

人工智能驱动硫化机： 电气控制、智能编程与数字孪生调试研究

王虾妹

(中化(福建)橡塑机械有限公司, 福建 三明 365500)

摘要：橡胶硫化工序决定橡塑产品品质与生产收益，传统硫化机采用固定参数PID控制，存在参数自适应能力弱、人工编程效率低、现场调试依靠试错等问题，易造成温压偏差大、能耗偏高、故障预警滞后等问题。本文引入人工智能技术，从电气智能控制、智能程序编写、数字孪生调试三方面开展研究，运用智能算法优化工艺参数与能耗分配，依托模块化思路重构编程体系，借助虚拟仿真完成设备校准。实际应用表明，升级设备温控误差控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，压力误差不超 $\pm 0.05\text{ MPa}$ ，调试时间缩减七成以上，产品质量与运行效率显著提高。研究成果可为橡塑设备智能化改造与产业数字化转型提供参考依据。

关键词：人工智能；硫化机；电气智能控制；PLC智能编程；数字孪生调试

引用论文：王虾妹. 人工智能驱动硫化机：电气控制、智能编程与数字孪生调试研究[J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(8):07-11.

中图分类号：TQ330.492

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2026)08-0007-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.08.002

0 引言

橡塑制造产业配套应用场景广泛，交通出行、工程建设、日用制造等领域均离不开橡胶制品支撑，硫化加工环节是塑造产品力学强度、耐磨特性与使用年限的关键流程。硫化机作为该工序的核心作业装置，设备把控精度、自动化运作能力与日常维护效果，对生产线成品合格率、能源消耗总量以及整体生产进度起到决定性作用。现阶段国内诸多橡塑生产企业依旧沿用传统PLC控制搭配固定参数PID调节的设备运行模式，该模式参数调整灵活性不足，难以应对硫化过程多变量联动、工况实时变动、非线性变化明显的复杂生产特点，制约高品质橡胶制品规模化稳定产出。

结合实际生产工况分析，传统硫化设备运行管控模式存在多处短板。电气调控体系缺少自主优化能力，面对原料品质波动、外界环境改变、设备部件老化等干扰因素，无法自动修正运行参数，工艺生产稳定性难以保障；设备控制程序沿用人工编写梯形图的作业形式，运行逻辑固化死板，修改调整流程繁琐，难以适配多品类产品切换生产的需求；设备投产调试工作依靠技术人员从业经验判断，反复试错的调试方式不仅耗费大量时间，还会造成原材料损耗与产能浪费，设备管控标准化与智能化程度偏低。

智能制造理念逐步普及，边缘计算、数字孪生、

人工智能等前沿技术不断落地工业控制场景，为老旧橡塑加工设备转型升级开辟全新路径。本文结合行业智能化发展趋势，依托自身前期研究积累^[1]，将智能算法技术全面融入硫化机电气管控、程序编制、设备调试全作业流程，搭建智能化自适应运行管控体系。通过实际生产线落地测试，检验整套技术方案的运行效果与实用价值，针对性解决传统设备把控精度不足、能耗偏高、调试效率低下、生产适配性弱等现实问题，为同类型设备数字化改造提供可借鉴的实施思路。

1 传统硫化设备运行管控现存缺陷

1.1 电气调控精度受限，能耗与稳定性难以平衡

传统硫化设备普遍搭载液压传动结构，配合固定参数PID算法完成工艺管控，设备运行参数设定完成后不再变动，无法根据原材料批次差异、模具长期磨损损耗、车间温湿度起伏等外界影响因素灵活调整，静态管控模式难以适配动态变化的生产工况。

1.1.1 工艺稳定性不足

硫化作业对温度、压力数值敏感度较高，固定不

作者简介：王虾妹(1981—)，女，本科，电气专业中级工程师，主要从事硫化机的设备研发、设计、编程、调试工作。

变的运行参数容易引发数值偏移现象,橡胶原料交联反应均匀度无法保障,最终成型产品品质参差不齐,难以契合统一生产标准。

1.1.2 设备能耗消耗偏高

液压传动结构本身存在密封渗漏、信号传递延迟、动力损耗等问题,驱动装置无法根据负载大小实时调整动力输出规模,设备全程保持高功率运转状态,能源利用效率偏低。

1.1.3 设备运维保障薄弱

原有控制系统仅设置参数超标报警基础功能,只能在故障发生后发出提示,无法实时监测设备运行状态,也不能提前预判潜在故障隐患。轴承磨损、管路渗漏、加热部件功率衰减等问题难以及时发现,容易引发设备突发停机,打乱生产线连续作业节奏。

