

辽宁省科技计划项目可行性研究报告

**面向流程工业的知识增强多模态  
大模型系统集成与示范应用**

沈阳工业大学

2025年11月10日

# 目 录

一、 项目提出的目的及意义（国家战略需求分析） .....	3
二、 项目相关领域国内外研究概况及发展趋势分析 .....	7
三、 主要研究内容及技术路线（技术可行性分析） .....	30
四、 现有工作基础和条件 .....	130
五、 申请人基础条件（包括主要研究成果） .....	162
六、 进度安排和实施方案（包括运行机制） .....	182
七、 预期成果和考核指标 .....	184
八、 推广及应用前景（预期经济社会效益） .....	186
九、 经费预算及来源 .....	193
十、 申报资料附件 .....	206
十一、 申请单位主管部门（推荐单位）意见 .....	206

# 辽宁省科技计划项目可行性研究报告

## 一、项目提出的目的及意义（国家战略需求分析）

新一轮科技革命和产业变革深入发展，制造业的数字化、网络化、智能化水平已成为衡量一个国家综合国力和竞争力的关键标志。流程工业，包括钢铁、有色冶金、化工等，是国民经济的支柱和基础，关乎国家产业链供应链的安全与韧性。其发展质量直接影响到国防安全、基础设施建设以及高端装备制造的自主可控能力。本项目是国家推进新型工业化、建设制造强国的战略亟需。党中央、国务院始终将推动制造业高端化、智能化、绿色化发展置于核心位置。《中国制造 2025》战略纲要将“智能制造”作为主攻方向，后续的《“十四五”智能制造发展规划》、《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》等一系列政策文件，均明确要求推动人工智能等新一代信息技术与制造业深度融合。

流程工业作为制造业的重要组成部分，其智能化转型的成功与否，直接关系到制造强国战略的全局。然而，与传统离散制造业相比，流程工业具有生产过程连续、工艺机理复杂、耦合性强、能耗与排放集中等特点，其智能化转型面临着更为严峻的挑战。辽宁省作为中国重要的老工业基地，钢铁冶金产业基础雄厚，以鞍钢、本钢、铝镁设计院等龙头企业为核心，形成了完整的工业体系。其钢铁和有色冶金产业正经历着从传统

制造向智能化、高端化、绿色化的深刻转型。目前，整个行业在高端化、智能化、绿色化三个维度上展现出新的发展态势，但也面临着持续的转型需求。

流程制造业作为典型的知识密集型产业，其连续型长周期、多工序紧密耦合及高度依赖隐性知识的核心特点，共同构成了其研究工业知识增强大模型系统的内在必要性与独特适应性。本项目面向流程制造业，致力于将当前最具颠覆性潜力的多模态大模型技术，与流程工业深厚的知识积淀相结合，打造面向特定场景的工业智能系统。这不仅是落实国家战略的具体行动，更是抢占全球制造业智能化竞争制高点的关键点，对于提升我国流程工业的整体核心竞争力，确保国家在关键基础材料领域的自主供应能力，具有深远的战略意义。

经过数十年的发展，我国流程工业在规模上已位居世界前列，但普遍面临着资源能源消耗高、质量控制稳定性不足、工艺优化逼近极限、高端人才短缺、安全生产与环保压力日益增大等共性难题。传统的自动化、信息化手段在应对这些复杂系统性问题时，已显现出局限性。例如，海量的多模态工业数据（如文本工艺规程、图像视频、传感器时序数据、音频等）蕴藏着优化生产过程、诊断设备故障、提升产品质量的巨大价值，但由于其异构性强、专业壁垒高，传统分析方法难以对其进行深度融合与智能解析。同时，行业内的专家知识和经验多

以隐性形式存在，依赖于少数资深工程师，难以标准化、规模化复用和传承，形成了“知识孤岛”和“专家依赖”困境。本项目拟推广的知识增强多模态大模型通过构建覆盖“设备-工艺-质量-能耗”的流程工业知识图谱，将分散的、隐性的行业知识（包括基于“五流”耦合的物理机理）进行系统化、结构化的梳理与融合，为机器理解工业过程提供了可计算、可推理的语义基础。进而，利用大规模预训练技术，让模型从海量多模态语料中学习行业术语与模式，再通过知识增强技术，将静态的知识图谱动态注入模型的推理过程，有效克服通用大模型在专业领域容易产生的“幻觉”问题，使其回答更具准确性和可解释性。这种“数据驱动”与“知识引导”的深度融合，能够实现对生产全流程的深度感知、智能决策与精准控制，从而在降低能耗、提升质量、预测性维护、工艺优化等方面产生显著效益，实质性地推动流程工业向绿色、高效、高附加值方向转型升级，催生形成以全要素生产率提升为核心的新质生产力。

本项目是应对全球科技竞争、实现工业人工智能领域自主创新的重要举措。当前，以大模型为代表的人工智能技术正引领全球科技浪潮，主要发达国家纷纷将其视为维持产业领先地位的战略技术。然而，现有的通用大模型多基于互联网公开文本和图像数据训练，在面对流程工业这种高可靠性、高安全性、强专业性的领域时，存在严重的水土不服。直接应用不仅效果

不佳，还可能因“幻觉”引发生产事故。因此，开发面向垂直行业的、安全可控的领域大模型，已成为全球产业界和学术界的共识与竞争焦点。本项目选择在钢铁和有色冶金这两个典型的、具有战略意义的流程工业进行技术攻关与示范应用，具有极强的代表性和推广价值。通过本项目将突破多模态工业数据治理与高质量语料库构建、基于工业知识图谱的增强与推理、面向复杂工业场景的轻量化部署与系统集成等一系列关键技术，形成具有自主知识产权的核心技术体系与工业软件智能体。这不仅能够打破国外在高端工业软件与核心算法方面的潜在垄断，保障我国重点工业领域的数据安全与技术主权，更能通过成功的示范应用，形成可复制、可推广的解决方案，为我国在其他流程工业（如石化、建材、造纸等）推广应用大模型技术提供宝贵的范式、标准与经验，从而在全球工业智能化的新赛道上，建立起属于中国的竞争优势。

综上所述，流程制造业作为典型的知识密集型产业，其连续型长周期、多工序紧密耦合及高度依赖隐性知识的核心特点，对于工业知识增强大模型系统的集成应用需求迫切。长周期运行产生了海量的历史数据与宝贵的专家经验，但传统方法难以实现有效的沉淀与传承，而知识增强大模型能够构建“企业记忆”，将碎片化的操作知识系统化，并支持跨时空尺度的因果追溯与前瞻性决策，从而保障生产的长期稳定与优化。

多工序的复杂串联使得局部优化往往导致全局次优，系统性的“孤岛”效应凸显了对全局协同的迫切需求，知识增强大模型通过内嵌工艺机理与约束关系，能够扮演“虚拟生产总监”的角色，进行全流程的动态模拟与协同调度，实现从单一设备效率到产线整体效能的跨越。而其知识密集的本质，意味着核心竞争力深藏于工艺配方、专家经验和反应机理等隐性知识中，知识增强大模型的核心价值在于能将这些隐性知识显性化、代码化，使其成为有经验的专家系统，不仅能赋能加速研发、实现工艺参数的逆向设计，还能在异常工况下提供专家级的决策支持，最终推动行业从依赖个人经验的传统模式，向数据与知识双轮驱动的智能新范式演进。

## 二、项目相关领域国内外研究概况及发展趋势分析

### 2.1 流程工业工业大模型现状及趋势

#### 2.1.1 钢铁行业的工业大模型现状

当前，全球制造业正经历以数字化、智能化、绿色化为核心特征的新一轮工业革命。钢铁工业作为国民经济的支柱产业，不仅是衡量工业化水平的重要标志，也是能源消耗和碳排放最集中的领域之一。面对国际竞争加剧、资源环境约束趋紧及客户需求多样化的挑战，传统以产量驱动为主的粗放型增长模式已难以为继。实现从“规模扩张”向“效率提升”、从“局部

改进”向“系统优化”、从“人工决策”向“智能决策”的战略转型，已成为钢铁行业高质量发展的必然选择。

近年来，国家密集出台“制造强国战略”“智能制造发展战略”“数字中国建设规划纲要”等政策，并明确“双碳”目标，为钢铁行业的智能化与绿色化转型提供了政策引导和技术方向。构建以数据驱动、模型优化和算法决策为核心的智能生产计划体系，已成为落实国家战略、提升产业竞争力的关键路径。

以鞍钢和本钢为例，其生产体系覆盖炼铁、炼钢、连铸、热轧、冷轧等多环节，具有多基地、多产线、多工序的复杂结构，内部存在显著的物料流、能源流与信息流耦合特征。各环节间的时序与资源依赖高度复杂，传统“烟囱式”管理和分层独立排程模式已难以适应现行的高动态生产环境：信息孤岛导致响应迟滞，工序间协同不足造成瓶颈传递，能源利用缺乏统筹引发浪费与波动，整体生产效率和客户交付能力均受制约。

传统钢铁企业的分层排程机制在稳定市场环境下具备一定合理性，但在订单多变、能源波动与设备状态频繁变化的现实中，局部最优决策常导致全局资源失衡。例如，炼钢环节追求高产会造成连铸环节过载与热能损失；计划割裂也使得当设备故障、订单变更等突发情况发生时，系统难以及时调整，导致交期延误与能耗上升。因此，构建一个可实现跨工序、跨产线、跨基地协同的全局计划排程体系，是企业优化运行效率与

提升响应能力的核心任务。特别是在“炼钢—连铸—热轧”这一关键生产段中，工序衔接的时效性直接决定能源利用效率与产品质量。若能实现钢水的热装热送与直接轧制，将显著降低能源消耗并提高生产效率。然而，受制于各环节计划非同步、能源供给波动及设备故障等因素，实际生产中常出现热能浪费、节拍波动与库存增加等问题。如何在全局层面协调多工序节奏与能源利用，是唐钢智能制造升级的核心技术瓶颈。

此外，钢铁生产中普遍存在的余材与库存问题，也制约了资源利用效率。由于订单结构复杂、工艺路线多样，常产生大量未匹配的半成品或余材。通过建立自动余材充当模型，可基于钢种、规格、质量等级与客户需求实现智能匹配与再利用，从而减少库存积压、降低成本并提升绿色循环利用水平。

从理论上讲，全局计划排程问题是一个超大规模、强耦合、多目标的复杂系统优化问题，决策变量数量庞大、约束高度非线性，且目标间存在显著冲突，如效率与能耗、库存与交期等。单一数学规划方法难以在有限时间内获得高质量解。因此，本项目将在运筹优化模型基础上，系统引入智能优化与自学习技术，构建契合钢铁全流程特征的求解体系。首先，通过混合整数规划（MIP）模型实现多基地、多工序的精确建模，明确生产、能源与库存间的逻辑约束；

其次，结合多目标进化算法实现生产效率、能源利用率与

交期满足率的综合平衡；进一步引入强化学习算法，构建可在设备故障、能源波动、订单变更等不确定情境下动态调整的自适应优化机制；并通过启发式算法提升求解效率与模型收敛性能。四类算法协同构成“精确建模—智能优化—自学习决策—快速求解”的核心技术框架，为唐钢集团全局计划排程系统提供坚实算法支撑。在工程应用层面，本项目建设的全球计划排程系统将实现多层次计划协同与全流程可视化管理，构建从宏观到微观、从计划制定到执行反馈的闭环体系。系统将支持实时监控与策略动态调整，确保生产节奏平稳、能源配置合理、订单执行高效。

本项目的实施将为钢铁行业智能化与绿色化转型提供示范样本。通过建立以算法驱动的全局优化体系，唐钢集团将实现生产效率与能源利用率的双提升，并以数据驱动的智能决策体系推动企业迈向数字化、低碳化、智能化的新阶段。

总体而言，本项目在战略上契合制造业高质量发展要求，深化复杂制造系统多目标优化研究，在工程上助力企业实现生产与能源的深度协同与智能决策升级，为我国钢铁行业构建可复制的智能制造创新范式。

钢铁炼铸系统是典型的多阶段、强耦合、动态复杂的生产系统，其计划与调度问题不仅受到工艺路径和物理约束的影响，还受到能源波动、设备状态变化、订单结构差异以及多基

地协同关系等多重因素的干扰。在唐山钢铁集团构建全局一体化计划排程体系的过程中，“炼钢—连铸—热轧”等核心环节的协同优化成为制约企业整体运行效率与智能化水平提升的关键瓶颈。当前，炼铸生产在以下几个方面面临显著挑战。

### **(1) 核心工序的强耦合**

钢铁生产过程的各主要工序之间存在高度的时间与物料依赖性，尤其在炼钢—连铸—热轧连续作业区段中，钢水必须在严格的保温时间窗内完成从出钢到轧制的连续流转。任何一个环节的波动，如炼钢时间偏差、连铸机临时检修或热轧机停机，都可能引发连锁反应，导致下游换浇、冷料增加，甚至生产中断，造成效率损失和能源浪费。传统排程模型在面对这些复杂约束时容易效率低下，因此排程系统必须具备高鲁棒性和实时重调度能力，能够在复杂工业环境下持续优化，以保障工序衔接的稳定性和生产节奏的连续性。

### **(2) 多目标冲突的复杂性**

钢铁企业的生产决策涉及经济效益、能源消耗、产品质量和交货期等多个维度，这些目标之间往往相互制约。例如，提高设备利用率和产量可能导致能源峰值负荷升高，而节能运行策略又可能降低生产效率或延长交货周期。随着“双碳”目标与绿色制造要求的提出，能源约束对排程系统的影响愈发显著。炼钢与炼铁环节能耗占比高，副产煤气、蒸汽、电力等能源介

质的产耗具有明显时序特征，其供应还受到储气容量、电价波动及蒸汽压力等条件限制。若排程与能源系统不同步，容易出现能量放散或供需不平衡，既影响经济性又增加碳排放压力。因此，建立生产与能源一体化的协同优化机制，构建兼顾经济效益与能源约束的多目标优化模型，成为实现高效、低碳运行的关键。

### **（3）跨基地多工序协同问题**

钢铁集团多产线的组织结构，使得跨工序、跨空间的协同成为全局优化的重点与难点。不同厂区之间的产能配置、设备能力及工艺节拍差异显著，若缺乏统一协调，极易造成上游过载、下游待料、半成品滞留等现象，降低系统整体效率。同时，内部物流环节的复杂性进一步加剧了排程难度。板坯库作为炼铸与热轧之间的关键缓冲区域，其堆垛、倒库、出入库路径与行车调度均需精确规划。若调度不当，不仅会造成板坯积压和作业冲突，还可能影响后续热轧计划的执行。实现多工序、多设备的物流与生产协同，必须通过智能算法和数字化手段对物料流、能量流与信息流进行同步优化，从而保障全流程节奏的连续性和均衡性。

### **（4）模型规模巨大与计算求解难度高**

全流程、全基地的计划排程问题本质上是一个超大规模的混合整数规划问题。模型往往包含数百万级变量与约束，涵盖

多目标、多时段、多约束的复杂结构，难以在有限时间内获得可行的全局最优解。传统的商业求解器或单一启发式方法难以满足工业应用中对求解效率与精度的双重要求。为此，项目必须研发适配于钢铁生产场景的智能优化算法，包括基于分解策略的多层次建模、基于强化学习的动态重调度机制以及融合改进遗传算法、变邻域搜索等混合启发式方法的高效求解框架。这些算法需在分钟级甚至秒级时间尺度上输出高质量解，确保模型在工业现场具备可计算性与可部署性。

### **（5）智能化与自适应能力不足**

面对订单结构多样化、客户需求定制化和市场波动性增强的现实背景，传统的规则化排程模式已难以支撑企业高柔性运营需求。生产系统需具备自学习与动态优化能力，能够根据实时数据自动调整排程策略，实现订单优先级、产能配置、能源供需的智能匹配。尤其在冷轧环节，工艺路径复杂、切换频繁、质量约束严苛，传统“见料排”方式无法充分利用数据与算法优势，导致前后工序衔接不畅、节奏失衡和库存积压。构建基于知识驱动与算法优化融合的智能排程机制，建立冷轧与热轧之间的动态协同，是提升系统柔性及交付稳定性的关键方向。

### **（6）从局部最优到全局最优的系统性挑战**

钢铁生产计划历来以工序级优化为主，缺乏从企业层面进行整体统筹的全局视角。全局计划排程不仅要统筹月、周、日

等多层时间尺度，还需综合考虑产能负荷平衡、库存策略、设备检修计划、能源供给和销售计划等多维约束。各层次计划之间的滚动调整与反馈机制尚不完善，导致计划间脱节与执行偏差，而全局最优需要通过多层次协同优化架构，将战略规划、生产调度与执行控制深度融合，形成动态联动的智能决策体系。如表 1-1 所示。

表 1-1 钢铁炼铸排程关键挑战

挑战类别	问题特征	解决思路
强耦合与动态不确定性	炼钢—连铸节奏不稳	动态重调度+强化学习
多目标冲突	效率 vs 能耗	多目标进化算法
跨基地协同	多产线物流瓶颈	全局优化建模
模型规模大	求解复杂度高	分层建模+启发式算法
智能化不足	缺乏自学习能力	引入强化学习与知识图谱
局部最优	缺少全局统筹	全局多层协同优化体系

总体来看，钢铁炼铸计划排程的核心挑战集中在强耦合、多目标、动态不确定与计算复杂性四大方面。这些问题相互交织，构成了制约全局优化与智能调度的系统性障碍。为此，本项目将在多源数据融合、智能优化算法、强化学习动态调度以及全流程一体化建模等方向上开展研究，构建具备高鲁棒性、高自适应性与高实时性的全局计划排程体系，从而实现企业级生产系统的整体最优与智能化升级。

钢铁生产是典型的复杂工业流程，由功能不同但又相互关联、相互支撑、相互制约的炼铁、炼钢、轧钢多工序集成，存在着物质流、能量流、成本流、信息流、控制流耦合紧密，工艺、设备、物质流、能量流约束种类多，信息流、控制流回路复杂，多系统多目标协同优化难等问题。钢铁工业从追求规模到高质量发展的转型升级提出了规模化定制、提升产品品质、节能减排等新的需求，加剧了钢铁生产过程的复杂性、时变性和不确定性。基于两化深度融合，突破单工序、单要素管控的局限，促进工序间进一步融合和优化、提升工序协同效率，打破原有业务部门边界，缩短决策和信息传递链、提升管控精细化水平，从全流程、多流耦合、全局综合优化视角进行网络化协同生产智能管控，是钢铁工业转型升级的必然选择，对制造强国建设意义重大。

在国外，欧盟、美国、韩国融合工艺机理和数据分析，在多工序协同控制、跨工序集成优化、全过程质量管控以及智能平台建设方面取得阶段性成果。欧盟成立钢铁集成智能制造工作组（I2M），旨在打造钢铁版工业 4.0，研究全流程集成优化架构 I2MSteel、生产能源动态耦合协同 DynergySteel、跨工序质量耦合控制 PreSed 等多流耦合协同管控技术。普锐特、PSI、浦项等开发了面向供应链的一体化生产管理系统，利用供应商先期介入和先进评价技术进行供应链优化；PSI、

IBM 公司研发了板坯设计、库存匹配、工序排程等决策优化技术；浦项、BFI、SMS 等研发了基于数据挖掘的质量数据动态监控与分析系统，实现了跨工序产品质量影响因素判断；德国 SMS 和美国 Noodle.ai 基于 BEAST 大数据智能平台进行供应链运营和生产线调度，实现了对产品质量、设备运行状态和工艺过程的监控，建设了高度智能化的美国大河钢厂；韩国浦项钢铁公司基于 PosFrame 智能工厂平台进行跨工序一体化管理，通过虚拟工厂、远程协同等技术手段，在提升生产效率的同时，实现了产品质量预测与缺陷成因的高效精准追溯，节约了改进产品时间和试生产费用，全面提高钢铁生产的综合竞争力，并在远离浦项、光阳等生产厂的首尔建立起了集计划、生产、物流、质量为一体的生产制造管控中心。

在国内，发挥中国产学研结合优势，在冶金流程界面优化、铁区集中协调管控、一体化计划调度及大数据平台建设方面取得示范性成果，研究成果总体与国外处于并跑水平。钢铁研究总院和冶金自动化研究设计院以殷瑞钰院士冶金流程工程学为指导，研究了全流程动态有序运行、工序界面、物质流能量流协同、全流程质量追溯等技术，用于钢铁企业生产动态调度、铁钢界面优化、能源管控优化、产品质量管控，在首钢京唐、沙钢、河冶科技等企业成功应用。东北大学、重庆大学深入研究了不确定条件下多工况冶金过程预测控制、钢铁制造流程网

络动态建模、生产运行多场景多系统协同优化、生产计划排程优化、能源系统优化等技术，并在宝钢、重钢、攀钢等企业应用取得实效。宝信软件、北京科技大学、中冶京诚等分别研发了基于大数据的质量管理系统，支撑全流程工序一贯质量管控及分析优化。中冶赛迪基于工业物联网、大数据、云计算、人工智能等信息技术，打造中冶赛迪工业互联网平台 **CISDigital**，实现了跨平台信息互联、跨系统控制闭环、跨工序协同生产；创建了以高炉稳定高效为中心、以铁区综合指标整体最优为目标的铁区一体化智能管控中心，以及钢区、轧钢、能环等多区段或多系统的一体化智能管控中心建设系统架构及工程化方案，在宝武、韶钢等企业成功应用。山钢集团日照公司围绕钢铁全流程中的关键工序界面，研究开发界面一体化融合技术，实现了原料、炼铁、炼钢、热轧、冷轧、成品发运等上下游工序间信息的贯通，解决上下工序间协调运作、生产信息及时传递、质量信息与生产紧密结合的问题，促进了生产全局的整体优化。

目前，国内外钢铁生产网络化协同智能管控技术研究都处于起步阶段，尽管取得了上述研究成果，但远未进入成熟应用阶段。随着钢铁工业由高速度向高质量的转型发展，网络化协同生产智能管控模式及平台智能技术创新需求迫切，在集成业务模式、协同管控技术与智能化平台创新方面，具有广阔的发

展前景。在集成业务模式层面，需要以新的全流程、全价值链视角，厘清多流耦合机理和协同优化机制，突破现有五级架构信息孤岛和协同不畅的瓶颈，构建横向铁区-钢区-轧区多工序贯通、纵向计划-执行-控制协同新模式，提高资源利用效率，实现规模化定制生产；在协同管控技术与智能化平台方面，面向质量、效率、能环、成本等多目标综合优化，深度融合钢铁冶金物化机理和工业互联网、人工智能、大数据等新一代信息技术，充分挖掘知识价值和数据价值，协同生产、物流、能源、设备等管控环节，研发多工况精准模型、多目标决策优化和自适应操控技术，以及网络化协同智能管控平台，提升产品质量和生产效率，节能减排、降低生产成本，支撑钢铁工业转型升级和高质量可持续发展。

### **2.1.2 有色冶金行业的工业大模型现状**

传统的氧化铝和电解铝生产依赖“机理生产控制模式”，面临着数据监测不实时、生产管理靠经验、控制不精准等痛点。这些行业普遍存在“大时滞、多变量”等复杂耦合问题，制约了产业的高质量发展。随着电解槽迈向大型化，电流强度大幅提升，槽内区域工况差异性变大，传统控制模式已难以满足生产精准、稳定的管控需要。而工业大模型的出现，为这些百年难题提供了全新的解决方案。基于数据驱动的工业大模型，正在将铝冶金行业从经验依赖转向数据驱动。

在氧化铝生产领域，广西华昇打造的“智昇氧化铝 AI 大模型”成为行业标杆。该模型采用“四横四纵”技术架构，构建了从数据感知到智能决策的全流程优化体系。它通过对蒸发、溶出、沉降等工序的 501 个参数进行分钟级预测，实现了对生产状态的精准映射。关键指标的预测准确率超过 80%，溶出 aK 准确率突破 90%，原本需要 6 小时的人工化验，现在 3 分钟内即可输出预测结果。在电解铝领域，云铝股份研发的“绿铝云慧鉴”数字大模型，构建了基于电解槽热平衡和物料平衡的区域特征智能优化控制系统。该模型通过分布式感知数据采集系统，将铝电解槽检测数据拓展到 13 类共 518 个，采集运行特征数据 168 个。它不仅实现了出铝作业的智能化预测，还完成了氧化铝（分钟级）和氟化铝（小时级）分时添加量的精准预测，大幅提高了生产流程的安全性和稳定性。

“绿铝云慧鉴”采用云边协同架构，通过布设 10P 的高性能算力中心及 2P 的低时延边缘推理节点，实现统一的人工智能开发、训练和运维。数据闭环管理是这些系统的核心特点。中铝集团的坤安大模型通过联合搭建统一算力中心、数据平台与 AI 开发平台，模型训练完成后，各下属企业可按需申请算力、调用数据模型。这种架构既实现了大模型在集团内的快速落地和复制推广，又满足了数据不出域的合规要求。中国钢研的“冶金流程感知大模型”则采用“感侧大模型+知侧大模型”

双塔结构，独创 OTS 机制实现双塔链接。该模型在时空表征、工况认知、轨迹生成等任务上进行训练与微调，为流程智能化提供微观、中观和宏观尺度的感知能力。

广西华昇通过应用“智昇氧化铝 AI 大模型”，每年可为企业带来千万元级的降本效益。中铝集团全面推广后，年效益预计达 1.3 亿元。而云铝股份的“绿铝云慧鉴”在云铝文山 500kA 电解系列上推广应用后，创效降本可达 8512.4 万元。在生产效率方面，大模型的应用使传统依赖人工的生产环节实现了质的飞跃。广西华昇的主控操作工作量降低 85%，取样化验效率提升 30%。遵义铝业与华为云联合研发的国内首个电解铝复杂电解质体系下工艺指标动态优化预测大模型，有效支撑了企业单日 1100 吨电解铝的生产数据演算与优化。

有色冶金工业大模型的发展呈现出三个明显趋势：

(1) 大模型+小模型的融合特征。工业大模型正从单一模型应用向“大模型+小模型”的协同体系发展。中铝集团已构建了“铝艺智控-智昇氧化铝”、“铝艺智汇-氧化铝”等多个专业模型。这些模型采用大模型加小模型的方式，构建完整的知识链路体系。

(2) 生产全流程协同趋势。工业大模型正从生产环节向研发、管理、服务等多环节延伸。中铝材料院开发的“金属智眼”可以批量快速地识别铝合金组织，准确率达到 99.5%，效

率提升 90%以上。而中铝瑞闽的“铝智云排” AI 大模型，使冷轧排产从原本人工排产升级为 AI 模型自动排产，从亿级变量中快速算出接近最优解的分钟级生产计划。

(3) 产业生态协同。产、学、研协同创新成为推动工业大模型发展的重要动力。中南大学举办的“绿色低碳数智化铝冶金”系列学术活动，汇聚高校学者、行业专家及企业技术骨干，围绕人工智能、产业链协同创新等热点议题展开深入研讨。产学研用联合培养既懂有色金属工艺，又掌握 AI 技术的复合型人才。

## **2.2 流程工业工业大模型面临的挑战**

### **2.2.1 通用工业大模型面临的挑战**

近年来，大模型（如 GPT-4o 等）凭借大规模训练数据、大规模参数、大规模算力，涌现出传统 AI 模型所不具备的强大生成能力、泛化能力和交互能力。在自然语言处理领域，大模型能够生成高质量的文本并完成复杂的对话任务；在计算机视觉领域，大模型能够实现精准的图像识别并生成高保真的图像或视频。此外，大模型还在医学、教育等专业领域展现出巨大的应用潜力，通过对领域数据的学习，提供准确的问答、诊断、预测和决策支持，已成为迈向通用人工智能的里程碑技术。

制造业是立国之本和强国之基，建设制造强国是我国的重大战略决策。在新一代信息通信技术的推动下，制造业正从数

字化网络化迈向智能化的全新发展阶段。如何推进人工智能赋能新型工业化，培育面向工业领域的大模型，推动人工智能与实体经济深度融合，成为当前重要的国家创新战略。

欧美发达国家已开始探索大模型在工业领域的应用。例如，西门子采用 ChatGPT 来自动生成可编程逻辑控制器（PLC）代码，OpenAI 采用多模态大模型操控机器人并尝试在宝马制造车间从事简单的抓取工作，英伟达正在基于大模型打造通用人形机器人平台。当前国内外的研究主要是利用已有的通用大模型尤其是大语言模型，尝试解决工业制造业的具体问题。学术界和产业界对于工业大模型的巨大发展潜力抱有极高期待。

然而，制造业的复杂性使得工业大模型的发展面临诸多严峻挑战：

**【难点与挑战 1：工业跨模态协同难】**通用大模型擅长处理文本、图像、视频等常见数据模态，其数据多来源于互联网等公开渠道。但对于工业制造业中难以获取的特有数据模态，如 CAX 模型、传感信号、工艺文件、机器指令等了解甚少。工业场景中多模态数据融合时存在异质性和同步性问题，不同类型传感数据采样率和数据格式不同，存在信息冗余和语义不一致性，大模型难以对复杂异质的工业数据模态进行有效对齐和协同。这是因为大模型缺乏对工业复杂模态数据特性的深刻

理解，导致其跨模态数据协同处理能力有限。

**【难点与挑战 2：工业高可信输出难】**通用大模型对输出的精准性和可靠性没有统一的严格要求，能容忍一定程度的幻觉现象。而工业应用对准确性和可靠性要求极高，如机械臂协作装配的精确控制。现有大模型基于概率预测，输出结果不确定性高，难以满足工业任务的高精度要求。这是由于大模型的概率特性和非目标驱动特性，使其难以学习到任务背后的工业机理和规律。此外，多任务优化与单任务的冲突使得模型在处理高精度任务时可能出现信息冲突和遗忘，降低单任务性能。

**【难点与挑战 3：工业多场景泛化难】**通用大模型常见的文本或图像内容生成、知识问答等应用场景，底层逻辑较为统一，大多可基于对话界面完成任务。而工业领域产品全生命周期涵盖研发设计、生产制造、试验测试、运维服务等多种不同应用场景，不同行业不同场景任务需求各异，且生产任务需机器设备执行才能完成，大模型难以适应复杂多变的工业场景。这是因为大模型对工业多学科跨领域专业知识的泛化能力不足，且工业场景中存在大量硬件设备交互任务，使当前大模型主流应用范式无法适应。

**【难点与挑战 4：工业多流程关联难】**通用大模型应用场景涉及的多流程关联逻辑性任务较少。而工业制造业应用离不开具有内在关联的多流程业务，各流程任务之间的关联和依赖

关系复杂,如跨企业多工序多因素耦合的质量问题追溯与根因分析,实现多个流程任务的有效关联和协同是一个重要挑战。大模型难以全面理解和认知复杂的工业流程语境和任务间的动态关系,缺乏对复杂流程的深层次任务关联和长期记忆能力,使其难以有效处理多流程任务。

**【难点与挑战 5: 工业高实时推理难】**通用大模型对应用的实时性没有统一的高要求。而工业现场应用,如设备控制等,具有严格的实时性要求(毫秒级),同时还受到算力设施的限制,大模型在工业边缘实时应用中面临资源受限的挑战。现有轻量化方法,如模型剪枝、量化等,虽在压缩率和加速效果方面取得一定进展,但仍无法满足工业边缘轻量实时应用的高要求。这是因为大模型参数规模庞大,执行工业任务时需要激活大部分计算单元,难以在工业边缘有限的计算资源下实时运行。

从上述挑战可知,当前通用大模型无法直接用于解决复杂的工业问题,工业大模型不是通用大模型在工业领域的简单垂直应用,亟需开展全新的工业大模型基础理论和关键技术研究。目前,国内外关于工业大模型的系统性研究仍属空白。

### 2.2.2 流程工业工业大模型面临的挑战

流程工业是现代工业体系的重要组成部分,涵盖了石油化工、化学工业、钢铁及有色金属冶炼加工等领域,主要涉

及连续化或大批量生产方式的制造过程。其在自然资源利用、全球环境保护和人类健康保障等方面发挥着关键作用。融合大数据与人工智能（AI）技术的智能制造，是提升流程工业核心竞争力的重要战略，同时也是各国提高生产效率和资源利用率、迈向工业 5.0 的关键路径。然而，流程制造业的高度复杂性以及通用大模型在技术层面的局限，使得构建适用于该场景的大模型面临诸多挑战。

流程工业具有高度复杂的机理过程、高不确定性的反应动力学及多工序并行制造的特征，且其生产过程通常是连续且不可中断的。这些特性导致建模与控制难度较大，进而阻碍了研发与优化的进程。

主要挑战如下：

**【深层机理建模难】**流程工业中的制造过程常涉及复杂的物理和化学机理，如热力学、化学反应动力学、流体力学等。这些反应过程具有高度非线性和相互依赖性，难以通过简单的数学模型或经验公式准确刻画各工艺参数间的交互作用。因此，现有模型难以全面描述制造过程中的复杂反应关系，精确的机理建模尚未实现。

**【过程控制精度要求高】**流程生产过程中存在多种不确定性。例如，在有色金属冶炼过程中，温度、压力、浓度或组分比的微小波动都可能显著影响最终产品质量。同时，流程工业

具有原材料变化频繁、反应条件动态变化等特征，而生产过程却需保持持续稳定运行。随着反应过程不断演化，亟需依赖模型实现对关键参数进行实时、精确控制。

**【全流程协同优化难度大】**流程工业涉及众多生产环节，且环节之间存在复杂耦合关系，不同工序之间的参数与反应过程相互影响，单一环节的波动可能引发连锁反应，影响整体工艺的稳定性与效率。实现全流程的协同优化，必须同时考虑多工段之间的协同约束与整体生产效率的最优提升，这在实际工程中具有相当大的难度。

**【新材料工艺研发效率低】**新材料或新工艺的研发通常需要大量实验验证其可行性与性能。例如，开发新型电池材料时，常需合成数百乃至上千种候选材料，并逐一测试其电化学性能。这不仅需要大量人力与物力投入，还涉及复杂的实验设计、数据分析与结果验证流程，从而导致材料与工艺研发周期长、成本高。

现有大模型在技术上的内在缺陷，使其在流程工业中的集成应用面临重大挑战，主要具体表现如下：

**【泛化能力不足】**流程工业大模型需要能够处理来自不同工艺、设备及生产条件的数据，适用于多个行业的应用场景。由于每个行业拥有独特的生产流程与工艺特征，当面临新型生产条件或行业差异显著的应用场景时，通用大模型往往难以泛

化工业物理化学知识，难以适应复杂多变的流程制造场景。

**【可信性、可靠性与可解释性差】**流程工业对模型的可信度、可靠性及可解释性要求极高。流程生产过程常涉及复杂的物理化学反应，若模型出现预测错误或决策失误，可能引发严重的生产事故或产品质量问题。由于大模型的底层架构通常为概率性输出，难以保障其可信性并解释其预测或决策的依据。

**【灾难性遗忘现象】**流程工业常常面临新的工况与新工艺场景，因此大模型必须具备持续学习能力。但现有大模型在吸收新知识时，往往出现“灾难性遗忘”现象，即原有知识被覆盖，导致其在长期生产支持中效果不稳定。

综上所述，当前通用大模型难以胜任流程工业在建模、控制与优化等方面的复杂需求。因此，工业大模型不应被视为通用大模型的直接应用，而应通过对新型基础理论与关键技术的深入研究，构建面向流程工业的新一代大模型。

### **2.3 流程工业工业知识增强的大模型系统集成应用需求分析**

对于流程工业而言，钢铁和有色冶金行业是应用工业知识增强大模型较为成熟的场景，其知识依赖度高、流程复杂、数据基础好且提质降本需求迫切。

钢铁和有色冶金行业的生产过程具有典型的“黑箱”特性，其核心工艺环节——无论是钢铁冶炼中的高炉、转炉，还是有色冶金中的电解槽、沉降槽——内部都发生着复杂的物理

化学反应，难以直接观测与测量。

传统上，生产的稳定与优化极度依赖工程师与操作工长年累月积累的“手艺”与“经验”。这种隐性知识难以规模化传承，且易伴随人员流动而流失，构成了行业高质量发展的首要瓶颈。与此同时，流程工业海量、多源的数据特性——包括时序传感器数据、设备运行日志、质检报告、工艺规程文本乃至现场图像与视频——为基于数据驱动的新范式提供了可能，但传统分析方法难以穿透这些多模态数据，挖掘其深层价值。

知识增强大模型不仅能处理结构化数据，更能理解行业术语、工艺原理与操作规程等非结构化知识，通过构建工业知识图谱，将散落在不同手册、规程与专家头脑中的隐性知识显性化、结构化，形成一个可计算、可查询、可推理的“企业智慧大脑”。例如，在钢铁行业，大模型可以深度融合冶金物理化学原理与实时传感器数据，实现对炼钢终点温度的精准预测，或将老师傅“看火候”的经验转化为基于计算机视觉的智能识别模型。在有色冶金领域，如中铝集团的实践所示，大模型通过对大量工艺参数的分钟级预测，降低主控操作工作量，并将原本需要数小时的化验结果预测缩短至3分钟以内，实现了从事后分析到事前预测的质变。

流程制造业的长周期为知识增强大模型提供了深厚的数据基础和复杂的优化目标；其多工序的复杂耦合关系，为模型

提供了全局优化的必要性；此外，知识密集的特性使模型从工具转化为智能载体。

然而，在具体应用实施过程中，钢铁和有色冶金行业存在差异。钢铁行业的知识更侧重于工程实践与流程管控，例如，如何通过调整工艺参数来匹配特定的钢种标准；而有色冶金的知识则与物理化学机理绑定得更深，例如，如何通过控制电势、pH 值来高效地分离和提纯金属。这导致两者在构建知识库时，侧重点和难度有所不同。此外，钢铁生产流程长，但工序相对标准，这为数据采集和贯通创造了较好的数据基础，也为实施全流程物料跟踪和一体化调度提供了可追溯的数据支撑；有色冶金则常面临高温、强腐蚀等极端环境，传感器部署困难，导致关键数据更容易缺失或不稳定，因而对数据增强和软测量技术有更强的依赖。两个行业的需求差异分析具体如表 1-2 所示。

表 1-2 钢铁和有色冶金 2 个行业在具体需求层面的差异分析

需求维度	钢铁行业	有色冶金行业
生产工艺	工艺流程耦合紧密、质量一致性要求高、全流程物料跟踪难	原料成分复杂多变、反应机理深、能耗与排放控制压力大
知识融合	工艺知识库与质量溯源，深度融合炼铁、炼钢、轧制等各环节工	机理模型与动态优化：深度融合热力学、化学

	艺知识,构建全流程质量关联知识图谱,实现从微观组织到宏观性能的精准调控	反应动力学等机理模型,使大模型能理解并推理复杂反应过程,实现工况自适应优化
智能感知与认知	多尺度感知与协同,需要实现从微观(金相组织)、中观(表面缺陷)到宏观(物料位置)的全链条、一体化智能感知与认知分析	关键参数软测量与工况识别:对难以直接测量的关键工艺参数(如熔池温度、成分)进行软测量,并精准识别复杂的工况模式
决策与控制	全局协同与实时控制:追求全流程一体化调度与关键工艺环节(如转炉炼钢)的实时闭环控制	况自适应与能效优化:在动态变化的条件下进行自适应操作优化,并在保证质量的同时,实现能源效率的最大化

