

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306329

基于模糊的氢燃料电池时序采样能量控制方法*

骆俊伟¹ 陆建山¹ 周鸿波¹ 潘文松²

(1. 浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023; 2. 杭州康代思锐生物科技有限公司 杭州 311103)

摘要:氢燃料电池汽车的能量管理系统对燃料电池寿命、耐久、经济性等性能起着重要作用。在对经典模糊控制策略的改进基础上,解决控制策略存在的燃料电池输出功率变载频繁的问题,以时序规则进行优化设计,根据燃料电池运行特性、工作效率点以及道路工况具备的特点提出了一种基于时序周期采样的控制策略,通过对车辆搭载燃料电池和动力电池输出功率的控制,完成能量管理策略优化。针对一款实际运营的燃料电池公交车在等速工况和中国典型城市公交循环工况下,使用不同控制策略时的氢耗、燃料电池输出功率状态、动力电池荷电状态变化等数据进行分析,发现设计的控制策略能有效降低燃料电池变载次数,提高燃料电池使用寿命,在氢耗方面比功率跟随策略、开关控制策略有明显优势,在初始动力电池荷电状态为60%条件下,后两者策略氢耗分别增加了3.98%和27.88%。

关键词:氢燃料电池;能量管理;模糊控制;算法策略

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

Fuzzy based sequential sampling energy control method for hydrogen fuel cells

Luo Junwei¹ Lu Jianshan¹ Zhou Hongbo¹ Pan Wensong²

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Hangzhou KDx Biotechnology Co., Ltd., Hangzhou 311103, China)

Abstract: The energy management system of hydrogen fuel cell vehicles plays an important role in the performance of fuel cell lifespan, durability, and economy. On the basis of improving the classic fuzzy control strategy, the problem of frequent load changes in the output power of fuel cells in the control strategy is solved. The optimization design is carried out using temporal rules, and a control strategy based on temporal period sampling is proposed based on the operating characteristics, efficiency points, and road conditions of fuel cells. By controlling the output power of vehicles equipped with fuel cells and power batteries, complete the optimization of energy management strategies. An analysis was conducted on the hydrogen consumption, fuel cell output power status, and power cell charge state changes of a fuel cell bus in actual operation under constant speed conditions and typical urban bus cycle conditions in China, using different control strategies. It was found that the designed control strategy can effectively reduce the number of fuel cell load changes, improve the service life of the fuel cell, and compare the hydrogen consumption with the power following strategy, the switch control strategy has obvious advantages. Under the initial state of charge of the power battery of 60%, the hydrogen consumption of the latter two strategies increased by 3.98% and 27.88%, respectively.

Keywords: hydrogen fuel cell; energy management; fuzzy control; algorithm strategy

0 引言

传统燃油车是碳排放的一个重要因素,因此中国乃

至世界都在大力发展新能源汽车产业^[1-3],作为新能源汽车技术路线之一的氢燃料电池汽车正逐渐走入大众视野,步入商业化发展道路^[4-5]。

氢燃料电池汽车通常包含两种或以上动力源以适应

不同工况下车辆运行需求,而多动力源的控制需要协调,不同能量源的性质也不尽相同,搭载有多个动力源的车辆需要一个合适的管理系统来统筹各部分能源的输出状态,以保证整车能够有正常的发挥,即多能源的最优匹配问题^[6]。该系统的研究关键在于能量管理策略,策略的好坏决定了能量管理系统的控制效果以及对氢耗量的节能效果。

目前对氢燃料电池汽车的能量管理策略可分为基于规则的管理策略^[7]和基于优化的管理策略^[8-9],两类策略具有不同的应用特点^[10]。基于规则的能量管理策略通常需要制定对应规则,依靠一定的研究或者经验等信息做出决策,它接收、处理输入信息如实时车速、燃料电池系统状态、动力电池荷电状态(state of charge, SOC)、行驶功率需求等,通常会设置相关的门限值、切换点并以一定的逻辑规则进行定义控制。基于优化的能量管理策略会设定优化目标以全局控制手段或是单目标优化方法进行控制,通常需要进行建立优化方程并计算得到最优解来实现优化策略的目的,这一方法依赖较多的计算,控制手段可以适应多种理论方法。

