

金属冶炼生产中智能感知与过程控制研究

申长青

安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司，河南 安阳 455133

[摘要]金属冶炼生产智能感知与过程控制研究借助构建多源信息感知体系，并且以整合关键参数检测与传感技术作为根基，达成了对冶炼过程多源异构数据的融合以及特征提取这一目的。随后结合过程机理和数据驱动建模，开发出了智能优化控制算法以及自适应预测控制技术。最后从系统架构与硬件部署、软件平台与算法实现以及系统可靠性安全性这些方面给出了完整的实施方案，从而为行业的智能化转型打下了稳固的理论根基与实践方面的指导原则。

[关键词]智能感知；过程控制；数据融合；冶炼生产；优化算法

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18338

中图分类号: TP274

文献标识码: A

Research on Intelligent Perception and Process Control in Metal Smelting Production

SHEN Changqing

Angang Group Yongtong Ductile Cast Iron Pipe Co., Ltd, Anyang, He'nan, 455133, China

Abstract: The research on intelligent perception and process control in metal smelting production utilizes the construction of a multi-source information perception system and integrates key parameter detection and sensing technology as the foundation to achieve the goal of integrating multi-source heterogeneous data and feature extraction in the smelting process. Subsequently, by combining process mechanisms and data-driven modeling, intelligent optimization control algorithms and adaptive predictive control technology were developed. Finally, a complete implementation plan was provided from the aspects of system architecture and hardware deployment, software platform and algorithm implementation, and system reliability and security, laying a solid theoretical foundation and practical guidance principles for the intelligent transformation of the industry.

Keywords: intelligent perception; process control; data fusion; smelting production; optimization algorithm

近年来，我国金属冶炼行业在国民经济中的地位愈加重要了，但其高温、高压、化学反应复杂等特性，使其安全生产问题日益突出。为此，国家出台了一系列相关政策文件，例如《安全生产法》《工业企业安全生产标准化基本规范》，要求企业强化安全管理，提升事故预防和应急处置能力。同时，《“十四五”工业绿色发展规划》也明确提出要推动工业智能化改造，提升生产效率和安全水平。传统的安全管理模式往往依赖人工操作和经验判断，难以适应日益复杂的生产环境和不断提高的安全要求。随着智能化技术的深入发展，自动化、物联网、大数据和人工智能等技术已逐步在冶炼行业得到了广泛应用，为安全管理提供了更为精细化和智能化的解决方案。

1 智能感知技术在金属冶炼中的应用基础

1.1 多源信息感知体系构成

多源信息感知体系的构成需整合多种类型的信息采集设备，像温度传感器、压力传感器、流量计、成分分析

仪以及视觉传感器等等。这些设备借助有线或者无线的方式连接到中央处理单元，进而形成一个分布式的感知网络。在金属冶炼的过程中，感知体系得涵盖原料预处理、熔炼、精炼、浇铸等诸多环节，以此来保证数据采集具备全面性与连续性。比如，在高温熔炼阶段会采用耐高温热电偶还有辐射测温仪来监测炉内温度分布情况，在气体排放环节则使用气体色谱仪检测有害气体浓度。多源信息感知体系的构建不但要考虑硬件部署方面的问题，而且还要涉及到数据通信协议与接口的标准化事宜，从而达成不同设备之间的互联互通状态。

1.2 关键参数检测与传感技术

关键参数检测以及传感技术乃是智能感知当中的极为重要核心部分，其发展所达到的水平会直接对冶炼过程监控的精度还有实时性产生影响。就温度检测技术来讲，把非接触式的红外测温方式同嵌入式的热电偶相互结合起来，便能够达成从表面一直到内部的温度梯度测量目的。

压力检测方面，会采用压电传感器以及应变片这两种方式，以此来满足在高压以及真空环境下能够稳定开展工作的需求。流量检测主要依靠电磁流量计和超声波流量计，这二者适用于对金属熔体以及气体进行计量。成分检测技术涵盖了 X 射线荧光光谱、原子吸收光谱等等，它们的作用在于对金属成分以及杂质含量展开在线分析。这些传感技术之所以能够取得进步，这离不开材料科学以及微电子技术的发展，也正是如此才让传感器具备了更强的耐高温能力、抗腐蚀性能以及更快的响应速度。在实际的应用进程当中，传感技术的校准以及维护同样有着不容忽视的重要意义，通过定期开展校验工作以及进行故障诊断，从而能够确保数据的准确性。关键参数检测与传感技术不断地进行优化并且持续提升，这就为冶炼过程的智能感知给予了十分可靠的技术支持。

