DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.229 **中图分类号**：U461.8 **文献标志码**：A

基于模糊控制优化小波分解的 FCHEV 能量管理策略

严锐浩(中国电源学会学生会员)，许 亮
(天津市新能源电力变换传输与智能控制重点实验室(天津理工大学电气工程与自动化学院)，天津 300384)

摘要：为了提高燃料电池混合动力汽车 FCHEV(fuel-cell hybrid electric vehicle)的能耗经济性，改善燃料电池的运行环境，提出了首先使用小波变换分解车辆总线功率；然后将分解后的低频需求功率、动力电池的荷电状态作为模糊控制器的输入；随后计算燃料电池功率的能量管理策略，并使用遗传算法进行模糊规则的改进以提高控制效果；最后分别使用 Simulink 和 Cruise 搭建整车能量管理策略模型以及整车动力学模型，并在 CLTC-P 工况下进行联合仿真。所提出策略与基于功率跟随的控制策略相比，燃料电池的等效耗氢量下降 14%；车辆在更节能的同时，有效减少了燃料电池的启停次数与变载速率，延长了燃料电池的使用寿命。

关键词：燃料电池；锂离子电池；小波分析；模糊控制；能量管理策略

Fuzzy Control Based Optimized Wavelet Decomposition for FCHEV Energy Management Strategy

YAN Ruihao, *Student Member*, *CPSS*, XU Liang
(Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion, Transmission and Intelligent Control, School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to increase the energy efficiency of fuel-cell hybrid electric vehicle (FCHEV) and improve the operating environment of fuel cells, an energy management strategy is proposed. Firstly, wavelet transform is used to decompose the vehicle bus power, and the decomposed low-frequency demand power and the state of charge of the power battery are used as inputs to the fuzzy controller. Then, the output power of the fuel cell is calculated via the energy management strategy. Furthermore, genetic algorithm is used to improve the fuzzy rules and improve the control performance. Finally, a vehicle energy management strategy model is built, and a vehicle dynamics model using Simulink and Cruise respectively, and conduct joint simulation under CLTC-P operating conditions. Compared with the power following based control strategy, the proposed strategy reduces the equivalent hydrogen consumption of fuel cells by 14%. While the vehicle is more energy-efficient, it effectively reduces the start stop frequency and load change rate of fuel cells, thereby extending their service life.

Keywords: Fuel-cell；lithium-ion batteries；wavelet analysis；fuzzy control；energy management strategy

收稿日期：2023-10-25；**修回日期**：2023-12-08，2024-01-03；
录用日期：2024-01-28；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：国家自然科学基金资助项目(61975151, 61308120)；天津市科技重大专项与工程，互联网+新能源跨界融合创新示范工程项目资助项目(ZXHLGX00040)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grants 61975151 and 61308120; Project Supported by Major Scientific and Technological Special Projects and Projects in Tianjin, Internet and New Energy Cross-Border Fusion Innovation Demonstration Project under the garnt ZXHLGX 00040

随着环境污染问题和能源危机日益严峻，各国均在研究高效的清洁能源系统，燃料电池汽车应运而生。燃料电池作为 1 种清洁高效的发电装置，其在汽车上的运用具有良好的发展前景，但燃料电池的动态性能较差[1-3]，需要添加辅助能量源共同为车辆供电。在纯电动汽车方面，Wang 等[4]提出使

用锂离子电池与超级电容组成复合能源系统，验证了可利用辅助能量源的优秀动态性能为主能量源的功率输出进行削峰填谷，以提高整车能耗经济性。随后，将复合能源系统应用在燃料电池汽车上，解决了燃料电池动态特性较差的问题[5]，并利用辅助能量源吸收制动回收能量，进一步提高了车辆的能耗经济性。此外，可灵活配置燃料电池的功率以及辅助能量源的容量，以满足不同车型的使用需求[6-9]。

目前燃料电池混合动力汽车的控制策略有逻辑门限、功率跟随、模糊控制、自适应控制等[10-15]。近年来随着人工智能的迅速发展，部分学者提出了基于学习的控制策略，如王浩聪等[16]提出利用改进的 Q 学习算法，将神经网络与强化学习结合，使系统控制性能更优；部分学者提出了基于预测模型的控制策略[17]，通过建立预测模型，提前输出下一时刻辅助能量源的功率，以减少燃料电池的功率波动。但基于学习以及基于预测的控制策略对计算需求较大，其实用性受车载计算机的运算能力限制，目前尚未得到广泛应用。此外，现阶段能量管理策略的目标主要是对车辆动力经济性进行优化，对能量源损耗关注较少。

考虑到不同能量源的动态特性不同以及在工程中的实际应用价值，本文采用分层能量管理策略：上层使用小波变换对车辆总线功率进行分解，将分解的低频信号送入模糊控制器作为燃料电池的参考输出功率；下层的模糊控制器除了考虑燃料电池的参考功率，还将燃料电池工作效率作为输入变量，让燃料电池工作在高效区间，同时加入相应的约束条件，以减少燃料电池的开关机次数、降低变载速度，进而提高燃料经济性、延长燃料电池的使用寿命。

