

热泵技术在暖通空调系统中的集成设计与节能潜力评估

王旭斌

石家庄市建筑设计院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]热泵技术因其具有能效比高, 清洁环保等特点, 广泛应用于供热、通风与空调 (HVAC) 系统的集成化中。文章研究基于热泵技术的分类特性深入剖析了系统匹配原则、控制策略优化、关键部件的选型等核心内容, 同时构建多维度的节能潜力评估相关体系。研究结果表明, 采用热泵-HVAC 系统集成设计方案可以有效提高系统的综合能效, 一定程度上降低建筑能耗, 减少碳的排放强度, 以供参考。

[关键词]热泵技术; 暖通空调系统; 集成设计; 节能潜力; 能效评估

DOI: 10.33142/ec.v8i11.18577

中图分类号: TU83

文献标识码: A

Integrated Design and Energy-saving Potential Assessment of Heat Pump Technology in HVAC Systems

WANG Xubin

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

Abstract: Heat pump technology is widely used in the integration of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems due to its high energy efficiency, cleanliness, and environmental friendliness. The article deeply analyzes the classification characteristics based on heat pump technology, including system matching principles, control strategy optimization, and selection of key components. At the same time, a multidimensional energy-saving potential evaluation system is constructed. The research results indicate that the integrated design scheme of heat pump - HVAC system can effectively improve the comprehensive energy efficiency of the system, reduce building energy consumption to a certain extent, and decrease carbon emission intensity, which can be used as a reference.

Keywords: heat pump technology; HVAC systems; integrated design; energy-saving potential; energy efficiency evaluation

引言

随着全球气候变化问题日益严峻, 节能减排已成为各行业发展的重要任务^[1]。经济日益发展背景下, 全球能源消耗也随之持续增长, 建筑行业作为能源消耗最大的行业之一, 其中暖通空调系统能耗在建筑总能耗占比较高^[2], 在城市化进程不断推进背景下, 建筑工程逐渐增加, 新时期我国建筑行业为响应国家提出的“双碳”“节能减排”“绿色发展”等政策^[3], 传统 HVAC 系统以化石能源为主要动力、能效水平偏低的弊端愈发凸显, 其节能化改造已迫在眉睫。热泵技术基于逆卡诺循环原理, 采用一定的设备把低位热源中的热量输送至高位热源的过程, 在此过程中不需要对燃料进行燃烧处理, 是一种高效环保的技术手段, 从而满足 HVAC 系统的供暖、制冷需求^[4], 并已成为提高 HVAC 节能性能的主要发展方向之一。在 HVAC 中引入热泵可以达到提高其整体能量利用率的目的, 减少对于不可再生能源的消耗量, 对于我国可持续发展的建筑节能工程有着积极意义。

1 热泵技术分类特性

根据热源类型的不同, 热泵技术可分为空气源热泵、水源热泵、地源热泵三大类, 不同类型热泵的工作特性、适用场景存在显著差异, 如表 1 所示。

表 1 不同类型热泵技术特性对比表

热泵类型	热源来源	COP 范围	优势特性	局限性	适配场景
空气源热泵	室外空气	2.0~4.5	安装便捷、初投资低、维护简单	低温环境下 COP 显著下降、冬季结霜需除霜能耗	气候温和地区、中小型建筑
水源热泵	地表水、地下水、工业废水	3.0~5.5	能效稳定、受环境温度影响小	受水源分布限制、需处理水源污染问题	临近水源的建筑、大型商业建筑
地源热泵	土壤、地下含水层	3.5~6.0	能效最高、运行稳定、环境效益显著	初投资高、安装施工复杂、受地质条件限制	地质条件适宜的建筑、长期使用的大型公共建筑

2 热泵技术与 HVAC 系统的集成设计要点

2.1 集成系统匹配原则

将热泵系统应用于 HVAC 设计应以“能量供需匹配、设备性能适配、运行高效协同”为基本原则进行选型及应用。其中能量供需匹配是指热泵系统供能的能力应该满足 HVAC 系统的需求量, 即不能供能过多而造成能源的浪费, 也不能供能过少而引起室内热舒适度下降等问题。一是建

