

• 燃料电池汽车技术专题 •

基于小波变换的燃料电池汽车能量管理策略

梅彬裕 李红信 郭柳 靳晨曦 耿毫伟

(雄川氢能科技(广州)责任有限公司, 广州 510760)

【摘要】以一款功率跟随型燃料电池轻型载货汽车为研究对象,结合典型工况下整车需求功率的频率特性,使用小波分析方法构建了一种基于小波变换的燃料电池汽车功率跟随能量管理策略:将小波变换后获取的车辆需求功率低频分量分配给燃料电池,改善燃料电池输出功率的波动;结合动力电池充放电能力与车辆功率需求,动态调整小波分解层数,自动调整功率跟随程度,保证整车动力需求。仿真结果表明,基于小波变换的功率跟随分配策略在典型工况下能够满足整车的动力性需求,维持动力电池荷电状态(SOC)在合理的范围内,燃料电池输出功率的波动度下降了29.8%,同时,整车百公里氢耗下降1.5%。

关键词:燃料电池 能量管理 小波变换 功率跟随

中图分类号:U469.72;TM911.4 **文献标志码:**A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230068

Energy Management Strategy of Fuel Cell Vehicle Based on Wavelet Transform

Mei Binyu, Li Hongxin, Guo Liu, Jin Chenxi, Geng Haowei

(Xiongchuan Hydrogen Technology (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou 510760)

【Abstract】With a light truck equipped with power-following fuel cell as the research object, a power-following energy management strategy of a fuel cell based on wavelet transformation has been constructed combining the frequency characteristics of the vehicle power demand under typical driving cycles using wavelet analysis method. The low frequency component of the vehicle power demand obtained after wavelet transform was allocated to the fuel cell, so as to improve the fluctuation of the fuel cell output power. In addition, the wavelet decomposition level was dynamically adjusted to regulate the power following degree automatically, to ensure the power supply of the vehicle under various power battery charge-discharge capacity and vehicle power requirement. The simulation result shows that the power-following allocation strategy based on wavelet transform can meet the vehicle power demand under typical driving conditions, and the SOC can be kept in the reasonable range, the power output fluctuation of the fuel cell has been decreased by 29.8%, in addition, the hydrogen consumption has been reduced by 1.5%.

Key words: Fuel cell, Energy management, Wavelet transform, Power-follow

【引用格式】梅彬裕,李红信,郭柳,等.基于小波变换的燃料电池汽车能量管理策略[J].汽车工程师,2024(3):8-14.

MEI B Y, LI H X, GUO L, et al. Energy Management Strategy of Fuel Cell Vehicle Based on Wavelet Transform [J]. Automotive Engineer, 2024(3): 8-14.

1 前言

质子交换膜燃料电池因其具有清洁、高效、零污染等特性,已成为新一代新能源车辆重点研究和方向^[1]。燃料电池无法单独作为车辆的供能系统,需配备动力电池或超级电容等供能部件^[2],多能量源的功率合理分配有助于发挥动力电池和燃料电池各自优势,降低系统的能量损耗^[3],避免频繁变

载和启停对燃料电池系统的性能和寿命造成严重损害^[4-6]。

当前,燃料电池汽车的能量管理策略主要分为基于规则和基于优化算法两类^[7]。基于优化算法的能量管理策略虽然有很好的控制效果,但是计算复杂度较高,实时性差,难以进行实际应用^[8];基于规则的能量管理策略可分为确定性规则和模糊规则,前者具有逻辑简单、鲁棒性强等优点,已得到广

泛应用,包括恒温控制、功率跟随、状态机控制等,后者的设计依靠设计人员的经验,其控制效果具有一定的局限性和不确定性^[9]。

轻型载货汽车一般采用较小容量的动力电池,此时为防止电池荷电状态(State Of Charge, SOC)的剧烈波动,一般选择功率跟随的控制方式^[10]。该方式将造成燃料电池负载的频繁变化,影响燃料电池系统的经济性和使用寿命。