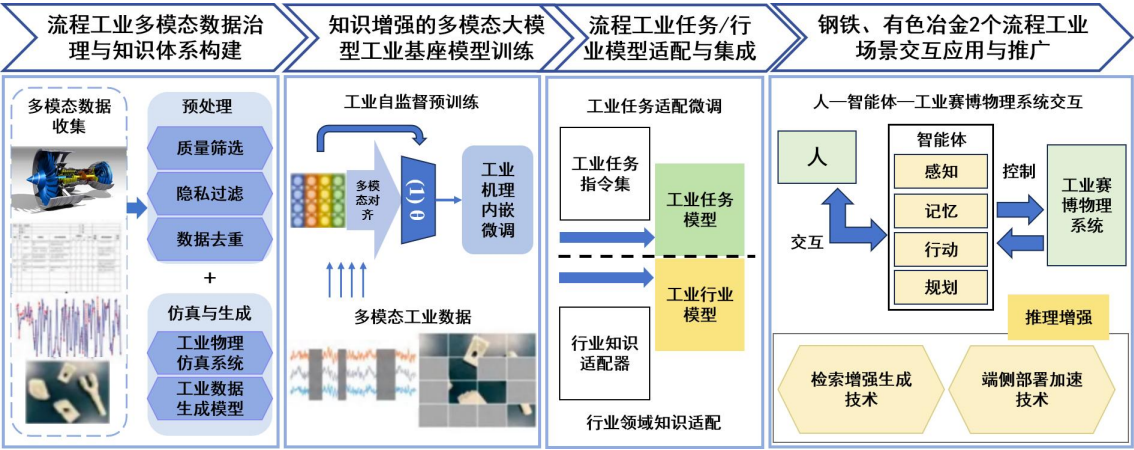
### 三、 主要研究内容及技术路线 (技术可行性分析)

#### 3.1 主要研究内容和总体技术路线

面向流程工业的工业知识增强大模型系统,其核心是构建一个融贯“知识-数据-算法”的复杂工业智能体。技术路径始于工业知识图谱与物理机理模型的深度嵌入,这既将操作规

程、专家经验等隐性知识转化为可计算的结构化表征，又通过将热力学、反应动力学等第一性原理以约束形式编码，确保模型的物理一致性与可解释性。在此基础上，系统通过多模态数据融合技术，统一处理时序传感数据、视觉图像与声纹信号，形成对生产全流程的立体感知，并利用符号推理在知识图谱中实现可追溯的根因诊断。最终，在融合了机理与数据的高保真数字孪生体中，系统通过结合强化学习与模型预测控制，求解满足全局约束的最优操作序列，实现从单一设备参数到全流程协同的动态闭环优化，从而完成从感知、认知到决策的完整智能闭环，推动流程制造从经验驱动向知识与数据协同驱动的模式迁移。

本项目研究内容主要包括工业数据制备、工业基座模型训练、工业任务/行业模型适配、工业场景交互应用 4 个阶段，如图 1 所示。



## 图 1 项目研究内容和总体技术路线

具体包括：

**工业数据制备：**工业数据具有多种模态，如传感器的时序数据、工业视频和图像数据、CAD 数据、工业代码等，其制备方式更加多样化，主要包括数据收集、预处理、仿真及生成三个流程。可以通过使用公开或企业自有数据集、数据爬取和联邦学习等多种方式获取数据。为确保模型训练的效度和可靠性，需要进行数据清洗和预处理，包括质量过滤、敏感内容过滤、数据去重以及针对不同模态数据的标准化等操作。为满足大模型对大量数据的需求，可以通过仿真系统生成和生成式模型两种方法增加数据量，生成的数据需经过工业仿真系统筛选与过滤，剔除不可信样本后用于后续模型训练。

**工业基座模型训练：**主要包含工业自监督预训练、跨模态注意力对齐以及工业机理内嵌微调 3 个任务。自监督预训练旨在使大模型获取对工业领域复杂数据集进行特征提取与编码的能力，对于常见模态数据可直接采用预训练网络，对于工业特殊模态数据则需要重新设计并训练对应的编解码器。模型需要进行多模态对齐，调整不同模态数据的向量表征，确保它们在同一语义空间内的一致性，针对工业特殊模态数据的特

点，在冻结原有参数的同时重点训练对应的输入和输出映射器。完成注意力对齐后，大模型具备感知工业多模态数据的能力，但仍需进行工业机理内嵌微调，收集相关工业知识并转换为可用于训练的嵌入向量特征，通过并入训练目标、并入大模型的输入、进行知识图的指令微调等方法完成工业机理内嵌微调，对于工业机理方程，可将其信息表征为神经网络可识别的特征信息嵌入模型中，或者添加符合物理规律的后处理模块实现工业机理内嵌，提高模型输出的合理性。

**工业任务/行业模型适配：**完成工业大模型的训练后，基于工业基座大模型，通过模型适配获得适用于具体工业任务的模型和行业领域模型。模型适配过程包括针对任务模型的任务适配微调以及针对领域模型的行业知识内化。在任务适配微调过程中，对不同的任务准备不同的任务指令集，在任务指令集上对模型进行指令微调，提高模型在专精任务上的表现。完成任务模型微调后，为使模型应用于各个行业时具有更强的适配性，需要进行适配器微调，通过添加小规模适配层而不改变预训练模型参数，减少训练成本的同时保留预训练模型的泛化能力，提高在行业特定数据集上的性能。

**工业场景交互应用：**主要分为“人—智能体—工业赛博物

理系统”交互和高效实时推理增强两项任务。人、智能体、工业赛博物理系统作为相互交互的主体，形成有机整体。智能体以工业大模型的能力为内核，并增加与应用环境的交互功能，如主动感知、情景记忆、行动规划、执行控制等，根据多变的工业任务目标，在工业环境中实现主动化的观测、行动与协作。在模型推理过程中，可以使用检索增强生成（RAG）技术进行推理效果增强，预先将工业赛博物理系统中的领域或者环境信息编码为知识图谱，动态地从外部知识库中检索相关信息，并将其与模型当前处理的内容结合起来，增强模型的知识理解和回答能力，该技术特别适用于存在大量动态变化因素的工业环境场景。对于端侧算力不足的情况，可以使用工业轻量端侧部署加速推理技术实现高效实时推理，通过模型剪枝、模型量化、知识蒸馏等方法对模型进行压缩与量化，减少使用过程中需要的算力。

根据上述研究内容，具体拆分为4个研究任务，详述如下。

### **任务 1：流程工业多模态数据治理与知识体系构建**

沈阳工业大学（牵头）：负责研究流程工业知识图谱的基础构建方法，围绕“设备-工艺-质量-能耗”等核心要素，基于物质流-能量流-控制流-信息流和成本流（简称“五流”）耦合机理

抽取和融合行业知识，构建覆盖关键工序的、可推理的流程工业知识图谱；研究构建跨模态对齐的钢铁工业高质量预训练与微调语料库。

**本溪钢铁（集团）信息自动化有限责任公司（参与）：**负责钢铁行业的数据资源盘点与标准制定，梳理钢铁全流程（如炼铁、炼钢、连铸、热轧等）产生的多模态数据（文本工艺规程、图像/视频表面质检、时序传感器数据、音频设备异响等），研究并提出钢铁行业的数据清洗、标注与融合的标准规范。

**沈阳铝镁设计研究院有限公司（参与）：**负责有色冶金（主要包括铝冶炼中电解铝和氧化铝）行业的数据资源盘点与标准制定，梳理铝冶炼全流程（如氧化铝，电解铝等）产生的多模态数据（文本工艺规程、图像/视频表面质检、时序传感器数据、音频设备异响等），研究并提出铝冶炼行业数据清洗、标注与融合的标准规范。

交付成果包括：

- （1）《流程工业多模态数据治理白皮书》1份
- （2）流程工业基础知识图谱统一构建方法1套；覆盖钢铁、有色冶金2个行业的不少于3个关键工序的流程工业细分

知识图谱各 1 套，实体关系数量不少于 10 万条；

(3) 钢铁、有色冶金 2 个行业的高质量多模态领域语料库各 1 个，总量不低于 10TB，并完成跨模态关联标注。

## **任务 2：知识增强的多模态大模型关键技术和集成平台研发**

**沈阳工业大学（牵头）：**基于通用大模型逻辑和算力，利用**任务 1**构建的语料库持续预训练，使模型掌握基本的行业术语与知识；研究视觉、文本、时序数据在钢铁场景下的多模态融合与对齐技术，实现跨模态的联合理解与推理（如根据炉内图像和工况数据判断炉况）；研究将**任务 1**构建的知识图谱动态注入大模型的推理过程，开发知识检索增强、思维链引导推理等技术，提升模型回答的准确性和可解释性，解决实际使用过程中的“幻觉”问题；研发“流程工业知识增强多模态大模型应用平台”原型系统，集成**任务 2**训练的模型，提供模型服务、知识检索、人机交互等核心功能。

**本溪钢铁（集团）信息自动化有限责任公司（参与）：**研究适用于钢铁生产现场的高效微调、模型压缩、轻量化部署技术，平衡模型性能与推理成本。

**沈阳铝镁设计研究院有限公司（参与）：**研究适用于有色

冶金（电解铝和氧化铝）生产现场的高效微调、模型压缩、轻量化部署技术，平衡模型性能与推理成本。

交付成果包括：

（1）完成钢铁、有色冶金 2 个领域预训练的行业基础大模型（Base Model）各 1 个；

（2）“知识增强的多模态融合”、“图谱引导推理”等核心算法工具包 2-3 套；

（3）完成轻量化部署的模型版本，在特定硬件上关键响应时间<500ms。

### **任务 3：钢铁工业典型场景的知识增强多模态大模型系统集成与应用**

本溪钢铁（集团）信息自动化有限责任公司（牵头）：  
在任务 2 研制的流程工业知识增强多模态大模型应用平台上集成钢铁行业的典型场景工业软件智能体，并在 1-2 家合作钢铁企业的选定产线（如炼钢、热轧产线）进行系统部署，开展不少于 6 个月的连续示范运行；建立量化评估体系，从技术指标（如模型准确率、响应时间、系统可用性）和经济指标（如质量合格率提升、能耗降低、运维成本节约、专家工作效率提升）两方面综合评估系统效果；总结示范经验，分析系统投资

回报率,提出可行的商业化运营模式与在钢铁行业的大规模复制推广路径。

**沈阳工业大学(参与):** 聚焦钢铁高炉故障诊断自然语言问答与优化、烧结矿/连铸坯质量溯源与分析等 2-3 个高价值场景进行深度集成与工业软件智能体开发部署。

交付成果包括:

(1) 在钢铁行业的典型场景(如故障诊断、工艺优化)中部署端到端的工业软件智能体;

(2) 在 1-2 家大型钢铁企业完成示范应用,形成示范应用报告 2 份;

(3) 提供《技术经济性分析报告》1 份,量化验证关键指标提升;

(4) 提出钢铁行业知识增强多模态大模型系统可行的商业化模式与推广方案建议书 1 份。

#### **任务 4: 有色冶金工业典型场景的知识增强多模态大模型系统集成与应用**

**沈阳铝镁设计研究院有限公司(牵头):** 在任务 2 研制的流程工业知识增强多模态大模型应用平台上集成有色冶金行业的典型场景工业软件智能体,在 1-2 家合作的有色冶金企业

的选定产线（如氧化铝或者电解铝产线）进行系统部署，开展不少于 6 个月的连续示范运行；建立量化评估体系，从技术指标（如模型准确率、响应时间、系统可用性）和经济指标（如质量合格率提升、能耗降低、运维成本节约、专家工作效率提升）两方面综合评估系统效果；总结示范经验，分析系统投资回报率，提出可行的商业化运营模式与在有色行业的大规模复制推广路径。

**沈阳工业大学（参与）：**聚焦有色冶金原料制备工艺自然语言问答与优化、电解工艺人机协同交互等 2-3 个高价值场景进行深度集成与工业软件智能体开发部署。

交付成果包括：

（1）在有色冶金 2 个行业的典型场景（如原料制备、电解工艺优化）中部署端到端的工业软件智能体；

（2）在 1-2 家有色冶金企业完成示范应用，形成示范应用报告 1-2 份；

（3）提供《技术经济性分析报告》1 份，量化验证关键指标提升；

（4）提出有色冶金行业知识增强多模态大模型系统可行的商业化模式与推广方案建议书 1 份。

## 3.2 详细技术路线

### 3.2.1 流程工业多模态数据治理与知识体系构建技术路线

目前，流程工业生产中普遍应用了分布式控制系统（Distributed Control System, DCS），该系统可以实时采样流程工业生产过程中各个环节的生产状态，特别是传感器技术及数据库技术的快速发展，DCS 系统对流程工业生产状态的监控越来越多。流程工业控制系统采样得到的数据经过长时间的积累形成规模庞大的历史数据库，在这些数据中包含了可用于生产和管理的大量有价值的信息和知识。除了隐含在直接来自生产现场具有多维度、多尺度、异构的海量数据中的知识之外，在流程工业中的知识还包括具有隐蔽性、非量化的经验知识，以及能够反映生产过程的气液固多相变化机理的机理知识。知识资源已经成为支撑流程工业企业生存与发展的重要力量，流程工业对知识资源的高效应用具有非常迫切的需求。以面向业务的工业应用软件的开发与应用为实现路径，工业技术、工艺经验、制造知识和方法等通过软件实现显性化、数字化和系统化。

目前工业知识的研究在流程工业中应用已经研究很久，主要是通过贝叶斯网络、模糊系统、以及专家系统等完成在流程

工业对知识的自动推理以及实现自主决策。但是随着实际系统的复杂性不断增加，上述方法的复杂性会大大增加，使得大多数理论应用都是停留在研究层面，实际应用场景非常少。知识发现主要是从专家人员、文件或其他系统等提取知识并向知识型系统转移的过程。常用的方法包括事件关联规则挖掘、人工神经网络、数据统计分析方法、遗传算法、决策树等。由于工业数据数量大并且质量难以保证，工业过程中知识的提取仍然是主要难点。

流程工业制造过程包括 3 个重要环节：一是研制过程；二是生产过程；三是运营过程。知识作为重要的生产要素，不仅要考虑产品生产周期全过程如何智慧化，同时还要考虑产品运维过程对研制和生产的反向影响。对于不同的生产过程和知识有不同的结合点，知识跟企业产品研制过程关系最紧密，研制是知识的归宿。普通制造过程的知识密度比较低，但是工艺设计指南、产品使用手册、作业指导书等知识如果能够得到很好的整理，将对制造过程产生很大的价值。生产过程的知识大多来源于大数据分析结果，通过制造过程的异常数据可以判断设备、生产线以及产品运营过程的健康程度，利用大数据技术科研对制造过程、产品运营进行预测、改进甚至自动决策。产

品运维过程也会产生大量的数据，这些数据都可以被知识化，能够指导企业优化研制和生产过程，及时修改产品的设计和生  
产。

### **3.2.1.1 流程工业的知识分类与建模**

在制造企业中，数据、信息和知识是一个彼此关联和不断重用、提炼的过程。数据在反复关联与使用中提升为信息，信息在反复关联和使用中转化为知识。数据类资源通过标准化技术，可以使其获得有序化特征，但仍然属于低层次的知识形态。信息类资源对数据知识进行分析整理，通过结构化加工强化共享特征，经过分类、聚类、语义分析等手段结构化后，信息类资源形成各种分类知识库供参考查阅。

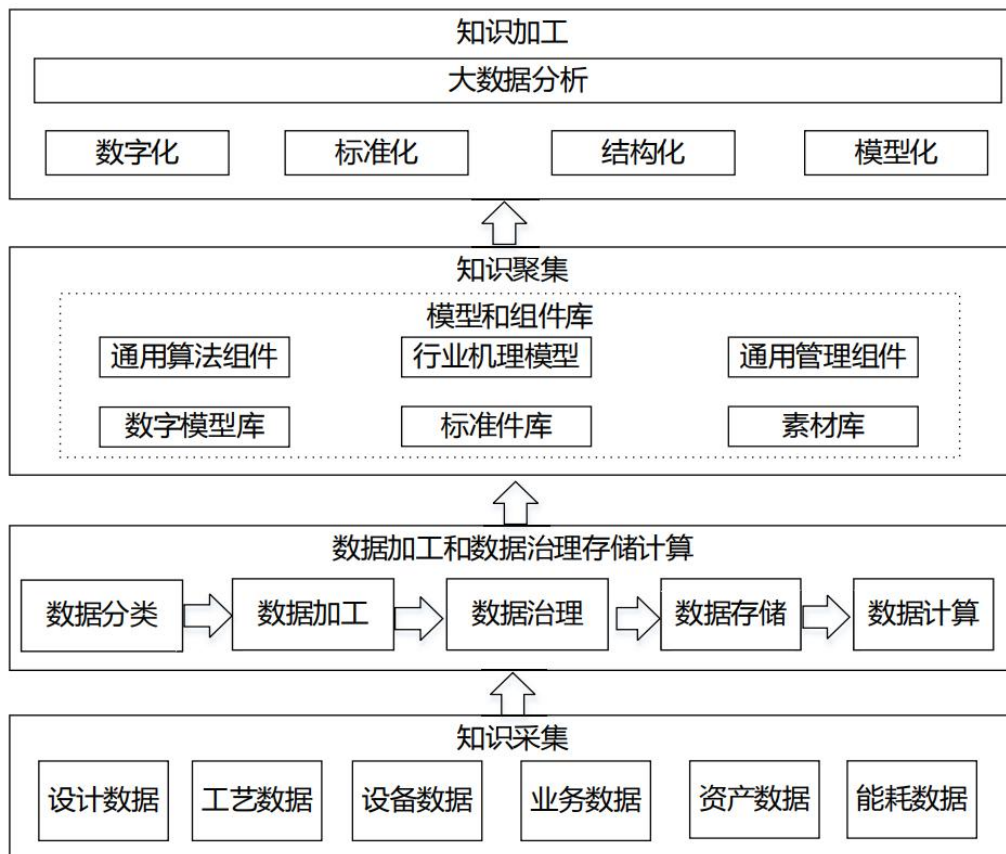


图 2 流程工业知识建模框架

知识建模框架如图 2 所示，知识采集针对设计数据、工艺数据、业务数据等类型，是资源数据的基础层；数据加工和数据治理存储计算对采集到的数据进行分类、加工、治理、存储和计算；知识聚集是针对不同的知识形态，设计不同的知识模型和组件库，将知识模块和知识载体管理入库，最终形成各种类型的知识库，包括通用算法组件、行业机理模型、通用管理组件等；最后通过知识加工对知识库中不同类型的知识进行数字化、标准化、结构化、模型化等技术进行加工处理，提升知识层级，实现知识增值。

合理的知识分类是有效获取、管理与利用知识的基础。为深入了解和掌握流程行业企业复杂知识资源的特征及对知识资源的需求情况，完成对知识资源的梳理，对钢铁、有色冶金等典型流程行业企业进行了多次的现场调研，为了便于制造企业知识资源有效管理与应用的角度，从产生生命周期和知识表现形式对流程行业知识资源进行分类。将流程工业的知识资源划分为数据类知识、文档类知识、过程类知识和经验类知识 4 种类型，方便复杂知识资源的存储管理。

（1）**数据类知识**：支撑研制过程、进行产品设计的参考数据以及生产过程、管理营销过程中的数据资源，包括工程实例数据、基础支撑数据、设备运行数据、操作数据以及各种参考库等数据资源。

（2）**过程类知识**：包括科研、生产管理、营销活动外围的流程知识及内部的过程知识。科研、生产管理及营销活动外围的流程知识为科研、生产管理、营销活动和相关科研活动的逻辑关系，以数据流图的形式表示，还包括对科研活动的输入输出的选取原则、要求等进一步描述，一般以文字描述的形式表示。科研、生产管理及营销活动内部的流程知识，主要描述执行上述相关活动的设计子流程、执行步骤的说明，以工作流

图或文字描述的形式表示。

**(3) 文档类知识：**为纯文档、图形文档、图像文档或混合文档的形式，主要包括各类技术报告，如安装报告、工况分析报告、诊断报告、工具使用手册、使用案例和使用方法等；工业活动过程中需要遵循的标准和约束条件，如相关国家标准、行业标准、企业标准、规范作业等。

**(4) 经验类知识：**经验类知识主要指企业研发人员、研究人员等为工业生产、管理过程人员在处理同类问题时，提供成功经验、心得和失败教训。包括但不限于各种经验、教训、最佳实践、解决方法、应用技巧、使用心得等。

知识分类中包含显性知识和隐性知识，通常以文字、图表、公式、流程和模型等表述的知识称为为显性知识；通过自动知识挖掘工具，发现、收集知识库以外以及游离于管理制度之外的知识获取各类知识称为把隐性知识。区别于以往的单一知识的提取流程，根据流程工业中存在的各类知识表现形式，面向工业过程决策、优化、控制、故障诊断等实际应用需求，研究不同类型的资源信息采用不同的建模手段，提升其知识特征，满足企业的发展需求。

### **(1) 数据类知识建模**

采集企业各业务环节中产生数据，基于工业大数据、工业区块链、人工智能等技术，通过数据挖掘、数据分析、数据处理等方法建立数据与业务的关联模型，实现以数据支撑业务管理的决策优化。主要提取过程包括：数据处理、数据分析、特征提取、算法选择、建立模型、参数调优，模型验证等。数据建模过程可用如图 3 所示。

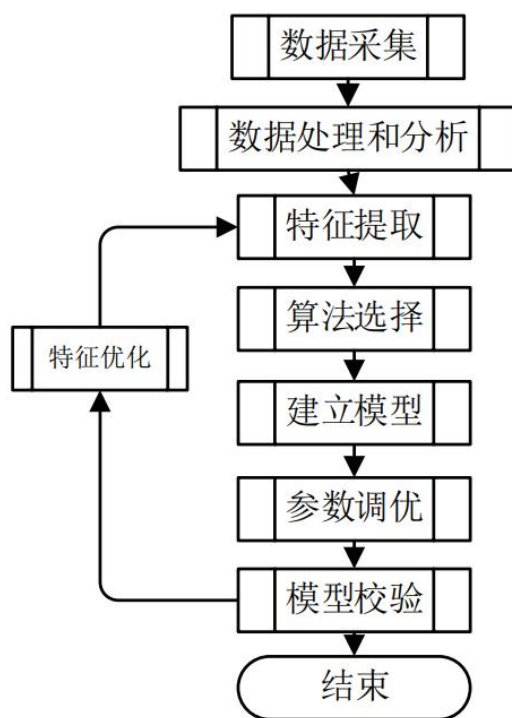


图 3 流程工业数据类知识的建模

1) 数据采集：收集生产管理运营过程中与模型相关的业务数据、操作数据、设备数据、监测数据、管理数据等。

2) 数据处理和分析：在建立模型数据集的基础上，对数据进行预处理，包括缺省值、异常值处理，以及数据的标准化

等。通过初步数据探索，发现数据特征和规律，常用的数据分析方法有数据特征描述、相关性分析、主成分分析等。

3) 特征提取：通过过滤法、包裹法、嵌入法等方法选择或者构建与模型相关性较大的一部分特征，作为模型的输入，以减少数据噪声对模型结果的影响。

4) 算法选择：根据业务的任务类型（监督学习、非监督学习、强化学习）以及涉及的问题（回归、分类、聚类）进行算法选择。

5) 建立模型：将数据集分为训练数据集、验证数据集及测试数据集，使用训练数据集中的数据对模型进行训练。

6) 参数调优：使用验证集对训练集学习得到的模型进行评估和参数调优，检查模型是否得到有效的训练或是否可以完成任务。并使用网络搜索、随机搜索或贝叶斯优化等方法对为达到效果的模型进行参数调优。

7) 模型校验：建立初始模型后，使用测试数据集对模型预测能力进行测试验证，同时不断应用特征优化、算法改进和参数调优等方法进行模型优化迭代，直至满足功能业务需求。

## **(2) 过程类知识建模**

面向企业各实际业务场景，将业务管理规范、业务流程管

控、业务信息流转等业务以工业组态、图形化建模等方式提炼为数据管理流程模型、工艺生产流程模型、业务管理流程模型等的过程，最终实现各项业务活动的信息化管理。过程类知识建模过程可用如图 4 所示。

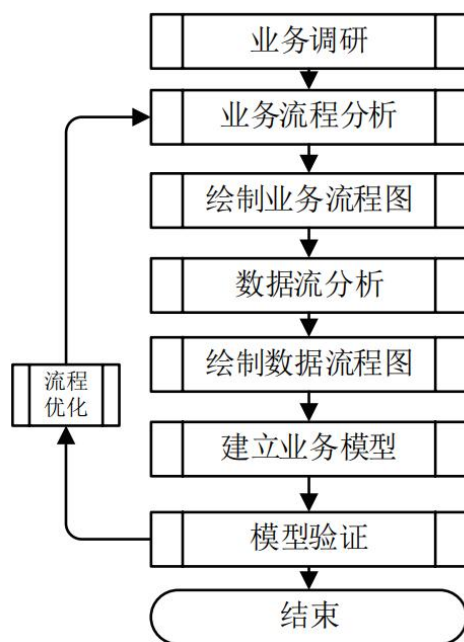


图 4 流程工业过程类知识的建模

1) 业务调研：通过业务调研发方式完全理解业务流程，明确业务流程类别（营销流程、采购供应流程、计划排产流程、储运流程以及企业管理流程），流程涉及的组成以及相关操作规范、管理章程、规章制度、行业标准等文件及数据。

2) 业务流程分析：针对具体业务流程，开展业务流程的开始及终止节点、过程活动节点及步骤，模型涉及的相关岗位及部门分析，以及活动流程中的控制流。

3) 绘制业务流程图：根据业务流程分析，使用跨职能流程图、UML 活动图等方法绘制。

4) 数据流分析：梳理完成业务流程的数据输入项以及输出项，进而逐渐细化为最细粒度数据，一般包含数据的输入，加工、传递存储等功能。

5) 数据流程图：依据数据流图的基本规则，包括外部实体、数据处理、数据流和数据存储，建立描述数据流动、存储、处理的逻辑关系图，将业务流程抽象化。

6) 建立业务逻辑模型：将业务流程抽象化，建立业务逻辑模型。

7) 模型验证：验证模型产生的结果是否实现其业务目标。

### **(3) 文档/经验类知识建模**

文档类和经验类知识建模将相关领域的经验知识以显性化的方式展现出来，如将经验知识提炼为预警报警标准、操作流程、应急预案、安全规程等。经验文档知识类建模过程可用如图 5 所示。

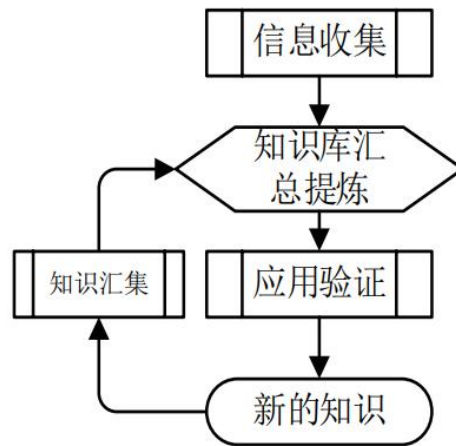


图 5 流程工业文档类和经验类知识建模

1) 信息收集：汇集与经验类知识（相关经验、教训、应用技巧、使用心得等）梳理相关的数据、文件、图片等数据。

2) 知识库汇总提炼：建立相关问题的知识库，通过简单的数据分析、数据对标、业务对标、流程分析的方式，提炼与目标问题相关的新的结论。

3) 应用验证：以显性化的方式，如量化的控制标准、逻辑化的控制管理流程等，将经验类知识在实际场景的应用并验证，或作为其他模型建模的基础数据。

### 3.2.1.2 流程工业的知识图谱构建

知识图谱作为知识工程的典型范式，其本质是通过本体论框架对客观世界的认知要素进行多维度组织。该技术采用图结构数据模型，将具体事物对象（如物理实体、社会主体、历史事件等）与抽象认知单元（如学科概念、业务规则、操作流程

等)进行语义关联,形成具有层次化特征的语义拓扑结构。知识图谱的核心概念主要包括以下几个方面如表 3-1 所示。这种网络化知识表征方法不仅明确定义实体间的关联属性(包含隶属关系、时空关系、因果关系等),还通过跨域知识融合实现复杂语义的机器可读性,为知识的系统性表示与推理提供计算基础。它利用图结构(节点和边)对数据进行组织,将分散的信息整合为可推理的知识体系,广泛应用于搜索引擎、智能问答、推荐系统等多个领域,为智能化应用提供了重要的知识基础。

表 3-1 知识图谱的组成

名称	定义
实体 (Entity)	现实世界中的具体对象或抽象概念,可以是人、地点、事件、物品等。
属性 (Attribute)	描述实体的特征或性质,通常以键值对的形式表示。
关系 (Relation)	知识图谱的基本数据单元,由两个实体及其关系或一个实体及其属性组成,形式为 <头实体,关系,尾实体>或 <实体,属性,值>。
本体 (Ontology)	用于定义知识图谱中概念的分类体系及其关系的规则,是知识图谱的“骨架”。

---

图结构 (Graph Structure)	知识图谱的表示形式, 由节点 (实体或概念) 和边 (关系或属性) 组成。
知识表示 (Knowledge Representation)	将知识以计算机可理解的形式表示出来, 通常使用标准化的数据模型。
知识推理 (Knowledge Reasoning)	基于已有知识推导出新知识的过程。
知识融合 (Knowledge Fusion)	将来自不同来源的知识进行整合, 解决冲突、重复和歧义问题。

---

知识图谱工程是通过系统化的方法和技术, 设计、构建、维护和应用知识图谱的全过程。它融合了数据工程、语义技术、自然语言处理 (NLP) 以及机器学习等多领域的知识, 旨在将分散的、碎片化的信息整合为结构化的知识体系, 从而为智能化应用提供强有力的支持。知识图谱的构建通常涵盖以下核心任务: 数据准备、知识抽取、知识融合、本体构建、知识图谱构建以及知识图谱展示。知识图谱的构建主要包括自顶向下和自底向上两种方法。其中, 自顶向下方法通常依托高质量的结构化数据源 (如百科类平台), 通过抽取本体和模式信息, 逐步构建知识库。构建流程如 6 所示。自底向上方法则是从开放链接的数据源中提取实体、属性和关系, 逐步抽象为概念, 最

终形成模式层，构建流程如 7 所示。这两种方法共同构成了知识图谱从数据到知识的完整生命周期。

自顶向下构建知识图谱流程遵循以下原则，首先需要完成需求分析与目标界定，明确图谱的功能定位与应用场景；其次构建领域本体框架，通过概念分类体系确立核心实体类别及其语义关联规则；继而依据领域特征设计结构化数据模型，规范知识元素的存储范式与约束条件；在知识初始化阶段，基于领域专家经验进行知识节点的初始化填充，建立基础语义网络；随后通过整合多源异构数据资源，补充图谱；运用知识推理优化图谱质量；继而开发应用程序，实现知识检索、智能问答等应用，最终结合用户行为分析与领域演进特征持续优化知识图谱。

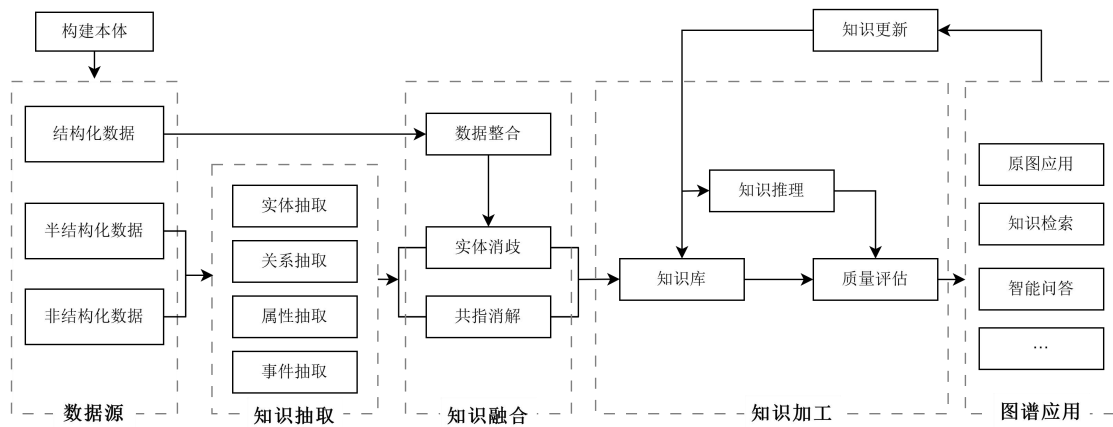


图 6 自顶向下构建知识图谱流程

自底向上构建知识图谱流程遵循以下原则，首先收集并系

统整合结构化、半结构化及非结构化文本资源,进行数据清洗、格式转换等操作;继而运用信息抽取技术,结合深度学习方法实现非结构化文本的抽取,生成实体和关系集合;基于图结构的存储架构(如 Neo4j 等图数据库),设计节点-边模型并定义属性约束,完成知识存储;通过本体标注与语义规范化处理,为知识要素附加类型约束与领域语义,强化图谱的语义解析能力;针对多数据源,采用知识融合技术整合数据,确保图谱一致性。依托知识推理,挖掘隐含语义关联并构建知识驱动的政策支持系统;最终对图谱进行定期维护,更新实体及其关系信息,以确保知识的时效性和准确性。本文所采用的是自顶向下的方法构建的知识图谱。

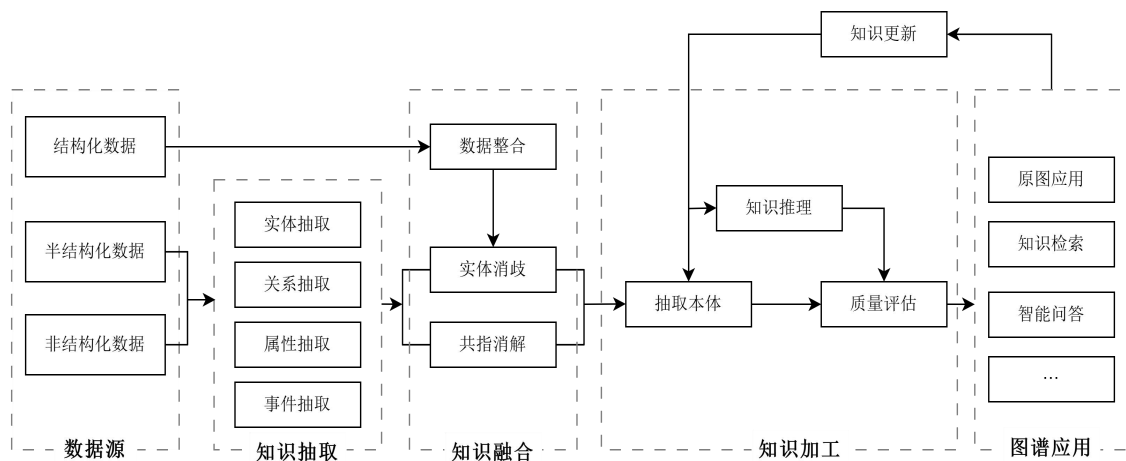


图 7 自底向上构建知识图谱流程

知识抽取体系的核心构成要素主要包括实体识别与关系

提取两大关键技术模块。其中实体识别负责定位文本中的概念单元，关系提取则致力于挖掘概念间的语义关联。这两个模块的协同运作实现了从原始语料到结构化知识的转化过程。

实体识别作为知识图谱构建的基础技术，其方法论经历了显著的技术迭代与范式升级。早期研究主要依赖基于规则的方法，通过人工构建领域词典与正则匹配规则实现实体标注。随着统计机器学习的不断发展，条件随机场（CRF）等基于统计方法的序列标注模型逐渐成为主流，通过融合词性标注、边界特征等语言学特征实现概率化预测。近年来，深度学习方法通过 BiLSTM-CRF 混合架构有效捕获上下文语义关联，特别是以 BERT 为代表的预训练语言模型在特定领域中展现出强大的细粒度识别能力，能够有效处理复杂文本中的实体抽取任务，尤其是在面对上下文关系复杂的文本时具有较好的效果。标志着实体识别进入语义理解驱动的新阶段。

关系抽取的方法按领域划分可以分为：面向封闭领域的抽取方法和面向开放领域的抽取方法；按模型可以分为特征工程、核函数、图模型以及深度学习等方法；按框架可以分为基于人工模板、监督学习、远程监督与弱监督、Bootstrapping 以及无监督的学习框架；拓展开来还包括多元关系抽取，跨句或

篇章级的关系抽取，实体和关系的联合抽取，基于对抗学习、强化学习或元学习，以及最近比较流行的基于预训练模型的抽取方法等，典型的一些关系抽取方法如图 8 所示。

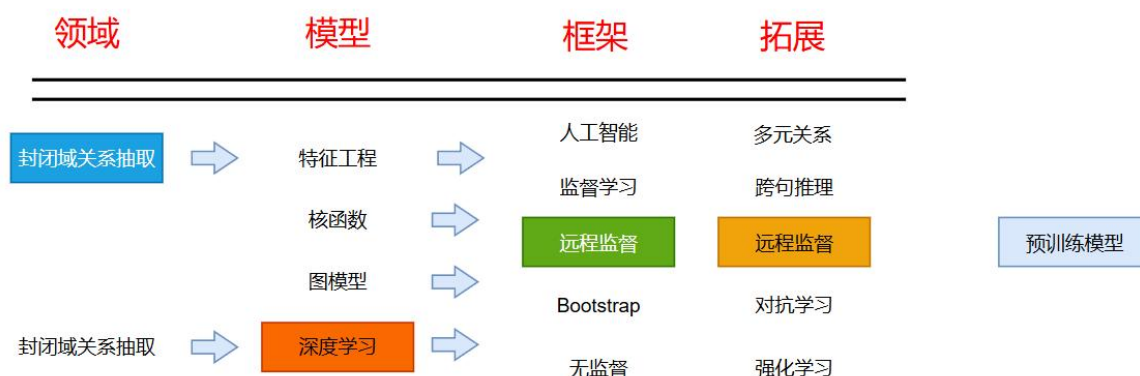


图 8 典型的关系抽取方法

知识存储系统的设计与选型是构建知识图谱体系架构的关键技术决策，其核心需要平衡存储效率、查询性能与系统扩展性之间的多维需求。当前主流的图数据库解决方案虽均采用节点-边拓扑模型实现知识表征，但在技术实现路径与功能特性层面存在显著差异。相较于 JanusGraph 受限于 Gremlin 查询语言的复杂度及其相对薄弱的开发者生态，Neo4j 凭借 Cypher 查询语言降低了关系型查询的认知负荷，同时依托成熟的社区资源加速了工程实践迭代。对比 ArangoDB 在图遍历算法优化方面的局限，Neo4j 原生图存储引擎通过物理层索引优化实现了亚秒级多跳关联查询响应。针对 Amazon Neptune 等托管服

务存在的成本控制难题，Neo4j 的开源特性与混合部署架构在保证企业级可靠性的同时提升了成本效益。相较于 AzureCosmosDB 在多模型支持导向下的图计算能力折衷，Neo4j 专注图数据处理的垂直深耕策略使其在复杂关系推理场景中保持性能优势。这些差异化技术特征表明，在需要深度关联分析与高频拓扑更新的知识图谱应用中，专用图数据库在工程适用性层面展现出更优的综合表现。

本项目实施过程这个采用自顶向下和自底向上结合的方式，如图 9 所示。通过系统化的知识处理流程，实现流程工业领域结构化知识体系的自动化构建。该流程包含三个核心处理阶段：首先对原始文本数据进行清洗、去噪和标准化等预处理操作；随后采用基于深度学习的命名实体识别和关系抽取技术，完成关键故障信息的自动化提取；最后通过知识融合与消歧处理，形成结构化的知识网络。

