

地源热泵系统在住宅建筑中的应用效果与优化研究

文 / 胡可 山东省城乡规划设计研究院有限公司

摘要：随着建筑节能与环保需求增长，地源热泵系统在住宅建筑应用渐广，因传统系统能耗高、污染大，故探究地源热泵应用效果与优化策略成为必然。研究涵盖其原理、构成、节能、环保、不同工况运行及问题剖析等内容，采用案例分析与数据对比法。结果表明该系统节能显著、环保突出，但有技术设计与设备运行问题，经优化可改善。其意义在于为住宅能源利用提供良策，促进建筑可持续发展与技术革新。

关键词：地源热泵；住宅建筑；应用效果；优化策略

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.07.075

引言

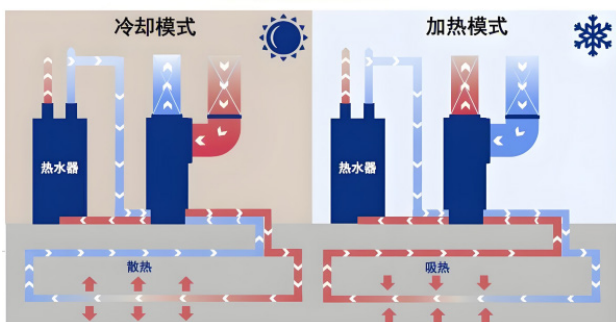
在全球绿色建筑浪潮汹涌之际，住宅建筑的节能与环保转型迫在眉睫，传统供暖制冷方式弊端尽显，能源消耗巨大且环境代价高昂。地源热泵系统恰似一颗璀璨的新星，凭借对浅层地热资源的巧妙利用，为住宅建筑的能源困境带来曙光。它如何在节能与舒适间精妙平衡？又怎样应对复杂多变的运行状况？深入探索地源热泵系统在住宅建筑中的应用与优化之旅，将开启建筑可持续发展的崭新篇章。

一、地源热泵系统概述

（一）工作原理剖析

在冬季（地源热泵系统示意图），地源热泵系统通过地下埋管换热器（如示意图中所示的地下部分），充分利用地下相对稳定且温度高于环境空气的地热资源，从中提取热量。这些热量随后经热泵机组压缩升温后，被输送至住宅建筑室内用于供暖和提供生活热水（可参考示意图中加热模式部分，热量从地下被提取后输送至室内热水器）。而在夏季，系统则逆向操作，将室内的热量通过相关部件转移至地下（对应示意图中冷却模式部分，室内热量被转移至地下），从而实现制冷。在整个过程中，制冷剂发挥着关键作用，它借助自身的相变特性，在蒸发器中吸收低温热源热量而气化，再于冷凝器中释放热量液化，如此循环往复，保证了系统的持续运行。随着智能控制技术的不断发展，地源热泵系统能够依据室内外的温度、湿度等多参数进行精准调节，确保系统运行在最佳状态，进而提高能源利用效率。这种高效的运行方式符合绿色低碳的发展理念，减少了对传统高碳能源的依赖，在为住宅建筑营造舒适环境的同时实现了节能减排的目标。

地源热泵系统示意图



（二）系统构成解析

地埋管换热器是与地下进行热量交换的关键部件，其材质、管径、管长及埋管形式等均会影响换热效率，目前新型环保高效的复合材料地埋管逐渐得到应用。热泵机组是核心，通过电能驱动，实现热量的提升与转移，先进的热泵机组具备宽工况运行、智能除霜等功能以适应复杂环境^[1]。循环泵负责循环载热介质，保障热量传输，其变频技术可根据系统负荷动态调节流量。室内末端系统形式多样，如地板辐射采暖、风机盘管等，不同末端形式在舒适度、能耗等方面各有差异，可根据住宅建筑需求灵活搭配，从而构建起一个完整且高效的地源热泵住宅供暖制冷体系。

二、地源热泵系统在住宅建筑中的应用效果

（一）节能成效显著

地源热泵系统在住宅建筑节能方面表现卓越，与传统供暖制冷方式相比，其节能优势显著。在供暖季，地源热泵消耗1单位电能可从地下提取3-4倍甚至更多的热量，而传统电加热设备仅能产生1单位热量，燃气锅炉的能源利用率也相对较低。在制冷时，地源热泵的能效比同样高于普通空调机组。这得益于地下浅层地热资源相对稳定的温度特性，减少了能源提升过程中的损耗。从全生命周期来看，虽然地源热泵系统初始投资较高，但随着运行时间推移，其节能带来的成本节省逐渐凸显，一般3-5年即可收回成本差。并且，随着智能控制技术融入，系统可根据住宅内人员活动、室外气象条件实时调整运行参数，避免不必要的能源消耗，如在无人时段自动降低负荷或待机，进一步提升节能效果。在建筑节能成为全球趋势的当下，地源热泵系统的节能特性有助于降低住宅建筑能耗总量，推动建筑行业向低碳、绿色方向转型，契合可持续发展理念。

