

烧结点火炉自动控制模型的应用研究

雷 星 张立军 何春虎

重庆钢铁股份有限公司 重庆长寿 401220

摘要: 本文提出一种烧结点火炉自动控制模型的应用研究。通过对煤气压力 PID 调节器参数进行优化, 可以实现自动调节稳定煤气压力调节阀出口压力的需求。对煤气流量、空气流量 PID 调节器参数进行优化, 可以实现自动调节稳定煤气流量、空气流量的功能和通过煤气流量实际值、空燃比串级控制空气流量的功能, 实现定煤气自动燃烧, 改善燃烧效果, 减小点火炉温度波动。

关键词: 烧结; 点火炉; 自动控制

引言

钢铁工业作为能源密集型产业, 烧结工序能耗约占全流程 10%~15%^[1]。烧结是钢铁生产中的重要工序, 其主要作用是将铁矿粉、熔剂、燃料等原料在高温下(1100~1300℃)粘结为具有良好强度和透气性的烧结矿, 为高炉提供优质炉料。该工艺不仅能改善原料冶金性能、提高高炉冶炼效率, 还可回收利用含铁粉尘等废弃物, 实现资源循环利用。同时, 现代烧结技术通过余热回收、烟气净化等手段, 显著降低了钢铁生产的能耗和污染排放, 是钢铁行业实现“精料入炉”和绿色生产的关键环节。

烧结点火炉是钢铁烧结工艺中的关键设备, 其主要作用是通过高温火焰(1100~1300℃)点燃烧结台车上的混合料表层燃料(如焦粉), 形成初始燃烧带, 并在抽风作用下使燃烧层逐步下移, 最终将铁矿粉、熔剂等原料粘结为高强度烧结矿。其点火效果直接影响烧结矿的成品率、强度和能耗, 同时现代点火炉采用低氮燃烧、余热回收等技术, 助力钢铁生产节能减排^[2]。作为烧结工艺的“火种”环节, 点火炉的运行稳定性对整个高炉炼铁的原料质量和生产效率至关重要。

传统烧结点火炉控制系统燃烧自动调节效果一直不佳, 不能达到实现点火温度自动控制的目的。传统烧结点火燃烧系统采用双串级 PID 调节系统, 根据点火炉平均温度串级调节煤气流量, 根据空燃比和煤气流量实际值串级调节空气流量, 在实际生产过程中, 烧结点火温度仍波动较大, 烧结点火炉燃烧控制主要存在问题: 1) 煤气流量波动; 2) 空气流量波动; 3) 空气流量自动控制无法实现; 4) 煤气流量自动控

制无法实现。

针对烧结点火炉燃烧自动调节效果一直不佳, 不能达到实现点火温度自动控制的目的, 本文提出一种具有针对性的烧结点火炉自动控制模型。通过考虑点火强度、台车速度、点火炉平均温度、混合料含水量和含碳量等参数通过模型优化, 计算煤气流量设定值来实现点火炉自动燃烧控制从而控制点火炉平均温度^[3]。

通过技术改造, 煤气管网压力波动变小, 对煤气压力 PID 调节器参数进行优化, 可以实现自动调节稳定煤气压力调节阀出口压力的需求。对煤气流量、空气流量 PID 调节器参数进行优化, 可以实现自动调节稳定煤气流量、空气流量的功能和通过煤气流量实际值、空燃比串级控制空气流量的功能, 实现定煤气自动燃烧, 改善燃烧效果, 减小点火炉温度波动。同时可减轻操作人员的操作强度, 提高操作的连贯性。

1 自动控制模型

针对烧结点火炉存在的实际温度不能自动控制问题进行研究, 模型拟在下述方面取得一定的创新性: 历史原有程序仅仅是单纯的温度控制, 而在本次模型当中创新性的引入点火强度、台车速度、混合料含水量、混合料含碳量优化算法调节煤气流量设定值, 降低煤气消耗, 减少二氧化碳排放。

自动控制模型综合考虑点火强度、台车速度、点火炉平均温度、混合料水分和含碳量等参数通过模型优化计算煤气流量设定值来实现自动燃烧控制从而控制点火炉平均温度^[4]。

$$\text{煤气流量设定值} = \text{点火强度控制煤气流量设定值} + \text{温}$$

度控制煤气流量增减量 + 含水量控制煤气流量增减量 - 含碳量控制煤气流量增减量^[5]

在点火炉自动控制模型中，点火强度控制模块是主调，给定煤气流量的设定值；混合料含水量控制模块和含碳量控制模块是微调，对煤气流量设定值进行修正。温度控制模块是辅调，在当前煤气流量设定值进行定煤气串级燃烧控制时，点火炉平均温度可能与温度控制值存在偏差，就需要用温度控制模块来对煤气流量设定值进行修正，从而使点火炉平均温度稳定在温度控制值。

