

生物医药实验室电气智能化设计与应用实践

章子生

中国医药集团联合工程有限公司广州公司 广东 广州 510000

【摘要】：生物医药实验室兼具科研精准性、环境严苛性、运行安全性与合规性多重要求，传统电气系统存在运维繁琐、能耗偏高、环境调控滞后、安全隐患难预警等问题，已无法适配现代生物医药研发与检测的高效运转需求。本文结合生物医药实验室功能特性与电气设计规范，阐述电气智能化系统的设计原则、核心架构与关键模块配置，通过实际项目应用案例，分析智能化系统在供电保障、环境调控、安全管控、能耗管理等方面的实践成效，总结设计与运维过程中的优化要点，为同类实验室电气智能化升级改造提供参考，助力生物医药实验室实现高效、安全、低碳、合规运行。

【关键词】：生物医药实验室；电气智能化；供电可靠性；安全管控；节能运维

DOI:10.12417/2811-0536.26.07.007

1 引言

生物医药实验室是开展新药研发、生物检测、样本分析、病理实验的核心场所，其运行环境、供电稳定性直接影响实验数据精准度、样本完整性与操作人员安全。

传统生物医药实验室电气系统多采用分散式控制、人工值守模式，存在供电冗余不足、环境调控被动、故障排查滞后、能耗浪费严重、数据无法追溯等短板。随着物联网、边缘计算、智能控制技术在工程领域的普及，电气智能化系统逐步应用于实验室场景，通过感知设备、控制终端、管理平台的一体化集成，实现电气运行全流程自动化、可视化、智能化管控。本文结合实际工程项目，深入探讨生物医药实验室电气智能化的设计思路与应用实践，推动实验室电气系统从传统被动运维向主动智能管控转型。

2 生物医药实验室电气智能化设计原则与核心需求

2.1 设计基本原则

生物医药实验室电气智能化设计需兼顾实用性、安全性、合规性、扩展性与节能性，遵循四大核心原则：一是安全优先原则，所有电气设备与智能模块需符合实验室防爆、防腐、防尘、易清洁要求，重点强化漏电保护、电弧监测、应急供电功能，杜绝电气安全隐患；二是合规适配原则，严格遵循药品生产质量管理规范、生物安全实验室建设标准、民用建筑电气设计规范，匹配不同等级洁净区、实验区的电气管控要求；三是稳定可靠原则，针对核心实验设备采用双回路供电与不间断电源备份，优化电能质量，降低电压波动、谐波干扰对精密仪器的影响；四是集成协同原则，打破电气系统与环境、安防、设备管理系统的信息壁垒，实现多系统联动控制，避免重复建设与数

据孤岛；五是低碳节能原则，通过智能调控实现照明、通风、空调等设备按需运行，降低非必要能耗，契合绿色实验室建设要求。

2.2 核心功能需求

结合生物医药实验室功能分区与运行特点，电气智能化系统需满足五大核心需求：第一，可靠供电需求，实现分级配电、电能质量优化、应急供电自动切换，保障核心设备不间断运行；第二，智能环境联动需求，完成照明、通风、空调、净化设备的自动化调控，匹配实验区温湿度、压差、洁净度要求；第三，全方位安全管控需求，实现电气故障实时监测、异常报警、远程切断，同时联动门禁、视频监控、气体泄漏监测系统，提升整体安全等级；第四，精细化运维需求，通过中央监控平台实现电气设备状态可视化、故障定位精准化、运维记录数字化，减少人工巡检工作量；第五，能耗管理需求，实时监测各区域、各设备能耗数据，分析能耗规律，制定节能调控策略，降低运维成本。

3 生物医药实验室电气智能化系统架构设计

本次设计采用分层分布式架构，自下而上分为感知执行层、网络传输层、平台管控层、应用决策层，四层架构协同配合，实现电气系统全维度智能管控，架构逻辑清晰、运行稳定，便于后期扩容与升级。

3.1 感知执行层

感知执行层是系统的神经末梢与执行终端，由各类智能传感器、智能断路器、电能质量监测模块、智能照明控制器、联动控制模块组成，负责实时采集电气运行参数、环境参数、设备状态数据，同时接收管控指令，执行设备启停、参数调节、电源切断等操作。核心设备包括电流电压传感器、温度传感器、漏电监

