识,再结合实际业务特点,依据精准量化的数据与规律做出科学决策,进而对大系统进行精准的控制^[8-11]。

从信息论角度来看,露天矿智能化升级的本质是通过数字化技术构建信息获取、传递、加工、转化处理的基本流程与手段,将未知或者模糊的信息精准量化,很大程度上减少地质勘探、矿山设计与决策、矿山工程生产组织管理、矿山装备维检、矿山安全管理、矿山经营管理等诸多业务系统的不确定性。

从系统论角度来看,露天矿智能化升级的本质是通过科学、精确的分析方法,定量描述采矿大系统内部机制与发展过程的状态演化过程,提高人们对不同采矿业务系统及子系统之间结构、层次、要素、功能等内部特征、演化机理、发展过程的认知水平,进而更科学的对大系统施加控制。

从控制论的角度来看,露天矿智能化升级的本质是基于充足的矿山生产、管理及经营信息以及对大系统内部特征、演化机理、发展过程的深刻认识,依据内外部条件变化对矿山大系统施加控制并精准执行,使得大系统稳定保持在“高效、安全、环保、可持续”的预定状态。

2 关键概念的定义与逻辑关系

2.1 “信息化、数字化、自动化”的定义

2.1.1 信息化

“信息化”有着严格的官方定义,1997年召开的首届全国信息化工作会议中,将信息化定义为:信息化是指培育、发展以智能化工具为代表的新的生产力并使之造福于社会的历史进程^[12]。在中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《2006—2020年国家信息化发展战略》中,“信息化”概念叙述如下^[13]:信息化是充分利用信息技术,开发利用信息资源,促进信息交流和知识共享,提高经济增长质量,推动经济社会发展转型的历史进程。在工业生产领域中,信息化与工业化融合指信息技术广泛应用到工业生产的各个环节,是工业企业生产、经营、管理的必然手段。

综上所述,信息化是一个极为宏观的概念,贯穿工业3.0及工业4.0两个阶段的技术革命进程,并将继续延续下去。“数字化、自动化、智能化”等可统称为信息化,智能化矿山、智慧矿山也是信息化进程中的产物之一^[14-15]。

2.1.2 数字化

数字化指使用0和1两位数字编码来表达和传输一切信息的综合性技术。数字化的解释一是具有可计算性,将信息转变为可以度量的数据,并根据数据建立起适当的数字模型,并转变为一系列二进制代码;解释二是具有可量化性,即可将任何连续变化的输入转化为一串分离的单元,在计算机中用数字0和1表示^[16]。

根据信息物理系统理论,实现数据的自动流动需要经过4个环节,分别是感知、分析、决策、执行。其中感知实现了隐性信息的采集与量化,从而变成显性数据,因此我们也将这一过程称之为数字化。

2.1.3 自动化

自动化狭义上指机器设备、系统或过程在无人或少人干预的条件下^[17],自动完成“全面感知、深度分析、科学决策、精准执行”的全过程,在这一过程中隐性信息依次加工成“显性数据、规律性知

识、策略性知识”,数据的利用价值不断提高.因此,数字化是自动化的基础(如图 1 所示).

以往人们对自动化的理解是以机械的动作代替人力操作、自动地完成特定的作业.随着电子信

息技术在各领域的发展与应用,自动化的概念不断充实,智能化露天矿语境下的自动化还包括了设计自动化、办公自动化、管理自动化、过程自动化等诸多内容^[18].

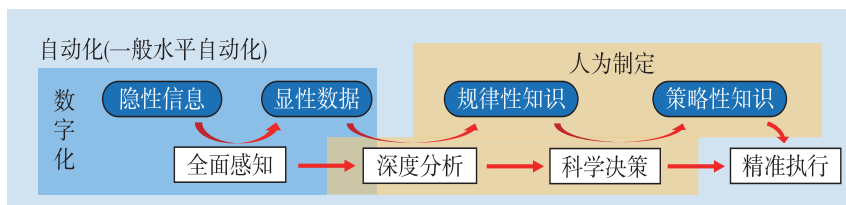


图 1 自动化(一般水平自动化)的数据驱动逻辑

Fig. 1 Data-driven logic for automation (general level automation)

2.2 “智能化、人工智能”的定义与逻辑关系

2.2.1 智能化与强人工智能

智能化是高级水平的自动化,其本质是信息知识分析、处理、决策的自动化.智能化不仅涵盖了“全面感知、深度分析、科学决策、精准执行”整个过程,更加强调“自我意识、自组织、自学习、自适

应”能力(如图 2 所示).智能化的特点:一是具有记忆和思维能力,能够利用已有的知识对信息进行分析、计算、比较、判断、联想、决策;二是具有学习能力和自适应能力,即通过与环境的相互作用,不断学习积累知识,使自己能够适应环境变化;三是具有行为决策能力,即对外界的刺激作出反应,形成决策并传达相应的信息.

