文章编号: 1671-251X(2025)01-0119-07 DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024010007

露天煤矿智能化能力成熟度与演进逻辑研究

王忠鑫[1,2]， 田凤亮[2]， 孙鑫[2]， 郭晓松[2]， 黄俊婷[2]， 王磊[2]， 张忠文[2]， 赵广志[2]， 宋波[2]， 曾祥玉[2]

（1. 辽宁工程技术大学 矿业学院，辽宁 阜新 123000；
2. 中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司，辽宁 沈阳 110015）

摘要: 现有针对智能化露天煤矿建设的研究主要聚焦于智能化露天煤矿总体规划、基本架构、建设内容的完整性评价等方面，关于智能化露天煤矿建设完成后运行效果综合评价的研究很少。提出了露天煤矿智能化能力的概念，即矿山巨系统对内外部环境变化能够自主做出合理响应的综合能力，是评价露天煤矿智能化程度最重要的标志。基于能力成熟度模型，从功能完整性、功能活跃性、系统结构性、数据利用高效性 4 个维度建立了露天煤矿智能化能力成熟度评价模型。分析了影响露天煤矿智能化能力成熟度的主要因素，发现单纯追加投资、扩建系统不能保障智能化能力的成熟，通过科学的规划，尽量采用少的功能来实现智能化建设目标，智能化建设效益将更加显著。从智能化露天煤矿能力成熟度评价模型出发，提出了露天煤矿智能化建设应遵循的减法逻辑、生态逻辑、重构逻辑与自洽逻辑，并给出了未来露天煤矿智能化发展的总体目标——全面建成“001”模式智能化露天煤矿，即移动设备及固定岗位全无人值守（“0 人员”）、场景生态全覆盖（“0 盲区”）、业务管控一体化（“1 大脑”）。

关键词: 智能矿山；露天煤矿；智能化评价；智能化能力成熟度；演进逻辑

中图分类号: TD824 文献标志码: A

Research on the intelligent capability maturity and evolution logic of open-pit coal mines

WANG Zhongxin[1,2], TIAN Fengliang[2], SUN Xin[2], GUO Xiaosong[2], HUANG Junting[2], WANG Lei[2], ZHANG Zhongwen[2], ZHAO Guangzhi[2], SONG Bo[2], ZENG Xiangyu[2]

(1. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;
2. CCTEG Shenyang Engineering Company, Shenyang 110015, China)

Abstract: Existing studies on the construction of intelligent open-pit coal mines have primarily focused on areas such as overall planning, basic architecture, and the evaluation of the completeness of construction content. However, there has been limited research on the comprehensive evaluation of operational effectiveness after the construction of intelligent open-pit coal mines. This paper introduces the concept of intelligent capability in open-pit coal mines, defined as the mine's ability to autonomously respond to internal and external environmental changes in a reasonable manner. It is the most critical indicator for assessing the intelligence level of open-pit coal mines. Based on the capability maturity model, an evaluation model for the intelligent capability maturity of open-pit coal mines was established from four dimensions: functional completeness, functional activity, system structure, and data utilization efficiency. The main factors affecting the intelligent capability maturity of open-pit coal mines were analyzed, and it was found that simply increasing investment and expanding systems cannot guarantee the maturity of intelligent capabilities. Through scientific planning and the use of fewer functions to achieve intelligent construction goals, the benefits of intelligent construction were shown to be more significant.

收稿日期: 2024-01-04; **修回日期**: 2025-01-19; **责任编辑**: 盛男。

基金项目: 国家重点研发计划项目（SQ2023YFF1300285）；中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项重点项目（2023-ZD002）；沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目（RC220436，RC220484，RC230427）。

作者简介: 王忠鑫（1984—），男，内蒙古赤峰人，教授级高级工程师，博士研究生，研究方向为露天煤矿智能开采技术与成套装备研制，E-mail: wzx_syy@qq.com。

引用格式: 王忠鑫，田凤亮，孙鑫，等. 露天煤矿智能化能力成熟度与演进逻辑研究[J]. 工矿自动化，2025，51(1)：119-125.
WANG Zhongxin, TIAN Fengliang, SUN Xin, et al. Research on the intelligent capability maturity and evolution logic of open-pit coal mines[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(1): 119-125.

