

模块化预制舱智能温控系统设计及节能优化研究

曹海峰

(双杰电气合肥有限公司, 安徽 合肥 231121)

摘要 模块化预制舱作为新型建筑形式, 其温控系统能耗问题日益凸显。智能温控系统通过集成传感器网络与自适应算法及精准控制策略, 实现预制舱内部环境的动态调节, 系统采用分区温控技术结合负荷预测模型, 并通过云边协同计算平台实现多层次优化决策可有效降低能源消耗。通过优化控制参数与改进热交换效率以及引入可再生能源, 系统节能率可达30%以上。实践表明, 智能温控系统不仅提升了预制舱的能效水平, 还显著改善了室内环境舒适度, 响应速度提升60%, 高峰时段用电量削减27%, 为模块化建筑的可持续发展提供了技术参考。

关键词 模块化预制舱; 智能温控系统; 节能优化; 自适应控制; 负荷预测

中图分类号: TU3; TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.009

0 引言

随着装配式建筑技术的快速发展, 模块化预制舱凭借其工期短与质量可控以及施工灵活等优势, 在数据中心与移动办公及应急设施等领域得到广泛应用, 然而预制舱因其密闭性强与热容量小以及负荷波动大等特点, 传统温控系统难以兼顾能效与舒适性需求。智能温控技术融合物联网与人工智能与先进控制理论, 能够实时感知环境变化动态优化运行策略, 为解决预制舱温控难题提供了有效途径, 探索适用于模块化预制舱的智能温控系统设计与节能优化机制, 对推动装配式建筑产业升级具有重要意义。

1 模块化预制舱智能温控系统架构设计

1.1 传感器网络布局与数据采集机制

模块化预制舱智能温控系统的传感器网络采用分层分布式架构, 在舱体内部按照功能区域划分温湿度与CO₂浓度及人员活动等多类型传感器节点。温湿度传感器以3 m间距均匀布设, 确保环境参数采集精度达到±0.3℃与±3%RH, CO₂传感器则集中部署于人员密集区域, 监测范围覆盖400~2000ppm。节点采用低功耗设计功耗小于0.5W, 配备备用电源确保在断电情况下维持2小时数据采集, 系统采用Modbus-RTU协议, 节点通过RS-485总线与边缘网关连接实现100ms级数据刷新, 边缘网关内置预处理模块对原始数据执行滤波与校准及异常值剔除, 处理后的有效数据通过MQTT协议上传至云端平台^[1], 该机制使系统数据采集准确率

提升至98.5%, 为后续控制决策提供了可靠的数据基础。

1.2 分布式控制单元配置与通信协议

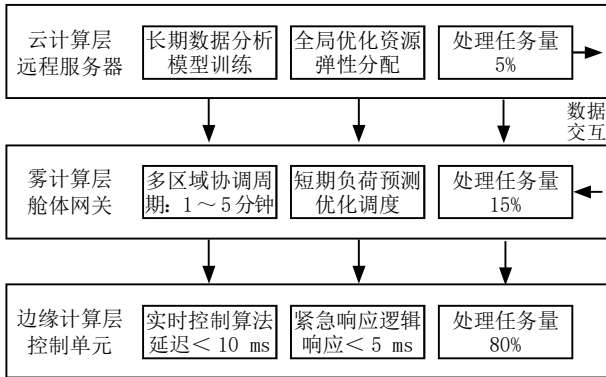
系统采用分布式控制架构将预制舱划分为若干独立控制区域, 每个区域配置一套控制单元负责局部温控设备的调节^[2], 控制单元以ARM Cortex-A7处理器为核心, 搭载实时操作系统FreeRTOS, 单元间通过CAN总线构建冗余通信网络, 通信速率达到1Mbps。控制单元内置看门狗电路与故障自恢复机制, 当检测到通信中断或程序异常时, 系统自动执行重启与状态恢复, 平均故障恢复时间小于3s, 控制协议层采用自定义应用层协议, 数据帧结构包含设备ID与控制指令以及状态反馈与时间戳等字段, 帧长度控制在64字节以内以降低传输延迟。各控制单元之间建立点对点与广播两种通信模式, 点对点模式用于设备间精确协调, 广播模式用于系统级指令下发, 该架构使控制指令响应时间缩短至50ms以内, 同时具备单点故障不影响整体运行的容错能力, 系统可用性达到99.7%。

