

电磁加热轮胎硫化机智能控制系统

李长泰, 王莉, 薛福光, 褚宏图

(青岛海琅智能装备有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要: 针对传统蒸汽加热轮胎硫化工艺存在的能耗高、温度均匀性差、响应滞后及控制精度不足等问题, 本文提出并设计了一套基于电磁感应加热技术的轮胎硫化机智能控制系统。系统以 PLC 为核心控制器, 结合高频电磁加热电源, 并引入模糊自适应 PID 控制算法, 构建了一个集精准控温、多阶段工艺管理、状态实时监控与故障诊断于一体的智能控制体系。通过 Simulink 仿真及实验验证, 结果表明: 相较于传统方式, 该系统将模具表面温度均匀性提高了 60% 以上, 升降温响应速度提升约 50%, 综合节能效果超过 30%, 硫化工艺参数重复精度达到 ± 0.5 °C, 显著提升了轮胎硫化质量和生产效率, 实现了硫化过程的绿色化与智能化升级。

关键词: 轮胎硫化; 电磁感应加热; 智能控制系统; 模糊 PID; 温度均匀性; 节能

引用论文: 李长泰, 王莉, 薛福光, 等. 电磁加热轮胎硫化机智能控制系统 [J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(4):66-70.

中图分类号: TQ330.493

文章编号: 1009-797X(2026)04-0066-11

文献标识码: B

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2026.04.014

0 引言

轮胎硫化是决定轮胎最终性能的核心工艺环节, 其本质是在热与力的作用下, 使橡胶发生交联反应。传统的硫化热源主要依赖饱和蒸汽或过热蒸汽, 存在热效率低、温度控制滞后、大型模具温差大、配套系统复杂等固有缺陷。电磁感应加热技术通过磁场直接在金属模具内部感应涡流产生热量, 具有热效率高、加热均匀、响应迅速及清洁环保等突出优点, 是替代传统蒸汽加热的理想方案^[1]。然而, 将电磁加热技术应用于轮胎硫化机, 并实现稳定、精确的工艺控制, 面临诸多挑战: 电磁加热系统本身具有非线性及时变性; 硫化工艺要求对温度、压力进行多阶段、高精度的协同控制; 生产现场对系统的可靠性与智能化水平要求日益提高。因此, 开发一套与之匹配的智能控制系统至关重要。

本文旨在研究并设计一套完整的电磁加热轮胎硫化机智能控制系统。该系统融合先进的传感技术、PLC 控制技术 & 智能算法, 构建了一个集精准控温、工艺管理、状态监控与故障诊断于一体的智能化平台, 旨在全面提升轮胎硫化的质量、效率与能效水平。

1 系统总体设计

1.1 系统架构

本智能控制系统采用“集中管理、分散控制”的

思想, 设计为设备层、控制层与管理层三层网络架构, 其总体架构如图 1 所示。

1.1.1 设备执行层

是系统的物理基础, 包括直接产生热能的高频电磁加热电源及环绕模具的感应线圈、提供合模与内压的液压执行机构(液压站、比例阀、油缸)、完成合模动作的机械结构, 以及遍布模具关键位置的高精度温度传感器和压力传感器。

1.1.2 智能控制层

以高性能西门子 S7-1500 系列 PLC 为核心, 是系统的“大脑”。它负责采集所有传感器信号, 运行温度控制、压力控制、工艺逻辑等核心算法, 并向电磁加热电源、比例阀等执行器发出精确指令, 实现闭环控制^[2]。

1.1.3 监控管理层

由工业触摸屏(HMI)和上位机监控系统构成, 提供人机交互界面。负责工艺配方的输入与管理、生产过程数据与曲线的实时显示与记录、历史数据追溯、报警信息处理及系统状态监控^[3]。

1.2 电磁加热单元设计

电磁加热单元是系统的热源核心。其工作原理是

作者简介: 李长泰(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事橡塑智能装备控制系统的研发、制造和技术管理工作。