扫码移动阅读

Building on the intelligent capability maturity evaluation model, the paper proposed the subtraction logic, ecological logic, reconstruction logic, and self-consistency logic that should guide the intelligent construction of open-pit coal mines. Additionally, the overall goal for the future intelligent development of open-pit coal mines was outlined: the comprehensive establishment of the "001" model for intelligent open-pit coal mines, which encompasses full unmanned operation for both mobile devices and fixed positions ("0 personnel"), full ecological coverage of scenarios ("0 blind spots"), and integrated business and control ("1 brain").

Key words: intelligent mining; open-pit coal mine; intelligence evaluation; intelligent capability maturity; evolution logic

0 引言

截至 2023 年底，我国 40 余座大型露天煤矿全部启动了智能化建设工作，其中 5 座国家首批智能化示范露天煤矿已经全部完成验收，均达到“中级”智能化水平。广大科技工作者针对智能化露天煤矿规划设计理论和建设实施路径开展了大量研究工作，探索形成了丰富的理论研究和工程实践成果。

王忠鑫等[1-3]分析了中国露天煤矿的开发现状和实际基础条件，剖析了露天煤矿智能化建设面临的困境和问题根源，提出了露天煤矿智能化建设的设计思想、场景生态理念、分级原则、建设目标、设计内容、业务架构、技术架构、数据架构、投入产出评价方法等系统性的规划设计方法。孙健东等[4]提出了当前我国露天煤矿智能化规划面临的问题，从智能化知识图谱构建、矿山合理智慧程度评价体系构建、规划内容优先级决策 3 个方面提出了建议。顾清华等[5]围绕“双碳”背景下露天矿低碳智能开采转型升级问题，提出了露天矿智能化建设新模式，即清洁能源开发及碳封存与利用、露天矿开采设计的新理念、新能源智能装备定制化方案及露天矿无人连续生产工艺。付恩三等[6]根据《煤矿智能化建设指南（2021 年版）》，从建设内容完整性角度构建了包括智能技术应用、智能安全治理、智能环境体系、智能基础设施及智能应急体系 5 个一级指标的评价指标体系和评价模型，并对 45 处露天煤矿进行了评价。然而，已有研究主要聚焦于智能化露天煤矿总体规划、基本架构、建设内容的完整性评价等方面，关于智能化露天煤矿建设完成后运行效果综合评价的研究很少。

当前，我国露天煤矿智能化发展正处于从“试点示范”向“全面深化推广”的关键节点，迫切需要建立一套能够定量表征智能化建设实效的评价方法。因此，本文构建露天煤矿智能化能力成熟度评价模型，进而基于评价结果揭示露天煤矿智能化向更高阶段发展的底层逻辑及发展路径，以期为科学建设智能化露天煤矿提供参考依据。

1 露天煤矿智能化能力成熟度评价模型

露天煤矿的智能化能力是指矿山巨系统对内外部环境变化能够自主做出合理响应的综合能力，是评价露天煤矿智能化程度最重要的标志。为科学评价露天煤矿的智能化能力，定量表征智能化建设的实效，本文基于能力成熟度模型（Capability Maturity Model, CMM）[7-10]，从以下 4 个维度构建露天煤矿智能化能力成熟度评价模型：① 功能完整性，即智能化建设覆盖各生产环节的程度。② 功能活跃度，即智能应用常态化运行的程度。③ 系统结构性，即系统间数据联动的频繁程度。④ 数据利用高效性，即数据流转的效率和驱动系统自主运行的程度。

1.1 功能完整性指标

定义功能为具备参与者、环境、行为、结果 4 个要素的实体。参与者可以是人，也可以是算法；环境是功能起作用的必要条件；行为是参与者与环境的交互；结果为功能的输出。

功能完整性指标用以表征露天煤矿智能化建设的系统性和全面性程度。由于智能化露天煤矿建设具有“一矿一策”特点，不同露天煤矿的评价基准是非一致性的[7]。假设露天煤矿的智能化功能完整性集合 $Q=\{q_i\}$（$i=1, 2, \cdots, N$，N 为应建设的智能化功能数量），q_i 为露天煤矿的智能化功能，露天煤矿已建设的智能化功能集合 $P=\{q_j\}$（$j=1, 2, \cdots, n$，n 为已建设的智能化功能数量，$n\leqslant N$），则露天煤矿的智能化建设功能完整性指标为

