

# 基于改进型等效氢耗的车用燃料电池混合动力系统能量管理方法研究

陈 志<sup>1</sup> 梁汝军<sup>1</sup> 蔡 芳<sup>1</sup> 燕 雨<sup>2</sup>

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京; 2. 郑州大学电气与信息工程学院, 450001, 郑州)

**摘 要** [目的]等效氢耗作为一种针对燃料经济性优化的方法,其在储能系统荷电状态跟随方面表现欠佳,故需对其进行改进以实现区间荷电状态的动态平衡。[方法]在传统等效氢耗算法基础上,对系统的氢耗函数进行了优化;通过加入电压平衡系数,以确保超级电容在车辆运行过程中不会出现过充或过放的情况,进而通过极小值求解,实现了对系统功率的实时分配。[结果及结论]基于数轨电车的运行数据,对所提出的方法在半实物仿真平台上进行了验证。实验结果表明,所提出的改进型等效氢耗算法能够实现复杂工况下的混合动力系统能量分配,所加入的电压平衡系数能够保证车辆区间末端超级电容的电压在合理的区间内。

**关键词** 数轨电车; 燃料电池; 混合动力系统; 能量管理

**中图分类号** TM911.4

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.05.005

## Research on Energy Management Method of Fuel Cell Hybrid Power System Based on Improved Equivalent Hydrogen Consumption

CHEN Zhi<sup>1</sup>, LIANG Rujun<sup>1</sup>, QI Fang<sup>1</sup>, YAN Yu<sup>2</sup>

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, 450001, Zhengzhou, China)

**Abstract** [Objective] Equivalent hydrogen consumption, as a method for optimizing fuel economy, performs poorly in following the state of charge of energy storage systems. Therefore, it is necessary to improve it to achieve dynamic balance of interval state of charge. [Method] Based on the conventional equivalent hydrogen consumption algorithm, the hydrogen consumption function of the system is optimized. By adding a voltage balance coefficient, it ensures that the supercapacitor will not be overcharged or over-discharged during vehicle operation. Then, through minimization solution, real-time allocation of power to the system is achieved. [Result & Conclusion] Based on the operational data of virtual-rail trams, the proposed method is validated on a semi-physical simulation platform. Experimental results show that the improved equivalent hydrogen consumption algorithm can achieve

energy distribution of hybrid power systems under complex working conditions. The added voltage balance coefficient ensures that the voltage of the supercapacitor at the end of the vehicle interval remains within a reasonable range.

**Key words** virtual-rail tram; fuel cell; hybrid power system; power management

## 0 引言

近年来,随着电源技术的不断发展,氢能凭借其“零污染、零排放”的优点在交通领域大放异彩。随着我国“双碳”战略以及《氢能产业发展中长期规划》等一系列指导文件的出台,推动运输工具装备低碳转型势在必行。不仅如此,文件还明确指出,应加快氢能技术的研发和示范应用,并积极扩大氢能等新能源、清洁能源在交通领域的应用。

质子交换膜燃料电池作为常温电氢转化装置,同时兼具“体积小、效率高”等诸多优势,在城市轨道交通领域极具应用价值,非常适用于双碳目标下的轨道交通国家发展战略。

数轨电车因其“成本低、容量适中”的特点,越来越受到中小城市的欢迎。然而,传统轨道交通车辆普遍采用接触网供电,架空接触网越来越不适应现代城市的要求。因此,对非接触式电源技术的需求十分迫切<sup>[1]</sup>。

与现有的非接触网数轨电车相比,以质子交换膜燃料电池为核心动力源的混合动力发电系统无需接触网供电即可实现全面运行<sup>[2-4]</sup>,并通常采用“燃料电池+储能系统”以构成混合动力系统<sup>[5-6]</sup>。由于数轨电车属于大功率应用场景,利用超级电容器吸收/提供车辆的快速峰值功率<sup>[7]</sup>,在混合动力系统中具有重要的应用前景。

