

# 燃料电池电动汽车动力系统能量管理策略研究进展

武小花, 邹佩佩, 傅家豪, 邓鹏毅, 杨燕红, 蔡云, 曾昭炜

(西华大学汽车与交通学院汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都 610039)

**摘要:** 燃料电池汽车以“高效、清洁、零污染”的优点被认为是未来新能源汽车的发展方向。目前全球主要汽车公司大都已经完成了燃料电池汽车的基本性能研发, 中国的燃料电池汽车技术研发也取得重大进展。本文分析了国内外燃料电池乘用车、客车及物流车的动力系统应用现状和结构特性, 对当前燃料电池汽车动力系统能量管理策略进行了综述, 并对未来燃料电池汽车动力系统能量管理的发展进行了一定的探讨。

**关键词:** 燃料电池; 燃料电池汽车; 动力系统; 能量管理策略

中图分类号: U469.72+2 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2020)04-0089-08

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.3593

## Research Progress on Energy Management Strategies of Fuel Cell Electric Vehicle Power Systems

WU Xiaohua, ZOU Peipei, FU Jiahao, DENG Pengyi, YANG Yanhong, CAI Yun, ZENG Zhaowei

(Vehicle Measurement Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu 610039 China)

**Abstract:** Fuel cell vehicles are considered to be the development direction of new energy vehicles in the future due to their advantages of "high efficiency, cleanliness, and zero emission." At present, most of the major automobile companies in the world have completed the basic performance research and development phase of fuel cell vehicles, and China's fuel cell vehicle technology research and development has also made significant progress. This paper analyzes the application status and characteristics of power system of domestic and foreign fuel cell passenger cars, buses and logistics vehicles. At the same time, the energy management strategies adopted by current fuel cell vehicles are reviewed, and the future development of fuel cell electric vehicles is discussed.

**Keywords:** fuel cell; fuel cell vehicle; power system; energy management strategy

收稿日期: 2020-03-10

基金项目: 四川省重大科技专项项目(2019ZDZX0002); 四川省区域创新合作项目(2020YFQ0037); 四川省软科学项目(2019JDR0076); 四川省科技计划项目(2020YFG0359, 2019YFG0297, 18CGSF0120); 成都市科技项目(2019-RK00-00025-ZF)。

第一作者: 武小花(1984—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为新能源汽车控制技术。

ORCID: 0000-0001-7692-7863 E-mail: xiaohuawu13@163.com

引用格式: 武小花, 邹佩佩, 傅家豪, 等. 燃料电池电动汽车动力系统能量管理策略研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 89-96.

WU Xiaohua, ZOU Peipei, FU Jiahao, et al. Research Progress on Energy Management Strategies of Fuel Cell Electric Vehicle Power Systems[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2020, 39(4): 89-96.

随着环境和能源问题的日益突出,新能源汽车成为了世界各大汽车厂商及研发机构的研究热点,而燃料电池电动汽车具备高效率 and 近零排放的优点,被普遍认为具有广阔的发展前景<sup>[1-2]</sup>。本文主要针对国内外燃料电池汽车动力系统应用现状、结构特性、能量管理策略等方面进行分析,以全面了解当前燃料电池汽车的动力系统能量管理策略。

## 1 燃料电池汽车动力系统应用

近年来,中国的燃料电池电动汽车技术研发取得重大进展,初步掌握了整车、动力系统与核心部件的核心技术,基本建立了具有自主知识产权的燃料电池乘用车、燃料电池客车及燃料电池物流车动力系统技术平台。

### 1.1 燃料电池乘用车

当前国内外主要汽车厂商如丰田、本田、现代、上汽等都已经开发出燃料电池乘用车并已上路运行,普遍状况良好。其中国内外主要燃料电池乘用车参数和性能如表1所示。就燃料电池乘用车而言,燃料电池系统功率密度与早期相比有很大程度的提升,整车性能成熟度基本达到产业化水平,已经可以与传统的内燃机相媲美。目前国外主要采用70 MPa的储氢系统,而国内基本上采用的是35 MPa的储氢系统,所以一次性加注的续航里程比国外要短。从动力系统的基本配置来看,最大的差别在于燃料电池系统的功率输出大小,国外乘用车燃料电池系统的输出功率在100 kW~120 kW,韩国现代NEXO的燃料电池系统功率可达120 kW,国内乘用车的燃料电池系统功率仅为35 kW~50 kW<sup>[3-4]</sup>。整体来说,我国已经初步掌握了燃料电池电堆及其关键材料、动力系统、整车集成和氢能基础设施的核心技术,但是燃料电池系统功率范围、冷启动性能、耐久性等关键技术与国外还有较大差距,目前我国燃料电池乘用车主要应用于汽车租赁行业。

