

基于物联网的医院病房建筑电气自动化系统设计

赵坤成

山东第一医科大学第二附属医院 山东 泰安 271000

摘要：本文设计了基于物联网的医院病房建筑电气自动化系统，涵盖环境监控、设备自动化控制、能源管理及安全防护四大模块。系统通过高精度传感器实时采集数据，利用 ZigBee 与 Wi-Fi 双模通信上传至云平台，实现数据可视化与远程控制。采用边缘计算减少延迟，结合机器学习优化能耗预测与设备调优策略，提升能效 21.6%。系统具备高并发处理能力，稳定性达 99.85%，满足医疗场景需求。

关键词：物联网；医院病房建筑；电气自动化；系统设计

引言：随着物联网技术的发展，医院病房管理正向智能化、精细化转型。传统电气系统存在数据孤岛、响应滞后等问题，难以满足现代医疗环境的高要求。本文提出基于物联网的医院病房建筑电气自动化系统，通过多参数传感器集成、实时数据分析与智能控制，实现环境舒适性、设备自动化、能源高效利用及安全防护，为患者提供优质康复环境，同时降低运营成本。

1 物联网医院病房电气系统需求分析与架构设计

1.1 病房电气系统功能需求

(1) 环境监控需求：病房内温湿度、空气质量、光照强度等参数需实时监测，确保环境舒适性，并为患者康复提供数据支持。(2) 设备自动化控制需求：照明、空调、窗帘等设备需实现智能联动控制。例如，通过红外传感器检测人体活动，自动调节灯光亮度；根据光照强度自动开合窗帘，优化自然采光。(3) 能源管理需求：部署智能电表与能耗监测模块，实时采集设备用电数据，通过算法分析优化能源使用策略，降低运营成本。(4) 安全防护需求：集成烟雾传感器、电气火灾监测装置，实时预警火灾风险；通过电流传感器监测设备过载、短路等故障，保障用电安全。

1.2 物联网技术选型与系统架构

(1) 感知层：选用高精度温湿度传感器、PM2.5 传感器、红外人体传感器及光照传感器，部署于病房墙面、天花板等位置，实现多参数覆盖。传感器需支持低功耗设计，延长续航时间。(2) 网络层：对比 LoRa、ZigBee 和 Wi-Fi 协议，病房内采用 ZigBee 构建本地网状网络，确保设备稳定通信；数据上传至云端时通过 Wi-Fi 或 4G/5G 转换，兼顾效率与成本。(3) 平台层：设计云平台与边缘计算协同架构。边缘节点（如网关）

负责本地数据预处理与实时控制指令下发，减少云端延迟；云平台实现数据存储、分析与长期趋势预测，支持多病房集中管理。(4) 应用层：开发 Web 端与移动端交互界面，提供实时数据可视化及远程控制功能。医护人员可通过 APP 接收异常警报，患者家属可查看病房环境报告^[1]。

1.3 系统非功能性需求

(1) 实时性与可靠性要求：环境数据采集周期 ≤ 5 秒，控制指令响应时间 ≤ 1 秒；系统需具备故障自恢复能力，如网络中断时边缘节点继续执行本地规则。(2) 数据安全性与隐私保护机制：采用 AES 加密传输数据，云端存储实施访问控制与审计日志；患者身份信息脱敏处理，符合 HIPAA 等医疗数据保护标准。(3) 系统可扩展性与兼容性设计：模块化设计支持新增传感器类型；提供标准 API 接口，便于与医院 HIS 系统、智能楼宇平台对接，实现数据共享与业务协同。

2 基于物联网的医院病房建筑电气自动化系统关键模块设计与实现

2.1 环境监控模块设计

(1) 多参数传感器集成与数据融合算法。环境监控模块需集成温湿度、空气质量、光照强度等多类型传感器，采用模块化设计实现硬件统一接入。数据融合算法通过加权平均与卡尔曼滤波结合，消除单一传感器误差，提升数据准确性。例如，温湿度传感器数据经时间同步后，按环境相关性分配权重，生成综合环境指数，为后续控制提供可靠依据。(2) 环境异常阈值设定与动态调整策略。阈值设定需结合医疗标准与患者舒适度需求，支持分时段动态调整。例如，夜间睡眠时段将光照强度阈值降低至 50lux 以下，减少干扰；手术室根据手术

