



智能化煤矿数据治理方法论体系与实施框架

谭章禄 王美君 叶紫涵

引用本文：

谭章禄, 王美君, 叶紫涵. 智能化煤矿数据治理方法论体系与实施框架[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 284–295.

TAN Zhanglu, WANG Meijun, YE Zihan. Methodological system and implementation framework of data governance for intelligent coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 284–295.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-1794>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

智能化煤矿大数据平台架构及数据处理关键技术研究

Study on big data platform architecture of intelligent coal mine and key technologies of data processing

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b0ab44ca-6dcf-4469-aa36-9945f0f926c9>

基于协议匹配和数据压缩的采煤机数据管理技术研究

Research on data management technology of shearer based on protocol matching and data compression

煤炭科学技术. 2024, 52(11): 89–102 <https://doi.org/10.12438/est.2024-1138>

基于GIS的工作面探煤数据管理方法研究与应用

Research and application of coal exploration data management method in working face based on GIS

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 254–261 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0511>

透明工作面智能化开采大数据分析决策方法及系统研究

Research on big data analysis and decision system of intelligent mining in transparent working face

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 252–262 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/62bf9949-9d39-4600-9c2c-da0b68533560>

煤矿智能化标准体系框架与建设思路

Coal mine intelligent standard system framework and construction ideas

煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0d41dd60-ad22-4627-82e6-1d9ba5ed6ce0>

基于大数据与AI驱动的智能煤矿目标位置服务技术

Intelligent coal mine target location service technology based on big data and AI driven

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 121–130 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/84196658-15c3-4693-bbf7-5de5add2e833>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

谭章禄,王美君,叶紫涵.智能化煤矿数据治理方法论体系与实施框架[J].煤炭科学技术,2025,53(1):284-295.
TAN Zhanglu, WANG Meijun, YE Zihan. Methodological system and implementation framework of data governance for intelligent coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 284-295.

智能化煤矿数据治理方法论体系与实施框架

谭章禄,王美君,叶紫涵

(中国矿业大学(北京)管理学院,北京 100083)

摘要:数据治理是支撑煤矿智能化建设的底层技术,是煤矿智能化系统实现协同集控的关键保障。针对智能化煤矿数据治理缺乏顶层设计和方法论支撑的问题,从“理论基础、概念模型、基本原则、过程和程序、方法和工具、评估准则”6个方面构建智能化煤矿数据治理方法论体系,系统阐明有效实现智能化煤矿数据治理目标的依据和原则,为智能化煤矿数据治理的顶层设计提供理论基础和方法论支撑;参考相关技术标准,开发智能化煤矿数据治理实施框架,为智能化煤矿数据治理的管理实施提供具体路径和管理方法;基于分层架构思想,设计智能化煤矿数据治理技术架构,为智能化煤矿数据治理的技术实现提供技术方法和工具。研究结论如下:①复杂系统理论、数据战略管理理论、数字连续性理论、公共治理理论、协同创新理论、信息生命周期理论和PDCA循环理论共同构成智能化煤矿数据治理的理论基础。②智能化煤矿数据治理的概念模型由理念、目标、主体、客体、流程和工具5个核心概念维度构成,遵循业务导向、协同治理、文化驱动、技术赋能、流程嵌入、持续改进的基本原则。③智能化煤矿数据治理实施框架自顶向下阐释智能化煤矿数据治理的管理过程和关键程序,包括“统筹与规划、构建与运行、监控与评价、改进与优化”4个循环迭代的关键环节。④智能化煤矿湖仓一体技术架构阐述智能化煤矿数据治理平台的系统结构和技术选型,为智能化煤矿数据治理的技术实现提供方法和工具,关键在于数据中台5大核心层级的开发。⑤智能化煤矿数据治理能力成熟度模型为智能化煤矿数据治理提供评估准则框架和能力提升路径,由“能力成熟度等级、数据治理能力、数据治理实践”3个维度耦合而成,遵循“项目化管理—流程化管理—标准化管理—一定量化管理—标杆化管理”的渐进式发展规律。

关键词:智能化煤矿;数据治理;数据管理;数据标准;数据质量;数据安全;湖仓一体

中图分类号:TD67 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2025)01-0284-12

Methodological system and implementation framework of data governance for intelligent coal mines

TAN Zhanglu, WANG Meijun, YE Zihan

(School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Data governance underpins the intelligent development of coal mines and ensures collaborative centralized control of mine systems. To tackle the issues of inadequate top-level design and methodological support in intelligent coal mine data governance, a methodological system has been developed. The methodological system comprises six key components: theoretical foundation, conceptual model, basic principles, processes and procedures, methods and tools, and evaluation criteria. It systematically clarifies the basis and principles for effectively realizing the goals of intelligent coal mine data governance, and provides the theoretical foundation and methodological support for the top-level design of intelligent coal mine data governance. Meanwhile, the implementation framework for intelligent coal mine data governance is developed with reference to relevant technical standards, which provides specific paths and management methods for

收稿日期:2024-12-03 策划编辑:常琛 责任编辑:宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2024-1794

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(61471362)

作者简介:谭章禄(1962—),男,江西赣县人,教授,博士。E-mail: tanzl@vip.sina.com

通讯作者:王美君(1995—),男,四川泸县人,博士。E-mail: wangmeijunedu@126.com

the management and implementation of intelligent coal mine data governance. Furthermore, the technical architecture for intelligent coal mine data governance is designed based on the idea of layered architecture to provide technical methods and tools for the technical realization of intelligent coal mine data governance. The following study results have been obtained. ① The theoretical foundation of intelligent coal mine data governance is grounded in complex system theory, data strategy management theory, digital continuity theory, public governance theory, collaborative innovation theory, information lifecycle theory and PDCA cycle theory. ② The conceptual model of intelligent coal mine data governance consists of five core conceptual dimensions: governance philosophy, governance goals, governance subjects, governance objects, and governance processes and tools. It adheres to the principles of business orientation, collaborative governance, culture-driven, technology-enabled, process-embedded, and continuous improvement. ③ The implementation framework of intelligent coal mine data governance delineates the management processes and key procedures from the top down, encompassing four key links of the iterative cycle: coordination and planning, construction and operation, monitoring and evaluation, and improvement and optimization. ④ The technical architecture of the Data Lakehouse for intelligent coal mine describes the system structure and technology selection for the data governance platform. It offers technical methods and tools to facilitate the implementation of intelligent coal mine data governance, with the core focus on developing the five key layers of the data middle platform. ⑤ The data governance capability maturity model for intelligent coal mines provides an assessment criteria framework and capability improvement pathway. It encompasses three dimensions namely, the level of capability maturity, data governance capabilities, and data governance practices. The enhancement of data governance capabilities in intelligent coal mines progresses from project management to benchmarking, encompassing process, standardization, and quantitative management stages.