1 车辆参数选型

1.1 动力系统架构选型

目前燃料电池汽车的辅助能量源主要有超级电容和动力电池，可选择燃料电池+动力电池、燃料电池+超级电容、燃料电池+动力电池+超级电容等动力架构。由于超级电容的调节范围有限，且三能量源架构存在成本较高、控制复杂的问题，故本文使用燃料电池+动力电池的架构，整车动力系统拓扑如图 1 所示。为了解决燃料电池不可逆向充电和电压匹配问题，燃料电池使用单向升压 DC-DC 与车辆直流母线相连，使其与直流母线电压匹配。由于动力电池具有较为稳定的电压，故实现电压匹配较为容易，本文使用半主动式 DC-DC 方案，即动力电池直接与高压直流母线相连。相比于全主动式 DC-DC 方案，该方案可以减小系统的体积、节约成本，并减少 DC-DC 带来的损耗。

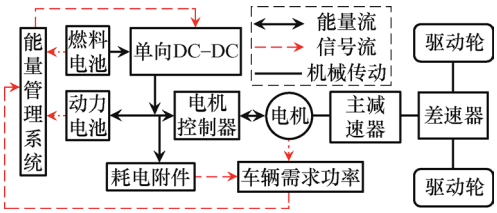


图 1 动力系统拓扑图

Fig. 1 Power system topology diagram

1.2 车辆基本参数及参数匹配

燃料电池混合动力汽车的动力系统主要包括驱动电机、燃料电池和锂离子电池。本文根据汽车行驶阻力以及电机转矩-功率特性方程，并利用 MATLAB App 设计了整车动力参数匹配系统，系统运行界面如图 2 所示、车辆的性能参数见表 1。该系统不仅可以根据车辆设计者给定的车辆性能指标，快速计算车辆电机的主要工作点、燃料电池的输出功率；还可根据所需的纯电续航里程，匹配动力电池的容量，并绘制出电机的外部参数特性曲线。

本文在进行参数匹配时，考虑车辆能在满载情况下满足动力性能，因此选择额定功率为 50 kW 的燃料电池作为车辆的主能量源。同时，考虑车辆的辅助能量源需要承担快速波动的总线功率，而磷酸铁锂电池具有较长的循环寿命和较高的安全性[18]，故选择额定容量为 20 A·h 的磷酸铁锂电池作为系统辅助能量源，最终驱动电机与动力电池的参数匹配见表 2。

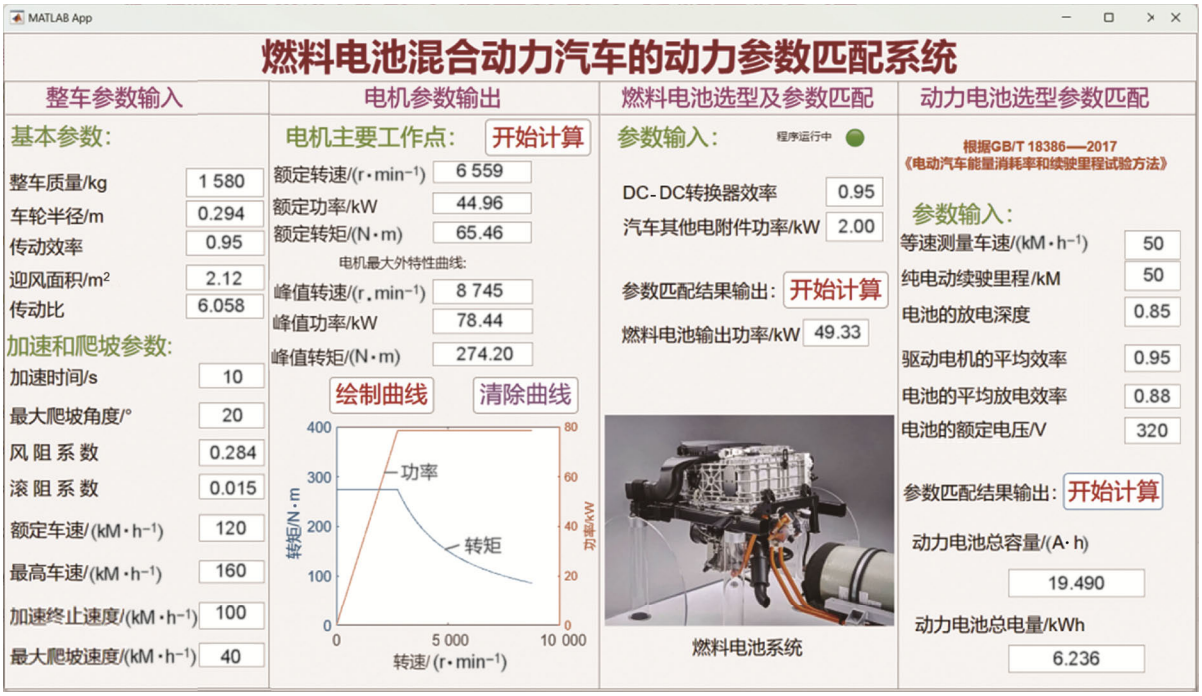


图 2　整车动力参数匹配系统

Fig. 2 Vehicle power parameter matching system

表 1　车辆基本参数

Tab. 1 Vehicle basic parameters

参数	数值
长，宽，高，轴距/mm	4 090, 1 745, 1 475, 2 480
整备质量，满载质量/kg	1 250, 1 580
迎风面积/m²	2.12
风阻系数，主减速比	0.278, 6.058
车轮半径/mm	294
最高车速/(km·h^{-1})	≥160
0~100 km·h^{-1} 加速时间/s	≤10

