ISSN 1002-4956
CN11-2034/T

实 验 技 术 与 管 理
Experimental Technology and Management

第 43 卷 第 5 期 2026 年 5 月
Vol.43 No.5 May 2026

DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2026.05.012

燃料电池整车能量管理策略设计及实验研究

孙 柯，孙 文，白书战

（山东大学 核科学与能源动力学院，山东 济南 250061）

摘 要：该文基于燃料电池、动力电池、电机的多源耦合特性，搭建了燃料电池动力系统台架并设计了软件系统，实验平台具备动力总成在环测试功能，支持整车工况模拟与控制策略验证。该文设计了基于确定规则和模糊逻辑的两类能量管理策略，从电机响应、燃料电池功率分配、动力电池荷电状态波动与氢耗经济性四个维度开展对比实验。结果表明：模糊逻辑控制策略具有更强的动态响应能力，能够快速适应工况波动，提升整车驱动平顺性；确定规则控制策略则在系统能效与燃料经济性方面表现更优，燃料电池工作稳定，能量路径短，氢耗较低。

关键词：燃料电池；混合动力系统；能量管理策略

中图分类号：TK91 **文献标识码：**A **文章编号：**1002-4956(2026)05-0092-06

交通运输作为碳排放的重要来源，亟需实现能源结构转型[1-2]，氢能与燃料电池因具有零排放[3]、高能量密度与良好续航能力等优点，成为推动商用车低碳化转型的关键路径[4-5]。其中，质子交换膜燃料电池因工作温度低、启动迅速与功率密度高等优势，尤其适用于中重型商用车辆的动力系统[6-7]。

燃料电池在实际应用中仍面临一系列工程挑战，如在负载突变下响应滞后，难以单独支撑频繁启停与高动态工况的需求[8]。因此，当前主流技术路线是采用“燃料电池+动力电池”的混合动力结构，以动力电池辅助瞬时功率输出提升系统稳定性[9]。该架构虽然提升了整车运行的灵活性与可靠性，但也对能量管理策略提出了更高的要求[10]。

能量管理策略研究逐渐从经验规则向智能优化转变[11-12]：①基于规则的策略具有结构清晰、易于工程实现等优点，但对系统状态的响应能力有限[13]；②基于优化的策略，如动态规划、模型预测控制等，虽能获得理论上的最优控制，但对先验工况依赖强，计算复杂度高，限制了其实时应用[14]；③基于智能方法的策略，如模糊控制、强化学习等，具备一定的自适应能力，适合动态工况环境下的在线控制[15]。目前，相关研究多集中于模型构建与策略算法，缺乏实验验证数据支持，特别是在实际工况响应、系统功率分配与能效表现等方面的工程可行性评估尚不完善。

1 实验装置设计

首先，根据车辆的物理结构与能量流动路径，基于模块化设计理念，将整车功能划分为多个独立子模块，并据此构建了系统的硬件架构；然后，根据各关键部件的通信协议特性，开发了基于 CAN 总线的整车控制网络，确保燃料电池系统、动力电池系统及驱动电机之间的高效协同控制。最后，结合软件建模与硬件配置，设计了工况回放与动态交互的循环台架模拟平台，并开发了支持整车功率系统响应验证的动力总成硬件在环测试系统。

1.1 台架功能

为在台架环境下准确模拟燃料电池整车工况，基于车辆运行状态的动态特性将台架系统分为 4 个核心模块，如图 1(a)所示。①驾驶员模拟模块用于输入目标工况，模拟实际驾驶过程中的加速、减速和速度保持行为。②动力总成模块包括燃料电池系统、动力电池系统、直流电压转换（DC/DC）模块及驱动电机，用于验证多能源耦合驱动逻辑。③阻力负载模块用于模拟整车在道路行驶过程中所受到的滚阻、风阻和坡道阻力等，提供与真实环境等效的负载条件。④数据采集与监控模块用于实时采集与记录电压、电流等关键运行参数，为控制策略效果评估与性能对比提供数据支撑。图 1(b)为实物照片。

