低碳目标下暖通空调新型节能技术应用前景探析

贾浩璇
河北加壹建筑设计有限公司，河北 石家庄 050000

[摘要]暖通空调能耗占建筑总能耗的 40%以上，低碳转型成为双碳目标落地的重要部分。目前技术发展的主要矛盾已经由单机效率提高转变为系统碳效改善，评价标准也正在发生由能效优先向碳效优先的转变。高效冷热源和变频技术越来越成熟，热泵与可再生能源耦合、热回收与余热利用、低碳制冷剂替代等技术路线并行发展。但是技术落地存在负荷预测精度不高、多源耦合控制稳定性差、全生命周期碳效评价方法缺失等系统性障碍。多技术协同集成、智能化运行管理、能源结构深度优化、全生命周期评价体系的形成，就是一条可行的推进途径。

[关键词]低碳目标；暖通空调；节能技术
DOI：10.33142/sca.v9i10.20626 中图分类号：TU832.5 文献标识码：A

Exploration on the Application Prospects of New Energy-saving Technologies for HVAC under Low-carbon Goals

JIA Haoxuan
Hebei Jiayi Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: HVAC energy consumption accounts for over 40% of the total building energy consumption, and low-carbon transformation has become an important part of achieving the dual carbon goal. The main contradiction in current technological development has shifted from improving single machine efficiency to improving system carbon efficiency, and evaluation standards are also shifting from prioritizing energy efficiency to prioritizing carbon efficiency. Efficient cold and heat sources and frequency conversion technology are becoming increasingly mature, and technology routes such as coupling heat pumps with renewable energy, heat recovery and waste heat utilization, and low-carbon refrigerant substitution are developing in parallel. However, there are systemic obstacles to the implementation of technology, such as low accuracy in load forecasting, poor stability of multi-source coupling control, and lack of full lifecycle carbon efficiency evaluation methods. The formation of multi technology collaborative integration, intelligent operation management, deep optimization of energy structure, and full life cycle evaluation system is a feasible way to promote it.

Keywords: low-carbon targets; HVAC system; energy-saving technology

引言

暖通空调是建筑能耗的首要因素，占据公共建筑能耗总量的 40%～60%。双碳目标提出之后，节能问题由原来的运行成本控制变成碳排放刚性约束。一项技术是否值得推广，评价标准已经从省了多少电转变为减了多少碳，从单机效率有多高转变为系统碳效有多优。该转向带来的直接结果就是，一些在能效角度看来划算的技术方案，在碳效角度下不一定成立。电制冷机组的能效提高可以明显降低运行电耗，但是如果电力碳强度过高，那么它的减碳贡献就会被稀释掉。相反，能效提高幅度小但是可以和可再生能源深度耦合的技术，在碳效上会更具有优势。暖通空调新型节能技术的应用前景，在碳效约束之下需要重新审视。

1 低碳目标下暖通空调节能技术的发展需求

传统的节能技术评价是以能效比为唯一标准，隐含地假定电力是清洁的。在碳排放约束下，电力本身存在碳强度，各时段、各地区之间差别较大。这就意味着技术的选择要考虑用能的时间和用能结构的碳属性，而不是只考虑总量的减少。以煤电为主的电网中，夜间低谷电的碳强度大于日间光伏出力时段，如果热泵系统在夜间蓄热运行，那么它的实际碳减排效果就会小于理论预期。

多技术协同成了低碳暖通系统的主要特点。有研究用 BIM 智能调控等技术手段对暖通系统进行智能化调控，说明单个技术的减排效果较小，只有系统集成才能发挥出低碳效能的最大化。不同的技术路线之间接口标准、通信

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

协议、运行逻辑要统一，否则集成系统就会因为兼容性问题而达不到预期的效果。需求变化的第二层含义就是技术评价周期的延伸。传统的节能评价只关注运行阶段，碳排放核算要涵盖设备的生产、运输、使用、回收等全过程。从生命周期评价研究得知，机房空调温室气体排放主要是使用、维护两个阶段的电能消耗、制冷剂排放造成的，分别为 94.24%、5.36%。该结论支持运行阶段优先的减排策略，但是也提示制冷剂逸散不能忽略。第三层需求是建筑负荷特征变化所引起的。随着建筑围护结构保温性能的提高和内部得热密度的增大，暖通系统负荷结构也由以前以显热负荷为主转向显热和潜热负荷并重。该变化给传统的、热负荷固定不变的空调系统提出新的要求，即必须要有能够对潜热进行独立处理的温湿度分控系统。