于瀛霄等^[11]提出了一种双层模糊控制策略,控制需求电流工作在高效区间内的基础上增加了一层模糊控制约束燃料电池输出变化速率,以人工蜂群算法对模糊控制器的隶属度函数和权重系数进行优化,降低了燃料电池耐久损耗,优化续航里程,在变载速率方向上提出了控制思路。刘楠等^[12]通过研究功率跟随策略中动力电池 SOC 限值和超级电容充电功率参数的影响,设计了 Z 曲线法和 PI 调节法来降低电池波动率,也研究了不同调节方式下的氢耗量变化。张瑞亮等^[13]在功率跟随策略基础上采用低通滤波器将整车需求功率划分为低频、高频两个部分并由氢燃料电池和动力电池分别提供,同时用模糊控制器来调整低通滤波器中的截止频率,设计了基于低通滤波器的自适应能量管理策略,保证了车辆的动力性和经济性,降低了波动度,该策略可用于处理燃料电池输出功率的波动。武小花等^[14]提出了一种基于工况更新构建可变模糊规则的能量管理方法,其研究以动态规划下的最优功率分配结果进行模糊控制,最终得到一种较优的控制策略,在该策略控制下,相较于实车能量管理策略,降低了氢耗量,提高了经济性,能维持锂电池 SOC 在合适的区间。黄珍珍^[15]通过 BP 神经网络(backpropagation neural network)建立 4 个子模型,提出了一种在线多目标能量管理策略,结果显示经济型得到提升。

现有研究在变载次数、氢燃料电池短时间内的输出特性等影响燃料电池性能等方面还未深入开展,据此本研究在功率跟随的模糊控制策略基础上设计了定周期模糊控制策略,能够保证车辆动力性能的同时减少氢燃料

电池变载次数,在一定程度上降低了整体氢耗量,提升了燃料电池耐久性能,提高燃料电池寿命,增加经济性。

1 整体架构

如图 1 所示,氢燃料电池汽车通过空压机将空气输入,主要利用其中的氧气参与反应,氢气经由车载的氢气罐输入,在燃料电池系统中电堆中反应产生电流,经升压变换器进入高压配电系统,进一步分配能量给电机从而驱动车辆行驶。同时,作为辅助能源,动力电池能够在氢燃料电池输出功率不足的情况下对外输出电量,保证电机具备合适的运行功率来满足车辆的动力性需求。

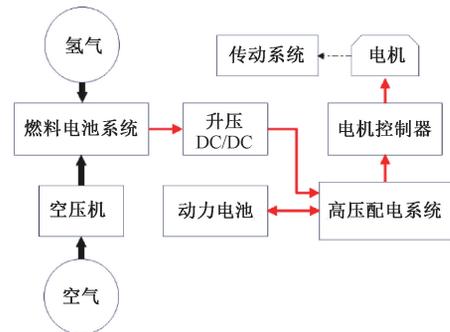


图 1 氢燃料电池汽车架构

Fig. 1 Hydrogen fuel cell vehicle architecture

在设计氢燃料电池汽车能量管理系统时,评价指标有经济性、耐久性等,需要关注氢耗量这一数据,同时应该使燃料电池和动力电池工作在合理区间以延长其使用寿命。

氢燃料电池在不同输出功率下具有不同的效率点,现有研究^[8]表明燃料电池应尽量工作在高效率区间,控制策略应考虑效率区间分布。

氢燃料电池公交车主要运行在城市公交线路,因此关注中国典型城市公交循环工况(typical city cycle bus working conditions in China, CCBC 工况)。根据车辆动力学公式,忽略坡度阻力功率项,可得实际计算式为:

$$P_e = \frac{1}{\eta_r} \left(\frac{Gfu_a}{3\ 600} + \frac{C_d A u_a^3}{76\ 140} + \frac{\delta m u_a}{3\ 600} \frac{du}{dt} \right) \quad (1)$$

式中: P_e 代表车辆需求功率, η_r 为传动系统效率, G 为整车半载重量, f 为滚动阻力系数, u_a 为实时车速, C_d 为风阻系数, A 为车辆迎风面积, δ 为旋转质量换算系数, m 为车辆半载质量。

2 策略设计

2.1 策略要求

如图 2 所示,驾驶员依据外界道路信息做出驾驶判

断,对加速、制动踏板进行操作,整车控制器(vehicle control unit,VCU)根据当前车辆行驶速度、电机转速、踏板开度等信息计算出对应驾驶需求转矩,而能量管理系统则根据制定的能量管理策略以及输入的需求转矩、动力电池 SOC、氢燃料电池及动力电池当前输出功率、车辆速度等信息做出决策,对氢燃料电池和动力电池的输出功率进行控制,从而实现满足动力需求和两个动力源的功率分配,分配的结果依据策略的情况会带来不同的效果。

