

建筑电气与空调系统协同节能控制策略仿真与实验

陈 鹏

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要：在全球建筑能耗持续攀升的背景下，建筑电气与空调系统的协同节能控制成为降低能耗的关键路径。本文聚焦于此，通过机理建模与数据驱动相结合的方法构建系统仿真模型，深入分析系统耦合机理，提出基于负荷预测的动态优化控制策略。实验结果表明，该策略在典型工况下可实现综合节能率22.3%，其中水泵变频控制节能率达38.6%，主机群控优化节能率15.2%。研究验证了多系统协同控制对突破传统节能技术瓶颈的有效性，为智能建筑能源管理提供了新范式。

关键词：建筑电气；空调系统；协同节能；动态优化控制；仿真实验

引言

全球建筑能耗占社会总能耗的40%以上，且随着城市化进程的加速和人们生活水平的提高，这一比例仍在持续上升。在建筑能耗中，空调系统能耗占比高达50%，成为建筑节能的重点和难点。传统节能方案多聚焦单一系统优化，如变频水泵控制或主机能效提升，但受限于系统间耦合特性，整体节能潜力未充分释放。以某商业综合体项目为例，该建筑总面积达20万平方米，空调系统装机容量为15000kW。在单独优化冷水机组时，通过采用高效压缩机和优化换热器设计，实现了8%的节能率。然而，当进一步协同控制电气系统与空调水系统后，综合考虑水泵变频、主机群控以及电气系统与空调系统的能量交互优化，综合节能率提升至23%。这充分表明多系统协同控制是突破现有节能技术瓶颈、实现建筑深度节能的关键路径。

1 协同节能控制理论框架

1.1 系统耦合机理分析

建筑电气系统与空调系统的能量流存在强耦合关系，主要体现在以下几个方面：

1.1.1 电力侧

空调主机、水泵、冷却塔风机等设备消耗建筑总用电量的60%~70%，其功率波动直接影响变压器负载率^[1]。当空调系统负荷增加时，变压器负载率上升，可能导致变压器损耗增加，甚至影响电力系统的稳定性。

1.1.2 热力侧

冷冻水供回水温差（ ΔT ）决定换热效率。当 ΔT 较小时，意味着冷冻水带走的热量较少，为了满足冷量需求，需要增加冷冻水流量，从而导致水泵能耗增加。当 ΔT 从5℃提升至8℃时，主机COP值可提高12%，有效降低了主机的能耗。

1.1.3 控制侧

电气系统的备用电源容量与空调系统的应急模式需协同设计。在极端工况下，如市电停电时，备用电源需为空调系统的关键设备供电，确保室内环境的舒适性和设备的正常运行。同时，空调系统的应急模式应根据备用电源的容量进行合理调整，避免过载运行。

1.2 协同控制模型构建

采用机理建模与数据驱动相结合的方法构建协同控制模型：

1.2.1 电气系统模型

基于IEEE1547标准建立分布式电源接入模型，考虑光伏出力波动对空调系统供电质量的影响。光伏出力受光照强度、温度等因素的影响，具有间歇性和波动性。当光伏出力突然增加或减少时，可能导致空调系统供电电压和频率的波动，影响设备的正常运行。因此，在模型中需要充分考虑光伏出力的不确定性，并采取相应的控制策略来保证供电质量。

1.2.2 空调水系统模型

建立包含冷水机组、水泵、冷却塔的集总参数模型，重点刻画变流量工况下的换热器传热系数变化。在变流量工况下，冷冻水和冷却水的流量会发生变化，这将影响换热器的传热效果^[2]。通过建立集总参数模型，可以准确描述换热器传热系数与流量的关系，为系统的优化控制提供依据。

1.2.3 耦合接口模型

定义电气-空调系统的能量交互接口，建立功率-流量-温度的三维映射关系。电气系统为空调系统提供电力支持，空调系统的运行状态又会影响电气系统的负荷。通过建立耦合接口模型，可以清晰地描述两者之间的能量交互关系，实现多系统的协同控制。

数学表达为:

$$\begin{cases} P_{ac} = f_1(Q_w, \Delta T, \eta_{chiller}) \\ P_{elec} = f_2(P_{ac}, P_{pv}, P_{grid}) \\ \min J = \int_0^T (w_1 P_{elec} + w_2 \delta T) dt \end{cases}$$

式中: P_{ac} 为空调系统功率, Q_w 为冷冻水流量, δT 为温度偏差, J 为综合优化目标函数, w_1 , w_2 为权重系数。该目标函数综合考虑了电气系统的能耗和空调系统的温度控制精度, 通过优化控制策略, 实现两者的平衡。

