

有色金属工业智能模型库构建方法及应用

阳春华¹, 刘一顺¹, 黄科科^{1,2}, 孙备¹, 李勇刚¹, 陈晓方¹, 桂卫华¹

(1. 中南大学自动化学院, 长沙 410083; 2. 鹏城实验室, 广东深圳 518055)

摘要: 有色金属工业是我国实体经济的重要基础, 在国民经济和国防建设中占有关键地位。工业软件作为有色金属工业高质量发展的核心要素之一, 与深入实施国家软件发展战略相关联。本文针对有色金属工业因知识模型缺失而极大限制行业工业软件发展的迫切问题, 提出了有色金属工业智能模型库构建方法。从元模型驱动工程出发, 定义了有色冶金元模型及其属性特点, 提出了基于MODELING架构的元建模方法; 设计了基于工业互联网的有色金属智能模型库总体架构、多语言融合模型集成敏捷开发环境、多场景黑盒复用的元模型封装体系, 构建了基于“五层两维”分类标准、领域知识图谱的元模型全生命周期管理平台。立足有色冶金工艺机理、操作经验、智能方法等方面的长期积淀, 开发了有色金属工业智能模型库。通过两个有色冶金典型场景的应用案例, 展示了有色金属智能模型库在工程应用中对提升智能化水平发挥的良好作用。有色金属工业智能模型库为行业工业软件的发展提供了核心知识支撑, 将在提升有色金属工业智能制造水平、加快有色金属强国建设进程方面起到基础支撑作用。

关键词: 有色金属工业; 工业软件; 元模型; 智能模型库; 工业互联网

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A

Intelligent Model Library for Nonferrous Metal Industry: Construction Method and Application

Yang Chunhua¹, Liu Yishun¹, Huang Keke^{1,2}, Sun Bei¹, Li Yonggang¹,
Chen Xiaofang¹, Gui Weihua¹

(1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: Nonferrous metal industry is the foundation of China's substantial economy and plays a key role in national economy and defense construction. Industrial software is crucial for the high-quality development of the nonferrous metal industry and is associated with the in-depth implementation of national software development strategies. Currently, the industrial software development in the nonferrous metal industry is significantly restricted by the lack of knowledge models. Hence, we propose a method for constructing an intelligent model library for the nonferrous metal industry. Considering meta-model-driven engineering, we define the nonferrous metallurgical meta-model and its attributes, and propose a meta-modeling method based on the MODELING architecture. Additionally, we design an overall architecture for the intelligent model library based on industrial Internet, an agile model-development environment integrating multiple languages, and a meta-model encapsulation system based on multi-scenario black-box reuse. Moreover, a meta-model full lifecycle management platform is constructed based on a five-layer two-dimension classification standard and the domain knowledge graph. The intelligent model library for the nonferrous metal industry is developed based on the

收稿日期: 2022-05-10; **修回日期:** 2022-07-05

通讯作者: 黄科科, 中南大学自动化学院教授, 研究方向为智能制造与工业互联网; E-mail: huangkeke@csu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“流程制造工业软件发展战略研究”(2021-XZ-28); 国家自然科学基金项目(61988101)

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

long-term accumulation of nonferrous metallurgy process mechanism, operating experiences, and intelligent methods. The good role of intelligent model library in improving the intelligent level in engineering applications is presented through the application of two typical nonferrous metallurgical scenarios. The intelligent model library of the nonferrous metal industry provides a core knowledge support for the development of industrial software and plays a fundamental role in promoting smart manufacturing and strengthening the nonferrous metal industry.

Keywords: nonferrous metal industry; industrial software; meta-model; intelligent model library; industrial Internet

一、前言

有色金属工业是国民经济的支柱产业和实体经济发展的基础,也是制造强国的重要支撑[1]。改革开放40多年来,我国有色金属生产工艺、装备和自动化水平得到显著提升,形成了较为完整的现代有色冶金工业体系[2]。我国有色金属生产量和消费量连续多年位居世界第一[3],如10种常用有色金属的产量占比均在50%以上[4]。然而,我国距离有色金属强国仍有一定差距,行业高质量发展面临排放体量大、能耗物耗高、人工依赖严重等问题,亟需推进信息化和工业化深度融合,以智能制造促进绿色、智能、高效化生产[5]。

工业软件作为工业技术软件化的产物,是虚拟制造、工艺数字化设计、生产优化控制的关键支撑,有色金属工业智能制造的核心要素[6,7]。工业软件作为当前我国科技攻关的迫切问题,关乎工业体系的长远发展[8]。工业软件具有强工业属性,是工业知识的代码化表达。其中,软件是应用载体;模型是内核,集中体现了工业软件技术能力。在有色金属工业,有色冶金模型将生产过程涉及的工艺机理、最佳实践等进行封装,是行业工业软件最底层、最核心的支撑,为行业智能化提供技术知识底座,促进有色金属工业智能化转型[9]。

目前,针对有色金属生产流程中的各个环节已有较多研究,形成了一系列知识模型。针对矿山磨矿系统提出了混合非线性模型预测控制器,保证了在外部干扰下磨机电路的稳定控制[10];提出了基于多信息融合与可拓理论相结合的铋浮选工况识别方法,实现铋浮选工况的准确识别[11];针对有色冶金过程提出了智能集成建模描述方法,结合多类有色冶金工程问题探讨了优化方法应用[12];面向有色冶金复杂生产过程研究了基于标签传播字典学习的过程监测方法,通过铝电解案例验证了有效性[13];面向有色冶金过程的动态不确定特性,以典型场景为应用对象,提出了概率不确定、模糊不确定、区

间不确定优化方法[14];采用基于动力学的优化控制方法有效提升钛加工成型的控制精度[15]。

尽管有色金属生产全流程的工艺建模、运行优化等均已方法模型,但多是面向特定场景开发的,因集成度较高而不易在其他场景下应用;相关模型的开发工作基本上“各自为战”,没有在具有统一标准的平台上对模型资源进行汇聚管理,使得模型的质量差异大、兼容性差,无法形成有色冶金模型应用业态。这些差异化、碎片化、分散化的有色冶金模型,难以对行业工业软件发展构成有效支撑[16]。因此,有色冶金模型数量不足、质量不一,明显制约了行业工业软件的发展水平。着眼于有色金属工业高质量发展要求,亟需对行业知识进行沉淀,开发通用化、强兼容的模型,面向全行业构建标准化、规模化的汇聚管理平台;通过模型库整合全行业优势资源,促进形成资源富集、协同演进的新生态;探索出解决行业工业软件核心知识不足问题的有效途径,推动行业工业软件发展进程。

本文以有色冶金通用模型和汇聚管理平台为切入点,对有色金属工业模型库构建方法开展系统分析。凝练有色金属智能模型库构建需求,定义有色冶金元模型及元建模范式,提出基于工业互联网的智能模型库构建技术;立足行业知识,构建有色金属智能模型库,通过有色冶金典型场景验证模型库的应用效能;对未来的模型库研究方向进行展望,以期有色金属工业智能化发展提供启发和参考。

二、有色金属工业智能模型库构建需求

(一) 有色金属工业模型库宏观架构需求

从有色金属工业的整体状态来看,现有的模型库多以离线资源形式存在,体量规模小、类别不全面、获取利用难,模型资源与实际应用脱节断链,难以融入智能化制造、网络化协同的发展潮流,不足以支撑形成模型开发/应用/服务业态。

