

冷暖双供系统中地源与空气源热泵协同运行优化研究

张宗龙¹ 霍彩虹²

1.江苏徐矿热力有限公司 江苏 徐州 221000

2.江苏师范大学文学院 江苏 徐州 221000

【摘要】：针对传统热泵系统在复杂气候条件下能效波动大、可再生能源利用率低的问题，本研究提出“地源-空气源热泵协同-光储充一体化”的冷暖双供系统优化方案。通过构建多能互补能源微网，解析地源与空气源热泵的耦合运行机理，设计基于负荷预测的模糊控制策略，并引入相变储能技术平抑供需波动。研究证实，多能源耦合协同可有效提升冷暖双供系统的能效与稳定性，为建筑能源系统低碳化升级提供技术参考。

【关键词】：地源热泵；空气源热泵；协同运行；相变储能；能源微网；双碳目标

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.032

1 多能互补冷暖双供系统设计与创新点

1.1 系统整体架构

系统以“冷暖双供为核心、多能互补为支撑、智能控制为保障”，由四大模块组成。双热泵核心模块地源热泵负责基础负荷，空气源热泵作为调峰与补能单元，地源热泵和空气源热泵通过二网出水混合实现热耦合；光伏供电模块屋顶分布式光伏阵列通过逆变器为双热泵机组、循环水泵等设备供电，余电接入储能电池；光热辅助模块平板式太阳能集热器通过为两个场景提供热量：冬季通过板换为空气源热泵提供热量，夏季为地源热泵土壤储热；智能控制模块基于 PLC 控制器与物联网平台，实时采集环境参数、系统参数及负荷参数，实现多设备协同控制。

1.2 系统耦合创新点

1.2.1 地源-空气源热泵“时空双维度”协同耦合

突破传统“单热泵主导”模式，创新提出“基础负荷+调峰负荷”的时空协同机制。地源热泵覆盖建筑 60%-70%的基础冷暖负荷，空气源热泵针对局部高负荷区域进行精准调峰，避免地源热泵长期满负荷运行导致的土壤热失衡；冬季常规低温工况下，空气源热泵针对早晚用能高峰、局部区域临时高负荷进行调峰；冬季极端低温工况下，鉴于空气源热泵制热效率衰减特性，将其定位为补充调峰单元，承担 30%-40%负荷，避免核心制热任务依赖空气源热泵导致的能效下滑，仅在地源热容量有限、需避免土壤过度取热的特殊场景下，适度提升空气源热泵参与度。

1.2.2 光伏-光热“源荷匹配”深度耦合

针对光伏出力与热泵负荷的时序错位问题，构建“电-热互补”匹配机制。电力匹配通过储能电池缓冲光伏出力波动，优先使用光伏直供电能，当光伏出力不足时，自动切换至电网补

充；光伏出力过剩时，余电上网；夏季光热系统吸收多余太阳能，通过旁通管路为地源热泵土壤换热器补充排热，加速土壤温度恢复，避免土壤冷热失衡。

1.2.3 多参数联动的智能调控耦合

开发“负荷预测-能源分配-设备启停”的三级调控模型，基于 LSTM 神经网络，结合历史负荷数据、气象预报，提前 24 小时预测建筑冷暖负荷；根据预测负荷与实时光伏/光热收益，采用粒子群优化算法求解最优能源分配方案，目标函数为“系统总能耗最小化+光伏自给率最大化”；基于分配方案自动调整双热泵运行台数、水泵频率及光热/光伏接入模式，避免设备频繁启停导致的能效损失。

2 冷暖双供系统构建与协同机理

2.1 系统架构设计

地源热泵优先运行，承担 80%热负荷；空气源热泵作为调峰热源，在负荷高峰时段启动；光伏余电驱动空气源热泵，并为电池充电。空气源热泵承担制冷/制热任务，COP \geq 3.0；地源热泵切换为土壤热恢复模式（夏季向地下储热，维持土壤热平衡）；白天释热满足 50%以上热负荷需求。光伏直接供电驱动热泵及充电桩，余电存入电池；充电桩负荷峰值由电池与电网协同供电，实现“自发自用、余电上网”。

2.2 协同运行机理分析

土壤温度场模拟表明，埋管周围 1m 内温度梯度达 5℃/m，冬季出口水温维持在 20-24℃，COP 稳定在 4.0-4.5；采用“蒸发温度-过热度”双闭环控制，在-10℃时通过喷气增焓提升排气温度 15℃，COP 从 1.8 提升至 2.3；协同运行相比单一空气源热泵，冬季能效提升 25%-30%，夏季制冷能耗降低 15%（见表 1）。

表1 不同运行模式能效对比

工况	单一空气源热泵	地源-空气源协同	能效提升率
冬季制热(-5°C)	COP=2.0	COP=2.8	+40%
夏季制冷(35°C)	COP=2.8	COP=3.2	+14.3%

