

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.04.002

二氧化碳跨临界循环热泵的应用与发展

Application and development of CO₂ transcritical cycle heat pumps

李敏霞,侯培然,王派,董丽玮,田华

LI Minxia, HOU Beiran, WANG Pai, DONG Liwei, TIAN Hua

(天津大学 中低温热能高效利用教育部重点实验室,天津 300350)

(Key Laboratory of Efficient Utilization of Medium and Low Temperature Heat Energy,
Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

摘要:在碳达峰、碳中和背景下,采用自然工质的 CO₂ 热泵更加符合绿色低碳的要求。介绍了国内外 CO₂ 热泵应用与研究现状。CO₂ 热泵热水器与传统电热水器相比,CO₂ 排放量减少 40%,其最大优势在于,以较大温升保持较高的换热效率。在室外温度较低的情况下,通过使用 CO₂ 热泵,铁路沿线和北方农村地区能出产满足要求的热水并具有较高的全年能效比。一些企业已完成 CO₂ 车载空调的研发,并已基本实现量产。CO₂ 热泵干燥与传统的电热干燥技术相比,节能率高达 55%。CO₂ 热泵技术将是未来研究环保低碳新技术的热点,将在我国碳达峰、碳中和事业中发挥关键作用。

关键词:CO₂ 热泵;跨临界循环;供热;制冷;碳中和

中图分类号:TK 01

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2023)04-0012-07

Abstract: Under the background of carbon peaking and carbon neutrality, the application of heat pumps with natural working medium CO₂ as refrigerant is more in line with the new requirements of green development and environmental protection. Comparing the status of overseas and domestic researches on CO₂ heat pumps in different scenarios, it is found out that CO₂ emissions from a CO₂ heat pump water heater is 40% lower than that from a traditional electric water heater. The most prominent advantage of a CO₂ heat pumps is the significant temperature rise which leads to high working efficiency. In low outdoor temperatures, CO₂ heat pumps can satisfy the hot water demands of users along railways and in rural areas of northern China with high annual energy efficiency ratios. CO₂ on-board air conditioners have been developed and basically into mass production. Compared with a traditional electric dryer, a CO₂ heat pump dryer can save energy by 55% at most. CO₂ heat pump technology will be a hot spot in the future research on environmental protection and low-carbon technologies, and will play a key role in China's "dual carbon" target.

Keywords: CO₂ heat pump; transcritical cycle; heating; refrigerant; carbon neutrality

0 引言

构建绿色低碳的能源结构是我国能源行业发展的重要目标。与此同时,全球变暖的问题日益显著,碳中和成为全球趋势。我国需要使用更高比例的清洁能源,进一步实现低碳、环境友好的新能源结构。热泵因其高效的电热转换性能,是可以有效“脱碳”的能源设备。

热泵供暖对氢氟烃类(HFCs)制冷剂的需求带来温室效应和臭氧层空洞等环境问题。根据基加利修正案^[1],到 2045 年,HFCs 制冷剂的使用量将削

减至 20%,目前制冷与空调行业中使用的大部分 HFCs 制冷剂将被取代。因此,热泵的发展受到制冷剂替代问题的挑战。在众多替代工质中,CO₂ 作为一种自然工质,臭氧消耗潜能(ODP)值为 0,全球变暖潜能(GWP)值为 1,成本低、易获得、无毒且稳定。CO₂ 热泵相较传统工质热泵系统具有供热水温范围广、受环境气温制约小等优势,可有效减少化石能源的消耗、提高能源利用效率,从而助力实现碳中和。目前国内外关于 CO₂ 热泵技术应用的研究热点包括 CO₂ 热泵热水器、CO₂ 热泵供暖、CO₂ 热泵汽车空调、CO₂ 热泵干燥技术等。

传统用于供暖的 CO₂ 跨临界循环有较大的节流损失^[2],为改善常规 CO₂ 循环存在的不足,国内外学者从不同方向对 CO₂ 热泵优化进行了研究。Bastani

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFF0306801)
National Key R&D Program of China(2021YFF0306801)

