

中国燃料电池公共汽车商业化示范项目办公室

燃料电池汽车 技术政策研究

王菊 郑贺悦 尤可为 于丹◎编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



中国燃料电池公共汽车商业化示范项目办公室

燃料电池汽车技术 政策研究

王 菊 郑贺悦 尤可为 于 丹 编著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池汽车技术政策研究/王菊等编著. —北京:北京理工大学出版社,2013. 1

ISBN 978 - 7 - 5640 - 7108 - 0

I. ①燃… II. ①王… III. ①燃料电池-电传动汽车-技术政策-研究
IV. ①U469. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 308210 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京泽宇印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 7.5

插 页 / 2

字 数 / 102 千字

责任编辑 / 梁铜华

版 次 / 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

责任校对 / 周瑞红

定 价 / 30.00 元

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换

近年来,随着全球能源与环境气候形势的日益严峻,能源安全和环境保护问题已成为国际汽车工业面临的共同挑战,而发展节能与新能源汽车则成为全球汽车工业的共同选择。世界各国在加快推进汽车产品节能的同时,纷纷将新能源汽车产业作为战略性新兴产业予以培育发展,新的国际竞争格局正在形成。为此,中国政府确定了推进传统汽车节能技术发展与加快新能源汽车发展并举的双重发展战略。目前在中国,新能源汽车主要包括混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车3种。本书主要以新能源汽车中的氢燃料电池汽车的发展为对象开展研究。

在“全球环境基金/联合国开发计划署(GEF/UNDP)中国燃料电池公共汽车商业化示范项目”执行期间,本书编写者所在团队从事了相关研究工作。本书集纳的就是他们的研究成果。全书共分8章,主要介绍国内外燃料电池公共汽车示范情况和氢基础设施建设情况,跟踪研究国内外燃料电池汽车发展方面的支持政策和规划,并借鉴世界发达国家在促进燃料电池汽车产业化方面的经验和应用成果,具体结合中国燃料电池公共汽车商业化示范项目在北京和上海开展的两期燃料电池公共汽车和基础设施示范运行的实例分析,探讨如何促进燃料电池公共汽车在国内的扩大示范和商业化。

上述项目研究得到了科技部、全球环境基金、联合国开发计划署的资助。同济大学、清华大学、上海汽车工业(集团)总公司、中国汽车技术研究中心、北京公共交通控股(集团)有限公司、北京清能华通科技发展有限公司等中国燃料电池公共汽车商业化示范项目各个参与单位提供了数据和技术支持,

美国阿岗国家实验室王全录博士对本书第7章全生命周期模型的方法学研究和模型计算方面提出了大量宝贵的建议，在此一并致谢。

本书主要参编人员有王菊、郑贺悦、尤可为、于丹。由于燃料电池汽车技术是新能源汽车与节能领域的新技术，许多实际问题还有待研究和解决，相关标准法规也正在逐步完善中，加上时间有限，作者经验和水平不足，书中错漏之处在所难免，恳请专家和读者批评指正。

编 者

2012年10月

主要符号对照表

EV	电动汽车（Electric Vehicle）
FC	燃料电池（Fuel Cell）
FCV	燃料电池汽车（Fuel Cell Vehicle）
FCB	燃料电池公共汽车（Fuel Cell Bus）
GHG	温室气体（Greenhouse Gas）
GREET	交通运输的温室气体、常规排放物以及能源消耗（Greenhouse Gas, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation）
HEV	混合动力汽车（Hybrid Electric Vehicle）
KWh	千瓦时（Kilowatt Hour）
LCA	全生命周期分析（Life Cycle Analysis）
LPG	液化石油气（Liquefied Petroleum Gas）
PEMFC	质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell）
TTW	油箱到车轮（Tank to Wheel）
WTT	油井到油箱（Well to Tank）
WTW	从油井到车轮（Well to Wheels）

图 目 录

图 2.1	燃料电池的反应原理	4
图 2.2	美国提供的燃料电池大批量生产时的成本构成	9
图 2.3	车用燃料电池成本预测	9
图 2.4	中国提供的燃料电池大批量生产时的成本构成	10
图 2.5	梅赛德斯 - 奔驰公司本那比市燃料电池生产中心	12
图 2.6	本田 FCX Clarity 燃料电池汽车	13
图 3.1	日本燃料电池汽车和加氢站的普及计划	28
图 5.1	制氢体系示意图	45
图 5.2	天然气重整制氢加氢站的基本流程	47
图 5.3	天然气重整制氢装置 (北京永丰示范加氢站)	48
图 5.4	斯图加特的蒸气重整器单元	48
图 5.5	电解水制氢路线	49
图 5.6	生物质制氢加氢站的基本流程	50
图 5.7	煤焦化制氢的流程	51
图 5.8	北京加氢站供氢方案示意图	57
图 5.9	北京加氢站的工艺流程图	59
图 5.10	上海安亭加氢站	61
图 5.11	上海加氢站的工艺流程图	62
图 5.12	上海焦化的氢气分离提纯示范装置	62
图 6.1	北京燃料电池客车示范运行	66
图 6.2	北京永丰燃料电池加氢站	67
图 6.3	福田燃料电池客车	67
图 6.4	国产燃料电池客车与奔驰燃料电池客车同期里程对比	69

