

基于模糊控制的燃料电池汽车能量管理研究*

刘静^{1,2}, 孙闫²

(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)

摘要: 搭建整车模型、电池模型及燃料电池模型,设计模糊控制策略,并针对模糊控制策略中隶属度函数制定主观性问题,开发禁忌搜索算法对模糊控制中的隶属度函数进行迭代优化,最后通过算法建模与仿真计算验证上述策略的可行性。仿真结果表明,所提出的控制策略可有效分配燃料电池和电池的输出电流,延长燃料电池使用寿命,续航里程提升 3.8%。

关键词: 汽车;燃料电池;能量管理;模糊控制;禁忌搜索算法

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)04-0011-03

燃料电池通过氢氧化学反应生成水,同时产生电能给车辆供电,其间燃料电池不会产生任何有害气体排放,因而近年来燃料电池在大巴车上得到推广应用,并逐步推广到乘用车。文献[3]分析了基于燃料电池和电池,基于超级电容、电池和燃料电池,基于超级电容和燃料电池的混合动力系统及能量管理策略。文献[4]认为燃料电池内部电化学和热力学反应缓慢,限制了其响应电气负载瞬态变化的速率,当超级电容器或电池与燃料电池搭配并用作辅助存储元件时,系统可通过削峰填谷的方式利用辅助存储单元快速响应负载的瞬态变化。文献[5]在车辆中引入混合动力系统,将燃料电池与牵引电机所需的电流分离,从而使燃料电池尽可能接近其高效区。文献[6]通过电池或超级电容回收减速和再生制动器制动产生的能量提高系统的能量利用效率,减少燃料电池系统规模,降低系统总质量。另一方面,混合拓扑和复杂的能量流给系统提供了额外的自由度。可见,能量管理是影响燃料电池汽车动力性、经济性的关键。该文基于模糊控制策略研究燃料电池汽车的能量管理策略。

1 能源系统建模

1.1 整车模型

对于基于电池和燃料电池的混合动力车辆,对瞬时功率需求进行数学建模具有重要意义。整车阻力包含滚动阻力、空气阻力、加速阻力和坡道阻力,整车需求功率计算方式如下:

$$P_m = \frac{(F_w + F_f + F_i + F_j)v}{\eta_m} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_w = 0.5C_d A \rho v^2 \\ F_f = mgC_r \cos\theta \\ F_i = mg \sin\theta \\ F_j = \delta_m m \frac{dv}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_m 为整车需求功率; F_w 为空气阻力; F_f 为滚动阻力; F_i 为坡道阻力; F_j 为加速阻力; v 为车辆速度; η_m 为机械传动效率; C_d 为空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ 为空气密度; m 为整车质量; C_r 为滚动阻力系数; θ 为坡道角度; δ_m 为旋转质量校正系数。

1.2 电池模型

电池模型由一个电阻和可变电电压源组成,电池在放电状态下的输出 V_{li} 为:

$$V_{li} = E_{li} - I_{li} \cdot R_{dch} [1 - e^{-t/(R_{dch} \cdot c_p)}] \quad (3)$$

式中: E_{li} 为空载电压; I_{li} 为电池电流; R_{dch} 为放电电阻; t 为输出电压的采样时间; c_p 为极化电容。

电池在充电状态下的输出及剩余电量为:

$$V_{li} = E_{li} + I_{li} \cdot R_{ch} [1 - e^{-t/(R_{ch} \cdot c_p)}] \quad (4)$$

$$SOC = SOC_i - \left(\frac{1}{C_{li}} \int I_{li} dt \right) \times 100 \quad (5)$$

式中: R_{ch} 为充电电阻; SOC_i 为电池初始电量; C_{li} 为电池容量。

1.3 燃料电池模型

燃料电池作为混合动力车辆的增程器,其输出电压可用能斯特瞬时电压方程表示为:

* 基金项目: 南京交通职业技术学院科研基金项目(JZ2104);江苏省重点研发计划(BE2018343-1)

$$V_{fc} = N(E - V_{loss}) \quad (6)$$

$$V_{loss} = V_{om} + V_{con} + V_{act} \quad (7)$$

式中: V_{fc} 为系统输出电压; N 为单体个数; E 为每个电堆的可逆电压, 按式(8)计算; V_{loss} 为燃料电池系统损耗电压; V_{om} 为欧姆电压; V_{con} 为浓度电压; V_{act} 为活化电压。

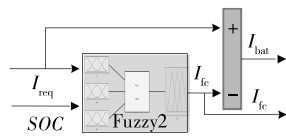
$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} (\ln P_{hyd} + 0.5 \ln P_{oxg}) \quad (8)$$

