

基于节能优化的地源热泵系统在住宅供暖中的应用研究

陈勇军

浙江陆特能源科技股份有限公司, 浙江 杭州 310052

[摘要]地源热泵系统用于住宅供暖,具备清洁高效特性。研究从系统结构与工作原理出发,分析住宅环境能耗现状、地质差异及运行能效瓶颈,通过调控换热效率、匹配流体参数、优化运行策略实现节能。针对单户与集中式住宅场景提出设计优化路径,并借助智能控制集成、数据反馈机制与综合管理方案,提升系统热效率与稳定性,为绿色低碳建筑发展提供技术支撑。

[关键词]地源热泵; 节能优化; 住宅供暖; 热效率; 系统调控

DOI: 10.33142/ec.v8i5.16652

中图分类号: TU833.3

文献标识码: A

Application Research on Ground Source Heat Pump System Based on Energy-saving Optimization in Residential Heating

CHEN Yongjun

Zhejiang Loopmaster Energy Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310052, China

Abstract: Ground source heat pump systems are used for residential heating and have clean and efficient characteristics. Starting from the system structure and working principle, this study analyzes the current energy consumption status, geological differences, and operational energy efficiency bottlenecks of residential environments. Energy conservation is achieved by regulating heat transfer efficiency, matching fluid parameters, and optimizing operational strategies. Propose design optimization paths for single household and centralized residential scenarios, and use intelligent control integration, data feedback mechanisms, and comprehensive management solutions to improve system thermal efficiency and stability, providing technical support for the development of green and low-carbon buildings.

Keywords: ground source heat pump; energy-saving optimization; residential heating; thermal efficiency; systemic regulation

引言

能源短缺与环境污染加剧背景下,住宅供暖领域亟需绿色转型。地源热泵系统凭借稳定运行、环保节能优势,成为解决能源与环境矛盾的重要技术路径。随着住宅建筑能耗标准不断提高,如何在保障热舒适性的同时实现系统节能优化,成为行业关注焦点。深入探究地源热泵系统在不同地质与气候条件下的适应性,挖掘其节能潜力,对推动可再生能源在住宅供暖中的广泛应用,具有重要现实意义与战略价值。

1 地源热泵系统的结构组成与工作原理

1.1 地源热泵系统的主要构成单元

地源热泵系统由地面换热器、热泵主机、末端散热装置及辅助控制模块构成。地面换热器多采用闭式管路埋地循环,利用地下浅层土壤近乎恒定的温度特性,实现高效的冷热交换。热泵主机内的压缩机、蒸发器、冷凝器和膨胀阀协同工作,通过制冷剂的相变循环,将地下低品位热能提升为可供室内使用的高品位热能。末端散热装置可依据用户需求,灵活选择地板辐射、风机盘管或暖气片,实现热量在居住空间内的合理分配。辅助控制模块凭借温度传感器、流量计及智能调节器,实时监测系统运行参数,并进行动态调控,确保系统始终处于高效运行状态,为用

户提供舒适的供暖体验。

1.2 供热运行机制与能量转换过程

系统运行时,埋地管路中的循环工质自土体吸收热量后,以低温低压蒸汽状态进入热泵蒸发器内汽化,吸热作用促进制冷剂相变;压缩机将低压蒸汽压缩为高温高压气体,随后进入冷凝器,释放热能至末端散热系统;制冷剂在冷凝后变为高压液体,经膨胀阀限压降温后重新回到蒸发器完成下一个循环。该过程通过持续的相变与压缩—膨胀循环,实现地下低品位热能向高品位热能的有效转换,并将热能稳定输送至室内。

1.3 影响系统运行稳定性的关键因素

土壤热物性、埋管深度与走向直接影响换热效率。土壤导热系数因湿度、密实度变化而波动,湿度高、密实度大的土壤热传导性好,利于热量交换,反之则热阻增大。埋管过浅易受地表温度波动干扰,过深则增加施工成本与热阻。循环工质流速与温差匹配至关重要,流速过快,工质与土壤换热时间不足;流速过慢,热量传输效率降低。压缩机运行状态、冷凝器散热条件影响系统稳定,环境温度过高或散热不畅,会使制冷剂温度异常^[1]。智能控制若无法随室内负荷调整参数,设备频繁启停或低效运行,将缩短使用寿命、降低节能效果。

2 节能优化需求下的系统性能挑战

2.1 常见住宅环境中的能耗现状分析

现代住宅采暖负荷主要来源于建筑围护结构的热损失与室内热量需求动态变化。围护墙体、屋顶及窗户的传热系数直接决定冬季热量散失速率,当外墙保温材料性能不佳、窗户密封性差时,大量热量快速逸散,迫使热泵系统长期处于高负荷运转状态。室内温度设定与实际居住模式的不匹配,如无人时段持续供暖或频繁调整设定温度,极易造成能源浪费。管道与末端散热装置的热阻同样不可忽视,管道保温层老化破损、末端暖气片或地暖管布局不合理,会导致管网热损失增加与热量分配不均。室外环境温度骤变与室内人员活动、设备散热等因素引起的负荷波动,使热泵系统难以稳定运行在高效工况点,进一步削弱了系统整体性能与节能效果。