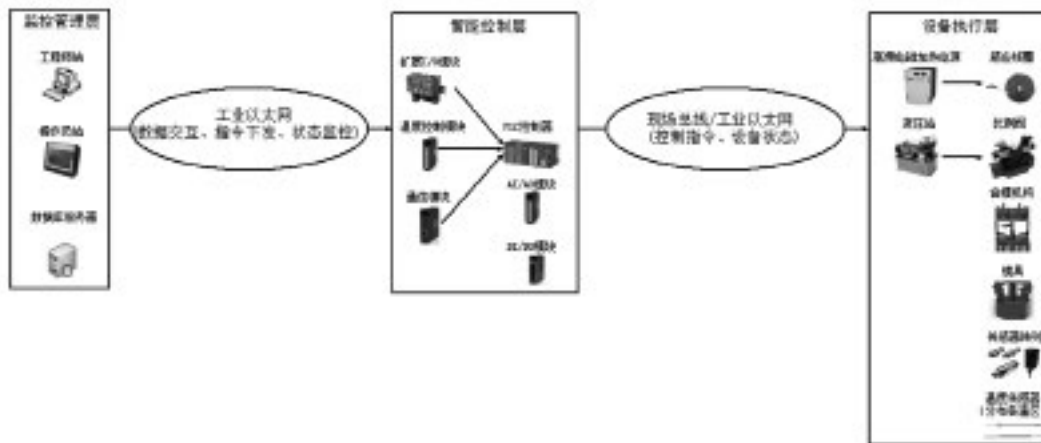


图1 电磁加热轮胎硫化机智能控制系统总体架构图

高频电磁加热电源（通常频率在 10~50 kHz）将工频交流电转换为高频交流电，通过精心布置在模具外围或内部的感应线圈，产生高频交变磁场。该磁场穿透模具表面，在金属内部产生涡流，利用金属的自身电阻实现高效、均匀的生热。

1.2.1 线圈设计

采用分布式、分层绕制结构，根据模具 3D 模型进行电磁-热耦合仿真，优化线圈匝数、分布及间距，确保模具轴向和径向的温度均匀性。轴向采用变节距螺旋绕组，径向布置多层正交回路，消除磁场盲区。Litz 线（利兹线）结构降低高频趋肤损耗，外覆耐高温聚酰亚胺绝缘层（450 °C 级），确保能量精准作用于金属模具。

1.2.2 电源选型

选用功率可连续调节（0~100%）的 IGBT 高频电源，功率密度需满足最大升温速率要求，并具备过流、过压、过热及缺相保护功能。高频电源（10~50 kHz）将工频电转化为交变电流，通过趋肤效应（Skin Effect）在金属表层 0.1~1 mm 深度内形成密集涡流。电流克服金属电阻做功（焦耳定律），实现 95% 以上电能-热能转化率，远高于电阻加热（70%~85%）。

2 控制系统核心模块设计

2.1 温度精准控制模块

温度是硫化质量的决定性因素。系统采用“分区控制”策略，将大型模具划分为多个独立的温控区域（如侧模、上模、下模等），每个区域配备独立的温度传感器和电磁加热线圈。

2.1.1 加热原理

高频电磁加热电源将工频电转换为频率为 10~50 kHz 的高频交流电，驱动感应线圈产生高频交变磁场。该磁场穿透模具表面，在其内部金属中产生涡流，由于金属自身的电阻效应而直接发热，实现了“模具自发热”。

2.1.2 智能控制算法

针对电磁加热的时变非线性特性，采用模糊自适应 PID 控制算法。该算法能在线自动整定 PID 参数，克服传统 PID 参数固定、适应性差的缺点。其工作原理如图 2 所示。

模糊控制器根据实时温度误差 e 和误差变化率 ec ，依据专家经验建立的模糊规则（例如：“若 e 为正大且 ec 为负小，则 ΔK_p 取正大， ΔK_i 取零， ΔK_d 取负中”），在线推理并输出 PID 参数的调整量，使控制器能动态适应过程变化，实现快速、平稳、无超调的温度跟踪。

2.2 多阶段硫化工艺管理模块

一条完整的硫化工艺曲线包含多个阶段：合模加压、快速升温、多级保温、后硫化、降温开模等。系统内置配方数据库，可存储和管理数百种不同规格轮胎的硫化工艺配方（温度-压力-时间曲线）。