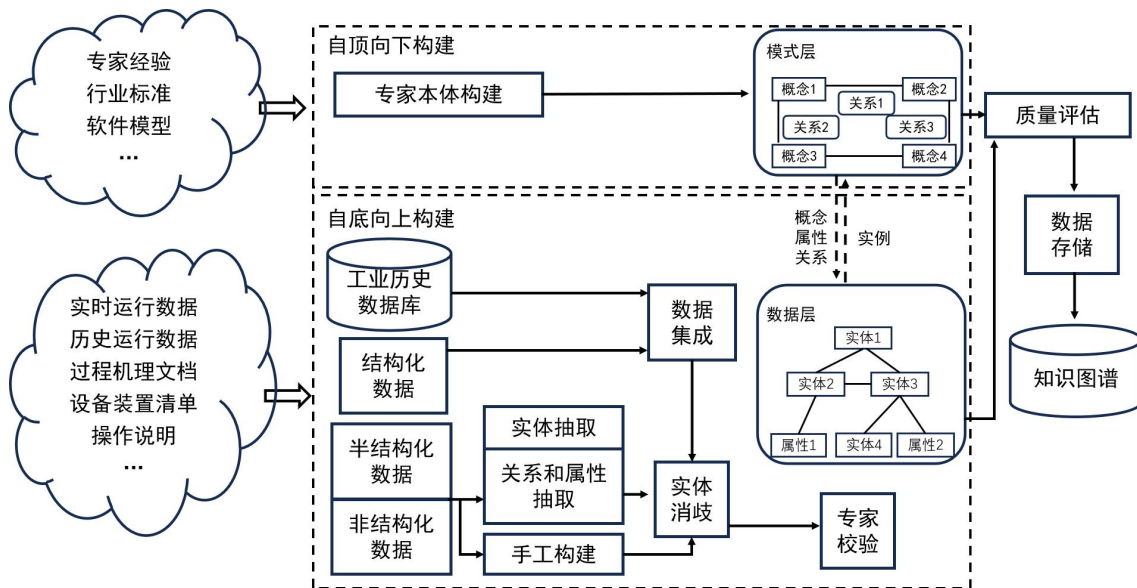


图9 融合的知识图谱构建方法

### (1) “五流”耦合的知识图谱统一构建方法

研究以“设备-工艺-质量-能耗”为核心要素，基于物质流-能量流-控制流-信息流-成本流（“五流”）耦合机理的知识图谱构建方法。具体包括以下步骤：

**1) 本体层设计：**构建流程工业上层本体。定义核心概念类，如“工序”、“设备”、“物料”、“工艺参数”、“质量指标”、“能源介质”、“控制指令”、“成本单元”等，并形式化地定义它们之间的关联关系，例如“设备\_执行\_工序”、“工序\_消耗\_能源”、“工艺参数\_影响\_质量指标”、“控制指令\_调节\_设备状态”。此本体设计将充分参考《面向典型应用的工业知识图谱技术规范》等团体标准。

**知识抽取：**采用“规则+深度学习”的混合策略。对于结构化、半结构化数据（如MES、ERP系统表单），采用规则

模板进行精准抽取。对于非结构化文本（如工艺文档、故障记录），利用在通用语料上预训练的模型（如 BERT、ERNIE）进行领域自适应微调，执行命名实体识别与关系抽取任务。例如，从“提高冷却水流量可降低终轧温度”文本中，抽取（冷却水流量，正向影响，终轧温度）的三元组。

**知识融合与推理：**将来自不同数据源、不同模态的知识进行融合，消除歧义（如“TMT”可能指“飞剪”或“温度模型精轧”），形成统一的知识网络。在此基础上，开发基于规则（如 SWRL）或图神经网络（GNN）的推理机，实现知识补全与隐性知识发现。例如，通过“高炉冷却壁水温差超过警戒值”和“冷却壁水温差过高可能导致炉缸烧穿”两条知识，推理出“高炉存在炉缸烧穿风险”的预警。

## （2）高质量多模态领域语料库建设

基于治理后的数据，构建钢铁、有色冶金各不低于 10TB 的高质量多模态语料库。

**1) 语料构成：**语料库将包含纯文本语料（技术标准、论文、专利）、图文对语料（缺陷图像与描述文本）、时序-文本对语料（传感器数据段与对应的工况描述）、以及跨模态关联标注数据（如前文所述的以“炉次 ID”关联的多模态样本）。

**2) 跨模态对齐：**这是语料库质量的精髓。我们将利用对比学习技术（如 CLIP 模型的思想），训练跨模态编码器，使

得在向量空间中，语义相关的文本和图像/时序数据拥有相近的表示。例如，使“带状裂纹缺陷”的文本描述与其对应的带钢表面图像在特征空间中对齐。

在完成文本数据的多维度特征提取与关联关系挖掘后，系统成功构建了包含故障实体及其关系的语义网络拓扑。为提升知识存储效率，采用 Py2neo 数据接口工具，将规范化处理后的知识批量存储至 Neo4j 图数据库中，如图 10 所示，显示了以图和文本两种方式呈现的磨矿机故障类型表现出的故障现象相关实体，图 11 给出了实体关系示例图。

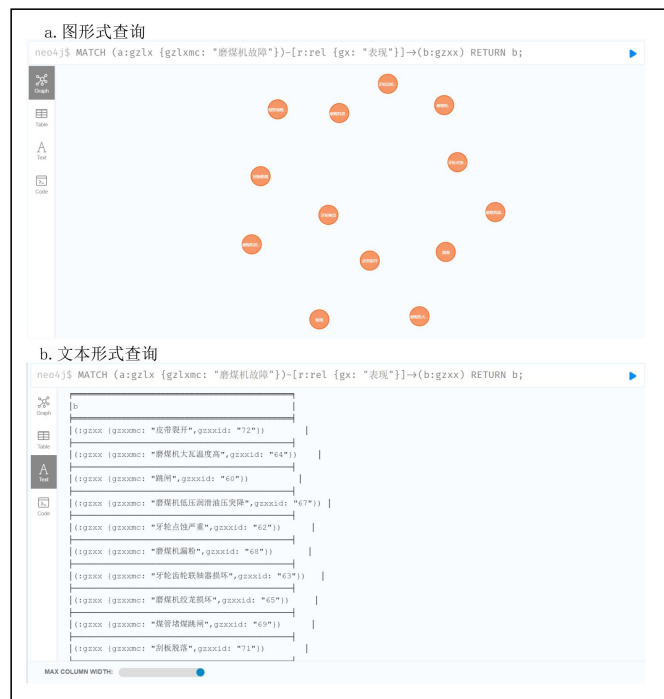


图 10 Neo4j 两种形式的故障类型-故障现象查询结果



旨在让模型“读懂”行业语言，掌握基本的工艺原理、设备知识和操作规程，成为一个“懂行的学生”。

**多模态融合与对齐技术：**研究视觉、文本、时序数据的统一表征与融合架构。对于图像与文本的融合，可采用类似于 Flamingo 的交叉注意力机制，让模型能根据炉内图像回答“当前炉况是否正常”等问题。对于时序与文本的融合，创新点是设计时序编码器（如 TimesNet、Transformer-based）将可变长序列数据编码为固定维度的特征向量，并与文本特征在语义空间进行交互，实现如“根据过去一小时的温度压力序列，生成工况报告”的功能。

### 3.2.2.2 知识增强与推理优化技术

为解决大模型的“幻觉”问题并提升其可解释性，我们研究将研究内容 1 构建的知识图谱动态注入大模型。核心技术包括：

**知识检索增强生成：**借鉴 KAG 框架的思想，构建知识增强生成框架。当用户提问时，首先对查询进行语义解析，然后在知识图谱中执行多跳查询，检索出相关实体和关系子图，最后将检索到的结构化知识与大模型的知识一同作为生成答案的依据。

**图谱引导的思维链推理：**对于复杂问题，如“分析连铸坯中心裂纹产生的原因及对策”，模型将被引导执行一个思维链。首先，从知识图谱中检索与“中心裂纹”相关的所有工艺因素（如二冷水量、拉速、钢水过热度）；其次，结合当前生产数据，计算各因素的偏离程度；最后，综合推理出最可能的原因，并给出基于知识的调整建议。这个过程将知识图谱作为推理的“脚手架”，使模型的思考过程透明化、可追溯。

**动态知识注入：**研究如何将知识图谱中的三元组信息通过修改模型注意力机制（如在 Key-Value 对中注入知识实体）或作为外部记忆单元供模型随时读取，实现知识的内化与即时更新。

### 3.2.2.3 模型轻量化与知识增强的多模态工业大模型集成平台

#### （1）面向工业现场的高效微调与轻量化部署

本钢信息自动化（钢铁）和沈阳铝镁院（有色）将主导此方向，目标是让大模型能在资源受限的边缘环境中稳定、高效运行。具体包括：

**参数高效微调：**针对具体场景任务（如设备故障诊断、工艺参数推荐），采用 LoRA、QLoRA 等参数高效微调技术，仅训练少量适配器参数，快速适配模型，大幅降低对计算资源

和标注数据的需求。

**模型压缩与加速：**采用知识蒸馏技术，训练一个小型化但性能强劲的学生模型。同时，应用量化技术，将 FP32 的模型权重转换为 INT8 甚至 INT4，减少存储占用和内存带宽需求。结合模型剪枝，去除冗余的神经元或注意力头，进一步提升推理速度。

**轻量化部署：**利用 TensorRT、OpenVINO 等推理加速引擎，对优化后的模型进行部署，并通过动态批处理、请求队列管理等技术，确保在特定硬件上关键响应时间<500ms，满足工业实时性要求。

## **（2）流程工业知识增强多模态大模型应用平台”原型系统研发**

沈阳工业大学主导研发一个集模型服务、知识检索与人机交互于一体的平台原型，采用微服务架构，实现高内聚、低耦合，便于功能模块的独立开发与水平扩展。

核心功能模块包括：

**模型服务与管理中台：**统一管理多个领域大模型及其不同版本，支持模型的动态加载、版本控制和性能监控。

**知识检索与推理引擎：**封装研究内容 1 构建的知识图谱，

提供高效的语义查询接口（如 SPARQL）和多跳推理服务。

**多模态人机交互接口：**提供自然语言、语音、图像等多种交互方式。例如，操作员可以上传一张设备异常图片并询问“这是什么问题？”，平台能综合图片视觉信息和历史运行数据，给出诊断结论和处置建议。

**AI 智能体 workflow 引擎：**支持通过低代码方式，将大模型的决策能力编排到具体的业务流程中，例如构建“质量异常自动诊断→根因分析→工艺参数调整建议生成→推送至 MES 系统”的自动化闭环。

知识增强的多模态工业大模型体系架构，如图 12 所示，包含基础设施层、基座层、模型层、交互层、应用层 5 个层次。

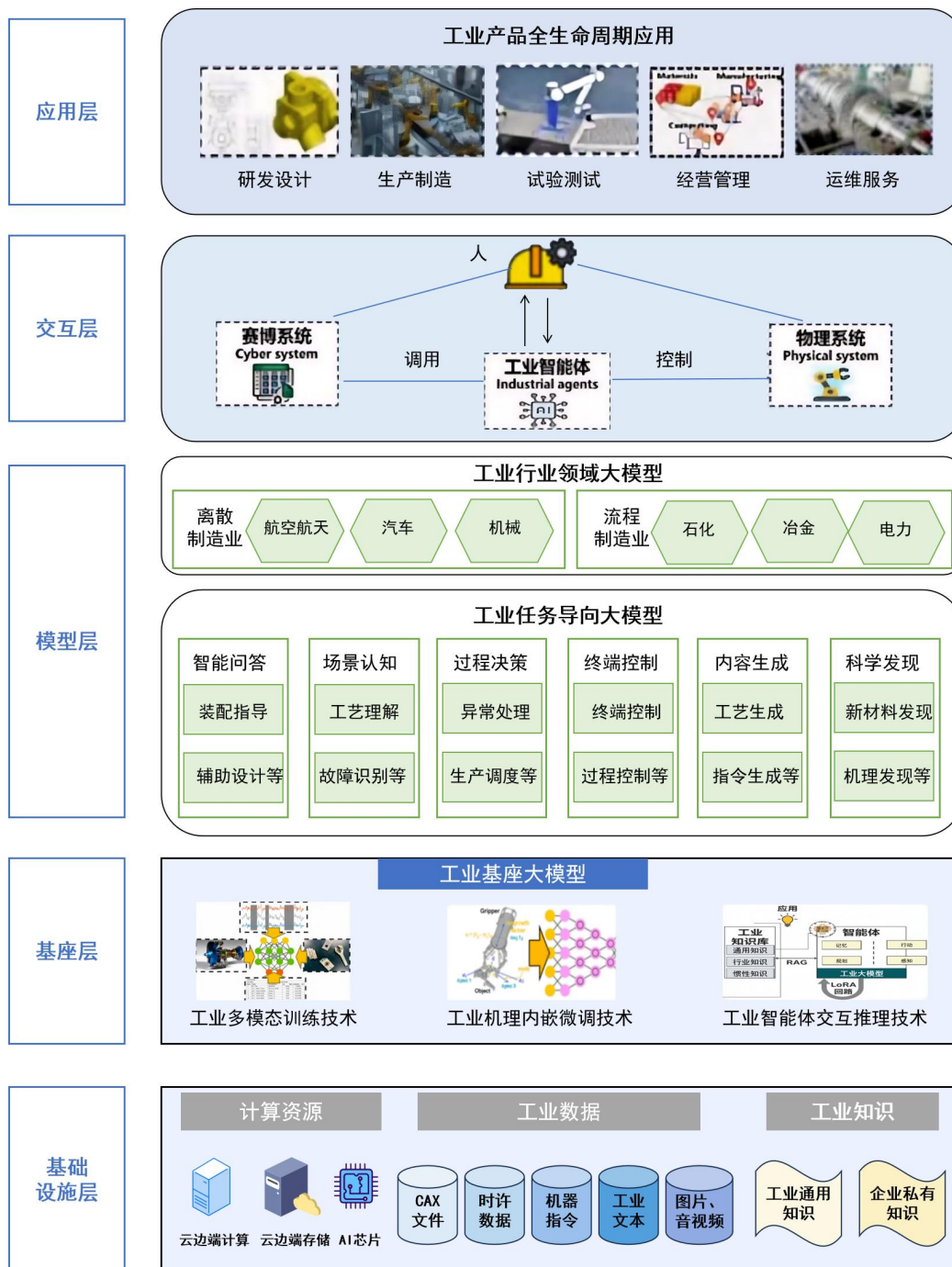


图 12 知识增强的多模态工业大模型体系架构

具体如下：

**基础设施层：**是构建工业大模型所需的基础资源，包括工业数据、算力、知识等。工业数据涵盖信息管理系统的数据、

工业时序数据、机器指令、工业文档以及图像、视频和音频等多模态数据，是模型训练和操作的基础。计算资源包括用于大模型训练和推理的云边端算力、存储，以及专为 AI 运算设计的芯片。工业知识包括工业通用知识和企业私有知识，涵盖行业规范、操作文档、机器运作原理和维护经验等工业知识文件和专用的领域知识图谱，为模型提供决策分析的深层次知识逻辑基础。对于流程工业，工业知识主要包括涵盖传感器信号、工业图像、工艺文档和 CAE 文件等多模态数据资源；深度融合化学反应机理、物理过程规律等专业知识。

**基座层：**是工业大模型的核心支撑，主要包括基于工业多模态预训练技术、工业机理内嵌微调技术、工业智能体交互推理技术 3 类核心技术的工业基座大模型。预训练通过与下游任务无关的工业多模态数据的初始训练，使工业大模型具备理解和处理工业场景中多模态数据的通用能力。微调是在较小、特定数据集上进一步训练预训练模型，以提高模型在特定任务上的性能和泛化未见过任务的性能。工业推理使模型在复杂的工业环境中能够迅速、准确地处理数据并作出决策，包括模型压缩、硬件加速、工业检索增强生成等方法。工业基座大模型具备工业任务的通用解决能力，为更精细的模型适配及场景应

用提供基础。

**模型层：**是工业大模型的主干部分，面向不同的工业任务和行业领域进行适配，形成任务导向大模型和行业领域大模型。工业任务适配是以工业基座大模型为基础，经过多任务指令微调，在保留通用任务能力的基础上使其在特定任务上表现更优，包括智能问答模型、场景认知模型、过程决策模型、终端控制模型、内容生成模型、科学发现模型。行业领域大模型则是在其基础上通过行业领域知识嵌入和适配器微调得到的，涵盖航空航天、汽车、机械等离散制造领域，以及石化、冶金、电力等流程工业领域。

**交互层：**由人、大模型智能体、工业赛博物理系统三部分组成，形成有机整体对工业生产过程进行交互协作。用户包含研发人员、工程人员、生产操作人员和经营管理人员等各类专项人员，在制造过程中承担不同任务目标。智能体集成工业大模型的几项基本能力，并增强记忆、规划、行动、感知来与外界交互，具有主动感知和控制工业环境的能力，能够自发记忆、观测和影响外界环境。赛博物理系统包含物理系统（如机器人、机床、自动导引车等）和赛博系统（数据库、工业软件、工业网络等），是智能体感知、调用和控制的对象。

**应用层：**是工业大模型在服务端的表现形式。工业大模型涵盖智能问答、场景认知、过程决策、终端控制、内容生成和科学发现等 6 大能力，这些能力使其能完成复杂专业的问答，理解和分析复杂的工业环境，作出科学的过程决策，直接控制工业设备，以及自动生成技术文档和仿真设计。基于这些能力，面向工业制造业全生命周期，对研发设计、生产制造、试验测试、经营管理、运维服务 5 个工业环节进行支撑应用。

机理认知是理解复杂工业系统的基础，指对流程工业底层物理与化学机制的认知能力。工业大模型具备从数据中挖掘参数关系与工艺机制的能力，从而辅助工艺优化与改进。通过学习历史数据与相关机理理论，大模型可以揭示关键变量之间的关系，帮助工程师优化操作条件。例如，模型可学习化学反应动力学原理，预测影响反应速率、产物质量和产率的因素，从而为工程师推理出原料浓度、反应温度、pH 值等变量的最优区间，提升产线运行效率。

流程工业领域涉及大量专业、复杂的知识。知识问答能力体现为大模型提供相关专业技术知识的能力，为工程师与操作人员在生产过程中快速解答技术问题。通过集成并学习大量文献资料、实验数据与工艺知识库，模型可以对工程师提出的问

题提供精准、专业的答案，显著缩短决策时间。进一步地，通过引入人类反馈机制，模型能够持续适应工业标准的演进，提供更精准、上下文相关的指导。例如，若生产过程中出现异常情况，工程师可向模型提问，模型将基于历史经验和当前工艺参数迅速生成可能原因列表，辅助问题定位。

仿真生成能力体现为模型基于已有数据与机制进行高精度过程仿真、预测反应过程的行为与结果，支持工艺优化与风险规避。在开发新工艺或进行参数测试时，工程师可使用大模型生成不同工况下的仿真结果，以评估调整方案的效果。例如，模型可用于预测不同操作条件下的产品质量，辅助确定最优参数组合。同时，通过输入控制策略与参数条件，模型可输出关键物理场（如温度场、磁场）的分布模拟结果，支持生产过程的可视化监控。

过程控制能力体现为大模型对关键过程参数的实时监测与调节能力，确保工艺运行的稳定性与一致性。模型可通过实时数据分析，动态调整控制策略，应对生产过程中的波动与不确定性。例如，在连续生产过程中，模型可持续监测温度、压力、流量等关键指标，自动反馈并调整控制变量，避免产品质量波动。同时，模型可根据当前状态输出推荐调整方案供操作

人员参考。模型在微调阶段还可嵌入运行安全约束，确保其输出建议始终在温度、压力、流量等设定安全阈值内，保障工艺安全。

优化与决策能力是指模型在多变量、多目标条件下的全局优化能力，帮助企业制定经济效益与资源利用最大化的生产计划。通过集成企业资源计划系统（ERP）等信息，模型可在复杂约束下寻优决策。例如，在原材料采购与库存管理方面，模型可综合考虑原料价格波动、供应链稳定性、生产需求与库存成本等因素，制定最优采购与库存方案，确保生产连续性、降低成本并提升企业响应市场的能力。未来，可通过构建与工业知识融合的提示词库（prompt library）提升模型在优化决策方面的实用性与可控性。

科学发现能力体现为大模型支持新材料、新工艺与新产品开发的能力。通过分析大量实验数据与过程参数，模型可辅助研究人员发现潜在的科学规律、新材料性能或创新工艺路径，加速技术突破。例如，在新材料性能预测方面，模型可结合历史数据与机理知识，预测材料在实际应用中的表现，识别潜在的合成路径，从而缩短研发周期、提升效率、降低实验成本。此外，模型还能结合已有知识，提出具有创新性的实验设计方

案，在控制多变量条件下快速迭代实验，提高研发成功率。

### (3) 流程工业多模态预训练技术

流程工业多模态预训练技术工业生产中存在大量多模态数据，如图像数据、设备运行声音数据、操作日志中的文本数据、各类传感器数据等。各模态数据来源和表现形式不同，模型难以直接处理并用于任务决策。因此，需要首先训练工业模态编码器和生成器，然后对不同模态的数据在统一语义空间内进行协同对齐编码和跨模态融合，完成预训练。

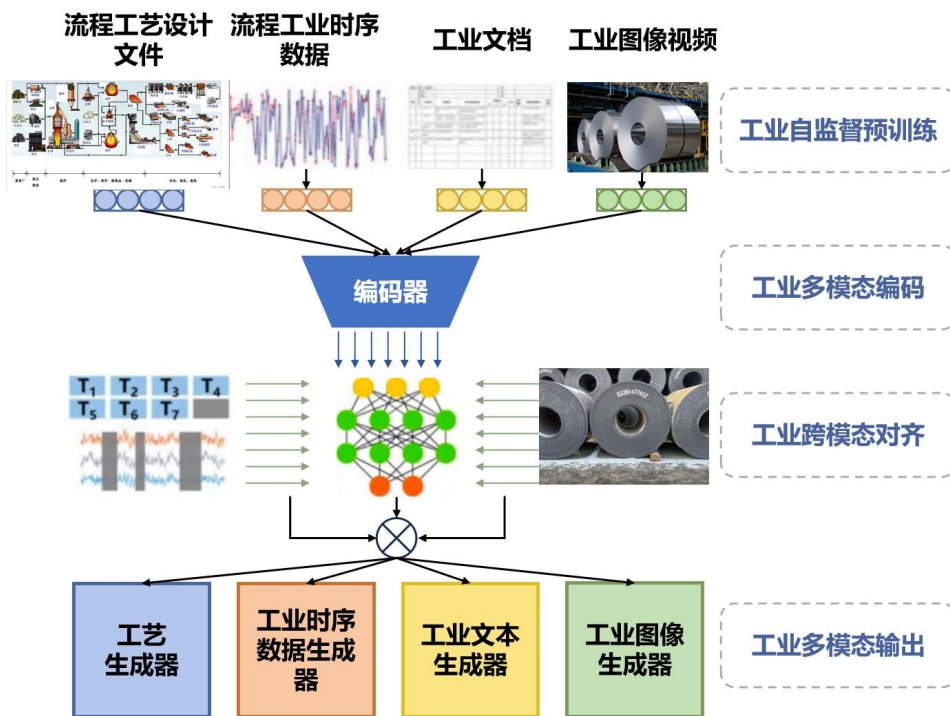


图 13 流程工业的多模态预训练技术

**工业自监督预训练：**旨在对模态编码器、模态生成器和骨干网络进行预训练，赋予它们对各自模态数据的语义理解及特

征提取能力，涉及对流程工业领域复杂数据的特征提取与编码。对于常见模态的数据（文档、图像、视频等），可直接采用预训练的网络，预训练方法包括预测下一个 token 或句子和去噪自编码任务等。针对时序数据，可通过在特定时间点添加掩码并预测还原来实现预训练；对于工艺设计数据，可以采取序列化处理并输入到专门设计的拓扑、几何等编码器中，学习各种变化。

**工业多模态协同编码：**为解决流程工业场景下不同数据的模态间未对齐问题，可通过多模态协同编码方式统一表征，缩小或消除模态间的语义间隔，为后续多模态预训练奠定基础。针对不同模态数据的特点进行预处理及特征编码，文本数据根据工业词表使用分词器分词得到词元序列并编码；视觉数据进行标准化预处理后划分为图像块或点簇，通过 2D 或 3D 编码器转换为编码向量；音频数据采样并转换为音频频谱，再通过频谱编码器输出音频向量表征；传感器数据间隔采样提取时序点数据进行数值标准化，采用时序编码模型得到时序编码向量。

**工业跨模态对齐：**结合多模态数据的编码，通过注意力对齐调整不同模态数据的向量表征，确保它们在同一语义空间内

的一致性。具体可通过训练输入和输出映射器优化预定义的目标函数实现多模态对齐。多模态预训练对齐阶段通常涉及大规模的文本配对数据,利用自监督学习损失函数优化各模态的编码器,使各模态在联合嵌入空间中更为接近。由于工业场景数据模态更丰富,还需设计针对性的工业模态数据对齐方法,如工艺设计-文本匹配、传感时序数据-文本匹配等,并在保持预训练模块冻结的同时,重点训练输入和输出映射器。可采用基于联合优化的投影转换跨模态融合,或基于交叉注意力的感知增强跨模态融合等方法。当配对数据较为充足时,可采用端到端的方式在混合模态数据进行训练对齐,优化跨模态训练的稳定性。

#### (4) 工业机理内嵌微调技术

预训练完成后,大模型具备了一定的普适性通用化能力,能应对部分任务。然而在工业多场景任务中,由于缺乏工业领域的专业知识和机理,大模型难以准确理解和处理工业问题,输出结果的可信性也较差。所以,结合工业知识和机理对大模型进行微调十分必要,具体过程如图 14(工业机理内嵌微调)所示。

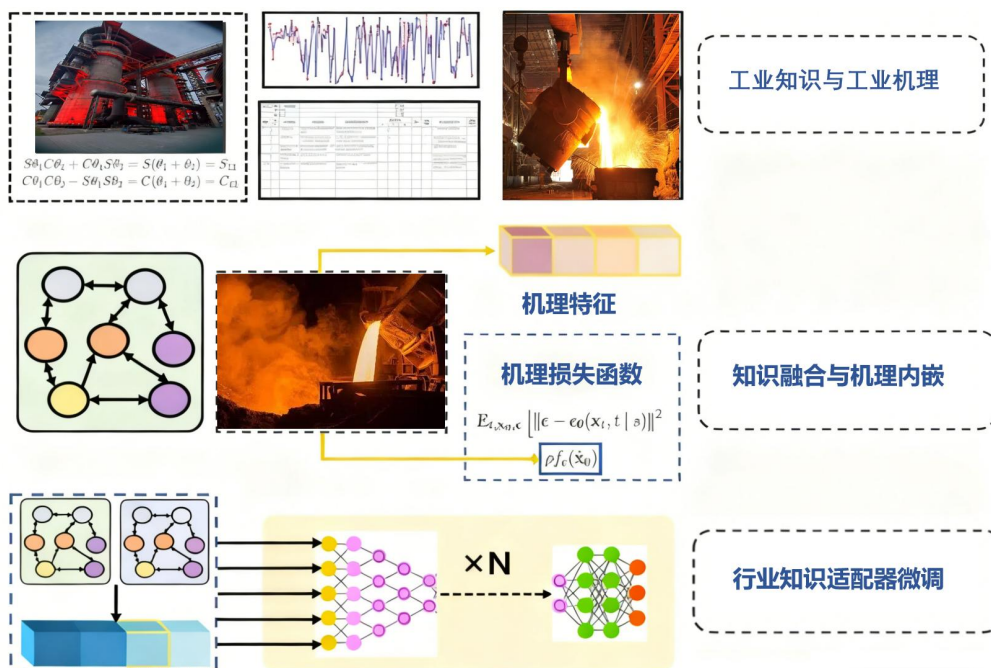


图 14 流程工业机理内嵌微调

具体技术包括：

**通用知识融合与工业机理内嵌：**大模型常用指令微调的方式，即在由人类指令和期望输出组成的配对集合上，对预训练后的模型进行微调。为将工业知识融入大模型，首先要从多种渠道收集工业知识，如工艺流程、技术规范等经验知识。其次，把这些知识转化为大模型能够理解和处理的形式，比如创建知识图谱中的三元组数据（头实体、关系、尾实体），并利用知识图嵌入技术将知识转为嵌入向量特征，用于后续训练。最后，使大模型融合工业知识，可通过将知识图谱整合进训练目标，以及进行知识图的指令微调来实现。

在将工业机理方程嵌入模型方面，可把机理信息表征为神

神经网络能识别的特征信息,嵌入网络架构中。在模型输出阶段,引导模型输出符合工业物理规律的结果,例如在损失函数中添加机理方程,对违反物理规律的输出结果进行惩罚。此外,还能依据机理知识库中的规则,检查约束模型输出,使其符合工业机理,也可以使用仿真工具或专家系统,验证模型输出的可信性和准确性。

**行业知识适配器微调:** 完成不同工业任务的模型微调后,为增强模型在各个行业的适配性,还需进行行业知识嵌入微调,让大模型精通特定行业的专业知识,从而在不同行业发挥更出色的作用。在行业模型微调时,使用适配器微调,既能最大限度保留任务模型的能力,又能显著增强模型对不同行业的适应能力。之后,准备详细的行业数据集,在这些数据集上微调模型性能,提升模型在行业专业问题上的表现。

**场景知识内化强化自训练:** 场景知识内化强化自训练技术主要用于解决工业行业知识中细分场景标注数据有限的问题。该技术先对小规模标注数据进行初步训练,然后利用模型生成伪标签,标注大规模未标注数据,并引入强化学习设定奖励机制,优化伪标签质量,进而提升模型性能。在标注数据有限的情况下,这种技术有助于解决工业细分场景问题的场景大模型

微调，提高模型训练效率和精度。

### (5) 工业智能体交互推理技术

在流程工业生产过程中，人、智能体、工业赛博物理系统三个主要组成部分，具体关系如图 15（人—智能体—工业赛博物理系统交互）所示。其中，人包括研发设计师、生产操作工、经营管理人员、运维服务人员等。智能体相较于大模型，具有更强的主动感知和控制工业赛博物理系统的能力。工业赛博物理系统涵盖了实际生产中的工业设备、控制系统、工业软件、工业互联网等，是智能体感知和控制的对象。

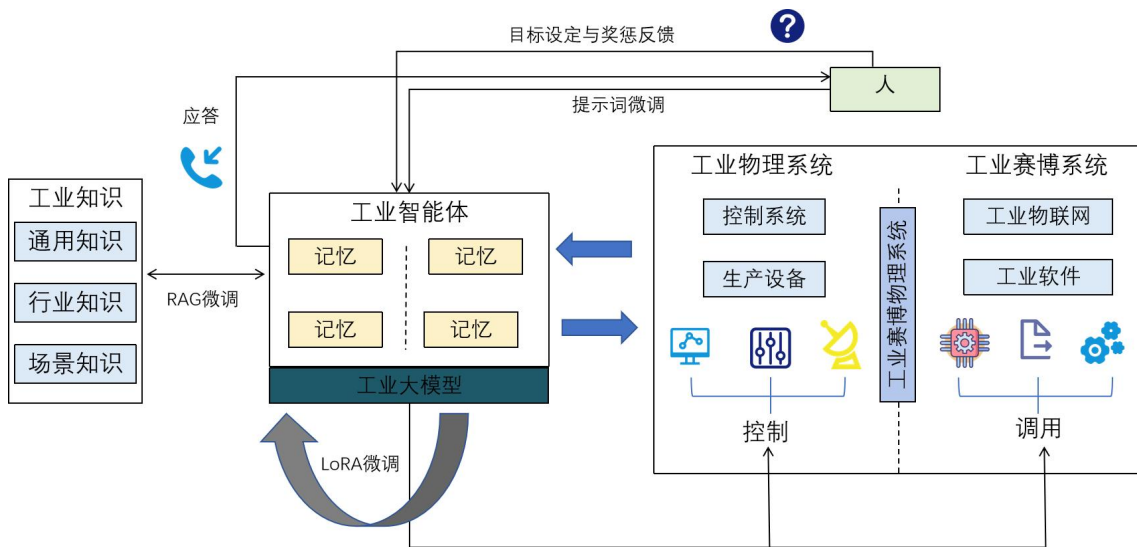


图 15 人—智能体—工业赛博物理系统交互

在人和智能体的交互过程中，人可根据具体任务需求，为工业智能体设定决策目标。智能体依据目标设定，主动规划任务流程、优化目标，并分解任务，设计不同的解决方案，同时

协调各子流程任务关系。此外，人还能向智能体提供奖惩反馈机制，促使智能体迭代优化自身策略，不断进化发展。在智能体和工业赛博物理系统的交互过程中，主要任务包括工业环境监控及资源的动态调配等。智能体利用感知能力观察生产要素条件和生产环境，再通过优化决策能力设计生成相应的控制逻辑，最终控制工业软件和工业设备，在工业赛博物理系统中完成生产任务。

工业大模型采用多种推理加速技术，如模型压缩、剪枝、量化等，以减少模型的计算量和存储需求，提高推理速度。同时，它还支持 GPU、TPU 等高性能硬件，进一步加速推理过程，满足工业应用场景对实时性的高要求。此外，推理加速还有助于降低模型的能耗和成本，提高模型的可用性和普及度。除满足实时推理需求外，在使用工业大模型进行推理时，还可借助以下技术提升模型表现。

工业知识库检索增强生成（RAG）结合了检索和生成的方法，适用于工业场景中的知识密集型任务。首先构建包含产品设计、工艺流程和设备维护等工业知识的数据库，然后利用 BM25 和 Dense Retrieval 等高效检索算法，从知识库中检索相关信息，最后基于检索到的信息，通过大模型生成更准确、

更具针对性的回答。在工业制造中，RAG 系统能快速提供技术支持、生成维护手册和优化生产流程。

**Prompt** 工程是通过设计合适的提示（**Prompt**），引导大模型生成符合用户需求和期望的文本或响应，是对 **Prompt** 的结构、内容等维度进行优化的 AI 技术。用户既可以选择预制模板，也能创建自定义 **Prompt**。

低秩微调（**LoRA fine-tuning**）是一种低秩适应方法，通过引入少量可训练参数，实现对大模型的高效微调。由于编码器经过大量数据预训练，具有较强且通用的模态先验，采用低秩微调可避免灾难性遗忘问题，同时减少训练参数量，提升模型训练速度。

### **3.2.3 钢铁工业典型场景的知识增强多模态大模型系统集成与应用技术路线**

#### **3.2.3.1 高价值场景遴选与工业软件智能体开发**

基于业务紧迫性和技术可行性，优先选择高炉故障诊断自然语言问答和烧结矿/连铸坯质量溯源与分析作为深度集成场景。

**高炉故障诊断智能体**：该智能体将集成知识增强的大模型（用于理解自然语言问询和生成解释）、专家知识库（包含故

障案例库和处置规则)以及实时数据接口(接入高炉各类传感器数据)。当工长询问“炉况是否顺行?”,智能体可自动检索当前及历史数据,结合知识图谱进行推理,最终生成“目前炉况基本顺行,但请注意冷却壁水温差有上升趋势,建议检查冷却水压力”的结论与预警。

**质量溯源分析智能体:**构建从烧结到连铸的全流程质量知识图谱,明确各工序工艺参数对最终产品质量(如强度、裂纹)的影响路径。当出现质量异议时,输入产品批号,智能体可快速追溯其生产全流程数据,并通过大模型分析各环节参数的波动情况,定位最可能的质量异常工序和原因,形成可视化的溯源分析报告。

### (1) 需求分析与构建流程

对于高炉系统故障知识库以及质量溯源知识库的构建而言,当前的关键任务,是以准确且快速的方式收集和整理相关专业知 识,为后续应用与决策提供支持。因此,通过构建高炉系统故障知识图谱,旨在将该复杂领域的文本知识转化为结构化信息表示。使用图数据库 Neo4j 的数据存储功能来提供可视化服务,使得高炉系统故障领域的这些结构化知识得以直观展示,从而更好地支撑的探索。这一章的核心便是聚焦于如何获

取高炉系统故障领域的结构化知识,并着力构建相应的知识图谱。

本项目所采用的知识图谱构建数据源主要来自于本信公司提供的钢铁工程数据,将收集到的高炉故障和质量相关的半结构化和非结构化数据进行预处理。首先进行数据标注,将标注好的高炉系统故障数据用于 BERT 预训练模型中,结合双向长短期记忆网络 (BiLSTM) 和条件随机场 (CRF) 混合模型进行训练以及对比实验。将训练后的模型进行知识抽取,使用该 BERT-BiLSTM-CRF 混合模型抽取高炉系统故障知识三元组,抽取后的三元组还需要进行知识融合。

以高炉故障诊断场景为例,经过融合后的三元组存储到 Neo4j 图数据库中,构建出了一个高炉系统故障知识图谱网络。在构建高炉故障知识图谱的过程中,本章主要包括了几个关键步骤:故障知识数据的收集及预处理、知识抽取以及知识存储等。高炉系统故障知识图谱构建具体构建流程如图 16 所示。

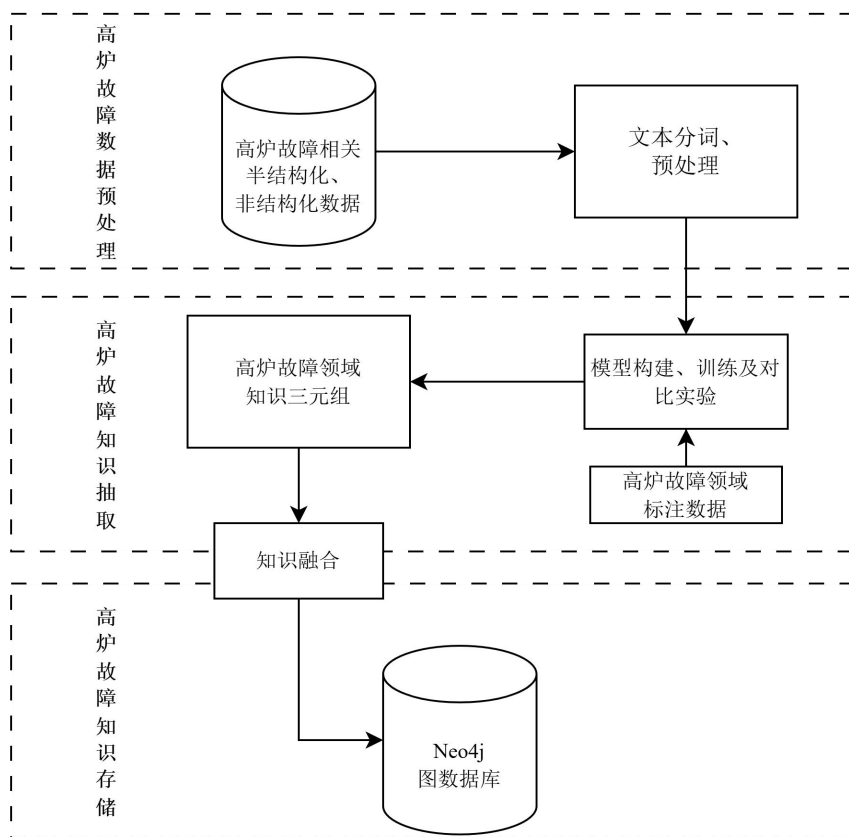


图 16 高炉系统故障知识图谱构建流程

## (2) BERT-BiLSTM-CRF 混合模型

运用双向长短时记忆网络 (BiLSTM) 结合条件随机场 (CRF), 以流水线方式应用在高炉系统故障的实体关系抽取任务中, 并引入预训练模型 BERT 以增强性能。其中 BERT 能够有效捕捉字符、词汇及句子之间的深层关联特征, 将高炉系统故障文本转化为高维向量表示, 可以为 BiLSTM 模型在学习上下文特征过程中提供更丰富的语义信息支持。BERT-BiLSTM-CRF 模型的结构如图 17 所示, 其中, 嵌入层将输入的高炉系统故障语句  $w_n$  进行向量化, 生成对应的输入特