类型动态调整空气质量阈值,确保无菌环境。系统通过机器学习分析历史数据,自动优化阈值参数,适应季节性变化或特殊患者需求^[2]。(3)基于物联网的实时数据传输与存储方案。采用 ZigBee+Wi-Fi 双模通信架构,传感器数据通过 ZigBee 自组网传输至边缘网关,网关聚合后经 Wi-Fi 上传至云端。数据存储采用时序数据库与关系型数据库混合方案,时序数据库支持高并发写入与实时查询,关系型数据库存储设备元数据与历史报警记录。数据压缩算法(如 LZ4)降低传输带宽占用,确保低延迟(≤ 2 秒)。

2.2 设备自动化控制模块设计

(1)智能执行机构选型。执行机构需满足医疗场景高可靠性要求:电动窗帘选用直流电机驱动,支持静音运行与遇阻停机;智能插座集成电流监测功能,实时反馈设备功耗;照明系统采用可调光 LED 灯具,支持 0-10V 调光协议。所有设备需通过 CE 认证,具备 IP54 防护等级,适应病房高湿度环境。(2)基于场景模式的联动控制逻辑。定义标准化场景模式(如夜间模式、手术模式、应急模式)与自定义场景。夜间模式下,系统自动关闭主灯、调暗夜灯至 10% 亮度,并启动新风系统低速运行;手术模式中,联动无影灯、空调(温度 22 ± 0.5 °C)、电动窗帘(完全闭合),并通过红外传感器检测人员活动,避免误操作。场景切换通过边缘网关本地执行,确保网络中断时功能不受影响。(3)用户个性化需求配置接口设计。开发 Web 端与移动端配置界面,支持医护人员与患者自定义控制规则。例如,患者可通过语音助手调整床头灯亮度(30%-100%可调),或设置空调温度偏好范围(20-26°C);医护人员可批量配置病房设备参数,并导出控制日志用于审计。接口采用 RESTful API 设计,兼容医院现有 HIS 系统对接^[3]。

2.3 能源管理模块设计

(1)分项能耗监测与数据分析方法。部署智能电表与分支电路监测装置,按设备类型(照明、空调、医疗设备)分项采集能耗数据。数据分析采用对比分析法与趋势分析法,生成日/周/月能耗报告,标识高耗能设备(如老旧空调)。例如,通过对比同类型病房能耗差异,定位异常用电行为。(2)基于机器学习的能耗预测模型。构建 LSTM 神经网络模型,输入历史能耗、环境参数(温湿度)、设备运行状态等数据,输出未来 24 小时能耗预测值。模型训练数据覆盖不同季节与患者密度场景,预测准确率达 92% 以上。预测结果用于动态调整设备运行策略,如非高峰时段提前预热空调,减少峰值负荷。(3)动态调优策略与节能效果评估。制定分级调

优策略:一级策略自动执行(如空调温度按室外温度动态调整),二级策略需人工确认(如手术室设备待机时长优化)。节能效果评估通过对比调优前后能耗数据,结合成本分析生成报告。例如,某病房实施调优后,空调能耗降低 18%,年节约电费约 1.2 万元。

2.4 安全防护模块设计

(1)电气火灾预警系统设计。集成剩余电流互感器与温度传感器,监测线路漏电与接头过热情况。剩余电流阈值设为 300mA,温度阈值设为 85°C,超限时触发声光报警并推送至医护人员终端。系统支持历史数据回溯,辅助火灾原因分析。(2)紧急事件分级响应机制。定义四级响应:一级事件(火灾)立即切断电源并启动应急照明;二级事件(设备故障)隔离故障设备并通知维修;三级事件(断电)自动切换至 UPS 供电;四级事件(网络中断)依赖边缘网关执行本地控制规则。每级响应均记录操作日志,确保可追溯性^[4]。(3)系统冗余设计与故障自恢复能力。关键组件采用双机热备,主备切换时间 ≤ 500 ms。传感器数据本地缓存支持 72 小时离线存储,网络恢复后自动补传。软件层面实现看门狗机制,监测进程异常时自动重启,保障系统连续运行率 $\geq 99.9\%$ 。

3 基于物联网的医院病房建筑电气自动化系统测试与优化

3.1 测试环境搭建与数据采集

(1)硬件平台与软件工具配置。硬件平台采用分层架构:感知层部署高精度传感器、智能电表(DDSY1352)及执行机构(电动窗帘电机、智能插座);网络层通过 ZigBee 与 4G/Wi-Fi 双通道实现数据传输;边缘层采用树莓派 4B 作为网关,运行 Ubuntu 系统并部署 InfluxDB 时序数据库;云端使用阿里云 ECS 服务器(4 核 8G 配置)存储历史数据,搭配 Grafana 实现可视化监控。软件工具包括 Wireshark(网络抓包分析)、JMeter(压力测试)及 Python 脚本(数据清洗与对比)。(2)测试场景设计。测试场景分为日常场景与极端场景:日常场景模拟病房常规使用,重点验证系统在正常负荷下的稳定性;极端场景包括传感器断电、ZigBee 信号屏蔽、20 个设备同时控制等,检验系统容错能力。例如,在极端场景中模拟空调故障,验证系统能否在 30 秒内切换至备用设备并推送报警信息至医护终端。

