

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.11.004

空气源热泵空调技术应用现状及发展前景

Application status and perspectives of air-source heat pump air conditioning technology

陈健勇¹,李浩²,陈颖¹,赵军³

CHEN Jianyong¹,LI Hao²,CHEN Ying¹,ZHAO Jun³

(1.广东工业大学 材料与能源学院,广州 510006; 2.中国建筑科学研究院有限公司,北京 100013;

3.天津大学 中低温热能高效利用教育部重点实验室,天津 300350)

(1.School of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2.China

Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 3.Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and

Medium Grade Energy(Tianjin University), MOE, Tianjin 300350, China)

摘要:空气源热泵空调系统具有高效节能、绿色环保等优点,在采暖、热水和烘干等领域有广泛应用。围绕空气源热泵空调的循环构建、除霜和系统控制等方面对国内外研究现状进行了综述,分析了各种技术的优缺点。介绍了空气源热泵空调在各行业的典型应用,重点分析了空气源热泵空调在我国北方“煤改电”项目中的贡献,系统平均循环性能系数可达 2.13,节能效果明显。最后总结了空气源热泵空调推广应用面临的政策不完善、公众不熟悉等问题,提出需从部件、循环、除霜以及系统控制等方面进行创新,进一步提升空气源热泵空调的性能,同时可与储热、大数据和人工智能等技术结合,在“双碳”的新形势下发挥巨大作用。

关键词:双碳;空气源热泵空调;循环构建;除霜;煤改电;储热;大数据;人工智能;节能减排

中图分类号:TU 831.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)11-0025-15

Abstract: Air source heat pump air conditioning systems are widely used in heating, hot water supply and drying, due to their advantages of high efficiency, energy saving and environmental protection. Researches on the circulation construction, defrosting mechanism and control strategy of the air conditioning system are made at home and abroad, and the advantages and disadvantages of the various technologies are analyzed. The typical application scenarios of air source heat pump air conditioning systems in different industries are introduced, and attention is paid to the contributions to "coal-to-electricity" projects in northern China made by the systems. The COP of the system can reach 2.13, which indicates a significant energy saving. Finally, the challenges faced by the promotion of air source heat pump air conditioners are illustrated, including deficient policy and low public acceptance. Corresponding improvement should be made on the components, cycles, defrosting and control mechanisms. Moreover, the further advancement for the system can be made by integrating thermal storage, big data and artificial intelligence technologies, which will facilitate the realization of carbon peaking and carbon neutrality under the new situation.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality; air-source heat pump air conditioning; circulation construction; defrosting; coal-to-electricity; heat storage; big data; artificial intelligence; energy saving and emission reduction

0 引言

在全球范围内,建筑消耗约 40% 的一次能源,排放约 30% 的温室气体^[1]。住宅和公共建筑供暖及制冷设备的覆盖率逐年提高,能耗不断提高。目前我国制冷制热用电量占全社会用电总量的 15% 以上且年均增长速度接近 20%,主要产品节能空间达 30%~50%^[2]。2019 年我国发布了《绿色高效制冷行

动方案》,提出了绿色高效制冷产品市场占有率提高 40% 且能效提升 30% 以上的目标,对热泵空调设备提出了更高的要求。2020 年提出的“碳达峰、碳中和”目标,定调了国家绿色低碳的高质量发展方向,热泵空调行业迎来了新的机遇与挑战。

空气源热泵空调以消耗少量电能为代价,将室外环境空气中低温热源的热能转变为高温热源,达到对室内空气进行调节的目的。与其他的供暖装置相比,空气源热泵空调具有高效节能、绿色环保、安装灵活、使用方便等优点,适用于分户安装。

1981年在内罗毕召开的“新能源和可再生能源”国际会议上,首次明确了可再生能源的定义^[3]。欧盟2009年发布可再生能源指令,将“空气热能”定义为“环境空气中存在的能量”并将其纳入可再生能源范畴^[4]。2018年全球热泵总销量约300万台,其中欧洲市场和美国市场基本呈现稳步增长的趋势,绝大部分欧洲国家都出台了相应的补贴政策^[5]。2015年11月25日,我国住房和城乡建设部科技发展促进中心发布了《空气热能纳入可再生能源范畴的指导手册》。在中国“煤改清洁能源”等项目的推动下,空气源热泵空调迎来了高速发展,2013—2020年,空气源热泵空调市场规模增加了2倍^[6]。除了冷暖制备产品,空气源热泵烘干机和热水器等产品也逐渐占据市场份额。空气源热泵空调在夏热冬冷气候区、寒冷气候区、夏热冬暖及温和气候区节能潜力共计1 620万t标准煤/a,而在北方及长江中下游地区的节能潜力共计4 097万t标准煤/a^[6]。

在新形势下,高效环保的空气源热泵空调对节能减排减碳具有重要价值和现实意义。本文从空气源热泵空调研究进展、典型应用、挑战和发展这几方面对近年来相关技术进行分析,探讨空气源热泵空调的优缺点,总结空气源热泵空调的节能减排潜力,为行业技术人员和学者提供参考。

1 空气源热泵空调的研究现状

1.1 循环构建

空气源热泵空调兼具冬季供暖热泵和夏季空调制冷的功能,冬季供暖时环境温度可以从0℃以上变化到-15℃甚至更低,要应对极端恶劣天气,热泵需要有良好的低温运行性能。为提高空气源热泵空调的低温适应性和经济性,学者们对单级压缩热泵循环进行改进,提出了准二级压缩热泵循环、双级压缩热泵循环、复叠式热泵循环、多源耦合热泵循环及空气源热泵空调-蓄热/冷系统等。

1.1.1 准二级压缩热泵循环

准二级压缩循环的核心是中间补气技术,以补气压缩机为基础,通过中间压力吸气口吸入一部分中间压力的制冷剂,与部分已压缩的制冷剂混合再压缩,增加冷凝器中制冷剂的流量,提升制热能力。根据经济器类型可将准二级压缩热泵循环分为过冷器循环和闪发器循环,如图1所示。由于闪发器循环的中间补气状态相较于过冷器循环更接近饱和气态,能够进一步降低压缩机的排气温度,因此可获得更好的循环性能系数(COP)^[7]。

石文星^[8]认为中间补气技术可使热泵系统制热量增加30%以上,COP提高10%以上。申江等^[9]通

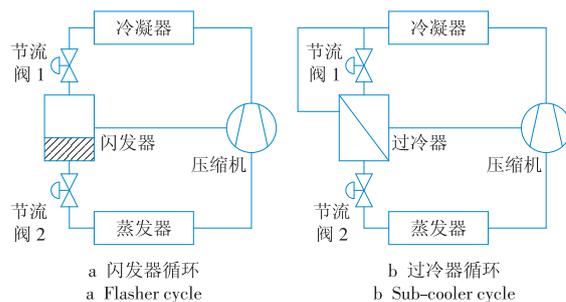


图1 准二级压缩热泵循环

Fig. 1 Cycle of a quasi-two-stage compression heat pump

过试验发现闪蒸器系统在-15~-10℃的低温环境下仍有较高的制热能力和供暖效率,能够满足寒冷地区冬季的制热需求,而且随着室外温度的降低,准二级压缩系统的优势愈发明显。Heo等^[7]对一种带有闪蒸罐的准二级压缩空气源热泵空调进行研究,研究表明中间补气量越多,热泵的制热能力越好,但闪蒸罐的工作效率会随之降低。马国远等^[10]发现中间补气技术能够提高系统的COP,但随着蒸发温度的提高,补气效果会减弱,当蒸发温度高于-10℃时,中间补气的效果可忽略不计。张剑飞等^[11]将带过冷器的准二级压缩热泵与单级热泵性能进行了对比,对比结果表明当蒸发温度从-5℃降低至-20℃时,准二级热泵的制热量增加15%~30%,COP提高9%~19%,耗电仅上升约10%。艾淞卉等^[12]通过测试总结出中间补气的准双级压缩热泵是优良的低温热泵,其实测性能良好、运行可靠。因此,准二级热泵适用于低蒸发温度、大压缩比的场合,可在北方严寒地区室外温度低于-25℃的环境下运行,但不能根本解决压缩机压比过大、排气温度高等问题,且随着蒸发温度的上升,准二级压缩循环的优势逐渐变小,目前研究范围局限在低温供暖。

1.1.2 双级压缩热泵循环

双级压缩热泵循环将压缩过程分为2段:低压压缩机先将制冷剂压缩至中间压力,经过中间冷却后再进入高压压缩机将制冷剂压缩至冷凝压力,最后从压缩机排气口排出。双级压缩热泵循环可以分为一级节流中间完全冷却、一级节流中间不完全冷却、两级节流中间完全冷却和两级节流中间不完全冷却,如图2所示。

金旭^[13]对特定工况下4种双级压缩循环分别进行了试验分析,分析结果表明:尽管中间完全冷却能够获得更低的排气温度,但补气量的增加会使低压压缩机的循环量减少,导致整个系统的COP降低;同时相较于一级节流,两级节流能够减少制冷剂在节流过程中的不可逆损失。两级节流中间不

