

模糊自适应控制在楼宇暖通空调系统中的应用

张晶

内蒙古工大建筑设计有限责任公司，内蒙古呼和浩特，010000；

摘要:模糊自适应控制在楼宇暖通空调（HVAC）系统中的应用，主要通过融合模糊逻辑与自适应机制，解决传统控制方法难以应对的系统非线性、时变性和不确定性等问题，实现精准温湿度调节与能效优化。模糊控制层：将专家经验转化为“IF-THEN”模糊规则（如“若室温偏高，则增大冷量输出”），处理传感器数据的不精确性。自适应层：在线调整模糊规则权重或PID参数（如比例系数、积分时间），动态响应负荷变化与外部扰动（如人员流动、气象突变）。

关键词:模糊自适应控制；楼宇暖通空调系统中；应用

DOI: 10.69979/3029-2727.25.09.035

模糊自适应控制通过智能化决策与动态参数调整，显著提升了HVAC系统在复杂环境下的稳定性与能效比，是推进建筑节能的关键技术路径。

1 模糊自适应控制定义

1.1 基本定义

控制框架，模糊自适应控制结合模糊控制与自适应控制的双重特性：通过模糊逻辑处理系统的不精确性和非线性，将专家经验转化为“IF-THEN”规则进行推理；引入自适应机制，实时调整控制器参数或规则权重以适应系统动态变化（如时变性、外部扰动）。数学模型依赖性，不依赖被控对象的精确数学模型，仅需在线检测实际输出与期望输出的偏差，即可实现复杂工业过程（如时滞系统、非线性系统）的稳定控制。

1.2 核心特征

动态自适应性，控制器通过自适应律实时学习被控对象的动态特性（如负荷突变、环境扰动），自动更新模糊规则或参数，保持控制鲁棒性。关键技术实现。模糊推理过程：将输入变量（如偏差）模糊化为语言变量（如“正大”“负小”），经规则库推理后解模糊输出精确控制量；参数在线调整：如模糊自适应PID控制器，通过模糊矩阵表实时修正参数，响应系统状态变化。

2 模糊逻辑与自适应控制如何结合

2.1 框架融合的核心原理，模糊逻辑的角色处理系统非线性与不确定性

将精确输入模糊化为语言变量（如“正大”“负小”），基于专家经验构建模糊规则库，通过模糊推理生成参数调整建议，输出模糊控制量。自适应机制的引入，实时

动态调整控制参数：根据系统反馈（如输出偏差），利用自适应律在线修正模糊规则权重或PID参数，自适应目标：抑制外部扰动（如负载突变）、补偿模型时变性。

2.2 关键技术结合路径

参数自适应调整（主流应用），模糊自适应PID控制：优势：解决固定参数PID在非线性系统中的僵化问题。隶属函数自适应：依据历史数据优化隶属函数形状，提升模糊划分精度。结构自适应优化，规则库自学习：结合神经网络或聚类算法，从输入输出数据中自动生成/优化模糊规则。示例：利用Lyapunov稳定性理论在线更新规则权重。评价因子动态调整：在路径规划等场景，通过模糊控制自适应分配权重因子（如避障 vs. 路径平滑）。混合智能控制架构，模糊神经混合系统（FNHS）：模糊逻辑处理规则推理，神经网络提供学习能力，实现控制器参数与结构的协同优化。应用：机械臂控制中融合模糊规则与神经网络自适应律，提升抗扰性。

2.3 结合后的核心优势

克服传统控制局限：无需被控对象精确数学模型，适应强非线性/时变系统。动态鲁棒性提升：实测对比：突加扰动时恢复速度提升50%，暂态响应缩短30%。多目标协同优化：同步优化控制精度（如温湿度收敛）与能效（如空调系统节能20%）。

3 楼宇暖通空调系统特点

3.1 系统架构复杂性与集成化

多系统耦合设计，冷热源系统（如离心式/螺杆式冷水机组、地源热泵）与末端装置（风机盘管、空气处理机组）深度耦合，通过冷冻水或冷媒循环实现能量传

递。典型供回水温度为 7℃/12℃，能效比（COP）可达 5.8 以上，适用于超高层建筑（>3 万 m²）。灵活分区调控，支持按楼层/区域独立控制，如 VRV 系统单模块覆盖 8-64HP，满足租户分层计量需求；人员密集区（如会议室）通过 CO₂ 传感器联动新风阀，动态调整换气量（≥30m³/h）。

3.2 能效优化为核心目标

节能技术集成，采用冰蓄冷、相变储热材料（余热回收率 82%）、磁悬浮离心机组（能效比 6.8）降低能耗；区域供冷系统（如前海 CBD）较分散式空调节能 30%，年减碳 3.6 万吨。动态负荷匹配，基于负荷预测（如 LSTM 模型）启停冗余机组，负荷率<30%时关闭冗余设备可降耗 15%-20%；过渡季切换全新风模式利用自然冷源，节能率 25%-30%。