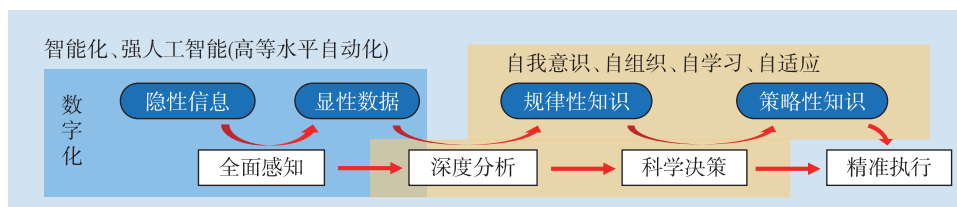


图 2 智能化、强人工智能(高级水平自动化)的数据驱动逻辑

Fig. 2 Data-driven logic of intelligent and strong artificial intelligence (advanced horizontal automation)

智能化的概念较为抽象,参考人工智能研究领域的定义:人工智能是以事实和规则为基础,对人类的专业知识进行模拟的一种技术.按照是否能够实现理解、思考、推理、解决问题等高级行为,人工智能分为强人工智能和弱人工智能,其中强人工智能指机器能像人类一样思考,有感知和自我意识,能够自发学习知识^[19].

2.2.2 弱人工智能

弱人工智能指不能像人类一样进行推理思考并解决问题的智能机器.迄今为止,所有的人工智

能均是弱人工智能,仅能实现某种特定功能的系统,通过人工对数据做分类、检测等处理,然后根据模型结果进行决策,其本质是数据归纳的方法,不具备可解释性.

当前在弱人工智能方面对于某些特定领域,如机器翻译、图片识别等,取得了一定的成绩,专用系统已接近于人类的水平.弱人工智能与常规意义的自动化相比存在以下区别:常规意义的自动化的数据处理规则由人为制定,弱人工智能的规则由机器自主提炼(如图 3 所示).

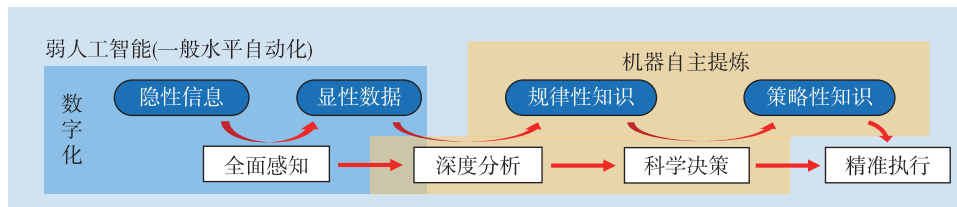


图 3 弱人工智能(一般水平自动化)的数据驱动逻辑

Fig. 3 Data-driven logic for weak AI (general level automation)

2.3 关键概念的理解与分析

由于不同专业背景的从业人员表达逻辑不一

致、非专业媒体对诸多概念进行了误导,造成了人们理解上的混乱,因此为了避免误解,必须对上述

名词在不同表述逻辑下的概念进行系统性的分析,详见表 1.

表 1 不同表述逻辑下关键概念的对应关系
Table 1 Correspondence of key concepts under different representation logics

人们交流中使用的概念	人工智能领域定义的概念	数据驱动逻辑下的概念本质	特征
数字化	数字化	数字化	使用 0 和 1 数字编码实现信息表达传输
自动化	自动化	一般水平自动化	数据处理规则由人为制定
智能化	弱人工智能	一般水平自动化	数据规则由机器自主提炼,不具备人类思考思维
智能化	强人工智能	高级水平自动化	像人类一样思考,有感知和自我意识,能够自发学习知识

综上所述,我们总结以下观点:

- 1)严格意义下的“智能化”特指“强人工智能”,本质上是高级水平的自动化,仅在表述“露天采矿行业宏观发展方向”的语境下使用,强调的是未来露天矿向着自主思考、自主决策的智慧体形态发展.
- 2)当前露天矿规划建设中的“智能化”泛指“一般水平自动化”,距离真正意义上的智能化(强人工智能)还很遥远;人工智能领域的“弱人工智能”技术实际上属于“一般水平自动化”概念范畴,产生误解的原因在于不同语境下的语言歧义.
- 3)弱人工智能技术与传统自动化技术的区别在于数据处理策略的制定方式不同,但二者不存

在优劣之分,主要原因是:第一,数据处理规则是“由人为制定”还是“由机器自主提炼”是根据具体业务场景下目标系统的结构、层次等特征决定的;第二,弱人工智能技术由于不深入涉及系统的内部机理,仅是数据表象上的挖掘与分析,因此适用范围存在一定限制.

3 “数字化、自动化、智能化”同步建设原则

3.1 数字化阶段建设发展方向

根据“数字化、自动化、智能化”的逻辑关系,智能化露天矿的发展必须要经历“数字化、自动化、智能化”3 个阶段,由于不同领域的技术成熟程度不同,不同业务版块的建设起点亦不同,因此 3 个阶段是实际上是同步开展建设的.我国露天开采行业从 2000 年就开展数字化矿山建设工作,但当前实际的数字化程度依旧很低,无论是矿山设计、生产组织还是经营管理工作,普遍缺乏精准、快捷的感知手段,作业场景中所蕴含的大量的重要数据无法被准确获取.因此,当前的重要任务是解决露天矿“再数字化”的问题.