等^[3]评估了在建筑物中3种加热应用的性能,DX-CO₂ GSHP在温度需求较低的应用中表现出更好的性能和更高的加热能力。Kurtulus等^[4]采用热经济学方法分析模型的经济性,并结合热力学和经济计算,获得每个组件和整个系统的成本结构。吴彦丽等^[5]分析了不同方案的系统效率和天然气消耗量,以及CO₂热泵制热系数对系统效率和燃料节约率的影响规律。陈子丹等^[6]搭建了寒冷地区超临界CO₂空气源热泵供暖系统,采用等效电方法对比分析了3种热源供暖的能源利用效率及CO₂排放量。何璇等^[7]分析了各设计参数对复合供暖系统性能的影响。齐海峰等^[8]建立了常规CO₂系统、R410A喷气增焓系统、复叠系统、间接过冷CO₂系统、直接过冷CO₂系统的热力学模型,对采用不同供热末端的系统性能进行优化和分析。刘雪涛等^[9]通过构建综合考虑初始投资成本和年运行成本的经济性评价模型,结合典型年气象参数,研究不同城市中各系统在运行周期内的总投资情况。

CO₂跨临界循环具有较大的温度滑移,可得到较高温度的热水,作为热水器应用有着巨大潜力。国内外学者通过对气冷器进行优化分析、尝试不同匹配设计方法等方向进行了多项研究。王迪等^[10]以跨临界CO₂热泵热水器系统作为研究对象,对系统最优排气压力及主要部件气冷器进行了仿真优化研究。刘宇轩等^[11]针对目前CO₂热泵热水器应用的难点问题之一融霜提出了一种新的融霜方法。吕静等^[12]以CO₂定压比热容最大的准临界温度作为分界点,将气冷器的换热过程分为3个温度区间,以准临界区间的换热特性为基础,提出一种在名义工况下,最佳气冷器进气压力和温度的简单算法。张超等^[13]设计了一种直热式空气源CO₂热泵热水器系统,利用试验研究了环境温度、气冷器冷却水入水温度及流量对系统性能的影响。许文华等^[14]分析系统不同组分CO₂质量分数对系统热力性能系数及工况压力的影响,提出考虑环境影响的系统综合评价体系,并给出不同目标下的推荐工质。

CO₂热泵在较低环境温度下具备较好的制热性能,CO₂汽车热泵空调在寒冷地区应用具有很大优势。国内外学者对CO₂汽车空调进行了不同方向的研究。陈凯胜等^[15]提出一种车用CO₂热泵空调系统,建立了CO₂热泵空调的仿真模型,并利用试验数据校核了模型的准确性。刘业凤等^[16-17]通过一维CFD仿真对整车热管理系统进行建模并在新欧洲标准行驶循环(New European Driving Cycle, NEDC)工况下进行仿真分析,将CO₂热泵空调与传统R134a制冷剂及正温度系数(Positive Temperature

Coefficient, PTC)电阻加热器性能进行对比。孟祥瑞等^[18]采用理论分析与试验研究相结合的手段对CO₂热泵电动汽车空调系统进行研究,测试和优化系统性能,探索系统性能变化规律及关键影响因素。彭旭等^[19]建立了跨临界CO₂准二级压缩循环的仿真模型,研究了运行工况对循环性能的影响,并将跨临界CO₂准二级压缩循环的结果和跨临界CO₂单级压缩循环的结果进行对比。

相较于其他热泵干燥方式,CO₂热泵干燥具有更大的温度调节范围且更具节能减排优势,更适合热泵干燥工艺,拥有巨大的发展空间,国内外学者在不同方向进行了研究。Sarkar等^[20]利用试验数据对提出的跨临界CO₂热泵干燥器仿真模型进行了验证,并利用该模型对CO₂热泵干燥器进行了模拟,试验数据结果表明,该模型对系统性能的预测略高。Erdem等^[21]对以CO₂为制冷剂的热泵滚筒式干燥系统进行了理论研究,建立了计算机模型。Sian等^[22]通过建立合理的模型,对CO₂和R134a在热泵衣物干燥中的性能进行了比较研究。王帅^[23]在对CO₂跨临界循环进行热力学研究的基础上,对CO₂热泵干燥系统进行仿真模拟,通过建立干燥模型并确定初始和边界条件,分析了流动速度、温度和物料厚度对干燥过程的影响。

