



混合动力机车燃料电池启停 与变载协同优化策略

王永斌¹, 范浩然², 关达¹, 付君¹, 李俊祥¹, 李腾²

(1. 国能新朔铁路有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300;

2. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 氢能机车凭借零排放与长续航能力的优势成为轨道交通绿色转型的重要技术方向, 然而其核心动力源(燃料电池)仍面临成本高与耐久性不足等瓶颈, 尤其是启停与变载工况所导致的性能快速衰减严重影响了其全生命周期经济性。为解决该问题, 文章面向电氢混合动力机车, 构建了燃料电池-蓄电池联合供能系统模型。基于燃料电池动态响应特性, 提出了旨在抑制启停损耗的控制策略, 并结合电压退化模型实现了寿命预测与等效氢耗的量化评估。在运行控制层面, 设计了储能系统的两阶段平滑切换策略: 在启停阶段采用恒电流控制, 令储能单元优先响应负荷突变; 在变载阶段采用下垂控制, 使其应对快速功率需求, 从而保障燃料电池功率平滑过渡, 并维持直流母线电压稳定。仿真结果表明, 该综合策略在机车典型工况下能有效降低系统氢耗(单次启停工况下的氢耗降低42%, 变载工况下的氢耗降低5.6%), 为电氢混合机车的工程应用提供了具有实践价值的解决方案。

关键词: 电氢混合动力机车; 氢燃料电池; 启停工况; 变载工况; 控制策略

中图分类号: TM911.42; U260.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)06-0148-09

0 引言

我国能源消费总量位居世界第一, 亟须解决能源安全和减少碳排放等问题。氢能是一种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源, 氢能源机车可依靠自身携带的氢气燃料发电以维持运行, 满足机车牵引的动力需求。其中, 质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)具有高功率密度、高能量转换效率、零排放等优点, 被视为未来交通运输领域具有广阔应用前景的动力源之一^[1-3]。

PEMFC的稳定性和耐久性一直是制约其大规模商业化应用的主要因素。目前, 国内外企业和研究机构结合实际道路工况条件, 通过高耐久材料开发、电堆结构优化设计、系统运行策略改进来提高燃料电池汽车的耐久性^[4]。质子交换膜、催化剂、碳纸等关键材料

的性能衰减以及工作环境的复杂性都会影响燃料电池的寿命^[5-6]。合成碳纳米管^[7]、碳纳米纤维^[8]等新型材料有更稳定的电化学反应, 可以作为催化剂载体, 但它们的成本较高, 且耐久性较差。因此, 在新材料研究及制备有限的情况下, 开发燃料电池系统的控制策略非常重要。

有研究指出, 根据车辆行驶条件可将燃料电池系统运行过程分为4个工况: 动态循环、启停、开路/怠速以及高功率负载^[9]。研究发现, 系统在实际运行过程中, 导致燃料电池使用寿命缩短的因素中, 启停工况约占33%, 变载工况约占55.5%^[10]。为防止阳极侧形成氢-空界面, 并避免阴极侧在启停阶段出现高电位, 早期的燃料电池系统通常采用氮气吹扫阳极策略。之后的研究提出了改进方案, 在启停过程中通过将阳极氢吹扫与辅助负载接入相结合形成了联合控制策略。该策略在吹扫的同时施加外部辅助负载, 可有效清除膜

基金项目: 国能集团新朔铁路“网-源-储-车”协同供能技术应用研究项目(GJNY-21-189, GNXS-2021-07)

通信作者: 李腾, 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事储能系统在供电系统中的应用及控制方面的研究; E-mail: liteng@bjtu.edu.cn

引用格式: 王永斌, 范浩然, 关达, 等. 混合动力机车燃料电池启停与变载协同优化策略[J]. 机车电传动, 2025(6): 148-156. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.017.

Citation: WANG Yongbin, FAN Haoran, GUAN Da, et al. Collaborative optimization strategy for fuel cells in hybrid locomotives under start-stop and variable-load conditions[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 148-156. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.017.

电极（燃料电池的核心部件，由质子交换膜和两侧的催化层、气体扩散层组成）中残留的反应气体，从而抑制相关老化现象，延长燃料电池的使用寿命^[11-12]。

变载是燃料电池常见的动态工况，其动态特性的优劣影响着电池输出性能^[13-14]。已有研究通过建立 PEMFC 动态模型分析了负载突变情况下输出电压的动态特性，该经验模型的仿真结果和试验数据具有较高的吻合度^[15]。文献[16]通过研究明确了 PEMFC 在多时间尺度下的动态特性及影响因素，并据此推出了多时间尺度模型。其中，负载变化时，因双层电荷作用，电压曲线呈轻微弧形变化（下冲）。对 PEMFC 电堆在动态工况下的输出特性进行试验研究，最新的研究结果表明，在动态过程中，电流上升时的电压最大下冲值较电流下降时大^[17]。

基于以上研究分析，针对机车运行工况复杂多变，燃料电池系统耐久性差的问题，本文聚焦于机车实际运行场景，开展燃料电池启停与变载过程的协同优化研究。首先建立氢燃料电池-蓄电池联合供能系统模型；其次采用基于气体吹扫的启停优化策略，进行寿命预测并构建启停等效氢耗模型；然后设计针对储能系统的下垂-恒电流平滑切换策略，实现启动到变载的切换以及变载过程的平滑控制；最后通过仿真验证策略对启停与变载过程氢耗的改善效果。

1 系统建模

本文所研究的电氢混合动力机车应用了燃料电池+蓄电池的结构，系统能量主要通过燃料电池供应，但是氢燃料电池具有“软起、软停”的特性，动态响应慢，加载减载都需要一定的时间，因此系统通过蓄电池辅助供能。

