

基于PLC的工业生产线自动化控制系统设计

翁肖强¹ 翁广涵²

1. 百威(台州)啤酒有限公司 浙江 台州 317200

2. 中国计量大学 浙江 杭州 311100

摘要: 本文以啤酒生产线为具体应用对象,系统性地阐述了基于PLC的自动化控制系统的设计与实现。首先,深入剖析了啤酒生产的典型工艺流程及其核心控制需求;其次,详细论述了PLC控制系统的设计原则、硬件选型(包括PLC主站、I/O模块、传感器、执行器及HMI人机界面)与网络架构;接着,重点介绍了软件层面的程序设计,涵盖梯形图逻辑、顺序功能图(SFC)在发酵、灌装等关键工序的应用,并融入了PID控制算法以实现精准的温度与压力调节。本研究旨在为啤酒及其他流程工业的自动化升级提供一套可借鉴的技术方案与实践路径。

关键词: PLC; 啤酒生产线; 自动化控制; 顺序控制; PID控制; 人机界面(HMI)

引言

啤酒是全球消费量大的酒精饮料,现代啤酒工业已从传统作坊式转向高度自动化、智能化的大规模生产模式。消费者对啤酒品质一致性、风味稳定性及食品安全性的要求提升,促使企业采用先进自动化技术精确控制生产环节,因工艺偏差可能致整批次产品报废、造成经济损失。在此背景下,工业自动化技术,尤其是以PLC为核心的控制系统至关重要。PLC专为工业环境设计,能可靠执行多种操作,控制机械或生产过程,且相比传统继电器-接触器控制系统,具有体积小、功能强等优点^[1]。因此,针对啤酒生产线设计并实现一套基于PLC的高效、稳定、智能自动化控制系统,可提升企业核心竞争力,为食品饮料行业自动化改造提供经验,有重要价值。

1 啤酒生产线工艺流程与控制需求分析

1.1 核心工艺流程概述

一条完整的现代化啤酒生产线通常包含麦芽制备、糖化、过滤、煮沸、回旋沉淀、冷却、发酵、过滤、灌装等多个环节。其中,糖化工段将粉碎后的麦芽与热水在糊化锅和糖化锅中按特定温度曲线进行混合与保温,促使淀粉充分转化为可发酵性糖;随后,糖化完成的麦汁进入煮沸锅,在加入酒花后进行一定时间的煮沸,以实现蛋白质变性、杀菌及风味物质提取,之后流入回旋沉淀槽,利用离心力分离热凝固物;冷却后的澄清麦汁被泵入发酵罐,在低温或常温条件下接种酵母,经历主发酵与后熟阶段,此过程对环境条件极为敏感;最终,成熟的啤酒经清酒罐暂存后,进入灌装工段,依次完成洗瓶、灌装、压盖、杀菌、贴标与装箱等操作,形成可供销售的成品。整个流程环环相扣,任何一个环节的失控都可能影响最终产品的感官品质与理化指标。

1.2 关键控制需求分析

基于上述复杂的工艺链条,啤酒生产线对自动化控制系统提出了多维度、高精度的要求。首先,大量设备动作依赖严格的时序逻辑,例如灌装线上洗瓶、进瓶、灌装、压盖等工序必须协同运行,任一环节故障需触发全线联锁停机,这构成了典型的顺序控制需求。其次,糖化、煮沸、尤其是发酵等关键工段涉及温度、压力、液位等连续变量的动态调节,要求系统具备高精度的闭环控制能力,通常需借助PID算法实现 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 级别的温控稳定性。此外,系统还需具备全面的数据采集与可视化功能,将遍布产线的传感器信号实时汇总至人机界面,供操作人员监控与决策^[2]。安全方面,必须建立完善的报警与联锁机制,当出现超温、超压、液位异常或电机过载等危险工况时,系统应能立即响应,执行紧急保护措施,确保人员与设备安全。最后,为适应多品种柔性生产,系统应支持配方管理,能够存储并调用不同啤酒品类的工艺参数,并实现从原料投料到成品出库的全流程数据记录与批次追溯,满足现代食品工业的质量合规要求。

2 基于PLC的控制系统总体设计

2.1 设计原则

本系统的设计遵循以下核心原则:(1)可靠性:选用工业级元器件,采用冗余设计(如关键信号双通道输入)和完善的抗干扰措施(如屏蔽、接地、滤波),确保系统7x24小时不间断稳定运行。(2)先进性与实用性结合:在满足当前生产需求的基础上,适度考虑技术前瞻性,但避免过度设计,注重系统的实用性和投资回报率。(3)开放性与可扩展性:采用标准的工业通信协议(如PROFINET,ModbusTCP/IP),便于未来与上层MES/ERP系统集成,也为后续增加新设备或工段预留接口。