图 6.5	国产燃料电池客车与奔驰燃料电池客车同期氢耗对比	69
图 6.6	燃料电池公共汽车在上海世博园服务	70
图 6.7	燃料电池客车示范运行	71
图 7.1	ISO 生命周期评价框架	76
图 7.2	车用燃料循环过程	77
图 7.3	REET 模型计算 WTT 阶段排放和能量利用的计算逻辑示意图	79
图 7.4	各种制氢技术路线	82
图 7.5	石油基燃料路线	84
图 7.6	天然气燃料路线	86
图 7.7	中国 2005—2030 年的发电量预测	89
图 7.8	氢燃料电池汽车的 WTW 总能量消耗	93
图 7.9	氢燃料电池汽车的 WTW 化石能量消耗	94
图 7.10	氢燃料电池汽车的 WTW 石油能量消耗	95
图 7.11	氢燃料电池汽车的 WTW 温室气体排放量	96
图 7.12	北京永丰加氢站不同制氢方式的燃料全生命周期能耗对比	97
图 7.13	全生命周期的能耗分担比例对比	98
图 8.1	中国制氢技术路线发展情况	102

表 目 录

表 2.1	国际上燃料电池堆和系统供应商	6
表 2.2	燃料电池汽车代表车型参数	6
表 2.3	本田燃料电池汽车发展情况	13
表 2.4	跨国汽车企业新能源汽车开发情况	15
表 2.5	新旧客车发动机模块的性能比较	17
表 2.6	不同品牌车辆性能对比	19
表 4.1	BC Transit 燃料电池公共汽车示范运行数据	40
表 4.2	3 种车辆加速时间对比表	42
表 5.1	国际部分水电解制氢设备制造公司的装置性能指标	49
表 5.2	煤焦化制氢的污染物排放及能耗	52
表 5.3	各种储氢方式对氢气纯度的要求	55
表 5.4	国外部分天然气重整制氢加氢站	56
表 5.5	国外部分水电解制氢加氢站	56
表 5.6	北京永丰加氢站设计指标	58
表 5.7	氢气品质的要求	58
表 6.1	奔驰燃料电池客车示范数据	66
表 6.2	福田燃料电池客车示范数据	68
表 6.3	北京燃料电池汽车示范运行项目车辆情况	68
表 6.4	上汽燃料电池客车示范数据	71
表 7.1	生命周期评价的相关标准	76
表 7.2	本研究涉及的各种制氢技术路线	83
表 7.3	石油基燃料在炼制环节能量效率估算	85
表 7.4	不同汽化工艺特点对比	87

表 7.5 中国中长期发电比例结构及发电效率预测 88

表 7.6 多种车辆驱动技术的燃油消耗（等效汽油当量） 89

表 7.7 美国 GM 公司对现有制氢技术的经济评估结果 99

表 7.8 北京加氢站的氢气技术指标 99

目 录

第1章	序言 / 1
第2章	燃料电池汽车技术现状与发展趋势 / 3
2.1	燃料电池汽车的基本定义 / 3
2.2	燃料电池技术最新进展 / 5
2.3	国外产业界积极投入燃料电池汽车 研发 / 11
2.4	我国燃料电池汽车技术发展现状 / 16
第3章	国内外燃料电池汽车相关政策跟踪 / 22
3.1	美国 / 22
3.2	欧洲 / 24
3.3	日本 / 26
3.4	加拿大 / 29
3.5	韩国 / 30
3.6	中国 / 30
第4章	国外燃料电池汽车示范综述 / 34
4.1	美国燃料电池公共汽车示范 / 34
4.2	欧洲燃料电池公共汽车示范 / 37
4.3	日本燃料电池公共汽车示范 / 39
4.4	加拿大燃料电池公共汽车示范 / 40
4.5	澳大利亚燃料电池公共汽车示范 / 41
4.6	英国燃料电池公共汽车示范 / 42
第5章	氢基础设施建设 / 44
5.1	氢的制取、应用和储存 / 44
5.2	国内外氢基础设施发展情况 / 55
第6章	案例分析：中国燃料电池公共汽车示范 项目 / 64
6.1	项目背景 / 64
6.2	北京项目示范情况 / 65