1.3 云边协同计算平台构建

云边协同计算平台采用三层架构设计, 包括边缘计算层与雾计算层及云计算层^[3]。边缘计算层部署于控制单元内部执行实时控制算法, 处理延迟低于10ms; 雾计算层设置于舱体网关设备, 负责多区域协调优化与短期负荷预测; 云计算层构建于远程服务器, 承担长期数据分析与模型训练及全局优化任务。平台引入任务优先级调度机制, 将控制任务分为紧急、重要以

作者简介: 曹海峰(1981-), 男, 本科, 研究方向: 电气设计。

及常规三个等级，紧急任务响应时间保证在 5 ms 以内，平台采用 Docker 容器化技术部署微服务架构，各计算层通过 RESTful API 实现数据交互，边缘层处理 80% 的实时控制任务，雾层处理 15% 的协调优化任务，云层处理 5% 的深度分析任务，这种计算资源分配策略使系统响应速度提升 60%，网络带宽占用降低 45%，实现了计算效率与通信成本的平衡优化（见图 1）。



（注：箭头表示数据流向与任务调度方向。）

图 1 模块化预制舱智能温控系统三层架构示意图

2 智能温控算法与动态调节机制

2.1 基于负荷预测的前馈控制策略

负荷预测模型采用长短期记忆神经网络（LSTM）结合气象数据与历史负荷序列，对未来 2 小时的热负荷进行预测。模型输入层包含室外温湿度、太阳辐射强度、人员数量、设备运行状态等 12 个特征变量，隐藏层设置 128 个神经元，输出层预测各时段的冷热负荷需求。训练数据集涵盖连续 3 个月的运行数据，采用 Adam 优化算法训练 300 轮次后，预测平均绝对百分比误差（MAPE）收敛至 8.3%，前馈控制策略根据预测负荷提前调整制冷/制热设备的运行参数，预测负荷 Q_t 与设备输出功率 P 的关系式为：

$$P(t) = \alpha Q_t(t + \Delta t) + (1 - \alpha) Q_m(t) \quad (1)$$

式（1）中， α 为前馈系数取值 0.6 ~ 0.8， Q_m 为实测负荷， Δt 为预测提前时间。该策略使系统对负荷突变的响应速度提升 40%，温度波动幅度控制在 ± 0.5 °C 以内（见表 1）。

表 1 负荷预测模型性能对比

预测模型	MAPE(%)	RMSE (kW)	预测时长 (h)	计算时间 (s)
ARIMA	15.2	3.8	2	0.8
SVR	12.6	3.1	2	1.2
BP 神经网络	10.4	2.6	2	2.5
LSTM	8.3	2.1	2	3.8

