

既有建筑暖通系统改造中的能耗降低技术应用

冯 探

石家庄市建筑设计院有限责任公司，河北 石家庄 050000

[摘要]随着能源危机来袭且环保意识增强，使得建筑领域将既有建筑暖通系统的节能改造当作重要研究方向，文章对此进行了系统分析。此文先分析既有暖通系统能耗特点并点明其能耗高、效率低、控制落后等问题，接着详细讨论既适用又有建筑暖通系统改造的关键技术，如热源系统方面有锅炉替换改造、热泵技术应用、分布式能源系统，输配系统方面有变频技术应用、管网平衡与保温优化，末端设备方面有高效末端设备替换、辐射供暖、制冷技术应用，智能控制系统方面有楼宇自控系统、智能分户计量与调节、需求侧响应技术等，之后以三个典型案例分析不同类型建筑的改造效果，结果显示科学合理地选择技术与集成系统，能使既有建筑暖通系统改造后能耗降低 15%~40%，并且室内舒适度也得以提升，经济效益和环境效益都很显著。最后，针对中国既有建筑暖通系统改造实践，文中提出技术选择策略与实施路径建议，为推动既有建筑节能改造提供理论依据和技术参考。

[关键词]既有建筑；暖通系统改造；能耗降低；节能技术；系统优化

DOI: 10.33142/ucp.v2i6.18568 中图分类号: TU83 文献标识码: A

Application of Energy Consumption Reduction Technology in the Renovation of Existing Building HVAC Systems

FENG Tan

Shijiazhuang Architectural Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the outbreak of the energy crisis and the increasing awareness of environmental protection, the energy-saving renovation of existing building HVAC systems has become an important research direction in the field of construction. This article provides a systematic analysis of this. This article first analyzes the energy consumption characteristics of existing HVAC systems and points out their problems of high energy consumption, low efficiency, and outdated control. Then, it discusses in detail the key technologies that are applicable to building HVAC system renovation, such as boiler replacement and renovation, heat pump technology application, and distributed energy system in the heat source system, frequency conversion technology application, pipe network balance and insulation optimization in the transmission and distribution system, efficient end equipment replacement, radiation heating and cooling technology application in the terminal equipment, and building self-control system, intelligent household metering and regulation, demand side response technology in the intelligent control system. Finally, three typical cases are used to analyze the renovation effects of different types of buildings. The results show that scientifically and reasonably selecting technology and integrated systems can reduce energy consumption by 15% ~ 40% after the renovation of existing building HVAC systems, and improve indoor comfort, with significant economic and environmental benefits. Finally, in response to the practice of retrofitting HVAC systems in existing buildings in China, the article proposes technical selection strategies and implementation path suggestions, providing theoretical basis and technical reference for promoting energy-saving retrofitting of existing buildings.

Keywords: existing buildings; HVAC system renovation; energy consumption reduction; energy-saving technology; system optimization

引言

全球能源消费中建筑能耗占比相当重要，国际能源署（IEA）最新统计数据表明，全球终端能源消费中建筑领域能源消费占比约为 36%且二氧化碳排放量贡献率达近 40%，中国全国总能耗中建筑能耗占比大概 30%且有逐年上升之势，2019—2023 年中国建筑能耗年均增长率一直在 4.5%左右，并且建筑总能耗里暖通空调系统能耗占比为 50%~60%，所以暖通空调系统是建筑节能的重点领域，在中国现有的大约 600 亿 m² 的既有建筑里面大部分建筑暖通系统的建设标准低且设计和设备都比当下节能标准

差很多，所以这些地方能耗降低的空间很大。

既有建筑暖通系统存在能耗高、效率低、控制落后等普遍问题，很多既有建筑以传统燃煤或者燃气锅炉充当热源，能源利用效率低且污染物排放多，并且不少既有暖通系统是定流量运行模式，不能依据实际负荷需求调整运行参数而造成能源严重浪费，此外系统输配环节存在管网失衡、保温不够等问题使热能传输时损失大，而且传统暖通系统缺少智能控制手段，精细化管理和个性化调节难以实现从而舒适度和节能性难以兼顾，不过 2020 年发布的《中国建筑节能与绿色建筑发展报告》称科学改造既有建筑暖