2 暖通空调新型节能技术及其应用基础

2.1 高效冷热源与变频节能技术

变频技术的发展给暖通系统赋予了基本的负荷调节能力。压缩机、水泵、风机采用变频驱动可以使得系统在部分负荷时保持较高的效率，防止定频设备频繁启停造成的能量损失[1]。该技术路线的边际收益已经达到了递减状态，单靠变频改造不能达到深度减碳的要求，必须与智能控制、系统优化等手段结合使用。磁悬浮离心机、气悬浮离心机等新型压缩技术的商业化，使冷热源效率达到了一个新的水平。磁悬浮轴承去除了机械摩擦造成的能量损耗，当压缩机处在低负荷运转状态的时候，它的效率下降幅度会大大减小。这类设备的初投资大，在高负荷率、长运行时间的情况下，它的全生命周期成本优势才开始体现出来。

2.2 热回收与可再生能源利用技术

热回收技术的主要原理就是把原来排放的冷凝热或者排风能量再利用起来。三管制热回收多联机系统工程案例说明在广州市某火锅店的使用效果上，该系统的全年运行费比以前节约了 28.88%，碳排放量比以前减少 18.43%。热回收技术的适用性要依靠冷热需求的同步率来决定，餐饮、酒店、医院等建筑类型的同步率高，技术经济性好；办公建筑热水需求集中在特定时段，热回收利用小时数受限制。可再生能源利用方面，太阳能和热泵耦合属于目前的研究热点。有研究认为太阳能光热和热泵耦合系统依靠时序互补、多能协同，可以大大提高能源利用率和稳定性。太阳能耦合系统的主要难题就是辐照强度的间歇性和建筑负荷的连续性之间的矛盾，蓄热水箱或者相变蓄能装置是解决这一矛盾的必要设备。地热能利用技术路线分化的比较明显，浅层地埋管系统受土壤热平衡的限制，中深层地热井取热不取水的模式规避了地下水资源的约束，但是钻井成本高，适合于集中供热的场合。

3 低碳目标下暖通空调新型节能技术的应用分析

3.1 智能控制与负荷动态匹配技术应用

人工智能技术正在改变暖通系统的控制逻辑。有研究表明，以深度学习为基础的负荷预测、强化学习优化决策、多系统协同、预测性维护等关键技术，可以大大提高暖通系统的运行效率。负荷预测精度提高之后，系统可以提前调整运行策略来减少供需不平衡造成的能量浪费[2]。强化学习在冷机群控中可以实现多台设备之间动态分配负荷，避免部分设备低效运行而其他设备满载的粗放调度方式。双向 LSTM 负荷预测模型的均方根误差可以控制在 7.3% 以内，给设备群控提供了一个可以使用的预测精度基础，但是预测模型对于不同的建筑类型以及气候区的泛化能力还需要进一步的检验。智能控制的另一个应用方向就是故障检测和诊断，运行数据异常检测算法可以在故障初期发出警报，把维护模式由定期检修改为状态检修。数字孪生技术的引入为智能控制提供了新的支撑手段。利用暖通系统虚拟映射模型，在数字空间里预先模拟不同的控制策略运行效果，减少实际操作过程中试错的成本。模型预测控制和强化学习相结合，系统在滚动优化时会同时考虑目前的能耗以及未来的负荷变化，从而提高控制的精细程度。