$$C = n/N \tag{1}$$

由式（1）可知，$0\leqslant C\leqslant 1$。C 越大，表明露天煤矿智能化功能建设越全面。

1.2 功能活跃度指标

功能活跃度指标用以表征露天煤矿已建智能化系统常态化运行的程度。若露天煤矿常态化运行的功能数量为 w，则露天煤矿的功能活跃度指标为

$$A = w/n \tag{2}$$

由式(2)可知，$0 \leqslant A \leqslant 1$，$A$ 与应建设的智能化功能数量 N 无关。A 越大，表明系统常态化运行越好。

事实上，智能化功能持续常态化运行是十分困难的[8]，既要求功能本身的高度可用性，也需要对露天煤矿的组织、流程、人员配置等做出相应调整。

1.3　系统结构性指标

系统结构性指标用以表征露天煤矿智能化系统联动的程度。系统间的联动必然存在数据交换，这种交换可能是单纯的数据转移(如监测数据存储到数据库)，也可能是数据转换(如利用车辆采集到的障碍物信息配合 GIS 系统更新地图)。相比于数据转移，数据转换更能发挥数据的价值。

定义 $r_{i,j}(i, j=1, 2, \cdots, w)$ 来标志系统功能间是否存在联动。如果功能 q_i 与 $q_j(i \neq j)$ 间以数据交换的形式实现了联动，二者的功能性因此获得提升，则 $r_{i,j}=1$，否则 $r_{i,j}=0$。当 $i=j$ 时，$r_{i,j}=1$。各个系统功能之间的联动关系形成关系矩阵 $\boldsymbol{R}$。

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,w} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,w} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{w,1} & r_{w,2} & \cdots & r_{w,w} \end{bmatrix} \tag{3}$$

则露天煤矿的系统结构性指标为

$$S = e/w^2 \tag{4}$$

式中 e 为实现系统联动而进行数据交换的总数。

其中，e 的计算表达式为

$$e = \sum r_{i,j} \tag{5}$$

由式(4)可知，$0 \leqslant S \leqslant 1$。$S$ 越大，表明智能化系统间联动越多，系统结构性越强。当 $S=1$ 时，说明系统中的“数据孤岛”彻底消失。

1.4　数据利用高效性指标

数据利用高效性指标用以表征露天煤矿智能化系统间数据转换的强度。数据转换产生的价值主要表现为不确定性的降低，不确定性的降低可用信息增益衡量，因此可用信息增益反映数据转换强度。假设功能 q_i 与 q_j 之间存在数据交换，而无数据转换时，信息熵为

$$H = -p(x)\sum \ln p(x) \tag{6}$$

式中 $p(x)$ 为数据 x 的概率分布。

增加数据转换后，概率分布为 $p_{\mathrm{f}}(x)$，则信息熵为

$$H_{\mathrm{f}} = -p_{\mathrm{f}}(x)\sum \ln p_{\mathrm{f}}(x) \tag{7}$$

信息增益为

$$G = H - H_{\mathrm{f}} \tag{8}$$

对于大部分智能化露天煤矿，其建设的智能化系统众多，且量化各类数据的概率分布十分困难。为简化评价模型，本文以数据转换次数 v 表征数据利用效率。

$$v = \sum t_{i,j} \tag{9}$$

式中 $t_{i,j}(i, j=1, 2, \cdots, w)$ 为系统之间是否存在数据转换的标志，如果 $G>0$，则记 $t_{i,j}=1$。

根据式(9)可知，有 $w<v<w^2$。露天煤矿的数据利用高效性指标为

$$E = v/e \tag{10}$$

E 反映了数据交换中数据转换所占比例，其值越大，说明露天煤矿的数据利用效能越高。当 $E=0$ 时，说明各功能之间的数据交换只是单纯的数据转移，数据价值未被充分利用，系统的不确定性降低有限。

1.5　露天煤矿智能化能力成熟度

综合考虑露天煤矿智能化的功能完整性、功能活跃度、系统结构性与数据利用高效性，露天煤矿智能化能力成熟度为

$$M = CASE = \frac{n}{N}\frac{w}{n}\frac{e}{w^2}\frac{v}{e} = \frac{v}{Nw} \tag{11}$$