Key words: intelligent coal mine; data governance; data management; data standard; data quality; data security; Data Lakehouse

0 引言

随着煤矿智能化建设向纵深推进^[1-3],煤矿智能化建设正面临数据感知不透彻、信息难以深度互联、自主学习能力不足、智能应用体系不健全、全局协同性差等多重技术挑战^[4-5]。数据治理为解决上述问题提供了核心支撑。数据治理通过优化煤矿数据及相关业务和技术在全生命周期的权力、责任和利益的制度安排,满足煤矿数据应用的质量要求,防控煤矿数据应用的安全风险,确保煤矿数据运营的合规性,充分发挥煤矿数据要素价值,是发展煤矿人工智能技术和开发煤矿自主学习算法的重要基础,是煤矿智能化业务系统、生产系统和技术装备实现整合集成和协同集控的关键保障。数据治理已然成为制约煤矿智能化建设进程的关键瓶颈^[6-7]。

智能化煤矿数据治理的理论研究和技术实践已取得初步进展,主要成果集中在理论方法、技术架构和数据管理关键技术3个方面。在数据治理理论方法研究上,谭章禄等^[8-10]剖析了智能化煤矿数据治理的概念和内涵;构建了数据治理概念模型和技术架构;提出了智能化煤矿数据治理参考模型和体系框架;王美君等^[11]开发了智能化煤矿数据治理能力成熟度模型,指出了智能化煤矿数据治理的能力提升策略;奠定了智能化煤矿数据治理的理论研究和技术实现的基础。

在数据治理技术架构研究上,姜德义等^[12]基于云边协同的思想,设计了包含设备层、传输层、服务

层和应用层的智能化煤矿数据治理技术架构,并提出相应的融合性、实时性和安全性解决方案;杜毅博等^[13]依托 Hadoop 大数据技术生态,构建了涵盖数据接入、存储、资产管理及服务的智能化煤矿数据治理技术架构;疏礼春^[14]基于数据中台技术体系,提出了由数据汇聚、开发、资产管理、服务等模块构成的智能化煤矿数据治理技术架构;方乾等^[15]基于工业互联网体系提出了涵盖基础设施即服务层、平台即服务层和软件即服务层的智能化煤矿数据治理技术架构。

在数据管理关键技术研究上,王国法等^[16]通过对智能化煤矿巨系统数据逻辑模型和跨系统全时空数字感知体系的分析,提出由基础标准、技术标准和业务标准构成的智能化煤矿数据标准体系。谭章禄等^[17]通过实施“基准—扩展”2阶段策略,提出了智能化煤矿数据归类与编码的技术方法,为智能化煤矿数据资产体系的构建奠定了基础。谭靓洁等^[18]基于区块链技术,针对煤矿安监云数据,设计了包含访问权限模型和访问控制模型的云数据安全访问模型,推进了智能化煤矿数据安全管理基础模型的研究与应用。韩培强等^[19]提出了事前预防、事中控制和事后补救3个方面的数据质量管理策略和关键技术,实现智能化煤矿数据质量的闭环控制。尚伟栋等^[20]开发了基于对象模型的数据采集融合共享系统,为智能化煤矿数据的集成与共享提供了解决方案。

然而,智能化煤矿数据治理尚存在以下问题:第一,智能化煤矿数据治理缺乏完善的顶层设计,当前

主要就单项智能化建设项目被动式开展数据治理工作,难以实现煤矿数据的整合集成和融合共享。第二,智能化煤矿数据治理缺乏健全的数据标准体系和数据管理规范,难以确保智能化煤矿数据满足数据质量、数据安全和数据合规要求,难以确保数据治理的技术流程和方法工具得到有效管理。第三,智能化煤矿数据治理缺乏规范的实施框架,治理组织权责不清晰,实施过程不规范,关键程序不明确,难以达成数据治理目标。第四,智能化煤矿数据治理缺乏科学的技术架构,难以实现煤矿数据资源和服务能力的优化配置,难以实现智能化煤矿业务需求的敏捷响应,难以实现煤矿智能化系统的协调联动和集成管控。上述问题的解决需要完善的方法论体系、实施框架和技术架构加以指导。

因此,基于智能化煤矿数据治理参考模型提供的理论分析框架,确定指导智能化煤矿数据治理的理论基础;基于数据治理五要素集成论,构建智能化煤矿数据治理的概念模型;基于智能化煤矿数据治理的目标要求,提出智能化煤矿数据治理的基本原则;参考国家标准并结合煤矿智能化建设实际,开发智能化煤矿数据治理实施框架,阐释智能化煤矿数据治理的过程和程序;基于数据治理技术发展趋势和智能化煤矿的数据治理需求,设计基于湖仓一体的技术架构,阐释智能化煤矿数据治理的方法和工具;借鉴能力成熟度思想,构建数据治理能力成熟度

模型,为智能化煤矿数据治理的目标实现提供评估准则。由此完整构建包含“理论基础、概念模型、基本原则、过程和程序、方法和工具、评估准则”6个要素的智能化煤矿数据治理方法论体系,系统性阐发其中的关键问题和关键技术;并通过智能化煤矿数据治理实施框架和技术架构规范数据治理的管理过程和技术流程,以期引导智能化煤矿数据治理的理论研究和技术实践向纵深发展。

1 智能化煤矿数据治理方法论体系

智能化煤矿数据治理方法论体系是由理论基础、概念模型、基本原则、过程和程序、方法和工具以及评估准则等要素构成的规则体系(图1),为有效实现智能化煤矿数据治理目标提供依据和原则^[21]。理论基础为智能化煤矿数据治理方法和工具的应用等提供理论指导。概念模型为智能化煤矿数据治理相关问题的研究提供分析框架和研究逻辑。基本原则为智能化煤矿数据治理的业务开展和技术实施提供根本遵循,以保证智能化煤矿数据治理目标的符合性和过程的合理性。过程和程序指明智能化煤矿数据治理的管理过程和关键程序,为智能化煤矿数据治理提供行动指南。方法和工具为智能化煤矿数据治理提供最佳实践和支持工具参考。评估准则以智能化煤矿数据治理能力成熟度模型为核心,为智能化煤矿数据治理目标实现提供标准和指引。

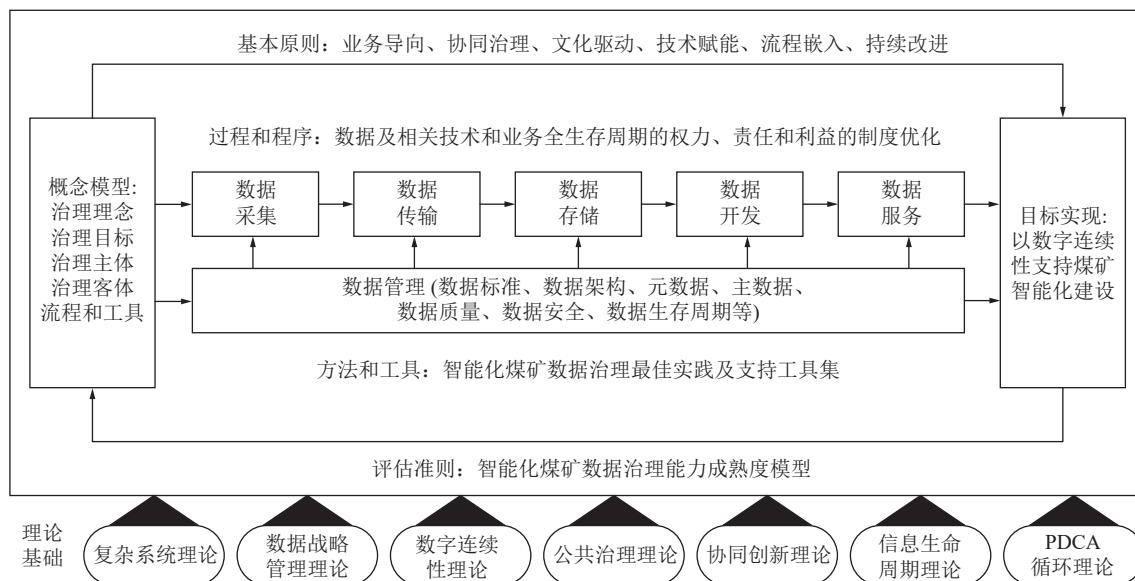


图1 智能化煤矿数据治理方法论体系
Fig.1 Methodological system for intelligent coal mine data governance