硫化工艺的核心是“胶料硫化反应”（硫磺与橡胶分子的交联反应），而曲线的每个阶段都围绕“控制反应速率”和“保证均匀性”设计，具体如下：

（1）合模加压：轮胎成型的“基础封印”，合模加压是硫化的第一步，其本质是通过机械力将胶料限制在模具型腔中，为后续升温硫化提供“封闭空间”。

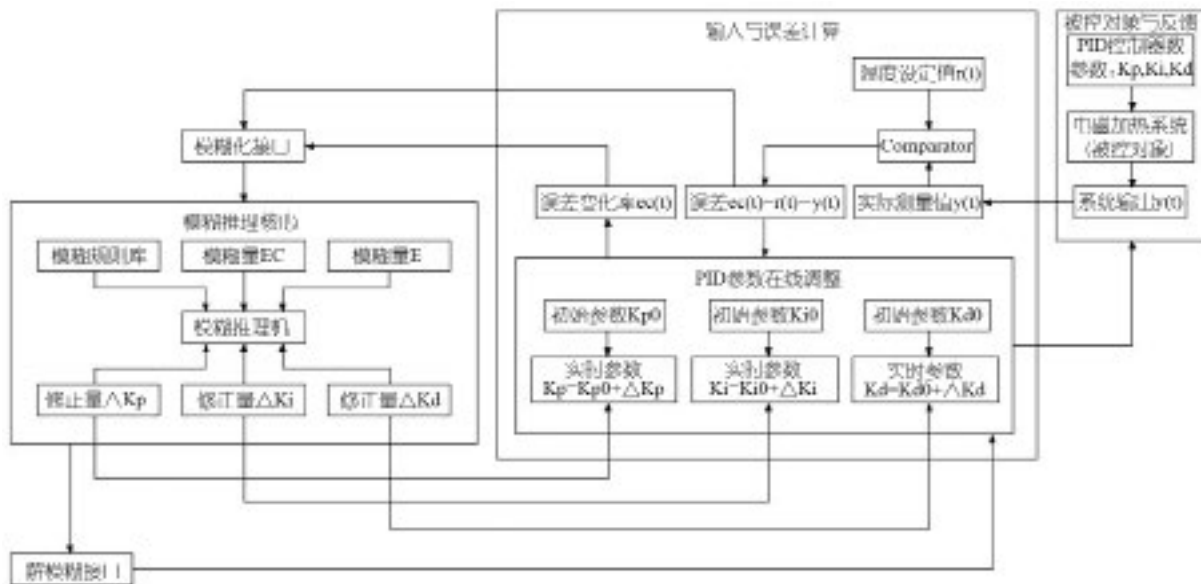


图2 模糊自适应PID控制器结构框图

(2) 快速升温：激活硫化反应的“启动键”，快速升温的目的是将胶料温度从室温快速提升至“硫化反应起始温度”（通常 130~150 °C），激活硫化剂（如硫磺、促进剂）的活性，启动橡胶分子的交联反应。

(3) 多级保温：硫化反应的“核心战场”，多级保温是硫化曲线中时间最长、参数最复杂的阶段（占总硫化时间的 60%~70%），其目的是分阶段控制交联反应速率，确保胶料从“流动状态”向“网状结构”转变时，内外均匀、性能达标。

(4) 后硫化：厚轮胎的“补漏环节”，后硫化是针对厚规格轮胎（如 18" 以上 SUV 轮胎）设计的“补充阶段”，其目的是解决“内外硫化不均”问题——厚轮胎的“v 开模的目的是将轮胎从“高温硫化状态”冷却至“可脱模温度”（80~90 °C），防止因热膨胀导致“脱模变形”。

2.2.1 时序控制

PLC 严格按照配方设定的时间节点，自动切换各阶段的温度与压力设定值。时序控制是硫化工艺的“时间轴”，PLC（可编程逻辑控制器）作为“大脑”，需严格按照配方设定的时间节点，切换各阶段的温度、压力参数，其精度直接决定了“硫化一致性”（同一批次轮胎的性能差异）。

2.2.2 压力协同控制

液压系统通过比例阀和压力传感器构成闭环，精确控制合模力及内压，确保压力曲线与温度曲线的最佳协同。压力协同控制是硫化工艺的“灵魂”——合

模力（模具的机械力）与内压（轮胎内腔的压力）需与温度“动态匹配”，才能确保胶料在“流动-硫化”过程中，不溢出、不收缩、花纹清晰。温度压力画面如图 3 所示。

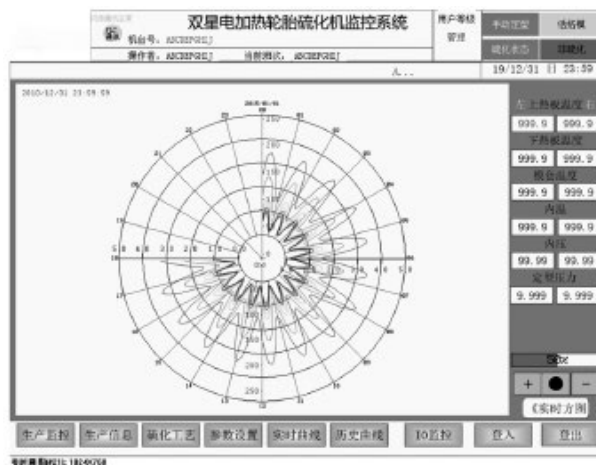


图3 温度压力协同控制曲线

2.3 智能监控与故障诊断模块

2.3.1 实时监控

HMI 界面动态显示所有温区的实际和设定温度曲线、系统压力、电源状态、当前阶段及剩余时间等。智能监控与故障诊断模块：构建热处理产线的数字化神经中枢，该模块是现代热处理装备智能化升级的核心引擎，深度融合实时数据采集、智能分析决策与闭环管理功能，实现对设备运行状态的全息感知、异常精准干预及工艺深度优化。其设计目标在于最大化设

