

# 燃料电池汽车低温冷启动性能技术探讨

李新茹 王士英

海南海马汽车有限公司 海南 海口 570216

**摘要:** 为了优化燃料电池电动汽车在低温环境下的冷启动性能,使其能够快速启动并输出足够的功率以支持行驶,本文探讨了整车冷启动策略方案。这些方案旨在提升车辆在极端低温(-30℃)下的启动性能。经过分析与试验验证,成功地实现了在120秒内快速启动,这标志着燃料电池电动汽车在低温条件下的启动性能取得进步。这一成果为燃料电池电动汽车的商业化应用提供了宝贵的经验,进一步提升了其市场竞争力和实用性。

**关键词:** 燃料电池; 燃料电池电动汽车; 快速低温冷启动

## 1 引言

氢能在我国实现碳中和目标中扮演着重要的角色。2021年多部委联合发布的《关于开展燃料电池汽车示范应用的通知》中,明确提出了对高功率燃料电池汽车的发展鼓励,并随后实施了以奖励代替补贴的示范运营城市群政策。

现有的研究工作主要集中在燃料电池堆和系统级别的开发上,对于整车关键性能与策略优化的深入研究还显得相对匮乏。这意味着,尽管燃料电池技术本身得到了广泛的研究和发展,但将这一技术融入整车系统并实现最佳性能匹配方面,仍存在诸多挑战和待解决的问题。特别是在低温环境下,燃料电池的性能提升已成为一大难点。本文旨在深入探讨影响整车在低温下冷启动性能的关键因素,并对燃料电池汽车进行低温冷启动性能的优化研究。

## 2 燃料电池电动汽车的技术特点

燃料电池电动汽车,作为一种前沿的新能源汽车技术,其核心技术在于氢气和氧气在质子交换膜上的电化学反应,持续稳定地生成电能。燃料电池电动汽车唯一的反应产物是水,因此被视为零碳排放的清洁能源,且其效率可以达到42-60%,使得燃料电池电动汽车在能源利用上具有显著优势。

燃料电池堆输出电压通常低于动力电池,因此燃料电池电动汽车比传统电动汽车多了一个升压DC/DC变换器,用于提升电压并稳定输出。此外,为了确保系统的正常运行,还配备了供氢、供气等辅助系统,以及使用专用冷却液的独立冷却系统。这些设计都是为了确保燃料电池电动汽车能够高效、稳定、安全地运行。

## 3 燃料电池系统低温特性

### 3.1 燃料电池堆低温特性

燃料电池堆在低温环境下的冷启动及其运行性能的

优化是现在应用的一大挑战。由于燃料电池在反应过程中会生成水,在零度以下的低温条件下易于结冰,从而破坏质子交换膜上或妨碍电化学反应。且燃料电池堆内部的质子交换膜在低温环境下工作效率降低,甚至可能无法正常工作。这种情况不仅使得燃料电池系统在低温环境中的启动过程变得更复杂,还会降低功率输出和效率<sup>[1]</sup>。同时,低温条件下燃料电池的启动周期通常较长,这在一定程度上降低了其实用性和便利性。

更为重要的是,在低温环境下,电堆内部吹扫不完全而结冰的情况难以完全避免。当燃料电池系统的防护措施不够理想时,相关阀体易受冻结冰,进而直接阻碍供氢和排水过程,最终可能导致冷启动的失败。更为严重的是,不恰当的反复冻结和融化过程会对燃料电池堆的结构和性能造成损害,导致性能退化,进而影响到燃料电池汽车的运行稳定性和耐久性[2-3]。

### 3.2 燃料电池系统低温启动方式

质子交换膜燃料电池堆的低温工作温度因结构和质子交换膜组成不同而不同,有的只能在-10℃开始启动工作,有的可达到是-20℃,有的甚至低至-30℃环境温度。燃料电池堆在低温环境的工作效率低,且会影响质子交换膜的寿命,因此需先加热燃料电池温度至合适的工作温度,才允许大功率输出。

为了加快燃料电池堆的冷启动,根据不同燃料电池堆的特性,采用不同的设计和控制方案。

方案一:采用PTC加热模块,加热电堆冷却液,加快燃料电池堆内部温度。

在燃料电池冷却回路的增加一个PTC模块。在零下或低温工况,为加快燃料电池堆内部温度,启动PTC加热冷却液,且进入小循环不通过散热器,加热电堆冷却液至温度阈值,再启动燃料电池系统。

优点:对燃料电池堆的低温启动温度要求不高,可

通过PTC先加热燃料电池堆的温度；保证燃料电池堆工作在合适温度范围内，延长使用寿命；设计和控制方案相对简单。

缺点：增加PTC成本；动力电池的电量能在低温环境下满足燃料电池堆冷启动的过程的能量需求，增加成本。

方案二，采用电堆内部自加热升温。燃料电池系统的冷却回路相对简单，无PTC模块。在零下或低温工况，为加快燃料电池堆内部温度，进入小循环不通过散热器，燃料电池堆启动小功率工作，内部自加热至温度阈值，然后再按功率需求输出。

