

专利视角下的新能源车用CO₂热管理技术发展综述

任纪霖, 殷翔*, 宗硕, 杨旭, 王文毅, 曹锋*

西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049

* 联系人, E-mail: xiangyin@mail.xjtu.edu.cn; fcso@mail.xjtu.edu.cn

2025-10-22 收稿, 2025-12-30 修回, 2025-12-31 接受, 2026-01-04 网络版发表

广东省重点研发计划(2023B0909050005)资助

摘要 面向新能源汽车冬季续驶里程衰减的行业难题及环保工质替代的政策要求, CO₂热管理技术是有效解决方案之一. 不同于常规氟利昂类工质, CO₂热管理技术以跨临界循环为基础, 衍生技术差异大, 产业链尚不健全, 受环保政策影响显著, 亟需更综合全面的技术研判综述支撑其发展. 现有学术论文类综述研究总结学术前沿方向, 但不能指导产业在政策规划下的有序发展; 专利类综述研究从专利申请数量变化入手分析技术变迁趋势, 缺失了对具体技术细节的探讨, 更不兼顾政、产、研三方协同作用的考量. 汽车热管理行业随着新能源汽车的销量增长水涨船高, 市场竞争也进一步加剧, 相关技术只有符合政策和生产的共同要求, 才能进一步持有更大的技术市场份额. 本文从宏观态势和具体细节两方面进行了专利技术综述, 首先基于调研到的2504条相关专利, 从数量变化、国家地区分布、主要研究单位和专利状态进行了总结; 同时针对理论和工程技术特征, 从乘用车、商用车等场景中总结了零部件、系统、控制三大研发方向的关键技术发展, 详细分析了关键部件、系统架构、集成模块、控制算法四个方面的技术特征及演变方向. 最后, 本文阐释了政策规划、技术瓶颈、产品效果对于技术发展的协同作用, 从时空角度分析了三种因素的制约关系, 并归纳论证了“高效化、低能耗、低成本、低碳化”的技术发展新要求, 为CO₂车用热管理技术产业链稳健发展提供了有力支撑.

关键词 新能源汽车, 热管理技术, CO₂自然冷媒, 专利分析

能源低碳关乎人类未来, 能源安全关系国家命脉. 大国间能源博弈持续推动“双碳”目标和能源改革, 中国新能源产业因此而蓬勃发展, 中国电动汽车行业也屡开新篇. 2024年中国电动汽车产销量达1288万辆, 电动汽车保有量超过3000万辆, 呈现高速增长状态, 汽车行业电气化与智能化纷至沓来. 电动汽车是中国能源改革的重要突破, 为新能源的高效应用提供了新的技术方案. 大规模电动汽车在各个时间段的大量充电需求也能用于对冲新能源电力不稳定、不持续的峰谷波动, 进而反哺新能源电力行业的发展. 电动汽车的推广可谓是中国新能源产业进一步升级的枢纽.

然而, 这一进程也面临困境. 室外温度变化造成锂

离子电池有效容量衰减, 车内空调运行带来巨大能量消耗, 都使电动汽车的续驶里程大幅降低, 以及较长充电时间的困境, 进一步放大了里程焦虑, 这种情况在极寒天气下尤甚. 解决该问题的关键是研发设计更加绿色高效的热管理系统. 作为电动汽车的重要组成部分, 热管理在调控电池、电机、电控的工作温度, 调节乘员舱舒适性的环节中起决定性作用. 技术指标上, 用户的里程焦虑要求更高效率且更低能耗的热管理系统, 主要目标是兼顾续航与舒适度; 产品评估中, 行业出于经济性考虑追求更低成本, 更多轻量化小型化产品占据市场; 环保政策下, 汽车热管理系统使用的制冷剂低碳化也迫在眉睫, 制冷剂泄漏也给环境保护新增负担.

引用格式: 任纪霖, 殷翔, 宗硕, 等. 专利视角下的新能源车用CO₂热管理技术发展综述. 科学通报

Ren J, Yin X, Zong S, et al. Advances in CO₂ thermal management technology for new energy vehicles: a review from perspective of patents analysis (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2025-5684](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5684)

因此高效化、低能耗、低成本、低碳化逐渐成为学术界认可的电动汽车热管理系统优化的明确目标,同时也是工业界参考用以热管理系统生产的重要指南^[1]。

热管理系统“一高三低”目标的实现,离不开相关领域的深耕,而冷媒选择、系统设计、部件优化正是该技术升级最主要的方向。当前政策影响下,主流车用热管理系统的低碳冷媒有 CO_2 、R290、R1234yf以及各类混合工质,其中自然工质冷媒的发展持续受到政策鼓励。不同冷媒在很大程度上决定了热管理系统的成本, CO_2 系统较高的运行压力导致了更高的生产成本;R290易燃爆,因此安全成本极高;R1234yf作为人工合成冷媒,自身的制造成本比前两种天然冷媒都高;混合工质虽然以自然工质为主,但充注过程面临的各种困难带来了更高的使用成本;上述各种冷媒的运行成本和容积制冷量也各有不同,其中 CO_2 系统制热效果好,更适应冬季低温电池容量衰减的应用场景,容积制冷量高,更符合当前电动汽车发展追求的设备小型化,在张凯等人^[2]的研究中也呈现了相关工质的具体特性对比。总之,车用热管理系统冷媒低碳化的道路上,降低成本是当前技术研发的底层逻辑,增效减耗是热管理技术发展的最终目标。为进一步挖掘技术优化潜力,探究技术前进方向,需要从热管理系统整机与零部件的技术细节、国内与国外的发展现状、学术界与工业界的研究侧重等多个维度进行技术上的详细分析,而与该技术相关的专利恰好可以体现这些内容。本文将专利为研究视角,以作者所在研究团队最熟悉的 CO_2 热管理技术为对象进行分析,为后续学者提供参考,共同推动新能源车用热管理系统低碳化技术的进步。

新能源车用 CO_2 热管理技术是 CO_2 热泵空调技术的衍生,通过蒸汽压缩与相变换热实现热量迁移,主要由压缩机、换热器、节流元件构成。车用 CO_2 压缩机通常为涡旋压缩机,是整个系统中质量最大、成本最高的部件;节流元件多使用电子膨胀阀,存在较大节流损失但胜在结构简单;换热器可依据所在位置的换热对象分为电池冷却器、室外换热器、室内换热器,电池冷却器常同时兼顾电池和电机的热管理,室外换热器与室外环境换热,室内换热器与室内车舱换热,要能够实现多种功能和更好性能;此外,换热器依据相变过程可以分为气体冷却器、蒸发器、冷凝器等,依据结构又可以分为微通道换热器、板式换热器、套管换热器等,种类繁多,因地制宜。 CO_2 热管理系统的基本原理和典型架构如图1所示,整个系统以 CO_2 为媒介完成电池、

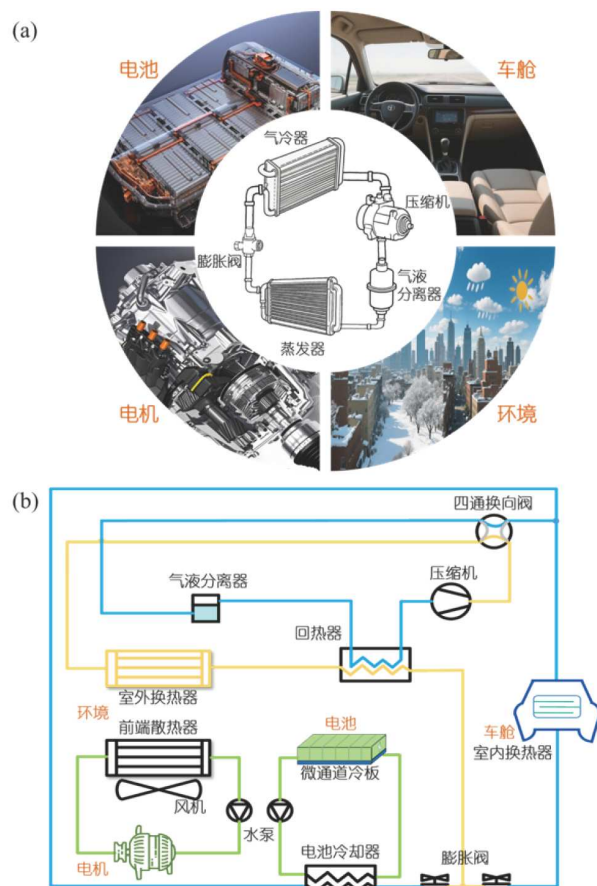


图1 CO_2 热管理技术原理与典型架构。(a) CO_2 热管理技术基本原理;(b) CO_2 热管理系统典型架构

Figure 1 Principle and typical structure of CO_2 thermal management technology. (a) Fundamental principle of CO_2 thermal management technology. (b) Typical structure of a CO_2 thermal management system

车舱、电机与环境间的换热过程,将各个部分控制在需求的温度范围,实现综合热管理效果。本文所作综述均以上述基本原理为主体,对其基本部件、综合系统、协同控制、应用方式等方面的技术发展变迁和研究重点方向进行分析。

CO_2 热管理技术的综述类论文在早期侧重于热泵热水器与制冷空调领域,这与其发展和应用方向有关,如孙井伟等人^[3]、杜诗民等人^[4]总结了跨临界 CO_2 循环的机理和所用部件的特点,也明确提出了 CO_2 热管理技术在汽车空调领域的应用前景,尽管彼时2014年认为该项技术在汽车上的应用道阻且长,但随着新能源汽车发展的 CO_2 热管理技术再度受到重视。这之后, CO_2 热管理技术经过更多人的完善,总结了双级压缩^[5]、回热器^[6]、喷射器^[7]、过冷技术^[8]、润滑油^[9]等对于性能与工作特性的影响,这些技术路线与研究方案充实

