纯电动商用车热泵型集成式热管理系统研究

董欣　杨杰　付凯强　杨龙涛　高星

陕西重型汽车有限公司

摘要：本文旨在探讨热泵型集成式热管理在纯电动商用车行业的应用和性能表现。通过理论分析和试验数据，发现热泵型集成式热管理在纯电动汽车领域具有显著的应用优势，包括提高能源利用效率、降低能耗、提升系统性能等。

关键词：纯电动商用车；热泵技术；集成式热管理系统；热泵型集成式热管理

0　前言

纯电动商用车作为新能源汽车的一部分，近年来在国家政策的扶持下发展迅速。2023 年我国新能源汽车产销分别完成 958.7 万辆和 949.5 万辆，同比分别增长 35.8% 和 37.9%，市场占有率达到了 31.6%，其中新能源商用车产销也已占到了商用车产销量的 11.5% 和 11.1%（商用车年产销量累计完成 403.7 万辆和 403.1 万辆）。

对于纯电动商用车来说，电池种类、工作条件、热管理方式、电池间连接方法以及外界气候环境等因素都会影响电池性能的变化，导致高速续航衰减、低温续航衰减、电池安全和电池耐用性差等问题，其根本原因是动力系统的工作特性与温度强相关，温度对动力性能的影响最大。因此，对整车热管理系统的研究与提升，将大大提升纯电动商用车的使用性能，为客户提供更满意的驾驶体验与最大化的经济效益。本文将对热泵型集成式热管理系统进行详细的理论分析和试验论证。我们相信，热泵型集成式热管理系统在未来的纯电动商用车领域作为一种高效、环保的能源转换技术，具有广泛的应用前景。

1　传统热管理系统

纯电动商用车在设计时针对主要的热量来源而常用的热管理系统包括动力电池系统热管理（BTMS）、空调系统热管理和电机电控系统热管理。传统的分散式热管理系统是电池、空调及电机电控系统三条回路彼此独立，各自有一套完整的温控系统和管路系统，因此在汽车运行过程中存在着某一系统用电加热系统制热的同时，另一部件或系统在对外散热能量没有得到充分利用，不但造成能量浪费，而且不利于节能环保。另一方面，由于整个热管理系统集成度较低，导致管路复杂、零部件数量多成本高，整车质量偏重，从而也加速了车辆在运行过程中电池电量的消耗速度，减少了车辆续驶里程，对整车的经济性产生了不小的影响。

2　集成式热管理系统的设计和优化

为了实现纯电动汽车的高效节能，提升整车性能和续驶里程表现，尤其是低温环境下的性能，整车热管理系统正朝着系统集成式、智能化的方向发展。集成式热管理利用多通道阀门或管路，将电池、空调和电机电控系统中某些或全部回路连通，形成一个大的、可控的循环回路，从而发挥出集成热管理系统的优势。此外，电机余热可以通过集成热管理系统进行回收再利用，可以在冬季寒冷环境下为电动汽车统筹热量管理，减少能量的浪费。不仅如此，集成式热管理系统对电池、空调和电机电控系统三大热管理系统集成度提高，控制逻辑增强，减少了零部件数量，降低整车质量，改善制造成本，间接缓解了电量在行车过程中的消耗速度。

某纯电动商用车采用了集成式热管理系统。该系统机组内部集成了水泵、换热器、膨胀阀和 PTC（正温度系数热敏电阻，选配）等部件，性能参数如表 1。

表 1　集成式热管理机组性能参数

序号	性能	参数
1	最大外形尺寸	450 mm × 450 mm × 280 mm
2	制冷量	8 kW
3	控制逻辑	工作模式 + 目标水温
4	工作模式	制冷模式、自循环模式、关机模式、加热模式
5	工作电压	24 V
6	制冷剂	R134a
7	冷却液	50% 水 +50% 乙二醇
8	水泵	50 L/min 120 kPa
9	机组功耗	＜ 300 W
10	板式换热器	换热功率＞ 8 kW，冷却液 30 L/min
11	PTC 加热器（选配）	加热功率≥ 12 kW
12	质量	≤ 20 kg
13	防护等级	IP67
14	其他性能要求	水冷机组与 BMS 信号交互