小波变换可以在时域和频域内提取信号并具备高频处时间细分、低频处频率细分的自适应时频信号分析能力^[11],使用小波分解与重构可以很好地分离整车瞬态需求功率。王永军等^[12]使用小波滤波器将需求功率一级分流后,结合状态机控制,能够更好地抑制燃料电池的瞬态峰值功率,确保燃料电池工作在高效区间;张炳力等^[13]使用小波变换将功率高频分量分流至超级电容,动力电池与燃料电池间功率按固定比例分配,降低了燃料电池功率波动程度,但未考虑超级电容、动力电池SOC的影响。

本文从工程实际要求出发,设计一种基于小波变换的燃料电池汽车功率跟随能量管理策略,自适应调节小波分解层数,满足整车动力需求的同时,降低燃料电池功率的输出波动,从而达到延长燃料电池使用寿命的目的。

2 燃料电池轻型载货汽车动力系统

2.1 整车动力系统结构及参数

本文研究的燃料电池轻型载货汽车满载质量为 4.5×10^3 kg,主要用于市区、城郊物流配送和冷链运输等,其主要参数如表1所示。

表1 整车参数

主要参数	取值
整车整备质量/kg	3 120
整车满载质量 m /kg	4 500
迎风面积 A /m ²	5.7
空气阻力系数 C_d	0.55
轮胎滚动半径 R /mm	402

考虑燃料电池系统、储氢系统等部件在整车上的布置要求,以及整车整备质量的要求,应尽可能降低动力系统的体积及质量,因此驱动系统采用集成式驱动桥,动力电池采用高功率密度型锰酸锂电池,结合整车运行工况,经匹配计算后,驱动电机额定功率选定为60 kW,峰值功率选定为120 kW,

燃料电池额定功率选定为60 kW,动力电池电量选定为9.12 kW·h,具体参数如表2所示。

表2 动力系统参数

参数项	取值
电机额定功率/kW	60
电机峰值功率/kW	120
电机最高转速/ $r \cdot \min^{-1}$	12 000
电机最大扭矩/ $N \cdot m$	325
传动系统减速比	16
传动系统效率	0.94
电池单体容量/ $A \cdot h$	17.5
单体标称电压/V	3.7
串并联数	1P145S
电池总能量/ $kW \cdot h$	9.12
脉冲充电倍率/C	10
恒流充电倍率/C	6
脉冲放电倍率/C	12
恒流放电倍率/C	6
燃料电池额定功率/kW	60
燃料电池最高效率/%	60.3

图1所示为整车动力系统的拓扑结构,燃料电池通过DC/DC升压变压器与高压母线相连,与动力电池共同为整车提供驱动能量。按照动力电池功率及能量配置,动力电池主要用于整车起动、能量回收和剧烈功率需求变化的响应,燃料电池为主要供能部件,需要覆盖车辆行驶过程中的能量需求。

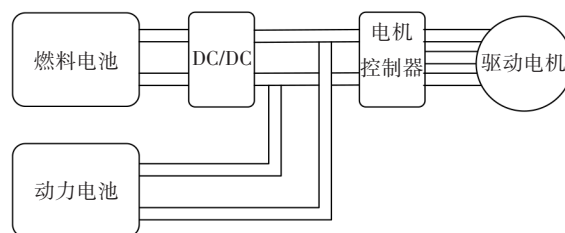


图1 整车动力系统拓扑结构

2.2 动力电池

锰酸锂电池功率响应速率远快于燃料电池,适合用于响应功率的剧烈变化。其开路电压 U_{ocv} 、等效内阻 R_{int} 是关于电池荷电状态 S 和温度 T 的函数:

$$\begin{cases} U_{ocv} = U(S, T) \\ R_{int} = R(S, T) \end{cases} \quad (1)$$

若忽略温度对电池特性的影响,则可直接使用

图2所示的测试数据代替。基于 R_{int} 等效电路建立动力电池模型^[14]:

$$\begin{cases} U = U_{ocv} - IR_{int} \\ P_{bat} = U_{ocv} I \end{cases} \quad (2)$$

