

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.002

引用格式: 刘静. 基于模型预测控制的燃料电池汽车能量管理控制策略研究[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 9-12.

Citation: LIU Jing, SUN Yan. Research on energy management control strategy of fuel cell vehicle based on model predictive control[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 9-12.

基于模型预测控制的燃料电池汽车能量管理 控制策略研究*

刘静^{1,2}, 孙闫^{2,3}

(1. 南京交通职业技术学院 汽车工程学院, 江苏 南京 211188; 2. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 3. 浙江远程商用车研发有限公司 电子电控部, 浙江 杭州 310000)

摘要: 为了提高燃料电池汽车的经济性和部件的耐久性, 提出一种基于实时模型预测控制(MPC)和庞特里金极小值原理(PMP)的燃料电池混合动力汽车能量管理策略。该策略采用模型预测控制实现燃料电池和电池之间的能量分配, 降低总等效氢消耗; 通过反向传播神经网络(BPNN)获得预测速度序列, 利用极小值原理求解每个预测区间的最优控制问题。与基于规则的策略(RB)相比, 该策略可以在保持电池荷电状态稳定的同时减少 10.97% 的总等效氢消耗量。

关键词: 汽车; 燃料电池; 能量管理; 极小值原理; 模型预测控制(MPC)

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)03-0009-04

近年来能源需求与二氧化碳排放量快速增长, 能源问题和环境问题日益严重^[1]。在各类能源中, 氢能优势突出, 相较于普通化石能源, 氢能具有无污染、可再生、来源广泛等优点。随着燃料电池技术的发展, 燃料电池汽车引起了工业界和学术界的广泛关注^[2-4]。目前的燃料电池动力系统需要配备蓄电池、超级电容等辅助电源, 以提高整车的动力性能和经济性^[5]。由于燃料电池汽车需要搭载多种能源, 能量管理策略(Energy Management Strategy, EMS)对提高其燃料电池耐久性和燃油经济性具有至关重要的作用。

目前对能量管理策略的研究主要分为基于规则的策略(RB)和基于优化的策略^[6-9]。基于规则的策略主要通过一系列预先定义的规则实现电力系统的能量分配, 由于其设计简单、计算量小, 在实际工程中得到广泛应用。李晓英等设计了一种基于确定性规则的恒温器控制策略, 该策略可减少发动机启停次数且控制发动机工作在高效区、经济区, 避免电池以大电流放电, 提高整车经济性^[10]。但基于规则的策略存在客观性较差的问题, 可能无法保证在各种驾驶工况下燃油经济性都最佳和能量得到有效利

用。为解决这个问题, 基于不确定规则的模糊控制得到采用。模糊控制的优点是模糊化过程对不确定性、噪声和干扰具有鲁棒性和适应性, 缺点是模糊规则和隶属函数完全依靠经验设计, 限制了燃油经济性的提高^[11]。因此, 基于优化的策略成为近年来的研究热点。基于优化的策略包括全局优化策略和实时优化策略^[12-14]。全局优化策略须预先获得完整的驾驶循环, 在给定目标函数后, 获得燃油经济性的最优结果。全局优化策略包括动态规划、遗传算法和凸优化算法等, 其中动态规划最具代表性。全局优化策略的缺点是须提前知道整个驾驶循环, 计算量庞大, 无法应用于实时控制, 常作为其他实时策略的对比基准。实时优化策略主要包括等效消耗最小策略、庞特里金极小值原理(Pontryagin's Minimum Principle, PMP)及模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)等^[15-17]。等效消耗最小策略利用等效系数将电池或超级电容器消耗的电能换算成等效燃料消耗量, 进而找到总燃料消耗量的最小值。庞特里金极小值原理引入协态向量, 类似于等效消耗最小策略中的等效系数, 其缺点是协态向量直接决定最终控制结果, 对不同工况非常敏感。本文基于

* 基金项目: 南京交通职业技术学院科研基金项目(JZ2203); 江苏省高等学校自然科学基金资助项目(21KJB460028)