丰富了CO₂热管理技术,进一步提升了车用的可行性。CO₂热管理技术的不断成熟,使之在其他领域的应用也相继开展,如太空^[10]、建筑^[11]、人工冰场^[12]、食品保存^[13]等方面,CO₂系统的使用率与日俱增,但由于工况复杂性、需求多样性、成本敏感性等原因,2021年前后,只有以大众ID4为代表的个别乘用车产品尝试搭载了CO₂热管理技术,突破新能源车用的技术瓶颈迫在眉睫。王从飞等人^[1]以碳中和大背景为视角规划了新能源车用热管理技术的发展战略,刘宇轩等人^[14]从技术细节上总结了具体技术的学术研究进展,部件、系统架构、控制策略三方面正是新能源车用CO₂热管理技术最主要的研发方向。对于一项产业依赖度较高的技术,行业对技术的要求更多与市场上投放的产品效益相关,单从学术视角进行技术研判并不全面。学术类论文的重点在于机理的揭示、理论的验证和瓶颈的突破,并不会过多关注工程应用和行业生产需求。大部分研究对于宏观政策也不敏感,政策导向并不影响学者对理论问题的探索,只起到了对技术热点的升温作用。从学术研究的角度整理技术发展脉络,一定程度上脱离了产业本身使得分析结果失真,学术研究的热点不完全符合实际生产的需求,也不是对政策导向的绝对贯彻。而同样是新能源汽车相关的技术类综述,马天舒等人^[15]基于专利分析了新能源整车智能热管理技术发展现状,用专利数量直观体现产业中对技术的需求度,专利申请人具体反映了主要的研究团体,能获得更多与产业应用直接相关的信息。臧玲等人^[16]的电动车能量管理专利分析也有同样特色。论文中政策的影响和行业的态度在定量的数据变化中一目了然。新能源车用CO₂热管理技术因为衍生技术差异大、产业链不健全、受政策影响显著,发展陷入瓶颈,清除限制的关键在于提出合理的技术路线研判,从产业所需要的成本、质量、体积,高校所关切的性能、效率、功能,政策所要求的绿色、低碳、环保多方面综合考量,分析技术进一步发展的条件和方向。专利类技术综述能更直接地反映技术应用的现状与前景,因为专利的申请主体主要是企业和一些与产业发展密切结合的高校学者,他们更能洞悉政策导向和行业需求。但大多数该类型论文只能从专利数量上笼统反映技术的变化,又缺失了对技术细节的把控,并不能阐释清楚政策要求、技术瓶颈、产品效益三方之间的关系,更无法从技术层面回应产业需求和政策导向的最核心问题。如果有论文研究能在专利综述的基础上,对其中技术细节进一步

分析,并考虑政策导向、产品效益、技术瓶颈间的协同作用,将以翔实的数据和充足的证据呈现出技术路线的变迁、技术前沿的方向,形成可信度更高的技术预判。尤其对于有待全面商用的新能源车用CO₂热管理技术,受到政、产、研三方制约,需要一篇以专利为切入点的技术类综述,既总结技术现状,又综合研判发展方向与前景,填补研究空白的同时展望行业发展,这便是本文主要目的所在。

本文通过大为Innojoy平台和壹专利平台进行专利检索,通过合享IncoPat平台进行专利数据分析。共计2504项专利。其中,大为Innojoy专利数据库收录了全球104个国家的1亿多条专利数据,具有较长回溯时间;壹专利Patyee平台具有智能检索、高级检索、分类检索的丰富功能;合享IncoPat数据库有强大的专利数据加工处理和分析能力,文中数据的专利检索时间截至2024年5月31日。

1 专利数量与技术发展

CO₂热管理技术在冬季具有良好的制热性能,能更好地应对电动汽车冬季续驶里程严重衰减,是电动汽车热管理系统的最佳解决方案之一。图2所示是1989~2023年CO₂热管理技术的专利申请数量变化,在经历了技术发展的初期和沉淀期之后,随着2016年《基加利修正案》出台,专利申请数量也突破前高,进入驱动增长期,随后2020年特斯拉八通阀在ModelY上问世带来了热管理技术的重大突破,2021年大众ID4成为汽车行业首款可以选装CO₂热泵空调系统的车型,选装率在欧洲地区超过80%,都反映了该时期CO₂热管理技术的蓬勃发展。而2022年专利申请数量达到峰值,随后出现了波动,标志着新能源车用CO₂热管理技术进入发展成熟期,遇到了一定瓶颈,需要新的创新动力促进其持续增长。

1989~2023年,各个国家均对CO₂热管理技术开展

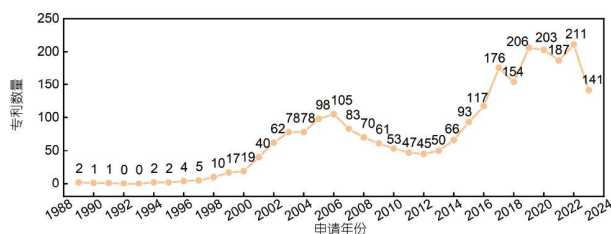


图2 CO₂热管理技术逐年专利申请数量

Figure 2 Amount of patent applications for CO₂ thermal management technology in different years

了广泛研究,如图3所示,2000年开始中国的专利申请数量显著增加,随后数量稳步上升,2007年专利申请数量全球第一,2009年开始专利申请数量已经超过其他各国及组织的申请数量,至今已是CO₂热管理技术相关专利全球最大的申请国和拥有国.过往时间内,日本、德国、美国等国家在不同时期同样申请了大量的CO₂热管理技术相关的专利,为该项技术的发展做出了一定贡献.近期,对于新能源车用CO₂热管理技术的研究者主要来自中国,充分体现了中国制造业的突飞猛进和该技术领域内中国学者的突出贡献.

图4所示为专利申请数量排名前20的申请单位及其对应国家,中国专利申请数量最多的单位是西安交通大学和天津商业大学,是高等学校;而日本等国专利申请数量最多的单位均为企业,日本为株式会社电装公司(DENSO CORP),美国为开利公司(Carrier),德国为马勒贝洱有限公司(MAHLE Behr GmbH & Co. KG).同时,专利申请数量最多的中国企业是广东美芝制冷设备有限公司,数量少于日本和美国的企业,略高于德国的企业.中国CO₂热管理技术的主要研究者为高校科研人员,而国外该技术的主要开发者为企企业.高校研究者普遍更关注效率和能耗的优化,而企业研发人员通常更在乎降低成本.如何填补二者之间的鸿沟、权衡好性能和成本的关系,是形成技术研发合力的关键,因此大力促进产教融合和校企合作推动技术进步具有重要意义.

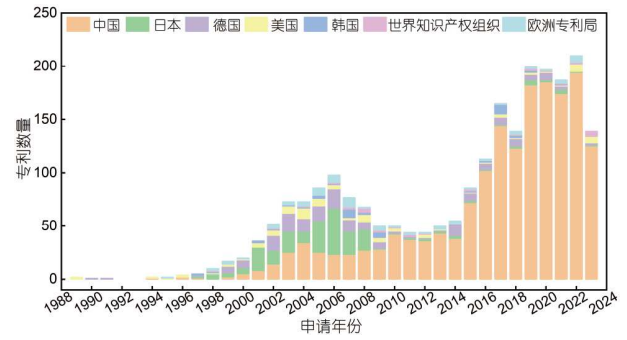


图3 CO₂热管理技术各国专利申请数量
Figure 3 Amount of patent applications for CO₂ thermal management technology in different countries

图5和6所示是CO₂热管理技术的专利类型和法律状态,反映了当前市场对该技术的态度.在所有专利中,实用新型占比37.32%,发明授权和发明申请共占比62.22%,外观设计仅占比0.46%.而在所有专利中授权数量占比45.25%,实质审查阶段有19.12%,其余接近35%的专利均因未缴年费、驳回、撤回等原因导致作废.总体来看,在专利申请和授权数量很大的同时,也有相当多的专利被作废,一方面是由于技术生命周期较长带来的时间原因,另一方面也是当前市场对技术不看好的表现.这与新能源车用CO₂热管理技术的部件成本较高有很大关系,近年来各类性价比更高的车用热管理工质如丙烷等也逐渐进入研发人员的视野,同类型其他技术路线的研发推进一定程度上也导致了

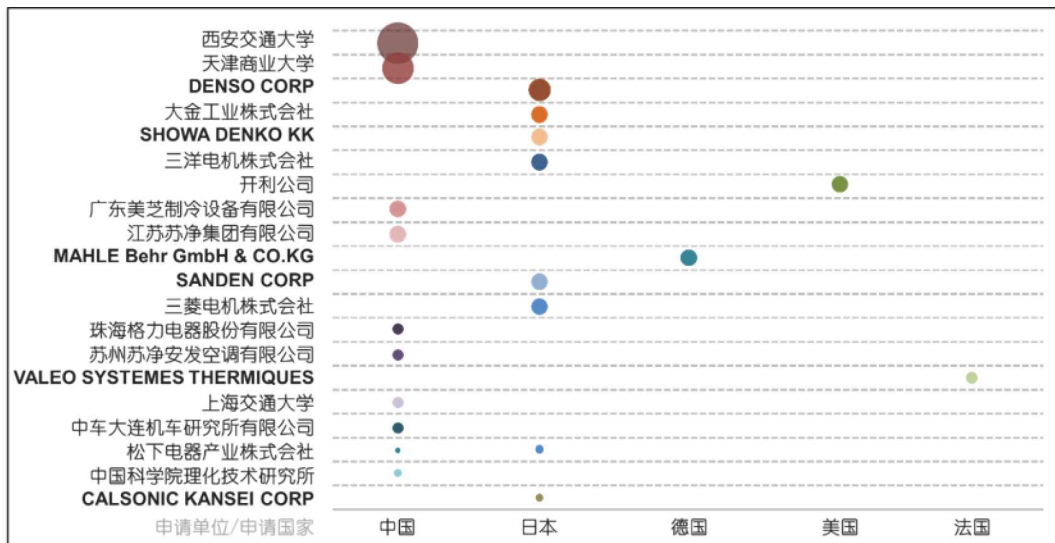
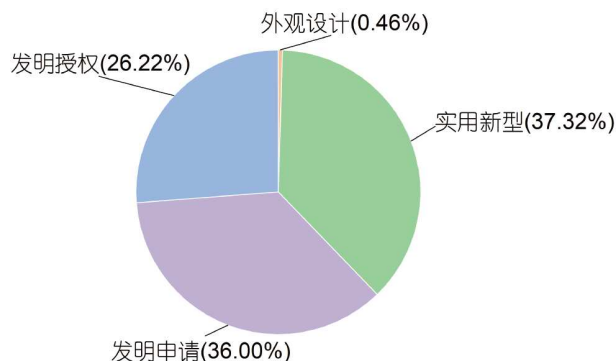
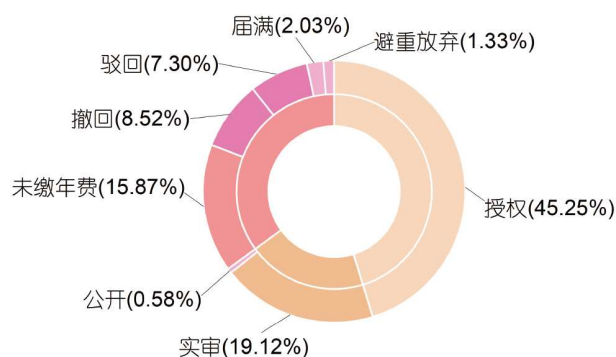