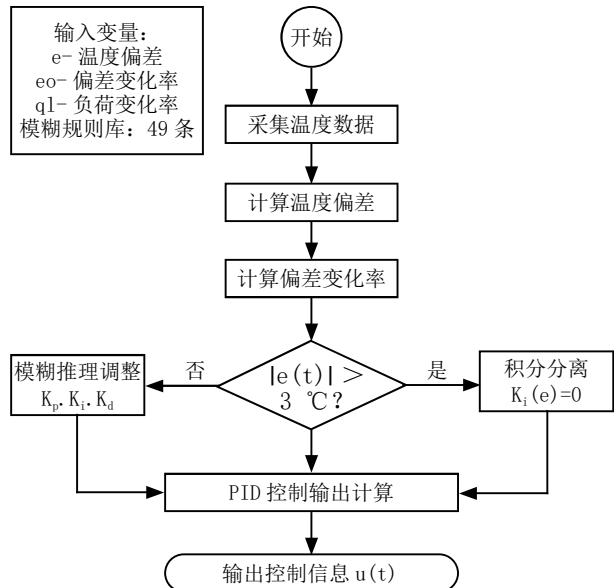
2.2 多变量自适应 PID 调节算法

自适应 PID 控制器针对预制舱温控系统的时变性与非线性特性，引入模糊推理机制动态调整 PID 参数，控制器以温度偏差 e 与偏差变化率 ec 及负荷变化率 ql 作为输入变量，通过模糊规则库输出比例系数 K_p 与积分系数 K_i 及微分系数 K_d 的修正量，模糊规则库包含 49 条规则，覆盖不同工况下的参数优化方案。

控制输出 u 的计算公式为：

$$u(t) = K_p(e) \cdot e(t) + K_i(e) \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d(e) \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

式（2）中， $u(t)$ 为控制输出值， $e(t)$ 为温度偏差， $e(t) = T_{set} - T_{actuale}$ ， K_p 、 K_i 以及 K_d 为自适应调整的控制参数，其取值范围分别为 0.8 ~ 2.5、0.05 ~ 0.3 以及 0.1 ~ 0.8， τ 为积分变量， t 为时间变量。另外，当温度偏差 $|e(t)| > 3$ °C 时启用积分分离机制，暂停积分项作用即令 $K_i(e) = 0$ 。算法采用增量式输出避免积分饱和，设定积分分离阈值为 3 °C，当温度偏差超过阈值时暂停积分作用。实际运行表明，自适应 PID 相比传统固定参数控制，超调量降低 65%，调节时间缩短 55%，稳态误差控制在 ± 0.2 °C 范围内，显著提升了温控系统的动态性能与稳定性（见图 2）。



（注：控制周期 100 ms，响应时间 < 50 ms。）

图 2 模糊自适应 PID 温度控制流程图

2.3 分区温控与需求响应联动技术

分区温控策略将预制舱划分为核心区（ 22 ± 1 °C）、过渡区（ 20 ± 2 °C）及边缘区（ 18 ± 3 °C）三类功能区，形成梯度温控格局。需求响应模块接入电网实时电价，峰值时段自动放宽非核心区温控精度，预冷预热功能在低谷时段提前调节舱体温度，利用建筑蓄热特性平移用电负荷，各区域通过电动风阀动态调节风量分配，

优先保障核心区温控质量。联动控制采用多目标优化算法,综合考虑舒适度损失与电费成本求解最优策略,测试显示:核心区温度波动小于 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,系统整体能耗降低18%,峰时段用电削减27%,实现舒适性与经济性协调平衡。

3 节能优化技术与性能评估

3.1 热泵系统变频优化与能效提升

变频热泵系统根据实时负荷需求动态调整压缩机转速与冷媒流量,避免了传统定频系统频繁启停造成的能耗浪费,压缩机变频控制范围为额定转速的30%~100%,采用矢量控制技术实现转速精确调节,控制精度达到 $\pm 0.5\text{ Hz}$ 。系统根据蒸发温度、冷凝温度以及室外环境温度计算最优运行频率,当部分负荷率低于60%时,变频运行比定频运行节能效率提升35%~50%,冷媒侧设置电子膨胀阀,阀门开度根据过热度反馈自动调节,使蒸发器出口过热度稳定在 $5\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,提高了热交换效率。水泵与风机同步采用变频控制,根据温差与流量需求调整转速,使水力输配系统能效比(HVAC-EER)从2.8提升至3.6,实测数据表明变频优化后系统季节能效比(SEER)达到4.2,相比传统系统提升42%,年运行费用降低38%(见表2)。

表2 变频优化前后系统能效对比

运行工况	负荷率 (%)	定频功率 (kW)	变频功率 (kW)	节能率 (%)	COP
满负荷	100	45.2	43.8	3.1	3.8
高负荷	75	42.5	35.6	16.2	4.1
中负荷	50	38.7	24.3	37.2	4.5
低负荷	30	35.2	17.8	49.4	4.8