数字化阶段的重点任务是构建信息获取、传递、存储的基本流程与手段,为下一阶段信息分析、处理提供基础.按照数字化建设在露天矿生产、经营与管理中起到的作用与意义,我们将数字化阶段的主要建设方向归纳为:信息获取精准化、信息获取便捷化、信息载体电子化(详见表 2).方向的划分是为了便于我们深入理解数字化阶段的主要任务,而实际上方向之间不存在严格的界限.

表 2 露天矿数字化阶段主要建设方向及特征
Table 2 The main construction directions and characteristics of the digitalization stage of surface mines

主要方向	典型特征	典型案例
信息获取精准化	利用先进的传感器、物联网等技术,全面、系统、精准的采集矿山生产中“人、机、物、环、管”等信息要素,为分析决策工作提供关键数据支撑	电铲全时状态数字化:应用传感器、物联网等技术,针对电铲上的重点结构件、传动部件的运行状态进行全时采集与存储
信息获取便捷化	针对获取过程繁琐、存在安全风险、人工作业强度大的信息采集工作,利用高新技术及相关装备实现信息获取的便捷化	地表快速建模:应用三维激光扫描技术、无人机技术等作为传统测绘技术的补充,实现采场三维地表信息的快速获取
信息载体电子化	针对相关单据、台账、报表、计划、预案、文件、报告等资料,将信息的编制、录入、存储、管理等工作方式由手工模式向电子化模式过度,保障信息安全、降低劳动强度、提高检索效率、提高信息管理水平	信息编码管理:构建各类设备、物件等的信息编码系统,实现常规检修、维护等作业中信息录入、存储、管理的电子化

3.2 自动化阶段建设发展方向

在露天矿“再数字化”建设的同时,逐步利用成熟的自动化技术开展露天矿生产、管理、经营相关系统及装备的升级改造工作,重点构建信息分

析、处理、决策与执行的基本流程与手段,实现提高工作效率,缩短设计决策周期、提高生产精细化程度等目标^[20].

按照露天矿生产、经营与管理的业务类别,我

们将自动化阶段的主要建设方向归纳为:设计自 表 3.
动化、办公自动化、管理自动化、生产自动化,详见

表 3 露天矿自动化阶段主要建设方向及特征
Table 3 The main construction directions and characteristics of the surface mine automation stage

建设方向	典型特征	典型案例
设计自动化	应用计算机辅助进行产品设计、性能分析、模拟试验等,缩短设计过程,提高设计的准确性与可靠性 ^[21]	采矿设计软件;实现短中长期生产计划的自动化编制,开采方式、开采程序、开拓运输系统的辅助设计、土岩流量流向优化设计等
办公自动化	应用新技术、新机器、新设备从事办公业务,改善办公环境和条件,实现科学化、自动化办公,提高办公效率,改进办公质量,缩短办公处理周期	OA 系统;实现公文流转、流程审批、文档管理、会议管理、资产管理等功能,完善职能部门之间的沟通和信息共享机制,建立企业内部的协同工作环境
管理自动化	应用系统工程的方法,实现最优控制与最优管理目标,由计算机完成大量信息的快速处理和重复性的脑力劳动,抽象问题的分析决策由人来完成 ^[22]	风险监测预警系统;通过物联网技术实时采集安全环境数据、作业人员数据等,基于安全风险指标体系和评价模型,为安全监管监察工作提供自动化决策支持
生产自动化	应用自动控制装置或系统部分或全部代替操作人员的劳动,实现生产过程中各项参数的自动调节与控制,使之达到预定的技术指标,确保整个生产过程在不同程度上自动进行 ^[23]	破碎站自动化控制;通过图像识别等技术,依据料仓内物料堆积情况、物料块度分布情况,自动化调节给料速度、齿辊转速等,提高破碎效率,降低破碎能耗

3.3 智能化阶段建设发展方向

从科学技术发展现状来看,无论是单一环节还是整体系统实现“自主感知、自主分析、自主决策”的强人工智能在未来几十年内都难以实现,因此科学严格意义上的智能化露天矿是一个理想中的建设目标,我们在此处仍沿用“智能化”这个词语仅是因为它已被广泛宣传并被大众所熟知.我们从大系统的局部和整体两个角度阐述智能化阶段建设发展方向.

3.3.1 露天矿大系统局部环节决策与执行智能化

露天矿大系统局部环节的智能化主要体现在弱人工智能技术应用上,具体包括计算机视觉、自然语言理解与交流、认知与推理、机器人学、机器学习等^[24-25].上述弱人工智能技术与相关自动化系统、装备相结合,降低信息分析、决策环节的人为参与程度,在一定程度上实现规律性及策略性知识的自主分析与提炼,详见表 4.