2 冶炼过程数据融合与特征提取

2.1 多源异构数据融合方法

多源异构数据融合方法主要涵盖数据级融合、特征级融合以及决策级融合这三个不同的层次。其中，数据级融合是直接针对原始数据展开操作，具体而言就是对其进行对齐处理以及整合工作，就好比通过实现时间上的同步以及空间方面的配准，进而把温度数据和压力数据合并到一起。特征级融合的操作流程则是先从各个数据源当中提取出相应的特征，然后再把这些所提取出来的特征向量加以融合，举例来讲，可以运用主成分分析或者独立成分分析这类手段来达成降维的目的。至于决策级融合，它是依据各个数据源所给出的初步决策结果来进行综合性的判断，像是采用加权投票的方式或者是借助贝叶斯推理等方法^[1]。在金属冶炼这一实际应用场景当中，数据融合往往会碰到诸如传感器存在误差、通信出现延迟等一系列问题，此时常常会采取卡尔曼滤波、神经网络等相应的方法，以此来促使融合精度得以提升。多源异构数据融合方法的实际应用，能够在很大程度上提升数据所具有的可靠性以及可用性，从而为后续开展特征提取相关工作筑牢坚实的基础。

2.2 过程关键特征识别

过程关键特征识别是从海量的数据当中去筛选出那些对冶炼过程有着显著影响的变量，而这些变量通常和产品质量、能耗、效率等目标存在着直接的关联。其识别方法包含了依据机理模型展开的分析、凭借数据驱动所进行的统计学习，还有将这两种方式相结合的办法。机理模型依照物理化学原理来确定关键参数，像反应温度、压力、浓度等等这类参数。数据驱动方法会运用聚类、分类、回

归等各类算法从历史数据里挖掘出潜在的特征，比如说借助关联分析来找出温度波动和产品缺陷之间的关系，或者通过时间序列分析来预测炉况变化的趋势。过程关键特征识别的准确性在很大程度上取决于领域知识与数据质量的相互结合，并且得经过多次的验证与优化。识别出来的关键特征会被用来构建控制模型，以此达成对过程状态的实时评估与预测，从而为智能控制给出直接的依据。

2.3 实时数据处理与传输

实时数据处理以及传输方面，需要在数据完成采集之后可快速地予以处理，并且要将其迅速传送到控制单元，如此才能契合冶炼过程对于快速响应所提出的相应需求。数据处理通常涵盖滤波、平滑以及异常检测等一系列预处理的步骤，其主要目的在于将噪声还有异常值都给去除掉。而传输环节，就涉及到网络协议的选择、带宽的合理分配以及延迟的有效控制等相关技术了。在金属冶炼这样的特定环境当中，往往把有线以太网和无线 Zigbee、LoRa 等不同的通信方式相互结合起来运用，从而确保数据可以实现可靠的传输。实时数据处理与传输系统必须要具备较高的吞吐量以及较低的延迟特性，比如说可以通过采用边缘计算的方式，在数据产生的源头就开始着手进行初步的处理工作，以此来减轻中央服务器所承受的负担。实时性得以保障之后，控制决策便能够依据最新的数据来及时地对操作参数做出相应的调整，进而避免冶炼过程中偏差不断地积累起来。实时数据处理与传输技术要是能够加以优化的话，那么这将会成为智能感知系统能够高效地运行的一个极为关键的环节，事实上，该技术环节究竟完善到何种程度，这可是对整个系统响应速度起着决定性作用的一个重要因素。

3 冶炼过程智能建模与控制策略

3.1 过程机理与数据驱动建模

过程机理建模是依据冶金反应动力学以及热力学等相关原理来开展工作的，在此过程中会建立起微分方程或者代数方程，以此来对相关过程加以描述，就好比高炉炼铁环节当中的物料平衡模型还有能量平衡模型便属于此类情况。而数据驱动建模则是借助神经网络、支持向量机这类机器学习算法，从海量的数据当中去学习并掌握输入输出之间的关联关系。把这两者相互结合起来，便能够很好地弥补单纯依靠机理模型所存在的复杂程度过高的弊端，同时也能够克服仅靠数据驱动模型所具有的泛化能力较为薄弱的缺陷，比如说可以让机理模型来给出结构方面的约束条件，而由数据驱动模型去对残差进行拟合处理。在金属冶炼这一领域当中，开展建模工作的时候务必要充

