

碳排放背景下暖通空调系统的能源转换与减排研究

刘双婷¹ 冯志²

1.河北建筑设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

2.中国电子系统工程第四建设有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]暖通空调系统是建筑物领域碳排放的重要源泉之一, 系统的能源转换性能高低影响了“双碳”目标能否顺利推进。本文探讨了影响暖通空调系统碳排放的主要因素以及系统内涉及的相关高效率冷热源技术、余热回收利用、可再生能源集成应用以及能量存储控制等能源转换的核心技术, 并在此基础上提出了减少碳排放的改进方案以及系统的综合调控方式。结果表明, 暖通空调系统可以通过多种形式能源相互配合, 逐级使用的方式达到提高能效和减碳的目的, 从而为低能耗建筑的发展提供技术支持以及思路借鉴。

[关键词]暖通空调; 碳排放; 能源转换; 热泵技术; 余热回收; 蓄能调节

DOI: 10.33142/ect.v4i9.20484

中图分类号: TU83

文献标识码: A

Research on Energy Conversion and Emission Reduction of HVAC Systems under Carbon Emission Background

LIU Shuangting¹, FENG Zhi²

1. Hebei Institute of Architectural Design & Research Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

2. The Fourth Construction Co., Ltd. of China Electronics System Engineering, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: HVAC systems are one of the important sources of carbon emissions in the building industry, and the energy conversion performance of the system affects whether the "dual carbon" goal can be smoothly promoted. This article explores the main factors affecting carbon emissions in HVAC systems, as well as the core technologies involved in energy conversion such as high-efficiency cold and heat source technologies, waste heat recovery and utilization, integrated application of renewable energy, and energy storage control within the system. And based on this, improvement plans to reduce carbon emissions and comprehensive control methods for the system were proposed. The results indicate that HVAC systems can improve energy efficiency and reduce carbon emissions by coordinating various forms of energy and using them step by step, providing technical support and ideas for the development of low-energy buildings.

Keywords: HVAC; carbon emissions; energy conversion; heat pump technology; waste heat recovery; energy storage regulation

引言

建筑行业作为全球能耗和碳排放的“大户”, 占全球能源消耗的 30%~40%、温室气体排放的 30%。据《2024 中国城乡建设领域碳排放研究报告》显示, 我国建筑领域消耗我国能源消费总量的 44.8%, 其中, 公共建筑所消耗能源量占整个建筑能耗的 36.43%, 而暖通空调系统则由于常年运作、大负荷运转, 其消耗了建筑总能耗的近 50%, 是建筑领域节能减排的核心点。就单个公共建筑能源消耗及二氧化碳排放来看, 在既有公共建筑中, 围护结构节能减碳能力影响着建筑能耗或者二氧化碳排放占比达 25%~35%, 而供暖通风空调系统的占比更是达到 35%~

45%, 两者相加超过 80%。2025 年底, 生态环境部、住房和城乡建设部共同发布了《温室气体自愿减排项目方法学 既有公共建筑围护结构与供暖通风空调系统能效提升 (CCER-06-001-V01)》。这是国内首次为公共建筑围护结构及供暖通风空调系统能效改造编写的方法学, 不仅有利于促进公共建筑节能降碳, 还有利于提高整体建筑能效、降低二氧化碳排放水平, 在推动城乡建设领域实现碳达峰碳中和方面意义重大, 在这种背景下进行暖通空调系统的能量转换原理及减碳机制的研究显得尤为重要。

1 暖通空调系统节能减排的重要性

暖通空调系统的节能减排不仅仅是一项技术挑战, 也

是一项与国家能源政策、应对气候变化相关的重大战略任务。就能源消耗比例而言，建筑运营阶段消耗大约占全社会能源消耗总量的 20%，随着城市化进程推进、人们生活质量提高，建筑领域能耗将会继续增加。暖通空调系统是建筑能耗的大头，节能空间很大。从碳排放量的组成而言，空调采暖系统的碳排放主要分为间接排放和直接排放两类：间接排放是指用电加热产生空调运转所耗电量；直接排放主要是因为制冷剂泄露、检修和拆除造成的碳排放。围护结构保温隔热性能提高与采暖通风空调系统的改造是公共建筑节能减碳改造的有效技术手段，节能减碳贡献率达到近 80%，因此加强运行能效改善以及制冷剂控制的双管齐下，就是减少暖通空调碳排放量最为有效的方式。暖通空调设备是建筑耗能量最大的部分，它的能效高低决定了整个建筑能耗及碳排放的多少。因此，同步推进运行能效提升与制冷剂管控，是降低暖通空调系统碳排放最具实效的路径。