备可靠性、工艺稳定性与生产透明度。

(1) 动态工艺曲线可视化, HMI 界面以高刷新率 ($\geq 1 \text{ Hz}$) 同步渲染所有温区设定温度 - 实际温度双轨曲线, 支持毫秒级延迟显示, 直观呈现加热 / 保温 / 冷却各阶段的温度跟随精度与均匀性偏差; 集成压力 - 流量 - 时间三维图谱, 实时监控管道内氦气动态, 结合阀门开度反馈, 构建气路系统状态全景视图。

(2) 生产进度智能导航, 阶段化进程管理: 自动识别当前工艺阶段 (预热 / 加热 / 定型 / 抽真空), 并基于剩余时间倒计时与能耗预估, 辅助生产调度决策; 异常工况标定: 当参数偏离安全阈值时, 曲线自动触发颜色报警标记 (如超温段显红色), 实现异常快速定位。

2.3.2 故障诊断

系统预置故障模型库, 通过分析传感器数据、电源参数和设备状态 (如线圈短路、热电偶断路、超温、压力异常等), 实现故障的实时报警、分类和初步定位, 并给出处理建议, 提高设备可维护性。故障诊断画面如图 4、图 5 所示。

(1) 故障知识库与模型引擎, 多层次故障树建模: 内置典型故障模式 (如加热线圈匝间短路、热电偶动态漂移、液压系统保压失效), 覆盖电气 / 传感 / 热工 / 机械全系统; 多源数据协同分析: 吸合电流突增 (线圈短路特征)、温区温差扩大 (热电偶失效)、压力梯度异常 (阀门泄漏) 等关联参数组合判据, 降低误报率。

(2) 诊断 - 响应闭环机制, 四级报警策略: 区分预警 (黄色)、报警 (红色)、急停 (闪烁红色) 等级别, 对应不同处置时效; 根因定位与处置指引: 报警触发同时推送故障定位树状图及处理预案 (如 “T3 区热电偶断路: 检查接线端子 X7-24”), 缩短 MTTR (平均修复时间) 30% 以上。

2.3.3 数据管理

所有工艺参数、生产数据、报警记录均存储于数据库, 支持按时间、批次、规格等进行查询、分析和导出, 为质量追溯和工艺优化提供数据支撑。

(1) 结构化数据仓储架构, 时序数据库 高效存储秒级传感器数据流, 关系型数据库 管理工艺配方、报警事件等结构化数据, 支持 TB 级历史数据毫秒检索; 元数据标签体系: 为每条数据附加批次号、工件图号、操作员工号等 20+ 维度标签, 实现全要素追溯。

(2) 深度分析应用场景, 工艺合规性审计: 自动比对实际温度 - 时间曲线与工艺规范窗口 (如

AMS2750E), 生成符合性报告; SPC (统计过程控制): 对关键参数 (如压力) 进行 CPK 分析, 识别系统性偏差; 能耗瓶颈诊断: 按温区 / 时段统计能耗分布, 定位热效率洼地 (如模具密封劣化导致保温能耗上升 15%)。

(3) 知识沉淀与协同优化, 报警解决方案库: 积累维修案例与处置有效性评分, 形成企业专属知识库。

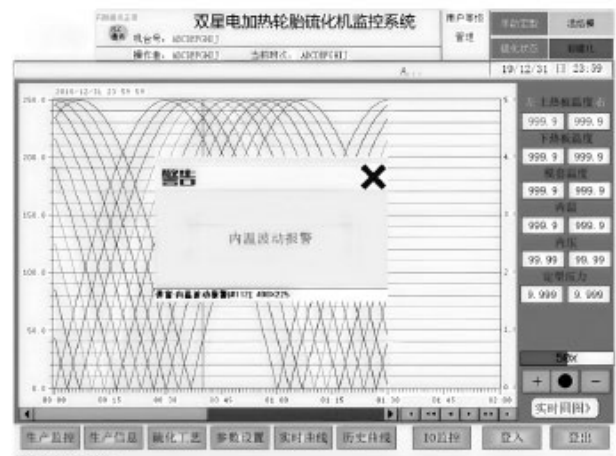


图 4 内温故障诊断



图 5 外温故障诊断

3 仿真与实验分析

为验证所设计控制策略的优越性, 首先在 Simulink 环境中搭建了电磁加热温控系统模型, 对比传统 PID 与模糊自适应 PID 的控制性能。仿真设定一条包含快速升温和多段保温的典型硫化温度曲线。