2　露天煤矿智能化能力成熟度理论分析

令 $\varepsilon=v/w$，ε 表示常态化运行的智能化功能的数据转换能力平均值，即数据转换密度，表征露天煤矿智能生态化的程度，则式(11)可转换为

$$M = \varepsilon/N \tag{12}$$

对于不同露天煤矿，应建设的智能化功能数量 N 越大，说明其业务系统越复杂，智能化场景越多，对智能生态化的要求越高，智能化能力成熟度越小。

对于某一特定露天煤矿，M 的唯一决定因素为 ε。但数据转换密度 ε 不取决于个别功能，而依赖于规模化的系统生态[8-12]。

由式(11)可知，ε 与 n, w, e 相关，但无法由这些变量直接控制，属于典型的内生变量。这说明追加投资、扩建系统等行为决定了既定露天煤矿智能化能力的上限，但并不是保障其能力成熟的充分条件，反映了智能化能力成熟度的内生性。当 $n=w=N$ 时，即露天煤矿应建系统全部建成且投入使用，M 可表示为

$$M = v/N^2 \tag{13}$$

式(13)表明，智能化系统的数据转换次数越多，能力成熟度越高。

露天煤矿应建设的智能化功能数量 N 与智能化能力成熟度 M 的关系曲线如图 1 所示（不同数据转

换密度ε_1—ε_3之间的关系为$\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$）。在数据转换密度$\varepsilon$一定的情况下，$N$越小，$M$越大。这表明应通过科学的规划，尽量减少应建设的智能化功能数量以提升智能化能力成熟度。但目前国内外关于如何减少功能数量方面缺乏深入研究，而通过不断增加功能数量来进行智能化建设仍是普遍做法，导致应建设的智能化功能数量N取值普遍较大。另外，当规划的应建设的智能化功能数量N相同时，不同数据转换密度ε也会影响露天煤矿智能化能力成熟度，ε越大，M越大。

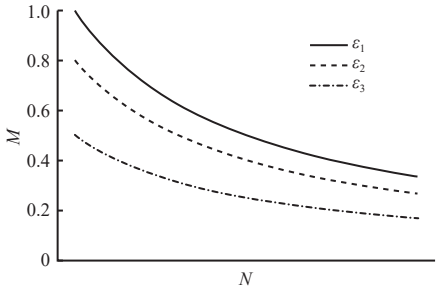

图 1　露天煤矿应建设的智能化功能数量与智能化能力成熟度之间的关系曲线

Fig. 1　Relationship curve between the number of intelligent functions to be constructed in open-pit coal mines and intelligent capability maturity

3　露天煤矿智能化演进逻辑与目标

本文在对露天煤矿智能化能力成熟度进行量化评价的基础上，提出露天煤矿智能化演进的减法逻辑、生态逻辑、重构逻辑、自洽逻辑，并给出演进目标。

3.1　露天煤矿智能化演进逻辑

3.1.1　减法逻辑

减法逻辑的基本思路是对系统数量做减法，用更少的系统数量体现更多的数据价值。根本目的是强化智能化建设的基础水平，以合理的系统数量实现既定的目标和智能化水平。具体要求为结合智能化煤矿子系统建设现状及未来建设目标，从系统融合、系统整合、系统替代 3 个方面来实现。

1）系统融合。系统融合是指打通有继承关系子系统间的信息壁垒[12]，构建系统之间的业务逻辑和系统要素之间的层次关系，建立业务关联，实现业务融合、要素融合和数据融合。以地质保障系统和灾害预警系统为例，前者主要用于矿山三维地质模型构建、采矿规划设计、资源储量管理等工作，后者主要用于边坡和隐蔽采空区等进行灾害监测和预警。二者有着很多的共性技术和共用数据，且 2 个系统要能够实现实时联动。因此，将 2 个系统进行融合是必要和可行的。

2）系统整合。系统整合是指对有共同载体的系统进行整合，以减少系统数量和节省投资。例如在智能化建设过程中，为实现车辆的防碰撞、防超速、防疲劳、生产调度等功能，往往针对 1 台车辆重复安装部署了多个类似的终端和平台，造成投资浪费，且各系统孤立运行和侵占有限的设备空间资源等问题突出。因此，针对类似的以同一台设备为载体进行重复投资建设的系统，应进行整合。