测模块、谐波监测装置、智能开关面板、应急电源控制器等，所有设备均选用适配实验室环境的防腐、防尘、易清洁型号，避免积尘污染影响实验洁净度。

3.2 网络传输层

网络传输层负责数据的稳定传输与交互，采用工业以太网与无线物联网相结合的传输方式，有线网络保障核心配电间、精密仪器区的数据传输稳定性，无线网络覆盖普通实验区、辅助区，降低布线复杂度。传输网络独立搭建，不与实验检测网络混用，避免数据干扰，同时设置数据加密与防火墙，保障传输安全，满足实验室数据合规性要求。

3.3 平台管控层

平台管控层是系统的核心大脑，部署于实验室中央监控室，集成电力监控、环境联动、安全报警、能耗分析、运维管理五大功能模块，采用可视化界面展示全实验室电气运行状态，支持数据存储、历史查询、异常报警、远程控制等功能。平台具备开放性接口，可对接实验室信息管理系统，实现电气数据与实验流程数据的互通共享，便于全程追溯与合规审计。

4 关键电气智能化模块设计与配置

结合生物医药实验室功能分区差异，针对性设计供电保障、智能照明、环境联动、安全防护、能耗管理五大关键模块，各模块独立运行又协同联动，全面满足实验室运行需求，具体配置要点如下表所示。

表 1 具体配置要点

模块名称	核心功能	适配区域	关键配置要点
智能供电保障模块	分级配电、不间断供电、电能质量优化、故障自动切换	精密仪器室、样本存储室、生物安全实验室	双回路供电设计，核心设备配置 UPS 不间断电源，加装有源滤波器与动态电压调节器，控制电压波动范围，降低谐波干扰
智能照明控制模块	分区控制、感应启停、亮度调节、昼夜模式切换	实验操作区、缓冲间、走廊、辅助办公区	采用洁净型 LED 灯具，搭配人体感应与光线感应模块，洁净区照明定时关闭，避免非必要长明，特殊实验区可调亮度适配操作需求
环境电气联动模块	通风空调联动、压差调控、温湿度适配、消毒设备联动	洁净区、负压实验室、恒温恒湿室	与通风柜、净化空调、压差传感器联动，根据环境参数自动调节风机转速与电源输出，维持区域环境参数稳定

电气安全防护模块	漏电监测、过载保护、电弧故障报警、应急供电、远程断电	全区域，重点覆盖化学品存放区、精密仪器区	配置智能漏电断路器、电气火灾监控装置，异常情况实时报警并自动切断非必要电源，应急照明与疏散指示系统自动启动
能耗监测管理模块	分区能耗统计、设备能耗分析、节能策略推送、能耗报表生成	全区域	安装智能电表与能耗采集终端，分类统计照明、空调、实验设备能耗，生成月度年度能耗报告，识别高能耗环节

4.1 智能供电保障系统

生物医药实验室用电负荷分为一级负荷、二级负荷与三级负荷，其中生物安全柜、超低温冰箱、精密分析仪器、应急照明等属于一级负荷，必须保障不间断供电。设计采用三级分级配电模式，一级配电负责总电源接入与分配，二级配电针对各功能分区独立供电，三级配电直达单台实验设备，实现负荷分级管控。一级负荷采用双回路独立供电，同时配置在线式 UPS 不间断电源，断电后可自动切换，保障核心设备持续供电 4 小时以上，满足样本保存与实验收尾需求。针对精密仪器易受电压波动、谐波干扰影响的问题，加装电能质量优化装置，将电压波动控制在±1%以内，谐波畸变率降至 3% 以下，有效降低仪器故障率，保障实验数据精准性。

4.2 环境与电气联动系统

生物医药实验室洁净区、负压区对温湿度、压差、通风量有严格要求，传统人工调控模式响应滞后，易出现环境参数超标问题。智能化系统将电气控制与环境监测深度联动，通过传感器实时采集区域温湿度、压差、有害气体浓度等参数，传输至管控平台后，自动调节通风风机、净化空调、通风柜的供电频率与运行功率。例如，负压实验室压差低于标准值时，系统自动提升排风机供电功率，加大排风力度，恢复负压状态；实验人员离开洁净区后，系统自动调低空调与通风设备运行功率，进入节能模式，既保障环境合规，又降低能耗浪费。

4.3 全方位电气安全防护系统

安全是生物医药实验室电气设计的核心底线，智能化安全防护系统实现事前预警、事中控制、事后追溯的全流程管控。全区域部署智能监测断路器，实时监测线路电流、温度、漏电状态，发现过载、漏电、电弧故障等隐患时，立即发出声光报警，并通过移动