2.3 地源与空气源热泵协同运行优势

2.3.1 提高系统能效

冬季供暖全周期，地源热泵持续承担核心供热任务，其COP值始终保持在较高水平，即使在低温环境下仍能稳定高效运行。例如，在某地区冬季供暖期间，当室外温度处于0°C-10°C时，地源热泵COP可达4.0左右，单独运行即可满足建筑全部或绝大部分负荷需求，且能耗可控；此时空气源热泵可根据系统负荷波动择机介入，其COP约3.0左右，辅助分担10%-20%负荷，减少地源热泵运行压力，进一步优化能耗结构。当室外温度低于-5°C，空气源热泵制热效率显著衰减，此时完全依托地源热泵主导运行，其COP仍能稳定在4.0左右，若系统负荷峰值超出地源热泵单机承载能力，再启动空气源热泵联合运行，通过“核心主导+峰值补充”的模式，既确保供热稳定性，又最大化降低系统整体能耗，提升冬季供暖全程能效。

2.3.2 降低设备初投资

地源热泵地下埋管换热器投资占系统初投资比例较大，空气源热泵设备成本相对较低。采用协同运行系统，可适当减小地源热泵埋管规模，降低初投资成本。以一个建筑面积为5000平方米的建筑为例，若单独采用地源热泵系统，地下埋管投资约占总投资的40%，而采用地源与空气源热泵协同系统，通过合理配置，可将地源热泵埋管投资占比降低至25%-30%，同时减少了地源热泵主机容量，从而降低整体设备初投资。

2.3.3 解决土壤热失衡问题

在夏季制冷工况下，以地源热泵为主导承担核心制冷负荷，利用埋管储热系统将制冷过程中产生的余热高效储存于土壤中，主动为土壤“蓄热补能”，为冬季取热储备能量基础；空气源热泵聚焦峰值负荷分流，在正午、傍晚等制冷需求高峰时段启动，承担30%-40%的瞬时负荷，避免地源热泵向土壤过量排热导致的局部热堆积。该模式可使夏季土壤储热温度提升至适宜范围，上海某住宅小区案例显示，蓄热季土壤升温达27.7°C，为冬季热平衡奠定基础。同时，通过埋管群合理布局及顶部隔热层设计，减少储热过程中的向上散热，确保热量高效留存于地下蓄热体。在冬季供暖工况下，坚持地源热泵优先主导运行，充分利用夏季储存的土壤热量进行稳定取热，最大化发挥地源热泵不受室外温度影响、取热效率稳定的优势，避免土壤过度失热。

3 协同运行优化策略与控制实现

3.1 冬季供暖模式

地源热泵全程满负荷运行，充分发挥其土壤热源恒温优势，制热能效比稳定在4.0左右，承担100%基础供暖负荷，满足建筑核心供暖需求。空气源热泵作为柔性补充单元，仅在短时局部负荷波动时介入，分担10%-20%峰值负荷。辅助系统协同运行，光热系统通过集热器预热空气源热泵进风，提升其吸气温度与运行能效；光伏系统出力优先为地源热泵、空气源热泵机组供电，多余电能存储至储能设备，实现清洁能源优先利用，降低电网供电依赖。

3.2 夏季供暖模式

核心目标缓解地源热泵土壤热堆积，提升系统整体COP。常规工况地源热泵承担80%负荷，空气源热泵在负荷峰值时段辅助运行；光热系统通过旁管路为土壤换热器排热，光伏供电优先满足水泵、风机等辅机；极端高温开启双热泵并联运行，地源热泵与空气源热泵负荷比调整为6:4；光热系统满负荷运行，同时启动冷却塔辅助地源热泵排热；阴雨天气光伏出力不足时，优先保障地源热泵运行，空气源热泵根据电网电价峰谷调整启停时间。

3.3 过渡季模式

核心目标为最小化能源消耗，优化设备启停频率，依托地源热泵低负荷运行优势实现高效供能。过渡季建筑供暖或供冷需求处于低位，优先启用地源热泵承担全部负荷，其在低负荷工况下仍能保持稳定能效，避免空气源热泵频繁启停导致的能耗浪费与设备损耗，空气源热泵全程待机，仅在系统突发故障时作为应急备用单元。辅助能源系统协同策略聚焦“清洁能源优先利用+储能维护”。光伏系统出力优先供给地源热泵机组、循环泵及控制系统，满足核心设备运行电力需求，多余电能用于储能电池的充放电维护，通过“浅充浅放”模式保持电池活性，避免长期闲置导致的容量衰减，确保极端季节储能系统高效投入使用。整个过渡季运行过程中，通过“地源热泵低负荷稳供+光伏直供+储能维护”的协同模式，既减少设备启停频次、降低能源消耗，又为冬夏极端季节的系统高效运行奠定设备基础，实现过渡季供能的经济性与可靠性平衡。