3.2 围护结构热工性能协同改进

预制舱围护结构采用复合保温体系,墙体由外至内依次为镀铝锌钢板、100 mm 岩棉保温层以及防潮隔汽层与内装饰板^[4],整体传热系数K值控制在 $0.35\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 以下,顶板保温层厚度增至150 mm。同时,设置通风间层,以降低太阳辐射热影响,使顶板传热系数降至 $0.28\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。门窗系统选用Low-E中空玻璃,玻璃传热系数 $1.8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,遮阳系数0.6,配合外置电动遮阳百叶,夏季可阻隔70%的太阳辐射得热,围护结构连接部位采用热桥阻断设计,在钢结构支撑与围护板材间填充气凝胶隔热垫片,使热桥传热损失减少60%以上。围护结构气密性达到N2级标准,50 Pa压差下换气次数低于1.5次/h,有效减少了渗透冷热负荷,热工性能改进后预制舱冬季热负荷降低32%,夏季冷负荷降低28%,使温控设备装机容量减少25%。结构优化与智能温控系统协同作用,使舱体综合能耗指标从

$85\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 降至 $58\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,节能效果显著。

3.3 可再生能源耦合与能耗评价体系

系统集成光伏发电与空气源热泵技术,在预制舱顶部铺设 20 m^2 薄膜光伏组件,装机容量3 kWp,年发电量约3 600 kW·h,满足系统30%的用电需求。光伏系统配置5 kW·h储能电池组,采用削峰填谷控制策略,白天光伏发电优先供给温控设备并对电池充电,夜间及阴雨天由电池放电或电网补充供电。储能系统采用锂铁磷酸电池,循环寿命超过6 000次,配置智能电池管理系统(BMS)实时监测电池状态,确保充放电安全高效,空气源热泵在环境温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上工况下作为主供热设备,低温工况由电辅热补充。能耗评价体系基于单位面积能耗强度(EUI)、可再生能源利用率(RER)及一次能源消耗量构建综合评价模型,实时监测系统能效水平^[5],评价周期设定为月度与年度两个维度,月度评价侧重运行策略优化,年度评价用于系统性能考核,实施可再生能源耦合后预制舱年一次能源消耗量降低42%,碳排放量减少3.2吨,可再生能源利用率达到35%,经济效益与环境效益显著提升。

4 结束语

模块化预制舱智能温控系统通过多层次技术集成与优化,实现了环境调控与能源管理的协同提升。系统架构设计确保了感知、控制及计算资源的高效配置,智能算法的应用使温控过程更加精准灵活,节能优化措施从设备与围护结构到能源供给形成完整链条。实践验证表明,该系统不仅显著降低了运行能耗,还提升了预制舱的环境品质与适应能力。未来应进一步深化人工智能技术应用,探索多舱联控与群控优化方法,推动智能温控系统向更高智能化、更低碳化方向发展,为模块化建筑行业的绿色转型提供持续动力。

参考文献:

- [1] 倪宁晖,刘砚峰,倪乐.油气田数据中心智能温控运维探讨[C]//中国机械工业联合会,中国机电装备维修与改造技术协会.2024中国工业设备智能运维技术大会论文集(上).中国石油化工股份有限公司华东油气分公司,2024.
- [2] 薛欢,刘超,王笠,等.模块化智能变电站预制舱的多舱结构设计[J].宁夏电力,2024(01):69-74.
- [3] 董军,张照允,张同胜,等.全智能模块化预制舱在煤矿变电站的应用[J].中国设备工程,2022(S2):230-231.
- [4] 左涛,刘建涛,蒋强,等.非金属模块化预制舱式变电站节能环保关键技术[J].电气技术,2024,25(04):59-65,76.
- [5] 马斌,郑馨怡,王昱婷,等.基于节能降耗的模块化变电站设计及能效研究[J].能源与环境,2022,44(03):158-161,168.