实时模型预测控制和庞特亚金极小值原理研究燃料电池混合动力汽车能量管理策略。

1 系统建模与试验

1.1 整车模型

燃料电池汽车采用电池作为主要能源,燃料电池作为增程器,整车需求功率模型如下:

$$P_{\text{req}}(t) = (fmg \cos\theta + 0.5\rho_{\text{air}}C_D A_f v^2 + mg \sin\theta + ma)v \quad (1)$$

式中: $P_{\text{req}}(t)$ 为整车功率; f 为滚动阻力系数; m 为整车质量; θ 为道路坡度; ρ_{air} 为空气密度; C_D 为空气阻力系数; A_f 为迎风面积; a 为整车加速度; v 为车辆行驶速度。

1.2 燃料电池模型

燃料电池效率模型如下:

$$P_{\text{fc}}(t) = N_{\text{fc}} P_{\text{fc-stack}} \eta_{\text{fc}}(t) \quad (2)$$

$$m_{\text{hyd,consum}} = \frac{1}{J_{\text{hyd,low}}} \int_0^t \frac{P_{\text{fc}}(t)}{\eta_{\text{fc}}(t)} dt \quad (3)$$

$$P_{\text{fc-stack}} = U_{\text{stack}} I_{\text{satek}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{fc}}(t)$ 为燃料电池系统的输出功率; N_{fc} 为燃料电池单体个数; $P_{\text{fc-stack}}$ 为燃料电池单体输出功率; $\eta_{\text{fc}}(t)$ 为燃料电池系统效率; $m_{\text{hyd,consum}}$ 为氢气消耗质量; $J_{\text{hyd,low}}$ 为氢气低热值; U_{stack} 为电堆单体电压; I_{satek} 为电堆单体电流。

1.3 电池模型

电池的主要作用是降低燃料电池输出电流的波动。采用经典的 Rint 内阻模型,电池由理想电压源串联内阻组成,模型如下:

$$\begin{cases} U_{\text{bat}} = U_{\text{ocv}} - I_{\text{bat}} R_{\text{bat}} \\ P_{\text{bat}} = U_{\text{bat}} I_{\text{bat}} \\ I_{\text{bat}} = \frac{U_{\text{ocv}} - \sqrt{U_{\text{ocv}}^2 - 4R_{\text{bat}} P_{\text{bat}}}}{2R_{\text{bat}}} \\ C_{\text{SOC}}(t) = C_{\text{SOC,max}} - \int_0^t \frac{I_{\text{bat}} dt}{Q_{\text{max}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_{bat} 为动力电池端电压; U_{ocv} 为动力电池电压源; I_{bat} 为动力电池电流; R_{bat} 为动力电池内阻; P_{bat} 为动力电池输出功率; $C_{\text{SOC,max}}$ 为电池最大荷电状态; Q_{max} 为动力电池最大电量。

2 能量管理策略设计仿真

2.1 速度预测

采用 MPC 控制进行能量管理。MPC 控制可以在满足整车功率需求和各种约束条件下分配燃料

电池系统和电池的输出功率,使整个行驶循环中电池荷电状态保持在设定范围内,同时获得最小的氢消耗量。MPC 控制首先须进行预测控制,为了获得预测视界内的功率需求,须预测视界内的速度序列。

采用反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)进行速度预测。BPNN 网络结构分为输入层、隐藏层和输出层,在速度预测中, BPNN 的输入是历史速度序列,输出是预测速度序列。时间 t 时映射关系可以用以下函数表示:

$$[V_{t+1}, \dots, V_{t+Hp}] = f_N[V_{t-Hp+1}, \dots, V_t] \quad (6)$$

使用 BPNN 网络进行速度预测时,选择 9 个标准驾驶循环(MANHATTAN, NYCC, WVUCITY, INDIA_URBAN_SAMPLE, UDDS, WVUSUB, HWFET, NREL2VAIL, US06_HWY)作为训练样本,世界轻型汽车测试循环工况(World Light Vehicle Test Cycle, WLTC)作为测试样本。选取 4 种不同预测视界长度进行研究,分别为 5 s、10 s、15 s、20 s。图 1 为 4 种预测视界长度下实际速度和预测速度。