本研究总结了不同使用场景下CO₂热泵的功能和应用现状,旨在为未来进程CO₂热泵技术研究提供参考。

1 CO₂循环类型

常用的CO₂循环类型主要包括亚临界循环和跨临界循环。亚临界循环压力范围较小(一般为0.55~4.50 MPa),压缩机吸/排气压力均低于临界压力,吸/放热过程在亚临界条件下进行,其循环过程如图1中1—2—3—4—1所示。

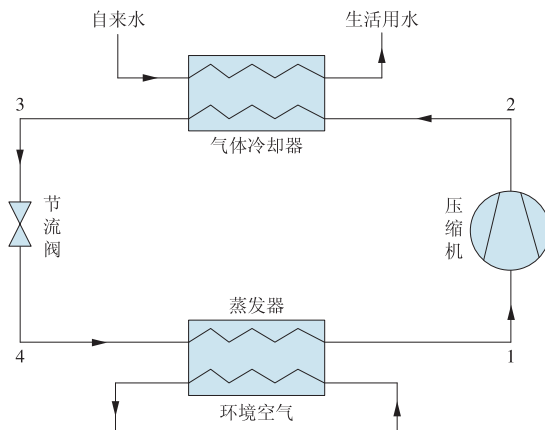


图1 CO₂热泵循环工作流程

Fig. 1 Circulation flow of a CO₂ heat pump

因此目前 CO_2 亚临界循环主要应用在复叠式制冷/热泵系统中作为整体循环的低压级,可用于低温制冷和制热工况。复叠式制冷/热泵系统的缺点是需要其他工质作为二级循环,结构复杂,成本高。而 CO_2 跨临界循环热泵在通常的工况下就可以提供所需温度的热水,具有结构简单且经济的特点,因此在实际应用中多使用 CO_2 跨临界循环热泵。跨临界循环压缩机排气压力高于临界压力,其循环过程如图 2 中 1—2'—3'—4'—1 所示。

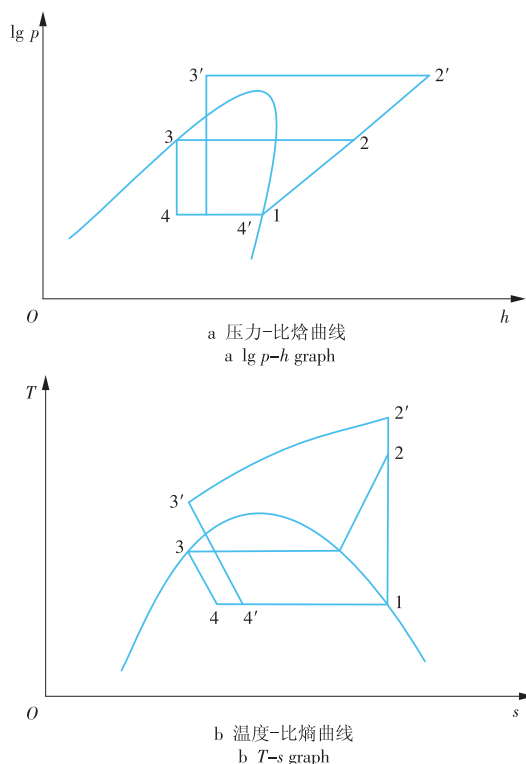


图 2 CO_2 热泵循环原理

Fig. 2 Schematic of CO_2 heat pump cycle

CO_2 跨临界循环出水温度高,可直接加热自来水提供 $65\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ 的热水,主要用于家庭和宾馆的洗浴用水、工厂工艺用热水及车用热泵等。用于热泵供暖工况时,放热过程处于超临界状态,在高压侧具有更大的温度滑移,能获得更高温度的热水。而且在低环境温度下, CO_2 跨临界循环的运行压力仍处于正压状态并提供热量,因此具有良好的运行优势。基于上述优点, CO_2 热泵技术在供暖领域获得飞速发展。

但 CO_2 跨临界循环也存在一些不足,相较于传统工质, CO_2 跨临界循环系统的工作压力要远大于一般的氢氯氟烃(HCFC)系统。因此 CO_2 跨临界循环系统需要使用成本较高的耐高压零部件。另外,在相同的条件下, CO_2 跨临界循环系统的效率要低于常规的热泵系统,需要依靠优化设计进一步改善其性能。