优点：可减少PTC加热模块成本；动力电池耗能低。

缺点：燃料电池堆的低温工作温度范围要求高，低温甚至达到 $-30^{\circ}\text{C}$ ；对燃料电池性能要求高，可实现低电压高电流输出特性，加快温度升高；控制方案复杂，冷启动时间可能会延长。

本论文采用电堆自加热升温方式，且在此基础上通过优化控制，优化吹扫，减少内部水分积累；提高电堆的发电功率，从而快速提升燃料电池堆的温度，缩短冷启动时间。

#### 4 整车低温冷启动性能优化策略

##### 4.1 吹扫控制策略

燃料电池系统下电吹扫是为了吹扫阴极和阳极内部的多余水汽，确保电堆内部湿度保持在适当水平，以保障车辆下次能够成功启动，同时不影响燃料电池堆的使用寿命，对于提高低温冷启动性能有非常重要的作用。

车辆下电吹扫根据环境温度不同，吹扫后的电堆湿度也不一样，进而吹扫的时间也不同。例如，在环境温度为 $0^{\circ}\text{C}$ 或在某个低温阈值（例如 $5^{\circ}\text{C}$ ）以上，车辆进行正常吹扫，吹扫时间预计1分钟；环境温度在 $0^{\circ}\text{C}$ 或阈值以下，车辆进行长时间吹扫，保证电堆内部更干燥，不会因为车辆长期停在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下导致电堆内部结冰，长时间吹扫时间预计3~5分钟。

车辆下电至OFF档，燃料电池系统进入吹扫模式。如图1所示，空压机开始高转速工作，对电堆阴极（空气）腔体持续一定时间吹扫，吹走腔体内部水汽，然后关闭进气阀和背压阀，封闭电堆阴极腔体，打开旁通阀，空压机再降低转速持续工作，此时阴极腔体内部还有部分氧气。此过程阳极（氢气）正常供氢，电堆处于低功率输出。

封闭电堆阴极腔体后，阳极正常供氢，消耗完阴极腔体内部氧气，确保阴极腔体只有惰性气体（例如氮气）。当氧气耗完，即电堆无功率输出，氢气循环泵持续工作，开始吹扫阳极内部水汽至水气分离器，水气分离器内部的排气排水阀间断性打开，通过氢气高压把

阳极腔体尤其是水气分离器内部的水排出至排气管，完成排水后，氢气循环泵停止工作。进氢阀总成增加阳极腔体内压力至阈值，确保阳极腔体压力大于阴极压力，避免阴极腔体内部气体渗透至阳极腔体。在此过程空气压缩机持续工作，通过旁通阀排出空气至排气管，稀释阳极腔体排出的氢气，避免氢气浓度升高。至此燃料电池系统完成吹扫，零件停止工作。

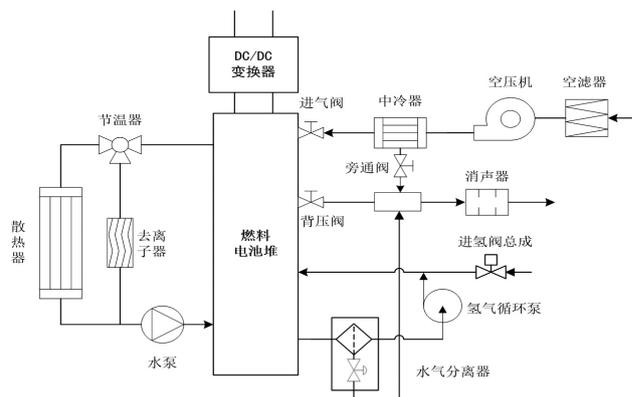


图1 燃料电池电动汽车吹扫原理图

整个吹扫过程根据燃料电池系统的工作特性，先吹扫阴极腔体后吹扫阳极腔体，避免电堆腔体内部的水分吹扫不完全。要达到较好的湿度要求，低温时吹扫通常需要更长时间。考虑到整车性能，长时间吹扫会增加额外耗能，因此要制定合理的吹扫方案。例如，低温行驶时，车辆根据环境温度、车辆停车坡度、电堆累积的反应功率，实施即时吹扫和停机后彻底吹扫结合的吹扫策略，提高燃料电池堆自加热功率，缩短启动时间。

##### 4.2 电堆控制策略

燃料电池系统低温启动时，根据燃料电池堆输出特性实现自升温是一种节能方式。采用低电压大电流输出方式，提高电堆本体内部的自产热，加速给电堆加热及缩短启动时间。通过整车能量管理策略，启动车辆大功率耗能系统，进一步增加燃料电池堆输出排气排水阀，利于在低温环境下融解破冰。这些措施的实施，将有效解决低温环境中的结冰问题，提升燃料电池系统的可靠性和冷启动成功率。