3）系统替代。系统替代是指经过系统融合和整合后，在不影响露天煤矿整体智能化运行的前提下，淘汰剩余孤立、落后、冗余的系统。

减法逻辑需要完成 4 项重点任务，包括场景识别分类、多源异构数据融合、算法模型优化、业务流程再造，其技术路线如图 2 所示。

1）场景识别分类是按照露天采矿工艺业务链，以较少的应建功能的原则，在地测、采矿设计等环节梳理出关键智能化场景，减少当前各露天煤矿已建

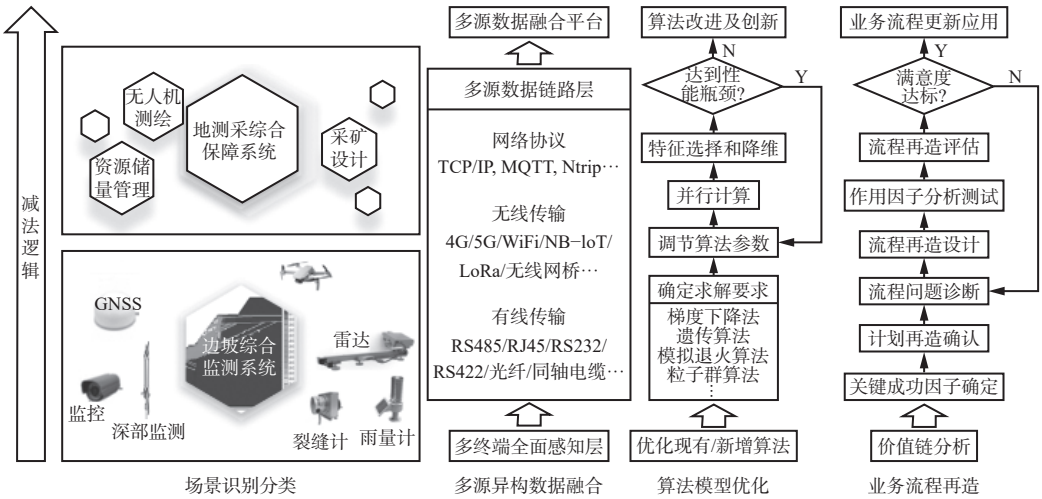

图 2　减法逻辑的重点任务及技术路线

Fig. 2　Key tasks and technical routes of subtraction logic

设的复杂、冗余的系统数量。

2）多源异构数据融合的任务是打通设备–设备、设备–平台、平台–平台间信息交互，实现基于统一数据融合标准的底层感知链路[13-16]，构建实时更新的露天煤矿网络信息，搭建能够有效进行数据治理的数据中台，从而为减法逻辑的实现提供数据保障。

3）算法模型优化技术路径包括优化现有功能单一模型、选择优化算法类型、调节算法参数、并行计算、特征选择及降低参数维度、识别算法瓶颈，从而实现模型或算法的改进及创新，以解决当前各类系统建设应用后的模型功能单一、缺乏智能决策模型、算法固化等问题。

4）业务流程再造是面向企业管理端的价值链重塑，以场景内部数据流转或场景间协同联动逻辑为业务流程再造的依据，依托减量化后的业务场景，向上提炼出企业管理层决策需要的关键指标，向下梳理并确定各业务场景内的成功因子，包括提高数据自动化采集率、提高 5G 网络覆盖度、提高机器人替代率、提高各业务环节内事故隐患排查和治理率、降低机电设备故障率、降低能耗指标等，从而围绕成功因子对现有的业务流程进行计划再造以输出相应指标。由于涉及到各业务部门的权责分属，所以流程再造的中间过程都需要相关权责部门共同确认，包括问题诊断、再造设计、分析测试等，最后需要各权责部门共同评估，判断再造后的流程满意度，进而实现业务流程更新应用。

3.1.2　生态逻辑

生态逻辑的基本思路是梳理露天煤矿整体业务架构，以需求为动力，以数字技术为基础，将智能化技术渗透到各业务环节中，用科学的颗粒度划分智能化场景，实现业务场景的全面数字化表达，研究建立场景之间的协同机制。其根本目的是构建健康的智能化场景生态[17]，形成场景间协同和共生生态，进而确保露天煤矿智能化能力的成熟。

根据露天煤矿的工艺环节、技术要素和生产过程，构建无人化场景、安全生产场景、智能控制场景、智能设计场景、智能决策场景。场景之间、场景内部之间、系统与系统之间相互影响、进化共生。以内蒙古某露天煤矿为例，构建的露天煤矿智能化场景生态如图 3 所示。

利用 5G 通信、工业物联网、云计算、大数据、智能终端等新一代数字技术构建智能化露天煤矿信息基础设施，保障智能化场景的常态化运行。基于露天煤矿生产环节多、工序离散的特点，打破传统智能化场景的边界，实现设备之间或功能之间的互联

