

车用大功率自增湿燃料电池系统控制与应用

刘 泽, 许思传, 张白桃, 石 磊, 刘鹏程

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 针对 100 kW 级乘用车燃料电池一体化系统, 开发了一种高效、长寿命的系统控制器。结合 Matlab/Simulink 软件和 Motohawk 平台快速控制原型开发了完整的系统控制程序; 以空气子系统为代表, 讨论了控制器的闭环控制性能; 通过开发 FC 系统控制器, 研究了整个系统的动态性能。结果表明, FC 系统在净功率、系统效率和一致性方面表现出极好的潜力。系统最高效率达到 62%, 电压变化系数(C_v)在负载动态变化期间控制在 1% 以下。

关键词: 车用燃料电池系统; 系统控制策略; 软件开发

中图分类号: TM911. 4

文献标志码: A

Control and Application of High-Power Self-Humidification Fuel Cell System for Passenger Cars

LIU Ze, XU Sichuan, ZHANG Baitao, SHI Lei, LIU Pengcheng
(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Proton exchange membrane fuel cell vehicles are an important technology route to achieve carbon neutrality in transportation. In this paper, a system controller was developed for high efficiency and long durability on an integrated 100 kW passenger car fuel cell system. The complete control program is developed in conjunction with Matlab/Simulink and the Motohawk rapid control prototype. Then, the closed-loop control performance of the controller was discussed, represented by the air subsystem. Finally, with the implementation of the FC controller developed, the dynamic performance of the entire system was studied. The results show that the FC system has an excellent potential in terms of net power, system efficiency, and consistency. The maximum efficiency of the system reaches 62%, and the voltage variation coefficient (C_v) is controlled below 1% during dynamic load changes.

Key words: vehicle fuel cell system; system control;

software development

质子交换膜燃料电池作为一种能源转换装置, 具有高功率密度、高效率、零污染、良好的低温启动性能等优点, 成为汽车动力系统变革的重要研究方向^[1]。燃料电池汽车搭载燃料电池系统具有加氢时间短、续航里程长、环境适应性好等优点成为世界范围内新能源汽车实现碳中和的重要技术路线^[2]。车用燃料电池系统在服役期间的性能输出和耐久性是其非常重要的。一方面要保证系统高效的发电, 另一方面要缓解衰减以提高使用寿命^[3]。

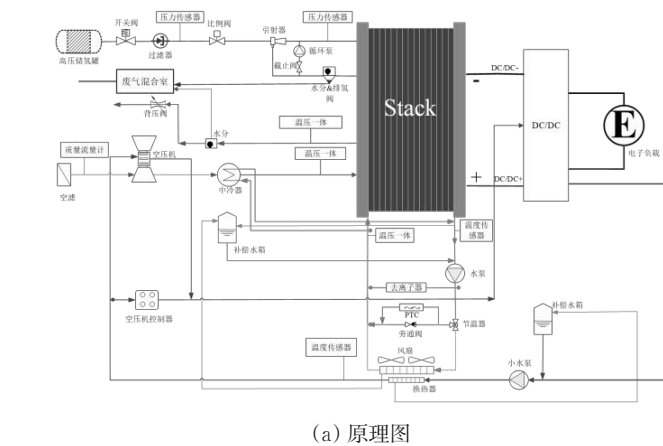
目前, 乘用车燃料电池系统研发路线向高集成度、高功率密度、长耐久性迈进^[4]。丰田汽车于 2014 年和 2020 年先后发布了当时最先进的燃料电池乘用车^[5-7], 其中, Mirai 车型的燃料电池二代体积功率最高达到 5.4 kW/L^[6], 系统组件如 DC/DC 转换器、辅助部件、主控制器等与电堆高度集成化, 可安装在发动机舱内。中国的燃料电池乘用车技术正在蓬勃发展, 但与世界最先进水平仍有差距。乘用车燃料电池系统在车辆道路行驶下要面临多变的环境条件和反复的经受启停、变载等工况, 这对性能输出和耐久性提出了巨大的挑战^[8]。从关键材料和结构的角度进行创新的设计以实现从单片电池到电堆再到系统三级层面的性能和耐久提升已有大量的工作和成果, 但这需要大量的研发时间和成本^[9]。在现有材料的基础上, 从系统控制的角度提出针对性的控制策略以提高系统的净功率输出、发电效率和延长耐久性是一种行而有效且可以快速迭代的方法^[10]。系统控制从宏观上调节运行参数例如流量、压力和温度等可提高微观层面的电化学反应效率及缓解材料的衰减例如碳腐蚀、铂团聚和膜干裂等^[11-13]。车用燃料电池系统由空气供给子系统、氢气供给子系统、水热管理子系统、电气管理子系统和控

