

大功率氢燃料电池动力系统节能优化策略研究

朱丹¹, 王晗¹, 舒晨¹, 宁世超¹, 郭之锐², 赵轩¹

(1.长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710026; 2.西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要:燃料电池汽车动力系统温度与氢气消耗量均为评价其性能的重要指标,为提升大功率燃料电池动力系统热量控制效率和燃料经济性,通过构建大功率氢燃料电池动力系统模型,分析冷却系统等辅助部件能耗,在保证温度控制的基础上设计基于模糊逻辑控制的功率分配策略,提出以总氢耗最小为目标的热量与功率协同优化控制方法。结合 115 kW 燃料电池卡车整车参数,在 Matlab/Simulink 平台下进行控制策略及其优化策略的仿真分析,研究结果表明,相较于功率跟随控制策略,采用协同优化控制策略的百公里等效氢耗分别降低了 8.04%和 9.9%,证实了该策略在节能优化方面的有效性。

关键词:氢燃料电池;动力系统;节能优化;协同控制;模糊控制

中图分类号:U469.7

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2024)05-0828-10

环境问题与能源危机给社会发展带来了严峻挑战,过度依赖传统能源尤其是海外原油将给国家环境改善与能源安全带来隐患^[1]。氢能作为无污染的可再生能源,被视为应对当前挑战的关键,氢燃料电池汽车成为科技发展的核心领域之一^[2]。质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 因其能量密度高、续驶里程长成为氢能发动机技术的研究热点,发展大功率氢燃料电池卡车被认为是交通运输电气化发展的理想路径^[3]。为弥补燃料电池发动机动态反应特性较慢的特点,需引入辅助能源系统以满足车辆的运行需求,因此,合理的能量分配控制策略对实现多能源系统高效协同至关重要^[4]。通过设计控制策略以实现动力系统瞬时动态特性与长期氢气消耗的协同优化,可有效减少能耗,为大功率燃料电池商用车的发展与推广提供重要支持。

近年来,燃料电池动力系统的控制策略研究主要围绕动力性、经济性和耐久性等优化目标展开^[5]。王瑞鑫等^[6]提出了复合模糊控制方法,采用

加权均值滤波算法限制输出功率变化速度,有效提升了燃料电池卡车的经济效益和使用寿命。Meng 等^[7]提出了一种基于储能系统历史运行数据的等效耗氢计算方法,设计基于参数在线辨识的自适应功率分配策略,提高了等效氢耗计算精度并延长了电堆寿命,但未考虑发动机辅助部件的氢耗。Hu 等^[8]通过凸优化对动力系统的参数配置和功率分配进行调整,在考虑动力电池老化情况的同时获取实时最优控制效果,然而对燃料电池的老化情况考虑不足。尹燕莉等^[9]提出一种基于 Q 学习算法的能量流动平衡机制,结合离线优化与实时应用,有效减少了氢气的消耗。宋震等^[10]开发了一种结合强化学习与实际路况信息的燃料电池汽车能量分配控制策略,提高了整车的经济性和耐用性。

上述研究表明,采用合理的功率分配策略可以有效降低燃料电池汽车的氢耗。然而,现有研究在评估整车能耗时主要关注燃料电池电堆和动力电池的等效氢耗量,未充分考虑发动机系统辅助部件的功率消耗,从而影响了整车燃料经济性评估的准确性,降低了控制策略的节能效果。

PEMFC 电堆能量转换效率约为 40%~60%,剩余能量主要以热能形式被耗散^[11],其中仅有约 3%通过排气和热辐射散失,其他部分需通过冷却系统散热^[12],故冷却系统在控制燃料电池电堆工作温度中发挥极大作用,其功耗占发动机系统能耗的 10%

收稿日期:2023-10-28

基金项目:国家自然科学基金(52202462)、国家重点研发计划项目(SQ2021YFE0192900)、中央高校高新技术研究支持计划(300102224208)与陕西省自然科学基金(2022JQ-501)资助

作者简介:朱丹(1991—),讲师

通信作者:赵轩(1983—),教授 e-mail:zhaoxuan@chd.edu.cn

~40%^[13],因此减少冷却系统能耗将是实现整车节能的有效途径。朱仲文等^[14]开发了一种集成式氢燃料电池汽车热管理系统,通过优化设计提升余热利用效率,降低冷却能耗,实现整车节能优化,但系统结构较为复杂。本文综合考虑大功率燃料电池动力系统的动态性能与燃料经济性,深入分析散热系统能耗对整车节能优化的影响,并提出一种多子系统协同控制的能量分配策略。该策略通过调节燃料电池系统与动力输出系统之间的能量流动,实现热效率和动力效率的协同优化,维持燃料电池温度稳定的同时实现整车节能优化。本文首先结合燃料电池商用车运行需求,搭建以 PEMFC 发动机作为主动力源、锂离子电池辅助驱动的混合动力系统模型,同时,通过参数分析整车等效氢气消耗,作为协同优化控制策略的目标函数。其次,设计基于模糊逻辑的控制策略,考虑冷却系统等辅助部件的能量消耗,以发动机温度控制与功率输出的协同优化为目标,提高整车燃料经济性。最后,结合 NEDC 工况,基于 Matlab/Simulink 仿真验证了本文节能优化策略的有效性。