2 智能化煤矿数据治理理论基础

根据智能化煤矿数据治理参考模型提供的理论

分析逻辑^[10],从治理机制、治理层次、治理要素和治理过程4个维度对智能化煤矿数据治理中的复杂关

系进行剖析,确定指导智能化煤矿数据治理的基础理论包括复杂系统理论、数据战略管理理论、数字连续性理论、公共治理理论、协同创新理论、信息生命周期理论和PDCA循环理论。

从治理机制角度分析,智能化煤矿数据治理旨在通过制度安排,优化赋存于煤矿数据及与之关联的业务和技术的全生命周期中的权力配置、责任划分和利益分配,是一个长期、动态、复杂的系统性工程,具有开放交互性、整体涌现性和循环迭代性,遵循复杂系统发展规律。

从治理层次角度分析,智能化煤矿数据治理贯穿战略管理、经营决策、智能管控和作业操作等各个治理层次,是通用数据技术支持下为满足智能化煤矿业务需求的数据战略管理问题,遵循数据战略管理的理论与方法。

从治理理念和治理目标的角度分析,智能化煤矿数据治理要求煤矿中的人员和设备基于统一的数据语用、数据语义和数据语法,开发和共享一致的、可信的、实时的和可持续的数据模型和数据服务,强调以数字连续性支持煤矿智能化建设目标的完整实现,遵循数字连续性理论。

从治理主体角度分析,智能化煤矿数据治理是一个公共治理和协同创新的过程,强调整合从作业班组、专业科室、基层煤矿、集团总部、行业协会和学会直至政府主管部门的多元化数据治理主体,充分释放多元数据治理主体在资本、人才、技术和数据等要素上的创新活力,提升多元数据治理主体的数字化和智能化能力,实现智能化煤矿数据要素增值和数据权益共享,遵循公共治理理论和协同创新理论。

从治理客体和治理过程角度分析,智能化煤矿数据治理强调对煤矿数据及其关联技术与业务实施全生命周期的有效治理和闭环管理,持续提升智能化煤矿数据治理能力,以实现智能化煤矿数据治理目标,遵循信息生命周期理论和PDCA循环理论。

3 智能化煤矿数据治理概念模型

基于数据治理五要素集成理论框架^[21],智能化煤矿数据治理的概念模型由理念、目标、主体、客体、流程和工具等5个核心维度构成^[9]。在智能化煤矿数据治理理念的指引下,数据治理主体紧扣数据治理目标,合理部署数据治理的技术策略和技术工具,通过数据采集、数据传输、数据存储、数据开发、数据服务、数据管理等技术流程,优化智能化煤矿数据及其相关业务和技术在全生命周期的权利、责任和

利益的制度安排,以全面支撑和推动智能化煤矿建设目标的实现。

智能化煤矿数据治理遵循沉淀、复用、共享和协同的理念。沉淀强调梳理和盘活智能化煤矿的数据资源、存储资源、网络资源、计算资源和业务能力,为技术复用、数据复用和能力复用奠定基础。复用强调资源和能力的标准化和敏捷化,通过智能化煤矿数据资产体系和数据治理技术的标准化封装,支持智能化煤矿核心业务的敏捷响应。共享关注智能化煤矿数据服务、技术服务和业务服务的融合共享,通过开发统一的智能化煤矿数据架构、技术架构和业务架构,实现智能化煤矿核心数据资源、技术能力和业务能力的共享。协同强调根据管理权限,分类、分级配置智能化煤矿的技术服务、数据服务和业务服务,实现智能化煤矿“研发—采购—生产—运销”全环节、“人员—设备—材料—工艺—环境”全方位的协调与联动,实现煤矿各类业务的一体化综合管控。

智能化煤矿数据治理在煤矿发展战略上需要满足业务目标,在煤矿专业实现上需要满足技术目标。其中,业务目标旨在阐明数据治理在智能化煤矿建设中的战略定位及其与智能化煤矿其他建设任务之间的关系,是指导智能化煤矿数据治理技术实施和资源分配的长期导向。技术目标旨在阐明如何通过数据治理技术工具达成智能化煤矿数据治理的技术要求及各技术要求之间的关系,为智能化煤矿数据治理业务目标的实现提供技术支撑。智能化煤矿数据治理的业务目标是确保智能化煤矿的数字连续性,以全面支撑和推动智能化煤矿建设目标的实现。智能化煤矿数据治理通过为煤矿中的人员和设备提供一致、可信、实时和可持续的数据模型和数据服务,全方位满足地质保障透明化^[22-23]、安全生产智能化^[3,24]、经营管理精益化、综合管控一体化^[25]等业务领域的数据需求。智能化煤矿数据治理的技术目标包括保证数据质量、保障数据安全、确保数据合规、提升数据价值4个方面。其中,数据合规、数据安全和数据质量是智能化煤矿数据价值的坚实基础。智能化煤矿数据治理通过数据质量定义、数据质量评估、数据质量监控、数据质量改进等技术流程,保障智能化煤矿数据满足完备性、完整性、准确性、唯一性、一致性、及时性、合理性和有效性的质量要求。智能化煤矿数据治理通过构建煤矿数据的隐患排查治理和风险分级管控机制,确保智能化煤矿数据在全生存周期的各阶段满足安全性要求。智能化煤矿数据治理通过数据权限配置、数据合规审计、数据合

规监控、数据合规改进等技术流程,确保智能化煤矿数据在全生存周期的各阶段满足合规性要求。数据价值提升则强调基于一致、可信、实时和可持续的数据模型和数据服务,开发智能化煤矿数据资产体系和智能算法体系,为煤矿安全生产和经营管理业务赋能。

智能化煤矿数据治理主体是由作业班组、专业科室、基层煤矿、集团总部、行业协会和学会、政府主管部门中多个业务领域和多个学科专业的人员共同参与的、以首席数据官为核心的数据治理机构作为主导的数据治理联盟,旨在整合多元数据治理主体在煤矿业务技能、信息专业技术和经营管理才能等方面的优势^[26],确保智能化煤矿数据治理目标的实现。

智能化煤矿数据治理的客体包括煤矿智能化进程中产生的数据资源及其紧密关联的业务流程与技术体系,构成了智能化煤矿的数据治理域,是智能化煤矿数据治理工作的核心关注对象。

智能化煤矿数据治理的技术流程涵盖数据采集、数据传输、数据存储、数据开发、数据服务、数据管理等数据全生存周期环节,需要结合智能化煤矿的业务需求和数据特性,合理部署相应的技术策略和技术工具。

4 智能化煤矿数据治理基本原则

基本原则是指导智能化煤矿数据治理业务开展和技术实施的总体要求,是智能化煤矿数据治理活动须遵循的基本规则,旨在保证智能化煤矿数据治理目标的符合性和过程的合理性。为了实现智能化煤矿数据治理的业务目标和技术目标,智能化煤矿数据治理的业务开展和技术实施应遵循业务导向、协同治理、文化驱动、技术赋能、流程嵌入和持续改进6项基本原则。

1)业务导向原则强调智能化煤矿数据治理活动的开展应充分理解智能化煤矿的业务流程和技术逻辑为前提,以满足智能化煤矿业务需求、实现智能化煤矿建设目标为导向。

2)协同治理原则强调智能化煤矿数据治理活动的开展应吸收多元数据治理主体共同参与,满足多元数据治理主体的业务需求,明确和统一多元数据治理主体的权力、责任和利益,整合多元数据治理主体的能力优势。

3)文化驱动原则强调通过数据治理在智能化煤矿中培育以数据为核心、遵循数据规律、运用数据方

法、恪守数据伦理的决策文化,以此驱动智能化煤矿的科学决策和精益管理。

4)技术赋能原则强调智能化煤矿数据治理应针对智能化煤矿的业务需求和数据特性,开发和部署自动化、智能化的数据治理解决方案与技术工具,以此提升数据治理效率,达成数据治理目标。

