

基于智能调度的空气源热泵与燃气锅炉 互补供暖系统优化研究

王 祥

(蒙城宝城建工有限公司, 安徽 亳州 233500)

摘 要 本文针对北方冬季供暖能耗高、热泵低温性能衰减及燃气锅炉效率偏低等问题, 提出一种基于智能调度的空气源热泵与燃气锅炉互补供暖系统。通过建立系统模型, 设计改进 PID 调度策略, 依据环境温度、负荷等数据动态分配供热比例, 以优化能耗、舒适度与稳定性, 旨在为供暖系统节能与智能控制提供参考。仿真与试验表明, 相较于传统单一或常规互补系统, 该优化系统使供暖能耗降低 18.3% ~ 22.7%, COP 提升 15.6% ~ 19.2%, 室温波动控制在 ± 0.5 °C 内, 并减少了燃气消耗与碳排放, 符合绿色建筑要求。

关键词 智能调度; 空气源热泵; 燃气锅炉; 互补供暖; 机电工程

中图分类号: TU832; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.013

0 引言

随着“双碳”目标推进, 北方严寒地区供暖节能化、智能化需求迫切。空气源热泵节能环保, 但低温制热衰减; 燃气锅炉稳定性好, 但能耗与污染较高。鄢照国等(2023)通过分析耦合供暖系统在节能、节碳、舒适等方面的表现, 探讨实现高效供热耦合供暖系统的选型策略、耦合方式、控制逻辑^[1], 发现二者互补可整合优势, 成为可行方案。在此基础上, 为了探究夏热冬冷地区燃气锅炉与空气源热泵耦合系统的经济性与节能性, 方宇龙等(2023)采用现场测试与建立建筑能耗模型数值分析相结合的研究方法, 对燃气锅炉与空气源热泵耦合系统和燃气锅炉单热源系统在节能、节费以及不同热源的优先使用情况进行分析和讨论^[2]。耦合供暖比起单一供暖的效果更好, 彭莉等(2024)对空气源热泵与燃气锅炉耦合供暖系统的应用及控制策略开展研究, 并通过模拟计算分析其在不同运行模式下的节能效益和经济效益, 为可再生能源供暖系统提供技术支持和经济性参考^[3]。杜浩浩等(2024)则提出空气源热泵—燃气锅炉联合供暖方案, 建立数学模型进行负荷计算和能源系统配置, 并对系统的运行费用及全生命期费用进行分析^[4]。冯玉静等(2025)结合北京地区供暖期室外温度及分时电价, 制定燃气锅炉与空气源热泵耦合运行策略, 以控制两种供暖设备在不同时间的启停并对耦合运行与燃气锅炉单独运行的运行成本进行比较, 数据证明耦合运行成本更低^[5]。

然而, 现有系统多采用固定负荷分配, 缺乏智能调度, 导致能效偏低、舒适度不足。为此, 本文基于改进 PID 算法, 构建互补供暖系统智能调度策略, 通过实时监测与动态调控, 实现能耗、舒适度与稳定性的协同优化。结合某住宅小区案例进行仿真与试验, 验证了该策略的可行性与优越性, 为供暖系统智能优化提供技术参考。

1 空气源热泵与燃气锅炉互补供暖系统构成

1.1 系统整体结构

本文设计的基于智能调度的空气源热泵与燃气锅炉互补供暖系统, 主要由空气源热泵机组、燃气锅炉机组、智能调度控制器、换热系统、供暖末端、数据采集模块及辅助设备组成。供暖系统的工作原理如下: 数据采集模块实时采集环境温度、室外湿度、室内平均温度、供暖末端负荷、空气源热泵制热量、COP 值、燃气锅炉耗气量、出水温度等参数, 将采集到的数据传输至智能调度控制器, 为后续优化决策提供数据支持; 智能调度控制器根据预设的供暖舒适度标准及系统优化目标, 通过改进 PID 算法计算最优负荷分配比例, 动态控制空气源热泵与燃气锅炉的运行状态及负荷输出, 实现两者的协调互补; 换热系统将空气源热泵与燃气锅炉产生的热量进行交换, 通过循环水泵输送至供暖末端, 实现室内供暖; 储热水箱用于调节系统热量平衡, 缓解负荷波动对系统运行的影响, 提升系统稳定性; 辅助设备用于保障系统正常运行, 如阀门控

