

生物制药车间智能电气控制系统架构及能效优化策略

闫正为 王子安 陆文静
北京生物制品研究所有限责任公司 北京 100176

摘要：生物制药车间对环境与生产工艺要求严苛，其电气控制需求多样。本文设计了分层分布式智能电气控制系统架构，遵循分层管控、冗余可靠等原则，划分现场设备层、控制层等层次，选型关键技术并注重安全与可靠性。同时，提出负荷优化调度、智能设备能效管控等能效优化策略，构建三级能效监测体系，通过案例分析验证，该架构与策略能满足生物制药车间需求，有效提升能效，降低生产成本，保障生产稳定高效进行。

关键词：生物制药车间；智能电气控制系统；分层分布式架构；能效优化

1 生物制药车间的特点与电气控制需求分析

1.1 生物制药车间的环境特点

生物制药车间对环境要求极为严苛。在洁净度方面，不同生产区域划分了明确的洁净等级，从A级到D级，对空气中尘埃粒子数量和微生物浓度有严格限制，以确保药品生产不受污染。温湿度控制也十分关键，合适的温湿度环境能保障生物制品的活性和稳定性，例如某些疫苗生产需在特定的低温低湿条件下进行。此外，车间还需具备良好的通风换气系统，保证空气新鲜，防止有害气体积聚。

1.2 生物制药生产工艺特点

生物制药生产工艺复杂且多样，涵盖发酵、纯化、制剂等多个环节。发酵过程是生物制药的核心步骤之一，需要精确控制温度、pH值、溶氧量等参数，以促进微生物的生长和代谢，生产出目标产物。纯化环节则要去除杂质，提高产品的纯度，常采用层析、过滤等技术。制剂过程是将纯化后的产品制成适合临床使用的剂型，如注射剂、片剂等。各工艺环节紧密相连，对生产设备的协同性和稳定性要求极高^[1]。

1.3 电气控制需求分析

基于上述环境和工艺特点，生物制药车间的电气控制需求呈现出多方面特征。首先，需要实现对环境参数的精确控制，如通过智能传感器实时监测温湿度、洁净度等，并自动调节空调、通风等设备，确保环境稳定。其次，对生产设备的控制要求高精度和高可靠性，要能精确控制发酵罐的温度、搅拌速度，灌装机的灌装量等。另外，还需具备完善的故障诊断和报警功能，以便及时发现和处理设备故障，保障生产的连续性。

2 生物制药车间智能电气控制系统架构设计

2.1 系统总体架构设计原则

分层管控原则，按“现场设备层-控制层-监控层-管

理层”分层设计，各层级各司其职又协同联动。现场设备层负责数据采集与指令执行，控制层负责逻辑运算与精准控制，监控层负责状态监控与报警管理，管理层负责数据分析与决策支持，实现从设备级到企业级的全流程管控。（1）冗余可靠原则，核心设备与关键链路采用双冗余设计。例如控制层的PLC控制器配置主备冗余，当主控制器故障时，备控制器自动切换，切换时间小于1秒；通讯链路采用双网冗余，通过工业以太网与无线通讯互为备份，避免单点故障导致系统瘫痪。（2）开放兼容原则，采用标准化通讯协议与接口，支持多系统互联互通。系统兼容ModbusTCP、Profinet、OPCUA等主流协议，可与MES、ERP等管理系统对接，实现生产计划与电气控制的协同。同时，预留扩展接口，便于后期新增设备与功能模块。（3）合规可追溯原则，在架构设计中嵌入合规性管控模块。通过权限管理系统控制操作权限，不同岗位人员分配不同操作权限；通过审计追踪模块记录所有操作行为，包括操作人员、操作时间、操作内容，确保操作可追溯、可审计。

2.2 系统层次结构划分

现场设备层是基础，由智能传感器、智能执行器、智能仪表等设备组成。智能传感器包括温度传感器、压力传感器、电流传感器等，用于采集工艺、环境及电气参数；智能执行器包括变频调速器、伺服控制器、电动阀门等，接收控制指令驱动设备运行；智能仪表包括电力仪表、流量计等，实现参数的现场显示与数据上传。例如在洁净区安装温湿度传感器，在电机回路安装电流传感器，实时采集运行数据；控制层是核心，以PLC、DCS及边缘计算网关为核心设备。PLC负责逻辑控制与参数调节，如发酵罐的温度闭环控制、空调系统的压差控制；DCS适用于大规模、复杂工艺的集中控制，实现多工序协同调控；边缘计算网关负责现场数据的预处理