1.2 程序编写模式固化,设备柔性生产能力不足

传统硫化设备控制程序完全依靠人工编制,梯形图与功能块是主要编写形式,设备运行控制逻辑固定单一,难以适配当下行业小批量、多规格的生产订单模式。

1.2.1 程序适配灵活性差

一旦更换生产产品、调整原料配比、修改工艺参数,工作人员需要逐段调整程序代码,编写修改工作量大、耗时较长,人工操作过程中还容易出现逻辑漏洞与参数设置失误。

1.2.2 程序模块化程度偏低

设备程序没有按照控制功能划分独立模块,不同机型、不同生产线的程序代码无法相互调用,后期开展故障排查、部件检修、功能升级等工作难度较大。

1.2.3 数据互联共享性弱

设备大多单独运行作业,缺少数据采集、传输交互功能,设备运行数据、工艺参数记录、故障信息资料不能接入工厂智能管理系统,达不到智能工厂协同生产的基础要求。

1.3 现场调试依赖人工经验,调试周期长、成本高

硫化机整机调试工作涵盖机械装配校准、电气线路接线、液压动力匹配、工艺参数整定等多项专业内容,传统调试工作主要依靠技术人员实操经验开展。

1.3.1 参数整定效率偏低

温度、压力、伺服三环等核心运行参数,都需要工作人员反复测试比对才能确定合理数值,单台全新

设备完成全套调试工作,通常需要耗费 10~14 天时间。

1.3.2 试错调试成本较高

调试过程中容易出现模具对接错位、压力数值超标、热力分布不均等异常状况,反复拆装调试作业会消耗大量人力、物料与时间资源,增加设备投产前期成本。

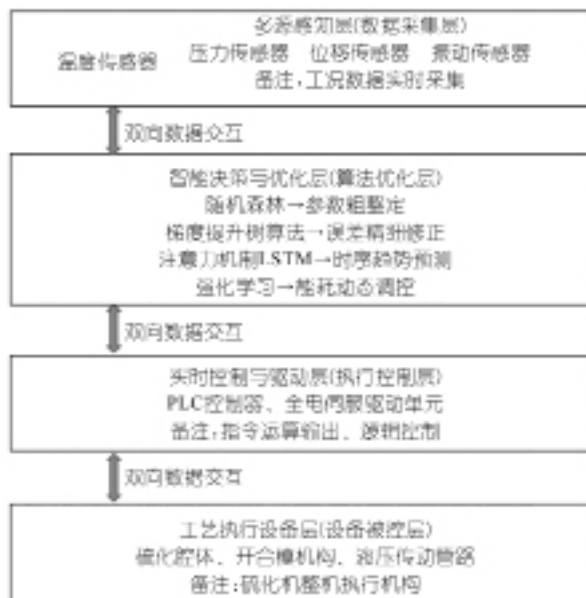
1.3.3 产品质量标准不一

不同技术人员的操作习惯、从业经验、参数把控标准存在区别,同型号设备调试完成后的运行状态存在差异,成品初次生产合格率无法稳定把控,不利于新生产线搭建与老旧设备智能化升级推进。

2 人工智能驱动硫化机电气控制创新应用

2.1 多算法协同智能控制架构

结合硫化工序多变量联动、状态非线性变化、外界干扰因素繁多的运行特点,本文搭建前馈补偿结合反馈调节、智能算法预测优化的复合型控制框架,替换沿用已久的单一 PID 静态管控模式,实现工艺参数动态精准把控如图 1。



图注：该架构创新融合多源振动信息与四类智能算法,实现硫化机多参数协同优化控制。系统通过多源感知层采集现场工况数据,依托智能决策与优化层完成参数整定、误差修正、趋势预测与能耗优化,经实时控制与驱动层下发指令,最终实现硫化机温压参数的动态精准控制与设备智能化自适应运行,区别于传统单一 PID 或简易 AI 架构。