表 2　驱动电机与动力电池参数

Tab. 2 Drive motor and power battery parameters

参数	数值
电机额定电压/V	320
电机额定转速，最高转速/(r·min^{-1})	6 600, 8 800
电机额定功率，峰值功率/kW	45, 80
电机额定扭矩，峰值扭矩/(N·m)	65, 280
电池最低单体电压，额定单体电压，最高单体电压/V	2.20, 3.20, 3.65
电池额定单体容量/(A·h)	20
电池串联个数，并联个数	100, 1

1.3　燃料电池特征分析

燃料电池是车辆的主要能量源，本文使用的是某款额定功率为 50 kW 的燃料电池，其效率曲线如图 3 所示。由图可知，燃料电池在低输出功率阶段，随着功率的增长，效率也快速提升，在功率达到约 11 kW 时获得最高效率，随后转换效率开始下降。其中，输出功率在 4~30 kW 为燃料电池高效工作区间，该区间具有较高的燃料效率。

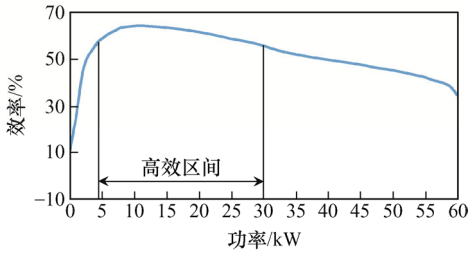


图 3　燃料电池效率

Fig. 3 Fuel cell efficiency map

2　基于模糊控制器优化小波的分层能量管理策略

2.1　基于需求功率的小波变换

由于燃料电池的动态特性较差，故考虑将总线信号分解为不同频率的信号。对于双能量源系统可

让燃料电池承担低频信号，由动力电池承担中、高频的功率波动，从而改善燃料电池的运行环境。小波变换可对信号进行多尺度变换，从而获取信号的不同频率分量。由于总线的功率信号是每隔 10 ms 采样的离散信号，故使用一维离散小波对原始信号进行分解，其分解表达式为

$$\begin{cases} W(\lambda,u)=\int_R x(t)\dfrac{1}{\sqrt{\lambda}}\psi\left(\dfrac{t-u}{\lambda}\right)\mathrm{d}t \\ x(t)=\sum\limits_{j\in\mathbf{Z}}\sum\limits_{k\in\mathbf{Z}}W(j,k)\psi_{j,k}(t) \end{cases} \tag{1}$$

式中：W 为小波系数；λ 为尺度因子，$\lambda=2^j$；u 为平移因子，$u=k2^j$；R 为积分区域，通常为实数；ψ 为小波函数；$x(t)$ 为原始信号；j、k 分别为离散尺度参数、离散平移参数；$\mathbf{Z}$ 为整数集。由于 Haar 小波基具有较短的紧支撑及良好的正交性和对称性，故其运算速度较高；但 Haar 小波的消失矩较小，可能会导致一定的细节损失。由于整车功率信号对实时性要求较高，而功率信号的细节损失可由动力电池弥补，故选择 Haar 小波对整车的功率信号进行分解。经过验证，使用三级小波分解具有较好的信噪比，可提取较好的频率特性。Haar 小波分解流程如图 4 所示。图中：$H_1(z)$、$H_2(z)$分别为高、低通滤波器；↓2 为 2 倍下采样；$x_1(t)$、$x_2(t)$、$x_3(t)$分别为最高频、中高频、中低频细节信号；$x_0(t)$为最低频的整体信号轮廓。

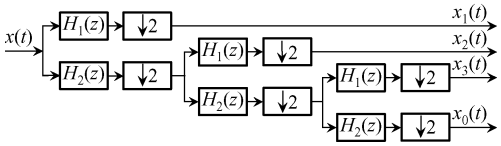


图 4 Haar 小波分解流程

Fig. 4 Haar wavelet decomposition process

虽然小波分解考虑了燃料电池的动态特性，但是未考虑燃料电池的工作效率特性，故将分解后的低频信号送入模糊控制器作为燃料电池的需求功率信号，通过模糊控制器优化燃料电池的输出功率，以进一步优化燃料电池的工作环境，从而提高燃料经济性，减少燃料电池的输出功率波动。

2.2 模糊控制器的设计

模糊控制器具有鲁棒性强、计算速度较快的特点，设计模糊控制器时应保证汽车满足功率运行需求，通过控制燃料电池的输出功率，进一步提高整车的燃料经济性、延长电源寿命。在汽车行驶过程中，由于复合能源系统的功率分配受当前功率需求、燃料电池效率以及动力电池荷电状态 SOC (state of charge)的影响，故它们均为该模糊控制器的输入变量。控制器模糊集合范围及子集分割见表 3，其中，Z 为数值 0、L 为低、ML 为中低、M 为中、MH 为中高、H 为高。

表 3 模糊集范围及语言

Tab. 3 Fuzzy set range and language

参数	模糊集范围	模糊子集分割
燃料电池需求功率 P_{req}	[0, 50]	L ML M MH H
动力电池 SOC	[0.1, 0.9]	L ML M MH H
燃料电池效率 η	[0, 1]	L M H
燃料电池输出功率 P_{out}	[0, 50]	Z L ML M MH H

2.3 模糊控制器规则制定

模糊控制器的核心是制定合适的规则库，本文的汽车能量均直接或间接来源于氢气，在车辆实际行驶中，燃料电池提供主要功率；动力电池作为辅助能量源，为燃料电池输出功率进行削峰填谷，尽量避免燃料电池在低效率区间运行，同时，动力电池负责刹车阶段的能量回收。在制定模糊规则时，首先考虑的因素是电池 SOC，当电池 SOC 较高且车辆需求功率较低时，仅由动力电池进行供电；当需求功率上升到一定程度时，燃料电池启动并尽可能工作在最佳效率点；当电池 SOC 下降且需求功率上升时，燃料电池逐步加大输出功率。