制单元组成,各子系统的协调控制是实现燃料电池系统高性能和长耐久性的关键。

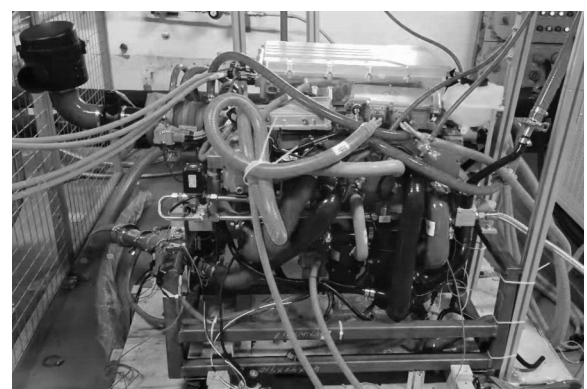
本文面向乘用车大功率燃料系统的研发需求,在课题组的研究基础上,设计并集成了乘用车用 120 kW 高比功率自增湿燃料电池系统。针对搭建的系统,利用 Matlab/Simulink 软件与 Motoshawk 平台快速开发原型进行了系统控制器的软件开发,实现了各子系统的控制算法及控制目标。通过实施面向满足电堆运行需求的高效且长耐久的控制策略,实现了系统运行的高效率给与高可靠性。

1 高比功率自增湿燃料电池系统集成

为了适应乘用车的搭载空间,系统需要高度集成化。120 kW 高比功率自增湿燃料电池系统原理



如图 1 所示。系统的集成方案从整车需求出发,以高功率密度为目标,逐层级的提出对燃料电池系统、电堆、各关键零部件的要求。整套系统以 120 kW 燃料电池堆为主体,分别适配满足电堆运行需求的辅助子系统。辅助子系统包括了供气子系统,供氢子系统,电堆冷却子系统、辅助部件冷却子系统以及控制子系统。各子系统部件根据电堆接口的位置进行布置,尽可能的减少管路、线束等在连接各部件和传感器时出现冗余,减低传输阻力、提高传输速度,从而提高集成化程度。如图 1(a)所示,系统集成的一大创新点是去掉了传统的外部加湿器,转而通过电堆材料和结构创新、氢气再循环和氢空逆流配置来实现系统的自加湿功能,这对整套系统的高集成度意义重大。



(a) 原理图 (b) 测试台架

图 1 燃料电池系统

Fig.1 Schematic diagram and test bench of fuel cell system

集成的系统实际测试台架如图 1(b)所示。整套系统的主体为峰值功率达 120 kW 的电堆,电堆的规格参数如表 1 所示。

表 1 120 kW 电堆规格
Tab.1 Specification of 120 kW stack

参数	参数值
单片数目	360 个
连接模式	串联
有效活性面积	298 cm ²
电压范围	212~360 V
电流范围	0~570 A
峰值功率	120 kW
体积比功率	3.4 kW/L

在这里,以供气子系统为代表进行匹配介绍。供气子系统的匹配是系统匹配中最关键的,因为供气的响应性、稳定性强烈关系到电堆的输出性能和

耐久性。采用离心式压缩机和背压阀的组合来提供电堆所需的空气质量流量和压力。供气子系统的匹配需要满足全功率范围内的供气需求。所配备的离心式空压机关键技术参数如表 2 所示。空压机的实际 MAP 图与电堆全功率工况的匹配曲线如图 3 所示。