3.2 热泵与可再生能源耦合技术应用

热泵技术的减碳效果由它所用的电力来源的碳强度决定。在可再生能源电力比例提高的情况下，热泵的碳效优势会越来越大。中深层地热能和高温热泵深度耦合的工程实例显示，以能量梯级利用为基础的系统结构可以把地热能综合利用率提高到 75.85%的程度，在区域全绿电供应状况下，可以使得供热过程达到零碳排放的效果。该案例的技术要点就是地热井出水温度的梯级利用，高温段直接供暖，中温段驱动热泵提温，低温段用于预热或者回灌。浅层地热能利用也有着广阔的应用前景。有研究认为，浅层地热能技术在暖通空调中属于一种既可以取得经济效益又可以取得环保效益的技术途径。热泵和可再生能源耦合的约束条件是地理资源禀赋，长江流域冷热双需求特征适合地埋管系统，北方寒冷地区供暖主导需求更适合中深层地热或者空气源热泵配辅助热源。

空气源热泵在寒冷地区低温适应性技术研究是主要的。喷气增焓、双级压缩、复叠循环等技术方案都可以使低温工况下的制热量和能效得到提高。实际运行数据显示，在-20℃的环境里，使用喷气增焓技术的空气源热泵仍然可以保持一定的制热量，但是其能效比远小于常温工况。因此，在系统设计时必须考虑到低温工况下所具有的容量

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

裕度以及辅助热源的配置方案。热泵和光伏的直流耦合也值得进一步研究，光伏直流电直接驱动热泵压缩机，省去了逆变环节，可以降低系统的成本，并提高可再生能源的利用率。

3.3 热回收与余热利用技术应用

热回收技术的应用范围由原来的单个建筑扩大到整个区域的能源系统。冷凝热回收在大型商业建筑中的应用研究发现，利用热交换器回收高温冷凝热可以降低冷却塔排热和城市热岛效应。从实验结果可知，在现有的设备上增加换热器和连接管路即可达到节能的目的，具有投入成本低、节能率高、运行可靠等优点。该类改造项目投资回收期一般为 2～3 年，在既有建筑节能改造中应用较多。余热利用的深层道理就是能量品位相匹配。低品位余热用作预热或者生活热水，高品位热量用作驱动吸收式制冷[3]。数据中心余热回收有特殊价值，服务器散热产生的低品位热量经热泵提温后可用来供热周边建筑，达到能量跨系统利用的目的。工业余热与暖通系统的耦合也不能忽略。钢铁、化工、制药等行业工艺冷却水携带大量的低温余热，用换热器和热泵相结合的方式可以将余热的品位提高到供暖可用的程度。跨行业能量梯级利用要解决工业企业运行稳定和建筑供暖连续性之间的矛盾，合同能源管理模式的引入可以降低用能单位的改造风险。

3.4 低碳制冷剂与系统综合优化技术应用

制冷剂替代属于暖通空调减碳的必需部分。低 GWP 制冷剂的研究表明，R1234yf、R1234ze(E)、R290、R152a 等替代工质与 R134a 的热物理性质存在差异，系统需要针对性优化。R290 在电动汽车热管理系统中具有换热量大、流动阻力小的优点，但是可燃性限制了它在某些场合的使用。制冷剂替代技术路线因应用场景不同而异，在家用空调领域 R290 更适合小冷量机型，商用多联机领域 R32 是过渡期的主要选择。系统综合优化的价值就在于防止由于单点最优而造成的整体次优。针对低碳建筑的暖通系统多目标优化，开发出 380V 直流母线结构，实现光伏和空调的直接耦合，提高可再生能源自消纳率。系统层面的重新构造，比单个设备的效率提高具有更强的减碳杠杆作用。直流母线结构减小了光伏逆变和空调变频之间的交直流转换环节，降低转换损耗，简化了储能装置的接入方式。

4 暖通空调新型节能技术的应用前景与发展路径

4.1 多技术协同与系统集成发展

单点技术的减排潜力有极限，系统集成是突破瓶颈的一种方法。热泵和热回收的组合、光伏和空调的直流耦合、地热和高温热泵的梯级利用都是技术协同。集成的难点就是控制策略的复杂度，要解决多源系统动态匹配和故障工况下切换逻辑的问题。系统集成的另一维就是跨系统能量交换，暖通系统同建筑给排水系统、电气系统之间的能量传递有改善之处，实现这种改变依靠建筑信息模型和能源管理平台的深度整合。