##### 4.3 辅助系统低温控制策略

在低温环境下，因吹扫不完全导致供氢或排水阀体内部水汽冻结，进而影响冷启动失败或延长启动时间，需采取针对性的设计和控制策略。具体而言，电堆冷启动自加热过程，通过设计旁通路引进电堆冷却液加热在燃料电池系统进入“startup”前，FC需求功率已经达到 $7\text{kW}$ ，且此时整车启动电池PTC，消耗燃料电池输出的功率且同时给动力电池加热。燃料电池系统响应输出功率

需求,准备就绪后,开始以7kW左右功率输出,电堆输出电流达到160A左右,提高自身的发电功率,加快冷却液温度提升,因此冷却启动时间缩短至111s。

## 5 燃料电池电动汽车低温冷启动性能

### 5.1 低温冷启动试验流程

低温冷启动试验方法参考GB/T 24554-2022《燃料电池发动机性能试验方法》中的8.1.2.1条款,主要目的是验证低温冷启动策略的有效性和启动时间。低温冷启动试验的环境温度是-30℃,试验过程重复进行,且连续两次成功低温冷启动并维持需求功率输出。当燃料电池堆出水温度达到阈值且燃料电池系统按照需求输出被视为燃料电池系统启动成功。

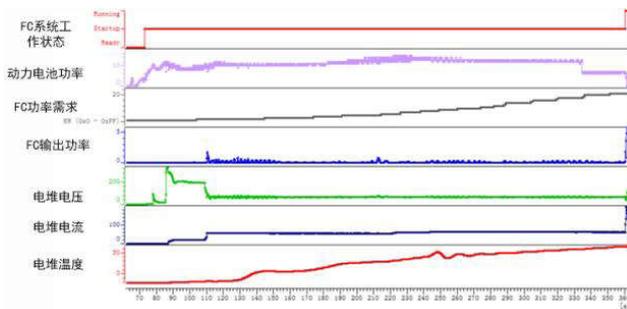


图2 未增大FC功率需求的冷启动数据

在燃料电池系统进入“startup”前,FC需求功率已经达到7kW,且此时整车启动电池PTC,消耗燃料电池输出的功率且同时给动力电池加热。燃料电池系统响应输出功率需求,准备就绪后,开始以7kW左右功率输出,电堆输出电流达到160A左右,提高自身的发电功率,加快冷却液温度提升,因此冷却启动时间缩短至111s。

## 6 结论

本文聚焦于快速低温冷启动的整车控制策略展开深入研究,成功实现了燃料电池汽车在-30℃环境下的快速低温冷启动性能优化。在此过程中,我们提出并介绍了一系列针对整车低温冷启动性能的优化策略,这些策略显著提升了燃料电池汽车在极端低温条件下的启动速度和效率。本文的研究成果不仅为燃料电池汽车的低温适应性提供了有效解决方案,也为推动燃料电池技术的进

## 5.2 方案试验结论

燃料电池系统的冷启动完成标志是电堆温度达到阈值,且“FC系统工作状态”从“startup”进入“running”。通过验证车辆冷启动过程,FC需求功率不同,即自加热功率不同时的冷启动时间。

图2是FC需求功率小时的验证方案。燃料电池系统还处于“startup”时,整车对燃料电池系统的功率需求是从2kW开始缓慢上升。因燃料电池系统还未完成启动时,只能响应第一次功率需求,整个冷启动过程,因燃料电池系统特性,只能输出0-1kW功率,电堆输出电流只有50A左右。因此冷却启动时间延长至286s,温度才达到设计阈值。

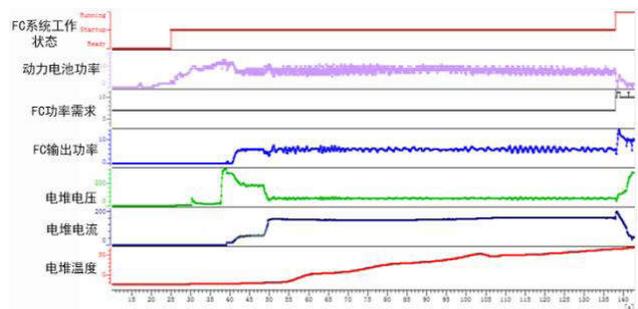


图3 增大FC功率需求的冷启动数据

一步发展提供了有力支持。

## 参考文献

- [1]常国峰,曾辉杰,许思传.燃料电池汽车热管理系统的研究[J].汽车工程,2015,37(8):959-963.
- [2]GAVELLO G, AMBROSIO E P, ICARDI U A, et al. Effect of Freezing Conditions on PEM-FC Components(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. [J]. Ees Transactions, 2009: 359-368.
- [3]HAN K, HONG B K, KIM S H, et al. Influence of Ani-sotropic Bending Stiffness of Gas Diffusion Layers on the Degradation Behavior of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells Under Freezing Condition [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2011,36(19),12452-12464.