通过实际的匹配和标定,可以发现,空压机的流量/转速/压比 MAP 图可以覆盖到电流在 0~570 A 范围内的任一供气需求。通过协调控制转速和背压阀,可以实现阴极所需的流量和压力。

2 系统控制及软件开发

2.1 应用层软件开发

图 3 展示了燃料电池控制系统应用层软件开发

表2 离心式空压机规格

Tab.2 Specifications of centrifugal air compressor

参数	参数值
最大流量	180 g/s @ 压比 2.3
额定流量	144 g/s @ 压比 2.8
额定功率	22 kW
冷却方式	水冷
转速范围	$(30 \sim 95) \times 10^3 \text{ r/min}$
工作温度范围	$-30 \sim 65^\circ\text{C}$
重量	$\leq 13.5 \text{ kg}$

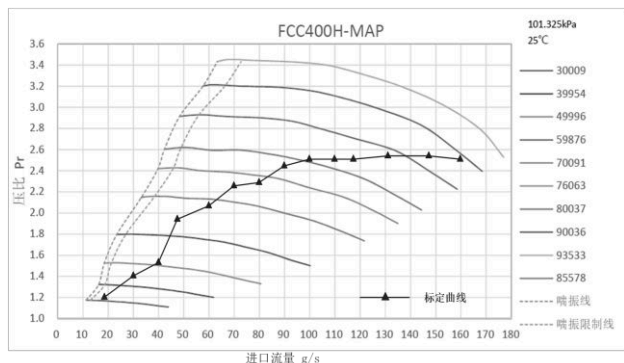


图2 全功率范围内的供气条件匹配

Fig.2 Matching of air supply conditions over the full power range

架构,通过上位机将控制指令下发至FCU,FCU与各传感器和执行器进行通讯并实现具体的功能。传感器数据通过模拟信号输入接口实时传输到上位机监控界面,SECM112控制器拥有33路模拟输入量接口,可以满足燃料电池系统中全部的温度、压力、流量等传感器的应用。系统中包含7路CAN信号,分别为空压机、循环泵、节温器、DCDC、PTC、CVM、水泵。通过CAN总线实现FCU与各部件的信息交互。系统中涉及的一些阀门和风扇通过低边输出(布尔或PWM)和H桥进行驱动。

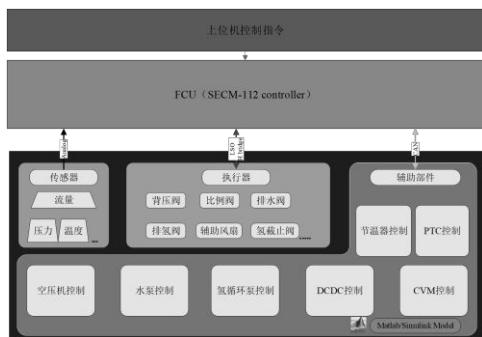


图3 系统应用层软件架构

Fig.3 System application layer software architecture

基于MotoHawk和Matlab/Simulink开发的系统控制模型。根据系统功能定义开发了完整的系统

程序。包括各种运行状态、状态之间的切换以及不同状态的控制策略。根据车载运行条件,状态机分为开机自检、待机、自动运行、停机前吹扫、放电、关机、急停。根据不同的状态,进行不同的控制计算,然后驱动部件执行动作,从而实现相应地功能。

2.2 面向高效和长耐久的控制策略

燃在车载应用场景中,工况的变化会引起燃料电池系统状态参数的变化,如果系统经历在恶劣的条件下(高温、缺氧、水淹等),将会导致电堆内部关键材料(膜、碳载体、气体扩散层等)的不可逆衰减,从而造成系统效率下降与耐久性下降。因此,面向高效、长耐久的燃料电池系统控制策略开发,应立足于解决变载瞬间缺氧、氢气快速跟随、电堆进出口温差和温度及加减载速率等问题,实现氢气子系统、空气子系统、冷却子系统和电气子系统的协调与闭环控制。在这里,以空气供给控制为代表进行讨论。