图4 CO₂热管理技术专利主要申请单位及国别
Figure 4 Major applicants and countries of CO₂ thermal management technology patents

图5 CO₂热管理技术专利种类Figure 5 Varieties of CO₂ thermal management technology patents图6 CO₂热管理技术专利法律状态Figure 6 Legal status of CO₂ thermal management technology patents

CO₂热管理技术发展相对放缓。

上述宏观数据描述了车用CO₂热管理技术的发展变化,从起步到成熟,再到现在进入瓶颈期,企业作为技术的主要应用者,出于成本、政策和研究周期的考虑,在技术方案的采用决策中出现了犹豫,也促成了当前技术发展陷入瓶颈的局面。实然层面,这些数据表明车用CO₂热管理技术已经具备了一定的研发储备和应用前景;应然层面,国内与国际政策对天然制冷剂的使用态度始终是积极的。困局在于多方因素耦合情况下,又有各式各样的技术方案和车用技术路线不断涌现,增加了技术扩大应用和进一步产业化的不确定性。因此车用CO₂热管理技术的发展需要从众多方案和路线中梳理一个更加具体明确的方向,整合业界和学界信息的同时,提振相关从业人员的信心。下文将从技术热点进一步深入,研判车用CO₂热管理技术的未来路线。

2 专利内容与技术热点

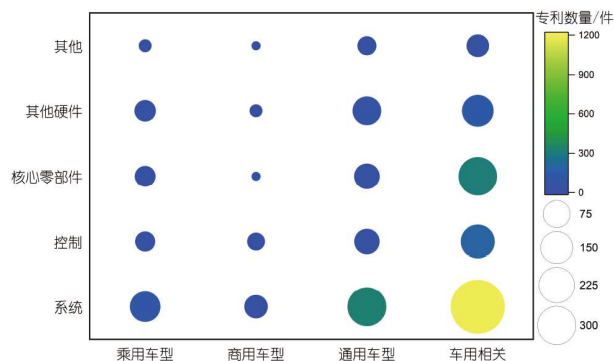
CO₂热管理技术相关专利依据具体内容可分为系统、控制、核心零部件、其他硬件和其他五大部分。

其中系统类为热管理系统层面整体的设计与改进,控制类为控制策略、控制算法相关的专利,核心零部件为压缩机、换热器以及节流元件等,其他硬件包括管路、水泵、风箱及一些水路、风道的集成模块,其他主要为不在上述四类的专利技术,比如一些测试评估方法、传感器布置方式等。这五类中,系统类和控制类存在一定重叠,在不少与系统相关的专利中通常会介绍系统的控制方式或者为系统设计较为先进的控制策略,且一些控制算法也是依托特定系统实现,因此会存在一些重叠。

依据具体应用领域可以将所有专利分为乘用车型、商用车型、通用车型,以及车用相关四类。其中乘用车型主要是常见的轿车类乘用车,商用车型包括客车、运输车辆、冷藏车和轨道交通等,通用车型则是明确为车用领域但是并未明确说明为何种车型的专利,未提及车用类则是未明确说明是车用领域,但是从技术角度分析具备车用可行性的专利。

如图7所示是CO₂热管理技术按照上述内容与领域分类的气泡图,从内容角度分析,系统相关的专利数量最多,控制与核心零部件的专利数量次之,其他类相对较少,说明对于CO₂热管理技术的研究主要集中在系统层面,同时兼顾了控制与核心零部件的配套研发。从应用领域的角度分析,车用相关类的专利数量最多,通用车型类次之,乘用车型的数量大于商用车型,这体现了CO₂热管理技术扎实的技术积累,以及该技术向汽车领域转型和迁移应用的迅速,针对特定车型或者通用车型,从多个角度提出了适配的解决方案,发展势头十分迅猛,应用前景也无比广阔。

对技术内容作进一步分类有助于进行技术路线的

图7 CO₂热管理技术专利内容及应用场景Figure 7 Content and application scenarios of CO₂ thermal management technology

深度剖析, 图8所示是在上述技术内容分类的基础上, 针对CO₂热管理技术前沿与特点, 进一步展示了关键部件、系统架构、集成模块、控制算法四个方面, 这正是当前技术的研究热点, 也是亟待突破的重点方向. 关键零部件是图7中核心零部件与其他硬件的整合, 针对硬件中最重要的压缩机、换热器、管路、阀件、回油几个方面的专利做了进一步梳理; 系统架构是在系统设计的基础上使用多级压缩、喷射器、回热器等方式实现系统性能提升的相关技术; 集成模块是将热管理系统的一部分结构甚至整体结构模块化, 常见的有余热回收模块与二次回路模块; 控制算法则以经济性、舒适性、安全性为主要设计目标. 在对这些技术进行整理和呈现的过程中, 本文充分考虑了限制其发展的主要原因, 而非关注性能、效率等单一指标, 包括但不限于生产和使用的成本、寿命、质量、体积等汽车热管理行业十分敏感的因素, 以此确保论证分析的实用价值.

2.1 关键部件开发

在各个关键部件技术专利的归纳整理中, 压缩机和换热器是热管理系统中最重要的部件, 也是专利数量最多的技术点.

车用CO₂热管理系统中压缩机常用结构形式有活塞式压缩机^[17-19]、滚动转子压缩机^[20,21]、单螺杆压缩机^[22]、涡旋压缩机^[23,24]. 其中活塞式压缩机和单螺杆压缩机的主要专利申请单位为三菱, 滚动转子压缩机则更多由广东美芝制冷设备有限公司开发, 涡旋压缩机专利的主要申请者为西安交通大学和日本松下电器. 不同结构形式压缩机特点不同, 但为了能够在车上更

好应用, 除了能够适应车载多变工况和较低噪声的要求, 还在向小型化、轻量化、高集成化发展, 因此CO₂涡旋压缩机备受青睐. 为了压缩机效率与性能的进一步提升, 在型线设计^[25]、背压调节^[26]、热气旁通^[27-29]、密封泄漏^[30-32]、油气分离结构^[33-35]等技术细节上均有研发投入. 型线设计^[24]应用变壁厚生成方法, 克服热变形引起的泄漏和磨损问题; 也有借助人工智能算法使用神经网络预测最优型线的技术方案, 降低了开发设计成本; 通过背压调节^[25]的方法能有效防止背压腔中气体回流造成的工作腔压力波动, 提高了压缩机运行期间的稳定性. 热气旁通技术^[27-29]在压缩机上增加了旁通管使得压缩机具备了融霜功能, 能够更好适应极端工况的工作场景. 油气分离机构^[33,34]是压缩机中必不可少的部件, 实现了对润滑油的循环和过滤, 广东美芝^[35]提出了一种对制冷剂和润滑油进行分流的控制方法, 提升了回油效率. 材料选择^[36]和零件加工精度^[37,38]在压缩机的设计开发中也至关重要, 广东美芝在轴套壳体中增加了石墨烯, 提升了壳体强度, 能更好适应CO₂压缩机高运行压力的工作情况, 也有使用柔性材料制造压缩机以实现集成化和小型化的方案. 零件加工精度^[37,38]对上述所有技术细节如泄漏、型线都有很大影响, 最终作用于压缩机工作效率和寿命, 因此设计和使用一些对加工精度敏感性低的零部件, 保证了稳定性从而能够显著优化压缩机的成本和性能.

车用CO₂热管理系统几种结构形式压缩机相关技术的专利旨在解决两个问题: 压缩机运行效率与效率的可持续性, 这种可持续性体现在短期运行的稳定性和长期运行中的寿命评估两方面. 也因此才涌现出针对型线、密封泄漏等效率提升类技术, 也有了背压调节、热气旁通、油气分离等稳定增强类技术, 其中, 型线优化、油循环率优化同样是压缩机寿命延长类技术. 而进行新材料的研发属于长期投入研发, 见效慢并且在短期内会使得生产成本增高, 但随着材料生成工艺的发展新材料应用的成本会逐渐降低, 使压缩机实现全方位的性能提升. 加工精度脱敏是工程实践中最常见的解决思路, 有效回避加工精度对机械结构寿命和工作性能的影响, 能够大幅降低生产加工成本. 这些面向技术的方法、面向生产的方法和不同结构形式的压缩机选取, 都是为了解决上述两个问题.

