

燃料电池电动汽车

陈全世 仇斌 谢起成 等编著

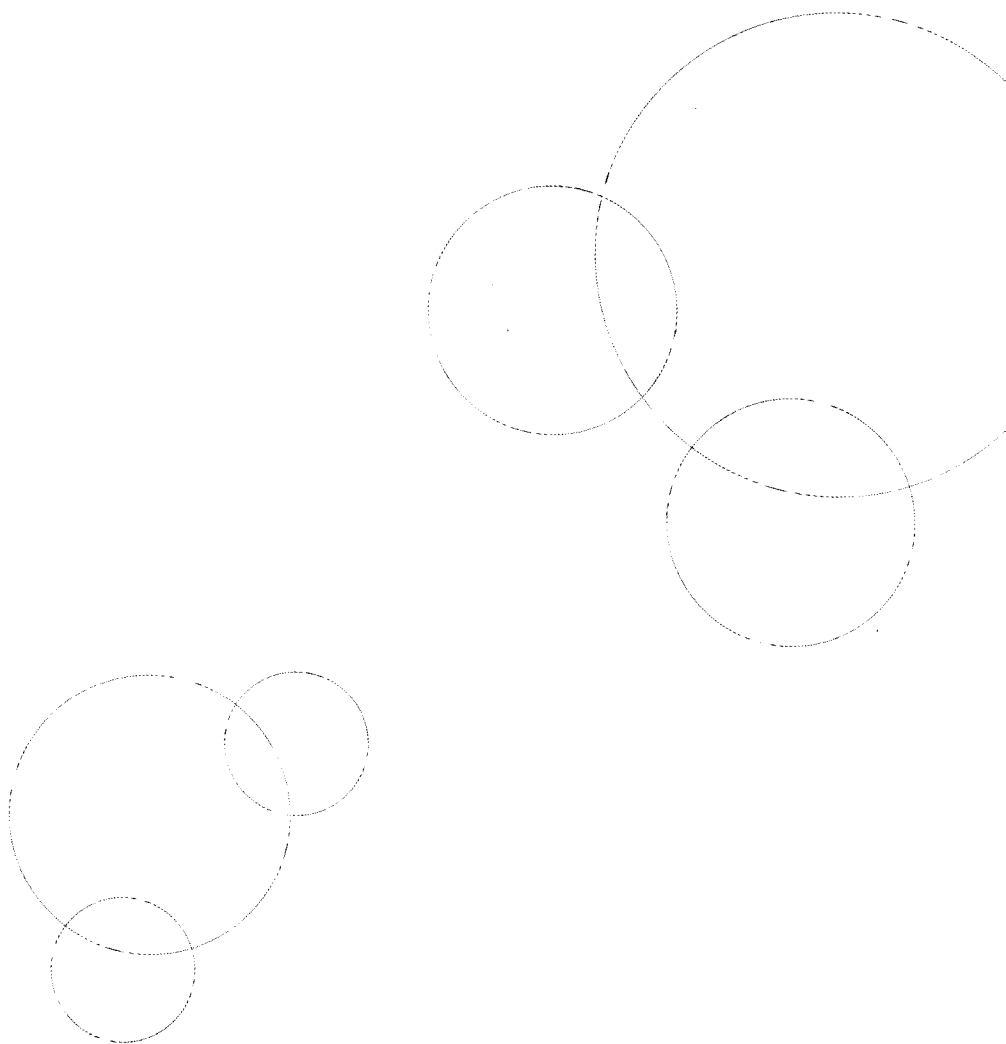


清华大学出版社

上海汽车工业教育基金会资助

燃料电池电动汽车

陈全世 仇斌 谢起成 等编著



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书讲述了燃料电池电动汽车的关键技术,包括燃料电池的特点,燃料电池电动汽车的总体结构及关键部件的性能,燃料电池电动汽车系统仿真计算、试验方法,以及燃料电池汽车的“燃料”——氢——的制取、储存、运输和氢安全等内容,反映了当前燃料电池电动汽车的最新研究成果。书中还收集了世界主要燃料电池汽车研制单位所推出的样车的技术路线、结构特点、性能参数、图片和当前的研究进展状况。本书是作者所在的研究团队十多年来从事电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车研究成果和经验的总结,理论性较强,又紧密结合研究工作实践。

