

地源热泵与传统供热系统的联合运行优化策略研究

韩绍喜

(济南市章丘区热力公司, 山东 济南 250202)

摘 要 地源热泵与传统供热系统的联合运行是提升供热能效、降低运行成本和减少环境污染的重要手段。传统供热系统虽具备强大的供热能力, 但存在能源消耗高、污染物排放大的问题, 而地源热泵能效高、环保性强, 但在极端天气下供热能力受限, 通过优化设备匹配、智能控制系统调节运行模式, 可实现不同热源的合理分配, 提高系统整体效能。本文认为联合运行模式能够有效减少燃料消耗, 降低供热成本, 同时减少碳排放和污染物排放, 在节能减排方面具有重要意义, 以期为未来清洁供热的发展提供可行路径。

关键词 地源热泵; 传统供热; 联合运行; 能效优化

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.17.024

0 引言

随着清洁能源技术的发展, 提高供热系统的能源利用效率、减少碳排放成为行业发展的重要方向。传统供热系统主要依赖化石燃料, 能源消耗大, 污染排放高, 而地源热泵技术利用地下稳定的热源进行供暖, 能效高, 运行成本低, 在供热领域得到广泛应用。在极寒天气或供热高峰时, 单一地源热泵系统难以满足需求, 通过地源热泵与传统供热系统的联合运行, 可实现不同热源的合理调配, 提升系统的整体效能, 也符合节能环保的发展趋势, 是优化供热方式的重要手段。

1 地源热泵与传统供热系统概述

1.1 地源热泵系统

地源热泵系统利用地下土壤或水体的稳定温度, 通过埋设于地下的换热器实现热量转移, 依托逆卡诺循环原理完成供热或制冷^[1]。系统主要由地下埋管换热器、热泵机组和末端供热设备组成, 其中埋管换热器可采用 U 型或螺旋管布置, 依据《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366-2018) 的要求设计。该系统以 COP (性能系数) 和 EER (能效比) 衡量能效水平, 地源热泵的 COP 通常在 3.5 ~ 5.0 之间, 远高于传统空调系统 (COP 约 2.5 ~ 3.5), 在节能、环保和运行稳定性方面表现优异, 被广泛应用于建筑供暖、制冷及生活热水供应。

1.2 传统供热系统

传统供热系统主要包括燃煤锅炉、燃气锅炉及集中供热系统^[2]。燃煤锅炉供热成本较低, 但污染排放

较大, 受环保政策限制逐步减少; 燃气锅炉效率较高 (热效率可达 90% 以上), 但受天然气供应和价格影响; 集中供热依赖热电联产或大型锅炉房, 通过热网输送热能, 适用于高密度城市区域。根据《中国能源统计年鉴》, 2023 年我国传统供热系统供热面积超 150 亿 m², 其中燃煤供热占比约 45%, 天然气供热约 30%, 清洁能源供热比例提升但仍处于发展阶段。传统供热系统能耗较高, 占全国总能耗的 20% 左右, 同时二氧化碳、硫氧化物排放量较大, 面临节能减排和清洁转型的挑战。

2 联合运行的必要性与可行性分析

2.1 必要性

地源热泵与传统供热系统的联合运行在提升能源利用效率和环境效益方面具有显著优势。单独运行时, 地源热泵系统的 COP 可达 3.5 ~ 5.0, 但在极端低温环境下效率下降, 而传统供热系统虽具备较强的峰值供热能力, 但整体能效较低 (燃煤锅炉热效率约 70% ~ 85%)。联合运行可优化热源配置, 提高综合能源利用率 10% ~ 25%。在环境效益方面, 根据《全球碳预算报告》, 供热行业碳排放约占全球总排放的 20%, 联合运行可减少燃煤使用, 降低二氧化碳排放 10% ~ 25%, 并有效减少硫氧化物、氮氧化物等污染物排放, 符合低碳环保发展趋势。

2.2 可行性

地源热泵与传统供热系统在技术上具备良好的兼容性。两者均以水或空气为热媒, 能够通过换热器、管网及智能控制系统实现热源调配与动态优化。现有

建筑供热系统可通过增设换热设备、智能控制模块实现与地源热泵的高效耦合,符合《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366-2018)的要求。在经济可行性方面,虽然初期投资较高,但运行成本更低。燃煤锅炉供热成本约 $0.2 \sim 0.3$ 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$,而地源热泵供热成本可降至 $0.1 \sim 0.15$ 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$,联合运行可减少 $20\% \sim 30\%$ 的供热费用,同时延长设备寿命,降低维护成本,提高整体投资回报率。