(4) 人机友好性: HMI界面设计简洁直观, 操作便捷, 信息呈现清晰, 降低操作员的学习成本和误操作风险。

2.2 系统硬件架构设计

本系统采用“集中管理、分散控制”的分布式架构, 主要由以下几个部分组成:

2.2.1 中央控制单元 (PLC主站)

选用西门子S7-1500系列PLC作为主控制器。该系列PLC处理速度快、内存容量大、集成运动控制和PID控制功能强大, 并支持多种工业以太网协议, 非常适合复杂的流程控制应用。配置CPU1516-3PN/DP, 配备足够容量的工作存储器 and 装载存储器。电源模块、导轨、背板总线等配套齐全。

2.2.2 I/O模块

(1) 数字量输入 (DI): 用于接收按钮、限位开关、接近开关、电机运行/故障反馈等开关量信号。选用SM1221DI16x24VDC。(2) 数字量输出 (DO): 用于控制接触器、电磁阀、指示灯、报警器等执行元件。选用SM1222DO16x24VDC/0.5A。(3) 模拟量输入 (AI): 用于采集温度 (PT100热电阻)、压力、液位、流量等4-20mA或0-10V的模拟信号。选用SM1231AI8xRTD (用于温度) 和SM1231AI8x13bit (用于其他模拟量)^[1]。(4) 模拟量输出 (AO): 用于向变频器、电动调节阀等发送4-20mA的控制信号。选用SM1232AO4x14bit。

2.2.3 现场仪表与执行器

传感器包括PT100温度传感器、压力变送器、雷达/超声波液位计、电磁流量计、光电开关、接近开关等。执行器包括气动/电动调节阀、变频器 (用于控制水泵、风机转速)、电磁阀、交流接触器等。

2.2.4 人机界面 (HMI)

选用西门子KTP700BasicPN触摸屏。7英寸彩色显示屏, 支持Profinet通信, 具备丰富的图形库和报警记录功能。提供全厂工艺流程图 (P&ID) 动态显示、实时数据监控、历史趋势查询、报警信息管理、手动/自动模式切换、配方参数设定等操作界面。

2.2.5 网络通信架构

控制层网络采用工业以太网PROFINET, 将PLC主站、远程I/O站 (如有)、HMI、变频器等设备高速互联, 实现数据的实时交换。管理层网络通过PLC的第二个以太网口或独立的OPC服务器, 将生产数据上传至工厂的MES系统, 实现生产调度、质量管理等功能。

3 控制系统软件设计

3.1 软件设计方法论

软件开发在TIA Portal (博途) V17统一工程平台下进

行, 该平台实现了PLC、HMI与驱动的协同编程, 极大提升了开发效率。设计中贯彻结构化编程思想, 将庞大的控制任务分解为多个高内聚、低耦合的功能块 (FB) 和功能 (FC), 显著增强了代码的可读性、可重用性与后期维护便利性。根据控制任务的不同特性, 灵活选用多种IEC61131-3标准编程语言: 梯形图 (LAD) 因其图形化、直观性强的特点, 主要用于实现基础逻辑控制与安全连锁; 顺序功能图 (SFC) 则擅长描述具有明确步骤序列的过程, 如灌装、清洗等周期性操作; 而对于复杂的数学运算、数据处理或自定义控制算法, 则采用结构化控制语言 (SCL) 进行高效编写。这种多语言融合的策略, 使得软件架构既能满足逻辑清晰的要求, 又能应对高性能计算的挑战。

3.2 关键工序控制程序设计

3.2.1 发酵罐温度PID控制

发酵过程对温度极其敏感。本设计采用PLC内置的PIDCompact指令块来实现。(1) 控制回路: 温度传感器 (PT100) 将罐内温度信号传给PLC的AI模块。PLC将此测量值 (PV) 与操作员在HMI上设定的目标值 (SP) 进行比较。PID控制器根据偏差计算出输出值 (MV), 该值作为4-20mA信号发送给AO模块, 进而控制冷却水 (或热水) 调节阀的开度。(2) 程序实现: 在OB30 (循环中断组织块, 周期100ms) 中调用PID_Compact指令。通过HMI可以在线修改PID参数 (P增益、I积分时间、D微分时间), 以适应不同发酵阶段的需求。程序还加入了防积分饱和、手动/自动无扰切换等高级功能。