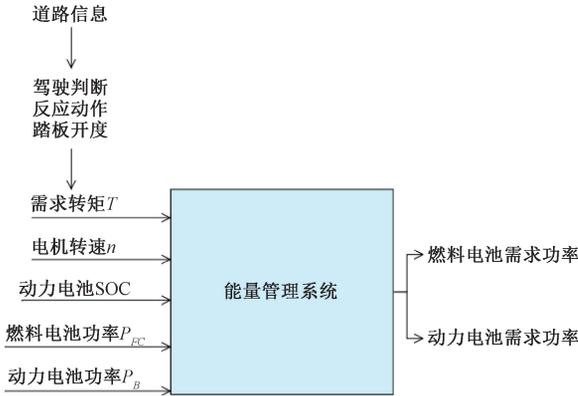


图 2 控制策略示意图

Fig. 2 Schematic diagram of control strategy

对于外界输入,在实验中,主要以设置工况计算获得的整车需求功率作为参考,以此代替由驾驶员踏板开度计算获得需求转矩这一过程,结合动力电池实时 SOC 输入到控制策略模块进行分析和决策,输出燃料电池以及动力电池需求功率对车辆进行控制,并获得相关数据。

2.2 模糊策略

模糊控制策略是一种非线性控制手段^[16-17],在氢燃料电池汽车的能量管理系统中使用这一策略可以有效应对多变、未知的外界状态,合理控制燃料电池输出。

1) 输入数据模糊化

氢燃料电池公交车在行驶过程中主要受驾驶员操纵意图影响,当驾驶员踩下加速、制动踏板时,踏板开度能够对应行驶车辆的需求功率,此时功率参数即为模糊控制的输入参数之一。此外,由于车辆包含氢燃料电池(fuel cell, FC)和动力电池(battery, B)两部分,同时动力电池的 SOC 是影响动力电池性能、寿命、安全等各项指标的重要因素,在不同的 SOC 状态下对氢燃料电池和动力电池两者进行不同比例的能量输出分配,因此动力电池 SOC 也是模糊控制输入量。

需求功率以及动力电池 SOC 的隶属度函数使用三角(trimf)和梯形(trapmf)函数进行描述。

2) 建立模糊规则库

将输入量模糊化后,需要将模糊语言对应到输出量

即燃料电池的功率的确定。当动力电池 SOC 很高时,整车能量分配策略优先考虑更多使用动力电池作为整车功率来源,以实时降低动力电池 SOC 避免动力电池产生过充问题,对整体经济性有所提升,并有利于保护动力电池寿命。当动力电池 SOC 很低时,其已经不具备继续向外输出的能力,此时需要提高燃料电池的输出能力来满足整车运行需求,同时对动力电池进行充电使 SOC 上升到合适区间以便其能够继续实现削峰填谷的作用,配合燃料电池进行优化运作。当动力电池 SOC 处于中间合适范围时,燃料电池和动力电池协作配合,工作在理想状态。根据这些规则,制定如表 1 所示模糊控制规则。Pre 表示整车需求功率。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rule table

SOC	Pre				
	L	M1	M2	M3	H
L	M1	M1	L	L	L
M1	M2	M2	M1	L	L
M2	M3	M3	M2	M1	L
M3	H	M3	M3	M2	L
M4	H	H	H	M3	M1
H	H	H	H	H	M1

3) 解模糊

模糊控制的最后一个阶段便是对上面分析得到的模糊量进行解模糊操作,在此策略中,采用重心法对其进行解模糊,转化为真正的控制量,即燃料电池的输出功率,如图 3 所示。

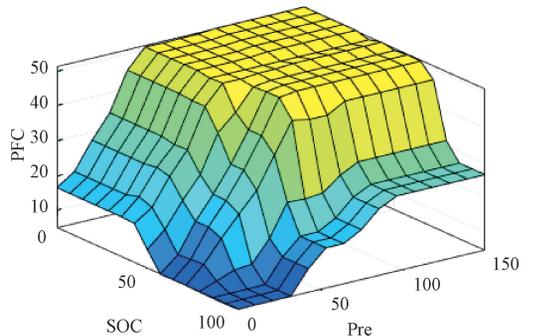


图 3 模糊控制器曲面

Fig. 3 Fuzzy controller surface

2.3 基于模糊的时序采样控制策略

传统模糊策略能针对多变的外界输入控制输出响应,但在研究中发现其变载次数较为频繁。其他控制策略同样缺少对减少控制燃料电池输出功率变载次数的策略研究,而变载次数的控制对燃料电池耐久性存在一定影响^[18]。基于此,设计了一种基于模糊的氢燃料电池时

序采样能量控制策略,目的是解决一般控制策略下出现的燃料电池输出功率频繁变载问题。

在前面根据专家经验获取的燃料电池模糊控制策略后,策略给出的燃料电池输出功率及动力电池输出功率已能够对外界需求功率形成实时响应,但外界功率需求波动大,变化频率快,如果燃料电池对此进行无差别响应,会恶化燃料电池的性能,因此考虑在满足功率需求同时降低燃料电池的响应次数。