通系统后能耗能降低 15%~40%，每年可节省大概 1.5 亿吨标准煤并减少大约 4 亿吨二氧化碳排放。

“碳达峰”“碳中和”的双碳目标大背景下，我国要实现能源战略转型，推动既有建筑暖通系统节能改造是重要途径，这几年国家接连出台《建筑节能与绿色建筑发展“十四五”规划》《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》之类的政策文件，明确指出要加强既有建筑节能改造并推广可再生能源在建筑中的应用，而且热泵技术、变频控制、智能调节这些暖通先进技术发展很快，给既有建筑暖通系统改造带来好多技术选择，也让节能改造的经济性、可行性提高不少，所以本研究打算系统分析不同类型建筑的改造效果，给出技术选择策略和实施路径建议，为推动既有建筑暖通系统节能改造提供理论依据和技术参考。

2 既有建筑暖通系统改造的关键技术

2.1 能源监测与评估系统

既有建筑暖通系统改造以能源监测与评估系统为基础且是其前提，通过全面精准地监测分析建筑能耗能识别出能源浪费之处并确定改造重点，还能给改造后效果评估提供数据方面的支撑，现代能源监测与评估系统大体包含能耗数据采集设备、数据传输网络、数据存储与分析平台这三部分，近期研究表明全面使用能源监测与评估系统能让建筑识别出 15%~25% 的节能潜力且系统自身投资的回收期一般在 1~3 年。

表 1 建筑暖通系统能源监测关键指标及评估标准

监测指标	评估标准	应用领域	监测频率	数据精度要求
能源利用效率 (EUI)	<120kWh/m ² 年(公建) <65 kWh/m ² 年(住宅)	整体能效评估	月/年	±3%
系统能效比 (COP/EER)	冷水机组 COP>4.5 热泵 COP>3.0	制冷/供暖设备	日/周	±2%
输配系统能效 (kW/RT)	<0.35kW/RT(水系统) <0.9kW/RT(风系统)	泵/风机系统	小时/日	±5%
部分负荷性能 (IPLV)	>5.2(离心机) > 4.5(螺杆机)	主机性能评估	季节性	±3%
系统运行时间 (小时)	根据实际需求优化	运行策略评估	实时/日	±0.5h
温度分布均匀度 (℃)	变化<±1.5 ℃	舒适度评估	实时/小时	±0.5 ℃

在既有建筑改造中应用的能源监测与评估系统主要历经四个阶段，即基准线建立、能耗诊断分析、改造方案确定以及效果验证，在基准线建立阶段，系统会收集不少于 12 个月的能耗数据以构建建筑能耗基准模型，并且在能耗诊断分析阶段，借助对比分析、趋势研究等方法找出能源浪费之处并算出节能潜力，而在改造方案确定阶段，系统能够给出不同技术方案的节能效果预估和

经济效益分析，到了效果验证阶段，依靠测量与验证（M&V）方法评估改造的实际节能成效，2020—2023 年的研究表明，2020—2023 年的研究显示，既有建筑改造项目若采用科学的能源监测与评估流程，节能目标实现率达传统方法的 20%~30% 之高且投资回收期可缩短 15%~25%。

2.2 暖通设备高效替换技术

既有建筑暖通系统改造中，暖通设备高效替换为核心环节，以新型高效低耗设备替换原有低效设备后，系统整体能效就能直接提升^[1]。设备高效替换主要涉及热源系统、输配系统和末端系统这三个方面，在热源系统上，近几年高效锅炉、热泵系统和分布式能源系统被广泛应用，有数据表明，把传统燃气锅炉换成冷凝锅炉，热效率能提高 15%~20%，使用空气源热泵系统，节能效果比传统电加热系统好 60%~70%，而在合适的地方用上地源热泵，能耗还能降低 40%~50%。

在输配系统中，应用变频技术于改造是成本效益相当不错的措施之一，因为研究显示把固定频率的水泵、风机改成变频控制的，在部分负荷下运行时电能消耗能节省 30%-50%，而且管网平衡优化一般跟变频改造一块做就能有效解决大多数既有建筑都有的“冷热不均”问题。末端系统里，高效风机盘管和辐射供冷/供热系统正在慢慢替代传统末端设备，由于新型风机盘管的效能比传统设备要高 20%~30% 且辐射供冷、供热系统和传统对流式系统对比起来能耗能降 15%~40% 并且热舒适度还能提高。