工业互联网是新一代信息技术与现代工业技术

深度融合的产物，也是制造业数字化、网络化、智能化的重要载体，世界新一轮产业竞争的制高点 [17]。在国家规划层面，要求加快建设制造强国，加快发展先进制造业，推动互联网、大数据、人工智能（AI）和实体经济深度融合 [18]。工业互联网作为智能制造的关键基础设施，有助于有色金属行业实现智能化生产、网络化协同、服务化转型。

对于有色金属工业智能模型库，工业互联网中的基础设施即服务（IaaS）层提供了强有力的基础设施与海量数据，平台即服务（PaaS）层的开放式云操作系统形成了可扩展、可兼容的服务支撑，软件即服务（SaaS）层中的工业应用程序（APP）构建方式为不同场景下的应用提供了灵便轻巧的途径 [19]。因此，工业互联网为模型库提供了载体支撑和应用途径，资源集聚共享的平台能力有助于模型库的行业推广应用。

在新时期、新阶段下，把握智能制造建设方向，构建基于工业互联网的有色金属工业智能模型库，将加速行业智能化发展、形成有色金属行业转型升级新动能，有效缓解国产工业软件在有色金属工业中面临的核心知识模型不足的难题，筑牢有色冶金智能模型和工业软件的开发基础。

（二）有色金属工业模型库构建技术需求

1. 有色冶金过程相场耦合表征难、模型集成度高且通用性差，需定义粒度适中的元模型和标准化建模范式

有色冶金是典型的长流程工业场景，生产过程中的物理化学反应复杂、“气-液-固”多相交织、“电-磁-热-流-力-浓度”多场耦合；通常需多个工序、多种设备进行协作，具有很强的过程关联性与数据复杂性，相应模型包含多项参数且模型之间关联耦合 [20]。有色冶金从业人员难以编码开发如此复杂的模型，而软件开发人员难以理解耦合关联的行业知识并进行代码描述，严重的行业知识壁垒导致有色冶金模型开发难度大。在传统模型开发模式下，开发者因追求整体性，倾向于将多种复杂功能进行封装，形成较高层级的粗粒度模型。当面向新场景调用某种功能时，由于原有模型的集成度过高、无法单独拆解，需进行模型的大幅修改或重新编码，从而造成模型重复开发、应用效率偏低的局面。

为了解决模型耦合复杂而难以开发、集成度高而通用性差等问题，应将模型进行解耦和拆分，以粒度适中、通用化的基础元模型对行业知识进行表征；在极大降低开发与应用难度的同时，可促进工业技术知识的沉淀与复用，进一步引导行业模型库的良性发展。

2. 模型编译环境差异大、兼容性差且复用难，需支持多语言融合的模型集成敏捷开发环境

从元模型开发者的视角看，当前模型开发工作多属“各自为战”，因模型开发人员知识、技能存在差异，所使用的开发语言可能各不相同（如 Python、C++、Java 等）。单一的开发环境较难满足模型开发过程中的多样化需求，不同语言模型之间相互阻隔、兼容性差，难以协同使用。因此，要求模型开发环境支持多语言协同开发。从元模型应用者的角度看，应根据实际需求将多个元模型进行组合，得到具备特定复杂功能的模型。然而，元模型集成者多为有色冶金行业从业人员，具有丰富的领域知识而通常不具备娴熟的编程能力，难以在短时间内从底层开始对诸多元模型代码进行继承、派生以形成复杂模型。

图形化、组态式的开发环境，更适合行业人员的敏捷使用。用户根据模型中的逻辑关系，将多个元模型进行可视化拼接操作，无需编码即可实现具有复杂功能的模型，从而显著降低模型开发门槛、提高模型开发效率 [21]。

3. 模型管理效率低下、推广应用难，需涵盖分类管理、审核评价、精准搜索的全生命周期综合管理平台

有色金属类别多、生产流程长、工艺类型多、工艺单元关联耦合、反应机理复杂。元模型作为有色金属工业知识的基本载体，数量庞大、种类繁多、关联性强 [22]。随着元模型开发数量及种类的增多，若缺乏有效的组织管理手段，元模型将如同“一盘散沙”。当用户开发服务需调用某种功能时，很难根据所需的功能与应用场景等属性，快速地找到对应的元模型，也就导致众多元模型无法被有效利用，模型库自然难以发挥应有价值。

因此，需从元模型全生命周期出发，构建集分类管理、审核评价、精准搜索等于一体的全生命周期综合管理平台，对海量模型资源进行高效管理，充分促进模型库的实践应用与价值呈现。

三、有色金属工业元模型构建技术

(一) 元模型定义及特点

有色冶金模型是一种反映有色冶金系统（对象）各变量之间定量或定性关系的数学（软件化）表达形式，包括机理模型、数据模型、知识模型、AI 方法等；目的是为了描述有色冶金系统（对象）的变化规律，支撑有色冶金的工艺设计、运行控制、决策优化。将模型解耦并拆解为多个独立的模型单元，以粒度适中、通用化的元模型对行业知识进行表征，可显著降低模型开发与应用门槛，促进行业模型库的发展水平。

元模型是具有独立决策功能且不可继续拆分的模型单元，创建特定领域中模型的基本构建元素（即模型的“模型”）；作为具有复杂功能的独立单元，是代码的抽象表示、多个基本函数融合而成的高级功能单元。模型由若干个元模型共同定义，成为元模型的高级组合，是接近于应用服务的实例，相应功能较元模型更为丰富；作为元模型的结构化组合，可通过并联集成、加权集成、串联集成、嵌套集成、结构网络化集成、部分方法替代集成等方式将元模型进行组合。单个元模型可被多个模型使用，单个模型也可与多个元模型相关联。元模型驱动工程总体分为 3 层架构，从下至上为代码块层 M0、元模型层 M1、模型层 M2（见图 1）。

元模型是面向对象的，将特定功能相关的代码组织成一个整体，从更高层次进行系统建模，更贴

近事物的自然运行模式。元模型作为模型的细粒度表现，本质上仍是模型的存在形式，与模型拥有相同的适用范围、结构形式、方法集合等属性；通过代码抽象和模型解耦，以适中的复杂度对工业知识进行沉淀与固化。每个元模型可由三元组进行表示，元模型就是包含该三元组且不可再细分的模型单元；模型则可描述为一组元模型的有机组合。

元模型是具备复杂功能的独立智能单元，从元模型驱动工程、工业互联网环境下的软件开发及应用角度看，主要特点如下。① 可复用。元模型被构建为标准化、通用化的可重用构件，在不同应用中保持一致性。可复用的元模型具有良好的适应性，可以提高模型开发与应用效率，降低开发成本，改善系统可维护性。② 互操作。不同开发语言和开发环境下开发的元模型，可相互连接并无障碍地进行数据交换，多个元模型的互操作形成了模型服务。③ 跨平台。元模型可在不同语言环境、不同操作系统、不同硬件配置、不同工业互联网平台下直接运行，无需修改原始文件或代码；相比原生开发，基于跨平台元模型的服务开发具有成本低、周期短、难度小等优势。