2 CO_2 跨临界循环热泵的应用

2.1 CO_2 热泵热水器

由于 CO_2 的临界温度很低,因此 CO_2 的放热过程不是在两相区冷凝,而是在接近或超过临界点区域的气体冷却器中放热。其放热过程为变温过程,有较大的温度滑移。这种温度滑移正好与所需的变温热源相匹配,是一种特殊的劳伦兹循环。当用于热泵循环时,有较高的放热系数,非常适合应用于热泵热水器, CO_2 热泵与常规 HCFC 热泵的性能对比见表 1。

表 1 不同类型热泵性能对比

Table 1 Comparison of different types of heat pumps

项目	常规 HCFC 热泵	CO_2 热泵
热水温度/ $^\circ\text{C}$	约 100	约 55
换热过程	潜热换热	显热换热
低温制热能力	衰减快	稳定可靠
换热效率	低	高

CO_2 热泵热水器在日本发展较为迅速,日本于 1998 年 9 月开始进行 CO_2 热泵热水器的基础理论研究,TEPCO 公司对改进型 CO_2 热泵热水器的全年平均性能系数进行了测算^[24],结果表明包括风扇和水泵功耗在内的全年系统平均制冷效率(COP)值高达 3.0,而且改进型系统在外界环境温度为 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,仍可提供 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 的热水。2010 年,日本 CO_2 热泵热水器年产量达到近 50 万台,市场发展迅速。某公司采用变频涡旋 CO_2 压缩机的 CO_2 热泵热水器,性能系数达到 4.1,与传统电热水器相比 CO_2 的排放量减少了 40%。

国内对 CO_2 热泵热水器的研究起步较晚,从 20 世纪末开始研究 CO_2 循环制冷与热泵,到 2010 年之后用于更广的温度范围,满足不同环境条件下不同用户的多种需求,并达到有效节能减碳的目的。相关企业研发了 CO_2 热泵热水机、 CO_2 热泵供暖机一体机和分体机、 CO_2 冷热联供机组、 CO_2 热泵家用系列产品,单机制热功率为 $5\sim 1\,500\text{ kW}$ 。通过技术合作推动产品升级,采用变频和回热器方案^[25],系统可在 $-25\sim 43\text{ }^\circ\text{C}$ 环境下正常运行,以一次加热的方式可生产最高 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 的热水,并已成功应用于商务酒店。按 10 a 有效运行估算,可节约用电 $741\text{ MW}\cdot\text{h}$,减少 CO_2 排放 738.7 t ,通过结合峰谷电蓄热,每年可节电 $74\text{ MW}\cdot\text{h}$,节省费用约 13.1 万元。

2.2 CO_2 热泵供暖

空气源 CO_2 热泵供暖,已在我国铁路沿线的供暖中得到实际应用。2018 年,中国铁路总公司印发

关于《中国铁路总公司节约能源和环境保护发展规划(2018—2020年)》的通知,明确提出用空气源热泵技术替代锅炉,进一步加大空气源热泵技术示范推广力度,加快替代既有燃油锅炉和燃煤锅炉。根据站段供暖面积及热水需求量,合理选择热泵机组容量,实现以电代油和以电代煤,降低供暖成本和能耗,优化能源消费结构。2018—2020年,完成替代燃油锅炉150台、燃煤锅炉1300余台。

为解决偏远地区供暖问题并兼顾节能减排,采用CO₂分体空气源热泵供暖取代原有燃煤锅炉,最高供暖面积可达7500 m²,设计总负荷650 kW。CO₂复叠空气源热泵供暖系统可在环境温度-25℃下正常运行,回水温度55℃,供暖季室内温度保持在18℃以上,月平均耗电成本低于4元/(kW·h·m²)。

根据铁路沿线的气候条件,哈尔滨局部分地区、呼和浩特局大部分地区、沈阳局、兰州局、乌鲁木齐局大部分地区、西安局、北京局、太原局运行环境温度为-30~40℃,站段分布散、城区少、偏远地区多、建筑面积小,原有管网老旧,末端为铸铁暖气片且更换困难。CO₂热泵具备出水温度高的特点,可适配原有的铸铁暖气片使用。其气体冷却器内温度和压力相互独立,温度变化取决于外部介质流量和进口温度,决定了出水温度不受限于冷凝温度。铁路沿线空气源CO₂热泵机组提供70/50℃进/回水供暖热水和95℃的生活热水,年平均能效比达到1.9~2.1,满足铁路沿线各站点的节能改造要求。