1) 点火强度控制模块

根据设定的点火强度、台车速度计算点火强度控制煤气流量设定值，从而控制点火炉平均温度。

点火强度控制煤气流量设定值 = 点火强度 × 台车速度 × 台车宽度 × 60，根据对 1# 烧结点火炉煤气流量、温度等历史曲线的分析统计，计算得出 1# 烧结实际点火强度为 3 ± 0.1 ，模型点火强度取值为 3。

2) 温度控制模块

根据点火炉平均温度的变化情况，应用模糊控制技术，计算得到温度控制煤气流量增减量，调节煤气流量设定值，从而控制点火炉平均温度。详见温度模糊控制的研究。

3) 混合料含水量控制模块

根据混合料含水量变化计算含水量控制煤气流量增减量，从而控制点火炉平均温度。

含水量控制煤气流量增减量 = 含水量控制参数 K (人工设定) × 含水量。

混合料含水量来自配料计算中的数据，实际 K 值设定范围为含水量增加 0.1% 流量增加 20-30m3。

4) 混合料含碳量控制模块

根据混合料含碳量变化计算含碳量控制煤气流量增减量，从而控制点火炉平均温度。

含碳量控制煤气流量增减量 = 含碳量控制参数 K (人工设定) × 含碳量。

混合料含碳量来自配料计算中的数据，实际 K 值设定范围为含碳量增加 0.1% 流量减少 10-20m3。

5) 保温控制模块

当台车速度小于 0.2 米 / 秒，持续时间大于 5S，即可认为台车停车，自动进入保温控制模式，按预先设定的保温煤气流量设定值自动调节，从而控制点火炉平均温度。

保温时参数控制范围：煤气 100-200m3/h，温度 500-600℃。

通过实践得出经典 PID 采用的调节数学模型已经无法解决点火炉温度调节在当前环境下的调节功能，必须另辟蹊径，根据总结的温度流量时间曲线 t，压力反馈的参变量的不稳定，只有采用模糊控制^[6]。模糊控制主要适应于复杂被控对象或过长的非线性、时变性、多参数间的强烈耦合、较大的随机干扰、过程机理错综复杂、各种不确定性以及现场测量手段不完善等，这些特点 1# 烧结点火炉都非常吻合，对于那些难以建立数学模型的复杂被控对象，采用传统的控制方法效果并不好，而看起来似乎不确切的模糊手段往往可以达到精确地目的。控制系统是通过不断地学习、积累操作经验来实现对被控对象进行控制的，这些经验包括对被控对象特征的了解、在各种情况下相应的控制策略以及性能指标判据。这些信息通常是以自然语言的形式表达的，其特点是定性的描述，所以具有模糊性。

模糊控制的基本原理是以模糊集合理论、模糊语言及模糊逻辑为基础的控制，它是模糊数学在控制系统中的应用，是一种非线性智能控制。模糊控制是利用人的知识对控制对象进行控制的一种方法，通常用“if 条件，then 结果”的形式来表现，所以又通俗地称为语言控制。一般用于无法以严密的数学表示的控制对象模型，即可利用人（熟练专家）的经验和知识来很好地控制。因此利用人的智力模糊地进行系统控制的方法就是模糊控制。

它的核心部分为模糊控制器。模糊控制器的控制规律由计算机的程序实现，实现一步模糊控制算法的过程是：PLC 采样获取被控制量的精确值，然后将此量与给定值比较得到误差信号 E；一般选误差信号 E 作为模糊控制器的一个输入量，把 E 的精确量进行模糊量化变成模糊量，误差 E 的模糊量可用相应的模糊语言表示；从而得到误差 E 的模糊语言集合的一个子集 e (e 实际上是一个模糊向量)；再由 e 和模糊控制规则 R (模糊关系) 根据推理的合成规则进行模糊决策，得到模糊控制量 u 为：u=eR。式中 u 为一个模糊量；为了对被控对象施加精确的控制，还需要将模糊量 u 进行非模糊化处理转换为精确量：得到精确数字量后，经数模转换变为精确的模拟量送给执行机构，对被控对象进行一步控制；然后，进行第二次采样，完成第二步控制，这样循环下去，就实现了被控对象的模糊控制。

