整车级燃料电池系统冷启动技术研究

王丙虎，刘 康，黄玉鹏，范志先，朱岩朋
（中通客车股份有限公司，山东 聊城 252000）

摘 要：为解决燃料电池系统在低温环境下启动时间长、受动力电池充电功率限制的问题，本文提出一种整车级冷启动控制方法。该方法分别面向单模组和双模组燃料电池系统，设计了基于高压附件状态和动力电池允许充电功率的开机指令与功率请求策略。在-25 ℃环境下对 12 m 燃料电池城市客车进行实车验证，结果表明，本方法能够突破动力电池持续充电功率对燃料电池系统冷启动的限制，实现自适应控制，冷启动时间平均缩短了 90%。该研究为提升燃料电池系统在极寒环境下的启动效率和环境适应性提供了解决方案。

关键词：燃料电池；冷启动；环境适应性；自适应控制
中图分类号：TM911.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.05.002

Research on Cold-start Technology for Vehicle-level Fuel Cell Systems

WANG Binghu, LIU Kang, HUANG Yupeng, FAN Zhixian, ZHU Yanpeng
(Zhongtong Bus Holding Co., Ltd., Liaocheng 252000, China)

Abstract: To address the long startup time of fuel cell systems and the limited charging power of the power battery in low-temperature environments, this paper proposes a vehicle-level cold-start control method. For single-module and dual-module fuel cell systems, the proposed method defines startup commands and power-request strategies based on the status of high-voltage accessories and the allowable charging power of the power battery. The vehicle tests on a 12 m fuel cell city bus at -25 ℃ show that the proposed method overcomes the constraint imposed by the battery's continuous charging power on fuel cell cold starting, enables adaptive control, and shortens the cold-start time by 90% on average. This study provides a solution for improving the startup efficiency and environmental adaptability of fuel cell systems in extremely low-temperature environments.

Key words: fuel cell; cold start; environmental adaptability; adaptive control

当前，在低温环境下，为防止动力电池过充，其允许的充电功率较低，从而限制了车载燃料电池系统的启动。具体而言，当动力电池单体温度低于 0 ℃时，出于自我保护，其允许充电功率为 0，即无法接受充电[1-3]。此时，若燃料电池系统启动并怠速运行，其电能无法被电池吸收，将给整车运行带来风险。目前，整车对燃料电池系统的冷启动控制既受动力电池允许充电功率为 0 的限制，又缺乏允许其提前开机的灵活策略[4-5]。因此，在现有控制策略下，唯有当动力电池通过自身加热或因整车需求放电，使其温度升至特定阈值后，整车才允许燃料电池系统进入低温启动模式。在该模式下，由于燃料电池自身温度极低，需通过外部 PTC 或内部自加热装置升温至一定温度，方可正常运行并向动力系统供电[6-8]。由此可见，燃料电池系统的启动时间取决于动力电池加热时长和系统自身冷启动时长。据燃料电池车辆在-25 ℃环境下的运营数据显示，车用燃料电池系统的整车冷启动总时间约 40 min，严重影响驾驶体验，且不利于车辆在极寒地区的大规模推广。因此，如何实现极寒条件下车用燃料电池系统的快速启动，是当前亟待解决的关键问题[9-10]。

为解决上述问题，本文提出一种整车层面的燃料电池系统冷启动控制方法。在低温环境下，当动力电池无法支持燃料电池系统直接启动时，整车控制器通过协调高压部件状态，在防止动力电池过充的同时，向燃料电池系统控制器发送开机指令及目标功率。

收稿日期：2025-12-08。
第一作者：王丙虎（1991—），男，硕士，工程师，主要从事燃料电池整车技术研发工作。E-mail：13863516315@163.com。

该方法旨在缩短燃料电池系统的整车级冷启动时间，提升系统在低温条件下的运行效率。

1 燃料电池系统开机指令控制

1.1 单模组燃料电池系统

1）控制器唤醒。钥匙电信号分为 OFF、ON、START 三挡。当钥匙拧至 ON 挡时，整车控制器、电机控制器、燃料电池系统控制器、动力电池管理控制器及集成电源控制器被唤醒，可正常发送和接收报文。上述控制器通过 CAN 网络架构实现信号交互，其连接关系如图 1 所示。