图 1 面向硫化过程的多算法协同智能控制架构图

2.1.1 随机森林算法参数粗整定

整合设备长期运行积累的硫化工艺历史数据,运

用随机森林算法开展数据训练与特征分析，梳理工况状态与控制参数之间的对应规律，自动匹配伺服系统位置环、速度环、电流环基础运行参数。该算法抗干扰性能良好，能够适配工业现场带有干扰数据的运算场景，快速完成参数初步设定，替代人工反复试调参数的作业模式。

2.1.2 梯度提升树算法精细优化

以随机森林算法初步设定的参数为基础，采用梯度提升树算法开展误差修正迭代运算。持续对照工艺理论数值与设备实际运行数值，不断调整控制模型运算权重，弥补温度偏移、动力损耗、传动延迟等运行误差，实现控制参数精细化动态优化。

2.1.3 注意力机制 LSTM 时序预测

硫化生产属于连续性时序作业，运行参数会随时间不断改变，常规算法难以捕捉长期参数变化规律，本文采用注意力机制优化后的 LSTM 神经网络搭建预测管控体系。

(1) 依托网络时序记忆特性，全程追踪硫化全过程温度与压力数值变化趋势。

(2) 借助注意力机制自主划分影响权重，聚焦核心作用参数，弱化无关外界因素带来的干扰。

(3) 系统可以提前 10~30 s 预判参数波动趋势，及时调整加热功率与压力输出大小，将温度运行误差稳定控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。

同时以降低能耗、提升成品合格率为双重优化目标，设定强化学习奖惩运算规则，动态调整设备运行功率，让设备始终维持节能高效的运行状态。

2.2 边缘端 AI 监测与预测性运维方案

在硫化机加热腔体、液压输送管路、伺服驱动组件、开合模传动机构等关键位置布设高精度传感装置，不间断采集温度、压力、震动幅度、部件位移等运行数据。在边缘计算终端搭载轻量化智能运算模型，实时对比设备运行数据与标准运行样本数据，精准识别温度突变、压力偏移、部件异常震动等潜在故障风险。依托多类别数据整合分析方式挖掘故障产生规律，实现故障提前预警提醒，将传统故障维修模式转变为预

判式维护模式，有效减少设备停机故障发生频次。

2.3 AI 协同全电伺服驱动替代传统液压系统

借助智能算法优化伺服部件运动轨迹运算模型，将传统液压驱动模式升级为全电伺服驱动模式。智能系统能够根据模具合模加压、恒温硫化保压、成品开模卸胎等不同生产阶段，以毫秒级速度调整伺服部件响应速率与动力输出扭矩，消除液压设备漏油、响应迟缓、能耗偏高的固有缺陷。高精度伺服定位可以减少模具碰撞磨损，缩短设备动作运行时长，提升整机运行稳定性与设备使用年限。

3 人工智能赋能硫化机编程体系革新

3.1 自然语言驱动程序自动生成

搭建适配硫化设备作业场景的专属智能编程操作平台，工作人员只需录入产品规格尺寸、硫化设定温度、保压标准压力、工艺运行时长等基础工艺信息，系统即可通过自然语言解析技术拆分管控逻辑，调用标准化功能模板快速生成合规完整的 PLC 控制程序。平台收纳各类成熟工艺程序模板，可直接复用通用动作逻辑，大幅减少人工编写代码产生的漏洞与操作失误。

3.2 控制逻辑自适应动态调控

智能编程系统具备自主学习能力，实时收集橡胶原料特性、模具磨损程度、车间环境状态等现场数据，通过机器学习算法总结工况变化规律。系统能够自主优化保温升温曲线、压力输出模式与机械部件运行速率，无需人工改动程序代码，即可适配多种规格产品生产作业，有效增强设备生产适配能力。

3.3 模块化标准化程序体系构建

对比传统一体化固化程序结构，本文基于 AI 聚类算法拆分控制功能如图 2，划分五类独立功能模块。各类模块具备自我检测、自主适配、跨机型复用的使用特性，工作人员通过拖拽配置即可搭建完整控制程序，模块相互独立运行，既能灵活组态适配多品类生产，也可降低故障扩散风险，有效提升程序通用性与设备运维便捷性。

