

基于 PLC 与 SCADA 的电气自动化控制系统优化设计

谢云华

江西宏达电力工程有限公司

摘要：现代工业自动化系统正向高度集成化、智能化与网络化方向发展。可编程逻辑控制器与数据采集与监控系统作为工业控制的核心，其协同工作的性能直接影响生产过程的效率、稳定性与安全性。针对传统控制系统中存在的响应延迟、数据孤岛、可扩展性不足及运维困难等问题，有必要对 PLC 与 SCADA 集成的控制系统进行系统性优化设计。优化设计工作围绕硬件架构选型、控制逻辑算法、通信网络、人机交互界面以及数据管理等多个维度展开，旨在构建一个高效、可靠、开放且易于维护的自动化控制平台，从而为生产过程的精益管理与智能升级奠定坚实基础。

关键词：控制系统架构集成；控制算法效能；工业通信网络

1 控制系统架构的集成优化

传统分层式控制架构存在信息传递路径长、决策延迟明显的弊端。优化设计采用扁平化与分布式相结合的混合架构理念。在设备控制层，选用具备强大处理能力、丰富通信接口及模块化扩展功能的高性能 PLC 作为主站，负责对现场设备进行直接、快速、精确的逻辑与过程控制。同时，在允许的子系统层面部署智能远程终端单元或分布式 I/O 模块，形成分布式的数据采集与控制节点，减轻主 PLC 的负荷并提升局部响应速度。在监控管理层，SCADA 系统不再仅仅是数据的被动接收与显示终端，而是通过标准化协议与各 PLC 节点建立高效、双向的数据通道，实现控制参数的下发、生产指令的调度以及全局状态的协同。此种架构优化有效缩短了控制回路，增强了系统的实时性与可靠性，并为后续的功能扩展提供了清晰的物理与逻辑边界。

PLC 内部控制程序的优劣是系统性能的基石。优化设计首先强调控制逻辑的标准化与模块化编程。采用结构化的文本语言或功能块图，将复杂的工艺过程分解为独立的功能模块，如电机启停模块、PID 调节模块、顺序控制模块等。这种方式提升了程序的可读性、可复用性与可维护性。在算法层面，针对存在时变性、非线性的控制对象，引入并实施高级控制策略。例如，在温度、压力、流量等连续过程控制中，对传统 PID 算法进行改进，采用模糊 PID 控制或参数自整定 PID 算法，以适应工况变化，提高控制精度与稳定性。对于多电机同步、张力控制等复杂场景，可嵌入预制的先进算法库功能块^[1]。优化的控制逻辑不仅提升了单台设备的控制品质，更为 SCADA 系统进行更高层

次的协调优化提供了稳定可靠的执行基础。

2 工业通信网络的可靠性与实时性保障

PLC 在工业自动化中扮演着至关重要的角色，它为关键流程提供了高精度的控制能力。而 SCADA 系统则更侧重于实时数据的可视化与决策支持，帮助企业 在快节奏的工业环境中做出明智的决策，确保生产优化和高效运营。因此，准确区分 PLC 与 SCADA 的能力显得尤为重要。PLC 与 SCADA 系统，作为现代工业自动化的两大核心支柱，共同承担着控制、监控与优化制造、能源及水管理等众多行业流程的重任。PLC 专注于实时执行控制任务，依据来自现场设备和传感器的信号进行精准调控；而 SCADA 系统则更进一步，提供全面的监控、数据采集及深入分析，助力企业做出数据驱动的明智决策。这两大系统相辅相成，共同确保工业运营的安全、高效与远程监督。

PLC 的编程语言遵循国际电工委员会 (IEC) 制定的标准，主要有梯形图、指令列表、顺序功能图和结构化文本等。这些语言使得编程人员能够根据具体的控制需求，灵活地编写控制逻辑。在实际应用中，PLC 控制系统的设计需考虑系统的可靠性、实时性、可扩展性和易维护性。为了提高系统的可靠性，PLC 通常采用冗余设计，包括硬件冗余和软件冗余^[2]。硬件冗余通过增加备份组件来提高系统的容错能力，而软件冗余则通过程序设计实现故障检测和自动恢复。实时性是衡量 PLC 控制系统性能的关键指标，它要求系统能够在规定的时间内完成控制任务。为此，PLC 采用高效的调度算法和优化的程序结构来减少响应时间。