一般来说,空气子系统的控制是决定燃料电池系统高效率、高性能和长寿命的关键。控制目标是在循环变载期间快速的提供给电堆精准的空气流量和压力,以避免缺氧和空压机过度功耗。面对空气流量和压力强耦合的问题,采用一种易于标定地双回路模糊前馈加分段PI反馈控制策略来实现流量和压力的解耦闭环控制^[14]。根据电堆在不同工况下所规定地标准进气条件进行实验。图4显示了空气流量和压力解耦控制策略下的控制效果。系统电流运行曲线如图4(a)所示,由图可见,从50 A逐渐加载到330 A,DCDC几乎无差别的响应了设定电流指令,表明了反应物供给可以满足电流拉载的需求。图4(b)显示了解耦控制器对空气流量的控制效果,由图可见,在加载瞬间,由于空压机的响应惯性和控制器的超调,流量会出现短暂的上冲现象,但是,从接收到加载信号到流量达到稳定的时间控制在2 s以内,这避免了氧饥饿现象,是满足工程应用的。在整个运行期间,流量的稳态误差在 $\pm 2.5 \text{ g/s}$ 以内,考虑到传感器和控制器在采集、测量、噪声等方面造成的精度波动,这个误差效果在可接受范围内。图4(c)展示了过氧比的跟随效果,过氧比很好的跟随在设定值附近,波动极差在0.2之内。图4(d)显示了压力动态响应控制效果,解耦控制使进气压力与进气压力解耦,很好的跟随了设定值。在加载瞬间,流量到达设定值的响应时间在2 s以内,之后能够稳定的实现跟随控制,稳态运行期间,误差在 $\pm 1.5 \text{ kPa}$ 之内,保证了进气压力的稳定性。