换热器方面, 车用CO₂热管理系统主要使用板式换热器^[39]、微通道换热器^[40,41], 在极个别特殊情况下如回热器与储液罐集成^[42]时会采用螺旋内管^[43-45]、套

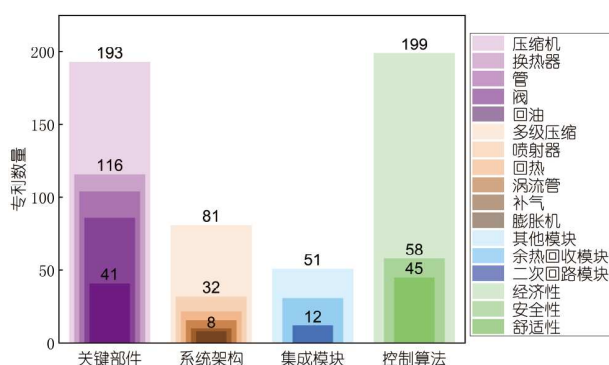


图8 CO₂热管理技术前沿与特点

Figure 8 Frontiers and features of CO₂ thermal management technology

管式^[45,46]和管壳式^[47]的换热器形式。微通道换热器主要适用于制冷剂与风换热,一种类似板式换热器的电池冷却器更适用于制冷剂与载冷剂换热,冷板微通道换热器适用于制冷剂或载冷剂与电池流动换热,这些换热器因为体积小、换热效率高,已经成为行业内的普遍选择。在汽车行驶面临的复杂多变工况下,热管理系统运行要求诸多功能,换热器设计还要更好适应这些场景和需求,解决极寒地区换热器结霜^[48,49]、电池冷却效率^[50]等问题。电池冷却效率的提升还可以采用制冷剂直接冷却的方式^[51],将制冷剂直接通入微通道冷板中与电池进行换热,不仅能够减小热损失、提高换热效率,还能保证电池在冷却过程中的温度均匀性,有效延长电池寿命。 CO_2 作为冷媒具有更大的单位容积制冷量,使用直冷换热器进行电池热管理效果更佳。对于 CO_2 热管理系统,较高的运行压力使其面临较大的泄露风险,继而制约其性能及成本,换热器恰是系统中泄漏点最多的部件,通过加工工艺的改进和接头密封设计,能够显著减少 CO_2 热管理系统中制冷剂的泄漏^[52]。汽车产业发展对 CO_2 热管理系统轻量化和小型化提出更高要求^[53~55],当前对换热器流道的优化借助了很多仿生学方法进一步提升性能,行业内也尝试用柔性材料制造换热器以便于实现集成化,换热器的轻量高效化在新的技术方法加持下不断进步。

综合来看,换热器成本远远低于压缩机,因此换热器并不是决定整个系统成本的关键,与换热器关联更密切的是热管理效率^[56,57]和制冷剂泄漏,从场景适用、换热性能、泄漏密封以及轻量小型四个方面发力是换热器设计的重要突破方向。

2.2 系统设计方法

压缩机、换热器、膨胀机构等部件组装后形成车用 CO_2 热管理系统。系统层面的设计优化主要有架构与模块两方面:架构是分解整体系统,对实现特定功能之部件的位置部署或结构设计进行优化,从而起到扩展功能或提升性能的效果;模块是集成局部系统,将协同实现特定功能的所有部件集成为一个整体,以实现成本节约和空间利用的最大化。对现有系统架构进行模块化是当前热门的技术方案,通常引入载冷剂形成二次回路换热,并在电池、电机回路增加多功能阀组实现余热回收效果和更多热管理功能的拓展。与此同时,模块化精简之后也给更多新型架构的实际应用带来更大可行性和潜力,二者相辅相成,共同发展。

CO_2 热管理系统运行压力高,节流过程通常伴随着不小的能量损失,因此具有巨大能量回收潜力。当前系统架构优化主要是针对膨胀机构的改进,包括使用喷射器^[58]、涡流管^[59]、膨胀机^[60]等部件代替原有的电子膨胀阀,实现对节流过程的能量回收。这些新型的膨胀机构显然也是一种零部件,但加入后引起了整个系统的热力学过程发生变化,形成了新的运行特性与规律,以结果为导向将其归类为系统架构比零部件更加合适。相关专利介绍了具体结构的设计方法及在系统中的应用,同时会提供适配的调节和控制策略。在实际应用过程中,喷射器^[61]使用喷嘴引射低压流体,调节喷嘴喉部面积实现运行过程中的能效优化,但由于调节范围有限,无法适用于电动汽车热管理需求的多种工况;涡流管可以分离流体获得更强的制冷效果,但结构复杂并且工作效率极大程度受限于工况;膨胀机通过气体膨胀回收能量,但会大幅增加空间占用和生产成本,尽管小型膨胀机和压缩膨胀一体机^[62]能节省空间,但更为复杂的机械结构导致现在并无量产设备,其应用所带来的研发和维护成本也是不可估量的;也有一些专利技术将喷射器、涡流管^[63]、双级压缩^[64]等不同架构综合起来,但都因太复杂、成本太高而未能实用;反而是最简单的回热结构^[65,66]增强了压缩机吸气过热和系统制冷性能,已经在车用 CO_2 热管理系统中广泛应用;此外, CO_2 双级压缩中间补气的方案^[67,68]进行了最大限度的余热回收和能量梯级利用,进一步实现制冷性能的增强^[69],并且系统架构更改小,所用双级压缩机也有成熟产品^[70],极具实用价值,是下一步车用 CO_2 热管理技术系统架构的潜在发展方向。

集成模块化主要目的就是为了保证多种热管理功能模式的基础上尽可能简化流体流路和阀件数量以降低成本,减少制冷剂接头数量以降低冷媒泄漏量。目前集成模块化的技术逐渐向着间接系统、二次回路方向发展^[71~74],具有小型化、轻量化的特征,其总体思想是将制冷剂循环的部件集成为一个整体模块,外接载冷剂循环进行换热,再由载冷剂回路将热量与冷量传递出去,该模块将整个制冷回路封装集成,与载冷剂回路分离,方便实现对制冷剂模块的整体替换,提升系统的通用性和拓展性。最终,整个热管理系统集成为制冷剂模块和载冷剂模块两大部分^[75],载冷剂模块通过多功能阀组和流道板能够实现高效的能量分配^[76],并且可以在电池、电机等元件处通过余热回收模块^[77~79]实现更高效的能量梯级利用。将热管理系统集成为两大

模块的另一优势是可以更好适应政策引导下的制冷剂更替, 系统架构的可复用性极大程度避免了重复研发的风险成本。

CO₂热管理系统进行集成模块化之后相较于其他制冷剂更具特点。首先, 相关技术采用的模块化方案将距离较近的零部件进行整体式铸造, 替换传统接头连接的方式起到减少制冷剂泄漏的效果, 这对于工作压力高更容易泄漏的CO₂系统助益显著; 其次, 用载冷剂作为二次回路能最大限度减少制冷剂管路和阀件, 尽管会增加载冷剂管路和阀岛设计的复杂程度以完成功能模式切换, 但由于制冷剂管路为金属材质且工作压力高, 总体成本将大幅降低, 这进一步缩小了CO₂热管理系统与其他制冷剂系统的生产成本差距; 最后, CO₂的单位容积制冷量大、系统潜在体积更小, 回热器作为系统架构最常使用的性能提升结构也能完美集成其中, 因此模块化制冷剂系统的空间利用率将更高, 整个热管理系统的体积和质量也得以降低。

总体来说, 系统层面的优化设计方法在关注系统整体性能和成本的同时, 更追求极简主义, 尤其是制冷剂循环的简化, 这不仅是出于对空间和成本的考虑, 简单的系统架构更易设计控制逻辑和策略, 方便应对汽车运行过程中的复杂情况。太复杂的系统架构不仅占用了大量的车内空间, 也增加了成本, 不符合汽车总体设计的轻量简洁目标。

2.3 控制优化算法

建立在系统设计基础之上的还有控制算法的实现, 通过一定策略实现对系统的控制是车用CO₂热管理技术不可或缺的部分。控制优化算法包括两层面、三方面, 当前各类技术在硬件和软件两个维度的支撑下, 功能经济性、乘客舒适性和运行安全性三个方面的控制目标。

控制器作为硬件是控制执行的物理基础, 再结合相应逻辑对阀门、风门进行通断、开度控制, 能够实现新能源汽车多种热管理功能模式^[80], 包括车舱冷却、车舱加热、挡风玻璃除雾、室外换热器除霜、电池冷却、电池预热、电机冷却等。应用特定控制算法如最朴素的PID算法可以将电池、电机、电控、乘员舱等热管理对象的温度控制在目标范围, 实现功能控制到性能控制的进阶, 并且保证了汽车行驶的安全性和舒适性。汽车运行过程中遇到的气候环境、道路状况都会影响热管理负荷和目标的变化, 多目标与多场景耦合的动态情形常常使得PID对跨临界CO₂循环的控制

力有不逮, 控制调节容易出现失稳和性能急剧恶化的情况。通过软件和算法实现稳定控制下的性能提升是当前车用CO₂热管理系统的大难题, 因此更先进的动态控制算法如ESC、MPC、规划算法等^[81]也逐渐应用在了电动汽车热管理系统的控制中, 还有专门针对CO₂系统运行性能的控制方法如区间非最优排气压力控制^[82]、结合深度学习神经网络^[83]的适充状态控制, 特异性地提升了系统性能, 并且相关的思想方法也可以用在其他制冷剂的热管理系统当中。这类算法往往具备简易和鲁棒性强的特点, 能够在新能源汽车上有限算力情况下提供最大程度的控制优化, 相对传统PID控制响应更快、稳定性更好。

经济性方面, CO₂热管理系统因为跨临界运行特性, 调节排气压力^[84]具备一定系统性能优化的潜力, 相较于其他制冷剂的热管理系统经济性优化空间更大。但排气压力的控制受到室内外换热边界条件影响, 因此与天气环境、汽车行驶速度、热管理需求强相关, 在天气波动、车速变化、乘客需求变换的多方作用下排气压力的控制鲁棒性堪忧。因此, 上述动态优化算法应用的意义更加显著, 这是CO₂热管理系统的优化潜力和汽车行驶中的强动态变化共同决定的。除了基本功能模式实现和经济性优化, 控制算法也能提升CO₂热管理系统对乘员舱舒适性的快速调节。

舒适性方面, CO₂热管理系统制热模式下室内换热器中存在温度滑移, 较大的出风温度不均匀性带来了更差的舒适性, 使用局部PMV作为舒适性评估和控制指标能更好地提升乘客舒适度^[85]。舒适性控制往往需要一定数量精度不低的传感器, 如果使用神经网络预测车舱内温度场的变化^[86], 配合热管理系统的控制响应, 可以用更少的传感器实现更好的控制效果, 从而化硬件成本为软件成本, 降低产品的总体成本对于行业来说尤为重要。同时, 当电池热管理需求与乘员舱舒适性控制出现冲突时, 相关技术使用分布式模型预测控制和非合作博弈方法实现了二者协同加热的高效控制^[87]。此外还有车内湿度^[88]、空气质量^[89]、分区温度控制^[90]等通用性方法, 主要基于CO₂热管理系统的特性对空调箱进行特殊设计, 也能进一步提升舒适性。

安全性方面, CO₂热管理系统运行的吸排气压力及排气温度是重点管控参数, 排气压力和排气温度需要设计控制上限值, 防止高温高压的泄漏和破坏, 同时吸气压力需要设计控制下限值, 防止吸气带液, 造成液击损坏压缩机。系统运行温度压力的控制限制, 也形成对