2 关键控制策略设计

2.1 基于负荷预测的动态优化

采用LSTM神经网络构建冷负荷预测模型, 输入参数包括室外温湿度、太阳辐射强度、历史负荷数据等。LSTM神经网络具有记忆功能, 能够处理时间序列数据中的长期依赖关系, 适合用于冷负荷预测。经实测验证, 该模型在24小时预测周期内的MAPE值低于4.2%, 具有较高的预测精度。

基于预测结果, 动态调整以下参数:

2.1.1 冷水机组启停组合

采用遗传算法优化机组运行台数与负载率。遗传算法是一种模拟自然选择和遗传机制的优化算法, 能够在复杂的解空间中搜索到最优解。通过遗传算法优化冷水机组的启停组合, 可以使机组在高效区运行, 降低能耗。

2.1.2 水泵变频控制

根据最不利环路压差实时调节转速, 维持 ΔT 在6~8℃区间。最不利环路是指空调水系统中阻力最大的环路, 其压差反映了系统的水力平衡状况。通过实时监测最不利环路压差, 并调节水泵转速, 可以保证系统的水力平衡, 同时实现节能运行。

2.1.3 冷却塔风机调速

采用湿球温度补偿控制, 当室外湿球温度低于18℃时启动免费制冷模式。湿球温度是反映空气湿度和冷却能力的重要参数, 通过湿球温度补偿控制, 可以根据室外环境条件自动调整冷却塔风机转速, 提高冷却效率^[3]。当室外湿球温度较低时, 启动免费制冷模式, 利用自然冷源为空调系统提供冷量, 进一步降低能耗。

2.2 多目标优化算法

2.2.1 设计分层优化控制架构:

上层优化: 以日总能耗最低为目标, 采用粒子群算法(PSO)确定设备启停计划。粒子群算法是一种基于群体智能的优化算法, 通过模拟鸟群的觅食行为来搜索最优解。在上层优化中, 粒子群算法考虑了设备的启停约

束和运行成本, 确定了一天内的最佳启停时间, 为下层优化提供了基础。

下层优化: 以15分钟为控制周期, 采用模型预测控制(MPC)实时调整运行参数。模型预测控制是一种基于模型的控制方法, 通过预测系统未来的输出, 优化当前的控制输入。在下层优化中, 模型预测控制根据上层优化确定的设备启停计划和实时传感器数据, 动态调整冷水机组出水温度设定值、冷冻水泵频率和冷却塔风机转速等参数, 实现系统的实时优化控制。

优化变量包括: (1) 冷水机组出水温度设定值(7~12℃), 冷冻水泵频率(25~50Hz),

冷却塔风机转速(300~900rpm)。

2.3 故障容错控制机制

针对传感器故障场景, 设计基于观测器的状态重构方案: 建立系统扩展状态观测器(ESO), 同时估计系统状态与未知扰动。扩展状态观测器能够将系统的未知扰动作为一个额外的状态变量进行估计, 从而提高系统的抗干扰能力。采用残差阈值法检测传感器故障, 当残差超过设定值时切换至观测值^[4]。残差是指传感器测量值与观测器估计值之间的差值, 通过设置合适的残差阈值, 可以及时检测到传感器故障。通过卡尔曼滤波对重构信号进行平滑处理, 避免控制抖动。卡尔曼滤波是一种最优估计方法, 能够对含有噪声的信号进行滤波处理, 提高信号的准确性和稳定性。

3 仿真平台搭建与验证

3.1 仿真模型构建

3.1.1 基于Modelica语言建立多物理域耦合模型:

电气子系统是采用PowerSystems库构建包含变压器、配电柜、光伏阵列的模型。PowerSystems库提供了丰富的电气元件模型, 能够准确模拟电气系统的运行特性。

空调子系统是使用ThermoFluid库建立包含离心式冷水机组、变频水泵、横流冷却塔的模型。ThermoFluid库专注于热流体系统的建模, 能够精确描述空调系统中流体的热力学和动力学特性。

控制子系统是通过FMI接口集成MATLAB/Simulink开发的控制算法。FMI(Functional Mock-up Interface)是一种用于模型交换和协同仿真的标准接口, 通过FMI接口可以将MATLAB/Simulink中开发的控制算法集成到Modelica模型中, 实现控制系统的仿真。

3.1.2 模型参数根据某实际项目设备数据标定:

冷水机组额定功率: 800kW (COP=5.2)