(二) 有色金属工业元模型建模范式

有色冶金知识专业性强、跨领域差异大，建模过程对知识理解程度及描述手段的差异性往往导致元模型质量参差不齐。为保证元模型的整体一致性、提升元模型建模效率与质量，需要流程化、标

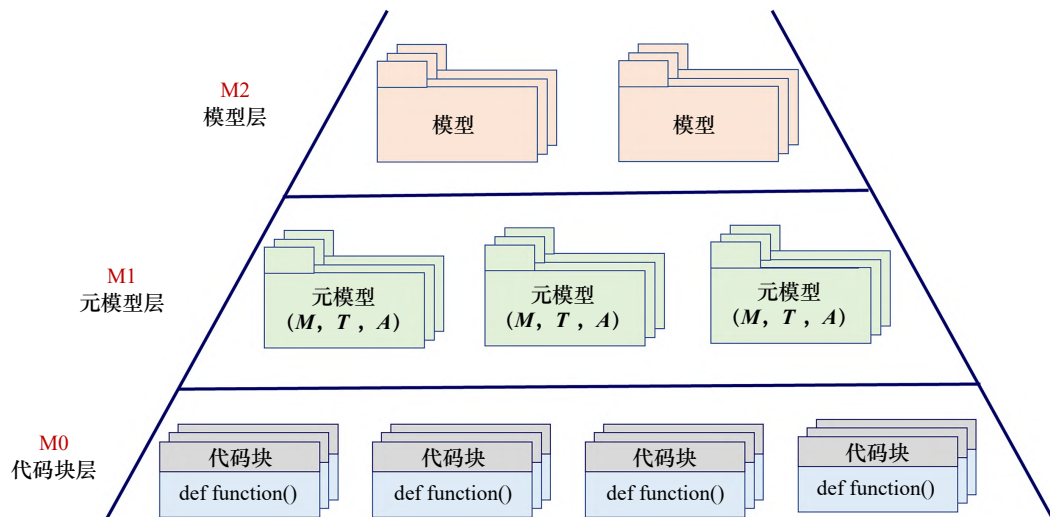


图1 元模型驱动工程三层架构

注： M 是元模型原型对象； T 是元模型输入、输出及形参集合的数据类型； A 是元模型的功能属性。

标准化的元建模范式作为方法论指导。本研究提出了基于MODELING架构的有色冶金元模型建模方法，通过“层次开发-迭代优化”构建对象抽象化、描述具象化、应用软件化的元模型。

有色冶金元模型MODELING建模方法包括建模对象、功能定义、表达形式、逻辑接口、标准化编码、逐步优化。①在建模之初，确定建模对象（如流程、工序、设备等），对元模型功能进行详细定义，明确建模目的（如决策、控制、诊断等）；②结合建模对象和功能方面累积的经验知识，以机理描述或数据描述等多种形式对元模型进行准确表达（如数学公式、网络结构、流程规则等），从建模对象抽象出用于信息交互的逻辑接口（输入、输出、形参）；③采用多种编程语言，依照元模型功能及接口进行标准化编码，完成元模型的数字化描述和软件化实现；④依据元模型测试结果及用户评价，逐步优化并迭代更新，提升元模型成熟度。

在MODELING建模方法中，元模型可通过多种形式进行具体描述。通过各种表现形式的编码与封装，形成具有标准化接口的通用元模型。例如，有色冶金过程中的物质转化、反应动力学、场相变化等工艺机理，可用化学反应方程式、差分方程等形式进行建模；趋势分析、参数设定等操作经验和最佳实践，可用专家规则、模糊函数、Petri网等形式进行具象化表示以形成知识元模型；AI方法可用

神经网络、树结构等进行表示。

以锌冶炼除钴过程的反应机理建模为例，阐述MODELING建模方法的应用过程。将锌冶炼除钴过程的反应机理作为建模对象，旨在揭示锌冶炼除钴过程中的关键指标随时间、操作参数变化的动态特性。基于锌冶炼工艺知识、物料平衡、生产数据、物化性质等先验知识，结合过程关键变量，构建由动力学、热力学、反应类型、反应步骤、具体反应组成的锌冶炼除钴过程反应机理表达形式；通过机理与数据结合的建模方法，确定除钴过程的反应动力学及具体参数；以软件化手段对反应机理元模型进行编码和封装，形成工业机理元模型实体，通过元模型调用和应用效果对该元模型进行反馈更新。

四、有色金属工业智能模型库构建技术

（一）基于工业互联网的智能模型库架构

工业互联网作为连接装置/设备、物料、人、信息系统的基础网络，实现工业数据的全面感知、动态传输、实时分析，支撑科学决策与智能控制，是智能制造的关键基础设施 [23]。在基于工业互联网的有色金属工业智能模型库总体架构中（见图2），工业互联网IaaS层中各项基础设施为模型库的构建提供丰富资源，同时将不同来源的数据进行广泛采

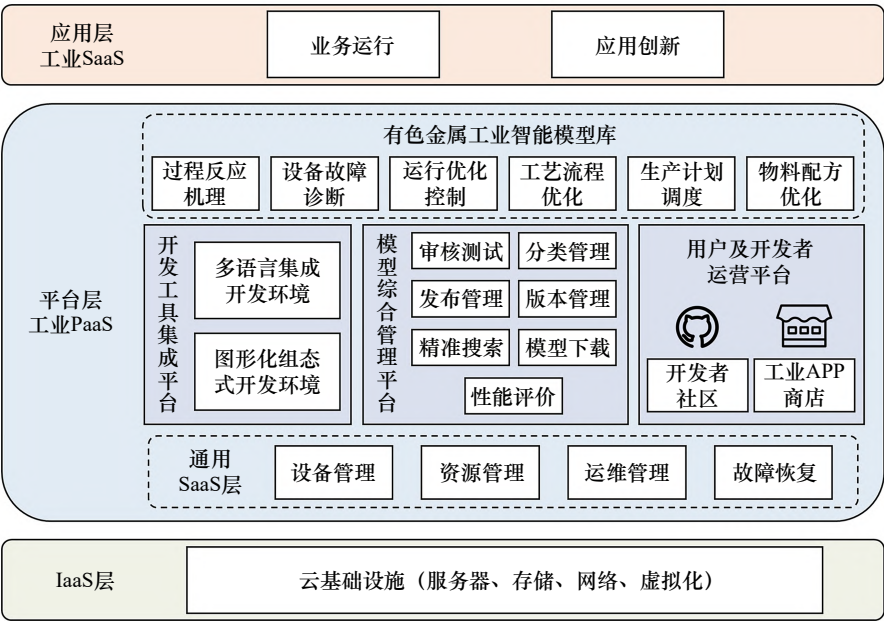


图2 基于工业互联网的有色金属工业智能模型库架构

集与汇聚存储,为元模型的开发与测试应用提供“原料”;PaaS层中具有可扩展的开放式云操作系统,基于通用PaaS、工业大数据系统等形成面向应用的工业云中间件和微服务,以多样化、可兼容的平台环境为模型库提供服务支撑;SaaS层中的微服务和工业应用开发工具,可快速构建定制化的工业APP,形成满足不同行业及场景的应用服务,解决工业实践和应用创新需求,为元模型的便捷调用提供便利途径。将有色金属工业智能模型库中的元模型集成开发平台、综合管理平台、开发者社区以及各项元模型统一部署在工业互联网PaaS层,为各类工业APP应用提供核心技术基础。