本书可作为高等学校车辆工程专业本科生和研究生的选修课教材,也可作为机械、电机、化工、材料化学等专业本科生和研究生的参考书,还可供电动汽车相关领域工程技术人员、管理人员和科研人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池电动汽车/陈全世,仇斌,谢起成等编著. —北京:清华大学出版社,2005.5
ISBN 7-302-10643-6

I. 燃… II. ①陈…②仇…③谢… III. 燃料电池—汽车 IV. U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 019255 号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084
社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

责任编辑:曾洁

封面设计:周力辉

印刷者:北京市世界知识印刷厂

装订者:三河市金元装订厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:175×245 印张:13.5 字数:264 千字

版 次:2005年5月第1版 2005年5月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-10643-6/TK·21

印 数:1~2000

定 价:39.00元

早在世界上第一辆内燃机汽车诞生的 1886 年之前，在巴黎等欧洲城市的街道上就出现了电动汽车。随着石油的大规模开采及科学与技术的进步，内燃机汽车的性能大大超过了电动汽车，电动汽车开始逐渐淡出历史舞台。到了 20 世纪末期，100 多年来的许多科学技术和文化成果融入汽车技术之中，使汽车的生产技术愈来愈先进，汽车的性能愈来愈完善，汽车技术更加成熟。当前，全世界汽车的年产量超过了 6000 万辆，保有量超过 7 亿辆，其中半数以上是小轿车。汽车工业的发展给人们带来了许多就业机会，带来了财富；汽车缩短了人们之间的距离，带来了舒适与繁荣。然而，汽车给人类带来巨大贡献的同时，每天都在大量消耗地球上有限的石油资源，排出大量的有害气体，严重地污染了人类赖以生存的自然环境，给人类生存造成了严重的危害，这与人类追求美好生活的愿望背道而驰。如何在发展汽车工业的同时解决其带来的能源和环境问题，是汽车工业乃至整个文明社会需要解决的重大问题。这就是促使电动汽车重新被人们重视的主要因素。

最新的电动汽车绝不是 100 年前陈旧电动汽车技术的重复，它集机械、电子、汽车、电机、智能控制、化学电源、计算机、新能源、新材料等科学领域和工程技术中最新成果于一身，是多种高新技术凝聚的结果。电动汽车在行驶过程中没有排放污染，热辐射低，噪声小，不消耗汽油，可应用多种能源，结构简单，使用维修方便，是一种新型的交通工具，具有广阔的发展前景。

燃料电池(fuel cell,FC)是一种将氢和氧的化学能通过电极反应直接转换成电能的装置。由于燃料电池同时兼备无污染、高效率、适用广、低噪声、可快速补充能量、具有模块化结构等特点，被公认为是今后替代传统内燃机的最理想的汽车动力装置。

本书的主要内容是作者所在的科研团队在国家“八五”、“九五”以及“十五”计划期间的十几年时间里承担国家电动汽车重大项目，从事电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车研究工作的体会和成果。

本书主要介绍质子交换膜燃料电池的基本原理、国内外研究进展，燃料电池电动汽车的基本构成、系统仿真、试验方法以及氢燃料的制备、储存、运输等问题。

全书共分 7 章，由陈全世任主编，参加编写工作的人员有：仇斌、谢起成、

II 燃料电池电动汽车

齐占宁、曹建荣、黄勇、陈勇、田光宇、林成涛、李海晨、管华等。全书的插图由陈勇协助整理。清华大学电动车研究室的伦景光教授、朱家珺教授、施双容副教授、韩晓东高级工程师、金达锋副教授、朱元博士、高大威博士、卢兰光博士，博士研究生林成涛，硕士研究生牟风涛、杜兴山、楼栋、胡伟华、熊健、赵立安、彭涛、梁伟铭、刘国权、黄文华、付正阳、王波、项晓波、周伟波等，博士后宋建国、王军平、王贺武、常秋英、江发潮等，国家“十五”“863”电动汽车重大专项——燃料电池城市客车项目组的欧阳明高教授、卢青春教授、张扬军研究员、裴普成副教授、马凡华副教授等为本书的写作提供了有价值的资料和热情的帮助，在此仅表示衷心的感谢。