1) 改进控制方法

在传统模糊控制基础上增加定周期采样控制方法,通过制定采样周期,读取不同时间点上初次模糊控制后的燃料电池输出功率值,以此参考值作为实际燃料电池受控功率大小,在下次采样前燃料电池均以此值作为功率输出参数,在采样得到控制信号并传给燃料电池之后的一个周期内,燃料电池的输出功率不会发生波动,形成稳定的对外输出功率工作点。这样能够减轻燃料电池系统的变载负担,空压机等辅助部件的工作条件同样得到了优化,降低了变载损耗。由于动力电池的响应速度快,实际需求功率中不足功率将由动力电池进行实时补足,当燃料电池功率大于需求功率时,多余能量将对动力电池进行充电,如图 4 所示。

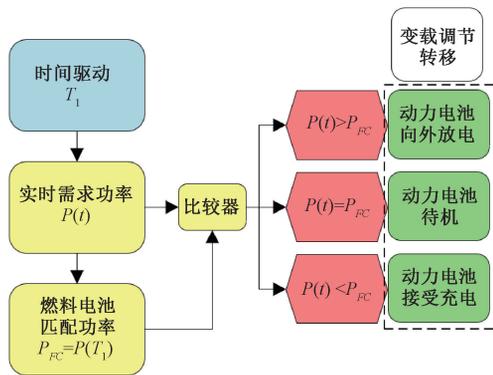


图 4 优化控制变载转移示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optimized control load transfer

2) 采样周期的选择

针对策略控制周期的选择,综合考虑燃料电池本身的工作效率、输出能力及动力电池的峰值放电能力。动力电池以峰值放电持续时间根据动力电池系统技术规范, SOC $\geq 30\%$ 时,放电持续时间不小于 120 s,特制定 60 s 的周期参数,燃料电池每 60 s 响应一次外界需求功率,对自身工作功率进行调整,在长工作期内能够满足动力需求。

3) 工作状态分析

在燃料电池进行定功率输出时,根据实际需求功率的大小,燃料电池输出功率与实际功率差值将影响到动力电池的工作状态,动力电池输出状态分为输出与

不输出。动力电池的峰值放电能力有限,但根据策略,在遇到大功率需求时,短时间内由动力电池放电补充,燃料电池能够在该段时间内准备拉升,提高输出能力,在下一周期内功率能够满足实际需求功率,同时动力电池不再需要以峰值功率对外放电,既利用了动力电池的快速响应特性又保证了动力电池不会长期以高放电倍率工作。

这样的工作模式形成了燃料电池长时间稳定输出,成为车辆的主要输出动力源,在过功率、欠功率工况时由动力电池进行充放电工作,综合功率满足实际需求。

在该策略控制下,被控燃料电池能减少变载次数,降低功率波动率,提升燃料电池的耐久性能,延长燃料电池使用寿命。

3 仿真与分析

根据国内某款实际运营的 8.5 m 氢燃料电池公交车^[19]的模型参数作为研究数据进行分析,使用实际运行车辆的数据可以让研究策略更贴合应用需求。

实验用到的氢燃料电池,通过实验室测试数据给出其效率功率曲线如图 5 所示。

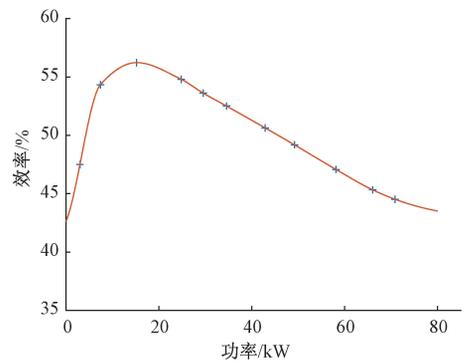


图 5 氢燃料电池效率-功率曲线

Fig. 5 Efficiency-power curve of hydrogen fuel cell

通过 MATLAB Simulink 搭建氢燃料电池能量管理系统模型,软件仿真的形式能缩短实验周期,减少设备投入^[20],图 6 采用开关控制策略、功率跟随策略以及改进的基于模糊的采样控制策略,根据 CCBC 工况和前述车辆参数作为仿真对象,在不同初始动力电池 SOC 下循环多个工况,分析燃料电池输出功率的状态、动力电池输出功率的状态、动力电池 SOC 变化^[21]、氢气消耗量以及行驶里程等数据,比较各个策略控制性能,以验证前面提出的控制策略效果。其中 SOC 估计方法采用安时积分法^[22]进行设计。