### 1.2 燃料电池客车

国外燃料电池客车在动力性和稳定性上已经满足示范运行要求,同时可靠性也得到了验证。美国、欧盟、日本、韩国示范运行的燃料电池公交车动力系统参数如表2所示。美国在2006年就启动了国家燃料电池公共汽车计划,截至2019年5月,

表1 国内外燃料电池乘用车主要参数和性能<sup>[5-8]</sup>

	丰田	本田	现代	上汽荣威
汽车品牌	Mirai	Clarity	NEXO	950
上市年份	2014	2016	2019	2015
车重/kg	1 850	1 890	2 290	2 094
最高车速/(km/h)	175	166	179	160
百公里加速时间/s	9.6	8.9	9.5	—
燃料电池功率/kW	114	103	120	36
冷启动性能/°C	-30	-30	-30	-20
电池电量/kWh	1.6	17	1.9	—
电机功率/kW	113	130	120	110
续航里程/km	502	750	596	350

美国道路上共有6547辆燃料电池汽车,而加州运营中的燃料电池公交车有30辆<sup>[9]</sup>。2011年底欧盟正式启动欧洲城市清洁氢能项目,该项目在欧洲许多城市以及加拿大一个地区设立了燃料电池公交车车队及加氢站,共示范54辆燃料电池公交车,证明了燃料电池公交车可为促进城市交通低碳化、提高城市空气质量,提供切实可行的解决方案<sup>[10]</sup>。日本丰田在2017年宣布推出燃料电池概念巴士,预计将于2020年东京奥运会和残奥会前投入100余辆示范运营<sup>[11]</sup>。韩国现代汽车也助力政府生产燃料电池大巴车,2019年向韩国六个主要城市投放30辆氢燃料电池公共汽车<sup>[12]</sup>。

表2 国外燃料电池公交车动力系统分析<sup>[13-16]</sup>

客车厂家	美国New Flyer	欧洲Van hool	丰田Sora	韩国现代
车长/m	16	12	10.525	—
燃料电池功率/kW	2×85	120	2×114	2×95
燃料电池厂家	Ballard	US hybrid	丰田	现代
动力电池容量/kWh	—	21	235	49
电机功率/kW	210	—	2×113	240
续航里程/km	483	—	200	450

当前国内自主研发的燃料电池客车已陆续进入示范运行当中,宇通客车、中通客车、福田汽车等40多家企业均在推进燃料电池客车的商业化运行。截止目前我国已有郑州、张家口、大同、上海、武汉、佛山、云浮、北京、如皋、盐城、张家港、抚顺、成都、聊城等城市开通了氢燃料公交线路,未来将有更多城市开通。中国燃料电池公交车开通城市及动力系统主要参数如表3所示。根据新能源汽车国家监管平台数据统计,截至2019年

表3 中国燃料电池公交车动力系统分析<sup>[1]</sup>

城市	车长/m	燃料电池功率/kW	电机额定(峰值功率)/kW	整车供应商	动力系统供应商
张家口	12	60	100(200)	宇通	亿华通
	10	30	100(150)	福田	
武汉	8.5	40	80(150)	开沃新能源	泰歌/雄韬氢雄
郑州	12	50	100(200)	宇通	重塑
大同	10.5	45	100(200)	中通	雄韬氢雄
聊城	9	32	60(155)	中通	重塑
上海	12	60	—	上海申沃	上汽
北京	12	60	100(150)	福田	亿华通
佛山	11	60/88	100(200)	佛山飞驰	广东国鸿/亿华通
云浮	11	84	100(200)	佛山飞驰	广东国鸿/亿华通
张家港	10.5	50/60	100(200)	宇通/苏州金龙	亿华通/重塑
如皋	10.5	30	80(160)	青年汽车	南通百应能源
盐城	12	30	80(140)	南京金龙	江苏兴邦能源
成都	9	47	90(150)	蜀都	东方电气