基于工业互联网的有色金属工业智能模型库总体技术路线如图3所示。在底层数据层,对生产过程中的海量数据进行动态采集、实时流计算、加载抽取及分布式存储,以Java数据库连接(JDBC)、开放数据库互连(ODBC)等标准接口的形式提供数据库访问能力。对于集成开发环境,通过JSON-RPC、Docker、WebSocket等技术,将各种语言的编译环境与JupyterLab适配整合,构建支持C++、Java、Python等多类型编程语言的集成开发环境,实现多语言、交互式的元模型代码建模。同时,基

于Docker、Kubernetes、Render等技术构建图形化开发环境,实现元模型的组态式操作、原子化交互,对各元模型进行“拖拉拽”连接即可快速开发智能服务。

在元模型全生命周期综合管理平台中,基于“五层两维”有色冶金元模型分类体系,利用非关系型图数据库Neo4j构建有色冶金元模型知识图谱,通过知识抽取、知识融合、语义理解等,实现元模型的快速精准搜索与智能推荐。对于模型库中数字化、标准化的元模型,针对在线使用场景,将其实例化封装成RESTful应用程序编程接口(API),支持curl、Python、Scala等多方式灵活调用;针对离线使用场景,则封装成PMML格式文件,实现多场景跨域使用。在应用服务层各类浏览器/服务器模式(B/S)、服务器/客户机(C/S)架构应用中,“即插即用”的元模型调用方式可提升工业APP的开发效率并改善系统的可维护性。

(二) 多语言融合的模型集成敏捷开发环境

1. 多语言融合的元模型集成开发环境

考虑元模型开发语言、开发工具、开发环境的差异性,提出了多语言融合的元模型集成开发环境

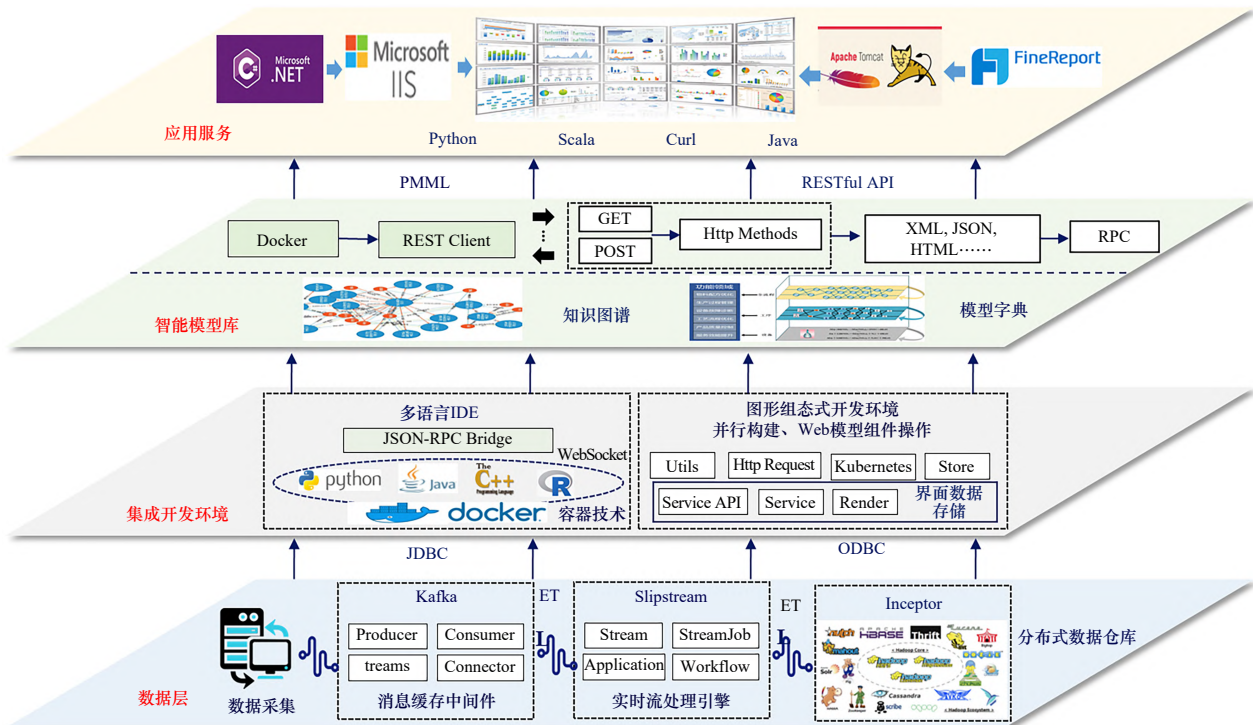


图3 基于工业互联网的有色金属工业智能模型库技术路线

注: PMML表示预测模型标记语言; XML表示可扩展标记语言; HTML表示超文本标记语言; RPC表示远程过程调用; IDE表示集成开发环境。

构建框架。用户可根据开发需求自由切换编译环境，实现多语言协同下交互式的元模型代码开发。在底层，利用 Docker 技术分别为 C++、Python、Java 等语言构建虚拟编译环境；各环境相互独立并采用并行操作模式，消除不同环境之间的耦合干扰，有利于提升计算资源利用效率。在前端，利用 JupyterLab 将各种语言的内核镜像进行适配，通过 WebSocket、Bridge、JSON-RPC 等技术完成前端编码界面与后端编译内核之间的消息传递，实现多语言代码的在线运行与结果实时反馈 [24]。

2. 图形化、组态式模型敏捷开发环境

为合理降低模型开发门槛、提升模型开发效率，发展了图形化、组态式模型敏捷开发环境。将代码编程的单个元模型封装为独立镜像，以标准化服务的形式发布并供外部调用。用户在该开发环境下可快速定制所需的个性化模型。在图形化、组态式界面中，通过对象图、活动图等将各元模型封装为可“拖拉拽”的独立模块；各模块采用热拔插技术，可直接选取并连接调用。用户通过拖动模块选择所需的元模型，根据应用中元模型的逻辑关系进行输入/输出关系连线，以可视化组态的形式快速完成模型开发。在执行过程中，元模型根据连线的逻辑关系进行数据流传输，按此顺序依次调用对应的服务，服务又与底层算子镜像相连。当调用某个元模型时，通过服务将计算任务下发至底层镜像，待计算完成后上传至图形化界面，将结果传递至下一元模型。特别地，当某个元模型任务执行完毕，与其直接相连的多个元模型可并行化执行，以此显著提升计算效率。

在图形化、组态式模型敏捷开发环境中，模型应用者基于已有的基础元模型，利用知识关联与逻辑策略对元模型进行图形化“拖拉拽”和指向性连线；从过去的语句级编程转变为构件组装，快速完成不同模型的开发并实现具有复用特征的编程。“流程即代码”形式很大程度上规避了有色冶金行业人员在计算机编程技能方面的短板，有利于发挥有色冶金行业人员的专业优势，降低模型开发门槛及成本。

(三) 有色冶金元模型封装方法

在元模型进行代码编辑及接口定义后，为方便模块化存储管理、标准化便捷调用，还需对元模型

进行面向对象的封装，以此隐藏实体内部的细节（仅对外提供访问接口）；用户无需知晓功能内部具体实现过程即可直接调用。标准化、模块化方式简化了应用编程，有利于提高元模型管理与应用效率、提升系统的可维护性、保护元模型开发者的知识产权。从元模型定义以及开发、管理、应用的全生命周期角度看，元模型封装需满足可复用、互操作、跨平台、标准化、接口兼容、安全性等要求。