2 暖通空调系统碳排放影响因素分析

暖通空调系统碳排放受到多重因素综合影响，可以从设备能效、运行方式、制冷剂种类、电源结构以及系统设计五大方面来探究。设备能效是最根本的原因之一，制冷主机的 COP 越大，则运行过程中的间接碳排放就越少；如果存在大量老旧低效设备，那么就会使整个系统的间接碳排放大大增加。运行方式的影响也不容小觑，室温设置数值大小、开机时间长短以及非满载状态下的调控方案都对最终的实际耗电量有着决定性的作用。空调系统的碳足迹主要包括间接和直接两类，减少空调系统碳排放的技术途径主要有以下几种：减小系统制冷供热需求量、增强系统的运行效率、开发并运用各类可再生资源并增强系统的

“灵活性”、选择使用低 GWP 值的制冷剂等。制冷剂种类的影响非常独特，传统制冷剂如 R410A 的 GWP 值大于 2000，一旦发生微小泄漏就会造成严重的温室效应^[1]，空调机组及其所使用的制冷剂大约占到了世界温室气体总量的 3%左右。占世界总能耗的 7%左右，而电网结构又直接决定了我们的间接碳排放量大小，电网中可再生能源的比例越大相同设备运行时的碳排放就越少。除此之外系统的设计是否合理也是影响着能耗水平高低的因素之一，比如冷热源配比是否合适，管网水力平衡情况如何，控制方式是否高效等等这些因素都是从最开始就确定了系统的节能潜力大小。

3 暖通空调系统能源转换关键技术

3.1 高效冷热源系统技术

高效冷热源系统是暖通空调能源转换的核心环节，其能效水平直接决定建筑能耗与碳排放。常见的高效技术包括：热泵技术、磁悬浮离心式冷水机组、吸收式制冷及蒸发冷却。双源耦合热泵系统制热季节性能系数 COP 达 6.05，较传统系统能效提升 31%；磁悬浮离心式冷水机组以电磁悬浮实现转子无接触运转，能耗仅为传统机组的 2%，实测节能 51%~63%；吸收式制冷可回收 60~100℃ 工业低品位余热，电量仅为输出冷热量的 1%；蒸发冷却技术在重力或动力作用下利用自然冷源实现冷却，每千瓦负载年节能 0.163 万度电。各技术核心要点汇总于表 1。

热泵技术是暖通空调系统进行能源转化的基础保障。热泵设备具有高效率的能源转化功能，能够以较少的能量消耗把低位热能提升为高位热能，从而满足了生活生产中的供热需求，节约了能源消耗。不同种类型的热泵适用场合及性能各不相同，如表 2 所示。

表 1 高效冷热源系统技术对比

技术类型	核心优势	典型能效指标
热泵技术	供热制冷一体化，低温衰减减小	制热 COP6.05
磁悬浮冷水机组	无油零摩擦	能耗为传统 2%，节能 51%~63%
吸收式制冷	余热驱动，电耗极低	电量占输出冷热量的 1%
蒸发冷却	自然冷源，水为制冷剂	0.163 万度电/kW 年

表 2 常见热泵类型性能对比

热泵类型	热源/热汇	平均 COP 范围	性能稳定性	适用气候	典型应用场景
空气源热泵 (ASHP)	室外空气	3.5~4.5	受室外气候影响大，低温下 COP 下降	夏热冬冷、寒冷地区	住宅供暖制冷、公共建筑热水
地源热泵 (GSHP)	土壤/地下水	4.5~5.5	非常稳定，全年波动小	各类气候区	医院、学校、办公楼集中供暖
水源热泵 (WSHP)	地表水/地下水/再生水	4.0~5.5	较稳定，水质影响设备寿命	靠近水源的区域	污水源热泵站、河流取热项目
吸收式热泵	燃气/余热	1.2~1.8	稳定	各类气候区	工业余热回收、CCHP 系统

以北京为例, 冬季土壤温度大多维持在 $10^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 之间, 而空气温度则有可能降到零度以下, 此时的地源热泵系统的制热 COP 可以达到 $3.5\sim 4.5$, 相比之下空气源热泵的 COP 只有 $2.5\sim 3.5$, 地源热泵系统寿命长, 其地埋管换热器可使用超过五十年, 国家标准《基于项目的温室气体减排量评估技术规范建筑热泵系统》已经向社会征集意见, 作为对热泵项目碳减排量统计的技术参考。

3.2 余热回收与能量梯级利用技术

回收余热工艺使原本被弃置的废热变成了可以二次应用的能量, 是提升系统整体效能的有效方式, 在大型公建领域如空调排风热回收、数据中心机房服务器余热供暖、冷水机组冷凝热回收等技术日渐完善。

中建三局大厦通风工程安装热回收机组, 在夏天可借助室内与室外空气对流传来减少制冷负担, 电梯增设势能回收装置, 在下落过程中回收势能并储存起来用于需要的时候将势能转换成电能加以利用, 总共节电率可达 25%。