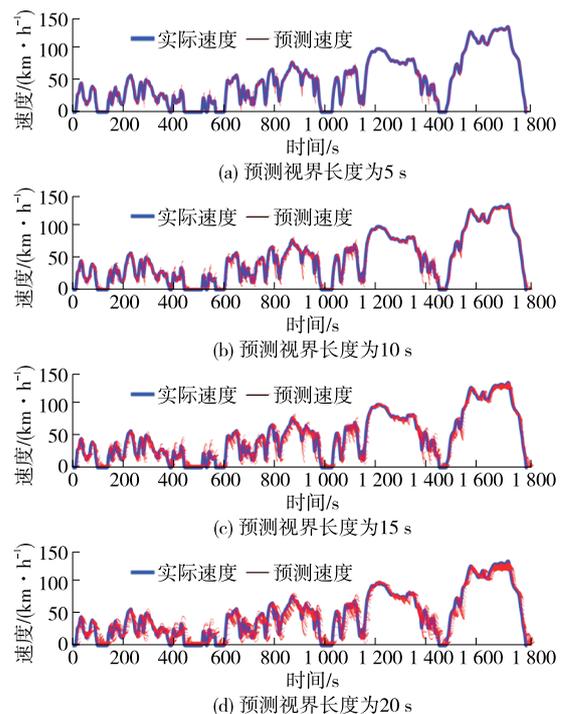


图 1 不同预测视界长度下速度预测结果

由图 1 可知:预测视界长度为 5 s 时,预测速度最接近实际速度;随着预测视界长度的增加,预测精度逐渐降低。

采用均方根误差作为评价速度预测准确性的指标,不同预测视界长度下预测速度的均方根误差见

表 1。

表 1 不同预测视界长度下预测速度的均方根误差

预测视界 长度/s	均方根误差	预测视界 长度/s	均方根误差
5	2.03	15	7.15
10	4.64	20	9.72

2.2 基于 PMP 的模型预测控制

获得预测视界内需求功率序列后,结合需求功率序列,通过 PMP 理论构造哈密顿函数,求解每个采样时间内预测视界的最优控制,并采用算法的第一个输出进行实际控制。采用基于预测的模型预测算法(Predict-Model Predictive Control, P-MPC),定义预测区间内目标函数如下:

$$J = \min \sum_{k=1}^{H_p} \dot{m}(P_{fc}(k)) \quad (7)$$

式中: H_p 为预测范围的长度; \dot{m} 为氢消耗率。

为保证车辆的正常运行,在长度为 H_p 的预测视界内,各部件须满足以下约束:

$$\begin{cases} C_{SOC, \min} < C_{SOC}(k) < C_{SOC, \max} \\ P_{fc, \min} < P_{fc}(k) < P_{fc, \max} \\ -\Delta P_{fc, \max} < P_{fc}(k) - P_{fc}(k-1) < \Delta P_{fc, \max} \\ P_{bat, \min} < P_{bat}(k) < P_{bat, \max} \\ C_{SOC}(H_p) = C_{SOC, \text{ref}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $C_{SOC, \min}$ 为电池最小荷电状态; $k=1, 2, \dots, H_p$; $P_{fc, \max}$ 、 $P_{fc, \min}$ 分别为燃料电池最大输出功率和最小输出功率, $P_{bat, \max}$ 、 $P_{bat, \min}$ 分别为电池最大输出功率和最小输出功率;由于燃料电池系统的输出限制, $\Delta P_{fc, \max}$ 设置为 1 kW/s; $C_{SOC, \text{ref}}$ 为电池参考荷电状态,设置为 60%。

由于电池参考荷电状态是一个定值,利用 PMP 解决最优功率分配问题时会导致燃料电池多次启停。为减少电池启停次数,燃料电池仅在驾驶循环的开始和结束时经历启动和停止,其他时刻在非零最小功率点下工作。