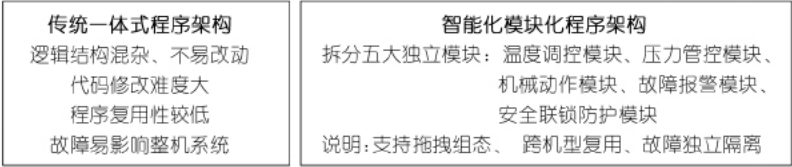


图 2 硫化机 AI 模块化程序功能拆分示意图

3.4 云边协同实现程序远程迭代优化

依托工业互联网技术搭建云端平台与现场终端协同运行架构,设备运行日志、程序执行数据实时上传至云端数据库。云端智能算法分析程序运行缺陷与优化空间,自动生成程序升级数据包并远程下发至本地 PLC 终端,完成控制程序无人化更新升级,契合智能工厂远程管控、无人化作业的发展需求。

4 AI 与数字孪生融合的设备调试升级方案

4.1 数字孪生虚拟预调试技术应用

如图 3 搭建与实体设备等比例数字孪生模型,实现设备运行数据双向实时同步。依托虚拟空间提前排查生产隐患、优化控制参数,再将最优方案导入实体设备完成校准,摒弃传统试错调试模式。



配套功能:虚拟工况模拟、工艺参数预优化、现场设备精准校准

图 3 硫化机数字孪生虚实联动调试模型图

4.2 AI 辅助线下设备精准校准

将虚拟调试优化得出的最优工艺参数、PID 控制参数、伺服运行参数批量导入实体设备,完成全部运

行参数自动校准设定。针对现场调试过程中出现的异常工况,系统对照虚拟模型数据与设备实际运行数据,快速判定线路接线问题、传感部件故障、参数匹配失衡等问题,显著提升故障排查与设备校准效率,同时可支持多台设备同步批量调试作业。

4.3 调试数据闭环迭代优化体系

系统统一汇总虚拟仿真调试、现场设备校准、实际生产运行产生的全部数据,建立硫化设备智能调试专属数据库。运用深度学习算法梳理参数匹配规律与故障诱发原因,持续优化数字孪生模型仿真精度与智能控制算法运算性能,形成仿真调试—现场校准—生产运行—数据汇总—算法升级的闭环优化模式,推动设备调试工作朝着标准化、智能化方向稳步推进。

5 工程应用案例分析

本文研发的 AI 智能硫化机控制系统,已经投入国内多条全钢、半钢轮胎硫化生产线实际应用,系统整合多算法协同控制、智能模块化编程、数字孪生虚拟调试等多项核心技术,现场运行改善效果十分突出。

改造后故障预警识别准确率达 91%,模块化编程使程序编写效率提升 85%,模块复用率 90%。单台设备每年可节约能耗、运维、试错损耗等成本超 8 万元,综合生产效益提升明显,见表 1。

表 1 硫化设备智能化改造前后性能指标对比

性能指标	传统硫化设备	AI 智能升级设备	优化效果
温度控制误差	$\pm 3 \sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	控制精度大幅提升
压力波动误差	$\pm 0.15\text{ MPa}$	$\leq \pm 0.05\text{ MPa}$	运行稳定性增强
单台设备调试周期	10~14 天	3 天以内	时长缩减 70% 以上
产品一次合格率	81%	96% 以上	合格率提升 15%
设备非计划停机频次	偏高	下降 65%	运维可靠性提升
生产线整体能耗	基准值	降低 10%	节能效果突出