5)流程嵌入原则强调智能化煤矿数据治理的制度和标准应全方位嵌入智能化煤矿业务实现的全流程,确保数据在全生存周期内满足数据质量、数据安全、数据合规和数据应用的要求。

6)持续改进原则强调智能化煤矿数据治理应聚焦于保证数据质量、保障数据安全、确保数据合规和提升数据价值等关键方面,不断通过评估、指导和监控(Evaluate-Direct-Monitor, EDM)机制,实现数据治理绩效的持续改进和数据治理能力的持续提升。

5 智能化煤矿数据治理实施框架

基于智能化煤矿数据治理的理论基础和概念模型,遵循智能化煤矿数据治理基本原则,参考《信息技术 大数据 数据治理实施指南》(GB/T 44109—2024)等国家标准,结合煤矿智能化建设实际,构建智能化煤矿数据治理实施框架(图2),自顶向下阐释智能化煤矿数据治理的管理过程和关键程序,为智能化煤矿数据治理提供行动指南。智能化煤矿数据治理的管理过程涵盖“统筹与规划”“构建与运行”“监控与评价”“改进与优化”4个循环迭代的动态环节。智能化煤矿数据治理管理过程中的关键程序及其执行顺序将指明智能化煤矿数据治理实施的管理方法和具体路径。

5.1 统筹与规划

“统筹与规划”环节的关键任务是进行智能化煤矿数据治理的顶层设计,包括数据战略规划的制定、数据治理组织的构建以及业务架构、数据架构、技术架构和管理架构等顶层架构的设计等内容。

数据战略规划的关键程序包括:①调研和分析智能化煤矿所处的宏观环境,明确智能化煤矿数据治理应遵循的法律法规、政策要求、经济趋势、数据伦理和技术条件;②调研和分析智能化煤矿所处的行业环境,明确智能化煤矿数据治理应遵循的行业监管要求以及可采纳的行业最佳实践^[27];③调研并分析智能化煤矿数据治理现状,盘点智能化煤矿的数据资源、存储资源、网络资源和计算资源,评估智能化煤矿数据治理的能力水平,梳理智能化煤矿数据治理的核心问题;④从组织、机制、技术、能力等

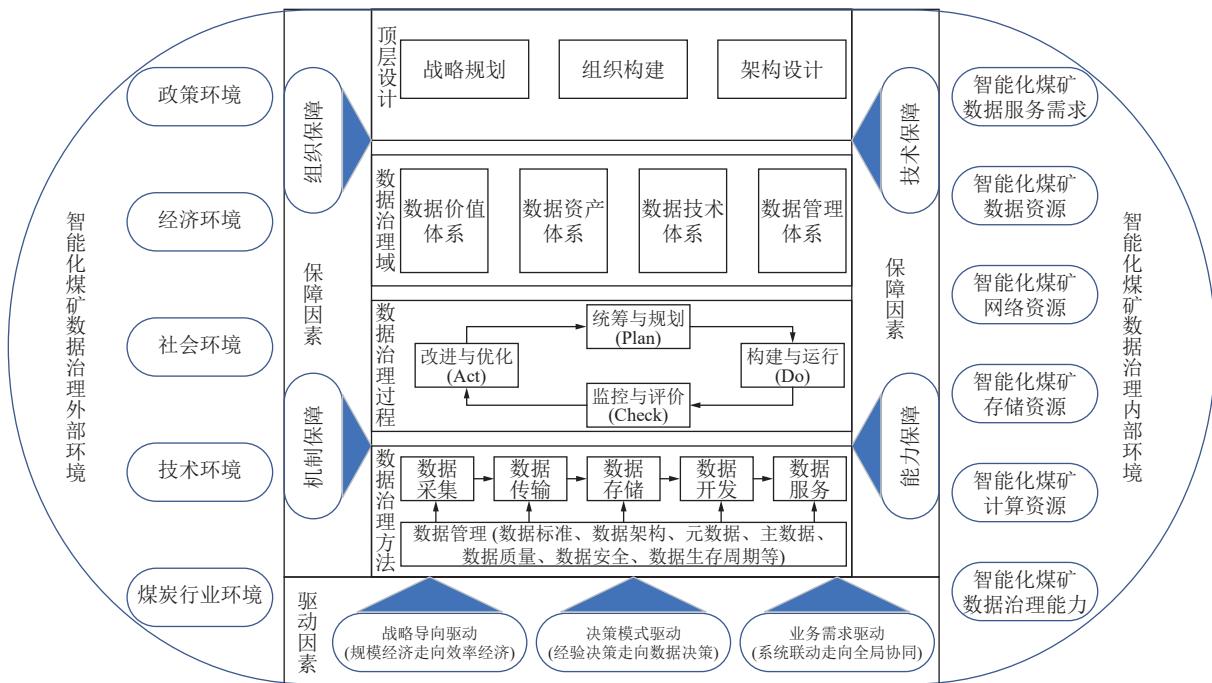


图 2 智能化煤矿数据治理实施框架

Fig.2 Implementation framework for intelligent coal mine data governance

方面调研和分析智能化煤矿数据治理的保障因素,从战略导向、决策模式、业务需求等方面调研和分析智能化煤矿数据治理的驱动因素;⑤识别智能化煤矿内外部数据治理主体的多元化数据服务需求,明确智能化煤矿数据治理的业务范围、业务目标、阶段任务、实施路线以及在数据质量、数据安全、运营合规和数据价值等方面的整体要求,制定数据战略规划。

治理组织构建的关键程序包括:①确定智能化煤矿数据治理的组织模式,根据智能化煤矿的组织架构和业务特点选用集中式、分布式或混合式的组织模式;②划分智能化煤矿数据治理的组织层级,根据决策权、监管权和执行权三权分立原则组建智能化煤矿数据治理组织的决策层、监管层和执行层;③定义智能化煤矿数据治理的组织职责,明确决策层、监管层和执行层的具体职责,做到权力、责任和利益的统一;④定期开展智能化煤矿数据治理制度规范和理论方法的职业培训,持续提升智能化煤矿员工的数据治理能力^[28]。

顶层架构设计的关键程序包括:①设计智能化煤矿的业务架构,明确智能化煤矿数据治理的业务要求,为智能化煤矿数据价值体系的构建提供指导;②设计智能化煤矿的数据架构,明确智能化煤矿在数据质量、数据安全、数据合规等方面的数据要求,为智能化煤矿数据资产体系的构建提供指导;③设计智能化煤矿数据治理的技术架构,明确智能化煤

矿在数据采集、数据传输、数据存储、数据开发、数据服务和数据管理等方面的技术要求,为智能化煤矿数据技术体系的构建提供指导;④设计智能化煤矿的数据管理架构,制定关于数据标准、数据架构、元数据等的数据管理制度,为智能化煤矿数据管理体系的构建提供指导。

5.2 构建与运行

“构建与运行”环节的关键任务是建立健全智能化煤矿数据治理域,确保智能化煤矿数据治理域的安全可靠运行,达成智能化煤矿数据治理目标。“构建与运行”环节的关键程序包括:①数据价值体系的构建与运行;②数据资产体系的构建与运行;③数据技术体系的构建与运行;④数据管理体系的构建与运行。

1)智能化煤矿数据价值体系是指满足智能化煤矿内外部数据治理主体的数据服务需求的路径和方法构成的体系。构建与运行智能化煤矿数据价值体系的关键在于识别并满足智能化煤矿内外部数据治理主体的数据服务需求,包括政府部门的行业监管需求、社会公众的信息披露需求、煤炭行业信息交流需求以及煤矿企业内部的战略支持需求、管理决策需求和业务执行需求等。