可扩展性是指 PLC 控制系统能够根据生产需求的

作者简介：谢云华（1987—），男，本科，工程师，研究方向为机电工程。

变化, 灵活地添加或修改控制模块。现代 PLC 系统通常支持多种通信协议和接口, 如 Modbus、Profibus 和 Ethernet/IP 等, 这使得系统能够轻松地与其他自动化设备或信息系统进行集成。易维护性则体现在 PLC 系统的诊断功能和用户界面设计上。PLC 提供丰富的诊断信息, 帮助维护人员快速定位和解决问题。直观的用户界面使得编程和调试过程更加简便。随着技术的发展, PLC 控制系统正朝着智能化、网络化和集成化的方向发展。智能化体现在 PLC 能够通过内置的智能算法, 如模糊控制、神经网络等, 实现更复杂的控制策略。

3 人机交互界面的功能性与体验优化

SCADA 系统的人机界面是操作人员与生产过程交互的主要窗口, 其设计质量直接影响生产监控的效率和安全性。优化设计遵循直观、高效、安全的原则, 需要从用户体验和工程实践两个维度进行系统性构建。界面布局采用科学的区域化设计, 通常将屏幕划分为工艺流程总览区、关键参数监控区、报警事件列表区及操作控制区, 这种分区方式符合操作人员的认知习惯, 能够实现信息的快速定位。图形元素严格采用符合行业标准的符号体系, 并通过动态颜色变化、动画效果和数据标签的有机结合, 准确、直观地映射现场设备状态。在报警管理方面, 引入智能化的分级报警管理机制, 依据报警的紧急程度、持续时间和工艺影响范围进行多维度筛选、分类与优先级排序, 并实现与标准操作程序和处理预案的自动关联, 为操作人员提供精准的处置指导^[3]。安全机制贯穿于交互设计始终, 对关键操作设置多级权限验证、操作口令确认与电子签名流程, 并通过逻辑互锁防止顺序错误的操作发生。此外, 开发响应式设计的移动监控终端访问功能, 允许授权人员通过安全的虚拟专用网络通道, 使用平板电脑或智能手机实时查看关键生产信息与接收分级推送的报警通知, 这一功能极大地提升了运维管理的空间灵活性与事件响应速度。一个设计优良的 HMI 能够显著降低操作人员的认知负荷, 通过情景化的信息呈现和引导式的交互流程, 有效提升其对复杂异常工况的判断准确性与处置效率, 是人机协同作业成功的关键。

现代 SCADA 系统已超越单纯的数据监视功能, 正朝着深度数据价值挖掘与智能化决策支持方向演进。在数据采集端, 优化工作的核心在于精细化的点位表规划与管理, 通过评估工艺监控的实际需求与数据价值密度, 在保证反映工艺状态完整性的前提下, 合理规划采样频率与数据精度, 平衡数据丰富度与系统处

理及存储负荷, 避免无效数据泛滥导致的资源浪费。数据存储架构采用分层策略, 利用高性能实时数据库保存毫秒级或秒级变化的过程数据, 满足监控与快速回顾的需求; 同时, 利用关系型数据库或时序数据库存储生产事件、报警记录、操作日志、质量检验数据等结构化历史数据, 支撑长期的趋势分析与统计挖掘^[4]。在数据应用层面, 充分利用 SCADA 系统内置或通过外部接口集成的数据分析工具, 对汇聚的历史与实时数据进行多角度分析, 包括关键参数的趋势分析、多变量之间的相关性分析、生产过程的统计过程控制分析以及设备性能的退化分析。通过建立集成的关键性能指标看板, 将设备综合效率、产品合格率、单位能耗、计划达成率等指标进行可视化呈现, 为不同层级管理者的生产决策提供即时、直观的数据支持。更进一步, 通过定义统一的数据模型与接口规范, 可将清洗、处理后的标准化数据通过安全的应用程序编程接口或中间件, 稳定地推送至更高层的制造执行系统或企业资源计划系统, 从而实现从车间控制层到工厂运营层乃至企业资源管理层的纵向信息深度集成, 彻底打破信息孤岛, 为构建数字孪生、实现基于数据的全局优化奠定坚实基础。

4 系统安全性与可靠性的强化设计

工业控制系统的安全稳定运行是保障连续生产和经济效益的基石。其优化设计必须秉持防御纵深的理念, 从物理硬件到应用软件, 从网络边界到内部行为, 构建多层协同的加固体系。