所提出的有色冶金元模型封装架构（见图4），对元模型进行建模、编码、接口定义，得到包含明确输入/输出/参数的元模型原型，随后通过标准化封装获得元模型属性及元模型代理。元模型属性包括编号、名称、功能、接口、语言等，是对元模型相关信息的具体描述，为元模型管理与调用提供依据。元模型代理作为元模型原型的引用，只对外暴露输入/输出接口及有限的参数。调用者无需访问元模型原型，而是通过元模型代理进行调用。代理模式可保护元模型原型，避免对原对象的代码或方法进行随意修改，同时兼顾调用者在元模型代理基础上自由添加额外功能，显现出良好的扩展性。

在元模型的调用过程中，部署环境及方式可能存在较大差异。例如，元模型封装发布后可在平台内部署、在同一网络环境中在线调用；亦可采用云端发布、边缘调用的云边协同模式，支持网络互通情况下的在线调用。此外，由于不同企业或同一企业不同地域的网络限制，元模型发布端与调用端无法实现有效的双向通信，只能将元模型离线传输至调用端进行部署。综合考虑元模型部署环境的差异性以及元模型封装的专有要求，提出了面向在线调用、离线调用的有色冶金元模型封装方法。通过

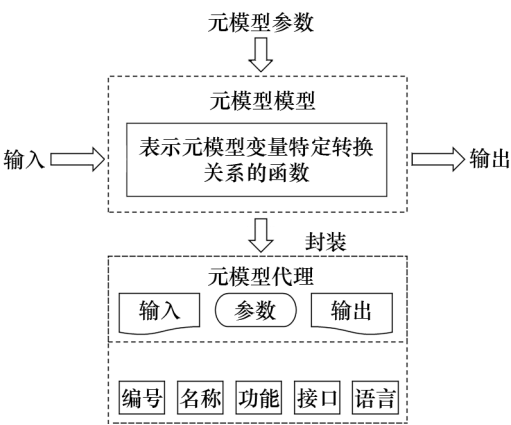


图4 有色冶金元模型封装架构

RESTful API 链接、PMML 文件形式构建的元模型代理, 分别对元模型进行在线封装和离线封装, 具有良好的独立性、通用性、复用性、兼容性等, 支持异构语言的统一化描述及跨平台调用。

对于在线调用, 元模型在开发云平台上经代码编辑与接口定义后, 以 RESTful API 形式封装为元模型代理对外发布。RESTful API 主要包括供调用的连接统一资源定位符 (URL)、用于权限认证的令牌 (token) [25]。用户获得 token 后与 URL 进行认证获得使用权限, 在调用模板中接入输入数据及参数即可获得元模型的输出结果。RESTful API 基于运行态黑盒复用概念, 将元模型本体以 URL 链接的形式供外部调用, 对使用者屏蔽了内部实现细节, 只保留接口和有限参数, 避免了对元模型原型的影响。此外, 对使用者的编程语言及资源环境无特殊要求, 无需对部署环境进行改造配置, 以接口的开放性实现了跨平台灵活调用; 采用结构化格式的消息体对输入/输出以平台规范的格式进行呈现, 标准化、开放式的接口方式赋予了元模型的互操作性。

对于离线调用, 可将元模型以 PMML 形式进行封装, 以文件形式来离线推送给使用方 [26]。使用方获得元模型代理 PMML 文件后, 可用 Python、Java 等语言进行标准化加载调用。PMML 依托统一的 XML 格式描述生成的元模型, 调用者应用时可用目标环境解析 PMML 库加载元模型, 可在不同操作系统和应用平台上运行, 具有良好的独立性、可移植性。

(四) 元模型全生命周期综合管理平台

元模型全生命周期综合管理平台主要包括审核测试、分类管理、发布管理、版本管理、精准搜索、模型下载、性能评价。① 审核测试, 从专业角度考虑功能性、可靠性等, 对开发者上传的元模型进行质量审核, 审核测试通过后可存储至模型库供用户使用。② 分类管理, 对数量繁多的元模型建立多维度分类体系, 依此赋予元模型标签并进行分类管理。③ 发布管理, 对元模型合理分配计算、内存等资源, 选择性地对待使用元模型上线。④ 版本管理, 结合元模型使用中的迭代更新, 对发布的元模型进行滚动升级, 构建新镜像并固化历史镜像。⑤ 精准搜索, 用户结合自身需求并根据类别标签筛选元模型, 也可自行搜索关键词以快速获得所需元

模型。⑥ 模型下载, 针对元模型的在线、离线使用需求, 分别以 RESTful API、PMML 形式下载元模型。⑦ 性能评价, 元模型的用户根据使用体验, 对元模型进行数值评分及描述评论, 以用户反馈的持续积累促进元模型质量的不断优化。从突出重点内容的角度, 主要阐述分类、审核评价、搜索方面的研究与进展。

1. 有色冶金元模型的分类体系

有色冶金作为典型的流程工业, 按照过程层级可分为全流程层、工序层、设备层, 各个过程之间存在大量的耦合关系; 元模型与元模型之间可以相互嵌套, 利用多个元模型的级联能够得到新的模型, 如多个工序元模型级联得到全流程模型, 多个设备元模型级联得到工序模型。此外, 各层级中的所有元模型都具有相应功能, 如生产优化控制、物料配方优化、运行状态监测等主要的功能域, 在每一功能域下又包含具体的功能属性。基于此, 提出了“全流程-单元工序-设备-功能域-功能标签”的有色冶金元模型多维度分类体系 (见图 5)。

在“五层二维”的元模型分类体系中, 主要分为过程维度和功能维度: 前者根据不同的金属类别及冶炼过程的物理结构, 自顶向下分为“全流程-单元工序-设备”3 个层级; 后者包括“功能域-功能标签”两个层级, 分别从宏观类别、微观属性两方面描述元模型的功能特点。例如, 锌焙砂可溶锌率预测元模型属于锌冶炼全流程-焙烧工序-焙烧炉设备; 通过输入标温、锌精矿化验值等可预测锌焙砂可溶锌率并指导标温设定值的优化, 因此在

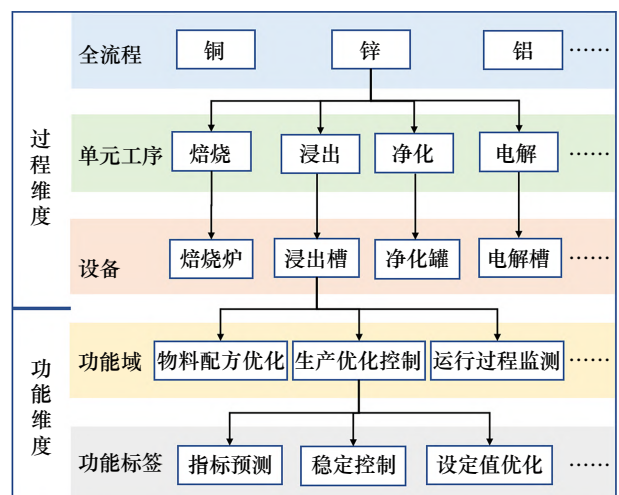


图5 有色冶金元模型分类体系

功能维度属于生产优化控制—指标预测。通过标准化、结构化的分类体系，将具有相同属性或特征的元模型进行归集，所形成的条理清晰、层次鲜明的架构有助于元模型的查询、识别、管理、调用。