式中: T_{fc} 为燃料电池组的温度; P_{hyd} 为阳极侧氢气压; P_{oxg} 为阴极侧氧气压。

2 能量管理策略

2.1 策略制定

在不同负载需求下, 若电源之间的功率分配没有得到适当管理, 没有有效的能量管理系统控制设计, 则可能导致系统不稳定。为此, 提出一种基于模糊逻辑的能量管理单元, 用于根据需求电流和电池的 SOC 生成参考电流(见图 1)。利用 MATLAB 中的 Fuzzy Logic 工具箱对模糊控制器进行定义, 采用适应性较好的三角形隶属度函数。模糊控制有 2 个输出, 一个是电机需求电流, 另一个是燃料电池输出电流。电机一方面接收燃料电池和电池提供的电流并将电能转化为机械能, 此时需求电流为负; 另一方面也可将制动能量转化为电能, 此时电流为正。因此, 需求电流范围为 $[-120, 65]$ A, 包括 4 个模糊子集, 分别为 {NB, NS, PS, PB}; SOC 范围为 $[0.1, 0.95]$, 包括 5 个模糊子集 {LVS, LS, LM, LB, LVB}。考虑到燃料电池系统开启后一方面要满足电机的需求电流, 另一方面多余的电流要供给电池充电, 燃料电池输出电流范围为 $[-180, 0]$ A, 包括 5 个模糊子集 {NVS, NS, NM, NB, NVB}。模糊控制规则见表 1、图 2。



I_{req} 为需求电流(A); I_{fc} 为燃料电池电流(A); I_{bat} 为电机电流(A);
SOC 为电池电量(%)

图 1 模糊控制策略

2.2 策略优化

模糊控制解决了燃料电池和电池输出对电流控制的问题。然而模糊规则及权重系数的设置依赖个

表 1 模糊控制规则

SOC	不同需求电流 I_{req} 下的燃料电池电流 I_{fc}			
	NB	NS	PS	PB
LVS	NVB	NVB	NVB	NB
LS	NVB	NVB	NB	NM
LM	NB	NB	NS	NM
LB	NS	NM	NS	NS
LVB	NVS	NVS	NVS	NVS

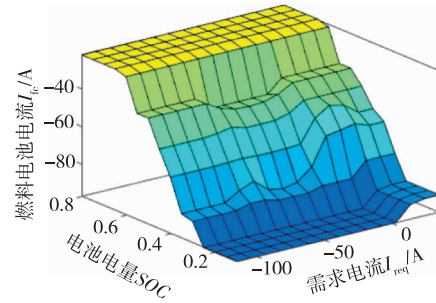


图 2 模糊控制规则

人经验, 无法达到最佳控制效果。为此, 以续航里程为优化目标对模糊控制策略进行优化, 期望在相同的初始及终止条件下车辆能行驶最远距离。优化对象为模糊控制的隶属度函数, 权重系数设为 1。

将续航里程作为优化函数, 通过禁忌搜索算法进行迭代寻优, 优化对象为双层模糊控制的隶属度函数及权重系数。优化过程如下: 将各隶属度函数端点及顶点依次作为禁忌搜索算法的向量, 令其为 $(X_1, X_2, X_3, \dots)$; 通过对整车模型进行离线仿真计算一次补充能源车辆续航里程, 根据禁忌搜索算法编写 MATLAB 脚本文件并不断更新 $(X_1, X_2, X_3, \dots)$, 达到终止条件时, 对应隶属度函数分布即为最终优化结果。图 3 为需求电流隶属度函数优化结果。SOC 及燃料电池输出电流的隶属度函数优化过程与需求电流隶属度函数优化过程相似, 不再赘述。

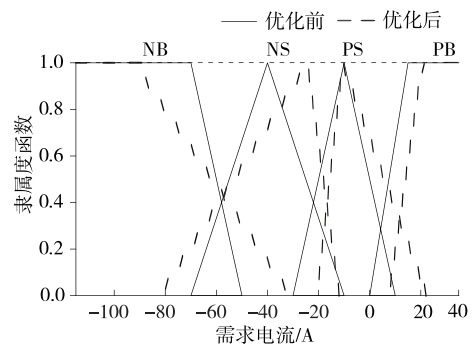


图 3 需求电流隶属度函数优化结果

3 结果与讨论

在世界轻型汽车试验规程(WLTP)下进行仿真与优化,经过禁忌搜索算法优化后的续驶里程(221.5 km)相比优化前(213.3 km)提高 8.2 km。图 4 为 WLTP 工况下需求电流,图 5 为电池 SOC 的变化,图 6 为电池电流的变化,图 7 为燃料电池电流的变化。图 4 中电流为正表示制动,电流为负表示驱动;图 6 中电流为正表示充电,电流为负表示放电。