我们对这款纯电动商用车的集成式热管理系统进行了仿真测试。测试要求电池入水口温度为 15℃，电池的允许温升小于 2 ℃。测试之后对集成方案与独立方案的成本进行比对见表 2，可以看出，集成方案在外形尺寸、质量和成本方面的优势都非常明显，能带来各方面效益的增加。不仅如此，从可扩展性分析，独立机组的外形尺寸与一个标准 C 箱电池相同，为了保证模块化，单机组散热功率已不可扩展，仅能通过增加机组数量满足电池热管理需求，而集成机组可通过提高压缩机功率，增大冷凝器面积，并联两个换热器，可将散热功率扩展到 12 kW，实现能量的高效利用，降低车辆的能耗。

3　热泵型集成式热管理系统

3.1　热泵型集成式热管理原理

在集成式热管理系统的基础上，为了更好地满足电池的高温度敏感性，纯电动商用车的热管理复杂层级和精细化程度都在持续提高，还有一些创新应用正在加入其中，热泵技术就是其中之一。热泵本身并不生产热，只是热的搬运工，基于逆卡诺循环原理（图 1），用少量电能驱动机组，将工作介质进行变相循环，把低品位热能吸收压缩升温后加以利用。热泵的主要构件包括制冷

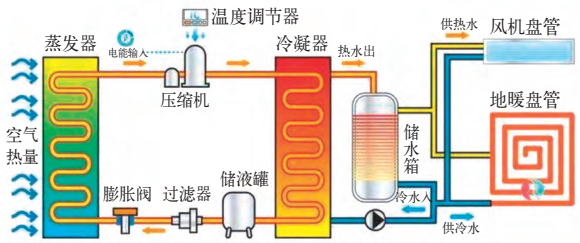

图 1　热泵原理

剂、压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器等。它是一个封闭循环的回路，其中的介质即冷媒 / 制冷剂，在此循环回路中被连续地压缩和膨胀。在每次被压缩和膨胀时（即每一轮工作状态），制冷剂将热量从低温环境中“抽取”并传送到高温环境中。空气并未作为冷媒使用，尽管它不会造成污染且无成本，因为其每轮工作状态的热效率相当低，实际使用的冷媒是能够在吸收热量时蒸发，散发热量时冷凝的液体。液体形态的改变过程能够在每一轮工作循环中极大地提高热效率。热泵系统具有制冷、制热两种工况。将热泵技术与集成式热管理系统相融合，可以开发出新的热泵型集成式热管理系统。利用该技术的热泵空调系统以电动空调压缩机，利用制冷循环可逆转的特点，集制冷与制热为一体，具有通用性好、结构紧凑、高效节能和环保等优点，已成为车载空调的新趋势。在冬季制热工况下 COP（制冷性能系数）可达 2 ~ 4，能效多倍于目前纯电动汽车领域普遍使用的 PTC 加热系统，可以有效延长 20% 以上的续驶里程。当前热泵系统的类型主要有直接式热泵空调系统、间接式热泵空调系统和补气增焓直接式热泵空调系统，如图 2 所示，可制热、可制冷。通俗一点讲，就是在热泵系统中使用四通换向阀可以使热泵空调的蒸发器和冷凝器功能互相对换，改变热量转移方向，从而达到夏天制冷、冬天制热的效果。

3.2　热泵型集成式热管理的试验验证

目前热泵型集成式热管理系统在纯电动商用车上应用还较少，乘用车上已有一些应用。热泵系统通过制冷剂的气液转换，将空气中的热量转化为自身的内能，COP 值比 PTC 加热系统高出 2 ~ 3 倍，可有效延长 20% 以上的续驶里程，即使在极低温度下，仍可保证 COP 大于等于 1，而 PTC 能效系数则一般小于 1。而

表 2　集成 8 kW 机组与独立 8 kW 机组参数比对

参数	独立 8 kW 机组	集成 8 kW 机组	优势	效果
外形尺寸 /mm	835 × 550 × 280	432 × 420 × 247	↓ 64%	节省空间可增加 18 kW · h 电量，可增加续航 9 km
质量 /kg	50	22	↓ 57%	可多拉 28 kg 货物，预计全年多增加收入 2000 元
机组成本 / 元	10514	4503	↓ 57%	单车降成本 6011 元
电池热管理系统成本 / 元	14358（松芝）	8554	↓ 40%	单车降成本 5804 元

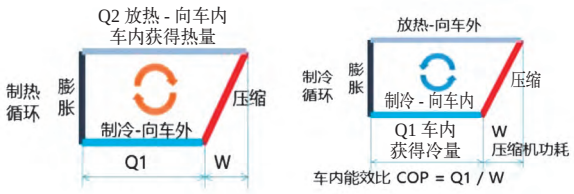

图 2　热泵系统的制热循环和制冷循环

在制热环节，依靠系统的反向循环，将外界空气的热能强制转移到乘客舱的空调系统，因此热泵空调的能效系数比 PTC 加热高出 2 ~ 3 倍，特斯拉 Model Y 的热泵能耗系数如图 3 所示。