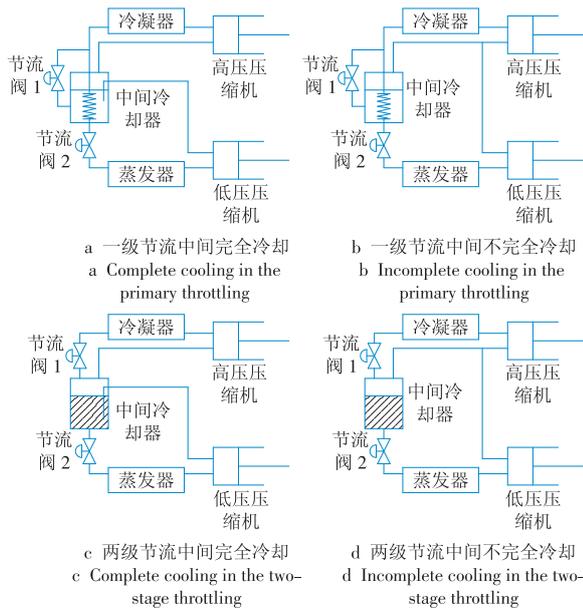


图 2 双级压缩热泵循环

Fig. 2 Cycle of a two-stage compression heat pump

完全冷却可以作为一种比较理想的循环方式应用在低温环境下的空气源热泵空调系统中,其COP相对较好,见表1。

虽然双级压缩循环能够降低各级压缩的压比以及压缩机排气温度,具有更优的COP,但也存在高/低压级压缩机回油不均、最佳中间压力难以确定和温跨范围受到限制等问题。

1.1.3 复叠式压缩热泵循环

复叠式压缩循环由低温级循环和高温级循环构成,该系统通过蒸发冷凝器将2个单级压缩循环联系起来,利用低温级循环为高温级循环创造运行条件,如图3所示。王林等^[14]提出了一种复叠式热泵循环,在低温下可以减小各级压缩机的压比,降低压缩机的排气温度,提高空气源热泵空调的制热能力。周亮亮等^[15]分别选取R134a和R410A作为高、低温级制冷剂,构建了复叠式空气源热泵热水系统样机。室外温度为-25℃时能正常制取85℃的热水,同时解决了室外机结霜的问题。复叠式压缩热泵系统构建较为复杂,成本过高,夏季难以运行,仅在特定场合使用。

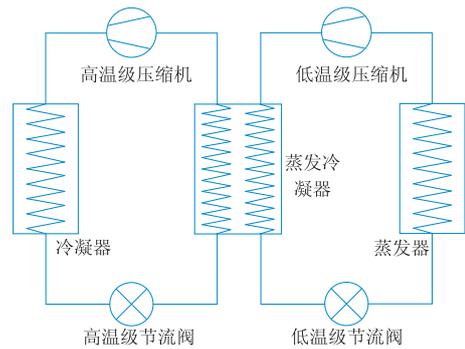


图 3 复叠式热泵循环

Fig. 3 Cycle of a cascade heat pump cycle

1.1.4 多源耦合热泵循环

空气源热泵空调在严寒地区的应用受到限制,存在低温适应性差和负荷匹配性问题,而与其他可再生能源热泵相结合,采用多源耦合的热泵可弥补单一空气源热泵空调的不足,获得高效复合热泵系统。

太阳能热泵系统利用太阳能为蒸发器提供热源,只能在白天间歇性工作,空气源-太阳能复合热泵可持续供热,实现高效运行。Odeh等^[16]提出了一种太阳能-空气源双热源热泵系统,如图4所示。该系统采用双套管蒸发器,太阳能热水流经内管,制冷剂在内外管之间的环形通道流动,外管则从空气中吸收热量,实现太阳能、空气热能与制冷剂同时换热,该系统的热效率高于传统太阳能热泵系统。马坤茹等^[17]设计了一种新型的太阳能辅助空气源复合热泵,在室外温度为-7℃时,复合热泵较单一空气源热泵空调制热量提高约24%,能效提高25%以上。

地源热泵将地下浅层土壤的热能作为热源,是一种高效、节能的热泵系统,但长期不间断运行会导致土壤出现取排热失衡等问题,空气源-地源复合热泵可减小埋管面积,降低成本。周光辉等^[18]将传统的翅片管式换热器与套管式换热器相结合,作为空气-地源双热源热泵系统的复合换热器,实现了不同热源在同一换热器中与制冷剂同时进行换热。游田等^[19]提出了一种耦合空气源补热器的地源热泵系统,如图5所示。利用TRNSYS搭建系统

表 1 双级压缩热泵循环4种循环方式对比

Tab. 1 Comparison of four circulation modes of the two-stage compression heat pump

循环形式	高压压缩机功率/kW	低压压缩机功率/kW	高压压缩机排气温度/℃	理论 COP	蒸发器冷负荷/kW
一级节流中间完全冷却	1.645	0.992	94.03	1.896 1	3.204
一级节流中间不完全冷却	1.603	0.998	110.90	1.922 0	3.229
两级节流中间完全冷却	1.645	1.085	94.03	1.831 7	3.592
两级节流中间不完全冷却	1.587	0.982	110.51	1.946 4	3.251

注:系统制热量为5kW,制冷剂为R22,冷凝温度为70℃,蒸发温度为-30℃,中间压力为0.699MPa,高压压缩机效率为0.70,低压压缩机效率为0.65。

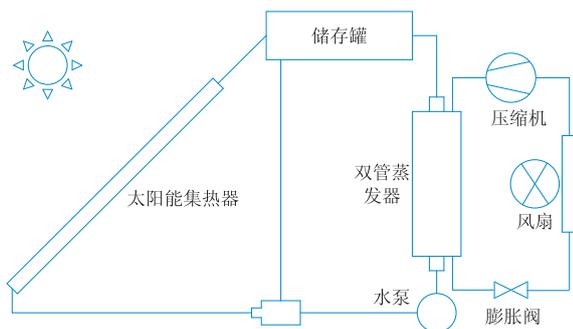


图 4 太阳能-空气源双热源热泵系统

Fig. 4 Solar-air source heat pump system

模型,从可靠性、节能性、经济性 3 个方面分析该系统在不同地区的适应性。结果表明,该系统能够满足北方地区的供暖、供冷和供生活热水的需求,且初投资较低,能较好地维持土壤热平衡,是一种值得推广的供热供冷形式。

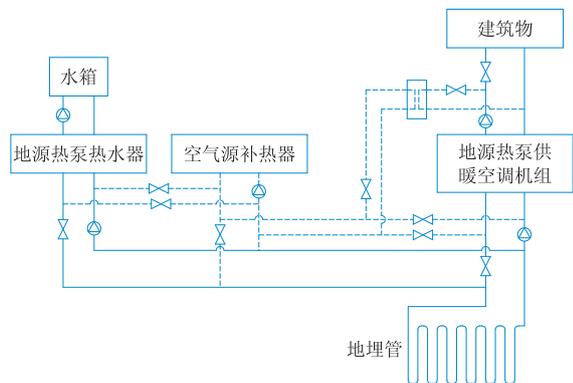


图 5 新型地源热泵系统

Fig. 5 New geothermal heat pump system

水源热泵需要大量稳定的水资源,地区限制较大且地下水回灌技术不够成熟,而空气源-水源复合热泵可减少这些问题的发生。徐俊芳等^[20]对空气-水双热源复合热泵进行理论性研究,认为当环境温度较高时,系统采用单一热源即可实现供暖,当环境温度降至 0℃以下时,采用双热源比单一空气源更具优势。吴晓阳^[21]针对船舶特殊的工作环境,设计了一种机舱空气和海水复合的热泵系统,如图 6 所示。该系统共有 3 种运行模式,可根据实际情况进行选择,在保证供暖需求的同时可实现较单一热源热泵更高的供热效率,但该系统存在腐蚀、颠簸等问题且初投资较高。

1.1.5 空气源热泵空调-蓄热/冷系统

为保证空气源热泵空调系统低温效率,扩大运行范围,常结合相变材料蓄热技术组成空气源热泵空调-蓄热系统。为了解决空气源热泵空调结霜问题,通过蓄热延缓多变的室外空气造成的空气源热泵空调制热量的变化,平衡热泵的供热量与用户需求,同时调节电力负荷^[22]。韩志涛等^[23]提出空气源

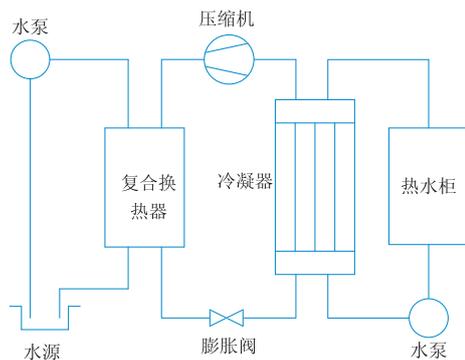


图 6 空气源-水源复合热泵

Fig. 6 Air source-water source composite heat pump

热泵空调蓄热热气除霜系统,除霜时间更短,节省了除霜能耗。空气源热泵空调蓄热系统的供热调节主要是将用热需求低的多余热量转移至供热不足的时间段,可以提高低温下的制热量和能效,解决空气源热泵空调低温运行的问题。大型蓄热式空气源热泵空调机组可实现电力调峰,虽然不是从节能角度出发,但通过低谷电价较低的特点实现系统经济性并提高工程价值^[22]。