收稿日期：2025-11-01 **修改日期：**2025-11-18

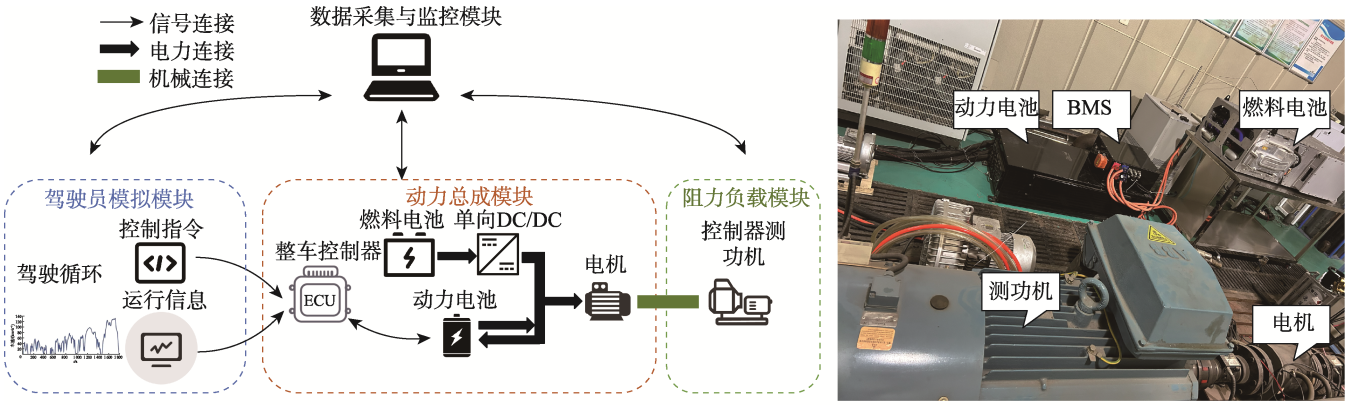
基金项目：教育部产学合作协同育人项目（240906707014442）；山东大学实验室建设与管理研究重点项目（sy20232305）；山东省重点研发计划软科学项目（2025RZB0202）

作者简介：孙柯（1987—），男，山东聊城，博士，高级实验师，主要研究方向为新能源，sunkeke@sdu.edu.cn。

通信作者：白书战（1979—），男，山东聊城，博士，教授，主要研究方向为实验平台管理，baishuzhan@sdu.edu.cn。

引文格式：孙柯，孙文，白书战. 燃料电池整车能量管理策略设计及实验研究[J]. 实验技术与管理, 2026, 43(5): 92-97.

Cite this article: SUN K, SUN W, BAI S Z. Design and experimental study of energy management strategies for fuel cell vehicles[J]. Experimental Technology and Management, 2026, 43(5): 92-97. (in Chinese)



(a) 功能模块及相关关系　　(b) 实物照片

图 1　燃料电池动力系统台架

1.2　台架硬件结构

燃料电池混合动力台架包括燃料电池系统、动力电池系统、电机驱动系统及辅助单元，如图 2 所示[16]。燃料电池系统作为台架的主要能量来源，由燃料电池电堆、氢气供给模块、空气压缩机、冷却系统及多种传感器单元组成，控制氢气与空气供应、反应产物排放及堆体温度，保证电堆运行的安全性与高效性。动力电池系统为高性能磷酸铁锂电池，配备电池管理系统，主要功能包括能量缓冲、辅助驱动及能量回收，同时实时监控电池组的电压、电流、温度与荷电状态（state of charge，SOC），提高整套系统的运行安全性与能量利用效率[17]。

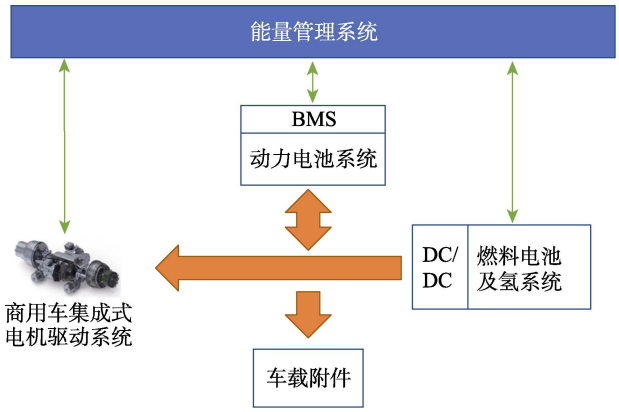


图 2　燃料电池混合动力台架

台架集成了驱动电机及控制器，能够根据预设工况精确模拟整车的驱动过程。电机驱动系统与台架加载装置相联动，测试整车在加速、减速、匀速等多种动态工况下的能量流分布与响应特性。为保障测试精度与系统可控性，台架还配备了高精度数据采集与处理单元、CAN 总线通信模块以及可视化人机交互界面，实时监测各子系统运行状态并记录数据。