式中: U 为电池输出电压, I 为输出电流, P_{bat} 为电池的输出功率。

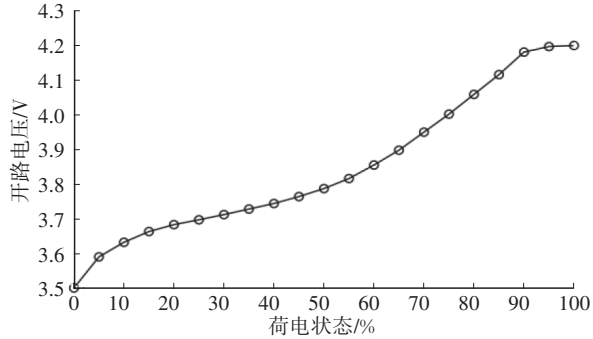


图2 动力电池电芯开路电压特性

I 可表示为:

$$I = \frac{U_{ocv} - \sqrt{U_{ocv}^2 - 4P_{bat} R_{int}}}{2R_{int}} \quad (3)$$

2.3 燃料电池

燃料电池系统通过质子交换膜上发生的电化学反应,将氢气和空气中的氧气反应生成水,同时产生电能与热能,电能通过DC/DC升压变压器到达直流母线,用于驱动车辆。整个系统运行需要电堆、供氢系统、空气进气系统、电气系统和热管理系统协调工作。本文主要讨论整车功率在燃料电池和动力电池间的分配,因此可以使用燃料电池系统的稳态效率特性建立燃料电池查表模型,其特性如图3所示。随着燃料电池系统输出功率 P_{fc} 的升高,其效率逐渐上升,当输出功率高于9 kW后,系统效率开始下降,直至降到最低,该特性是由燃料电池的极化特性及附件消耗功率决定的。

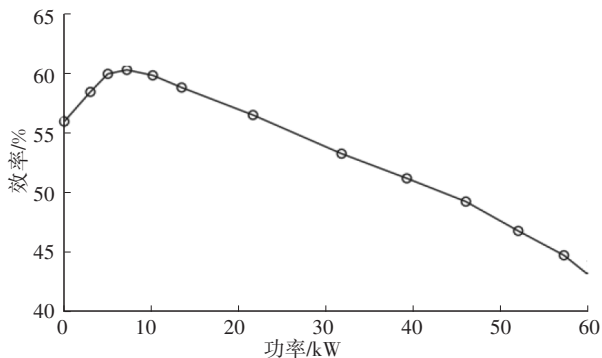


图3 燃料电池系统效率特性

2.4 驱动电机

电机在驱动和制动回馈时,其电功率与机械功

率关系不同,在驱动时:

$$\begin{cases} P_{mech} = P_{elec} \eta_{dischg} \\ P_{mech} = \frac{T_{mot} n_{mot}}{9550} \end{cases} \quad (4)$$

在制动回馈时:

$$\begin{cases} P_{mech} = P_{elec} / \eta_{chg} \\ P_{mech} = \frac{T_{mot} n_{mot}}{9550} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{mech} 、 P_{elec} 分别为电机机械功率和电功率; T_{mot} 、 n_{mot} 分别为电机转矩和转速; η_{dischg} 、 η_{chg} 分别为电机放电和充电效率,可由图4中的电机效率图查得。