实验用到的参数为实际运行的整车数据,如表 2 所示。

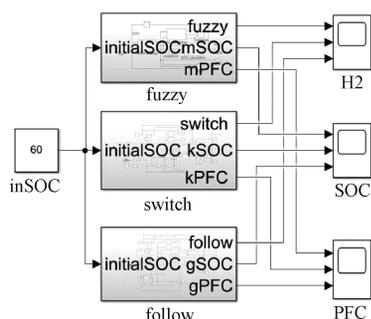


图 6 仿真系统

Fig. 6 simulation system

表 2 车辆及部件参数

Table 2 Vehicle and component parameters

项目	参数	
整车	满载质量/kg	12 200
	车辆转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	1.05
	车辆迎风面积 S/m^2	6.7
	风阻系数	0.65
	轮胎半径/m	0.452
	主减速器速比	6.14
	传动系统效率	0.95
	空气阻力系数	0.65
	额定/峰值功率/kW	81/150
电机	额定/峰值转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1 300/2 600
	额定/峰值扭矩/Nm	595/1 850
	燃料电池发动机额定功率/kW	60
燃料电池	燃料电池发动机峰值功率/kW	60.5
	工作电压范围/V	145~290
	额定总电压/V	515.2
	额定容量/Ah	106
	电池组电压范围/V	400~584
动力电池	总能量/kWh	54.6
	额定:1 C	
	电池组放电能力	最大:2 C/脉冲

3.1 能量管理策略模型

1) 开关控制策略

开关控制策略依据输入的需求功率与动力电池 SOC 值大小,设定阈值,并在切换点处做出判断,对燃料电池的输出功率进行控制,基本控制形式可以是燃料电池的工作与否,也可以是燃料电池的分层功率输出,如图 7 所示。

2) 功率跟随策略

功率跟随策略同样依照动力电池 SOC 和需求功率作为控制的输入参数,以燃料电池的功率参数作为输出量。当动力电池 SOC 大于设定上限值、需求功率小于燃料电池的额定输出功率时,将燃料电池关闭,整车动力需求由动力电池提供。当动力电池 SOC 大于规定的下限

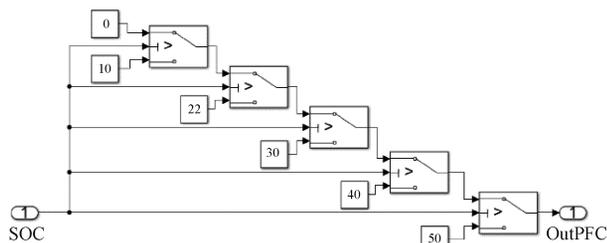


图 7 开关控制策略仿真模型

Fig. 7 Simulation model of switching control strategy

值,需求功率不大于 1.2 倍的燃料电池额定功率时,燃料电池输出功率做出跟随动作,与其上一状态保持一致,这能够减少燃料电池变动与开关次数,延长寿命^[23]。图 8 为功率跟随策略示意图,其中 P_{re} 为整车需求功率, P_{FC} 为燃料电池额定功率, SOC 为动力电池荷电状态。

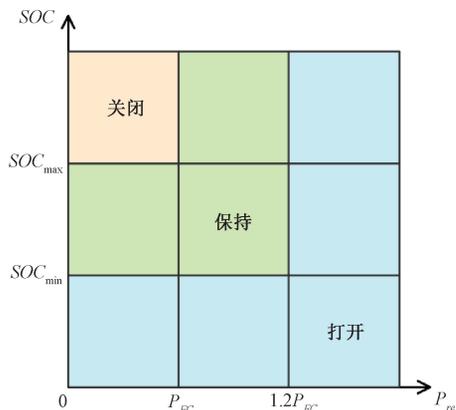


图 8 功率跟随策略示意图

Fig. 8 Schematic diagram of power following strategy

3) 改进的采样模糊策略

在 Simulink 平台上建立改进的采样模糊策略模型,输入动力电池 SOC 以及需求功率 P_{re} ,经过经典模糊策略输出控制功率,再以定周期采样获取实际控制功率,经过迭代计算最终输出燃料电池输出功率 P_{FC} 、动力电池控制功率 P_B 以及动力电池充电功率 P_{Bch} ,如图 9 所示。