在硬件可靠性层面, 冗余设计是实现高可用的核心策略, 并需注重其实现的智能性与平滑性。对于核心控制设备, 如 PLC, 采用双机热备冗余配置已成为标准实践。这不仅包括 CPU 模块的 1:1 冗余, 还涵盖电源模块、通信模块乃至背板总线的冗余。先进的热备系统能够实现无扰切换, 在主控制器发生故障时, 备用控制器能在数十毫秒内接管控制权, 确保生产过程不间断。通信网络通常采用环形或双星型拓扑结构, 配合快速环网协议, 在单点线路中断时可在毫秒级内自愈重构。对于特别关键的检测回路, 可采用“三取二”表决式传感器冗余配置, 通过中间值选择或容错算法, 屏蔽单一传感器的误报或失效, 极大提升信号可信度。执行机构冗余则可能表现为并联气路与阀门, 或变频器与工频旁路的自动切换设计^[5]。

软件与网络安全的防御体系需贯穿于系统的整个生命周期。在控制软件层面, 除了在 PLC 编程中集成软件看门狗与结构化异常处理, 还应强化对输入/输出数据的合理性校验与边界保护, 防止因传感器故障

或通信干扰导致的控制输出异常。在主机安全层面，对 SCADA 服务器、操作员站等所有上位机，实施严格的小型化安装原则，移除或禁用非必要的服务和端口，定期更新经严格测试的工控系统补丁，并部署专为工业环境设计的应用程序白名单软件，仅允许授权进程运行。

网络架构安全通过分区隔离实现。遵循 IEC 62443 标准，将整个工厂网络划分为多个安全区域，例如过程控制区、操作监控区、设备维护区和工厂信息区。区域之间通过部署具有深度包检测功能的工业防火墙或单向网闸进行隔离。防火墙策略须基于“默认拒绝”原则，仅允许特定的源、目的、端口和协议通过，并对 Modbus TCP、OPC UA 等工业协议进行指令级过滤，拦截如非法的寄存器写入或功能码调用。

5 数据深度集成与智能监控界面开发

SCADA 系统的价值正从“可视”向“可知”与“可预测”演进，其核心驱动力在于将海量的运行数据转化为可行动的洞察力与前瞻性决策支持。优化设计致力于构建一个端到端的数据价值链条，确保数据从采集、处理、存储到分析应用的全流程高效与智能化。

在数据采集端，首要工作是建立一套统一、规范的数据治理基础，制定具备语义信息的数据点命名规范与层次化编码规则，这为后续的数据关联与分析提供了结构化的前提。利用 SCADA 系统强大的数据流处理引擎，在数据入库前即实施一系列预处理：包括基于规则的有效性过滤以剔除明显无效值，采用旋转门等算法进行有损压缩以减少存储压力，执行工程单位转换以实现多源数据的标准化，并进行初步的质量标定，从而显著提升原始数据的可信度与可用性。历史数据采用高性能时序数据库进行高效存储，其优异的压缩比与查询性能，完美支持对多年历史数据的速度回溯、对比分析以及对秒级甚至毫秒级高频

数据进行深度挖掘，为模式识别与原因分析奠定了基础。

在数据应用层面，系统通过内置或外接的分析工具，构建从描述性分析到预测性分析的进阶能力。例如，运用统计过程控制方法监控关键工艺参数的稳定性；通过机器学习算法对设备运行状态进行聚类分析，建立正常工况基准模型；并基于历史故障数据与运行参数，训练预测性维护模型，对诸如轴承磨损、换热器结垢等渐进性故障进行早期预警。

6 结语

电气自动化控制系统的优化是一个持续演进、不断深入的过程。聚焦于 PLC 与 SCADA 的协同设计，通过架构集成、算法升级、网络强化、界面改善、数据深化应用以及安全加固等多方面的综合施策，能够构建出更敏捷、更稳健、更智能的现代工业控制系统。这种优化不仅解决了当前生产中的具体痛点，更为企业拥抱工业物联网、实现数字化转型搭建了坚实可靠的底层基础设施。随着边缘计算、人工智能等新技术的逐步融入，PLC 与 SCADA 系统优化设计的内涵与外延必将进一步拓展，持续驱动工业自动化向更高水平发展。

参考文献：

- [1] 郭少卿. 基于 PLC 的电气自动化控制系统优化设计与应用研究 [J]. 机械与电子控制工程, 2025, 7(13).
- [2] 付先勇. 电气自动化控制系统路径优化设计分析 [J]. 模具制造, 2023, 23(12):223–225.
- [3] 王勇. 智造升级电气自动化系统优化设计与数字化融合 [J]. 数码设计 (电子版), 2024(4):0883–0885.
- [4] 邓永峰. 探究智能化技术在电力系统电气工程自动化中的运用 [J]. 电力设备管理, 2022(21):208–209.
- [5] 王斌. 工业电气自动化控制系统的优化设计与实现策略 [J]. 数字化用户, 2025(48):82–84.