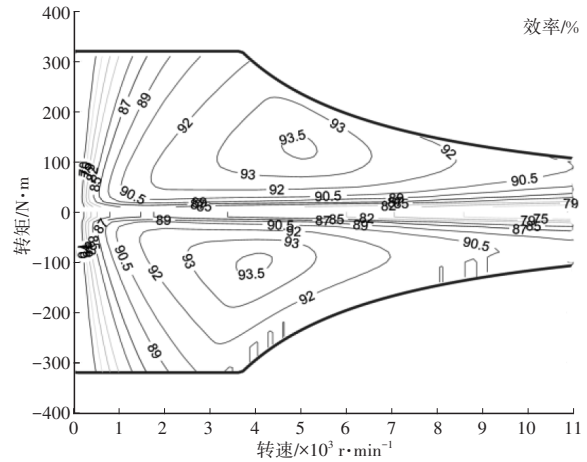


图4 电机效率

2.5 整车需求功率

依据功率平衡方程^[15],整车需求功率 P_{req} 为:

$$\begin{cases} P_{req} = P_{elec} + P_{acc} = P_{bat} + P_{fc} \\ P_{mech} = \frac{u}{3600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_d A u^2}{21.15} + \delta m \frac{du}{dt} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{acc} 为整车附件功率, η_t 为传动系统效率, u 为车速, δ 为旋转质量换算系数, g 为重力加速度, $f = 0.0076 + 0.000056u$ 为滚动阻力系数。

3 功率跟随控制策略设计及优化

3.1 功率跟随策略

在功率跟随策略中,燃料电池的功率一部分用于平衡整车负载,另一部分用于修正动力电池荷电状态 S ,使之处于合理范围:

$$P_{fc} = P_{req} - f_{soc} P_{nol} \quad (7)$$

式中: P_{nol} 为电池标准充放电功率,此处设置为电池的恒流充放电功率; f_{soc} 为电池荷电状态的修正系数。

f_{soc} 可表示为:

$$f_{soc} = \frac{2S - (S_H + S_L)}{2(S_H - S_L)} \quad (8)$$

式中: S_H 、 S_L 分别为电池荷电状态的上、下限,保持电池具备一定的充、放电能力,同时兼顾电池的循环寿命。

f_{soc} 的范围为 $[-1,1]$,当其小于0时,即电池荷电状态低于理想值,燃料电池增加输出功率,对锂电池充电,反之,燃料电池降低功率,锂电池放电参与驱动。

另外,在实际应用中,还需增加约束条件,燃料电池启动时,有:

$$\begin{cases} P_{fc,min} \leq P_{fc} \leq P_{fc,max} \\ P_{bat,min} \leq P_{bat} \leq P_{bat,max} \\ S_L \leq S \leq S_H \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{bat,min}$ 、 $P_{bat,max}$ 分别为电池功率状态(State of Power, SOP)的最小值、最大值,由电池管理系统(Battery Management System, BMS)根据电池当前状态计算; $P_{fc,min}$ 为燃料电池怠速功率; $P_{fc,max}$ 为燃料电池最大功率。

在燃料电池启动时,整车驱动功率与SOC修正功率的差低于怠速功率,燃料电池功率将被约束在怠速功率,剩余部分功率由动力电池提供。燃料电池未启动时,其功率为0。为减少燃料电池的频繁启停,定义启停策略如下:当电池荷电状态 S 小于启动荷电状态 S_{start} 时,燃料电池启动;当 S 大于荷电状态上限 S_H 时,燃料电池停机;当 S 处于二者之间时,燃料电池启停保持上一状态不变。在以上策略中,各控制参数设置如表3所示。

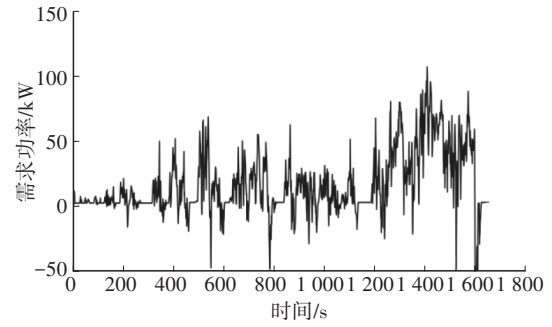
表3 功率跟随控制策略参数

参数名称	取值
燃料电池怠速功率 $P_{fc,min}$ /kW	8
燃料电池最大功率 $P_{fc,max}$ /kW	60
荷电状态下限 S_L /%	40
荷电状态上限 S_H /%	80
燃料电池启动荷电状态 S_{start} /%	50