筑负荷分析：通过对建筑的负荷计算来明确不同时节、不同时间段的冷热负荷最大及平均负荷情况，以确定热泵系统的额定功率以及调节范围；二是设备性能适配：即热泵系统工作参数（如供水温度、供回水温差）与 HVAC 的末端设备（如风机盘管、地暖、空调机组）性能参数的匹配性。保证末端设备充分利用热泵提供的能量。比如，地暖适应低温供水的空气源热泵，可以提高整个系统的能效水平。最后，运行高效协同要求集成系统中的各部件（热泵机组、水泵、风机、末端设备）运行状态协同优化，避免一个设备高效运行而整体系统能效低的情况。

2.2 关键部件选型设计

2.2.1 热泵机组选型

根据建筑类型、负荷特点、气候条件等对热泵机组进行选型设计：对于中小规模的居住建筑，优选空气源热泵机组，方便安装、初始投资小，可以提供基础的冷热负荷；对于大规模的商业或者公共建筑，如果周边有水体资源，则可选用水源热泵机组，运行效率较为可靠，并且能够提供的冷热量较大。对能效有较高要求且长时间使用的建筑物在地质条件许可下可考虑地源热泵机组。同时，需考虑热泵机组的调节性能，优先选择变频热泵机组，其可根据负荷变化实时调节压缩机转速，在部分负荷工况下仍能保持较高能效，适应 HVAC 系统负荷波动大的特性。

3.2.2 末端设备适配选型

末端负荷类型应结合热泵机组供能参数进行适配性选择，以达到最大化能源利用的目的。供暖工况下，低温空气源热泵适配地暖系统或者低温风机盘管，地暖系统为低温热水辐射供暖，供水温度 35~50℃，与空气源热泵出水温度匹配度较高，热效率可达 90% 以上；高温水源热泵或地源热泵可以适配传统的散热器，满足高温供暖需求。在制冷工况下，热泵机组的冷冻水温度一般为 7℃，可以直接匹配常规风机盘管、组合式空调机组等末端设备，通过适当增大送风量及降低送风温度来提高室内舒适性及系统效率。

3.2.3 辅助设备优化选型

其中水泵、风机、节流装置属于辅助设备，在很大程度上影响着集成系统的综合效能。水泵的选择应该依据系统水力计算的结果来选定流量及扬程，尽量使用变频水泵，按照所需调节流量进行调节，减少输水量；风机应依据末端设备所对应的风量来进行选择，选用效率高且噪音小的风机，利用变频技术对风量进行调节，降低风机的运行能耗；节流装置采用电子膨胀阀，调节精度高、反应快，可以根据热泵系统运行工况实时调节工质流量，提高热泵机组的运行稳定性和能效。

3.3 系统流程设计

将热泵与 HVAC 集成的过程是按照不同的热泵及不同建筑物的负荷来进行的，通常包括单热泵集成系统以及多个热泵联合集成系统。其中，单个热泵集成系统是指在

一些对负荷的需求比较单一或者受天气影响不大的建筑物中使用，在这些地方应用的最为广泛的是小规模住宅中的空气热泵+地板供暖/风机盘管集成系统，它的过程是：热泵机组产生的热水/冷冻水经由变频水泵送入到末端机内，达到对室内的供暖/制冷效果，末端回水再回到热泵机组中再次被加热/冷却的过程。多热泵联合集成系统适用于负荷规模大、负荷波动复杂的大型建筑，通过协同控制实现系统高效运行，减少管路阻力损失，降低输送能耗。

3.4 控制策略优化

高效的控制策略也是提高热泵-HVAC 集成系统的效率的重要手段，主要目的是达到“负荷精准匹配、设备协同高效、能耗最低”的目的；而控制策略主要有负荷预测控制、变工况调节控制、多设备协同控制三方面。负荷预测控制即根据建筑物的历史负荷信息以及室外环境条件如气温、气湿、太阳辐射等，采用机器学习的方法对后续时间段的冷热负荷进行预测，并提前调整热泵机组及末端的状态，防止滞后性带来的能效降低。