1.3　台架软件结构

本文开发了面向电池动力系统台架的集成化控制软件，软件界面分为燃料电池信息区、动力电池信息区及电机信息区，分别对应整车能源系统的关键子系统。台架 LabVIEW 监控界面 GUI 如图 3 所示，各功能模块通过底层的数据采集与处理单元与硬件平台对接。燃料电池信息模块监测燃料电池电堆的电压、电流、温度、压差等参数，具备电堆健康状态初步评估与告警功能。动力电池模块实时展示电池组的总电压、电流及 SOC，为能量管理策略提供有效边界条件与安全保护支持。电机信息模块采集与分析驱动电机转速、输出扭矩及功率数据，可用于性能评估与负载追踪。系统底层通信通过 CAN 总线与台架各关键部件交互信号，同时兼容其他工业标准通信接口；上层基于人机交互界面设计，支持多参数可视化展示、状态监控与指令交互操作。

软件控制系统首先通过底层通信模块周期性地采集各类传感器与执行器的数据，包括电压、电流、温度、SOC、转速等关键运行参数，并依据预设的能量管理策略判定运行状态。根据系统当前运行状态及负载需求，控制逻辑模块自动分配燃料电池与动力电池输出功率比例，并将调节结果通过控制指令下发至对应的执行单元，实时调控整车动力输出。此外，系统具备完善的故障监测与安全保护机制，可对关键参数进行越限判断与逻辑关联分析，发生异常时自动触发告警提示，并进入安全模式，确保台架与人员操作的安全性。

2　控制策略设计

将基于 MATLAB/Simulink 开发的燃料电池整车模型集成至台架系统，验证能量管理策略的功能并评估效果。面向典型的燃料电池+动力电池混合动力商用车架构，多能源系统的高效协同控制核心目标如下：①保障在各种驾驶工况下的驱动能力，确保车辆的可驾驶性与运行安全；②优化燃料电池与动力电池之间的功率分配路径，降低氢耗，提升系统经济性；③将 SOC 维持在设定的合理区间内，避免过充过放，延长电池寿命并增强系统运行稳定性。