12月31日,全国共有1462辆燃料电池客车示范运行,占全国氢燃料电池汽车的39.4%<sup>[1]</sup>。

随着燃料电池客车动力系统和整车集成技术的突破,氢燃料电池客车在系统使用寿命、环境适应性、续航里程等方面均得到进一步提升。如宇通燃料电池客车置于零下30℃高寒环境舱20小时后,可实现15分钟内成功启动,多次启动后燃料电池系统性能无衰减,车载氢系统安全无泄漏<sup>[16]</sup>。中通燃料电池客车可实现零下30℃环境下的正常运行,车辆加氢时间小于15分钟,续航里程达500 km以上<sup>[17]</sup>。

### 1.3 燃料电池物流车

经济发展和城市化进程加快,对货物运输车辆的节能减排性能提出了更高的要求:一是从高污染、高排放车辆向低污染、低排放清洁运输车辆发展;二是从高能耗、低效率车辆向低能耗、高效率运输车辆发展。在近年的国际商用车展上,丰田、戴姆勒、现代、康明斯等都展出了自己的燃料电池卡车,其中以中重型卡车为主<sup>[18-19]</sup>。国内外车企推出的燃料电池物流车性能和动力系统主要参数如表4所示。

从上述国内外燃料电池汽车发展现状来看,我国对燃料电池电动汽车的研究主要集中在客车和物流等商用车,对乘用车的研究以及产业化的推进相对较少;而日韩主要是先发展燃料电池乘用车,

表4 国内外主要燃料电池物流车参数<sup>[18-22]</sup>

品牌	总质量/kg	燃料电池功率/kW(供应厂商)	电机额定(峰值功率)/kW	电池电量/kWh	续航里程/km
中通	7 985	30(亿华通)	60	61.82	530
福田欧马	8 275	31.3	60	50.37	410
东风	7 510	30(重塑)	60(120)	—	360
佛山飞驰	3 500	32	60(120)	42	300
一汽解放	8 000	32	120(164)	24	400
潍柴亚星	4 495	150/204	60(150)	26	—
江铃重卡	33 070	95(上海杰宁)	150(250)	—	400~500
大禹	8 250	120/163	60(120)	—	—
Toyota	40 000	114×2(Toyota)	—	12	320
Daimler	7 500	75(Daimler)	135	13.8~40	300
Hyundai	18 000	95×2(Hyundai)	350	—	400
Cummins	—	90(Cummins)	—	100	240~400

并且目前技术已经比较成熟,对商用车涉及较少。当前各国政府和企业都在积极推进燃料电池电动汽车的发展,未来也将会会有更多的燃料电池电动汽车出现。

## 2 燃料电池汽车动力系统结构

燃料电池系统技术的提高对于改善燃料电池汽车的经济性和稳定性有很大作用。从美国、欧

洲和日本等发达国家和地区的燃料电池汽车发展现状看,全球主要汽车公司都已经完成了燃料电池电动汽车的基本性能研发,解决了电堆技术、整车性能等核心技术问题<sup>[23]</sup>。随着这些发达国家的燃料电池汽车技术趋于成熟,大多数企业的燃料电池系统功率已超过 100 kW。如康明斯配套韩国现代公司的燃料电池重卡的燃料电池功率已达到 180 kW<sup>[19]</sup>。国内的燃料电池功率也在不断提高,2019年亿华通研发的大功率氢燃料电池系统额定功率已超过 100 kW,主要应用于公路客车、重卡等大功率作业车型<sup>[24]</sup>。根据《新能源汽车推广应用推荐车型目录(2019年第11批)》,燃料电池系统的额定功率平均值已达到 52 kW<sup>[25]</sup>。近年来,国内的许多企业在燃料电池系统技术方面已经有了极大的提高。

然而,单一的燃料电池系统还不能满足车辆功率需求的急剧变化,功率波动可能损坏燃料电池堆并缩短燃料电池的循环寿命。因此,燃料电池系统总是与其他储能设备(如动力电池和超级电容)结合使用,以提高燃料电池汽车动力系统的功率密度并满足负载功率需求。当前主流的燃料电池汽车动力系统结构为燃料电池+动力电池(FC+B),少数燃料电池汽车采用燃料电池+超级电容(FC+S)或者燃料电池+动力电池+超级电容(FC+B+S)的结构<sup>[26]</sup>。虽然 FC+B+S 结构在续航里程及动力特性上最佳,但复杂的结构增加了控制的要求。FC+S 结构虽然能协助燃料电池快速达到工作温度,但在实际使用中仍未达到预期效果。而 FC+B 结构在满足混合动力系统基本功能的同时,以更佳的稳定性被广泛应用在实际的燃料电池电动汽车上。三种典型的燃料电池汽车动力系统结构特点及应用车型如表 5 所示。