1.1 系统拓扑

本文采用全主动式混合能源拓扑结构，其示意图如图1所示。相较于传统的半主动式拓扑，该拓扑不仅能协调燃料电池和锂电池之间的功率分配，还能控制直流母线电压，进而提升系统的稳定性和能效。系统直流侧能量经由 DC/AC 变换器传输给机车电机；燃料电池输出功率通过单向 DC/DC 变换器控制；锂电池经双向 DC/DC 与直流母线相连而保持其保持母线电压稳定。当氢燃料电池的输出功率需求发生变化而其无法即时响应时，短时的能量缺口由锂电池补充；同时，多余的能量可通过双向 DC/DC 给锂电池充电。

1.2 氢燃料电池等效模型

本文所述氢燃料电池系统采用由 200 个质子交换膜电池单体串联而成的 50 kW 等级的 PEMFC 电堆作为基本功率单元，实际机车系统可采用“2 串 3 并”的模块

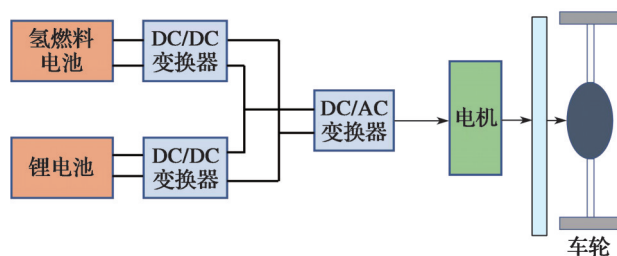


图1 全主动式拓扑结构

Fig. 1 Fully active topology

化组合，总功率达 300 kW，满足典型混合动力机车牵引需求。这种模块化设计方法有利于热管理均衡、故障隔离与维护更换，提升系统整体可靠性。氢燃料电池发电过程如图2所示。图2中氢燃料电池本质上是一个“化学能→电能”的转换装置，其中，氢气（H₂）和氧气（O₂）通过化学反应生成水（H₂O），并在此过程中直接产生电能。为方便研究，本文通过搭建动态模型来描述燃料电池特性，模型如图3所示，模型包含了空气压缩机、散热器、阴阳极输入控制阀、加湿器与 PEMFC 电堆模型。燃料电池的输出特性如图4和图5所示。本系统中燃料电池输出电压通过单向 DC/DC 变换器升压至直流母线电压（设计为 750 V），确保系统功率的传输效率。图4所示的 *U-I* 曲线为单个电堆侧特性，由图4中的低功率区段可看出，单个电堆侧特性近似于电压源+电阻。实际系统中燃料电池端电压约为 500 V，DC/DC 变换器工作于高效区间（效率高于 95%），不会因升压比过高导致系统效率显著下降。

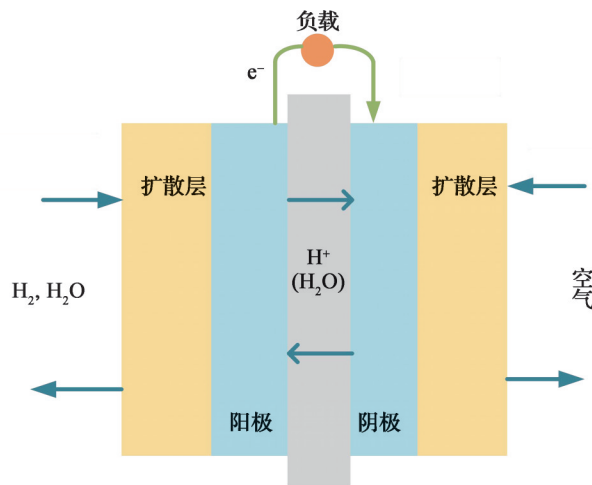


图2 氢燃料电池发电过程

Fig. 2 Power generation process of hydrogen fuel cell

氢燃料电池工作时的氢耗量与输出电流的关系如式(1)所示。氢燃料电池的效率与氢耗量的关系如式(2)所示。

$$m_c = \frac{N \cdot M_{H_2}}{n \cdot F} i_o \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_o}{m_c \cdot L_{HV}} \quad (2)$$

式中： m_c 为氢耗量，g； N 为燃料电池的数量； M_{H_2} 为

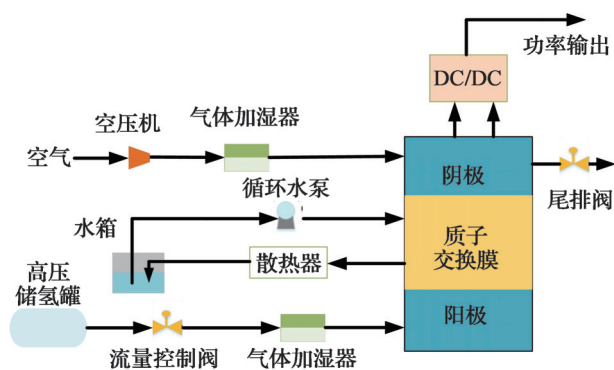
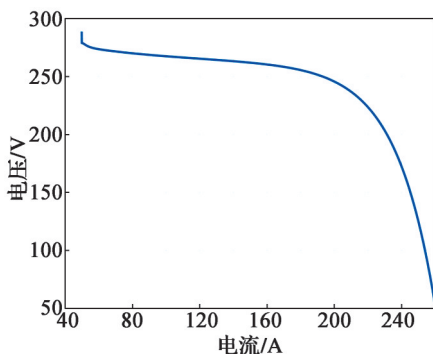
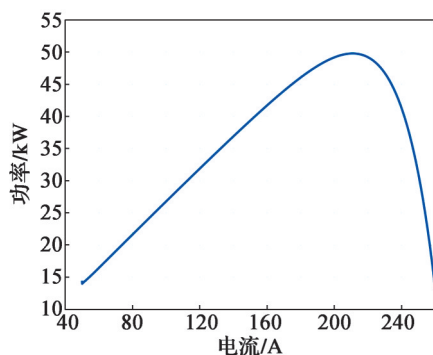


