

建筑生活热水系统节能技术路径比较与案例研究

夏远玲

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i6.4839

[摘要] 本文系统梳理了当前主流的生活热水系统节能技术路径,包括高效热源技术(空气源热泵、太阳能热水、地源热泵、燃气冷凝锅炉)、智能控制策略(变频控制、分时分区、用水预测)以及系统集成优化方法(多能互补、余热回收、管网优化)。通过建立综合评价指标体系,从能效、经济性、环境影响、适用性四个维度对各类技术路径进行横向比较。研究表明:单一技术路径难以满足复杂多变的用热需求,多能互补与智能化控制是未来发展的核心方向;在夏热冬冷地区,太阳能-空气源热泵复合系统具有显著的综合优势;而在高密度、高可靠性要求的商业建筑中,燃气冷凝锅炉结合余热回收技术则展现出良好的适应性。

[关键词] 生活热水系统; 节能技术; 多能互补; 空气源热泵; 太阳能热水

中图分类号: TU822 **文献标识码:** A

Comparison of Energy-Saving Technology Paths and Case Studies for Building Domestic Hot Water Systems

Yuanling Xia

Xinjiang Production and Construction Corps Survey, Design and Research Institute Group Co., Ltd.

[Abstract] This paper systematically reviews current mainstream energy-saving technology paths for domestic hot water systems, including high-efficiency heat source technologies (air source heat pumps, solar water heating, ground source heat pumps, gas condensing boilers), intelligent control strategies (variable frequency control, time-of-use zoning, water usage prediction), and system integration optimization methods (multi-energy complementarity, waste heat recovery, pipeline network optimization). By establishing a comprehensive evaluation index system, a horizontal comparison of various technology paths is conducted across four dimensions: energy efficiency, economic feasibility, environmental impact, and applicability. The research indicates: a single technology path is insufficient to meet complex and variable heating demands, and multi-energy complementarity combined with intelligent control is the core direction for future development; in regions with hot summers and cold winters, solar-air source heat pump hybrid systems demonstrate significant comprehensive advantages; while in commercial buildings with high density and high reliability requirements, gas condensing boilers integrated with waste heat recovery technology show good adaptability.

[Key words] Domestic Hot Water Systems; Energy-Saving Technology; Multi-Energy Complementarity; Air Source Heat Pump; Solar Water Heating

引言

在全球气候变化加剧与能源安全挑战并存的背景下,节能减排已成为各国共识。建筑领域作为能源消费大户,其运行阶段的能耗占全社会终端能耗的比重超过20%,其中生活热水系统的能耗不容忽视。据住房和城乡建设部相关统计,在居住建筑中,生活热水能耗可占到总能耗的20%以上;在酒店、医院、学校等公共建筑中,该比例甚至高达30%~40%。传统的生活热水系统多依赖电热水器或燃气锅炉,存在能效低、碳排放高、运行成本高

等问题。近年来,随着可再生能源技术、高效热泵技术及智能控制技术的快速发展,建筑生活热水系统的节能路径日益多元化。然而,面对纷繁复杂的技术选项,如何科学选择、合理配置并实现最优运行,成为工程实践中亟待解决的关键问题。

1 建筑生活热水系统主要节能技术路径

1.1 高效热源技术

1.1.1 空气源热泵热水系统(ASHP)

空气源热泵利用逆卡诺循环原理,从环境空气中吸收低品

位热能,通过压缩机做功提升为高品位热能用于加热水。其核心优势在于能效比(COP)高,通常可达3.0~4.5,即消耗1kW电能可产生3~4.5kW的热能,远高于电热水器(COP≈1)。在环境温度不低于-5℃的地区,其全年综合能效表现优异^[1]。但其性能受环境温度影响较大,在严寒地区需考虑辅助热源或低温型机组。

1.1.2 太阳能热水系统(SWH)