征向量，作为模型处理的基础，其中  $H = (h_1, h_2, \dots, h_n)^T$  为特征矩阵。BiLSTM 层可以从输入特征中提取出上下文的语义信息，生成更具语义表达能力的高级词向量特征。自注意力层则利用自注意力机制通过计算文本中各个单词的重要性权重，从而捕捉深层次的全局语义特征，揭示词语在句子中的相互关联性。输出层将自注意力层产生的全局特征向量与 BiLSTM 层的局部特征向量进行拼接整合，最终生成反映实体之间关系的向量。在基于自注意力机制的关系抽取模型中，实现关系抽取的两个重要公式，自注意力权重向量  $\mathbf{a}$  如式 (3.1) 所示，实体关系概率分布  $\mathbf{p}$  如式 (3.2) 所示。

$$\mathbf{a} = \text{soft max}(\mathbf{v}_{att} * [\tanh(H)]^T) \quad (3.1)$$

$$\mathbf{p} = \text{soft max}(W * [\tanh(\mathbf{a} * H)]^T + \mathbf{b}^T) \quad (3.2)$$

$$H = (h_1, h_2, \dots, h_n)^T \quad (3.3)$$

其中， $\mathbf{v}_{att}$  表示维度为  $2u$  的权重向量， $H$  为 BiLSTM 编码后的特征矩阵； $W$  为词语权重矩阵。 $\mathbf{c}$  表示关系类别的总数，在本节中定义为  $\mathbf{c}=5$ ； $\mathbf{b}$  为维度为  $\mathbf{n}$  的偏置向量。 $\tanh(\bullet)$  表示双曲正切激活函数， $\text{soft max}(\bullet)$  为归一化指数函数，其计算表达式如下式 (3.5) 所示。

$$\text{soft max}(f_y) = \frac{\exp(f_y)}{\sum_{c=1}^c \exp(f_c)} \quad (3.5)$$

通过自注意力机制,该网络层能够动态地计算输入序列中各词汇单元的关联权重,从而有效提取文本的全局上下文语义信息,进一步揭示词语之间的相互关系。输出层将自注意力层生成的全局特征向量与 BiLSTM 层的局部特征向量进行整合,生成用于描述实体关系的向量。该模型结合文本前后语义的隐藏状态信息,有效捕捉文本中较长距离的语义依赖关系,从而提升高炉系统故障文本的关系抽取效果。在序列化标注任务中,CRF 推理层由于具有条件概率分布的特性,成为了处理高炉系统故障文本的首要选择。该层以 BiLSTM 网络层的输出为输入,通过优化标注序列的最大似然概率,为预测标签的生成施加关键约束。这种设计不仅实现了故障实体关系的精准定位,更为构建高炉故障智能诊断系统提供了可靠的知识推理基础。

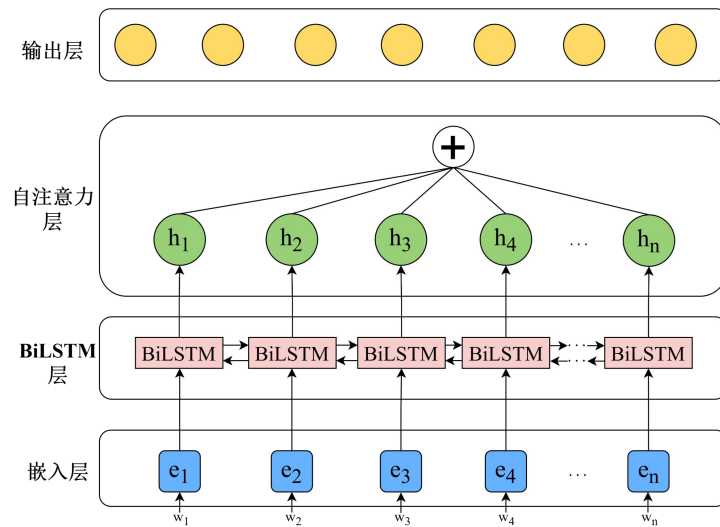


图 17 BERT-BiLSTM-CRF 模型结构

将 BERT、BiLSTM 与 CRF 层组合成统一架构后，形成了针对高炉故障文本领域的端到端知识抽取模型。该模型利用 BERT 获得深层语义表示，再由 BiLSTM 对序列信息进行细粒度建模，最后通过 CRF 层实现全局最优的序列标注。与传统方法相比，该混合模型在处理领域专有名词、长句及复杂语义关系上具有明显优势，能够更准确地识别与相关的实体以及关系。

### (3) 基于 BERT-BiLSTM-CRF 模型知识图谱的构建

#### 1) 数据收集及预处理

确保知识图谱质量的关键在于选择高质量的数据。为了保证高炉故障知识图谱数据的真实性和可靠性，本项目基于本信公司在钢铁工业的信息技术积累为依据，构建高炉故障知识图

谱的数据来源。部分数据样例如图 18 所示。

根据锅炉多次灭火的情况来看，锅炉灭火前炉内燃烧都不稳定，灭火时负荷都很高，灭火的发生来得很快，分析原因如下：锅炉炉膛内结渣严重时，不断发生掉渣，当大块焦洒掉和人捞渣船的水池中时，不但溅起大量的水花，同时产生大量的水蒸气，引起炉内负压波动，当波动超过保护定值时，保护误动作造成锅炉灭火。大泥块的不间断掉落对捞渣机的伤害较大，造成捞渣机不能持久稳定运行。当捞渣机发生故障停运时，锅炉渣斗的渣门关闭不严，又无水封，漏风严重，大量冷风从炉底进入负压的炉膛，致使火焰中心抬高与偏斜，甚至破坏炉内的动力场，使炉内燃烧性能恶化，两侧温差变大，均匀性变坏，容易发生结渣，掉渣量增多增大，对捞渣机的伤害更加严重，形成恶性循环。与此同时，灼热的大泥块掉入捞渣船的水池中，骤然产生大量的水蒸气，引起炉膛负压大幅度波动，破坏炉内燃烧稳定。煤质挥发分低着火困难，而且变化大，根据燃煤工业分析，挥发分变化范围为 7%—19%，这种变化容易使炉膛燃烧稳定性发生变化。由于受习惯操作方式方法的影响，对新型燃烧器特性掌握不够，对其运行操作还不能适应，风粉比例配合不够恰当，以致对锅炉燃烧造成不利影响。下一次风的稳燃型直接点火燃烧器的喷口刚性不足，使用一段时间后发生变形，使稳定回流区发生变化，造成空气动力场不合理，燃烧稳定性下降。水冷壁的泄漏也会造成炉内负压波动而灭火。

捞渣机对锅炉稳定燃烧十分重要，可起到保证设备状态完好的作用，同时建议在捞渣机的上部适量加装防冲破酒梁，可增加捞渣池的刚性，保护捞渣机刮板，同时起到破渣的作用。也可以选择更好的捞渣机更新。加强煤场管理，对不同煤种要分堆存放，锅炉煤斗进煤时尽力做好混煤工作，拟出混煤措施，严格执行。根据冷态试验结果，在低负荷运行时采用正室配风为宜，当高负荷时采用均匀布风。下两层一次风由直流式燃烧器改为稳燃型燃烧器后，阻力有所增加，根据冷态试验结果，由于改造的下两层一次风气流刚性弱于未改造

图 18 部分数据样例

采用 OCR 识别处理，得到故障维修案例 346 条。对于相关文献采用 Python 爬虫技术以“高炉故障”为关键词从知网上检索相关文献，得到所有相关文章的 DIO 号，然后根据 DIO 号爬取相应的文章全文，共收集获取文章 206 篇。互联网网页数据通过写脚本代码的方式进行收集，将收集到的所有数据以 txt 格式进行存储。利用脚本对文章进行预处理操作，剔除这些冗余信息（文章出版时间、作者信息、空格和逗号等），最终得到 3994 条高炉系统故障领域的高质量文本。数据，方便后续的使用，获取的部分数据样例如图 20 所示。

## 2) 知识抽取

对处理后的文本进行知识抽取主要包括三个核心任务：本体构建、实体关系抽取以及知识融合。这些任务的目标在于构建一个能够反映高炉系统故障领域复杂网络结构的知识图谱。

下面将详细阐述知识抽取过程的具体方法与实施步骤。

### A. 本体构建

在知识图谱的构建过程中，本体层是至关重要的组成部分。它不仅提供了知识的结构化表达形式，而且保证了数据与查询之间的语义一致性。通过本体，可以对特定领域的实体及其相互关系进行形式化描述，从而有效表达复杂的领域知识。在高炉故障领域的知识图谱中，本体层的构建不仅帮助明确各种故障类型、现象、原因和防范措施，还规定了这些元素之间应如何相互作用和连接。当前，领域本体的手工构建方法主要包括 TOVE 法、骨架法、IDEF-5 法、METHONTOLOGY 法、SENSUS 法、KACTUS 工程法和七步法[9]。其中，七步法由斯坦福大学医学院提出，是应用最广泛的方法，主要用于领域本体的开发。因此，本节将对传统的七步法进行深入分析，构建高炉系统故障领域本体。具体本体构建流程图如图 19 所示。

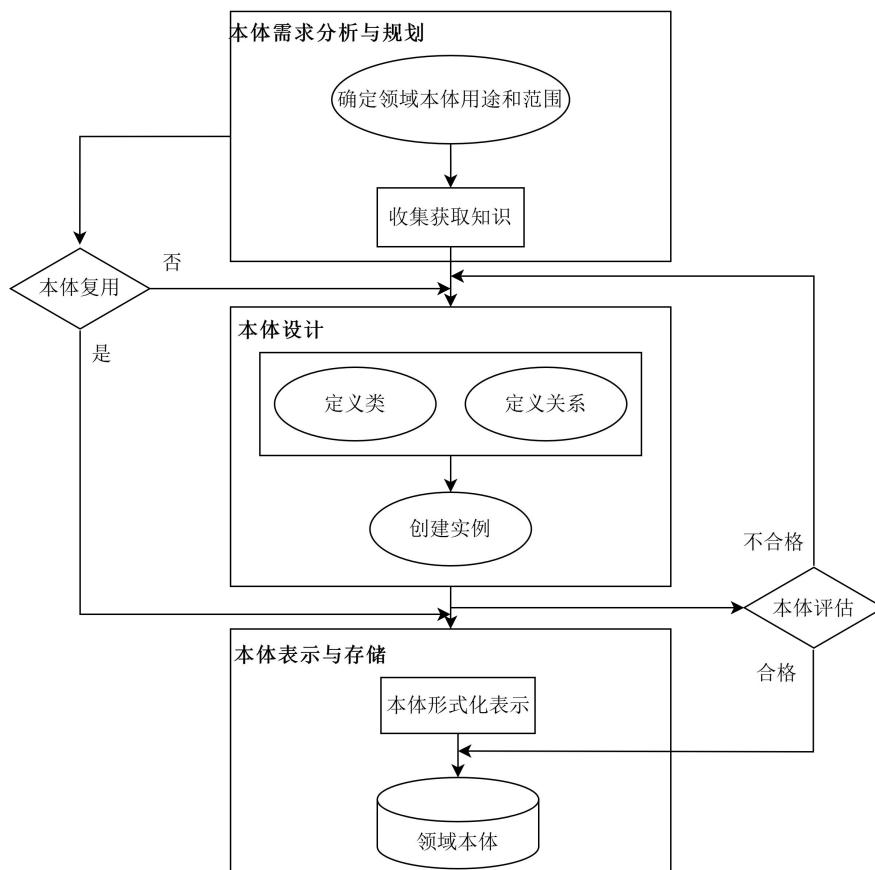


图 19 本体构建流程图

本应用场景构建的本体包含四个类：故障类型、故障原因、故障现象和防范措施。在高炉工作过程故障本体的设计中，除了简单地记录故障及其相应的原因外，还包括其他附加信息。这些信息可以为根本原因分析提供额外的知识，从而实现更准确的故障原因分析。此外，本体模型在提供故障原因的同时，还提供相应防范措施和故障现象，目的是协助安全管理人员及时处理故障。如图 20 所示显示了高炉故障本体的总体结构，它总共包括 4 个类和 5 个关系。本节选用 Protégé 作为构建本

体的工具，并采用支持 Protégé-Frames 进行本体建模。在高炉故障知识本体的构建过程中，使用 Protégé 工具进行编辑和构建，在完成本体编辑后，可直接利用该软件提供的存储功能，方便本体的管理与组织。

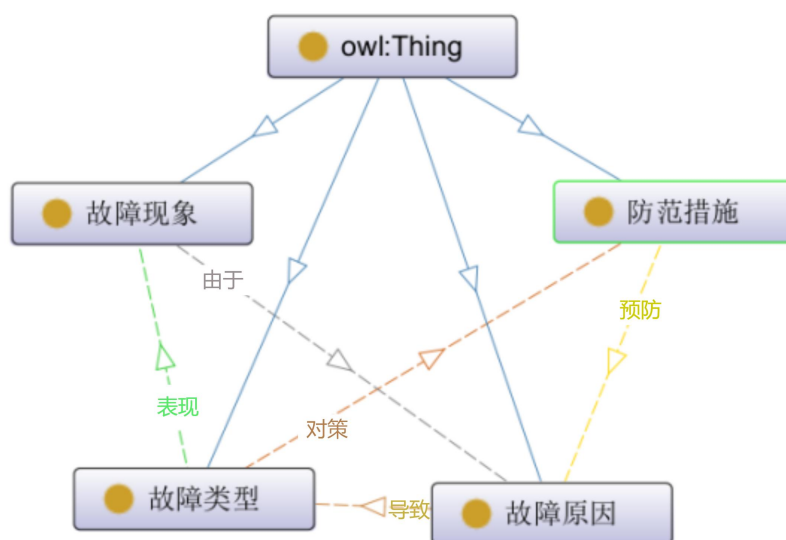


图 20 本体模型可视化

## B. 实体和关系抽取

在构建好高炉领域本体后需定义高炉领域实体概念。在领域专家的指导和审核下，人工梳理创建高炉领域实体类型，通过从文献中抽取实体以完善类型。采用 BIO 标注法对实体进行标记，其中，B 表示实体的起始位置，I 表示实体的内部位置，O 则用于标识非实体部分。如图 21 所示为高炉系统故障语料实体标注的一个示例。以“给煤机”这一实体为例，其被

归类为故障类型（failure type, FT）实体，因此该实体首字符“给”的标注结果为“B-FT”标签。

为训练和评估模型性能，需将已标注数据按 6 : 1 : 1 的比例划分为训练集、验证集和测试集。在此过程中，持续调整模型参数以优化其性能。通过在训练集上进行参数训练，获取最优模型参数，最终完成知识抽取任务。

原始文本	给	煤	机	故	障	的	故	障	原	因	是	由	于	入	炉	煤	水	分	较	大	
标签	B FT	I FT	I FT	O	O	O	B FI	I FI	I FI	I FI	O	O	O	B FC	I FC	I FC	I FC	I FC	I FC	I FC	I FC

图 21 高炉系统故障语料实体标注

BERT-BiLSTM-CRF 模型抽取相关实体和关系，其中实体类型包括故障类型、故障原因、故障现象、防范措施，关系包含“表现”、“由于”、“导致”、“对策”、“预防”等与高炉故障相关分析的动词。基于上述方法获取的实体类型，指导构建了高炉系统故障领域知识图谱。部分高炉故障领域实体类型与关系类型如表 3-2 所示。

表 3-2 实体类型表

实体类型	样例
故障类型	送风机故障、过热器故障、 引风机故障、磨煤机故障
故障原因	渣门关闭不严、煤质差、频

故障现象	繁吹灰、排管间距窄 叶片损坏、喘振、漏粉、皮 带裂开
防范措施	定期吹灰、加装防磨瓦、提 高煤炭质量、增焊加强块

表 3-3 关系类型表

关系类型	样例
表现	给煤机表现出跳闸故障现象
由于	跳闸故障现象是由于 B2 给 煤机皮带跑偏
导致	弯管焊口出泄露是导致省煤 器故障的原因
对策	给煤机跳闸故障的对策是检 查皮带松紧运行情况
预防	降低入炉煤水分可以预防给 煤机跳闸

最终，基于 BERT-BiLSTM-CRF 模型，成功抽取出 1267 个相关实体及 1249 条关系，构建了一个规模庞大的知识网络。这些实体代表了高炉系统的各种故障类型、故障现象、故障原因和防范措施等，这些抽取出的实体之间存在多种关联，揭示了它们之间的相互作用，例如：故障现象与故障类型的联系。高炉系统故障知识图谱的构建不仅为系统提供了全面而详细



行推理和分析。知识融合方法的核心思想在于综合利用余弦距离  $D_{\cos}$  与 Jaccard 相关系数 ( $D_{Jaccard}$ ) 来衡量高炉故障实体间的相似性。该方法依据预先设定的阈值,对候选匹配实体进行判定,从而实现了知识的有效整合。

采用余弦距离这一指标来衡量文本语义间的关联性。具体而言,首先将实体转换为向量形式,然后通过比较这些向量之间的夹角来评估实体间的相似程度:夹角越小,表明实体间的相似性越高。相关公式如式(3.4)所示。

$$D_{\cos}(s_1, s_2) = \frac{|A(s_1) \cap A(s_2)|}{\sqrt{|A(s_1)| |A(s_2)|}} \quad (3.4)$$

另外,采用 Jaccard 相关系数作为衡量各实体相似性的重要指标,从而对实体之间的相似程度进行量化,具体计算方式如式(3.5)所示。

$$D_{Jaccard}(s_1, s_2) = \frac{|A(s_1) \cap A(s_2)|}{|A(s_1) \cup A(s_2)|} \quad (3.5)$$

式中,  $s_1$  和  $s_2$  分别表示高炉系统中的两个故障实体,而  $A(s)$  则代表实体  $s$  对应的属性字符串。当该数值增加时,表明两实体之间的语义相似性也随之提升。基于经验设定阈值,认为当余弦距离小于 0.8 或 Jaccard 相关系数大于 0.6 时,两个实体有较大可能是匹配的。最终得到高炉故障领域实体 1067 个,关

系 1249 条。

### 3) 知识存储

选用 Neo4j 图数据库作为存储知识图谱的平台。该平台是一款高效的图形数据库管理系统,专门针对海量且复杂的关系网络的存储与处理进行了优化。本节还将 Neo4j 与其他图数据库系统,如 JanusGraph、ArangoDB、Amazon Neptune 以及 Azure Cosmos DB 进行比较。相较于 Neo4j,这些系统可能存在的不足已在表 3-4 中进行了详细汇总。

表 3-4 其他数据库相比 Neo4j 缺点表

图数据库	缺点
JanusGraph	查询语言 Gremlin 相对复杂,社区和生态系统虽不如 Neo4j 成熟和广泛
ArangoDB	查询语言 AQL 在图查询上不如 Cypher 直观,图数据处理和查询优化方面相对较差
AmazonNeptune	作为托管服务,导致更高的成本和较低的灵活性
AzureCosmosDB	在全球分布式和多模型数据管理方面表现出色,在图数据查询和分析能力上相对较差

通过系统化的知识处理流程,实现了高炉系统故障领域结



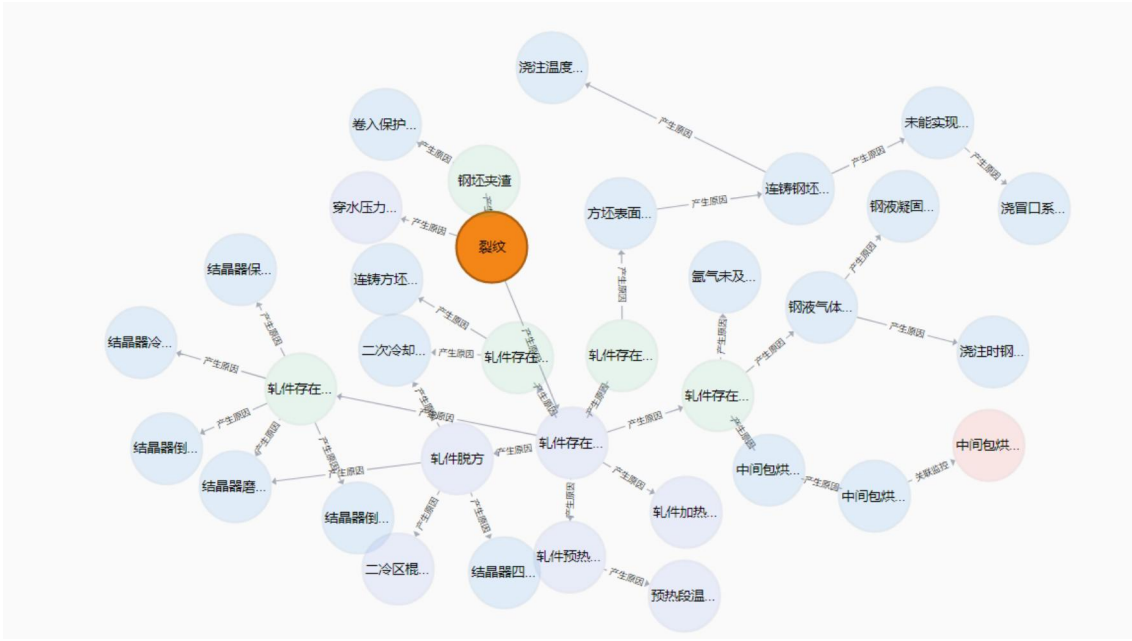


图 24 裂纹的知识图谱展示效果

如图 24 所示是高炉系统故障知识图谱存储在 Neo4j 图数据库中的效果图，展示了完整的高炉系统故障知识图谱。包含了 45 种故障类型的实体 1067 个，关系 1249 条。其中不同的颜色代表的不同的实体类型，边则显示了对应实体之间的关系。连接了省煤器、水冷壁、送风机、引风机、一次风机、磨煤机、给煤机、一次风管等实体。通过该知识图谱能够让安全管理人员直观地了解与高炉设备故障相关的内容，在无需耗费大量时间与精力的情况下，也便于研究人员能够快速了解掌握高炉系统故障的相关内容，保障高炉安全运行，提升工业生产力。

### 3.2.3.2 系统部署与示范运行

在 1-2 家合作钢铁企业的选定产线（如炼钢、热轧）进行

系统部署。

**边缘-云协同部署：**将轻量化模型部署在产线边缘服务器，处理实时性要求高的任务（如实时工况判断）；平台核心系统部署在工厂私有云，负责复杂分析、模型管理和知识更新。这种架构兼顾了低延迟和强算力的需求。

**连续示范运行与优化：**开展不少于 6 个月的示范运行。期间，持续收集系统运行数据、用户操作反馈和模型预测结果。建立在线学习机制，对模型进行持续微调，使其适应生产条件的动态变化。同时，严密监控系统的技术指标，如模型准确率、响应时间、系统可用性等。目前在智能转炉的应用效果如图 25 和图 26 所示；质量溯源应用场景如图 27 所示。



图 25 高炉故障诊断工业大模型系统

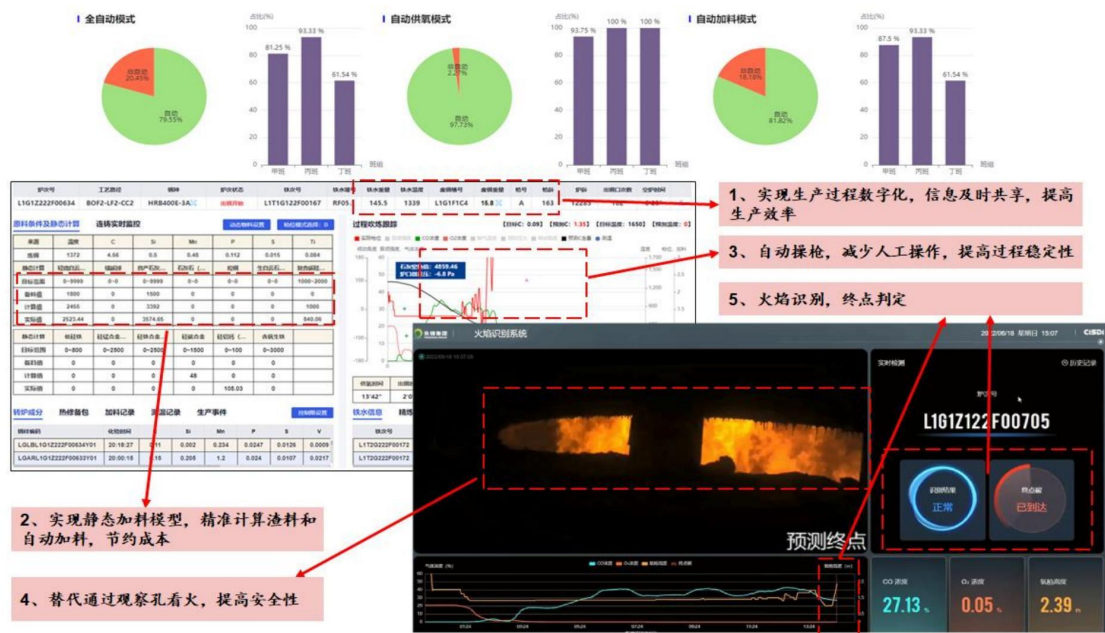


图 26 智能转炉控制模型应用效果



图 27 基于知识图谱的产品质量溯源模型

### 3.2.3.3 量化评估与投资回报分析

建立涵盖技术、经济两方面的量化评估体系，包括但不限于模型在测试集上的准确率、召回率、F1-score，系统平均响应时间，以及系统可用性（可达 99.9%以上）。

通过对比系统应用前后的数据,量化质量合格率提升百分比(如带钢一级品率提升)、工序能耗降低值(如吨钢能耗下降)、运维成本节约额(如减少非计划停机时间)以及专家工作效率提升(如减少人工分析报告时长)。最终,通过投资回收期、净现值等财务指标,形成《技术经济性分析报告》。

### **3.2.3.4 商业化模式与推广方案设计**

总结示范经验,设计可行的商业化模式,探讨项目制解决方案销售、SaaS 化服务订阅、技术许可等多种模式。制定从单点示范→产线推广→集团级应用→跨行业复制的清晰路径。针对钢铁行业内部,可优先在工艺相似、问题共性的产线进行快速复制。

## **3.2.4 有色冶金工业典型场景的知识增强多模态大模型系统集成与应用技术路线**

### **3.2.4.1 高价值场景遴选与工业软件智能体开发**

本任务由沈阳铝镁院牵头,沈阳工业大学参与,技术路线与研究内容3类似但聚焦于有色冶金行业的独特需求。重点聚焦氧化铝原料制备工艺优化和电解铝工艺人机协同交互。

**原料制备工艺优化智能体:**氧化铝生产原料复杂,工艺条件苛刻。该智能体将融合物料配比知识、溶出反应机理模型和

历史最优案例，构建质量、能耗、成本多目标优化模型。操作人员可通过自然语言询问“当前铝土矿品位下，如何调整配碱量以达到最佳溶出率？”，智能体通过检索知识图谱和运行优化算法，给出具体的操作参数建议区间。

**电解工艺人机协同交互智能体：**电解铝车间环境恶劣，传统人工巡检强度大、风险高。该智能体将整合计算机视觉（识别阳极效应、铝液镜面波动）、音频分析（监听槽底异常噪声）和时序数据分析（预测槽电压稳定性）。通过 AR 眼镜或移动终端，为现场工程师提供“增强现实”般的交互体验，如自动识别设备并叠加显示其实时运行状态、历史维修记录，并对潜在风险进行语音预警。

沈阳铝镁设计研究院有限公司将负责对氧化铝和电解铝生产流程的数据进行系统性梳理。

### **（1）氧化铝生产（以拜耳法为核心）**

**文本类数据：**铝土矿配料方案、溶出工艺卡、沉降槽操作手册、种子分解作业指导书。

**图像/视频类数据：**

- **焙烧度图像：**对氧化铝成品进行取样，在显微镜下观察其晶型和焙烧程度，图像可用于评估产品质量。

- 沉降槽泥层界面：通过视频监控或雷达扫描，监测沉降槽内泥层（赤泥）与清液层的界面高度，是控制底流排放的关键。

#### 时序数据类：

- 溶出过程数据：溶出釜的温度  $T(t)$ 、压力  $P(t)$  序列，碱液浓度  $C_{\text{NaOH}}(t)$ ，以及各釜的进出料流量。
- 蒸发器组数据：各效蒸发器的温度、压力、液位、出料密度等参数序列，构成了一个复杂的多输入多输出系统。

#### (2) 电解铝生产（以预焙阳极电解槽为核心）

电解槽是铝冶炼的“细胞”，其数据直接关系到电耗和效率。

**文本类数据：**电解槽焙烧启动方案、正常期工艺技术标准、阳极更换周期规定。

#### 图像/视频类数据：

- 铝液镜面状态监控：通过槽上摄像头观察铝液镜面的波动情况、阳极气泡的析出行为，辅助判断极距是否正常、是否存在阳极病变。
- 阳极组装视觉：对阳极导杆与钢爪的磷铁浇铸质量进

行图像检测，防止因接触不良导致电压升高。

### 时序数据类：

- 槽电压与效应波形：单个电解槽的槽电压  $V_{\text{cell}}(t)$  是核心参数。其波形中蕴含了丰富的信息：正常的噪声电压、异常的阳极效应（AEs）尖峰。对电压序列进行特征提取（如均值、方差、频谱特征）是槽况识别的基础。
- 系列电流：整个电解系列的直流电流  $I_{\text{series}}(t)$ ，是所有电解槽运行的共同输入。
- 槽壳温度场：通过安装在槽壳上的多个热电偶，形成温度场时序数据  $T(x, y, z, t)$ ，用于监测内衬状况和热平衡。

#### 3.2.4.2 系统部署与示范运行

在 1-2 家合作有色冶金企业的氧化铝或电解铝产线部署系统。部署策略同样采用边缘-云协同架构，确保在强电磁干扰、高温等恶劣工业环境下的系统稳定性与可靠性。示范运行期间，重点关注系统在多目标优化和极端工况适应性方面的表现，并持续迭代优化。

现场部署系统分为工业现场端和虚拟实验端。工业现场端

在进行应用测试的同时，还通过内部局域网将现场的工业数据传输到实验端，用真实的生产数据驱动虚拟氧化铝生产线，使得虚拟实验端能够更加真实的模拟实际的氧化铝生产过程。

虚拟实验端以三维动态模拟的铝冶炼智能工厂为虚拟对象，以铝冶炼智能工厂数据统一集成平台为数据载体，并同时开发工艺模型系统、信息模型系统、控制与优化系统以及可视化监控系统等，形成氧化铝工业大模型系统，方案逻辑架构图如图 28 所示，具体包括：

### **(1) 数据中心**

为了能够让虚拟实验端与工业现场端连接起来，在不影响工厂正常生产的情况下让庞大的实际工业生产数据在实验端进行存储，并且管理开发的各个系统间数据传输权限、数据通信。项目组开发了氧化铝工业大模型系统的数据中心。

### **(2) 工艺模型系统**

为了手机氧化铝智能工厂的工艺模型设计规则、工艺流程模拟模型和工艺三维模型内容。项目组开发的工艺模型系统中搭建的工艺模拟模型具有工艺流程仿真功能，主要包括氧化铝生产运行过程的仿真运算、虚拟测试等，氧化铝工艺三维模型是对工厂设备以及物料转移的可视化展现。

### **(3) 铝冶炼 3D 智能工厂仿真系统**

真实氧化铝生产现场，存在着工艺复杂、生产线长、生产条件要求苛刻、重型设备多且杂等诸多问题，想要在实验室复现一条氧化铝生产线难度非常大。为此项目组根据多年氧化铝生产现场工作经验，开发了氧化铝 3D 智能工厂虚拟对象。在逼真的复现实际氧化铝生产的基础上，为平台其他系统的开发架设提供了底层虚拟生产对象。

项目组开发的氧化铝 3D 智能工厂仿真系统包括：

- 氧化铝 3D 智能虚拟工厂：主要负责搭建氧化铝生产全流程 3D 仿真的物理模型，将实际氧化铝生产现场逼真的复现在工业大模型系统上，并且通过系统自带可视化功能，更加真实的展现了氧化铝生产过程。
- 氧化铝智能数字孪生平台：主要负责将数据中心中存储的实际工业生产的过程数据导入搭建的氧化铝工厂对应 3D 模型中，用真实生产数据驱动氧化铝 3D 虚拟工厂运行。

### **(4) 控制与优化系统**

为了测试氧化铝全流程智能优化控制信息模型的工程架构，以及项目组根据多年氧化铝现场生产工作经验针对每道工

序给出了相应的检测仪表测点、成套设备、过程控制方案和优化运行方案。

项目组开发的控制与优化系统包括：

- 过程控制系统：针对氧化铝生产的六大工艺，根据每道工序的生产特点，开发了料浆制备过程控制子系统、溶出过程控制子系统、赤泥沉降分解过程控制子系统、种子分解过程控制子系统、母液蒸发过程控制子系统、焙烧过程控制子系统。每个子系统主要负责本工序下的检测仪表测点、成套设备、单回路控制以及部分过程控制方案。
- 运行优化系统：项目组根据多年氧化铝生产现场工作经验，结合本项目合作企业的特点，从实际出发。针对料浆制备工序、溶出工序、种子分解工序、母液蒸发工序开发了料浆制备运行优化控制子系统、溶出运行优化控制子系统、种子分解运行优化子系统以及母液蒸发运行优化子系统。

#### （5）知识增强系统

归纳氧化铝智能工厂生产过程信息建模的方法、原则、框架和信息模型的描述规则。

项目组开发了知识增强系统，包括：

- 知识增强编辑器：主要负责对氧化铝智能工厂的信息模型进行构建和编辑。
- 知识增强加载器：依据氧化铝智能工厂信息模型，形成 OPC UA 服务器唯一地址空间，使得现场庞大的数据信息可以和 3D 虚拟工厂对象能够通过该地址进行数据配对，实现现场数据真实精准的驱动 3D 虚拟工厂模型。

#### **(6) 可视化监控系统**

项目组根据系统间的层级关系以及氧化铝生产现场的实际情形，开发了可视化监控系统。目的是为了监控氧化铝智能工厂虚拟生产线中的生产过程数据以及可视化各系统要求展示的操作过程，从数据和人机交互的角度观测信息模型的运行效果。

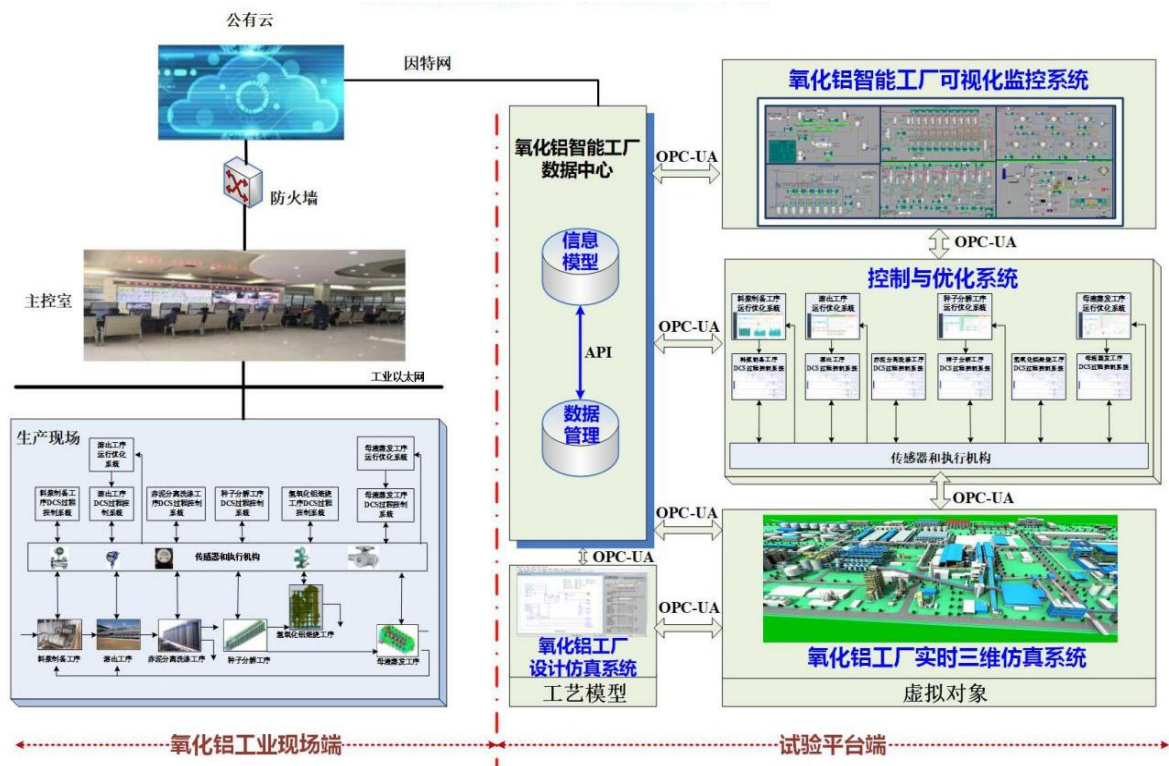


图 28 有色冶金现场系统部署架构图（氧化铝）

其中，工业现场端包含氧化铝生产现场众多重型设备以及控制系统设备。为了能够与实际生产现场连接起来，将现场生产数据传输并且存储在实验端，同时实验端进行的操作又不能影响工业现场，保证工业现场的安全。由于氧化铝生产属于典型的流程行业，独立工控系统不允许遭遇外界入侵攻击。为此，项目在原有的氧化铝生产现场系统架构上搭建了硬件防火墙，保证现场数据在向上传输的同时，向下的任何数据信息和操作信号不得传入工业现场，影响正常生产。

另外，氧化铝实际生产过程中会产生庞大的生产过程数据，并且数据按秒刷新。实验端无法利用现有的硬件设施区存

储如此数据量的数据。为此，项目组搭建了一个云端服务器，对传输上来的工业生产数据进行选择性的存储、丢弃以及传输。这样，云端服务器既能保证拥有足够的存储能力，又能够对数据进行筛选，保证实验端能够以最少、最优质的数据进行3D虚拟工厂的驱动。

在完成对现场生产数据的处理之后，项目组为整体的工业大模型系统搭建了氧化铝智能工厂数据中心，它包含一台数据库服务器、一台 OPC UA 服务器、一台知识增强编辑器工作站以及一台知识增强加载器工作站。

数据服务的目的是用来存储从云端过来的现场生产数据。OPC UA 服务器负责保证各系统间按照 OPC 协议进行数据交互，并且负责管理各个系统间的数据传输权限。

知识增强编辑器工作站主要负责对氧化铝智能工厂信息模型进行编辑和构建，确定实验端的氧化铝智能工厂到底需要哪些现场数据。

知识增强加载器工作站主要负责生成 OPC UA 服务器的地址空间，让各个系统间能够遵循每个信息模型的卫衣地址空间进行数据传输交互。

在完成对数据的定义、存储、交互权限的管理等操作之后，

项目组开始搭建实验端的独立工控系统。但是对工控系统来说，都需要一个被控对象。为此，项目组利用氧化铝孪生系统工作站对氧化铝 3D 智能虚拟工厂进行物理建模。

为了测试项目组开发的氧化铝 3D 虚拟工厂是否符合实际氧化铝生产的工艺流程，项目组利用氧化铝工厂设计仿真系统工作站进行氧化铝工艺流程的测试。

在完成对氧化铝 3D 智能虚拟工厂的开发之后，工业大模型系统独立的工控系统就有了虚拟的被控对象。根据氧化铝生产的六大工艺流程，分别需要六台过程控制工作站，分别是料浆制备过程控制工作站、溶出过程控制工作站、赤泥沉降分解过程控制工作站、种子分解过程控制工作站、母液蒸发过程控制工作站以及焙烧过程控制工作站。每个工序的工作站负责本工序下的检测仪表测点、单回路控制以及过程控制方案。

此外，根据多年氧化铝现场工作经验，发现目前氧化铝企业在进行生产时对运行指标的优化完全由操作员凭借个人经验进行。这样的操作存在在试探性、随机性以及无规则性，会导致全厂或者部分工序的指标无法达到最优结果。为此，项目组在过程控制系统上又搭建了四个运行优化控制工作站，分别是料浆制备运行优化控制工作站、溶出运行优化控制工作站、