2. 有色冶金元模型的审核评价体系

元模型的优劣决定了有色金属工业智能模型库的整体质量水平。从开发者角度出发，审查元模型的功能性、可靠性等，测试通过的元模型方可添加至模型库供用户使用。从用户角度出发，评价元模型的成熟度、运行效率等，基于用户体验开展元模型的迭代提升。

开发者提交的元模型源代码、使用说明书、需求说明书等，由系统管理员及行业专家从形式标准、功能/性能等方面进行评判与测试；只有当总体指标评分、特定单项评分均满足审核标准时，元模型才能存储至模型库供用户使用。多维度的审核体系从源头保障了模型质量，相关的审核指标主要有功能性、可靠性、健壮性、安全性、易用性、执行效率：功能性通过功能完备性与正确性评估；可靠性描述了元模型在规定时间内及条件下完成规定功能的能力，可由平均无故障工作时间来表征；健壮性通过容错能力和恢复能力定性描述；安全性指遭受恶意攻击时仍能正确运行且确保软件在授权范围合法运行；易用性指使用过程对元模型输入/输出及参数的易理解、易学习、易操作；执行效率由多服务并发条件下的时间特征和资源特性进行定量

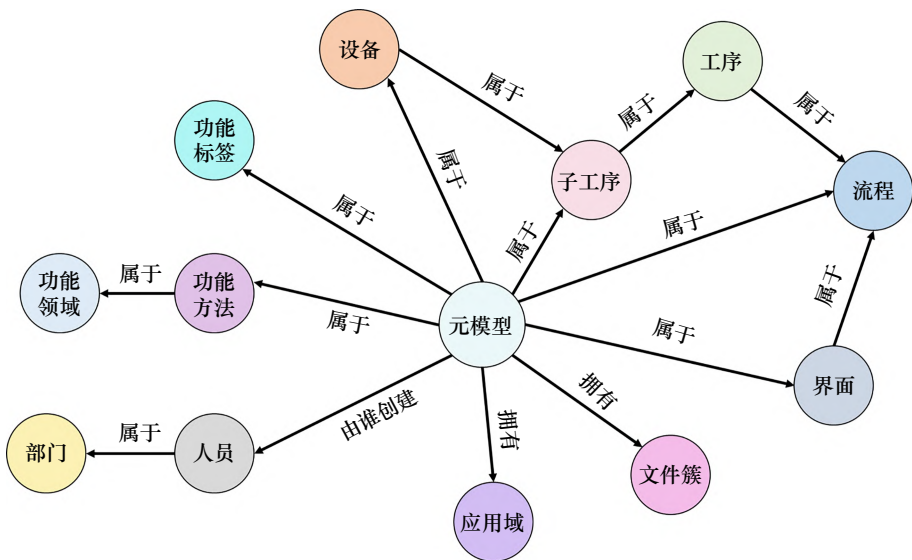
描述。

关于评价，只有具备使用过程和经验的用户才能对元模型进行评价，分为用户评分和用户评论：前者包括功能完整性、正确性、稳定性、容错性、易用性，用户分别对各维度进行数值评分；后者作为定性评价，可直接显式表达用户对该模型的意见（如使用感受、改进建议等）。用户反馈直接体现了元模型在应用阶段的实际表现，开发者可根据评价反馈进行模型的迭代优化。

3. 基于领域知识图谱的元模型搜索引擎

有色冶金元模型间关联性强，随着元模型数量增加，元模型之间的关联复杂度呈指数型上升。传统关系型数据库搜索时间长、资源负载大，难以满足数量庞大的有色冶金元模型快速搜索需求。知识图谱是一种揭示实体间关系的语义网络，可以清晰明了的关系网络支持结果快速检索，据此构建元模型搜索引擎，能够实现元模型的高效检索与管理，有助于提升元模型的应用效率。

有色冶金领域知识图谱构建流程包括本体设计、知识抽取、知识映射、知识融合、知识存储五部分。① 本体设计，采用基于行业专家经验、自顶向下方式构建本体，输入有色冶金领域知识、术语词典、专家经验等，输出包括构成知识图谱的实体类别以及类别之间的关系；采用七步法 [27]挖掘有色冶金领域知识，定义元模型的概念本体，形成有色冶金元模型本体库（见图6）。② 知识抽取，从



各类数据源提取用于创建知识图谱节点的实体、属性以及实体之间相互关系,采用基于规则的方法进行实体识别和关系抽取,以“实体-关系-实体”三元组形式建立图状知识库,形成本体化知识表达。③ 知识映射,按照本体的设计组织抽取出实体、属性、关系,进而形成节点,完成内部知识的统一表示,便于多源知识融合、知识图谱应用推理。④ 知识融合,整合获得的新知识,消除矛盾和歧义,通过指代消解、实体消歧、实体链接等方式融合各类知识。⑤ 知识存储,图数据库作为非关系型数据库,可存储实体与实体间关系,节点、边、属性等基本组成要素与知识构件中的实体、关系、属性相对应;以图数据库 Neo4j [28] 为介质完成知识存储,显著改善关联查询的效率。

基于领域知识图谱的元模型搜索过程为:① 针对用户所选标签或输入的查询文本,通过语义理解提取标签或查询文本中的属性和关系;② 基于 Neo4j 图数据库的 Cypher 查询语言,利用相关属性和关系自动生成图数据库查询语句;③ 根据查询语句搜索得到知识图谱中的元模型编号,依此索引获取库中的元模型,从而返回搜索结果。用户搜索所需元模型的方式主要是标签选择、关键词搜索:前者主要依赖模型关联节点的分类查询,即以元模型本体节点为起点,以所选工序、功能域、功能标签节点为终点,通过 Neo4j 图数据库的 Cypher 查询语言检索出指向该标签节点的全部元模型节点;后者基于 Neo4j 图数据库中的 Cypher 查询语言,将元模型属性的关键字自动转换为 Match 查询语句中的查询条件,输出属性值符合查询条件的元模型节点。

五、有色金属工业智能模型库及其应用案例

(一) 有色金属工业智能模型库

基于上述元模型、模型库的构建技术,本研究在服务器集群上搭建了具有工业互联网架构特征的光有色金属工业智能模型库;在多语言融合的元模型集成敏捷开发环境下,对有色冶金工艺机理、经验知识、数据模型、AI 方法等进行沉淀(见图 7)。为充分满足元模型开发、测试、运行、发布、管理等需求,智能模型库的物理运行环境配置了高性能的中央处理器/存储系统/图形处理器。

有色金属工业智能模型库重点面向铜、铝、

铅、锌等有色金属的生产过程,涵盖设备、工序、全流程、通用、优化算法 5 个大类的 25 个子类,目前已有元模型 1251 个。围绕有色冶金生产过程中的装备智能监控、原料供应链优化等迫切需求,制定了相应的解决方案并在有色冶金重点企业中进行应用,在有效提升行业智能化水平的同时,创造了可观的经济效益。

