

Automated Control of High Magnetic Induction Oriented Silicon Steel Annealing Process Based on Improved PID Algorithm

Jiangwei Tian

Angang Southern Electromagnetic New Material Technology Co., Ltd., Anyang, Henan, 455000, China

Abstract

High magnetic induction-oriented silicon steel is the “chip” in high-end equipment fields such as power and new energy. The precision control of parameters like temperature, atmosphere, and tension during the annealing process directly determines the product’s magnetic permeability and iron loss performance. Traditional PID control features fixed parameters and weak anti-interference capability, failing to meet the nonlinear and large-lag characteristics required for the annealing process, resulting in poor product performance consistency. This paper proposes an improved PID algorithm integrating fuzzy logic and parameter self-tuning, enabling dynamic adjustment of proportional (Kp), integral (Ki), and derivative (Kd) parameters based on real-time identification of the annealing process stages (heating, holding, cooling). Simulation and industrial tests demonstrate that this algorithm reduces the annealing temperature fluctuation range from $\pm 5^{\circ}\text{C}$ to $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$, improves hydrogen partial pressure control accuracy by 32%, increases average magnetic permeability by 11.7%, and reduces iron loss by 9.3%. The study provides an efficient and stable automated control solution for the annealing process of high magnetic induction-oriented silicon steel, promoting the localization and intelligent development of high-end silicon steel production.

Keywords

Improved PID algorithm; High magnetic induction orientation; Silicon steel annealing process; Automated control

基于改进 PID 算法的高磁感应取向硅钢退火过程自动化控制

田江伟

安钢南方电磁新材料科技有限公司, 中国·河南 安阳 455000

摘要

高磁感应取向硅钢是电力、新能源等高端装备领域的“芯片”，其退火过程的温度、气氛、张力等参数控制精度直接决定了产品的磁导率、铁损等性能。传统PID控制参数固定、抗干扰能力弱，无法满足退火过程非线性、大滞后特性要求，造成产品性能一致性差。本文提出一种融合模糊逻辑与参数自整定的改进PID算法，实现比例（Kp）、积分（Ki）、微分（Kd）参数根据实时识别的退火工艺阶段（升温、保温、冷却）动态整定，经仿真和工业试验表明：该算法使退火温度波动范围由 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 减少到 $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ ，氢气分压控制精度提高了32%，产品磁导率平均提高11.7%，铁损降低9.3%。研究给出高磁感应取向硅钢退火过程高效、稳定的自动化控制方案，促进了高端硅钢生产向国产化、智能化方向的发展。

关键词

改进PID算法；高磁感应取向；硅钢退火过程；自动化控制

1 引言

高磁感应取向硅钢属于变压器、发电机这类电力设备的重要铁芯材料，其磁性能的优劣直接影响电力传输效率和设备能耗，退火工艺是取向硅钢生产的关键工序，要准确把握温度梯度、气氛组分和钢带张力，才能促使晶粒择优取向和二次再结晶，形成良好的高斯织构，当下国内高端取向硅钢生产存在控制难题：传统手动控制依靠操作人员经验，

容易出现人为误差，造成工艺波动；常规PID控制参数整定之后就固定不变，不能适应退火过程中物料特性、环境温度等因素不断变化的情况，抗干扰能力较差。这些问题造成产品磁导率离散度大，铁损超标，限制了我国高端取向硅钢的自给率，鉴于此，本文围绕改进PID算法的设计与应用，搭建契合退火过程特性的自动化控制系统，经由算法改进与工艺融合，优化控制精度与稳定性，给高端取向硅钢的规模化、高品质生产给予技术支撑。

【作者简介】田江伟（1988-），男，中国河南西平人，本科，工程师，从事电气自动化研究。

2 改进 PID 算法的高磁感应取向硅钢退火过程自动化控制意义

2.1 突破传统控制精度瓶颈

高磁感应取向硅钢退火过程具有强非线性，大滞后及多参数耦合特点，传统 PID 控制依靠参数静态设定，应对温度、气氛等参数动态变化时比较吃力，改良 PID 算法可做到实时反馈调节参数，使得温度控制精度从 ± 5 摄氏度优化到正负 1.2 摄氏度以内，气氛组分控制误差缩小到 2% 以下，这种提升精度能减小晶粒取向偏差，推动二次再结晶均匀性，使产品磁导率等关键指标达到国际先进水平，从而打破传统控制技术性能限制^[1]。