针对混合动力系统,能量控制是其中的关键技术之一。在已有的众多研究成果中,针对燃料电

池/超级电容器混合系统的控制策略较少,且都存在一定的局限性。文献[8]将超级电容器的荷电状态 SOC(电池的充电状态)作为控制燃料电池或超级电容器输出的标准。然而,这种方法只允许超级电容器在加速间隔期间输出,必然会在后期充电期间增加燃料电池的输出功率,从而增加整个工作范围内的氢耗量。文献[9]将效率图划分为分段图,以促使车辆的氢消耗达到较低的水平。但是,这种方法不能自始至终有效地控制车辆的 SOC,不利于车辆的长期连续运行。等效氢耗算法是解决燃料电池混合动力系统能量分配问题的典型算法。文献[10-14]均在混合动力系统中实现了等效氢耗算法,然而由于超级电容器的能量密度低,在复杂的运行条件下,电压值会发生剧烈变化,因此导致电车运行不稳定,当燃料电池的额定功率较大时,其功率-氢耗曲线不能用线性函数拟合,这也导致了等效氢耗法不能用于控制大功率燃料电池系统。

在上述算法中,等效氢耗算法虽能在一定程度上解决了混合动力系统的功率分配问题,但在系统功耗建模、控制变量选取等方面依然存在一定的不足,特别是针对以超级电容作为储能单元的混合动力系统,极易出现输出功率波动较大等问题。因此,本文针对上述问题,提出了一种改进型等效氢耗方法,以解决大功率应用背景下,燃料电池/超级电容混合动力系统的功率分配问题。首先对燃料电池功耗模型进行优化,进而通过求解以等效氢耗为基础的系统功耗函数,最终得到以燃料电池输出功率为控制变量的解析解,实现了对混合动力系统功率分配的实时优化。此外,利用 RT-LAB 半实物仿真平台进行了验证,充分检验了该方法的实时控制效果。

## 1 混合动力系统建模

### 1.1 燃料电池系统效率模型

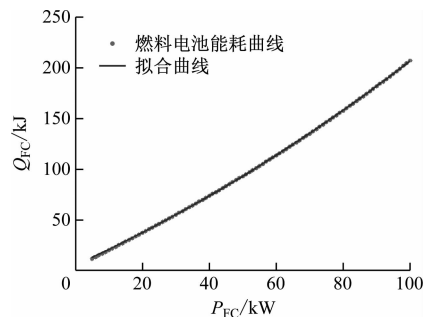
本文所采用的燃料电池功耗模型,是基于实际车辆中应用的燃料电池系统估算得到的,系统的详细参数如表1所示。

对于燃料电池系统效率的计算,本文摒弃了以往等效氢耗算法中一次函数的高误差拟合方式,采用精度较高的二次函数作为拟合的基函数。基于实际测量的功耗数据,燃料电池系统的能耗及拟合曲线如图1所示。

表1 燃料电池系统参数

Tab.1 Parameters of fuel cell system

参数	参数值
净功率/kW	100
待机功率/kW	6
电压/V	最小值为400,最大值为588
电流/A	最小值为15,最大值为288
氢气压力/kPa	正常值为800



注:  $P_{FC}$  为燃料电池净输出功率;  $Q_{FC}$  为燃料电池的瞬时氢耗。

图1 燃料电池系统能耗及拟合曲线

Fig.1 Fuel cell system energy consumption and fitting curve

在图1中,拟合曲线表达式为:

$$Q_{FC} = aP_{FC}^2 + bP_{FC} + c \quad (1)$$

式中:

$a$ 、 $b$ 、 $c$ ——拟合系数。

经最小二乘法拟合,得到拟合系数分别为:  $5.067 \times 10^{-6}$ 、1.506 和 4 849。

### 1.2 超级电容系统效率模型

本文所采用的超级电容系统功耗模型,基于超级电容的一阶 RC 模型估算得到,超级电容的详细参数如表2所示。

表2 超级电容系统参数

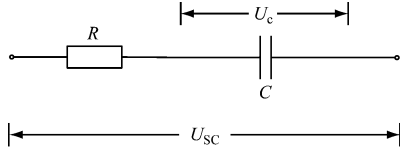
Tab.2 Parameters of supercapacitor system

模块数量	电容/F	内阻/mΩ	电压/V	电流/A
4 并 30 串	881.5	27	最小值为300,最大值为750	最小值为-1 000 A,最大值为1 000 A

超级电容的一阶 RC 模型如图2所示。

基于一阶 RC 模型的超级电容的效率模型式如下:

$$\begin{cases} \eta_{\text{chg}} = 2 / \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4RP_{\text{sc}}}{U^2}} \right), & P_{\text{sc}} < 0 \\ \eta_{\text{dis}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4RP_{\text{sc}}}{U^2}} \right), & P_{\text{sc}} \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$