由于考虑了将燃料电池运行效率作为模糊控制器的输入，当系统检测到运行效率较低时，会适当限制燃料电池功率的进一步提升。因此，在短时大功率的需求场景下，控制器会优先使用动力电池承担较大的需求功率，使燃料电池尽可能工作在高效工作区间。当长时间的高功率需求导致电池 SOC 下降时，燃料电池才继续提升输出功率，使电池 SOC 维持在合理区间。此外，小波分解导致的低频功率信号损失，可在模糊控制规则里加入对 SOC 的补偿规则，使电池 SOC 能更好地维持在合理区

间内，本文制定的模糊规则见表 4。其中，S_{SOCbat} 为车辆电池包当前 SOC。

表 4　模糊逻辑规则表

Tab. 4 Fuzzy logic rule table

P_{out}	S_{SOCbat}	$P_{\mathrm{req}}(\eta=\mathrm{L})$					$P_{\mathrm{req}}(\eta=\mathrm{M})$					$P_{\mathrm{req}}(\eta=\mathrm{H})$				
		L	ML	M	MH	H	L	ML	M	MH	H	L	ML	M	MH	H
S_{SOCbat}	L	L	ML	ML	M	H	L	ML	M	MH	H	ML	M	MH	H	H
	ML	L	L	ML	M	MH	L	ML	M	M	MH	ML	ML	M	MH	H
	M	L	L	ML	ML	M	L	L	ML	M	MH	L	ML	M	MH	MH
	MH	Z	L	L	ML	ML	Z	L	ML	M	M	Z	L	ML	M	MH
	H	Z	Z	L	L	L	Z	Z	L	ML	ML	Z	Z	L	ML	M

2.4　模糊控制器的优化

由于模糊控制器受设计者主观影响较大，为了降低其影响，使用遗传算法对模糊控制器的隶属度函数进行离线寻优。本文利用历史迭代的运行数据，调整模糊控制器隶属度函数的取值和形状，从而在保证汽车动力经济性的前提下，整车等效氢耗量有效下降，同时兼顾燃料电池衰退与电池 SOC 的保持，本文的目标函数设计为

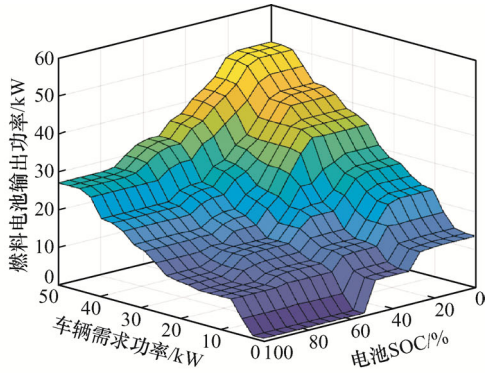
$$\begin{aligned}\mathrm{Min}F(x)=&\alpha(h_{2,\mathrm{mass}})+\beta(\Delta f_{\mathrm{fc,life}})+\\&\delta(S_{\mathrm{SOC}}(t)-S_{\mathrm{SOC}}(t_0))\end{aligned}\tag{2}$$

式中：α、β、δ 分别为氢耗、燃料电池寿命衰退、动力电池 SOC 保持性能的权重系数；$h_{2,\mathrm{mass}}$ 为氢气消耗质量；$\Delta f_{\mathrm{fc,life}}$ 为燃料电池的衰退值统计；$S_{\mathrm{SOC}}(t)-S_{\mathrm{SOC}}(t_0)$ 用来衡量一段时间内动力电池 SOC 的保持情况。此外，燃料电池在频繁启停、有害变载、长时间低功率工作或高功率工作运行时均会加快寿命衰减速度。可认为变载速率超过 $0.1P_{\mathrm{fc,max}}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ 时会产生有害变载，其中，$P_{\mathrm{fc,max}}$ 为燃料电池输出额定功率，本款燃料电池变载速率为 5 kW/s。在燃料电池输出高于额定功率的 80%或低于额定功率的 10%时，分别为高、低功率运行区间。由于每款燃料电池的衰退值不完全相同，故本文只统计燃料电池的启停次数，有害变载次数，以及在高、低功率运行的时间，并将其作为衰退计算指标。

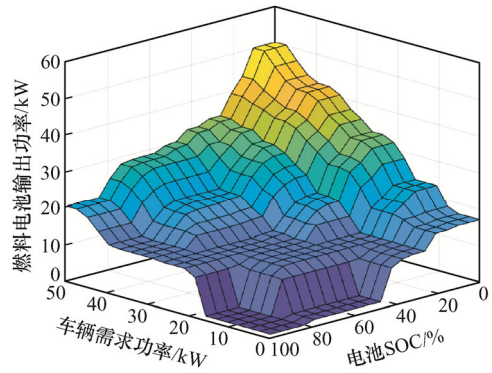
为了避免优化得到无效解，添加的约束条件为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{fc,min}}<P_{\mathrm{fc}}(t)<P_{\mathrm{fc,max}}\\P_{\mathrm{bat,\,chgmax}}<P_{\mathrm{bat}}(t)<P_{\mathrm{bat,outmax}}\\S_{\mathrm{SOC,min}}<S_{\mathrm{SOC}}(t)<S_{\mathrm{SOC,max}}\\P_{\mathrm{req}}(t)=P_{\mathrm{bat}}(t)+P_{\mathrm{fc}}(t)\cdot\eta_{\mathrm{dc}}(t)\end{cases}\tag{3}$$