图3 铁路沿线的空气源CO₂热泵

Fig. 3 Air source CO₂ heat pumps along railways

空气源CO₂热泵供暖也应用于我国北方农村居民住宅示范项目,如图4所示。例如河北省围场县,最低月平均温度-13.2℃,极端低温-42.0℃。在某村所辖共计7500 m²分散布局的楼房、平房利用空气源CO₂热泵供暖。设计供水温度45.0℃,回水温度35.0℃,热指标为100 W/m²,选用2台分体式复叠式空气源CO₂热泵,满足整个区域房屋的冬季供暖负荷。



图4 北方农村地区的空气源CO₂热泵

Fig. 4 Air source CO₂ heat pumps in rural areas of northern China

2.3 CO₂汽车空调

根据2006年欧盟已通过的含氟温室气体(F-gas)法规要求,自2011年1月1日起,欧盟禁止新生产的汽车空调使用GWP值大于150的制冷剂(R134a因GWP值为1300,已被禁用);在2011年1月1日至2017年1月1日的6年间,在用的汽车空调按比例逐步淘汰GWP值大于150的制冷剂;自2017年1月1日起,禁止所有汽车空调使用GWP值大于150的制冷剂。随着汽车从燃油动力转变为电力驱动,车载空调系统采用低GWP制冷剂成为必然趋势,CO₂势必会成为发展热点。特别是电动汽车在冬季没有燃油车的余热供暖,采用空气源热泵将是更节能环保的选择。

鉴于CO₂热泵空调系统具有节能环保高效的性能特点,2017年有多家企业已在多种车型中采用基于R744制冷剂的CO₂单冷空调,并推向欧洲市场^[24]。国内各主机厂也开展了CO₂热泵空调系统的研发工作^[25],近几年完成了CO₂台架搭建、测试及整车搭载和测试工作,多种车载CO₂热泵空调已实现量产。

2.4 CO₂热泵干燥

CO₂超临界循环放热温度高,也可应用在热泵干燥技术上。德国Essen大学的Schmidt等^[26]和Klöcker等^[27]早在20世纪90年代末就从理论上分析讨论了CO₂在热泵干燥方面应用的可行性,并与R134a热泵干燥进行理论分析比较,同时对二者应用于洗衣房干燥衣物进行节能比较,得到了很好的应用效果。通过试验,CO₂热泵干燥COP达到5.5,比起传统的电干燥技术,节能达55%。程同等^[28]以胡萝卜为干燥对象,在样机上研究CO₂工质参数变化对系统性能的影响和蒸发器对系统能耗的影响。试验结果表明,该装置干燥介质温度可稳定在75℃,具有较高的系统能效比和单位能耗除湿量。何艳东^[29]对封闭式CO₂热泵干燥机的整体结构、干燥原理进行分析,对热泵干燥装置进行CO₂跨临界循环分析、系统高/低压区压力分析、干燥介质的热

力学分析,并对系统中制冷循环和热泵系统性能评价指标和热泵干燥装置各部件的各项参数进行分析,提出优化建议。刘圣春等^[30]介绍了CO₂跨临界循环热泵干燥系统的研究现状。从CO₂热泵干燥应用的可行性等多个方面来看,CO₂热泵干燥系统优化方式比较单一、试验结果与模拟仿真拟合度低的问题需要未来进一步解决。

3 CO₂跨临界循环热泵市场前景

热泵作为可再生能源技术设备具有巨大的发展潜力,但在循环工质方面,还受到蒙特利尔议定书基加利修正案^[1]的限制。基加利修正案对制冷剂的发展限制如图5所示,始于HFCs+HCFC的用量。我国从2013年已经开始对HCFC类物质实施配额制,到2030年HCFC类物质使用量削减到2.5%。我国将从2024年开始削减HFCs类物质,到2045年使用量达到冻结年的20%。这些工作都是在碳达峰和碳中和期间实施的,因此发展环保工质对热泵的发展至关重要。