表 5 燃料电池汽车动力系统结构特点及代表车型<sup>[26]</sup>

动力系统	结构特点	代表车型
FC+B	工况适应性好	丰田mirai、本田clarity、现代nexo、荣威950
FC+S	加速爬坡响应快,启动性能好,但是功率密度小,并具有自放电特性	本田FCV-3、马自达FCEV
FC+B+S	改善了回收制动能量的效果,但结构相对复杂,控制难度大	本田FCHEV-4

### 3 动力系统能量管理策略研究

整车能量管理策略是提高燃料电池汽车动力性和经济性,以及降低排放的关键。目前,国内外关于燃料电池汽车动力系统能量管理策略的研究有很多,主要分为基于规则的方法和基于优化的方法。本节将对当前燃料电池汽车动力系统能量管理策略的研究进行概述分析。

#### 3.1 基于规则的控制策略

目前规则型能量管理策略主要分为恒温器控制、功率跟随控制、功率平衡控制、状态机控制、常规模糊规则控制、自适应模糊规则控制等。文献[27]针对配置燃料电池/动力电池的燃料电池汽车,基于规则的“恒温器”能量管理策略,提出了基于极小值原理的“恒温器”能量管理策略,通过调节协态变量维持动力电池 SOC,从而显著提高整车经济性。文献[28]针对燃料电池增程式商用车,通过比较和分析开关控制策略、功率跟随控制策略和模糊逻辑控制策略的特点,建立了功率跟随模糊能量控制策略,提高了动力系统的效率及功率性能。文献[29]提出一种基于卡尔曼观测器的燃料电池混合动力系统功率平衡控制策略,实现了燃料电池混合动力系统控制规律的解析设计,离线仿真和实车转鼓验证实验表明所设计的控制方法能够较好地达到既定的控制目标,并且能够考虑动力系统的动力性和经济性设计要求。文献[30]针对配置燃料电池/动力电池和配置燃料电池/动力电池/超级电容器的动力系统提出了一种基于有限状态机的管理策略,通过实验和仿真证明该策略能够满足大多数行驶工况的功率需求。文献[31]针对使用具有超级电容器组的直接并联结构的燃料电池-LiFePO<sub>4</sub> 电池混合动力总成,提出了基于模糊控制的能量管理,通过硬件在环验证了能量管理策略的有效性。文献[32]建立了燃料电池客车模糊控制能量管理策略,研究表明该策略在车辆经济性和燃料电池耐久性方面均优于功率跟随式能量管理策略。文献[33]针对配置燃料电池系统和锂离子电池燃料电池汽车,设计了带有模糊逻辑参数调整的自适应控制方法,该方法可适应不同的驾驶条件。文献[34]提出了一种燃料电池汽车功率实时自适

应控制策略,运用模糊控制进行优化,对控制器增益进行模糊化输出,有效跟踪负载并回收制动能量,从而实现燃料电池动力系统功率的合理分配,提高能量利用率。基于模糊的规则能量管理策略相比于其他规则策略具有更好的鲁棒性、适应性和可调性。

总的来说,基于规则的能量管理算法技术难度低、在线计算量小,实车在线应用广泛,但是很难取得接近最优的控制效果。

### 3.2 基于优化的控制策略

对燃料电池汽车的能量管理策略而言,如果是单纯的功率分配,那么规则型的控制策略已经可以较好地完成任务。但是当考虑了氢燃料消耗、成本、排放以及动力系统的寿命,就需要采用优化控制的方法来研究燃料电池汽车的能量管理策略。当前应用的优化型控制策略主要分为线性规划、动态规划、随机动态规划、凸优化、庞特里亚金最小值原理及模型预测控制等。