通过将空气源与太阳能、地源、水源等可再生能源进行耦合构建多源热泵系统,提升系统性能。空气源-太阳能复合热泵能够实现太阳能与空气热能的优势互补,使系统能够在全年各工况下稳定运行,有效提高了系统的经济性和节能性;空气源-地源和空气源-水源复合热泵不仅克服了单一空气源热泵空调在夏季高温和冬季低温环境下换热热量小的缺陷,还可缓解单一空气源热泵空调地源或水源热泵的水泵功耗大、地下水回灌等问题。空气源热泵空调与相变蓄热系统结合,在除霜、供热、热水器以及电力调峰方面都能起到提高系统运行效率的作用。这些系统通过切换不同模式,实现不同工况下的更优匹配,更加节能环保,具有更广泛的发展空间。

表 2 对比了各种热泵循环:准二级压缩循环会在压缩机偏离设计工况时出现效率下降、制热/冷量不足的情况;双级压缩循环在蒸发温度较低的工况下,可降低压缩机的排气温度和减少压缩机的能耗;复叠式热泵循环能满足特定的设计工况,同时满足低蒸发温度时的蒸发压力和环境温度条件下的冷凝压力,但由于冷凝蒸发器中多了换热温差,系统效率相对较低;多源耦合热泵循环能充分利用各种热源,克服各种单一热源热泵的缺陷,拓宽了热泵的应用范围,但部分存在初投资较高的痛点;空气源热泵空调-蓄热/冷系统保证了热泵在低温环境下的运行效率且充分利用了低谷电价,经济性有所提升。

表 2 压缩热泵循环系统对比
Tab. 2 Comparison of the circulation systems of compression heat pumps

循环系统类型		优点	缺点	适宜运行工况
准二级压缩热泵系统	带过冷器	结构简单	分流比需要严格控制	在-30℃的低温环境下,可取代双级压缩系统
	带闪发器	低温时制热性能优于带过冷器的系统		寒冷地区小型空气源热泵空调的较佳选择
双级压缩热泵系统	带中间冷却器	排气温度较低,系统适应性提高	运行范围相对较小	应用于蒸发温度和冷凝温度相差较大的工况
	带经济器	排气温度不高,系统COP提高	逆循环除霜有一定的局限性	在-15℃的低温环境下,性能优于准二级压缩热泵系统
复叠式压缩热泵系统		采用2种不同的制冷剂,在各自较好的范围工作	COP相对较低,难以部分负荷运行	特定设计工况
多源耦合热泵循环		可实现不同工况下的更优匹配,应用范围更广	部分多源热泵初投资较高	严寒地区,单一热源受限工况
空气源热泵空调-蓄热/冷系统		保障低温运行效率,解决结霜问题,调节电力负荷	初投资相对较高	低温地区

1.2 除霜

当冷表面温度同时低于空气露点和水的三相点温度时,水蒸气极易在冷表面上冷凝或凝华结霜。随着霜层厚度的不断增加,空气侧流阻和热阻不断变大,换热器传热速率下降,此时,空气源热泵空调系统热效率降低,耗能增加。学者们提出了许多解决方法,见表3。

除霜方法可分为主动除霜和被动除霜^[24]:主动除霜是机组通过四通阀的切换变换蒸发器和冷凝

器的位置,利用系统热量除霜,着眼于系统研究;被动除霜是从观察霜层生长过程的研究出发,分析总结霜层形成机理,通过改变冷表面特征来抑制或延缓霜的形成,偏向于微观与几何方面。目前实际应用中往往使用单一方法除霜,效果有限,应该深入研究不同的主动除霜方法并配合抑制霜层形成的方法,使霜层生长全过程都得到控制,考虑“抑霜为先,除霜为后”,完善评价体系,实现除霜性能和经济最优化^[25]。

表 3 各种除霜方法的特点
Tab. 3 Characteristics of various defrosting technologies

除霜方法	优点	缺点	具体方式和原理	
外加能量	电加热	简单	能耗增大	在膨胀阀和蒸发器间增设电加热器,除霜时开启电加热器
	外加电/磁场	系统稳定性好,不影响室内供热	系统复杂,成本高	利用外场影响水分子排布、霜层生长等,使冷壁面形成霜晶并掉落
	超声波	效率高,制热不间断	振动大	干扰早期的霜晶体生长,起到抑制结霜的效果
不需外加能量	逆循环	无需增加额外的设备	室内舒适性降低	利用四通换向阀将室外机变成冷凝器进行除霜
	蓄热	恢复正常制热速度快,可靠性高	蓄热阶段可能影响制热效果	在压缩机出口或膨胀阀前设置蓄热装置,为除霜提供热源
	热气旁通	可保证室内的舒适性	出现液击的风险变大,除霜时间长	压缩机与室外换热器之间设置旁通,使压缩机排气直接进入室外换热器进行除霜
冷壁面改性	疏水涂层	霜晶核生成时间相对较晚	在大规模应用还不成熟,成本高	疏水涂层应用仿生学,减少霜层厚度
改变空气因素	降低水蒸气比例	有效抑制霜层的形成	系统体积庞大、控制复杂	外机进口气体通过吸附床来降低相对湿度和采用亲水涂层等

1.3 系统控制

在空气源热泵空调系统中,通过耦合多种控制部件及控制机制(如控制压缩机转速、电子膨胀阀开度及制冷剂循环方向等)来满足需求。现有的空气源热泵空调仍存在寒冷地区供暖舒适性不足、压缩机频繁启停以及除霜等问题,学者们提出了一系列控制策略以提升空气源热泵空调的能效,其中研究较多的是除霜控制^[26],见表4。

另外,空气源热泵空调的核心目标之一就是在满足用户需求的前提下,实现能耗可视化、节能可控化,这对于大型多联机空调设备、共享办公空调系统尤为突出。随着云计算、大数据、边缘计算、物联网、人工智能、5G等智能技术的发展,市场上涌现了集中管理、分类统计的各种应用,但实现效果和运行水平有待进一步验证,中国标准化协会也发布了相关标准^[27]。

表 4 低温空气源热泵空调现存问题及解决办法

Tab. 4 Problems and solutions of the low-temperature air source heat pump air conditioning systems

现存问题	方法和技术	控制原理	
严寒地区供热量不足	设计、改良变频控制系统	耦合多级、多源系统,同时采取时间控制、制热量优先等控制方式提升系统能效	
	三缸压缩机变容量控制技术	根据环境温度调控变容控制部件的开启/关闭,实现最优容积比匹配	
压缩机频繁启停	基于控制回风温度策略和能耗控制策略	根据环境条件及能耗控制策略等控制压缩机启停间隔	
空气源热泵空调除霜 ^[26]	直接除霜	显微成像技术	通过显微摄像机拍摄结霜图像,再利用图像处理技术输出霜层厚度
		激光测厚技术	通过激光位移传感器测量霜层厚度
		千分测厚技术	利用千分测厚仪直接测量霜层厚度
		探针-测微仪测厚技术	利用探针观测霜层表面的微观形貌
	间接除霜	光电耦合技术	利用光电技术判断换热器表面是否结霜
		定时除霜法	设定除霜周期定时除霜
		温度除霜法	通过测量换热器表面温度判定是否需要除霜
		温度-时间除霜法	耦合换热器表面温度及运行时间控制除霜节点
		湿度-湿度时间除霜法	在温度-时间基础上考虑湿度对除霜时间的影响,耦合 3 个参数控制
		空气压差除霜法	通过测量工质侧空气侧压差判断是否需要除霜
	智能除霜	最大平均供热能力除霜控制法	以热泵工质所提供的平均供热能力达到最大时开始除霜
		制冷剂过热度	通过测量制冷剂出口过热度判定是否需要除霜
		自适应模糊控制法	对输入变量模糊化处理及模糊推理,判断控制规则是否有效,对结霜控制进行适应性调节
		神经网络控制法	基于试验数据中关于结霜的变量,建立变量间的非线性关系,进而实现合理的除霜控制

2 空气源热泵空调的应用场合及节能减排

2.1 空气源热泵空调制冷的应用

2.1.1 汽车空调

汽车空调是指对汽车内空气的温度、湿度、流速和清洁度等参数进行调节的装置,预防或去除车窗玻璃上的雾、霜和冰雪,保证驾驶员和乘客身体健康以及行车安全。传统燃油汽车空调系统制冷主要采用发动机驱动压缩机制冷,制热主要来自发动机余热。而对于纯电动汽车以及燃料电池汽车来说,没有发动机作为空调压缩机的动力源,不能利用其余热,无法直接采用传统汽车空调系统的解决方案。对于混合动力汽车,发动机的控制方式多样,空调压缩机也不能采用发动机直接驱动的方式。汽车空调系统主要由制冷系统、取暖系统、配气系统和控制电路组成,如图 7 所示。

汽车空调打开时,空调压缩机的运转会导致发动机对外输出功率提高,发动机单位时间内或单位里程内的燃油消耗量也随之增加。有关数据表明,以私家车为例,2.0 L 排量的发动机,每行驶 100 km 的空调燃油附加量为 3.43 L^[28]。目前,大多数电动汽车均采用空调制冷和热泵式空调或热敏电阻(PTC)制热的方式控制车内环境,空调系统消耗的能源在整车能源消耗中的占比约为 33%;同时,在满负荷运转的情况下,制热时电动汽车续航里程会降低近 50%;因此,节能是新能源电动汽车空调的研究重点^[29]。目前针对汽车空调的节能措施见表 5。