图3 燃料电池系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of fuel cell system

图4 燃料电池电堆 $U-I$ 特性曲线Fig. 4 $I-U$ characteristic curve of fuel cell stack图5 燃料电池电堆 $P-I$ 特性曲线Fig. 5 $I-P$ characteristic curve of fuel cell stack

氢气的摩尔质量, g/mol ; n 为反应时转移的电子数量, mol^{-1} ; F 为法拉第常数, C/mol ; i_0 为氢燃料电池输出电流, A ; P_0 为氢燃料电池输出功率, W ; L_{HV} 为氢气的低热值, kJ/g 。

燃料电池电堆的效率和输出功率关系如图6所示。由图6可知, 为保证能量利用率最大化, 需要将输出功率维持在一定范围内。 P_{limit} 为燃料电池的功率下界, 功率下界也称最小可持续功率或怠速功率, 是燃料电池电堆为维持自身稳定、健康运行而必须输出的最低功率值。在车辆怠速、不输出驱动功率的情况下, 燃料电池需要通过功率下限维持辅助系统运行。运行于低于功率下限的燃料电池容易产生大幅的效率下降和寿命衰减。 P_{effmax} 为燃料电池的最大效率功率点, 是燃料电池在特定工况下（温度、压力、湿度已优化）, 其输

出功率与氢气消耗功率之比（即电化学转换效率）达到最高的工作点。在最大效率点工作, 每公斤氢气可以转化为最多的电能, 可直接提升车辆的燃料经济性, 降低运行成本, 并延长单次加氢的续航里程。

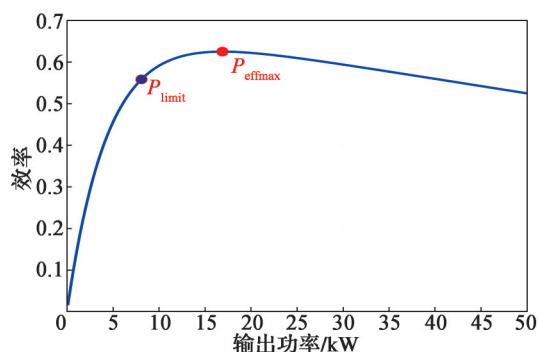


图6 燃料电池电堆效率-功率曲线图

Fig. 6 Efficiency-power curve of fuel cell stack

1.3 锂电池等效模型

本文采用的锂电池系统由100节磷酸铁锂动力电池串联构成, 其开路电压为360 V, 容量为150 Ah（放电速度为2C, 放电功率约为128 kW）, 可以提供因PEMFC的功率爬升率有限而产生的功率缺额。该系统在电氢混合动力架构中承担着功率补偿和工况优化的核心功能, 其既能弥补氢燃料电池的功率缺口, 又能处理瞬态及低功率负荷, 从而使氢燃料电池避开低效率工作区间, 持续运行在最佳效率点附近。本文仿真所采用的高精度一阶R-C等效模型如图7所示。图7中, U_{oc} 为理想电压源, 与电池荷电状态（State of charge, SOC）存在非线性关系; R_0 为欧姆内阻, R_1 为极化电阻, C_1 为极化电容, U_t 为电池端电压。锂电池电压与SOC值的关系如图8所示, 通过能量管理系统调控锂电池充放电行为, 将SOC维持在电压稳定区间, 从而协同燃料电池共同支撑直流母线电压, 保障整个动力系统的稳定运行。

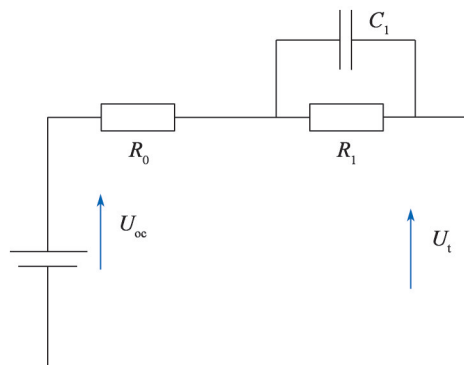


图7 锂电池一阶等效模型

Fig. 7 First-order equivalent model of lithium battery

2 启停优化策略

质子交换膜燃料电池（proton exchange membrane

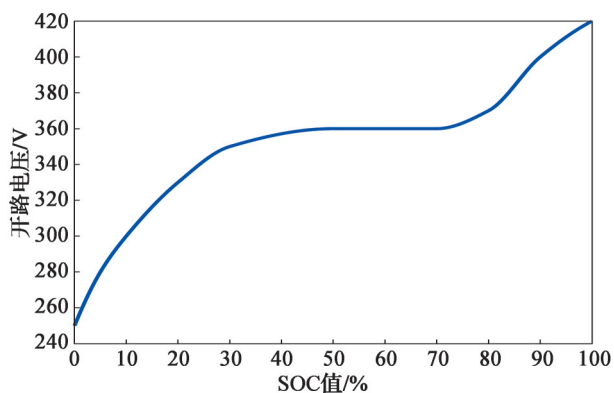


图8 锂电池电压-SOC值变化曲线

Fig. 8 Voltage-SOC variation curve of lithium battery

fuel cell, PEMFC) 在启停过程中的操作条件对其性能与寿命有重要影响。本文优化启停阶段的气体管理策略, 采用改进的启停控制方法, 并通过加速应力测试评估其效果。本文提出基于电压衰减的等效氢耗模型, 将燃料电池在启停过程中因性能衰退所导致的额外氢耗量化为经济成本, 为系统全生命周期成本分析提供可量化的评估依据。