（二）环保效益卓越

地源热泵系统具有极为出色的环保效益，其运行过程中不产生诸如二氧化硫、氮氧化物等大气污染物以及粉尘等颗粒物，极大地减少了对大气环境的污染。与传统燃油、燃气供暖设备相比，可显著降低温室气体二氧化碳的排放。以一个规模为10万平方米的住宅社区为例，如果采用地源热泵系统供暖制冷，每年可减少二氧化碳

排放数百吨^[2]。地源热泵利用的是可再生的浅层地热资源，不会像化石能源那样面临资源枯竭问题，减少了对不可再生能源的依赖，保障了能源供应的可持续性。而且，在一些对环境质量要求较高的区域，如生态保护区附近的住宅建筑，地源热泵系统的应用可有效避免因传统能源系统运行带来的环境污染风险，保护周边生态环境，为生物多样性提供良好的生存空间，符合生态环保与资源循环利用的发展要求，对构建环境友好型住宅建筑具有重要意义。

三、不同条件下地源热泵系统运行策略

(一) 基于入住率的运行模式

在高入住率的住宅建筑中，地源热泵系统面临较大的负荷需求，需充分发挥系统各组件的协同作用以实现高效运行，应合理调配地埋管换热器的热量交换能力，确保从地下提取足够热量用于供暖或排出足够热量实现制冷。可通过增加循环泵的流量与扬程，保障载热介质在地下埋管与热泵机组间的快速循环，但需注意避免过高流量导致的能耗增加与管道磨损。对热泵机组的运行参数进行精细调整，依据不同季节与室内外温差，优化压缩机的转速与制冷剂流量，使热泵在高效工况点运行。

在夏季制冷高峰期，可结合冷却塔辅助散热，降低地埋管的热负荷，提高系统整体稳定性与制冷效率。借助智能控制系统，根据住宅各区域的实际使用情况，分区调节室内末端设备的供冷供热风量或水量，避免能源浪费在无人区域，实现精准供能，满足高入住率下多样化的舒适需求并降低能耗。

低入住率时，住宅建筑的热负荷需求大幅降低，地源热泵系统需采用适应性策略。可采用间歇运行模式，依据室内温度变化与预设阈值，灵活控制热泵机组与循环泵的启停。当室内温度接近舒适温度范围上限时停止运行，接近下限时启动，减少不必要的能源消耗。对于地埋管换热器，可适当降低循环介质流量，维持地下温度场的稳定，防止过度取热或排热造成地下温度失衡影响系统长期性能。在冬季低入住率情况下，若仅有部分区域有供热需求，可对该区域单独开启供热回路，关闭其他闲置回路，同时降低整体供热温度设定值，以匹配实际热负荷。利用先进的传感器与自控技术，实现对各房间或区域的实时监测与独立控制，确保系统在低负荷下仍能高效、稳定运行，避免因低入住率导致的系统效率低下与能源浪费，符合节能与精细化管理的发展理念。如图1所示：