1 大功率燃料电池动力系统建模

1.1 大功率燃料电池动力系统结构及参数

研究中所应用的大功率燃料电池商用车动力系统结构如图 1 所示。

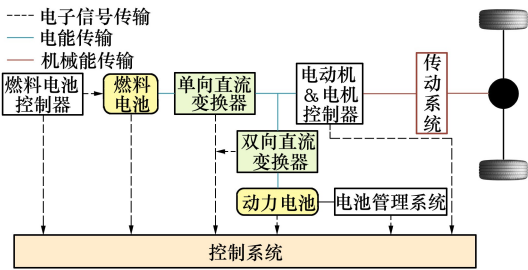


图 1 燃料电池卡车动力系统结构图

燃料电池和动力电池分别通过双向和单向直流变换器连接至总线。所研究的燃料电池商用车为某型半挂牵引中型卡车,主要的整车参数及性能需求如表 1 所示。

表 1 整车参数

分系统	参数	数值
整车部分	总质量/kg	105 000
	长/mm×宽/mm×高/mm	7 480×2 550×3 720
	迎风面积/m ²	9.486
	滚动阻力因数	0.01~0.016
	空气阻力因数	0.65
性能指标	最高车速/(km·h ⁻¹)	90
	最大爬坡度/%	20
	续驶里程/km	600
电机	额定功率/kW	220
	峰值功率/kW	260
燃料电池	额定功率/kW	115
动力电池	额定功率/kW	90

燃料电池发动机系统结构如图 2 所示,主要由 PEMFC 电堆、供氢系统、供氧系统、电控系统以及冷却系统组成。本研究主要聚焦于燃料电池发动机冷却系统的节能问题,该系统包括水泵、三通电磁阀、散热器以及膨胀水箱等组件,冷却液为去离子水和乙二醇的混合物^[15],主要用于维持电堆工作温度。电堆及冷却系统相关参数如表 2 所示。

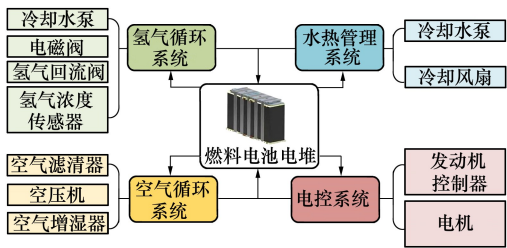


图 2 燃料电池发动机系统构成

表 2 PEMFC 电堆及冷却系统相关参数

分系统	参数	数值
PEMFC 电堆	电池片数	430
	双极板类型	金属板
	有效活化面积/cm ²	298
	质子交换膜厚度/cm	0.012 75
冷却系统	散热方式	水冷
	电堆最佳运行温度/℃	70

1.2 车辆动力学模型

基于车辆纵向动力学模型,可计算出车辆行驶过程中因加速度、空气阻力、滚动阻力以及坡度等因素产生的动力需求,车辆需求总功率 P_{req} 为

$$\begin{cases} F_t = mgf\cos\theta + mg\sin\theta + ma(t) + \frac{1}{2}C_D A \rho v^2(t) \\ P_{\text{req}} = \eta F_t \cdot v \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_t 为车辆牵引力; m 为车辆质量; f 为车辆与地面的滚动摩擦因数; a 为行驶时的加速度; v 为车辆速度; θ 为道路坡度; C_D 为迎风阻力因数; A 为迎风面积; η 为传动系统效率。

1.3 燃料电池电堆模型

氢燃料电池发动机通过直接转换氢气中的化学能为电能为车辆提供驱动。根据燃料电池商用车用能需求和负荷特性,采用半经验模型描述系统的复杂时变非线性特征,燃料电池电堆输出电压 V_{st} 为

$$V_{\text{st}} = NV_{\text{cell}} \quad (2)$$

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{Nerst}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{con}} \quad (3)$$

式中: V_{cell} 为 PEMFC 单体电压; N 为单体 PEMFC 片数; E_{Nerst} 为能斯特电压; η_{act} 为活化电压损失; η_{ohm} 为欧姆电压损失; η_{con} 为浓度差电压损失。

PEMFC 的能斯特电压满足

$$E_{\text{Nerst}} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F} \times (T - T_r) + \frac{RT}{2F} \left[\ln(p_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{\text{O}_2}) \right] \quad (4)$$

式中: ΔG 为反应过程的吉布斯自由能; F 为法拉第常数(96 485 C/mol); ΔS 为反应熵变(J/mol); R 为理想气体的通用气体常数(8.314 J/(mol · K)); p_{H_2} 为阳极氢气压力, p_{O_2} 为阴极氧气压力; T 为工作温度; T_r 为相对温度。

活化电压、欧姆电压和浓度差电压损失表示为

$$\begin{cases} \eta_{\text{act}} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(c_{\text{O}_2}) + \xi_4 T \ln(i) \\ \eta_{\text{con}} = -\frac{RT}{F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_{\text{max}}}\right) \\ \eta_{\text{ohm}} = I_{\text{fc}} R_{\text{ohm}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ 为经验参数; $c_{\text{O}_2}, c_{\text{H}_2}$ 分别为阴极、阳极气体摩尔浓度; i 为电流密度; i_{max} 为极限电流密度; R_{ohm} 为欧姆极化等效电阻。