2.1 启停过程中的损耗分析

如果启动前阳极侧局部区域与整个阴极侧均存在氧气, 那么启动时氢气会在阳极形成局部的氢气-氧气界面。该界面的存在将导致对应阴极区域产生异常高的电势。理论计算表明, 此阴极电势可急剧升高至 1.44 V。在此高电位下, 阴极侧的催化剂载体碳材料会发生剧烈的氧化反应, 造成催化剂颗粒脱落, 从而导致 PEMFC 性能发生不可逆的衰减。同理, 在燃料电池停机后, 氧气从外界或阴极侧渗透至阳极, 同样会形成氢气-氧气界面, 并引发碳载体的腐蚀问题, 对电池寿命构成持续威胁。

2.2 启停优化策略

基于上述分析, 本文采用基于气体扫吹的启停优化策略。在启动过程中, 系统首先向阳极流道注入高纯氮气进行吹扫, 形成惰性环境彻底清除残留氢气, 避免传统空气吹扫可能引发的催化剂氧化。随后, 在维持氮气环境的基础上切入阳极氢气和阴极空气, 利用氮气的缓冲作用防止氢氧直接接触。切入时, 控制系统逐步提升氢气浓度至额定值, 并精确调节氢空流量比, 直至化学计量平衡, 从而平稳建立电池电压, 有效避免启动阶段因局部氢空比失衡而引起的催化剂氧化或膜电极损伤。在 PEMFC 关机过程中, 性能衰减主要源于阳极侧残留的氢气, 因此首先切断氢气供应, 并维持阴极空气流量, 利用电化学反应主动消耗阳极腔体内的残余氢气, 防止阴极出现高电位而腐蚀碳载体。待氢气浓度传感器确认消耗完毕后, 系统自动切换至氮气吹扫模式, 同时吹扫阴阳两极。此举既能排

出系统内残余水汽防止冰堵, 又能为膜电极建立一个无氢无氧的惰性保存环境。该方法可显著减少停机后氢气的残留量, 降低反向电流和碳载体腐蚀的风险。

高纯氮气吹扫所需的车载氮气瓶 (气压 35 MPa, 容量 50 L) 采用高压碳纤维复合材料, 单次启停的氮气消耗量约 5 L (标况), 一瓶氮气可支持约 10 次启停。系统配备减压阀、精密流量计、安全阀及泄漏传感器, 确保供气稳定与运行安全。增加氮气系统虽增加约 15 kg 设备重量及一定维护成本, 但可提升燃料电池寿命 (预期寿命延长 60% 以上), 因此具有显著的经济性。

为验证策略的有效性, 对 PEMFC 进行了加速应力测试仿真, 通过在仿真中施加高应力条件 (如采用由正弦信号与特定阈值比较生成的周期信号模拟间歇运行模式, 并通过设定 6 000 s 的仿真步长模拟长期运行) 来加速老化过程, 从而预测其长期性能退化趋势; 随后, 从 MATLAB 的 Results 结构体中提取效率、输出功率和输出电压的时域数据, 并通过循环遍历筛选出处于稳定工作状态的数据点 (筛选条件为效率值大于 0.1, 且在该点之后 10 000 个采样点内的效率变化幅度小于 0.01), 分别绘制效率、输出功率和输出电压的衰减曲线, 直观展示性能退化趋势, 模拟实际启停工况。在 100 次启停循环之后, 对电池的电压、功率及效率等关键性能参数进行监测。关键参数衰减曲线如图 9~图 11 所示 (输出电压、功率都为标么值)。由图 9~图 11 可知, 采用改进启停策略的电池, 其性能衰减幅度显著降低。100 次恶劣工况循环后, 对照国际参考基准值, 电压衰减通常大于 5%, 甚至可达 10%~30%, 功率与效率衰减通常与电压衰减同步或更高。本文优化后的电压、功率及效率衰减率均小于 4%, 优于常规基准。

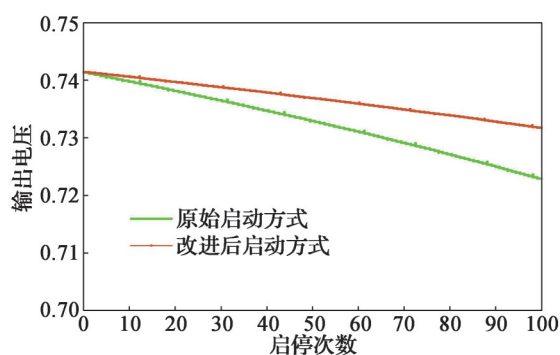


图9 燃料电池输出电压衰减曲线

Fig. 9 Output voltage attenuation curve of fuel cell

2.3 寿命预测

基于通过加速应力测试获取的启停循环数据, 本研究采用神经网络方法对 PEMFC 的剩余使用寿命进行预测。在众多性能指标中, 电流密度可以通过改变外部负载进行调整, 而效率的计算依赖于电压和电流的乘积。相比之下, 在恒定操作条件 (如恒电流模式) 下测量的电压, 能够最直接、最无歧义地反映电池的

