“双碳”目标下医院建筑智能化节能控制策略研究

吴磊

南昌大学第一附属医院，中国 ·江西 南昌 330209

摘要：医院是公共建筑中能耗强度最高的一类，空调系统全年不停机，新风量大，洁净区域的换气次数又有硬性规定，单位面积碳排放明显高于办公楼和商场。本文从医院的用能特征出发，指出节能潜力主要集中在冷热源、净化空调与新风负荷三个环节，提出由感知层、传输层、平台层与应用层构成的智能化控制架构，并逐项说明冷源群控与模型预测控制、末端需求化通风、净化区分级值班运行、照明与遮阳联动、三级计量与能碳核算、需求响应与光储协同的实现方式。算例仿真表明，上述策略组合后建筑全年总能耗下降约 13.8%，冷源与净化风机的贡献最大。本文的算例尚未经过实测验证，这是后续需要补上的工作。

关键词：双碳目标；医院建筑；建筑智能化；节能控制；模型预测控制；能源管理系统

Research on Intelligent Energy-Saving Control Strategies for Hospital Buildings Under the "Dual Carbon" Goals

Wu Lei

The First Affiliated Hospital of Nanchang University, China Jiangxi Nanchang 330209

Abstract: Hospitals are among the most energy-intensive types of public buildings, with air conditioning systems operating year-round, high fresh air volumes, and strict regulations on air exchange rates in clean areas, resulting in significantly higher carbon emissions per unit area compared to office buildings and shopping malls. This paper begins with the energy consumption characteristics of hospitals, identifying the primary energy-saving potential in three key areas: thermal energy sources, purification air conditioning, and fresh air loads. It proposes an intelligent control architecture consisting of a perception layer, transmission layer, platform layer, and application layer, detailing the implementation methods for chilled water group control with model predictive control, demand-based ventilation at the terminal level, hierarchical duty operation in purification zones, lighting and shading coordination, three-tier metering and energy-carbon accounting, demand response, and photovoltaic-storage synergy. Simulation results demonstrate that the combined strategies reduce the building's annual total energy consumption by approximately 13.8%, with the greatest contributions from chilled water systems and purification fans. The case study in this paper has not yet been validated through field measurements, which remains a task for future research.

Keywords: Dual carbon target; Hospital buildings; Building intelligence; Energy saving control; Model predictive control; Energy management system

0 引言

建筑运行阶段的碳排放占全国总量两成左右，医院在这块里分量不轻。医院和办公楼不一样：空调、净化、消毒和医技设备几乎全年无休，室内温湿度和洁净度还受规范约束，靠调高温度设定值省电这条路基本走不通。已有统计显示，三甲医院单位面积年能耗多在 90~160 kWh/m^2 区间，是普通公共建筑的 1.5~2 倍。

实际运行水平却配不上这个关注度。不少医院的楼宇自控系统建成后就停在监视层面，控制回路常年手动；冷源参数由运行人员凭经验设定，冬夏各调一次，年内基本不动；能耗计量大多只做到变电所出线回路，分不到科室和设备。设备换了高效机型，电费没怎么降，这种情况我见过不止一次。

传感器成本下降、边缘计算普及、负荷可以被提前预测，这几件事凑在一起，才让动态优化有了工程条件。本文讨论的就是这些手段如何在医院的约束下组织成一套能长期运行的控制体系。讨论范围限定在技术实现，政策机制和管理考核只作背景交代。

1 医院用能特征与节能潜力

1.1 全年连续运行的负荷

医院没有寒暑假，也没有明显的季节性停运期。住院部、急诊、ICU、洁净手术室和医技科室需要 24 小时供冷供热、送新风并维持压差梯度。冬季内区房间因设备散热和人员密集，往往仍需供冷，冷热抵消在过渡季尤其明显，这部分浪费在既有建筑中很常见。

1.2 新风与湿负荷

院感控制要求决定了新风量下不来。病房、门诊和洁净区域的换气次数取值远高于常规公建，新风负荷可占空调总负荷的 30%~45%。候诊大厅和消毒清洗区产湿量大，常规一次回风系统普遍采用冷却除湿后再加热的方式，再热能耗相当可观。这是医院空调区别于普通公建最本质的地方，也决定了照搬办公建筑的节能套路会失效。

1.3 分项能耗结构

典型综合医院中，暖通空调占 45%~55%，其中冷源又占空调能耗的六成以上；照明与插座占 20%~30%；医疗专项设备占 10%~20%；生活热水与蒸汽消毒占 5%~10%。冷源与净化空调是主攻方向，照明和插座回路属于投入小、见效快的补充项。