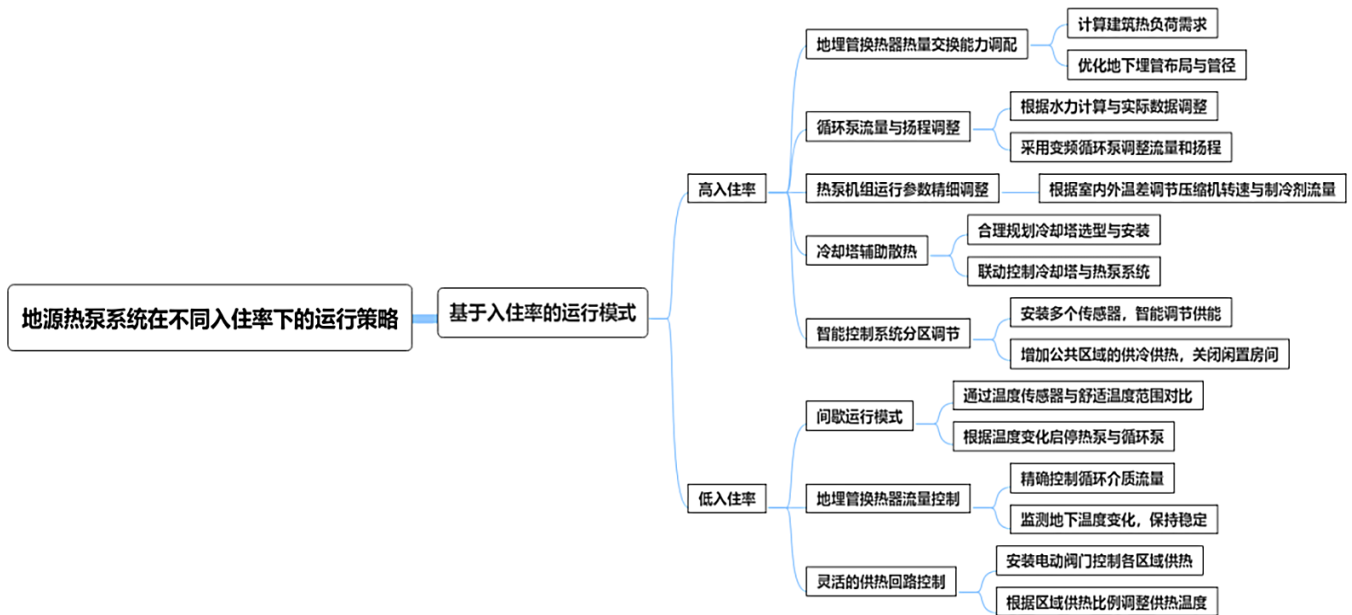


图1 地源热泵系统在不同入住率下的运行策略

(二) 特殊工况应对举措

在极端寒冷天气下，地源热泵系统面临严峻考验，为保障住宅供暖效果，要强化地埋管换热器的防冻保护措施。可在地埋管内注入防冻液，并实时监测防冻液温度与压力，确保其在低温环境下不结冰、不堵塞管道。调整热泵机组的运行模式，启用辅助加热装置，如电加热棒或燃气加热器，当热泵输出热量不足以满足室内需求时及时补充热量，确保室内温度稳定在舒适范围内。在极端炎热天气制冷时，优化冷却塔的散热性能，增大冷却塔的风量与水量，降低冷却水温度，提高热泵机组

的制冷效率。对室内末端设备进行风量或水量的动态调节，根据不同房间的朝向、隔热性能与人员活动情况，优先保障人员密集区域或隔热较差区域的制冷效果，通过智能控制系统实现精准分配冷量，以应对极端高温下的制冷需求，提升住宅在特殊气候条件下的居住舒适度与系统可靠性。

当面临电压波动时，系统中的关键设备如热泵机组与循环泵可能出现运行异常。为应对此情况，在设备选型时优先选用具有宽电压运行范围的产品，其内置的智能电压调节模块可在一定电压波动范围内自动调整设备

的工作状态,保障稳定运行^[3]。对于循环泵,可配备变频器,当电压降低导致泵转速下降时,变频器自动提升输出频率,维持泵的正常流量与扬程,确保地埋管与室内末端之间的热量传输不受影响。设置不间断电源(UPS)作为应急电源,在短暂停电时为控制系统与关键传感器供电,避免系统因突然断电而出现故障或数据丢失。

四、地源热泵系统现存问题探究

(一) 技术设计缺陷

不同地区地质条件差异巨大,而当前测试标准未充分考虑特定地质构造、地下水位变化以及岩土热物理性质的复杂多样性对测试结果的影响。在一些多岩石地层或高湿度土壤区域,传统测试方法难以准确获取真实的热交换数据。测试孔数量的确定也较为模糊,过少的测试孔会导致样本数据不具代表性,使得每延米换热量数据存在偏差,且对于这些数据是否需要修正以及如何修正缺乏明确的科学依据与操作指南。测试过程中仪器的制热及制冷功率以及地埋管换热器内的水流速度等关键参数的确定方法不够完善,易造成测试结果的误差与不确定性,进而影响整个地源热泵系统的设计精度与运行效率,不利于系统的大规模推广与优化升级,与精细化、科学化的工程设计理念相悖。地源热泵系统常出现能量平衡失调问题。许多项目初期由于打井规划不合理,地源井数量不足,在制冷制热运行时,无法从地下获取充足的冷热量。这导致热泵机组工作时长大幅增加,不仅降低了系统的整体能效,还造成电能消耗显著上升。尤其是在冷热负荷需求差异较大的地区,如夏季炎热冬季寒冷地区,能量供需矛盾更为突出。