系统性能和适用工况范围的限制。在低温环境运行时,室外换热器结霜会使热管理系统无法换热,吸排气压力也会快速趋近限制值因而出现停机保护和功能失效。而除霜模式和无霜控制技术^[91]能避免类似场景的发生,这是控制算法在CO₂热管理系统功能维护和安全保护方面的重要体现。

当前针对经济性、舒适性、安全性的控制算法已经有大量的技术构想和产品,但仍然没有相关算法实现多种控制目标的协同和评估。从本质上来看,安全性是系统正常运行的保障,属于功能目标,需要优先满足;而经济性和舒适性均属于性能目标,对于二者的综合评价相对复杂。为了实现多控制目标的协同实现,需要提出合理的评价体系,并且为该体系输入大量实时参数用于分析判断。引入V2X物联网技术能很好实现上述效果^[92,93],为评价体系提供全时空的需求参数,评价体系需要完成两个任务:经济性和舒适性的价值量化,实现最优价值过程中的边际效益量化。可以用最低百公里能耗和最优PMV两个指标进行价值量化,在有限区间内构造无量纲边际效益模型,实现评价体系模型的构建。通过AI算法结合用户习惯和导航目的地,预测单次行驶时间、电池负荷、整车热负荷动态变化,进而判断舒适性和经济性在特定时间内的价值评分,再结合边际效益评估进行舒适性和经济性的协同优化,增强系统控制的鲁棒性。

3 技术特点与研判

对于新能源车用CO₂热管理技术而言,政策规划、技术研发、产品效果三个方面是互相影响和制约的,但三者对“高效化、低能耗、低成本、低碳化”的预期效果都是相同的,只是在演变过程中三者的具体关注点又不尽一致,政策来自有为政府的顶层设计是技术的先导,产品面向有效市场的消费群体是技术的反馈。随时间发展主要矛盾会发生变化是该类有待商用产业化技术的特点,从短期到长期技术发展的重点通常依次为低成本、低能耗、高效化、低碳化。在技术的全生命周期中,时间上产品效果、技术指标、政策要求要依次实现,根据可投入的研发资源和现有技术条件限制,可以并行推进也需要提前布局,空间上引入高等院校和科研机构共同参与预研,更好促进政、产、研之间的技术预期弥合,也能避免技术路线的错误造成不可估量的损失,因此要兼顾现实与目标,才能形成良好的技术研判,指导技术高效健康发展。

基于上述特点,对于新能源车用CO₂热管理技术未来的发展有如下预判:

(1) 功能性硬件提升: 零部件方面,压缩机和换热器等主要部件的性能提升是热管理系统高效运行的基础,该方面的研究将持续推进;管路接头密封性要更好,阀件的功能性要更强,能为多种工况模式的工作提供保障。架构方面,极简是第一位,双级压缩中间补气的增能型热管理系统方案最具应用潜力。

(2) 整体性模块设计: 通用化模块设计的方案是应对当前政策导向下成本最低的选择,也是有效减少CO₂泄漏、保障系统性能的重要方法,同时具备了对其他制冷剂方案的兼容性,因此模块化产品怎样设计是下一步研究的核心。

(3) 系统性智能优化: 汽车热管理并不是孤立系统,与电池和电机构成能量流交互的表现也应成为设计的重要参考内容。但CO₂系统跨临界循环在多目标、多场景的需求下,存在控制失稳的不确定性,结合物联网技术,应用深度学习方法建立整个能量系统的智能控制模型、环境工况变化的响应预测模型,能够保障多目标协同和多场景稳定的控制需求。综合整车动态系统的建模预测是未来系统设计的关键突破方向。

(4) 工程性量化评价: 热管理系统综合评价量化是实时控制的依据,但在工程实际中,精准控制难度大成本高,在汽车复杂行驶工况下更为尤甚,因此要评估控制的边际效益,增强系统鲁棒性,在控制成本尽可能低的情况下提升性能的综合评分,是未来汽车领域工程技术发展的重要思想方法。

4 总结与展望

CO₂热力学循环作为目前新能源车用热管理系统的解决方案之一,其发展受到政策要求、技术现状、产品效益三个方面的综合影响,各类分析中专利数量的变化都反映着三个因素共同作用的技术发展状况。初期因为技术逐渐积累,专利数量缓慢稳步上升;中期因政策导向和技术的进一步突破出现井喷式发展,后续由于产品效益不及预期和技术进入了瓶颈期增速放缓,专利申请数量甚至出现减少的情况。

在所调研的专利基础上进行分析,本文的技术研判对象包括车用CO₂热管理系统的零部件、系统架构、集成模块、智能设计与优化控制等多方面。其中:零部件将继续降本增效,保证低成本的同时,提升涡旋压缩机和换热器的性能,采取制冷剂直接换热的方式提升

电池热管理的效率, 优化管路接头制冷剂泄漏的减少; 系统架构以极简化为方向, 双级压缩中间补气方案是新一代技术产品最可能的选择之一; 集成模块突破了传统零部件的物理边界, 统筹了压缩机和换热器等核心部件的设计, 提高了生产加工和实际运行的效率, 通用化的二次循环模块也能更好地适应潜在政策变化, 实现多种工质共用; 智能设计是AI技术的赋能, 从更多更高维度进行设计层面的优化, 是未来提高系统综合性能的关键方法; 控制优化要兼顾效果和成本, 在保证性能的前提下也要增强系统的控制鲁棒性, 量化评估优化的边际效益尤为重要。

在研究方法上, 本文在控制相关专利的论述中提出了其安全性、经济性、舒适性的多目标综合评价方法, 后续也分析了政策、技术、产品对车用CO₂热管理系统发展的协同作用。本文所用定性分析的研究方法, 能够大体明确控制设计时安全性、经济性、舒适性如何权衡, 大致了解技术研判时政策、技术、产品的影响如何考量。虽然不能对技术发展给出具体指导和肯定答复, 但也是基于本文大量论述分析和专业经验得出初步结论, 仍旧具有很强的参考意义。本团队后续研究中将针对宏观评估和综合优化进行分析模型的指标量化及评价量化, 建立时空复合维度的量化模型是道阻且长但意义非凡的, 小到复杂工程系统的优化, 大到

宏观政策的制定都会受益于此。

除了技术方案的研判和研究方法的提升, 本文对未来车用CO₂热管理技术全生命周期的发展变化也有如下展望:

(1) 该技术在乘用车型、商用车型上的具体应用都体现了对“高效化、低能耗、低成本、低碳化”理念的贯彻, 其中高效化是低成本的更高追求, 低碳化是低能耗的更进一步, 这阐释了该理念的内在逻辑。

(2) 关键零部件、系统架构、模块集成、控制算法的技术设计以更低成本为当前的首要任务, 更低能耗为重要指标, 高效化是将来较长时期的必行方案, 低碳化是最终目标, 这体现了发展理念的衍化脉络。

(3) 技术产品的发展过程中, 企业生产紧盯市场定价的成本, 政策法规强调宏观碳排放的评估, 而高校科研机构和企业研发部门最关注的是直观量化的性能。研究者和技术人员在提升车用CO₂热管理系统的性能时也需要关注成本和政策要求, 增强技术和产品的实用性及适用性, 是发展理念得以贯彻落实的具体方法。

总之, 车用CO₂热管理系统未来的技术研发将在政策规划、技术瓶颈、产品效益的多重客观因素作用下, 围绕“一高三低”的行业目标进一步开展, 先以低成本、低能耗的技术方案促进产业发展, 在政策导向和技术积累下逐步过渡到低碳高效的新形态。

参考文献

- Wang C F, Cao F, Li M J, et al. Research status and future development of thermal management system for new energy vehicles under the background of carbon neutrality (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 4112–4128 [王从飞, 曹锋, 李明佳, 等. 碳中和背景下新能源汽车热管理系统研究现状及发展趋势. *科学通报*, 2021, 66: 4112–4128]
- Zhang K, Ouyang H S, Zhang D X, et al. Research progress of heat pump air conditioning refrigerants for electric vehicles (in Chinese). *Zhejiang Chem Ind*, 2021, 52: 6–12 [张凯, 欧阳洪生, 张董鑫, 等. 电动汽车热泵空调冷媒研究进展. *浙江化工*, 2021, 52: 6–12]
- Sun J W, Liu Y F, Jia S W. Research status on gas cooler of transcritical CO₂ heat pump water heater (in Chinese). *Chin J Ref Tech*, 2016, 36: 72–78 [孙井伟, 刘业凤, 贾世伟. 跨临界CO₂热泵热水器用气冷器研究现状. *制冷技术*, 2016, 36: 72–78]
- Du S M, Liu Y F, Zhu H L, et al. Research progress and application of CO₂ trans-critical cycle (in Chinese). *Energy Res Inf*, 2016, 32: 187–194 [杜诗民, 刘业凤, 朱洪亮, 等. 跨临界CO₂循环的研究进展及应用. *能源研究与信息*, 2016, 32: 187–194]
- Sun Z X, Yao H Q, Zhang W K, et al. Review of the prioritization scheme of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle system (in Chinese). *Refr Air Condit*, 2022, 36: 469–475 [孙知晓, 姚海清, 张文科, 等. 跨临界二氧化碳制冷系统优化方案的研究综述. *制冷与空调*, 2022, 36: 469–475]
- Guo Y Q, Ye Z L, Wang Y K, et al. Overview of progress in research of internal heat exchanger in transcritical CO₂ system (in Chinese). *Fluid Mach*, 2019, 47: 84–88 [郭雅琪, 叶祖樑, 王驿凯, 等. 跨临界CO₂循环中回热器研究进展概述. *流体机械*, 2019, 47: 84–88]
- Zong S, Song Y L, Cao F. A review on optimal regulation technology for transcritical CO₂ ejector system (in Chinese). *Fluid Mach*, 2021, 49: 50–56 [宗硕, 宋昱龙, 曹锋. 跨临界CO₂喷射器系统优化调节技术综述. *流体机械*, 2021, 49: 50–56]
- Huang L F, Cao F. Review of the development of subcooling enhancement technology in transcritical CO₂ cycle (in Chinese). *Fluid Mach*, 2021, 49: 88–96 [黄龙飞, 曹锋. 跨临界CO₂循环中过冷强化技术的发展综述. *流体机械*, 2021, 49: 88–96]
- Zhang S C, Yin X, Song Y L, et al. Research progress of influencing characteristics of lubricating oil in research progress of influencing