2.1.2 房间空调

我国是热泵和空调制造大国,家用空调产量持续占据全球 80% 以上份额。新国标 GB 21455—2019《房间空气调节器能效限定值及能效等级》于

表 5 汽车空调的节能措施

Tab. 5 Energy-saving approaches for vehicle air conditioners

节能措施	原理和特点	实施案例
系统改进	对于电动汽车,减少空调系统蓄电池输出的电功率	电动热泵式空调系统、电动压缩机制冷-电加热采暖空调系统、余热空调及复合热泵空调系统以及储能式空调系统
高效压缩机	涡旋压缩机结构简单、体积小、质量小、流动损失小;转速调节范围大,效率变化不大	摇板式压缩机、斜板式压缩机、变排量压缩机、外部控制阀、内部控制阀等
换热器	换热器要能满足车内热湿负荷波动较大的要求,要有更高的单位体积换热量,具有抗震性、密封性	管翅式换热器、管带式换热器、板式换热器、微通道换热器等
自动控制系统及人机交互	平衡汽车空调复杂功能与易用性之间的关系,为用户提供复杂但易用的空调控制界面,更加科学地管理空调系统运行	经济模式(ECO)控制、启停功能控制等节能控制技术;外控变排量压缩机、同轴管等空调节能部件

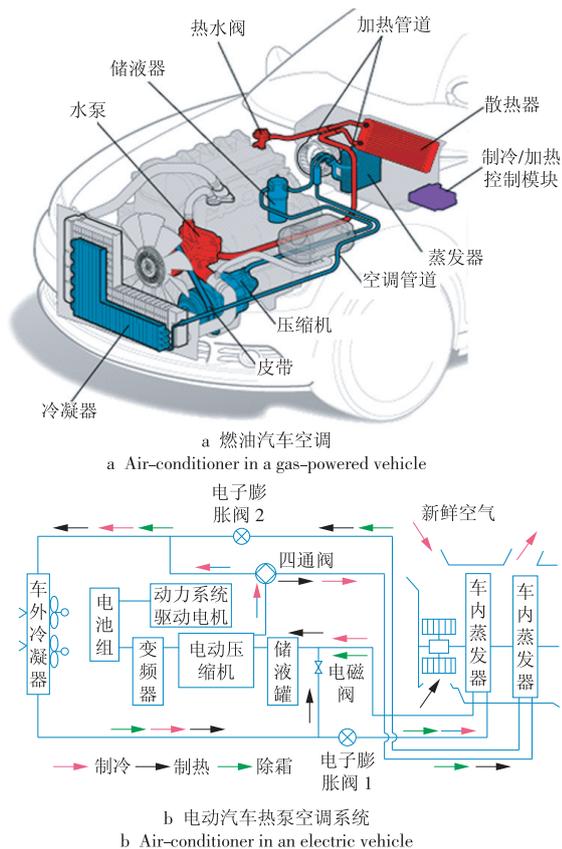


图 7 汽车空调系统

Fig. 7 Air conditioning systems for vehicles

2020年7月1日正式实施,在原标准(GB 21455—2013)基础上能效有较大幅度提升,加快了高效节能空调的推广和产品结构调整。提升房间空调器能效的主要措施包括采用变频调速、优化冷凝器与蒸发器的强化换热和流道、提高压缩机效率、优化设计电子膨胀阀和家用空调器结构参数以及系统参数等。此外,研究人员还提出了一系列新技术:空调热回收技术,包括空调冷凝热回收加热水;空调蓄热技术,主要对电网削峰平谷,达到节能的目的;新材料研发技术,如采用亲水膜铝箔材料强化换热以及新型制冷剂;高效压缩机,如采用变容量调节压缩机等^[30]。

房间空调附加功能成为当前市场新的突破点,目前附加功能可分为舒适类(湿度控制、风感控制等)、健康类(新风、空气品质控制、换热器/过滤网自清洁等)和智能类(远程控制、智能控制、局部温控、模式识别、人机交互、智能互联等)^[31]。附加功能的应用提升了用户的舒适度和使用体验,为空调器差异化发展提供了充分的空间,不同附加功能对房间空调能耗的影响如图8所示。

2.1.3 多联机空调

多联机空调俗称“一拖多”,是指一台室外机连接2台及以上室内机,通过控制压缩机的制冷剂循

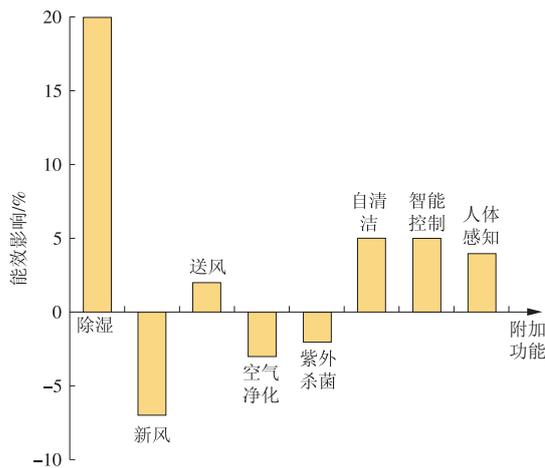


图 8 不同类型附加功能对空调能效的影响

Fig. 8 Impact of different additional functions on the energy efficiency of air conditioners

环量和进入室内换热器的制冷剂流量,实时满足室内冷、热负荷要求的高效率制冷剂空调系统,常用于数据机房、商业中心、医院等功能性场所。其优点为:冷(热)量直接由制冷剂输送,不需要风管或水管系统,减少了输送耗能及载冷剂输送中的能量损失;冷(热)量随负荷调节,节能效果显著,能效比相对较高。其缺点为:回油比较复杂;制冷剂管道安装要求高,管路较长,制冷剂灌装量大^[32]。肖寒松等^[33]总结了多联机控制技术的进展,从循环、除霜、回油、舒适性及节能等方面提出了技术展望:系统优化控制、发展应用多联机实现电力调峰、发展基于大数据的系统舒适性和节能控制以及系统故障诊断技术。多联机将进一步与大数据技术交叉、融合,实现控制技术的创新,提升全工况性能,推动多联机向高效节能、高舒适性、多功能和智能化方向发展^[33]。

2.1.4 节能措施

研发和推广高能效比的空调器可有效提高能源利用率,是目前我国空调行业发展的大趋势。空调整能技术主要包括建筑环境、系统设计和智能控制3方面,具体措施见表6。

2.2 空气源热泵空调制热的应用

空气源热泵空调因高效、环保、节能和紧凑等特点在很多行业得到应用,如农林牧渔业、采矿业、制造业、住宿和餐饮业、建筑业、交通运输业等,其中普通家用制取生活热水、建筑采暖、烘干等方面的技术相对较成熟。

2.2.1 农林牧渔

农林牧渔业对温度的稳定性要求较高,如苗/种初期培育和温室栽培需一年四季调整温度,过低的温度会导致生长发育缓慢,水养殖则需要稳定的水

表 6 空调节能技术

Tab. 6 Energy-saving technologies for air conditioners

项目	常见问题	节能措施
环境建筑	施工缺乏规范 围护结构保温性差 输送介质散热量大 废弃热量大	科学规范施工要求 使用中空玻璃门窗,管道包裹保温材料,加强保温性能 增强建筑通风效果,构建主动式暖通空调系统 合理优化通风布局,调节新风量,减少能耗
系统设计	新技术推广不足 部件层面的研发不足 适应室外环境变化的能力不足 空调系统缺乏维护,使用寿命降低	推广变频技术、变容量调节等节能技术 开发高效节能部件,优化换热器结构设计 采用复合系统,分时段切换冷源系统运行模式 采用空调系统全生命周期管理,定期检修系统 因地制宜,采用新风回风混合、电加热辅助稳定室外工况等措施提高系统运行效率
智能控制	制造成本高 智能化水平整体偏低 信息安全风险高 平台之间不能互联互通	完善生产工艺,调研市场用户需求 加强智能技术的开发 解决终端应用程序(APP)的信息漏洞,加强口令及密码次数限制,提高敏感信息存储安全 厂家加强合作,减少平台开发的资源浪费

温,其供热温度为10~35℃(热泵技术在温室中的应用),空气源热泵空调均能满足需求^[34]。广东省佛山市三水阳特园艺有限公司是生产花卉种苗的企业,育苗所需温室大于30 000 m²,组织培养车间约2 000 m²,年平均气温为21.9℃,最低为-0.7℃,最高为39.1℃。2013年该公司引入空气源热泵空调模块机组,3 a运行期间冬季采暖运行费用减少了50%,温室内部环境温度得到精准控制,占地面积和员工数量减少,稳定性较传统燃煤加热方式高,无污染物排放,总体社会效益与经济效益较好^[35]。

2.2.2 采矿

煤矿供热主要有建筑采暖热负荷、井筒防冻热负荷和生活热水,而井筒防冻热负荷占一半以上,主要供热介质有热水、蒸汽、热风 and 导热油。采用空气源热泵空调供暖时,用于建筑采暖的热水温度一般低于60℃,井筒防冻供水温度高于50℃,严寒地区则高于75℃,双级压缩的低温空气源热泵热水器(准二级压缩循环热泵)能够满足低温工况下制热量大的需求^[36]。以山西省临汾市乡宁县的煤矿为例,该煤矿共布置141台空气源热泵空调机组替代燃煤锅炉^[36],采用空气源热泵空调初投资较低,运行费用低,比燃煤锅炉房节省3.36万元。原油生产需要采用单井储油罐贮存原油以方便外运,而油井生产的原油黏度较高,从储油罐中向罐车里装原油前需要加热到一定温度,采用空气源热泵空调加热可满足安全、环保、节能的要求^[37]。

