硫化机装胎机构 HMI–PLC 伺服协同控制系统设计与优化

王虾妹
（中化（福建）橡塑机械有限公司，福建　三明　365500）

摘要：针对传统轮胎硫化机装胎机构多采用气缸、水缸驱动，存在定位精度差、运行抖动明显、规格调试繁琐、能耗偏高及易损伤胎胚等生产痛点，本文以硫化机装胎爪开合、装胎手回转两大核心机构为研究对象，设计一套 HMI-PLC 伺服协同控制系统。该系统以 PLC 作为控制中枢，搭配伺服电缸替换传统流体执行结构，依托人机界面完成工艺参数预设、规格一键切换与数据实时监测，构建数字化闭环控制体系。工程实践结果表明：优化后的控制系统可实现轮胎规格参数一键适配，参数调试时长缩短 50% 以上；机械手回转动作耗时由 7 s 缩减至 2 s，设备综合产能提升 30%；同时设备能耗降低 25%~35%，轮胎废品率下降 20%~25%。该改造方案运行稳定性强、适配性广，从根本上解决传统装胎机构运行缺陷，可为同类型橡塑硫化设备智能化技改提供参考，具备较高的现场推广价值。

关键词：硫化机；装胎机构；HMI–PLC；伺服控制系统；参数优化
引用论文：王虾妹．平硫化机装胎机构 HMI–PLC 伺服协同控制系统设计与优化 [J]. 橡塑技术与装备，2026, 52(11):27-30.
中图分类号：TQ330.493　　**文章编号**：1009-797X(2026)11-0027-04
文献标识码：B　　DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.11.005

0　引言

在智能制造产业化升级的大背景下，轮胎制造行业正逐步由粗放式生产模式向高精度、低能耗、无人化智能生产模式转型。硫化机作为轮胎成型生产的核心关键设备，其电气控制系统的运行性能直接决定轮胎成品质量、生产效率与企业生产成本。现阶段国内多数传统硫化机核心执行机构普遍采用气缸、水缸驱动模式，依托流体压力驱动机械结构完成装胎、开合模、机械手回转等工序。

受气体可压缩性、液体压力滞后性等物理特性限制，传统驱动结构普遍存在定位精度低、启停冲击大、设备抖动明显、工序调试依赖人工经验等缺陷。同时传统控制系统无法实现参数数字化存储与一键切换，更换轮胎生产规格时调试流程繁琐，不仅增加人工运维成本，长期震动还会加剧零部件磨损，降低设备使用寿命，间接造成轮胎刮伤、胶囊破损、产品尺寸偏差等质量问题。

为解决上述问题，本文将 HMI 人机交互技术、PLC 可编程控制技术与伺服电缸驱动系统深度融合，重构硫化机电气控制系统 [1]。通过 HMI 完成工艺参数可视化配置，PLC 统筹各执行单元联动逻辑，伺服电缸替代传统流体驱动部件，实现硫化机核心工序智能化、数字化、精准化控制，全方位优化设备生产性能，助力轮胎制造企业智能化转型升级。

1　系统总体设计方案

本次优化设计的 HMI–PLC 伺服协同控制系统，整体架构分为三层：人机交互层、逻辑控制层、执行驱动层。三层结构相互协同，构成闭环自动化控制系统，系统整体架构如下图 1 所示。

其中人机交互层由工业触摸屏组成，负责工艺参数录入、规格切换、运行数据监测、故障报警、参数偏差微调；逻辑控制层以 PLC 为核心，接收 HMI 下发指令，结合内置控制程序，输出脉冲信号控制伺服驱动器 [2]；执行驱动层包含伺服驱动器与伺服电缸，根据控制信号完成精准定位、匀速启停、角度调节等机械动作。