本书的写作得到了“上海汽车工业教育基金会”的资助，在此表示衷心的感谢。

由于燃料电池汽车技术是近十多年来迅速发展的新技术，许多技术问题正在研究和解决中，此外，由于作者的知识和水平的限制，错误和不足之处在所难免，敬请专家和读者批评指正。

编著者

2005年3月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
参考文献	6
第 2 章 燃料电池的基本原理及应用	7
2.1 燃料电池的基本原理	7
2.2 燃料电池的分类	8
2.2.1 碱性燃料电池	9
2.2.2 磷酸燃料电池	9
2.2.3 质子交换膜燃料电池	9
2.2.4 熔融碳酸盐燃料电池和固体氧化物燃料电池	10
2.3 质子交换膜燃料电池	10
2.3.1 质子交换膜	11
2.3.2 质子交换膜燃料电池的催化剂	13
2.3.3 膜电极和双极性集流板	15
2.4 质子交换膜燃料电池的效率和工作特性	17
2.4.1 质子交换膜燃料电池的效率	17
2.4.2 质子交换膜燃料电池的工作特性	18
2.5 质子交换膜燃料电池的模块特性	21
2.6 燃料电池的发展趋势	21
参考文献	22
第 3 章 燃料电池汽车结构	23
3.1 燃料电池汽车的基本结构	23
3.2 燃料电池系统	25
3.2.1 燃料电池系统的基本结构	25
3.2.2 质子交换膜燃料电池与传统内燃机的比较	27
3.3 DC/DC 变换器	27
3.3.1 DC/DC 变换器的作用	27

3.3.2	DC/DC 变换器的基本工作原理	28
3.3.3	燃料电池汽车 DC/DC 变换器的关键技术	30
3.4	驱动电机及其控制系统	31
3.4.1	电机及其控制器	31
3.4.2	感应电机的矢量控制	33
3.4.3	无刷直流电机	39
3.4.4	燃料电池汽车电驱动系统的研究方向	40
3.5	辅助电池及其管理系统	42
3.5.1	电池概述	42
3.5.2	氢-镍电池	43
3.5.3	锂离子电池	46
3.5.4	电池管理系统	48
3.6	超级电容	54
3.6.1	超级电容概述	55
3.6.2	超级电容的分类	55
3.6.3	超级电容的发展水平	59
3.6.4	超级电容组管理系统	60
3.7	燃料电池汽车的研究进展	63
3.7.1	美国通用汽车公司	64
3.7.2	美国福特汽车公司	67
3.7.3	美国克莱斯勒汽车公司	68
3.7.4	加拿大巴拉德动力系统公司	68
3.7.5	戴姆勒-奔驰汽车公司	69
3.7.6	日本丰田汽车公司	72
3.7.7	日本本田汽车公司	75
	参考文献	77
第 4 章	建模仿真与能量管理策略	79
4.1	电动汽车仿真技术及其应用现状	79
4.1.1	仿真的基本概念	79
4.1.2	仿真方法	80
4.1.3	常用的仿真软件	81
4.2	燃料电池汽车的部件建模	82
4.2.1	车辆部件及其建模	82
4.2.2	轮胎模型	84
4.2.3	驱动电机及其控制器	87
4.2.4	辅助蓄电池及管理系统	93