(二) 应用方案之一——锌冶炼焙烧炉智能监控

焙烧炉是锌冶炼过程的大型装备,运行状态对冶炼过程的下游工序乃至全流程的稳定运行至关重要 [29]; 工况识别与运行优化是保证焙烧炉长周期安全、稳定、高效运行的关键。由于焙烧炉体积庞大、结构复杂、子系统关联耦合强、多采样率运行数据及化验数据严重不平衡等问题,导致相关装备的运行状态监测与优化控制较为困难。在当前依赖人工的运维服务模式下,装备运行效率低、异常状态频发、温度波动范围大、长周期稳定运行困难。

针对这一工程难题开发了系列应用,调用了模型库中的焙烧炉流化速度计算模型、焙烧炉故障判别模型、焙烧炉标温设定模型、焙烧炉运行工况分类模型、重构误差控制限计算模型、误差触发更新模型等元模型,形成了锌冶炼焙烧炉智能监控解决方案,实现了运行状态自主评估、多层级设备故障诊断、运行温度稳定控制等功能。以焙烧炉运行温度实时稳定控制为例,按照业务逻辑,对入料总显热、烟气显热、机理模型下进料量控制、温度趋势提取分析、模糊规则控制算法等元模型进行“拖拉拽”连接,快速构成机理与数据联合驱动的焙烧炉温度实时稳定控制模型;应用服务以 API 形式进行封装发布,供 B/S、C/S 等架构下的应用调用。除了对元模型组态式操作构建模型服务外,单个元模型也能以 API 或 PMML 形式供各项应用系统的调用。

基于锌冶炼焙烧炉智能监控相关元模型,构建了包含系列应用在内的解决方案,在铅锌冶炼企业进行了工程应用(见图 8),显著降低了焙烧炉的生产故障率,提升了温度控制精度,实现了长周期稳定运行。

(三) 应用方案之二——锌冶炼企业原料供应链优化

锌精矿是锌冶炼过程的重要原料,采购供应及



图7 有色金属工业智能模型库



图8 锌冶炼焙烧炉智能监控解决方案

调配协同直接影响企业的生产运营。一方面,原料锌精矿的年采购成本达数十亿元,占生产总成本70%左右,资金占用率高[30];每降低1%的采购成本,将为企业增加5%~10%的利润。另一方面,锌冶炼是连续性生产过程,因断料恢复成本高昂而要求原料的持续供应;配料作为锌冶炼过程的第一道工序,原料配混质量将直接影响后续生产工序的运行稳定及成品质量。由于原料市场价格波动剧烈、供应商量大质异,人工决策的主观性强、缺乏合理信息反馈,往往导致原料库存占用高、采购成本居高不下、原料杂质含量超标等情况的发生。

针对锌冶炼企业原料供应链中的上述问题,依托智能模型库中的相关元模型,构建了原料供应链优化解决方案(见图9);采用的元模型有配料过程金属平衡、锌精矿安全库存设定、锌精矿供应商多维度评价、锌精矿多金属综合计价、锌精矿订单分配等。在应用原料供应链优化解决方案后,实现了从原料采购到物料配比在内的全流程一体化优化,以物料供货质量及配料质量提升、后续工序稳定高效生产支持企业生产成本的显著改善。

六、结语

有色金属工业在我国经济社会发展中占据重要

地位,工业软件是有色金属工业高质量发展的创新动力。本文应工业知识自动化、软件化的现实需求,从有色金属工业模型开发利用的现实困境出发,提出了有色冶金元模型建模封装理论体系、基于工业互联网的有色金属工业智能模型库架构,构建了多语言融合的模型集成敏捷开发环境、元模型全生命周期综合管理体系。有色冶金典型场景的实际案例分析表明,有色金属工业智能模型库在实际应用中发挥了提升行业智能化水平的预期作用,为有色金属工业强国建设提供了创新技术支撑。

有色金属工业知识复杂多样、生产过程动态多变,未来在知识发现、模型自学习等方面仍需深入探索。① 隐性知识深度挖掘与显性表征。有色冶金的工艺机理、智能方法等显性知识可相对容易地沉淀为元模型,但知识型工作者的诀窍、直觉等隐性知识难以准确获取,相关内容有待深入研究。② 复杂动态环境下的模型自适应在线更新。现有模型多为固定结构,对于复杂多变、动态不确定强的有色金属生产过程适应性不佳;需研究模型自适应在线更新方法,通过模型自学习来建立自洽、自治的软件系统。相关问题的研究突破,将进一步提升有色金属工业模型库的智能化水平,促进新技术、新思维、新业态的稳健发展。

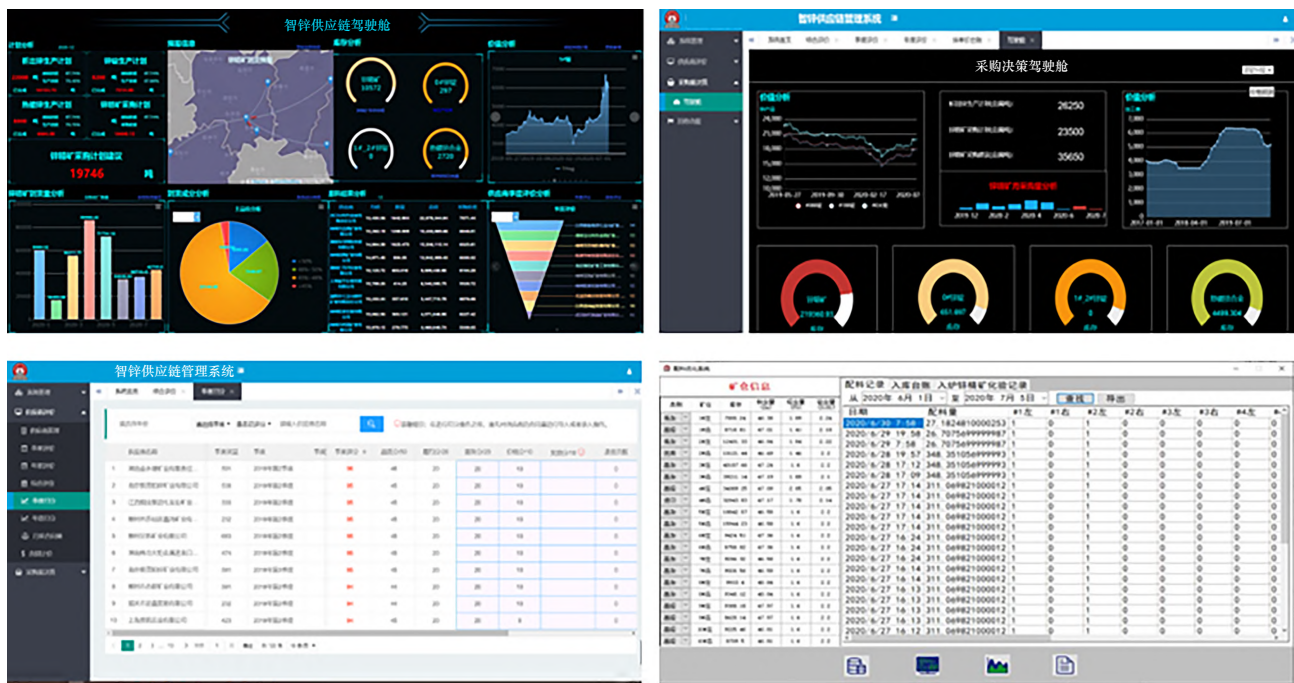


图9 原料供应链优化解决方案

参考文献

[1] 袁小锋, 桂卫华, 陈晓方, 等. 人工智能助力有色金属工业转型升级[J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 59–65.
Yuan X F, Gui W H, Chen X F, et al. Transforming and upgrading nonferrous metal industry with artificial intelligence [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(4): 59–65.