式中：$P_{\mathrm{fc,min}}$、$P_{\mathrm{fc}}(t)$ 分别为燃料电池最低、当前输出功率；$P_{\mathrm{bat,chgmax}}$、$P_{\mathrm{bat}}(t)$、$P_{\mathrm{bat,outmax}}$ 分别为动力电池最大充电、当前输出、最大放电功率；$S_{\mathrm{SOC,min}}$、$S_{\mathrm{SOC}}(t)$、$S_{\mathrm{SOC,max}}$ 分别为动力电池最低、当前、最高荷电状态；$P_{\mathrm{req}}(t)$ 为整车当前需求功率；$\eta_{\mathrm{dc}}(t)$ 为单向 DC-DC 当前工作效率。经过离线寻优的模糊平面如图 5 所示。由图可知，经过优化后的模糊控制器进一步提高了车辆的能耗经济性，燃



(a) 未优化



(b) 优化后

图 5　模糊控制平面图

Fig. 5 Fuzzy control surface

料电池的功率波动也更加平缓。在中、高功率需求时首先利用动力电池削峰填谷，尽可能让燃料电池工作在高效区间内，仅当 SOC 较低时，才进一步提升燃料电池的输出功率使电池 SOC 维持在合理区间。

3 仿真验证与对比

3.1 仿真模型建立

本文使用 AVL-Cruise 进行车辆动力学建模，车辆模型由整车模块、动力模块、机械模块及多个功能模块组成，建立的模型如图 6 所示。车辆控制策略在 Simulink 中完成，通过 Cruise 中的 DLL 动态链接库，实现车辆信号在 Cruise 和 Simulink 之间的传递。基于这种联合仿真，Cruise 作为前台软件独立完成计算，Simulink 中设计的控制策略模块以编译好的.dll 文件植入 Cruise 中。在联合仿真计算时，无需在后台打开 Simulink，运行结果直接在 Cruise 中输出。

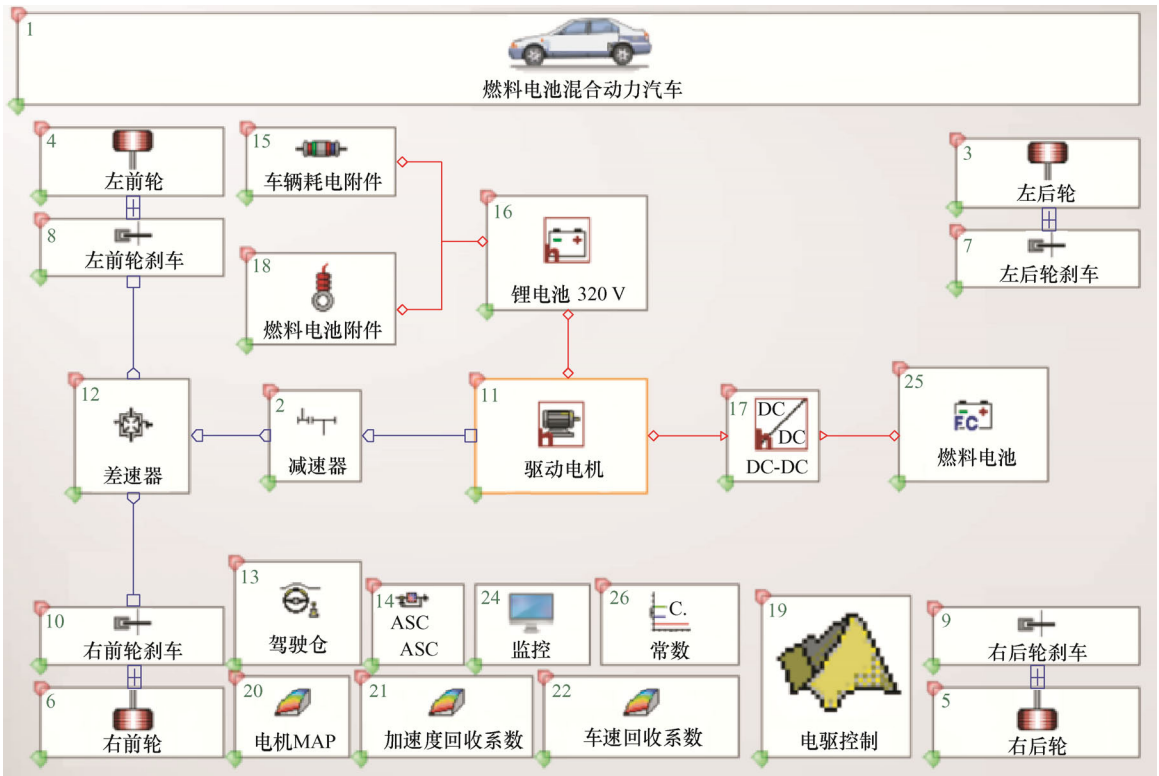


图 6 基于 AVL-Cruise 的整车模型

Fig. 6 Vehicle model based on AVL-Cruise

在线联合仿真流程如图 7 所示。首先利用 DLL 动态链接库将当前车辆信号送入整车控制模型，同时制定车速跟随模块，以实现车速跟随功能；随后将车辆的需求功率进行小波分解，获得低频功率，并根据当前燃料电池功率计算得到运行效率；接着把动力电池的 SOC 送入模糊控制器，通过模糊控制器计算出燃料电池输出功率，最终完成能量管理。