4.2.5	超级电容	96
4.2.6	DC/DC 变换器	99
4.3	燃料电池电动汽车整车仿真实例	100
4.3.1	后向仿真	100
4.3.2	前向仿真	107
4.4	燃料电池大客车的动力性计算与仿真实例	111
4.4.1	变速器设计及整车动力性能计算	111
4.4.2	燃料电池大客车的系统仿真	113
4.5	能量管理策略与优化	115
4.5.1	燃料电池汽车能量管理策略	115
4.5.2	传统的功率分配策略	117
4.5.3	功率分配的模糊控制	117
4.5.4	功率分配策略的优化	118
4.5.5	工况自适应的功率分配策略	120
	参考文献	120
第 5 章	整车控制系统设计	123
5.1	系统设计要求和原则	123
5.2	基于 dSPACE 的整车控制器快速原型开发	125
5.2.1	dSPACE 系统简介	126
5.2.2	整车控制器快速原型的开发	127
5.3	整车控制器电控单元 ECU 的研究开发	130
5.3.1	整车控制器硬件开发	131
5.3.2	嵌入式实时操作系统的应用	132
5.4	CAN 总线通信技术的应用	135
5.4.1	CAN 总线介绍	135
5.4.2	CAN 总线的技术规范和网络协议	137
5.4.3	CAN 总线在燃料电池汽车上的应用举例	139
5.5	线控技术简介	139
	参考文献	140
第 6 章	燃料电池电动汽车及关键部件试验	143
6.1	燃料电池电动汽车整车性能试验	143
6.2	质子交换膜燃料电池试验	143

6.2.1	影响燃料电池性能的主要工作参数	144
6.2.2	燃料电池试验的主要内容	144
6.2.3	燃料电池测试系统的基本结构	145
6.2.4	燃料电池系统的稳态和动态特性	147
6.2.5	燃料电池的测试	149
6.3	蓄电池组及管理系统试验方法	154
6.3.1	蓄电池组的试验标准	154
6.3.2	国内外电池测试规范介绍	155
6.3.3	电池组试验方法	159
6.4	超级电容试验	160
6.4.1	试验目的与试验规范	160
6.4.2	超级电容试验内容	160
6.4.3	超级电容试验设备	164
6.5	驱动电机及控制器试验	164
6.5.1	驱动电机及控制器试验目的	164
6.5.2	驱动电机及控制器试验分类	165
6.5.3	型式试验	165
6.5.4	电机常规试验	168
	参考文献	169
第7章	燃料电池汽车供氢系统、氢源及氢安全	171
7.1	氢的基本性质	171
7.2	氢的制备方法	172
7.2.1	化石燃料的转化	172
7.2.2	水电解制氢	175
7.2.3	含氢工业尾气回收氢	176
7.2.4	可再生资源制氢技术	177
7.2.5	车载制氢技术	177
7.3	氢分离纯化技术	180
7.4	氢的输配	182
7.5	燃料电池汽车车上供氢系统	186
7.5.1	高压氢气储存	186
7.5.2	液态储氢	189
7.5.3	金属储氢	192

7.5.4	活性炭吸附储氢·····	193
7.5.5	碳纳米材料储氢·····	193
7.6	燃料电池汽车氢安全系统·····	194
7.6.1	燃料电池汽车氢安全控制系统·····	194
7.6.2	燃料电池汽车车库的氢安全系统·····	195
	参考文献·····	197
附录	国内外电动汽车标准目录·····	199

绪 论

汽车工业是国民经济的支柱产业,是衡量一个国家工业化水平的重要标志。经济发达国家在世界经济中的地位与其在世界汽车工业中的排名顺序是基本吻合的。迄今为止,还没有任何一种商品能够取代汽车在全球出口贸易中第一大商品的地位。汽车工业的发展将带动相关产业的技术创新和产业本身的发展。为了发展面向 21 世纪的汽车工业,尽可能多地占领国际市场,世界各国政府和各大汽车公司投入大量的人力、物力和财力竞相研制开发和推广应用节能、环保型汽车。电动汽车作为一种节能、无污染的理想“零排放”汽车,理所当然地受到了广泛的关注与重视,并在今后汽车工业的发展中占有越来越重要的地位。