与边缘分析,减少数据传输量,提升响应速度,例如实时分析电机电流数据,预判设备故障;监控层是纽带,构建SCADA监控系统与操作台。SCADA系统通过可视化界面展示车间电气系统运行状态,包括设备启停状态、参数变化曲线、报警信息等,支持远程操作与参数设置;操作台配备触摸屏、指示灯、操作按钮,实现本地手动控制,作为自动控制的备份^[2]。同时,监控层设置报警管理模块,对不同等级的报警进行分类处理,优先级高的报警优先推送;管理层是延伸,集成能源管理平台与MES系统。能源管理平台对采集的能耗数据进行分析,生成能耗统计报表与能效分析报告,识别节能潜力;MES系统根据生产计划向电气控制系统下达负荷调度指令,实现生产与能源的协同优化。同时,管理层支持移动端访问,管理人员可通过手机APP实时查看车间运行状态。

2.3 关键技术选型与应用

PLC选型需适配车间工艺特点,核心工序选用中型PLC,如西门子S7-1500系列,支持多轴控制与复杂逻辑运算;辅助工序选用小型PLC,如三菱FX5U系列,降低成本。PLC需具备高速计数、脉冲输出等功能,满足精准控制需求,同时支持OPCUA协议,便于与其他系统通讯;变频调速器优先选用矢量控制型,如ABBACS880系列,控制精度高,可实现电机转速的平滑调节,适应发酵罐搅拌、风机、水泵等设备的调速需求。变频调速器需具备过载、过压、欠压等保护功能,支持Modbus通讯,可通过PLC实现远程控制与参数监控;传感器选用高精度、高可靠性产品,温度传感器选用铂电阻PT100,精度等级A级,测量范围-50-200℃;压力传感器选用扩散硅型,精度0.5级,测量范围0-1MPa;电流传感器选用霍尔效应型,精度0.2级,支持直流与交流测量。传感器需具备防爆、防水功能,适应车间复杂环境;通讯网络采用工业以太网为主、无线通讯为辅的方式。工业以太网选用千兆以太网,传输速率快、稳定性高,采用环网拓扑结构,冗余自愈时间小于300ms;无线通讯采用5G或Wi-Fi6技术,用于移动设备(如AGV、手持终端)的数据传输,满足高带宽、低延迟需求。

2.4 系统安全与可靠性设计

电气安全设计方面,配置完善的保护装置。配电系统采用TN-S接地系统,设备金属外壳可靠接地,接地电阻小于4Ω;各回路安装断路器实现过载与短路保护,插座回路安装剩余电流动作保护器(RCD),动作电流不大于30mA,动作时间小于0.1s。防爆区域选用防爆型断路器、灯具等设备,防护等级不低于IP65。系统安全设计

方面,构建多层次安全防护体系。通过防火墙与入侵检测系统防止外部网络攻击;采用数据加密技术保护传输与存储数据,加密算法选用AES-256;建立权限管理机制,按“最小权限原则”分配操作权限,操作人员需通过用户名、密码及指纹验证方可登录系统;可靠性设计方面,除冗余设计外,还需考虑环境适应性。电气设备选用宽温型产品,适应车间-10-50℃的温度范围;控制柜采用防尘、防水设计,配备空调或风扇进行散热,确保设备稳定运行。定期开展设备维护与校准,建立设备运维档案,延长设备使用寿命;合规性设计方面,满足GMP对数据管理的要求。系统具备数据自动备份功能,本地与云端双重备份,防止数据丢失;审计追踪模块记录所有数据修改与操作行为,不可篡改;支持生成符合GMP标准的运行报告、报警报告等,减少人工记录工作量。

3 生物制药车间智能电气控制系统能效优化策略

3.1 负荷优化调度策略

通过对车间内各生产设备的用电负荷进行实时监测和分析,制定合理的负荷调度方案。根据生产计划和设备运行状态,将高负荷设备安排在用电低谷期运行,降低用电成本。例如,在夜间电网负荷较低时,启动大型的发酵设备和纯化设备,充分利用低谷电价^[3]。同时,优化设备的启停顺序,避免设备频繁启停造成的能源浪费。对于一些非连续运行的设备,根据生产需求合理安排其运行时间,减少空载运行时间。

3.2 智能设备能效管控策略

采用智能设备对生产过程进行精确控制,提高设备能效。例如,智能变频器可根据设备实际负载情况自动调整电机转速,降低电机能耗。在空调系统中,智能温控设备能根据车间内实际温湿度需求精确调节制冷或制热功率,避免过度制冷或制热。另外,对设备进行定期维护和保养,确保设备处于最佳运行状态,提高设备能效。例如,定期清洗空调滤网,保证空调通风顺畅,提高制冷或制热效率。