基于上述模型,本文研究的大功率燃料电池电堆输出极化特性与功率特性如图 3 所示。

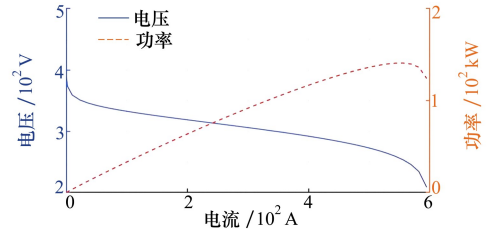


图 3 PEMFC 电堆极化曲线及功率图

1.4 燃料电池冷却系统模型

PEMFC 电堆的工作温度必须严格控制,温度过高会导致电解质膜熔化和催化剂失活,进而降低电池性能并缩短寿命;温度过低会降低反应速率和离子传导效率,降低电池输出功率^[16]。燃料电池发动机系统的散热方式包括水汽化散热、热辐射、尾气排放热和冷却水散热等。由于车用 PEMFC 工作温度较低,产生的余热为低品位能源,主要依靠冷却水散热。假设燃料中的化学能完全且仅被转换为电能和热能,可据此构建燃料电池发动机冷却系统模型为

$$\begin{cases} Q_{\text{gen}} = Q_{\text{tot}} - P_{\text{st}} = \Delta H \times \frac{NI_{\text{st}}}{2F} - V_{\text{st}} I_{\text{st}} \\ Q_{\text{cl}} = w_{\text{cl}} C_{\text{H}_2\text{O}} (T_{\text{st,out}} - T_{\text{st,in}}) \\ C_{\text{st}} M_{\text{st}} \frac{dT_{\text{st}}}{dt} = Q_{\text{gen}} - Q_{\text{cl}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q_{tot} 为总化学能; P_{st} 为电堆输出功率; Q_{gen} 为系统产生的剩余热量; Q_{cl} 表示单位时间内冷却水移热; w_{cl} 为冷却水流量; $C_{\text{H}_2\text{O}}$ 为冷却水比热容; $T_{\text{st,in}}$ 和 $T_{\text{st,out}}$ 分别为电堆入口和出口处的温度; C_{st} 和 M_{st} 为电堆的比热容和质量; T_{st} 为电堆的温度。

因此,冷却水流速与电堆电流的关系可表示为

$$w_{\text{cl}} = \frac{\Delta H \times \frac{NI_{\text{st}}}{2F} - P_{\text{st}} - C_{\text{st}} M_{\text{st}} \frac{dT_{\text{st}}}{dt}}{C_{\text{H}_2\text{O}} \Delta T} \quad (7)$$

由于燃料电池商用车发动机功率输出较大,伴随更高的散热需求,对冷却系统的需求增加,模型简化时将重点放在冷却风扇和冷却水泵的功率消耗上。冷却水泵为冷却液循环提供动力,根据流体力学理论推出冷却水泵功率为

$$P_{\text{pump}} = \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} g H_{\text{pump}} w_{\text{cl}}}{\eta_{\text{pump}}} \quad (8)$$

式中: $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 为冷却水密度; g 为重力加速度; H_{pump} 为冷却水泵扬程; η_{pump} 为冷却水泵机械效率。

冷却风扇是进行热量交换、维持循环水温的关

键设备,其散热需求为

$$Q_{\text{fan}} = c_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} (T_{\text{cl}} - T_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{out}}) w_{\text{cl}} \quad (9)$$

式中: T_{cl} 为冷却循环水温; $T_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{out}}$ 为燃料电池电堆冷却液出口温度。

根据贝茨理论可以得到冷却风扇的功率为

$$P_{\text{fan}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \eta_{\text{fan}} C_{\text{fan}} \pi r^2 V_{\text{air}}^3 \quad (10)$$

式中: ρ_{air} 为空气密度; η_{fan} 为冷却风扇传动系统机械效率; C_{fan} 为冷却风扇风能利用系数; r 为冷却风扇叶片半径; V_{air} 为空气流速。

1.5 燃料电池发动机效率模型

理论上基于氢气低热值得到燃料电池电堆工作效率达 94% 以上,但在实际使用中由于辅助设备消耗和工况动态变化,燃料电池发动机效率远远低于理论值。结合燃料电池发动机系统辅助部件功率模型,燃料电池发动机的输出净功率如(11)式所示。

$$P_{\text{fc}} = I_{\text{st}} V_{\text{st}} - (P_{\text{H}_2} + P_{\text{O}_2} + P_{\text{pump}} + P_{\text{fan}}) \quad (11)$$

式中: P_{H_2} 为供氢系统功率; P_{O_2} 为供氧系统功率。

空气压缩机的功率消耗与空气流量和压力相关,氢气循环泵的功率消耗与氢气流量有关。空气和氢气流量通常与燃料电池电流成正比,因此在一定范围内,可以认为氢气循环系统与空气供应系统的功耗与燃料电池堆电流呈线性关系,表示为

$$P_{\text{H}_2} + P_{\text{O}_2} = \varepsilon I_{\text{st}} \quad (12)$$

基于(12)式,燃料电池发动机效率为

$$\eta_{\text{fc}} = \frac{I_{\text{st}} V_{\text{st}} - (P_{\text{H}_2} + P_{\text{O}_2} + P_{\text{pump}} + P_{\text{fan}})}{\dot{m}_{\text{fc}} H_{\text{LHV}}} \quad (13)$$

式中, H_{LHV} 为氢气的低热值。

本文研究的大功率燃料电池电堆由于集成性高、产生热量大,对冷却需求高,导致发动机效率下降,如图 4 所示。

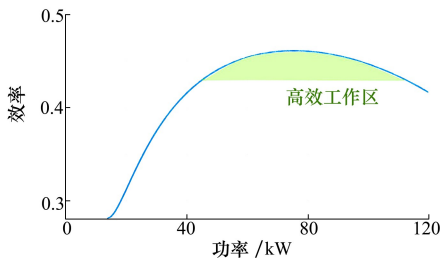


图 4 燃料电池发动机效率图

随着电堆功率的提升,发动机效率逐渐增加,然而当功率过大时,冷却系统等辅助部件功率消耗增大,导致发动机整体效率降低,因此,将发动机效率

高于 43% 的功率范围定义为高效工作区,控制燃料电池发动机的输出功率维持在该区域有助于整车燃料经济性的提升。

1.6 动力电池模型

电池等效电路模型将复杂电路中的元件替换为简单的电路元件进行分析与计算,本文选择 Rint 模型进行锂离子电池内部电路的仿真,燃料电池混合动力系统中动力电池模型可表示为:

$$U_{\text{bat}} = V_{\text{oc}} - I_{\text{bat}} R_{\text{bat}} \quad (14)$$

$$P_{\text{bat}} = V_{\text{oc}} I_{\text{bat}} - I_{\text{bat}}^2 R_{\text{bat}} \quad (15)$$