端推送信息至运维人员，严重隐患可自动切断故障线路电源，避免事故扩大。化学品存放区、有机溶剂使用区选用防爆型电气设备与监测模块，杜绝电气火花引发安全风险；同时联动门禁系统，非授权人员无法开启实验区电气设备，进一步提升安全管控等级。应急照明与疏散指示系统采用智能集中控制，断电后自动点亮，引导人员快速疏散，保障人员安全。

5 应用实践与成效分析

5.1 项目概况

本次应用实践依托某生物医药研发中心实验室项目，实验室总建筑面积 3200 平方米，涵盖 BSL-2 级生物安全实验室、精密仪器分析室、样本低温存储室、洁净实验区、普通实验区、辅助办公区六大功能区域，原有电气系统为传统分散式控制，存在运维效率低、能耗偏高、供电稳定性不足等问题。本次改造采用上述电气智能化设计方案，完成全区域智能模块安装、系统集成与调试，改造后持续运行 12 个月，各项指标均达到设计要求。

5.2 实践成效

(1) 供电可靠性显著提升：改造后，核心实验设备实现双回路+UPS 双重供电保障，运行期间未发生断电中断情况，电压波动与谐波干扰得到有效控制，精密仪器故障率同比下降 65%，实验数据重复性与精准度明显提升，避免了因供电问题导致的样本损毁与实验返工，降低了科研成本与时间损耗。(2) 运维效率大幅提高：通过中央监控平台与移动端远程管控，实现电气系统运行状态 24 小时可视化，故障定位精准至线路与设备，运维人员无需逐区域巡检，故障响应时间从原来的 2 小时缩短至 15 分钟以内，日常运维工作量减少 70%，同时系统自动生成运维记录与故障台账，满足实验室合规审计要求。(3) 节能降耗效果突出：通过智能照明、空调通风联动调控、能耗精细化管理，实验室整体用电能耗同比下降 28%，其中照明能耗下降 42%，通风空调能耗下降 31%。系统定期生

成能耗分析报告，帮助管理人员优化设备运行策略，持续挖掘节能潜力，实现绿色低碳运行。(4) 安全管控全面强化：运行期间，系统成功预警线路过载、漏电隐患 12 起，均在事故发生前完成处置，未出现任何电气安全事故。电气安全与环境、安防系统联动运行，构建了全方位安全防护体系，有效保障了实验人员人身安全与实验室财产安全，符合生物医药实验室安全管理规范。

6 设计与运维优化要点

结合本次应用实践，生物医药实验室电气智能化设计与运维需注意以下优化要点：一是设备选型需适配实验室特殊环境，优先选用防腐、防尘、易清洁、防爆型智能电气设备，避免影响实验洁净度与安全性；二是系统设计需预留扩容接口，适配实验室后续设备新增、功能升级需求，避免重复改造；三是供电设计需充分考虑精密仪器的电能质量要求，提前做好谐波治理与电压稳定措施；四是运维过程中需定期校准传感器与监测模块，保证数据采集精准性，同时加强管理人员操作培训，熟练掌握系统管控与应急处置流程；五是强化数据安全，对电气运行数据、实验相关数据进行加密存储，防止数据泄露与篡改，满足行业合规要求。

7 结论

电气智能化是生物医药实验室现代化建设的重要组成部分，能够有效解决传统电气系统的供电不稳、运维繁琐、能耗偏高、安全隐患突出等问题，全面提升实验室运行效率、安全等级与节能水平，契合生物医药行业科研创新与合规管理的双重需求。本文提出的分层分布式系统架构与五大核心模块设计，贴合生物医药实验室功能特性，具备较强的实用性与可推广性。后续可进一步结合数字孪生、人工智能技术，深化系统预判性管控与自动化运维能力，推动生物医药实验室向更高效、更智能、更安全、更低碳的方向发展，为生物医药科研工作提供更可靠的硬件支撑。

参考文献：

- [1] 肖祥,阮会明.三级生物安全实验室电气设计探讨[J].建筑电气,2025,44(08):22-25.
- [2] 李强,王国英,高达,等.医药工业厂房的电气设计[J].工程建设与设计,2025,(11):49-51.
- [3] 吴威.科研实验室电气设计策略[J].智能建筑,2022,(08):87-91.
- [4] 杨华春.高等院校教学实验楼电气设计探讨[J].大众标准化,2021,(24):76-78.
- [5] 李周林.某大型三甲医院科研实验室电气设计探讨[J].智能建筑电气技术,2020,14(02):41-45.