4 热泵-HVAC 集成系统节能潜力评估体系

4.1 评估指标体系构建

基于“能效-能耗-环境”多维度评估目标，构建热泵-HVAC 集成系统节能潜力评估指标体系，涵盖核心能效指标、能耗指标、环境效益指标三个层面，具体指标及定义如表 2 所示。

表 2 热泵-HVAC 集成系统节能潜力评估指标体系

评估维度	评估指标	指标定义	计算方法	优化目标
核心能效指标	热泵机组 COP	热泵机组输出热能与输入电能的比值	$COP=Q/W$ ，其中 Q 为输出热能，W 为输入电能	最大化
	系统综合能效比 (SEER)	集成系统总供能与总能耗的比值	$SEER=Q/E$ ，其中 Q 为系统总供能，E 为系统总能耗（含热泵、水泵、风机等）	最大化
	输送能效比 (TER)	输送系统供能与输送能耗的比值	$TER=Q/E$ ，其中 Q 为输送系统供能，E 为水泵、风机等输送能耗	最大化
能耗指标	单位建筑面积能耗	建筑单位面积的 HVAC 系统年能耗	$E=E/A$ ，其中 A 为建筑总面积	最小化
	能耗降低率	集成系统与传统的 HVAC 系统的能耗差值与传统系统能耗的比值	$\eta=(E-E)/E \times 100\%$	最大化
环境效益指标	单位能耗碳排放量	系统单位能耗产生的 CO 排放量	$C=E \times f$ ，其中 f 为能源碳排放系数	最小化
	碳减排量	集成系统与传统系统的碳排放量差值	$\Delta C=C-C$	最大化

4.2 节能潜力评估方法

4.2.1 能效指标分析法

能效指标分析法是指通过对集成系统 COP、SEER、TER 的测试或者计算,并与常规 HVAC 系统(比如燃气锅炉+电动制冷机系统)的能效指标进行比较,从而对集成系统的节能潜力做出定量描述的方法。该法简便易行、结果直观,在集成系统的粗略能效评价方面具有很好的应用价值。空气源热泵集成系统的能效提升率为 122%~394%,节能空间较大。实际项目中应根据现场实测得到热泵机组以及集成系统的实际运行工况进行判断。

4.2.2 能耗模拟预测法

能耗模拟预测法利用专业的建筑能耗模拟软件(如 DeST、EnergyPlus、TRNSYS),建立建筑及集成系统模拟分析模型,并输入建筑参数(面积、围护结构热工性能、朝向)、气候参数(室外温度、湿度、太阳辐射)、系统运行参数等信息,模拟集成系统在全年度或者某一时段内的能耗情况,对传统系统进行能耗模拟,与实际运行情况比较,计算出系统的节能空间;可以考虑多个影响因素之间的耦合,精确度较高,在集成功能较为详细的系统节能分析中使用。

5 集成系统节能潜力验证与优化方向

5.1 节能潜力理论验证

基于逆卡诺循环,热泵机组理想 $COP=T_c/(T_c-T_e)$ (T_c 为冷凝器温度、 T_e 为蒸发器温度)。供暖工况下, $T_c=323K$ 、 $T_e=273K$ 时,理想 COP 为 6.46,实际空气源热泵 COP 为 2.0~4.5,有提升潜力。优化集成设计与控制策略可缩小差距,如变频控制使部分负荷 COP 提升 10%~20%,低温增焓技术使 -15℃ 低温环境 COP 提升 30% 以上。结合不同热泵特性对与 HVAC 系统集成节能潜力理论计算(见表 3)显示,地源热泵集成系统节能潜力最大,能耗降低 40%~60%;水源热泵次之,降低 35%~55%;空气源热泵为 25%~45%,气候温和地区高于寒冷地区。

表 3 不同热泵-HVAC 集成系统节能潜力理论计算结果

热泵类型	传统系统能耗 (kWh/m ² ·a)	集成系统能耗 (kWh/m ² ·a)	能耗降低率 (%)	节能潜力等 级
空气源热泵	80~120	48~90	25~45	中等
水源热泵	80~120	44~78	35~55	较高
地源热泵	80~120	32~72	40~60	最高