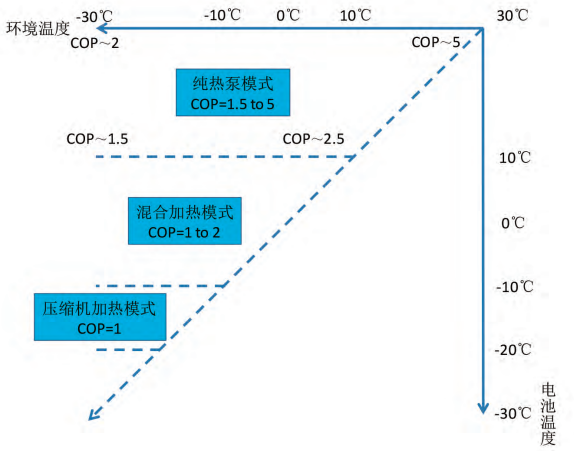

图 3　特斯拉 Model Y 热泵能耗系数

根据环境温度和电池温度的关系，以 COP 值来划分热泵系统参与加热程度，特斯拉有 9 种加热模式、3 种冷却模式，以及除湿、除霜及除雾模式，其 COP 值如表 3 所示。不仅如此，热泵系统的成本初步估算为 16800 元，较电池独立冷却方案低 2300 元，较电池集成冷却方案高 1200 元，约 1 年可收回高出的成本。

4　热泵型集成式热管理系统的优劣势

通过以上特斯拉的各项数据参数和性能，我们可以总结出热泵型集成式热管理的优劣势。

优势主要有：1）系统整合性强：将多个热管理子系统整合到一个系统中，实现了统一的控制和优化；这有助于减少系统复杂性，提高管理效率。2）能源效率：通过精确控制各个部件的温度和热量流动，能够更有效地利用能源，降低能耗。3）智能化管理：通常配备先进的传感器和控制系统，能够实时监测和调整系统的运行状态，实现智能化管理。4）环境适应性：可以根据环境条件自动调整运行策略，提高系统的适应性和稳定性。5）安装与维护：集成式热管理系统的结构紧凑，安装方便。

劣势主要表现为：1）技术难度高：需要整合多个子系统，技术难度相对较高，需要专业的技术支持。2）初期投资大：由于集成式热管理需要整合多个子系统，因此初期投资相对较大。3）维护成本高：由于系统复杂度高，集成式热管理的维护成本也相对较高。

综上所述，以整车综合性能提升为目的、集成设计优化为标准、多系统协调控制与统筹管理为手段的热泵型集成式热管理在能源利用效率、智能化管理、环境适应性及长寿命等方面具有显著优势，而这些优势正是未来整车热管理发展的大趋势。

5　结论

随着能源危机的加速、排放法规的日益严格，以及人们对驾驶环境舒适性的追求日益提高，控制和优化汽车的热量传递过程，保证重要部件和系统安全高效地运行，合理利用热能，降低废热排放，提高能源利用效率，减少环境污染等，必然会是未来纯电动商用车整车热管理系统的发展方向。

热泵型集成式热管理系统将热泵技术和集成式热管理理念相结合，其概念内涵已从传统发动机冷却扩展为涵盖动力电池加热冷却、机油冷却、空调制冷、暖通供热、增压中冷、低周热疲劳、热伤害、动力舱与乘员舱等多内容的综合热管理，为纯电动商用车提供高效、智能和可靠的热量管理。在电池技术没有突破性进展的前提下，热泵空调系统是当前降低续驶里程损耗的最佳解决方案之一。它将实现整车更高的能源利用效率和使用性能，为客户带来更加舒适的驾驶体验与最大化的经济效益——在低温 -10 ℃时，传统的 PTC 采暖使电动汽车的续驶里程下降 50% 以上，而利用热泵空调系统采暖可以使续驶里程改善 35% 以上。

据不完全统计，热泵空调在乘用车领域搭载车型逐步增多，国外搭载技术已经过 5 年验证，日产 Leaf、丰田 Prius 等销量极佳，捷豹 I-PACE 也规划了搭载热泵空调。国产电动汽车也完成了热泵装载从 0 到 1 的突破，如荣威 Ei5、荣威 MARVEL X、长安 CS75 PHEV 等车型都已经采用了热泵空调。根据相关领域专家预测，到 2025 年，热泵空调在新能源汽车的市场渗透率将达到 30%。