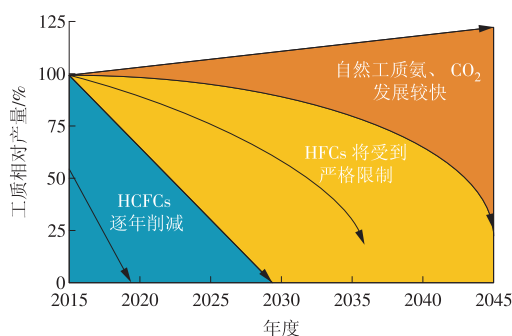


图5 制冷剂的发展限制趋势^[24]

Fig. 5 Development and restrictions of refrigerants^[24]

CO₂具有无毒环保的特性,且价格低廉,仅为丙烯类及氢氟烯烃类制冷剂价格的1/100,同时不像后者具有可燃性和目前尚不明确的环保问题。近年来CO₂跨临界循环在工程应用方面表现优异,如在CO₂跨临界循环冷库、CO₂亚临界复叠循环冷库和北京2022冬季奥运会场馆“冰丝带”CO₂跨临界循环直接制冰场等,为其发展和应用提供了良好示范。根据国际能源署(IEA)的预测^[26],到2030年,CO₂热泵占热泵整体市场份额将达到22.1%,而CO₂热泵以环保为基点更具发展和竞争潜力,能更有力地助力我国碳中和能源发展目标的实现。

4 结论

在碳达峰、碳中和的研究背景下,以自然工质CO₂为制冷剂的热泵技术更加符合“双碳”战略下我国节能减排的目标,本文介绍了CO₂热泵技术的发

展现状,对未来CO₂热泵技术发展和应用提供参考。

(1)CO₂热泵技术不仅可应用于热水器,还可以用于供暖、汽车空调、干燥等方向。CO₂的应用领域在不断扩展。

(2)我国不同地区成功实现了匹配不同环境温度的CO₂热泵机组,可满足多种需求水温并有效降低了电能的损耗。CO₂热泵汽车空调技术已经开始应用并实现量产。CO₂热泵干燥技术的研究及应用方向较为单一,未来有广阔的创新发展前景。

(3)随着相关法律规定的提出,以低GWP、环境友好的自然工质为制冷剂的热泵系统将会是未来发展的热点。自然工质CO₂在诸多替代工质中具有优良的性能,CO₂热泵循环在将来节能减排事业中有非常大的发展潜力。

参考文献:

- [1]生态环境部.我国正式接受《〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉基加利修正案》[R/OL].(2021-06-21)[2022-04-10]. https://www.mee.gov.cn/ywtdt/hjywnews/202106/t20210621_841062.shtml.
- [2]LLOPIS R, NEBOT-ANDRÉS L, SÁNCHEZ D, et al. Subcooling methods for CO₂ refrigeration cycles: A review [J].International Journal of Refrigeration, 2018, 93: 85-107.
- [3]BASTANI A, ESLAMI-NEJAD P, BADACHE M, et al. Experimental characterization of a transcritical CO₂ direct expansion ground source heat pump for heating applications [J].Energy and Buildings, 2020, 212: 109828.
- [4]KURTULUS K, COSKUN A, AMEEN S, et al. Thermoeconomic analysis of a CO₂ compression system using waste heat into the regenerative organic Rankine cycle [J].Energy Conversion and Management, 2018, 168: 588-598.
- [5]吴彦丽,陈赞林,赵子萱,等.CO₂热泵耦合燃气锅炉供暖系统研究[J].热力发电, 2021, 50(5): 133-138. WU Yanli, CHEN Zanlin, ZHAO Zixuan, et al. Research on CO₂ heat pump coupling gas boiler heating system [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(5): 133-138.
- [6]陈子丹,罗会龙,刘锦春,等.寒冷地区CO₂空气源热泵供暖运行性能分析[J].化工学报, 2018, 69(9): 4030-4036. CHEN Zidan, LUO Huilong, LIU Jinchun, et al. Analysis of heating performance of CO₂ air-source heat pump in cold region [J].CIESC Journal, 2018, 69(9): 4030-4036.
- [7]何璇,雷波.高寒地区槽式太阳能集热器与CO₂热泵复合采暖系统的优化研究[J].制冷与空调(四川), 2019, 33(1): 6-10. HE Xuan, LEI Bo. Optimization research of combining parabolic trough collectors and CO₂ air-source heat pump heating system in alpine region [J].Refrigeration and Air Conditioning, 2019, 33(1): 6-10.
- [8]齐海峰,代宝民,刘圣春,等.CO₂空气源热泵供暖系统性能