本文选用的是中国轻型乘用车循环工况 CLTC-P(China light-duty vehicle test cycle-passenger-car)，CLTC-P 总工况时间为 1 800 s，包含低速、中速、高速 3 种行驶工况，更贴近日常的驾驶情况。由于 CLTC-P 存在较多的启停情况，且车速波动较大，对燃料电池的动态输出能力提出了较大挑战，因此能很好地检验能量管理策略的优劣。

车辆的车速跟随曲线如图 8 所示，可以看出，跟随情况良好，车辆的动力性能可以满足工况要求。根据工况速度需求及车辆自身参数，可计算出车辆电机的需求功率，随后使用 Haar 小波对功率进行三级分解。原始信号经过三级分解可得不同频

率的信号，其中低频信号和车辆需求功率对比如图 9 所示。可以看出，分解后的低频信号相比于原始功率信号的波动已经大幅平稳。由于燃料电池不可逆向充电，故将分解后的低频信号取正的部分作为燃料电池的参考输出功率，随后送入下级模糊控制器的输入端。

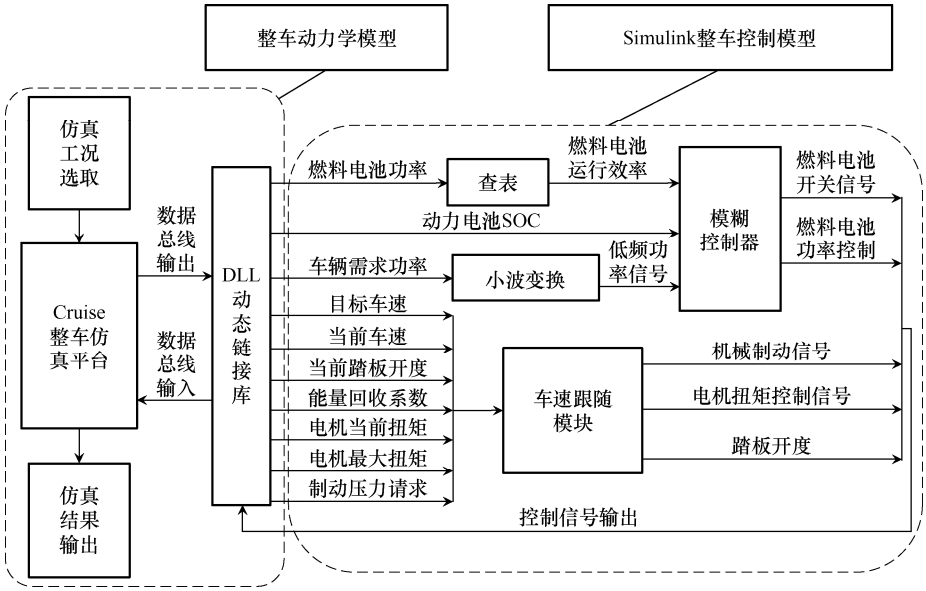


图 7　Cruise 与 MATLAB/Simulink 联合仿真流程

Fig. 7 Cruise and MATLAB/Simulink joint simulation process

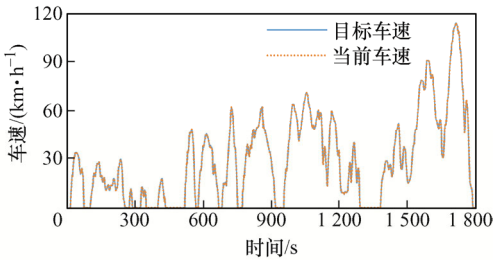


图 8　CLTC-P 的车速跟随曲线

Fig. 8 Vehicle speed following curve under CLTC-P test

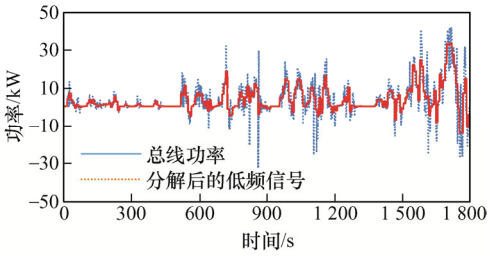
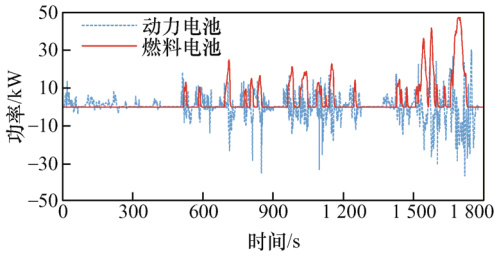
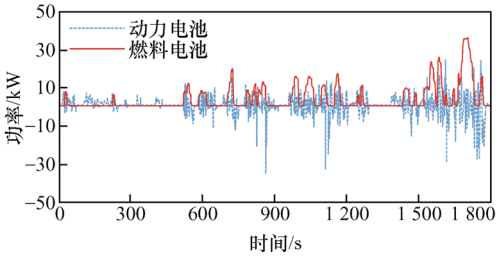