表 4 露天矿智能化阶段弱人工智能技术主要方向及特征^[16-17]
Table 4 Main directions and characteristics of weak artificial intelligence technology in the intelligent stage of surface mines

主要方向	典型特征	典型应用
计算机视觉技术	从视觉维度对外部环境感知,实现目标识别、跟踪测量、信息提取等,为后续的决策提供依据	视觉识别;固定场所限制区域人员智能识别及报警、固定岗位脱岗智能识别报警、基于人工智能的加油站发烟发火识别、矿区未佩戴安全帽智能识别与报警
自然语言处理技术	通过语法、语义、语用的主分析,使计算机既能理解自然语言文本的意义,也能以自然语言文本表达给定的意图、思想	应急预案主题抽取;采用词汇语义相关度计算方法,构建主题抽取模型,运用自然语言处理技术,实现应急预案主题的自动化抽取
认知与推理技术	基于已有知识,运用认知建模、知识表示、判断推理、问题求解等技术,完成限定领域决策行为	露天矿信息知识图谱;对各业务单元层级按照信息的流动规律进行解构,构建信息流知识图谱,实现大规模常识知识库与基于认知的逻辑推理
机器人学技术	研究机器人的控制与被处理物体之间的相互关系,使得机器人能够模仿人体动作功能实现多用途的自动化操作	选矸机器人;基于传感器技术实现煤、矸石及其他非煤物质的自动化识别、空间定位等,操控机械臂快速抓取非煤物质实现煤矸分离
机器学习技术	计算机系统在不遵循明确编程指令的情况下,通过数据训练模型进而开展预测的一种方法	爆破效果预测;以爆破历史数据样本为训练数据,建立监督式学习过程,将预测结果与实际结果进行比较,不断的调整模型,实现爆破效果的精准预测

3.3.2 露天矿大系统整体决策与执行智能化

露天矿是一个开放的复杂巨系统,特点是系统不仅规模巨大,属巨系统范畴,而且元素或子系统种类繁多,本质各异,相互关系复杂多变,存在多重宏、微观层次,不同层次之间关联复杂,作用机制不清,因而不可能通过简单的统计综合方法

从微观描述推断其宏观行为.钱学森院士在上世纪 90 年代指出:“研究开放的复杂巨系统,当然要靠计算机,靠知识系统,靠人工智能等技术手段,但又不能完全依靠这些机器,最终还要靠人,靠人的智慧.如果完全靠机器能解决问题,那就不是开放巨系统了”^[26-28].

上述论述对于智能化露天矿建设工作具有很强的指导意义,从根本上说明了在未来相当长的一段时间内,露天矿大系统及部分子系统的分析决策工作是不可能脱离人来完成的.同时,钱学森、戴汝为院士等还提出^[29-32]“处理这种开放的复杂巨系统,在目前只能用从定性到定量的综合集成法,就其本质而言,是将专家群体、数据和各种信息与计算机技术有机结合起来,把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来”,并命名“从定性到定量综合集成”为“大成智慧工程”,其本质是人机交互的智能平台.当前智能化露天矿建设中,诸如露天矿综合管控系统、露天矿时空演化系统、露天矿数字孪生系统等建设内容都是上述思想的体现形式.

实现完整的人机交互功能至少要完成露天矿基础数字化进程,建立数据中心及算力中心,同时构建大型专家知识库、可视化支撑平台、大数据分析平台、时空推演应用平台等等,由于涉及内容极其复杂、功能众多、开发费用高,在完整的构建出露天矿知识图谱之前,此类系统的建设工作难度极大.值得强调的是,当前诸多矿山建设的“综合管控平台”的系统本质上仅是“综合集成展示平台”,与大成智慧工程指导下的人机交互智能平台并非同一概念.

4 “应用一代、布局一代、探索一代”同步发展战略

4.1 工业互联网建设经验分析

作为基础能源行业的细分领域,当前针对露天矿开发的智能化产品与系统相对较少,整体上尚处于探索阶段.因此建设中必须参考当前发展相对较为成熟的工业互联网发展情况,进而形成科学的规划发展战略.参考《2020 中国技术发展白皮书》《中国制造业企业智能化路径研究报告》等^[33-34],总结我国当前工业互联网发展中的部分重要经验如下:

1) 整个工业体系中,中国拥有 41 个工业大类, 191 个中类, 525 个小类,整体市场规模庞大,但实际上每个细分市场规模都较小.由于工业智能化呈现高度碎片化特征,技术门槛和壁垒高、互相之间的技术复用性差,因此难以产生规模效应,导致工业互联网行业利润远远低于传统互联网行业.

2) 行业属性影响了平台向不同细分领域渗透与复制的难度,影响因素包括边际改善的高低、流程的复杂性、行业本身产业链特点.工业领域中整

体流程复杂程度高、行业技术壁垒高、环境非标准化的场景开展智能化建设的难度极大.

3) 数据是平台的核心资产与价值来源,数据分析、挖掘、利用的程度决定了平台的应用价值.当前基于数据深度分析与建模的资产管理服务与生产过程管控应用较多,与工业机理深度融合的平台在开发过程中具有较高壁垒,高机理复杂度的应用占比较低.

4) 制造业的智能化一般从生产环节入手,从价值量最高、复杂程度中等的生产环节开始,然后到价值量适中、复杂程度低的财务、人力管理环节,最终到价值量、复杂程度均高的制造与工艺管理环节(如图 4).

