

基于 PLC 的烘焙自动化生产线控制系统设计

杨绍明

广州复雅机械设备有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2026100032

摘 要 : 基于 PLC 的烘焙自动化生产线控制系统以 AB CompactLogix 控制器为核心, 通过 PROFIBUS-DP 总线集成远程 I/O 与变频设备, 实现注浆成型、隧道炉温控、脱模包装等全流程协同控制。采用串级 PID 调节与多配方管理策略, 满足多规格产品柔性切换需求。系统投入运行后, 圆形蛋糕班产达 620~640 盘, 产品报废率由 3.2% 降至 1.1%, 脱模次品率由 2.5% 降至 0.8%, 温控精度稳定在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 以内, 显著提升生产效率和产品质量。

关 键 词 : 烘焙生产线; 可编程逻辑控制器; 隧道炉温控; 自动化控制; 现场总线

Design of Control System for Baking Automation Production Line Based on PLC

Yang Shaoming

Guangzhou Fuya Machinery Equipment Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Based on PLC, the baking automation production line control system uses AB CompactLogix controller as the core, integrates remote I/O and frequency conversion equipment through PROFIBUS-DP bus, and realizes full process collaborative control of grouting molding, tunnel furnace temperature control, demolding and packaging. Adopting cascade PID regulation and multi formula management strategy to meet the flexible switching requirements of multi specification products. After the system was put into operation, the circular cake production reached 620-640 plates, the product scrap rate decreased from 3.2% to 1.1%, the demolding defect rate decreased from 2.5% to 0.8%, and the temperature control accuracy remained stable within $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, significantly improving production efficiency and product quality.

Keywords : baking production line; programmable logic controller; temperature control of tunnel furnace; automated control; fieldbus

引言

烘焙生产线涵盖注浆、醒发、烘烤、冷却、脱模、包装等多道工序, 设备种类繁多且时序耦合紧密。隧道炉多温区温湿度控制精度直接决定产品品质, 多规格柔性切换对控制系统提出较高要求。传统继电器逻辑难以满足多轴协同、高速脉冲输出及闭环调节的实时性需求。以 AB CompactLogix PLC 为核心控制器, 结合 PROFIBUS-DP 现场总线与 HMI 人机交互, 设计适用于立注式蛋糕及汉堡面包生产线的自动化控制系统。重点解决多温区串级 PID 温控、多配方管理与整线节拍协同等关键问题。

一、项目概述

(一) 项目背景与工艺特点

烘焙食品加工属于典型的流程型与离散型混合生产模式。以立注式蛋糕生产线为例, 其核心工艺链路涵盖注浆沉积、自动进炉、隧道烘烤、自动出炉、提升冷却、内部注芯、脱模分离、紫外线杀菌及自动理料包装等十余道工序。汉堡热狗面包生产线则涉及搅拌、一次醒发、成型、二次醒发(赛道醒发)、烘烤、脱模、螺旋塔冷却及包装等环节, 产能覆盖 12000 个/小时至 36000 个/小时多个等级。

上述生产线的显著工艺特点体现为三个方面。其一, 设备种

类繁多且动作时序耦合紧密。从注浆机、震动机、排盘机到隧道炉、脱模机、注芯机, 各单机设备必须在统一节拍下协调运行, 任何环节的延迟或停机均会造成全线积压或空载。其二, 热加工区域的温湿度控制要求极高。隧道炉蒸汽加热区段长达 20 至 24 米, 炉宽 1.85 米, 不同品类产品(圆形 2/4/6/8 寸、方形、长条汉堡胚)对烘烤温度曲线的需求差异显著, 且醒发阶段对面团环境的湿度与温度变化极为敏感。其三, 生产线须具备高度的柔性切换能力, 以应对多规格产品共线生产的需求, 同时满足出口项目对电气标准(如 415V 电压等级)及特定品牌控制系统的配置要求^[1]。

(二) 控制系统面临的技术难点

充分拆解各类工艺特点后, 梳理出控制系统设计阶段亟待突

破的三大关键技术难题。

其一，多轴联动运行与高速脉冲信号输出存在实时匹配冲突。产线注浆设备配备十组双工位枪体同步作业，成型设备每分钟成型效率维持200至400件，摆盘设备和入炉装置需要精准同步运转。以上工况，都要求PLC缩短扫描周期，同步处理多路高速脉冲输出与各类反馈信号。三向移动滑台完成取料、放料流程时，X、Y、Z三轴直线插补依靠逐点比对算法，定位误差控制在0.02毫米。该工况对PLC运算速率、中断信号处理能力提出较高要求。

其二，隧道炉分段温湿度闭环调控难以维持稳定状态。设备采用蒸汽供热搭配热风循环结构，炉体沿长度划分多个独立温区，形成阶梯式温度分布。不同温区温度存在非线性相互影响，前段温度变化会顺着热风传导至后段区域。设备运行会受到蒸汽压力起伏、物料输送速度变动等外部干扰。需要将烘烤区域温度波动控制在设定数值上下2摄氏度以内。这也是系统整定PID参数、搭建串级调节方案时，需要解决的主要难点。