种子分解运行优化控制工作站以及母液蒸发运行优化控制工作站。每个运行优化控制工作站根据独立算法，进行工序的运行指标优化，从而达到生产最优。

最后，为了能够展示搭建的各个系统，以及模拟氧化铝生产过程中的人机交互。项目组利用可视化监控系统工作站完成对各系统的数据展示以及人机交互。

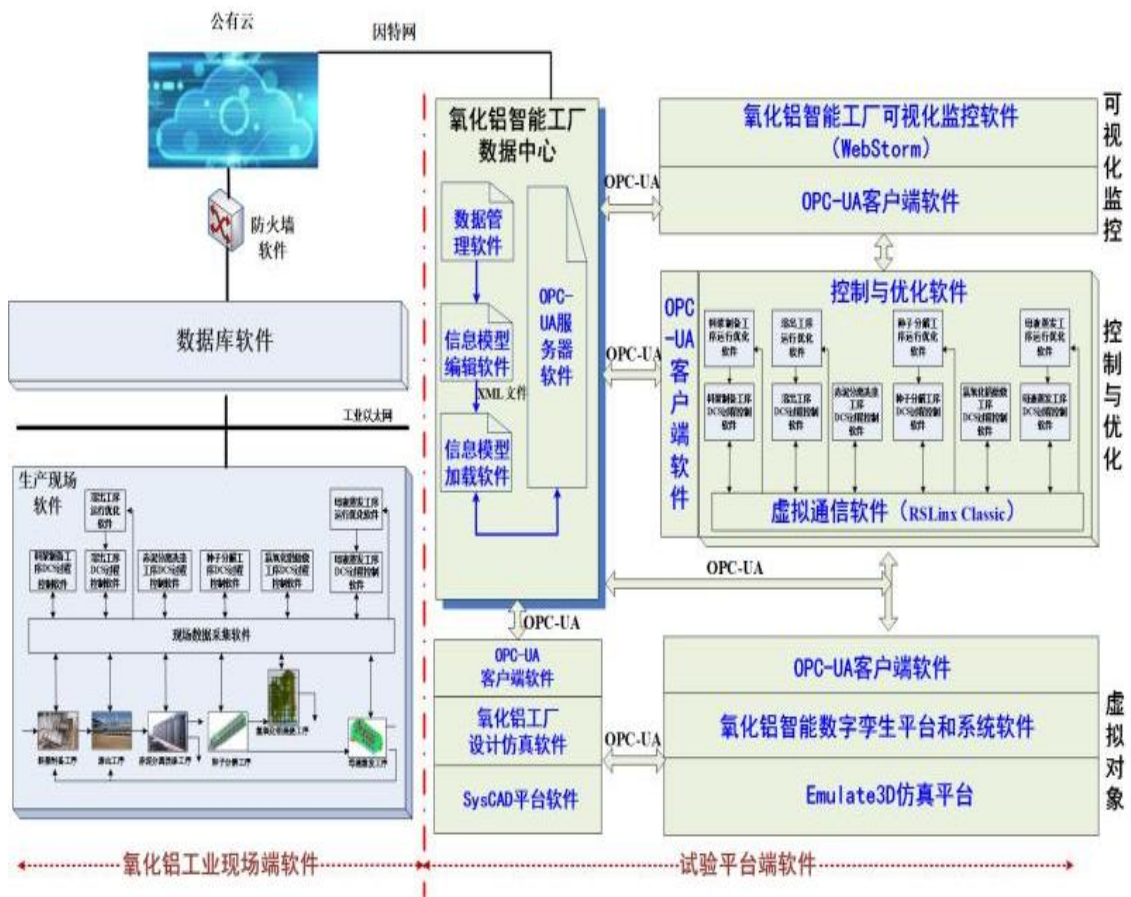


图 29 氧化铝工业大模型系统部署方案集成架构图

氧化铝工业大模型系统的网络拓扑如图 29 所示。

氧化铝工业大模型系统以真实模拟氧化铝生产为主要任

务,搭建平台的主要目标是优化氧化铝生产企业工厂的网络架构,生产流程,过程控制以及生产指标等。为了完成目标,项目组建立了一个分布式控制,高可靠、高开放的控制和管理一体化的工业 DCS 高速网络架构。它主要由设备层,控制层和可视化监控层,三层网络构成,并配备因特网将现场数据的传输到实验端。

### (1) 因特网 (Internet)

为了能够逼真的在实验室模拟真实的氧化铝生产过程,项目组采用现场数据驱动实验端平台的方式。由于氧化铝生产企业一般建设在矿区或者山区,特点就是人烟稀少,位置偏远,所以项目组无法利用内部局域网将现场数据传输过来。为此,项目通过搭建硬件防火墙和云端数据库,在保证现场生产安全的前提下,将现场生产数据通过 Internet 传输至实验端进行模型驱动。

### (2) 三层主体网络(底层)——设备层

最底层为设备层,由于在氧化铝真实生产中,所使用的都是重型设备,一般的储料罐,蒸发器都是 10-20m 高,再加上氧化铝生产工艺复杂,六大工艺流程不可或缺,所以在实验端

无法用真实的设备搭建氧化铝生产线。为此，项目组利用 Emulate 3D 2018 软件进行氧化铝智能工厂的 3D 物理建模，将 3D 工作站的 IP 地址设置为 192.168.1.100，并遵循 OPC UA 协议，跟氧化铝智能工厂数据中心使用内部局域网进行数据传输。

### （3）三层主体网络（中层）——控制与优化层

中间层为高速实时的 Controller Link 网，它把各个工序的控制站连成一体，Controller Link 网既可以与 PLC，也可以与普通计算机联网，从而便于与其他类型的 DCS 系统互连，达到系统开放的目的。Controller Link 支持能共享数据的数据链接和在需要时发送和接收数据的信息服务。数据链接使公共数据能够在网络上的 PLC 和计算机之间共享，当数据段写入本地节点的发送区域时，数据会自动传送到远程节点的接收区域中，由此实现计算机和 PLC 之间的通信。

### （4）三层主体网络（上层）——可视化监控层

上层为 Ethernet 网，可与各个工序的控制工作站以及数据中心相连，并与信息模型系统、工艺模型系统以及氧化铝数字孪生系统连接，展示信息模型工业大模型系统以及模拟氧化铝生产过程中的人机交互。

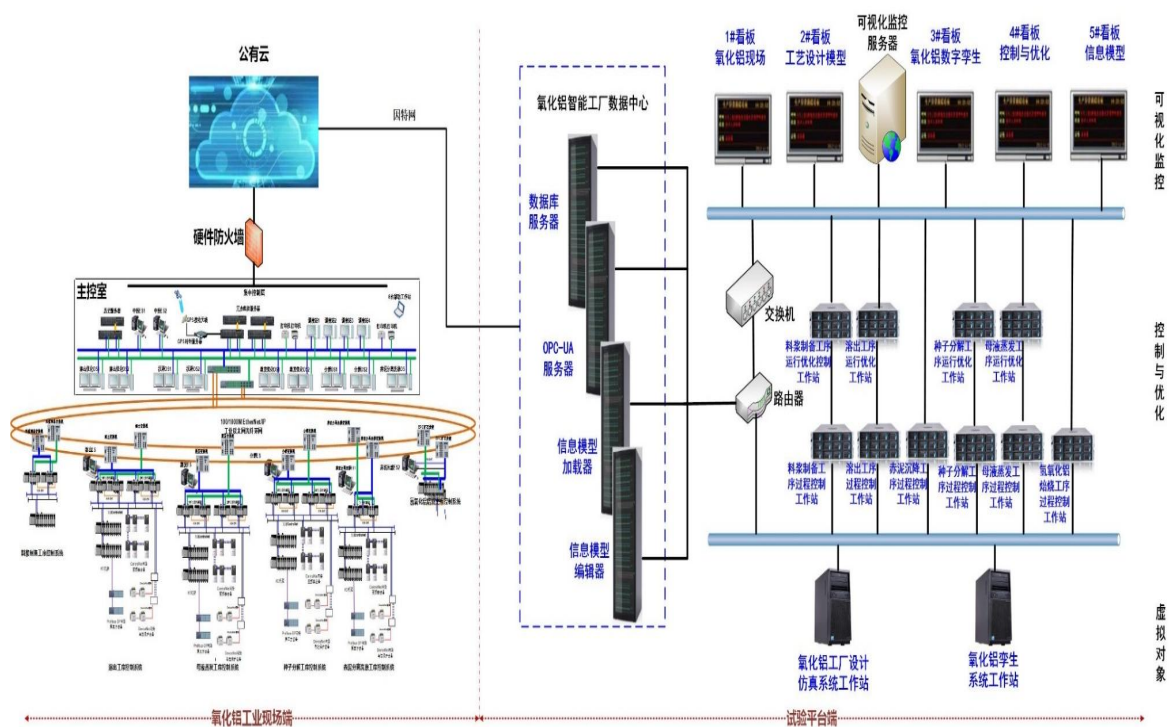


图 30 工业大模型系统测试网络拓扑

业务服务器的功能包括：在实验端真实模拟氧化铝实际生产过程，模拟生产现场操作员进行的单回路控制、比值控制操作、穿行控制操作以及某些工序的优化控制操作，以及实现氧化铝智能工厂的网络架构。项目组部署了氧化铝智能工厂数据中心、工艺模型系统、氧化铝 3D 智能虚拟工厂、氧化铝控制与优化系统以及可视化监控系统的业务服务器，如图 31 和图 32 所示。

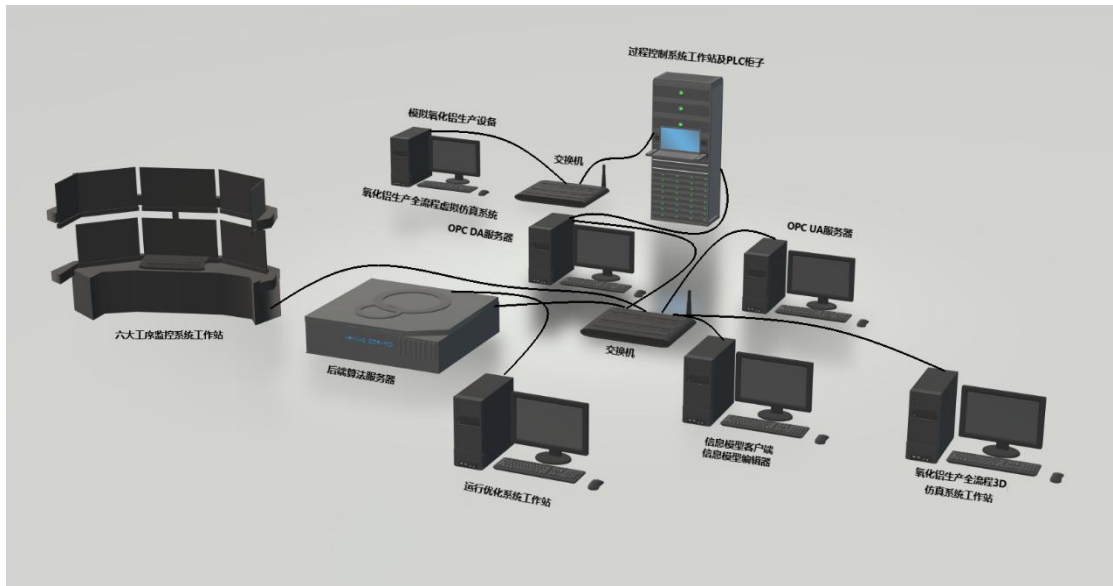


图 31 业务服务器硬件部署

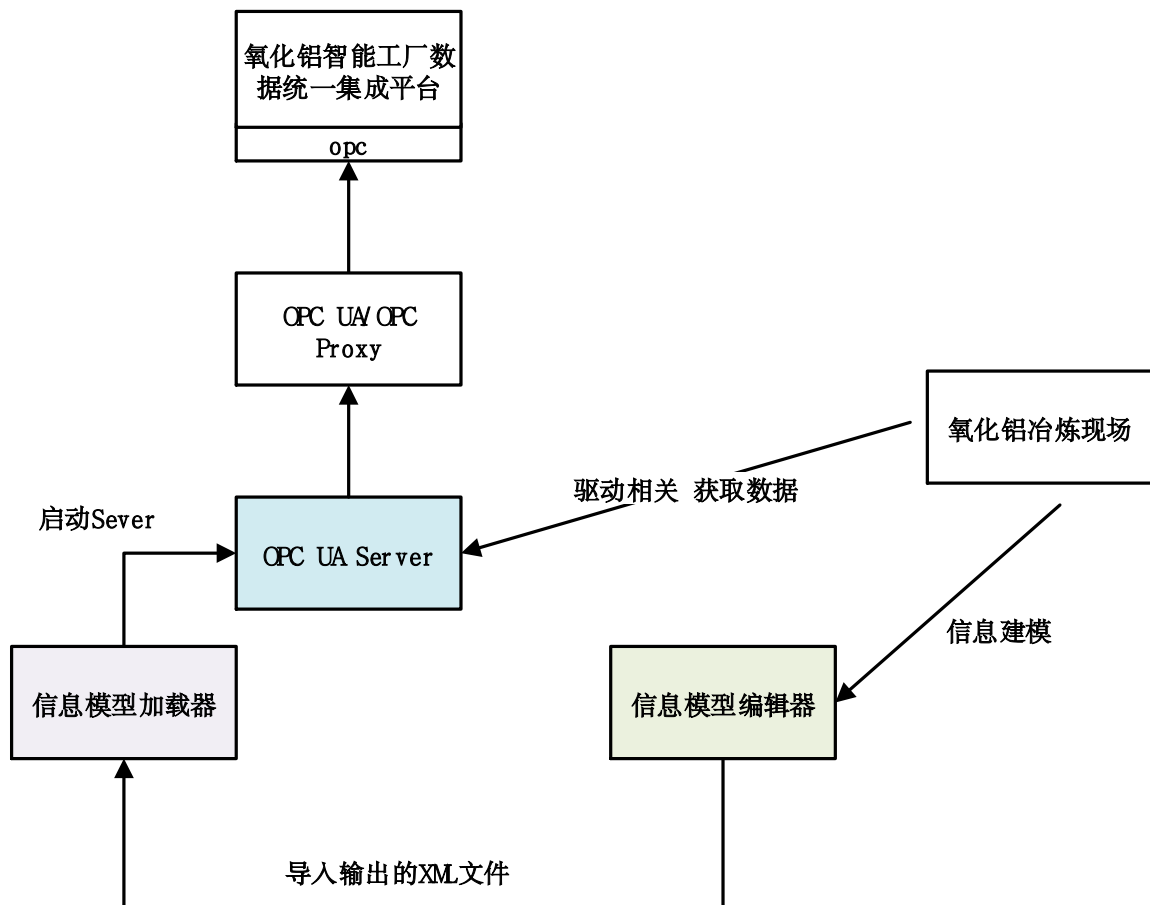


图 32 业务服务器软件部署

### 1) 知识增强编辑器

利用图 33 知识增强编辑器实现对氧化铝知识进行增强和编辑，支持的功能如下：

- 氧化铝智能工厂设备层、控制层和可视化监控层的静态属性集、过程属性集和配置属性集的定义；
- 氧化铝智能工厂六大工序组件及子组件的定义；
- 信息模型方法定义；
- 自动生成导出 XML 文件及显示氧化铝智能工厂信息模型结构。

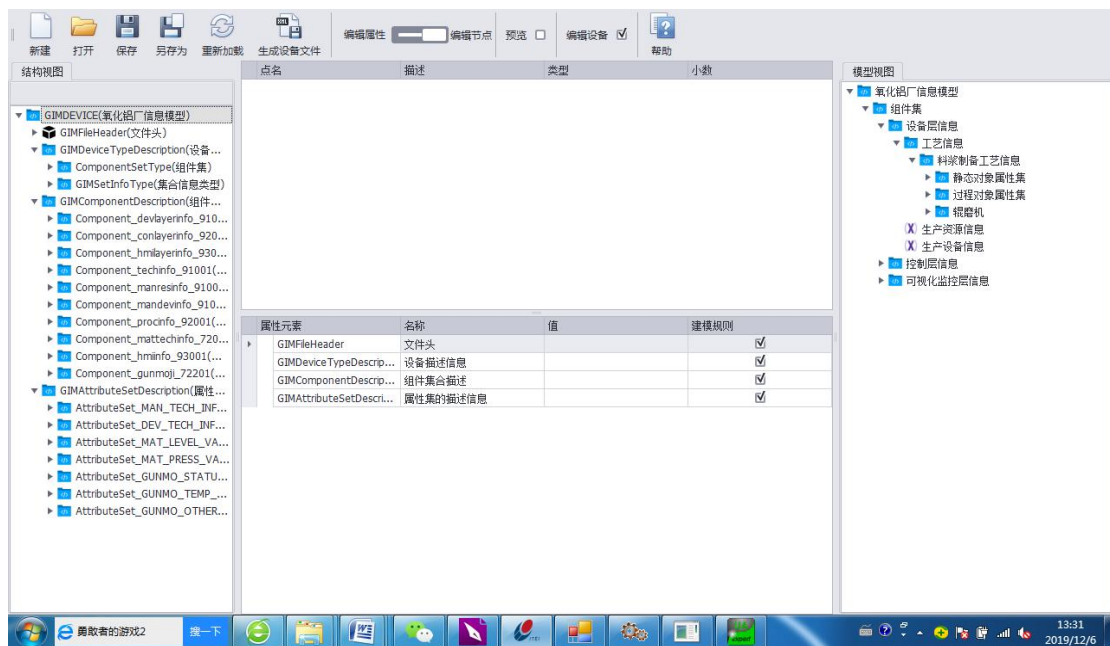


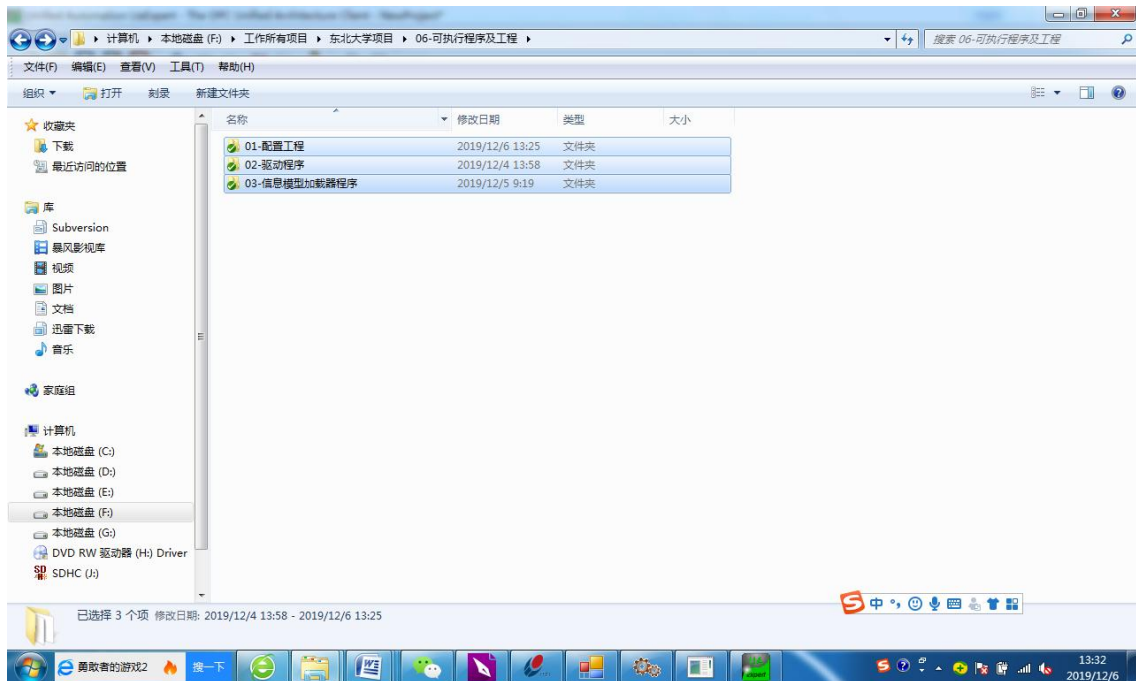
图 33 氧化铝智能工厂知识增强编辑器

### (3) 知识增强加载器

氧化铝知识增强加载器的主要功能如下：

- 导入氧化铝智能工厂信息模型描述 XML 文件；

- 依据氧化铝智能工厂信息模型，自动生成 OPC UA 地址空间；
- 集成了氧化铝智能工厂控制系统的协议驱动，实现符合信息模型标准的 OPC UA 数据服务器，实现的氧化铝智能工厂信息模型结构如图 34 所示。



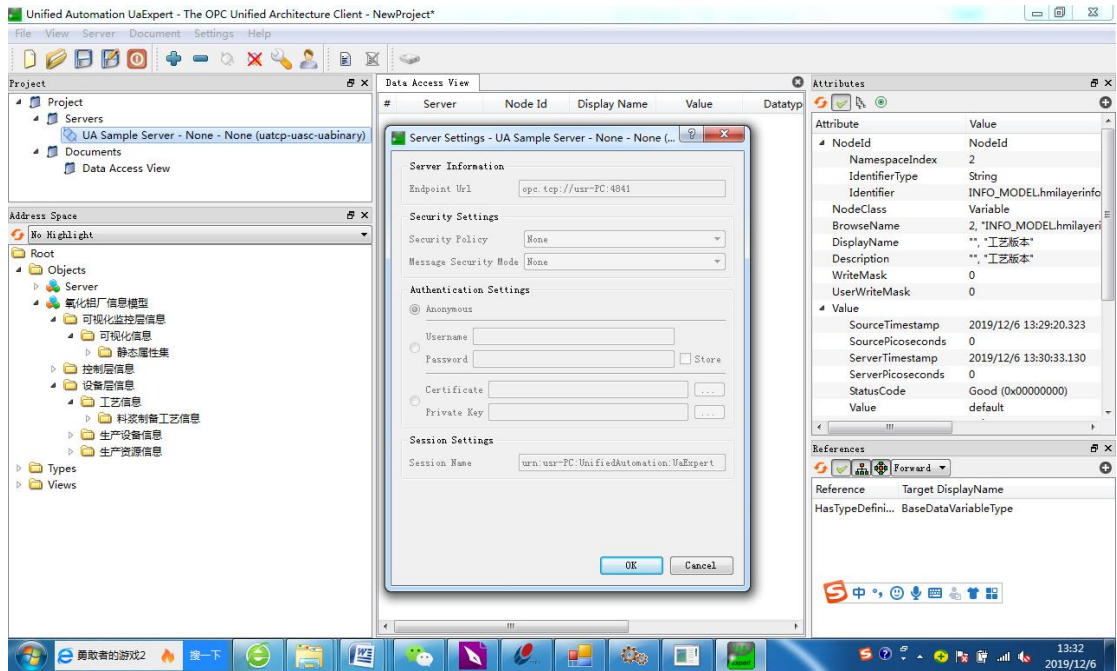


图 34 氧化铝知识增强加载器

项目组自主开发的氧化铝知识统一集成平台，如图 35 所示，支持 OPC 协议，通过 OPC/OPC UA 软网关转换，可以与氧化铝智能工厂信息模型 OPC UA 数据服务器通信和数据统一管理。

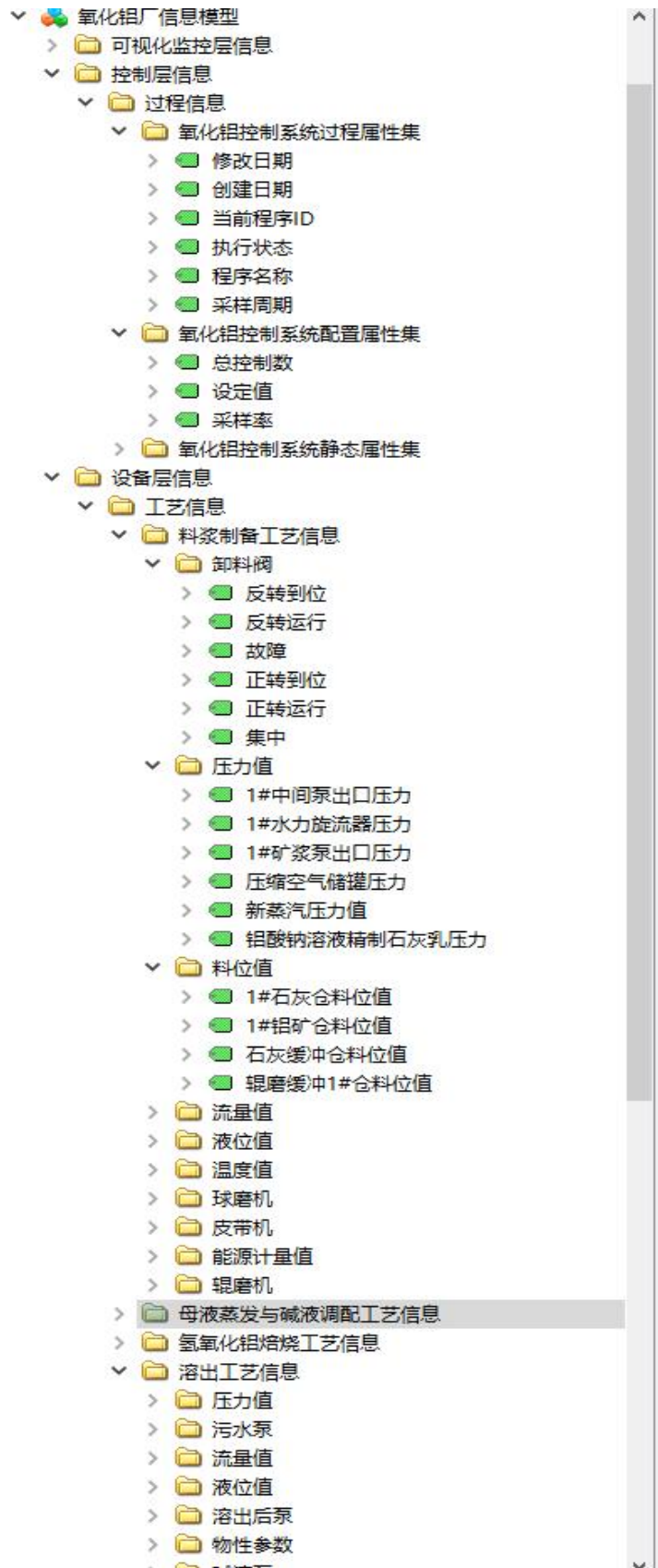


图 35 氧化铝工业大模型系统数据统一集成平台

知识集合如图 36 所示，覆盖氧化铝智能工厂信息模型的所有子模型，并虚拟呈现出氧化铝智能工厂的全过程，如图 37 至图 38。

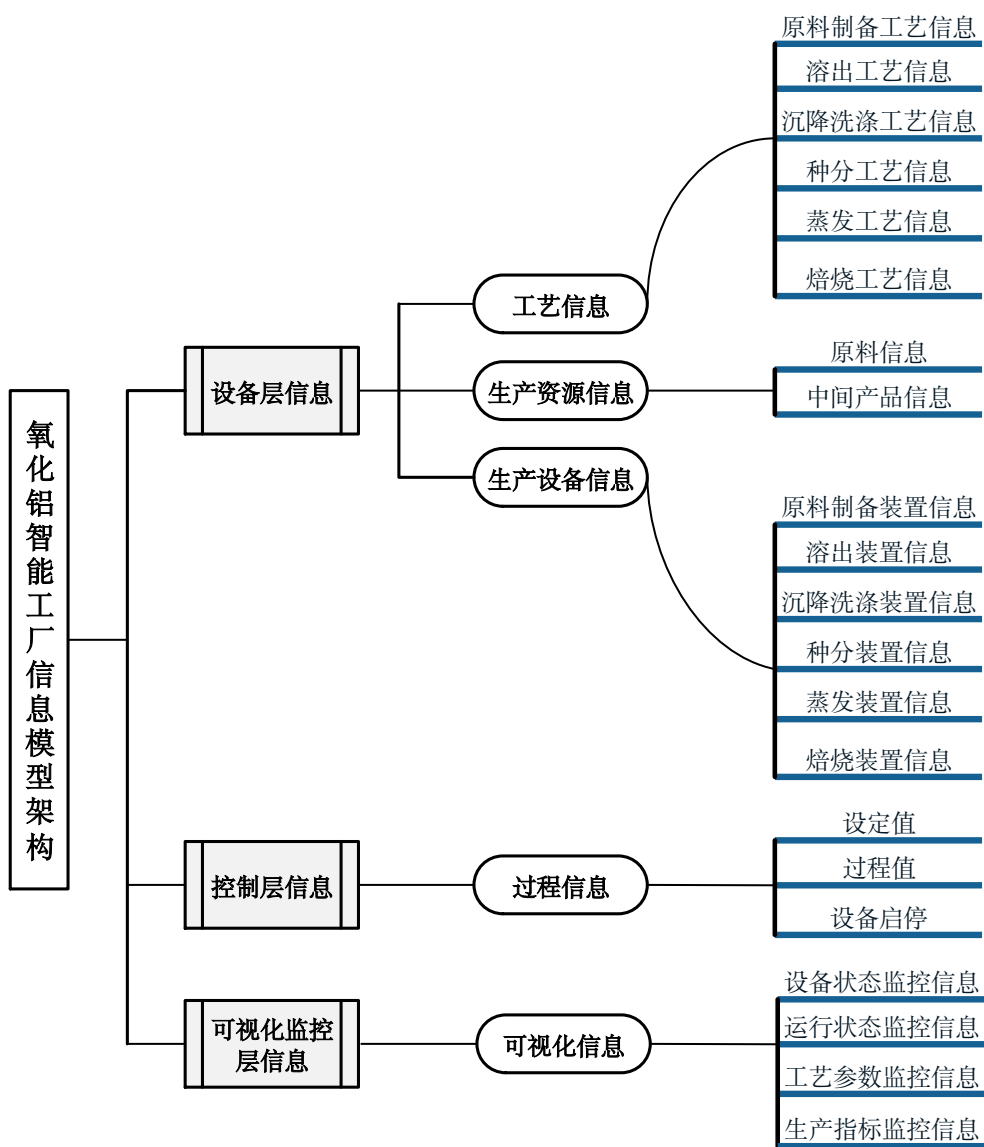


图 36 测试数据集合

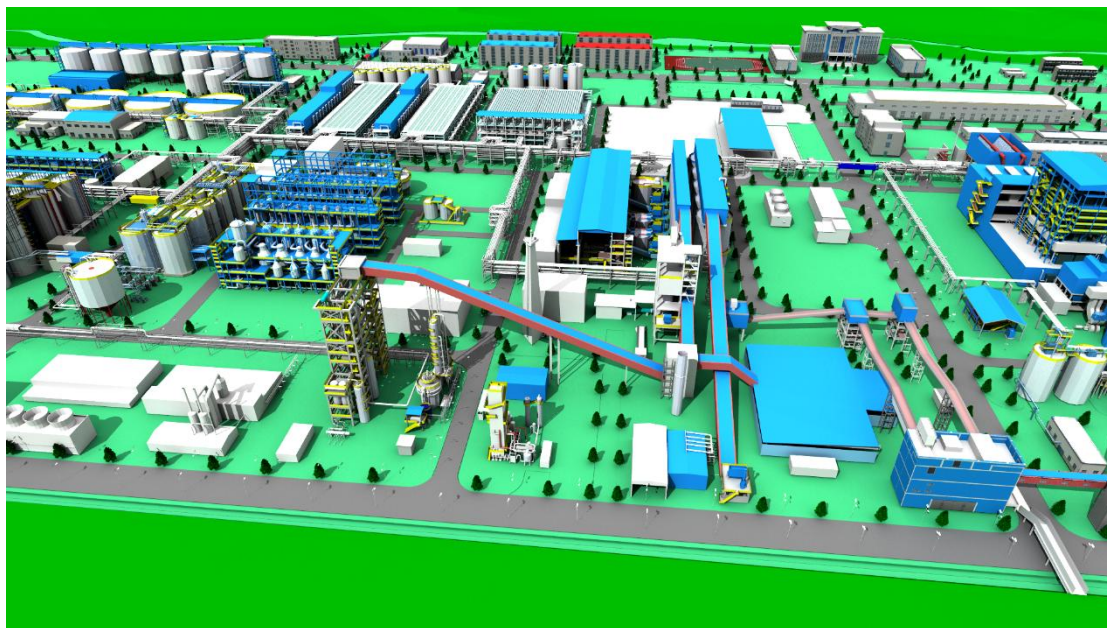


图 37 氧化铝 3D 仿真虚拟工厂



图 38 料浆制备区域 3D 物理模型



图 39 溶出区域 3D 物理模型



图 40 赤泥分离洗涤区域 3D 物理模型

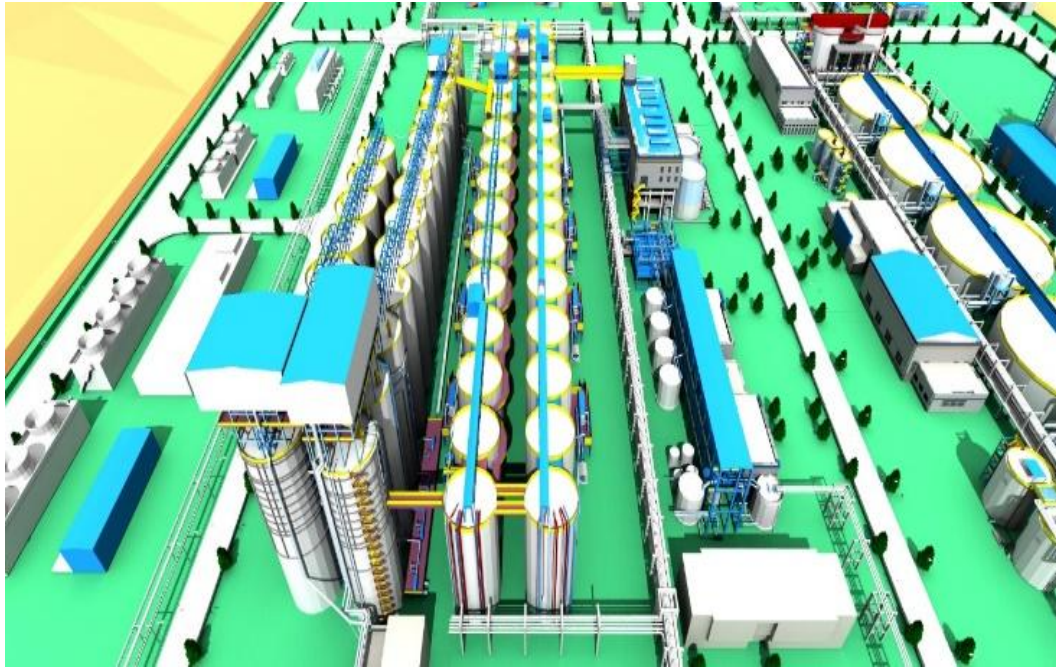


图 41 种子分解区域 3D 物理模型

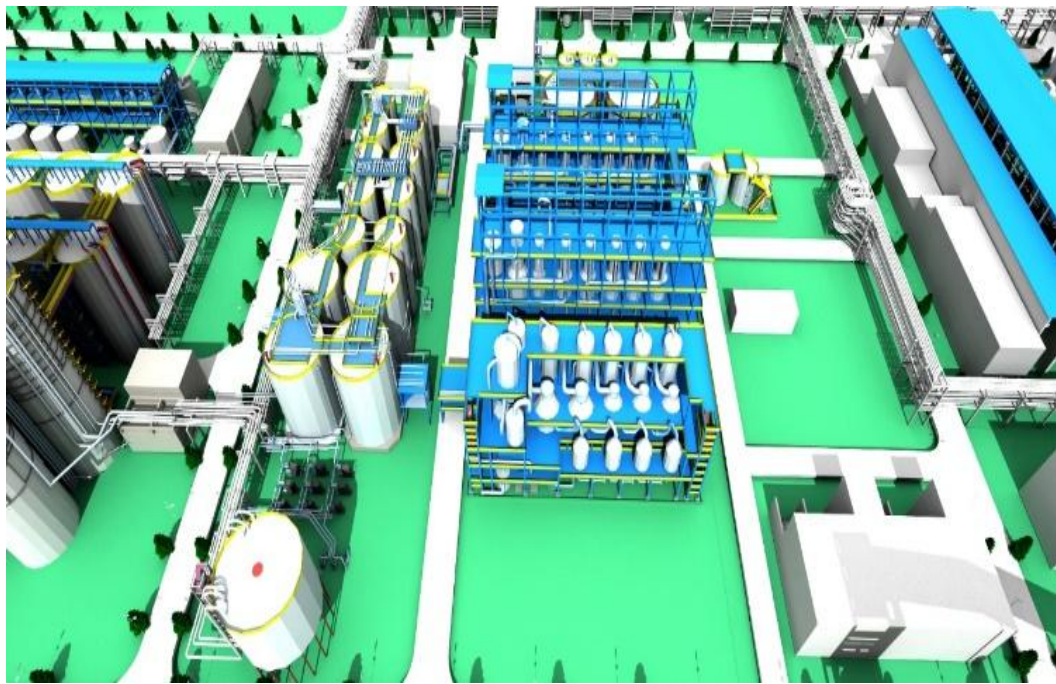


图 42 母液蒸发区域 3D 物理模型

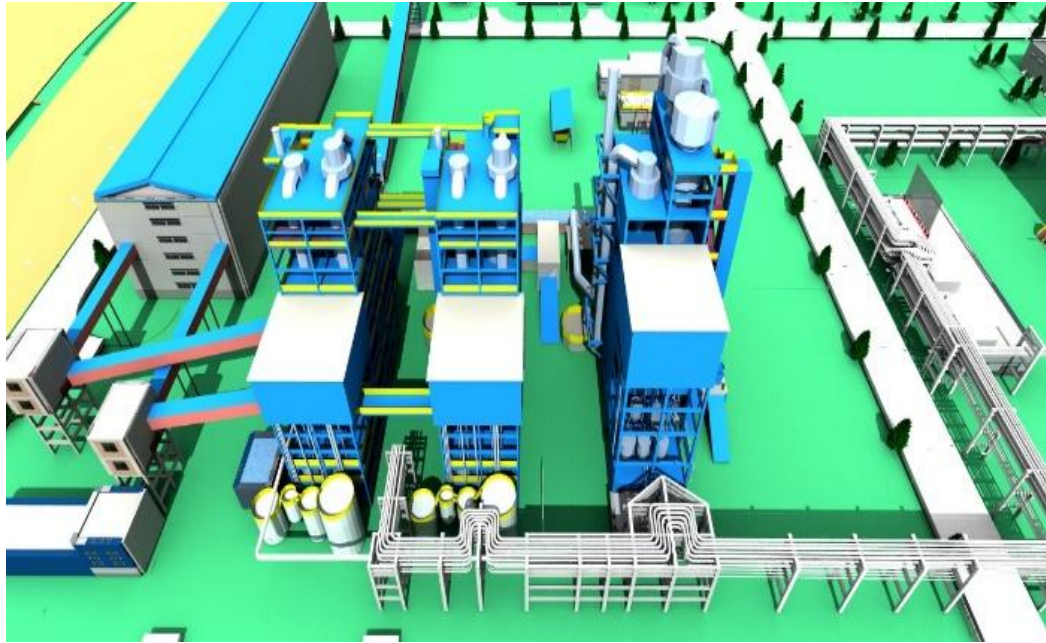


图 43 氢氧化铝焙烧区域 3D 物理模型

工业大模型系统现场集成结果如图 44 至图 49 所示。

综合生产指标	氧化铝产量	循环效率	能耗指标			物耗指标		
			电耗	蒸汽	天然气	铝土矿	石灰	NaOH
目标值	84kt/m	159kg/m <sup>3</sup>	1.65t/t	0.86t/t	610Nm <sup>3</sup> /t	1.93t/t	0.56t/t	73kg/t
实际值	30	148	1.57	0.78	600	1.65	0.47	71