式中: V_{oc} 为动力电池开路电压; I_{bat} 为动力电池内部电流; R_{bat} 为等效欧姆内阻; P_{bat} 为输出功率。则动力电池电流可表示为

$$I_{\text{bat}} = \frac{V_{\text{oc}} - \sqrt{V_{\text{oc}}^2 - 4R_{\text{bat}}P_{\text{bat}}}}{2R_{\text{bat}}} \quad (16)$$

式中:开路电压 V_{oc} 与等效内阻 R_{bat} 均为电池荷电状态 (state of charge, SOC) 的函数, S_{OC_0} 为电池 SOC 初始值, Q 为电池额定容量,则电池荷电状态可表示为

$$S_{\text{OC}} = S_{\text{OC}_0} - \frac{\int I_{\text{bat}} dt}{Q} \quad (17)$$

结合针对锂离子电池的通用测试数据库,动力电池的充电效率 η_{chg} 和放电效率 η_{dis} 可由(18)式计算获得^[17]。

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_{\text{chg}} &= \frac{U_{\text{OC}}}{U_{\text{OC}} - IR_{\text{chg}}} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{\text{chg}}(S_{\text{OC}})P_{\text{Bat}}}{[U_{\text{OC}}(S_{\text{OC}})]^2}}} \\ \eta_{\text{dis}} &= \frac{U_{\text{OC}} - IR_{\text{dis}}}{U_{\text{OC}}} = \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{\text{dis}}(S_{\text{OC}})P_{\text{Bat}}}{[U_{\text{OC}}(S_{\text{OC}})]^2}}}{2} \end{aligned} \right. \quad (18)$$

根据上述效率公式可知,在一定 SOC 下,蓄电池的充放电效率差异较大,尤其大功率充电时效率较低;在一定充电功率下,充电效率随 SOC 的增大而减小,而在放电时此变化趋势相反。

1.7 动力系统等效氢耗模型

在燃料电池卡车的混合动力系统能量消耗分析中,通过转化因子将燃料电池发动机向动力电池输送的能量以及辅助部件系统的能耗转换为等效的瞬时氢气消耗,以便于整合系统内部能源流并进行统一的氢气消耗评估^[18]。

燃料电池发动机的氢气消耗量与电堆输出电流呈正比关系,可表示为

$$\dot{m}_{\text{fc}} = \frac{NI_{\text{st}}M_{\text{H}_2}}{2F}$$

(19)

当发动机输出功率为 P_{fc} 时,将冷却系统等辅助部件的功率消耗等效由燃料电池电堆提供,则 I_{st} 可表示为

$$I_{\text{st}} = \frac{P_{\text{fc}} + P_{\text{H}_2} + P_{\text{O}_2} + P_{\text{pump}} + P_{\text{fan}}}{V_{\text{st}}}$$

(20)

动力电池等效氢耗与动力电池输出功率 P_{bat} 及效率 η_{bat} 、燃料电池电堆工作效率 η_{st} 、DC/DC 变换器效率 η_{DC} 等有关,其关系满足(21)式。

$$\dot{m}_{\text{bat}} = \frac{P_{\text{bat}}}{\eta_{\text{bat}} \eta_{\text{DC}} \eta_{\text{st}} \cdot H_{\text{LHV}}}$$

(21)

2 基于模糊控制器的协同控制策略

模糊控制对于处理非线性及复杂的问题表现出了良好的鲁棒性,本文旨在设计一种双输入单输出的模糊控制器,通过对燃料电池电堆功率输出与冷却系统的协同控制,有效降低燃料电池卡车的冗余能耗,实现整车节能优化设计,提升车辆经济性。模糊控制器结构如图 5 所示。

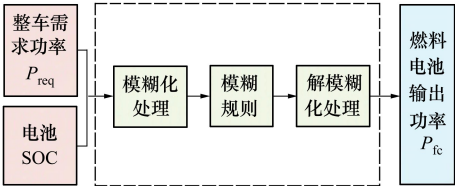


图 5 整车动力系统模糊控制流程图

1) 输入数据模糊化

氢燃料电池商用车行驶过程受工况影响,模糊控制策略需满足车辆行驶需求,基于工况的车辆功率需求是模糊控制的输入参数之一。结合工况特点和设计要求,将需求功率隶属度函数的论域定为 $[0,120]$,并划分为 $\{\text{VL}, \text{L}, \text{M}, \text{H}, \text{VH}\}$ 5 个模糊子集,其中 VL、L、M、H、VH 的含义分别是很低、低、中、高、很高。而另一输入参数动力电池 SOC 是影响动力电池充放电电流及效率的重要参数,同时,动力电池与燃料电池发动机共同提供车辆运行动力,不同 SOC 状态下燃料电池发动机的功率需求不同。动力电池 SOC 的论域定为 $[0,1]$,SOC 的隶属度函