相较于传统控制系统，该方案最大优势在于打破人工机械式调试模式，将所有限位参数、动作速度、

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。

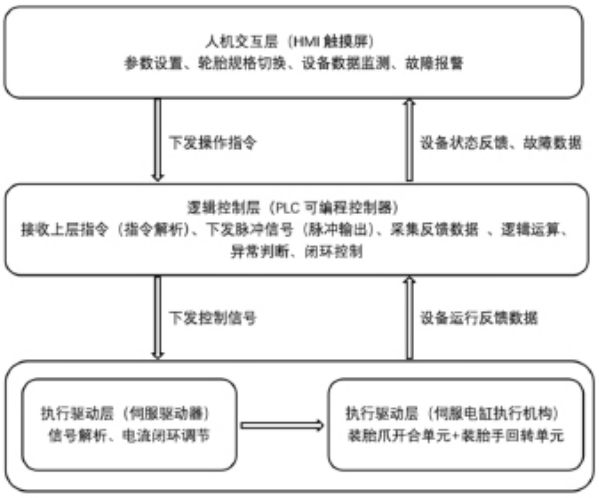


图 1　HMI-PLC 伺服协同控制系统整体架构

启停角度全部数字化，存储至 HMI 数据库。生产不同规格轮胎时，工作人员仅需切换对应型号即可完成参数自动赋值，从根源上解决传统设备调试难度大、重复性差、定位精度不足的行业难题。

2　伺服控制系统具体应用实施

2.1　伺服电缸在装胎爪开合机构中的应用

传统硫化机装胎爪开合结构以气缸、水缸为动力源，设备生产不同规格（15"~22"）胎胚时，工作人员需手动使用卷尺测量胎圈尺寸，反复调节机械调节杆，以此适配不同直径的胎胚。该调节方式高度依赖人工经验，调试耗时久、容错率低；若参数调节偏差过大，极易出现卡胎、胎胚刮伤、胶囊破损等生产故障，增加产品报废率与设备运维成本。

本次优化利用伺服电缸替代原有流体驱动装置，依托 HMI–PLC 协同控制系统实现装胎爪开合数字化管控。技术人员提前在 HMI 界面内录入 15"~22" 全规格轮胎对应的工艺参数，锁定装胎爪张开限位、半闭合限位、全闭合限位三大核心角度参数。轮胎规格选择界面如图 2 所示，装胎爪限位参数锁定界面如图 3 所示。

生产作业过程中，操作人员直接在 HMI 规格选择界面匹配对应轮胎型号，系统自动对三大限位参数进行强制赋值，一键完成参数配置。同时系统预留偏差调节窗口，工作人员可根据现场实际工况，微量修正角度偏差，适配特殊生产工况。

该应用方案摒弃机械式调节结构，全程数字化参数管控，彻底规避人工调试带来的质量风险，大幅缩



图 2　轮胎规格尺寸选择界面



图 3　装胎爪张闭限位参数锁定界面

短换模调试时间，实现装胎爪开合动作标准化、精准化控制。

2.2　伺服电缸在装胎手回转机构中的应用

装胎机械手回转动作是硫化机生产工序的核心环节，传统设备采用气缸驱动转臂完成转入、转出动作。由于空气介质具备可压缩特性，机械手启停阶段易出现反弹、抖动、偏移等问题，不仅无法保证重复定位精度，长期高频次震动还会造成螺栓松动、零部件疲劳损伤，降低整机设备稳定性，导致轮胎硫化受热、受压不均匀，影响轮胎均匀性与外观质量。此外，为规避抖动风险，传统设备需降低运行速度并增加延时缓冲程序，空循环时间过长，制约设备产能提升 [3]。

针对上述缺陷，采用伺服电缸替换气缸驱动回转机构，利用伺服系统闭环控制特性，实现机械手匀速启停、无冲击回转。该控制系统具备响应速度快、定位精度高、运行平稳、可无级调速等优势，适配扁平化、多元化轮胎生产工况，搭配自动存胎器可实现单机无

人化全自动生产[4]。

2.2.1 缩短回转作业时长

传统气缸驱动模式下，受抖动、缓冲延时、限位信号延迟影响，机械手由转出位置运行至转入位置，单次作业时长约 7 s。更换为伺服电缸驱动后，依托闭环速度调节技术，取消冗余延时程序，机械手全程平稳无冲击运行，单次回转时长压缩至 2 s，伺服电机回转运行流程如图 4 所示，单生产周期可减少 8~10 s 无效空循环时间，设备整体生产效率得到显著提升。