近期技术发展趋势表明，设备高效替换朝着集成化、智能化、模块化发展，像集成式热泵系统、一体化能源站这类产品能简化改造施工流程且能让工期缩短 30%~50%，而智能自适应控制系统与高效设备深度结合后可使设备运行状态得到实时优化，模块化设计让设备更新更灵活从而可根据负荷变化调整扩容，2021—2023 年间的很多案例研究表明，使用前述高效替换技术的既有建筑改造项目平均能使暖通系统能耗降低 25%~35% 且投资回收期为 3~6 年。

2.3 智能控制与管理系统集成

既有建筑暖通系统改造中，智能控制与管理系统的集成是核心部分，可使系统运行达到智能化且管理变得精细，中国建筑科学研究院 2023 年调研的数据表明，有智能控制系统加持的既有建筑暖通系统比传统控制方式平均节能 18%~25%，智能控制系统集成建筑自动化系统(BAS)、能源管理系统(EMS) 和物联网(IoT) 技术后，暖通设备就能协同控制、运行优化并被远程监管，像先进的预测控制算法会依据气象预报、建筑使用规律、能源价格等多方面数据预先调整系统运行参数，在确保室内舒适度的同时达成最优能耗。

近年来,管理系统集成方面的建筑能源大数据分析技术在云平台上有了显著进展,并且2022年发布的《建筑节能与可再生能源利用通用规范》明确规定新建和改造建筑需用智能化手段进行能源监测与管理,将分散的暖通子系统数据整合于统一平台后用人工智能算法分析,就能实现设备故障预警、能效实时评估以及运行策略优化,华东建筑设计研究院2021年的实践表明,在大型公共建筑暖通系统改造时,智能控制与管理系统集成不仅能额外降低8%~12%的能耗,而且投资回收期一般在3~5年,技术经济性良好^[2]。

3 典型案例分析

3.1 公共建筑改造案例

在某个省会城市有一栋2005年建成的政府办公大楼,其建筑面积大概35,000m²,2021年对该大楼的暖通系统进行了节能改造,改造之前大楼用的是传统的中央空调系统,包含两台500RT定速离心式冷水机组、四台固定速度的冷却水泵与冷冻水泵、风冷热泵供暖系统以及定风量空气处理系统,这系统的运行能效低下的问题很明显,大楼每年每平米能耗高达198千瓦时,比现代同类建筑标准高多了,并且室内舒适度也不好,各个区域温差还很大。

全面的技术方案被采用,其中涉及三个关键方面,一是热源系统更新,原来的机组被两台350RT高效变频离心机组取代且COP从4.2提高到6.5,原热泵供暖系统变为地源热泵系统并且供暖COP从2.8上升至4.3。二是输

配系统优化,全部水泵换成变频水泵并进行了水力平衡调试,风系统改造成能风量系统且新增加了用CO₂浓度传感器来控制新风量的装置。三是智能控制系统升级,安装了基于云平台的楼宇自控系统从而实现了设备运行参数优化、系统联动控制以及能耗的实时监测。

建筑暖通系统经改造后性能显著提升,数据监测结果显示改造后的首年暖通系统能耗就下降了35.8%降到127kWh/m²且室内温度均匀性提高了大约60%、用户满意度也从72%上升到93%,经济分析表明项目总投资大概620万每年能节省能源成本约145万投资回收期约为4.3年,这个案例成功的关键是系统性的改造思路,不但替换了核心设备而且优化了系统控制策略还构建起了完善的监测评估体系,项目施行时采用分阶段改造的方式从而最大程度地减少了对正常办公的干扰,这给同类公共建筑的改造提供了一个有价值的参照。

3.2 居住建筑改造案例

某北方城市有一2000年建成的住宅小区,有8栋建筑且总建筑面积约6.5万m²,该小区于2022年对集中供暖系统做了节能改造,改造之前小区供热靠市政热网,热力入口只设了简易混水装置,各个楼栋竖向供热不均衡而且没有热计量收费系统,所以供热质量差、居民投诉不断并且能源浪费很严重,监测数据表明供热季平均能耗是32千克标准煤当量每平方米,比当地同类建筑平均水平高25%^[3]。