2.2.3 制造烘干

制造业的烘干技术要求干化过程耗能低、效率高且安全。物料对温度较敏感且不同物料的烘干温度不同,因此需要对温度进行精准控制。相较于传统烘干技术,空气源热泵烘干使用模块化设计,温度调整范围大且精度高、效率高、安全性更好,能够达到物料的烘干要求,有广泛的应用,如图9所

示。辽宁省鞍山市岫岩县牧牛镇香菇烘干项目中,在热量需求、环境温度、降水和产量等条件相同的情况下,采用空气源热泵单次烘干费用仅199.14元,低于燃煤锅炉(271.56元)、天然气锅炉(604.00元)和电热器(628.88元)^[6]。

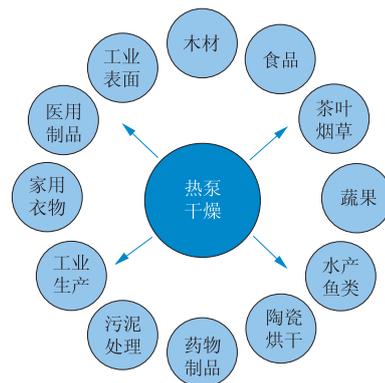


图9 空气源热泵空调用于制造业烘干

Fig. 9 Air source heat pump air conditioners used for drying of manufacturing industry

2.2.4 建筑

建筑的热量需求主要是热水和暖气,小型建筑使用普通家用空调热泵系统可满足住户供热采暖需求。大型建筑如写字楼、商场、教学楼等使用中央热泵式空调系统,系统体积庞大、管路复杂,需要与建筑结构、电气等配合,但具有经济节能、管理方便等优势。针对位置偏远、无市政热源和天然气的区域,空气源热泵空调能够有效解决热水和供暖问题。甘肃嘉峪关绕城高速公路收费站管理所的宿舍楼和办公楼采用超低温空气源热泵空调机组,解决了冬天供暖问题。相较于电采暖,采用超低温空气源热泵空调可节省58.3%的电量,节约标准煤94.6 t/a^[38]。同样,内蒙古北部的铁路站段(冬季最低温度为-23.0℃,夏季平均温度为27.5℃)采用空气源热泵热水系统,可满足60.0℃的用水需求,日

均能源消耗量为电锅炉的 30.4%,年运行费用是燃气锅炉的 40.6%^[39]。空气源热泵空调是“煤改电”采暖的最佳方式,催生 33.6 亿元的热泵市场^[40]。

2.2.5 交通运输

在交通运输业方面,除汽车外,船舶等也需要考虑行驶过程中的舒适性和节能性,空气源热泵空调在水上运输的应用同样有巨大潜力。船舶正常航行时机舱温度一般在 40℃以上,空气源热泵空调吸取船舱热量,可同时实现降低船舱温度和制取生活热水。热泵还可成为海水淡化的加热器,是船舶海水淡化的发展方向之一。目前,空气源热泵空调在船舶的应用有限,主要原因是:机舱空间相对封闭,空气不易流通;热泵效率不高,结构需要更加紧凑;出水温度低,无法满足油类的余热需求^[41]。

2.2.6 住宿和餐饮

住宿和餐饮业对热水的需求量较大且用水时段较集中,空气源热泵空调可错开用水集中时间或在用水需求少的谷电时间段蓄热水,显著提高经济性。由表 7 可见,在制备同等体积和温升热水的情况下,空气源热泵空调运行费用约为电热水锅炉的 19.6%,约为燃气锅炉的 27.4%^[42]。上海某酒店的生活热水采用空气源热泵,其全年综合能效比

(SEER)为 3.92,生产热水的能耗费用为 11.7 t/元,比改造前热水锅炉的费用低约 36.4%^[43]。浙江大学紫金港校区餐饮中心采用太阳能+空气源热泵供应热水,4—10月太阳能热水加热系统能够满足热水使用需求,在平均温度最低的 1 月,空气源热泵系统的月平均使用效率约为 55%,节能费用达 39.15 万元/a,每年可减少碳排放 187.5 t,社会、经济效益良好。

2.2.7 卫生和社会工作

杀菌消毒是卫生和社会工作的重要方面,采用空气源热泵空调产生蒸汽的过程控制能力强、运行经济性好、投资回收期短,能够应对突发性杀菌场合。Yan 等^[44]提出了一种复叠式空气源热泵空调,低压级制冷剂采用 R404A,高压级制冷剂采用 R245fa,产生的蒸汽量为 0.5 t/h,温度可达 120℃,运行 3 a 以上的经济性最好。

表 8 总结了空气源热泵空调的具体应用案例,其应用行业广、温度范围广,可以低温干燥物料高温杀菌,温度利用有即时型和蓄热型,供暖方式分中央供热式和模块化供热式,针对性强,安装条件灵活,受地理条件和气候影响小,在陆地和非陆地场合均能发挥作用。

表 7 空气源热泵空调与传统热水设备的运行费用

Tab. 7 Operating costs of the air source heat pump air conditioner and the traditional hot water equipment

项目	电热水锅炉	燃气锅炉	柴油锅炉	太阳能热水器	空气源热泵
能源类型	电能	液化气	轻柴油	太阳能+电能	空气热能+电能
热量需求/kJ	167 472	167 472	167 472	167 472	167 472
能源热值	3 600.65 kJ/(kW·h)	45 217.44 kJ/m ³	42 705.36 kJ/kg	3 600.65 kJ/(kW·h)	3 600.65 kJ/(kW·h)
年平均热效率/%	90	70	70	270	460
每日总耗能	51.68 kW·h	5.29 m ³	5.60 kg	17.23 kW·h	10.10 kW·h
能源单价(广州)	0.8 元/(kW·h)	5.6 元/m ³	4.9 元/kg	0.8 元/(kW·h)	0.8 元/(kW·h)
年运行费用/元	14 868	10 656	9 900	4 956	2 916

表 8 空气源热泵空调的应用

Tab. 8 Application of air source heat pump air conditioners

行业	目的	特点	挑战
农林牧渔业	维持温内温度	模块化控制,操作简单,设备紧凑,占地少	投资相对大,仅在花卉种植等效益较高场合使用
采矿业	空气加热,矿井口防冻送风	制冷剂和空气一次换热管,管路简单,可远程控制	螺杆式双级热泵噪声较大,涡旋式热泵无法满足要求
制造烘干业	加热循环风,烘干物料	模块化设计,烘干品质好,适用不同烘干温度的物料	需要燃气辅助快速升温,室内粉尘等颗粒影响设备长期使用
建筑业	制取生活热水,冬季采暖	经济效益高,安全性高,安装方便,维护简易	低温环境结霜影响设备效率,同时影响建筑的舒适度
交通运输业	制取热水,采暖	不受地理条件、能源来源等的限制,安装条件灵活	相对密闭的空间影响热泵效率,压缩机排气温度较低
住宿和餐饮业	提供洗浴、洗涤、洗菜等热水	用水时段集中,可夜间谷电时段蓄热,经济性好	普通空气源热泵出水温度低,蓄热水箱容积大、占地面积大
卫生和社会工作	高温蒸汽杀菌消毒	能够满足不同水温、长时间、大需求等要求	热泵出口温度低,需要蒸汽压缩机辅助提供高温蒸汽

在现有技术条件下,单级空气源热泵空调仍面临低温结霜、排气温度高等问题,导致其在某些场合应用受限,如船舶机舱、高温蒸汽杀菌等。

2.3 空气源热泵空调对节能减排的贡献

2.3.1 空气源热泵空调在农村的覆盖情况及经济性

近些年,作为大气污染防治重要措施的清洁取暖工作开展得如火如荼。北京市因其重要的城市作用,在清洁取暖工作方面发挥了排头兵作用。2013年启动了农村地区“减煤换煤清洁空气”行动,自2016年以来,大规模开展整村的清洁取暖工作^[45]。截至2020—2021年供暖季,北京市农村地区“煤改电”约90万户,其中近90%采用空气源热泵空调。国家空调设备质量监督检验中心空调设备检测部团队从2016年开始连续5a开展北京市农村煤改清洁能源供暖运行监测^[46],目前已有超过300个空气源热泵空调供暖项目在线运行。检测数据显示,2个供暖季的最高功耗为105.2 kW·h/m²,最低功耗为21.6 kW·h/m²。空气源热泵空调机组的COP值(≥ 0.95)高于普通电热锅炉和燃煤锅炉^[45]。2020—2021年供暖季(2020-11-15—2021-03-15),北京市平原农村地区室外平均温度为0℃,所监测的空气源热泵热水机系统供暖效果较好,能够在极寒天气满足农户基本供暖需求,室内温度平均为18.4℃,供暖系统COP平均值为2.13(含水泵能耗),供热量平均值为44.7 W/m²。运行费用受系统耗电量和谷电率(供暖季谷电时段为21:00到次日06:00,其余年份供暖季谷电时段为20:00到次日08:00;谷电率指整个供暖季谷电期间的耗电量与总耗电量的比值)的综合影响,政府对谷电补贴(谷电价格为0.1元/(kW·h),补贴上限为每个取暖季10 MW·h)后84%的空气源热泵热水机供暖系统日均运行费用集中在10~25元,94%在25元以下,表明空气源热泵供暖系统具有良好的经济性。