- 能分析[J].制冷学报,2020,41(4):37-44.
- QI Haifeng, DAI Baomin, LIU Shengchun, et al. Performance analysis of CO₂ air-source heat pump heating system [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(4): 37-44.
- [9] 刘雪涛, 李敏霞, 马一太, 等. CO₂跨临界热泵系统采暖工况下能效和经济对比分析[J]. 化工进展, 2021, 40(3): 1315-1324.
- LIU Xuetao, LI Minxia, MA Yitai, et al. Comparative analysis of energy efficiency and economy of CO₂ transcritical heat pump system under heating condition [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(3): 1315-1324.
- [10] 王迪. 跨临界 CO₂ 热泵热水器系统的特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- WANG Di. Study on the characteristics of a transcritical CO₂ heat pump hot water system [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [11] 刘宇轩, 许辉, 李猛, 等. 二氧化碳(CO₂)热泵热水器的优势和应用难点及一种融霜问题解决方案[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(3): 79-82.
- LIU Yuxuan, XU Hui, LI Meng, et al. Application status and difficulties of carbon dioxide (CO₂) heat pump water heater and a solution to defrosting problem [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2022, 42(3): 79-82.
- [12] 吕静, 李果, 赵琦浩, 等. CO₂热泵热水器气冷器的热力性能研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(5): 161-166.
- LÜ Jing, LI Guo, ZHAO Qihao, et al. Study on thermal performance of gas cooler for CO₂ heat pump water heater [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(5): 161-166.
- [13] 张超, 赵晓丹, 赵泽华. 直热式空气源 CO₂ 热泵热水器系统运行特性试验研究[J]. 流体机械, 2021, 49(3): 74-79.
- ZHANG Chao, ZHAO Xiaodan, ZHAO Zehua. Experimental study on operation characteristics of direct heating air source CO₂ heat pump water heater system [J]. Fluid Machinery, 2021, 49(3): 74-79.
- [14] 许文华, 李惟毅, 郭强. 考虑环境影响的 CO₂/低 GWP 混合工质热泵热水器工质优选[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 84-89.
- XU Wenhua, LI Weiyi, GUO Qiang. Working fluids selecting of CO₂ blends with low-GWP(global warming potential) heat pump system considering impact of environment [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(1): 84-89.
- [15] 陈凯胜. 电动汽车二氧化碳热泵空调制热性能及控制策略模拟研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- CHEN Kaisheng. Research on simulation of carbon dioxide heat pump air conditioner heating performance and control strategy for electric vehicles [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [16] 刘业凤, 王雨晴, 唐丹萍. 新能源汽车 CO₂ 热泵空调系统仿真研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(12): 45-51.
- LIU Yefeng, WANG Yuqing, TANG Danping. Simulation research on CO₂ heat pump air conditioning system of new energy vehicle [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(12): 45-51.
- [17] 刘业凤, 王君如, 钟文轩. 纯电动车用 CO₂ 空调整车热管理系统仿真研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(1): 29-33.
- LIU Yefeng, WANG Junru, ZHONG Wenxuan. Simulation on thermal management system for CO₂ air conditioning of pure electric whole vehicle [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(1): 29-33.
- [18] 孟祥瑞. 跨临界二氧化碳热泵型电动汽车空调系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- MENG Xiangrui. Research on transcritical CO₂ heat pump air conditioning system for electric vehicles [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [19] 彭旭. 纯电动汽车用跨临界 CO₂ 热泵空调系统仿真优化及实验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- PENG Xu. Simulation optimization and experimental research of transcritical CO₂ heat pump and air-conditioning system for pure electric vehicle [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [20] SARKAR J, BHATTACHARYYA S, GOPAL M R. Transcritical CO₂ heat pump dryer: Part 2. Validation and simulation results [J]. Drying Technology, 2006, 24(12): 1593-1600.
- [21] ERDEM S, HEPERKAN H. Numerical investigation of the effect of using CO₂ as the refrigerant in a heat pump tumble dryer system [J]. Drying Technology, 2014, 32(16): 1923-1930.
- [22] SIAN R A, WANG C C. Comparative study for CO₂ and R-134a heat pump tumble dryer — A rational approach [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 106: 474-491.
- [23] 王帅. 跨临界 CO₂ 热泵干燥过程的理论分析与应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- WANG Shuai. Theoretical analysis and applied research of transcritical CO₂ heat pump drying process [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [24] 中国节能协会热泵专业委员会. 二氧化碳热泵发展白皮书(2022年)[R]. (2022-07).
- [25] 中国节能协会热泵专业委员会. 热泵助力碳中和白皮书(2021年)[R]. (2021-10).
- [26] SCHMIDT E L, KLÖCKER K, FLACKE N, et al. Applying the transcritical CO₂ process to a drying heat pump [J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(3): 202-211.
- [27] KLÖCKER K, SCHMIDT E L, STEIML F. Carbon dioxide as a working fluid in drying heat pumps [J]. International journal of refrigeration, 2001, 24(1): 100-107.
- [28] 程同, 李娟玲, 杨道龙. 全封闭空气能 CO₂ 热泵干燥系统的研制[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 403-406.
- [29] 何艳东. CO₂ 热泵干燥装置的干燥性能研究与回油装置