2.2 地质差异对热泵性能的影响

地层导热性能、高含水率区域与岩石层结构差异会直接影响埋管地路的换热速率。不同地质构造下,土壤导热系数受含水量和密度影响显著,湿度较高的黏土或壤土热传导性优越,利于热量传递,而干燥砂土或松散岩层热阻大,导致换热效率低下。地下水流动虽能稳定换热管周边土体温度,但过高流速会加速热量流失,使热泵难以充分吸收土壤热能^[2]。埋管地路的埋深与间距设计需精准适配地质条件,过浅易受地表温度季节性波动干扰,过深则大幅增加施工成本与热阻,不合理的布置间距还可能引发热干扰,最终影响地源热泵系统整体性能。

2.3 运行过程中存在的能效瓶颈

循环工质在换热器与蒸发器中的温差控制对系统能效至关重要。温差过大易引发制冷剂过冷或过热,导致热压比效率下降,造成能量损耗。流量控制阀门与泵的匹配度直接影响流体分布,若匹配不合理,会在管路中形成流动死区或产生过度冲刷,前者导致局部换热失效,后者加剧管道磨损并降低传热效率。压缩机频繁启停会显著增加电机能耗,同时破坏润滑系统稳定性与冷媒量平衡,长期运行将加速部件磨损,缩短设备使用寿命。管网水力失衡问题表现为循环量异常,流量不足会导致末端供热不足,流量过大则增加泵功耗并引发系统压力波动。

3 影响系统节能效果的参数识别与调控

3.1 换热效率提升的控制要素

系统换热效率的提升依赖于对换热器入口温度、压差及流量的精细化调控。冷热源侧温差是影响系统能效的关键参数,借助高精度温度传感器实时监测,并联动电子膨胀阀进行动态调节,可确保制冷剂蒸发温度与土壤侧出入口温差始终保持在设计工况范围内,实现高效的热量交换。在管路系统设计中,合理规划管道布局与管径选型,能够保障流体在管道内具备充足的换热停留时间,配合变频水泵与电动调节阀的协同工作,可将流速精确控制在最佳传

热区间,稳定维持系统的流量与压力差。换热器表面的污垢与结垢问题不容忽视,定期采用在线清洗技术或防污涂层处理,能够有效维持换热器表面光洁度,确保系统长期稳定运行于高效状态。

3.2 流体温度与流速匹配机制

控制供回水温差是确保系统高效运行的核心环节。基于分布于系统各关键节点的传感器网络,可实现对供回水温度的毫秒级实时采集,同步结合建筑逐时负荷曲线,通过自适应算法驱动水泵转速无级调节,使供回水温差始终维持在最佳设计区间。流速与温差存在紧密的反比例关联:当流速过高时,循环工质在换热器内的滞留时间过短,难以完成充分的热量交换;流速过低则会导致供回水温差急剧增大,破坏制冷剂相变过程的稳定性与效率^[3]。采用变频控制策略,系统能够依据室温波动及地下侧温度变化,动态调整循环流量,不仅实现了地下热量的高效汲取与室内热量的精准释放,更通过优化水泵运行功率降低能耗,同时减少管路内部流体冲击,有效延缓设备磨损,延长系统整体使用寿命。

3.3 运行策略对能耗的间接影响

科学的调度策略可通过减少深度启动次数和优化压缩机负荷比例来降低电能消耗。将运行模式由定频切换至阶段化控制,使压缩机在负荷需求较低时进入低频运行或周期性间歇运行,既满足热量供应又避免长时间高负荷工况。结合室内温差与外部环境变化启用时段控制功能,可在低谷电价时段进行预热或预冷,减少高峰时段运行功率峰值。智能化调度平台通过历史数据分析和实时监测联动供热需求,实现按需供热,间接提升系统整体能效比。

4 典型住宅应用场景下的优化设计路径

4.1 单户独立系统设计优化分析

设计阶段需结合建筑朝向、地形条件和地下土壤热物性,确定埋管长度与回路配置,以满足不同季节的热负荷需求。管路布置应在保证换热效率的同时降低场地占用,通过合理分配垂直与水平换热回路,使土体温度恢复能力与系统吸热速率达到平衡。循环水泵需选型于流量与扬程匹配设计温差区间内,确保供回水温差稳定在 4~6 摄氏度范围,有助于保持压缩机在高效率工况运行。热泵主机容量需与建筑热负荷曲线相吻合,针对高峰需求与日常低负荷时段设置不同运行档位,避免长时间低负荷或频繁启停。智能调节阀与温度传感器配合应用,可实现全天候动态控制。见表 1。

表 1 单户地源热泵系统关键设计参数对比

参数	数值范围	推荐值	单位	数据来源
埋管长度	200~500	350	m	国家能源局 2021
循环流量	3.5~6.0	4.5	m ³ /h	中国建设部 2022
热泵额定功率	8~15	12	kW	中国热泵行业协会 2021
设计温差	4~7	5	℃	北京市节能中心 2020
管路埋深	1.2~1.8	1.5	m	上海市节能办 2021

