

冶金技术中的自动控制与电气自动化技术特点研究

李俊

黄河鑫业有限公司，青海省西宁市，810000；

摘要：自动控制与电气自动化作为现代冶金技术体系的核心支撑力量，已广泛嵌入炼铁、炼钢、连铸、轧制等环节，在提升系统运行效率、产品质量与生产安全方面发挥了关键作用。冶金工艺过程具有耦合性强、动态波动大、控制对象复杂等特点，对自动化系统的响应速度、可靠性与智能化水平提出了更高要求。本文围绕冶金生产中的自动控制功能、电气自动化系统的构成与应用，以及两者融合下的系统特性展开深入探讨，剖析典型工艺环节中的控制技术路径与设备协同方式，进一步分析当前冶金自动化系统在集成化、抗干扰性与智能升级方面的技术特征。研究认为，推动自动控制与电气自动化的深度融合，是实现冶金工业智能制造与绿色转型的关键路径。

关键词：冶金技术；自动控制；电气自动化；系统集成；智能制造

DOI：10.69979/3060-8767.25.08.059

引言

冶金工业是国民经济的基础产业，其生产过程覆盖从原料预处理到成品轧制的多个高温、高压与强干扰工艺环节，对系统控制与运行稳定性提出了极高要求。在长期发展中，自动控制技术与电气自动化系统逐步成为冶金企业提升生产效率、保障安全运行与实现产品质量可控的重要手段。二者不仅承担设备运行的基础支撑功能，更构成工艺管理与调度执行的信息化平台。

随着冶金生产向高效化、连续化和智能化方向演进，传统以人为主导的控制方式已逐步让位于以系统感知、数据驱动与智能决策为核心的自动化结构。自动控制系统在精细调节温度、压力、成分等关键工艺变量方面不断优化控制算法与响应机制；电气自动化系统则通过 PLC、DCS、变频器与工业通信网络等，实现了对关键设备的精准操控与系统级联动。

本文将从自动控制在冶金流程中的基本功能与算法策略出发，结合电气自动化技术在关键设备中的实践配置，分析两者协同下的系统集成特征与工程优化趋势，旨在为冶金工业的技术升级与系统优化提供理论支撑与技术路径参考。

1 冶金生产中的自动控制系统特征

1.1 自动控制在冶金工艺流程中的功能定位

冶金生产流程复杂、连续、节奏强，自动控制系统在其中起到核心调节和过程协调作用。以炼铁高炉为例，需对炉顶压力、炉温、鼓风流量、原料配比等变量进行动态调控，确保炉内热反应稳定进行。若控制系统响应不及时或偏差过大，极易引发炉况波动、能耗升高甚至设备故障^[1]。

在炼钢与连铸过程中，自动控制系统需对氧气喷吹、温度保控、合金投料时序、钢水液面高度等关键点实施

连续监测与调节。例如，转炉冶炼时采用动态模型预测控制，可实时调整吹氧量与节奏，防止钢液温度偏离工艺要求。

轧制工序中，自动控制则体现在张力控制、轧制力分配与厚度反馈调节系统上。各架轧机之间张力联动需高精度协调，才能保证板带产品的平整度与尺寸精度。控制系统不仅完成数据采集与反馈闭环控制，还参与故障预警与参数自适应修正，是冶金系统实现高稳定运行的技术基础。

1.2 控制对象的多变量、耦合性与动态特征

冶金过程具有高度的多变量与耦合特性，常伴随强非线性、滞后性及扰动性，使得控制策略远比一般工业控制更为复杂。一项控制变量的微调，常常影响多个工艺指标，且影响路径不唯一，增加了系统建模与算法设定难度。

以连铸工艺为例，拉速、冷却强度与结晶器液面三者相互影响：拉速过快会导致凝固不足，冷却强度偏高则引发壳层应力集中，液面波动则进一步影响壳层形成质量。此类变量间高度耦合，需通过协同控制模型实现动态调节^[2]。

冶金系统中的物理与化学过程具有明显时变特征，外部扰动频繁，如电网波动、原料成分变化、环境温度变化等均可能引发系统输出偏离预期目标。冶金自动控制系统需具备对模型参数变化的适应能力，能够在扰动发生后迅速作出反馈，并恢复至稳定状态。

1.3 控制策略的发展路径与典型算法应用

为应对冶金过程的复杂控制需求，控制策略从传统的 PID（比例-积分-微分）调节向更高级别的智能控制方法演进。在基础层面，PID 控制仍被广泛应用于温度、压力、速度等对象的精确调节，因其结构简单、响应快、

稳定性好, 适合单变量对象控制。

但在多变量系统与非线性系统中, 单纯 PID 控制无法有效处理交叉干扰问题, 因此引入了模糊控制、自适应控制与神经网络控制等方法^[3]。模糊控制可通过经验规则替代精确模型, 适应冶金领域知识表达模糊、不确定性高的工况特征; 自适应控制则通过在线参数调整应对工况动态变化, 广泛应用于钢水温度控制与吹炼过程控制等环节。