由于传统蓄电池的性能和价格远未达到使电动汽车实用化的要求,因此电动汽车研究开发和推广应用的关键在于高性能价格比电池的研制开发。

燃料电池是一种将氢和氧的化学能通过电极反应直接转换成电能的装置。这种装置的最大特点是由于反应过程不涉及燃烧和热机做功,因此能量转换效率不受“卡诺循环”的限制,其能量转换效率可高达 60%~70%,实际使用效率则是普通内燃机的 2 倍左右。能量转换效率高是燃料电池的主要特点之一。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)是燃料电池的一种,被认为是今后电动汽车上最理想的驱动电源。

燃料电池在工作过程中将外界供给的活性物质的化学能用电化学方式直接转换为电能,只要外部活性物质的供给不间断,燃料电池就会持续工作。所以,质子交换膜燃料电池汽车(PEMFC-EV)的行驶里程比普通电动汽车要长得多。据报道,20 世纪末期,美国通用汽车公司开发的“氢动 1 号”燃料电池轿车和戴姆勒-克莱斯勒汽车公司开发的 Necar-4 燃料电池轿车,使用液体氢气,一次充气可行驶 400km 以上,充气或更换氢气瓶只需要几分钟,比普通电动汽车充电时间短得多。燃料电池汽车的使用性能,如行驶速度、加速能力、一次加注燃料续驶里程等方面,可以和目前的燃油汽车相媲美。这是燃料电池汽车易于被使用者接受的主要特征。

由于质子交换膜燃料电池同时兼备无污染、高效率、适用广、低噪声、可快速补充能量、具有模块化结构等特点,因此被公认为是替代传统内燃机的最理想的动力

装置。全世界各发达国家及各大汽车公司都非常重视燃料电池的研究开发。美国能源部的最新报告指出,燃料电池的研制和开发“已接近历史性突破的边缘”,“欧、美、日的激烈竞争已进入冲刺阶段”,燃料电池技术将成为 21 世纪“汽车工业竞争的焦点”。美国前能源部部长助理克·西格尔说,21 世纪上半叶燃料电池技术在技术上的冲击影响,会类似于 20 世纪上半叶内燃机所起的作用。福特汽车公司主管 PNGV 项目的经理鲍伯·默尔称,燃料电池必定给汽车动力带来一场革命。

美国政府对燃料电池汽车的研制开发和推广应用非常重视。美国能源部于 2002 年 1 月 9 日提出 FreedomCAR(freedom cooperative automotive research)计划,支持新能源汽车的研究开发。该计划在 2003 年由美国联邦政府投资 15029.6 万美元,其中燃料电池 5000 万美元(占 33.27%),氢源设施 2582 万美元(占 17.18%),两者之和占总投资的 50%以上。2003 年 2 月美国总统乔治·布什向国会提出“自由燃料”(freedom fuel)计划,他在对此计划发表的公开讲话中指出,“我要国会花费 12 亿美元的国家投资,给氢燃料电池小客车项目,使它能从实验室走向售车展示室。我们希望看到,今天诞生的小客车将属于今天诞生的儿童,他(或她)所开的第一辆车将是一辆由氢驱动而无污染的车”,“使用氢动力的最大结果,是实现我国的能源独立”,“使我们伟大国家的未来公民,极少地依靠外国能源”。

日本政府对燃料电池汽车的研究开发和推广应用也表示了极大的关注,为了促进燃料电池汽车的商业化,由中央和地方政府共同资助在大阪、京都、东京等城市建立加氢站。2002 年底,日本首相小泉纯一郎以政府的名义采购了 5 辆燃料电池轿车(丰田公司 3 辆,本田公司 2 辆),租给政府各部门使用。