2)智能化煤矿数据资产体系是指满足智能化煤矿内外部数据治理主体的数据服务需求的数据资源构成的体系。构建和运行智能化煤矿数据资产体系

的关键在于设计和优化智能化煤矿的数据架构,具体包括智能化煤矿数据字典构建(业务流程和数据流程梳理、数据实体识别、数据分布确定、数据定义和描述等)、数据模型设计与优化(主题域模型、概念模型、逻辑模型和物理模型的设计与优化)、数据流设计与优化、数据集成与共享的设计与优化等。

3)智能化煤矿数据技术架构是指支撑智能化煤矿数据治理目标实现的数据技术构成的体系。构建和运行智能化煤矿数据技术架构的关键在于通用数据技术的行业化应用,具体包括适用于智能化煤矿业务需求和数据特性的数据汇聚、数据开发、数据服务、数据管理等数据技术标准的制定和应用。

4)智能化煤矿数据管理体系是指保障智能化煤矿数据治理目标实现的管理制度构成的体系。构建和运行智能化煤矿数据管理体系的关键在于统一智能化煤矿内外部数据治理主体的权力、责任和利益并确保各项数据管理制度的目标一致,具体包括数据标准管理、数据架构管理、元数据管理等数据管理规范的制定和实施。

5.3 监控与评价

“监控与评价”环节的关键任务是对智能化煤矿数据治理的全生命周期进行持续监控,综合评估其风险性、合规性和绩效表现,以确保智能化煤矿数据治理活动严格遵循既定原则,进而保障数据治理目标的顺利达成。“监控与评价”环节的关键程序包括:①建立并实施智能化煤矿数据治理的内部控制体系,识别和防控数据管理活动在数据质量、数据安全、数据合规、数据价值等方面的风险,以数据治理目标为导向实现智能化煤矿数据的全生存周期管理,确保数据管理活动的有效实施;②建立并实施智能化煤矿数据治理的外部审计体系,重点从数据质量、数据安全、数据合规和数据价值等关键方面对数据管理的制度和活动开展外部审计,诊断智能化煤矿数据治理的目标符合性、实施有效性和运营合规性;③建立并实施智能化煤矿数据治理绩效评估体系,构建智能化煤矿数据治理绩效评估的组织、机制、流程和准则,从资源投入、过程风险、运营合规、收益成效、治理能力等维度开展智能化煤矿数据治理绩效的定期评估和专项评估,为智能化煤矿数据治理的改进和优化提供参考基础。

5.4 改进与优化

“改进与优化”环节的关键任务是改进智能化煤矿数据治理的过程和程序,优化数据治理的方法和工具,完善数据治理的顶层设计和实施策略,实现智

能化煤矿数据治理能力的持续提升。“改进与优化”环节的关键程序包括:①识别并评估智能化煤矿数据治理目标与绩效之间的差异,对“统筹与规划”“构建与运行”“监控与评价”环节中的关键程序逐项进行差异分析,确定影响智能化煤矿数据治理目标实现的原因,为智能化煤矿数据治理的改进与优化提供参考依据;②制定并实施智能化煤矿数据治理改进方案,在下一阶段的数据战略规划中明确并落实数据治理改进范围、改进目标、阶段任务、改进策略和改进计划,指导智能化煤矿数据治理改进工作扎实、稳步推进;③监督并控制智能化煤矿数据治理的改进和优化过程,定期或专项地报告智能化煤矿数据治理改进工作,稽查智能化煤矿数据治理改进方案的落实情况,纠正智能化煤矿数据治理改进方案的执行偏差,以保证智能化煤矿数据治理目标的动态实现。

6 智能化煤矿数据治理技术架构

智能化煤矿数据治理技术架构阐述智能化煤矿数据治理平台的系统结构和技术选型,为智能化煤矿数据治理的技术实现提供方法和工具。随着数据治理需求的持续演进,智能化煤矿数据治理技术架构经历了数据库^[29]、数据仓库^[30]和数据中台^[14]等发展阶段,呈现出向湖仓一体发展的显著趋势。湖仓一体(Data Lakehouse, DL)融合了数据仓库高效的数据治理能力和数据湖灵活的数据汇聚能力,为企业数据治理提供了一种便利的开放式架构。为了实现智能化煤矿多源异构数据的良好治理,遵照智能化煤矿数据治理方法论体系和实施框架,参考湖仓一体的最佳实践,沿用分层架构的设计思想^[9],设计智能化煤矿湖仓一体技术架构(图3)。智能化煤矿湖仓一体技术架构包含“信息基础设施体系”“三中台融合体系”“智能应用体系”3大基础体系以及数据中台的“数据源层”“数据汇聚层”“数据开发层”“数据服务层”“数据管理层”5大核心层级,旨在以数字连续性完整实现智能化煤矿数据治理的业务目标和技术目标。

