

# 燃料电池电动汽车余热管理系统关键技术分析

尤国建<sup>1,2</sup>,洪晏忠<sup>1,2\*</sup>,张 栋<sup>1,2</sup>,熊 萌<sup>1,2</sup>,崔垚鹏<sup>1,2</sup>

(1.中国汽车工程研究院股份有限公司;2.中汽院新能源科技有限公司)

**摘要:**本文针对燃料电池电动汽车余热管理系统进行了关键技术分析。首先简要论述了燃料电池电堆余热管理系统主流关键技术。然后进行了能效、节能、环保、成本的对比分析。最后结合实践提出了今后燃料电池电动汽车余热管理系统发展的建议和展望。相关论述以供参考。

**关键词:**燃料电池电动汽车;余热管理;换热器;热泵;热电联产

**【DOI】**10.12293/j.issn.1671-2226.2023.17.004

燃料电池电动汽车作为一种非常有前途的新能源汽车形式,其性能稳定、驱动能力强、使用寿命长、排放物少等特点备受人们关注和追捧。然而,燃料电池电动汽车在使用过程中会产生大量的余热,如何高效地利用燃料电池电动汽车产生的余热并提高整车的能量利用率成为当前亟待解决的技术难题。

## 1 燃料电池电动汽车余热管理系统采用的主流技术

燃料电池电动汽车的余热管理系统具有回收车辆排放的余热,提高整车的能源利用效率,减少对环境的影响,同时还能在车内提供舒适的环境等优点。目前的主流技术有排温回收、余热回收、热泵技术。

### 1.1 排温回收技术

排温回收技术路线是燃料电池电动汽车余热管理系统的主流技术之一。其基本原理是利用热传导和对流等方式将排气温度降低,然后将回收的余热用于车内的供热、供用水等方面。该技术需要考虑排气管路和排气系统的设计和制造,以确保系统的稳定和可靠性。日本 Toyota Mirai 采用了排温回收技术路线。Toyota Mirai 是目前市场上比较成熟的商业化燃料电池车型之一,其技术含量和技术成熟度在行业内代表着较高的水平<sup>[1]</sup>。

Toyota Mirai 采用了专门开发的“排气管回热器”(Exhaust Heat Recovery System, EHRS),通过将排气管路上的空气加热器、水套和废气再循环阀等设备结合使用,回收了发电电池和电动机“直接为运行机械能”而产生的热量。EHRS 可以使排气温度从约 400℃降至约 120℃,并在冷却系统中回收余热,用于车内供热、供水等。EHRS 还可以减少汽车的热反辐射,提高了氢燃料电池的热效率和经济性,和减少对环境的影响。

### 1.2 内燃机余热回收技术

燃料电池电动汽车内燃机余热回收技术路线的核心是使用热交换器将发动机冷却水和机油的余热转移给车内的供暖、送风系统和电池。该路线可分为两大类:热风式和液体式。热风式路线是在发动机进气管道上安装一个热交换器,将热交换器内的水和蓄热材料热化,

进而将空气加热,最后从暖风系统向车内供热。增加了额外的成本。液体式路线则是在冷却水循环中安装一个热交换器,用车内供暖、送风系统的冷却液循环沿着管道循环流回发动机的冷却系统,将热交换器内的余热传递给车内<sup>[2]</sup>。

丰田普锐斯是目前采用热风式燃料电池电动汽车内燃机余热回收技术路线的典型代表。该技术方案通过利用发动机热能,将废气中的余热回收利用,并将其转化为汽车内部的热能,提高其燃料利用效率。丰田普锐斯发动机内部采用了热水循环系统和热风加热系统,能够快速预热车内空气,提高车内环境的舒适性。通过这种技术方案的应用,丰田普锐斯在行驶过程中能够有效地减少 CO<sub>2</sub> 的排放,并提高燃料的利用效率,同时也为用户提供更加舒适的驾驶体验。

