

夏热冬冷地区住宅暖通工程中多能互补供暖系统设计与运行成本优化研究

张艳增

120111*****4038

摘要: 夏热冬冷地区作为我国气候过渡带,其住宅供暖需求具有“冬季低温时间短但湿冷显著、夏季高温时间长且闷热”的双重特征,传统单一能源供暖系统普遍存在能效低、运行成本高、环境适应性差等问题。多能互补供暖系统通过整合太阳能、空气能、地热能及市政能源等多种能源形式,可实现能源的梯级利用与动态匹配,成为解决该地区住宅供暖困境的关键路径。本文基于夏热冬冷地区气候特性与住宅用能需求,系统分析多能互补供暖系统的设计原则、核心组件选型及系统耦合方式,重点探讨以“能效提升-成本控制”为目标的运行策略优化路径,旨在为该地区住宅暖通工程的绿色化、经济化发展提供理论参考与实践指引。

关键词: 夏热冬冷地区;住宅暖通工程;多能互补供暖系统;系统设计;运行成本优化

DOI: 10.69979/3060-8767.25.09.086

引言

夏热冬冷地区涵盖我国长江流域及其周边区域,该区域冬季无集中供暖传统,且室外温度多处于 $0-10^{\circ}\text{C}$ 区间,高湿度导致“体感温度远低于实际温度”,住宅室内热舒适度亟待提升;夏季高温高湿天气频繁,暖通系统需兼顾制冷与供暖功能,能源消耗压力显著。随着“双碳”目标推进与居民生活品质提升,该地区住宅供暖需求从“有无”向“优劣”转变,传统电采暖、燃气壁挂炉等单一能源系统暴露出诸多局限:电采暖运行成本过高,燃气壁挂炉受气源供应与价格波动影响大,且二者均存在碳排放较高的问题。

多能互补供暖系统依托“因地制宜、多能协同”的理念,通过不同能源形式的优势互补,可有效规避单一能源系统的缺陷,实现“环保性-经济性-可靠性”的平衡。目前,针对该系统的研究多集中于技术可行性验证,而对“设计与运行成本的协同优化”关注不足,尤其缺乏结合夏热冬冷地区气候波动性与住宅用能随机性的针对性方案。因此,深入研究该地区多能互补供暖系统的设计要点与运行成本优化策略,具有重要的工程实践价值。

1 夏热冬冷地区住宅暖通工程多能互补供暖系统设计要点

1.1 设计原则

多能互补供暖系统设计需遵循“气候适配、需求导向、能效优先、成本可控”四大原则。首先,需结合当地太阳辐射强度、室外温度变化曲线、地下水位埋深等气候与地质条件,优先选择资源禀赋优越的清洁能源,

如长江中下游地区年太阳辐射总量达 $4000-5000\text{MJ}/\text{m}^2$,适宜优先配置太阳能集热系统;其次,需匹配住宅用户的用能规律,如居民日间外出、夜间集中用能的特点,设计可动态调节的供能模式;再者,通过系统耦合提升能源利用效率,避免能源浪费;最后,在设备选型与系统架构设计阶段,需充分考虑初期投资与长期运行成本的平衡,避免过度追求“高清洁能源占比”而导致成本失控。

1.2 核心能源形式与组件选型

夏热冬冷地区多能互补供暖系统的核心能源形式包括太阳能、空气源热泵、地源热泵及市政辅助能源(如市政热网、燃气),各能源形式的组件选型需结合技术特性与地区适配性展开:

太阳能供暖组件: 优先选择平板式太阳能集热器,其抗冻性与耐候性优于真空管集热器,更适应该地区冬季低温与夏季高温的交替环境;集热器安装角度应结合当地纬度确定,通常与纬度角一致或偏差 $\pm 5^{\circ}$,以最大化太阳辐射吸收效率;储热水箱容量需根据住宅建筑面积与用能需求计算,避免容量过大导致热量损耗增加,或容量过小导致供能不足。

空气源热泵组件: 选择具有喷气增焓技术的空气源热泵机组,该技术可使机组在 -10°C 低温环境下稳定运行,满足夏热冬冷地区冬季极端低温天气的供暖需求;风机与压缩机需选用变频设备,以实现根据室外温度与室内负荷的动态调节,降低运行能耗。

地源热泵组件: 土壤源热泵适用于地质条件稳定、地下空间充足的区域,需合理设计埋管深度与间距,避免土壤热失衡;地下水源热泵需确保地下水位稳定且水

质达标,避免对地下水资源造成污染;热泵机组 COP(性能系数)应不低于 3.5,以保证能源转换效率。

辅助能源组件:当可再生能源供应不足时(如连续阴雨天气),需配置市政热网或燃气壁挂炉作为辅助热源,辅助热源的容量应根据系统最大负荷缺口确定,避免容量冗余导致投资浪费。