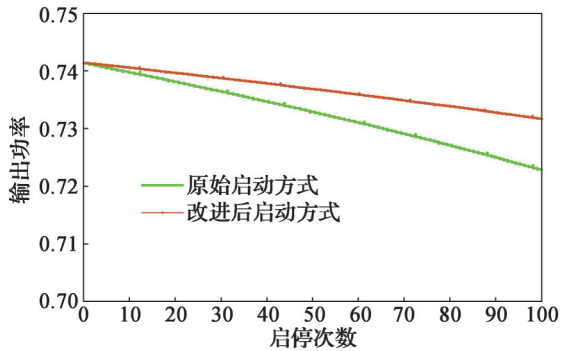


图 10 燃料电池输出功率衰减曲线

Fig. 10 Output power attenuation curve of fuel cell

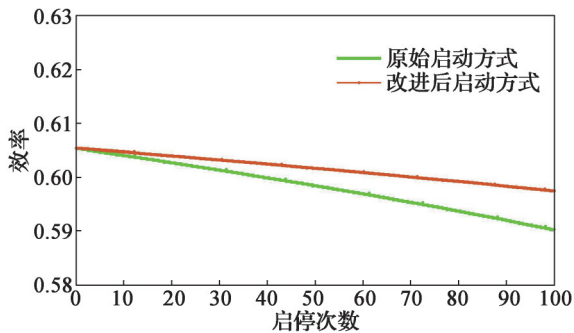


图 11 燃料电池效率衰减曲线

Fig. 11 Efficiency attenuation curve of fuel cell

本征健康状态, 电压的衰减可直接反映电池性能的衰减。单电池电压作为一个灵敏、可靠、易于测量的参数, 是表征 PEMFC 寿命衰减和预测剩余使用寿命的最优指标之一。本研究利用加速应力测试中记录的高精度电压时序数据, 构建和训练神经网络模型, 得到的寿命预测曲线如图 12 所示 (输出电压为标么值)。由图 12 可知, 改进启停方式后电池的使用寿命明显延长。

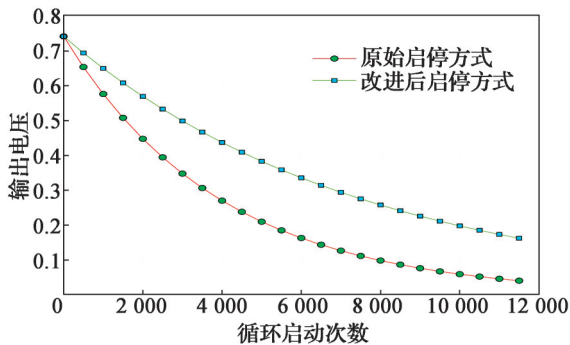


图 12 燃料电池寿命预测曲线

Fig. 12 Life prediction curve of fuel cell

2.4 基于寿命衰减的启停过程等效氢耗模型

本文以丰田 (Toyota) 第二代 Mirai 的固态聚合物燃料电池电堆作为分析对象, 该电堆百公里氢耗参数 C_{H_2} 约为 0.66 kg/(100 km), 单次启停平均行驶里程 D_{trip} 为 50 km。基于前文提到的加速应力测试和神经网络预测得出, 燃料电池的总寿命 (燃料电池最大启停次数为 N_{cycle}) 从原有策略下的 5 800 次提升至优化策略下的 9 501~

10 051 次。

单次启停等效氢耗 ΔH_{cycle} 的综合数学模型为

$$\Delta H_{cycle} = \frac{D_{trip} \times C_{H_2, base} \times \delta}{200} \quad (3)$$

式中: $C_{H_2, base}$ 为电堆百公里氢耗基准值; δ 为寿命性能衰减率。

燃料电池在启停发生后, 其性能 (电压) 会出现衰减。为了输出相同的功率, 系统需要消耗更多的氢气, 这意味着在相同功率下需要通过增加电流密度来补偿电压损失。燃料电池的总寿命预测以衰减到 20% 为指标, 经计算得出原始平均氢耗为 0.071 12 kg/次, 优化后平均单次启停的氢耗量为 0.041 25 kg/次。该数据是基于典型城市轨道交通运行工况 (日启停次数为 2 次, 负载率为 60%~90%) 统计得出的, 具备工程代表性。

3 平滑变载的控制策略

机车运行中更为频繁的变载工况所引发的累积性衰减同样是影响燃料电池寿命与经济性的关键因素。考虑对机车全生命周期进行优化, 本文进一步对燃料电池的变载过程进行管理。

3.1 阶梯式变载的燃料电池特性

在实际应用中, 燃料电池系统常遭遇单次阶跃式电流负载突变, 该突变会导致电压尖峰振荡、热应力叠加, 显著恶化电堆水热平衡状态并缩短系统寿命。为缓解这种单次大阶跃的冲击, 一种直观的思路是将其分解为多个小步幅、按顺序增加的阶跃, 如图 13~图 15 所示。每一个小的电流阶跃都会引发一次独立的电压下跌与恢复。虽然单次下跌的峰值比一次性大变载的峰值要小, 但电压会经历多次连续的“下跌-恢复”循环振荡。

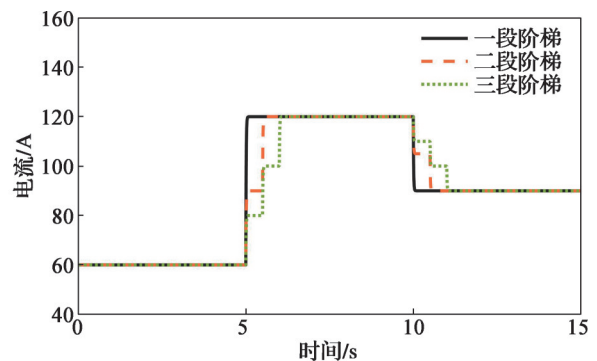


图 13 阶梯式变载下氢燃料电池电堆的电流变化

Fig. 13 Current variation of hydrogen fuel cell stack under stepwise variable load condition

3.2 控制策略

3.2.1 启动-变载切换策略

本文针对锂电池采用下垂-恒电流平滑切换策略进

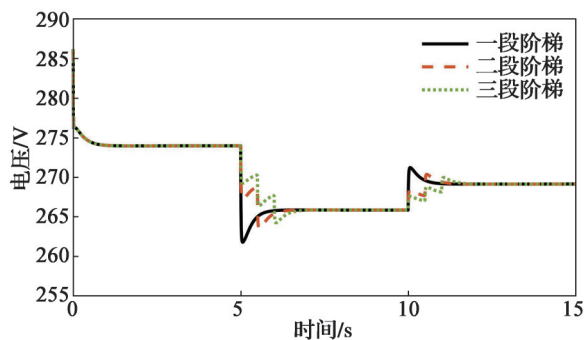


图 14 阶梯式变载下氢燃料电池电堆的电压变化

Fig. 14 Voltage variation of hydrogen fuel cell stack under stepwise load variable load condition