6.1 技术架构的3大基础体系构建

智能化煤矿湖仓一体技术架构通过数据关联和业务关联实现智能化煤矿3大基础体系的数据共享和业务协同。

信息基础设施体系由煤矿物联网基础设施、煤矿互联网基础设施、工程数字化系统、综合自动化系统、管理信息化系统、智能化综合管控平台、云边端

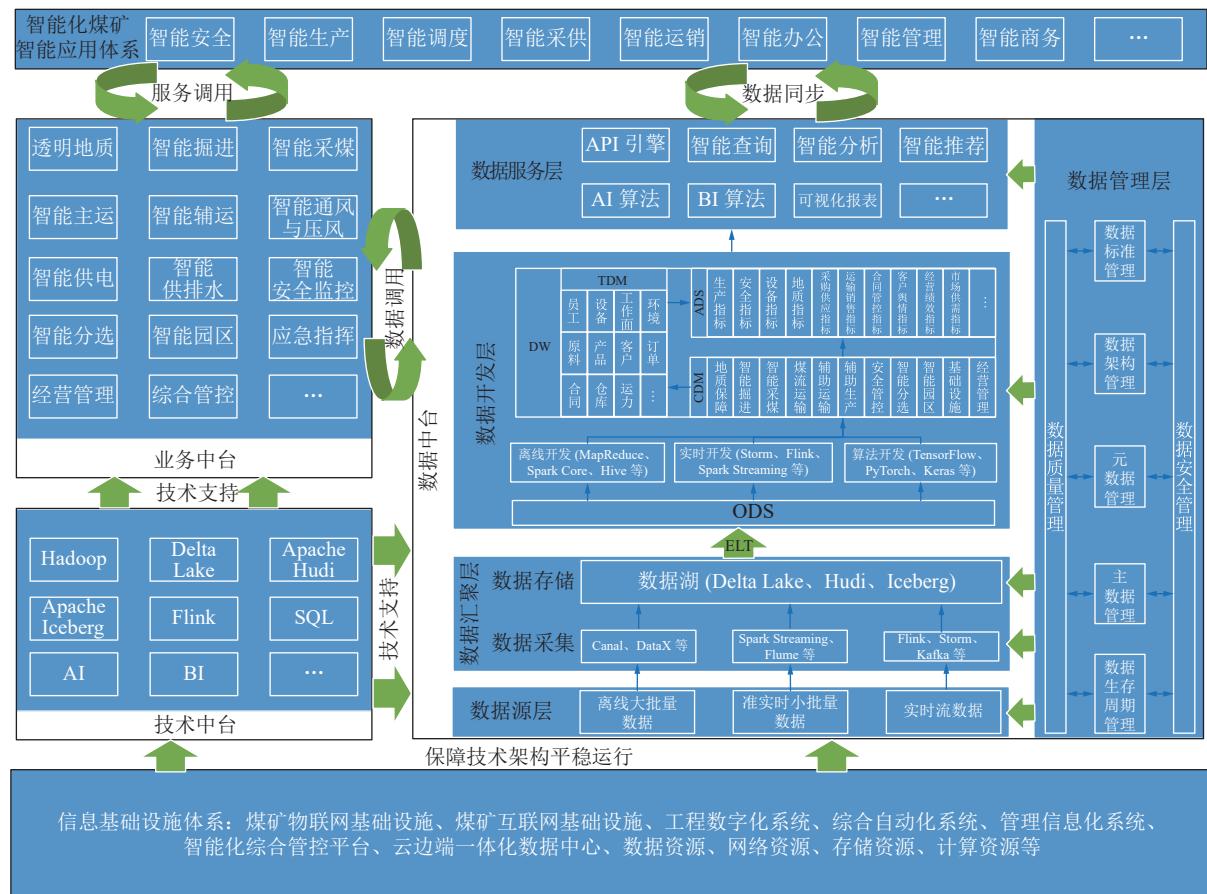


Fig.3 Technical architecture of Data Lakehouse for intelligent coal mines

一体化数据中心及其承载的数据资源、网络资源、存储资源和计算资源等构成,旨在为智能化煤矿湖仓一体技术架构的平稳运行提供专业化系统后台的资源管理能力保障,以此实现智能化煤矿的数据资源、存储资源、网络资源、计算资源和业务能力的沉淀。

三中台融合体系是技术中台、数据中台和业务中台基于微服务架构并通过标准化的应用程序接口 (Application Programming Interface, API) 交互融合形成的支撑体系。技术中台负责提炼智能化煤矿业务实现和数据治理所需的共性信息通信技术,并对其进行有效治理。数据中台负责沉淀智能化煤矿全域全量数据,并对其进行有效治理。业务中台负责抽取透明地质、智能掘进、智能采煤等智能化煤矿核心业务的共性业务逻辑和业务规则,并对其进行有效治理。三中台融合体系旨在为智能化煤矿湖仓一体技术架构的敏捷响应提供标准化系统中台的服务管理能力保障,以此支撑智能化煤矿数据治理技术目标的实现。

智能应用体系由智能安全、智能生产、智能调度等场景的应用需求构成,通过调用三中台融合体系

的业务微服务、数据微服务和技术微服务 API,为智能化煤矿核心业务的实现和潜在需求的满足提供轻量化系统前台的敏捷响应能力,以此充分发挥智能化煤矿的数据价值,支撑智能化煤矿数据治理业务目标的实现。

6.2 数据中台的 5 大核心层级开发

数据中台是智能化煤矿湖仓一体技术架构的核心组成部分,是智能化煤矿实现数字连续性的关键保障。根据数据治理的技术流程,数据中台涵盖“数据源层”“数据汇聚层”“数据开发层”“数据服务层”和“数据管理层”5 大核心层级的建设内容,部署和运行智能化煤矿数据治理体系、数据资产体系和自主学习算法体系。

数据源层沉淀了智能化煤矿全域全量的原始数据。为了有效制定和部署智能化煤矿数据管理策略、数据汇聚策略、数据开发策略和数据服务策略,智能化煤矿全域全量的原始数据应根据数据的吞吐量和处理的时效性划分为冷数据(离线大批量数据)、温数据(准实时小批量数据)和热数据(实时流数据)^[9]。

数据汇聚层采用 Delta Lake、Apache Hudi、

Apache Iceberg 等数据湖技术框架,通过数据采集和数据存储两大环节,依据智能化煤矿数据特性选取适当的数据汇聚策略,在遵循数据管理规范、保持数据原始性、满足数据安全和数据质量要求的前提下,将智能化煤矿全域全量数据汇聚到数据湖。

数据开发层根据智能化煤矿数据特性,采用离线开发、实时开发、算法开发等数据开发框架,在数据湖上构建以数据仓库承载的数据资产体系和自主学习算法体系。数据仓库(Data Warehouse, DW)采用分层设计。贴源数据层(Operational Data Store, ODS)对数据湖中的数据进行抽取—加载—转换(Extract-Load-Transform, ELT)操作,为公共数据层(Common Data Model, CDM)的构建奠定数据基础。CDM 使用 ODS 数据,面向智能化煤矿核心业务进行主题域建模。标签数据层(Tag Data Model, TDM)使用 CDM 数据,面向智能化煤矿业务对象建模,构建业务对象的数据画像。应用数据层(Application Data Store, ADS)使用 TDM 和 CDM 数据,面向智能化煤矿安全管理、生产管理和经营管理的应用需求建模,形成智能化煤矿指标数据体系。

数据服务层通过构建标准化的数据微服务 API 体系,为智能化煤矿的业务中台和智能应用体系提供规范的数据服务接口。智能化煤矿的数据微服务包括基础数据微服务、标签画像微服务和智能算法微服务等类型。基础数据微服务包括 API 引擎、智能查询、智能分析、智能推荐等。标签画像微服务包括数据画像、可视化报表等。智能算法微服务包括人工智能算法微服务、商务智能算法微服务等。

数据管理层旨在落实智能化煤矿数据治理的制度安排,部署和运行智能化煤矿数据管理体系和数据标准体系,采用数据标准管理、数据架构管理、元数据管理、主数据管理、数据生存周期管理、数据质量管理、数据安全管理等技术工具,确保数据运营合规,保证数据质量,保障数据安全,支撑智能化煤矿数字连续性的实现。

7 智能化煤矿数据治理评估准则

基于智能化煤矿数据治理的目标要求和基本原则,参考《数据管理能力成熟度评估模型》(GB/T 36073—2018)、《信息技术 大数据 数据治理实施指南》(GB/T 44109—2024)等国家标准,结合智能化煤矿数据治理实施框架和技术架构,考虑智能化煤矿数据治理实际,借鉴能力成熟度思想^[11],构建智能化煤矿数据治理能力成熟度模型(图 4),为智能化煤矿

数据治理提供评估准则框架,并明确智能化煤矿数据治理的能力提升路径。

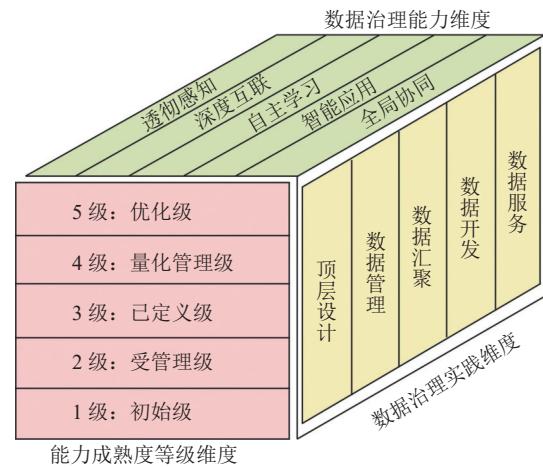


图 4 智能化煤矿数据治理能力成熟度模型

Fig.4 Data governance capability maturity model for intelligent coal mines

智能化煤矿数据治理能力成熟度模型由“数据治理能力、数据治理实践、能力成熟度等级”3个维度耦合而成。其中,3个维度间的耦合关系指引了智能化煤矿数据治理的能力提升路径。智能化煤矿数据治理能力成熟度等级的达成以对应能力成熟度等级中关键能力的实现为标志。智能化煤矿数据治理关键能力的实现则以有效执行对应关键能力所需的关键实践为支撑。由此,从初始级开始,在原有数据治理关键能力的基础上,通过有效执行对应能力成熟度等级的关键实践,达成对应能力成熟度等级的关键能力并符合对应能力成熟度等级的共性特征,逐级实现智能化煤矿数据治理能力成熟度等级的提升。

