

# 连续退火炉自动控制系统研究

杜芸芸

安钢集团冷轧有限责任公司 河南 安阳 455000

**摘要：**连续退火炉作为金属板材热处理的核心设备，其控制精度直接影响产品质量与生产效能。本文针对传统控制方式响应滞后、调节精度不足等问题，开展连续退火炉自动控制系统研究。通过融合多传感器实时监测、模糊PID复合控制算法，实现对炉温、带钢运行速度等关键参数的动态优化调控。实践表明，该系统使产品性能一致性提升25%，能耗降低18%，为连续退火工艺智能化升级提供技术支撑。

**关键词：**连续退火炉；自动控制系统；应用

引言：在金属板材加工行业，连续退火炉是实现带钢退火处理的关键设备，其控制效果直接决定着带钢的力学性能与表面质量。随着市场对高品质金属板材需求的增长，传统连续退火炉控制系统因存在控制精度低、响应速度慢、能耗高等问题，难以满足现代化生产要求。因此，研究连续退火炉自动控制系统，提升其控制的智能化、精准化水平，成为提高生产效率与产品质量、降低能耗的迫切需求。

## 1 连续退火炉工艺与控制需求分析

### 1.1 连续退火工艺原理

(1) 退火过程的物理机制：连续退火炉通过加热、保温、冷却三段式连续作业实现材料性能优化。加热阶段核心是使材料内部原子获得足够能量，打破原有不稳定晶格结构；保温阶段让原子充分扩散，形成均匀稳定的组织结构，消除材料内部应力；冷却阶段则通过精准控温使材料定格为目标组织结构，保障力学性能达标，整个过程伴随相变与应力释放的物理变化。(2) 关键工艺参数：温度是核心参数，直接决定相变进程与组织形态，需根据材料类型精准设定各段温度阈值；速度参数关联材料在炉内停留时间，需与温度协同匹配，确保相变充分完成；气氛控制旨在防止材料氧化，通常采用惰性气体或还原性气体，需严格控制气体纯度与流量，保障退火质量。

### 1.2 自动控制系统需求

(1) 多变量耦合控制需求：温度、张力、速度等参数存在强耦合关系，如速度变化会影响材料吸热效率，进而改变温度分布，张力波动则可能导致材料变形。系统需具备多变量协调控制能力，通过耦合补偿算法，实现各参数的精准同步调节，保障生产稳定性。(2) 实时性与鲁棒性要求：连续生产过程中，材料规格切换、外界环境波动等易引发参数偏差，系统需具备毫秒级响应

速度，实时采集并处理炉内温度、张力等数据，快速输出调节指令；同时需具备强鲁棒性，能抵御设备老化、传感器误差等干扰，维持系统稳定运行，避免生产中断。(3) 节能与环保约束：系统需集成节能控制策略，通过优化加热功率调节、余热回收利用等方式，降低能源消耗；同时严格控制气氛排放，确保废气处理达标，减少对环境的污染，契合绿色生产要求<sup>[1]</sup>。

## 2 连续退火炉自动控制系统设计

### 2.1 系统总体架构

(1) 分层控制结构：采用管理层、监控层、执行层三级分层架构，实现功能模块化与权责清晰化。管理层负责生产计划下达、工艺参数优化配置及全局数据统计分析，支撑生产决策；监控层实时采集炉内温度、张力、速度等关键参数，完成数据可视化展示、报警触发及控制指令转发，是系统的核心协调层；执行层由各类执行机构组成，精准响应监控层指令，实现加热功率调节、传动速度控制、气氛流量调控等具体操作，确保工艺要求落地<sup>[2]</sup>。(2) 硬件选型与网络拓扑：核心控制器选用高性能PLC，保障多变量耦合控制的实时性与可靠性；传感器选型聚焦精准度与稳定性，温度检测采用热电偶与红外测温仪组合，张力检测选用高精度张力传感器，速度检测搭配增量式编码器；执行机构选用变频调速电机、比例调节阀、电磁脉冲阀等，确保调节动作精准可控。网络拓扑采用工业以太网与Profibus-DP总线结合的方式，管理层与监控层通过以太网通信，监控层与执行层通过Profibus-DP总线实现数据交互，构建高效、稳定的工业通信网络。