4.2 智能化运行与精细化能效管理

物联网同人工智能相融合，正在改善暖通系统运行管理的水平。基于物联网架构的建筑设备监控系统可以达到负荷预测、设备群控、能耗计量和故障预警的目的，从而提高设备的运行效率。精细化能效管理的方向是由粗放的分项计量转向设备级的实时碳效核算，给运行策略的调整提供数据支持。数字孪生技术创建起物理系统虚拟映射之后，可以对各种运行策略的成效加以模拟，从而缩减策略试错的成本，对于大型复杂系统尤为合适。

4.3 可再生能源深度耦合与能源结构优化

可再生能源与暖通系统的耦合深度决定了减碳的上限。目前大多数项目还处在可再生能源提供部分电力的阶段，深度耦合要求暖通系统具有柔性用能能力，在可再生能源出力充足的时候主动蓄能或者提负荷，在可再生能源出力不足的时候降负荷或者释放蓄能。柔性能力的形成要靠设备选型、控制策略和储能配置三者之间的协同设计来实现。建筑光伏一体化同暖通系统相结合，给城市建筑的可再生能源利用赋予了可行途径，屋面光伏和立面光伏的发电量预估需要同暖通负荷预估相配合，才能达成自消纳率的最大化。

表 1　暖通空调新型节能技术碳减排效果对比

技术类型	典型案例/数据	碳减排效果	主要约束
热回收多联机	广州火锅店全年运行	碳排放下降 18.43%	冷热需求同时性
地热+高温热泵	雄安能源站	零碳排放全绿电	地热资源禀赋
机房空调运行优化	数据中心 LCA 分析	运行阶段占碳足迹 94.24%	电力碳强度
光伏直驱空调	380V 直流母线架构	提升自消纳率	初投资与并网
低 GWP 制冷剂替代	R290/R1234yf	直接排放显著降低	可燃性与成本

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

4.4 全生命周期低碳评价与技术推广

全生命周期评价法在暖通空调领域还处在起步阶段。在全生命周期视角下建筑空调系统低碳化改造方案比较研究中得出结论，各个系统耗能量、碳排放量是非对称性的。这就意味着以运行能耗为唯一依据的选择标准存在偏差，应该创建起包含生产、运输、运行和回收等全部环节的碳效评价体系。技术推广的障碍不单是技术本身所造成的，还牵涉到标准的缺乏以及市场认识的问题。低碳制冷剂的替代进度、热回收系统的设计规范、智能控制系统的验收标准都需要有相应的标准体系来支持。碳交易市场的完善可以给暖通空调的减碳项目提供另外的收益来源，提高技术经济性。

5 结语

暖通空调新型节能技术应用前景的好坏，是由技术自身和碳效评价框架是否匹配所决定的。高效冷热源和变频技术为基础能力，热泵和可再生能源耦合决定减碳上限，热回收和余热利用挖掘存量潜力，低碳制冷剂和系统优化保证长期合规性。四类技术不是替代关系，而是协同关系。目前核心瓶颈不是单项技术的成熟度问题，而是系统集成能力和碳效评价方法滞后的问题。负荷预测精度、多源耦合控制稳定性和全生命周期碳核算标准，都是影响技术从示范走向推广的因素。暖通空调的低碳转型是渐进的，技术路线的选择要根据建筑类型、气候条件、能源结构和经济水平综合考虑，不能采取一刀切的推广方式。

[参考文献]

[1]林波,樊文科.三管制热回收多联机的节能工程应用——基于广州某火锅店的案例分析[J].制冷与空调,2026,26(6):128-136.

[2]李海军,牛瑞恺,赵登科,等.低 GWP 制冷剂在汽车空调领域替代 R134a 的研究进展综述[J].制冷与空调,2025,25(11):36-45.

[3]程立权,吴俊峰,屈博艺,等.机房空调的碳足迹与减碳途径分析[J].制冷与空调,2026,26(3):17-22.

作者简介：贾浩璇（1994—），女，汉族，河北石家庄人，工程师，河北建筑工程学院，现就职于河北加壹建筑设计有限公司，从事暖通设计工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.