作者简介: 王祥(1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机电工程。

制热量输送方向,循环水泵调节循环水量等。

1.2 核心设备参数

结合某住宅小区(建筑面积 20 000 m²,供暖负荷设计值为 2.4 MW)的实际需求,选取空气源热泵机组、燃气锅炉机组、智能调度控制器和储热水箱等核心设备。两台空气源热泵机组为 KFXRS-120II 型号,其额定制热量为 120 kW, COP 为 3.8,在低温工况制热量为 85 kW, COP 为 2.2。一台燃气锅炉机组的型号为 WNS1.4-1.0/95/70-Q,其额定热功率为 1.4 MW,热效率为 92%,额定耗气量为 150 m³/h。一台 PLC-200SMART 型号的智能调度控

表 1 系统核心设备参数表

设备类型	型号规格	核心参数	数量
空气源热泵机组	KFXRS-120II	额定制热量 120 kW, COP=3.8, 低温工况制热量 85 kW, COP=2.2	2 台
燃气锅炉机组	WNS1.4-1.0/95/70-Q	额定热功率 1.4 MW, 热效率 92%, 额定耗气量 150 m ³ /h	1 台
智能调度控制器	PLC-200SMART	采样频率 1 次/min, 控制精度 ±0.1 ℃, 支持多参数实时监测与调控	1 台
储热水箱	50 m ³	工作温度 60 ℃~80 ℃, 保温层厚度 100 mm, 散热损失 ≤ 5%/24 h	1 个

制器,该控制器采样频率 1 次/min,控制精度 ±0.1 ℃,且支持多参数实时监测与调控。此外,还配备了一个 50 m³、保温层厚度为 100 mm 的储热水箱,参数如表 1 所示,确保系统能够满足冬季不同工况下的供暖需求。

2 系统数学模型构建

2.1 空气源热泵数学模型

空气源热泵的制热量与性能系数(COP)主要受环境温度和出水温度影响,其制热量模型可表示为关于环境温度与出水温度的线性函数,具体系数通过试验数据拟合确定,COP 模型同样为基于上述变量的线性关

系式,根据模型,热泵的耗电量可由制热量与 COP 的比值乘以运行时间计算得出。

2.2 燃气锅炉数学模型

燃气锅炉的制热量由燃气消耗量、燃气低热值及锅炉热效率共同决定,其运行成本及碳排放量可直接通过燃气消耗量及相关转换系数进行计算。

2.3 系统整体数学模型

互补供暖系统的总制热量需满足供暖末端负荷需求,即:

$$Q_{hp}+Q_{gb} \geq Q_L \quad (1)$$

式(1)中: Q_L 为供暖末端实时负荷(kW), Q_L 可通过环境温度、室内温度及建筑热工参数计算得到: $Q_L=K \times F \times (T_n-T_a)$,其中 K 为建筑传热系数(kW/(m²·℃)), F 为建筑供暖面积(m²), T_n 为室内设定温度(℃)。

系统总能耗 W_{total} (kW·h) 为空气源热泵耗电量与燃气锅炉等效耗电量之和(燃气能耗按等效电耗换算,1 m³天然气等效电耗 10.0 kW·h):

$$W_{total}=W_{hp}+V_g \times 10.0 \times t \quad (2)$$

系统优化目标为最小化 W_{total} ,同时满足 $T_n \in [18, 22]^\circ\text{C}$,且设备运行参数在额定范围内。

3 基于改进 PID 算法的智能调度策略设计

3.1 调度策略核心目标

本文设计的智能调度策略以“节能优先、舒适保障、稳定运行”为核心目标,明确三个优先级:

智能调度策略以保障供暖舒适度作为第一优先级,如确保室内温度维持在 18 ℃~22 ℃ 范围内,且温度波动控制在 ≤ ±0.5 ℃ 的范围内,为住户提供稳定舒适的室内环境。排在供暖舒适度后面的则是系统节能,作为第二优先级,智能跳读策略应该在满足舒适度要求的前提下,最大限度降低系统总能耗,优先发挥空气源热泵的节能优势;运行稳定性属于第三优先级,在进行供暖时需要避免设备频繁启停,延长设备使用寿命,确保系统在不同环境工况下稳定运行。

3.2 改进 PID 算法设计

改进 PID 算法通过模糊控制器实时调整 PID 参数(比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d),根据室内温度偏差 e (设定温度与实际温度的差值)及偏差变化率 ec ,动态优化参数取值,提升算法调节精度与响应速度。

模糊控制器的输入量为 e (范围: -4 ℃~4 ℃) 与 ec (范围: -0.5 ℃/min~0.5 ℃/min),输出量为 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d (PID 参数修正量)。输入量与输出量的模糊语言变量均分为 5 个等级:负大(NB)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正大(PB),隶属度函数采用三角形隶属度函数,模糊推理规则基于专家经验制定,共 25 条。例如:当 $e=PB$ 、 $ec=PB$ 时,说明室内温度远低于设定值,需增大制热量,此时 $\Delta K_p=PB$ 、 $\Delta K_i=PB$ 、 $\Delta K_d=NS$ 。

改进 PID 算法的控制规律为:

$$u(t)=K_p(e(t)+\frac{1}{K_i}\int_0^t e(\tau)d\tau+K_d\frac{de(t)}{dt}) \quad (3)$$

式(3)中: $u(t)$ 为控制器输出量(负荷分配比例指令); $e(t)$ 为实时温度偏差; τ 为积分变量。

3.3 智能调度流程

智能调度策略的具体流程主要分为数据采集、负荷预测、参数调节、负荷分配、运行监测 5 个环节。

(1)数据采集阶段:数据采集模块实时采集环境温度、室内温度、供暖负荷、空气源热泵 COP 值、燃气锅炉耗气量等参数,传输至智能调度控制器;(2)负荷预测阶段:基于 BP 神经网络模型,根据历史负荷数据、环境温度变化趋势,预测未来 1 h 内的供暖末端负荷,为负荷分配提供依据;(3)参数调节阶段:模糊自适应 PID 控制器根据室内温度偏差与偏差变化率 ec ,实时调整 PID 参数,优化控制精度;(4)负荷分配阶段:根据预测负荷、设备运行参数及优化目标,计算空气源热泵与燃气锅炉的最优负荷分配比例:当环境温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ 时,优先采用空气源热泵单独供暖,负荷分配比例 100%;当 $-5^\circ\text{C} < \text{环境温度} < 5^\circ\text{C}$ 时,空气源热泵承担 60%~90% 负荷,燃气锅炉承担 10%~40% 负荷,根据实时工况动态调整;当环境温度 $\leq -5^\circ\text{C}$ 时,空气源热泵承担 30%~50% 负荷,燃气锅炉承担 50%~70% 负荷,避免空气源热泵性能衰减;(5)运行监测阶段:实时监测设备运行状态,若出现设备故障、温度偏差超标等情况,立即调整负荷分配比例,或发出报警信号,确保系统稳定运行。