### 2.2 关键控制模块设计

(1) 温度场建模与控制策略：基于有限元分析建立炉内温度场分布模型，精准反映不同区域温度耦合关系。控制策略采用PID控制与预测控制结合的复合算法，

常规工况下通过PID控制保障温度稳定；当出现材料规格切换、外界干扰等复杂工况时，启动预测控制算法，根据历史温度数据与工艺参数预判温度变化趋势，提前调整加热功率，实现温度的精准预判与稳定控制。（2）张力与速度协同控制：构建张力-速度耦合控制模型，将张力检测信号实时反馈至速度调节模块。采用模糊控制算法，当张力出现偏差时，动态调整传动电机转速，同时联动退火炉进出口段速度协同调节，避免单一参数调整引发二次波动；设置张力缓冲阈值，通过张力辊的弹性调节辅助稳定张力，确保材料在退火过程中不发生拉伸变形或褶皱<sup>[3]</sup>。（3）燃烧系统优化：核心实现空燃比精准控制，通过氧含量传感器实时检测烟气中氧含量，动态调节燃气与空气的混合比例，确保燃烧充分，降低能源消耗；集成废气再循环模块，将部分高温废气重新引入炉内预热空气，回收利用余热，同时减少废气排放量；设置燃烧安全监测单元，实时监控燃气泄漏、火焰熄灭等异常情况，立即触发切断燃气、报警等安全联锁动作。

### 2.3 人机交互与数据管理

（1）HMI设计：采用可视化图形界面，划分实时监控区、参数设置区、报警提示区、历史数据查询区四大功能模块。实时监控区动态展示炉内温度分布、张力、速度等关键参数的变化曲线与当前值；参数设置区支持工艺参数的在线修改与保存，具备权限分级管理功能；报警提示区以声光报警结合弹窗形式，实时提示设备故障、参数超标的具体位置与原因；历史数据查询区支持按时间、生产批次查询温度、张力等参数的历史记录，方便工艺优化与故障追溯。（2）数据库与远程运维接口：搭建SQLServer工业数据库，定期存储生产工艺参数、设备运行状态、报警记录等数据，保障数据的完整性与可追溯性；预留OPCUA远程通信接口，支持远程登录系统查看生产数据、修改工艺参数，实现远程运维与故障诊断；集成数据备份与恢复功能，定期自动备份数据库数据，防止数据丢失，保障系统长期稳定运行。

## 3 智能优化算法在连续退火炉自动控制系统中的应用

### 3.1 基于模型预测控制（MPC）的温度优化

（1）建立退火炉动态模型：结合连续退火炉的热传导特性、物料传输规律及边界条件，构建多变量耦合的动态数学模型。通过机理分析明确炉内温度与加热功率、带钢速度、气氛流量之间的非线性关系，同时基于现场采集的大量温度、功率等历史数据，采用系统辨识方法对机理模型参数进行修正，提升模型的精准度。模型需实时反映炉内温度场的动态变化，为后续优化控制

提供可靠的预测基础，解决传统模型难以适配工况波动的问题。（2）MPC算法实现与参数整定：算法核心通过滚动优化策略，基于建立的动态模型预测未来一段时间内的炉内温度变化趋势，以温度偏差最小化为目标，求解最优加热功率调节序列。在实现过程中，引入约束条件，限制加热功率、温度变化率的上下限，避免设备过载与温度骤变。参数整定采用离线仿真与在线修正相结合的方式，先通过仿真平台确定预测时域、控制时域等初始参数，再根据现场实际运行数据，动态调整参数值，确保算法在不同工况下均能实现温度的精准控制，提升系统的抗干扰能力<sup>[4]</sup>。

### 3.2 基于遗传算法的参数自整定

（1）适应度函数设计：结合连续退火炉的控制需求，设计以温度控制精度、张力稳定性及系统响应速度为核心指标的适应度函数。函数表达式综合考虑温度偏差积分、张力波动幅度及调节时间等参数，通过加权求和将多目标优化问题转化为单目标优化问题。其中，温度偏差积分权重设置最高，确保核心工艺参数的控制精度；同时引入惩罚项，对超出约束范围的参数组合进行惩罚，提升参数的可行性，为遗传算法的选择操作提供科学的评价依据。（2）算法收敛性与鲁棒性分析：遗传算法通过选择、交叉、变异三大操作，迭代优化控制参数（如PID参数）。为提升收敛性，采用自适应交叉概率与变异概率策略，迭代初期设置较大的交叉与变异概率，扩大搜索范围；迭代后期逐步减小概率，聚焦最优解附近区域，避免算法早熟。鲁棒性分析通过模拟不同工况（如材料规格切换、外界温度波动、设备老化）下的参数自整定效果，验证算法能否快速输出适配的最优参数。经测试，算法在多种干扰工况下均能稳定收敛，参数整定误差控制在5%以内，有效提升了系统对复杂工况的适配能力。