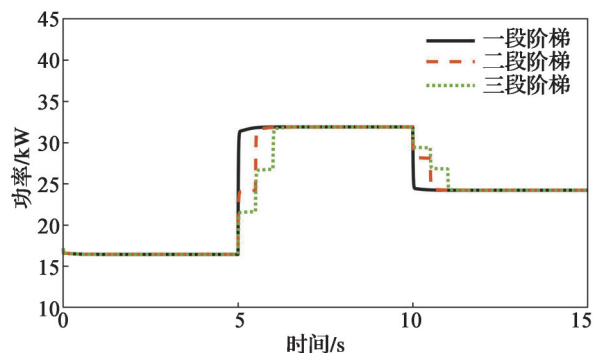


图 15 阶梯式变载下氢燃料电池电堆的功率变化

Fig. 15 Power variation of hydrogen fuel cell stack under stepwise variable load condition

行控制，控制输出特性如图16所示。储能系统在启动初期采用恒电流模式，其核心目的是在母线电压低于氢燃料电池启动电压 U_0 时，为系统提供稳定、可控的初始功率支撑。当氢燃料电池完成启动并逐步承担主要负荷功率后，储能系统切换至下垂模式。下垂控制的核心是通过下垂特性，实现功率的自主分配和电压的稳定支撑；同时，为了保证锂电池能提供所需功率，SOC控制在[30%,80%]范围内。在机车变载运行工况下，燃料电池与锂电池混合动力系统均采用构网型控制，稳定支撑直流母线电压。

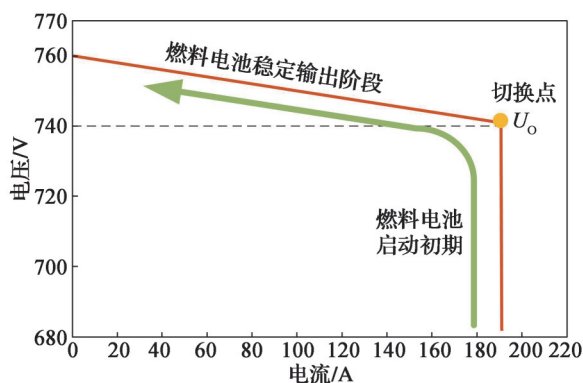


图 16 锂电池输出特性曲线

Fig. 16 Output characteristic curve of lithium battery

图16展示了锂电池在系统启动与变载过程中的多模式输出特性，为实现燃料电池“软启动”与功率平

滑过渡，锂电池的控制逻辑分为两个阶段。在恒流启动阶段，燃料电池输出功率 P 小于其功率下限 P_{limit} ，低功率运行时的输出特性近似恒压源+电阻($U-R$)，此时，能量管理系统(EMS)可控制燃料电池作为稳压源，同时锂电池工作于恒电流输出模式(EMS控制电流 I_{batt_set} 变化，以 I_{batt_set} 向直流母线供电)。在下垂稳压阶段，当母线电压达到 U_0 ，锂电池由恒电流输出平滑过渡至下垂控制，在维持母线电压稳定的前提下，燃料电池切换为恒功率模式(EMS设定参考功率缓慢变化)。燃料电池进入稳定发电状态后，其输出功率承担当前需求的主要部分；此时，锂电池的输出电压-电流特性曲线为呈负斜率的下垂曲线，主要发挥功率缓冲与电压支撑的作用。下垂曲线根据锂电池的实时SOC动态调整，SOC较高时，设置较小的下垂系数，使锂电池更积极地参与功率支撑；SOC较低时，适当增大下垂系数以保护电池。

3.2.2 平滑变载策略

在燃料电池与锂电池协同响应负载功率变化的架构下，本文提出通过平滑锂电池输出功率变化的方式，实现对氢燃料电池的平滑变载。在负载变化过程中，混合动力系统采用构网型控制策略，使输出电压基本维持恒定。基于功率平衡原理，氢燃料电池、锂电池的输出及负载电流的变化可直接线性地反映为其功率变化，具体关系如图17所示。

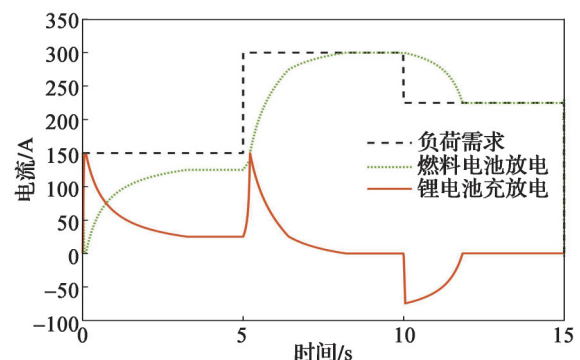


图 17 平滑变载的负载电流分配曲线

Fig. 17 Load current distribution curve under smooth variable load condition

3.2.3 仿真

平滑变载与阶梯式变载时燃料电池单个电堆输出的电流、电压、功率对比情况如图18~图20所示。在平滑变载下，电压会呈现出一条平滑下降再平滑恢复的曲线，完全避免了剧烈的电压尖峰和多次振荡。这为电堆内部的水、热、气、电化学反应提供了充足的响应时间，使其能够平稳、协同地过渡到新的稳态，极大地减少了材料所承受的机械和化学应力。由于电压变化平滑，系统避免了多次跌落“低谷”阶段，能更快地进入并维持在较高电压的高效工作区，平均运行电压更高，使得整个变载过程中的能量转换效率显