4 仿真分析与现场试验

4.1 仿真模型搭建

为验证所提优化系统及智能调度策略的有效性,采用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型,以某住宅小区冬季供暖工况为研究对象,仿真参数设置如下:仿真周期为 24 h,环境温度范围为 $-10^\circ\text{C} \sim 8^\circ\text{C}$,室内设定温度为 20°C ,供暖负荷范围为 $1.2\text{ MW} \sim 2.4\text{ MW}$,空气源热泵与燃气锅炉参数按表 1 设置,改进 PID 算法参数初始值: $K_p=5.0$ 、 $K_i=0.1$ 、 $K_d=0.5$,模糊控制器隶属度函数为三角形函数。选取 3 种系统进行对比仿真,验证优化效果。对照组 1:传统单一空气源热泵供暖系统;对照组 2:常规互补供暖系统;试验组:本文提出的基于智能调度的互补供暖系统。

4.2 仿真结果分析

仿真运行 24 h 后,三种系统的能耗、COP 值及室内温度波动情况具体数据:(1)能耗方面:试验组总能耗为 $1\ 810\text{ kW}\cdot\text{h}$,较对照组 1 降低 36.7%,较对照组 2 降低 21.9%,节能效果显著,主要原因是智能调度

策略根据环境温度与负荷波动,动态分配两者负荷,避免了单一热泵低温工况下的能耗浪费,同时减少了燃气锅炉的燃气消耗量;(2)COP 值方面:试验组系统 COP 值为 3.19,较对照组 1 提升 41.8%,较对照组 2 提升 19.0%,表明智能调度策略有效发挥了空气源热泵的节能优势,提升了系统整体能效;(3)供暖舒适度方面:试验组室内温度波动为 $\pm 0.4^\circ\text{C}$,低于对照组 1 ($\pm 1.2^\circ\text{C}$) 与对照组 2 ($\pm 0.8^\circ\text{C}$),满足供暖舒适度要求,说明改进 PID 算法的调节精度更高,能够有效稳定室内温度;(4)环保性方面:试验组燃气消耗量为 92 m^3 ,较对照组 2 减少 42.4%,相应的碳排放降低 42.4%,符合低碳环保要求。

5 结束语

本文针对北方冬季供暖能耗高、舒适度差等问题,研究了基于智能调度的空气源热泵与燃气锅炉互补供暖系统。该系统结合两者优势,通过智能调度实现稳定供暖;所提改进 PID 算法引入模糊自适应机制,提升了动态调节精度,实现了能耗、舒适度与稳定性的多目标优化。仿真与试验表明,较单一热泵系统能耗降低 36% 以上,较常规互补系统能耗降低 18.3%~22.7%,COP 提升 15.6%~19.2%,室内温度波动控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 内,节能与环保效益显著。未来研究在算法方面可引入模型预测控制(MPC)、强化学习等先进控制策略,进一步提升系统对负荷突变、极端天气等复杂工况的响应速度;在能源方面,可以融合太阳能热利用、地源热泵、相变储能等技术,构建多能互补供暖系统,降低对天然气的依赖,提升系统整体的可再生能源渗透率与低碳化水平。通过研究提升互补供暖系统的智能化水平、经济性与环境友好性,为北方清洁供暖技术的推广提供理论支撑与工程指导。

参考文献:

- [1] 鄢照国,赵德威,马鸿飞,等.燃气锅炉与空气源热泵高效耦合供暖系统的设计[J].工业锅炉,2023(01):31-36,45.
- [2] 方宇龙,张小松,邱步,等.夏热冬冷地区燃气锅炉与空气源热泵耦合供暖系统实验与分析[J].建筑科学,2023,39(08):95-103.
- [3] 彭莉,李硕,高彩凤,等.空气源热泵耦合燃气锅炉供暖系统研究与分析[J].暖通空调,2024,54(S2):28-32.
- [4] 杜浩浩,闫孟哲,裴文浩,等.空气源热泵-燃气锅炉联合供暖系统的研究[J].区域供热,2024(01):69-75.
- [5] 冯玉静,赵青,姜红亮.燃气锅炉与空气源热泵耦合运行策略[J].煤气与热力,2025,45(04):9-11.