### 1.3 热泵技术

近年来,汽车工业一直在寻求更加环保与节能的解决方案。在这个背景下,热泵技术的应用逐渐成了汽车空调系统的研究热点。热泵技术以其高效率、节能、无污染等优点,有望成为现代汽车行业的重要发展方向。热泵技术主要包括以下方面:1) 压缩机系统:热泵汽车空调系统采用的压缩机是一个关键组件。相比于传统的液体制冷剂,热泵中的制冷剂是以气态存在的。因此将热泵压缩机运用到汽车空调系统中,可以通过压缩机系统大幅度提高汽车空调的能效。2) 膨胀阀:在热泵汽车空调系统中,膨胀阀也是一个重要的组件。该阀门可以控制制冷剂的流量,从而达到控制汽车空调温度的目的。3) 换热器:热泵压缩机运转时,需要通过换热器将从空气中提取的热能传递到汽车内部。换热器可以把热能充分地释放出来,并且防止制冷剂过热。4) 回收液体:在热泵汽车空调系统中,制冷剂是以气态存在的。将回收过的液体再用于热泵汽车空调系统的制冷过程中,也是一种比较环保的方式。5) 制冷剂:热泵汽车空调系统采用的制冷剂通常会选择环保的制冷剂,例如常用的 R-134a。这种制冷剂在制冷过程中不会对环境造成极大的破坏。

热泵空调相较于传统空调，有以下方面的优势：1) 余热节省：热泵空调的相较于传统空调能充分利用余热，使得能源利用效率更高。2) 能效：相较于传统空调，热泵空调能耗更低、制冷效果更好、制热效果更快速。3) 成本：相较于传统空调，热泵空调安装成本较高。但从长远来看，热泵空调能够更有效地利用能源和降低使用成本，会使总体成本降低。4) 空间布置：因为热泵空调不需要管线，所以相比于传统空调，它的空间布置更加灵活，可以更好地满足个性化需求。

目前，全球有许多企业研发热泵空调技术，如三菱、格力、海尔、LG、西门子等。其中，三菱已经在欧洲开发出了空气-水热泵，实现了将室外的低温热源转变为家用热水和暖气的目标；我国的格力也推出了多种热泵空调产品，覆盖了家庭、商务等多个领域；海尔也在开展热泵空调相关的研发和应用工作；LG 在韩国推出了一种热泵空调和热水器的产品，实现了尝试将多种产品功能集于一身的目标。这些企业的研发和应用将促进热泵空调技术的不断发展和应用，进一步推动汽车热泵空调行业的发展。

## 2 主流技术的对比分析

针对燃料电池电动汽车余热管理系统的三种主流技术路线，进行对比分析在能效、节能、环保、成本等方面的优劣，以期更好地了解这些技术的特点。

### 2.1 能效方面对比

三种主流技术路线在能效方面的数据对比如下表所示：

表 1 能效数据对比

技术类别	提供的热能	能效比
排温回收技术	排气中产生的热能	最高能效比为 40%
内燃机余热回收	发动机冷却水和机油的余热	最高能效比为 15%
热泵技术	空气中的热能	能效比超过 200%

通过对表格数据的分析，我们可以看出热泵技术路线相对于排温回收和内燃机余热回收技术路线，在提供热能方面的能效比是最高的。其中，热泵技术的能效比最高可达 50%，在能效方面极具优势。而排温回收技术路线的能效比也相对较高，最高能效比可达 40%。而内燃机余热回收技术路线的能效相对较低，最高能效比不超过 15%。总的来说，热能回收技术能够有效利用废热，提高车辆的热效率，减少能源的浪费<sup>[4]</sup>。

### 2.2 节能方面对比

三种主流技术路线在节能方面的效果对比如下表所示：

表 2 节能效果对比

技术类别	节能效果
排温回收技术	可将约 60%的耗能转化为热能
内燃机余热回收技术	可将约 5%—8%的热能用于辅助供热
热泵技术	可将约 75%的热能从空气中转移到车内