图 9　小波分解的功率曲线

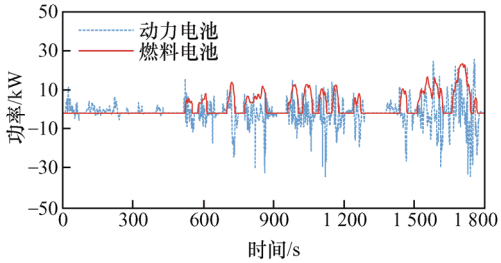
Fig. 9 Power curve of wavelet decomposition



(a) 功率跟随式策略功率分配



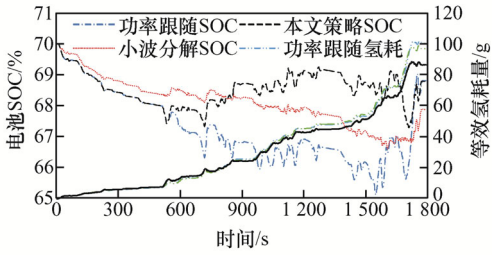
(b) 小波分解策略功率分配



(c) 模糊优化小波策略功率分配

3.2　不同策略下性能指标对比

为了验证本文提出策略的有效性，实验设置了不同能量管理策略进行对比。车辆的电池 SOC 统一设置为 0.70，图 10 为不同指标下的性能指标对比。可以看出，基于功率跟随的管理策略存在较多



(d) 耗氢量与电池 SOC 对比

图 10 不同策略下性能指标对比

Fig. 10 Comparison of performance indicators under different strategies

的启停现象，且燃料电池的峰值功率较高，导致整体运行效率偏低；基于小波分解的管理策略可为燃料电池提供较好的运行环境，从而减缓了电池寿命衰退速度，但其氢耗量优化有限。

图 10(c)为本文提出的利用模糊优化小波分解的功率分配情况，由于考虑了将动力电池 SOC 及燃料电池效率作为模糊控制器的输入参数，因此燃料电池基本均工作在高效区间，峰值输出功率进一步减小，从而避免了在高功率区间工作导致效率偏低的问题。由此可得，该策略不仅有效提高了燃料电池的平均工作效率，且燃料电池输出波动比小波分解策略更加平缓，启停次数也有所减少，其在改善电池寿命衰减状况的同时，有效节省了氢耗量，提高了整车的动力经济性与寿命经济性。

图 10(d)为 3 种策略的等效氢耗量及电池 SOC 变化对比，由于 FCHEV 无需外部补能，故电池 SOC 变化可等效为氢耗变化，从而更好地反映汽车的能耗经济性能。本文通过计算动力电池当前能量与初始能量的差，将电池释放的能量转化为燃料电池氢气的消耗量，电池 SOC 下降导致氢耗增加的计算式为

$$\Delta_{mH_2}=-\frac{Q\cdot[S_{SOC}(t)-S_{SOC}(t_0)]}{(L_{LHV,h_2}\cdot\overline{\eta}_{fc})} \tag{4}$$

式中：Q为电池能量，单位为 Wh；$S_{SOC}(t_0)$为电池初始 SOC；L_{LHV,H_2}为氢气的低热值，其值为 120 MJ/kg；为了简便计算，设$\overline{\eta}_{fc}$为燃料电池平均工作效率。在 1 个 CLTC-P 后，本文所提基于模糊优化小波策略的燃料电池等效耗氢量比基于功率跟随的策略下降 14%。同时，其动力电池可在车辆需求功率较低时维持更高的 SOC，以备在高功率需求时提供更多的能量；在车辆高功率需求时则积极放电，使燃料电池仍能工作在高效区间。此外，本文策略可充分发挥动力电池的削峰填谷作用，对燃料电池的运行寿命提升具有较大帮助，不同策略下的关键参数对比见表 5。

表 5 不同策略下的关键指标对比

Tab. 5 Comparison of key indicators under different strategies

能量管理策略	等效氢耗量/g	初始 SOC/%	结束 SOC/%	SOC 下降/%	燃料电池平均效率/%	启停次数	有害变载次数	高功率运行时间，低功率运行时间/s
功率跟随	100.28	70.00	68.79	1.21	55.18	20	14	27, 138
小波分解	96.62	70.00	67.87	2.13	58.33	18	9	0, 135
本文策略	86.24	70.00	68.77	1.23	60.47	13	3	0, 66

由表 5 可知，在 1 个 CLTC-P 工况下，本文所提策略通过合理分配燃料电池和动力电池的输出功率，相较于功率跟随，其等效氢耗量下降 14%，平均工作效率进一步提升。此外，在提高燃料电池运行经济性的同时，有效减少了燃料电池的启停次数、有害变载次数及在高/低功率区的运行时间，对延缓燃料电池的衰退具有较大帮助。

4 结论

本文以某燃料电池混合动力汽车为原型车，利用所设计的参数匹配系统，完成了车辆的动力参数匹配。为了改善燃料电池的运行环境，提出了首先使用小波变换将总线功率进行分解，让燃料电池尽可能地承担低频功率波动；然后将分解后的低频需

求功率、动力电池的荷电状态、燃料电池运行效率作为模糊控制器输入，通过模糊控制器计算燃料电池输出功率的能量管理策略，并使用遗传算法进行离线寻优以进一步提高性能；最后使用 MATLAB/Simulink 与 AVL-Cruise 建立整车控制模型与动力学模型，在 CLTC-P 工况下完成了联合仿真验证，所搭建的模型可满足工况要求。本文策略在满足汽车动力需求的情况下，使用辅助能量源对车辆需求功率削峰填谷，改善燃料电池运行环境，有效减少了燃料电池的氢耗量和输出功率的波动率，延缓了燃料电池寿命的衰退，具有一定的工程意义与实用价值。

未来计划在燃料电池实车上进一步开展燃料电池的寿命衰退测试，以改进寿命衰退模型的计算精度，更深入地研究寿命衰退对燃料电池性能的影响，并添加超级电容形成三能量源的混合动力架构，在进一步提高车辆能耗经济性能的同时，进一步保护燃料电池和动力电池。

参考文献：

[1] Zhao Yulong, Wang Weida, Xiang Changle, et al. Research and bench test of nonlinear model predictive control-based power allocation strategy for hybrid energy storage system [J]. IEEE Access, 2018, 6: 70770-70787.