为了使发展中国家的大城市公共交通工具改变能源结构,降低有害物和温室气体(CO₂)排放,联合国发展计划署(united nations development programme, UNDP)和全球环境基金(global environmental facilities, GEF)资助巴西的圣保罗、墨西哥的墨西哥城、中国的北京和上海等大城市开展燃料电池公交客车的运行示范工程,其目的在于促进燃料电池大客车的尽快商业化。我国燃料电池公共汽车商用化示范项目于 2003 年 3 月 27 日在北京召开启动会,标志着这一由中国政府、全球环境基金、联合国发展计划署共同支持,科技部和北京市、上海市共同组织实施的项目进入实施阶段。该示范项目总投入为 3236 万美元,其中 GEF 投入 1158 万美元,UNDP 投入 40 万美元,科技部和北京市、上海市共投入 1458 万美元,企业等其他投入约 580 万美元。我国燃料电池公共汽车商用化示范项目为期 5 年,根据北京和上海的地域和资源特点提出燃料电池公共汽车系统技术指标,采用全球招标方式购置 12 辆燃料电池公共汽车,并建立相应的加氢设施,在北京和上海(各 6 辆)示范运行,预计运行 160 万 km。在示范运行中,将系统采集和分析各种试验数据,验证燃料电池公共汽车的技术可行性,积累包括可靠性、失效模式方面的知识和经验,进一步改进设计,降低成本,最终推动燃料电池公共汽车在我



国实现产业化和推广应用,从而达到减少温室气体排放、保护环境的目的。经过半年多的筹备及与世界各主要燃料电池大客车研制生产商的协商,项目组于2003年12月18日在北京向外界发布了第一期6辆(北京、上海各3辆)燃料电池大客车的招标书,投标截止日期为2004年3月18日。参与投标的共有4家公司:东风电动汽车有限公司、上海汽车工业集团总公司、戴姆勒-克莱斯勒中国(投资)有限公司、北京清华科威国际技术转移有限公司。经过专家评审和谈判,最后于2004年5月17日在北京与戴姆勒-克莱斯勒中国(投资)有限公司签署了采购3辆燃料电池大客车的合同。合同规定,3辆戴姆勒-克莱斯勒公司的燃料电池大客车将在2005年10月在北京市投入示范运营。

我国的汽车工业落后于当代世界先进水平至少20年。我国的石油资源比较匮乏,仅居世界第十位。从1993年开始,我国已经从石油净出口国再次转变为石油进口国。我国汽车工业的发展依靠石油燃料进口是不可能实现可持续发展的。从环境状况来看,汽车废气排放污染已经成为我国大中城市大气污染的主要污染源,这主要是因为我国人口分布高度集中,部分城市机动车尾气排放在大气污染中所占的比例是相当高的,所以我国的能源和环境状况要求我国未来的汽车工业发展不能跟在别人的后面走,必须探求新的思路,走中国特色的汽车工业发展道路,而电动汽车(electric vehicle, EV)无疑是我国未来汽车工业的发展方向。

发展我国21世纪的汽车工业,应当顺应当前的科技发展趋势,把握时机和切入点,与西方在应用高新技术、发展关键技术方面站在同一起跑线上。电动汽车是汽车工业未来发展的趋势,将电动汽车作为中国21世纪汽车工业的切入点,是实现我国汽车工业技术跨越式发展的战略选择。世界范围的资源和环境压力,使电动汽车不仅在中国,而且在全世界范围内都有巨大的发展潜力。我国的汽车工业可以充分利用后发优势,把各方面的研究、设计、制造力量联合起来,集中解决燃料电池电动汽车的各种关键技术,积极推动电动汽车产业化,其影响将是广泛而深远的。

我国政府也非常重视燃料电池汽车关键技术的研究,“九五”期间,国家科技部将燃料电池关键技术研究列入国家攻关计划。在国家科技部、中科院、北京市和上海市政府的支持下,中科院大连化学物理研究所、北京世纪富源燃料电池公司、北京飞驰绿能电源技术有限责任公司、上海神力科技有限公司等分别研制出5kW~30kW质子交换膜燃料电池。清华大学汽车工程系和北京世纪富源燃料电池公司合作,于1999年11月研制成功5kW质子交换膜燃料电池电动游览车(见图1-1),这是我国第一辆质子交换膜燃料电池电动车。