注:  $R$  为超级电容器的内阻;  $C$  为超级电容器的电容;  $U_c$  为理想电容端子电压;  $U_{sc}$  为超级电容端子电压。

图 2 超级电容等效电路图

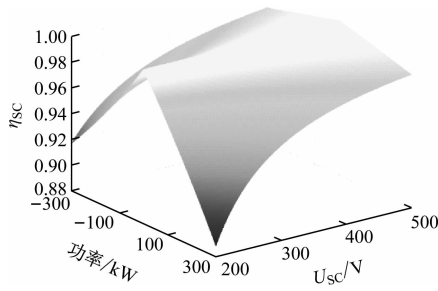
Fig. 2 Diagram of supercapacitor equivalent circuit

式中:

$\eta_{chg}$ 、 $\eta_{dis}$ ——超级电容的充电与放电效率;

$P_{sc}$ ——超级电容器的充电或放电功率。

计算得到超级电容的充、放电效率如图 3 所示。



注:  $\eta_{sc}$  为超级电容的充放电效率。

图 3 超级电容器充、放电效率曲线

Fig. 3 Charge and discharge efficiency curves of supercapacitor

### 1.3 改进型等效氢耗算法

燃料电池/超级电容混合动力系统的总瞬时氢耗  $C_{all}$ , 由燃料电池瞬时氢耗  $Q_{FC}$  及超级电容瞬时氢耗  $C_{SC}$  组成, 公式如下:

$$C_{all} = Q_{FC} + C_{SC} \quad (3)$$

$$C_{SC} = P_{SC} \frac{\sigma}{L\eta_{FC,avg}} \quad (4)$$

$$\sigma = \begin{cases} \frac{1}{\eta_{chg,avg} \eta_{dis}}, & P_{SC} \geq 0 \\ \eta_{dis,avg} \eta_{chg}, & P_{SC} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$\eta_{chg,avg}$ 、 $\eta_{dis,avg}$ ——燃料电池系统的平均充电效率与平均放电效率, 在实际计算过程中也被视为常数;

$L$ ——氢气的低热值, 取 119.63 kJ/kg;

$\eta_{FC,avg}$ ——燃料电池的平均放电效率;

$\sigma$ ——效率系数, 其值与超级电容系统的充放电状态直接相关。

本文在现有等效氢耗算法基础上, 进一步针对超级电容系统提出了电压平衡系数  $\kappa$ , 故可将式(3)

进一步写为:

$$C_{all} = C_{FC} + \kappa C_{SC} \quad (6)$$

其中, 电压平衡系数  $\kappa$  的计算公式:

$$\kappa = 1 + \frac{U_0^2 - U_{SC}^2}{U_{SC,max}^2 - U_{SC,min}^2} \quad (7)$$

式中:

$U_{SC,max}$ 、 $U_{SC,min}$ ——超级电容的最大与最小电压。

根据上文, 当超级电容的电压低于平衡点时, 平衡系数大于 1, 这时会增加燃料电池输出, 而减缓超级电容 SOC 的降低趋势; 反之则降低燃料电池输出, 减缓超级电容 SOC 的增加趋势, 从而防止超级电容出现过充或过放现象。通过式(3)一式(5)可知  $C_{all}$  与  $P_{FC}$  的关系:

$$C_{all} = aP_{FC}^2 + \left( b - \frac{\kappa\sigma}{L\eta_{FC,avg}} \right) P_{FC} + \left( c + \frac{\kappa\sigma P_{req}}{L\eta_{FC,avg}} \right) \quad (8)$$

式中:

$P_{req}$ ——车辆直流母线的需求功率。

根据式(8)可知, 函数  $C_{all}$  对  $P_{FC}$  的二阶偏导数满足:

$$\frac{d^2 C_{all}}{dP_{FC}^2} = 2a > 0 \quad (9)$$

故式(8)有最小值, 该最小值即为燃料电池系统的最优输出功率, 可得:

$$P_{FC,opt} = \frac{\kappa\sigma}{2aL\eta_{FC,avg}} - \frac{b}{2a} \quad (10)$$

式中:

$P_{FC,opt}$ ——燃料电池系统的最优输出功率。

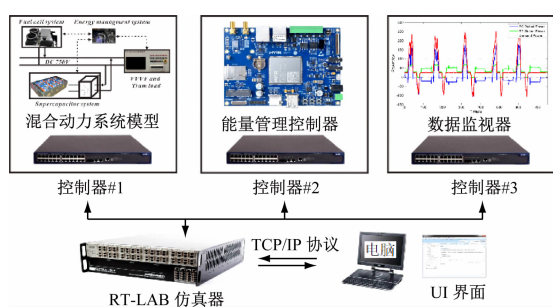
因此, 数轨电车在运行中, 燃料电池系统与超级电容系统的最优功率分配:

$$\begin{cases} P_{FC} = P_{FC,opt} \\ P_{SC} = P_{req} - P_{FC,opt} \end{cases} \quad (11)$$