5) 管理平台市场产品目前集中于设备监控、流程管理、远程运维,现阶段最大的应用需求为监控生产运营情况和提升资源使用效率.在现有发展状况下,设备资产管理是目前落地最广泛的场景,生产制造优化其次.发展迅速主要原因是应用逻辑相对简单、模式容易复制,行业属性弱,推广难度低.

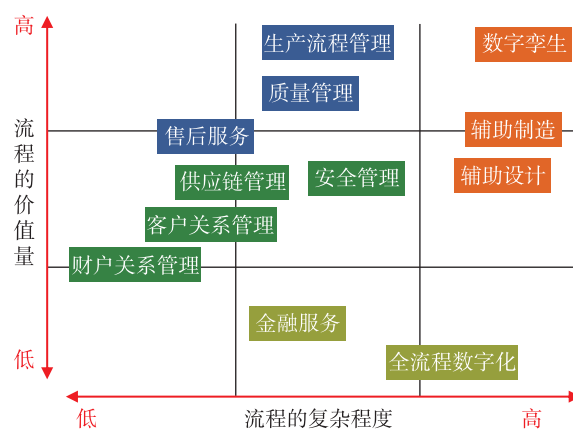


图4 工业互联网领域不同类型应用的流程价值与复杂程度^[29]

Fig. 4 Process value and complexity of different types of applications in the industrial Internet field

4.2 智能化露天矿同步发展战略

首先必须明确的是,露天矿智能化技术体系目前整体上尚不成熟,各项系统仍在研究与探索之中,建设工作也并非只是系统与装备的购置工作,还需要系统化、专业化的设计、生产、管理等相关人员做基础支持.尤其是对于以非专业化外委队伍为主要生产实践主体的中小型民营矿山,由于专业化水平低、基础薄弱等诸多原因,目前难以真正完成智能化露天矿建设.因此,此类矿山应当结合自身特点,优先补齐基础短板.另外,在矿山开展智能化建设工作中,传统设计、工艺方法等研究工作

变得更加重要,如果传统的基础研究发展停滞,智能化技术再先进也只是原地踏步;如果工艺的设计、装备的应用及生产组织管理方式本身就存在问题,那么在此基础上发展智能化只会错上加错.

考虑到露天矿的智能化升级改造工作是一项庞大的系统工程,投资庞大、周期漫长、存在一定的技术风险,因此必须遵循市场经济与技术发展基本规律,科学合理确定阶段重点建设方向与投入规模.参考我国国防装备更新的“服役一代、研制一代、预研一代、探索一代”基本发展原则,我们提出智能化露天矿同步发展战略——“应用一代、布局一代、探索一代”,当前矿山企业在整体投入比重上,要确保“应用一代 > 布局一代 > 探索一代”.

4.2.1 应用一代

“应用一代”主要针对当前已经成熟应用的工艺系统及装备、已经投入使用的软硬件及系统,充分发挥其效应;在智能化方面重点关注市面上技术成熟度高、改造升级成本低的相关装备技术与系统.“应用一代”强调“投入即见效”,资金投入的本质上是成熟系统与装备的购置.我们认为对于多数矿山企业,智能化改造资金应主要投入到“应用一代”的项目建设工作中.

参考工业互联网建设经验,应用一代中主要建设资产管理服务、生产流程管理(设备监控、流程管理、远程运维)、财务管理等技术成熟的基础应用.根据资金投入情况,逐步完善基础数字化建设、引入技术成熟的自动化系统及装备,详见表 5.

表 5 “应用一代”典型建设内容
Table 5 Typical construction content of “Application Generation”

业务版块	建设的系统、装备及技术举例
地质保障	测绘管理系统、地质信息管理、无人机测绘等
矿山设计	采矿、爆破设计软件(实现基础设计、可视化、报表等功能)
矿山工程	设备数字化监控(设备健康监测、能耗监测等)、卡车防碰撞、防疲劳驾驶系统、破碎站自动控制系统、卡车调度系统、无人巡检系统、胶带跑偏保护等
矿山机电	供配电管理、维修维护管理、备品备件信息编码管理等
安全环保	边坡监测系统、电子围栏、大型装备盲区监测系统、疏干排水系统、环境监测系统、隐患排查治理、视频监控、违章管理、安全培训、职业卫生与健康管理
经营管理	采购管理、销售管理、财务管理、企业资源计划(ERP)系统、办公自动化(OA)系统、班组及部门综合考核系统
其他	基础通讯网络、数据中心、智能厂区、智能化指挥中心、办公环境智能化等

4.2.2 布局一代

“布局一代”主要针对具有潜在应用价值的新装备、新工艺、新技术、新系统等,经过可行性论证后、需要进一步开展研发、实践的规划内容.“布局一代”的资金投入本质上是技术研发投资,具有不确定性,尤其是针对采矿专业性较强的建设内容,需要矿山企业及项目承担单位共同参与研发工作,因此理论上技术成果应归属于双方.在这一前提下,矿山企业不仅需要考虑资金投入和直接效益,还需要考虑后期成果转化与市场推广的潜在效益.

参考工业互联网建设经验,结合露天矿智能化装备及系统的研发难易程度分析,“布局一代”的典型建设内容如表 6 所示.