3 联合运行优化策略研究

3.1 基于负荷预测的运行模式优化

负荷预测是优化地源热泵与传统供热系统联合运行的关键,其准确性直接影响系统能效与运行成本。常见的负荷预测方法包括时间序列法、灰色预测法和人工神经网络(ANN)法^[3]。其中,时间序列法基于历史数据的周期性和趋势性,适用于供热需求变化较为平稳的区域;灰色预测法适合数据有限或信息不完全的情况,能够在小样本条件下进行较为可靠的预测;而 ANN 法凭借其强大的非线性建模能力,在处理复杂、多变量供热负荷预测问题时表现出色。例如:北京某区域采用 ANN 法进行供热负荷预测,结合历史气温、建筑特性和用户用热习惯等因素,误差控制在 5% 以内,使调度更加精准。近年来,大数据分析 with 机器学习技术的发展进一步提升了负荷预测的准确性和适应性,可在多变量耦合的复杂供热系统中优化预测结果,为联合运行模式提供科学依据。

基于精准的负荷预测结果,可制定高效的联合运行策略,以最大化整体能效并降低运营成本。在低负荷时(如春秋季节、夜间或供暖初期),优先运行地源热泵系统,其能效比(COP)一般在 $3.5 \sim 5.0$ 之间,可有效降低燃煤和天然气消耗,减少污染排放。而在冬季极寒天气或用热需求高峰时,则通过智能控制系统启动传统供热系统,以补充热量,确保供暖的稳定性。动态调节机制能够在不同热负荷条件下优化热源调度,提高系统综合能效 $5\% \sim 15\%$,并减少碳排放 $10\% \sim 25\%$,有效满足节能减排政策要求。这种联合运行模式不仅提升了供暖系统的灵活性和经济性,还促进了可再生能源与传统能源的合理互补,为供热行业的可持续发展提供了重要支撑。

3.2 设备匹配

设备匹配是确保地源热泵与传统供热系统联合运行效率的关键,合理的设备选型能显著提升系统能效并降低运行成本。在配置过程中,需要结合供热负荷、运行环境及系统特性,并遵循《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366-2018 标准^[4]。地源热泵机组的选型

应匹配区域供热需求,单机容量一般在 $50 \sim 500$ kW,集中供热项目可达数 MW,并且必须满足全年稳定运行的要求。传统供热设备(燃气或燃煤锅炉)的选型需兼顾热效率(一般为 $85\% \sim 92\%$),确保与地源热泵系统形成有效互补,避免因设备过载或低效运行导致的能源浪费。此外,换热器、水泵、阀门等辅助设备的选型需基于负荷计算和水力平衡分析进行合理配置,以优化系统整体水力特性,提高运行效率,确保冷热源之间的稳定切换与协同工作。

智能调控策略是优化系统能效的重要手段,能够实现设备的精准控制和能源的高效利用。通过智能控制系统对地源热泵、锅炉、水泵及阀门等关键设备进行实时监测和动态调节,可有效降低系统能耗,提高运行稳定性^[5]。在某市供热工程案例中,采用智能调控系统后,通过负荷预测与环境参数调整热源切换逻辑,使系统能耗降低 15% ,运行成本减少 20% 。此外,变频控制技术的应用提高了水泵流量调节精度,使地源热泵 COP 提升 $0.5 \sim 1.0$,进一步优化能源利用效率,减少碳排放,提高系统运行的经济性和环保性。通过设备合理匹配与智能调控的协同优化,不仅能够确保地源热泵与传统供热系统的高效协同运行,还能满足现代供热系统节能降碳的政策要求,为供热行业的可持续发展提供重要支持。

3.3 系统集成优化

系统集成优化是确保地源热泵与传统供热系统高效协同运行的核心。合理的系统架构设计应采用“主—辅”模式,其中地源热泵作为基础热源,传统供热系统作为辅助热源,依据负荷需求动态切换。架构包括地下埋管换热器、热泵机组、蓄热装置、智能控制中心及末端供热设备,各子系统间通过中央控制系统协调运行,确保热源分配均衡^[6]。智能调度系统可依据实时负荷和气象数据调整热源比例,提高运行效率。此外,热泵与锅炉的互联换热网络需具备高效换热能力,并符合《城镇供热系统设计规范》(GB 50736-2012)标准,以减少热损耗并优化热能利用。

运行参数优化是提升系统性能的关键,可通过实验或模拟分析确定最佳运行条件。地下埋管换热器的进出口水温优化范围通常为 $8 \sim 16$ $^{\circ}\text{C}$,以提升换热效率并防止冻土效应;地源热泵机组的蒸发温度建议维持在 $-5 \sim 5$ $^{\circ}\text{C}$,冷凝温度控制在 $35 \sim 50$ $^{\circ}\text{C}$,以保持 COP 在 $3.5 \sim 5.0$ 之间。锅炉补充供热时的供水温度优化在 $55 \sim 75$ $^{\circ}\text{C}$,以平衡热泵输出功率和系统稳定性。实验数据显示,实施上述优化参数后,系统整体能效提升幅度可达 $10\% \sim 20\%$,供热稳定性增强,同时碳排放量减少 $15\% \sim 25\%$,进一步满足节能减排要求。