- characteristics of lubricating oil in transcritical CO₂ automotive air conditioner (in Chinese). J Refr, 2024, 45: 1–11 [张树铖, 殷翔, 宋昱龙, 等. 跨临界CO₂汽车空调中润滑油影响特性研究进展. 制冷学报, 2024, 45: 1–11]
- 10 Niu Z T, Fu Z D, Miao J Y, et al. Research progress of transcritical carbon dioxide heat pumps in space applications (in Chinese). Chin Space Sci Tech, 2024, 44: 23–33 [牛子天, 付振东, 苗建印, 等. 跨临界CO₂热泵空间应用研究进展. 中国空间科学技术, 2024, 44: 23–33]
 - 11 Sun Z X. Application of CO₂ heat pump technology in HVAC system (in Chinese). In: 2022 HVAC Engineering Construction and Efficient Operation Seminar, 2022. 6 [孙知晓. 跨临界CO₂热泵技术在供暖系统中的应用综述. 见: 2022供热工程建设与高效运行研讨会论文集, 2022. 6]
 - 12 Liu J, Shang X Y, Zhang X R. An overview of the Worldwide Implementation of Carbon Dioxide Utilization Technology (in Chinese). Energy Conserv Environ, 2023, 8: 24–27 [刘佳, 尚星宇, 张信荣. 跨临界二氧化碳冷热处理技术国际应用综述. 节能与环保, 2023, 8: 24–27]
 - 13 Xuan F C, Xie J. Research progress of trans-critical CO₂ refrigeration cycle system and application (in Chinese). Food Mach, 2019, 35: 226–231 [轩福臣, 谢晶. 跨临界CO₂制冷循环系统与应用研究进展. 食品与机械, 2019, 35: 226–231]
 - 14 Liu Y X, Ren J H, Yin X, et al. Review of application and optimization of CO₂ heat pump air conditioning for electric vehicles (in Chinese). Refr Air-Cond, 2022, 22: 56–69 [刘宇轩, 任佳航, 殷翔, 等. 电动汽车CO₂热泵空调应用与优化综述. 制冷与空调, 2022, 22: 56–69]
 - 15 Ma T S, Ye X X, Zheng R, et al. Research on intelligent thermal management technologies for new energy vehicles based on patent analysis (in Chinese). Autom Digest, 2024, 12: 21–26 [马天舒, 叶晓雪, 郑锐, 等. 基于专利分析的新能源整车智能热管理技术发展现状研究. 汽车文摘, 2024, 12: 21–26]
 - 16 Zang L, Liu J X, Zhai N, et al. Research on global electric vehicle energy management patent intelligence and China's development route (in Chinese). Chin Invention Patent, 2024, 21: 56–65 [臧琳, 刘佳鑫, 翟诺, 等. 全球电动汽车能量管理专利情报与我国发展路线研究. 中国发明与专利, 2024, 21: 56–65]
 - 17 Tomohiro I, Akira I. Rotary piston compressor and refrigeration cycle device (in Chinese). PRC Patent, CN113474559A, 2021-10-01 [和泉晓和, 井柳友宏. 旋转活塞式压缩机以及制冷循环装置. 中国专利, CN113474559A, 2021-10-01]
 - 18 Zhao D H, Yang C J, Zhang X P, et al. With CO₂ Transcritical reciprocating piston compressor as refrigerant (in Chinese). PRC Patent, CN211819831U, 2020-10-30 [赵东华, 杨长军, 张显鹏, 等. 一种以CO₂作为制冷剂的跨临界往复活塞压缩机. 中国专利, CN211819831U, 2020-10-30]
 - 19 Schwarzkopf O. Piston compressor for air conditioning system of vehicle. DE Patent, DE102006056823A1, 2008-06-05
 - 20 Yang K C. Rotary compressor for vehicle and vehicle with same (in Chinese). PRC Patent, CN111306062A, 2020-06-19 [杨开成. 车用旋转式压缩机和具有其的车辆. 中国专利, CN111306062A, 2020-06-19]
 - 21 Yang K C. Compressor and vehicle with same (in Chinese). PRC Patent, CN106704186A, 2017-05-24 [杨开成. 压缩机和具有其的车辆. 中国专利, CN106704186A, 2017-05-24]
 - 22 Li T S. Single screw compressor and refrigeration air conditioner provided with same (in Chinese). PRC Patent, CN210265126U, 2020-04-07 [栗田慎. 单螺杆压缩机和具备该单螺杆压缩机的制冷空调装置. 中国专利, CN210265126U, 2020-04-07]
 - 23 Obrist E G. CO₂ vehicle air conditioning system having a scroll compressor and a scroll compressor. JP Patent, JP6425417B2, 2014-12-08
 - 24 Obrist E G. CO₂ vehicle air conditioning system having a scroll compressor and a scroll compressor. JP Patent, JP6425418B2, 2014-12-08
 - 25 Yang X, Tang J Y, Cao F, et al. CO₂ for vehicle thermal management method for generating stage type wall thickness-variable vortex molded line of vortex compressor (in Chinese). PRC Patent, CN116738591A, 2023-09-12 [杨旭, 唐静懿, 曹锋, 等. 车辆热管理用CO₂涡旋压缩机阶段式变壁厚涡圈型线生成方法. 中国专利, CN116738591A, 2023-09-12]
 - 26 Yang X, Tang J Y, Cao F, et al. Orbiting scroll, scroll compressor and CO₂ Pressure regulating method for thermal management (in Chinese). PRC Patent, CN116928098A, 2023-10-24 [杨旭, 唐静懿, 曹锋, 等. 动涡盘、涡旋压缩机及用于CO₂热管理的引压调节方法. 中国专利, CN116928098A, 2023-10-24]
 - 27 Lesage G, Kantchev J. R-744 system with hot gas defrost by the transcritical compressors. US Patent, US11226144B2, 2019-11-21
 - 28 Lesage G, Kantchev J. R-744 System with hot gas defrost by the transcritical compressors. CA Patent, CA3005541C, 2019-11-18
 - 29 Wu J W, Zhang Y L, Ning H F, et al. Take CO₂ cascade refrigeration system of defrosting compressor (in Chinese). PRC Patent, CN205403223U, 2016-07-27 [吴家伟, 张永立, 宁会锋, 等. 一种带融霜压缩机的CO₂复叠制冷系统. 中国专利, CN205403223U, 2016-07-27]
 - 30 Schwarzkopf O. Carbon dioxide axial piston compressor for vehicle air-conditioning systems comprises an axial floating ring seal and a housing-side ring stop which define on a housing inner side an annular space between a drive shaft and a housing passage. DE Patent, DE10242625A1, 2004-03-25
 - 31 Schwarzkopf O. Axial mechanical seal, in particular for a compressor of a vehicle air conditioning system. DE Patent, DE19960284A1, 2001-08-02
 - 32 Hinrichs J. Gasket between cylinder block and valve plate of carbon dioxide compressor, for air conditioning installation of road vehicle. DE Patent, DE19962121A1, 2000-07-13
 - 33 Dou Q. Oil-gas separation structure, compressor and refrigerating and heating system (in Chinese). PRC Patent, CN217440293U, 2022-09-16 [窦青. 一种油气分离结构、压缩机及制冷制热系统. 中国专利, CN217440293U, 2022-09-16]