3.3 能源回收与梯级利用策略

在生物制药生产过程中,会产生大量的余热、余压等能源。通过安装能源回收装置,对这些能源进行回收利用。例如,在发酵过程中产生的余热可用于加热纯化工艺中的水,实现能源的梯级利用。对于一些高压蒸汽,可通过减压装置将其压力降低后用于其他对蒸汽压力要求较低的工艺环节。此外,还可以利用太阳能、地热能等可再生能源,为车间提供部分能源,减少对传统能源的依赖。

3.4 能效监测与持续优化策略

构建三级能效监测体系,覆盖“车间-工段-设备”三个层级。车间级监测总用电量、总功率因数等指标;工段级监测各生产环节的能耗数据,如发酵工段、纯化工段的能耗;设备级监测单台设备的耗电量、能效比等参数。通过智能电力仪表、能耗采集终端实现数据采集,传输至能源管理平台。能效分析与诊断,能源管理平台采用大数据分析技术,生成能耗统计报表、能效趋势曲线等,对比不同批次、不同时段的数据,识别能耗异常点。例如通过分析发现某台发酵罐的能耗高于同类设备,进一步排查得知是搅拌电机轴承磨损导致,及时更换后能耗恢复正常;持续优化机制,建立“监测-分析-改进-验证”的闭环优化流程。每月召开能效分析会议,基于能源管理平台的数据提出优化建议,如调整空调运行参数、优化设备运行时序等;实施改进措施后,跟踪验证节能效果,将有效的优化措施固化为标准流程,持续降低车间能耗;数字化仿真优化,采用数字孪生技术构建车间电气系统的虚拟模型,模拟不同负荷、不同工况下的能耗情况,预测优化策略的实施效果。例如通过仿真对比不同变频调速方案的节能效益,选择最优方案;模拟光伏发电与储能系统的运行模式,优化充放电策略,提升再生能源利用率。

4 生物制药车间智能电气控制系统实施与效果评估

4.1 系统实施步骤

在生物制药车间部署智能电气控制系统,必须秉持全面规划、有序推进的原则。开展工作之初,要展开详尽的需求调研。这需要与车间生产、设备、电气等各个相关部门进行深度交流,全面了解生产流程、设备特性及电气控制需求,从而精准明确系统所需具备的功能以及应达到的性能指标。完成需求调研后,进入系统设计阶段,涵盖架构设计、硬件选型、软件编程等工作。要根据车间实际情况,精心规划系统架构,合理挑选适配的硬件设备,并编写高效、稳定的软件程序。随后开展设备采购与安装调试,严格依照设计方案采购PLC、传感器、变

频器等关键设备,在现场进行精准安装与细致调试,确保设备能稳定、正常运行。之后进行系统集成与联调,将各个子系统整合到整体架构中,开展联合调试,实现各系统间的数据交互与协同控制^[4]。最后,按验收标准对系统进行全面测试,验收合格后正式上线运行。

4.2 实施效果评估指标

为准确评估系统实施效果,设定多方面评估指标。在生产效率方面,统计设备利用率、生产周期等指标,对比系统实施前后的变化,评估系统对生产流程的优化效果。在能效提升方面,监测车间总能耗、单位产品能耗等数据,分析系统能效优化策略的实施成效。在质量控制方面,检查产品合格率、质量稳定性等指标,评估系统对生产环境与工艺参数精确控制对产品质量的影响。在系统可靠性方面,统计系统故障发生率、故障恢复时间等数据,评估系统的稳定运行能力。

结束语

生物制药车间智能电气控制系统架构与能效优化策略的研究具有重要意义。通过合理设计系统架构,保障了车间电气控制的稳定性与可靠性;能效优化策略的实施有效降低了能耗,提高了能源利用效率。未来,随着技术的不断发展,智能电气控制系统将更加完善,能效优化策略也将不断创新,为生物制药行业的可持续发展提供更有力的支持,推动行业向绿色、高效方向迈进。

参考文献

- [1]代闯,王超,李鑫.探究制药工程中的制药工艺质量控制[J].机械与电子控制工程,2024,6(11):40-42.
- [2]马媛.生物制药技术在制药工艺中的应用[J].化工设计通讯,2024,50(08):113-115.
- [3]李鹏飞.生物制药技术在制药工艺中的应用[J].当代化工研究,2024,(14):164-166.
- [4]于晓达.生物制药生产车间洁净室压差自控系统的构建探讨[J].科技创新导报,2019(10):81,83.