3.2.2 灌装线顺序控制 (SFC应用)

灌装线是一个典型的顺序控制过程。我们使用SFC来清晰地描述其工作流程。

SFC结构:

初始步: 等待启动信号。

步1-进瓶检测: 光电开关检测到瓶子到位。

步2-瓶子定位: 伺服电机驱动星轮将瓶子精确定位到灌装头下方。

步3-灌装: 灌装阀打开, 同时进行CO₂背压控制。通过流量计或称重传感器监控灌装量, 达到设定值后关闭阀门。

步4-压盖: 压盖头下降完成封盖。

步5-出瓶: 传送带将成品瓶送出。

转换条件: 每一步的完成信号 (如定位完成、灌装完成、压盖完成) 作为转换到下一步的条件。

SFC使得复杂的灌装逻辑一目了然, 便于调试和故障诊断。如果某一步骤超时未完成 (如瓶子卡住), SFC会

停留在该步并触发报警，防止错误继续发生。

3.2.3 安全联锁与报警管理

安全是自动化系统的生命线。本系统设计了多层次的联锁保护。一是设备级联锁：例如，只有当洗瓶机运行正常且有瓶信号时，灌装机才允许启动。二是工艺级联锁：例如，发酵罐压力超过安全阈值时，自动打开泄压阀并停止向罐内充CO₂。三是报警系统：所有报警信息（如“发酵罐1#温度超高”、“灌装阀2#堵塞”）都会被记录在PLC的报警队列中，并在HMI上以不同颜色（红色-紧急，黄色-警告）弹出^[4]。操作员确认后，报警信息才会消失，但历史记录会被永久保存，供日后查询分析。

4 系统仿真与测试验证

4.1 仿真环境搭建

为在投入实际硬件前充分验证控制逻辑的正确性，系统开发过程中充分利用了TIA Portal自带的PLCSIM Advanced高级仿真工具。该工具能够创建与真实PLC硬件完全对应的虚拟CPU，并支持对I/O信号的模拟。通过编写专门的仿真逻辑块，我们能够动态模拟现场传感器的状态变化（例如，模拟发酵罐温度随冷却过程逐渐下降，或模拟传送带上瓶子的周期性到达），同时也能反馈执行器的动作结果（如阀门开启到位、电机启动成功）。这种虚拟调试环境极大地缩短了现场调试周期，降低了试错成本，并为后续的系统优化提供了数据基础。

4.2 功能测试

在搭建好的仿真环境中，对系统的核心功能进行了全面测试。针对灌装线的顺序控制逻辑，通过启动仿真并观察SFC图表的状态流转，确认了各工序能够严格按照预设流程执行，并且在人为注入故障信号（如断开“瓶子到位”检测）时，系统能准确停留在故障步并触发相

应报警，验证了其鲁棒性。在发酵温度PID控制测试中，设定目标温度为12℃后，观察到虚拟温度值在控制器作用下平稳趋近设定点，通过在线调整P、I、D参数，成功优化了系统的响应速度与超调量，最终实现了无静差的精准控制，充分证明了控制算法的有效性。同时，HMI的所有交互功能，包括画面导航、数据录入、报警确认与历史查询等，均在WinCC Advanced仿真器中得到逐一验证，确保了人机交互的流畅与可靠。综合来看，仿真测试结果全面支持了本设计方案的可行性与完备性。

5 结语

本文聚焦啤酒生产线，系统设计并论证了基于PLC的自动化控制系统。从工艺需求出发，构建以西门子S7-1500 PLC为核心，集成分布式I/O等硬件的平台；软件上运用多种编程语言，实现对发酵、灌装等关键工序精准控制，还建立安全联锁与报警管理体系。未来研究可聚焦三点：一是推动PLC控制系统与MES、ERP深度集成，实现全流程数字化；二是引入机器学习算法，挖掘历史数据，实现工艺参数自学习、自优化与预测性维护；三是结合边缘计算，部署轻量级AI模型，构建新一代智能啤酒工厂。

参考文献

- [1] 罗宪昌. 基于PLC的工业生产线自动化控制系统优化与故障诊断研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(09): 137-140.
- [2] 朱长江. 数字化转型打通啤酒生产系统的信息壁垒[J]. 中国信息化, 2024, (09): 41-42.
- [3] 王高建. 基于PLC的工业生产线远程监控系统开发与应用研究[J]. 装备制造技术, 2023, (11): 190-192.
- [4] 左懿. 工业生产线集成数字化关键技术的研究[D]. 上海第二工业大学, 2023.