由于燃料电池在工作过程中只经历一个启停循环,燃料电池的退化主要是由燃料电池功率的变载所致,在目标函数中添加一个减少燃料电池功率变化的权重项 p ,表达式如下:

$$J = \min \sum_{k=1}^{H_p} \dot{m} \{ P_{fc}(k) + p [P_{fc}(k) - P_{fc}(k-1)] \} \quad (9)$$

系统控制变量为 P_{fc} , 状态变量为电池荷电状态,时间 t 时哈密顿函数如下:

$$H(C_{SOC}, \lambda, P_{fc}, t) = \dot{m}(P_{fc}(t)) - \lambda(t) \dot{C}_{SOC}(t) + p [P_{fc}(k) - P_{fc}(k-1)]^2 \quad (10)$$

式中: $\lambda(t)$ 为协态向量。

根据 PMP 理论,时间 t 时最优控制变量 $P_{fc}^*(t)$ 由正则方程确定:

$$P_{fc}^* = \operatorname{argmin} H(C_{SOC}, \lambda, P_{fc}, t) \quad (11)$$

协态向量定义如下:

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{\lambda(t)}{Q_{\max}} \left(\frac{\partial I_{\text{bat}}}{\partial U_{\text{ocv}}} \frac{\partial U_{\text{ocv}}}{\partial C_{SOC}(t)} + \frac{\partial I_{\text{bat}}}{\partial R_{\text{bat}}(t)} \frac{\partial R_{\text{bat}}(t)}{\partial C_{SOC}(t)} \right) \quad (12)$$

3 结果分析

在 WLTC 工况下比较 PMP、RB、P-MPC 3 种能量管理策略的优劣,图 2 为不同策略下电池荷电状态。从图 2 可以看出:采用 RB 策略,最终电池荷电状态不能保持在参考值 0.6 附近;而采用 PMP 和 P-MPC 策略,最终电池荷电状态可以等于或接近参考值;与 P-MPC 策略相比,PMP 策略下电池荷电状态变化更明显。

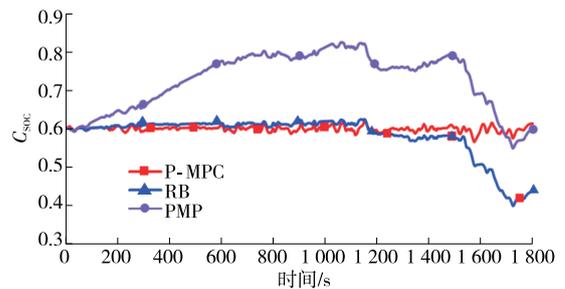


图 2 不同能量管理策略下电池荷电状态

根据仿真结果,P-MPC、PMP、RB 策略的等效氢消耗分别为 430.3 g、426.7 g、483.3 g。与 PMP 策略相比,P-MPC 策略的等效氢消耗量略有提高;但与 RB 策略相比,P-MPC 的等效氢消耗量降低 10.97%。RB 策略不限制燃料电池功率波动,燃料电池输出功率波动更严重;RB 策略仅依赖预定义的功率分配规则,燃料电池的整体工作效率较低,氢气消耗更多。

4 结论

本文提出一种基于实时模型预测控制和庞特里亚金极小值原理的燃料电池混合动力汽车能量管理

策略 P-MPC,该策略可以兼顾燃料电池的燃油经济性和耐久性。搭建整车及零部件模型,分析不同预测视界长度(5 s、10 s、15 s、20 s)对燃料电池混合动力汽车能量管理策略性能的影响,并将 P-MPC 能量管理策略与其他策略进行比较。结果表明:P-MPC 能量管理策略可以减少氢气消耗并延长燃料电池的使用寿命,同时保持电池荷电状态的稳定;与基于规则的能量管理策略相比,P-MPC 策略可以降低 10.97%的等效氢消耗量,其等效氢消耗量更接近理想优化策略;该策略不依赖工况先验知识,可用于燃料电池混合动力汽车能量实时控制。

参考文献:

[1] SUN Y, XIA C G, HAN J Y. Optimization of energy saving and fuel-cell durability for range-extended electric vehicle[J]. Journal of Energy Engineering, 2023, 149(1): 4022056.1-4022056.10.