2.3.2 空气源热泵空调的碳足迹

碳足迹指的是系统运行过程中的温室气体排放量,用CO₂当量表示^[47]。根据燃料、电、热水或蒸汽的消耗量与当地排放系数得到各种温室气体的排放量,然后根据其全球变暖潜能值(GWP)转化为CO₂当量,具体计算公式为^[48]

$$E_{\text{CO}_2,i} = GE_{f,i} P_{\text{GW},i},$$

式中: $E_{\text{CO}_2,i}$ 为某种温室气体的CO₂当量,kg; G 为燃料、电、热水或蒸汽的消耗量,kg; $E_{f,i}$ 为某种温室气体的排放系数,定义为消耗单位燃料或生产单位产品时某种温室气体的排放量,kg/kg或kg/(kW·h); $P_{\text{GW},i}$ 为某种温室气体的GWP。

样本分布在北京市农村平原地区(大兴区、通州区、顺义区、房山区、朝阳区、丰台区和海淀区)。考虑到人口密度、经济因素和个人习惯等因素,根据实际运行时间选择了50户家庭进行性能测试。北京市供暖从11月15日开始,到次年3月15日结束,共4个月。在120d的供暖季中,2016—2017年和2017—2018年供暖季的平均供暖需求为61d,耗电量分别为61.3,65.3 kW·h/m²,最冷的一天耗电量分别为79.5,89.7 kW·h/m²^[45]。由此可以计算出采暖季日平均CO₂当量,如图10所示。由图10可见,相比于电热锅炉,空气源热泵空调机组在常规天气和最冷天气的CO₂当量较低。

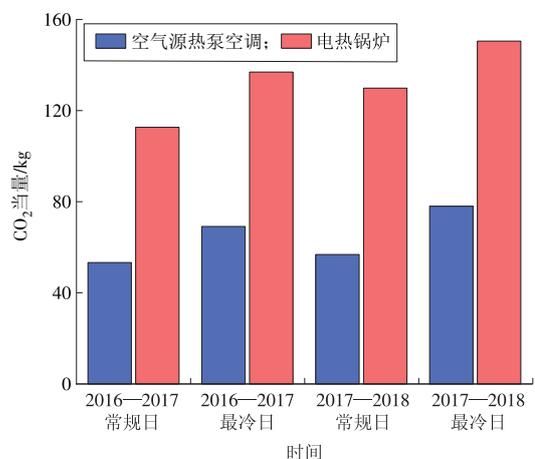


图10 空气源热泵空调与电热锅炉的碳足迹

Fig. 10 Carbon footprint of air-source heat pump air conditioners and electric boilers

2.3.3 节能与减排

图11a为北京市平原地区(山区)循环水温为38.7℃、室内温度为18.9℃时,空气源热泵空调机组和电热锅炉采暖季的逐时耗电量和逐时耗煤量。通过对比可知,空气源热泵空调的逐时耗电量与逐时耗煤量总是低于电热锅炉。由于空气源热泵空调的制热效率要高于电热锅炉,因此在相同的制热量前提下,空气源热泵空调相比电热锅炉更为节能、环保,其日耗电量比电热锅炉少127.80 kW·h。图11b为空气源热泵空调机组和电热锅炉采暖季的CO₂排放趋势。在相同热负荷下,相比于电热锅炉,空气源热泵空调机组的高COP、低耗电量的特点使其CO₂的逐时排放量更少,平均减少了43.95%,具有节能减排的作用。

目前,空气源热泵空调供暖系统平均COP为2.13,若平均COP提升15%,根据已经实施改造的区域测算,以空气源热泵空调供暖系统供暖季单位面积供热量平均值为44.7 W/m²、整个供暖季供暖120d计,单户(按120m²供暖面积核算)现有供暖能

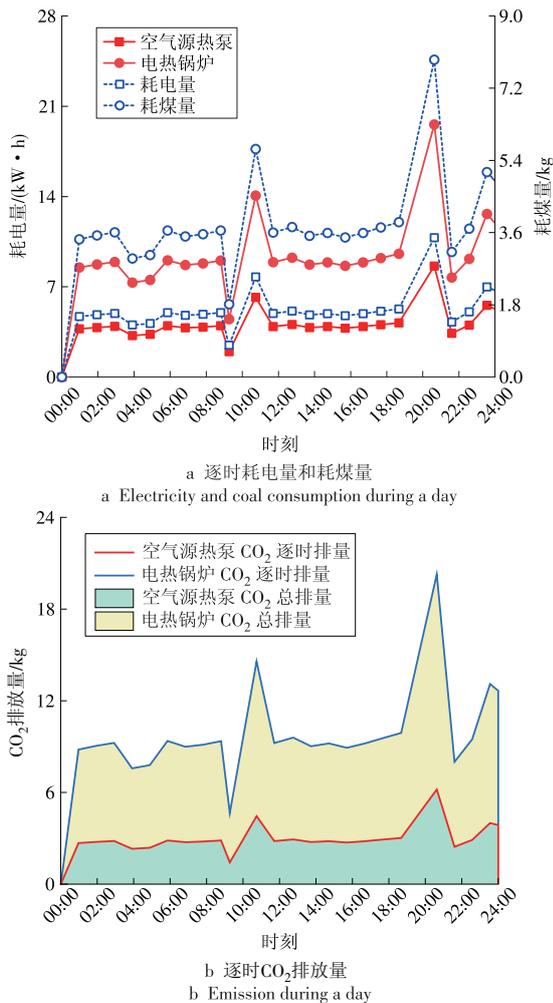


图 11 空气源热泵空调与电热锅炉的逐时耗电量、耗煤量及 CO₂排放量
Fig. 11 Hourly electricity consumption, coal consumption and CO₂ emissions of air-source heat pump air conditioners and electric boilers

耗为 7 252.7 kW·h,空气源热泵空调能效提升后,可节省电量 946.0 kW·h,单户节约费用 473.0 元(按电价为 0.5 元/(kW·h)计)。北京市现有 81 万户采用空气源热泵空调供暖系统,根据 GB/T 50801—2013《可再生能源建筑应用工程评价标准》提供的常规能源替代量的评价方法,能效提升后预计可节约电量 770.0 GW·h,相当于每年可以节约标准煤 13.4 万 t,可实现 CO₂减排 33.21 万 t,SO₂减排 0.30 万 t,粉尘减排 0.10 万 t。

3 空气源热泵空调面临的挑战及未来发展趋势

3.1 面临的挑战

随着国际上对环境问题的日益关注以及我国“双碳”目标的提出,空气源热泵空调潜力将会被进一步挖掘,市场将进一步扩大。但空气源热泵空调的推广应用面临各种挑战,包括技术、经济、监管、政策和公众接受等问题,如图 12 所示^[49]。政策不确

定、无明确的低碳路线和技术革新是热泵发展面临的主要问题。

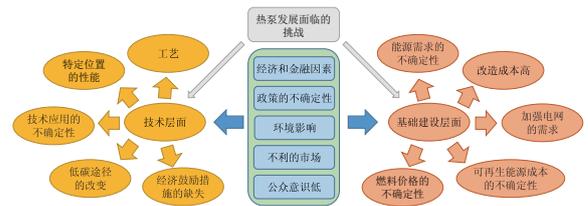


图 12 空气源热泵空调发展面临的挑战
Fig. 12 Challenges faced by the air-source heat pump air conditioning systems

(1)政策的制定很大程度依赖用户末端的用能形式和供热技术,普适性的政策对目标达成效果并不好。虽然各国出台了各种鼓励政策,如英国空气源热泵空调补贴为 0.60~1.15 元/(kW·h),法国空气源热泵空调可获得 25% 的设备金额减免,日本和欧美各国都给予了购买价 25% 的政策性补贴,我国各省也陆续出台了相应的空气源热泵空调补贴政策,但总体来说,补贴不足也是热泵技术不能广泛应用的一个障碍。

(2)公众对热泵不熟悉、不了解对环境的意义和成本效益、热泵存在噪声、运行费用高、初投资高、不推荐在保温不好的建筑物使用等,导致公众对热泵的接受度较低。

(3)缺乏标准和相关强制性政策也限制了热泵的发展,虽然有相关热泵设计和安装规范,但缺乏安装和维修的专业人员,不能满足一些行业的特殊需求。

(4)热泵的大规模使用会增加高峰期的电力需求量,在英国,热泵的使用可能会导致峰值电力需求增加 14%^[49]。因此,热泵的使用规模与峰值电力需求之间存在一定的匹配问题,有学者提出采用蓄热来解决该问题。

总的来说,空气源热泵空调的发展面临各种挑战,但在减少温室气体排放和对供暖和制冷行业可持续发展的贡献已毋庸置疑。

3.2 发展趋势

为提高空气源热泵空调的性能,可通过优化系统部件、优化系统、改进除霜方法、采用新工质等实现。通过采用高效的压缩机和换热技术,扩宽系统运行范围,在大温差工况下保持系统的稳定性和可靠性;通过深入研究热泵系统理论机理,优化设计空气源热泵空调系统,开发新型空气源热泵空调系统等,使制热量、COP 等得到提升;通过深入研究结霜机理、提出新的除霜方法、优化除霜控制等措施来改善低温运行性能;通过研究制冷剂的热物性、