工序优化指标	旋流器溢流粒度
目标值	X
实际值	25.11399

		固体下料总量			
		设定值SP	275.3	比值K2	
		检测值PV	210.8793		
		比值K1	76.6	65	
基础控制回路	缓冲槽补碱流量m <sup>3</sup> /h <input type="checkbox"/>	铝土矿下料量 <input type="checkbox"/>	T/h	石灰下料量 <input type="checkbox"/>	T/h
				入口碱液流量 <input type="checkbox"/>	缓冲槽液位 <input type="checkbox"/>
设定值SP	50.6	210.8798	64.41994	178.945	11.61749
检测值PV	50.59974	210.8793	64.41994	178.9445	11.61775
控制量OP	缓冲槽碱液调节阀开度指令 <input type="checkbox"/>	X		入口碱液调节阀开度指令 <input type="checkbox"/>	旋流器给料泵频率指令 <input type="checkbox"/>
	50.59974			58.15032	48.23304

	检测值	单位
铝土矿仓料位	11.71552	m
石灰仓料位	8.052493	m
旋流器进料泵出口压力	0.06974665	Mpa
合格矿浆槽液位	10.81775	m
合格矿浆泵出口流量		m <sup>3</sup> /h

图 44 料浆制备工序工业大模型集成结果

综合生产指标		氧化铝产量	循环效率	能耗指标			物耗指标		
目标值	84kt/m	159kg/m <sup>3</sup>	1.65t/t	0.86t/t	610Nm <sup>3</sup> /t	1.93t/t	0.56t/t	73kg/t	
实际值	30	148	1.57	0.78	600	1.65	0.47	71	

工序优化指标	稀释槽出口ak	溶出率
目标值	X	X
实际值	31.00672	24.93613

基础控制回路	二次补碱流量□	隔膜泵给料□
	m <sup>3</sup> /h	流量m <sup>3</sup> /h
设定值SP		161.7115
检测值PV		161.7113
控制量OP	二次补碱泵□	隔膜泵频率指令
	频率指令	15.66336

稀释槽□	预脱硅槽□	第一级赤泥洗□	赤泥洗□	稀释槽出口	稀释槽压力	稀释槽温度
槽液位	出口温度	进料密度	液流量	料密度		
8.61386	75.34653				0.128844	2128.8442
新蒸汽			伴留管			
温度	压力	流量	入口压力	出口温度	入口温度	入口
16.41504	0.169227	316.92273	13.71718	188.5442	178.8442	X

套管换热器	出口温度	第1级	第2级	第3级	第4级	第5级	第6级	第7级	第8级	第9级	第10级	第11级	单位
	编号	Nt101	Nt102	Nt103	Nt104	Nt105	Nt106	Nt107	Nt108	Nt109	Nt110	Nt111	
压力	0.099594	0.103349	0.292329	0.358787		0.104396	0.195804	0.156895	0.137748	0.120680	0.06		Mpa
温度	129.8442	131.8442	136.8442	140.8442	147.8442	150.8442	156.8442	160.8442	166.8442	173.8442	183.8442		°C
液位SP	9.959114	10.33469	17.47368	16.21566	15.14202	10.43992	19.58116	15.589	13.77456	18.363			m
液位PV	9.959374	10.33499	29.23297	35.87817	15.14174	10.43967	19.58064	15.58952	13.77481	12.06804			m
调节阀OP	66.62923	44.96635	32.02864	36.60064	31.26991	56.74737	37.03653	46.33767	51.96491	50.85806			%
冷凝水罐	编号	Np101	Np102	Np103	Np104	Np105	Np106	Np107	Np108	Np109	Np110	Np111	
	压力	13.71718	0.148109	0.139921	40.173640	20.163172	10.156682	40.180759	30.104637	30.193238	53.19873		Mpa
	温度	29.0213	20.18537	29.91291	33.97646	22.35558	25.29398	32.0725	22.36347	16.14813	23.1198		°C
	液位SP	10.9983	14.81123	13.99188	17.36428	16.31718	15.66826	18.07644	10.46347	19.3243	11.81253		m
	液位PV	10.99843	14.81097	13.99214	17.36402	16.3172	15.66826	18.07693	10.46373	19.32383	319.873		m
调节阀OP	51.16304	65.05753	42.50374	42.83593	49.22994	63.3005	42.66624	46.69597	64.84098	34.77938			%

图 45 溶出工序工业大模型集成结果

综合生产指标		氧化铝产量	循环效率	能耗指标			物耗指标		
目标值	84kt/m	159kg/m <sup>3</sup>	1.65t/t	0.86t/t	610Nm <sup>3</sup> /t	1.93t/t	0.56t/t	73kg/t	
实际值	30	148	1.57	0.78	600	1.65	0.47	71	

赤泥沉降分离洗涤动态参数								
底流流量SP	1#沉降槽	2#沉降槽	3#沉降槽	1#洗涤槽	2#洗涤槽	3#洗涤槽	4#洗涤槽	单位
底流流量SP	155.8109	155.7965	151.7571	141.3641	160.2529	147.2097	166.9781	m <sup>3</sup> /h
底流流量PV	155.8107	155.7968		25.60947	160.2527	147.2099	166.9779	m <sup>3</sup> /h
底流泵频率OP	32.39497	37.74942	25.65694	16.90887	26.94189	24.30875	21.71371	Hz
泥层界面高度SP	12.07847	10.28665	14.3111	19.39516	15.43368	13.64773	9.990969	m
泥层界面高度PV	12.07873	10.28691	14.31084	19.39464	15.43394	13.64799	9.991228	m
絮凝剂添加量OP	42.27507	61.85957	30.87835	49.80901	31.38521	66.54904	51.886	

图 46 赤泥沉降分离洗涤工序工业大模型集成结果



图 47 种子分解工序工业大模型集成结果

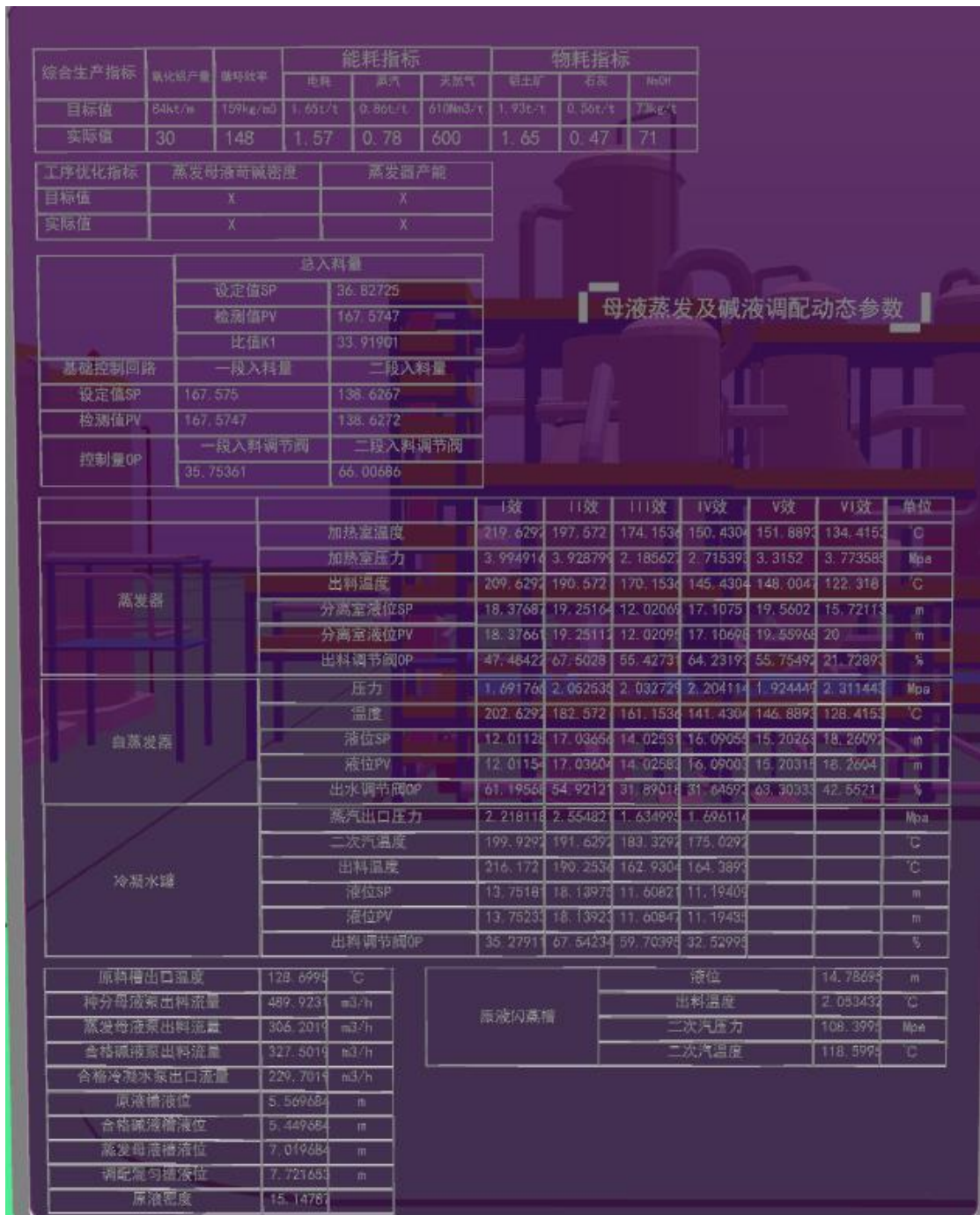


图 48 母液蒸发工序工业大模型集成结果

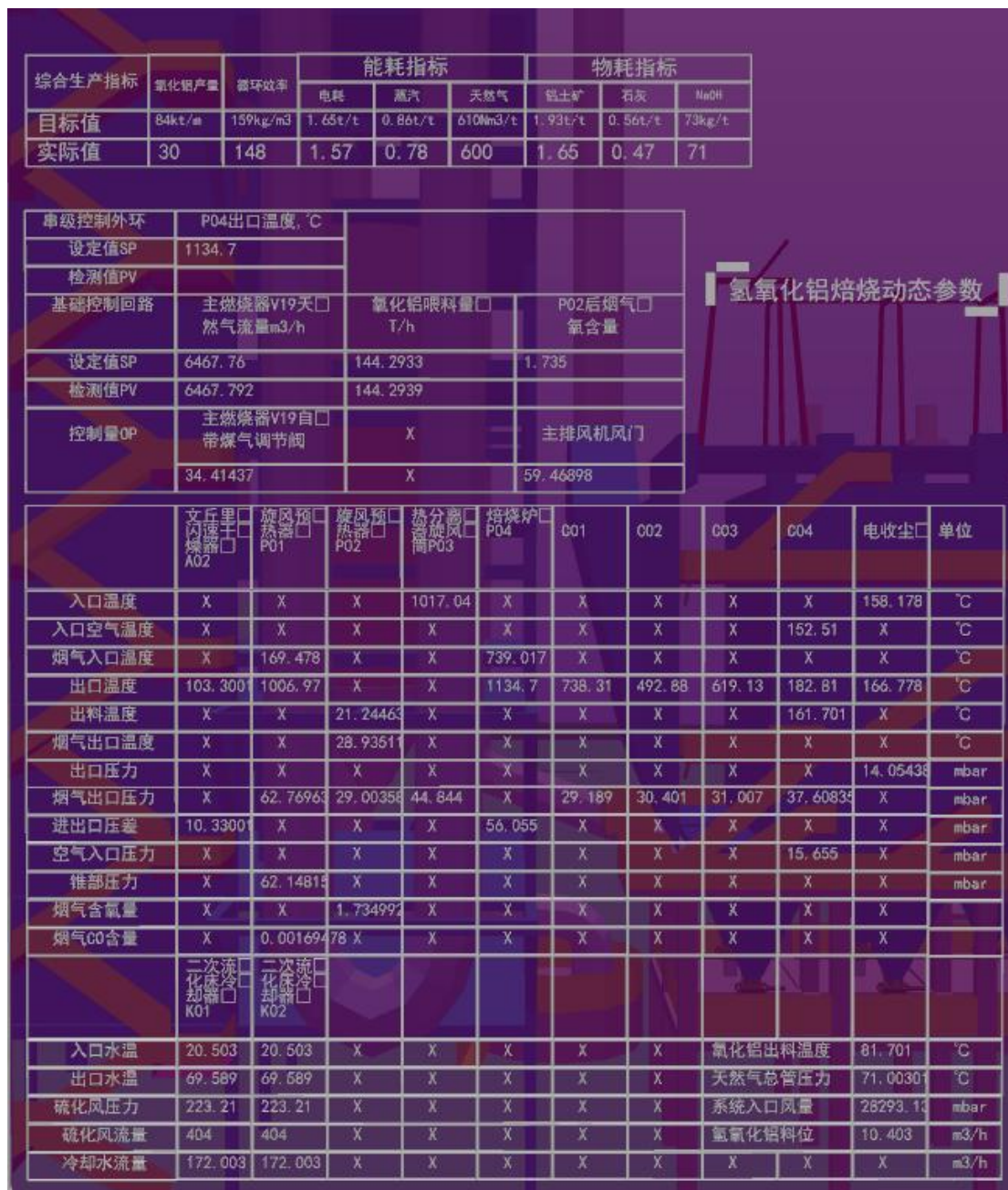


图 49 氢氧化铝焙烧工序工业大模型集成结果

### 3.2.4.3 量化评估与投资回报分析

参照研究内容 3 的方法,建立针对有色冶金行业的量化评估体系。经济指标将特别关注氧化铝溶出率/电解铝直流电耗的降低、阳极炭块等大宗物料消耗的节约,以及因槽寿命延长

带来的效益。通过严谨的财务分析，证明该技术的投入产出比。

#### **3.2.4.4 商业化模式与推广方案设计**

结合有色冶金行业产能相对集中、工艺标准化程度较高的特点，设计更具针对性的推广策略。可考虑与大型铝业集团合作，推动其成为集团级标准解决方案。同时，总结面向氧化铝和电解铝两个细分领域的实施经验，形成可独立部署、快速交付的行业套件，便于在不同规模的企业中推广复制。

### **3.3 技术可行性分析**

本项目深度融合了合作各方的独特优势，技术路径清晰，且其关键环节在当前技术环境下有成功的实践案例支撑。

#### **(1) 技术基础扎实**

沈阳工业大学在工业智能与知识图谱领域拥有深厚的学术积累，其“工业智能”专业本身就是为应对工业实际需求，融合人工智能与自动化技术的典型交叉学科。提出的无监督去噪、深度无监督哈希技术，能有效应对流程工业数据高噪声、异构的挑战，为后续模型训练提供高质量数据基础。

在知识表示与推理方面，全局图神经网络、可拓展树状推理结构等方法的提出，为构建覆盖“设备-工艺-质量-能耗”的可推理知识图谱提供了技术保障。

此外,沈阳工业大学已开发部署面向钢铁高炉故障诊断的工业智能体系统以及面向氧化铝行业的虚实结合的工业大模型系统,为本项目的开展提供了技术成熟的解决方案。

## **(2) 工程实践支撑**

本溪钢铁和沈阳铝镁设计研究院作为行业标杆企业,能提供项目所需的真实、海量且多模态的工业数据,以及关键的落地验证场景。

**数据层面:** 钢铁“炼铁-炼钢-连铸-热轧”主线及有色冶金“氧化铝-电解铝”全流程,能提供项目所需的文本(工艺规程)、图像(表面质检)、时序(传感器数据)、音频(设备异响)等多模态数据。

**场景层面:** 在高炉故障诊断、冷轧一体化排程等典型场景的工业软件智能体部署,具备工程实践基础。例如,类似的工业大模型已在 PID 性能评估与整定等工业软件中实现协同应用-2,通过多个智能体协作完成从数据获取到参数优化的闭环。

## **(3) 平台架构清晰**

项目规划的平台架构与业界提出的工业大模型驱动的新一代流程工业智能工厂核心软件系统架构一致。该架构已被验

证能有效提升数据透明度和软件互操作性。

项目中“云-边-端”协同的部署策略，结合本溪钢铁在模型轻量化部署方面的研究，能够平衡模型性能与工业现场对响应速度和数据安全的严苛要求。

#### **(4) 数据治理方案完备**

项目对数据治理的重视与当前“以数据为中心”的 AI 发展趋势一致。沈阳工业大学的网络大模型数据集建设中提出的“规划—采集—应用—评估—反馈”闭环运营模式，为本项目数据生命周期的管理提供了可直接参考的范例。

对于多模态数据融合与语义对齐的挑战，前期合作的华中科技大学相关团队在“真实开放环境下数据与知识协同的智能服务”研究中已提供了可行的技术路径，例如通过自监督学习、提示微调等范式，他们在跨模态任务中实现了准确率的显著提升。

## **四、 现有工作基础和条件**

### **1. 沈阳工业大学（项目牵头单位）**

沈阳工业大学是一所以工为主，涵盖工、理、经、管、文、法、艺术七大学科门类的多科性研究应用型大学。学校始建于1949年，1958年升格为沈阳机电学院，1985年更名为沈阳工

业大学，1998年由原国家机械工业部划归辽宁省人民政府管理，2019年在“双一流”建设中被列为全省冲击国内一流大学重点建设高校。学校在发展历程中始终与辽宁老工业基地血脉相依，与装备制造业发展同向同行，是“共和国工业奠基地”的建设者、见证者。学校设有22个学院、2个教学部和2个工程实训中心。现有普通本科生23259人，硕士研究生7045人，博士研究生925人。现有一级学科博士点5个，专业学位博士点1个，交叉学科博士点3个，一级学科硕士点20个，交叉学科硕士点1个，硕士专业学位授权类别12个，博士后科研流动站5个。电机与电器学科是国家重点二级学科，机械工程、材料科学与工程、电气工程、管理科学与工程学科是省“双一流”建设学科。学校现有本科专业61个，在招专业55个，其中国家级一流专业建设点20个，省级一流专业建设点36个。现有专任教师1431人，其中正高职309人、副高职466人，具有博士学位的教师850人。学校聘任校内外博士生导师248人、硕士生导师1143人。师资队伍中有中国工程院院士1人，国家级人才17人，享受国务院政府特殊津贴专家24人，各类省级人才称号获得者151人。拥有教育部科技创新团队2个、全国高校黄大年式教师团队2个、省级高校黄大年式教师团队4个。创新人才培养模式，实施学分制改革，推进教考分离，提高育人质量，毕业生深受社会好评，学校被誉为“卓越

工程师的摇篮”。加快卓越研究生教育，入选中组部工程硕博培养改革专项试点高校，成立辽宁首家省属高校卓越工程师学院。

沈阳工业大学形成了国家、省、市、校四级科研平台体系，拥有国家稀土永磁电机工程技术研究中心、国家级大学科技园、国家级“2011”协同创新中心、国家级技术转移中心、国家级工业设计中心、国家市场监督管理总局技术创新中心（稀土永磁电机）等国字号科研平台。建有教育部特种电机与高压电器重点实验室等省部级科研平台 41 个，沈阳市人工智能重点实验室等市级科研平台 22 个，特种电机研究所等校级科研平台 63 个。学校先后获得国家科技进步二等奖 5 项、三等奖 1 项，诞生了 4 项中国首创具有完全自主知识产权的科技成果，分别是中国第一台稀土永磁电机、中国第一台异型螺杆加工数控铣床、中国第一套长输管道智能检测系统、中国第一台兆瓦级风力发电机组。学校确定了“校地融合、校企融合、军民融合、国际合作”的科技发展战略，推进创新体系建设，提升科技创新能力，加快科技成果转化。近五年，学校承担国家重点研发计划等国家级项目 126 项，获省部级科研奖励 64 项，牵头组建了辽宁装备制造产业校企联盟等 4 个校企联盟，创办了辽宁智能制造技术与装备研究院、蓝金环保技术研究院、新能源研究院、辽宁增材制造产业技术研究院等研究机构；引导科技人

员将科技创新的着力点放到国家战略和辽宁振兴关键领域，签订“五技”合同 1823 项，合同额约达 9.24 亿元。

本项目落实主体为沈阳工业大学人工智能学院，聚焦传统产业焕新、新兴产业壮大、未来产业培育，紧扣国家“新基建”战略，强化人工智能基础研究和技术应用，致力于培养人工智能领域高素质创新应用型人才，建设“产学研用”一体化的新兴学院。已承担完成国家重点研发计划项目 2020YFB1712800“钢铁工业网络化协同生产智能管控平台开发及应用”、国家重点研发计划项目 2022YFE0114200 面向可持续制造的能源与资源效率提升方法研究及系统开发、工信部智能制造专项“面向铝冶炼行业的智能工厂通用模型标准验证与验证”，且部分项目取得“优秀”的综合绩效评价结果。上述行业类国家级项目为本项目的开展在工业知识储备——高质量数据集整合——管控平台研发——工厂级智能模型加载——应用场景验证等环节积累了成熟的技术方案以及成熟的应用场景。

此外，已结题的国家重点研发计划项目 2019YFB2006202“工业现场通信质量分析关键技术”以及在研的国家重点研发计划项目 2024YFF0617200“新一代工业网络关键技术研究与国际标准研制”，为本项目中工业知识的感知和数据采集提供了成熟的技术支撑。

项目组已建成面向流程工业的工业智能体（如图 50）以

及信息模型的各类系统（如图 51），其核心功能是通过数据驱动的方法，对生产全过程进行感知、分析、优化和控制。现有系统首先通过生产装置的温度、压力、流量、振动传感器以及在线质量分析仪，持续采集高频的工艺和设备数据。这些数据经由工业网络协议（如 OPC UA）传输并存储在时序数据库中，形成对物理实体的精确数字映射。在数据处理层，系统运用信号处理算法对原始数据进行清洗、降噪和特征提取。基于物理学定律的第一性原理模型，用于模拟工艺过程的稳态和动态行为。植入数据驱动的机器学习模型，从海量历史数据中学习复杂的非线性关系，例如用于预测关键产品质量指标或识别设备早期故障征兆。此外，系统周期性地（例如每 15 分钟）以当前工况为初始条件，求解一个包含经济效益目标（如最大化高价值产品收率、最小化能耗）和一系列工艺约束（如设备安全极限、产品质量规格）的非线性规划问题。求解得到的最优操作点参数集，被直接下发至底层分布式控制系统或先进过程控制系统，自动调整相关调节阀、泵速或温度设定值，形成一个闭环优化。对于生产调度，该系统整合市场订单、原料库存、设备可用性和能源成本等信息，运用运筹学算法生成最优的生产排产计划，并动态响应生产扰动。



图 50 研发应用的工业智能体



图 51 研发应用的工业知识增强编辑器和加载器

上述研发的工业智能体、信息模型系统、数字孪生系统已广泛应用于钢铁行业和有色冶金行业，典型案例详述如下。

### 案例 1: 钢铁行业全流程工业智能体

建立了全流程综合生产指标智能自主控制和优化决策的流程模型以及方法体系,在典型钢铁企业应用中形成覆盖全流程 2000 多个指标的综合生产评估体系,实现企业协同优化控制(如图 52)。基于能量流网络集成原理,构建了以节能减排为目标的能源预测及供需匹配调度优化模型,氧气需求量预测误差 $<\pm 1\%$ ,降低氧气放散 6-11%,保障管网压力负载均衡的同时节省 5-21%电力成本。扩展特征研究范围、量化机理规律、标准化工艺知识,融合大数据及算法技术,构建智能模型 4 个,支撑多工序质量优化与管控能力建设,核心指标预测准确率可达 90%以上,助力钢材成品成材率提高 0.5%。(如图 53 和图 54)

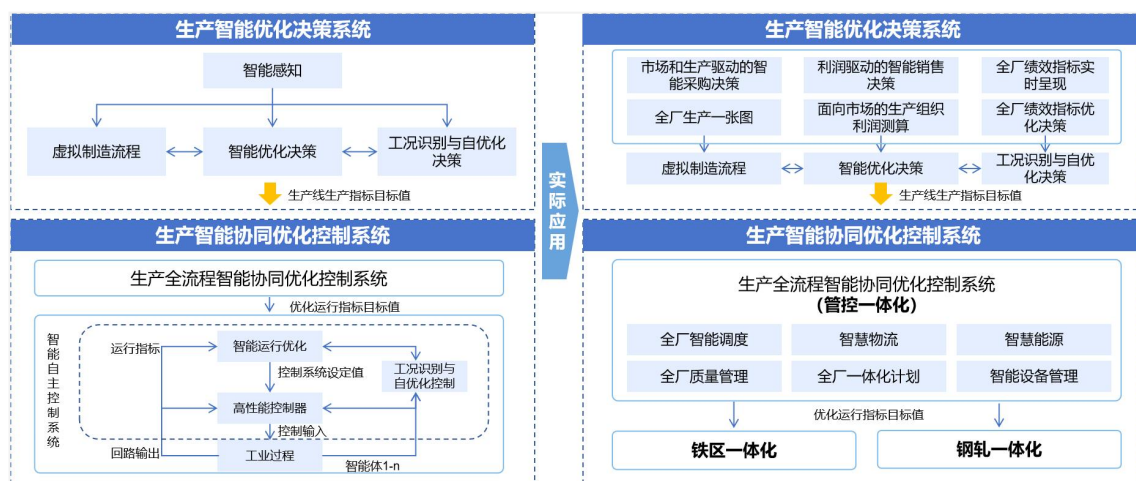


图 52 钢铁行业工业智能体系统架构

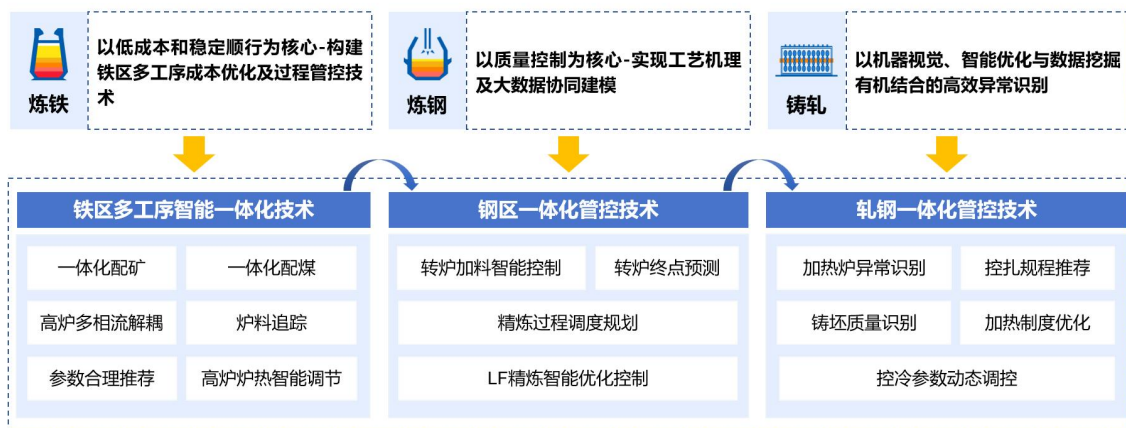


图 53 钢铁行业知识增强的全流程智能模型系统



图 54 钢铁行业工业知识增强和大模型系统应用效果



图 55 系统软件第三方测试报告



图 56 相关软件著作权

### 案例 2：有色冶金行业工业智能体

项目组在有色冶金行业积累较为深厚的工艺机理知识、管控知识以及模型等，并研制形成面向铝冶炼行业的智能工

厂数字孪生系统，获得了国家“明星工业大模型系统”称号，并在行业发布。

氧化铝智能工厂数字孪生系统形成首套可指导氧化铝工厂的智能制造解决方案，系统硬件组成和软件系统如图 57 和图 58 所示。

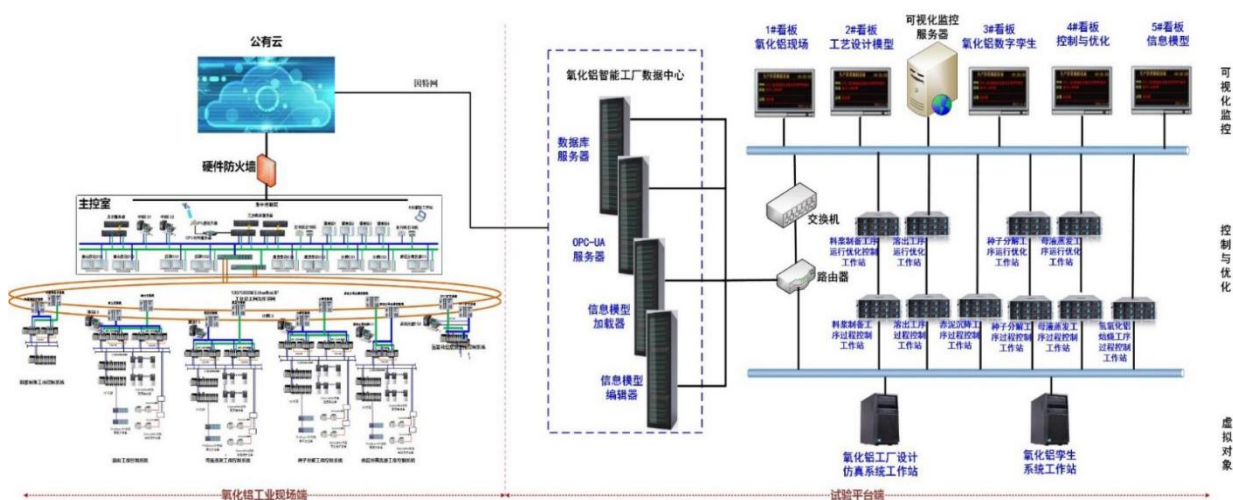


图 57 氧化铝智能工厂数字孪生系统硬件组成



- 针对氧化铝过程大多关键参数难以在线检测、或者检测装置昂贵的特点，采用机理建模与数据驱动补偿相结合的全流程先进控制与优化方法，实现关键工艺参数的终点值预报功能。此外，通过智能设定方法、反馈补偿方法和前馈补偿方法，对主要回路控制参数进行优化设定，将各工序关键工艺参数控制在目标值上。建立关键工艺参数、边界条件、终点预报、回路设定值等描述的统一定义，可以实现不同工序的先进控制与优化的统一实施，有利于快速实现全流程的运行优化控制。
- 氧化铝智能工厂数字孪生系统采用虚实交互的方式进行工业现场端和虚拟端的迭代优化，数字孪生系统的工业现场端和虚拟端分别如图 59 和图 60 所示。

**系统工作原理：**工艺模型参数以及控制与优化算法首先运行于氧化铝虚拟对象，工艺、控制和优化参数经过虚拟对象验证通过后，实时发送给工业现场端的测控系统，进行设定值和工艺参数的调整和优化；工业现场数据实时反馈给虚拟对象进行生产状态更新。



图 59 氧化铝智能工厂工业现场端

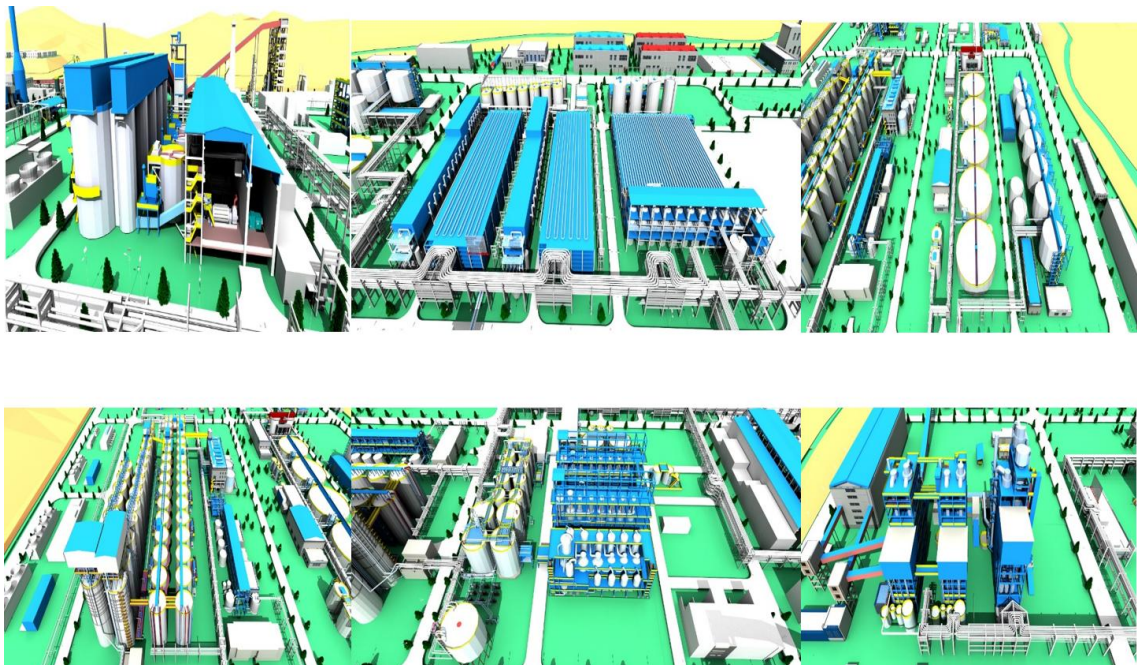


图 60 铝冶炼数字孪生虚拟端系统

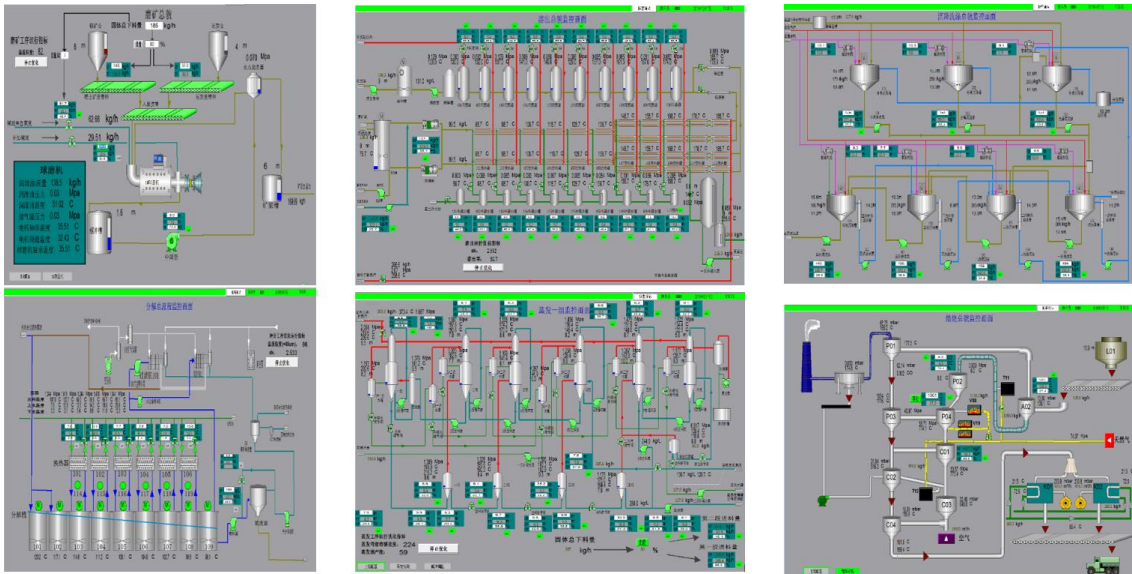


图 61 铝冶炼工艺控制系统建模

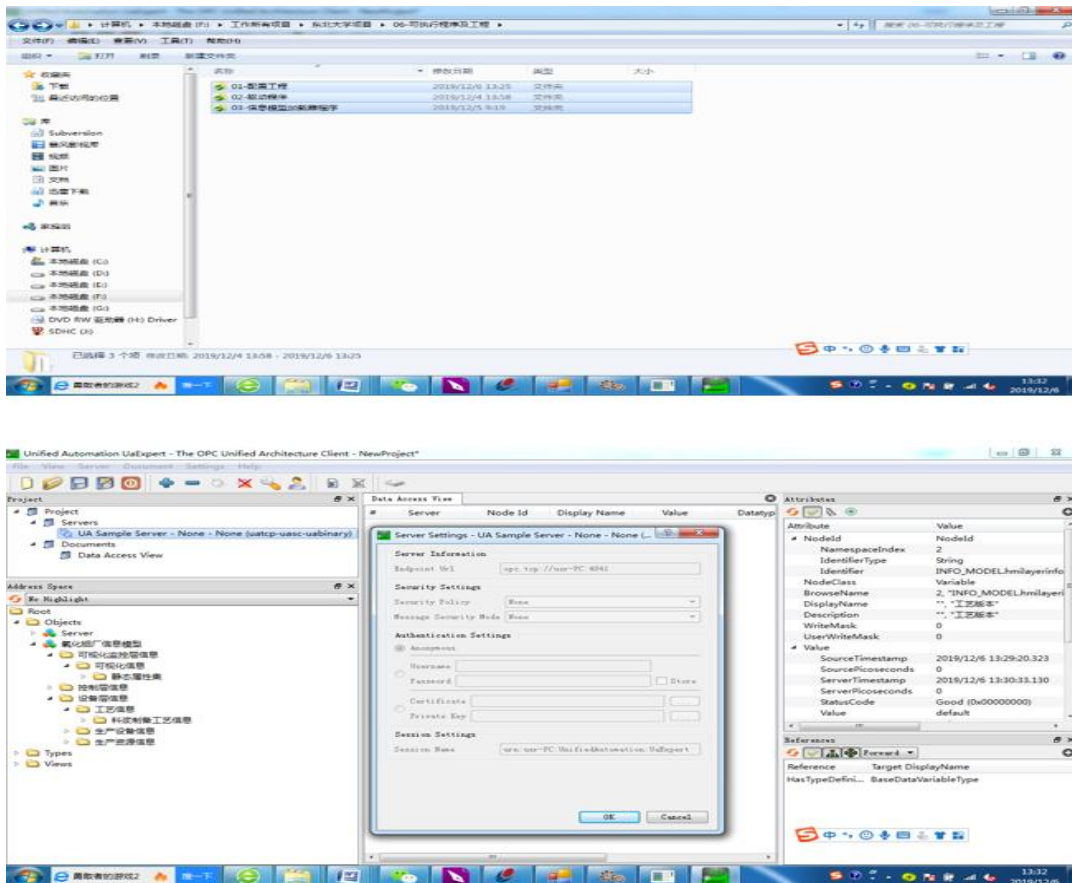


图 62 铝冶炼知识增强系统

综合生产指标	氧化铝产量	循环效率	能耗指标			物耗指标		
			电耗	蒸汽	天然气	铝土矿	石灰	NaOH
目标值	84kt/m	159kg/m <sup>3</sup>	1.65t/t	0.86t/t	610Nm <sup>3</sup> /t	1.93t/t	0.56t/t	73kg/t
实际值	30	148	1.57	0.78	600	1.65	0.47	71

工序优化指标	稀释槽出口ak	溶出率
目标值	X	X
实际值	31.00672	24.93613

基础控制回路	二次补碱流量	隔膜泵给料
	m <sup>3</sup> /h	流量m <sup>3</sup> /h
设定值SP		161.7115
检测值PV		161.7113
控制量OP	二次补碱泵频率指令	隔膜泵频率指令
		15.66336

稀释槽出口	第一级	第二级	第三级	第四级	第五级	第六级	第七级	第八级	第九级	第十级	第十一级	单位
温度	88.54418	98.54418	108.5442	118.5442	128.5442	138.5442	148.5442	158.5442	168.5442	178.5442	188.5442	°C
压力	0.099593	0.103349	0.292329	0.358787	0.404396	0.104396	0.195806	0.158893	0.201377	0.212068	0.212068	Mpa
温度	129.8442	131.8442	136.8442	140.8442	147.8442	150.8442	156.8442	160.8442	166.8442	173.8442	183.8442	°C
液位SP	9.959119	10.33469	17.47368	16.21566	15.14202	10.43992	19.58116	15.589	13.77456	18.353	13.77456	m
液位PV	9.959378	10.33498	29.2329	35.87817	15.14176	10.43967	19.58064	15.58952	13.7748	12.06804	12.06804	m
调节阀OP	66.62923	44.96639	32.02864	36.60064	31.26991	56.74737	37.03653	46.33761	51.96497	50.85804	50.85804	%
编号	Np101	Np102	Np103	Np104	Np105	Np106	Np107	Np108	Np109	Np110	Np111	
压力	13.71718	0.148109	0.13992	40.173640	20.163172	10.156682	60.180759	30.104637	30.193238	33.19873	33.19873	Mpa
温度	29.0213	20.1853	29.9129	33.97644	22.35558	25.29398	32.0725	22.3634	16.14813	23.11987	23.11987	°C
液位SP	10.9983	14.81123	13.99186	17.36428	16.31718	15.66857	18.07644	10.4634	19.32437	11.8125	11.8125	m
液位PV	10.9984	14.81097	13.99214	17.36402	16.3172	15.66824	18.07593	10.46374	19.32383	319.873	319.873	m
调节阀OP	51.15304	65.05753	42.50374	42.83593	49.22994	63.3005	42.66624	46.6959	64.84098	34.77938	34.77938	%

### 溶出工序动态参数

The image displays six Aspen Plus process simulation windows, each showing a different stream's properties and flow rates. The windows are titled as follows:

- Access-1 - DeSil\_Htr**: Shows concentrations of various components like TOC825, SodiumCarbConc, and Sol10mcc25. Annotations point to '合格矿浆固含' (Qualified slurry solids content) and 'Na2O Equiv'.
- Access-1 - A100\_P\_Lime Mills**: Shows inlet flow conditions for mass flow, volume flow, and temperature. An annotation points to '石灰流量' (Lime flow).
- Access-1 - P\_MilicycDin**: Shows inlet flow conditions for mass flow, volume flow, and temperature. An annotation points to '入泵池循环母液流量' (Inlet pump tank recirculation mother liquor flow).
- Access-1 - A100\_Bauxite\_1**: Shows a detailed list of stream properties including mass flow, volume flow, and density. An annotation points to '矿石流量' (Ore flow).
- Access-1 - P\_MilliqMill**: Shows inlet flow conditions for mass flow, volume flow, and temperature. An annotation points to '入磨循环母液流量' (Inlet mill recirculation mother liquor flow).
- Access-1 - P\_Shurryin**: Shows inlet flow conditions for mass flow, volume flow, and temperature. An annotation points to '合格矿浆流量' (Qualified slurry flow).