图 1 控制器连接架构图

2）信号接收。整车控制器通过 CAN 总线接收电池管理系统发送的动力电池允许持续充电功率，以及集成电源发送的高压附件接触器状态，并通过硬线接收混动开关状态。

3）控制信号发送。当钥匙拧至 START 挡，整车完成高压上电，仪表显示“READY”后，驾驶员需开启混动开关。当整车控制器检测到混动开关状态值为 1（1 表示接触器闭合）时，进行以下判断：

①当动力电池允许持续充电功率小于燃料电池系统的怠速功率时：a）若集成电源内部的空调、电除霜、水暖、电暖风接触器中任何一个状态值为 1，则整车控制器向燃料电池系统控制器发送开机指令。b）若上述所有接触器状态值都为 0（0 表示接触器断开），则整车控制器不向燃料电池系统控制器发送开机指令。

②如果动力电池允许持续充电功率大于等于燃料电池系统的怠速功率，则整车控制器向燃料电池系统控制器发送开机指令。

1.2 双模组燃料电池系统

1）控制器唤醒。与单模组燃料电池系统完全一致。

2）信号接收与处理。整车控制器通过 CAN 总线接收以下信号：①燃料电池系统控制器发送的单模组及双模组怠速功率；②电池管理系统发送的动力电池允许持续充电功率；③集成电源发送的高压附件接触器状态。同时，整车控制器通过硬线接收混动开关状态。

整车控制器根据接收到的空调、电除霜、水暖、电暖风等高压附件接触器状态，统计处于闭合状态的接触器数量。

3）控制信号发送。双模组燃料电池系统的整车冷启动控制流程如图 2 所示。当钥匙拧至 START 挡，整车完成高压上电，仪表显示“READY”后，驾驶员需开启混动开关。当整车控制器检测到混动开关状态值为 1 时，进行以下判断：

①当动力电池允许持续充电功率小于单模组怠速功率时：a）若高压附件接触器闭合数量为 0，则整车控制器控制模组一和模组二都不开机。b）若闭合数量为 1，则控制模组一开机，模组二不开机。在此过程中，若检测到闭合数量超过 1，则立即开启模组二。c）若闭合数量大于 1，则控制模组一和模组二同时开机。