江森自控为助力甘肃打造首个污水源热泵集中供热示范工程, 项目一期每小时能够回收余热量约为 37.65MWh, 一个采暖期能够实现回收低品位热量约为 27.3 万 GJ, 在年耗电 184 万 kWh 的情况下相当于节约标准煤 9330t, 减排二氧化碳 3.2 万 t。

在能量梯级利用上, 高温能用于发电或驱动吸收式制冷, 中低温能用于供暖或预热生活热水。德州平原县西区城市洁净热源替换项目创造性运用“直供换热+热泵升压”的二级利用方法, 地热井开挖深度为 1500m, 抽取温度为 56°C 的地热水经过板式换热器直接供暖之后, 将 38°C 余热水进行热泵二次吸热处理, 降至 16°C 全部回注地下^[2]。

3.3 可再生能源耦合技术

单独一种可再生能源很难做到全年建筑冷热两用, 多种能源配合是最有效的解决方法, 其中太阳光能与地源热泵的配合最有代表性: 太阳光发的电驱动热泵工作, 地源热泵借助浅层地热能作为稳定的冷热源, 做到太阳光发的电与供暖制冷的全面配合。

山东长岛“地热+”多能互补零碳示范工程项目的“地热+”多能互补能源供给系统, 完成了 54 个钻孔的钻探, 钻探深度达到 3599m, 地下埋设双 U 型管道 14396m, 为 1730.9m^2 的建筑物提供零碳供暖和制冷; 配备 26.45kWp 光伏发电设备, 利用绿色电力带动地源热泵工作, 年均节省标煤量达 10.08t、减排二氧化碳量达到 26.15t。

太阳能光伏空调系统是实现建筑“自发自用、零碳制冷”的关键技术之一。该系统将光伏组件与直流变频空调

直接耦合, 光伏直流电驱动压缩机运行, 避免交直流转换损失, 系统综合能效可提升 $15\%\sim 20\%$ 。在日照与制冷负荷同步性高的建筑(如写字楼、商场、医院)中, 光伏空调可显著减少市电消耗。实测数据显示, 在夏热冬冷地区, 一套 5 匹光伏直驱空调年发电量约 4500kWh, 可满足自身用电量的 $70\%\sim 85\%$, 多余电力可并网或储存。与“光伏板+普通空调+逆变器”的常规方案相比, 集成式光伏空调省去了逆变器与电网交互环节, 初投资回收期可缩短至 5~7 年。该技术尤其适用于偏远无电地区及白天冷负荷集中的公共建筑, 是可再生能源与暖通空调深度耦合的重要发展方向。

3.4 蓄能技术与负荷调节技术

储能技术通过“削峰填谷”的方式对整个电网进行空间上的转换, 可以节省运行费用的同时还可以给可再生能源接入提供柔性支撑。

在济南中央商务区, 践行绿色低碳理念, 试行集中供冷模式。自 2023 年试运行以来, 该模式已覆盖近 21万 m^2 的用户。系统利用南部能源中心, 通过与冬季供热共用的一套管网输送冷冻水, 为办公楼、酒店、商业综合体等公建用户供冷, 利用济南的“峰谷电价”政策, 在晚上低谷电价的时候存储冷水用于白天使用。该模式减少了用户侧制冷设备占地和噪音, 降低了整体能耗和碳排放, 用户可按需使用、按量计费, 每年大约能够节省 12 万 t 碳排放。在冬天的时候, 输送冷冻水的供冷管线“变身”为供暖管线, 章丘电厂的 110°C 热水通过 43.8km 的管道可以直接输送到济南中央商务区。广州大学城区域集中供冷是我国最早投入运行的区域集中供冷项目之一, 具有重要的示范意义。项目采用“电制冷+冰蓄冷”的方式, 有效地实现了电力的“削峰填谷”, 近十年来转移峰时电量达到 6 亿瓦时, 节电 1.2 亿瓦时, 相当于节约标煤近 4 万 t, 减少二氧化碳排放量约为 11 万 t^[3]。和水蓄冷相比占用空间小得多, 比冰蓄冷也更加节电。潜热制冷装置可与自动化控制系统深度集成, 在负荷预测的基础上动态调整蓄放冷策略: “白天电价高峰时优先释放储存冷量, 减轻电网负荷; 在电网发出需求响应信号时, 还可主动降低主机功耗或切换至储能模式, 为系统提供柔性调节能力。这不仅是‘削峰填谷’的深化, 也为未来建筑空调体系融入虚拟电厂、实现源荷互动开辟了可行路径。”

世界第一座超阶“零碳”大厦特来电总部基地项目在山东青岛成功落成, 于 2025 年 8 月 24 日正式启用。该建筑超越传统零碳建筑仅依赖屋顶光伏的模式, 除了光发电