太阳能热水系统利用集热器将太阳辐射能转化为热能,直接加热生活用水。其最大优势是运行成本极低且零碳排放。根据循环方式可分为自然循环和强制循环;根据集热器类型可分为平板型和真空管型。然而,其供能具有间歇性和不稳定性,阴雨天或冬季需配备辅助热源(如电、燃气或热泵),系统初投资较高,且对建筑屋顶面积和朝向有一定要求。

1.1.3 地源热泵热水系统(GSHP)

地源热泵利用地下土壤或地下水作为稳定热源/热汇,通过埋管换热器提取热量用于制备热水。其COP通常高于空气源热泵(可达4.0~5.5),且全年运行工况稳定。但其初投资巨大,需较大的地下空间进行钻孔或埋管,适用于有充足土地资源的新建大型公共建筑或住宅区^[2]。

1.1.4 燃气冷凝锅炉

传统燃气锅炉排烟温度高(>150℃),大量潜热未被利用。冷凝锅炉通过降低排烟温度(<60℃),使烟气中的水蒸气冷凝,回收潜热,热效率可达98%~108%(按低位热值计算)。其响应速度快、占地面积小、适合高负荷需求场景,但依然依赖化石燃料,碳排放强度高于可再生能源系统。

1.2 智能控制与运行优化策略

现代生活热水系统的节能潜力很大程度上依赖于先进的智能控制与运行优化策略。变频控制技术通过调节水泵与风机的转速,使其输出功率与实际热负荷动态匹配,有效避免了传统定频系统“大马拉小车”造成的能源浪费。尤其在部分负荷工况下,变频调速可显著降低输配环节能耗。分时分区控制则基于不同建筑功能区域的用水规律差异,实施差异化供水策略。例如,学生宿舍在夜间可适当降低供水温度设定值,办公建筑在周末可关闭非必要区域的热水供应,从而减少无效加热与待机热损失。更进一步,借助历史用水数据与机器学习算法,系统可对短期用水行为进行预测,并据此提前优化热源启停时间、蓄热水箱充放策略及回水循环启停逻辑,实现从“被动响应”向“主动预判”的转变^[3]。此外,依托物联网平台构建的远程监控与故障诊断系统,能够实时采集温度、压力、流量、能耗等关键参数,及时识别异常运行状态并发出预警,不仅提升了系统可靠性,也为持续优化运行策略提供了数据支撑。

1.3 系统集成与余热回收技术

多能互补系统通过将两种或多种热源有机耦合,实现优势互补。例如,“太阳能+空气源热泵+燃气锅炉”组合可在晴好天气优先利用免费太阳能,在阴雨或低温时段自动切换至热泵供热,极端工况下再启用燃气锅炉作为兜底保障,既提升了可再生能源利用率,又确保了供水可靠性。类似地,“燃气锅炉+热泵”

混合系统可在电价低谷时段利用热泵蓄热,在高峰时段由锅炉快速响应,实现运行成本最小化。余热回收则是能源梯级利用的重要体现。建筑内部存在大量低品位废热资源,如空调系统冷凝热、数据中心服务器散热、厨房排烟余热等。通过设置换热装置,这些废热可用于预热生活给水,大幅降低主热源的加热负荷。例如,在设有中央空调的酒店中,夏季制冷产生的冷凝热可全部用于生活热水制备,实现“免费热水”。此外,管网系统的优化设计同样不可忽视。采用同程式布置可平衡各支路水力工况,减少局部过热或欠热;加强管道保温可有效抑制热损失;而回水循环泵配合定时或温控启停策略,则能在保证用户即开即热体验的同时,避免长时间循环造成的能源浪费与水资源损耗。