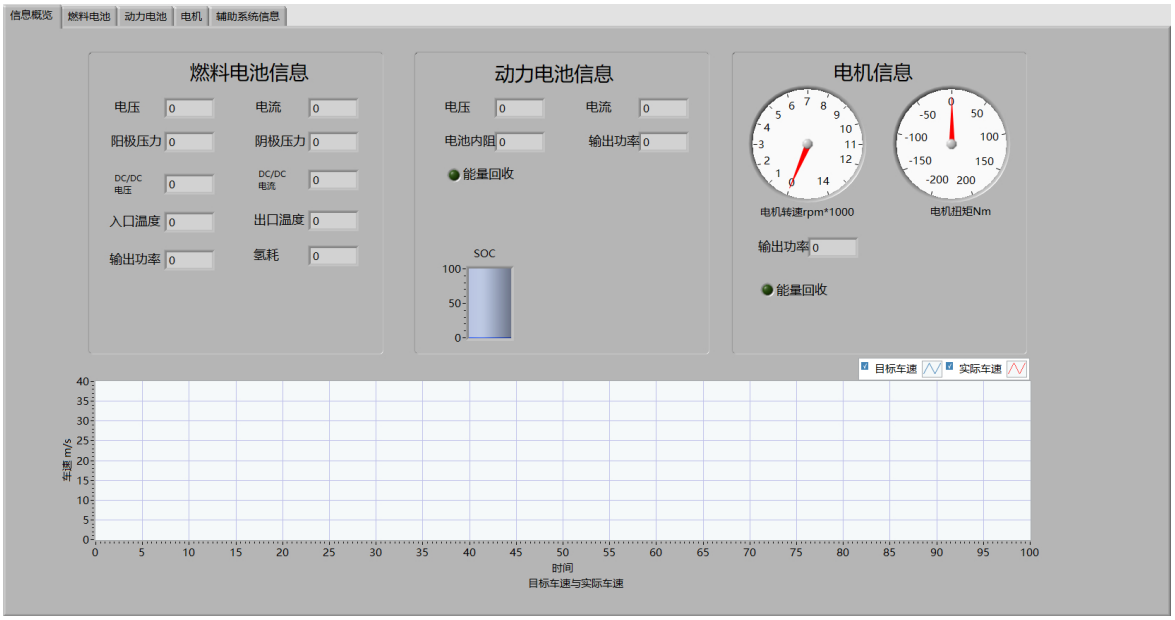


图 3 LabVIEW 环境下台架监控界面

2.1 基于确定规则的控制策略

在正常工况下，燃料电池系统负责驱动负载输出，动力电池则在功率突变时提供瞬时响应能力，并在制动或下坡等能量回收阶段吸收多余能量。

为保障动力电池的使用安全与寿命，控制策略基于动力电池 SOC 的分区控制机制，设置 SOC 的上下阈值，并对动力电池 SOC 进行持续监测与动态判定。根据 SOC 变化，控制逻辑自动切换不同的能量分配策略，避免过充或过放，维持系统能量稳定性。同时，策略具备多工况适应能力，能够识别车辆当前运行状态，如加速、减速、匀速、爬坡与能量回收等典型工况，并实时调整燃料电池与动力电池之间的功率分配比例，确保在复杂工况下的动力连续性与能量效率最优。

基于确定规则的能量管理策略采用主从式控制架构，以驱动电机所需功率 P_{mot} 为输入信号，通过一系列分层判断逻辑，确定燃料电池的输出功率 P_{fc}。

（1）能量回收阶段。驱动电机处于制动或能量回馈状态，系统默认由电机进行能量回收，燃料电池不输出功率。

（2）怠速或低负载阶段。车辆处于低负载运行阶段，为提高燃料电池系统效率，默认由电池独立供能，燃料电池保持关闭或待机状态。

（3）中功率输出阶段。功率需求介于低功率阈值与燃料电池最优效率输出功率之间时，车辆负载适中，系统采用固定最优效率点控制，燃料电池输出功率设定为最优功率。同时引入 SOC 状态判断，若 SOC 已达上限，可适当减少燃料电池输出或关闭，防止电池过充。

（4）高功率区间。控制策略转为根据实际电机需求提供更大功率，若未超过电堆最大额定功率 P_{max}，则 $P_{fc} = P_{mot}$。

（5）极高功率请求。若功率需求超过电堆能力，则电堆输出维持最大安全功率，即 $P_{fc} = P_{max}$。

2.2 基于模糊逻辑的控制策略

本文基于 MATLAB/Simulink 的编辑器设计模糊逻辑控制器的隶属度函数。模糊逻辑控制（fuzzy logic control，FLC）的核心目标是在满足整车动力需求的同时，合理分配燃料电池与动力电池之间的能量。

隶属度函数需综合考虑 SOC 稳定性、能量供给保障与控制器性能优化等多方面因素。一方面，为避免动力电池过充或过放，控制器需引导 SOC 维持在合理的工作区间内，以延长电池使用寿命并提升系统运行安全性；另一方面，应确保整车在加速、爬坡等典型工况下具备充足的能量供给能力，满足对动力输出的实时性与可靠性要求。同时，为兼顾模糊控制器的计算效率与控制精度，隶属度函数设计采用单峰形结构，并避免相邻函数间出现交叉干扰，从而确保模糊推理过程的清晰性与准确性。

综合考虑控制精度、实时性能与工程实现便捷性，本文选用三角形隶属度函数构建模糊控制器。相较于其他函数类型（如梯形、高斯型），三角形函数具有结构简单、参数调整灵活、适配性强、易于规则提取等优点，尤其适合应用于燃料电池整车能量管理策略设计中。