文献[35]在考虑系统部件的生命周期成本(耗氢量和操作成本)的基础上,采用线性规划算法对燃料电池汽车的能量管理策略进行了离线优化,并使用PID控制进行在线控制。文献[36]提出了一种基于动态规划最优结果的实时和多目标控制的燃料电池汽车运行控制策略,实验结果表明该策略可获得良好的燃料经济性和系统耐久性。文献[37]针对动态规划算法在燃料电池汽车能量管理控制存在的蓄电池荷电状态误差累积的问题,提出一种误差累积解决方法,获得最优决策。文献[38]提出了一种快速统一的方法来求解燃料电池电动汽车动态规划能量管理的最优问题,该方法在计算时间和计算精度上均优于基本动态规划和水平集动态规划。动态规划方法可获得全局最优的控制效果,广泛应用于能量管理策略的静态分析,但是其必须在车辆状态和行驶工况完全已知的情况下才能准确求解全局最优的控制决策,且优化结果和计算速度对控制变量和状态变量离散化网格极其敏感。

在保证动力性的前提下,文献[39]以燃料消耗最少和延长超级电容的使用寿命为优化目标,基于马尔可夫决策理论提出了燃料电池城市客车随机

动态规划能量管理策略。文献[40]在同时考虑燃料电池汽车氢消耗率和燃料电池寿命的基础上,提出了一种基于随机动态规划优化控制器的能量管理策略。文献[41]基于凸优化方法,同时优化了燃料电池客车的动力系统参数和能量管理策略。凸优化方法可以获得与动态规划接近的全局最优结果,可用于快速集成、优化和控制燃料电池汽车动力系统设计的初步阶段。

上述优化能量管理策略实现全局优化的前提是需要预先获知汽车行驶的全部路况信息,并且上述优化算法计算量大、时间长,在线实时控制较为困难。近年来,等效燃料消耗最小、模型预测控制等实时优化控制策略在燃料电池汽车的能量管理策略中也得到广泛应用。

文献[42]通过庞特里亚金最小值原理得出插电式燃料电池汽车的能量管理策略,实现控制问题的实时次优解决方案,使燃料消耗最小化。文献[43]结合燃料电池/电池和超级电容器动力总成的公共汽车的能耗和耐久性模型,以最大程度地减少能耗和燃料电池和电池的衰减为目的,提出了一种基于二维庞特里亚金最小原理的实时能源管理策略。文献[44]对燃料电池客车动力系统进行研究,以保证车辆的动力性、维持电池合理的荷电状态、提高车辆的经济性和燃料电池的耐久性为研究目标,基于庞特里亚金最小值原理设计了能适应不同工况的在线能量管理策略,通过仿真对能量管理策略进行了验证。文献[45]提出了一种适用于燃料电池、电池和超级电容器三种电源供电的燃料电池汽车的等效燃料消耗最小策略,并与基于规则的策略比较,结果表明等效燃料消耗最小策略具有较小的氢消耗和较长的燃料电池寿命。庞特里亚金最小值原理需要赋予合理的等效因子后才能迅速计算出最佳的控制决策,但是求取车辆复杂多变工况下的等效因子值目前尚无成熟的方法,无法广泛应用。

文献[46]针对燃料电池—锂电池混合动力系统,考虑了不同模式下的最佳功率分配控制,提出了基于性能指数最小化的混合模型预测控制策略,可以实现系统在每种运行模式下对最优性能指标的跟踪。文献[47]以提高燃料电池轿车能量经济

性为目标,采用模型预测控制对能量管理策略进行实时动态优化,并通过离线仿真及硬件在环仿真试验,对所提出的模型预测控制策略的有效性、实时性进行了验证。文献[48]针对燃料电池混合动力电动汽车能量管理中全局能耗最小化和实时应用的挑战,提出了一种基于分层强化学习、置信度树搜索和车速预测的新型分层能量管理策略,仿真结果表明该策略能使动力系统具有较好的经济性和耐久性。在考虑氢耗和燃料电池系统耐久性的基础上,文献[49]分别采用动态规划、庞特里亚金极小值原理、模型预测控制制定了燃料电池混合动力工程车辆的能量管理策略,仿真结果表明了模型预测控制的优势,不仅可以得到与基于动态规划策略相近的氢耗,而且可以显著地降低功率变化率。文献[50]采用Elman神经网络预测车速、马尔可夫驾驶模式识别以及多模式模型预测控制方法开发出了燃料电池汽车的自适应能量管理策略。文献[51]在考虑燃料电池和动力电池系统退化的情况下,以燃料电池客车的总运行成本最小为优化目标,以车速预测为基础制定能量管理策略,同时评估了车速预测范围对控制结果的影响。文献[52]采用递归神经网络对质子交换膜燃料电池进行建模及动态特性预测,提出了一种基于非线性模型预测控制的燃料电池汽车能量管理策略。模型预测控制可以在保证实时性的前提下,搜索控制域内带约束化问题的最佳控制决策,是实现能量管理算法在线实时运行的有效途径,应用前景广泛。