6.3 上海项目示范情况 / 69

6.4 项目经验总结、体会与思考 / 71

6.5 项目的效益分析 / 74

第7章 氢燃料电池汽车全生命周期的能耗和 温室气体排放 / 75

7.1 全生命周期研究方法和模型描述 / 75

7.2 全生命周期计算的主要参数设定 / 81

7.3 氢燃料电池汽车全生命周期的能耗和温室
气体排放分析 / 90

7.4 北京 FCV 示范运行案例的全生命周期
分析 / 92

第8章 展望和政策建议 / 101

8.1 展望 / 101

8.2 政策建议 / 103

引用·参考文献 / 105

第 1 章

序 言

20 世纪 70 年代,石油危机使西方主要工业国家意识到,石油作为全球性战略物资,与巨大的需求相比,相对稀缺。为此,以美国和日本为代表的多个国家重新启动了停顿多年的电动汽车研究工作,并借助制定其规划和颁布法规等手段,鼓励电动汽车的研发。到了 90 年代,世界性的环境问题和能源危机愈显突出,为电动汽车的研发提出了强烈的现实需求,而电力、电子、控制、材料等技术的快速发展,也为电动汽车的研发提供了有力支撑。因此,世界范围内再次掀起电动汽车的研发热潮。此时,电动汽车也从原来单一的由电池供电的纯电动汽车(BEV)发展为三大类,即纯电动汽车(EV)、混合动力电动汽车(HEV)和燃料电池汽车(FCV)。

1997 年 12 月,在日本京都召开的防止地球温暖化的联合国气候变化框架公约第 3 次缔约方大会(The 3rd Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change)上,与会国家达成共识:到 2010 年,全球二氧化碳的排放量减少 5%。为实现既定的目标,各国都致力于核能发电设备的更新和太阳能、风力、生物等新兴能源的开发。2002 年 6 月,在加拿大召开的第 14 届世界氢能源大会

提出了以燃料电池为主导产品的氢能源社会的概念。这样,发展氢社会成为人类能源革命的重大焦点。此后,美国、加拿大、日本、冰岛等国家先后宣布要大力发展以燃料电池为基础,在社会上广泛应用新能源,向氢社会迈进。

氢燃料电池汽车无污染,可实现零排放,是新一代清洁汽车。与传统汽车相比,它能效更高。在全球环境污染日益严重的情况下,“零排放”燃料电池汽车技术在解决城市空气污染,节约能源,实现可持续交通,推动汽车工业技术变革等方面,最具发展潜力和前景。应用这一新兴技术,不仅能减少交通部门对日益贫竭的传统化石能源的依赖,而且会推动人类社会进入一个新的洁净能源—氢能时代,甚至给传统生活方式带来巨大变革。

中国氢能及氢燃料电池汽车技术自2001年“863”电动汽车重大专项启动以来,通过国内研究单位的协作努力,目前在技术标准、材料、基础设施以及燃料电池堆、整车集成以及其他关键总成技术等方面都取得了阶段性的进展。经过近几年的发展,我国已成为世界上少数几个掌握车用百千瓦级燃料电池发动机研发、制造以及测试技术的国家之一,自主品牌的燃料电池在额定功率下发动机的氢燃料效率 $\geq 50\%$,重量比功率 ≥ 160 W/kg。根据国家发展和改革委员会委托中国汽车技术研究中心牵头组织行业企业及相关力量编写的《节能与新能源汽车技术政策研究》报告,燃料电池汽车作为中国“纯电驱动”汽车产业技术转型战略路线的重要组成部分,在技术和市场成熟的条件下,未来将会得到大规模发展。

■ 第 2 章

燃料电池汽车技术现状与发展趋势

3

2.1 燃料电池汽车的基本定义

燃料电池电动汽车采用燃料电池作为电源，是一种节能、无污染、环保型的汽车，是未来汽车发展的一条重要的技术路线。图 2.1 是燃料电池的反应原理。其反应过程包括：①氢气通过管道或导气板到达阳极；②在阳极催化剂的作用下，一个氢分子分解为两个氢原子，并释放出两个电子；③在电池的另一端，氧气（或空气）通过管道或导气板到达阴极，同时氢离子穿过电解质到达阴极，电子通过外电路也到达阴极；④在阴极催化剂的作用下，氧和氢离子与电子发生反应生成水，电子在外电路的连接下形成电流，通过适当连接可以向负载输出电能。燃料电池电动汽车整体构造和蓄电池电动汽车基本相同，所不同的是，驱动车辆的电能大部分来自于车载的燃料电池堆。