仿真结果表明, 在相同的工况下, 模糊自适应 PID 控制相较于传统 PID 控制, 上升时间缩短了约 38%, 最大超调量降低至 1% 以下, 并且在设定值变化及存在扰动时, 表现出更强的鲁棒性和更小的稳态

误差。

随后，在 1 台 65" 双模轮胎硫化机改造项目上进行了实验。将原有蒸汽加热系统替换为本文设计的电磁加热智能控制系统。

温度均匀性测试：在模具关键位置布置多个测温点，在恒温阶段，各点温差从传统蒸汽加热的 $\pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 缩小至 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内，均匀性提升超过 60%。

能耗对比：生产同规格轮胎，记录一个完整生产周期的总耗电量（电磁加热）与总耗汽量（折算为标准煤），综合计算显示节能率达到 32%~35%。

工艺重复精度：连续生产 10 条轮胎，同一测温点的最高温度重复精度在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。

硫化质量：对硫化出的轮胎进行解剖分析，其断面胶料熟度均匀性显著改善，产品力学性能（如拉伸强度、耐磨性）的一致性得到提高。

4 结论与展望

本文设计并实现的电磁加热轮胎硫化机智能控制系统，成功地将高效清洁的电磁加热技术与先进的智能控制算法相结合。通过采用模糊自适应 PID 和多区协同控制策略，系统显著提升了硫化过程的温度控制

精度、均匀性和响应速度，并取得了可观的节能效益。实验数据充分验证了该系统在提升轮胎产品质量、生产效率和实现绿色制造方面的巨大优势。未来应用 AI 技术可以围绕以下方向展开进一步研究开发。

(1) 工艺优化与自学习：引入机器 AI 自学习算法，通过对海量生产数据的学习，自动优化硫化工艺参数，实现从“精确控制”到“最优控制”的跨越。

(2) 数字孪生与预测性维护：构建硫化机的数字孪生模型，实时映射物理实体的状态，实现设备性能的预测和剩余寿命评估，实时数据分析，通过传感器持续监测设备状态，AI 算法识别潜在故障征兆并提前预警，推动维护模式向预测性维护转变。

(3) 柔性化与自动化生产：自适应 AI 控制算法，使硫化机能无缝对接工厂级 MES 管理系统，快速响应生产计划的变更，实现多品种、小批次的柔性生产。

参考文献：

- [1] 潘星, 王冠中. 电磁感应加热技术在轮胎硫化机上的应用研究 [J]. 橡胶工业, 2020, 67(9): 68-70.
- [2] 芮庆忠, 黄诚. 西门子 S7-1500 PLC 编程及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2023.
- [3] 廖常初. 西门子人机界面(触摸屏)组态与应用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

Intelligent control system for electromagnetic heating tire curing press

Li Changtai, Wang Li, Xue Fuguang, Chu Hongtu

(Qingdao Hilang Intelligent Equipment Co. LTD., Qingdao 266400, Shandong, China)

Abstract: In view of the problems of high energy consumption, poor temperature uniformity, response lag, and insufficient control accuracy in the traditional steam-heated tire curing process, this paper proposes and designs an intelligent control system for tire curing press based on electromagnetic induction heating technology. The system uses PLC as the core controller, combines high-frequency electromagnetic heating power supply, and introduces a fuzzy adaptive PID control algorithm to construct an intelligent control system integrating precise temperature control, multi-stage process management, real-time state monitoring, and fault diagnosis. The system is verified through Simulink simulation and experiments. The results show that compared to traditional methods, the system improves the temperature uniformity of the mold surface by more than 60%, enhances the temperature rise and fall response speed by about 50%, achieves a comprehensive energy-saving effect of over 30%, and achieves a repeatability accuracy of $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ for curing process parameters. This significantly improves the quality and production efficiency of tire curing, realizing the green and intelligent upgrading of the curing process.

Key words: tire vulcanization; electromagnetic induction heating; intelligent control system; fuzzy PID; temperature uniformity; energy saving

(R-03)