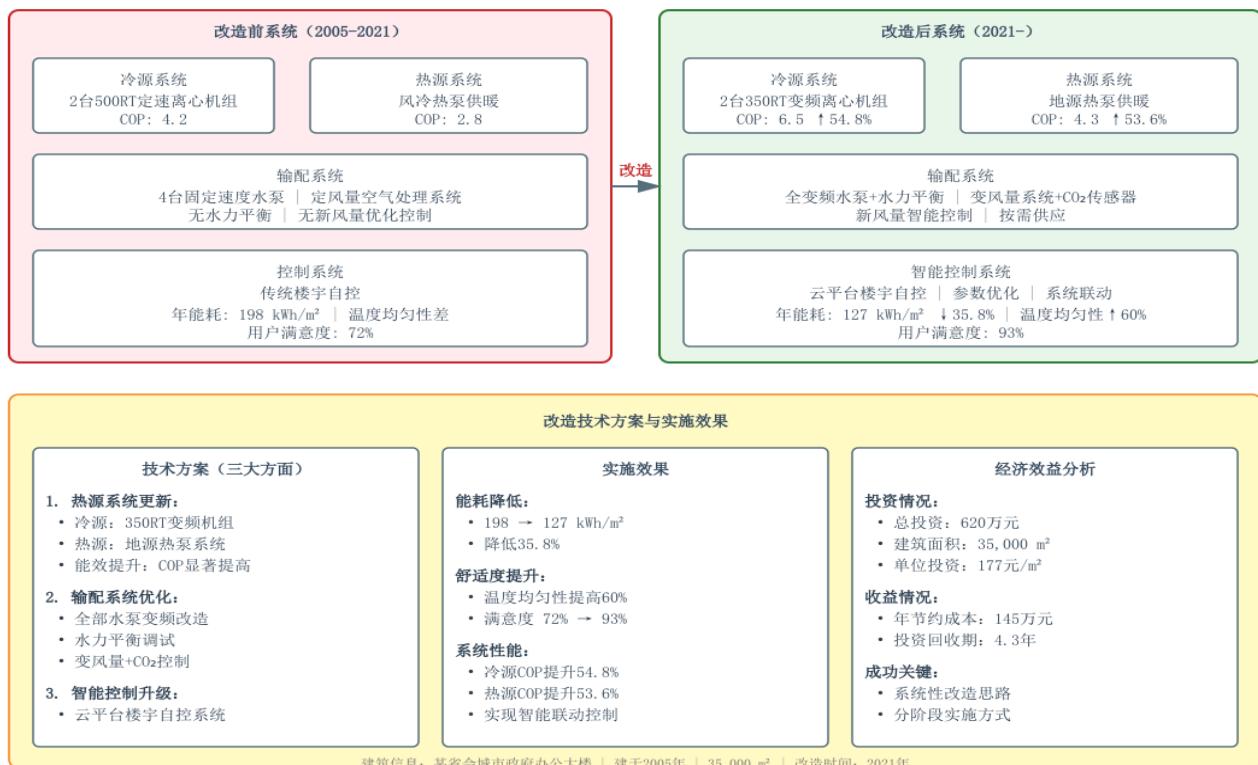


图1 暖通系统改造前后架构对比

改造工程主要采用了三项技术措施，其一是在小区设置智能换热站以代替原来的简易混水系统，从而让供水温度可随室外温度自动调节，其二是全面调试试管网系统并安装动态平衡阀和压差控制器来解决水力失调问题，其三则是安装包含超声波热量表、智能温控阀和室温采集终端的分户热计量系统，这样居民就能按需调节室内温度并依据实际用热量付费。

监测数据显示，改造后的首个供暖季，小区供热能耗降至 $23.5\text{kgce}/\text{m}^2$ ，较之前大幅降低了 26.6%，楼内温度均匀性明显提高，原本最冷与最热房间温差在 $4\sim6^\circ\text{C}$ 之间，现在则降到了 $1\sim2^\circ\text{C}$ ，而且居民投诉率大减，下降了 78%，用户满意度上升至 92%，改造项目总共投了大概 520 万，每年能节省大约 125 万的能源成本，若算上政府补贴，投资回收期约为 3.5 年。

这个案例取得成功是因为它重视技术和管理两手抓，在技术方面改造时充分考量既有系统的特性并运用合适的技术有针对性地进行改进，而在管理方面改造之后引进“按需供热、按量收费”的机制让居民节能的积极性被调动起来，并且项目采用“能源托管”模式由专业公司负责系统的运维和能效管理从而保证改造效果能够持续，另外改造的时候还很看重居民的沟通参与工作借助住户代表会议、宣传培训等手段提升用户的接受程度，这给类似居住建筑的改造提供了一个可供借鉴的做法。