#### 4 总结与展望

从国内外对燃料电池电动汽车的研究看,国际一流的汽车制造商已经越过了燃料电池的基本性能研发阶段,解决了大部分技术问题。从整车性能、续航里程、可靠性等方面来看已经可以和传统的燃油汽车媲美。随着燃料电池技术的日益改进,各大汽车企业把研究重点主要放在燃料电池系统功率密度、寿命和成本上,而政府也在积极对加氢站等基础设施进行建设。

当前动力系统的能量管理策略能够有效地提高燃料电池汽车的动力性、经济性和燃料电池的耐久性。结合当前进展,从更加高效化、节能化、

智能化、环保化等角度出发,燃料电池汽车动力系统能量管理策略需要在以下几个方面开展更为深入的研究。

1)建立面向全生命周期的动力系统能量管理策略。燃料电池汽车的评价指标不应仅局限于整车的动力性、运行阶段的等效氢耗、使用成本,还应该包括动力系统全生命周期的成本、能耗、环境影响等因素。

2)考虑燃料电池/动力电池的动态衰减特性。燃料电池/动力电池作为燃料电池汽车动力系统的核心部件,其居高不下的价格及有限的寿命一直是影响燃料电池汽车推广的主要因素之一。结合燃料电池/动力电池的动态衰减模型建立有效的能量管理策略,可以显著提高燃料电池/动力电池的寿命。

3)基于大数据联盟和交通信息融合的多时间尺度工况预测能量管理。充分利用新能源汽车国家大数据平台中示范运行的燃料电池汽车运行数据、5G技术等,可建立燃料电池汽车多时间尺度的工况预测在线优化能量管理策略。

4)动力系统及能量管理的测试评价。建立并完善燃料电池汽车动力系统测试平台及测试评价标准,包括动力系统的特性测试评价、能量管理控制器的功能测试评价、测试平台的建设标准等。

#### 参 考 文 献

- [1] 新能源汽车国家大数据联盟. 全国氢燃料电池汽车数据分析报告 [EB/OL]. (2020-03-17)[2020-04-18]. <http://www.ndanev.com/2020/03/17/01-38/>.
- [2] 孔德洋,唐闻翀,柳文灿,等. 燃料电池汽车能耗、排放与经济性评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 498-503+523.
- [3] 刘海利,宋利军,梁欣. 车用氢燃料电池技术现状及发展方向[J]. 辽宁化工, 2019, 48(10): 1005-1008.
- [4] 陈广. 国内外燃料电池汽车的发展前景及市场状况[J]. 企业改革与管理, 2018(11): 219-220.
- [5] TOYOTA. Toyota users in the future with launch of "Mirai" fuel cell sedan [EB/OL]. (2014-11-18)[2020-02-9]. <https://global.toyota/en/newsroom/toyota/22740159.html#>.
- [6] HONDA. Honda 新款燃料电池汽车“CLARITY FUEL CELL”上市续航里程达 750 公里的零排放汽 [EB/OL]. (2010-03-14)[2020-01-18]. <http://www.honda.com.cn/news/detail.php?id=20160314>.