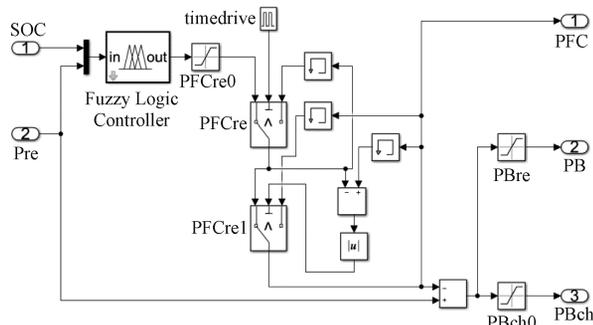


图 9 模糊控制仿真模型

Fig. 9 Fuzzy control simulation model

3.2 仿真结果

利用上述模型,对经典模糊策略和改进的时序采样策略进行比较。对于经典模糊控制策略,燃料电池输出功率变动率较大,在短时间内经过多次功率拉升及回落,燃料电池处于较为频繁的变载工况当中。文献[18]研究表明,变载对燃料电池性能影响较大,影响燃料电池健康状态,使其性能衰退,还有相关研究^[24]指出,反复变载会引起电位循环,造成 Pt 颗粒粗大化,进而减少燃料电池寿命。同时,受燃料电池本身反应原理,燃料电池内部反应速率控制受气体流速等因素影响,不能达到快速响应的效果。使用改进的采样模糊策略时,图 10 仿真结果显示,初始 SOC 为 60% 条件下,在一个 CCBC 工况中燃料电池仅经过 6 次变载,在少变载情况下配合合理的燃料电池加载速率控制策略,不仅实现针对外界需求功率由燃料电池匹配输出满足整车动力性,还能保证一定的健康状态,提升燃料电池寿命。

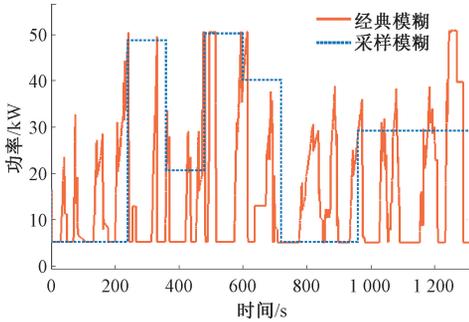


图 10 模糊与改进策略输出功率对比

Fig. 10 Comparison of output power between fuzzy and improved strategies

首先通过 40 km/h 等速行驶工况对改进的时序采样控制策略、开关策略、功率跟随策略进行研究验证。参考一个 CCBC 工况为 1 314 s,重复 4 个循环时长为 5 256 s,给定不同的车辆初始动力电池 SOC 值,在 5 256 s 运行时长后,3 个控制策略的相关控制结果和对比数据如表 3 所示。

表 3 等速工况仿真结果

Table 3 Simulation results of constant speed condition

策略	初始 SOC/%	工况结束 SOC/%	百公里等效氢耗/kg	氢耗增量
采样模糊	80	46.2	4.401	0
	60	43.5	4.521	0
	30	35.2	4.949	0
开关策略	80	57.4	4.452	+1.17%
	60	54.3	4.538	+0.38%
	30	50.0	6.079	+22.84%
功率跟随	80	50.0	5.188	+17.90%
	60	78.9	5.908	+30.68%
	30	49.0	5.908	+19.38%

从不同车辆动力电池初始 SOC 下的仿真结果来看,在动力电池 SOC 值较低时,控制策略会限制燃料电池的功率输出在较高位,进而导致氢耗增加,符合控制要求。而从 3 类策略对比控制效果来看,同一初始 SOC 条件下,改进的采样模糊策略氢耗量均低于其他两类控制策略。

实验中分别给定初始动力电池 SOC 为 30%、60%、80%,循环 4 个 CCBC 工况,对其结果(如表 4 所示)进行分析。

表 4 CCBC 工况仿真结果

Table 4 CCB working condition simulation results

策略	初始 SOC/%	工况结束 SOC/%	百公里等效氢耗/kg	氢耗增量
采样模糊	80	61.7	6.587	0
	60	49.5	7.297	0
	30	42.8	8.815	0
开关策略	80	68.8	6.619	+0.49%
	60	63.4	7.588	+3.98%
	30	60.2	10.203	+15.75%
功率跟随	80	74.2	8.072	+22.55%
	60	74.4	9.332	+27.88%
	30	68.6	10.849	+23.08%

在 CCBC 运行工况下,设计的采样模糊策略在同样初始 SOC 条件下,其氢耗量均低于开关策略以及功率跟随策略。初始 SOC 为 80% 条件下,开关策略和功率跟随策略的氢耗分别增加 0.49% 和 22.55%,在初始 SOC 为 60% 条件下,后两者策略氢耗分别增加 3.98% 和 27.88%,在初始 SOC 为 30% 条件下,开关策略和功率跟随策略氢耗分别增加 15.75% 和 23.08%。同时,与燃料电池使用寿命相关联的变载次数参数也得到了优化,增加了燃料电池使用寿命。可以看出,中国典型城市公交循环工况下,设计的时序采样控制方法在氢耗方面具有一定优势。

4 结论

在基于规则的控制方法中着重研究了模糊控制策略,基于经典模糊控制策略改进设计了时序采样的氢燃料电池能量管理策略,提出了优化控制变载转移调节的理念并通过 MATLAB Simulink 搭建了仿真模型进行验证。