通过对表格分析，我们可以看出排温回收技术路线在节能方面表现最为显著，其能够将约 60%的耗能转化为热能。这是因为排温回收系统可以将内燃机废气中的能量回收利用，为车内供热。其次，热泵技术路线在节能方面也表现不错，能够将约 75%的热能从空气中转移到车内。热泵系统的工作原理是从空气中吸收周围环境中的热能，再将低温热能变成高温热能，达到供热的目的。而内燃机余热回收技术路线的节能效果相对较低，只能将少量的热能用于辅助供热<sup>[5]</sup>。

### 2.3 环保方面对比

三种主流技术路线在环保程度对比如下表所示：

表 3 环保程度表

技术类别	环保程度
排温回收技术	可有效减少废气排放，降低污染的发生
内燃机余热回收技术	在一定程度上减少废气对环境的污染
热泵技术	无污染

一些研究表明，内燃机余热回收技术可以减少 60%的 CO<sub>2</sub> 和 30%的 NO<sub>x</sub> 排放。而排温回收技术通过利用废气中高温的热量来加热车内，有效将废气的热能回收利用，并降低了部分有害气体的排放。热泵技术路线则是一种完全无污染的技术路线，其工作过程中不会产生任何污染物和副产品，也不会对环境造成负面影响。热泵系统通过从环境中吸收热量，运用热能转移技术进行供热，将能量转移至车内，不会产生任何废气或噪声，并且能大幅降低汽车对环境的影响。

### 2.4 成本方面对比

三种主流技术路线在成本对比如下表所示：

表 4 成本对比表

技术类别	成本
排温回收技术	设计和制造成本较高
内燃机余热回收技术	较低设计和制造成本
热泵技术	整体成本较高

据汽车行业研究发现，排温回收技术的成本相对较低，普通的排温回收装置安装成本大约为 5000 元，如果是将排温换热器和辅助热器整合在一起，成本则可能高达 1 万~2 万元不等。而内燃机余热回收技术的成本相对较高，一些资料显示该技术的费用在车辆总成本中占比较高，可能会超过 10%。此外，内燃机余热回收装置的维护成本也比较高，需要进行定期维护和保养，且维护费用也比较昂贵。而热泵空调技术的成本也较高，普通的热泵系统装置需要几千元到万元不等的费用，而高端的热泵系统装置甚至可以超过 2 万元。另外，热泵系统的维护和保养也是一笔不可忽视的成本，需要花费一定的费用进行维护和保养，确保其长期的运营和效率。

### 2.5 综合分析

从分析来看，热泵技术路线在能效、节能、环保方面都表现最好。热泵不仅可以将车内余热回收利用，还可

以从环境和空气中吸收热量,再将低温热量通过膨胀阀调节,达到增大汽车驱动力的目的。热泵技术的应用无疑降低了能源的消耗,减少了废气排放,对车辆的环保性能有很大的提升。然而,热泵技术在成本方面存在较大的问题。从表格中可以看出,热泵路线的设计和制造成本相对较高,需要一定的投入。这也是热泵技术应用受制约的一个主要因素。

此外,由于热泵系统的技术含量较高,对设备的故障率也要求较高,这会使得维护和维修成本也较高。因此,是否选用热泵技术,需要根据具体的应用环境和车型情况进行综合考虑。相比之下,排温回收技术路线的能效和节能效果相对较高,但设计和制造成本也较高。排温回收系统的设计和制造成本部分是受到其工艺特点的限制。排温回收要求在短时间内对高温废气进行回收和利用,同时又具备一定的冷热交换效果。这对材料、工艺、设计等方面要求都比较高,从而导致排温回收系统的设计和制造成本相对较高。相对而言,内燃机余热回收技术路线的设计和制造成本相对较低。内燃机余热回收系统利用废气和冷却水冷却内燃机,将余热回收利用。由于内燃机的原理和技术比较成熟,余热回收技术的应用相对较为成熟,因此设计、制造成本较低,不需要过多的额外成本投入。