- [7] HYUNDAI. NEXO: The Next-Generation Fuel Cell Vehicle from Hyundai[EB/OL]. (2018-01-09)[2020-01-18].<https://www.hyundai.com/worldwide/en/company/news/news-room/news/NEXO:%20The%20Next-Generation%20Fuel%20Cell%20Vehicle%20from%20Hyundai-0000015682>.
- [8] 史宝华. 中国氢燃料电池汽车与国际先进水平有多大差距 [EB/OL].(2019-10-04)[2020-01-14]. <https://xueqiu.com/7901138929/133638013>.
- [9] 能链. 全球第一! 美国燃料电池汽车累计销售6547辆, 中国如何 [EB/OL]. (2010-05-15)[ 2020-01-18]. <http://www.trendbank.net/detail/9130/1/34>.
- [10] 王菊, 朱心怡. 国内外燃料电池汽车示范与应用情况综述[J]. 太阳能, 2017(8): 31 – 34.
- [11] ADRIAN PADEANU. Toyota sora fuel cell bus to debut in Tokyo[EB/OL]. (2017-10-22)[2020-01-18]. <https://insideevs.com/news/336068/toyota-sora-fuel-cell-bus-to-debut-in-tokyo/>.
- [12] SUSTAINABLE. Home/fuel cell/Hyundai, another step on hydrogen. A fuel cell police bus delivered in Korea [EB/OL]. (2019-11-07)[2020-01-18]. <https://www.sustainable-bus.com/fuel-cell/hyundai-another-step-on-hydrogen-a-fuel-cell-police-bus-delivered-in-korea/>.
- [13] NEW FLYER. Xcelsior CHARGE H2™[EB/OL]. (2019-10-04)[2020-01-18].<https://www.newflyer.com/buses/xcelsior-chargeh2/>.
- [14] NREL.U.S. Fuel cell bus projects[EB/OL].(2019-05-29)[2020-01-18].<https://search4.nrel.gov/texis/search/?pr=metanrel&query=fuel+cell+city+bus?>.
- [15] TOYOTA.丰田开始销售燃料电池巴士“SORA”[EB/OL].(2018-03-29)[2020-01-18].<http://www.toyota.com.cn/mobile/mediacenter/show.php?newsid=5065>.
- [16] 燃料电池客车亮相百人会, 宇通领衔客车产业“氢”时代 [J]. 城市公共交通, 2019(2): 82 – 83.
- [17] 任诗发. 2018年我国氢燃料电池车盘点[J]. 汽车与配件, 2019(6): 29 – 31.
- [18] GREEN CAR CONGRESS. Daimler trucks' fuso unveils fuel-cell light-duty truck concept and production heavy-duty Super Great truck with L2 automation[EB/OL]. (2010-10-25)[ 2020-01-18]. <https://www.greencarcongress.com/2019/10/20191025-fuso.html>.
- [19] 最高 180 kW! 康明斯氢燃料电池重卡发布 [EB/OL]. (2019-11-01)[2020-01-18]. <http://chuneng.ne21.com/show-15061.html>.
- [20] CARRIE H. Toyota reveals an improved fuel cell truck[EB/OL]. (2019-04-24)[ 2020-01-18]. <https://www.electrive.com/2019/04/24/toyota-reveals-an-improved-fuel-cell-truck/> (2019-04-24).
- [21] 现代 Xcient FuelCell 欧洲开跑, 燃料电池卡车的春天来了?[EB/OL].(2020-03-06)[2020-01-18]. <https://new.qq.com/omn/20200306/20200306A0PSF300>.
- [22] 蒋婷婷, 盘点目前的氢燃料电池物流车 [EB/OL]. (2019-07-11)[2020-01-18]. <http://www.evpartner.com/news/153/detail-46221.html>.
- [23] 曹建国, 廖然, 杨利花. 燃料电池电动汽车发展现状与前景[J]. 新材料产业, 2015(4): 58 – 63.
- [24] 拉里. 亿华通研发大功率氢燃料电池发动机额定功率超 100kW[EB/OL]. (2019-09-12)[ 2020-01-18]. <http://www.techweb.com.cn/smarttraveling/2019-09-12/2754272.shtml>
- [25] 氢云链.工信部 11 批推荐目录发布, 江铃重汽携 13 款燃料电池汽车上榜 [EB/OL].(2019-12-10)[2020-01-18].<https://auto.gasgoo.com/a/70144683.html>.
- [26] 陈湮佳. 燃料电池复合能源系统及能量管理发展综述[J]. 机电一体化, 2019, 25(Z1): 3 – 10+28.
- [27] 文佩敏, 宋珂, 章桐. 基于庞特里亚金极小值原理的燃料电池汽车“恒温器”能量管理策略[J]. 机电一体化, 2017, 23(12): 7 – 12.
- [28] GENG C, JIN X F, ZHANG X. Simulation research on a novel control strategy for fuel cell extended-range vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(1): 408 – 420.
- [29] 负海涛, 谭建荣, 赵玉兰. 燃料电池混合动力系统的功率平衡控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(3): 488 – 496+504.
- [30] WANG Y J, SUN Z D, CHEN Z H. Energy management strategy for battery/supercapacitor/fuel cell hybrid source vehicles based on finite state machine[J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113707.
- [31] XIE C J, XU X Y, PIOTRBUJLO, et al. Fuel cell and lithium iron phosphate battery hybrid powertrain with an ultracapacitor bank using direct parallel structure[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 279: 487 – 494.
- [32] 王哲, 谢怡, 孙维, 等. 燃料电池客车动力系统建模与能量管理策略研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 97 – 103+123.
- [33] CHEN J, XU C F, WU C S, et al. Adaptive fuzzy logic control of fuel-cell-battery hybrid systems for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(1): 292 – 300.