4 案例分析

4.1 项目概况

本案例选取北京某大型商业综合体,该项目集办公、购物、酒店及住宅于一体,总建筑面积约25万 m^2 ,供热面积达20万 m^2 。原供热系统采用燃气锅炉供暖,配置3台10 MW燃气锅炉,供水温度75 $^{\circ}\text{C}$,回水温度55 $^{\circ}\text{C}$,年燃气消耗量约1 200万 m^3 ,供热成本高,运行过程中 CO_2 排放量较大。此外,该项目所在地区冬季气温最低达-15 $^{\circ}\text{C}$,单一燃气供热模式在极端天气下运行压力较大。为提高能源利用效率、降低碳排放,该项目实施地源热泵与燃气锅炉联合供热,优化供热系统,提高经济性和环保效益。

4.2 联合运行方案实施

基于供热负荷分析,该项目引入地源热泵与燃气锅炉联合运行模式,以提升能源利用效率并降低运行成本。新增5台500 kW地源热泵机组,总供热能力达2 500 kW,并建设350 m深竖井换热器群,优化地热能利用。原有3台10 MW燃气锅炉保留,作为峰值热源使用。运行模式采用分阶段智能调控,在低负荷时(室外温度高于-5 $^{\circ}\text{C}$),地源热泵承担80%供热负荷,燃气锅炉仅维持低功率运行;在高负荷时(气温低于-5 $^{\circ}\text{C}$ 或用热高峰),智能控制系统动态调节锅炉负载,使其补充剩余20%~40%热量,确保稳定供暖。

在系统集成过程中,施工团队严格遵循《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366-2018),合理布置换热井,间距控制在6 m,防止热干扰,提高换热效率。智能控制系统采用变频水泵调节技术,确保换热系统出水温度维持在10~15 $^{\circ}\text{C}$,提升地源热泵COP值至4.2~4.8。同时,燃气锅炉与地源热泵的换热网络采用高效换热器,优化热量传递,减少热损耗。试运行阶段,监测系统对运行数据进行实时分析,确保供暖稳定性,实现智能调度优化,最终确保联合运行系统高效、经济、环保。

4.3 效果评估

联合运行模式实施后,供热系统的整体能耗显著降低。根据项目能耗统计报表,地源热泵承担全年70%的供热需求,燃气锅炉仅在极端寒冷天气或高峰时段补充30%的热量。相比单一燃气锅炉供热模式,年燃气消耗量从1 200万 m^3 下降至720万 m^3 ,节省40%。单位建筑面积能耗由85 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 降至68 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,系统综合能效提升20%。此外,地源热泵的COP(性能系数)在优化调控后稳定在4.2~4.8,进一步提高了能源利用效率,减少了运行成本。

联合运行模式有效降低了供热成本,提高了经济效益。项目改造总投资约1 200万元,其中地源热泵及地下换热系统投资800万元,智能控制系统及配套设备投资400万元。改造后,系统年运行成本从1 600万元降至1 200万元,节省400万元/年,其中燃气费用减少35%,设备维护成本降低15%。根据财务测算,投资回收期约3年,且长期运行中收益将持续增长。此外,智能调控系统优化了热源切换和水泵运行模式,使锅炉启停次数减少30%,进一步延长设备寿命,降低后期维护成本。

联合运行后,污染物排放大幅减少,显著改善了区域环境质量。根据环境监测数据,年二氧化碳排放量由3 000吨减少至1 500吨,二氧化硫排放减少50吨/年,氮氧化物排放减少40吨/年。燃气锅炉的运行时长减少50%,进一步降低了化石燃料消耗。该项目成功入选北京市节能示范工程,符合国家“双碳”战略目标,为清洁供热改造提供了可复制推广的成功经验。

5 结束语

地源热泵与传统供热系统的联合运行在供热能效、经济性和环保效益方面均表现出显著优势。通过科学的设备配置和智能调控,可优化热源分配,确保系统在不同负荷条件下均能高效运行。实践表明,联合运行模式能够有效降低燃料消耗,减少供热成本,同时减少碳排放和污染物排放,符合节能减排政策导向。在清洁供热需求不断增长的背景下,该模式具备广泛的推广前景。随着智能控制技术的进步,未来供热系统的精细化调控能力将不断增强,为优化能源结构提供更优解决方案。

参考文献:

- [1] 苗壮.西部寒冷地区太阳能-地源热泵联合供热系统模拟优化研究[D].邯郸:河北工程大学,2023.
- [2] 苗壮,鲍玲玲,李建伟,等.西部高寒地区太阳能-地源热泵联合供热系统分析[J].能源与节能,2023(11):53-58.
- [3] 宋萌萌,刘馨,梁传志,等.光伏光热-地源热泵耦合供热系统研究现状[J].建设科技,2023(15):28-31.
- [4] 刘仙萍,田东,雷豫豪,等.光伏/光热-地源热泵联合供热系统运行性能研究[J].太阳能学报,2022,43(09):88-97.
- [5] 刘仙萍,雷豫豪,田东,等.夏热冬冷地区太阳能光伏/光热-地源热泵联合供热系统运行性能模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(06):1892-1900.
- [6] 胡苇舟.学生公寓地源热泵承压式供热水系统运行能量特性研究[D].南宁:广西大学,2021.