其三，整条产线工序节拍协同，还要搭建故障快速识别机制。从注浆成型到成品打包入库，产线产能要达到设计标准。圆形制品每小时稳定产出80盘，方形、长条制品每小时产出50盘。输送皮带运转速度、烘烤时长、冷却停留时间，三者需要精准适配。系统还要实时监测各类设备异常，包含烤盘卡顿、注浆原料不足、脱模操作失效等问题。出现故障可自动触发停机防护，保障整条产线安全不间断生产。

二、控制系统总体架构与硬件设计

（一）控制系统层级划分与网络结构

基于分散控制、集中管理的设计原则，将控制系统划分为设备层、控制层与监控层三个层级。

设备层配备多种执行构件与检测传感器件。包含限位开关、光电定位感应器、工业摄像设备、称重传感组件、变频设备、步进电机驱动模块。该层级采集现场全部信号，同步响应上层下发的驱动控制指令。

控制层以PLC主站为核心，通过PROFIBUS-DP现场总线挂接远程I/O从站（ET200M系列）及变频器等智能设备。PLC主站选用美国AB（Allen-Bradley）公司的CompactLogix系列控制器，满足项目出口对美系控制系统的特定要求。该PLC提供多路100kHz高速脉冲输出通道，用于驱动X、Y、Z三轴步进电机驱动器，同时通过内置的以太网/IP模块与上位工业计算机实现数据交互。

监控层配置AB同系列的PanelView Plus人机界面（HMI），操作人员可通过触摸屏完成配方参数下载、运行状态监视、报警信息确认及手动/自动模式切换等操作。监控层同时承担数据记录与生产报表生成功能，为生产管理提供数据支撑^[2]。

（二）PLC主控单元与I/O模块配置

结合整条设备信号点位统计数据，数字输入点位64路、数字输出点位48路，模拟输入通道12路、模拟输出通道8路。

系统预留百分之二十至三十点位拓展空间，主控CPU选用AB CompactLogix 5370 L3系列控制器。这款控制器机身自带多轴运动控制相关指令，能直接以PWM形式输出脉冲信号，最高输出频率可达100kHz。设备步进电机运行速度设定90毫米每秒，对应所需驱动频率为4kHz，该控制器性能可完全匹配此项使用要求。

模拟量处理方面，隧道炉各区段温度传感器（热电偶型）信号经温度变送器转换为4-20mA标准电流信号后接入模拟量输入模块（1769-IF8）。该模块分辨率为16位，配合PLC内置的PID指令，可实现加热蒸汽调节阀的精确控制。模拟量输出模块（1769-OF8）则将PID运算结果转换为4-20mA信号驱动电气转换器或电动调节阀。

三、控制策略与软件设计

（一）注浆成型与摆盘进炉的阶段控制逻辑

注浆成型工序包含活塞注浆机、震动装置、排盘机三台设备协同时序运作。控制系统收到前道烤盘就位信号后，按顺序执行整套作业流程。排盘机运送空烤盘，精准停靠注浆作业位。震动装置保持恒定频率运转，让浆料分布均匀。十枪双头注浆设备同步下移，完成浆料灌注。震动维持两至三秒后关停。排盘机转运装好浆料的烤盘，送至入炉暂存区域。

整套工序动作时序逻辑依托PLC顺序功能图编写程序。借助T0到T7定时器，设置各步骤运行时长与动作间隔。产品尺寸款式区分较多，包含2寸、4寸、6寸、8寸、方形、长条。各类产品所需注浆量差距较大。人机交互界面内置多套预设工艺参数配方，工作人员结合当日生产计划调取匹配配方，PLC会自动读取对应注浆行程、震动频率与排盘运行速度。

自动送进炉体的结构分为推杆输送、链条输送两种类型。缓存区域烤盘数量达到设定入炉标准，例如八盘时，设备自动启动。一次性将整组烤盘推送至隧道炉进料端口。烤盘转运全程，PLC搭配位置感应设备实时追踪烤盘位置。规避烤盘堆叠、设备卡滞等故障问题。送料运转速度需要和炉内网带运行速度保持一致。杜绝进料位置物料堆积、物料空缺的情况^[3]。

（二）隧道炉多温区PID温度控制策略

隧道炉按整体长度分成三段，分别为预热段、烘烤主段与熟化后段。每段单独配备蒸汽加热线路、热风循环风机和测温热电偶。设备采用串级PID方式管控温度。炉膛实际温度作为主调控参数，蒸汽流量或压力作为辅助调控参数。操作人员通过触摸屏把温度参数下发到PLC控制器。采集到的实时温度经模拟量模块过滤处理，再和设定温度对比得出差值。差值数据输入PID运算单元，算出的结果用来控制蒸汽调节阀开启幅度。