智能化煤矿数据治理能力维度包含“透彻感知、深度互联、自主学习、智能应用、全局协同”5个能力域,共 28 个能力项。智能化煤矿数据治理实践维度包含“顶层设计、数据管理、数据汇聚、数据开发、数据服务”5个实践域中的关键实践^[11]。

顶层设计实践域和数据管理实践域重在实现全局协同能力,并对数据汇聚、开发和服务提供指导。顶层设计实践域包含数据战略规划、治理组织构建、顶层架构设计等关键实践。数据管理实践域包含数据标准管理、数据架构管理、元数据管理、主数据管理、数据质量管理、数据安全管理和数据生存周期管理等关键实践。数据汇聚实践域重在实现透彻感知和深度互联能力,包含数据采集、数据传输和数据存储等关键实践。数据开发实践域重在实现自主学习

能力,包含构建与运行数据资产体系、构建与运行自主学习算法体系等关键实践。数据服务实践重在实现智能应用能力,包括数据价值体系构建与运行(构建与提供智能化煤矿业务微服务、数据微服务与技术微服务)等关键实践。

智能化煤矿数据治理能力成熟度等级维度按照

数据治理能力项的拓展和深化程度划分为“初始级、受管理级、已定义级、量化管理级、优化级”5个等级。智能化煤矿数据治理遵循“项目化管理—流程化管理—标准化管理—量化管理—标杆化管理”的渐进式发展路径,实现智能化煤矿数据治理能力的持续提升(图5)。

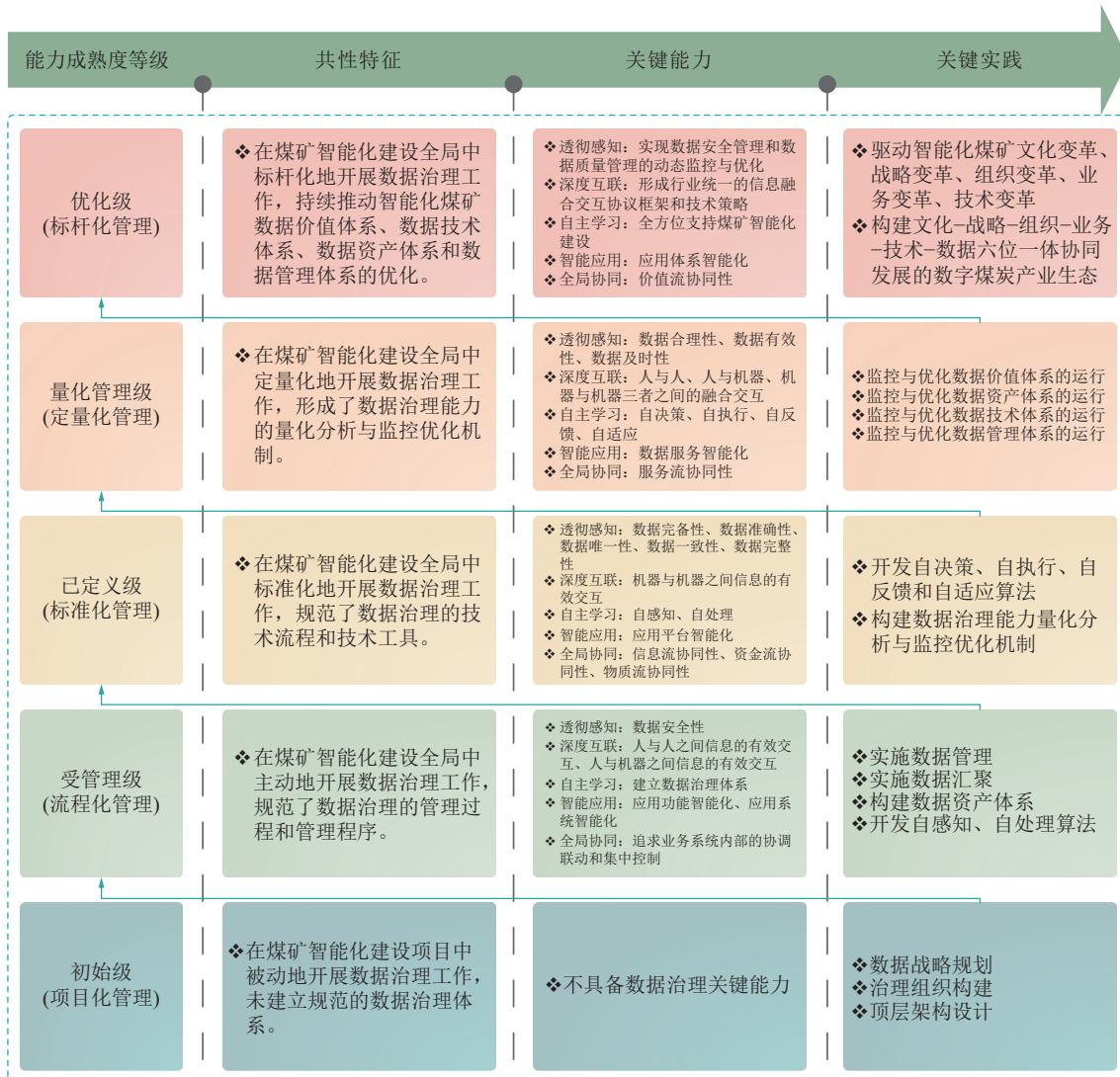


图5 智能化煤矿数据治理能力提升路径

Fig.5 Improvement path of data governance capabilities for intelligent coal mines

8 结语

智能化煤矿数据治理方法论体系是由概念模型、理论基础、基本原则、过程和程序、方法和工具以及评估准则等要素构成的规则体系,阐明有效实现智能化煤矿数据治理目标的依据和原则,为智能化煤矿数据治理的顶层设计提供理论基础和方法论支撑。多元协同的智能化煤矿数据治理主体在复杂系统理论、数据战略管理理论、数字连续性理论、公共治理

理论、协同创新理论、信息生命周期理论、PDCA循环理论等理论基础的指导下,遵循沉淀、复用、共享、协同的数据治理理念和业务导向、协同治理、文化驱动、技术赋能、流程嵌入、持续改进的基本原则,在“统筹与规划、构建与运行、监控与评价、改进与优化”4个动态环节上,运用数据治理技术和工具,通过顶层设计、数据采集、数据存储、数据开发、数据服务以及全生命周期数据管理等技术流程,保障数据质量,防控数据风险,确保数据合规,提升数据价值,

使煤矿数据满足智能化应用体系的数据服务需求，并在智能化煤矿数据治理能力成熟度模型的指引下持续提升数据治理能力，最终以数字连续性全面支持智能化煤矿建设目标的实现。智能化煤矿数据治理实施框架阐明智能化煤矿数据治理的管理过程和关键程序，为智能化煤矿数据治理的管理实施提供具体路径和管理方法。智能化煤矿湖仓一体技术架构，阐明智能化煤矿数据治理平台的系统结构和技术选型，为智能化煤矿数据治理的技术实现提供技术方法和工具。数据治理是支撑煤矿人工智能技术发展、煤矿自主学习算法开发和煤矿智能化建设的底层技术，是煤矿信息资源和能力实现整合集成、煤矿智能化系统实现协同集控的关键保障。国家主管部门、煤炭行业协会和学会、煤炭企业集团、基层煤矿等多元数据治理主体应通力协作，整合政策、资金、人才、技术等创新要素，各自发挥主体优势，加强智能化煤矿数据治理顶层设计，建立健全数据治理体制机制，加快智能化煤矿数据标准体系建设，研发智能化煤矿数据治理技术平台，强化智能化煤矿数据的全生命周期管理，以全面支撑煤矿数字化、智能化发展，共襄数字煤炭建设盛举。

参考文献(References):

[1] 毛君, 杨润坤, 谢苗, 等. 煤矿智能快速掘进关键技术研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1214–1229.
MAO Jun, YANG Runkun, XIE Miao, et al. Research status and prospects of key technologies for intelligent rapid excavation in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1214–1229.