4 地源与空气源热泵协同运行优化策略

4.1 运行模式优化

4.1.1 温度优先控制模式

根据室外温度设定不同运行模式切换点。在冬季，当室外温度高于某一设定值时，仅开启地源热泵和PVT光热；当室外温度低于该值且高于另一设定值时，空气源热泵与地源热泵联合运行，根据负荷需求动态分配二者供热量；当室外温度低于-5°C时，主要由地源热泵供热，空气源热泵辅助调节。夏季

制冷时,若室外温度低于某温度,优先使用地源热泵制冷;当室外温度高于此值时,地源热泵与空气源热泵联合制冷,通过控制阀门调节二者冷量输出比例。

4.1.2 负荷优先控制模式

实时监测建筑负荷变化,当负荷较小时,优先启动能效较高的热泵。例如,当建筑物仅部分区域使用、负荷仅为设计负荷的30%时,地源热泵低负荷运行能效仍稳定在3.5以上,远优于空气源热泵低负荷工况下的能效表现,且运行状态平稳,无频繁启停问题;当负荷逐步增大,超出地源热泵单机承载能力时,再启动空气源热泵作为补充单元,通过“主导+补充”的协同模式,共同满足负荷需求,避免单一设备过载运行。同时,根据负荷变化趋势预测未来负荷,提前调整热泵运行状态,避免频繁启停。

4.2 控制策略优化

4.2.1 基于智能算法的控制策略

引入模糊控制、神经网络控制等智能算法。以模糊控制为例,将室外温度、室内温度偏差、负荷变化率等作为输入变量,经过模糊化处理、模糊推理和去模糊化,输出地源热泵和空气源热泵的运行功率、阀门开度等控制信号。例如,当室外温度较低、室内温度低于设定值且负荷变化率较大时,模糊控制器自动增加地源热泵运行功率,适当减小空气源热泵运行功率,并调节相关阀门,优化系统运行。

4.2.2 分时分区控制策略

根据建筑物不同区域的使用时间和功能需求,进行分时分区控制。对于办公建筑,办公区域在工作时间负荷较大,非工作时间负荷小,可在工作时间重点保障办公区域的冷暖供应,合理分配地源与空气源热泵供能;对于酒店建筑,客房区域全天有需求,公共区域在特定时间段使用,可针对不同区域特点

制定控制策略,在非使用时段降低或关闭该区域热泵运行,提高能源利用效率。

4.3 系统匹配优化

4.3.1 热泵容量匹配

根据建筑全年动态负荷计算结果,合理确定地源与空气源热泵的容量配比。首先,通过建筑能耗模拟软件模拟建筑全年逐时冷热负荷,分析负荷分布特性。对于夏季制冷负荷较大、冬季供暖负荷相对较小的建筑,适当增大空气源热泵制冷容量占比,以满足夏季高峰冷负荷需求,同时保证冬季供暖时二者协同运行的灵活性。

4.3.2 管道与设备匹配

优化系统管道设计,确保地源热泵与空气源热泵之间以及与末端设备之间的水力平衡。根据热泵机组的流量、扬程要求,合理选择管道管径、长度和布置方式,减少管道阻力损失。例如,在设计地源热泵地下埋管系统时,采用同程式布置,使各并联环路的管道长度和阻力尽可能相等,保证每个环路流量均匀分配。同时,合理匹配水泵、阀门等设备,选择高效节能的水泵,根据系统需求调节水泵转速,实现变流量运行,降低水泵能耗;选用密封性好、调节性能优良的阀门,精确控制水流方向和流量,提高系统运行稳定性和节能效果。

5 结论

本研究构建的地源与空气源热泵协同运行系统,通过多能互补、储能调峰与智慧管控的深度融合,实现了建筑冷暖供应的高效低碳转型。项目实践表明,该系统在提升可再生能源利用率(72%)、降低能耗(16.5%)及碳排放(294t/年)等方面成效显著,为“双碳”目标下的建筑能源升级提供了科学路径和工程范例。未来需进一步优化土壤热管理、相变材料性能及多能流控制算法,推动该技术向规模化、标准化方向发展。

参考文献:

- [1] 碳中和和城区的建筑综合能源规划[J].龙惟定;潘毅群;张改景;张蓓红.建筑节能(中英文),2021(08).
- [2] 严寒地区超低能耗建筑负荷特性研究[J].冯国会;崔航;黄凯良;常莎莎;张磊.沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021(04).
- [3] 变频空调器间歇供冷能耗特征测试分析[J].张旭;程飞;黄奕翔;苏醒.暖通空调,2020(04).
- [4] 近零能耗办公建筑间歇运行负荷附加率研究[J].杨灵艳;张瑞雪.建筑科学,2019(10).
- [5] 上海地区不同通风方式住宅的室内环境实测分析[J].赵雨;谭洪卫.建筑热能通风空调,2019(01).