1.3 系统耦合架构设计

根据夏热冬冷地区能源资源特点,多能互补供暖系统常见的耦合架构包括“太阳能+空气源热泵”“太阳能+地源热泵+燃气辅助”两种模式:

“太阳能+空气源热泵”架构:该架构适用于太阳辐射资源较好、地质条件复杂(如城市建成区)的区域。太阳能集热系统优先为住宅供暖,当太阳能集热量不足时,空气源热泵启动补热;夏季可利用空气源热泵实现制冷功能,实现“一机两用”,降低设备初期投资。系统需设计高效的换热回路,通过板式换热器实现太阳能热水与热泵系统的热量交换,避免不同介质直接混合导致的腐蚀问题。

“太阳能+地源热泵+燃气辅助”架构:该架构适用于地质条件适宜(如新建住宅小区)、对供暖可靠性要求较高的场景。地源热泵作为基础热源,太阳能集热系统为地源热泵提供预热,降低热泵机组耗功;当极端天气导致可再生能源供应严重不足时,燃气壁挂炉启动辅助供暖,确保室内温度稳定。系统需设计智能切换阀组,实现不同能源形式的无缝切换,避免供能中断。

2 夏热冬冷地区多能互补供暖系统运行成本优化策略

2.1 基于负荷预测的动态运行调节

夏热冬冷地区住宅供暖负荷的波动性源于多重因素耦合,且影响程度随时间变化显著。外部环境中,冬季室外温度昼夜波动明显,阴雨、雨雪天气常导致太阳辐射强度间歇性变化,直接影响太阳能集热系统效率,进而改变热泵补热需求;用户行为上,日间人员外出使负荷仅维持基础保温,夜间人员集中活动时负荷显著上升,部分家庭用热水、开家电还会叠加额外热负荷;建筑围护结构差异也会间接影响负荷,老旧住宅因门窗密封性差,低温天气下负荷高于新建节能住宅。这些动态变化使传统“定频定温”模式难以适配,易出现供能不足或过剩,故需依托负荷预测实现动态调节。

负荷预测模型构建是动态调节的核心前提,需以“数据精准性-模型适应性-预测时效性”为目标。数据采集环节,需通过室外气象站实时获取逐时温度、湿度、太阳辐射、风速等环境参数,同时借助室内智能设备记录用能与温度数据,并结合物业管理系统的入住率、户型信息,为分类预测提供依据。模型选择上,考虑到负

荷影响因素的非线性特征,宜采用“机器学习算法+经验修正”的混合模型,例如以长短期记忆网络(LSTM)为核心,用历史多年气象与用能数据训练,再引入建筑热惰性系数、用户行为模式修正,降低极端天气预测误差。预测结果以“逐时负荷曲线”输出,明确未来 24 小时负荷峰值、谷值及时长,为调节提供量化支撑。

基于预测结果的动态调节,需按“日内精细化调节-季节阶段性调节”双层逻辑展开,实现能源与负荷的精准匹配。

短期调节(日内调节)需结合负荷曲线时段特征制定策略。早间居民起床时段,负荷从低谷上升,若预测日间太阳辐射充足,优先启动太阳能集热系统,提高循环泵转速增温储热,为日间负荷蓄力;日间低负荷时段,降低热泵运行频率,仅维持基础舒适温度,同时用太阳能余热预热生活热水,避免浪费;傍晚负荷攀升前,提前启动热泵逐步升温,规避夜间高峰设备满负荷运行的能耗激增;夜间负荷回落后,若储热充足则暂停热泵,仅靠储热满足基础负荷,温度低于阈值再重启,减少设备启停损耗。

中长期调节(季节调节)需结合冬季气候阶段性特征调整模式。初冬与冬末,室外温度较高且晴天多,太阳能供应稳定,采用“太阳能主导+热泵辅助”模式:太阳能满足大部分负荷,热泵仅在夜间高峰或阴天间歇运行,辅助能源完全关闭以控成本;隆冬季节,室外温度显著降低,太阳能效率下降、负荷增加,切换为“热泵主力+太阳能辅助+燃气应急”模式:白天用太阳能预热热泵以降能耗,热泵高频运行保基础负荷;室外过冷导致热泵制热量不足时,启动燃气壁挂炉辅助,但需智能设定启动阈值与时长——仅室内温度连续低于舒适标准时启动,单次运行时长可控,且优先用夜间谷段热泵储热替代燃气,避免成本大幅上升。这种季节差异化策略,可兼顾供能可靠性与经济性平衡。

2.2 能源梯级利用与余热回收

通过能源梯级利用提升系统整体能效,是降低运行成本的关键手段。多能互补供暖系统中,不同能源形式的温度品位存在差异,可按照“高品位能源满足高温需求、低品位能源满足低温需求”的原则,实现能源的合理分配:

太阳能集热系统产生的热水温度通常为 40~60℃,可直接用于地板辐射供暖(需求温度 35~45℃),避免将高温热水通过换热器降温后使用,减少热量损失;