优化[D].南京:南京农业大学,2017.

HE Yandong. Study on drying performance of CO₂ heat pump dryer and optimization of oil return device [D].

Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.

[30]刘圣春,林建森,滑雪,等.跨临界 CO₂热泵干燥系统研究现状与进展[J].制冷学报,2023,44(1):14-23,42.

LIU Shengchun, LIN Jiansen, HUA Xue, et al. Research status and progress of transcritical CO₂ heat pump drying system [J].

Journal of Refrigeration, 2023, 44(1): 14-23, 42.

(本文责编:惠忻)

收稿日期:2022-08-04;修回日期:2022-09-06

上网日期:2023-04-25;附录网址:www.iienenergy.cn

作者简介:

李敏霞(1971),女,教授,博士,从事制冷与热泵节能技术方面的研究,tjmxli@tju.edu.cn。

“人工智能与数字驱动的清洁能源电力系统优化运行与控制”专刊征稿启事

建设以新能源为主体的新型电力系统,既是清洁能源电力转型的必然要求,也是实现“双碳”目标的重要途径。清洁能源电力系统中的源网荷储资源丰富,调控潜力巨大;同时,新一代信息通信技术、人工智能技术和数字化技术的迅猛发展,对清洁能源电力系统各环节的建模和形态演变、规划、优化与控制、调度、市场机制与交易策略等都带来重大技术提升和转变。

为此,《综合智慧能源》特推出“人工智能与数字驱动的清洁能源电力系统优化运行与控制”专刊,邀请天津大学王丹副教授、东北大学周博文副教授、中国科学院深圳先进技术研究院杨之乐副研究员、安徽大学雷杨讲师、卢森堡科学与技术研究院曹军研究员、国网重庆市电力公司张施令高级工程师担任特约主编,共同探讨“双碳”目标及“人工智能与数字驱动”背景下清洁能源电力系统的最新研究进展、理论成果、技术应用及相关标准,促进新一代清洁能源电力系统研究的深入和技术的进步,为我国能源系统的协调发展提供有益的借鉴与启示,欢迎业内同仁踊跃投稿!

一、征稿范围(包括但不限于)

- (1)基于大数据的清洁能源电力系统源网荷储运行特性。
- (2)基于数字驱动的清洁能源电力系统海量资源聚合建模。
- (3)清洁能源电力系统源网荷储形态演变与规划技术。
- (4)清洁能源电力系统源网荷储优化控制。
- (5)清洁能源电力系统源网荷储运行的市场机制。
- (6)清洁能源电力系统源网荷储数字孪生技术。
- (7)基于人工智能的清洁能源电力系统源网荷储调度。
- (8)清洁能源电力系统源网荷储运行控制技术应用与标准化。

二、时间进度

专刊拟于2023年5月31日截稿,择期优先出版。

三、征稿要求

- (1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- (2)按照《综合智慧能源》论文格式要求使用 Word 软件排版,请登录《综合智慧能源》在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.iienenergy.cn)下载中心下载论文模板。
- (3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。
- (4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.iienenergy.cn)完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。
- (2)邮箱投稿:wangdantjuee@tju.edu.cn(王教授);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。
- (3)咨询联系:刘芳 0371-58501060,13838002988;杨满成 010-63918755,13801175292。