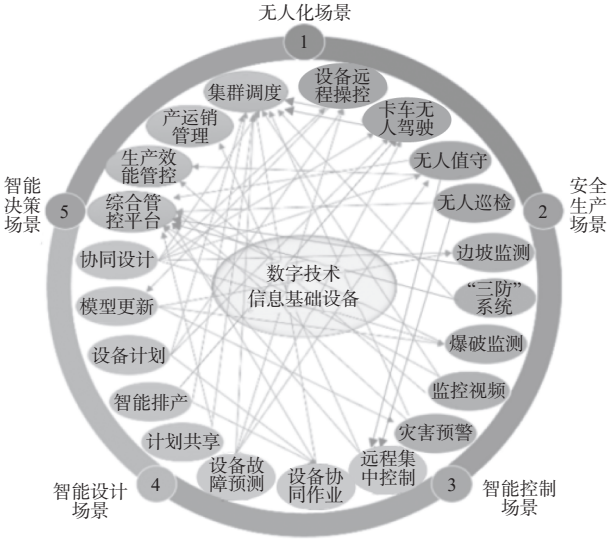

图 3　露天煤矿智能化场景生态

Fig. 3　Intelligent ecological scenarios in open-pit coal mines

互通，推动场景的智能化水平不断提升。以露天煤矿智能设计场景为例，该场景中的三维地质建模和采场三维模型更新功能，为生产计划设计提供基础数据，同时为安全生产场景中的边坡监测提供采场台阶变化信息，也为灾害预警提供地质模型服务。

3.1.3　重构逻辑

重构逻辑的基本思路是依托数字技术重构露天煤矿生产组织，实现由经验驱动的粗放性决策控制向数据驱动的精细化决策控制转变[16-19]。具体包括业务重构与流程重塑 2 个方面。

1）业务重构。业务重构是围绕露天煤矿生产环节，将业务单元划分由从业人员岗位角色向数据生产和消费功能转变。其具体思路是结合智能化场景生态对智能化建设系统的使用方、控制方、维护方、数据调取决策方进行判断，重构露天煤矿的业务结构，对人员分工、岗位职责进行重新规划[20]，形成与智能化露天煤矿相适应的业务单元与组织结构。

2）流程重塑。流程重塑的基本思路是以矿山设计和矿山工程为主体，以数据流和业务逻辑为主线，重塑智能化露天煤矿的流程体系。露天煤矿智能化业务流程数据流从数据采集、业务模型、专业分析、智能决策、精准执行、效果反馈 6 个维度进行循环迭代。

3.1.4　自洽逻辑

自洽逻辑是对减法逻辑、生态逻辑和重构逻辑的补充。这 3 种逻辑都从不同维度对露天煤矿智能化建设提出了要求，这些要求应相互一致、相互支撑，这是自洽逻辑的基本要求。

然而，在露天煤矿智能化实际建设过程中，始终面临着矿山工程的复杂性、工艺及装备的多样性、智能场景之间的耦合性、智能决策研究的滞后性等

挑战，这些极大地限制了数据流驱动的科学决策体系，不可避免地导致了决策与执行脱节。其中，前 3 项挑战属于露天煤矿智能化建设需要面对的固有矛盾，而智能决策研究的滞后性则属于阶段性难题。智能决策研究的关键问题见表 1。

表 1　智能决策研究的关键问题

Table 1　Key issus of intelligent decision-making research

问题	问题描述
缺乏数据采集与处理能力	难以有效地采集和整理大量多源异构数据，且无法进行准确、高效的数据处理，进而无法为决策提供可靠的依据
缺乏问题识别与分析能力	不能准确地识别和分析目标场景中的问题和挑战，致使无法明确决策的目标和需求
缺乏模型建立与优化能力	没有建立准确的数学模型和仿真模型，无法为决策提供科学依据
缺乏风险评估与管理能力	缺少对决策风险的识别和评估能力，进而无法制定相应的风险管理策略，难以降低风险对决策结果的影响
缺乏智能算法与技术应用能力	缺乏智能算法和技术的运用能力，导致无法对数据进行有效分析和挖掘，不能提供更准确、快速、自动化、智能化的决策支持
缺乏创新思维与解决问题能力	缺乏创新思维培养，且面对新问题时缺乏有效的解决方法和途径，从而无法提供更多选择和可能性
缺乏合作与沟通能力	人与人、人与系统、系统与系统间缺乏有效的协同，致使无法共同解决问题，难以提高决策的质量和效果
缺乏反思与学习能力	不能在决策过程中及时反思和总结，难以吸取经验教训，无法做到不断学习并改进决策能力