模糊规则设定体现了燃料电池输出功率与动力电池 SOC 之间的反向调节关系：随着动力电池 SOC 的上升，燃料电池的输出功率逐渐降低；在 SOC 较低或整车需求功率显著增加的情况下，燃料电池的输出功

率逐步增强；当 SOC 处于高位区间时，为避免动力电池出现过充，模糊规则将燃料电池输出设定为零，整车能量完全由动力电池供给。该策略实现了燃料电池与动力电池的有效协同，使系统在动态工况下能够平衡功率需求与电池保护之间的关系。在保障整车能量供应连续性的同时，有效控制动力电池 SOC 在设定范围内波动，从而提升整车系统的稳定性与能源使用效率。

3　结果分析

本研究对比了基于确定规则和基于模糊逻辑的两种能量管理策略，分析了车辆动力响应、燃料电池系统效率、动力电池 SOC 波动及氢耗等关键性能。根据台架的负载能力限制，驱动电机的最大输出功率为 80kW，考虑到整车在实际运行中的制动能量回收特性，设定整车需求功率取值范围为–80~80 kW，动力电池 SOC 的取值范围为 0~1。燃料电池最大功率为 30kW，功率输出范围为 0~30 kW。

3.1　电机功率

为评估不同能量管理策略对整车驱动响应性能的影响，本文对比分析了 FLC 与确定规则控制下的电机功率输出特性。如图 4 所示，两种控制策略在输出能力方面表现相近，平均功率分别为 16.55 kW 与 16.56 kW，电机功率峰值均为 80.38 kW，差异不显著。然而，在动态响应特性方面，FLC 策略显示出更强的适应能力，其输出功率与标准输入的误差为 0.9%，低于确定规则控制的 1.5%，表明 FLC 在调节过程中具有更高的输入跟随特性，体现出对负载变化的快速响应能力。电机功率曲线也印证了这一特性：FLC 策略能够更敏锐地追踪驾驶指令变化，尤其在加速、制动等复杂工况下具有更好的实时性与平顺性；确定规则控制策略输出曲线变化较为平稳，存在一定响应滞后，但有助于系统整体运行的稳定性与能耗优化。

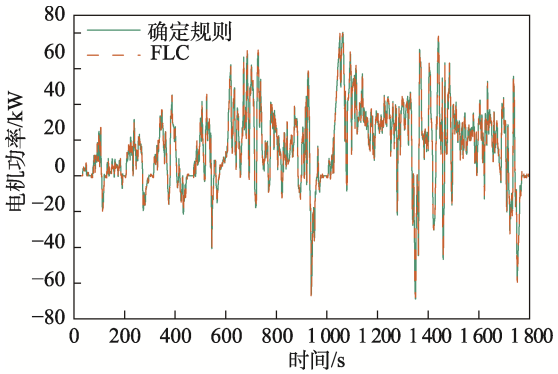


图 4　不同能量管理策略下电机功率输出对比

综上所述，FLC 策略在提升整车驱动动态响应与加速平顺性方面具有明显优势，更适合应用于城市交通等频繁变工况场景；确定规则控制策略则在稳态工况下具备良好的能量管理效率与系统稳定性。该实验结果验证了两种控制策略在响应敏捷性与系统稳定性之间的性能差异，为后续多场景下的控制策略切换与优化提供了数据支撑和理论依据。

3.2　燃料电池功率

为进一步评估能量管理策略对燃料电池运行行为的影响，本文对比分析了 FLC 与确定规则控制策略下的燃料电池输出功率特性。如图 5 所示，FLC 策略下燃料电池的最大输出功率为 24.22 kW，平均功率为 12.24 kW，标准差为 7.43 kW，显示出该策略以动力电池为主要供能单元，燃料电池处于辅助供能状态。FLC 策略功率输出波动较小、启停频率较高，有利于在频繁变工况下提升响应性与系统柔性。相比之下，确定规则控制策略下燃料电池输出功率达到最大值 30.00 kW，平均功率为 15.47 kW，标准差为 12.17 kW，表现出更强的持续供能能力。燃料电池功率曲线呈现明显的分段式特征，启停频率较低，有助于降低系统负载波动与氢耗，提高整车能效。从图 5 可以看出，确定规则控制策略在中低负荷、稳态工况下更具经济性与效率优势，适合需要稳定能量供应的应用场景；而 FLC 策略则在城市道路等频繁变速、启停的动态工况下更具适应性，能够有效提升整车驱动系统的响应速度与平顺性。