近年来, 基于模型的预测控制 (MPC) 在冶金工程中获得实践验证, 尤其适用于多变量耦合系统。该方法通过优化控制预测路径, 提前判断最优输出序列, 并将结果反馈至执行系统, 以实现最优性能指标。连铸液面控制系统、板带轧制厚度预测系统中已有 MPC 控制模型投入使用, 有效提升了控制精度与反应速度。

利用机器学习分析历史数据, 可辅助建立非参数控制模型, 甚至实现对复杂过程的端到端控制。尽管尚处于实验探索阶段, 但在钢铁冶炼过程建模与故障预判中已展现出较大潜力。

2 电气自动化技术在冶金设备系统中的应用

2.1 电气控制系统的组成结构与功能模块

电气自动化系统是冶金装备运行的神经中枢, 主要由供配电系统、控制执行单元、传感检测设备、人机交互界面和通信网络平台等模块组成, 构成从能源接入到逻辑响应的完整闭环^[4]。

供配电系统保证整条生产线各类负载的稳定供能, 并具备对不同设备电源进行分类保护与过载控制功能, 常采用高压变电所+变频驱动+低压就地配电柜三级结构布局。

控制执行单元则以 PLC (可编程控制器) 或 DCS (集散控制系统) 为核心, 负责采集传感器信号、执行逻辑判断与输出控制指令, 适应不同流程的连锁、顺序控制与自动反馈功能。

传感检测设备涵盖温度、电流、位移、张力、流量、压力等物理量的采集与反馈, 提升了系统的信息化水平。

人机交互界面 (如触摸屏、工业平板) 便于操作人员实时监测工况并进行参数调整, 而工业以太网、Profibus、CAN 等通信网络则实现各设备模块间的高速数据交换与远程集成控制。

整个系统强调安全性、实时性与冗余性, 常配备双 PLC 结构、电源 UPS 备份与通信链路冗余配置, 以保证关键冶金装备在复杂工况下的持续稳定运行。

2.2 冶金关键设备中的自动化集成实例

在现代钢铁企业的核心工序装备中, 电气自动化系统的集成度与响应精度直接决定着装备运行性能与产

品质量稳定性。

以连铸机为例, 其自动化控制涵盖了结晶器液面调节、拉速控制、喷淋强度调配、矫直压下操作与火焰切割定位等多个子系统, 均依赖电气自动化技术的精确协同。其中, 液面控制系统集成了电磁传感器、伺服执行器与高速采样控制逻辑, 可对数十毫秒级的波动实现快速补偿, 保证结晶器壳层均匀凝固。

在热轧生产线中, 粗轧机与精轧机的速度匹配、张力控制与板形自动修正系统构建起高度闭环控制网络, 电气自动化系统通过矢量变频驱动器精确调速, 并对各架轧机之间进行全流程张力平衡控制, 保障轧制力均匀分布与产品厚度一致性。

高炉风机、电炉升降机构、连续退火炉、酸洗线等重要设备, 也均通过电气自动化系统完成起停逻辑、异常保护、参数调节与运行记录采集, 实现了“无人干预、连续运行”的目标。值得注意的是, 这些系统往往运行于高温、高粉尘、高磁场的工业环境, 对设备耐干扰性与系统稳定性提出了极高要求。

2.3 电气自动化与工艺控制系统的协同运行机制

冶金工业控制系统强调工艺控制逻辑与设备控制执行间的协同统一。一般而言, 工艺控制系统以 DCS 或 MES 为核心, 负责控制逻辑的管理、调度指令的下达与生产计划执行; 而电气自动化系统则负责具体动作的实施与状态反馈, 两者需在数据链层面无缝对接, 构建出一个“感知-分析-执行”闭环反馈架构^[5]。

例如, 在转炉炼钢过程中, MES 系统调度原料投放、吹氧流程与合金补加节奏, DCS 系统根据实时温度与碳含量数据动态计算最佳控制参数, 并通过电气自动化系统完成相关设备启停与阀门调节, 实现钢液成分精准控制。

在板带轧制生产线中, 操作台下达厚度设定值后, DCS 对偏差量实时计算并将信号传输至 PLC 系统, PLC 再驱动变频器调整主轧电机转速, 形成实时厚度控制闭环。此外, 现场控制层通过传感器对张力、温度、震动等参数采样, 并反馈至上位系统用于预测性控制与参数修正。

近年来, 随着工业以太网技术的成熟, DCS 与 PLC 之间的通信不再依赖分布式串行链路, 而转向统一的数据总线平台, 使多层控制系统之间的信息交互效率与一致性显著增强。同时, 配套的 SCADA 系统与工业数据库实现了对全厂控制数据的统一展示与集中管理, 为操作人员提供更加直观、可控的监控界面, 也为智能分析与后续 AI 模型嵌入提供了数据基础。

3 冶金自动控制系统的技术特点与优化趋势

3.1 实时性与抗干扰能力的系统要求

冶金生产过程具有动态响应快、环境扰动强的特点，自动控制系统必须具备极高的实时性与抗干扰能力。炉温变化、料流波动、电弧干扰、磁场辐射等因素均可能对控制信号造成干扰，若响应滞后或控制失真，极易引发过程失稳、能耗上升甚至设备损毁。