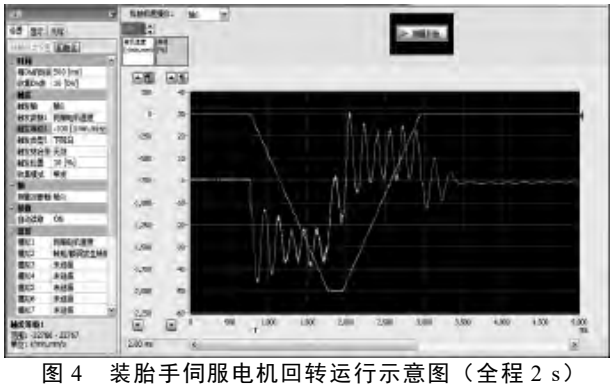


图 4 装胎手伺服电机回转运行示意图（全程 2 s）

2.2.2 简化限位调试流程

传统装胎手回转限位、对中装置需工作人员现场手动调节机械限位块，换规格操作繁琐，且调试一致性较差。优化后系统将回转限位数据存储于 HMI 内部数据库，伺服编码器实时记录位置信息，无硬件损坏前提下无需重复校准基准位置。针对不同规格轮胎生产需求，工作人员仅需在 HMI 界面微调角度参数即可完成适配（换算标准：100 mm 对应 1° 角度），无需拆解设备调节机械结构，大幅降低人工运维难度。

3 HMI−PLC 伺服协同控制系统综合优势

3.1 提升设备综合生产效率

协同控制系统从缩短辅助工序时长、简化换模流程两个维度优化生产模式。一方面，伺服电缸凭借毫秒级响应速度与微米级定位能力，优化装胎、回转、开合模等辅助动作，压缩无效等待时间；另一方面，HMI 数据库实现全规格轮胎工艺参数一键切换，摒弃传统人工测量、机械调节的老旧模式，换模调试效率提升 50% 以上。双重优化加持下，设备整体生产效率提升 30% 左右，有效释放设备产能。

3.2 降低设备整体能耗水平

传统气缸、水缸驱动模式需空压机、液压泵站持续恒压供能，无论设备是否作业，动力单元均处于运行状态，能源浪费严重。伺服电机具备负载自适应调节特性，仅在机械动作执行阶段输出功率，空载状态下进入休眠节能模式。同时 HMI 可实时采集伺服电机转速、扭矩、负载率等运行数据，动态优化运行参数，使执行单元始终处于最优能效区间。经现场实测，优化后硫化机综合能耗降低 25%~35%，节能效果显著[5]。

3.3 优化成品轮胎生产质量

伺服闭环控制系统可精准控制机械手动作位置、运行速度与输出扭矩，保证每一个生产周期内机械动作高度一致，规避抖动、冲击带来的胎胚损伤问题。同时工作人员可通过 HMI 实时监测硫化温度、内部压力、动作时长等核心工艺数据，结合生产大数据动态优化硫化工艺参数，让胎胚在硫化阶段受热、受压更加均匀。此外系统自带故障预警功能，可提前识别参数异常、电机过载等潜在故障，从源头降低产品报废率，现场实测轮胎废品率下降 20%~25%。

3.4 改善车间作业环境

传统气缸启停冲击大，运行过程中噪音、震动问题突出。伺服电缸全程柔性启停、匀速运行，运行噪音低、震动极小，既延长设备零部件使用寿命，也有效改善生产车间作业环境，降低噪音污染，符合现代化绿色工厂建设标准。

4 系统应用效果分析

本文优化的 HMI 与 PLC 伺服协同控制系统，从根本上弥补传统流体驱动模式的技术短板，解决硫化机换模繁琐、运行不稳定、能耗偏高、产品质量参差不齐等多项行业痛点。系统基于数字化控制逻辑，结合数据建模、轨迹规划、参数自适应调节技术，全方位提升设备智能化水平，具体应用效果如表 1 所示。