之外,大厦通过“光伏+梯次储能+电动汽车放电”三重系统实现100%绿电自给自足,不取电网一度电。绿电的消纳,每年能节约2500t的碳排放。通过数字化大幅度降低了建筑投资成本约20%~30%,运营效率提高了30%,用能成本节约了大概30%。

4 暖通空调系统减排优化策略

暖通空调系统的减碳增效要着眼于整个暖通空调系统的生命周期,在设备端首先使用高效制冷主机(例如磁悬浮离心机、变频热泵等),杜绝低效主机的长时间运行造成碳排放的累积;紧跟能效新国标,逐步淘汰低效产品并推动高效热泵以及磁悬浮等产品的研究开发及应用;探索使用天然冷媒的方式;中期(2025—2035年间),围绕系统集成和智能管控进行,以“设备+系统+AI”的一站式综合方案为客户提供最大的价值;运行层面,执行精细化控制措施,比如设置温湿度最佳值,调整流量大小,分区域供热等等。越来越多的暖通空调系统装有人工智能加强式控制系统以及监测系统,这些设备给提高建筑效率,改善居住环境,以及达成可持续发展目标带来更多的机遇。在制冷剂运用上,需要尽快退出HFCs类高GWP制冷剂,并应用R290、R32、CO₂等低GWP工质作为替代。努力到2030年把重点热泵产品的能效指标提高20%以上;研发大功率高温热泵、高效压缩机以及新型制冷剂等相关技术。另外,积极引导具备条件的存量公共建筑围护结构及供暖通风空调系统节能改造项目参加国家温室气体自愿减排交易市场获取节能量收入,用碳交易所得资金补偿节能改造投入,构建市场激励机制下的节能减排良性循环,在系统整合上,对热泵系统以及余热收集网、可再生能源设施、储能系统进行耦合化的设计,实现多种能源形式之间的互为补充提高综合效率。

5 暖通空调系统能源转换与减排综合模式构建

暖通空调系统的能源转化及降碳不是简单的单体技术堆砌,而是一个由“源-网-荷-储”协同构成的整体化工作机制,在“源”侧,采用热泵技术结合空气源、地源、水源、废热等低位能热源,形成多元化的供热方式;在“网”边,通过智能控制系统把各个耗能末端相连通,可以采集到实时数据并进行解析以及调整;在“荷”的部分,应用了负荷预测以及灵活性调节手段使得整个系统的工作曲线能自行适应负荷变化及价格信息;最后的“储”,设置

蓄冷/蓄热设备起到缓冲作用,调节供应使用之间的矛盾,提高本地可再生能源利用率^[4]。此集成模式的工作原理可以表述为:热泵高效转换、余热分层利用、多种能源耦合、储能调峰填谷、系统智能化管理。根据预测,能够被《方法学》支持的工程在2028年的年节能量可达46万t标准煤,而在2030年的年节能量能达到80万t标准煤,在2035年其年节能量甚至有可能达到160万t标准煤。而此一体化模式的成功之处就在于消除设备等级以及专业壁垒,把暖通空调系统放入整个建筑物的整体能源系统里面来进行统一的设计及调度管理,不是各个子系统分开来设计管理,互相隔离。

6 结语

碳排放环境下,暖通空调系统能量转换及低碳减排已经由附属问题转变为根本性问题。热泵技术的进步使得低位热源得到高效利用成为可能、余热回收使废弃的热量转变为可用的能源资源,可再生能源耦合解决了传统单一能源供应难题,储能技术对用电侧灵活调度以及可再生能源接纳提出了新的可能性。四种技术在系统层面深度融合,形成了暖通空调领域内的能源转换与低碳减排的技术体系。今后,温室气体自愿减排项目方法学不断应用于建筑之中,碳交易市场逐步健全完善,数字化控制技术不断发展进步,暖通空调系统运行方式也将不断从“按需供能”转为“预测优化供能”,为建筑业低碳发展持续提供动力支撑。

[参考文献]

- [1]梁巍.暖通空调系统中环保节能技术的应用[J].科技与创新,2026(4):222-224.
- [2]刘欢,袁浩.新能源技术在建筑暖通空调中的应用[J].中国房地产业,2026(6):194-197.
- [3]李新光,苑建华.住宅建筑暖通空调节能设计改造技术路径探讨[J].中华民居,2025,18(10):13-15.
- [4]王御棋,文继卿.现代建筑暖通空调工程的节能设计与施工技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025(22):190-192.

作者简介:刘双婷(1995—),女,汉族,毕业于石家庄铁道大学;现就职于河北建筑设计研究院有限责任公司;冯志(1995—),男,汉族,毕业于石家庄铁道大学,现就职于中国电子系统工程第四建设有限公司