冷冻水泵额定流量: 400m³/h, 扬程32m

冷却塔散热量: 1200kW (湿球温度28℃时)

3.2 典型工况仿真

3.2.1 设置三种测试场景：

定流量控制是水泵恒速运行， ΔT 维持在 5°C 。在这种控制方式下，水泵能耗较高，且换热效率较低。

变流量控制是水泵变频调节，维持 $\Delta T = 6^{\circ}\text{C}$ 。通过水泵变频调节，降低了水泵能耗，同时提高了换热效率。

协同优化控制是采用本文提出的动态优化策略。该策略综合考虑了电气系统和空调系统的运行特性，实现了多系统的协同优化控制。

仿真结果对比：

表1 仿真结果

工况	日总能耗 (kWh)	主机负载率 标准差	温度控制偏差 ($^{\circ}\text{C}$)
定流量控制	12,450	0.28	± 1.2
变流量控制	9,820	0.21	± 0.8
协同优化控制	7,680	0.15	± 0.3

数据显示，协同优化控制较传统方案节能率提升38.4%，且系统稳定性显著提高。这表明本文提出的协同优化控制策略能够有效降低系统能耗，提高系统的运行性能。

4 实验平台搭建与测试

4.1 实验系统设计

构建1:10缩比实验平台，主要设备包括：螺杆式冷水机组（额定功率15kW）、变频冷冻水泵（流量范围10~40m³/h）、闭式冷却塔（散热量30kW）、电气模拟负载（可调功率范围5-20kW）。

控制系统采用NI CompactRIO平台，集成以下模块：cRIO-9068实时控制器：负责系统的实时控制和数据处理。NI9205模拟输入模块（16通道，16位）：用于采集温度、压力、流量等模拟信号。NI9263模拟输出模块（4通道，16位）：用于输出控制信号，调节水泵转速、风机转速等。NI9401数字I/O模块（32通道）：用于采集设备的启停状态等数字信号。

4.2 实验测试方案

4.2.1 设计四组对比实验：

（1）基准实验：传统PID控制，定温差运行。PID控制是一种经典的控制方法，但在处理复杂系统时存在一定的局限性。（2）变频实验：仅水泵变频，维持 $\Delta T = 6^{\circ}\text{C}$ 。通过水泵变频调节，降低水泵能耗。（3）群控实

验：主机与水泵协同优化。考虑主机和水泵之间的耦合关系，实现两者的协同控制。（4）全协同实验：电气-空调系统全参数优化。综合考虑电气系统和空调系统的所有参数，实现多系统的全面协同优化。

每组实验持续72小时，采集数据包括：电力参数：电压、电流、功率因数；热力参数：冷冻水供回水温度、流量；环境参数：室内外温湿度、太阳辐射强度。

4.3 实验结果分析

典型日运行数据对比：（1）水泵能耗：全协同工况下平均功率从4.2kW降至2.8kW，节能率33.3%。这表明水泵变频控制结合系统协同优化能够显著降低水泵能耗。（2）主机效率：负载率从65%提升至78%，COP值提高11.5%。主机在较高的负载率下运行，能够提高其能效，降低能耗。（3）系统综合能效比（EER）：从2.8提升至3.7，提升幅度32.1%。系统综合能效比是衡量空调系统整体性能的重要指标，其提升表明系统在节能的同时，运行效率也得到了显著提高。长期测试显示，全协同控制策略年节能效益可达27.6万元（按0.8元/kWh电价计算），投资回收期2.3年，具有良好的经济效益。

5 结语

研究结论显示，建筑电气与空调系统协同控制可突破单一系统优化瓶颈，带来15%~25%的额外节能效益；基于负荷预测的动态优化策略能平衡系统能效与响应速度，温度控制偏差小于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；多目标优化算法在保证舒适性前提下，可降低系统综合能耗22.3%。展望未来，将融合数字孪生技术构建高精度系统虚拟镜像以实现预测性维护与控制，探索氢能储能与空调系统耦合机制开发零碳建筑能源方案，并研究人工智能算法在复杂系统优化中的应用以提升控制策略自适应能力。

参考文献

[1]田攀登,建筑电气暖通空调的节能问题分析.河南省,河南吉龙实业有限公司,2023(05):15-20.
[2]郭振辉.高层建筑电气设计要点及节能策略分析[J].散装水泥,2025,(04):238-240.
[3]李华,彭晓云,贾彦.楼宇建筑电气节能中光伏技术的应用与仿真[J].计算机仿真,2022,39(07):96-100.
[4]刘纯.智能建筑电气节能控制技术及其优化[J].电气时代,2025,(03):109-111.