5.2 集成系统优化方向

5.2.1 热泵技术升级优化

通过研发高效热泵技术,提升热泵机组的能效与低温适应性,为集成系统节能潜力提升提供技术支撑。例如,研发高效压缩机、高效换热器等核心部件,提升热泵机组的 COP;开发低温增焓、补气增焓等先进技术,改善空

气源热泵在低温环境下的运行性能;探索跨临界 CO₂ 热泵技术,其在高温供暖工况下具有显著优势, COP 可达 4.0 以上,可进一步提升集成系统的节能潜力。

5.2.2 集成系统协同优化

加强热泵系统与 HVAC 系统末端设备、辅助设备的协同优化设计,提升系统整体能效。例如,优化末端设备的结构设计,提升其与热泵供能参数的匹配度;采用高效水力输配系统,通过优化管路布局、选用低阻力阀门、采用变频水泵等措施,降低输送能耗^[5];探索热泵与太阳能、地热能等可再生能源的联合集成,构建多能源互补的 HVAC 系统,进一步提升节能潜力。

5.2.3 智能控制技术应用

充分融入前沿智能技术,例如大数据、物联网、人工智能等,提高集成系统的控制精度与运行效率。在构建负荷预测模型时,通过借助机器学习算法能够对历史数据以及各类影响因素之间的关联进行深入剖析,从而确保预测结果的精准性,实现负荷精准预测与提前调节。借助物联网技术,能够实时监测系统设备的运行情况,一旦设备出现异常或发生故障时,能够第一时间发出警报,运维人员能够及时处理,将风险降到最低。利用大数据技术对系统运行过程中产生的数据进行挖掘与分析,优化控制策略与运行参数,进一步提升系统整体能效。

6 结论与展望

6.1 结论

本文系统探讨了热泵技术与 HVAC 系统的集成设计要点及节能潜力评估方法,得出以下主要结论:(1) 热泵技术基于逆卡诺循环原理,热泵是基于逆卡诺循环的高效节能型设备,不同种类热泵(如:空气源、水源、地源热泵)的特点各有千秋,应结合建筑物性质、当地气候环境等特点选用合适类型的热泵;(2) HVAC 系统中热泵的设计应用应该以能源需求合理匹配、设备参数相适应、系统经济高效运行为原则,主要关注点为热泵机组、末端设备、辅助设备优选,系统流程及控制方式优化;(3) 提出的“能效-能耗-环境”多目标评价方法,利用能效比评价法、能耗计算预测法、环境影响评价法,能够定量地判断出集成化系统方案的节能效果;合理的集成设计能够节约系统能耗达 25%~60%,其中地源热泵集热系统节能空间最大,空气源热泵集热系统节能空间受气候影响较大。

6.2 展望

未来热泵与 HVAC 技术结合发展方向为高效化、智能化、多能源互补化,在技术研发上应该加大高效热泵关键部件及核心技术研发,提高热泵机组效率和适应能力;在集成设计上进一步完善系统集成设计理念,研究热泵与

其他新能源的耦合集成。在智能化控制方面,应加入更多的智能技术,形成自适应、自优化的智能化控制系统;在评价方面,应完善动态评价方法,考虑建筑整个寿命期的节能量。可进一步提升热泵-HVAC 集成系统的节能潜力,推动建筑领域的绿色低碳发展。

[参考文献]

- [1]孙健陶,胡芸蓉,蔡潇龙,等.基于热泵型储电技术国内外研究综述[J].储能科学与技术,2024,13(6):1963-1976.
- [2]范旭红.空气源热泵采暖在建筑节能中的应用与前景分析[J].山西建筑,2017,43(14):198-199.
- [3]熊帝战.适用于中国北方农宅的太阳能两用集热器性能及应用研究[D].北京:清华大学,2015.
- [4]朱晓姣,宋波,张思思,等.供暖系统节能运行调试技术分析及应用存在的问题[J].建设科技,2014(22):46-48.
- [5]李炅志.热水供热系统试运行故障成因及调试措施[J].中国科技投资,2013(17):93.

作者简介:王旭斌(1991.3—),毕业院校:沈阳工业大学,所学专业:建筑与土木工程专业,当前就职单位:石家庄市建筑设计院有限责任公司,职务:职员,职称级别:中级工程师。