研发绿色高效的新型制冷剂来促进空气源热泵空调技术的发展。

近年来,随着新材料的发展以及大数据、人工智能概念的提出,空气源热泵空调技术迎来了新的发展机遇和新的经济增长点。空气源热泵空调与储热技术结合是实现节能、调节电力负荷、减少运行费用的重要技术路线。材料的传热传质特性严重制约了能量的储存和传递,相变储热材料在应用过程中仍存在诸多问题,如相分离、过冷、导热性能差、储热密度低、腐蚀性强、相容性差等,这些问题都迫切需要解决;另外,多数储热材料的热导率均较低,导致蓄、放热速率慢,不能满足工业应用需求,传热强化技术已经成为相变储热系统的研究重点^[50-51]。在空气源热泵空调系统的运行过程中,利用数据挖掘技术,根据系统的历史运行数据建立模型,通过实时数据的接收和计算,可对设备进行监控,在故障发生前及时预警,找出故障源并实现维护预测,进而达到节省能耗、节省维护时间、降低人工维护成本的目的。另外,运行效率与运行环境、用户使用习惯等密切相关,通过大数据长期分析与监测,对系统的运行数据、能耗数据、当地气象数据和环境数据等进行分析,采用数据挖掘算法和人工智能,建立制冷空调系统能耗预测模型,提前预测系统未来的能耗,精确匹配机组运行参数,优化系统控制,提高运行效率,使系统始终在满足室内负荷的条件下最优化运行,从而达到节能的目的^[52]。

4 结论

近年来,空气源热泵空调技术迅猛发展,中国、日本、欧洲和美国是核心热点区域。在我国,供暖和热水占空气源热泵空调应用的92.7%。空气源热泵空调的研究工作主要围绕循环构建、除霜、系统控制等方面开展。准二级压缩热泵循环在低温空气源热泵空调产品中应用最广泛;与太阳能、地源和水源等耦合的多源热泵系统可实现系统能效提升,弥补单一热源的不足,但有些问题仍待解决,实际应用相对较少;空气源热泵空调结合相变蓄热,在电力负荷调节和热量匹配方面具有优势。比较了主动除霜和被动除霜的优缺点,指出系统控制是保证系统运行的重要手段。空气源热泵空调在制冷方面已有成熟应用,制热方面,制取生活热水、采暖和烘干等技术相对较成熟。空气源热泵空调在我国北方煤改清洁能源项目中扮演着重要角色,所监测的空气源热泵热水机的COP平均值为2.13,供热量平均值达到44.7 W/m²,节能减排效果明显。经济性、政策的不确定性、公众接受度低、技术瓶颈

等成为热泵广泛应用面临的主要挑战,新材料、大数据、人工智能与空气源热泵空调融合成为发展方向,空气源热泵空调在新形势下将会发挥重要的作用。

参考文献:

- [1]郑峥,王立雄,郭娟利,等.低能耗绿色建筑中针对被动式太阳能技术应用评价方法研究[J].建筑节能,2017(5):65-70.
ZHENG Zheng, WANG Lixiong, GUO Juanli, et al. Assessment method of passive solar technologies for low-energy green buildings [J]. Building Energy Efficiency, 2017(5):65-70.
- [2]张朝晖,王若楠,刘慧成,等.新冠疫情下制冷空调行业应对挑战的思考[J].制冷与空调,2021,21(1):1-6,19.
ZHANG Zhaohui, WANG Ruonan, LIU Huicheng, et al. Thoughts for the challenges facing by refrigeration and air-conditioning industry under the COVID-19 outbreak [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2021, 21(1):1-6, 19.
- [3]张伟涛,冯蛟杰.关于新能源概念界定的探讨[J].商品与质量,2012(S5):308.
ZHANG Weitao, FENG Jiaojie. Discussion on the definition of new energy [J]. The Merchandise and Quality, 2012 (S5):308.
- [4]European Commission. 2009 directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources[Z].
- [5]张行星,赵旭东,谭军毅,等.欧洲低温空气源热泵技术发展现状[J].暖通空调,2015,45(7):48-52.
ZHANG Xingxing, ZHAO Xudong, TAN Junyi, et al. Development status of low temperature air source heat pump technology in Europe [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(7):48-52.
- [6]房庆,宋忠奎,高屹峰.中国空气能(空气源热泵供热)产业发展报告(2020) [R].北京:中国节能协会热泵专业委员会,2020.
- [7]HEO J, MIN JEONG W, KIM Y. Effects of flash tank vapor injection on the heating performance of an inverter-driven heat pump for cold regions [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 33(4):848-855.
- [8]石文星.低温热泵技术在日本的进展[J].暖通空调,2008,38(12):26-34.
SHI Wenxing. Development of the low temperature air source heat pump in Japan [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(12):26-34.
- [9]申江,李园园,白俊文,等.闪蒸器补气热泵系统的试验研究[J].制冷学报,2008(2):20-22.
SHEN Jiang, LI Yuanyuan, BAI Junwen, et al. Experimental study on heat pump with flash-tank [J]. Journal of Refrigeration, 2008(2):20-22.

- [10] 马国远, 邵双全. 寒冷地区空调用热泵的研究[J]. 太阳能学报, 2002(1): 17-21.
MA Guoyuan, SHAO Shuangquan. Research on heat pump cycle for air conditioning in cold regions[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2002(1): 17-21.
- [11] 张剑飞, 秦妍, 秦海杰. 涡旋式压缩机中间补气技术[J]. 制冷与空调, 2012, 12(2): 22-24, 30.
ZHANG Jianfei, QIN Yan, QIN Haijie. Second gas-injection technology for scroll compressor[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2012, 12(2): 22-24, 30.
- [12] 艾淞卉, 吴成斌, 石文星, 等. 低环境温度空气源热泵机组在北京冬季运行的性能[J]. 暖通空调, 2015, 45(3): 52-58.
AI Songhui, WU Chengbin, SHI Wenxing, et al. Running performance of low-temperature air-source heat pump applied in winter of Beijing [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(3): 52-58.
- [13] 金旭. 双级压缩空气源热泵采暖系统实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [14] 王林, 陈光明, 陈斌, 等. 一种用于低温环境下新型空气源热泵循环研究[J]. 制冷学报, 2005(2): 34-38.
WANG Lin, CHEN Guangming, CHEN Bin, et al. Cycle analysis of heating and refrigeration in new air-source heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2005(2): 34-38.
- [15] 周亮亮, 李贺, 白建民, 等. 低温环境下复叠式空气源热泵热水系统的实验研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(4): 10-14.
ZHOU Liangliang, LI He, BAI Jianmin, et al. Experimental research on hot water system based on cascade air-source heat pump under low temperature conditions [J]. Building Science, 2013, 29(4): 10-14.
- [16] ODEH S, NIJMEH S, AKASH B. Performance evaluation of solar-assisted double-tube evaporator heat pump system [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2004, 31(2): 191-201.
- [17] 马坤茹, 李雪峰, 李思琦, 等. 新型太阳能/空气能直膨式热泵与空气源热泵供热性能对比[J]. 化工学报, 2020, 71(S1): 375-381.
MA Kunru, LI Xuefeng, LI Siqi, et al. Contrastive research of heating performance of direct expansion solar/air assisted heat pump system and air-source heat pump [J]. CIESC Journal, 2020, 71(S1): 375-381.
- [18] 周光辉, 陈圣洁, 刘寅, 等. 空气-地源双热源复合热泵低温制热特性实验研究[J]. 低温与超导, 2009, 37(10): 46-48.
ZHOU Guanghui, CHEN Shengjie, LIU Yin, et al. Experiment research on heat performance of the ground source-air double resources compound heat-pump [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2009, 37(10): 46-48.
- [19] 游田, 王宝龙, 石文星. 空气-土壤双源热泵系统在我国北方地区的应用[J]. 暖通空调, 2016, 46(12): 40-45.
YOU Tian, WONG Baolong, SHI Wenxing. Air-source and ground-source heat pump application to northern regions of China [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2016, 46(12): 40-45.
- [20] 徐俊芳, 赵耀华, 王皆腾, 等. 空气-水双热源复合热泵系统性能试验[J]. 建筑技术, 2019, 50(1): 16-19.
XU Junfang, ZHAO Yaohua, WANG Jieteng, et al. Performance experiments for air-water dual-source composite heat pump system [J]. Architecture Technology, 2019, 50(1): 16-19.
- [21] 吴晓阳. 船舶机舱空气与海水复合热源热泵技术应用分析[J]. 装备制造技术, 2017(7): 206-208.
WU Xiaoyang. The application analysis on composite heat pump of marine engine room air and seawater [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(7): 206-208.
- [22] 倪龙, 周超辉, 姚杨, 等. 空气源热泵蓄热系统形式及研究进展[J]. 制冷学报, 2017, 38(4): 23-30.
NI Long, ZHOU Chaohui, YAO Yang, et al. Research progress of air source heat pump heat storage system [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(4): 23-30.
- [23] 韩志涛, 姚杨, 马最良, 等. 空气源热泵蓄能热气除霜新系统与实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007(6): 901-903.
HAN Zhitao, YAO Yang, MA Zuilang, et al. A new air source heat pump system of energy store for heat flux defrost and its experimental study [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007(6): 901-903.
- [24] 周会芳, 臧润清. 除霜方法的研究及其进展[J]. 低温与超导, 2019, 47(12): 78-84.
ZHOU Huifang, ZANG Runqing. Research and development of defrosting methods [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(12): 78-84.
- [25] 冯瑞峰, 孙俊彪, 霍兵, 等. 空气源热泵除霜技术进展与区域化应用综述[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13509-13519.
FENG Ruifeng, SUN Junbiao, HUO Bing, et al. Summary of the air source heat pump defrosting technology and regional application [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(33): 13509-13519.
- [26] 王泮浩, 马龙霞, 王志华, 等. 空气源热泵除霜控制方法研究现状及展望[J]. 制冷学报, 2021, 42(5): 27-35.
WANG Fenhao, MA Longxia, WANG Zhihua, et al. Research status and prospect on defrosting control method of air source heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(5): 27-35.
- [27] 胡亚欣, 李红伟, 亓新, 等. 智能云多联式空调(热泵)机组智能水平评价技术规范标准解读[J]. 中国标准化, 2021(13): 170-174.
HU Yaxin, LI Hongwei, QI Xin, et al. Interpretation of the