4 节能效果评估与经济性分析

4.1 节能潜力量化方法

要量化既有建筑暖通系统改造的节能潜力得用科学合理的评估方法，所以本研究建立了一个基于能耗基准线比对的量化评估框架，其中确定改造前基准能耗、预测节能量以及验证实际节能效果是三个关键步骤。首先，要通过分析历史能耗数据、做实地测试或者能耗模拟来确立改造前建筑的能耗基准线，并且一般需要收集连续三年的能耗数据以消除气候和使用模式波动带来的影响。其次，要用国际节能效果评估规程（IPMVP）里的选项 C 或者 D 方法预测节能量，这两种方法能将建筑实际运行数据和暖通系统特性参数相结合^[4]。最后，用像 $\text{kWh}/\text{m}^2 \text{年}$ 这样的标准化能耗指标验证改造效果，拿 2020—2023 年的改造项目数据来说，既有建筑暖通系统经综合技术改造后，公共建筑能耗可降低 $15\%\sim40\%$ ，住宅建筑节能率达 $20\%\sim35\%$ ，不过具体数值跟改造深度、建筑类型和气候区域关系很大。

4.2 投资回收期与经济效益分析

既有建筑暖通系统节能改造投资回收期在 $2\sim8$ 年之间，这取决于改造技术类型、建筑类型以及能源价格等因素，中国建筑节能协会 2021 年数据表明，锅炉系统替换投资回收期大概 $3\sim5$ 年、变频技术应用回收期是 $1.5\sim3$ 年、热泵技术回收期为 $4\sim7$ 年，从经济效益看，北方有

个办公建筑改造投入资金约 120 万，每年可节约运行费用大概 35 万，投资回收期 3.4 年，改造后 5 年累计净收益达 55 万，并且 2022 年发布的《全国既有建筑节能改造白皮书》数据说明，暖通系统节能改造不但能降低建筑运营成本，而且可提升资产价值 $5\%\sim12\%$ ，还会产生显著社会效益，例如减少碳排放、改善空气质量、提高用户舒适度等，这些间接效益无法准确计算但在促进建筑可持续发展上意义重大。

5 结论

本研究经系统分析得出如下结论：对于建筑高能耗这一问题，既有建筑暖通系统的改造是个有效解决途径，因为综合运用热源系统优化、输配系统改进、末端设备更新以及智能控制系统升级等技术后，能耗能降低 $15\%\sim40\%$ 。2019—2023 年建筑节能改造项目的数据显示，暖通系统改造于建筑总体节能的贡献率达 $35\%\sim50\%$ ，所以这是建筑节能改造的重点领域。而案例分析也进一步证明，改造要成功关键在于技术和系统的集成选取得科学合理，并且像热泵技术、变频技术、智能控制系统这些新兴技术一应用，不但能耗大大降低、室内舒适度提高，而且经济效益和环境效益都相当显著。

我国既有建筑暖通系统改造实践推荐采用分阶段且系统化的改造策略，优先选取投资回报期短、节能效果佳的技术措施，并且要依据建筑类型、气候区位、使用特性等因素制定不一样的技术选择策略与施行途径^[5]。这几年建筑能效标准一直在提高，到 2023 年我国大型公共建筑暖通系统改造市场规模达到 600 亿，每年增长率为 15% 还多，可见其市场潜力与发展前景之大。往后随着数字化技术、可再生能源技术和暖通系统深度融合，既有建筑暖通系统改造会向着更智能、更绿色、更集成的方向发展，这对达成“碳达峰、碳中和”目标很有裨益。

【参考文献】

- [1] 崔少华,付素娟.被动式低能耗建筑节能技术在既有居住建筑节能改造中的应用[J].建设科技,2017(11):31-33.
- [2] 葛召深,王静.被动式超低能耗建筑保温系统在既有改造项目中的应用研究[J].建筑技术,2018(4):10-12.
- [3] 郝亮,时鹏.既有公共建筑中央空调系统节能改造技术现状及应用[J].节能,2024(8):128-130.
- [4] 陈颖,裴浩斐,商佳祺,等.光伏耦合相变蓄热技术在低能耗建筑供暖系统中的应用[J].能源研究与管理,2022(3):98-103.
- [5] 路国忠,邓瑜,郑学松,等.玻璃棉板外保温系统在既有建筑节能改造中的应用技术研究[J].墙材革新与建筑节能,2016(1):67-73.

作者简介：冯探（1991.4—），毕业院校：石家庄铁道大学，所学专业：建筑环境与设备工程，当前就职单位：石家庄市建筑设计院有限责任公司，职称级别：高级工程师。