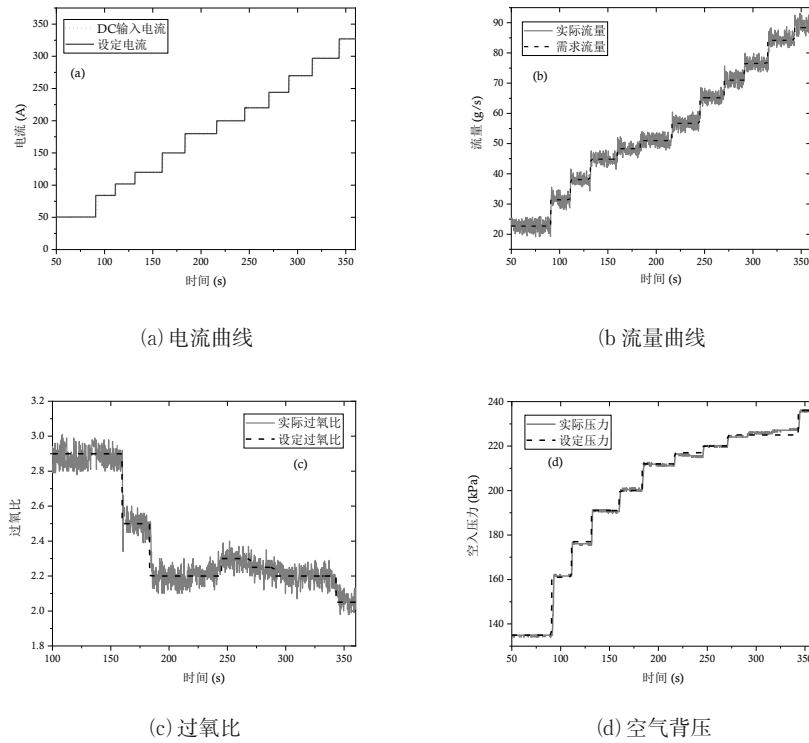


图4 空气进堆流量和压力解耦控制效果

Fig.4 Air flow into stack and pressure decoupling control effects

3 动态性能分析

3.1 输出性能

将所开发地控制策略转化成控制算法,形成一套完整的系统控制程序并下载到燃料电池系统控制器内,进行了120 kW系统的性能实验,其系统输出性能实验结果如图5所示。由图可见,当系统拉载至电流密度为1 781 mA/cm²时,单体平均输出电压为0.62 V,电堆输出功率达到峰值为120.2 kW,此时的系统峰值净功率达到97.8 kW,辅助部件功耗占比为18.6%。本系统实现了单体均压高于0.6 V下,峰值功率达到120 kW的设计目标。随着系统净功率的上升,效率整体呈现下降的趋势,本系统在净功率13 kW时,系统效率突破60%,最高效率则达到62%,达到国内先进水平。

3.2 电堆一致性

大尺寸燃料电池电堆在运行过程中,单电池之间的一致性与燃料电池的输出性能和耐久性强烈相关。本套系统由360片单电池组成,因此,电压一致性是评价电堆运行状态的极其重要的一个指标。本文从极差和电压变异系数 C_v 两个角度出发,来表征单体之间的一致性水平。极差通过单体均压减去单

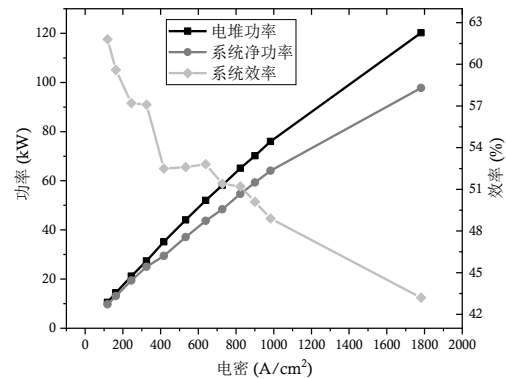


图5 120kW系统输出性能分析

Fig. 5 120 kW system output performance analysis

体最低电压计算得来, C_v 的计算公式如式(1)所示。

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{v_i - \bar{v}}{\bar{v}} \right)^2}{N}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N 代表单电池数目, v_i 为第 i 片单电池电压, \bar{v} 为单电池平均电压。

图6显示了电堆功率从20 kW加载至110 kW时的极差变化。随着功率的增加,极差呈现增大的趋势,并出现了一个明显的分界点。当堆功率低于100 kW时,极差控制在5~10 mV范围内波动,中位

值为10 mV左右;当堆功率高于100 kW时,极差在20~35 mV范围内波动,中位值为25 mV左右。总体而言,在实施前述所开发地系统控制策略下,电堆的极差控制在一个较好的范围内,满足电堆的标准操作要求。电压变异系数在负载变化期间的变化情况,本套系统的额定功率根据适配车辆的需要规定在60 kW,对应的电堆功率为70 kW左右。在电堆从启动加载至70 kW期间,观察了 C_v 的变化趋势。结果显示,在启动阶段,单体电压的不稳性主要是由于供氢和供气从开始启动到均匀分配具有一定的时间间隔,因此观察到 C_v 达到了4.5%。之后,电压迅速稳定, C_v 迅速下降。在整个加减速期间, C_v 控制在1%以内,是一个非常亮眼的结果,为系统高可靠和高持久的运行提供了基础。在2 100 s之后,系统进入到关机程序,切断了供氢和供气的同时电堆在放电模式,因此使得 C_v 突增。