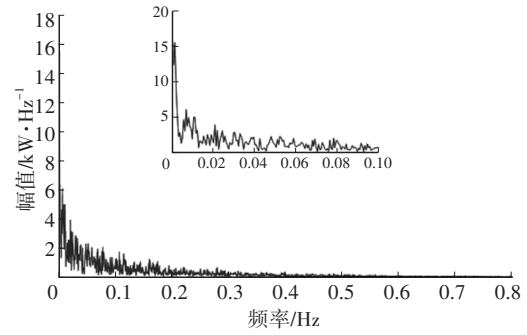
3.2 自适应小波变换功率跟随策略

传统的分析方法大多在时域上分析整车需求功率,以本文中标准测试工况中国轻型货车行驶工况(China Heavy-Duty Commercial Vehicle Test Cycle for Light Truck, CHTC-LT)为例,其功率需求如图5所示。对图5a所示的需求功率时域曲线进行频域分析,采样频率为100 Hz,可得图5b所示的频域特性,幅值随频率提高后迅速降低。因此,可以采用小波变换重构低频区域高幅值段信号,保留其主要

特征,用作功率跟随目标值。



(a)时域分布



(b)频域分布

图5 需求功率时域与频域分布

构建 Haar 小波,将采样的功率信号进行小波变换及逆变换,即可得到重构后的信号,对于原始信号 $x(t)$,离散小波变换及其逆变换为^[13]:

$$\begin{cases} W(\lambda, r) = \int x(t) \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \psi\left(\frac{t-r}{\lambda}\right) dt \\ x(t) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} W(j, k) \psi_{j,k}(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: W 为小波系数, t 为时间, ψ 为小波母函数, λ 为比例因子, r 为平移因子, j 为分解层数, k 为变换时的离散时刻。

对于 Harr 小波:

$$\psi = \begin{cases} 1, & t \in [0, 0.5) \\ -1, & t \in [0.5, 1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

为便于计算,通常 λ 、 r 的取值分别为:

$$\begin{cases} \lambda = 2^j \\ r = 2^j k \end{cases} \quad (12)$$

每一层分解后采样频率减半,相当于一次低通平滑处理。变换后各部分与原信号的关系可以表达为:

$$x(t) = a_j(t) + \sum_{j=1}^J d_j(t) \quad (13)$$

式中: $a_j(t)$ 为第 j 层低频近似分量; J 为最大分解层

数; $d_j(t)$ 为第 j 层高频分量,其分解与重构过程如图6所示。

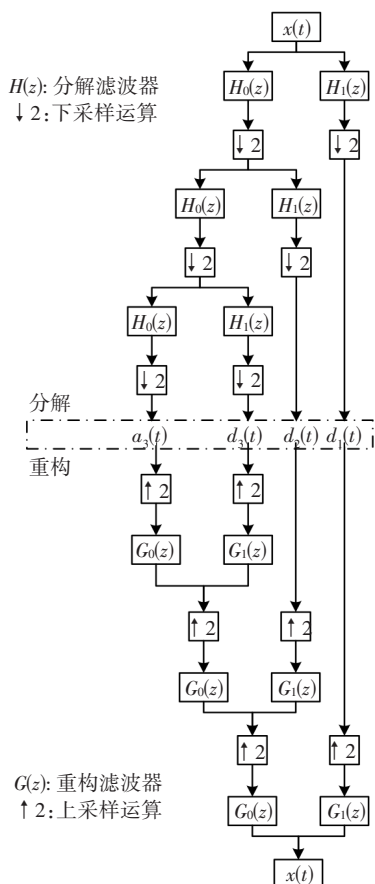


图6 小波分解与重构模型

将分解后的低频近似分量 $a_j(t)$ 作为功率跟随的目标功率 $P_{req,L}(t)$,剩余高频分量之和 $\sum_{j=0}^J d_j(t)$ 记为 $P_{req,H}(t)$,直接分配给动力电池,其他规则保持不变,即:

$$\begin{cases} P_{fc} = P_{req,L}(t) - f_{SOC} P_{nol} \\ P_{req} = P_{req,L}(t) + P_{req,H}(t) \end{cases} \quad (14)$$

小波变换具备多频率尺度分析的特点,通过选择不同的 J ,可以将需求功率信号按照不同的频率尺度分解,自动适应当前工况。当动力电池SOC较低、整车需求功率较大时,使用较低的分解层数,使氢燃料电池承担更大的功率输出,保证整车的动力性;当动力电池SOC较高、整车需求功率较小时,使用较高的分解层数,使氢燃料电池需求功率波动更小,从而有利于提高其耐久性。 J 值可以按照以下策略选取:当动力电池荷电状态 $S < 40\%$ 且整车需求功率 $P_{req} > 60 \text{ kW}$ 时, J 取值为4;当 $S > 40\%$ 且 $P_{req} < 40 \text{ kW}$ 时, J 取值为6;其他情况下 J 取值为5。

实际应用中,需要对功率信号进行实时处理,可采用滑动窗的方法,使用一定长度的窗口,截取

一定数量的信号点,持续进行小波变换。针对不同分解层数,窗口数据点数量最少为 2^j 个。若实际应用时控制器资源不足,则可降低信号采样频率和分解层数,相应地减小窗口长度。

4 策略仿真结果及分析

按照上述模型及策略建立燃料电池、动力电池、电机、整车等被控对象以及2种功率跟随策略模型。仿真工况选定为CHTC-LT工况,动力电池初始SOC设定为55%,仿真步长设置为0.01 s。

图7所示为需求功率小波变换前、后的曲线,从图中可以看出,经过小波分解后的低频部分 $P_{req,L}$ 与总需求功率近似,主要波动特征基本一致,但功率变化更加平缓,剧烈变化部分功率幅值较小。图8所示为功率跟随策略和基于小波变换功率跟随策略的车速跟随曲线,2种策略都能满足车速跟随要求。

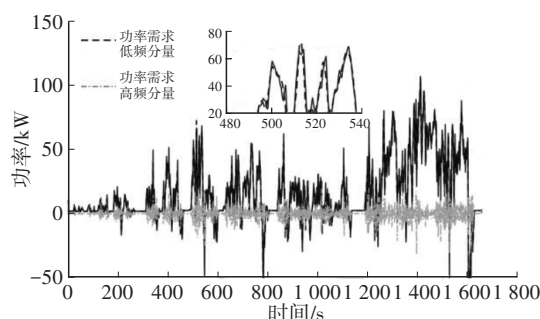


图7 需求功率分解曲线

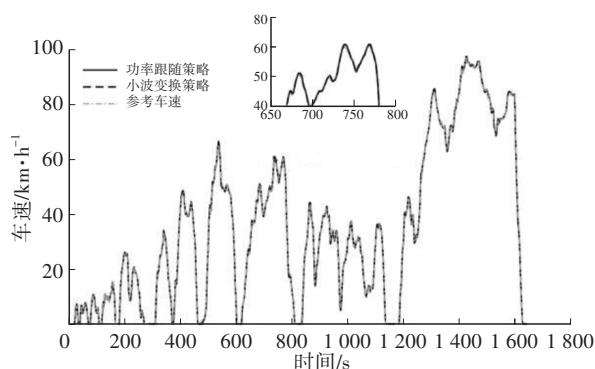


图8 车速跟随曲线

图9所示为功率跟随策略和基于小波变换的功率跟随策略的燃料电池输出功率曲线,可以明显看出:燃料电池功率趋势一致,在第400 s前燃料电池均未启动,之后一直运行;功率变化的波峰、波谷基本重合,符合功率跟随策略下的工况车速变化趋势,但采用小波变换后的功率跟随策略时燃料电池输出功率的尖峰值明显降低。