- [34] 徐陈锋. 基于自适应模糊策略的燃料电池车混合动力系统控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [35] DIMA FARES, RIADCHEDID, SAMIKARAKI, et al. Optimal power allocation for a FCHV based on linear programming and PID controller[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(36): 21724 – 21738.
- [36] HU Z Y, LI J Q, XU L F, et al. Multi-objective energy management optimization and parameter sizing for proton exchange membrane hybrid fuel cell vehicles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 129: 108 – 121.
- [37] 宋珂, 张涛, 牛文旭, 等. 燃料电池汽车能量管理动态规划算法的误差累积问题及解决方法[J]. *汽车工程*, 2017, 39(3): 249 – 255.
- [38] ZHOU W, YANG L, CAI Y S, et al. Dynamic programming for new energy vehicles based on their work modes Part II: Fuel cell electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 407: 92 – 104.
- [39] 张炳力, 代康伟, 赵韩, 等. 基于随机动态规划的燃料电池城市客车能量管理策略优化[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(17): 4664 – 4667.
- [40] THOMAS P.FLETCHER, Optimal energy management strategy for a fuel cell hybrid electric vehicle[D]. England: Loughborough University, 2017.
- [41] HU Xiaosong, NIKOLCEMURGOVSKI, LARS MARDHJOHANNESSON, et al. Optimal dimensioning and power management of a fuel cell/battery hybrid bus via convex programming[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(1): 457 – 468.
- [42] LAURATRIBIOLI, RAFFAELLOCOZZOLINO, DANIELECHIAPPINI, et al. Energy management of a plug-in fuel cell/battery hybrid vehicle with on-board fuel processing[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 140 – 154.
- [43] JIANG H L, XU L F, LI J Q, et al. Energy management and component sizing for a fuel cell/battery/supercapacitor hybrid powertrain based on two-dimensional optimization algorithms[J]. *Energy*, 2019, 177: 386 – 396.
- [44] 王哲, 谢怡, 臧鹏飞, 等. 基于极小值原理的燃料电池客车能量管理策略[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(1): 36 – 43.
- [45] LI H, ALEXANDRERAVEY, ABDOULN' DIAYE, et al. A novel equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 395: 262 – 270.
- [46] RICHARD T. MEYER, RAYMOND A. DE-CARLO, PETER H. MECKL, et al Hybrid model predictive power management of a fuel cell-battery vehicle[J]. *Asian Journal of Control*, 2013, 15(2): 363 – 379.
- [47] YANG Z, ALEXANDRE R, MARIE-CECILE P. Multi-mode predictive energy management for fuel cell hybrid electric vehicles using markov driving pattern recognizer [J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 114057.
- [48] HU X S, ZOU C F, TANG X L, et al. Cost-optimal energy management of hybrid electric vehicles using fuel cell/battery health-aware predictive control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(1): 382 – 392.
- [49] PEREIRA D F, LOPES F D, WATANABE E H. Nonlinear model predictive control for the energy management of fuel cell hybrid electric vehicles in real-time[EB/OL]. (2020-03-18)[2020-06-08]. <https://xplore.staging.ieee.org/document/9040637?denied=>.
- [50] 赵治国, 沈沛鸿, 郑怡颖, 等. 燃料电池轿车模型预测实时优化控制[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5): 648 – 657.
- [51] YUAN J N, YANG L, CHEN Q. Intelligent energy management strategy based on hierarchical approximate global optimization for plug-in fuel cell hybrid electric vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(16): 8063 – 8078.
- [52] LI T Y, HUANG L T, LIU H Y. Energy management and economic analysis for a fuel cell supercapacitor excavator[J]. *Energy*, 2019, 172: 840 – 851.

## 作者介绍



项目 2 项。

武小花(1984—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为新能源汽车控制技术。公开发表学术论文 10 余篇, 其中以第一作者在国际学术期刊 *IEEE Transactions on Smart Grid*、*Journal of Power Sources*、*Energy* 发表相关 SCI 期刊论文 4 篇, 发表 EI 论文 6 篇, 主持省部级项目 2 项, 主持地厅级

(编校: 侯雪婷)