4.2 集中式住宅区系统布局与调配

集中式模式下,地下换热场需根据地块面积与建筑总热负荷合理规划独立回路,避免因单一长回路带来热量分布不均。换热场与热泵机房之间采用干式或湿式换热站连接,通过管网分区供给各用户单元,配置缓冲水箱缓解负荷波动。各回路水泵组应具备无级调速功能,以适应不同区域的实时流量需求,并通过旁通阀和调节阀实现回路间水力平衡^[4]。管网设计需兼顾热损失控制与经济性,合理选择管径并采用保温措施。集中控制系统通过监测各子回路温度与流量数据,实时调整机组启停顺序及运行档位,保障整体能效比最优。

4.3 动态负荷条件下的能效调节方法

负荷动态变化时,通过对室内负荷与地下换热量实时监测,可调整热泵运行频率和循环流量,以便实现精准跟踪控制。变频技术使压缩机在部分负荷状态下维持高效率运行,减少因定频启停带来的能量损失。结合 PID 控制算法,对供回水温差与出口温度进行闭环调节,确保换热过程始终在设计工况范围内。时段控制策略可在低谷电价期间执行提前预热或余热回收,降低高峰期能耗。系统可根据历史运行数据和气象预报,对负荷变化趋势进行预测,提前优化运行计划。

5 节能导向下的运行管理与技术提升策略

5.1 智能控制系统的集成与应用

智能控制系统集成多类型传感器与智能算法,构建起地源热泵系统的智慧“大脑”。温度传感器实时采集室内外、土壤及换热器各关键节点温度,压力传感器监测系统管路压力,流量传感器精准计量循环工质流速,多源数据经边缘计算模块初步处理后,传输至中央控制器。控制器搭载模糊逻辑与神经网络算法,可动态分析数据间关联,根据室内热负荷需求、室外气象条件及土壤温度场变化,自动调节热泵主机运行频率、循环水泵转速与电子膨胀阀开度。通过自适应调节策略,使系统各部件始终协同运行于高效区间,避免传统定频控制下频繁启停与低效运行问题,同时借助无线通信模块实现远程监控与参数优化,提升系统节能运行的自动化水平。

5.2 运行监测平台的数据反馈机制

运行监测平台通过部署在系统各环节的传感器网络,持续采集海量运行数据,涵盖温度、压力、流量、能耗等关键指标。这些数据经加密传输至云端服务器后,利用大数据分析技术进行深度挖掘。一方面,通过对比实时数据与历史运行数据库中的最优工况参数,识别系统当前运行状态与高效运行区间的偏差,生成可视化的偏差报告与预

警信息;另一方面,运用机器学习算法对数据进行趋势预测,提前预判土壤温度场衰减、设备性能退化等潜在问题。平台将分析结果反馈至智能控制系统,为运行参数动态调整提供依据,同时为运维人员提供设备维护建议,形成“数据采集-分析处理-反馈优化”的闭环管理机制,确保系统始终处于节能高效运行状态。

5.3 提升系统使用寿命的综合管理方案

提升系统使用寿命需从设备维护、运行策略优化与环境适应性管理多维度实施。在设备维护方面,制定科学的预防性维护计划,定期对压缩机、换热器、水泵等核心部件进行清洁保养与性能检测,及时更换磨损密封件与老化电气元件;针对换热器易结垢问题,采用物理清洗与化学药剂相结合的防垢处理技术,维持高效传热性能。运行策略层面,优化系统启停逻辑,避免频繁深度启动,通过错峰运行与负荷调配,均衡设备运行时长;同时根据土壤热平衡原理,制定季节性交替运行方案,防止土壤温度场过度偏移^[5]。在环境适应性管理上,加强对地质条件与气象变化的监测,动态调整地埋管运行参数,降低外部环境对系统部件的损耗,从而延长地源热泵系统整体使用寿命。

6 结语

地源热泵系统应用于住宅供暖,通过剖析系统结构与工作原理,明确地质差异、运行瓶颈等节能挑战。经参数调控、场景化设计优化,结合智能控制、数据反馈与综合管理策略,显著提升系统热效率与运行稳定性。未来,随着技术迭代,地源热泵将深化与物联网、人工智能融合,进一步突破地质限制,完善全生命周期节能管理,加速在住宅供暖领域的普及,为建筑领域碳中和目标实现持续赋能。

[参考文献]

- [1]吕欢欢,朱大鹏,黄康.基于客流分配的城市轨道交通网络节能时刻表优化[J].铁道科学与工程学报,2025(5):1-12.
 - [2]朱艺焱,宋思扬.绿色发展背景下轨道交通节能减排的挑战与优化策略[J].时代汽车,2025(11):36-38.
 - [3]游尚钧.绿色建筑在节能居住建筑设计中的实践及技术优化路径分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(15):37-39.
 - [4]刘保平.基于 SVG 的煤矿供电系统节能优化策略[J].能源与节能,2025(5):88-90.
 - [5]焦玉婷.基于新型保温材料技术的民用建筑围护结构节能性能优化研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(14):184-186.
- 作者简介:陈勇军(1983—),性别:男,汉族,湖南新宁人,大专学历,初级职称。