## 2 实验验证与结果分析

为了验证该方法的可控性, 结合数轨电车的实际运行数据, 利用 RT-LAB(系统实时仿真平台软件包)硬件半实物仿真平台进行了仿真实验。RT-LAB 仿真平台结构如图 4 所示。

将 PF(功率跟随)法与所提方法进行对比, 经验证, OHC(最优氢耗)法可有效应用于在线控制。RT-LAB 的输入参数如图 5 所示。



注:TCP/IP 为传输控制协议/互联网络协议;UI 为用户界面。

图4 RT-LAB 仿真平台的结构截图

Fig. 4 Screenshot of RT-LAB simulation platform structure

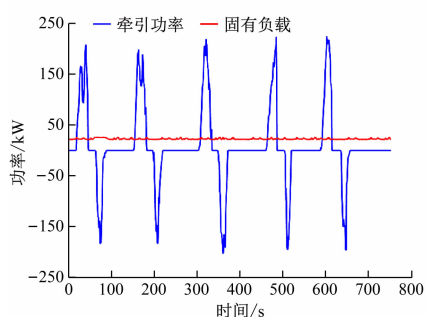


图5 RT-LAB 平台需求功率输入参数

Fig. 5 Input parameters of RT-LAB platform demand power

本文分别针对功率跟随算法和本文所提出的改进型算法分别进行了测试。功率跟随法和最优氢耗法的功率如图6和图7所示。

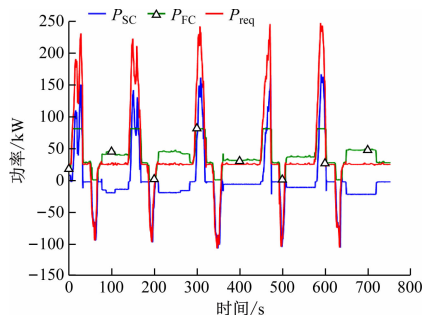


图6 功率跟随算法的功率图

Fig. 6 Power diagram of power tracking algorithm

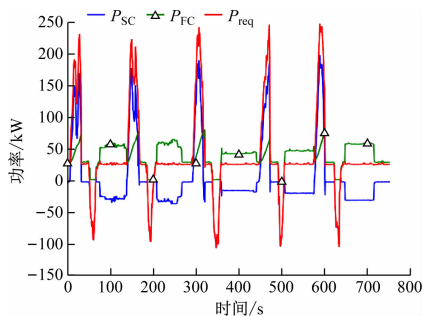


图7 本文改进算法的功率图

Fig. 7 Power diagram of proposed method

由图6和图7可知:所提出的算法在燃料电池输出平稳性方面有了较大的提升,且经过计算PF和OHC方法在同一工况下分别消耗613.4 g和585.7 g氢气。超级电容器电压波动曲线如图8所示。

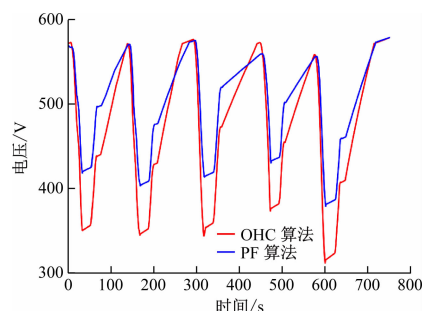


图8 超级电容电压波动曲线

Fig. 8 Voltage fluctuation curves of supercapacitor

由图8可知:基于本文所提出的电压平衡系数,超级电容的电压能够在每个运行周期末端保持在550 V左右。

### 3 结语

针对数轨电车全循环运行的特点,提出了一种燃料电池/超级电容器混合动力数轨电车的最佳氢耗方法。该方法可以在整个运行周期内有效节约运行成本。在牵引状态下,构建了混合电力系统的实时损失函数,并采用离线求解方法求解了不同需求功率和超级电容器电压下混合电力系统的最优能量分配方法。通过RT-LAB半实物仿真平台验证了等效能耗离线模型的实时控制效果。实验结果表明,拟合得到的离线模型具有良好的控制效果。通过对数轨电车的实际实验测试,与PF法相比,OHC法节约氢气约4.73%,表明该方法可以降低数轨电车的运行成本。