因此，系统设计须在硬件和软件两个层面强化响应性能。在硬件方面，广泛应用高速处理器、隔离型 I/O 模块、抗干扰电源模块与工业级通信接口，提高信号采集与指令执行速度，并增强电磁兼容性。在软件层面，采用优先级中断机制、事件驱动逻辑与数据过滤算法，保证关键变量在高干扰环境下仍能稳定识别与快速响应。

实际应用中，如电弧炉电压信号中常伴随机跳变化与噪声信号，控制系统需通过数字滤波算法实时提取有效值，并据此判断电弧强度与调整功率输入。连铸拉速控制中也常采用“超前预测+快速补偿”控制逻辑，以应对钢水温度突变或液面波动带来的延迟反馈风险。

此外，系统在设计中还需具备异常检测与容错机制。冗余传感器配置、断线检测、超温保护、通信中断报警等措施，可在系统部分故障时维持有限运行能力，避免整体停产或数据中断。

3.2 系统集成化与模块化的工程演进

冶金自动控制系统早期普遍采用“点对点”式布线与分散控制结构，设备间协作需人工干预，系统扩展性差、调试复杂度高。当前行业正朝集成化、模块化方向发展，强调软硬件统一架构、功能模块标准化与平台化配置，提升系统灵活性与工程实施效率。

在硬件结构方面，控制单元趋向标准化模块设计，各功能板卡（模拟量输入、数字量输出、通讯接口、备用模块等）可按需组合，实现“即插即用”的配置能力。控制柜集成温控、电源管理、通风防尘等功能，便于维护与远程诊断。

软件系统方面，多采用统一组态平台，支持对象化编程与工艺流程图逻辑搭建，提升程序可复用性与调试便捷性。部分高端系统已支持远程部署与模块在线热更新，为大规模部署与长期运维提供支撑。

模块化设计也便于工厂进行“边运行边优化”式升级，如在不更改主干网络与电源系统的前提下，可对轧线增设张力自控模块、增压站添加能效优化功能、连铸系统叠加钢水成分追溯模块等，实现按需拓展、渐进优化的灵活工程路径。

3.3 智能化升级路径与未来融合方向

在工业 4.0 与智能制造背景下，冶金自动控制系统正从“可控”向“自感知、自分析、自决策”的智能体

系演进。其核心目标是构建具备实时感知、数据预测、过程优化与自主执行能力的闭环控制网络，实现从工艺逻辑层到生产管理层的多层联动与系统协同。

未来冶金自动控制系统的智能化升级路径主要包括以下方面：

通过深度学习模型对历史工艺数据进行训练，形成缺陷识别模型或异常状态预测模型，实现早期预警与自主调参。典型应用如转炉冶炼终点预测、铸坯缺陷智能识别、轧制力预测控制等。

融合边缘计算与工业互联网技术，推动控制计算能力前移。在现场控制层布置边缘节点设备，可实现部分逻辑计算与初步数据处理在本地完成，降低响应延迟并减少主站数据压力。同时，边缘设备还能本地缓存与判断异常，提升系统分布式故障响应能力。

通过构建冶金工艺与装备运行的实时数字模型，操作人员可在虚拟环境中观察参数变动趋势，进行工艺试验与控制策略仿真，从而提前优化操作路径、验证控制逻辑并降低实操风险。

值得注意的是，智能化控制系统的发展仍需建立在高质量数据基础之上。因此，传感技术、数据采集精度、通信链路可靠性与现场规范化布线等基础条件仍是智能控制体系能否落地的关键保障。

4 结语

自动控制与电气自动化技术已成为冶金工业高效、安全运行的重要支撑。通过对冶金工艺控制特性、电气系统结构与智能化演进路径的系统分析，可以看出，两者的深度融合不仅提升了设备运行效率与产品质量稳定性，也为冶金企业实现流程再造与智能制造奠定了坚实基础。未来，随着 AI 算法、边缘计算与数字孪生等新技术的不断落地，冶金自动控制系统将进一步实现从“可调”向“自优化”的跃升。在保障系统稳定与提升经济效益的同时，也将引领冶金产业迈向更加绿色、高效与智能的新阶段。

参考文献

- [1]王超. 冶金电气自动化控制技术的创新与应用研究[J]. 冶金与材料, 2025, 45(05): 103-105.
- [2]杨维涛, 陈国伟, 杜晓东. 钢铁冶金电气自动化控制技术分析[J]. 新疆钢铁, 2025, (01): 93-95.
- [3]舒昕. 自动化控制技术在金属冶金电气设计中的应用及创新发展[J]. 冶金管理, 2024, (06): 68-71+77.
- [4]熊波. 钢铁冶金电气自动化控制技术研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(01): 285-286.
- [5]张小龙. 冶金企业电气自动化仪表与自动化控制分析[J]. 冶金管理, 2023, (19): 21-22.