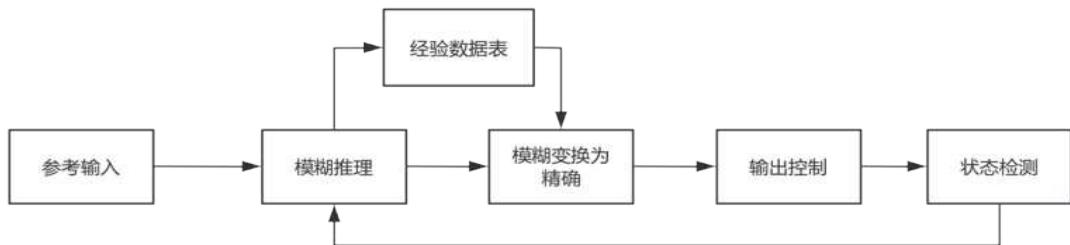


图 1 模糊控制流程

根据以上模糊控制理论结合点火炉的实际^[7]，通过多次测试、攻关、再测试、模型建立，最终设计一套智能模糊结合经典 PID 调节用以规避调节精度、大滞后的弊端。该设计在西门子经典 PID 基础上增加智能模糊的优化前级算法，通过多次调节回差的软件修改跟踪点的模糊算法，实现阀门

和设定流量的对应，也就是软件方式增加流量调节精度；再用串级调节软件智能跟踪对温度进行提前预处理优化了温度大滞后的弱点，让温度调节半联动于流量的变化也就是软调节。最终基于烧结点火炉模型实施，优化后的系统工艺控制流程如下图：