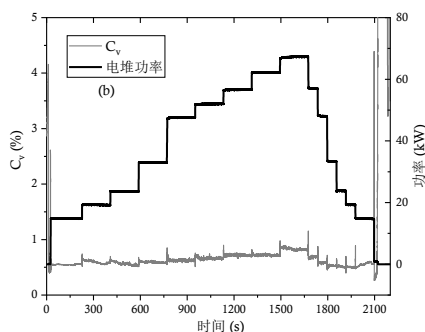


图6 120kW电堆在动态工况下的一致性分析

Fig. 6 Consistency analysis of 120kW stack under dynamic conditions

4 结语

根据燃料电池乘用车的开发需求,本文进行了大功率自增湿燃料电池系统的一系列研究。进行了120kW燃料电池系统的集成与匹配工作,以满足乘用车用的高集成度,高功率密度等要求。完整的开发了面向高效和和长耐久性的系统控制算法,并以空气子系统为代表进行了详细讨论。所开发的算法实现了空气流量和压力的高精度解耦控制以避免氧饥饿并提高输出性能。将开发的完整的系统控制程序下载到燃料电池控制单元,进行了系统的性能验证实验。电堆峰值功率达120.2 kW,系统净功率达到97.8 kW,最高系统效率突破62%,达到国内先进水平。在一系列的加减速试验下,电堆的 C_v 在1%以内,证明了系统高度的稳定性和一致性。

参考文献:

- [1] WU D, PENG C, YIN C, *et al.* Review of system integration and control of proton exchange membrane fuel cells [J]. *Electrochemical Energy Reviews*, 2020, 3(3): 466.
- [2] 方川,袁殿,邵扬斌,等. 面向冬奥示范的新一代燃料电池系统技术突破[J]. *汽车工程*, 2022, 44(4): 535.
FANG Chuan, YUAN Dian, SHAO Yangbin, *et al.* Technical breakthrough of new generation fuel cell system for winter olympics application environment [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(4): 535.
- [3] 刘鹏程,许思传. PEMFC电堆动态工况响应性能试验[J]. *化工进展*, 2021, 40(6): 3172.
LIU Pengcheng, XU Sichuan. Experimental study on dynamic response performance for PEMFC stack [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(6): 3172.
- [4] WANG J. System integration, durability and reliability of fuel cells: Challenges and solutions [J]. *Applied Energy*, 2017, 189: 460.
- [5] HASEGAWA T, IMANISHI H, NADA M, *et al.* Development of the fuel cell system in the Mirai FCV [R]. SAE Technical Paper Series, 2016.
- [6] ITOGA M, HAMADA S, MIZUNO S, *et al.* Development of fuel cell stack for new FCV [R]. SAE Technical Paper Series, 2016.
- [7] YOSHIZUMI T, KUBO H, OKUMURA M. Development of high-performance FC stack for the new Mirai [R]. SAE Technical Paper Series, 2021.
- [8] ZHANG B, WANG X, GONG D, *et al.* Experimental analysis of the performance of the air supply system in a 120 kW polymer electrolyte membrane fuel cell system [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(50): 21417.
- [9] 衣宝廉,侯明. 车用燃料电池耐久性的解决策略[J]. *汽车安全与节能学报*, 2011, 2(2): 91.
YI Baolian, HOU Ming. Solutions for the durability of fuel cells in vehicle applications [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2011, 2(2): 91.
- [10] 王亚雄,王轲轲,钟顺彬,等. 面向耐久性提升的车用燃料电池系统电控技术研究进展[J]. *汽车工程*, 2022, 44(4): 545.
WANG Yaxiong, WANG Keke, ZHONG Shunbin, *et al.* Research progress on durability enhancement-oriented electric control technology of automotive fuel cell system [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(4): 545.
- [11] WRW D, R RE, EH M, *et al.* PEM fuel cell system control: A review [J]. *Renewable Energy*, 2017, 113: 620.
- [12] YANG B, LI J, LI Y, *et al.* A critical survey of proton exchange membrane fuel cell system control: Summaries, advances, and perspectives [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(17): 9986.
- [13] LI Q, LIU Z, SUN Y, *et al.* A review on temperature control of proton exchange membrane fuel cells [J]. *Processes*, 2021, 9(2) 235.
- [14] LIU Z, ZHANG B, XU S. Research on air mass flow-pressure combined control and dynamic performance of fuel cell system for vehicles application [J]. *Applied Energy*, 2022, 309: 1108.