从露天煤矿智能化建设的角度出发，智能决策的总体技术路径如图 4 所示。一方面，应借助先进的传感技术和信息感知手段，强化多模态大数据采集基础设施。尤其是建设以数据中台为例的大数据平台，集中整合和管理露天煤矿多场景异构数据，进行跨场景数据拓扑关系分析。另一方面，应以人工智能、大模型训练等作为技术支撑底座，提升决策模型的准确性、效能、自主学习能力。其中决策模型的建立是形成决策能力的关键，其应从“采集+解释”模式向“学习+预测”模式转变。最后充分利用人的决策经验，形成人机高效协同的决策体系。面对露天煤矿复杂业务场景，以往的“人问−机答”的方式已不能满足人对决策结果的预期，因此要求模型不能仅充当决策结果信息反馈的角色[21]，而应通过接收人的反馈，对决策结果进行评估与优化，进而形成有效的协同机制，更好地体现人在决策中的丰富经验和创造力，同时辅助提升人的决策能力。

3.2　露天煤矿智能化演进目标

在减法逻辑、生态逻辑、重构逻辑、自洽逻辑驱动下，未来将全面建设“001”模式智能化露天煤矿——“0 人员”，移动设备及固定岗位全无人值守；“0 盲区”，场景生态全覆盖；“1 大脑”，业务管控一体化。

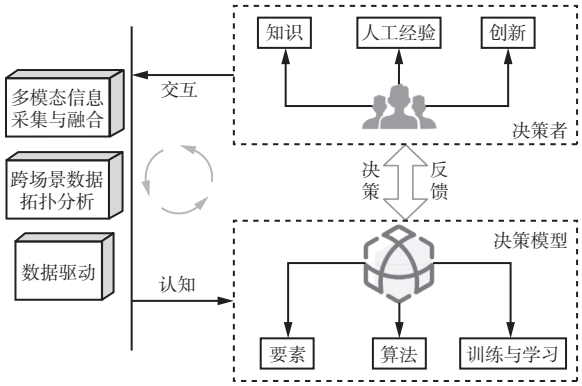

图 4　智能决策的技术路径

Fig. 4　Technical path of intelligent decision-making

1）“0 人员”。加速推动连续开采、连续运输、固定岗位无人值守、卡车无人驾驶、移动设备远程操控等技术迭代升级，构建露天煤矿移动设备和固定岗位全无人值守的运行场景，实现“采−剥−运−破−储−装”工艺链全环节无人。

2）“0 盲区”。建设露天煤矿智能化场景生态圈，智能化场景覆盖率达 100%，场景内充分发挥智能化优势，场景间有效协同，形成场景之间“共生共荣”的露天煤矿智能化建设新范式，场景生态健康稳定发展。

3）“1 大脑”。充分利用数字技术构建全矿统一的智能决策“大脑”，提高自主科学决策能力，实现“地−测−采−穿−爆−采−运−排”全流程一体化管控，经营和管理决策完全基于数据驱动和智能辅助，生产系统全部实现“机器人+远程”作业模式。

4　结论

1）从功能完整性、功能活跃度、系统结构性、数据利用高效性 4 个维度构建了露天煤矿智能化能力成熟度评价模型。

2）通过对露天煤矿智能化能力成熟度评价模型进行理论分析发现，单纯追加投资、扩建系统等行为并不是保障智能化能力成熟的充分条件，而通过科学的规划，尽量采用少的功能来实现智能化建设目标，智能化建设效益将更加显著。

3）露天煤矿智能化能力的成熟过程应遵循减法逻辑以实现系统减量化，遵循生态逻辑以提升数据转换密度，遵循重构逻辑以实现精细化决策，遵循自洽逻辑避免决策与执行脱节，从而最终形成“0 人员”（移动设备及固定岗位全无人值守）、“0 盲区”（场景生态全覆盖）、“1 大脑”（业务管控一体化）的“001”模式的智能化露天煤矿。

参考文献（References）：

[1]　王忠鑫，田会，王东，等. 露天采矿科学目标的演变与

未来发展趋势[J]. 煤炭学报，2024，49(增刊 1)：129-153.
WANG Zhongxin，TIAN Hui，WANG Dong，et al. Evolution and future prospect of scientific objectives of open-pit mining[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(S1)：129-153.