[2] Daud W R W, Rosli R E, Majlan E H, et al. PEM fuel cell system control: A review [J]. Renewable Energy, 2017, 113: 620-638.

[3] 敖文杰, 陈家伟, 陈杰, 等. 燃料电池−锂电池混合供电系统的无源控制策略及参数设计方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 580-594.
Ao Wenjie, Chen Jiawei, Chen Jie, et al. Passivity-based control strategy and parameter design method for fuel cell-lithium battery hybrid power supply system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 580-594. (in Chinese)

[4] Wang Yujie, Li Wenhuan, Liu Zeyan, et al. An energy management strategy for hybrid energy storage system based on reinforcement learning [J]. World Electric Vehicle Journal, 2023, 14(3): 57.

[5] Wang Yujie, Sun Zhendong, Li Xiyun, et al. A comparative study of power allocation strategies used in fuel cell and ultracapacitor hybrid systems [J]. Energy, 2019, 189: 116142.

[6] Kasimalla V K, G N S, Velisala V. A review on energy allocation of fuel cell/battery/ultracapacitor for hybrid electric vehicles [J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(14): 4263-4283.

[7] 李欣, 卢景涛, 肖林润, 等. 高速铁路列车长大坡道混合储能系统容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5645-5660.
Li Xin, Lu Jingtao, Xiao Linrun, et al. Capacity optimazation configuration of hybrid energy storage system for long steep slope of high-speed railway [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5645-5660.

[8] 胡建军, 肖军, 晏玖江. 纯电动车车用复合储能装置控制策略及参数优化[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(1): 1-11.
Hu Jianjun, Xiao Jun, Yan Jiujiang. Control strategy and parameter optimization of hybrid energy storage device forelectric vehicles [J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(1): 1-11. (in Chinese)

[9] 杨坤, 董丹秀, 王杰, 等. 多能量源燃料电池电动客车参数匹配及控制策略[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(3): 362-370.
Yang Kun, Dong Danxiu, Wang Jie, et al. Parameter matching and control strategy of multi-energy-source for fuel-cell for electric bus [J]. Journal of Automotive Safety and Engergy, 2020, 11(3): 362-370. (in Chinese)

[10] 李奇, 孟翔, 陈维荣, 等. 燃料电池混合动力系统参数匹配与多目标优化[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 1079-1086.
Li Qi, Meng Xiang, Chen Weirong, et al. Parameter matching and multi-objective optimization of fuel cell hybrid system [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(5): 1079-1086. (in Chinese)

[11] Babu T S, Vasudevan K R, Ramachandaramurthy V K, et al. A comprehensive review of hybrid energy storage systems: Converter topologies, control strategies and future prospects [J]. IEEE Access, 2020, 8: 148702- 148721.

[12] Fu Zhumu, Zhu Longlong, Tao Fazhan, et al. Optimization based energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle considering fuel economy and fuel cell lifespan [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(15): 8875-8886.

[13] Badji A, Abdeslam D O, Chabane D, et al. Real-time implementation of improved power frequency approach based energy management of fuel cell electric vehicle considering storage limitations [J]. Energy, 2022, 249: 123743.

[14] 宋传学, 周放, 肖峰. 基于动态规划的复合电源能量管理优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 8-14.
Song Chuanxue, Zhou Fang, Xiao Feng. Energy management optimization of hybrid energy storage system (HESS) based on dynamic programming [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(1): 8-14. (in Chinese)

[15] Wang Yujie, Sun Zhendong, Chen Zonghai. Energy management strategy for battery/supercapacitor/fuel cell hybrid source vehicles based on finite state machine [J]. Applied Energy, 2019, 254: 113707.

[16] 王浩聪, 付主木, 孙昊琛, 等. 改进深度 Q 学习的燃料电池混合动力汽车能量管理[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 34-40, 5.
Wang Haocong, Fu Zhumu, Sun Haochen, et al. Energy management of fuel cell hybrid electric vehicle based on improved deep Q-learning [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 43(4): 34-40, 5. (in Chinese)

[17] 曾韬. 燃料电池汽车短期功率需求预测方法及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
Zeng Tao. Research on approach and application of short-term power demand prediction in fuel cell vehicles [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)

[18] 何文轩, 耿磊, 姚芳. 电动汽车动力锂离子电池可靠性关键技术综述[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 183-196.
He Wenxuan, Geng Lei, Yao Fang. Overview of key reliability technologies for power lithium-ion batteries used in electric vehicles [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 183-196. (in Chinese)



严锐浩

作者简介：

严锐浩(1999—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：燃料电池汽车能量管理策略。Email：yrh18565592541@stud.tjut.edu.cn。

许亮(1980—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：储能系统能量管理策略。Email：lxu@email.tjut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)