- 34 Dou Q. Oil-gas separation structure, compressor and refrigeration and heating system (in Chinese). PRC Patent, CN114934902A, 2022-08-23 [窦青. 一种油气分离结构、压缩机及制冷制热系统. 中国专利, CN114934902A, 2022-08-23]
- 35 Chen Z H, Xiaojin Z X, Liang Z Q, et al. Rotation-type compressor with housing low pressure, control mode of coolant and oil return and applications thereof (in Chinese). PRC Patent, CN100529406C, 2009-08-19 [陈振华, 小津政雄, 梁自强, 等. 壳体低压的旋转式压缩机及其冷媒、回油的控制方式和应用. 中国专利, CN100529406C, 2009-08-19]
- 36 Xia X G, Yang K C. Graphite bushing and motor compressor and refrigeration equipment with the graphite bushing (in Chinese). PRC Patent, CN106812681B, 2019-09-06 [夏小鸽, 杨开成. 石墨轴套和具有该石墨轴套的电动压缩机和制冷设备. 中国专利, CN106812681B, 2019-09-06]
- 37 Naotaka H. Rotating piston type compressor (in Chinese). PRC Patent, CN203796562U, 2014-08-27 [服部直隆. 旋转活塞型压缩机. 中国专利, CN203796562U, 2014-08-27]
- 38 Chen Z H. Main shell structure of closed-type rotary compressor (in Chinese). PRC Patent, CN102116296A, 2011-07-06 [陈振华. 封闭式旋转压缩机的主壳体结构. 中国专利, CN102116296A, 2011-07-06]
- 39 Chen B, Zhang Z H, Wang X H, et al. Cold and hot integrated high-strength plate-fin heat exchanger (in Chinese). PRC Patent, CN117367175B, 2024-03-22 [陈彬, 张子瀚, 王显红, 等. 一种冷热一体式高强度板翅式换热器. 中国专利, CN117367175B, 2024-03-22]
- 40 Ba C, Liu Q, Wang M M. Heat exchange core body for micro-channel heat exchanger using carbon dioxide refrigerant (in Chinese). PRC Patent, CN218764077U, 2023-03-28 [巴程, 刘乾, 王萌萌. 一种使用二氧化碳制冷剂的微通道换热器用换热芯体. 中国专利, CN218764077U, 2023-03-28]
- 41 Huang Z X, Dai L, Zhou W B, et al. Flat tube of parallel flow heat exchanger of automobile CO₂ air conditioner (in Chinese). PRC Patent, CN214470319U, 2021-10-22 [黄自训, 代立, 周文博, 等. 一种汽车CO₂空调平行流换热器扁管. 中国专利, CN214470319U, 2021-10-22]
- 42 Ba C, Wang M M. Gas-liquid separator with heat exchange function for carbon dioxide refrigerant (in Chinese). PRC Patent, CN218672725U, 2023-03-21 [巴程, 王萌萌. 一种用于二氧化碳制冷剂的带换热功能的气液分离器. 中国专利, CN218672725U, 2023-03-21]
- 43 Cui H T, Wang C, Wang C. Gas cooler with snakelike heat exchange tubes for carbon dioxide heat pump (in Chinese). PRC Patent, CN114659387A, 2022-06-24 [崔海亭, 王超, 王晨. 一种用于二氧化碳热泵的蛇形换热管气体冷却器. 中国专利, CN114659387A, 2022-06-24]
- 44 Hao W W, Ma Y Q. Carbon dioxide heat pump is with tubular double-pipe heat exchanger in novel many spirals (in Chinese). PRC Patent, CN205425901U, 2016-08-03 [郝维维, 马永泉. 一种二氧化碳热泵用新型多螺旋内管式套管换热器. 中国专利, CN205425901U, 2016-08-03]
- 45 Xie J, Wang N X, Yang D Z, et al. Sleeve type micro-channel heat exchanger equipment suitable for marine transcritical carbon dioxide refrigeration cycle system (in Chinese). PRC Patent, CN215725320U, 2022-02-01 [谢晶, 王乃心, 杨大章, 等. 一种适用于船用跨临界二氧化碳制冷循环系统的套管式微通道换热器设备. 中国专利, CN215725320U, 2022-02-01]
- 46 Liu X D. Sleeve type heat exchanger for carbon dioxide heat pump system (in Chinese). PRC Patent, CN214250643U, 2021-09-21 [刘向东. 一种用于二氧化碳热泵系统的套管式换热器. 中国专利, CN214250643U, 2021-09-21]
- 47 Kang Z, Wang X L, Xu B R. Tube shell type heat exchanger for carbon dioxide heat pump system (in Chinese). PRC Patent, CN105698574A, 2016-06-22 [康喆, 王晓磊, 徐博睿. 一种用于二氧化碳热泵系统的管壳式换热器. 中国专利, CN105698574A, 2016-06-22]
- 48 Zhang X R, Du P J. CO₂ and air heat exchanger for cold regions (in Chinese). PRC Patent, CN201715888U, 2011-01-19 [张信荣, 杜培俭. 寒冷地区用CO₂空气换热器. 中国专利, CN201715888U, 2011-01-19]
- 49 Liu Y. Suitable for the outdoor heat exchanger and cascade type heat pump system of extremely cold area (in Chinese). PRC Patent, CN206387145U, 2017-08-08 [刘勇. 适用于极寒地区的室外换热器及复叠式热泵系统. 中国专利, CN206387145U, 2017-08-08]
- 50 Zhang Y F, Li H Z, Zhang L, et al. Efficient compact heat exchanger for heat exchange between gas-liquid two-phase carbon dioxide and water (in Chinese). PRC Patent, CN108344316B, 2024-01-30 [张一帆, 李红智, 张磊, 等. 一种气液两相二氧化碳与水换热的高效紧凑型换热器. 中国专利, CN108344316B, 2024-01-30]
- 51 Yang L, Chen Z W. The direct heat management system of power battery heat-pump-type refrigerant and method (in Chinese). PRC Patent, CN109449536A, 2019-03-08 [杨林, 陈志伟. 动力电池热泵式冷媒直接热管理系统及方法. 中国专利, CN109449536A, 2019-03-08]
- 52 Secret in website. Low-leakage high-temperature-resistant supercritical carbon dioxide sealed gas heat exchanger (in Chinese). PRC Patent, CN113137477A, 2021-07-20 [不公告发明人. 一种低泄漏耐高温的超临界二氧化碳密封气体换热器. 中国专利, CN113137477A, 2021-07-20]
- 53 Zhang L. A kind of variable cross-section heat exchanger (in Chinese). PRC Patent, CN209623433U, 2019-11-12 [张龙. 一种变截面换热器. 中国专利, CN209623433U, 2019-11-12]
- 54 Wang D. Heat exchanger for carbon dioxide refrigerating system (in Chinese). PRC Patent, CN214010088U, 2021-08-20 [王东. 一种二氧化碳制冷系统用换热器. 中国专利, CN214010088U, 2021-08-20]
- 55 Xu Z B, Yang Y. Heat exchanger and automobile air conditioning system (in Chinese). PRC Patent, CN210101256U, 2020-02-21 [徐正本, 杨勇. 一种换热器及汽车空调系统. 中国专利, CN210101256U, 2020-02-21]
- 56 Zhang X R, Liu Y, Li N, et al. A kind of method of heat exchange efficiency of the raising gas-liquid two-phase state CO₂ working medium in heat exchanger tube (in Chinese). PRC Patent, CN104154794B, 2017-07-21 [张信荣, 刘勇, 李宁, 等. 一种提高气液两相态CO₂工质在换热管内的换

- 热效率的方法. 中国专利, CN104154794B, 2017-07-21]
- 57 Lang F, Du H R, Du P J, et al. Distribution of adjustment carbon dioxide refrigerant mass dryness fraction improves evaporimeter of heat transfer (in Chinese). PRC Patent, CN205300046U, 2016-06-08 [郎峰, 杜鸿儒, 杜培俭, 等. 调整二氧化碳制冷剂干度分配提高换热的蒸发器. 中国专利, CN205300046U, 2016-06-08]
 - 58 Cao F, Zong S, Song Y L. Injector module and transcritical CO₂ for new energy vehicle heat pump air conditioning system and method. PRC Patent, CN113335016B, 2022-10-25 [曹锋, 宗硕, 宋昱龙. 新能源车用喷射器模块、跨临界CO₂热泵空调系统及方法. 中国专利, CN113335016B, 2022-10-25]
 - 59 Song Y L, Yang M Y, Cao F. Whole vehicle heat and humidity balance system adopting vortex tube and control method thereof (in Chinese). PRC Patent, CN117885492A, 2024-04-16 [宋昱龙, 杨梦莹, 曹锋. 一种采用涡流管的整车热湿平衡系统及其控制方法. 中国专利, CN117885492A, 2024-04-16]
 - 60 Yi C L, Cui H T. A kind of energy-conservation expanding machine for carbon dioxide heat-pump Refrigeration Technique (in Chinese). PRC Patent, CN105509360B, 2018-04-03 [易长乐, 崔海亭. 一种用于二氧化碳热泵制冷技术的节能膨胀机. 中国专利, CN105509360B, 2018-04-03]
 - 61 Yan J W, Huang X L, Yang H, et al. Electric automobile heat pump air conditioning system with ejector (in Chinese). PRC Patent, CN217048192U, 2022-07-26 [闫继位, 黄小兰, 杨骅, 等. 带喷射器的电动汽车热泵空调系统. 中国专利, CN217048192U, 2022-07-26]
 - 62 Zang R Q, Dong H, Li X X. CO₂ heat pump system adopting electromagnetic compression and expansion all-in-one machine (in Chinese). PRC Patent, CN210861775U, 2020-06-26 [臧润清, 董浩, 李骁啸. 一种采用电磁式压缩膨胀一体机的CO₂热泵系统. 中国专利, CN210861775U, 2020-06-26]
 - 63 Ning J H, Liu S C, Chu K, et al. The CO₂ refrigeration system that vortex tube and injector combine (in Chinese). PRC Patent, CN204254923U, 2015-04-08 [宁静红, 刘圣春, 诸凯, 等. 涡流管与喷射器组合的CO₂制冷系统. 中国专利, CN204254923U, 2015-04-08]
 - 64 Sun Z L, Yang L J, Li J M, et al. Double vortex tube coupled CO₂ two-stage compression refrigeration system (in Chinese). PRC Patent, CN110057125B, 2023-10-20 [孙志利, 杨立杰, 李佳美, 等. 一种双涡流管耦合的CO₂双级压缩制冷系统. 中国专利, CN110057125B, 2023-10-20]
 - 65 Cheng X Y, Chen G T, Pang X B, et al. Integrated heat return gas-liquid separator and refrigeration system for carbon dioxide refrigerant air conditioner (in Chinese). PRC Patent, CN210425379U, 2020-04-28 [程显耀, 陈广泰, 庞学博, 等. 用于二氧化碳冷媒空调的整合回热气液分离器及制冷系统. 中国专利, CN210425379U, 2020-04-28]
 - 66 Chen D L, Yu L Z. Carbon dioxide trans-critical two-stage steam compression type regenerative cycle heat pump (in Chinese). PRC Patent, CN202613753U, 2012-12-19 [陈殿磊, 余廉政. 二氧化碳跨临界双级蒸汽压缩式回热循环热泵. 中国专利, CN202613753U, 2012-12-19]
 - 67 Li B M, Qi Y X, Fang Y, et al. Vehicle-mounted air-supplementing enthalpy-increasing carbon dioxide heat pump air conditioning system (in Chinese). PRC Patent, CN115534631A, 2022-12-30 [李宝民, 祁影霞, 方勇, 等. 车载补气增焓二氧化碳热泵空调系统. 中国专利, CN115534631A, 2022-12-30]
 - 68 Zhang P T, Pang X B, Song D P, et al. Low-temperature-resistant railway vehicle quasi-double-stage compression variable-frequency carbon dioxide heat pump air conditioner (in Chinese). PRC Patent, CN117847824A, 2024-04-09 [张鹏腾, 庞学博, 宋大鹏, 等. 一种耐低温的轨道车辆准双级压缩变频二氧化碳热泵空调. 中国专利, CN117847824A, 2024-04-09]
 - 69 Cao F, Fang J M, Yin X, et al. CO₂ for vehicle Energy-increasing type thermal management system and control method thereof (in Chinese). PRC Patent, CN115284825A, 2022-11-04 [曹锋, 方健珉, 殷翔, 等. 一种车用CO₂增能型热管理系统及其控制方法. 中国专利, CN115284825A, 2022-11-04]
 - 70 Ebara T, Mukaiyama, Hiroshi, et al. Vehicle-mounted two-stage compression type air conditioner (in Chinese). PRC Patent, CN1280118C, 2006-10-18 [江原俊行, 向山洋, 桑原修, 等. 车载两级压缩式空调机. 中国专利, CN1280118C, 2006-10-18]
 - 71 Song Y L, Xie H S, Yang M Y, et al. For CO₂ Secondary circuit heat management system of heat pump air conditioner (in Chinese). PRC Patent, CN117109194A, 2023-11-24 [宋昱龙, 谢宏生, 杨梦莹, 等. 一种用于CO₂热泵空调的二次回路热管理系统. 中国专利, CN117109194A, 2023-11-24]
 - 72 Liao J J. Secondary cooler system of CO₂ heat pump air cooler (in Chinese). PRC Patent, CN214891938U, 2021-11-26 [廖俊静. 一种CO₂热泵气冷器二次冷却器系统. 中国专利, CN214891938U, 2021-11-26]
 - 73 Xu B H, Chen H W, Chen L J, et al. Bus whole-bus thermal management unit based on secondary heat exchange (in Chinese). PRC Patent, CN111137103A, 2020-05-12 [徐博涵, 陈宏伟, 陈留杰, 等. 一种基于二次换热的客车整车热管理机组. 中国专利, CN111137103A, 2020-05-12]
 - 74 Semel R R. Heat pump secondary coolant loop heat exchanger defrost system for a motor vehicle. US Patent, US1110778B2, 2021-09-07
 - 75 Liu Z K. Modularized passenger car secondary heat exchange air conditioning system (in Chinese). PRC Patent, CN212637081U, 2021-03-02 [刘志坤. 一种模块化客车二次换热空调系统. 中国专利, CN212637081U, 2021-03-02]
 - 76 Jin Z R, Jin Y H, Zhao W J. Concentrated energy module for a vehicle (in Chinese). PRC Patent, CN110901347B, 2024-08-09 [金载然, 金渊浩, 赵