[2] 袁智, 蒋庆友, 庞振忠. 我国煤矿智能化综采开采技术装备应用现状与发展思考[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 189–198.
YUAN Zhi, JIANG Qingyou, PANG Zhenzhong. Application status and development thinking of intelligent mining technology and equipment in coal mines in China[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 189–198.

[3] 王国法, 张建中, 刘再斌, 等. 煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 1–16.
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, LIU Zaibin, et al. Progress in digital and intelligent technologies for complex giant systems in green coal development[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 1–16.

[4] 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 181–202.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei, et al. System engineering and key technologies research and practice of smart mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 181–202.

[5] 刘峰, 郭林峰, 张建明, 等. 煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 1–15.

[6] 何敏. 智能煤矿数据治理框架与发展路径[J]. 工矿自动化, 2020, 46(11): 23–27.
HE Min. Framework and development path of data governance in intelligent coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(11): 23–27.

[7] 谭章禄, 吴琦. 基于层级链参考模型的智慧矿山建设问题分析[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(2): 257–266.
TAN Zhanglu, WU Qi. Analysis of the problems of smart mine construction based on the layer-level-chain reference model[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(2): 257–266.

[8] 谭章禄, 王美君. 智慧矿山数据治理概念内涵、发展目标与关键技术[J]. 工矿自动化, 2022, 48(5): 6–14.
TAN Zhanglu, WANG Meijun. Research on the concept connotation, development goal and key technologies of data governance for smart mine[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(5): 6–14.

[9] 谭章禄, 王美君. 智能化煤矿数据治理概念模型及技术架构研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(2): 242–255.
TAN Zhanglu, WANG Meijun. Research on the conceptual model and technical architecture of data governance for intelligent coal mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(2): 242–255.

[10] 谭章禄, 王美君, 叶紫涵. 智能化煤矿数据治理体系与关键问题研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(5): 22–29.
TAN Zhanglu, WANG Meijun, YE Zihan. Research on intelligent coal mine data governance system and key issues[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(5): 22–29.

[11] 王美君, 谭章禄, 李慧园, 等. 智能化煤矿数据治理能力评估与提升策略研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(1): 106–115.
WANG Meijun, TAN Zhanglu, LI Huiyuan, et al. Research on evaluation and promotion strategy of data governance capability for intelligent coal mines[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(1): 106–115.

[12] 姜德义, 魏立科, 王翀, 等. 智慧矿山边缘云协同计算技术架构与基础保障关键技术探讨[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 484–492.
JIANG Deyi, WEI Like, WANG Chong, et al. Discussion on the technology architecture and key basic support technology for intelligent mine edge-cloud collaborative computing[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 484–492.

[13] 杜毅博, 赵国瑞, 巩师鑫. 智能化煤矿大数据平台架构及数据处理关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 177–185.
DU Yibo, ZHAO Guorui, GONG Shixin. Study on big data platform architecture of intelligent coal mine and key technologies of data processing[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 177–185.

[14] 疏礼春. 智能煤矿数据中台架构及关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(6): 40–44.
SHU Lichun. Research on the architecture and key technologies

of intelligent coal mine data middle platform[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(6): 40–44.

[15] 方乾, 张晓霞, 王霖, 等. 智能化煤矿大数据治理关键技术研究、实践与应用[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(5): 37–45, 73.
FANG Qian, ZHANG Xiaoxia, WANG Lin, et al. Research, practice and application of key technologies of intelligent coal mine big data governance[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(5): 37–45, 73.

[16] 王国法, 任怀伟, 赵国瑞, 等. 智能化煤矿数据模型及复杂巨系统耦合技术体系[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 61–74.
WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, et al. Digital model and giant system coupling technology system of smart coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 61–74.

[17] 谭章禄, 王美君. 智能化煤矿数据归类与编码实质、目标与技术方法[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(1): 56–62, 72.
TAN Zhanglu, WANG Meijun. The essence, goal and technical method of intelligent coal mine data classification and coding[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(1): 56–62, 72.

[18] 谭靓洁, 李永飞, 吴琼. 基于区块链的煤矿安监云数据安全访问模型研究[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(5): 93–99.
TAN Liangjie, LI Yongfei, WU Qiong. Research on security access model of coal mine safety supervision cloud data based on blockchain[J]. *Industry and Mine Automation*, 2022, 48(5): 93–99.

[19] 韩培强, 胡而已, 叶兰, 等. 智能矿山数据质量管理研究及实践[J]. *中国煤炭*, 2024, 50(2): 70–76.
HAN Peiqiang, HU Eryi, YE Lan, et al. Research and practice of intelligent mine data quality management[J]. *China Coal*, 2024, 50(2): 70–76.

[20] 尚伟栋, 王海力, 张晓霞, 等. 基于对象模型的煤矿数据采集融合共享系统[J]. *工矿自动化*, 2024, 50(1): 17–24, 34.
SHANG Weidong, WANG Haili, ZHANG Xiaoxia, et al. A coal mine data acquisition, fusion and sharing system based on object model[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(1): 17–24, 34.

[21] 安小米, 王丽丽. 大数据治理体系构建方法论框架研究[J]. *图书情报工作*, 2019, 63(24): 43–51.
AN Xiaomi, WANG Lili. Research on methodology framework for big data governance system building[J]. *Library and Information Service*, 2019, 63(24): 43–51.

[22] 袁亮, 张平松. 煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 1–14.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Key technology and path thinking of dynamic reconstruction of mine transparent geological model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 1–14.

[23] 程建远, 王保利, 范涛, 等. 煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 1–12.
CHENG Jianyuan, WANG Baoli, FAN Tao, et al. Typical application scenes and key technologies of coal mine geological transparency[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 1–12.

[24] 王家臣, 刘云熹, 李杨, 等. 矿业系统工程 60 年发展与展望[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 261–279.
WANG Jiachen, LIU Yunxi, LI Yang, et al. 60 years development and prospect of mining systems engineering[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 261–279.

[25] 张晓霞, 陈思宇, 苏上海, 等. 矿井智能一体化管控平台设计及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(9): 168–178.
ZHANG Xiaoxia, CHEN Siyu, SU Shanghai, et al. Design and application of mine intelligent integrated management and control platform[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 168–178.

[26] 赵莉, 李俊. 智能化煤矿劳动力结构转型与职业重塑[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(6): 868–878.
ZHAO Li, LI Jun. Labor structure transformation and career remodeling of intelligent coal mine[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(6): 868–878.

[27] 付恩三, 刘光伟, 白润才, 等. 大数据时代矿山协同监管监察新思路[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(8): 39–44.
FU Ensan, LIU Guangwei, BAI Runcai, et al. Exploration and research of mine multi-element cooperative supervision new thinking in era of big data[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(8): 39–44.

[28] 孙旭东, 刘庚慧, 段星月, 等. 智能化煤矿监测监控数据治理能力提升路径研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(6): 139–144.
SUN Xudong, LIU Genghui, DUAN Xingyue, et al. Improvement path of monitoring data governance ability for intelligent coal mines[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(6): 139–144.

[29] 伊丙鼎. 我国煤矿井下地应力参数数据库的开发和研究[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(5): 134–138.
YI Bingding. Development and research of in situ stress parameters database for underground coal mines of China[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(5): 134–138.

[30] 王霖, 方乾, 张晓霞, 等. 智能化煤矿数据仓库建模方法[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(4): 5–13.
WANG Lin, FANG Qian, ZHANG Xiaoxia, et al. Intelligent coal mine data warehouse modeling method[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(4): 5–13.