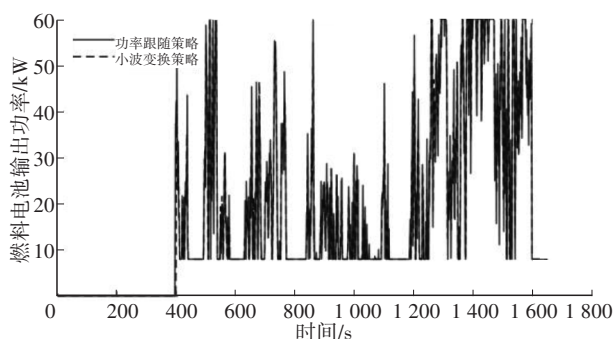


图9 燃料电池输出功率

对比图10所示的SOC变化情况,二者SOC均在50%~65%范围内,变化趋势基本一致,燃料电池启动后,SOC先上升后下降,最后经过能量回收阶段再上升,功率跟随策略SOC最大值为62.27%,基于小波变换的功率跟随策略SOC最大值为61.36%,二者相差较小。

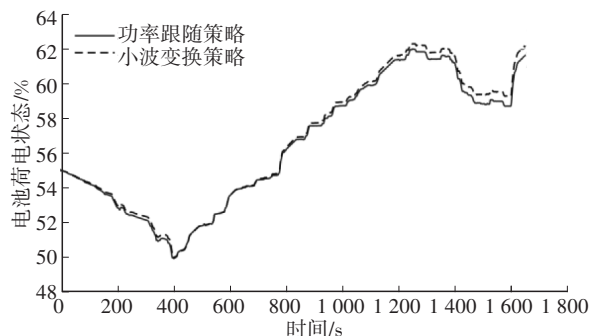


图10 动力电池荷电状态

为量化比较燃料电池输出功率的波动,引入输出功率波动度的概念,波动度 V 定义为^[14]:

$$V = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} |P_{k+1} - P_k|}{N-1} \quad (15)$$

式中: P_k 为 k 时刻燃料电池系统的输出功率, T 为采样周期, N 为采样点数量。

依此绘制出2种策略下的波动度,如图11所示。功率跟随策略波动度明显高于基于小波变换的功率跟随策略,前者最终值为3.21 kW/s,后者最终值为2.19 kW/s,降低了29.8%。

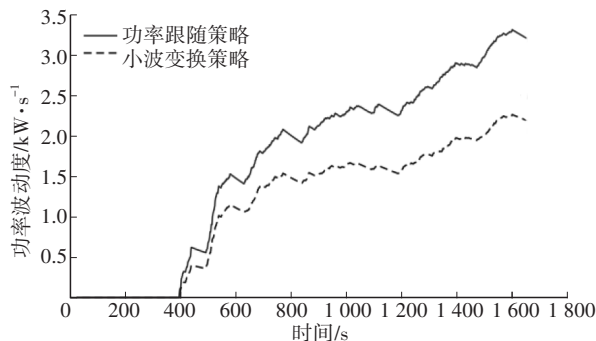


图11 燃料电池功率波动度

表4所示为2种控制策略的仿真结果对比,基于小波变换的功率跟随策略百公里等效氢耗比功率跟随策略低1.5%,百公里实际氢耗低1.3%,策略优化后经济性没有下降,优化策略可行。