1.4 既有系统的问题

（1）控制策略固化。冷冻水供水温度、二次泵压差设定值、新风比等参数常年为固定值。

（2）信息孤岛。楼控、消防、手术排程与计量系统互不联通，净化区域无法按实际使用情况调节。

（3）计量颗粒度粗。多数只到楼层或变电所回路，支撑不了科室级考核，也定位不了故障设备。

（4）缺少闭环验证。改造前后的节能量没有统一测量方法，收益说不清，改造方和使用方各执一词。

2 智能化节能控制架构

架构分四层：感知层、传输层、平台层、应用层。

感知层要同时解决“看得见”和“调得动”。温湿度、CO_2 浓度、压差、风量、冷热量与电能质量测点是基础配置，执行侧除了 DDC 控制器和电动调节阀，变频驱动装置的反馈信号必须回采，否则优化结果无法验证。净化区域的压差测点建议冗余布置，单点故障直接导致控制策略退出。

传输层用 BACnet/IP 与 Modbus TCP 承载楼控主干，时序数据经 MQTT 上送至本地数据中心或云端。边缘网关负责协议解析、数据清洗和本地闭环，控制回路的运算放在网关侧而不是云端，网络中断时本地策略照常执行。无线覆盖困难的管井和改造现场可辅以 LoRa 回传。采样周期按 1~5 min 即可，不建议盲目提高频率，数据量翻倍而信息量增加有限。

平台层最容易做虚。真正必要的三件事：点位标准化命名（可采用 Project Haystack 或 Brick Schema 语义模型，避免每接一个新系统就重新对点）、数据质量诊断与缺失值补全、能耗基线模型。设备数字孪生可以按需要建，但它不是节能的前提，没有它也能跑群控。算法组件以 API 方式向应用层提供负荷预测、群控寻优和故障诊断能力。

应用层包括能源管理系统、冷站群控优化器、末端需求化通风控制器、能碳核算看板与需求响应调度模块。需要提醒的是，应用层的界面做得再漂亮，如果优化结果不自动下发，运行人员两三个月后就会关掉它。自动执行是这套体系能不能活下去的关键。

3 关键节能控制策略

3.1 冷源群控与模型预测控制

冷源是医院能耗的核心。传统做法按经验设定冷冻水供水温度（常取 7℃）和开机台数，偏离最优工况。具体优化如下：

（1）逐时冷负荷预测。以室外干球温度、相对湿度、太阳辐射强度、门诊预约量、在院人数和历史负荷序列为输入特征，用 LSTM 或梯度提升树建立未来 24 小时逐时冷负荷预测模型。工程上把预测误差控制在 10% 以内就够用，再往下抠准确率对节能的贡献有限。

（2）冷冻水供水温度重置。依据最不利末端阀门开度反馈动态调整：最大开度超过 95% 时下调水温，低于 85% 时上调。供水温度每提高 1℃，冷水机组 COP 提升约 2%~4%，同时降低机组在低负荷率下的喘振与频繁启停风险。

（3）冷却水侧协同。冷却塔出水温度设定值取湿球温度加逼近度，逼近度在 2~4 K 范围内寻优。这里的目标函数是“主机 + 冷却塔 + 水泵”三者的总功率最小，不是主机效率最高，两者常常冲突。

（4）一次泵变流量与二次泵压差重置。一次泵随冷机台数联锁变流量，二次泵依据最不利环路末端阀门开度动态重置供回水压差设定值，消除定压差运行造成的阀门节流损失。

（5）台数寻优与模型预测控制。先建立冷水机组 COP—负荷率特性曲线库，用整数规划求解最优台数组合与加载率分配；再以 MPC 框架滚动优化：

$$\min J = \Sigma_{(k=1 \rightarrow Np)} [P_ch(k) + P_pump(k) + P_tower(k)] \cdot \Delta t$$

约束条件包括室内温湿度上下限、机组负荷率区间（一般取 0.3~1.0）与加减机最小间隔时间。最后一条约束容易被忽略，频繁加减机省下的电量抵不上设备寿命损失。

3.2 末端需求化通风与温湿解耦

（1）需求化通风。门诊大厅、候诊区、报告厅等人员密度波动大的区域，按实时 CO_2 浓度（阈值取 800~1000 ppm）与视频或红外人流统计调节新风阀开度和送风量，可降低新风负荷 20%~35%。

（2）送风温度与静压重置。VAV 系统采用 ASHRAE Guideline 36 推荐的高性能控制序列，实施送风温度重置与静压重置，并引入末端再热阀开度最小化逻辑，消除冷热抵消。

（3）温湿分控。用 16~18℃高温冷水承担显热，独立新风除湿机组承担湿负荷，避免过冷后再热；新风湿负荷较高时启用转轮或板式热回收装置，效率可达 60%~70%。

3.3 净化区域的分级动态运行

洁净手术室、ICU、血液病房常年定风量运行，是医院能耗的“黑洞”，但这里的节能空间恰恰最难动，因为涉及院感责任。可行的做法是分级加联动：

（1）模式分级。将净化空调划分为手术运行模式（高换气次数、建立正压梯度）、准备与恢复模式（中等换气次数）、值班模式（低换气次数、维持最小压差）三档，通过风量—压差串级控制平滑切换。

（2）排程联动。对接 HIS 手术排程与门禁、人员存在感知，按自净时间反算最优提前启动时刻，避免过早开启；手术结束后自动转入值班模式。非手术时段风机频率可下降 30%~50%。