5 结论

本文将 HMI 人机交互技术、PLC 可编程控制技术与伺服电缸驱动系统相结合，完成轮胎硫化机电气控制系统智能化升级改造，分别针对装胎爪开合、装胎机械手回转两大核心工序进行专项优化。相较于传统气缸、水缸驱动方案，该协同控制系统具备定位精度高、运行稳定性强、能耗低、调试便捷、适配性广等优势。

该方案不仅解决了传统硫化机人工调试繁琐、设备震动冲击大、产品质量不稳定等长期行业痛点，还

表 1　应用效果表

优化目标	实现方式	应用效果
多规格参数自适应调节	建立规格参数数据库，一键调用预设参数，支持微量偏差修正	参数调试时间缩短 50% 以上
机械手最优轨迹规划	伺服闭环控制，柔性启停，优化运动轨迹，消除动作冲击	机械手辅助动作时长减少 30% 以上
能耗优化管控	负载自适应功率调节，空载休眠，动态匹配工艺需求	设备综合能耗降低 25%~35%
成品品质升级	动作标准化、无抖动运行，工艺参数动态优化	轮胎生产废品率下降 20%~25%
生产效率提升	压缩空循环时长，简化换模工序，缩短辅助作业时间	设备综合产能提升 30% 左右

能有效降低企业人力成本与能耗成本，助力企业实现自动化、无人化生产。同时该控制方案具备极强的通用性，可推广至各类橡塑成型设备，为轮胎制造行业智能制造升级、老旧设备技改优化提供切实可行的技术参考，具备极高的工程应用价值与行业推广价值。

参考文献：

[1] 陈明辉 . 基于 HMI—PLC 协同的橡塑设备参数化控制技术研究 [J]. 中国设备工程，2023(16):189—191.
[2] 三菱电机自动化（中国）有限公司 . FX3U/FX5U 系列 PLC 与伺服驱动器应用技术手册 [Z]. 上海 : 三菱电机自动化（中国）有限公司，2022.
[3] 刘军 , 陈洪波 . 轮胎硫化机自动化控制系统优化与应用 [J]. 橡塑技术与装备，2023,49(08):45—48.
[4] 张伟 , 王浩宇 . 基于 PLC 的伺服机械手控制系统设计与性能优化 [J]. 机械工程与自动化，2022(05):136—138.
[5] 李东升 , 赵鑫 . 智能制造模式下橡胶硫化设备节能技改研究 [J]. 轮胎工业，2024,44(02):112—115.

Design and optimization of the HMI-PLC servo coordinated control system for the tire mounting mechanism of curing press

Wang Xiamei

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

Abstract: Traditional tire curing press tire loading mechanisms often utilize pneumatic cylinders and hydraulic cylinders for driving, which present production pain points such as poor positioning accuracy, significant operational vibration, cumbersome specification adjustments, high energy consumption, and potential damage to tire blanks. This paper focuses on the two core mechanisms of tire loading claw opening and closing and tire loading arm rotation in the curing press, designing a HMI-PLC servo collaborative control system. The system uses PLC as the control hub, paired with servo electric cylinders to replace traditional fluid actuator structures. It relies on the human-machine interface to complete process parameter presetting, one-click specification switching, and real-time data monitoring, establishing a digital closed-loop control system. Engineering practice results show that the optimized control system can achieve one-click adaptation of tire specification parameters, reducing parameter adjustment time by over 50%; the mechanical arm rotation time is shortened from 7 seconds to 2 seconds, increasing the overall equipment productivity by 30%; at the same time, the equipment energy consumption is reduced by 25% to 35%, and the tire scrap rate is decreased by 20% to 25%. This transformation scheme has strong operational stability and wide adaptability, fundamentally solving the operational defects of traditional tire loading mechanisms. It can provide a reference for the intelligent technological transformation of similar rubber and plastic curing equipment and has high on-site promotion value.

Key words: curing press; tire loading mechanism; HMI-PLC; servo control system; parameter optimization

(R-03)