著提升。平滑变载时的氢耗从 13.58 mg 减少到 12.82 mg, 减少了 5.6%, 具体对比情况如图 21 所示。

4 结束语

综上所述, 本研究通过等效氢耗模型量化启停与变载过程中的性能衰减成本。其中, 单次启停的氢耗(优化后为 0.041 25 kg/次)是指因启停引起的催化剂衰减导致的额外氢气消耗; 变载氢耗是指在负载变化过程中因电压波动与效率下降导致的氢气消耗增加。二者分别针对瞬时冲击与连续动态过程, 协同优化后可实现系统氢耗整体降低(启停工况降低 42%, 变载工况降低 5.6%)。该数据基于典型城市轨道交通运行工况统计得出, 具备工程代表性, 可以从整体上提升电氢混合动力机车的经济性与耐久性, 为混合动力机车在轨道交通中的工程应用提供可行技术路径。但本研究尚未考虑实时温度变化对 PEMFC 动态响应的影响, 未来工作将进一步探索基于氢燃料电池实时健康状态的自适应能量管理策略; 同时本研究目前仍未进行现场试验, 未来工作将围绕装车试验验证开展。

参考文献:

- [1] 樊运新, 龙源, 江大发, 等. 新能源混合动力机车发展现状及关键技术综述[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46(1): 1-11.
FAN Yunxin, LONG Yuan, JIANG Dafa, et al. Overview of development status and key technologies of new energy hybrid electric locomotive[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2023, 46(1): 1-11.
- [2] 李军, 刘建华, 汤丽娟. 氢能在轨道交通领域的应用前景研究[J]. 轨道交通装备与技术, 2023(1): 25-27.
LI Jun, LIU Jianhua, TANG Lijuan. Research on the application prospect of hydrogen energy in rail transit field[J]. Rail transportation equipment and technology, 2023(1): 25-27.
- [3] 谢嘉欣, 郭婉露, 秦庆民. 氢燃料混合动力机车能量管理策略[J]. 内燃机与配件, 2024(10): 122-124.
XIE Jiabin, GUO Wanlu, QIN Qingmin. Energy management strategy for hydrogen fuel hybrid electric locomotives[J]. Internal combustion engine & parts, 2024(10): 122-124.
- [4] SHAO R Y, XU X C, ZHOU Z H, et al. Promoting ordering degree of intermetallic fuel cell catalysts by low-melting-point metal doping[J]. Nature communications, 2023, 14(1): 5896.
- [5] 于力娜, 普星彤, 朱雅男, 等. 车用质子交换膜燃料电池膜电极关键材料与结构设计进展[J]. 汽车文摘, 2023(5): 9-23.
YU Lina, PU Xingtong, ZHU Yanan, et al. Advances in key materials and structure design of membrane electrodes for automotive proton exchange membrane fuel cells[J]. Automotive digest, 2023(5): 9-23.
- [6] 李政贤, 耿志勇, 李一凡, 等. 质子交换膜燃料电池关键材料发展现状综述[J]. 商用汽车, 2023(4): 93-95.