针对一款氢燃料电池公交车,给定不同的初始动力电池 SOC,在 40 km/h 等速工况以及 CCBC 工况下分别对开关控制策略、功率跟随策略的控制效果进行比较。结果发现设计的策略能够减少燃料电池变载次数,降低功率波动,延长燃料电池的使用寿命。等速工况中

在动力电池初始 SOC80%条件下氢耗量分别比开关控制策略和功率跟随策略要低 1.17%、17.09%,CCBC 工况下在动力电池初始 SOC80%条件下氢耗量分别比开关控制策略和功率跟随策略要低 0.49%、22.57%。在该策略控制下提升了一定的经济性。

未来计划从实车数据加载、改进时序调节参数、引入智能方法调节控制、增加控制预测性等方面作进一步深入研究,以改善目前燃料电池控制方面存在的问题。

参考文献

- [1] 王建建,张秀丽,胡辰树. “双碳”背景下氢燃料电池专用车发展现状与趋势分析[J]. 专用汽车,2022(4): 1-4.
WANG J J, ZHANG X L, HU CH SH. Analysis of the development status and trends of hydrogen fuel cell special purpose vehicles under the background of “Dual Carbon” [J]. Special Purpose Vehicles,2022(4):1-4.
- [2] MANOHARAN Y, HOSSEINI S E, BUTLER B, et al. Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect [J]. Applied Sciences, 2019, DOI: 10.3390/app9112296.
- [3] 黄琳,赵毅. 中国新能源技术加码世界杯 氢能源汽车引关注[N]. 中国经营报,2022-12-05 (B16), DOI: 10.38300/n.cnki.nzgjy.2022.003452.
HUANG L, ZHAO Y. China's new energy technology plus world cup hydrogen energy vehicles attract attention [N]. China Business Daily, 2022-12-05 (B16), DOI: 10.38300/n.cnki.nzgjy.2022.003452.
- [4] 邹才能,马锋,潘松圻,等. 论地球能源人类发展规律及碳中和愿景[J]. 石油勘探与开发,2022(2):1-19.
ZOU C N, MA F, PAN S Q, et al. Earth energy evolution, human development and carbon neutral strategy [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022(2):1-19.
- [5] 徐硕,余碧莹. 中国氢能技术发展现状与未来展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2021,23(6):1-12.
XU SH, YU B Y. Current status and future prospects of hydrogen energy technology development in China [J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021,23(6):1-12.
- [6] 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.
CHENG X Y, ZHANG B L, LI AO J, et al. Research on energy management strategy of hydrogen fuel cell hybrid buses based on Cruise/Simulink. [J] Bus Technology and Research, 2020,42(3):8-11,27.
- [7] 宋昱,韩恺,李小龙. 基于规则的能量管理策略对燃料电池汽车整车经济性影响研究[C]. 2019 中国汽车工程学会年会论文集(2),2019:217-224.
SONG Y, HAN K, LI X L. Study on the fuel economy of fuel cell electric vehicle based on rule-based energy management strategies [C]. Proceedings of the 2019 Annual Meeting of the Chinese Society of Automotive Engineers (2),2019:217-224.
- [8] 甘锐,李奇,江淑娜,等. 考虑燃料电池效率区间优化的混合动力系统双模式能量管理方法[J]. 中国电机工程学报,2021,41(20):7027-7039.
GAN R, LI Q, JIANG SH N, et al. Dual-mode energy management method considering optimization of fuel cell efficiency range [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021,41(20):7027-7039.
- [9] 李强. 基于多目标优化的燃料电池汽车能量管理策略研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
LI Q. Research on energy management strategy of fuel cell vehicles based on multiobjective optimization [D]. Hefei:Hefei University of Technology,2021.
- [10] 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):31-36.
LIU Q, ZHAN Y D, LI R Q. Research on a multi-objective optimization energy management strategy for fuel cell electric vehicles [J]. Electronic Measurement Technology, 2020,43(20):31-36.
- [11] 于瀛霄,孙闫,夏长高,等. 燃料电池汽车双层模糊控制能量管理策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2022,36(8):21-28.
YU Y X, SUN Y, XIA CH G, et al. Energy management strategy of double layer fuzzy control for fuel cell vehicles[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022,36(8):21-28.
- [12] 刘楠,于博轩,郭爱,等. 燃料电池混合动力的功率跟随管理策略分析[J]. 西南交通大学学报,2020,55(6):1147-1154.
LIU N, YU B X, GUO AI, et al. Analysis of power following management strategy for fuel cell hybrid power [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020,55(6):1147-1154.
- [13] 张瑞亮,陈淮,刘森海,等. 基于低通滤波的大功率型氢燃料电池重型货车自适应能量管理策略[J]. 汽车工程,2021,43(11):1693-1701,1729.
ZHANG R L, CHEN ZH, LIU S H, et al. Adaptive