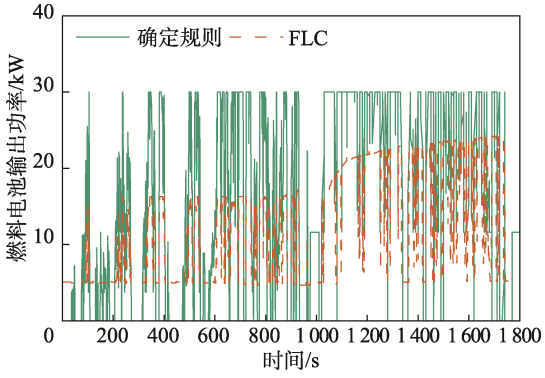


图 5　不同能量管理策略下燃料电池功率输出对比

3.3　荷电状态

为评估不同能量管理策略下动力电池的运行状态，本文对比分析了 FLC 与确定规则控制策略下的 SOC 变化趋势。如图 6 所示，FLC 策略下 SOC 为 57%~70%，标准差为 4.66%，表明该策略具备较强的动态调节能力，电池在运行过程中深度参与能量供给，通过实时充放电调节实现对燃料电池功率的辅助与补偿。相比之下，确定规则控制策略下 SOC 为 65%~70%，标准差为 1.54%，反映出该策略在电池管理上更为保守，主要依靠燃料电池供能，电池仅在必要时进行小幅充放电调节，有效提升了系统稳定性与电池寿命。

总体而言，FLC 策略适用于负载波动频繁、需快速响应的城市工况，而确定规则控制策略则更适合对系统经济性和可靠性要求更高的商用运行场景。

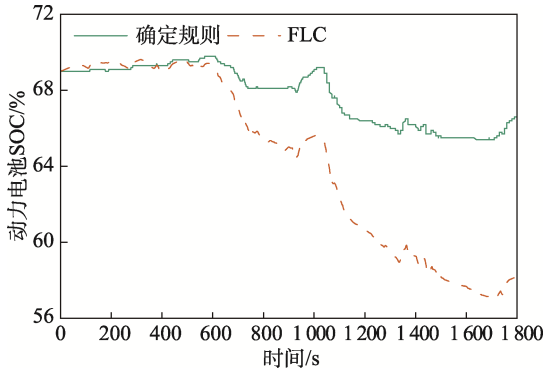


图 6　不同能量管理策略下动力电池 SOC 对比

3.4　氢耗

为进一步量化对比不同能量管理策略下的燃料电池系统性能，本研究对比了 FLC 与确定规则控制策略在同一循环工况下的实际氢耗与等效氢耗数据。如图 7 所示，FLC 策略下燃料电池的实际氢耗为 441.41 g，而其等效氢耗达到 726.40 g，相差 284.99 g，等效氢耗与实际氢耗的比值高达 1.65，表明该策略在车辆运行过程中较多依赖动力电池放电供能，系统能量路径复杂，效率损耗较大。确定规则控制策略的实际氢耗为 568.13 g，等效氢耗为 628.84 g，两者差值仅为 60.72 g，比值为 1.11，说明该策略能量供给主要由燃料电池完成，能量转换路径短、系统运行稳定，具有更优的氢耗经济性。综合来看，FLC 策略适用于动力需求变化剧烈、响应速度要求高的城市工况，而确定规则控制策略更适合于对能量效率与续航能力要求高的中远程运营场景。