质子交换膜燃料电池是近年来国内外研究最广泛、技术发展最为迅速的燃料电池。由于其电解质采用高分子膜，具有构造简单、启动快、工作温度较低等优势，因此最适宜为汽车等交通工具提供动力。由于质

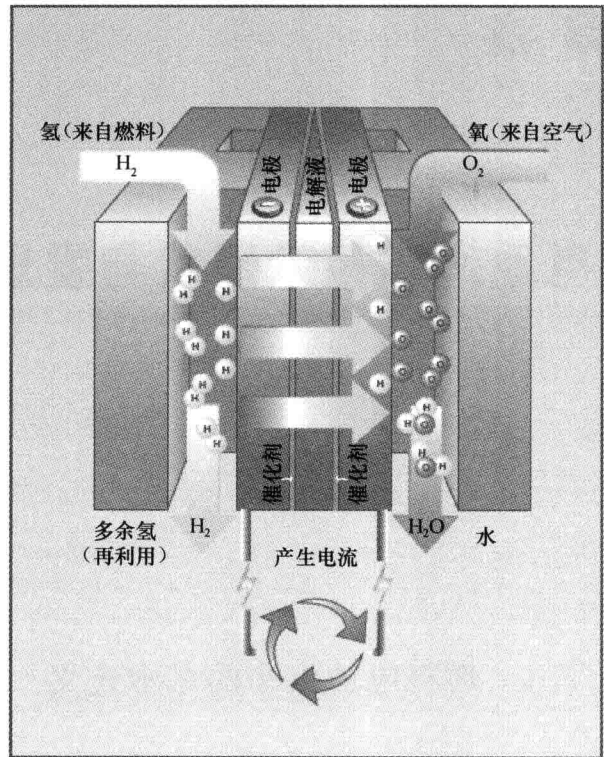


图 2.1 燃料电池的反应原理

子交换膜燃料电池具有很高的比能量和比功率，可以实现零排放，具有低温启动等优点，因此是未来电动汽车最理想的动力源。在 PEMFC 中，氧是燃料电池中常用的氧化剂，能很方便地从空气中获取。氢气是燃料电池常用的燃料，而在地球周围单质氢是极少的，在地壳中的某些特定条件下虽然也有氢气存在，但都难于开采与收集。由于地球上的自然条件下不存在游离态的氢，所以氢能系统一般包括氢的生产、运输、加注和终端利用 4 个子系统。燃料电池氢能系统以燃料电池汽车作为氢的终端利用子系统，是氢能 in 交通领域的具体应用，也是近期最有可能实现商业化的氢能系统。由于目前制氢技术所提供的氢源实际价格较高，在氢能制备上，开展新技术的创新是降低制氢成

本的根本出路。因此,世界各大汽车公司均达成共识,解决氢源的问题比解决燃料电池本身更有意义,未来大规模推广使用燃料电池必须先解决氢源问题。

2.2 燃料电池技术最新进展

燃料电池是燃料电池汽车的关键零部件。近10年来,世界很多国家投入巨资开展燃料电池技术的研发,使得燃料电池成本大大降低,燃料电池汽车技术领域也因此取得了很大的进展。

自1993年加拿大巴拉德公司推出燃料电池汽车后,全球进入一个燃料电池汽车研究开发的热潮,主要汽车厂家都投入到燃料电池汽车研发当中,并取得不断进步。Fuel Cell Today统计表明,到2006年年底全球共有620~640辆燃料电池汽车在进行试验和测试,燃料电池的功率由20世纪90年代的30 kW左右逐渐提高到90 kW,续航里程由90年代的100 km左右分别到500 km左右(甲醇和液氢作燃料)和300 km(压缩氢燃料),最大行驶速度达到了150 km/h。燃料电池汽车的动力性能逐渐接近驾驶者对汽车动力性能的要求。

在燃料电池汽车厂商大规模进行研发的同时,大量由政府支持的示范工程投入运行。仅戴姆勒-克莱斯勒公司旗下的燃料电池汽车的行驶里程就超过 450×10^4 km。

燃料电池技术是国际燃料电池汽车企业竞争的焦点,美国GM,日本丰田、本田、尼桑,德国戴姆勒等都拥有自主的车用燃料电池技术,也代表了目前国际燃料电池技术的先进水平(见表2.1)。其主要技术现状包括:电堆功率大致在1 500~2 000 W/L,动态寿命为4 000~5 000 h。

近年来,国际上新推出的燃料电池汽车在可靠性和成本控制等方面取得了长足进步,代表车型包括奔驰B-Class F-Cell,丰田FCHV-adv,通用-欧宝SUV Hydro Gen 4和本田FCX Clarity等。燃料电池汽