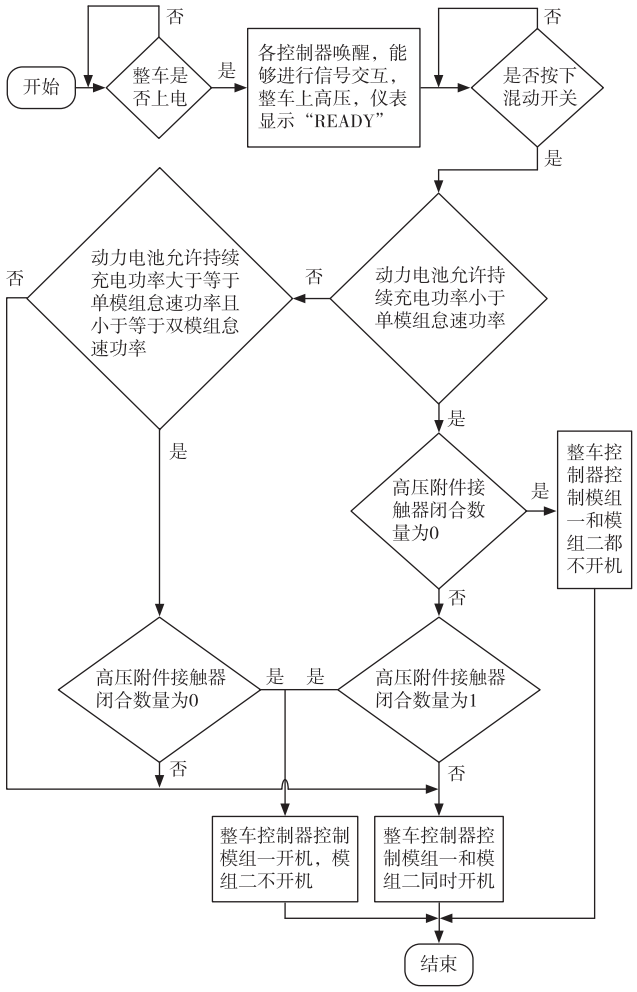


图 2 双模组燃料电池系统整车冷启动控制流程

②当动力电池允许持续充电功率大于等于单模组怠速功率且小于等于双模组怠速功率时：a）若高压附件接触器闭合数量为 0，则整车控制器控制模组一开机，模组二不开机。在此过程中，若检测到闭合数量增至 1 及以上，则立即开启模组二。b）若闭合数量大于等于 1，则控制模组一和模组二同时开机。

③当动力电池允许持续充电功率大于双模组怠速功率时，整车控制器控制模组一和模组二同时开机。

2　燃料电池系统功率请求

单模组与双模组燃料电池系统的功率请求控制流程完全相同，如图 3 所示。

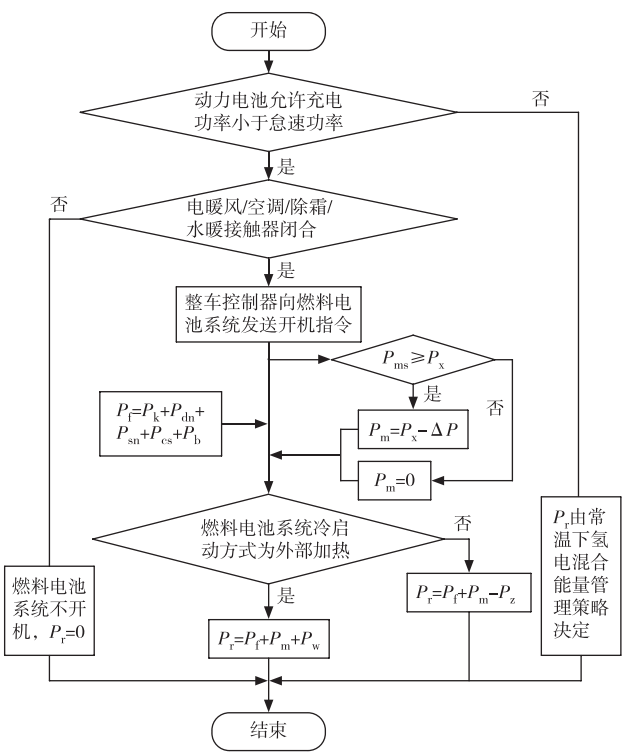


图 3　燃料电池系统功率请求控制流程

动力电池允许持续充电功率小于燃料电池系统怠速功率时：若整车控制器判断高压附件运行状态不满足燃料电池系统开机条件，则整车控制器不向燃料电池系统发送开机指令，且请求功率值为 0（$P_r=0$）；若整车控制器判断高压附件运行状态满足燃料电池系统开机条件，则整车控制器在向燃料电池系统发送开机指令的同时，一并发送请求功率。在此控制过程中，整车控制器通过 CAN 总线接收电机的电压与电流值，计算得出电机需求功率，并根据电机需求功率阈值及防止动力电池过充的功率保留值对电机需求功率进行修正。同时，整车控制器依据各高压附件运行状态确定各高压附件的需求功率，并根据燃料电池系统的冷启动方式判断该系统在冷启动过程中是放电还是耗电。最终，整车控制器综合电机需求功率、高压附件需求功率及燃料电池冷启动方式，确定整车向燃料电池系统的请求功率（P_r）。

1）电机需求功率（P_m）的确定方法如下：若电机实际需求功率（P_{ms}）≥电机功率需求阈值（P_x），$P_m=P_x-\Delta P$，ΔP 为防止动力电池过充的功率保留值；若 $P_{ms}<P_x$，则 $P_m=0$。