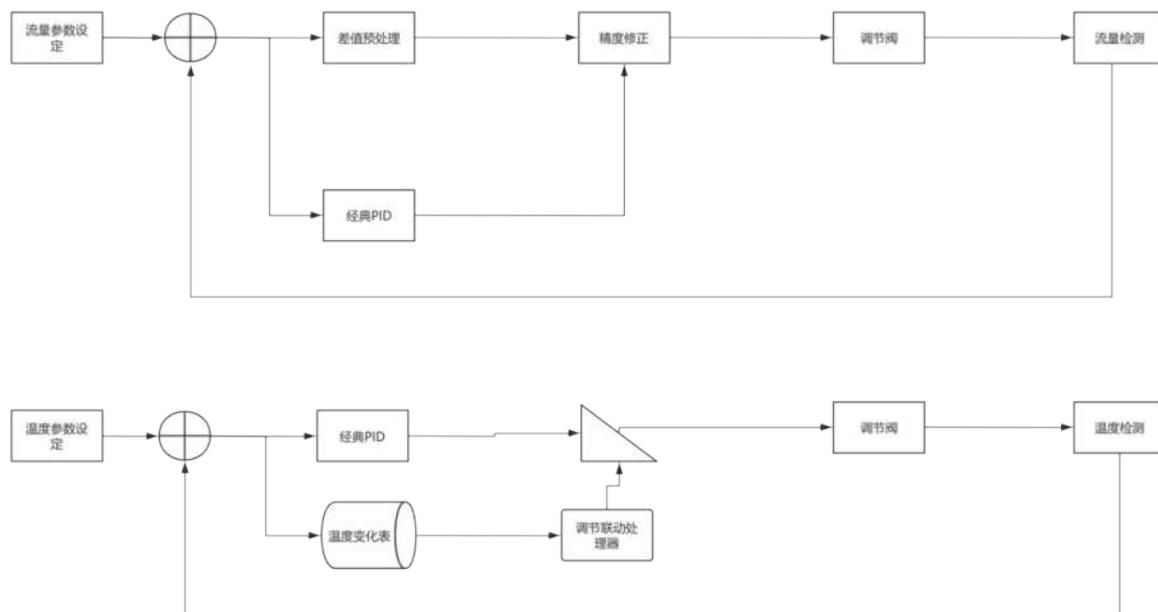


图 2 流量温度串级调节

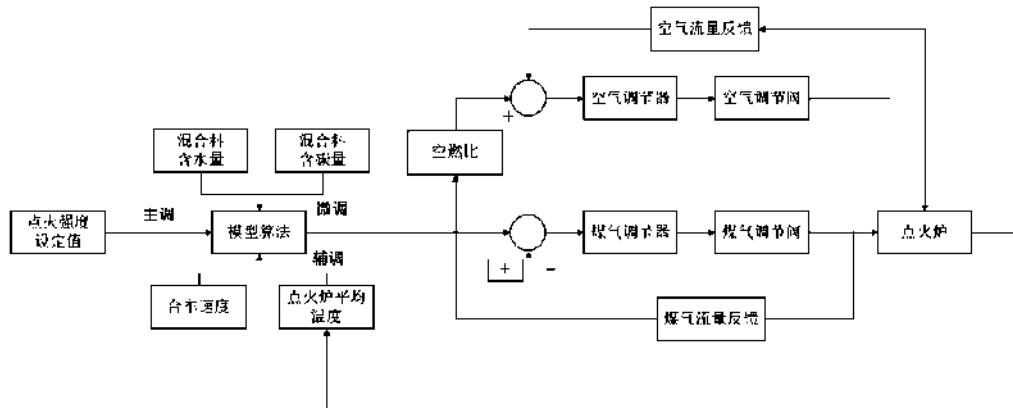


图 3 工艺控制流程

2 模型结果

本试验以重庆钢铁 1# 烧结点火炉作为试验平台, 试验

时间从 2024 年 4 月 1 日持续到 2024 年 4 月 30 日。在试验期间,

重庆钢铁 1 号烧结点火炉的点火温度如下图所示。

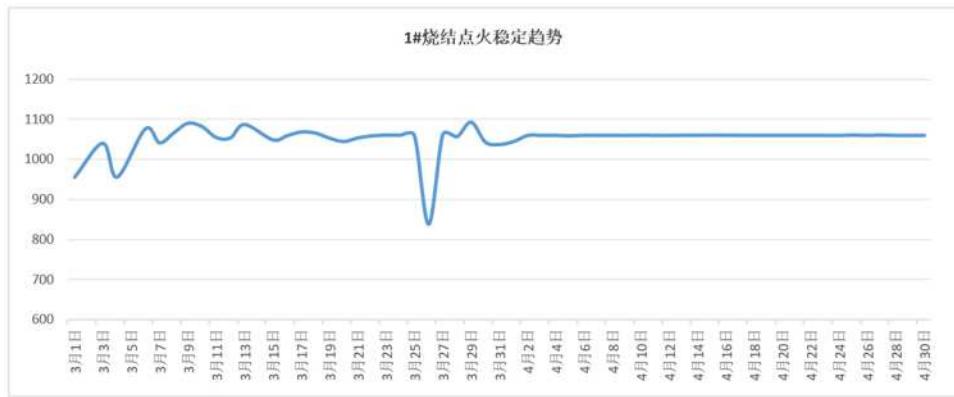


图 4 1# 烧结 3 月 1 日—4 月 30 日点火温度波动情况

3 结论

试验表明, 点火温度控制在 $1060^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, 反馈时间

的趋势。模型计算结果的整体误差较小, 模型对于烧结点火炉操作具有明确的指导意义。

小于 1 分钟, 节约煤气使用量 3%, 长期来看误差具有收敛

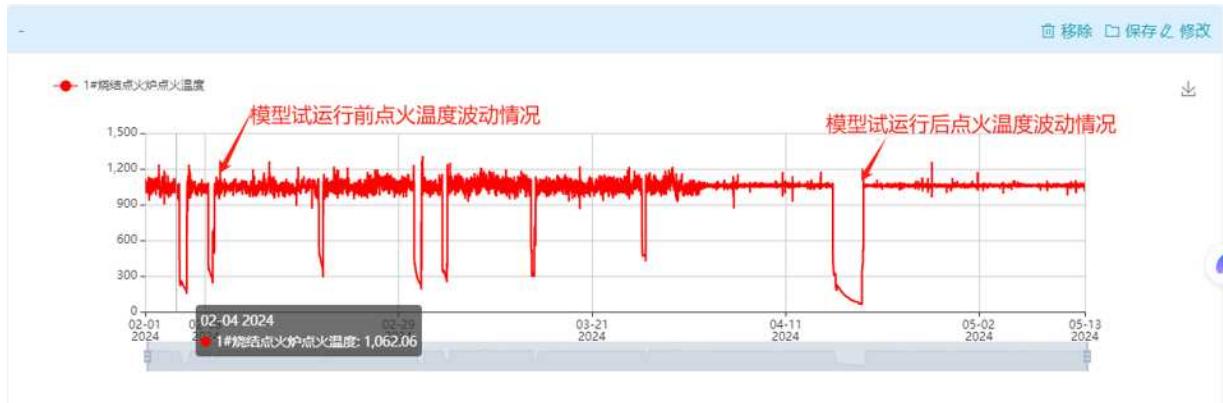


图 5 烧结点火炉温度趋势图

参考文献:

- [1] 李新创. 中国钢铁工业节能低碳发展报告 [J]. 钢铁, 2022, 20(2): 45–60.
- [2] 刘志全. 钢铁行业超低排放改造技术指南 [J]. 烧结, 2020, 15(3): 80–100.
- [3] 郜学已. 钢铁行业超低排放改造技术指南 [J]. 烧结超低排, 2020, 31(4): 136–140.
- [4] 范晓慧, 王海东. 烧结过程数学模型与人工智能 [M]. 湖南: 中南大学出版社, 2002.

[5] 冯二莲, 李楠, 姜涛. 现代烧结生产实用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.

[6] 薛兴昌. 钢铁工业自动化技术手册 [J]. 点火炉, 2020, 32(8): 320–325.

[7] 侯向东. 烧结球团生产操作与控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2024.

作者简介: 雷星 (1989—), 男, 汉族, 重庆市合川区, 中级 (矿物加工), 大学本科, 研究方向为烧结。