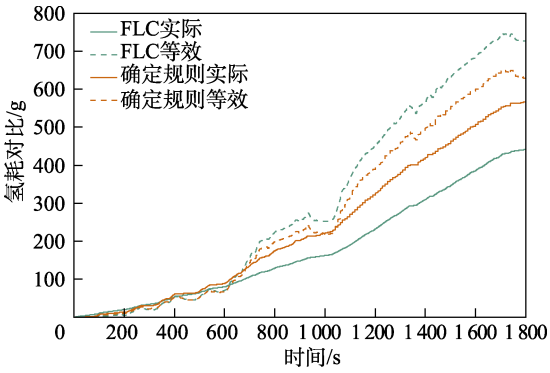


图 7　不同能量管理策略下氢耗对比

4　结语

本文围绕燃料电池商用车复杂工况背景下的能量管理问题，基于整车纵向动力学模型与多源系统耦合特性，设计并对比了 FLC 与确定规则控制两种能量管理策略，并在实验环境下进行了验证与评估。FLC 策略更适用于复杂、变化快速的城市工况；确定规则控制策略更适合运行工况较稳定、能量效率要求较高的商用场景。未来工作可结合数据驱动与自适应优化方法，进一步提升策略在不同工况下的适应性和能量管理协同能力。

参考文献 (References)

[1] ABBASIAN HAMEDANI E, ALENABI S A, TALEBI S. Hydrogen as an energy source: A review of production technologies and challenges of fuel cell vehicles[J]. Energy Reports, 2024, 12: 3778–3794.

[2] KUMAR V B, COLLIN A, SANKAR M G, et al. Fuel cell technologies in the automotive sector: A focus on proton exchange membrane and Alkaline fuel cells[J]. Green Technologies and Sustainability, 2025, 3(3): 100218.

[3] BAI F L, ZHAO F Q, LIU M, et al. Assessing the viability of renewable hydrogen, ammonia, and methanol in decarbonizing heavy-duty trucks[J]. Applied Energy, 2025, 383: 125293.

[4] PEIRETTI PARADISI B, PULVIRENTI L, VINOGRADOV A, et al. A techno-economic life cycle assessment of H2 fuelled and electrified urban buses[J]. Applied Energy, 2025, 401: 126738.

[5] 雷钢, 卢海峰, 张财志, 等. 高温质子交换膜燃料电池动态性能测试教学实验设计[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(4): 209–214.
LEI G, LU H F, ZHANG C Z, et al. Teaching experiment design for dynamic performance testing of high-temperature proton exchange membrane fuel cells[J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(4): 209–214. (in Chinese)

[6] VALLEJO-CERVANTES C, ESPINOZA-ANDALUZ M, IRANZO A. Technical review of commercial LT-PEMFC technologies: Performance, applications and challenges[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 176: 151480.

[7] LEE J, PARK J H, CHOI D, et al. Ligand engineering at the precursor stage unlocks exceptional durability in PtCo@PtAu catalysts for heavy-duty PEMFCs[J]. Applied Catalysis B: Environment and Energy, 2026, 381: 125887.

[8] 王亚雄, 余庆港, 王薛超, 等. 考虑性能衰退的燃料电池汽车自适应优化能量管理策略[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(1): 190–204.
WANG Y X, YU Q G, WANG X C, et al. Adaptive optimal energy management strategy of fuel cell vehicle by considering fuel cell performance degradation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 190–204. (in Chinese)

[9] ZHOU J X, PENG J K, YU S C, et al. Toward ecological decision-making on highways: A multi objective eco-driving framework for connected FCHEVs via offline-to-online reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2026, 12(1): 440–452.

[10] LI Q, TAN H L, WANG T H, et al. Hierarchical and domain-partitioned coordinated control method for large-scale fuel cell/battery cluster hybrid power electric multiple units[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2026, 12(1): 78–89.

[11] WANG Y L, WANG Y F. Fuzzy Q-learning-based energy management for fuel cell mobile robot considering multi-scenario parameter[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 169: 150786.

[12] 纪常伟, 李响, 梁晨, 等. 基于 LMS AMESim 的车用燃料电池–锂离子动力电池混合动力系统能量管理仿真[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(1): 58–67.
JI C W, LI X, LIANG C, et al. Simulation of energy management for hybrid power system of vehicle fuel cell and lithium ion power battery based on LMS AMESim[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(1): 58–67. (in Chinese)

[13] 武小花, 余忠伟, 朱张玲, 等. 燃料电池公交车模糊能量管理策略[J]. 吉林大学学报（工学版）, 2022, 52(9): 2077–2084.
WU X H, YU Z W, ZHU Z L, et al. Fuzzy energy management strategy of fuel cell buses[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(9): 2077–2084. (in Chinese)

[14] GHORASHI KHALIL ABADI S A, HABIBI S I, KHALILI T, et al. A model predictive control strategy for performance improvement of hybrid energy storage systems in DC microgrids[J]. IEEE Access, 2022, 10: 25400–25421.