表4 仿真结果对比

项目	功率跟随策略	小波变换策略	优化比例/%
百公里等效氢耗	2.493	2.456	1.5
百公里实际氢耗	2.713	2.677	1.3
燃料电池功率波动度	3.210	2.190	29.8

5 结束语

本文针对现有燃料电池汽车功率跟随策略中,燃料电池频繁变载导致寿命降低的问题,设计了一种基于自适应实时小波变换的功率跟随策略。仿真结果表明:在典型的CHTC-LT工况下,该策略可以在满足整车动力需求的前提下,有效地降低燃料电池输出功率波动,功率输出的波动度降低了29.8%;动力电池SOC波动与优化前相差不大,仍可维持在合理范围内;整车氢耗略有降低,未对经济性造成负面影响。

参考文献

- [1] 王贺武,欧阳明高,李建秋,等. 中国氢燃料电池汽车技术路线选择与实践进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2022(2): 13.
WANG H W, OUYANG M G, LI J Q, et al. Hydrogen Fuel Cell Vehicle Technology Roadmap and Progress in China [J]. Journal of Automotive Safety and Energy Conservation, 2022(2): 13.
- [2] 张可健. 燃料电池汽车混合动力系统能量管理策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
ZHANG K J. Study on Energy Management Strategy of Fuel Cell Vehicle Hybrid Power System[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [3] 陈浩. 燃料电池/锂电池混合动力系统优化管理[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
CHEN H. Optimal Management of Fuel Cell/Battery Hybrid Power System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [4] 潘瑞. 面向燃料电池外特性的老化行为建模及延寿策略研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
PAN R. Research on Aging Behavior Modeling and Lifespan Prolongation Strategy of Fuel Cell With External Characteristics[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.

- [5] 王宗松. 质子交换膜燃料电池性能衰退与寿命预测研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
WANG Z S. Performance Degradation and Life Prediction Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cells[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [6] 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 Cells[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [7] 王志福, 罗崑, 徐崧, 等. 燃料电池汽车能量管理策略综述[J]. 电池, 2022, 52(3): 328-332.
WANG Z F, LUO W, XU S, et al. A Review of Energy Management Strategies for Fuel Cell Vehicles[J] Battery, 2022, 52(3): 328-332.
- [8] 韩海硕. 基于工况识别的自适应改进型ECMS控制策略研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
HAN H S. Research on Adaptive Improved ECMS Control Strategy Based on Condition Recognition[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [9] 张梦. 燃料电池混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
ZHANG M. Research on Energy Management Strategy of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [10] 纪人桓. 全功率燃料电池汽车动力系统优化设计与能量管理[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
JI R H. Optimal Design and Energy Management of Power System for Full-Power Fuel Cell Vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [11] 李弼程, 罗建书. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
LI B C, LUO J S. Wavelet Analysis and Its Application[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005.
- [12] 王永军, 孙宾宾, 李文涛, 等. 基于小波规则的燃料电池电动汽车能量管理策略[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 322-328.
WANG Y J, SUN B B, LI W T, et al. Energy Management Strategy of Fuel Cell Electric Vehicles Based on Wavelet Rules[J]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2021, 35(4): 322-328.
- [13] 张炳力, 赵韩, 吴迪, 等. 基于小波变换的燃料电池混合动力系统多能源管理策略研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(10): 5.
ZHANG B L, ZHAO H, WU D, et al. A study on Multi-Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Powertrain Based on Wavelet-Transform[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(10): 5.
- [14] 黄莉莉, 任星星, 苗博博, 等. 基于改进Rint模型锂离子电池SOC估计[J]. 电池工业, 2022(4): 26.
HUANG L L, REN X X, MIAO B B, et al. SOC Estimation of Lithium-Ion Battery Based on Improved Rint Model[J]. Battery Industry, 2022(4): 26.
- [15] 余志生. 汽车理论[M]. 第5版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
YU Z S. Automobile Theory[M]. 5th Edition. Beijing China Machine Press, 2009.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2023年3月6日。