6 现存挑战与发展展望

6.1 现存技术短板

(1) 行业尚未出台统一的设备数据采集与存储规范,不同厂家生产设备的数据格式存在差异,传感采集数据夹杂干扰信息与缺失内容,影响智能模型训练精准程度。

(2) 工业现场边缘终端硬件运算能力有限,复杂深度学习模型部署存在一定难度,难以同时满足模型运算精度与设备快速响应的双重要求。

(3) 兼具机械电气、工艺生产、人工智能专业能力的复合型工作人员数量较少,限制智能硫化设备大

范围推广应用。

(4) 智能算法运行过程具备封闭性,故障溯源排查难度偏大,工业设备安全防护体系依旧存在优化完善空间。

6.2 未来发展趋势

(1) 后续行业可以研发轻量化智能算法,搭配高算力硬件设备升级,提升边缘终端数据运算水平^[2]。

(2) 统一硫化设备行业数据采集标准,搭建共享工艺数据库,增强智能算法通用适配性能^[3]。

(3) 推动人工智能、数字孪生、5G 通信、工业互联网技术深度融合,构建设备设计制造、调试运行、

维护报废全生命周期智能管控体系^[4]。

(4) 研发运行过程可追溯的智能算法, 完善设备故障溯源与安全防护机制, 推动硫化装备朝着高精度、低能耗、高智能化、高稳定性的方向持续升级。

融合多项前沿工业技术, 构建覆盖设备从设计投产到报废升级的全流程管控体系, 推动硫化装备朝着高精度、节能化、高智能化方向迭代升级。

7 结论

本文以人工智能技术作为核心研发基础, 围绕硫化机设备电气控制、智能程序编写、数字孪生调试三大核心环节开展智能化升级探究, 有效破解传统硫化设备把控精度不足、程序生产适配性弱、调试耗时成本高、能耗管控效果差等行业共性难题。多算法融合管控模式改善工艺参数偏移问题, 同步提升设备运行精度与节能效果; 自然语言搭配模块化的智能编程形式, 改变传统人工代码编写模式, 有效增强设备多品类产品生产适配能力; 数字孪生虚拟调试方式摒弃人工试错作业模式, 大幅压缩设备投产调试周期, 减少生产调试阶段资源损耗。

多条轮胎生产线实际应用结果, 验证了整套智能控制技术方案的可行性与先进性。目前橡塑智能装备领域依旧存在行业数据标准不统一、终端运算能力有限、复合型人才储备不足、算法溯源性较差等现实问题。伴随工业智能技术持续更新迭代, 人工智能与数字孪生融合技术会进一步赋能橡胶装备制造行业, 助力橡胶加工产业实现智能化、精细化、绿色化、高效化转型发展, 为传统制造行业数字化升级提供可靠的技术参考^[5]。

参考文献:

- [1] 王虾妹. AI 与伺服电机协同: 引领硫化机电气控制系统设计新潮流 [J]. 信息与电脑, 2025, 37(23): 139-141.
- [2] 张宏建, 李刚. 基于边缘计算的工业设备智能监测与故障预警 [J]. 自动化仪表, 2024, 45(11): 62-66.
- [3] 中国橡胶工业协会. 橡胶装备智能化发展行业白皮书 [R]. 北京: 中国橡胶工业协会, 2025.
- [4] 刘成良, 周俊. 数字孪生技术在工业装备调试领域的应用进展 [J]. 机械设计与制造, 2025(3): 289-292.
- [5] 赵文博. 人工智能在工业 PLC 智能编程中的应用研究 [J]. 工业控制计算机, 2025, 38(2): 78-80.

Artificial intelligence-driven curing press: Research on electrical control, intelligent programming and digital twin debugging

Wang Xiamei

(Sinochem (Fujian) Rubber and Plastic Machinery Co. LTD., Sanming 365500, Fujian, China)

Abstract: The rubber curing process determines the quality and production efficiency of rubber and plastic products. Traditional curing presses adopt fixed parameter PID control, which has problems such as weak parameter adaptability, low manual programming efficiency, and reliance on trial and error for on-site debugging. These problems can easily lead to large temperature and pressure deviations, high energy consumption, and delayed fault warnings. This paper introduces artificial intelligence technology, conducting research from three aspects: electrical intelligent control, intelligent program writing, and digital twin debugging. It uses intelligent algorithms to optimize process parameters and energy consumption allocation, reconstructs the programming system based on modularization, and completes equipment calibration with virtual and real simulations. Practical application shows that the upgraded equipment has temperature control error controlled within $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, pressure error not exceeding $\pm 0.05\text{ MPa}$, debugging time reduced by more than 70%, and product quality and operational efficiency significantly improved. The research results can provide a reference for the intelligent transformation of rubber and plastic equipment and the digital transformation of the industry.

Key words: artificial intelligence; curing press; electrical intelligent control; PLC intelligent programming; digital twin debugging

(R-03)