[15] PARDHASARADHI B, SHILAJA C. A deep reinforced Markov action learning based hybridized energy management strategy for electric vehicle application[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 74: 109373.

[16] 孙闫. 燃料电池商用车动力系统参数匹配与能量管理策略的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
SUN Y. Research on parameter matching and energy management strategy of fuel cell commercial vehicle power system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023. (in Chinese)

[17] 顾诚. 电-电混合燃料电池汽车能量管理策略研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
GU C. Research on energy management strategies of a fuel cell hybrid electric vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021. (in Chinese)

Design and experimental study of energy management strategies for fuel cell vehicles

SUN Ke, SUN Wen, BAI Shuzhan

(School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: [Objective] For achieving the global “Dual Carbon” goals, the transportation sector urgently needs cleaner and more efficient powertrains. The proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) technology, featuring zero tailpipe emissions, high energy density, and extended range, has become a key means for decarbonizing commercial vehicles. However, the slow dynamic response of PEMFC systems makes it difficult for a stand-alone fuel cell to withstand frequent start-stop cycles and rapid load fluctuations. Therefore, fuel cell–battery hybrid architectures are widely adopted, placing higher requirements on energy-management strategies (EMSs) to efficiently coordinate multiple energy sources. This study addresses the EMS design problem for fuel cell commercial vehicles and experimentally compares two representative strategies from an engineering perspective to provide a basis for system optimization. [Methods] A hardware-in-the-loop bench platform for a fuel cell-battery hybrid electric vehicle was established. The platform integrated a PEMFC system, a lithium iron phosphate battery pack, and a drive motor. Further, a dynamic load simulation system was used to reproduce real-world driving resistances. A self-developed LabVIEW-based software platform, combined with controller area network bus communication, enabled real-time driving-cycle replay, data acquisition, and EMS verification. Using this platform, two EMSs were implemented: a deterministic rule-based strategy and a fuzzy logic control (FLC)-based strategy. The rule-based strategy adopted a master-slave architecture, in which the fuel cell served as the main power source, and power was allocated according to total vehicle demand and battery state-of-charge (SOC) thresholds. The FLC-based strategy used vehicle power demand and the SOC as inputs and outputted the fuel cell power, adjusting power distribution based on predefined fuzzy rules. [Results] Bench tests under the same driving cycle revealed distinct characteristics of the two strategies. Both strategies achieved similar peak and average motor power; however, the FLC-based strategy exhibited slightly larger power fluctuations and faster tracking of load changes, indicating better dynamic adaptability and smoother acceleration and deceleration behavior. In the FLC-based strategy, the fuel cell operated at a lower average power with more frequent start–stop cycles and the battery contributed more to power regulation. In contrast, in the rule-based strategy, the fuel cell output was more continuous and often close to its rated power. Further, the battery SOC was maintained within a narrow band, benefiting battery life. Hydrogen consumption analysis showed that although the FLC reduced instantaneous fuel cell usage, its higher reliance on battery charge-discharge cycling led to higher equivalent hydrogen consumption. In contrast, the rule-based strategy offered shorter energy paths and better overall fuel economy. Quantitatively, the rule-based strategy achieved an actual and equivalent hydrogen consumption of 568.13 and 628.84 g, respectively. Meanwhile, the FLC-based strategy achieved 441.41 and 726.40 g, respectively. [Conclusions] The two EMSs present complementary advantages. The FLC-based strategy is more suitable for urban scenarios with frequent start–stop cycles and rapidly varying loads, where dynamic response and driving smoothness are prioritized. Conversely, the deterministic rule-based strategy is more appropriate for stable operating conditions that prioritize driving range and hydrogen economy, owing to its efficient and stable power-supply characteristics. Future work will focus on adaptive or hybrid EMS frameworks that combine rule-based logic with data-driven or intelligent optimization methods to enhance multiscenario applicability and overall energy-management performance of fuel cell-battery hybrid commercial vehicles.

Key words: fuel cell; hybrid power system; energy management strategy

（编辑：孙浩）