料浆制备工序运行优化系统						
优化状态	<input type="button" value="自动优化"/>		<input type="button" value="人工确认"/>		<input type="button" value="解除优化"/>	
优化条件	通讯状态	正常				备妥
	铝土矿下料量回路	SP	127.92	稳态		
		PV	127.9	自动		
	石灰下料量回路	SP	39.08	稳态		
		PV	39.08	自动		
	缓冲槽补碱回路	SP	0.00	非稳态		
		PV	0.00			
OP		0.00	自动			
优化周期	60分钟					
优化指标			上次优化	本次优化		
	旋流器溢流粒度	目标值	71.10	15.20	<input type="button" value="修改"/> <input type="button" value="确认"/>	
		检测值	71.10	30.14		
优化指令	缓冲槽补碱流量设定值		47.70	0.00	<input type="button" value="修改"/> <input type="button" value="确认"/>	
	固体下料量设定值		267.10	34.02		
	球磨机入口固液比值K2		57.10	15.48		

图 63 铝冶炼智能工厂知识增强的大模型系统

其中，工业现场端包含氧化铝生产现场众多重型设备以及控制系统设备。为了能够与实际生产现场连接起来，将现场生产数据传输并且存储在实验端，同时实验端进行的操作又不能影响工业现场，保证工业现场的安全。由于氧化铝生产属于典型的流程工业，独立工控系统不允许遭遇外界入侵攻击。为此，需要在原有的氧化铝生产现场系统架构上搭建硬件防火墙，保证现场数据在向上传输的同时，向下的任何数据信息和操作信号不得传入工业现场，不影响正常生产。

另外，氧化铝实际生产过程中会产生庞大的生产过程数据，并且数据按秒刷新。虚拟端无法利用现有的硬件设施区存储如此数据量的数据。为此，搭建一个云端服务器，对传输上来的工业生产数据进行选择性的存储、丢弃以及传输。这样，云端服务器既能保证拥有足够的存储能力，又能够对数据进行筛选，保证实验端能够以最少、最优质的数据进行3D虚拟工厂的驱动。

在完成对现场生产数据的处理之后，搭建氧化铝智能工厂数据中心，它包含一台数据库服务器、一台 OPC UA 服务器、一台知识增强编辑器工作站以及一台知识增强加载器工作站。

- 数据库服务器的功能是用来存储从云端过来的现场生产数据。
- OPC UA 服务器负责保证各系统间按照 OPC 协议进行数据交互，并且负责管理各个系统间的数据传输权限。
- 知识增强编辑器工作站主要负责对标准中定义的氧化铝智能工厂信息模型进行编辑和构建，确定实验端的氧化铝智能工厂到底需要哪些现场数据
- 知识增强加载器工作站主要负责生成 OPC UA 服务器的地址空间，让各个系统间能够遵循每个信息模型的卫衣地址空间进行数据传输交互。

在完成对数据的定义、存储、交互权限的管理等操作之后，搭建虚拟端的独立工控系统。但是对工控系统来说，都需要一个被控对象。为此，利用氧化铝孪生系统工作站对氧化铝 3D 智能虚拟工厂进行物理建模。在完成对氧化铝 3D 智能虚拟工厂的开发之后，虚拟端平台独立的工控系统就有了虚拟的被控对象。根据氧化铝生产的六大工艺流程，分别需要六台过程控制工作站，分别是料浆制备过程控制工作站、溶出过程控制工作站、赤泥沉降分解过程控制工作站、种子分解过程控制工作站、母液蒸发过程控制工作站以及焙烧过程控制工作站。每个工序的工作站负责本工序下的检测仪表测点、单回路控制以及过程控制方案。

此外，根据多年氧化铝现场工作经验，发现目前氧化铝企业在进行生产时对运行指标的优化完全由操作员凭借个人经验进行。这样的操作存在在试探性、随机性以及无规则性，会导致全厂或者部分工序的指标无法达到最优结果。为此，在过程控制系统上又搭建了四个运行优化控制工作站，分别是料浆制备运行优化控制工作站、溶出运行优化控制工作站、种子分解运行优化控制工作站以及母液蒸发运行优化控制工作站。每个运行优化控制工作站根据独立算法，进行工序的运行指标优化，从而达到生产最优。

最后，为了能够展示氧化铝智能工厂数字孪生系统的各个

系统，以及模拟氧化铝生产过程中的人机交互，利用可视化监控系统工作站完成对各系统的数据展示以及人机交互。

### 案例 3：领域国际标准、国家标准和行业标准制定

沈阳工业大学围绕工业知识增强，牵头制定和重点参与了智能制造、数字工厂、工业互联网、工业 5G 等领域 50 余项国际标准和国家标准。牵头制定了《氧化铝信息模型》行业标准。

表 4-1 牵头制定的国际标准和国家标准

序号	标准名称	类别	批准单位	获批时间
1	Industrial Networks – 5G communication technology – General considerations 工业网络 5G 通信技术 通用要求	IEC 国际 标准	IEC 国际电 工委员会	2025.09
2	Industrial Networks –5G communication technology -Part 1: Terms, definitions and fundamentals 工业网络 5G 通信技术 第 1 部分：术语、定义和基本原理	IEC 国际 标准	IEC 国际电 工委员会	2025 立项
3	数字化车间 通用技术要求	IEC 国际标 准(国家标准 转)	IEC 国际电 工委员会	2025 立项
4	智能工厂 工业控制异常监测工具技术要求	IEC 国际标 准(国家标准 转)	IEC 国际电 工委员会	2025 立项

5	基于蜂窝网络的工业无线通信规范 第1部分 通用技术要求	IEC 国际标准(国家标准转)	IEC 国际电工委员会	2025 立项
6	用于工业自动化的工业互联网系统功能架构	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化 管理委员会	2025 立项
7	工业互联网 氧化铝智能工厂 信息模型	行业标准	国家工业和 信息化部	2025 立项
8	GB/T 32235.2-2024 工业过程测量、控制和自动化 数字工厂框架 第2部分：模型元素	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化 管理委员会	2024.08
9	GB/T 41771.7-2023 现场设备集成 第7部分：通信设备	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化 管理委员会	2023.12
10	IEC PAS 62441-2022: New Functional Architecture of Industrial Internet System for Industrial Automation Applications 用于工业自动化的工业互联网系统功	IEC 国际标准	IEC 国际电工委员会	2022.10

	能架构			
--	-----	--	--	--

表 4-2 重点参与制定的国际标准和国家标准

序号	标准名称	类别	批准单位	获批时间
1	GB/T 25105.1-2025 工业通信网络 现场总线规范 类型 10: PROFINET IO 规范 第 1 部分: 应用层服务定义	国家标准	国家市场监督 管理总局 国家标准化管理委员会	2025.04
2	GB/T 25105.3-2025 工业通信网络 现场总线规范 类型 10:PROFINET IO 规范 第 3 部分:PROFINET IO 通 信行规	国家标准	国家市场监督 管理总局 国家标准化管理委员会	2025.04
3	GB/T 25105.2-2025 工业通信网络 现场总线规范 类型 10: PROFINET IO 规范 第 2 部分: 应用层协议规范	国家标准	国家市场监督 管理总局 国家标准化管理委员会	2025.04
4	GB/T 45511-2025 工业现场通信质量 检测 通用技术规范	国家标准	国家市场监督 管理总局 国家标准化管理委员会	2025.03
5	GB/T 45510-2025 边缘智能仪表通用 要求	国家标准	国家市场监督 管理总局	2025.03

			国家标准化管 理委员会	
6	GB/T 45508-2025 机器可读标准能力 等级模型与评估	国家标准	国家市场监督 管理总局 国家标准化管 理委员会	2025.03
7	GB/T 41771.6-2025 现场设备集成 第6部分：技术映射	国家标准	国家市场监督 管理总局 国家标准化管 理委员会	2025.03
8	GB/T 44880-2024 因果矩阵	国家标准	国家市场监督 管理总局 国家标准化管 理委员会	2024.10
9	GB/T 32235.1-2024 工业过程测量、 控制和自动化 数字工厂框架 第1部 分：通用要求	国家标准	国家市场监督 管理总局 国家标准化管 理委员会	2024.08
10	GB/T 44452-2024 工业过程测量控制 和自动化 系统和部件的生命周期管 理	国家标准	国家市场监督 管理总局 国家标准化管	2024.09

			理委员会	
11	GB/T 42126.5-2024 基于蜂窝网络的工业无线通信规范 第 5 部分:应用要求	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2024.04
12	IEC 63283-4:2023 INDUSTRIAL-PROCESS MEASUREMENT, CONTROL AND AUTOMATION – SMART MANUFACTURING – NEW TECHNOLOGIES USED IN SMART MANUFACTURING	国际标准 (第 2 单位参与制定)	IEC 国际电工委员会 国家市场监督管理总局	2023.04
13	IEC 61158-3-28:2023 工业通信网络 现场总线规范 第 3-28 部分: AUTBUS 数据链路层服务定义类型 28	国际标准 (第 3 单位参与制定)	IEC 国际电工委员会 国家市场监督管理总局 英国标准协会	2023.04
14	IEC 61158-4-28:2023 工业通信网络 现场总线规范 第 4-28 部分: AUTBUS 数据链路层协议规范类型 28	国际标准 (第 3 单位参与制定)	IEC 国际电工委员会 国家市场监督管理总局 英国标准协会	2023.04
15	IEC 61158-5-28:2023 工业通信网络 现场总线规范 第 5-28 部	国际标准 (第 3 单位)	IEC 国际电工委员会	2023.04

	分：AUTBUS 应用层服务定义 类型 28	参与制定)	国家市场监督 管理总局	
16	IEC 61158-6-28:2023 工业通信网 络 现场总线规范 第 6-28 部 分：AUTBUS 应用层协议规范 类型 28	国际标准 (第 3 单位 参与制定)	IEC 国际电工 委员会 国家市场监督 管理总局	2023.04
17	IEC 61784-1-22:2023 工业网络 行 规 第 1-22 部分：现场总线行规 CPF22	国际标准 (第 3 单位 参与制定)	IEC 国际电工 委员会 国家市场监督 管理总局	2023.04
18	IEC 61158-1 : Industrial communication networks - Fi eldbus specifications - Part 1: Overvie w and guidance for the IEC 61158 and IEC 61784 series	国际标准 (参与制 定)	IEC 国际电工 委员会 国家市场监督 管理总局	2023.02
19	IEC 61158-2 : Industrial communication networks - Fi eldbus specifications - Part 2: Physical layer specification and service definition	国际标准 (参与制 定)	IEC 国际电工 委员会 国家市场监督 管理总局	2023.02
20	IEC 61158-X-28 : Industrial communication networks - Fi eldbus specifications and Profiles - Typ	国际标准 (参与制	IEC 国际电工 委员会	2023.02

	e 28 elements	定)	国家市场监督管理总局	
21	ISO 24644-1:2023 Mass customization value chain management —Part 1:Framework	国际标准 (第四单位参与制定)	国际标准化组织 (ISO) 国家市场监督管理总局	2023.09
22	GB/T 42019-2022: 基于时间敏感技术的宽带工业总线 AUTBUS 系统架构与通信规范	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2022.10
23	GB/Z 42023.2-2022: 工业自动化设备和系统的可靠性 第2部分: 系统可靠性	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2022.10
24	GB/Z 42023.1-2023 工业自动化设备和系统可靠性 第1部分: 自动化设备可靠性数据保证及其来源规范	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2023.11
25	GB/T 42383.1-2023: 智能制造网络协同设计 第1部分 通用要求	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2023.03

			理委员会	
26	GB/T 42383.2-2023: 智能制造 网络协同设计 第 2 部分 软件接口和数据交互	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2023.03
27	GB/T 42383.4-2023: 智能制造 网络协同设计 第 4 部分 面向全生命周期设计要求	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2023.03
28	GB/T 42383.5-2023: 智能制造 网络协同设计 第 5 部分 多学科协同仿真	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2023.03

## 2. 本溪钢铁（集团）信息自动化有限责任公司（钢铁行业应用场景集成单位）

本溪钢铁（集团）信息自动化有限责任公司（以下简称本信公司）成立于 2003 年 11 月，是鞍钢数科公司全资子公司，注册资金 5000 万元。本信公司主要以信息技术服务及软件开发（企业管理软件、嵌入式软件等）为主营业务，是国家科改示范企业。是辽宁省“双软”企业、国家级高新技术企业，是国

家级“专精特新”小巨人企业，辽宁省瞪羚企业，是本溪地区最大的软件企业。

本信公司具有 ITSS 三级、电子与智能化专业承包二级、建筑机电安装工程三级、安防三级等资质，通过了 ISO 质量管理体系认证。累计取得授权专利 137 件，软件著作权 250 件，专有技术 70 件，已发布国家、行业和团体标准 15 件，11 项科技成果分别获国家、省、市、本钢集团科技进步奖。

本信公司现有在籍员工 196 人，柔性引入国家级人才 18 人，省级人才 12 人，招聘成熟人才 18 人，科技人员 161 人，技术人员占在籍员工总数的 82.1%。具有正高级职称 2 人，副高级职称 47 人，中级职称 55 人；研究生学历 36 人，大学本科学历 153 人，中高级职称人员占人员总数的 78%。

本信公司全面承接本钢集团“改革+精益”“数字+科技”四轮驱动和深化改革、管理提升和转型升级重点工作，秉承“赋能产线、服务厂矿、支撑部门、搭建平台”的企业定位，坚持“专精特新”战略发展方向，高质量落实数字产业整合工作，纵深推进本信科改、经营和党建三大目标，构建新发展格局迈出新步伐。

在工业自动化、智能化领域，提供工厂自动化和信息化融

合技术服务。围绕本钢能源管控、质量管理、组织管理、产品生产制造管理和安全管理等管理需求，重点开展智能工厂（智慧矿山）、智能装备、智能物流、智慧服务等核心业务的研发和实施，应用物联网、大数据、云计算等技术，致力于为企业打造包括管理咨询与服务、ERP、MES、IT系统集成、运行维护等在内的整体信息化解决方案，帮助客户实现管理进步和技术提升，从而增强企业的整体竞争力。目前中心具有自主知识产权的产品和技术已经广泛应用于矿山、炼铁、炼钢、轧钢、铁路运输等领域。

公司所在的行业是软件和信息技术服务业。软件在信息产业中的贡献不言而喻。国民经济各个领域对软件产业的需求非常强劲，“互联网+”所形成的国民经济各个领域对大数据、云计算、物联网和数据传输、获取、存储、信息安全的巨大需求都建立在强大的基础信息平台之上，机遇与挑战并存。软件行业的竞争非常激烈，目前软件行业的特点是软硬件结合紧密，嵌入式软件产业发展迅猛。本信公司牵头承担了中央引导地方科技发展专项项目“5G 无人行车网关设备”及辽宁省科学技术计划项目“冶金工业互联网关键技术和终端研发及应用”两个省级项目。

### 3. 沈阳铝镁设计研究院有限公司（有色冶金行业应用场景集成单位）

项目参与单位沈阳铝镁设计研究院有限公司，为有色冶金应用场景的集成应用牵头单位。沈阳铝镁设计研究院有限公司是一家集科技研发、工程咨询、工程设计、节能环保设备、智能化控制、工程总承包于一体的国际工程公司。始建于 1951 年，隶属于世界 500 强企业中国铝业集团有限公司，是中铝国际工程股份有限公司的成员企业，是国家最早建立的大型综合性甲级设计研究单位，是全国勘察设计综合实力百强单位，是国家级“守合同、重信用”单位。公司拥有先进的工程技术中心和产业化基地，建有“国家级铝工业节能环保技术工程研究中心”和 6 个省部级工程技术研究中心。公司获得国家、省、部级科技进步奖、优秀工程设计咨询奖 500 余项，拥有有效专利 550 余件，国际专利 120 余件次，主编或参编国家和行业标准 15 项。公司高端人才汇集，拥有全国有色金属行业工程勘察设计大师 8 人，中铝集团首席工程师 2 人，享受国务院津贴专家 22 人，辽宁省工程设计大师 2 人；拥有研究生以上学历 217 人，国家各类注册工程师执业资格 184 人。公司坚持科技引领发展之路，专注铝行业的工艺技术、工程设计、节能环保和智能控制装备的研究与开发，主体工艺技术处于国内领先、国际先进水平。近年来，公司为了推动铝冶炼行业智能化改造和数

数字化转型，以“机器换人、数据换脑”为出发点，全面提升设计、生产、管理等各环节的智能化水平，在自动化仪表选型，PLC/DCS 控制系统设计、现场控制系统的软件编程调试、车间级 APC/RTO 软件，铝行业 MES 系统等方面加大研发投入，形成了一批有代表性的智能制造成果，极大的促进了铝冶炼行业智能制造水平的提升。

近年来沈阳铝镁设计研究院有限公司完成了国内外多项铝冶炼生产企业设计任务，并在新建企业配置先进的智能制造系统，情况如下：

□ 近年SY600电解槽业绩					
序号	投资方	地区	槽台数	产能 (kt)	服务范围
1	中铝连城分公司	中国	12		设计
2	山东信发铝业公司	中国	636	1000	设计+供货
3	包铝华三项目	中国		420	设计+供货
4	中铝青海分公司项目	中国		500	设计+供货

□ 近年SY500电解槽业绩					
序号	投资方	地区	槽台数	产能 (kt)	服务范围
1	甘肃连城电铝业公司	中国	288	388	EPC
2	甘肃酒钢集团	中国	336x4	453x4	设计
3	新疆神火煤电集团	中国	332	430	设计
4	新疆农六师	中国	368x2	496x2	设计+供货
5	新疆东方希望	中国	330x2	440x2	设计
			372x2	500x2	

□ 近年SY500电解槽业绩

序号	投资方	地区	槽台数	产能 (kt)	服务范围	序号	投资方	地区	槽台数	产能(kt)	服务范围
6	新疆嘉润集团	中国	336x2	453x2	设计+供货	14	内蒙古蒙泰铝业公司	中国	368	496	技术许可+设计+供货
7	内蒙古锦联铝业公司	中国	360X2	976	设计	15	内蒙古创源金属公司	中国	336	453	技术许可+E
8	营口忠旺铝业公司	中国	320	431	设计	16	中铝华润铝厂	SY500	368	496	EPC (包括技术许可)
9	华云铝厂	中国	342	460	设计+供货	17	华云铝厂	SY500	342	460	技术许可+E
11	营口忠旺铝业公司	中国	336	448	设计+供货	18	中铝云南文山铝厂	SY500	368	496	技术许可+EPC
12	中铝华润吕梁项目	中国	368		EPC	19	内蒙古白音华铝厂	SY500	300	405	EPC (包括技术许可)
13	华云铝厂	中国	342	460	技术许可+设计+供货	20	云南其亚铝厂	SY500	240	330	技术许可+E

□ 近年SY400电解槽业绩

序号	投资方	地区	槽台数	产能(kt)	服务范围	序号	投资方	地区	槽台数	产能(kt)	服务范围
1	内蒙古壹煤鸿骏铝业公司	中国	328	350	E	9	新疆天龙矿业公司	中国	192	206	设计+供货
2	青海鑫业电解铝厂	中国	276	300	E	10	新疆神火煤电公司	中国	336	362	E
3	河南万基铝业公司	中国	198	210	E	11	马来西亚民都鲁铝厂	马来西亚	300	323	设计+供货
4	陕县恒康铝业公司	中国	220	230	E	12	青海鑫恒铝厂	中国	2x312	674	E
5	内蒙古东方希望铝业公司	中国	294	316	E	13	内蒙古大唐集团	中国	210		EPC
6	新疆农六师	中国	336	361	设计+供货	14	内蒙古华云二期	中国	264	280	设计+供货
7	甘肃陇西东兴铝业公司	中国	228	246	设计+供货	15	重庆国丰项目	中国	192	200	E
8	陕西榆林铝业公司	中国	2x288	620	设计+供货	16	兰州铝厂	中国	288	290	EPC

丰富业绩

氧化铝业绩

序号	项目名称	业主或建设地	单线产能 (kt/a)	设计产能 (kt/a)	设计年度	备注
1	印尼博萨达铝业西加里曼丹氧化铝项目	印尼	1000	1000	2015	三水铝石, 低温拜耳法
2	牙买加氧化铝项目	牙买加	1000	2000	2016	三水铝石, 高温拜耳法
3	中铝港口氧化铝项目	河北	1000	4000	2016	三水铝石, 低温拜耳法
4	越南林同氧化铝项目二期工程	越南	1000	1000	2017	三水铝石, 低温拜耳法
5	阿联酋铝业200万吨氧化铝项目	阿联酋EGA集团	1000	2000	2018	三水铝石, 低温拜耳法
6	河北曹妃甸360万吨氧化铝项目	高朗铝材河北有限公司	1200	3600	2018	三水铝石, 低温拜耳法
7	柬埔寨铝业集团公司氧化铝项目	柬埔寨铝业集团	1600	6400	2019	三水铝石, 低温拜耳法
8	华蒙铝业有限公司200万吨氧化铝项目	华蒙铝业	1000	2000	2019	三水铝石, 低温拜耳法
9	加纳1600kt/a氧化铝项目	博赛集团	800	1600	2019	三水铝石, 低温拜耳法
10	中铝北方港口项目	中国铝业公司	1000	4000	2020	几内亚矿石, 低温拜耳法

丰富业绩

氧化铝业绩

序号	项目名称	业主或建设地	单线产能 (kt/a)	设计产能 (kt/a)	设计年度	备注
1	中国铝业中州分公司冶金级氧化铝项目	中州铝业	500	500	2015	一水硬铝石, 高温拜耳法
2	中铝山西铝循环产业吕梁基地氧化铝项目	中铝华兴铝业公司	1000	1000	2016	一水硬铝石, 高温拜耳法
3	山西兴华铝基新材料项目二期工程	兴华科技	550	550	2017	一水硬铝石, 高温拜耳法
4	中铝河南分公司氧化铝升级改造项目	中铝河南分公司	1000	1960	2017	一水硬铝石, 高温拜耳法
5	山西孝义信发氧化铝	山东信发集团	1200	2400	2017	一水硬铝石, 高温拜耳法
6	国电投山西铝业公司	国电投集团	300	300	2017	一水硬铝石, 串联法扩建
7	中州铝业公司8万吨/年高白氢氧化铝项目	中州铝业公司	80	80	2018	一水硬铝石, 烧结法
8	东方希望三门峡铝业公司	东方希望集团	800	2400	2018	一水硬铝石, 烧结法
9	山西强锦铝业公司	泰兴集团	1200	1200	2018	一水硬铝石, 高温拜耳法
10	山西道尔铝业有限公司氧化铝项目	山西道尔集团	1200	1200	2018	一水硬铝石, 高温拜耳法
11	营口中南山氧化铝有限公司氧化铝项目	博赛集团	1250	2500	2018	三水铝石, 低温拜耳法
12	赤峰启辉铝业公司	锦国投集团	1300	6500	2020	三水铝石, 高、低温拜耳法

丰富业绩

主要智能化项目业绩

No	时间	项目名称	主要实施内容
1	2024	中铝青海分公司600KA电解铝全厂数据三维展示项目	数字孪生
2	2024	内蒙古华云新材料有限公司全厂数据分析项目	数字孪生
3	2024	中铝青海分公司600KA电解铝谐波治理项目	谐波治理
4	2023	内蒙古华云新材料有限公司三期谐波治理项目	谐波治理
5	2023	新增400kA系列电解槽短路口异常自诊断及连锁保护系统	槽控保护
6	2023	新增350kA系列电解槽短路口异常自诊断及连锁保护系统	槽控保护
7	2023	中铝国际印尼1000Kt/a氧化铝全厂自控电信专业设备	全厂网络, 自控
8	2024	青铜峡铝业分公司350KA系列氧化铝系统EPC改造项目	自控
9	2024	300kA电解系列短路口自诊断智能快切技术研究与应用	槽控保护
10	2022	霍煤鸿骏电源维修项目物资采购	槽控
11	2022	意大利Porto Vesme复产项目PLC控制系统	全厂自控
12	2022	广西来宾银海铝业330KA电解槽自控系统项目	电解槽控
13	2022	广西百色银海铝业槽控系统项目	电解槽控
14	2021	内蒙古霍煤鸿骏铝电有限责任公司电解槽技改项目铝电解槽控系统	电解槽控
15	2021	重庆九龙万博4000t/d气态悬浮焙烧炉DCS系统	焙烧控制
16	2021	霍煤阳极集中监控系统改造(一二期)	组装集控

丰富业绩		主要智能化项目业绩	
No	时间	项目名称	主要实施内容
17	2021	内蒙古华云电解二厂槽控机升级项目	电解槽控
18	2021	包头铝业电解三厂槽控机升级项目	电解槽控
19	2021	霍煤阳极集中监控系统改造（三期）	组装集控
20	2021	电解厂数据保障系统维修合同项目	数据分析
21	2021	青海海源绿能铝业公司电解槽分类评判系统、智能评判系统项目	智能决策
22	2021	青铜峡铝业公司阳极MES系统研制与开发项目	MES系统
23	2020	辽宁霍煤炭素自控工程项目	全厂自控
24	2020	广西华昇新材料3500t/d氢氧化铝气态悬浮焙烧炉控制系统	焙烧控制
25	2020	内蒙古白音华煤电一期自控系统及仪表项目	全厂自控
26	2020	内蒙古白音华煤电一期电信系统项目	全厂网络
27	2020	云南文山铝业500KA铝电解计算机控制系统项目	电解槽控
28	2020	赤峰启辉铝业发展有限公司氧化铝项目智能管理平台初步设计合同	氧化铝智能化
29	2020	内蒙古华云新材料有限公司智能工厂项目质量管理体系升级	质量管理
30	2020	云南文山铝业有限公司绿色低碳水电铝材一体化项目集控优化、信息集成平台	全厂信息集成
31	2019	内蒙古锡林郭勒白音华煤电有限责任公司高清铝板带产品项目一期建设工程全厂管理信息系统	MES系统
32	2018	山西中铝华润有限公司吕梁轻合金循环产业基地一期50万吨铝合金项目（轻合金部分）MES系统	MES系统

## 五、 申请人基础条件（包括主要研究成果）

### 1. 张晓玲（项目负责人，任务2负责人，沈阳工业大学）

张晓玲，女，1982年出生，博士，教授，沈阳工业大学人工智能学院副院长，沈阳市工业智能芯片及网络系统创新应用实验室主任，AII汽车智能技术创新应用实验室副主任、物模型特设组副主席等。担任科技部2021-2035中长期战略规划组成员；担任国际电工委员IEC/TC65 WG22、WG23、WG16工业无线、可靠性等标准工作组委员；IEC SyC COMM工业5G国际标准工作组委员，国家标准委员会工业测控TC124委员会SC4委员；科技部“制造基础技术与关键部件”重点专项核心专家库专家，工信部流程工业领域专家，辽宁省优秀专家、辽宁省工业互联网专家，沈阳市智能制造专家，华为最有价值

专家 MVP，华为开发者布道师、海尔/东土等高级技术和标准顾问等。

主要方向包括工业人工智能技术、智能制造技术标准化，研究领域覆盖钢铁、有色冶金、智能汽车、智慧矿山等。作为项目负责人和主要人员，承担国家重点研发计划、国家自然科学基金等国家级项目 8 项，中国科学院先导项目、工信部重点项目等省部级项目 30 余项，企业横向项目 10 余项。承担中国工程院工业互联网高质量发展重大咨询项目和重点咨询项目 2 项。牵头制定和重点参与智能制造与工业互联网领域国际标准、国家标准以及行业 50 余部，发表论文 40 余篇，授权国际专利 7 项，授权国家专利 50 余项，软著 5 项，白皮书 5 部。特别是牵头制定了工业互联网领域第一项国际标准 *IEC 63441-2022: New Functional Architecture of Industrial Internet System for Industrial Automation Applications* (中文：面向工业自动化应用的工业互联网系统功能框架)，目前正在联合牵头制定工业 5G 国际标准，相关成果得到新华网、辽宁省人民政府、辽宁省教育厅、辽宁日报等重要媒体报导。

近五年主持的项目清单包括：

起止时间	项目性质和来源	经费 总额 (万元)	参与 人数	申报人的具体职位 和任务

2025.10-2028.09	国家科技重大专项“10Mbps级长距离低功耗物理层终端和交换机芯片研制及验证”	57	144	任务负责人，负责芯片功能与性能参数测试方法与工具
2025.04-2027.05	国家重点研发计划“新一代工业网络国际标准关键技术国际标准研制”	15	11	任务执行负责人，负责新一代工业网络应用验证平台研制。
2023.01-2025.12	国家重点研发计划（政府间国际科技创新合作）“面向可持续发展的能源与资源效率提升方法研究及系统开发”	85	19	课题负责人，负责面向可持续制造的能源和资源信息系统研发
2023.01-2025.12	国家重点研发计划“典型高端装备制造业技术研究与国际标准研制”	20	4	任务负责人，负责智能制造新技术应用国际标准技术研究
2023.01-2025.12	辽宁省“智造强省”创新与平台建设-（三）标准修订—“国际标准 IEC 63441-2022 面向工业自动化应用的工业互联网系统功能框架”	100	15	项目负责人，负责标准化制定和应用实施
2024.01-2025.12	辽宁省智造强省-标准化补贴-国家标准 GB/T 41771.7：现场设备集成 第 7 部分：通信设	50	15	项目负责人，负责标准化制定和应用实施

	备			
2025.01-2025.12	2024 年沈阳市标准化建设专项资金（第一批）项目资金-现场设备集成 第 7 部分：通信设备	8.25	10	项目负责人，负责标准化制定和应用实施
2025.01-2025.12	2024 年沈阳市标准化建设专项资金（第一批）项目资金-工业通信网络 现场总线规范 第 3-28 部分:AUTBUS 数据链路层服务定义（IEC 61158-3-28:2023）	7.95	6	项目负责人，负责标准化制定和应用实施
2025.01-2025.12	2024 年沈阳市标准化建设专项资金（第一批）项目资金-工业通信网络 现场总线规范 第 4-28 部分:AUTBUS 数据链路层协议规范	7.95	6	项目负责人，负责标准化制定和应用实施
2025.01-2025.12	2024 年沈阳市标准化建设专项资金（第一批）项目资金-工业通信网络 现场总线规范 第 5-28 部分:AUTBUS 数据应用层服务定义（IEC	7.95	6	项目负责人，负责标准化制定和应用实施

	61158-5-28:2023)			
2025.01-2025.12	2024 年沈阳市标准化建设专项资金（第一批）项目资金-工业通信网络 现场总线规范第 6-28 部分:AUTBUS 应用层协议规范	7.95	6	项目负责人，负责标准化制定和应用实施
2025.01-2025.12	2024 年沈阳市标准化建设专项资金（第一批）项目资金-工业网络行规 第 1-22 部分:现场总线行规 CPF22(接触61784-1-22:2023)	7.95	15	项目负责人，负责标准化制定和应用实施
2025.01-2025.12	2024 年沈阳市标准化建设专项资金（第一批）项目资金-大规模个性化定制价值链管理 第 1 部分：框架	7.95	6	项目负责人，负责标准化制定和应用实施
2024.08-2025.07	辽宁省教育厅科技创新团队-领军人才团队-工业智能芯片与网络系统创新团队	10	6	项目负责人，负责创新团队技术研发和团队建设
2024.12-2025.06	企业横向项目“时间敏感网络控制系统测试服务”	45	12	项目负责人，负责AUTBUS 测试平台建设和测试服务

2023.01-2024.12	沈阳市创新平台项目-标准化 补贴项目-“国际标准 IEC 63441-2022 面向工业自动化 应用的工业互联网系统功能 框架	19.35	15	项目负责人，负责标 准化制定和应用实 施
2023.10-2024.10	企业横向项目“数据总线标准 和一致性测试标准制定”	12	7	项目负责人，负责标 准制定服务
2022.09-2024.08	辽宁省应用基础研究计划项 目“数据驱动的智慧铸造工业 基础软件关键技术研究”	30	8	项目负责人，负责数 据驱动的智慧铸造 工业基础软件关键 技术研究
2019.01-2022.12	国家重点研发计划“工业通信 线路关键指标测量”	408	14	课题负责人，负责工 业通信线路反射信 号和线路阻抗测量
2022.01-2022.12	企业横向项目“煤矿唯一性安 全检测系统”	49	3	项目负责人，重点负 责智慧煤矿唯一性 安全检测系统实施
2022.07-2022.12	企业横向项目“安全驾驶场景 下基于 AUTBUS 芯片的智能 汽车预测追溯系统”	8	4	项目负责人，负责 AUTBUS 芯片应用
2020.01-2024.12	国家自然科学基金重大项目	640	8	骨干人员，负责智能

	61991404“重大耗能设备智能系统研发与关键技术验证”			传输系统及装置研发
2019.01-2021.12	中国工程院重大战略咨询项目 2019-ZD-12“工业互联网创新发展路径研究”	800	129	骨干人员，负责工业互联网网络系统研究
2019.06-2019.12	中国工程院咨询研究项目重点项目“工业互联网高质量发展模式与路径研究”	80	41	项目研究助理，负责工业智能网络系统发展路径研究
2018.01-2020.12	教育部东北大学重点项目“隐式信息交互下的异构共存网络协调方法研究”	40	5	项目负责人，重点负责研究网络状态较差情况下的通信资源分配方法、共存装置和算法验证平台研制
2017.08-2019.12	工信部智能制造标准化与新模式专项“面向铝冶炼行业的智能工厂通用模型标准研究与验证”	1200	21	项目执行负责人，信息模型标准化及标准验证平台研制

项目负责人牵头以及重点参与制定的标准清单包括：

表 5-1 牵头制定的国际标准和国家标准

序号	标准名称	类别	批准单位	获批时间
----	------	----	------	------

1	Industrial Networks – 5G communication technology – General considerations 工业网络 5G 通信技术 通用要求	IEC 国际 标准	IEC 国际电 工委员会	2025.09
2	Industrial Networks –5G communication technology -Part 1: Terms, definitions and fundamentals 工业网络 5G 通信技术 第 1 部分:术语、 定义和基本原理	IEC 国际 标准	IEC 国际电 工委员会	2025 立项
3	数字化车间 通用技术要求	IEC 国际标 准(国家标准 转)	IEC 国际电 工委员会	2025 立项
4	智能工厂 工业控制异常监测工具技术 要求	IEC 国际标 准(国家标准 转)	IEC 国际电 工委员会	2025 立项
5	基于蜂窝网络的工业无线通信规范 第 1 部分 通用技术要求	IEC 国际标 准(国家标准 转)	IEC 国际电 工委员会	2025 立项
6	用于工业自动化的工业互联网系统功 能架构	国家标准	国家市场监 督管理总局 国家标准化 管理委员会	2025 立项
7	工业互联网 氧化铝智能工厂 信息模型	行业标准	国家工业和 信息化部	2025 立项

8	GB/T 32235.2-2024 工业过程测量、控制和自动化 数字工厂框架 第2部分：模型元素	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化 管理委员会	2024.08
9	GB/T 41771.7-2023 现场设备集成 第7部分：通信设备	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化 管理委员会	2023.12
10	IEC PAS 62441-2022: New Functional Architecture of Industrial Internet System for Industrial Automation Applications 用于工业自动化的工业互联网系统功能架构	IEC 国际 标准	IEC 国际电 工委员会	2022.10

表 5-2 重点参与制定的国际标准和国家标准

序号	标准名称	类别	批准单位	获批时间
1	GB/T 25105.1-2025 工业通信网络 现场总线规范 类型 10: PROFINET IO 规范 第 1 部分：应用层服务定义	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管 理委员会	2025.04
2	GB/T 25105.3-2025 工业通信网络 现场总线规范 类型 10:PROFINET	国家标准	国家市场监督管理总局	2025.04

	IO 规范 第 3 部分:PROFINET IO 通信行规		国家标准化管理委员会	
3	GB/T 25105.2-2025 工业通信网络现场总线规范 类型 10: PROFINET IO 规范 第 2 部分:应用层协议规范	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2025.04
4	GB/T 45511-2025 工业现场通信质量检测 通用技术规范	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2025.03
5	GB/T 45510-2025 边缘智能仪表通用要求	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2025.03
6	GB/T 45508-2025 机器可读标准能力等级模型与评估	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2025.03
7	GB/T 41771.6-2025 现场设备集成 第 6 部分:技术映射	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管	2025.03

			理委员会	
8	GB/T 44880-2024 因果矩阵	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2024.10
9	GB/T 32235.1-2024 工业过程测量、控制和自动化 数字工厂框架 第1部分：通用要求	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2024.08
10	GB/T 44452-2024 工业过程测量控制和自动化 系统和部件的生命周期管理	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2024.09
11	GB/T 42126.5-2024 基于蜂窝网络的工业无线通信规范 第5部分：应用要求	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2024.04
12	IEC 63283-4:2023 INDUSTRIAL-PROCESS MEASUREMENT, CONTROL AND AUTOMATION – SMART MANUFACTURING – NEW TECHNOLOGIES USED IN SMART MANUFACTURING	国际标准 (第2单位参与制定)	IEC 国际电工委员会 国家市场监督管理总局	2023.04