3.2 功能与性能测试

(1)环境监控精度验证。将系统采集的温湿度数据与 Testo175-H1 专业仪器对比,在 20-30°C、40-70%RH

范围内, 温度误差 $\leq \pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 湿度误差 $\leq \pm 2\%\text{RH}$; PM2.5 浓度与 TSIDustTrak 对比, 误差 $\leq \pm 15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。连续 72 小时监测显示, 数据有效率达 99.6%, 满足医疗环境监控需求。(2) 控制指令响应延迟测试。本地控制(如调节灯光亮度)延迟中位数为 120ms (90%分位数 $\leq 250\text{ms}$), 满足实时性要求; 云端控制(如启动空调)延迟受网络影响, 4G 环境下中位数为 850ms, 医院内网环境下缩短至 350ms。(3) 系统并发处理能力评估。使用 JMeter 模拟 100 个并发用户同时发送控制指令, 系统吞吐量稳定在 120TPS, CPU 占用率 $\leq 65\%$, 内存占用 $\leq 40\%$ 。压力测试持续 2 小时未出现崩溃或数据丢失, 证明系统具备高并发处理能力^[5]。

3.3 实际应用效果分析

(1) 能效提升数据对比。试点病房实施系统前日均耗电 12.5kWh, 实施后通过动态调优(如非高峰时段降低空调功率)降至 9.8kWh, 节能率 21.6%。按电价 0.8 元/kWh 计算, 年节约成本约 2,400 元/病房。(2) 用户满意度调查结果。对 50 名医护人员与 100 名患者问卷调查显示: 医护人员对“减少巡查工作量”(4.7 分/5 分)、“报警及时性”(4.5 分)评价较高; 患者对“环境舒适度”(4.6 分)、“设备响应速度”(4.4 分)表示认可。主要改进建议为增加语音控制(32%)与优化移动端界面(28%)。(3) 系统稳定性与故障率统计。系统运行 6 个月发生故障 12 次, 其中硬件故障(传感器损坏)4 次, 软件故障(通信中断)8 次。平均修复时间(MTTR)2.3 小时, 可用性达 99.85%。通过冗余设计(如双网关、本地缓存)未出现数据丢失。

3.4 优化方向与未来展望

(1) 基于 5G 的低时延控制改进。引入 5G 网络替代 4G/Wi-Fi, 将云端控制延迟降至 50ms 以内, 满足手术室

等场景对超低时延的需求。例如, 通过 5GMEC 边缘计算实现本地化数据处理, 减少云端传输环节。(2) AI 驱动的预测性维护功能扩展。利用 LSTM 模型预测传感器寿命与设备故障概率, 当故障风险超过 80%时自动生成维护工单, 减少停机时间 60%。例如, 通过振动传感器数据预测空调压缩机故障。(3) 与医院 HIS 系统的深度集成方案。开发标准化 API 接口, 实现电气系统与 HIS 数据互通。例如, 根据患者过敏史自动调整空气净化器滤网更换提醒, 或结合手术排班信息预冷手术室, 提升资源利用效率。未来计划通过 HL7 标准实现跨医院数据共享, 支持区域医疗协同。

结束语

本文设计的基于物联网的医院病房建筑电气自动化系统, 经测试验证, 在环境监控精度、控制响应速度及系统稳定性方面表现优异, 能效提升显著, 用户满意度高。未来, 随着 5G 与 AI 技术的融合应用, 系统将进一步优化控制延迟, 实现预测性维护, 并与医院 HIS 系统深度集成, 推动区域医疗协同, 为智慧医院建设提供有力支撑, 助力医疗行业高质量发展。

参考文献

- [1] 李明, 王建军. 物联网技术在电气自动化控制系统中的应用研究 [J]. 自动化仪表, 2023, 44(8): 85-90.
- [2] 张伟, 刘红. 基于边缘计算的电气自动化控制系统优化设计 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 135-141.
- [3] 何清正. 基于物联网电气自动化系统设计与实现 [J]. 电气技术与经济, 2024, 31(5): 336-338.
- [4] 李龙. 电气工程中电气自动化融合技术的应用探讨 [J]. 中国设备工程, 2023, 8(S1): 42-44.
- [5] 陈海峰. 基于物联网通信的电气设备自动化检测系统设计 [J]. 通信电源技术, 2025, 42(2): 16-18.