2001年1月中科院大连化学物理研究所、电工所与东风汽车公司合作研制成功质子交换膜燃料电池(30kW)轻型客车。在北京市经委、科委的资助下,2001年4月清华大学与北京飞驰绿能电源技术有限责任公司联合研制成功质子交换膜燃

料电池(15kW)轻型客车(见图 1-2)。燃料电池汽车关键技术的研究已经全面展开。



图 1-1 5kW 质子交换膜燃料电池电动游览车



图 1-2 质子交换膜燃料电池(15kW)轻型客车

“十五”期间,燃料电池汽车及其关键技术的研究和样车的研制开发,被列入国家“863”电动汽车重大专项中,予以重点资助。图 1-3 是国家“863”电动汽车重大科技专项的组织结构和项目研究课题的设置概况,其中燃料电池轿车支持项目由上海新能源汽车公司承担,燃料电池城市客车整车项目由北京-清华新能源汽车工

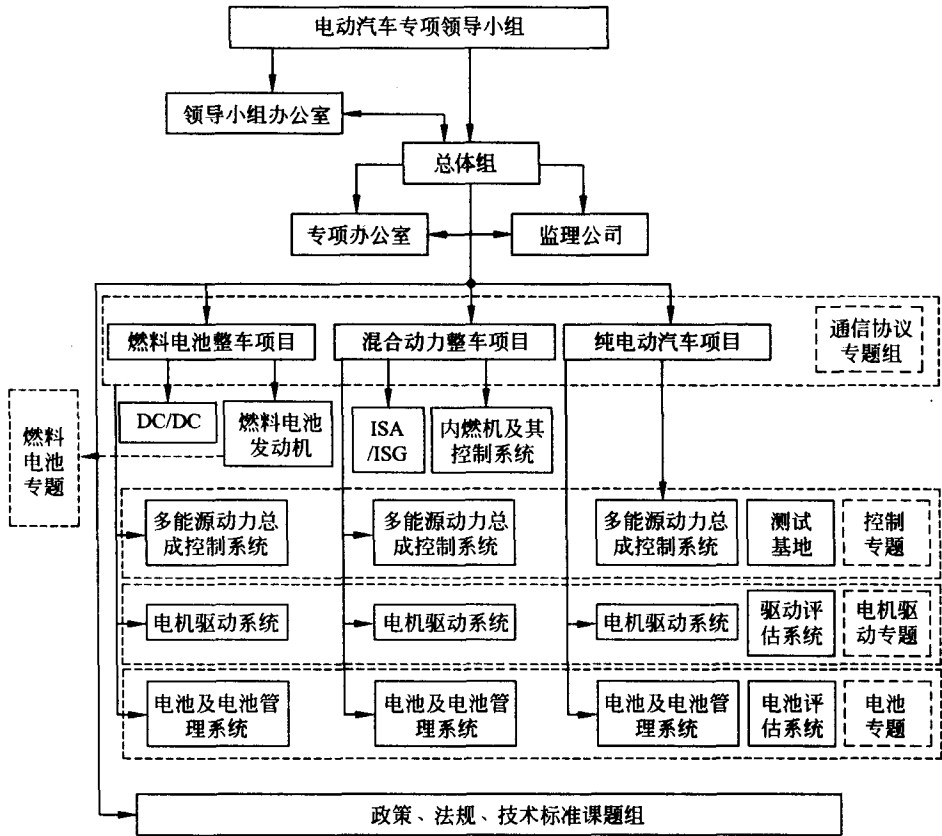


图 1-3 “863”电动汽车重大科技专项的组织结构和项目研究课题的设置

程中心承担。燃料电池系统项目由中科院大连化学物理研究所燃料电池工程中心、上海神力科技有限公司、北京世纪富源燃料电池公司与航天总公司 11 所、北京飞驰绿能电源技术有限公司与清华大学核研院共 4 个团队承担，他们按照项目要求研制的城市客车用 50kW、轿车用 30kW 燃料电池系统已于 2002 年底通过了整车单位的检测和国家科技部组织的项目验收。其中中科院大连化学物理研究所和上海神力科技有限公司为城市客车研制的 50kW 燃料电池系统，及为轿车研制的 30kW 燃料电池系统分别在燃料电池城市客车和燃料电池轿车上进行集成。两个燃料电池整车项目也通过了国家科技部的验收并顺利进入第二阶段。图 1-4 是由北京-清华新能源汽车工程中心与上海神力科技有限公司、中科院大连化学物理研究所燃料电池工程中心、株洲电力机车研究所、深圳雷天绿色电源有限公司、北京机电研究所等单位于 2002 年底联合研制的第一辆 11m 燃料电池城市客车样车。

本书的主要内容是作者所在的科研团队在国家“八五”、“九五”以及“十五”计



图 1-4 第一辆 11m 燃料电池城市客车样车

划期间的十几年内承担国家电动汽车重大项目,从事电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车研究工作的体会和成果。本书主要介绍质子交换膜燃料电池的基本原理、国内外研究进展,燃料电池电动汽车的基本构成、系统仿真、试验方法以及氢燃料的制备、储存、运输等问题。