表 6 “布局一代”典型建设内容
Table 6 Typical construction content of “Layout Generation”

业务版块	建设的系统、装备及技术举例
地质勘探	勘探技术升级
矿山设计	采矿、爆破设计软件(实现综合辅助优化设计、具备方案推送功能)
矿山生产	露天矿综合调度指挥系统(采装工程智能化管控、运输工程智能化管控、破碎环节作业计划与运行智能化管控、露天矿排土及尾矿库生产计划智能化管控)、岩性自动识别、钻孔质量自动监测、钻机智能化控制、混装车智能装药、爆破质量评价、电铲智能化控制、卡车无人驾驶、卡车智能作业辅助、道路质量评价、推土机作业智能辅助等
矿山机电	故障自动化诊断、数字化点检、供配电智能化管控等
安全环保	风险监测预警系统等
经营管理	人机交互智能系统(露天矿综合管控系统、露天矿时空演化系统、露天矿数字孪生系统)(实现生产、管理与经营的基础数据汇总)、产运销一体化管理等

4.2.3 探索一代

“探索一代”主要针对现有基础理论支持、具备战略性发展意义,实现技术跨界,颠覆传统采矿行业生产管理经营模式的新技术、新工艺或新设备.

相比“布局一代”的研发投资,“探索一代”的资金投入风险与收益更高,对于项目承担单位的技术水平有着极高的要求,建议由国家组织牵头,通过国家重点研发专项、国家自然科学基金项目等形式组织立项,承担主体一般是具有相当实力的装备厂商、高校及科研院所、高新技术公司.基于对行业发展方向的研判,“探索一代”主要建设具有技术挑战性的项目,如表 7 所示.

表 7 “探索一代”典型建设内容
Table 7 Typical construction content of
“Exploration Generation”

业务版块	建设的系统、装备及技术举例
地质勘探	透明地质技术
矿山设计	采矿、爆破设计软件(实现仿真推演、虚拟开采等功能)
矿山生产	新工艺技术、新装备技术、设计施工一体化综合管控、智能钻机、智能电铲、智能卡车、智能推土机等(实现装备的高效、低成本、无人或智能辅助作业)
矿山机电	智能化维检(预知维修)
安全环保	新能源装备
生产经营管理	人机交互智能系统(露天矿综合管控系统、露天矿时空演化系统、露天矿数字孪生系统)(实现生产、管理与经营基础数据的智能化综合分析决策)

5 结 论

1) 上世纪初发展成型的信息论、系统论、控制论是智能化露天矿发展的理论基础。“数字矿山”“感知矿山”“矿山物联网”“互联网+矿山”“矿山两化融合”“工业 4.0+矿山”“矿山信息物理系统”“智能化矿山”等概念本质上都是信息论、系统论、控制论思想的外延。

2) “数字化、自动化、智能化”等可统称为信息化,智能化矿山、智慧矿山也是工业信息化进程中的产物之一.数字化是自动化的基础,智能化是高级水平的自动化.当前规划建设中的“智能化露天矿”本质上是“一般水平自动化”,距离真正的智能化(强人工智能)比较远。

3) 数字化阶段的主要建设内容是信息获取精准化、信息获取便捷化、信息载体电子化;自动化层面的主要建设内容是设计自动化、办公自动化、管理自动化、生产自动化;智能化阶段的主要建设内容是大系统局部环节智能化与大系统全局决策智能化。

4) 我国当前工业互联网的发展经验显示,由于工业智能化难以产生规模效益,利润远远低于传统互联网行业,因此露天矿智能化建设中必须考虑研发中的技术风险,尤其对于工业领域中整体流程复杂程度高、行业技术壁垒高、环境非标准化的场景而言,开展智能化建设的难度极大。

5) 当前智能化露天矿建设应遵循“应用一代、布局一代、探索一代”的发展战略,“应用一代”强调“投入即见效”,“布局一代”强调技术跨界,颠覆传统采矿行业生产管理经营模式的新技术、新工艺或新设备.因此,矿山企业在整体投资比重上,要确保“应用一代 > 布局一代 > 探索一代”。

参考文献：

[1] 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.

[2] 王忠鑫,辛凤阳,宋 波,等.论露天煤矿智能化建设总体设计[J].煤炭科学技术,2022,50(2):37-46.
WANG Zhongxin, XIN Fengyang, SONG Bo, et al. On the overall design of intelligent construction of open-pit coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 37-46.

[3] 王忠鑫,田凤亮,辛凤阳,等.露天煤矿智能化建设构建场景生态是关键[J].智能矿山,2022,3(6):93-100.
WANG Zhongxin, TIAN Fengliang, XIN Fengyang, et al. Intelligent construction of open-pit coal mine is the key to construct scene ecology [J]. Intelligent Mine, 2022, 3(6): 93-100.

[4] 付恩三,刘光伟,赵 浩,等.智能露天矿山框架及关键技术[J].煤炭工程,2022,54(9):24-30.
FU Ensan, LIU Guangwei, ZHAO Hao, et al. Intelligent open-pit mine framework and key technologies [J]. Coal Engineering, 2022, 54(9): 24-30.