地源热泵与空气源热泵的冷凝热温度较高,可回收利用于生活热水制备,替代传统电热水器,降低生活用能成本;

住宅厨房、卫生间的排风蕴含一定热量,可通过全

热交换器回收排风中的显热与潜热，预处理新风温度，减少供暖系统的负荷压力。

2.3 智能控制系统与优化算法应用

智能控制系统是实现运行成本优化的重要支撑，通过集成传感器、控制器与优化算法，可实现系统的自动化运行与精准调控：

传感器部署：在室内各房间布置温度传感器，实时监测室内温度；在太阳能集热器出口、热泵机组进出口布置温度与压力传感器，监测系统运行参数；在室外布置气象站，采集温度、光照强度、风速等数据，为负荷预测提供依据。

优化算法应用：采用遗传算法、粒子群优化算法等智能算法，以“运行成本最低”为目标函数，以设备运行参数（如热泵启停温度、太阳能集热系统循环泵转速）为决策变量，建立优化模型。算法可根据实时数据动态调整决策变量，例如，当燃气价格上涨时，算法自动减少燃气辅助热源的使用，优先依靠可再生能源与热泵系统供能；当电价处于谷时段时，适当增加热泵系统的运行时间，利用低价电能储热，降低用电成本。

3 实践案例分析

以夏热冬冷地区某住宅小区多能互补供暖系统为例，该小区总建筑面积为5万m²，采用“太阳能+空气源热泵+燃气壁挂炉”的耦合架构。系统设计阶段，结合当地太阳辐射数据，配置平板式太阳能集热器面积为2000 m²，储热水箱容量为50m³；空气源热泵选用20台变频机组，单台制热量为15kW；燃气壁挂炉作为辅助热源，总制热量为100kW。

运行过程中，通过以下优化措施实现成本控制：

基于负荷预测模型，每日根据气象预报调整太阳能集热系统的循环泵运行频率，当预测次日光照充足时，提前将储热水箱充满，减少次日热泵系统运行时间；

采用能源梯级利用策略，太阳能热水直接供应地板辐射供暖，热泵系统产生的高温热水优先满足生活热水需求，余热用于补充供暖；

智能控制系统集成粒子群优化算法，实时优化热泵启停温度与燃气壁挂炉启动阈值，当室外温度高于5℃时，禁止燃气壁挂炉启动；当室外温度低于-5℃时，才允许燃气壁挂炉间歇性运行。

通过上述优化措施，该系统冬季运行成本较传统燃气壁挂炉供暖系统降低30%以上，可再生能源占比达到60%，且室内温度稳定维持在18-22℃，满足居民热舒适度需求。实践表明，多能互补供暖系统在夏热冬冷地区

住宅暖通工程中具有显著的经济性与可行性。

4 结论与展望

本文针对夏热冬冷地区住宅暖通工程的特点，深入研究了多能互补供暖系统的设计要点与运行成本优化策略，得出以下结论：

系统设计需遵循“气候适配、需求导向、能效优先、成本可控”原则，核心能源形式应优先选择太阳能与空气源热泵（或地源热泵），辅助能源需根据负荷缺口合理配置，避免容量冗余；

运行成本优化可通过“基于负荷预测的动态调节、能源梯级利用与余热回收、智能控制系统与优化算法应用”三大路径实现，其中智能算法的应用可显著提升系统运行的经济性与精准性；

实践案例表明，多能互补供暖系统可有效降低夏热冬冷地区住宅供暖运行成本，同时提升能源利用效率与供能可靠性。

未来研究可从以下方向展开：一是结合夏热冬冷地区夏季制冷需求，研究“供暖-制冷”一体化的多能互补系统，进一步提升系统综合利用率；二是探索多能互补系统与建筑节能技术（如被动式超低能耗建筑）的协同优化，实现“源-网-荷-储”的深度融合；三是针对农村地区住宅分散性特点，开发小型化、模块化的多能互补供暖系统，推动乡村能源革命。

参考文献

- [1]王静,王冬青,孟晋,等.多能源互补住宅采暖系统解决方案的调研与设计[J].科技创新与生产力,2018(1):2. DOI:10.3969/j.issn.1674-9146.2018.01.070.
- [2]宋诚骁,王奔,蔡丹,等.多热源联合供暖系统的集中控制逻辑设计和应用[J].工业控制计算机,2022,35(7):3.
- [3]施润亮.日喀则地区多能互补供热系统的应用研究[D].重庆大学[2025-10-01]. DOI:CNKI:CDMD:2.1016.908522.
- [4]金国辉、李威风、崔宝霞、梁娜飞、陈小娟.基于多能互补的内蒙古西部超低能耗草原民居供暖系统综合评价[J].科技促进发展,2020(6):7. DOI:CNKI:SUN:KJCJ.0.2020-06-010.
- [5]韩杰,张国强,周晋.夏热冬冷地区村镇住宅热环境与热舒适研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2009,36(6):5. DOI:CNKI:SUN:HNDX.0.2009-06-004.