2 节能技术路径综合评价体系构建

前述章节系统梳理了建筑生活热水系统的三大类节能技术路径——高效热源技术、智能控制策略以及系统集成与余热回收手段。然而,面对多样化的技术选项,如何科学、全面地评估其适用性与综合效益,成为工程决策的关键难题。单一指标(如COP或初投资)往往难以反映技术在真实场景中的全貌,尤其在“双碳”目标与高质量发展背景下,需统筹能效、经济、环境与适用性等多重目标。因此,亟需构建一套结构清晰、覆盖全面、可操作性强的综合评价体系,为不同气候区、建筑类型及资源条件下的技术选型提供量化依据。基于此,本文构建了一套包含四个一级指标与十二个二级指标的综合评价体系。

能效性能:聚焦能源转换与利用效率,包括年综合COP/热效率、节能率及热损失率;

经济性:涵盖全生命周期成本视角,涉及初投资成本、运行维护成本与投资回收期;

环境影响:响应绿色低碳导向,考量碳排放强度、可再生能源利用率及噪声与视觉影响;

适用性:强调落地可行性,评估气候适应性、建筑类型匹配度及空间与安装条件约束。

该评价体系不仅整合了技术本身的物理特性,也纳入了外部环境与用户需求因素,旨在实现从“技术可行”到“场景适配”的跨越。下文第3章将基于此框架,对各类节能技术路径开展多维度横向对比,揭示其优势边界与适用情境,为差异化、精准化的系统设计提供支撑。

3 节能技术路径多维度对比分析

3.1 能效性能维度对比

在能效性能方面,各类技术的根本区别源于热力学路径。空气源热泵通过逆卡诺循环提取环境空气中的低品位热能,其制热性能系数(COP)受环境温度显著影响——在夏热冬冷地区年综合COP可达3.5以上,但在严寒气候下若无低温强化措施,COP可能降至2.0以下,整体能效大幅削弱。太阳能热水系统直接利用太阳辐射加热水体,运行阶段几乎无二次能源消耗,但其供能具有天然间歇性,阴雨或冬季常需辅助热源,导致全年平均能效波动较大。地源热泵依托地下岩土体温度的稳定性,大幅减小热力学循环温差,年综合COP通常达4.0~5.0,能效表现最为平稳。燃

气冷凝锅炉虽通过回收烟气潜热将热效率提升至98% - 108% (按低位热值计), 但其本质仍为化石燃料的单向燃烧, 一次能源利用效率低于高效热泵。相比之下, 多能互补系统通过智能调度, 在高辐照时优先用太阳能、低谷电价时蓄热、极端工况启用锅炉, 实现动态最优能效, 体现出系统集成的优越性。

3.2 经济性维度对比

经济性决定技术的市场可行性, 需从全生命周期成本视角审视。地源热泵初投资高昂, 主要源于钻井与埋管成本, 在城市密集区实施难度大, 回收期普遍较长; 太阳能热水系统设备成本适中, 但对屋顶面积和结构有要求, 在高密度建筑中经济性受限; 空气源热泵因标准化程度高、安装便捷, 初投与运行成本较为均衡, 在多数适宜气候区具备良好回报; 燃气冷凝锅炉虽初始投入较低, 但受天然气价格波动影响显著, 长期经济性不确定性增加。多能互补系统虽初期投入较高, 但通过能源协同可降低年度能耗支出, 并提升可靠性以减少运维损失, 全生命周期经济性可能更优。此外, 峰谷电价政策、气电比价及补贴机制亦会显著影响不同技术的经济竞争力。