分考虑到其中存在着的多变量耦合、呈现出的非线性特点以及出现的时变等种种特性，进而凭借参数辨识以及模型验证等一系列的操作手段，从而促使整个建模的准确性得以切实提高。过程机理建模和数据驱动建模相融合之后，能够为控制策略的设计给予一个较为可靠的模型基础，进而让过程模拟以及后续的优化工作都能够更加紧密地贴近实际情况。

3.2 智能优化控制算法

智能优化控制算法其主要目的在于搜寻可让目标函数达成最优状态的操作参数，而目标函数往往涵盖能耗尽可能小、产量尽可能大、质量尽可能好等方面内容。常见的算法包含遗传算法、粒子群优化、模拟退火这类进化计算方式，还有深度学习、强化学习等人工智能方面的办法。这些算法具备处理存在多个目标以及多种约束条件的优化问题的能力。在冶炼过程中加以应用的时候，得考虑到算法所具有的实时性以及计算复杂度方面的情况，比如说依据神经网络构建的优化控制器会在线对燃料投入量以及风量分配情况进行调整，从而实现稳定炉温和减少能耗的目的。智能优化控制算法是否有效，这取决于模型的精度以及算法参数的调优状况，是需要凭借仿真以及实验来加以验证的^[2]。针对智能优化控制算法展开更为细致的研究，给冶炼过程实现高效且稳定地运行给予了强有力的算法支撑，朝着这个方向持续发展下去将会不断促使过程控制技术迈向更高的层次。

3.3 自适应与预测控制技术

自适应控制技术可依据过程变化自动调节控制器参数，以此来应对模型存在的不确定性或者环境出现的扰动情况。预测控制技术是凭借模型来预测未来过程的行为走向，并且会优化控制序列，从而实现对设定值的跟踪。在金属冶炼这一领域当中，自适应控制主要用于处理因原料成分产生波动或者设备出现老化等情况所带来的种种影响，就好比自整定 PID 控制器便是如此。而预测控制则是用来处理存在大滞后以及多变量的过程，比如模型预测控制 MPC 能够对温度与压力控制加以协调。将自适应控制技术和预测控制技术相互结合起来，能够让系统的鲁棒性以及控制性能得以提升，进而确保冶炼过程即便处于多变的条件之下也能够维持稳定的状态。这些技术在实施的时候，需要做到在线模型的更新以及优化计算工作，这便对硬件以及软件都提出了较高的要求。自适应控制技术与预测控制技术不断向前发展，这无疑使得冶炼过程控制的智能化程度得到了很大程度的增强，简单来说，这些技术

让整个控制系统变得更为聪明、更加灵活。

3.4 控制系统的集成与协同

控制系统集成协同牵涉诸多控制子系统协调运作，达成全流程整体优化，在金属冶炼里，原料处理、熔炼、精炼、浇铸等单元均有自身控制系统，集成这些系统需统一数据接口与通信协议。协同控制借助上层优化指令分配各单元设定值，防止局部优化致使全局次优。比如依据多智能体系统的分布式控制，各单元智能体相互间通信协商，一同达成生产目标^[3]。控制系统集成协同还要顾及人机交互与决策支持，给操作员提供直观的监控界面与及时的报警功能。集成协同实现，大幅提升了生产系统整体效率与灵活性，是构建智能冶炼工厂重要特点。