- technical specification for evaluation of intelligent level of intelligent cloud multi-connected air-condition (heat-pump) unit[J]. China Standardization, 2021(13):170-174.
- [28]周云龙. 汽车空调对油耗的影响及节能技术[J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10(9):46-47.
ZHOU Yunlong. Influence of automobile air conditioning on fuel consumption and energy saving technology [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2020, 10(9):46-47.
- [29]赵宇, 嵇天炜, 瞿晓华, 等. 电动汽车热泵空调系统综述[J]. 制冷与空调, 2020, 20(7):72-81.
ZHAO Yu, JI Tianwei, QU Xiaohua, et al. Review of heat pump system in electric vehicles[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2020, 20(7):72-81.
- [30]何曙. 我国家用空调器能效标准及节能技术发展综述[J]. 家电科技, 2012(5):62-63.
HE Shu. Summary of energy efficiency standards and energy saving technology development of domestic air conditioners in China [J]. Journal of Appliance Science and Technology, 2012(5):62-63.
- [31]成建宏, 邵双全, 付裕, 等. 房间空调器附加功能发展及对节能的影响探讨[J]. 制冷与空调, 2020, 20(11):6-8, 37.
CHENG Jianhong, SHAO Shuangquan, FU Yu, et al. Discussion on the development of additional function of room air conditioner and influence on energy saving [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2020, 20(11):6-8, 37.
- [32]马一太, 王洪利. 多联机空调系统及其能效标准进展[J]. 机械工业标准化与质量, 2008(2):21-23.
MA Yitai, WANG Hongli. Progress of multi split air conditioning system and its energy efficiency standards [J]. Machinery Industry Standardization and Quality, 2008(2):21-23.
- [33]肖寒松, 张国辉, 石文星, 等. 多联机控制技术进展与展望[J]. 制冷与空调, 2019, 19(11):69-79.
XIAO Hansong, ZHANG Guohui, SHI Wenxing, et al. Progress and prospects of the control technology for multi-split air conditioner [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2019, 19(11):69-79.
- [34]王强, 杨禹尧, 夏礼如, 等. 热泵技术在温室中的应用[J]. 中国农学通报, 2020, 36(29):139-144.
WANG Qiang, YANG Yuyao, XIA Liru, et al. Application of heat pump technology in greenhouse [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(29):139-144.
- [35]辜松, 初麒, 杨艳丽, 等. 温室空气源热泵加热系统的应用[J]. 农业工程技术, 2017, 37(22):26-30.
GU Song, CHU Qi, YANG Yanli, et al. Application of greenhouse air source heat pump heating system [J]. Agricultural Engineering Technology, 2017, 37(22):26-30.
- [36]邵鹏华. 空气源热泵在煤矿供热改造中的应用[J]. 暖通空调, 2021, 51(7):91-94.
SHAO Penhua. Application of air-source heat pumps to coal mine heating transformation [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(7):91-94.
- [37]秦磊磊, 朱建军, 刘小波, 等. 空气源热泵加热技术在油井加温系统的应用[J]. 石油石化节能, 2019, 9(6):14-20.
QIN Leilei, ZHU Jianjun, LIU Xiaobo, et al. Application of air source heat pump heating technology in oil well heating system [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2019, 9(6):14-20.
- [38]王霞. 浅析超低温空气源热泵在公路房建中的应用[J]. 智能城市, 2021, 7(13):20-21.
WANG Xia. Analysis on the application of ultra-low temperature air source heat pump in highway housing construction [J]. Intelligent City, 2021, 7(13):20-21.
- [39]冯晓娟. CO₂空气源热泵热水系统在铁路站段中的应用[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2019, 9(2):30-32, 55.
FENG Xiaojuan. Application of CO₂ air source heat pump hot water system in railway station and depot [J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2019, 9(2):30-32, 55.
- [40]XU Shuxue, WANG Yueyue, NIU Jianhui, et al. 'Coal-to-electricity' project is ongoing in North China [J]. Energy, 2020, 191, 15:116525.
- [41]刘世杰, 孙慧敏. 空气源热泵技术在船舶机舱中的应用分析[J]. 中国水运, 2021(2):123-125.
LIU Shijie, SUN Huimin. Application analysis of air source heat pump technology in marine engine room [J]. China Water Transport, 2021(2):123-125.
- [42]吴燕国, 霍韶波, 李森. 空气源热泵在五星级酒店热水系统中的应用及辅助措施[J]. 低碳世界, 2021, 11(3):102-104.
WU Yanguo, HUO Shaobo, LI Miao. Application and auxiliary measures of air source heat pump in hot water system of five-star hotel [J]. Low Carbon World, 2021, 11(3):102-104.
- [43]尹应德, 徐路生, 黄旭阳, 等. 基于全年综合能效评定方法的空气源热泵热水系统性能测试研究[J]. 高校化学工程学报, 2018, 32(4):933-939.
YIN Yingde, XU Lusheng, HUANG Xuyang, et al. Performance of air source heat pump domestic hot water system under seasonal energy efficiency assessment [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2018, 32(4):933-939.
- [44]YAN H Z, HU B, WANG R Z. Air-source heat pump heating based water vapor compression for localized steam sterilization applications during the COVID-19 pandemic [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021,

145:111026.

[45]XU Z W, LIU F, XU W, et al. Atmospheric air quality in Beijing improved by application of air source heat pump (ASHP) systems[J].Journal of Cleaner Production, 2020, 257:120582.

[46]徐昭炜, 杨强, 王智超, 等. 北京市农村地区清洁取暖运行效果监测评价[J]. 建设科技, 2020 (2):10-13.

XU Zhaowei, YANG Qiang, WANG Zhichao, et al. Monitoring and evaluation on the operation effects of clean heating in rural areas of Beijing[J]. Construction Science and Technology, 2020 (2):10-13.

[47]赵国涛, 钱国明, 王盛. “双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J]. 华电技术, 2021, 43(6): 11-20.

ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng. Analysis on green and low-carbon development path for power industry to realize carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 11-20.

[48]刘成波. 不同空调系统的碳足迹分析[J]. 建筑热能通风空调, 2011, 30(6): 14-16, 50.

LIU Chengbo. Carbon footprint analysis for different air-conditioning system [J]. Building Energy & Environment, 2011, 30(6): 14-16, 50.

[49]GAUR A S, FITIWI D Z, CURTIS J. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review [J]. Energy Research & Social Science, 2021, 71: 101764.

[50]李昭, 李宝让, 陈豪志, 等. 相变储热技术研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(12):5066-5085.

LI Zhao, LI Baorang, CHEN Haozhi, et al. State of the art review on phase change thermal energy storage technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39 (12):5066-5085.

[51]钟声远, 赵军, 李浩, 等. 基于城市功能区划分的分布式相变蓄热站热经济性分析[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 23-30.

ZHONG Shengyuan, ZHAO Jun, LI Hao, et al. Thermal economy analysis of distributed phase change heat storage stations based on urban functional zoning [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 23-30.

[52]张朝晖. 制冷空调技术创新与实践[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2019.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

陈健勇(1983—),男,湖南郴州人,副教授,硕士生导师,博士,从事强化传热和热泵空调节能提效等研究(E-mail: jianyong@gdut.edu.cn)。

李浩(1992—),男,内蒙古包头人,工程师,博士,从事空气源热泵长效性能提升研究(E-mail: lihao@emcs.com)。

陈颖(1969—),女,重庆人,教授,博士生导师,博士,从事微尺度传热和高性能相变材料等研究(E-mail: chenying@gdut.edu.cn)。

赵军(1964—),男,天津人,教授,博士生导师,博士,从事中低温热能高效利用、智慧型综合能源以及近零碳技术中的新理论与新方法等研究(E-mail: zhaojun@tju.edu.cn)。

广 告 索 引

郑州科润机电工程有限公司 (后插 1)

华电水务科技股份有限公司(跨版) (后插 2,3)

华电环保系统工程有限公司(跨版) (后插 4,5)

中国华电科工集团有限公司新能源技术开发公司 (后插 6)

国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术研发(实验)中心 (后插 7)

华电综合智慧能源科技有限公司 (后插 8)

华电通用轻型燃机设备有限公司 (后插 9)

郑州华电能源科技有限公司(跨版) (后插 10,11)

华电重工股份有限公司(跨版) (后插 12,13)

中国华电科工集团有限公司总承包分公司(跨版) (后插 14,15)

华电技术 (后插 16)

山东华电节能技术有限公司 (后插 17)

华电科工安全环境质量科学研究所 (后插 18)

华电郑州机械设计研究院有限公司 (封三)

中国华电科工集团有限公司 (封底)