[2] Qian F, Zhong W M, Du W L. Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry [J]. Engineering, 2017, 3(2): 154–160.

[3] 贾明星. 七十年辉煌历程 新时代砥砺前行——中国有色金属工业发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1801–1808.
Jia M X. A review of nonferrous metals industry achievements in China(1949–2019) and prospects for the future [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1801–1808.

[4] 柴立元, 王云燕, 孙竹梅, 等. 绿色冶金创新发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 10–21.
Chai L Y, Wang Y Y, Sun Z M, et al. Innovative development strategy of green metallurgy [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 10–21.

[5] 柴天佑, 丁进良. 流程工业智能优化制造[J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 51–58.
Chai T Y, Ding J L. Smart and optimal manufacturing for process industry [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(4): 51–58.

[6] 邵珠峰, 赵云, 王晨, 等. 新时期我国工业软件产业发展路径研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 86–95.
Shao Z F, Zhao Y, Wang C, et al. Development path of China's industrial software industry in the new era [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 86–95.

[7] 边缘计算产业联盟, 工业互联网产业联盟. 边缘计算与云计算协同白皮书(2018年) [R]. 北京: 边缘计算产业联盟, 工业互联网产业联盟, 2018.

[8] 新华网. 两院院士大会中国科协第十次全国代表大会在京召开 习近平发表重要讲话 [EB/OL]. (2021-05-28) [2022-06-10]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2021-05/28/c_1127504936.htm.
Xinhua Net. The academicians conference of the Chinese Academy of Sciences and the Chinese Academy of Engineering, and the 10th national congress of the Chinese Association for Science and Technology was held in Beijing, and Xi Jinping delivered an important speech [EB/OL]. (2021-05-28) [2022-06-10]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2021-05/28/c_1127504936.htm.

[9] 桂卫华, 曾朝晖, 陈晓方, 等. 知识驱动的流程工业智能制造[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(9): 1345–1360.
Gui W H, Zeng Z H, Chen X F, et al. Knowledge-driven process industry smart manufacturing [J]. Scientia Sinica Informationis, 2020, 50(9): 1345–1360.

[10] Botha S, Le Roux J D, Craig I K. Hybrid non-linear model predictive control of a run-of-mine ore grinding mill circuit [J]. Minerals Engineering, 2018, 123: 49–62.

[11] 刘美丽, 唐朝晖, 王晓丽, 等. 基于多信息融合与可拓理论的锑浮选工况识别方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(12): 4512–4519.
Liu M L, Tang Z H, Wang X L, et al. Performance recognition of antimony flotation based on multi-information fusion and extension theory [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(12): 4512–4519.

- [12] 桂卫华, 阳春华, 陈晓方, 等. 有色冶金过程建模与优化的若干问题及挑战 [J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 197–207.
Gui W H, Yang C H, Chen X F, et al. Modeling and optimization problems and challenges arising in nonferrous metallurgical processes [J]. ACTA AUTOMATICA SINICA, 2013, 39(3): 197–207.
- [13] Huang K K, Tao S J, Liu Y S, et al. Label propagation dictionary learning based process monitoring method for industrial process with between-mode similarity [J]. Science China Information Sciences, 2022, 65(1): 1–17.
- [14] 阳春华, 韩洁, 周晓君, 等. 有色冶金过程不确定优化方法探讨 [J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 856–865.
Yang C H, Han J, Zhou X J, et al. Discussion on uncertain optimization methods for nonferrous metallurgical processes [J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 856–865.
- [15] 张健. 基于动力学控制的钛加工材料成型优化技术 [J]. 世界有色金属, 2015 (10): 66–67.
Zhang J. Optimization technology of titanium processing material forming based on dynamic control [J]. World Nonferrous Metals, 2015 (10): 66–67.
- [16] 王立平, 张超, 蔡恩磊, 等. 面向自主工业软件的知识提取和知识库构建方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(5): 978–986.
Wang L P, Zhang C, Cai E L, et al. Knowledge extraction and knowledge base construction method from industrial software packages [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2022, 62(5): 978–986.
- [17] 陶永, 蒋昕昊, 刘默, 等. 智能制造和工业互联网融合发展初探 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 24–33.
Tao Y, Jiang X H, Liu M, et al. A preliminary study on the integration of intelligent manufacturing and industrial Internet [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 24–33.
- [18] 中华人民共和国国务院. 关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见 [EB/OL]. (2017-11-27)[2022-06-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-11/27/content_5242603.htm.
The State Council of the People's Republic of China. Interpretation of guiding opinions on deepening “Internet + advanced manufacturing” to develop industrial Internet [EB/OL]. (2017-11-27)[2022-06-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-11/27/content_5242603.htm.
- [19] 工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构白皮书 [R]. 北京: 工业互联网产业联盟, 2020.
Industrial Internet Alliance. Industrial Internet architecture white paper [R]. Beijing: Industrial Internet Alliance, 2020.
- [20] Sun B, Dai J T, Huang K K, et al. Smart manufacturing of nonferrous metallurgical processes: Review and perspectives [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(4): 611–625.
- [21] Woo M. The rise of no/low code software development: No experience needed? [J]. Engineering, 2020, 6(9): 960–961.
- [22] Yang C H, Sun B. Modeling, optimization, and control of zinc hydrometallurgical purification process [M]. Salt Lake City: American Academic Press, 2021.
- [23] 王晨, 宋亮, 李少昆. 工业互联网平台: 发展趋势与挑战 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(2): 15–19.
Wang C, Song L, Li S K. The industrial Internet platform: Trend and challenges [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(2): 15–19.
- [24] Haji W H. Web-based service optimization with JSON-RPC platform in Java and PHP [C]. Lampung: International Conference on Engineering and Technology Development (ICETD), 2012.
- [25] Huang X W, Hsieh C Y, Wu C H, et al. A token-based user authentication mechanism for data exchange in RESTful API [C]. Taipei: The 18th International Conference on Network-Based Information Systems, 2015.
- [26] Pechter R. What's PMML and what's new in PMML 4.0? [J]. ACM SIGKDD Explorations Newsletter, 2009, 11(1): 19–25.
- [27] Zhong W M, Li C Y, Peng X, et al. A knowledge base system for operation optimization: Design and implementation practice for the polyethylene process [J]. Engineering, 2019, 5(6): 1041–1048.
- [28] Miller J J. Graph database applications and concepts with Neo4j [C]. Atlanta: Proceedings of the Southern Association for Information Systems Conference, 2013.
- [29] Liang H P, Yang C H, Huang K K, et al. A hybrid first principles and data-driven process monitoring method for zinc smelting roasting process [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1–14.
- [30] Liu Y S, Yang C H, Huang K K, et al. Non-ferrous metals price forecasting based on variational mode decomposition and LSTM network [J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 188: 1–15.