3.3 智能化与自适应控制

全域感知网络，部署温湿度、CO₂、光照及人体存在传感器，实时监测 3 万+数据点（如上海中心大厦）；通过模糊自适应算法动态优化 PID 参数，响应负荷突变时波动次数减少 50%。多系统协同，与 BA 系统联动：无人区域自动进入节能模式，维持基础通风；安防数据驱动：人员密度<20%时，风机转速降至 70%节能 15%。

3.4 环境舒适性精准保障

微气候控制，高大空间采用垂直射流送风（速度 10-20m/s），消除温度分层，温控精度±1℃；个性化送风技术（如清华研发的红外感应装置）形成直径 80cm 微气候圈，降低整体负荷 60%。健康环境构建，H13 级纳米纤维滤网对 0.3 μm 颗粒物截留率 99.97%，湿度波动控制±5%（抑制霉菌滋生）；溶液除湿技术拆分制冷除湿能耗，提升空气品质。

4 楼宇暖通空调系统复杂性

4.1 物理结构复杂性

多系统深度耦合，冷热源（离心机组/地源热泵）、输配管网（冷冻水回路）与末端设备（风机盘管）需精密协同，管网渗漏等微小故障（如地下管道隐蔽点泄漏）可导致全系统循环失效，需多部门协作排查修复。高层建筑中水系统静压超常（>1.0MPa），管道耐压设计不足易引发垂向水力失调，影响外网稳定性。空间约束与集成冲突，设备层空间局促（如地下室锅炉房），管线交叉标高冲突频发，后期维修需大规模移动作业面；大空间建筑（体育馆/剧院）需分区设计独立热源，冷负

荷差异显著（舞台灯光热负荷>观众区新风负荷），送风方式需定制化（如垂直射流防温度分层）。

4.2 动态调控复杂性

强非线性时变特性，负荷瞬时突变：会议室人员骤增致 CO₂ 浓度飙升，需新风阀秒级响应（换气量≥30m³/h），延迟调控将引发舒适度投诉；外部干扰耦合：火锅店排烟气流与新风对冲，需动态调整导流板角度与风机增压参数以平衡气流组织。多目标冲突优化，能效与舒适性博弈：夜间无人区降频运行节能>15%，但需维持基础通风防霉菌（湿度波动±5%）；区域差异化需求：数据中心需 7×24 小时恒温恒湿（±0.5℃），而办公区允许间歇运行，控制策略需分层设计。

4.3 实施与运维复杂性

隐蔽工程调试难，管网气囊未排尽（施工配合失当）致水循环阻塞，冷水系统流量损失>20%；保温层脱离管壁引发冷凝水泛滥（结露滴水），维修需破坏吊顶结构。智能系统协同挑战，多源数据融合：需整合 3 万+监测点（温湿度/CO₂/光照）实现 BA 系统联动，传感器失效将导致控制失准；网络安全风险：IoT 设备接入增加攻击面（如勒索病毒锁定温控器），需零信任框架保障系统韧性。

4.4 楼宇暖通空调系统能耗高节能需求

能耗核心痛点，设备低效运行，冷水机组在低负荷率（<30%）时仍全功率运行，能耗浪费 15%-20%；定流量水泵无法匹配动态负荷，变频改造后可降耗 30%-40%。冷热供需失衡，传统控制滞后导致过量供冷（如会议室无人时仍全速送风），过度制冷占比超 25%；冷冻水供回水温差仅 6℃（标准设计值），未达 13℃大温差技术潜力，输配效率低下。关键技术节能路径，设备能效升级，磁悬浮离心机组：COP 达 6.8，较传统机组节能 30%以上（如鼎好 DH3 项目机房能效 EER>5.5）；变频水泵+变流量系统：动态调节水流量匹配负荷，降低水泵能耗 40%；相变储热/冰蓄冷技术：利用谷电储冷，削峰填谷节能 20%-30%。智能控制策略，负荷预测与动态匹配：LSTM 算法预测 24 小时负荷（误差±5%），按需启停冗余机组；负荷<30%时关闭冗余设备，避免“大马拉小车”。多目标协同优化：模糊自适应 PID 控制：根据温差、CO₂ 浓度（如>1000ppm 时优先新风）实时调节参数，响应速度提升 50%；焓值控制：过渡季切换全新风模式，利用自然冷源节能 25%-30%。系统集成优化，风水联动智能群控：末端温控器反馈联动主机调温（如多

房间超冷时自动提升水温 $1-2^{\circ}\text{C}$); 冷却塔近湿球温度控制技术, 提升换热效率。跨系统协同: 门禁数据驱动: 人员密度 $<20\%$ 时, 风机转速降至 70% 节能 15% ; 光照传感器联动: 强光区域自动补偿制冷量, 减少过度供冷。