[5] 付恩三,刘光伟,王新会,等.基于“互联网+”智慧露天煤矿建设发展新构想[J].中国煤炭,2020,46(2): 35-41.
FU Ensan, LIU Guangwei, WANG Xinhui, et al. Based on the new concept of "Internet +" intelligent open-pit coal mine construction and development[J]. China Coal, 2020, 46(2): 35-41.

[6] 孙健东,张瑞新,周科平,等.论智能化露天矿建设的问题、目的与途径[J].智能矿山,2022,3(12):2-10.
SUN Jiandong, ZHANG Ruixin, ZHOU Keping, et al. The fundamental purpose and approach of building intelligent surface mines [J]. Intelligent Mine, 2022, 3(12): 2-10.

[7] 孙健东,张瑞新,贾宏君,等.我国露天煤矿智能化发展现状及重点问题分析[J].煤炭工程,2020,52(11): 16-22.
SUN Jiandong, ZHANG Ruixin, JIA Hongjun, et al. Research and key issues on intelligent development of surface coal mines in China[J]. Coal Engineering, 2020, 52(11): 16-22.

[8] 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.
- [9] 陈建华,何彬彬,崔莹,等.面向智能成矿预测的案例推理模型与方法[J].中国矿业大学学报,2012,41(1):114-119.
- CHEN Jianhua, HE Binbin, CUI Ying, et al. Case-based reasoning model and method for intelligent metallogenic prediction [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(1): 114-119.
- [10] 何生全,何学秋,宋大钊,等.冲击地压多参量集成预警模型及智能判别云平台[J].中国矿业大学学报,2022,51(5):850-862.
- HE Shengquan, HE Xueqiu, SONG Dazhao, et al. Rock burst multi-parameter integrated early warning model and intelligent identification cloud platform[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(5): 850-862.
- [11] 赵颖旺,武强,王潇,等.基于人工智能的矿井水害灾情研判及预测研究[J].中国矿业大学学报,2023,52(1):10-19.
- ZHAO Yingwang, WU Qiang, WANG Xiao, et al. Research on artificial intelligence-based mine water disaster assessment and prediction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1): 10-19.
- [12] 中共中央办公厅,国务院办公厅.2006—2020 年国家信息化发展战略[EB/OL]. (2006-03-19) [2022-10-28]. <https://dnr.henan.gov.cn/2014/12-26/1862973.html>.
- Office of the Central Committee of the Communist Party of China, Office of the State Council. National information development strategy 2006—2020 [EB/OL]. (2006-03-19) [2022-10-28]. <https://dnr.henan.gov.cn/2014/12-26/1862973.html>.
- [13] 中华人民共和国工信部.关于加快推进信息化与工业化深度融合的若干意见[EB/OL]. (2011-04-21) [2022-10-28]. http://www.gov.cn/zwgk/2011-04/21/content_1849320.html.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Opinions on accelerating the deep integration of informatization and industrialization[EB/OL]. (2011-04-21) [2022-10-28]. http://www.gov.cn/zwgk/2011-04/21/content_1849320.html.
- [14] 工业和信息化部信息化推进司.转型与调整:中国信息化发展报告 2010[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- Ministry of Industry and Information Technology Information Promotion Division. Transformation and adjustment: China information development report 2010 [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.
- [15] 国务院信息化工作办公室政策规划组.国家信息化发展战略学习读本[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- Policy Planning Group of the Information Work Office of the State Council. National information development strategy reading [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007.
- [16] MBA智库.数字化[EB/OL]. (2022-03-15) [2022-10-28]. <https://wiki.mbalib.com/wiki/%E6%95%B0%E5%AD%97%E5%8C%96>.
- MBA Think Tanks. Digital [EB/OL]. (2022-03-15) [2022-10-28]. <https://wiki.mbalib.com/wiki/%E6%95%B0%E5%AD%97%E5%8C%96>.
- [17] 林军.“数字化”、“自动化”、“信息化”与“智能化”的异同及联系[J].电气时代,2008(1):132-137.
- LIN Jun. Differences and connections between "digitization", "automation", "informationization" and "intelligence"[J]. Electrical Age, 2008(1):132-137.
- [18] 本刊编辑部,马磊,赵永霞.从自动化、数字化到智能化的工业 4.0 系统解决方案[J].纺织导报,2020(3):26-28.
- Editorial Department, MA Lei, ZHAO Yongxia. Industrial 4.0 system solutions from automation, digitization to intelligence[J]. Textile Report, 2020(3):26-28.
- [19] 刘卫国.现代化、信息化、数字化、智能化及其相互关系[J].中国铁路,2011(1):83-86.
- LIU Weiguo. Modernization, informatization, digitization, intelligence and their relationship [J]. China Railway, 2011(1): 83-86.
- [20] 李靖一.自动化发展趋势[J].环球市场信息导报,2017(41):120.
- LI Jingyi. Automation development trend[J]. Global Market Information Report, 2017(41): 120.
- [21] MBA智库.工业自动化[EB/OL]. (2016-12-21) [2022-10-28]. <https://wiki.mbalib.com/wiki/%E5%B7%A5%E4%B8%9A%E8%87%AA%E5%8A%A8%E5%8C%96>.
- MBA Think Tanks. Industrial automation[EB/OL]. (2016-12-21) [2022-10-28]. <https://wiki.mbalib.com/wiki/%E5%B7%A5%E4%B8%9A%E8%87%AA%E5%8A%A8%E5%8C%96>.