[2] 李永亮,黄英,王绪,等.增程式电动汽车动力系统参数匹配及控制策略优化[J].汽车工程学报,2021,11(3): 177-190.

[3] CHEN Y Y, YAO Z Y, ZHONG K. Do environmental regulations of carbon emissions and air pollution foster green technology innovation: evidence from China's prefecture-level cities [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 350: 131537.1-131537.9.

[4] 王永宽,钱立军,牛礼民.插电式混合动力汽车双模糊控制策略及其优化[J].电子测量与仪器学报,2016, 30(2): 209-217.

[5] 刘静,孙闫,夏长高.考虑部件使用寿命的 FCEV 能量管理策略[J].电子测量技术,2022,45(9): 1-7.

[6] 何洪文,孟祥飞.混合动力电动汽车能量管理技术研究综述[J].北京理工大学学报,2022,42(8): 773-783.

[7] LIU T, TAN W H, TANG X L, et al. Driving conditions-

driven energy management strategies for hybrid electric vehicles: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 151: 111521.1-111521.16.

[8] QI C Y, ZHU Y W, SONG C X, et al. Hierarchical reinforcement learning based energy management strategy for hybrid electric vehicle [J]. Energy, 2022, 238: 121703.1-121703.10.

[9] 刘静,孙闫.基于模糊控制的燃料电池汽车能量管理研究[J].公路与汽运,2022(4): 11-13.

[10] 李晓英,于秀敏,李君,等.串联混合动力汽车控制策略[J].吉林大学学报(工学版),2005,35(2): 122-126.

[11] 何仁,李军民.混合动力电动汽车动力耦合系统与能量管理策略研究综述[J].重庆理工大学学报(自然科学),2018,32(10): 1-16.

[12] 李晓英,于秀敏,李君,等.串联混合动力汽车控制策略[J].吉林大学学报(工学版),2005,35(2): 122-126.

[13] 孙闫,夏长高,尹必峰,等.燃料电池电动汽车的能量管理[J].吉林大学学报(工学版),2022, 52(9): 2130-2138.

[14] SONG K, WANG X D, LI F Q, et al. Pontryagin's minimum principle-based real-time energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering both fuel economy and power source durability[J]. Energy, 2020, 205: 118064.1-118064.13.

[15] 阮永利,詹跃东.燃料电池汽车分层能量管理策略优化研究[J].电子测量技术,2021,44(19): 1-7.

[16] 吴珊.燃料电池电动汽车能量管理系统最优控制策略研究[J].国外电子测量技术,2020,39(4): 101-105.

[17] ZOU W T, LI J W, YANG Q Q, et al. A real-time energy management approach with fuel cell and battery competition-synergy control for the fuel cell vehicle[J]. Applied Energy, 2023, 334: 120667.1-120667.12.

收稿日期:2023-06-16

关于假冒杂志网站和邮箱的声明

目前互联网上出现以《公路与汽运》杂志名义建立的官方网站和投稿邮箱,它们盗用“公路与汽运”的名称,非法向外征稿并收取审稿费、版面费,严重损害了本刊的权益和声誉。为避免广大作者和读者上当受骗,本刊郑重声明:

1 本刊的网址为 <http://glyqy.csust.edu.cn>。互联网上以“公路与汽运”名义建立的其他网站都是假冒的,此类网站上发布的信息及由此造成的一切后果均与本刊无关。

2 本刊官方邮箱为 gongluyuqiyun@163.com,除此之外的任何以本刊名义设立的邮箱都是假冒的。本刊目前没有收取审稿费。

3 本刊强烈谴责这种假冒《公路与汽运》杂志名义、损害本刊和作者、读者权益的违法行为,并保留依法追究其法律责任的权利。

特此声明。

《公路与汽运》编辑部