- energy management strategy for high power hydrogen fuel cell heavy-duty truck based on low pass filter [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43 (11): 1693-1701,1729.
- [14] 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 ZH W, ZHU ZH L, et al. Fuzzy energy management strategy of fuel cell buses [J]. *Journal of Jilin University (Engineering Edition)*, 2022, 52 (9): 2077-2084.
- [15] 黄珍珍. 基于 BP 神经网络的燃料电池汽车在线多目标能量管理策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.
HUANG ZH ZH. Research on online multi-objective energy management strategy based on bp neural network for fuel cell vehicle [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [16] 葛媛媛,张宏基. 基于自适应模糊滑模控制的机器人轨迹跟踪算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(5):746-755.
GE Y Y, ZHANG H J. Trajectory tracking algorithm for robot based on adaptive fuzzy sliding mode control [J] *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017,31 (5): 746-755.
- [17] SHEN D, LIM C C, SHI P. Fuzzy model based control for energy management and optimization in fuel cell vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, DOI:10.1109/TVT.2020.3034454.
- [18] 路凯. 质子交换膜燃料电池动态响应特性分析及寿命预测研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
LU K. Dynamic response analysis and life prediction of proton exchange membrane fuel cell[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2020.
- [19] 朱昕宇. 氢燃料电池客车混合动力系统能量管理策略研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2021.
ZHU X Y. Hydrogen fuel cell bus hybrid power system energy management strategy study [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2021.
- [20] 陈倩倩,王勇,田硕,等. 基于 MATLAB 的模拟电阻炉过程控制实验设计[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(11):7-11.
CHEN Q Q, WANG Y, TIAN SH, et al. Design of simulation experiment of resistance furnace process control system based on MATLAB[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020,39 (11): 7-11.
- [21] 陈媛,何怡刚,李忠. 电池变温度模型似然函数参数辨识及 SOC 估计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(12):1-9.
CHEN Y, HE Y G, LI ZH. Battery variable temperature model parameter identification by likelihood estimation and SOC estimation [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019,33 (12): 1-9.
- [22] 石伟杰,王海民. 基于锂离子电池热特性的 SOH 在线诊断模型研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 206-216.
SHI W J, WANG H M. Online diagnosis model of SOH based on thermal characteristics of lithium-ion battery[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020,41(8): 206-216.
- [23] 任雪双. 燃料电池健康状态(SOH)估计及整车能量管理策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
REN X SH. Research on fuel cell state of health (SOH) estimation and vehicle energy management strategy [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2021.
- [24] 杨丽丽. 考虑动力电池寿命衰减的燃料电池汽车能量管理策略研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
YANG L L. Research on energy management strategy of fuel cell vehicle considering battery life degradation[D]. Changchun:Jilin University, 2022.

作者简介



骆俊伟,2022 年于浙江工业大学获得学士学位,现为浙江工业大学硕士研究生,主要研究方向为氢燃料电池控制策略。

E-mail: luojw@zjut.edu.cn

Luo Junwei received his B. Sc. degree from Zhejiang University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Zhejiang University of Technology. His main research interests include hydrogen fuel cell and control strategy.



陆建山(通信作者),2008 年于南京理工大学获得学士学位,2013 年于南京理工大学获得博士学位,现为浙江工业大学副教授,主要研究方向为新能源汽车电控系统、燃料电池系统及相关测试设备的研发。

E-mail: lujiانشan@zjut.edu.cn

Lu Jianshan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2008 and Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2013, respectively. Now he is an associate professor in Zhejiang University of Technology. His main research interests include research and development of electronic control systems, fuel cell systems, and related testing equipment for new

energy vehicles.



周鸿波, 2003 年于华南理工大学获得学士学位, 2008 年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江工业大学高级工程师, 主要研究方向为新能源汽车、氢燃料电池。

E-mail: zhouhb@zjut.edu.cn

Zhou Hongbo received his B. Sc. degree from South China University of Technology in 2003 and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2008, respectively. Now he is a senior engineer in Zhejiang University of Technology. His main research interests include new energy vehicles and hydrogen fuel cells.



潘文松, 2008 年于南京理工大学获得学士学位, 2011 年于南京理工大学获得硕士学位, 现为杭州康代思锐生物科技有限公司机械工程师, 主要研究方向为自动化机械结构设计。

E-mail: wspan@kdxbiotech.com

Pan Wensong received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2008 and M. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2011, respectively. Now he is a mechanical engineer in Hangzhou KDX Biotechnology Co. His main research interest includes automated mechanical structure design.