13	IEC 61158-3-28:2023 工业通信网络现场总线规范第3-28部分：AUTBUS数据链路层服务定义类型28	国际标准 (第3单位参与制定)	IEC 国际电工委员会 国家市场监督管理总局 英国标准协会	2023.04
14	IEC 61158-4-28:2023 工业通信网络现场总线规范第4-28部分：AUTBUS数据链路层协议规范类型28	国际标准 (第3单位参与制定)	IEC 国际电工委员会 国家市场监督管理总局 英国标准协会	2023.04
15	IEC 61158-5-28:2023 工业通信网络现场总线规范第5-28部分：AUTBUS应用层服务定义类型28	国际标准 (第3单位参与制定)	IEC 国际电工委员会 国家市场监督管理总局	2023.04
16	IEC 61158-6-28:2023 工业通信网络现场总线规范第6-28部分：AUTBUS应用层协议规范类型28	国际标准 (第3单位参与制定)	IEC 国际电工委员会 国家市场监督管理总局	2023.04
17	IEC 61784-1-22:2023 工业网络行规第1-22部分：现场总线行规 CPF22	国际标准 (第3单位参与制定)	IEC 国际电工委员会	2023.04

		参与制定)	国家市场监督 管理总局	
18	IEC 61158-1 : Industrial communication networks - Fieldbus specifications - Part 1: Overview and guidance for the IEC 61158 and IEC 61784 series	国际标准 (参与制定)	IEC 国际电工 委员会 国家市场监督 管理总局	2023.02
19	IEC 61158-2 : Industrial communication networks - Fieldbus specifications - Part 2: Physical layer specification and service definition	国际标准 (参与制定)	IEC 国际电工 委员会 国家市场监督 管理总局	2023.02
20	IEC 61158-X-28 : Industrial communication networks - Fieldbus specifications and Profiles - Type 28 elements	国际标准 (参与制定)	IEC 国际电工 委员会 国家市场监督 管理总局	2023.02
21	ISO 24644-1:2023 Mass customization value chain management —Part 1:Framework	国际标准 (第四单位参与制定)	国际标准化组织 (ISO) 国家市场监督 管理总局	2023.09
22	GB/T 42019-2022: 基于时间敏感技术的宽带工业总线 AUTBUS 系统架构与通信规范	国家标准	国家市场监督 管理总局 国家标准化管	2022.10

			理委员会	
23	GB/Z 42023.2-2022: 工业自动化设备和系统的可靠性 第2部分: 系统可靠性	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2022.10
24	GB/Z 42023.1-2023 工业自动化设备和系统可靠性 第1部分: 自动化设备可靠性数据保证及其来源规范	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2023.11
25	GB/T 42383.1-2023: 智能制造网络协同设计 第1部分 通用要求	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2023.03
26	GB/T 42383.2-2023: 智能制造网络协同设计 第2部分 软件接口和数据交互	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2023.03
27	GB/T 42383.4-2023: 智能制造网络协同设计 第4部分 面向全生命周期设计要求	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2023.03

28	GB/T 42383.5-2023: 智能制造 网络协同设计 第 5 部分 多学科协同仿真	国家标准	国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会	2023.03
----	---	------	--------------------------	---------

## 2. 陆军（任务 1 负责人，沈阳工业大学）

沈阳工业大学讲师，沈阳市领军人才，东北大学控制理论与控制工程博士、计算机科学与技术博士后，长期从事神经网络、集成学习、贝叶斯学习、鲁棒建模方法及其工业应用研究。作为负责人主持国家自然科学基金青年项目 1 项、国家自然科学基金重大项目子课题 1 项、中国博士后科学基金特别资助项目 1 项、辽宁省科技计划联合计划（自然科学基金面上项目）1 项、全国重点实验室开放课题 1 项、教育部重点实验室开放基金项目 1 项，作为骨干参与国家重点研发计划项目 1 项。相关研究成果在 IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems、IEEE Transactions on Industrial Informatics、IEEE Transactions on Fuzzy Systems、IEEE Transactions on Automation Science and Engineering、Journal of Process Control、Information Sciences、Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems、《控制理论与应用》、IFAC ADCHEM 等国际/国内重要学术期刊和学术会议上发表论文 20 余篇，1 篇论文获第 5 届 IFAC 采矿、矿物与金属加工国际会议(IFAC

MMM 2018)青年作者奖提名(Young Author Award Finalist), 1 篇论文获第 4 届数据驱动的复杂系统优化国际会议(DOCS 2022)最佳论文奖(Best Paper Award)。获辽宁省自然科学奖一等奖 1 项(排名第 4)。作为主要起草人参与制定国家标准 1 项, 授权国家发明专利 2 项。

### 3. 翟美娜(任务 1 联合负责人, 沈阳工业大学)

翟美娜, 沈阳工业大学工业智能专业讲师, 师从沈阳工业大学副校长、国家“万人计划”领军人才孙秋野教授。研究方向聚焦能源互联网领域, 提出了一系列创新的能源互联网模型构建和主动安全控制方法。申请人先后主持国家自然科学基金青年科学基金项目(30 万元, 62403331)、国家电网有限公司科学技术项目(57.55 万元, SGLNHL00KSJS2 501289)、辽宁省科技计划联合计划项目面上项目及辽宁省教育厅基本科研项目青年项目; 作为第一参与者参与国家自然科学基金重点项目(2/10, 232 万元, 62433013); 主持/参与国家自然科学基金等纵向及横向科研项目 10 余项。已发表 SCI 论文 16 篇, 其中第一作者/通讯作者发表 JCR Q1 论文 9 篇(影响因子 79.318)。其中 8 篇论文以第一作者发表于 IEEE Transactions on Cybernetics(中科院一区 TOP), IEEE Transactions on Industrial Informatics(中科院一区 TOP), IEEE Transactions on Automation Science and Engineering(2 篇, 中科院一区 TOP),

IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica (中科院一区 TOP) ,  
IEEE Transactions on Network Science and Engineering (中科院  
一区) 等行业内 Top 期刊; 另以通讯作者在 Neurocomputing  
(中科院二区 TOP) 发表 1 篇论文。出版能源互联网领域英  
文专著 1 部, 申请/授权国内发明专利及软著 3 项, 获 2024 年  
IEEE EI2 最佳论文奖。

#### **4. 孙闻初 (任务 3 负责人, 本溪钢铁 (集团) 信息自动 化有限责任公司)**

孙闻初, 男, 汉族, 1985 年 3 月 9 日出生。现任本溪钢  
铁 (集团) 信息自动化有限责任公司总经理、正高级工程师。  
牵头钢铁领域重要工程项目 20 余项, 主要负责计算机网络、  
网络安全、工业软件领域的研发和应用部署。在专业领域方面,  
他积极参与行业标准化工作, 现任 WG28 国际标准国内专家  
组成员及 CISASWG1-2025 工业软件标准化工作组成员。基于  
其在专业领域的突出贡献, 于 2023 年获评本溪市“山城英才”  
荣誉称号。

#### **5. 马恩杰 (任务 4 负责人, 沈阳铝镁设计院有限公司)**

马恩杰, 男, 汉族, 1976 年出生, 中共党员, 博士研究  
生学历, 教授级高工, 沈阳铝镁设计研究院有限公司副总工程  
师, 首席研究员, 中铝集团钻石人才, 兼任中国有色金属建设  
协会数字智能建造分会副理事长, 武汉大学, 东北大学, 辽宁

工业大学研究生兼职导师，辽宁省优秀共产党员，沈阳市优秀市优秀共产党员，沈阳市五一劳动奖章获得者，沈阳市战略性新兴产业专家、沈阳市数字经济领域专家。

主要研究方向为铝冶炼行业智能制造，近年来主持完成了《内蒙古华云新材料有限公司三期 42 万吨轻合金材料项目》，《中国铝业青海分公司 600kA 电解槽产能置换升级项目》，《内蒙古霍煤鸿骏扎哈淖尔铝合金续建二期工程》，《赤峰启辉铝业发展有限公司氧化铝项目》等十几项国内外铝冶炼行业重大工程项目智能制造总体规划；主持完成了《营口忠旺铝业有限公司 MES 项目》，《山西中润铝业有限公司生产管理系统项目》，《内蒙古白音华铝业 MES 系统》，《云南文山铝业全厂信息集成平台》，《内蒙古包头铝业智能工厂》，《青铜峡铝业有限公司阳极 MES》等十余项行业重大智能制造相关项目，获得授权专利 16 项（含国际 6 项），软件著作权 18 项，获得中国有色金属协会科技技术一等奖（排名第一）1 项，二等奖 2 项（分别排名第一，第二），发表学术论文 20 篇。

#### 1.主持或参与科研项目：

（1）工信部《中国制造 2025——有色金属工业核心领域技术规划及智能化工厂框架设计（有色轻金属冶金方面）》分项负责人；

（2）《串联法氧化铝厂的全流程智能生产控制》，沈阳

铝镁设计研究院有限公司重点科技项目，2014年，主持。

(3) 《基于全价值链信息集成的云端铝厂MES系统》沈阳市科技局科技攻关项目，2016年，执行负责人。

(4) 《构建数字化电解铝厂》等，2023年，中铝国际工程股份公司重点研发计划，项目负责人。

## 2.获得的授权专利情况：

(1) ZL 202111599250.8 一种铝用炭素企业信息集成平台数据的处理系统 发明专利 中国

(2) ZL 2012 1 0492069.1 一种电解铝厂制造执行系统软件开发支持系统 发明专利 中国

(3) ZL 2012 10129285.X 磨矿控制案例的智能提取方法 发明专利 中国

(4) ZL 2013 1 0660732.9 阳极碳块堆垛天车自动定位方法及系统 发明专利 中国

(5) ZL 2016 10904537.X 一种电解铝全生命周期的管理方法 发明专利 中国

(6) ZL 2011 1 0109896.3 利用阳极导杆等距压降预测阳极效应的方法 发明专利 中国

(7) ZL 2011 1 0109898.2 阳极效应抑制与熄灭的方法 发明专利 中国

(8) ZL 2012 1 0491981.5 一种针对电解铝厂能源管理的

控制系统 发明专利 中国

( 9 ) ZL 2012 1 0491981.5 一种针对电解铝厂设备管理过程的控制系统 发明专利 中国

( 10 ) ZL 2011 1 01805288 铝电解槽下料器单点控制下料方法 发明专利 中国

( 11 ) ZL 2011 1 01097621 在线测量铝电解槽阳极电流分布的装置 发明专利 中国

( 12 ) A METHOD USING ANODE ROD EQUIDISTANT VOLTAGE DROP TO PREDICT ANODE EFFECT CA2834292 发明专利 加拿大

( 13 ) ALUMINUM ELECTROLYSIS PLANT-WIDE CONTROL SYSTEM 1DP000069249 发明专利 印度尼西亚

( 14 ) METHOD FOR ON-LINE MEASURING ANODA CURRENT DISTRIBUTION OF ALUMINUM ELCTROLYTIC CELL IDP000052651 发明专利 印度尼西亚

( 15 ) Anot cubuguyla eait mesafede voltaj dususu kullanilarak anot etkisini tahmin etmeye yonelik bir yonterm TR2013 12452 发明专利 土耳其

( 16 ) METODE PENGUMPANAN BERBASIS KONTROL TITIK-TUNGGAL UNTUK PENGUMPAN SEL

REDUKSI ALUMINIUM      IDP000061066      发明专利  
印度尼西亚

(17) A METHOD USING ANODE ROD EQUIDISTANT  
VOLTAGE DROP TO PREDICT ANODE EFFECT  
IDP000057017      发明专利      印度尼西亚

### 3.代表性论文:

(1) 电解铝厂制造执行系统的开发与应用 ,有色冶金设计与研究, ISSN 1004-4345, CN36-1111/TF 马恩杰 2016

(2) 电解铝厂制造执行系统 SmelterStar 的研究与发展, 第四届中国铝工业科学技术发展大会, 三门峡, 马恩杰 2016

(3) Research of the Smart Aluminum Factory Architecture Based on the Whole Value Chain of Information Integration , IBAAS 2015, Ma enjie 2015

(4) 串联法氧化铝厂全流程智能生产控制系统的研发, 轻金属, CN21-1217/TG,2105.1,p54~58, 马恩杰, 2015

## 六、 进度安排和实施方案 (包括运行机制)

本项目拟采用“统筹规划、分层协同、迭代交付”的管理机制。设立项目管理办公室,由沈阳工业大学牵头,每月召开工作例会,每季度进行技术评审。建立数据共享与算法开发平

台，实现多方协同研发。成立由行业专家组成的技术委员会，对关键技术路线和示范应用方案进行指导。建立严格的质量管控和风险应对机制，确保项目按期高质量完成。

具体进度安排和工作计划如表 3 所示。

表 3 进度安排和实施方案

预计开始时间	预计结束时间	工作要点	预期成果
2026.01.01	2026.06.30	完成多模态数据资源全面盘点，制定钢铁与有色冶金行业数据治理标准规范。研究流程工业知识图谱统一构建方法，设计“设备-工艺-质量-能耗”五流耦合的知识表示框架。搭建基础开发环境，准备预训练所需的基础软硬件资源。	形成《流程工业多模态数据治理白皮书》初稿，确立数据清洗、标注与融合的标准规范。完成知识图谱构建方法论设计，构建包含至少 3 个关键工序的图谱原型，实体关系数量达到 3 万条。完成 5TB 多模态语料库的初步采集与整理。
2026.07.01	2026.12.31	完善知识图谱模式设计，开展大规模知识抽取与融合，完成钢铁炼钢、热轧及有色电解铝等关键工序的知识图谱构建。持续推进多模态语料库建设，完成跨模态关联标注。开始行业基础大模型的预训练，研究多模态数据对齐方法。	完成覆盖钢铁、有色冶金 2 个行业 3 个关键工序的知识图谱，实体关系数量达到 10 万条要求。建成总量 10TB 的高质量多模态领域语料库。完成行业基础大模型（Base Model）的初步训练，产出知识图谱构建方法文档。
2027.01.01	2027.06.30	深入开展知识增强的多模态大模型关键技术攻关，重点研发多模态融合、知识检索增强及图谱引导推理等核心算法。构建“流程工业知识增强多模态大模型应用平台”原型系统，集成训练好的基础模型，提供基础的模型服务和知识检索功能。	完成“知识增强的多模态融合”、“图谱引导推理”核心算法工具包开发。平台原型系统上线，支持基本的模型服务和知识检索。完成轻量化部署技术的初步研究，在测试环境中关键响应时间优化至 800ms 以内。

2027.07.01	2027.12.31	优化核心算法性能，完善平台功能，重点提升人机交互体验。深入研究模型轻量化、微调及压缩技术，形成适用于钢铁和有色冶金生产现场的部署方案。在实验环境中对优化后的模型和平台进行充分测试与验证。	平台功能趋于稳定，核心算法工具包优化升级。完成轻量化模型版本的开发，在特定硬件上关键响应时间达到<500ms的要求。形成针对两个行业的、完整的模型高效微调与部署技术方案。
2028.01.01	2028.06.30	在合作钢铁企业和有色冶金企业选定产线进行系统部署，开展工业软件智能体的集成与调试。启动为期6个月的示范运行，收集系统运行数据，同步进行初步的技术经济性评估。根据现场反馈持续优化系统性能。	在钢铁行业完成故障诊断、工艺优化等典型场景的工业软件智能体部署与系统集成。在有色冶金行业完成原料制备、电解工艺等场景的智能体部署与系统集成。形成初步的示范应用报告，验证系统在真实工业环境中的可行性。
2028.07.01	2028.12.31	完成示范运行的全面评估，系统分析技术指标(模型准确率、响应时间等)和经济指标(质量提升、能耗降低、效率提升等)。总结示范经验，深入分析投资回报率。研究并提出在钢铁和有色冶金行业大规模复制推广的商业化模式与路径。整理全部项目成果，准备最终验收。	提交完整的《技术经济性分析报告》，量化验证关键指标提升。提出两个行业可行的商业化模式与推广方案建议书。完成所有示范应用报告的编制，准备项目结题所需的全部文档、系统及算法工具包。

## 七、 预期成果和考核指标

### 任务 1：流程工业多模态数据治理与知识体系构建

交付成果包括：

(1) 《流程工业多模态数据治理白皮书》1份

(2) 流程工业基础知识图谱统一构建方法1套；覆盖钢铁、有色冶金2个行业的不少于3个关键工序的流程工业细分知识图谱各1套，实体关系数量不少于10万条；

(3) 钢铁、有色冶金2个行业的高质量多模态领域语料库各1个，总量不低于10TB，并完成跨模态关联标注。

## **任务2：知识增强的多模态大模型关键技术和集成平台研发**

交付成果包括：

(1) 完成钢铁、有色冶金2个领域预训练的行业基础大模型（Base Model）各1个；

(2) “知识增强的多模态融合”、“图谱引导推理”等核心算法工具包2-3套；

(3) 完成轻量化部署的模型版本，在特定硬件上关键响应时间<500ms。

## **任务3：钢铁工业典型场景的知识增强多模态大模型系统集成与应用**

交付成果包括：

(1) 在钢铁行业的典型场景（如故障诊断、工艺优化）中部署端到端的工业软件智能体；

(2) 在 1-2 家大型钢铁企业完成示范应用，形成示范应用报告 2 份；

(3) 提供《技术经济性分析报告》1 份，量化验证关键指标提升；

(4) 提出钢铁行业知识增强多模态大模型系统可行的商业化模式与推广方案建议书 1 份。

#### **任务 4：有色冶金工业典型场景的知识增强多模态大模型系统集成与应用**

交付成果包括：

(1) 在有色冶金 2 个行业的典型场景（如原料制备、电解工艺优化）中部署端到端的工业软件智能体；

(2) 在 1-2 家有色冶金企业完成示范应用，形成示范应用报告 1-2 份；

(3) 提供《技术经济性分析报告》1 份，量化验证关键指标提升；

(4) 提出有色冶金行业知识增强多模态大模型系统可行的商业化模式与推广方案建议书 1 份。

### **八、推广及应用前景（预期经济社会效益）**

辽宁省作为中国重要的老工业基地，其流程工业特别是钢

铁、有色冶金产业正处在转型升级的关键阶段。当前，全省规模以上工业增加值保持增长，其中高技术制造业增速明显高于工业平均水平，表明智能化转型已成为推动产业发展的重要动力。在这一背景下，面向流程工业的知识增强多模态大模型系统集成与示范应用项目的实施，对于推动辽宁省流程工业向高端化、智能化、绿色化方向转型具有里程碑意义。本项目聚焦钢铁与有色冶金两大行业，通过构建知识增强的多模态大模型平台，深度融合人工智能技术与流程工业知识，旨在打造覆盖“设备-工艺-质量-能耗”的全流程智能化解决方案。该项目不仅能够为参与企业带来直接的经济回报，更将通过技术示范和产业扩散，为辽宁省乃至全国流程工业的智能化转型提供可复制的成功经验。

## 8.1 经济效益分析

### （1）提质增效，优化生产流程，提升产品价值

在钢铁行业，项目应用可显著提升产品质量稳定性。以鞍山钢铁为例，其应用的“精炼温控智算助手”能够精准控制炼钢过程中钢水的温度变化，以最优温度组织生产，初步测算显示，每降低 1℃ 转炉出钢温度，每年就能为企业节省千万元成本。本项目通过在全省钢铁企业推广类似应用，预计可使关键工艺参数波动方差均值降低 40% 以上，产品质量一致性显著提升，废品率降低约 15%，每年为辽宁钢铁行业创造直接经济效益

可达数亿元。

在有色冶金领域，基于大模型的智能优化系统能够实现对电解槽、沉降槽等关键设备的精准控制。据大连西太平洋石油化工有限公司的实践表明，AI优化系统投用后，优化调整效率较传统人工提升超20%。本项目在铝镁冶炼企业推广应用后，预计可使电解铝关键工序能耗降低8%，设备利用率提高12%，劳动生产率提升25%以上，显著增强企业的核心竞争力。

此外，通过大模型技术加速新材料、新工艺的研发进程，可将传统研发周期压缩，大幅降低研发试错成本，加快创新成果转化速度，为企业抢占高端产品市场创造有利条件。

## **（2）节能降耗，降低资源消耗，减少运营成本**

辽宁作为工业大省，能源消耗总量巨大，流程工业是能耗主体。本项目通过大模型优化能源调度和工艺参数，可实现显著的节能效果。以鞍钢集团为例，通过AI技术对能源消耗进行精准建模与优化控制，2024年吨钢综合能耗、万元产值综合能耗降低3.4%、9.7%。在全省范围内推广本项目技术，预计每年可节约数十万吨标准煤，减少二氧化碳排放百万吨级，同时降低原材料消耗3-5%，为企业降低运营成本。

通过大模型实现的预测性维护，可准确识别设备潜在故障，避免非计划停机。鞍钢集团的实践表明，AI技术在设备

故障诊断等场景效果显著。本项目在全省流程工业企业推广智能运维系统，预计可使设备故障预警率提升 5% 以上，维修成本降低 15%，设备综合效率提升 8%，为企业节省大量运维费用。

### **(3) 培育新业态，创造新价值，助力产业链升级**

本项目实施将催生一批专注于流程工业数字化转型的服务企业，形成新的经济增长点。以鞍钢集团为例，其已组建鞍钢数科、矿业数智 2 家专业化数字产业公司，“羽嘉平台成功入选工信部‘跨行业、跨领域’工业互联网平台名单”，AI 视觉检测、地质信息系统等软件产品成功输出，得到客户高度认可。本项目成果的推广应用，预计可在辽宁省培育数十家工业智能解决方案供应商，形成新的工业智能服务市场。

通过构建工业数据平台，还可以促进数据要素流通和价值挖掘。本钢开发的“供应链金融数据产品，在贵阳和浙江数据交易所登记，并成功创效”。本项目将推动辽宁省流程工业数据资产化进程，形成工业数据要素市场，为企业开辟新的收入来源。

## **8.2 社会效益分析**

**(1) 引领行业转型升级，重塑产业生态，带动产业范式变革**

辽宁省正在全力做好结构调整“三篇大文章”，该项目的实施将直接助力“老字号”产业智能化升级、“原字号”产业精深加工、“新字号”产业培育壮大。项目成果应用于沈阳机床、沈鼓集团等“老字号”企业，可提升其产品智能化水平和市场竞争力；应用于鞍钢、本钢等“原字号”企业，可推动其向冶金新材料领域延伸；应用于辽宁材料实验室等“新字号”研发机构，可加速新材料研发和产业化进程。这种全产业链的智能化升级，将为辽宁省构建具有特色优势的现代化产业体系提供强大技术支撑。

项目推动人工智能与传统流程工业深度融合，形成“人工智能+流程工业”的新业态。以沈阳人工智能计算中心、沈阳人工智能产业园等为核心载体，与辽宁省4个万亿级产业基地、22个重点产业集群建设紧密结合，打造“智算底座+产业赋能”的融合发展模式，为全省产业结构优化升级注入新动能。这种融合不仅发生在技术层面，更在产业组织、商业模式等领域引发深刻变革，催生共享制造、服务型制造等新业态。

此外，项目集聚沈阳工业大学等高校、本溪钢铁等企业以及沈阳铝镁设计研究院等科研机构的多方资源，构建了“政产学研金”协同创新体系。这种协同创新模式将强化辽宁省在流程工业智能化领域的技术储备和人才储备，提升区域自主创新能力。同时，项目成果可为辽宁材料实验室、沈阳材料科学国

家研究中心等科研机构提供先进的研发工具和平台,加速材料基因工程等前沿领域的创新突破。

## **(2) 构建创新体系, 优化要素配置, 培育产业生态**

项目将促进辽宁省人工智能产业生态的完善和壮大。沈阳已形成覆盖“算力供给-生态平台-产业孵化”的 AI 产业生态链,项目成果将丰富其应用场景,强化其产业带动能力。同时,项目可吸引更多 AI 算法开发、系统集成、数据服务等企业集聚辽宁,形成完整的工业智能产业链,提升产业集群竞争力。预计项目全面推广后,可带动辽宁省人工智能产业规模增长 30% 以上,培育一批专精特新中小企业,形成大中小企业融通发展的良好局面。

项目推动过程中,将形成老工匠结合新专家的人才协同模式,既发挥经验工艺师傅的工艺经验优势,又利用 AI 人才的技术专长,促进传统工匠精神与现代智能技术的完美结合。这种模式将带动辽宁省工业人才队伍结构优化,培养一批既懂工业技术又懂人工智能的复合型人才,为产业长期发展提供人才保障。同时,项目与东北大学、大连理工大学等省内外高校的合作,将促进人才培养体系改革,使高校人才培养更贴近产业实际需求。

项目通过成功应用案例的示范效应,将在传统工业企业中

培育敢于创新、善于创新的企业文化。鞍钢集团“鞍云智鼎”AI大模型平台的成功应用，本溪钢铁等企业的积极参与，将为辽宁省流程工业企业树立智能化转型的标杆。

### **（3）优化资源配置，促进绿色转型，支撑区域协调发展**

项目成果推广应用将充分考虑辽宁省各市产业特点，形成差异化的智能化转型路径。沈阳、大连作为人工智能技术策源地，重点发展智能算法、算力服务和平台开发；鞍山、本溪等钢铁产业集群城市重点推进钢铁行业智能化；营口、辽阳等有色冶金集聚区重点推进铝镁冶炼智能化。这种差异化、专业化的产业布局，将强化各地区比较优势，促进区域间协同发展，提升辽宁省整体产业竞争力。

项目通过优化能源资源配置和工艺参数，可显著降低流程工业的能耗和排放，助力辽宁省实现绿色低碳发展目标。鞍钢集团的实践表明，通过AI技术对能源消耗进行精准建模与优化控制，可有效降低单位产值能耗。本项目在全省推广后，预计可使流程工业碳排放强度降低15%以上。

项目通过促进工业知识数字化和智能化，可有效应对老龄化和人才流失给流程工业带来的挑战，保障产业安全运行和持续发展。特别是对于鞍钢、本钢等大型钢铁企业，以及辽宁省重要的铝镁冶炼企业，关键工艺知识的数字化和传承对于保障

产业链供应链安全稳定具有重要意义。项目成果可形成工业知识保护屏障，防止因人才流动导致的技术断层和工艺退化，增强辽宁省流程工业的发展韧性和安全性。

基于辽宁省流程工业现状及项目特点，本项目拟采取“数据治理、场景遴选、协同创新”三轮驱动的实施路径。首先，依托辽宁省已有的 1600P 算力规模和沈阳、大连两个国家级人工智能算力中心，构建流程工业数据湖，统一数据标准，解决“数据孤岛”问题。其次，聚焦辽宁省流程工业的核心痛点，遴选高炉优化、电解槽控制、质量追溯等具有明显效益的场景作为突破口，实现快速验证和价值创造。最后，通过“政产学研金”协同创新机制，整合各方资源，形成持续迭代优化的技术体系和应用生态。

## 九、经费预算及来源

本项目所需经费 1000 万元，其中专项资金 300 万元，企业自筹资金 700 万元。主要用于项目执行过程中所需的购置费、业务费、劳务费。详细预算见下面测算。

### 9.1 省级财政资金(含中央引导地方科技发展资金)

#### (一)直接费用

**1.设备费。**(指项目实施过程中购置或试制专用仪器设备，对现有仪器设备进行升级改造，以及租赁外单位仪器设备而发

生的费用等。计算类仪器设备和软件工具可在设备费科目编列。填报时，30 万元及以上的设备详细说明，30 万元以下的设备费用分类说明。)

**设备费支出预算 62 万元**，主要用于购置搭建面向流程工业的知识增强多模态大模型平台所需的高效处理工业多模态数据并支持大模型本地化运行的服务器、大规模数据存储所需的 GPU 服务器、流程工业时序大模型以及知识图谱构建工具。用知识图谱来管理工艺参数、设备实体和专家规则等静态知识，同时利用时序大模型处理实时传感器数据并进行预测和优化，两者结合可以构建更强大的工业智能系统。

表 9-1 设备费清单

序号	名称	单价 (万元)	数量	金额 (万元)	规格配置、基本参数 要求	用途及测算依据
1	AI 服务器 (配置大模型基础平台)	20	1	20	采用成熟的 DeepSeek 大模型作为基础。配置 8 张计算加速 GPU 卡的服务器，单卡显存不小于 24GB，配置 64 核及以上的处理	处理工业场景下的海量时序数据和视频、图像等非结构化数据，面向工业场景的较大模型能够流畅运行和微调。配套

					以高效处理数据预处理和任务调度。配备 10TB 以上的硬盘空间,使用 NVMe SSD 以保障高速数据读写。	vLLM 服务化框架等工具,以优化模型的服务部署和推理效率。
2	GPU 服务器工作站	8	1	8	双路铂金 8163 48 核 96 线程 2.5GHz 含 RTX4090 24G 显卡 *2+128 内存,带 2 万点实时数据库。	用于存储,分析工业现场数据。
3	流程工业时序大模型 (钢铁、铝冶炼工艺)	22	1	22	中控 TPT 2, 基于 MoE (混合专家模型)的工业智能体平台; COPEs 能力矩阵 (模拟、控制、优化、预测、评估、统计)专为温度、压力、流量等工业时序数据设计,深度融合工业第一性原理;支持	考虑到流程工业数据强时序的特点,深度融合工业生产数据规律,实现根因定位与精准预测。

					对话式语言交互。	
4	知识图谱构建工具	12	1	12	Smart KG，支持快速部署、易用性，并主要应用于智能搜索、问答和关系挖掘等场景。可视化拖拽式构建，支持运行中更改图谱结构内置高性能图数据库引擎，支持上亿节点图谱构建；提供智能问答、路径推理和质量追溯等功能。	处理和分析工业场景下的文本、时序数据、图像等多种模态的数据，将工艺手册、操作规程等非结构化知识转化为机器可理解和计算的结构。
合计			4	62		

**2.业务费。**（指在项目实施过程中消耗的各种材料、低值易耗品等，发生的测试化验加工、燃料动力、出版文献、信息传播、知识产权事务、会议、差旅、国际合作与交流以及其他

与项目实施直接相关的各项费用。编报时，对单笔大额支出、对外委托支出重点说明。)

本项目业务费包括测试化验加工费、出版文献、信息传播、知识产权事务、差旅费、会议费，总计 137 万元。具体如下：

## 2.1 材料费

- **主要用途：**为了实现工业现场数据的全面感知，还需要规划在工业现场配置前端感知设备，例如高清摄像头、传感器以及用于组建高速内部网络的网络交换机等所需各种耗材。
- **与项目研发的相关性、必要性：**详见下述内容。
- **测算依据：**根据市场估值进行测算。
- **测算方法：**根据研究过程中的实际使用情况进行测算。

材料费共计 55.35 万元。具体明细如下：

表 9-2 材料费明细表

序号	产品名称	型号	单价 (万元)	数量	总金额 (万元)
1	TSN 通信模块	IE-4000-8GT4G-E	2	10	20
2	VXI 通信模块	DG-A2	0.5	3	1.5
3	Modbus RTU 通信模	SDD2080-AD1	0.3	4	1.2

	块				
4	Modbus TCP 通信模块	T-342	0.3	4	1.2
5	Powerlink 通信模块	PCM-26R2PL	0.5	4	2
6	CAN 通信模块	GCAN-201	0.3	3	0.9
7	HART 通信模块	6ES7331-7TF01-0A B0	0.3	4	1.2
8	WIA-PA 通信模块	CU-PA001	0.3	4	1.2
9	WIA-FA 通信模块	WIA-FA-WM-01	0.3	4	1.2
10	工业网络交换模组	S5720S-52P-LI-AC	0.4	3	1.2
11	SDRAM 芯片	M2V64S40BTP 64M	0.2	10	2
12	Flash 芯片	E28F128J3A-150	0.3	5	1.5
13	工业 RAM 主板	OK-MX9352-C	0.4	6	2.4
14	5G 模块	麒麟 990	0.3	50	15
15	线缆等辅助材料	6 类双绞线、接头等	0.0 285	100	2.85
合计					<b>55.35</b>

## 2.2 测试化验加工费

- **主要用途：**项目研究过程中对于终端、网关、软件、操作系统等测试的检验、测试等费用。
- **与项目研发的相关性、必要性：**详见下述内容。
- **测算依据：**根据市场估值进行测算。
- **测算方法：**根据研究过程中的实际使用情况进行测算。

测试化验加工费共计 **35.00** 万元。具体明细如下：

表 9-3 测试化验加工费明细表

序号	测试化验加工的内容	计量单位	测试/加工单价 (万元)	数量	金额 (万元)	用途
1	系统功能安全测试	次	5.00	1	5.00	系统需要在钢铁、有色冶金等行业应用，相关行业对功能安全要求很高，因此需要进行相关软件系统功能安全测试。
2	工业知识增强多模态大模型应用平台功能和性能测试	次	20.00	1	20.00	工业知识问答准确性、模态理解与生成、工业智能体 (Agent) 决策与执行、响应延迟与吞吐量等功能和性能测试。

3	系统可解释性和可靠性测试	次	5.00	1	5.00	验证当新的工艺文件或设备资料入库后，平台能否快速学习和掌握新知识，并测试其在相关知识问答上的表现是否有相应提升；当平台给出结论或建议时，应能追溯其决策依据，例如引用了哪份文档的哪个章节，或者主要基于哪些传感器数据的异常
4	数据隐私测试	次	5.00	1	5.00	验证平台是否可能从训练数据中还原或泄露敏感的生产数据、工艺配方或商业机密。
合计				4	35.00	

### 2.3 出版/文献/信息传播/知识产权事务费

- **主要用途：**用于项目研究过程中，用于资料购买、技术查新、报告印刷、文章发表版面费、研究资料购买、专利申请及其他知识产权事务等。
- **与项目研发的相关性、必要性：**本项目执行过程中，主要用知识增强技术、工业智能技术、工业软件体系架构、

工艺模型、安全防护体系等多个查新点国内外查新，购买技术资料费、论文出版费、专利软著以及材料组织、复印装订打印。具体见下表。

- **测算依据：**依据实际支出计算。
- **测算方法：**根据研究过程中的实际使用情况进行测算。

出版/文献/信息传播/知识产权事务费预算总额为 **15 万元**。具体明细如下：

表 9-4 出版/文献/信息传播/知识产权事务费明细表

序号	名目	单价 (元)	数量	金额 (万元)
1	国内外查新和技术资料	2000	17	3.40
2	论文出版费	3000	8	2.40
3	专利	4000	8	3.20
4	材料组织、复印、装订打印	\	\	6.00
合 计				<b>15.00</b>

## 2.4 会议/差旅费

- **主要用途：**用于项目执行期间支付差旅、会议费。
- **与项目研发的相关性、必要性：**在项目研究过程中，由于项目相关的部分会议或活动在非本单位所在地召开，因此需前往牵头单位及其工厂召开技术调研、项目/项目

研究、标准草案讨论会，参与该会议所发生的差旅费由本科目支出。在研究过程中，需召开项目和项目的启动会、协调会、评审会、验收会等会议，并且需要组织相关专家召开小型技术和标准工作组研讨会。

- **测算依据：**差旅费参照《关于进一步完善中央财政科研项目资金管理等政策的若干意见》（中办发〔2016〕50号）、《关于调整中央和国家机关差旅住宿费标准等有关问题的通知》（财行〔2015〕497号）、《中央和国家机关差旅费管理办法》（财行〔2013〕531号）。住宿费 500 元/天（平均），城市间交通费，3000 元/往返（飞机往返），1000 元/次（火车往返），交通补助 + 差旅补助 80 元/天+100 元/天。

- **测算方法：**根据研究过程中的实际使用情况进行测算

会议/差旅费共计 **31.65 万元**。具体明细如下：

### 1) 差旅费

为更好地完成本项目任务，项目组成员需赴外地对典型企业开展研究钢铁和有色冶金行业工业智能软件技术以及研发等工作。按照《中央和国家机关差旅费管理办法》（财行〔2013〕531号）和《关于调整中央和国家机关差旅住宿费标准等有关问题的通知》（财行〔2015〕497号）的规定，差旅费标准按

照飞机票往返平均 3000 元/人,伙食补助费按每人每天 100 元,出差期间市内交通按每人每天 80 元,住宿费每人每天按 350 元计算。

差旅费共计 27.25 万元。明细见下表。

表 9-5 差旅费明细表

序号	差旅项目	人数	每次天数	次数	住宿及公杂费	往返交通(万元)	小计(万元)
1	技术调研	9	3	27	0.06	0.30	9.72
2	省内企业调研和现场实施	15	3	45	0.06	0.30	16.2
3	市内交通费	—	—				1.33
合计							<b>27.25</b>

## 2) 会议费

本项目会议费预算总额为 4.40 万元。

会议费标准按照《中央和国家机关会议费管理办法》(财行〔2016〕214号)文的有关规定进行测算。即会期不超过 2 天,会议开支标准依据 550 元/人天测算。测算依据如下:

本项目计划召开项目会议 7 次,其中项目启动会 1 次,项

目中期总结会 1 次，项目预验收会 1 次，项目验收会 1 次，年度项目总结会 3 次；技术研讨会 4 次。会议费的标准按照三类会议标准 550 元/人天计算。

**会议费共计 4.40 万元。具体明细如下。**

表 9-6 会议费明细表

序号	会议名称	次数	天数	人数	费用	合计
1	项目验收会	1	1	20	0.055	1.10
2	技术咨询会	3	1	20	0.055	3.30
合计						<b>4.40</b>

**3.劳务费。**（指在项目实施过程中支付给参与项目的研究生、博士后、访问学者以及项目聘用的研究人员、科研辅助人员、科研〔财务〕助理等的劳务性费用；支付给临时聘请的咨询专家的费用等。项目聘用人员由单位缴纳的社会保险补助、住房公积金等可纳入劳务费列支。）

**主要用途：**用于项目研究过程中，参与项目研究的研究生、博士后、访问学者以及项目聘用的研究人员、科研辅助人员等，均可开支劳务费。

**与项目研发的相关性、必要性：**在研究过程中，需要支付项目组成员中无工资收入人员的相关费用，是完成本研究不可缺少的内容。

**测算依据：**在读硕士研究生 1200 元/人/月，在读博士研究生 2500 元/人/月，临时聘用人员 5000 元/人/月。

**测算方法：**根据研究过程中的实际使用情况进行测算。

**劳务费共计 41.00 万元。**具体明细如下表：

表 9-7 劳务费明细表

人员性质	人月	费用	小计
硕士研究生	200	0.12	24.00
博士研究生	28	0.25	7.00
临时聘用人员	20	0.50	10.00
总计（万元）			<b>41.00</b>

## 9.2 间接费用

**主要用途：**主要包括管理费、激励科研人员的绩效支出等。

**与项目研发的相关性、必要性：**学校为项目研究提供的房屋占用，日常水、电、气、暖等消耗，以及科研过程中的人员绩效激励支出等。

**测算依据：**科研总经费 20% 计算。

**测算方法：**根据研究过程中的实际使用情况进行测算

间接费共计 300 万元\*20% = **60 万元**。

## 9.3 除省级财政资金以外其他来源资金

自筹资金共计 700 万,由沈阳铝镁设计研究院有限公司采用单位自有资金。700 万元自筹资金已全部到位。相关自筹资金的支出预算主要包括有色冶金现场新增设备费和新增软件费用 500 万元;投入到该项目的员工工资支出 3 年共计 200 万元。

## 十、 申报资料附件

申报资料附件清单包括:

- ① 项目可行性研究报告;
- ② 预算说明书;
- ③ 科研诚信承诺书;
- ④ 自筹资金承诺书;
- ⑤ 科学数据汇交承诺书
- ⑥ 营业执照/法人证书;
- ⑦ 近两年财务审计报告;
- ⑧ 辽宁省科技计划项目联合申报协议;
- ⑨ 前期工作基础证明材料。

## 十一、 申请单位主管部门（推荐单位）意见

同意。