4 智能感知与控制系统的实施

4.1 系统架构与硬件部署

系统架构一般会采用分层的设计方式，其中包含了感知层、网络层、处理层以及控制层这几个层次。在感知层当中会去部署传感器还有执行器，而网络层的主要职责在于负责数据的传输工作，处理层则要开展数据融合方面的操作以及模型计算相关事宜，控制层则是用来发出控制指令的地方。在进行硬件部署的时候，需要依据冶炼车间的实际环境状况来挑选那些能够耐得住高温、具备防爆功能并且还能抗腐蚀的设备，并且要合理地做好布线方面的工作，以此来促使信号干扰得以降低。就好比说，在存在高温情况的区域当中，可以选用光纤传感器并采用无线传输的方式，通过这样的做法就能够让电缆的损耗有所减少。系统架构以及硬件部署方面的规划务必要和生产工艺流程紧密结合起来，从而保证能够将所有的关键监测点以及控制点都涵盖进去。架构采取模块化的那种设计形式，这样在后期进行升级以及维护的时候就会比较方便，而硬件方面留有冗余，那么就能够使系统的容错能力得到提升。系统架构以及硬件部署是否合理，这可是智能感知与控制系统能够顺利实施的一个基础条件。

4.2 软件平台与算法实现

软件平台把数据采集、存储、处理以及控制等诸多功能都集成到了一起，像 SCADA、DCS 这类工业控制软件是比较常用的选择，当然还有自定义开发的平台。算法实现会把数据融合、特征提取、建模以及控制等相关算法编写成可以执行的程序，然后让它在工业计算机或者云服务器上运行起来。软件平台得能支持实时操作系统以及多任务调度，这样才能保证算法能够按时执行。算法实现的时候，得充分考虑计算效率以及数值稳定性，比如说用 C++

或者 Python 来编程并且对代码加以优化。在金属冶炼的应用场景当中，软件平台会提供人机界面，通过它来展示过程的状态以及报警信息，而算法实现能够在线对控制参数做出调整^[4]。软件平台和算法实现的开发工作需要跨学科团队携手合作，把冶金知识和计算机技术很好地融合到一起。软件平台的可靠性以及算法实现的准确性，这两者会对整个系统的性能表现产生直接的影响，持续在这上面付出努力，将会有力地推动智能化技术走向实用化的过程。

4.3 系统可靠性及安全性

系统可靠性意味着在长时间运转过程中能够维持功能正常的那种能力，这里面涉及到像硬件故障率、软件鲁棒性以及数据备份等诸多方面。而安全性包含物理安全和网络安全这两部分，其主要目的在于防止设备出现损坏或者数据发生泄露等情况。在冶炼这样的环境当中，可靠性是依靠冗余设计、定期开展维护工作以及故障诊断等方式来予以保障的，比如说针对关键传感器会设置双备份，并且还会配备自动切换的相关机制。至于安全性方面的措施，则涵盖了部署防火墙、采用加密通信方式以及实施访问控制等一系列举措，以此来抵御那些潜在存在的网络攻击。物理安全方面就需要去考量防爆、防火等相关设计了。对于系统可靠性以及安全性进行管理的时候，需要制定出详尽的应急预案以及操作规程，并且要对相关人员展开培训，从而能够有效应对可能出现的异常情况。具备较高的可靠性以及安全性是智能感知与控制系统能够在工业领域实现应用的一个必备条件，同时也是确保生产能够连续进行

以及保障人员安全的一项极为重要的保障措施。

5 结束语

构建智能感知网络，融合多源数据，建立混合模型并且实施先进的控制手段，能够切实有效地提升冶炼过程的整体性能。不过就目前的情况来看，依然存在着集成复杂度颇高、所需成本投入颇为巨大以及相关标准还有待进一步完善的诸多挑战。在未来的相关研究当中，应当将关注点聚焦在算法的优化、成本的降低、标准的制定以及跨领域的协同等方面。智能感知与控制技术得到更为深入的应用之后，必定会为金属冶炼工业朝着绿色、高效且智能化的方向实现转型给予源源不断的有力驱动。

【参考文献】

- [1]杨帅.金属冶炼转炉终点碳温预测与控制模型优化研究分析[J].世界有色金属,2025,10(15):13-15.
- [2]丁少忠.矿山金属冶炼中非标自动化机械设备的设计[J].模具制造,2025,25(8):213-215.
- [3]杨帅.金属冶炼转炉终点碳温预测与控制模型优化研究分析[J].世界有色金属,2025,11(15):13-15.
- [4]杨静雅,鄢峰,潘岩,等.基于优化模糊控制的有色金属冶炼配料仓监测防堵系统 [J].冶金自动化,2025,49(1):100-107.

作者简介：申长青（1984.7—），毕业院校：国家开放大学，所学专业：计算机信息管理，当前就职单位：安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司，职务：科长，职称级别：初级。