[2] 王忠鑫，孙鑫，曾祥玉，等. 我国露天煤矿智能化建设现状及困境与发展路径[J]. 露天采矿技术，2022，37(3)：1-7.
WANG Zhongxin，SUN Xin，ZENG Xiangyu，et al. Current situation and dilemma and development path of intelligent construction of open-pit coal mine in China[J]. Opencast Mining Technology，2022，37(3)：1-7.

[3] 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. Overall design of intelligent construction in open pit coal mines[J]. Coal Science and Technology，2022，50(2)：37-46.

[4] 孙健东，张瑞新，贾宏军，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.

[5] 顾清华，李学现，卢才武，等. “双碳”背景下露天矿智能化建设新模式的技术路径[J]. 金属矿山，2023(5)：1-13.
GU Qinghua，LI Xuexian，LU Caiwu，et al. Technical path of new intelligent mode of open-pit mine under the background of "dual carbon"[J]. Metal Mine，2023(5)：1-13.

[6] 付恩三，刘光伟，白润才，等. 智能露天矿山评价体系研究[J]. 煤炭工程，2022，54(5)：1-8.
FU Ensan，LIU Guangwei，BAI Runcai，et al. Evaluation system of intelligent open-pit mine[J]. Coal Engineering，2022，54(5)：1-8.

[7] SHEN Liyin，DU Xiaoyun，CHENG Guangyu，et al. Capability Maturity Model (CMM) method for assessing the performance of low-carbon city practice[J]. Environmental Impact Assessment Review，2021，87. DOI：10.1016/j.eiar.2020.106549.

[8] HU Jingyi，GAO Sini. Research and application of capability maturity model for Chinese intelligent manufacturing[J]. Procedia CIRP，2019，83：794-799.

[9] LACERDA T C，VON WANGENHEIM C G. Systematic literature review of usability capability/maturity models[J]. Computer Standards & Interfaces，2018，55：95-105.

[10] GÖKALP M O，GÖKALP E，KAYABAY K，et al. The development of the data science capability maturity model：a survey-based research[J]. Online Information Review，2022，46(3)：547-567.

[11] 王国法，刘峰，庞义辉，等. 煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J]. 煤炭学报，2019，44(2)：349-357.
WANG Guofa，LIU Feng，PANG Yihui，et al. Coal mine intellectualization：the core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society，2019，44(2)：349-357.

[12] 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.

[13] YAVUZ M. The application of the analytic hierarchy process (AHP) and Yager's method in underground mining method selection problem[J]. International Journal of Mining，Reclamation and Environment，2015，29(6)：453-475.

[14] GUPTA S，KUMAR U. An analytical hierarchy process (AHP)-guided decision model for underground mining method selection[J]. International Journal of Mining，Reclamation and Environment，2012，26(4)：324-336.

[15] DOS SANTOS T B，LANA M S，PEREIRA T M，et al. Quantitative hazard assessment system (Has-Q) for open pit mine slopes[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2019，29(3)：419-427.

[16] KAVURI A，PRAKASH B. An adaptive，run-time navigation system for haul trucks in surface mines[J]. International Journal of Mining，Reclamation and Environment，2017，31(5)：364-374.

[17] 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. Construction of scene ecology，the key to the intelligent construction of open-pit coal mines[J]. Journal of Intelligent Mine，2022，3(6)：93-100.

[18] ZHANG Li，SHAN Wenxuan，ZHOU Bin，et al. A dynamic dispatching problem for autonomous mine trucks in open-pit mines considering endogenous congestion[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2023，150. DOI：10.1016/j.trc.2023.104080.

[19] MENA R，ZIO E，KRISTJANPOLLER F，et al. Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2013，23(1)：113-119.

[20] MOHTASHAM M，MIRZAEI-NASIRABAD H，ALIZADEH B. Optimization of truck-shovel allocation in open-pit mines under uncertainty：a chance-constrained goal programming approach[J]. Mining Technology，2021，130(2)：81-100.

[21] 苟晓茹. 基于多模态的 AI 语音识别及人机交互系统研究[J]. 自动化与仪器仪表，2024(12)：159-162，167.
GOU Xiaoru. Research on multi-modal AI speech recognition and human-computer interaction system[J]. Automation & Instrumentation，2024(12)：159-162，167.