纯电动商用车领域对于热泵型集成式热管理系统的研究和应用都有着划时代的重要意义，它推动了技术创新和市场拓展，同时也带来了更大的挑战，我们也将持

表 3　特斯拉 9 种加热模式的 COP

热泵模式	功能	工　况	COP 值
1	驾驶室加热	环境温度 > -10 ℃，车辆刚起动，电机、电池无余热，驾驶室需要加热	＞ 2
2	驾驶室加热	环境温度 > -10 ℃，电机、电池有余热，驾驶室需要加热	＞ 2
3	驾驶室加热	环境温度 <-10 ℃，电机、电池有余热，驾驶室需要加热	1 ＜ COP ＜ 2
4	驾驶室加热	环境温度 < -10 ℃，电机、电池无余热，驾驶室需要加热，在模式 2 基础上开 APTC	1 ＜ COP ＜ 2
5	驾驶室加热	环境温度 <-10 ℃，驾驶室温度很低，模式 4 不能满足加热，电池 / 电驱无多余热量	=1
6	驾驶室 + 电池加热	环境温度 <-10 ℃，驾驶室和电池温度都很低，驾驶室、电池都需要加热	=1
7	电池加热	环境温度 <-10 ℃，驾驶室不加热，当车速优先或在较冷的环境中充电	=1
8	电池加热	行驶前或停车后，驾驶室温度较高，将驾驶室热量保存到电池中（特斯拉电池由保温材料包裹）	＞ 2
9	电池加热	行驶前或停车后，电驱温度较高，将电驱热量保存到电池中（特斯拉电池由保温材料包裹）	＞ 2

续关注热泵型集成式热管理系统的未来发展，做好纯电动商用车热管理系统的技术储备。

参考文献

[1] 赵云峰，杨武双，李榕杰，等 . 我国纯电动汽车发展趋势分析 [J]. 汽车工程师，2020（7）：14-17.

[2] 中国汽车工业协会网站数据 .

[3] MEYER J J，LUSTBADER J，AGATHOCLEOUS N，et al.Range extension opportunities while heating a battery electric vehicle[C].SAE Paper 2018-01-0066.

[4] 金英爱，江楠，谯鑫，等。电气化背景下电动汽车热管理技术的进步与展望 [J]，2022,12（4）：446-458.

[5] 王振，李保国，罗权权，等 . 电动汽车锂离子电池热管理系统研究进展 [J]. 包装工程，2020,41(15):232-238.

[6] 刘霏霏 . 微热管在电动汽车电池热管理系统中应用的关键技术研究 [D]. 广州：华南理工大学，2017：1—221.

[7] WANG Z，LI S，ZHANG Y，et a1．Oxocar-bon-functionalized Graphene as a Lithium-ion Battery Cathode：A First-principles InVestigation[J]．Physical Chemistry Chemical Physics，201 8，20：33—52.

[8] Wen, Jianwu, Yu, Yan, Chen, Chunhua. A Review on Lithium-Ion Batteries SafetyIssues：Existing Problems and Possible Solutions[J]. Materials Express, 2012,2(3):197-212(16).

[9] 李江峰，李帅旗，阮先轸，等 . 纯电动汽车 CO^2 热泵空调及整车热管理概述 [J]. 储能科学与技术，2022 11（9）：2959-2970.

[10] YOKOYAMA A,OSAKA T, IMANISHI Y, et al. Thermal management system for electric vehicles[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2011, 4(1): 1277-1285.

[11] 胡杰 . 纯电动客车三电系统选型设计及其热管理分析 [D]. 吉林大学，2018.

[12] 张斌 . 电动汽车永磁同步驱动电机电磁热设计研究 [D]. 华中科技大学，2015.

[13] 黄世佩 . 某型纯电动汽车热泵空调集成式热管理系统构建及研究 [D]. 吉林大学，2021

[14] 艾志华 . 纯电动车热泵空调与动力系统集成式热管理系统研究 [D]. 湖南大学 ,2018.

[15] Ahn J H，Kang H，Lee H S，et al. Heating performance characteristics of a dual source heat pump using air and waste heat in electric vehicles[J]. Applied Energy, 2014, 119(15):1-9.

[16] 马自会 . 基于热泵技术的纯电动轿车热管理集成开发 [D]. 湖南大学 ,2015.

[17] 张兴瑞，范武，杨贵林，等 . 电动汽车集成热管理研究进展 [J]. 汽车实用技术，2020,45(21): 17-19.