调试PID三组参数，包含比例Kp、积分Ti、微分Td。调试时结合隧道炉储热多、温控延迟久的运行特点。适度拉长积分时长，减少温度超出设定区间的情况。搭配微分调节，缓解蒸汽气压变化造成的温度扰动。系统内置三套独立PID参数，适配不同食品烘烤需求。参数分别匹配蛋糕、汉堡胚、长条面包三类生产

品类。更换生产配方时，设备可自动调取对应控制参数。

热风循环装置可平衡炉内各处温度，加快热量交换速度。PLC 搭配变频器调节循环风机运转速度。升温阶段风机满速运转，缩短设备预热耗时。恒温阶段风机低速运转，减少整体能源消耗。超温防护程序和 PID 温控相互独立运行。任意区域温度超出安全上限时。PLC 会即刻关闭该段蒸汽进气阀门，同步触发声光警报。

四、系统集成与人机交互设计

（一）通信网络的构建与数据交互

整套控制系统通信架构划分为两层网络。

控制层采用 PROFIBUS-DP 总线，完成 PLC 主站、远程 IO 模块、变频设备及智能仪表的数据实时交互。管理层使用以太网链路，实现 PLC 与人机界面、工控上位机的数据互通，包含配方下发、设备状态查看、运行数据采集功能。

（二）人机交互界面功能布局

PanelView Plus 人机界面触摸屏，是操作人员和控制系统的核心交互载体。界面规划遵循分区清晰、操作步骤简化的设计标准。首页采用工艺流程图呈现整条产线设备实时工况，各个工位借助动态色块区分运行、待命、异常三类工作模式。实时数据板块展示核心工艺指标，涵盖隧道炉分段温度、传送网带运转速率、生产循环统计数值与设备异常提示内容^[4]。

配方管理页面为人机交互终端的核心功能板块。页面采用表格罗列各类产品规格，包含圆形 2 寸、4 寸、6 寸、8 寸、方形、长条、汉堡胚、热狗胚，配套对应的整套工艺数值。内容涵盖注浆用量、烘烤温度变化曲线、烘烤时长、冷却时长、注芯用量等信息。工作人员选定产品名称，就能一键同步全线参数，减少逐项手动录入产生的操作差错。

五、系统应用与效果分析

（一）系统调试与运行测试

设备硬件装配、程序编制全部完工后，实行分段调试作业。

第一阶段开展单机空载调试，逐项核对电机运转方向、限位开关反馈信号、变频器设置参数、步进电机驱动脉冲输出状态。第二阶段实施局部联合调试，以注浆、入炉、隧道烘烤、出料组成小型循环开展投料试运行，核查温控精准度、烤盘定位精度、成品烘烤色泽均匀程度。第三阶段开展全线联动投料试产，持续不间断运行八小时，记录实际产能达标比例与设备故障发生频次。

（二）控制效果与生产指标达成

设备正式投产使用后，汇总连续五个生产班组的运行数据。立式注浆蛋糕生产线圆形制品单班产量 620 至 640 盘，每班时长八小时，每小时产量接近八十盘的设计标准。方形制品单班产量 390 至 410 盘，每小时产量满足五十盘的预设要求。产品合格情况上，烘烤色差造成的废品比例，从改造前 3.2% 降至 1.1%。脱模环节产生的破损次品占比，由原先 2.5% 下降至 0.8%。

汉堡面包生产设备运行阶段，成型设备运行速度维持每分钟 280 至 320 个。整套设备运行节奏和隧道烘烤炉加工负荷适配稳定。输送醒发区域温湿度管控标准为温度浮动 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度浮动 $\pm 3\%\text{RH}$ 。面团醒发成品的品质统一程度得到明显改善。连续式脱模设备吸盘抓取成功率稳定在 99.2%。对比改造前依靠人工协助脱模的作业模式，整体生产效率提升超四成^[5]。

六、结束语

系统以 AB CompactLogix PLC 为核心，依托 PROFIBUS-DP 总线实现整线设备协同控制。串级 PID 调节有效抑制隧道炉温控超调，多配方管理满足多规格产品柔性切换。实际运行数据表明，班产与合格率均达到设计指标，温控精度稳定在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 。该方案在烘焙自动化领域具备良好的实用性与推广价值，可为同类生产线控制系统设计提供参考。后续研究可围绕智能化故障预测与能效优化方向进一步深入。

参考文献

- [1] 潘云. 食品干燥设备恒温控制系统设计 [J]. 中国食品工业, 2022, (17): 112-116.
- [2] 谢斌, 任行, 王丽丽. 基于 PID 温度控制的烘焙系统设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2021, (17): 223-224.
- [3] 杨晓星, 孔德文. 基于 PLC 的果蔬膨化控制系统设计 [J]. 食品工业, 2021, 42(8): 185-187.
- [4] 张科强, 池雄飞. 食品干燥设备恒温控制系统设计 [J]. 食品工业, 2021, 42(7): 188-190.
- [5] 彭琛, 曾显, 黄爽, 等. 基于 PLC 的食品加工用烘干设备的研究与应用 [J]. 电子世界, 2021, (13): 136-138.