- [22] MBA智库.管理自动化[EB/OL].(2017-01-17)[2022-10-28].<https://wiki.mbalib.com/wiki/%E7%AE%A1%E7%90%86%E8%87%AA%E5%8A%A8%E5%8C%96>.
MBA Think Tanks. Management automation[EB/OL].(2017-01-17)[2022-10-28].<https://wiki.mbalib.com/wiki/%E7%AE%A1%E7%90%86%E8%87%AA%E5%8A%A8%E5%8C%96>.
- [23] MBA智库.生产过程自动化[EB/OL].(2017-01-05)[2022-10-28].<https://wiki.mbalib.com/wiki/%E7%94%9F%E4%BA%A7%E8%BF%87%E7%A8%8B%E8%87%AA%E5%8A%A8%E5%8C%96>.
MBA Think Tanks. Production process automation[EB/OL].(2017-01-05)[2022-10-28].<https://wiki.mbalib.com/wiki/%E7%94%9F%E4%BA%A7%E8%BF%87%E7%A8%8B%E8%87%AA%E5%8A%A8%E5%8C%96>.
- [24] 中国电子技术标准化研究院.人工智能标准化白皮书(2018年)[EB/OL].(2018-01-19)[2022-10-28].<https://www.163.com/dy/article/GPA09NQR0551MFDN.html>.
China Institute for Standardization of Electronic Technology. White paper on standardization of artificial intelligence (2018)[EB/OL].(2018-01-19)[2022-10-28].<https://www.163.com/dy/article/GPA09NQR0551MFDN.html>.
- [25] 顾清华,江松,李学现,等.人工智能背景下采矿系统工程发展现状与展望[J].金属矿山,2022(5):10-25.
GU Qinghua, JIANG Song, LI Xuexian, et al. Development status and prospect of mining system engineering under the background of artificial intelligence [J]. Metal Mines, 2022(5):10-25.
- [26] 钱学森,于景元,戴汝为.一个科学新领域:开放的复杂巨系统及其方法论[J].自然杂志,1990(1):3-10.
QIAN Xuesen, YU Jingyuan, DAI Ruwei. A new field of science: Open complex giant systems and their methodology[J]. Journal of Nature, 1990(1):3-10.
- [27] 钱学森.再谈开放的复杂巨系统[J].模式识别与人工智能,1991(1):1-4.
QIAN Xuesen. Open complex giant systems[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1991(1):1-4.
- [28] 钱学敏.钱学森关于复杂系统与大成智慧的探索[J].北京联合大学学报(自然科学版),2006(4):5-11.
QIAN Xuemin. Qian Xuesen's exploration of complex systems and great wisdom [J]. Journal of Beijing United University(Natural Science Edition), 2006(4):5-11.
- [29] 戴汝为.钱学森论大成智慧工程[J].中国工程科学,2001(12):14-20.
DAI Ruwei. Qian Xuesen's view on metasynthetic engineering [J]. Engineering Science, 2001(12):14-20.
- [30] 钱学敏.略论复杂系统与大成智慧[J].系统辩证学学报,2005(4):30-35.
QIAN Xuemin. Outline of complex system and metasynthetic wisdom[J]. Journal of Systematic Dialectics, 2005(4):30-35.
- [31] 戴汝为.人-机结合的智能科学和智能工程[J].中国工程科学,2004(5):24-28.
DAI Ruwei. Man-computer cooperative intelligent science and intelligent technology [J]. China Engineering Science, 2004(5):24-28.
- [32] 武林.元维条件体系及其在交通发展方面的运用:大成智慧工程综合集成的框架与模型[J].钱学森研究,2016(2):89-109.
WU lin. Metadimensional conditional system and its application in traffic development: Framework and model of integrated Dacheng intelligent engineering [J]. Qian Xuesen Research, 2016(2):89-109.
- [33] InfoQ研究院.2020中国技术发展白皮书[EB/OL].(2020-08-14)[2022-10-28].<https://www.163.com/dy/article/G0PBE3SV0511BHI0.html>. InfoQ Research Institute. 2020 China technical development white paper [EB/OL].(2020-08-14)[2022-10-28].<https://www.163.com/dy/article/G0PBE3SV0511BHI0.html>.
- [34] 艾瑞咨询研究院.中国智能制造之路—中国制造业企业智能化路径研究报告[EB/OL].(2019-04-25)[2022-10-28].<https://max.book118.com/html/2022/1201/5143221314010024.shtm>.
Erie Consulting Institute. Road to intelligent manufacturing in China-research report on intelligent path of Chinese manufacturing enterprises [EB/OL].(2019-04-25)[2022-10-28].<https://max.book118.com/html/2022/1201/5143221314010024.shtm>.