### 参考文献

- [1] ERDINC O, UZUNOGLU M. Recent trends in PEM fuel cell-powered hybrid systems; investigation of application areas, design architectures and energy management approaches[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 2874.
- [2] LIU J, GAO Y, SU X, et al. Disturbance-observer-based control for air management of PEM fuel cell systems via sliding mode technique[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(3): 1129.
- [3] LI X, DENG Z H, WEI D, et al. Parameter optimization of thermal-model-oriented control law for PEM fuel cell stack via novel genetic algorithm[J]. Energy Conversion and Management,



- 2011, 52(11): 3290.
- [4] LIU J, LAGHROUCHE S, AHMED F S, et al. PEM fuel cell air-feed system observer design for automotive applications; an adaptive numerical differentiation approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(30): 17210.
- [5] EREN Y, ERDINC O, GORGUN H, et al. A fuzzy logic based supervisory controller for an FC/UC hybrid vehicular power system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(20): 8681.
- [6] FERNANDEZ L M, GARCIA P, GARCIA C A, et al. Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single DC/DC converter for a tramway[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(5): 2183.
- [7] POUR G B, ASHOURIFAR H, AVAL L F, et al. CNTs-supercapacitors: a review of electrode nanocomposites based on CNTs, graphene, metals, and polymers [J]. Symmetry, 2023, 15(6): 1179.
- [8] ANDARI W, GHOZZI S, ALLAGUI H, et al. Design, modeling and energy management of a PEM fuel cell/supercapacitor hybrid vehicle[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2017, 8(1): 273.
- [9] FEROLDI D, SERRA M, RIERA J. Energy management strategies based on efficiency map for fuel cell hybrid vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2009, 190(2): 387.
- [10] RODATZ P, PAGANELLI G, SCIARRETTA A, et al. Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(1): 41.
- [11] GARCÍA P, TORREGLOSA J P, FERNÁNDEZ L M, et al. Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(11): 9368.
- [12] GARCÍA P, TORREGLOSA J P, FERNÁNDEZ L M, et al. Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(12): 4791.
- [13] ZHANG W, LI J, XU L, et al. Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 134: 59.
- [14] ZHENG J, ZHANG X, XU P, et al. Standardized equation for hydrogen gas compressibility factor for fuel consumption applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(15): 6610.
- 收稿日期:2023-11-02 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10  
Received:2023-11-02 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10
- 第一作者:陈志,高级工程师,chenzhi\_crrc@126.com  
通信作者:蔡芳,正高级工程师,qifang11155@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 19 页)

## 参考文献

- [1] 交通运输部. 2023 年 10 月城市轨道交通运营数据[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 189.  
Ministry of Transport. Operational data of urban rail transit in October 2023[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(12): 189.
- [2] 王世峰, 康克农, 李力鹏. 列车牵引特性对牵引能耗和供电方案设计的影响分析[J]. 电气化铁道, 2020, 31(增刊 1): 76.  
WANG Shifeng, KANG Kenong, LI Lipeng. Analysis of the influence of train traction characteristics on traction energy consumption and power supply scheme design[J]. Electric Railway, 2020, 31(S1): 76.
- [3] 段玉琼. 城市轨道交通列车节能运行研究[J]. 中国储运, 2022(9): 183.  
DUAN Yuqiong. Study on energy-saving operation of urban rail transit trains[J]. China Storage & Transport, 2022(9): 183.
- [4] CHANG C S, SIM S S. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144(1): 65.
- [5] HOWLETT P G, MILROY I P, PUDNEY P J. Energy-efficient train control [J]. Control Engineering Practice, 1994, 2(2): 193.
- [6] 付印平. 列车追踪运行与节能优化建模及模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.  
FU Yinping. Research on modeling and simulations of train tracking operation and saving energy optimization[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [7] 褚心童, 张亚东, 郭进, 等. 基于蚁群算法的列车节能驾驶策略优化算法研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(2): 159.  
CHU Xintong, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. An optimization algorithm for train energy-saving driving strategy based on ant colony algorithm[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(2): 159.
- 收稿日期:2023-12-01 修回日期:2024-02-02 出版日期:2024-05-10  
Received:2023-12-01 Revised:2024-02-02 Published:2024-05-10
- 第一作者:高琦,正高级工程师,gq\_csr@163.com  
通信作者:梁化典,助理工程师,1446049372@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license