数同样划分为 $\{\text{VL}, \text{L}, \text{M}, \text{H}, \text{VH}\}$ 5 个模糊子集。燃料电池输出功率隶属度函数的论域按照燃料电池发动机额定功率定义为 $[0,115]$,划分为 $\{\text{VL}, \text{L}, \text{M}, \text{H}, \text{VH}\}$ 5 个模糊子集。3 个参数的隶属度函数均用三角形(trimf)函数进行描述。

2) 模糊规则设计

模糊规则是模糊控制器的核心,根据燃料电池卡车需求功率和动力电池 SOC 状态,以等效氢耗最小为目标,制定面向节能优化与协同控制的模糊规则。为避免动力电池过度充放电导致效率与寿命衰减,维持运行过程中动力电池 SOC 的稳定,在动力电池等效氢耗模型中加入调节因子,结合(19)式和(21)式混合动力系统等效氢耗模型可表示为^[19]

$$\dot{m}_{\text{hybrid}} = \dot{m}_{\text{fc}} + \mu \dot{m}_{\text{bat}}$$

(22)

$$\mu = 1 - \frac{2S_{\text{OC}} - (S_{\text{OC}_\text{H}} + S_{\text{OC}_\text{L}})}{S_{\text{OC}_\text{H}} - S_{\text{OC}_\text{L}}}$$

(23)

式中, S_{OC_H} 和 S_{OC_L} 分别为动力电池充电状态阈值的上下限,分别取值为 0.8 和 0.35。

在满足整车功率需求的同时,考虑冷却系统等辅助部件的功率消耗,增加燃料电池发动机运行在高效率区间的比例。基于等效氢耗最小策略优化的模糊规则如表 3 所示。

表 3 模糊逻辑规则表

燃料电池输出功率		整车需求功率				
		VL	L	M	H	VH
动力电池 SOC	VL	VL	L	M	H	VH
	L	VL	L	M	H	VH
	M	VL	L	M	H	VH
	H	VL	L	M	M	M
	VH	VL	VL	VL	VL	VL

3) 模糊规则优化

为进一步提升模糊控制器对整车等效氢耗的优化效果,精确匹配动力电池 SOC 状态,结合燃料电池发动机与动力电池的最优工作区域,分别设置 7 个模糊子集,将燃料电池发动机输出功率分为 8 个模糊子集,其中,高效工作区分为 3 个子集,低功率和高功率区分别划分为 2 个子集。模糊子集范围及子集分割如表 4 所示,其中,Z 为零,VL 为很低,L 为低,ML 为中低,M 为中,MH 为中高,H 为高,VH 为很高。

表 4 模糊集范围及语言

参数	模糊子集范围	模糊子集分割
整车功率需求 P_{req}	[0,120]	VL,L,ML,M,MH,H,VH
动力电池 SOC	[0,1]	VL,L,ML,M,MH,H,VH
燃料电池发动机功率 P_{fc}	[0,115]	Z,VL,L,ML,M,MH,H,VH

由于燃料电池动态响应较为疲软,频繁启动会加剧燃料电池老化,且功率较低时燃料电池发动机效率较小。因此,在燃料电池需重新启动且功率需求较小时,若动力电池 SOC 未达 VL 状态则限制燃料电池发动机的启动。当燃料电池发动机功率需求较高时,电堆产热量增加,导致冷却系统需求功率增大,控制策略将依据动力电池 SOC 状态调整燃料电池发动机输出。3 个参数的隶属度函数如图 6 所示,优化后的模糊规则表如表 5 所示。

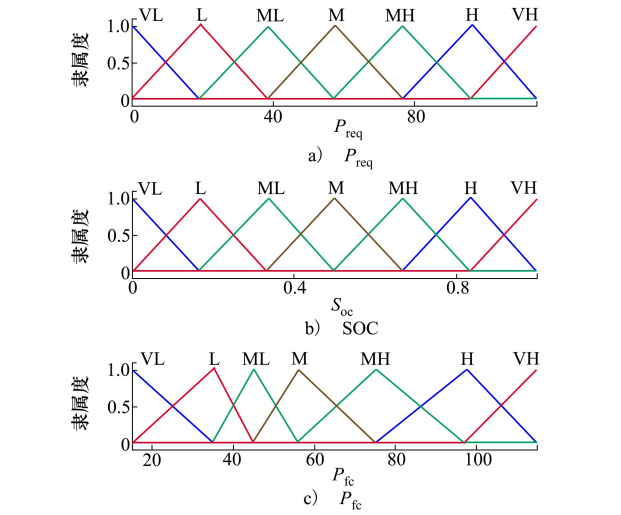


图 6 模糊子集优化后的输入输出量隶属度函数

表 5 模糊规则模糊子集优化后的模糊控制规则表

燃料电池		整车需求功率						
输出功率		VL	L	ML	M	MH	H	VH
动力电池 SOC	VL	VL	L	ML	M	MH	H	VH
	L	VL	L	ML	M	MH	H	VH
	ML	VL	L	ML	M	MH	H	VH
	M	VL	L	ML	M	MH	H	VH
	MH	VL	L	ML	ML	M	M	M
	H	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL
	VH	Z	VL	VL	VL	VL	VL	VL