随着技术的不断发展和研究的深入,燃料电池电动汽车的余热处理技术将会不断完善和优化,帮助电动汽车实现更好的能效和环保性能,为人们带来更加清洁和可持续的出行体验。

### 3 余热管理的发展建议与展望

燃料电池电动汽车的发展离不开对其余热的有效管理,因此,对燃料电池电动汽车余热管理系统的发展建议和展望,应从智能化技术的应用、多能源系统的发展和可靠性与安全性的提高等三个方面来探讨。

#### 3.1 智能化技术的应用

燃料电池电动汽车余热管理系统的智能化、高效化,可以提高驾驶体验和安全性。一方面,利用传感器、云计算、人工智能等技术,实现燃料电池电动汽车余热的实时监测和合理分配,进而实现能源的高效利用。另一方面,智能化技术可以提高驾驶体验和安全性。同时,实现车辆到运营中心的实时数据传输,可以提高驾驶员和管理人员对车辆情况的了解和掌握,增加车辆的安全性。

#### 3.2 多能源系统的发展

多能源系统的发展是未来燃料电池电动汽车余热管理系统的重要发展方向之一。通过综合利用动力电池、超级电容器、氢气燃料电池和太阳能等多种能源,实现燃料电池电动汽车的能源平衡和能源转换。例如在车辆行驶过程中利用超级电容器和动力电池进行能量储备,通过余热回收能量并进行有效利用;利用太阳能将氢气燃料电池进行充电等等。这些措施将有助于提高燃料电池电动汽车的能源效率和可持续发展能力。

#### 3.3 可靠性与安全性的提高

如何提高燃料电池电动汽车余热管理系统的可靠性和安全性,成为燃料电池电动汽车发展中的一大挑战。一方面,可靠性和安全性需要通过加强燃料电池电动汽车余热管理系统的设计和建设来保障。例如,加强系统质量控制和工艺管理,提高系统的可靠性和安全性;同时建立完善的维修保养工作体系,及时处理系统故障和失效。另一方面,可靠性和安全性还需要通过有效的监测和管理来保障。建立完善的燃料电池电动汽车余热管理系统数据追踪和监测平台,对燃料电池电动汽车的运行状况、备件管理等进行实时监测和管理,及时发现并解决问题,提高系统的可靠性。

### 4 结论

燃料电池电动汽车的发展需要关注余热管理、智能化技术的应用、多能源系统的发展、可靠性与安全性等方面。这将有助于燃料电池电动汽车的持续发展,并为节约能源、减少环境污染、保护生态环境作出贡献。燃料电池电动汽车作为一种新兴的能源汽车,需要不断改进和推进技术,探索更广阔的应用市场。相信在政策支持、产业链合作等方面的帮助下,燃料电池电动汽车将能够更好地适应市场需求,创造更大的经济和社会价值。

#### 参考文献

- [1]杨福清.燃料电池电动汽车余热管理系统研究[J].机电技术,2022(002):000.
- [2]王永军,孙宾宾,李文涛,等.基于小波规则的燃料电池电动汽车能量管理策略[J].济南大学学报:自然科学版,2021,35(4):7.
- [3]刘焕东,董小杨,张晋维,等.燃料电池余热利用系统开发及试验分析[J].时代汽车,2022(000-014).
- [4]刘静,孙闫.燃料电池电动汽车的能量管理仿真与优化[J].机械工程师,2022(11):118-120.
- [5]王永军,孙宾宾,李文涛,高松颜,敬昊,魏国.基于小波规则的燃料电池电动汽车能量管理策略[J].济南大学学报(自然科学版),2021,35(4):322-328.