参考文献

- 1 国家科技部. 国家高技术研究发展计划(“863”计划)课题申请指南,2001—2005 年度(能源技术领域,电动汽车专项)
- 2 全球环境基金/联合国发展计划署/国家科学技术部合作项目,中国燃料电池公共汽车商业化示范项目,简报,2003 年第 1~3 期,2003 年 6—11 月
- 3 清华大学燃料电池城市客车项目总体组. 国家“十五”“863”电动汽车重大专项——燃料电池城市客车项目——研究简报,2003 年 1~2 期,2003 年 4 月
- 4 Remarks by the President G. Bush on Energy Independence, The National Building Museum, Washington D. C. Hydrogen Fuel Initiative Can Make “Fundamental Difference.” <http://www.whitehouse.gov/news/releases/2003/02/20030206-12.html>

燃料电池的基本原理及应用

早在 1839 年,英国人 W. Grove 就提出了氢和氧反应发电的原理,这是最早的氢-氧燃料电池(FC)。但直到 20 世纪 60 年代初,由于航天和军事的需要,才开发了液氢和液氧的小型燃料电池,应用于空间飞行器和潜水艇。近二三十年来,由于一次能源的匮乏和环境保护的突出要求,人们开始转向开发利用新的清洁再生能源。燃料电池由于具有能量转换效率高、对环境污染小等优点,因而受到世界各国的普遍重视。

本章将简要介绍燃料电池的基本原理和发展、应用情况。

2.1 燃料电池的基本原理

燃料电池实质上是电化学反应发生器。燃料电池的反应机理是将燃料中的化学能不经燃烧而直接转化为电能。氢氧燃料电池实际上就是一个电解水的逆过程,通过氢氧的化学反应生成水并释放电能。氢气和氧气分别是燃料电池在电化反应过程中的燃料和氧化剂。图 2-1 是燃料电池装置的原理简图。其反应过程如下:

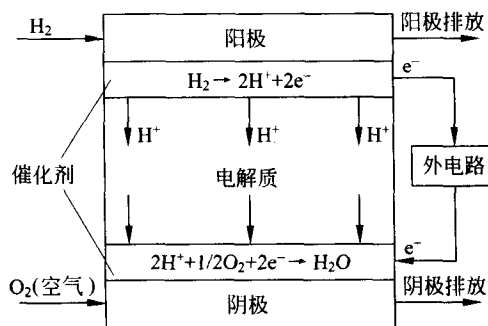


图 2-1 燃料电池基本原理示意图

(1) 氢气通过管道或导气板到达阳极。