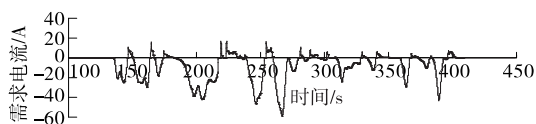


图 4 需求电流的变化

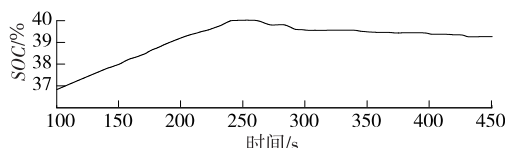


图 5 电池 SOC 的变化

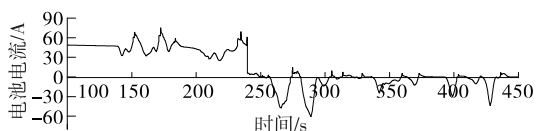


图 6 电池电流的变化

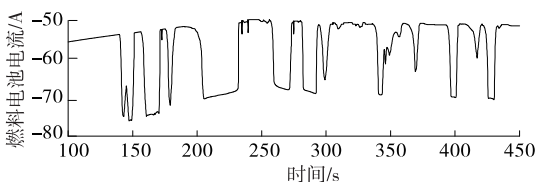


图 7 燃料电池电流的变化

从图 4~7 可看出:需求电流变化快速,但燃料电池输出电流波动较小,需求电流中的高频变化部分由电池提供或吸收,燃料电池输出平稳可有效提高其使用寿命;开始时电池 SOC 快速上升,到达 40% 时保持稳定,此时燃料电池和电池的输出电流处于平稳阶段,相较于 SOC 快速上升阶段,其电流变化范围减小,对保护电池及燃料电池有利。

4 结语

搭建整车模型、电池模型及燃料电池模型,设计模糊控制策略,并开发禁忌搜索算法对模糊控制中的隶属度函数进行迭代优化。仿真结果表明,所提

出的控制策略可有效分配燃料电池和电池的输出电流,能提升整车续驶里程和燃料电池的使用寿命。该控制策略可行性强,可应用于实车中,同时可为整车控制器开发提供理论基础。

参考文献:

- [1] 马丽,孙鹏,张秋.我国氢燃料电池汽车发展前景探究[J].专用汽车,2021(8):83-85+90.
- [2] 李晓易,谭晓雨,吴睿,等.交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):15-21.
- [3] SHARMA R,GYERGYEK S,LI Qingfeng,et al.Evolution of the degradation mechanisms with the number of stress cycles during an accelerated stress test of carbon supported platinum nanoparticles[J].Journal of Electroanalytical Chemistry,2019,838:82-88.
- [4] 屈鹏程,李嘉诚.PHEV 能量管理策略和电池配置多参数协同优化[J].汽车实用技术,2021,46(23):51-53.
- [5] 李永恒,陈洁,李菲晖,等.氢气制备技术的研究进展[J].电镀与精饰,2019,41(10):22-27.
- [6] 孙振广.纯电动客车复合电源系统寿命研究[J].农业装备与车辆工程,2021,59(10):117-121.
- [7] ZHANG T,WANG P Q,CHEN H C,et al.A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition[J].Applied Energy,2018,223:249-262.
- [8] 田晟,吕清.基于粒子滤波算法的动力电池容量估计模型研究[J].公路与汽运,2019(5):1-5.
- [9] 王成尧,王志伟,王涛.混合型氢燃料电池城市客车能量管理策略[J].客车技术与研究,2021,43(1):4-6.
- [10] 周金应,徐磊,程前,等.基于负荷跟随阈值变化规则的并联混合动力汽车能量管理策略[J].公路与汽运,2021(4):1-7.
- [11] 程啸宇,张炳力,李傲伽,等.基于 Cruise/Simulink 氢燃料电池混合动力客车能量管理策略研究[J].客车技术与研究,2020,42(3):8-11+27.
- [12] 徐小红,韦尚军,覃记荣,等.基于模糊控制理论的燃料电池汽车能量管理策略研究[J].河南科技,2020(16):95-98.
- [13] 张异,田维民.基于模糊控制的燃料电池列车能量管理研究[J].应用能源技术,2013(4):1-5.
- [14] 赵荣海,王军政.基于模糊控制的燃料电池混合动力系统能量管理研究[J].上海汽车,2018(2):3-8.
- [15] 崔鹏飞,沈英,赵凯烨.基于模糊控制的燃料电池汽车动力源能量管理[J].机械制造与自动化,2020,49(4):177-179+187.