2）高压附件需求功率 P_f 的计算公式见式（1）。计算时，各附件的需求功率取部件最小功率值。

$$P_f=P_k+P_{dn}+P_{sn}+P_{cs}+P_b \tag{1}$$

式中：P_k 为空调需求功率；P_{dn} 为电暖风需求功率；P_{sn} 为水暖需求功率；P_{cs} 为除霜需求功率；P_b 为动力电池自加热需求功率。

3）燃料电池系统的冷启动方式分为外部加热和电堆自加热。设外部加热功率为 P_w，自加热消耗功率为 P_z。若冷启动方式为外部加热，则 $P_r=P_f+P_m+P_w$；若冷启动方式为自加热，则 $P_r=P_f+P_m-P_z$。

如果动力电池允许持续充电功率大于等于燃料电池系统的怠速功率，则整车控制器向燃料电池系统的请求功率由常温下的氢电混合能量管理策略决定，该策略不在本文研究范围内。

3　试验验证

3.1　试验对象

本文试验对象为搭载单模组燃料电池系统的中通 12 m 燃料电池城市客车，其主要参数见表 1。

表 1　12 m 燃料电池城市客车参数

参数	数值
整备质量/kg	13 000
满载质量/kg	18 000
电机额定/最大功率/kW	100/200
燃料电池额定功率/kW	80（单模组）
动力电池电量/（kW·h）	105.28
供氢系统参数	140 L×8
滚动半径/m	0.465
最大车速/（km·h^{-1}）	69
最大爬坡度/%	≥15
0~50 km/h 加速时间/s	≤15

鉴于单模组与双模组燃料电池系统的冷启动控制逻辑存在相似性,通过前者的冷启动试验可有效说明后者的冷启动特性。因此,不再选取搭载双模组燃料电池系统的车辆进行冷启动试验。

3.2 试验方案

试验在张家口崇礼冬奥村(车辆实际运行环境)进行。为增强对比性,设计如下对比试验方案(两方案均以整车无故障、动力电池 SOC 及氢 SOC 满足燃料电池系统开机为前提):

1) 方案一:若动力电池允许持续充电功率小于燃料电池系统怠速功率,则整车控制器不允许燃料电池系统开机;若动力电池允许持续充电功率大于等于燃料电池系统怠速功率,则整车控制器控制燃料电池系统开机。

2) 方案二:若动力电池允许持续充电功率小于燃料电池系统怠速功率,但整车控制器检测到集成电源内部空调、电除霜、水暖、电暖风等高压附件对应的任一接触器闭合,则整车控制器控制燃料电池系统开机。

3.3 验证方法

选取实地运行的 6 辆 12 m 燃料电池城市客车,连续 5 天在低温环境下进行测试。测试前一日 20:00 前,车辆下电并停放在停车场,静置过夜。次日 8:00 起,对每辆车依次进行冷启动测试。将 6 辆车分别编号为 1~6,其中 1、2、3 号车采用方案一冷启动策略,4、5、6 号车采用方案二冷启动策略,测试期间各车辆的测试方案保持不变。测试均在静态下进行(车速为 0 km/h)。

方案一测试方法:打开车辆手拨开关,打开仪表台翘板开关,将钥匙拧至 ON 挡(整车上高压)。待燃料电池系统状态显示为待机后,打开仪表台混动开关,控制燃料电池系统开机。当燃料电池系统状态为正在运行且功率达到稳定时,关闭混动开关,控制燃料电池系统关机。待燃料电池系统状态为待机后,将钥匙拧至 OFF 挡(车辆下电),最后关闭仪表台翘板开关和手拨开关。

方案二测试方法与方案一基本一致,唯一区别在于打开混动开关控制燃料电池系统开机之前,需打开电空调、电除霜、电暖风、电加热水暖开关中的任意一个。

3.4 数据采集及分析

每次车辆冷启动测试完成后,拷贝这段时间内测试车辆远程监控终端的数据,提取有效数据以分析燃料电池系统的冷启动时间。有效数据包括:环境温度、燃料电池系统入口温度、动力电池允许持续充电功率、整车控制器下发的燃料电池系统开关机指令、燃料电池系统工作状态,以及电空调、电除霜、电暖风、电加热水暖高压接触器状态。试验车辆的冷启动数据统计结果见表 2。