4) 解模糊化

解模糊化是模糊控制器设计的最后阶段,通过将燃料电池发动机输出功率进行解模糊操作,模糊子集优化前后的燃料电池功率分布图如图 7 所示。

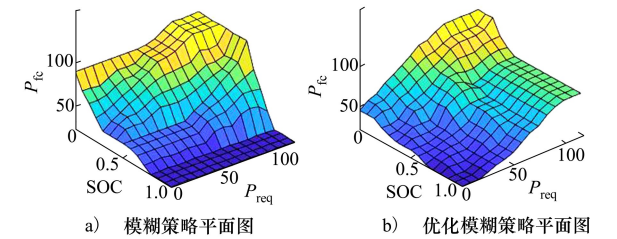


图 7 燃料电池系统功率分布图

3 控制策略仿真验证与对比分析

结合燃料电池卡车参数与性能指标,选取新欧洲行驶循环(NEDC)作为仿真工况,通过整车动力学模型分析,在该工况下整车需求功率如图 8 所示。

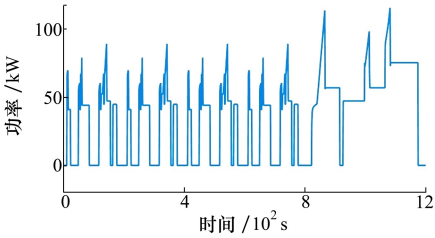


图 8 燃料电池卡车需求功率

为验证本文提出的节能优化与协同控制策略,设置基于功率跟随的模糊控制策略为基准,该策略中未考虑冷却系统等辅助部件的功率消耗,与本文中基于等效氢耗最小的模糊控制策略及子集优化后的控制策略进行对比。在 NEDC 工况下燃料电池发动机与动力电池的输出功率变化情况如图 9~10 所示。

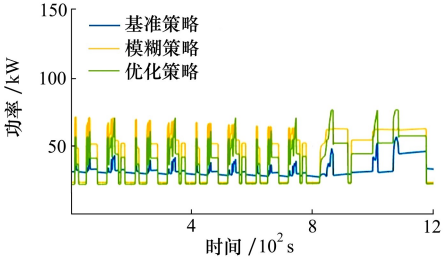


图 9 3 种策略下燃料电池发动机输出功率

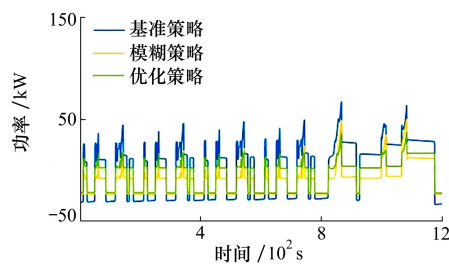


图 10 3 种策略下动力电池输出功率

从图 9 和图 10 可见,在基准策略中,动力电池 SOC 状态为主要标准,整车需求功率多由动力电池提供。在动力电池 SOC 较高的情况下,燃料电池发动机长时间运行在低效率区域,该情况不仅提高了动力电池的循环次数,也不利于整车等效氢耗的降低。在对模糊规则进行优化后,燃料电池发动机输出功率有所提高,但低效率区间占比仍较大。采用以等效氢耗最小为目标的策略优化模糊规则和模糊子集后,不仅显著增加了燃料电池发动机在高效区的工作时间,同时促进动力电池发挥平衡高峰和填补低谷的作用,从而在一定程度上减少了对动力电池循环使用寿命的损耗,实现了更优的系统综合性能。此外,通过优化模糊子集与隶属度函数,有效减少燃料电池发动机启停与变载次数,提升高效率区间工作时间占比,有助于提升燃料电池电堆的使用寿命,降低性能衰减。

燃料电池系统辅助部件的输出功率如图 11 所示。在基准策略下仿真时,燃料电池长时间处于低功率状态下工作,因此各辅助部件功率较低,表现出平稳的功率变化,但对负载变化的响应效果较差。经过模糊规则优化后,系统对负载变化的响应速度显著提高,但功率变化频繁且不稳定,经常出现高功率输出,稳定性较差。而优化后的模糊策略在负载变化时能够快速响应,且功率波动幅度较小,在保证系统温度的同时维持较好的功率稳定性。

将动力电池初始 SOC 统一设置为 70%,图 12 为 3 种策略下动力电池 SOC 的变化情况。使用基准策略进行仿真时,动力电池使用情况较多,在车辆低功率运行时以充电为主,而在 800 s 之后的高速工况条件下,动力电池迅速放电, SOC 下降较为明显。在对模糊规则进行优化之后,动力电池 SOC 的波动较小,优化后的模糊策略能更有效地将电池的电量维持在一个更稳定的范围内。进一步采用等效氢耗策略对模糊规则及模糊子集进行优化后,动力

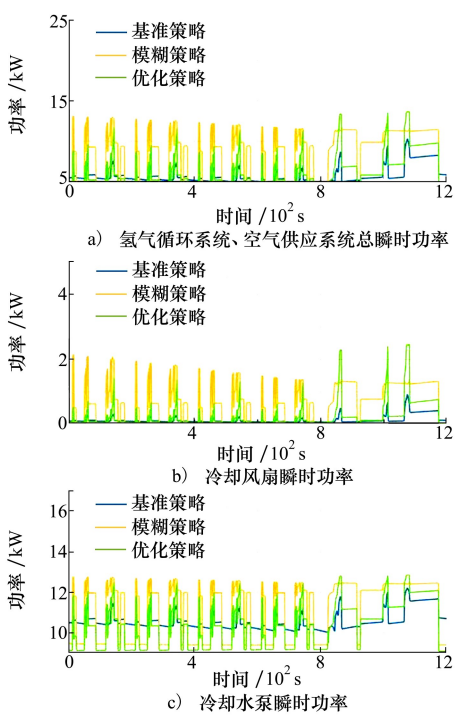


图 11 燃料电池系统辅件功率

电池 SOC 下降幅度进一步减小,燃料电池发动机提供整车驱动的主要动力。结果表明,通过控制策略优化能够降低混合动力系统对动力电池的依赖,同时有效提升动力电池的剩余寿命。