2.2 支撑高端硅钢国产化进程

我国是硅钢生产大国，高端高磁感应取向硅钢依赖进口，核心“卡脖子”技术之一就是退火过程精准控制技术，本研究自动化控制方案可直接应用于现有生产线升级，无需大规模改造设备，降低技术落地门槛，通过实现退火工艺标准化自动化控制，可大幅提高国产高端取向硅钢产品一致性与稳定性，减少进口依赖，推动我国钢铁行业向高端制造转型^[2]。

2.3 降低生产成本与能耗

传统退火控制方式不仅能耗高，废品率也高，人工干预频繁使生产效率低，改进 PID 算法的自动化控制系统可精准匹配工艺参数，降低能源消耗 8%-12%，废品率 3%-5%，企业生产成本减少 10% 以上，产品市场竞争力显著增强，为行业带来可观的经济效益。

2.4 丰富工业过程控制算法应用

现有改进 PID 算法大多用在机械制造，化工等领域，对于取向硅钢退火这种独特的工业场景，研究比较少，这项研究把退火工艺的非线性，时变特性等融合进去，改良算法的参数调节逻辑和反馈机制，给改进 PID 算法在冶金高温工艺中的应用赋予新的思路和操作实例，研究成果能充实工业过程控制的学术体系，为类似高温热处理工艺的控制改良给予借鉴^[3]。

3 改进 PID 算法的高磁感应取向硅钢退火研究现状

3.1 取向硅钢退火工艺研究现状

取向硅钢退火工艺包含升温、保温、冷却三个阶段，其核心目的在于通过调控温度与气氛，达成晶粒的择优取向，国外巨头像日本 JFE、德国 Thyssenkrupp 已构建起成熟的退火工艺体系，可将保温温度精准控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内，氢气分压稳定在目标值的 $\pm 1\%$ ^[4]。国内的研究大多集中在工艺参数的单因素考察，好比调整保温时间、氢气流量等，却缺少针对多参数耦合作用的探究，造成工艺稳定性欠佳，产品性能离散度较大。

3.2 传统 PID 控制应用现状

传统 PID 控制因其结构简洁，易于达成，所以被全面运用到硅钢退火生产线的温度，压力控制当中，但是它有明显的局限之处，参数整定依靠经验，难以兼顾动态响应和稳态精度，对退火过程中非线性特点适应性差，容易出现超调或者振荡，而且抗干扰能力不强，当环境温度，物料厚度发生改变的时候，控制效果明显变差，国内大半中低端生产线依然采用常规 PID 控制，这成为影响产品质量提升的关键因素^[5]。

3.3 改进 PID 算法研究现状

国内外学者针对传统 PID 的缺陷，提出诸多改善方案，模糊 PID 算法按照模糊逻辑规则灵活调整参数，在化工反应釜，温度控制等场合应用时抗干扰能力变强，神经网络 PID 依靠神经网络自学习能力改良参数，合适非线性系统，只是计算复杂，参数自整定 PID 利用偏差和偏差变化率自动矫正参数，其响应速度会更快，不过这些改善算法应用到取向硅钢退火过程中的较少，缺少针对具体工艺特性的深度融合，没有成熟化的工业方案。

表 1 传统 PID 与改进 PID 算法温度控制数据对比

退火时间(s)	目标温度(°C)	传统 PID 实际温度(°C)	改进 PID 实际温度(°C)	传统 PID 偏差(°C)	改进 PID 偏差(°C)
0	室温(25)	25.0	25.0	0.0	0.0
100	450	482.5	456.3	+32.5	+6.3
200	700	785.0	709.8	+85.0	+9.8
300	850	977.5	873.8	+127.5	+23.8
400	850	853.2	850.9	+3.2	+0.9
500	850	847.1	849.2	-2.9	-0.8
600	850	854.8	851.1	+4.8	+1.1
700	850	845.3	849.5	-4.7	-0.5
800	850	852.6	850.7	+2.6	+0.7
900	650	678.4	652.3	+28.4	+2.3
1000	400	421.7	398.9	+21.7	-1.1

3.4 退火过程自动化控制技术现状

国外高端生产线达到退火过程全自动化控制，采用 PLC 和工业计算机构成的分布式控制系统，融合高精度传感器完成参数的即时采集和反馈，国内部分大型钢铁企业引入自动化控制设备，存在“重硬件，轻软件”现象，控制系统与工艺适配性差，算法优化不到位，国内自动化控制系统的智能化水平不高，缺少预测性维持和自适应调节功能，无法达到高端取向硅钢的生产要求。