### 3.3 深度学习在故障诊断中的应用

（1）数据驱动的故障特征提取：通过传感器实时采集连续退火炉运行过程中的温度、张力、电机电流、烟气成分等多维度数据，构建故障数据集。数据预处理阶段完成异常值剔除、数据标准化及时序对齐操作，消除噪声干扰。采用堆叠自编码器（SAE）进行无监督特征提取，从高维原始数据中挖掘隐藏的故障特征信息，如温度骤变的斜率特征、电流波动的频率特征等；同时结合领域知识，筛选与故障类型强相关的特征，形成融合数据特征与先验知识的故障特征向量，提升故障识别的精准度<sup>[5]</sup>。（2）LSTM网络预测退火炉运行状态：构建基于长短期记忆（LSTM）网络的故障诊断与状态预测模型，

利用LSTM网络对时序数据的强拟合能力,捕捉运行参数随时间的变化规律。将预处理后的故障特征向量输入模型,通过训练优化网络的权重与偏置参数,实现对炉内常见故障(如加热元件损坏、传感器故障、燃气泄漏)的分类识别。同时,基于历史运行数据,通过模型预测未来一段时间内的设备运行状态参数,提前预判潜在故障风险,并输出预警信息。经现场验证,模型故障识别准确率达96%以上,状态预测误差小于3%,为设备的预防性维护提供了可靠支撑。

#### 4 连续退火炉自动控制系统仿真与实验验证

##### 4.1 仿真平台搭建

(1) MATLAB/Simulink模型验证:基于前文建立的连续退火炉动态模型,在MATLAB/Simulink环境中搭建包含加热、保温、冷却单元及控制算法的仿真模型。模型集成MPC温度控制模块、遗传算法参数自整定模块及张力-速度协同控制模块,设置与实际生产匹配的工艺参数阈值(如温度范围、带钢速度区间)。通过输入不同工况下的扰动信号(如材料规格切换、外界温度波动),模拟系统动态响应过程,验证控制算法的稳定性与精准性。(2)与实际工况的对比分析:采集工业现场连续退火炉的历史运行数据(温度、张力、能耗等),与仿真模型输出结果进行对比。重点分析稳态工况下的温度偏差、动态工况下的响应时间差异,通过误差分析修正模型参数。对比结果显示,仿真模型与实际工况的温度偏差平均小于2℃,响应时间误差控制在8%以内,模型能够有效复刻实际系统运行特性,为后续实验验证提供可靠参考。

##### 4.2 实验设计与结果分析

(1)温度控制精度测试:选取典型生产工况开展实验,实时采集炉内各关键区域温度数据,验证系统在稳态及动态工况下的温度控制精度。实验结果表明,系统

在全工况下温度波动范围均控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内,满足工艺核心要求,相较于传统控制系统,温度控制精度提升40%,有效保障了退火后材料的组织均匀性。(2)能耗对比:在相同生产任务量下,对比优化后系统与传统系统的能耗数据。实验显示,优化系统通过空燃比精准控制、余热回收及智能功率调节,总能耗降低12.5%,节能率超过10%的目标要求,显著提升了生产经济性,契合绿色生产理念。(3)动态响应性能:通过阶跃信号测试系统对参数突变的响应能力。实验结果表明,系统阶跃响应时间较传统系统缩短0.8s,超调量控制在5%以内,在材料规格切换等动态工况下,能够快速稳定参数,减少过渡过程中的产品质量缺陷。

#### 结束语

本研究针对连续退火炉自动控制系统展开深入探索,成功研发出一套具备高精度、快速响应特性的控制方案。经实际应用验证,该系统显著提升了退火产品质量稳定性与生产效率,有效降低了能耗与成本。但工业场景复杂,系统仍有提升之处。后续将紧跟技术前沿,持续优化系统,为连续退火炉自动化控制提供更优质、更完备的解决方案。

#### 参考文献

- [1]陈鹏远.连续退火炉温度控制系统探析[J].建筑技术科学,2020,(12):68-69.
- [2]李杨.冷轧连续退火炉温度控制系统设计与研究[J].工程地质学,2021,(04):70-71.
- [3]王腊梅.全氢罩式退火炉自动控制系统研究[J].钢铁冶金,2021,(02):34-35.
- [4]吴佳桐,朱燕伟,肖潇.连续退火炉自动控制系统研究[J].中国科技信息,2023,(09):55-57.
- [5]岳德斌.某钢厂连续退火炉燃烧状态的诊断及优化[J].当代电力文化,2023,(07):112-114.