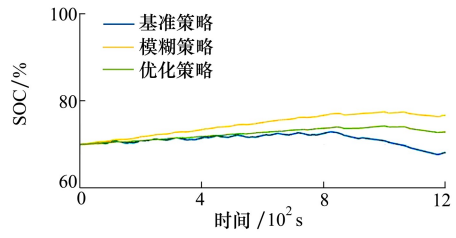


图 12 3 种策略下动力电池 SOC

图 13 为 NEDC 仿真工况下 3 种控制策略等效氢耗量,表 6 为数据对比。由图 13 和表 6 可知,基准策略即采用基于功率跟随思想的模糊控制策略,在保证车辆动力性基础上,百公里氢耗为 10.897 kg,与公开的实车验证数据报告相符。采用本文提出的节能优化与协同控制思想优化规则后的模糊控制策略进行仿真,百公里等效氢耗为 10.021 kg,降低了 8.04%。基于等效氢耗最小思想的优化策略根据燃料电池发动机工作效率将输出功率分为 8 个模糊子集,根据冷却系统等辅助部件的功耗优化功率分配策略,从而维持燃料电池发动机

工作在高效区域,百公里等效氢耗为 9.818 kg,降低了 9.90%,有效提升了整车燃料经济性。

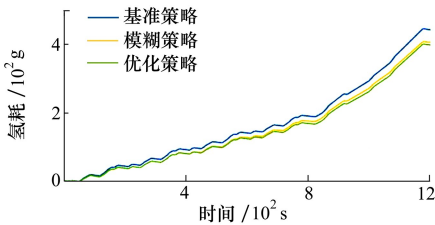


图 13 等效氢耗量

表 6 NEDC 仿真工况下各控制策略等效氢耗量			
控制策略	等效氢耗量	降低百分比/%	
基准策略	10.897/(kg · (100 km) ⁻¹)		
模糊策略	10.021/(kg · (100 km) ⁻¹)	8.04	
优化策略	9.818/(kg · (100 km) ⁻¹)	9.90	

从图 14 可见,基准策略下温度波动较小,整体保持在 9~13 K 之间;模糊策略下温度波动较大,尤其在 400~800 s 之间出现明显的高峰和低谷,温度变化频繁;而优化策略在 400 s 之前表现出与标准策略类似的温度控制稳定性,在 400 s 之后更好地控制了温度波动,使其在合理范围内保持稳定,尽管在 600 s 之后仍有一些波动,但幅度较小,整体保持在 8~13 K 之间。结果表明,本文提出的节能优化与协同控制思想优化规则后的模糊控制策略在减少氢耗的同时达到了燃料电池系统温度控制要求。

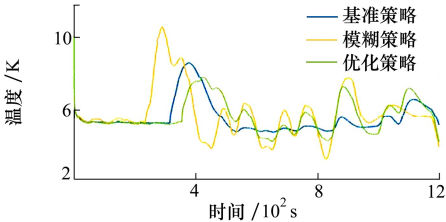


图 14 电堆出入口温差

4 结 论

本文以某型燃料电池卡车混合动力系统为例进行研究,主要结论如下:

- 1) 通过对大功率燃料电池动力系统结构分析,确立了以 PEMFC 发动机为主、锂电池为辅的混合动力配置,并基于 Matlab/Simulink 仿真构建了燃料电池发动机和动力电池效率模型以及动力系统氢耗模型,为节能优化策略提供了评价基准。
- 2) 提出并验证了基于等效氢耗最小思想的节能优化与协同控制策略,将冷却系统等辅助部件的功率消耗纳入优化目标,设计模糊控制器,并根据燃料电池发动机工作效率区间优化模糊子集与隶属度函数。
- 3) 仿真结果表明,所提策略能有效降低等效氢耗,在保障整车动力需求与燃料电池反应温度的基础上减少辅助部件能耗,模糊策略等效氢耗降低 8.04%,优化策略等效氢耗降低 9.90%。同时减少了燃料电池发动机的启停与大功率拉载次数,有效延缓燃料电池电堆老化,提升整车经济性。

参考文献:

[1] 谭旭光,余卓平. 燃料电池商用车产业发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 7
TAN Xuguang, YU Zhuoping. Development status and prospects of fuel cell commercial vehicle industry[J]. Engineering Sciences Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 7 (in Chinese)

[2] YUAN Yuxin, YUAN Xiaodong. Does the development of fuel cell electric vehicles be reviving or recessional? Based on the patent analysis[J]. Energy, 2023, 272: 127104

[3] 陈刚群,符一凡. 燃料电池重型卡车的发展建议及对策[J]. 专用汽车, 2023(5): 1-6
CHEN Gangqun, FU Yifan. Development suggestions and countermeasures for fuel cell heavy-duty trucks[J]. Special Purpose Vehicle, 2023(5): 1-6 (in Chinese)

[4] WU J, WEI Z, LI W, et al. Battery thermal-and health-constrained energy management for hybrid electric bus based on soft actor-critic DRL algorithm[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2021, 17(6): 3751-3761

[5] 陈家一,高帷韬,贾璐,等. 燃料电池汽车动力系统及能量管理策略研究进展[J]. 中南大学学报, 2024, 55(1): 80-92
CHEN Jiayi, GAO Weitao, JIA Lu, et al. Research progress on powertrain and energy management strategy of fuel cell vehicle [J]. Journal of Central South University, 2024, 55(1): 80-92 (in Chinese)