4 基于改进 PID 算法的自动化控制策略

4.1 改进 PID 算法设计

采用模糊 PID 和参数自整定相结合的改良方案，重点在于创建起退火工艺特性的模糊规则库，以温度偏差 e 和偏

差变化率 ec 为输入, 利用模糊推理动态调整 K_p , K_i , K_d 参数, 升温时加大 K_p 和 K_i , 加快响应速度, 保温时减小 K_p , 增大 K_i , 提升稳态精度, 冷却时改良 K_d , 抑制超调, 算法加入积分分离机制, 当偏差较大时暂停积分作用, 防止积分饱和, 保证系统稳定, 借助 MATLAB/Simulink 做仿真验证, 改良算法的超调量从传统 PID 的 15% 降到 3% 以下, 调节时间缩短 40%。

4.2 控制参数优化策略

根据取向硅钢退火工艺要求, 确定核心控制参数优化目标: 温度控制精度 $\pm 1.2^\circ\text{C}$ 、氢气分压控制精度 $\pm 2\%$ 、钢带张力控制精度 $\pm 5\text{N}$ 。开展正交试验, 设计多组参数组合仿真与试验, 分析 K_p 、 K_i 、 K_d 对各控制参数影响权重。根据不同退火阶段特点, 制定差异化参数优化方案, 升温阶段快速响应目标下 K_p 取 0.8-1.2、 K_i 取 0.05-0.1、 K_d 取 0.1-0.2; 保温阶段稳态精度目标下 K_p 取 0.3-0.6、 K_i 取 0.1-0.15、 K_d 取 0.2-0.3; 冷却阶段平稳过渡目标下 K_p 取 0.5-0.8、 K_i 取 0.08-0.12、 K_d 取 0.3-0.4。

4.3 自动化控制系统架构

构建采用“感知-决策-执行”三级控制系统架构。采用铂铑热电偶测温精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、氢气传感器测气氛组分响应时间 $\leq 1\text{s}$ 、张力传感器测钢带张力误差 $\pm 1\text{N}$ 高精度传感器进行参数采集, 决策层采用 PLC 作为核心, 集成改进 PID 算法模块, 通过工业以太网接收感知层数据, 经过算法运算后输出控制指令, 执行层采用加热装置、氢气流量调节阀、张力调节辊等执行机构根据决策层指令执行, 完成对工艺参数的精确控制。并且设计上位机监控界面, 实现参数实时显示、历史数据查询、故障报警等功能, 方便操作。

4.4 系统验证与实施方法

采用“仿真验证-实验室试验-工业现场试验”三步走方法, 在 MATLAB/Simulink 上搭建退火过程仿真模型, 比

较改进 PID 控制和传统 PID 控制的效果, 修改算法的参数, 再在实验室的小型退火炉上做试验, 以 $30\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的取向硅钢试样为对象, 验证系统对温度、气氛的控制能力, 最后在某钢铁企业取向硅钢生产线上做工业试验, 选取 100 卷产品做批量试验, 记录退火时的参数变化和产品性能指标, 试验表明, 改进后的控制系统使产品磁导率平均提高 11.7%, 铁损降低 9.3%, 生产效率提高 15%, 满足高端取向硅钢的生产要求。

5 结语

综上所述, 本文针对高磁感应取向硅钢退火过程控制难题, 给出改良 PID 算法的自动化控制方案, 经由算法改良, 参数调整, 系统构建, 达成对退火过程的精准, 稳定控制, 研究显示, 改良 PID 算法解决了传统 PID 参数固定, 抗干扰能力差的不足, 符合退火过程非线性, 大滞后的特点; 搭建的自动化控制系统达成了工艺参数的实时采集, 动态调节和闭环控制, 改进了产品性能和生产效率。这项研究成果, 一方面给高端取向硅钢的生产给予了技术支撑, 另一方面也为类似高温热处理工艺的控制优化提供了参考, 以后可以进一步融合人工智能, 大数据等技术, 研制具有预测性维修, 自适应学习能力的智能控制系统, 不断改进控制精度和智能水平, 推动我国冶金行业向高端化, 智能化方向转型。

参考文献

- [1] 郑韩超,董振虎,黎先浩,等.取向硅钢高温环形退火炉烧嘴研究及常见故障处理[J].电工钢,2024,6(06):43-46.
- [2] 陆佳栋,张杰,黄杰,等.常化工艺对新能源汽车驱动电机用退火无取向硅钢磁性能的影响[J].金属热处理,2024,49(11):149-155.
- [3] 宋天乐,王仲亮,包燕平,等.高品质取向硅钢关键生产技术研究进展[J].电工钢,2023,5(02):5-12.
- [4] 董丽丽,黄禄璐,卢晓禹,等.高磁感取向硅钢的脱碳退火工艺[J].金属热处理,2023,48(03):124-128.