(二) 设备运行隐患

地源热泵系统的部件质量问题不容忽视。地下换热器作为核心部件之一,若其质量不过关,如管材的抗压强度、耐腐蚀性能不足,在长期埋地运行过程中,容易出现漏水或损坏现象。这不仅会导致地源热泵系统的取热量大幅减少,影响正常的供暖制冷效果,还可能引发地下土壤污染等环境问题。循环泵、阀门等其他设备若选用质量低劣的产品,其密封性能、运行稳定性较差,会频繁出现故障,增加维修成本与系统停机时间^[4]。一些劣质循环泵可能存在叶轮平衡性差、轴承易磨损等问题,导致泵的流量与扬程不稳定,影响整个系统的热量传输效率,降低住宅建筑的舒适性与能源利用效率,不符合高品质、可靠运行的工程建设要求。当地自来水硬度较高时,热水侧换热器极易结垢。水垢的导热系数极低,会在换热器表面形成隔热层,严重影响换热效率。随着结垢程度的加重,换热器的传热阻力不断增大,需要消耗更多的能源来维持相同的供暖制冷效果,甚至可能导致换热器因局部过热或过冷而损坏。地埋管换热器在长期运行过程中,由于地下水水质复杂、微生物滋生等因素,可能会在管壁附着污垢、发生腐蚀等现象,降低其与土壤之间的换热能力。

五、地源热泵系统优化方案实施

(一) 技术规范完善

在岩土热响应测试方面,应建立基于不同地质类型的精细化工况模拟标准,综合考量地质构造、地下水位波动、岩土热物理参数的时空变化等因素,制定具有针对性的测试流程。明确测试孔数量确定方法,依据项目规模、地质复杂程度等指标,运用科学的统计分析手段确定合理的样本数量,确保每延米换热量数据的准确性与代表性。针对数据修正问题,构建基于大数据分析 with 物理模型验证相结合的修正模型,依据实际运行数据反馈,对测试数据进行动态修正。详细规定测试仪器的制热及制冷功率、地埋管换热器内水流速度等关键参数的校准方法与精度要求,提高测试结果的可靠性。

(二) 设备运维强化

针对部件质量瑕疵,建立严格的设备采购质量把控体系,优先选用符合国际标准、具有良好口碑与长期质保的品牌产品。对地下换热器等关键部件,加强原材料检验与成品质量检测,采用先进的无损检测技术,如超声波探伤、射线检测等,确保部件无缺陷出厂^[5]。在设备安装过程中,严格遵循施工规范,加强施工监督与质量验收,防止因安装不当造成部件损坏。对于换热效率衰减问题,制定定期的设备维护计划,采用化学除垢、物理清洗相结合的方法,定期对热水侧换热器与地埋管换热器进行清洗维护。利用环保型除垢剂去除水垢,采用高压水射流技术清除管壁污垢。建立换热效率监测机制,通过实时监测换热器进出口温度、压力等参数,及时发现换热效率下降趋势并采取相应措施。

结语

地源热泵系统于住宅建筑意义重大,虽具节能与环保优势,然其应用亦存挑战。从技术设计的测试规范漏洞与能量平衡失调,到设备运行的部件质量瑕疵与换热效率衰减等问题,均需重视。通过完善技术规范、强化设备运维等优化举措,有望提升系统性能。随着持续的探索与改进,地源热泵系统将为住宅建筑能源利用开辟更优路径,推动建筑行业绿色发展迈向新高度。

参考文献

- [1] 吴桂义. 住宅建筑的地源热泵系统节能设计研究[J]. 居舍, 2024, (07): 96-99.
- [2] 张雅奇, 王艳, 曹守凯. 住宅建筑地源热泵系统冷热源方案对比分析[J]. 四川建材, 2023, 49 (05): 238-240.
- [3] 张碧婷, 曲博, 梁江. 某住宅建筑地源热泵系统冷热源方案对比分析[J]. 制冷与空调, 2022, 22 (06): 68-72+78.
- [4] 张浩. 住宅建筑地源热泵+辐射空调系统运行策略优化研究[D]. 东南大学, 2022.
- [5] 刘佳露. 住宅建筑地源热泵-辐射供冷系统优化控制策略研究[D]. 长安大学, 2019.