- [6] 王瑞鑫, 孙桓五, 刘世闯, 等. 大功率型燃料电池重卡能量管理策略的研究[J]. 机械设计与制造, 2023(12): 199-204
WANG Ruixin, SUN Huanwu, LIU Shichuang, et al. Research on energy management strategy of high power fuel cell heavy truck[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(12): 199-204 (in Chinese)
- [7] MENG X, LI Q, WANG X, et al. A fuel cell vehicle power distribution strategy based on PEMFC online identification and ESS equivalent consumption calculation[C]//IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, 2020
- [8] HU Y, DEFOURNY B. Optimal price-threshold control for battery operation with aging phenomenon: a quasiconvexity optimization approach[J]. Annals of Operations Research, 2017(6058): 1-28
- [9] 尹燕莉, 张鑫新, 潘小亮, 等. 基于等效因子的 Q 学习燃料电池汽车能量管理策略[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(4): 785-795
YIN Yanli, ZHANG Xinxin, PAN Xiaoliang, et al. Equivalent factor of energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicles based on Q-Learning[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2022, 13(4): 785-795 (in Chinese)
- [10] 宋震, 闵德豪, 陈会翠, 等. 基于强化学习和路况信息的燃料电池汽车能量管理策略[J]. 同济大学学报, 2021(1): 49
SONG Zhen, MIN Dehao, CHEN Huicui, et al. Energy management strategy of fuel cell vehicles based on reinforcement learning and traffic information[J]. Journal of Tongji University, 2021(1): 49 (in Chinese)
- [11] ASLAM R, INGHAM D, ISMAIL M, et al. Simultaneous thermal and visual imaging of liquid water of the PEM fuel cell flow channels[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(2): 311-318
- [12] ZHAO J, HUANG Z, JIAN B, et al. Thermal performance enhancement of air-cooled proton exchange membrane fuel cells by vapor chambers[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 213: 112830
- [13] XU Z, YAN Y, WEI W, et al. Supply system of cryo-compressed hydrogen for fuel cell stacks on heavy duty trucks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(23): 12921-12931
- [14] 朱仲文, 汪鑫, 江维海, 等. 氢燃料电池汽车整车集成式热管理系统研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(11): 1991-2000
ZHU Zhongwen, WANG Xin, JIANG Weihai, et al. Research on integrated thermal management system of hydrogen fuel cell vehicle[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(11): 1991-2000 (in Chinese)
- [15] 戴刘亮. 燃料电池发动机水热管理仿真分析综述[J]. 内燃机与配件, 2021(3): 50-53
DAI Liuliang. Simulation models for water and thermal management of proton exchange membrane fuel cells engine: a review[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(3): 50-53 (in Chinese)
- [16] 刘罗祥, 宋珂. 质子交换膜燃料电池冷启动研究综述[J]. 佳木斯大学学报, 2020, 38(1): 131-133
LIU Luoxiang, SONG Ke. A review on cold start of proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Jiamusi University, 2020, 38(1): 131-133 (in Chinese)
- [17] 陈维荣, 胡斌彬, 李奇, 等. 基于动态规划的混合动力有轨电车能量管理方法[J]. 西南交通大学学报, 2020(5): 903-911
CHEN Weirong, HU Binbin, LI Qi, et al. Energy management method for hybrid electric tram based on dynamic programming algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020(5): 903-911 (in Chinese)
- [18] 林歆悠, 叶锦泽, 王召瑞. 融合工况预测的燃料电池汽车里程自适应等效氢耗最小控制策略[J]. 工程科学学报, 2023, 46(2): 376
LIN Xinyou, YE Jinze, WANG Zhaorui. Trip distance adaptive equivalent hydrogen consumption minimization strategy for fuel-cell electric vehicles integrating driving cycle prediction[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 46(2): 376 (in Chinese)
- [19] 刘琦, 詹跃东, 李瑞棋. 燃料电池汽车能量管理策略多目标优化研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(20): 6
LIU Qi, ZHAN Yuedong, LI Ruiqi. Research on a multi-objective optimization energy management strategy for fuel cell electric vehicles[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(20): 6 (in Chinese)

Research on energy-saving optimization strategies of high-power hydrogen fuel cell power systems

ZHU Dan¹, WANG Han¹, SHU Chen¹, NING Shichao¹,
GUO Zhirui², ZHAO Xuan¹

(1.School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710026, China;
2.School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Temperature regulation stand and hydrogen consumption as pivotal benchmarks in the assessment of fuel cell vehicle performance. To enhance the thermal control efficiency and fuel economy of high-power fuel cell power systems, this study formulates a model for a high-power hydrogen fuel cell power system. It meticulously scrutinizes the energy consumption of auxiliary components, notably cooling systems, and devises a power allocation strategy founded on fuzzy logic control, ensuring precise temperature control. Introducing a collaborative optimization control approach for heat and power, aimed at minimizing overall hydrogen consumption, constitutes a central aspect of this paper. Leveraging the parameters of a 115 kW fuel cell truck, the study conducts simulation analysis of control and optimization strategies utilizing the Matlab/Simulink platform. Results underscore the superiority of the collaborative optimization control strategy, demonstrating noteworthy 8.04% and 9.9% reduction in equivalent hydrogen consumption per 100 kilometers compared to the power following control strategy. These findings affirm the efficacy of the proposed strategy in optimizing energy consumption.

Keywords: hydrogen fuel cell; power system; energy saving optimization; collaborative control; fuzzy control

引用格式:朱丹, 王晗, 舒晨, 等. 大功率氢燃料电池动力系统节能优化策略研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(5): 828-837

ZHU Dan, WANG Han, SHU Chen, et al. Research on energy-saving optimization strategies of high-power hydrogen fuel cell power systems[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(5): 828-837 (in Chinese)