5 模糊自适应控制如何提升楼宇暖通空调系统适应性

5.1 动态参数自适应调整

模糊规则实时优化, 基于实时误差 (如设定温度与实际温度偏差) 及误差变化率, 在线调整 PID 控制器参数, 例如当 CO_2 浓度骤升时自动增大新风阀开度响应速度, 降低调控延迟 50% 以上。通过模糊推理引擎处理非线性变量 (如室外温湿度突变), 避免传统 PID 因固定参数导致的振荡或超调问题 (超调幅度减少 30%)。多目标协同决策, 建立舒适度-能耗平衡规则库: 当检测到人员密度 $<20\%$ 时, 自动放宽温度控制区间 (如 $26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), 同步降低风机转速至 70% , 节能 15% 且维持基础通风防霉。过渡季利用焓值比较器, 当室外焓值低于室内时切换至全新风模式, 减少制冷机组运行时间, 节能率 $25\%-30\%$ 。

5.2 智能学习与预测增强

负荷预测驱动预调节, 结合 LSTM 算法预测未来 24 小时负荷 (误差 $\pm 5\%$), 提前调整主机出水温度及水泵频率, 避免冷水机组低负荷率 ($<30\%$) 运行造成的 $15\%-20\%$ 能耗浪费。历史数据训练模糊规则库, 例如午间会议室使用高峰前预冷, 缩短温度稳定时间 40% 。抗干扰能力强化, 针对外部扰动 (如餐饮区排烟气流干扰), 通过压力传感器动态修正风阀开度与风机增压参数, 维持气流组织稳定性。管网阻力突变时 (如支路阀门故障), 自适应算法优先调节相邻阀门而非提升水泵转速, 减少系统震荡风险。

5.3 跨系统联动优化

全域感知数据融合, 整合温湿度、 CO_2 、人体存在等传感器数据 (单建筑超 3 万监测点), 构建环境状态矩阵, 驱动模糊控制器精准响应局部需求。安防系统联动: 门禁刷卡数据判断人员密度, 触发区域差异化运行策略 (如无人会议室关闭空调)。风水联动群控, 末端温控器反馈联动主机调温: 多房间超冷时自动提升冷冻水温度 $1-2^{\circ}\text{C}$, 减少过度供冷 25% 。冷却塔近湿球温度控制技术, 动态匹配环境湿度变化提升换热效率。

6 模糊自适应控制如何优化楼宇暖通空调控制

策略

6.1 动态规则在线优化

参数自整定机制, 依据实时误差 (如温度偏差 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) 及误差变化率, 在线刷新 PID 参数, 如当 CO_2 浓度骤升时, 自动增大新风阀开度响应速度, 调控延迟降低 50% 以上。通过模糊推理引擎处理非线性干扰 (如室外温湿度突变), 避免传统 PID 超调问题 (超调幅度减少 30%)。多目标协同决策库, 建立「舒适度-能耗」平衡规则: 当人员密度 $<20\%$ 时, 放宽温度控制区间 (如 $26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), 同步降低风机转速至 70% , 节能 15% 且维持防霉通风。过渡季结合焓值比较器: 当室外焓值低于室内时, 切换至全新风模式, 减少制冷机组运行, 节能率达 $25\%-30\%$ 。

6.2 负荷预测驱动预调节

数据驱动决策引擎, 整合 LSTM 算法预测 24 小时负荷 (误差 $\pm 5\%$), 提前调整主机出水温度及水泵频率, 避免冷水机组低负荷率 ($<30\%$) 运行的 $15\%-20\%$ 能耗浪费。基于历史数据刷新规则库: 例如会议高峰期前预冷, 缩短温度稳定时间 40% 。抗干扰强化机制, 针对外部扰动 (如餐饮区排烟气流), 通过压力传感器动态修正风阀开度与风机增压参数, 维持气流组织稳定。管网阻力突变时 (如阀门故障), 优先调节相邻阀门而非提升水泵转速, 降低系统震荡风险。

6.3 跨系统智能协同

全域感知数据融合, 整合温湿度、 CO_2 、门禁等超 3 万监测点数据, 构建环境状态矩阵。如人员密度骤降时自动关闭无人区空调。安防系统联动: 刷卡数据触发差异化运行策略, 如夜间办公区降频运行。风水联动群控优化, 末端温控反馈联动主机: 多房间超冷时自动提升冷冻水温度 $1-2^{\circ}\text{C}$, 减少过度供冷 25% 。冷却塔近湿球温度控制技术, 动态匹配环境湿度提升换热效率。

总之, 现代楼宇 HVAC 系统通过集成化架构、智能算法驱动、多目标协同优化, 实现能效与舒适性的精准平衡, 成为智慧建筑的核心生命维持系统。

参考文献

- [1] 刘海洋. 浅谈模糊自适应控制在楼宇暖通空调系统中的应用. 2022.
- [2] 李慧园. 关于模糊自适应控制在楼宇暖通空调系统中的运用. 2023.