（3）压差硬约束。所有优化必须在满足 GB 50333 规定的压差梯度与最小换气次数下执行，控制逻辑中设压差超限强制提频。这条约束不接受人工旁路，一旦可旁路，迟早会被旁路掉。

3.4 照明、遮阳与插座回路

采用 DALI 或 KNX 总线实现恒照度调光、日光感应和分时分区控制，公共区域照度按功能时段设定；外遮阳与电动幕墙依据太阳方位角、室外照度和室内眩光反馈联动，削减夏季辐射得热；办公插座和医用非关键插座回路定时切断，消除夜间待机功率。手术室、ICU、抢救室的无影灯和一般照明不纳入感应控制，医疗工艺优先。

3.5 三级计量与能碳核算

建立“科室—楼层—重点设备”三级计量体系，冷热源机房、净化机组、大型医技设备独立计量。基线模型用多元回归：$E = a \cdot HDD + b \cdot CDD + c \cdot$ 门诊量 $+ d$，实际值偏离基线超过 10% 时触发告警。电、水、气、冷热量按统一口径折算为二氧化碳当量，排放因子取主管部门最新公布的全国电网平均值，逐年更新，否则不同年份的减碳量没法横向比较。

3.6 需求响应与光储协同

在峰谷电价和需求响应机制下，EMS 依据电价信号与次日负荷预测，安排蓄冷罐的充放冷时段和储能系统的充放电计划，柔性负荷按预设优先级参与调节：先调非医疗区域的温度设定值，再调蓄冷，最后才考虑降照度。屋面光伏按“自发自用、余电上网”与储能协同，提升就地消纳比例。

4 仿真算例

算例对象为某三甲综合医院门诊医技楼，建筑面积约 12 万 m^2，冷源为 3 台 1200RT 离心式冷水机组加 1 台 600RT 螺杆机组，末端涵盖全空气定风量净化机组、风机盘管加新风系统及 VAV 系统。用 EnergyPlus 建模，以实测运行数据标定后，对基准工况（现有定值运行）与优化工况（本文策略集）做全年逐时对比。

结果如下：空调冷源能耗下降约 19.6%，其中冷冻水供水温度优化贡献 7.2%，台数寻优与冷却水侧协同贡献 8.4%，水泵变频与压差重置贡献 4.0%；末端需求化通风与温湿解耦使空调末端能耗下降 14.3%；净化区域分级值班运行使对应区域全年风机电耗下降 31.7%；照明调光与感应控制使照明能耗下降 35.2%。综合后建筑全年总能耗下降 13.8%，按全国电网平均排放因子约 0.57 $kgCO_2/kWh$ 估算，年减排二氧化碳约 1100 吨，静态投资回收期约 3.6 年。

净化风机的 31.7% 是各项里最高的，这也说明一个常被忽略的事实：在很多医院，最大的节能空间不在冷机，而在那些没人敢动的净化机组上。

需要说明的是，上述算例是本文设定的仿真情景。实际效果受气候区、使用强度、运维水平和初始系统状态影响很大，工程实施前应以现场实测数据重新标定模型，并按 IPMVP 相关选项开展节能量核定。

5 工程落地中的几个问题

数据质量。既有建筑的传感器漂移、点位缺失和时序错位是常态，冷热量表尤其容易失准。策略上线前应先做一轮数据体检，优先补齐关键回路计量，而不是一次性铺满测点。

安全边界。节能策略必须嵌套在医疗工艺约束之内。

实践中采用“安全规则层 + 优化层”的双层结构：安全规则层负责压差、换气次数、温湿度的硬约束，优化层只在规则层划定的可行域内寻优。

系统集成。建议以 OPC UA 或 BACnet/SC 实现跨系统语义级互联。点对点私有协议集成短期内省事，三年后新增子系统时会变成维护负担。

运维适配。策略长期有效的前提是运维团队看得懂、敢干预。需要同步建设故障知识库和培训体系，否则系统上线半年后会被切回手动模式，回到原点。

6 结语

医院的能耗高在功能连续性和洁净工艺要求上，节能潜力集中在冷热源、净化空调和新风负荷三处，其中净化机组的空间最常被低估。

以四层架构为支撑，把负荷预测、模型预测控制、需求化通风和分级值班运行组合起来，可以在不触碰医疗工艺底线的前提下拿到 12%~15% 的整体节能率，冷源群控和净化风机分级运行的贡献最大。

本文的不足在于算例为仿真结果，缺少实测数据的闭环验证，不同气候区和不同规模医院的适用性也有待检验。后续工作将围绕实测验证与策略参数的自适应整定展开。

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准：GB 50189—2015[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 综合医院建筑设计规范：GB 51039—2014[S]. 北京：中国计划出版社，2014.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 医院洁净手术部建筑技术规范：GB 50333—2013[S]. 北京：中国计划出版社，2013.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿色医院建筑评价标准：GB/T 51153—2015[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准：GB/T 51366—2019[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.

作者简介：吴磊（1987.05-），男，汉族，江西省抚州市人，硕士研究生，工程师，研究方向：从事医院基本建设和设备技术管理工作研究。