表 2 车辆冷启动数据

时间	环境温度/℃	车辆编号	燃料电池系统入口温度/℃	冷启动时间/s
第一天	-26	1	-20	2 541
		2	-19	2 254
		3	-20	2 512
		4	-20	291
		5	-19	242
		6	-20	252
第二天	-26	1	-20	2 465
		2	-21	2 538
		3	-20	2 377
		4	-22	273
		5	-21	255
		6	-20	263
第三天	-28	1	-22	2 385
		2	-22	2 635
		3	-23	2 834
		4	-22	289
		5	-21	279
		6	-23	312
第四天	-25	1	-19	2 291
		2	-19	2 225
		3	-18	2 155
		4	-19	226
		5	-19	244
		6	-18	242
第五天	-25	1	-18	2 213
		2	-19	2 237
		3	-20	2 352
		4	-19	238
		5	-20	269
		6	-18	231

表 2 中环境温度和燃料电池系统入口温度为直接读取值。冷启动时间定义为从打开仪表混动开关到燃料电池系统进入“正在运行”状态的时间。由表 2 可知，1、2、3 号车冷启动时间较长；4、5、6 号车冷启动时间较短。这主要是因为方案一在打开仪表混动开关控制燃料电池系统开机之前，并未开启电空调、电除霜、电暖风、电加热水暖等高压附件，整车控制器一直等待动力电池自加热。当动力电池温度上升，且其允许持续充电功率大于燃料电池系统怠速功率时，整车控制器才向燃料电池系统发送开机指令。因此，1、2、3 号车的冷启动时间包括动力电池自加热时间和燃料电池系统自身开机时间；而 4、5、6 号车的冷启动时间仅包括燃料电池系统自身开机时间。由此可见，方案二所描述的燃料电池整车冷启动方法能够突破动力电池允许持续充电功率对燃料电池冷启动的限制，实现整车对燃料电池系统冷启动的自适应控制及随时启动，冷启动时间平均缩短 90%。

4　结束语

本文提出并验证了一种利用高压附件协同控制实现燃料电池系统冷启动的策略。试验表明，在极寒环境下，通过主动接通空调、电除霜等高压附件的接触器以创造整车用电需求，能够有效突破动力电池允许充电功率为零所导致的燃料电池冷启动限制。在 -25 ℃环境下，冷启动时间缩短约 90%，且该策略对单模组和双模组系统均适用，显著提升了车辆在寒区的适用性。

然而，本研究仍存在局限，对策略的验证限于静态工况，动态行驶下的长期影响尚不明确。后续研究将重点开展长周期实车动态试验，引入多目标智能协同控制，完善差异化的功率分配策略，并结合车联网探索预判式预热启动方法，以期为工程化推广提供更坚实的技术支撑。

参考文献：

[1] 陈全世，齐占宁. 燃料电池电动汽车的技术难关和发展前景[J]. 汽车工程，2001，23(6)：361-364.

[2] 李建秋，方川，徐梁飞. 燃料电池汽车研究现状及发展[J]. 汽车安全与节能学报，2014，5(1)：17-29.

[3] 王诚，黄俊，王树博，等. 车用燃料电池启停工况性能衰减[J]. 化学通报，2016，79(11)：1001-1011.

[4] Jiao Kui，Li Xianguo. Three-dimensional multiphase modeling of cold start processes in polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Electrochimica Acta，2009，54(27)：6876-6891.

[5] Meng Hua. A PEM fuel cell model for cold-start simulations[J]. Journal of Power Sources，2008，178(1)：141-150.

[6] Kangasniemi K H，Condit D A，Jarvi T D，et al. Characterization of vulcan electrochemically oxidized under simulated PEM fuel cell conditions[J]. Journal of The Electrochemical Society，2004，151(4)：125-132.

[7] Pei Pucheng，Chang Qianfei，Tang Tian. A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2008，33(14)：3829-3836.

[8] 衣宝廉，侯 明. 车用燃料电池耐久性的解决策略[J]. 汽车安全与节能学报，2011，2(2)：91-100.

[9] 陈维荣，钱清泉，李奇. 燃料电池混合动力列车的研究现状与发展趋势[J]. 西南交通大学学报，2009，44(1)：1-6.

[10] 余意. 质子交换膜燃料电池启停特性及控制策略研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2013：6.