3.3 环境影响维度对比

环境影响维度的重要性在“双碳”战略背景下日益凸显。碳排放强度成为衡量技术绿色程度的核心指标。空气源热泵的碳足迹主要取决于电力来源——在煤电占主导的电网结构中, 其减排效益有限; 但随着可再生能源发电比例提升, 其运行碳排放可趋近于零。太阳能与地源热泵在运行阶段基本实现零碳排放, 尽管其设备制造、运输与安装过程存在隐含碳排放, 但从全生命周期看仍显著优于化石能源系统。燃气冷凝锅炉即便热效率高达108%, 每立方米天然气燃烧仍产生约1.9千克二氧化碳, 且甲烷泄漏等上游排放未被充分计入, 其碳锁定风险不容忽视。更进一步, 可再生能源利用率不仅关乎碳减排, 也体现能源安全与可持续性。太阳能与地热能属于本土化、分布式的清洁能源, 其高比例应用有助于降低对外部能源的依赖。而多能互补系统通过最大化可再生能源消纳比例, 同时保留化石能源作为应急兜底, 既提升了系统韧性, 又兼顾了环境目标, 代表了过渡期与中长期并重的务实路径。此外, 噪声污染、视觉干扰及土地占用等非碳环境影响, 虽常被忽略, 却直接影响用户接受度与城市生态协调性, 亦应纳入综合环境绩效评估体系。

3.4 适用性维度对比

气候条件是首要筛选因子: 太阳能热水在西北、华南等高辐照地区优势明显, 其中新疆南疆 (如喀什、和田) 年日照时数超

过2800小时, 太阳辐射强、晴天多, 是太阳能热水系统的理想应用区域; 而北疆 (如乌鲁木齐、阿勒泰) 冬季寒冷漫长、阴雪天气较多, 辐照资源相对较低, 系统效能受限。同样, 四川盆地等多云寡照区域, 太阳能热水系统全年产热稳定性较差, 效能大打折扣。空气源热泵在长江流域等冬季温和地区表现良好, 但在东北、西北严寒地带 (包括北疆) 需谨慎评估其低温适应性, 部分机型在-15℃以下制热效率骤降甚至停机。地源热泵对地质条件高度敏感, 砂质土壤导热性差、岩石层钻孔成本高, 均可能制约其应用, 尤其在新疆部分地区存在高矿化度地下水或冻土层, 进一步增加系统设计与施工难度。建筑类型同样关键: 住宅类建筑用水集中、有夜间低谷蓄热窗口, 适合配置蓄热水箱与热泵组合; 酒店、医院等24小时连续用热场景, 则对供水可靠性提出极高要求, 燃气锅炉或多源冗余系统更具优势; 学校、办公楼等具有明显作息规律的建筑, 则可通过分时控制大幅削减无效能耗。此外, 物理空间限制亦不可忽视——超高层建筑屋顶面积有限, 难以支撑大规模太阳能集热; 老旧城区地下管线密集, 地源热泵施工风险高; 小型商业体机房狭小, 可能仅容单一热源设备。因此, 任何技术路径的适用性都必须置于具体项目语境中加以审视, 脱离场地条件谈技术先进性并无实际意义。

4 结语

本文系统梳理了空气源热泵、太阳能、地源热泵、燃气冷凝锅炉等主流技术路径, 并构建了涵盖能效、经济、环境与适用性的综合评价体系。研究表明: 在夏热冬冷地区, 太阳能-空气源热泵复合系统兼具高效能与良好经济性; 在高可靠性要求的商业建筑中, 燃气冷凝锅炉结合余热回收技术具有独特优势; 而在寒冷地区, 低温空气源热泵配合智能控制亦能实现显著节能。未来, 多能互补、智能控制与全生命周期优化将是建筑生活热水系统节能发展的必然方向。建议在工程实践中坚持“因地制宜、系统集成、智慧运维”的原则, 推动建筑热水系统向更高效、更清洁、更智能的方向持续演进。

[参考文献]

- [1]王岩, 李晓峰, 毕姗姗, 等. 寒冷地区既有建筑生活热水节能改造探讨[J]. 建筑节能 (中英文), 2022, 50(06): 109-113.
- [2]赵铨, 王睿, 王耀堂, 等. 建筑集中生活热水水质保障与节能节水关键技术[J]. 给水排水, 2024, 60(01): 81-85.
- [3]潘善伟, 俞肖铭, 董涛, 等. 医疗建筑生活热水供给系统节能管控路径及措施研究[J]. 建筑节能 (中英文), 2023, 51(9): 69-72+113.