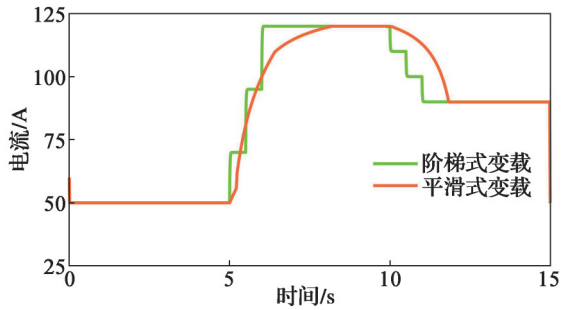


图 18 氢燃料电池电堆的输出电流对比图

Fig. 18 Comparison of output current from hydrogen fuel cell stack

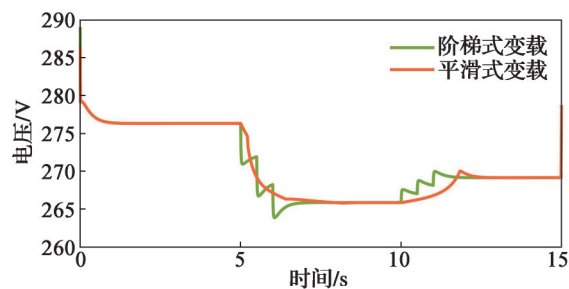


图 19 氢燃料电池电堆的输出电压对比图

Fig. 19 Comparison of output voltage from hydrogen fuel cell stack

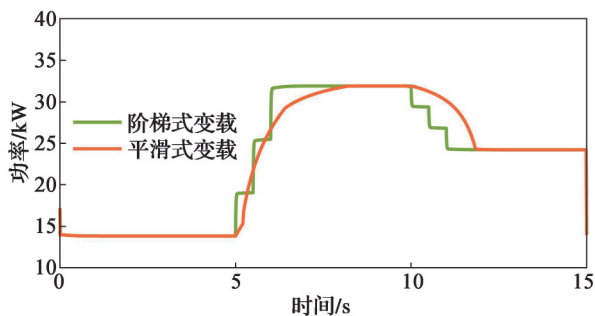


图 20 氢燃料电池电堆的输出功率对比图

Fig. 20 Comparison of output power from hydrogen fuel cell stack

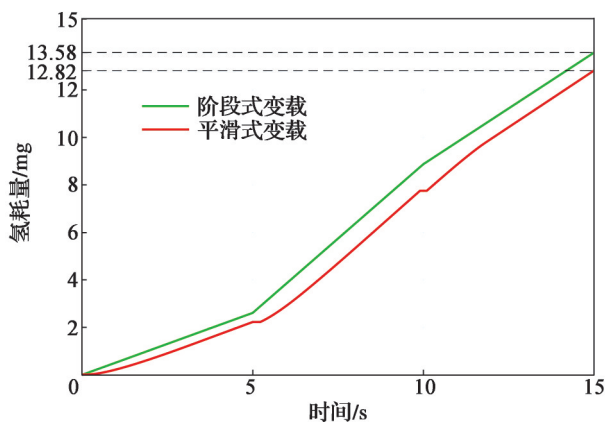


图 21 氢燃料电池电堆的氢耗量对比图

Fig. 21 Comparison of hydrogen consumption in hydrogen fuel cell stack

- LI Zhengxian, GENG Zhiyong, LI Yifan, et al. Review on the development of key materials for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Commercial vehicle*, 2023(4): 93-95.
- [7] KIM H, MOON S H. Chemical vapor deposition of highly dispersed Pt nanoparticles on multi-walled carbon nanotubes for use as fuel-cell electrodes[J]. *Carbon*, 2011, 49(4): 1491-1501.
- [8] GOUSE S P, RAVINDRANADH K, SRINU A, et al. Carbon nanofibers as potential catalyst support for fuel cell cathodes: a review[J]. *Energy & fuels*, 2021, 35(15): 11761-11799.
- [9] PEI P C, CHANG Q F, TANG T. A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2008, 33(14): 3829-3836.
- [10] 刘娜, 李红信, 汪树恒, 等. 车用质子交换膜燃料电池启停工况研究进展[J]. *汽车实用技术*, 2023, 48(21): 187-191.
- LIU Na, LI Hongxin, WANG Shuheng, et al. Research progress of startup-shutdown conditions for proton exchange membrane fuel cell in vehicles[J]. *Automobile technology*, 2023, 48(21): 187-191.
- [11] 彭跃进, 彭赞, 李伦, 等. 质子交换膜燃料电池启动策略[J]. *工程科学学报*, 2016, 38(3): 417-424.
- PENG Yuejin, PENG Yun, LI Lun, et al. Start-up strategy of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of engineering science*, 2016, 38(3): 417-424.
- [12] 魏永琪, 赵玉兰, 负海涛. 质子交换膜燃料电池系统启停控制策略的研究[J]. *重庆理工大学学报: 自然科学*, 2021, 35(1): 75-82.
- WEI Yongqi, ZHAO Yulan, YUN Haitao. Study of proton exchange membrane fuel cell in the startup and shutdown operation strategy[J]. *Journal of Chongqing university of technology: natural science*, 2021, 35(1): 75-82.
- [13] 王季康, 李华, 彭宇飞, 等. PEMFC 建模及性能分析控制[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(8): 27-34.
- WANG Jikang, LI Hua, PENG Yufei, et al. PEMFC modeling and performance analysis control[J]. *Electronic measurement technology*, 2022, 45(8): 27-34.
- [14] 曲炳旺, 陈会翠, 邢夏杰, 等. 质子交换膜燃料电池变载过程动态响应分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(增刊1): 110-116.
- QU Bingwang, CHEN Huicui, XING Xiajie, et al. Analysis of dynamic response of proton exchange membrane fuel cell under load change conditions[J]. *Journal of Tongji university(natural science)*, 2017, 45(Suppl 1): 110-116.
- [15] 皇甫宜耿, 任子俊, 张羽翔, 等. 质子交换膜燃料电池动态特性建模及仿真[J]. *电力电子技术*, 2020, 54(12): 44-46.
- HUANGFU Yigeng, REN Zijun, ZHANG Yuxiang, et al. Dynamic characteristics modeling and simulation of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Power electronics*, 2020, 54(12): 44-46.
- [16] 王季康, 李华, 彭宇飞, 等. 质子交换膜燃料电池多时间尺度下的动态特性[J]. *物理学报*, 2022, 71(15): 331-340.
- WANG Jikang, LI Hua, PENG Yufei, et al. Dynamic characteristics of proton exchange membrane fuel cell on a multiple time scale[J]. *Acta physica sinica*, 2022, 71(15): 331-340.
- [17] 刘鹏程, 许思传. PEMFC 电堆动态工况响应性能试验[J]. *化工进展*, 2021, 40(6): 3172-3180.
- LIU Pengcheng, XU Sichuan. Experimental study on dynamic response performance for PEMFC stack[J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2021, 40(6): 3172-3180.

Collaborative optimization strategy for fuel cells in hybrid locomotives under start-stop and variable-load conditions

WANG Yongbin¹, FAN Haoran², GUAN Da¹, FU Jun¹, LI Junxiang¹, LI Teng²

(1. CHN ENERGY Xinshuo Railway Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Hydrogen-powered locomotives represent an important direction for the green transformation of rail transport, offering zero emissions and long endurance; however, their core power source (fuel cells) remains constrained by high cost and insufficient durability. In particular, rapid performance degradation caused by start-stop and variable-load conditions seriously restricts their life-cycle economic efficiency. To solve this problem, this paper presents a fuel cell-battery combined energy supply system model for hydrogen fuel cell-battery hybrid locomotives. Based on the dynamic response characteristics of fuel cells, a control strategy was proposed to suppress start-stop losses, and a voltage degradation model was incorporated to achieve life prediction and quantitative assessment of equivalent hydrogen consumption. At the operation control level, a two-stage smooth switching strategy was designed for the energy storage system: under start-stop conditions, constant-current control prioritized the energy storage unit to respond to sudden load changes; under variable-load conditions, droop control enabled the unit to meet rapid power demands, thereby ensuring a smooth power transition of the fuel cells and stabilizing the DC bus voltage. Simulation results show that this comprehensive strategy effectively reduces hydrogen consumption under typical locomotive operating conditions, specifically—42% for a single start/stop and 5.6% under variable-load conditions—providing a practical solution for engineering applications in electric-hydrogen hybrid locomotives.

Keywords: hydrogen fuel cell-battery hybrid locomotive; hydrogen fuel cell; start/stop condition; variable-load condition; control strategy