- 完济. 用于车辆的集中能量模块. 中国专利, CN110901347B, 2024-08-09]
- 77 Dai B M, Liu S C, Liu K, et al. A kind of CO₂ for combining auxiliary supercooling based on waste heat overbottom pressure automotive air-conditioning system (in Chinese). PRC Patent, CN207257289U, 2018-04-20 [代宝民, 刘圣春, 刘坤, 等. 一种基于余热余压联合辅助过冷的CO₂汽车空调系统. 中国专利, CN207257289U, 2018-04-20]
- 78 Dai B M, Liu S C, Liu K, et al. A kind of CO₂ automotive air-conditioning systems based on waste heat supercooling (in Chinese). PRC Patent, CN206959387U, 2018-02-02 [代宝民, 刘圣春, 刘坤, 等. 一种基于余热过冷的CO₂汽车空调系统. 中国专利, CN206959387U, 2018-02-02]
- 79 Liu S C, Dai B M, Wang H D, et al. A kind of refrigerator car energy-saving and environmental-friendly refrigeration system reclaimed based on engine exhaust heat (in Chinese). PRC Patent, CN206449934U, 2017-08-29 [刘圣春, 代宝民, 王海丹, 等. 一种基于发动机余热回收的冷藏车节能环保制冷系统. 中国专利, CN206449934U, 2017-08-29]
- 80 Wu J H, Li J C, Zhang S. Electric automobile heat pump air conditioning system and control method thereof (in Chinese). PRC Patent, CN109177691B, 2024-01-09 [吴建华, 李佳宸, 张帅. 一种电动汽车热泵空调系统及其控制方法. 中国专利, CN109177691B, 2024-01-09]
- 81 Tan W, He Y G, Wei X P, et al. Electric automobile CO based on mu law 15 broken line 2 Heat pump air conditioner supercharging curve planning algorithm (in Chinese). PRC Patent, CN114347753B, 2023-07-04 [谭伟, 何友国, 韦秀萍, 等. 基于 μ 律15折线的电动汽车CO₂热泵空调增压曲线规划算法. 中国专利, CN114347753B, 2023-07-04]
- 82 Ren J, Zhang S, Zheng H, et al. Energy flow dynamic analysis and interval suboptimal control for real electric vehicle testing with R744 thermal management system. *Energy Convers Manage*, 2025, 346: 120408
- 83 Cao F, Jia F, Yin X, et al. Method for controlling filling state by exhaust pressure of transcritical carbon dioxide air conditioner heat pump (in Chinese). PRC Patent, CN116147243A, 2023-05-23 [曹锋, 贾凡, 殷翔, 等. 一种跨临界二氧化碳空调热泵排气压力控制充注状态的方法. 中国专利, CN116147243A, 2023-05-23]
- 84 Gou S G, He M. Carbon dioxide heat pump air conditioner thermal management system for new energy automobile and control method thereof (in Chinese). PRC Patent, CN114290870A, 2022-04-08 [苟顺国, 何铭. 新能源汽车用二氧化碳热泵空调热管理系统及其控制方法. 中国专利, CN114290870A, 2022-04-08]
- 85 Song Y L, Cao F, Yin X, et al. Energy-saving control method and system for electric vehicle thermal management system based on weighted PMV model (in Chinese). PRC Patent, CN116552196A, 2023-08-08 [宋昱龙, 曹锋, 殷翔, 等. 基于加权PMV模型的电动汽车热管理系统节能控制方法和系统. 中国专利, CN116552196A, 2023-08-08]
- 86 Huang H, Hu D H, Zhang H B, et al. DDPG-based pure electric vehicle passenger cabin air conditioner refrigeration control method (in Chinese). PRC Patent, CN116729060A, 2023-09-12 [黄浩, 胡东海, 张海波, 等. 一种基于DDPG的纯电动汽车乘员舱空调制冷控制方法. 中国专利, CN116729060A, 2023-09-12]
- 87 Xie Y, Yuan J H, Zhang Y J, et al. Electric vehicle passenger cabin and power battery cooperative heating control method and device (in Chinese). PRC Patent, CN115230433B, 2024-05-14 [谢翌, 袁佳慧, 张扬军, 等. 电动汽车乘员舱与动力电池协同加热控制方法及装置. 中国专利, CN115230433B, 2024-05-14]
- 88 Wang L L, Xu X, Yi H C, et al. New energy automobile air conditioner control system and method capable of humidifying (in Chinese). PRC Patent, CN113580874B, 2023-10-03 [汪琳琳, 许翔, 伊虎城, 等. 一种可加湿的新能源汽车空调控制系统及方法. 中国专利, CN113580874B, 2023-10-03]
- 89 Zhao N, Zhang X W, Zhang X F. Automobile air conditioning system and control method thereof (in Chinese). PRC Patent, CN112440659A, 2021-03-05 [赵宁, 张晓炜, 张晓飞. 一种汽车空调系统及其控制方法. 中国专利, CN112440659A, 2021-03-05]
- 90 Zhao H X, Cai H, Feng X Y, et al. A kind of electric car subregion air-conditioner control system and control method (in Chinese). PRC Patent, CN109664727A, 2019-04-23 [赵红霞, 蔡皓, 冯相友, 等. 一种电动汽车分区空调控制系统及控制方法. 中国专利, CN109664727A, 2019-04-23]
- 91 Cao F, Wang A C, Jia F, et al. Transcritical carbon dioxide electric automobile thermal management system and frostless control method thereof (in Chinese). PRC Patent, CN113715574B, 2023-05-02 [曹锋, 王谔词, 贾凡, 等. 跨临界二氧化碳电动汽车热管理系统及其无霜控制方法. 中国专利, CN113715574B, 2023-05-02]
- 92 Bai N N. A kind of automobile intelligent air conditioner control system of Internet of Things (in Chinese). PRC Patent, CN107415633A, 2017-12-01 [白娜娜. 一种物联网的汽车智能空调控制系统. 中国专利, CN107415633A, 2017-12-01]
- 93 Sun Z H, He W, Wang X Y. Automobile intelligent air conditioner control system and method and automobile (in Chinese). PRC Patent, CN114571948A, 2022-06-03 [孙中华, 何文, 汪向阳. 一种汽车智能空调控制系统、方法及汽车. 中国专利, CN114571948A, 2022-06-03]

Summary for “专利视角下的新能源车用CO₂热管理技术发展综述”

Advances in CO₂ thermal management technology for new energy vehicles: a review from perspective of patents analysis

Jilin Ren, Xiang Yin^{*}, Shuo Zong, Xu Yang, Wenyi Wang & Feng Cao^{*}

School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

^{*} Corresponding authors, E-mail: xiangyin@mail.xjtu.edu.cn; fcao@mail.xjtu.edu.cn

For the challenge of driving range degradation of new energy vehicles in winter and policy requirements for applying environmentally friendly refrigerant, CO₂ thermal management technology is gradually regarded as one of the effective solutions in the future. Unlike conventional hydrofluorocarbons refrigerant loops, CO₂ thermal management technology is based on transcritical cycles, with significant variations in derived technologies, underdeveloped industrial chains, and a notable influence from environmental policies. All of these factors form the limitation of CO₂ thermal management technology, so there is an urgent need for more comprehensive and integrated technical research reviews to support its further development. However, existing academic review studies summarize cutting-edge research directions but fail to guide the industry in developing regularly and orderly under policy planning. Patent-based review studies analyze trends in patent application numbers but lack in-depth discussions on specific technical details and do not consider the synergistic roles of policy, industry, and research in the process of promoting the technology. As the automotive thermal management industry grows alongside the rising sales of new energy vehicles, market competition intensifies. Only advanced technologies that meet both policy and production requirements and develop in an orderly manner can secure a larger share of the technical market. In order to address the problem, this paper provides a patent technology review from both macro and micro perspectives. First, based on 2504 relevant patents, this paper summarizes trends in patent numbers, geographical distribution, major research institutions, and patent status, like most patent-based reviews. Simultaneously, focusing on theoretical and engineering technical characteristics, it outlines key technology developments in three major research and design directions: components, systems, and control across several scenarios, including passenger vehicles, commercial vehicles, and so on. It provides a detailed analysis of the technical characteristics and evolution trends in four areas: key components, system architecture, integrated modules, and control algorithms. Finally, this paper explains the synergistic effects of policy planning, technical limitations, and product outcomes on technological development. It analyzes the constraints of these three factors from both temporal and spatial perspectives and summarizes new technical development requirements of high efficiency, low energy consumption, low cost, and low carbon emissions, providing robust support for the stable development of the CO₂ thermal management technology industrial chain. This comprehensive review bridges the gap between academic research, patent trends, and industry needs, offering valuable insights for future innovation and commercialization efforts. Ultimately, it aims to guide the orderly and sustainable development of CO₂ thermal management technology, ensuring its effective contribution to the advancement of new energy vehicles and the realization of environmental policy goals.

new energy vehicles, thermal management technology, natural CO₂ refrigerant, patents analysis

doi: [10.1360/CSB-2025-5684](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5684)