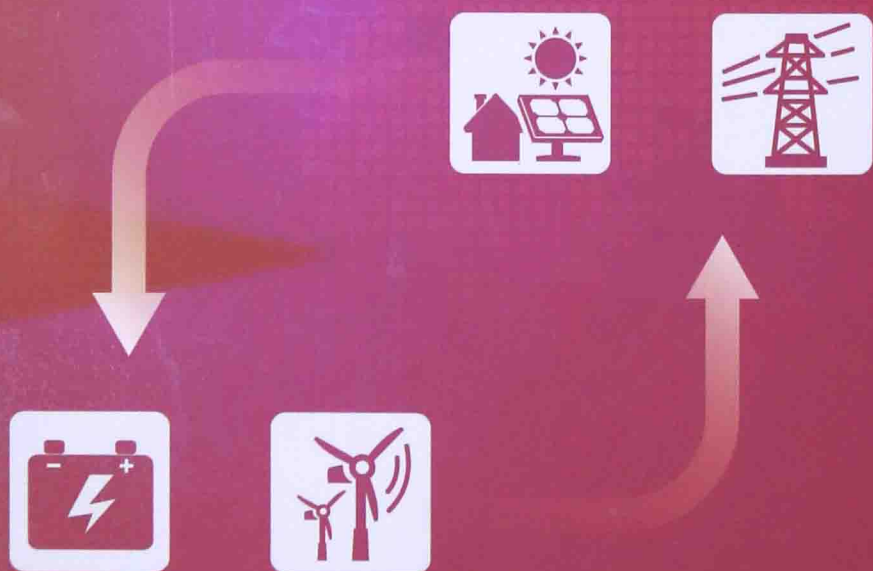


燃料电池混合电源 检测与控制

陈启宏 全书海 著



科学出版社

燃料电池混合电源 检测与控制

陈启宏 全书海 著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

能源短缺、环境污染、气候变暖是全球能源领域面临的共同挑战。质子交换膜燃料电池具有清洁环保、节能高效等显著优点,是 21 世纪最具发展潜力的绿色能源之一,在电动汽车、水下舰船等领域具有广阔的应用前景。本书紧密结合燃料电池的研究热点,对燃料电池混合电源系统检测与控制技术进行了较为详尽的介绍与分析。全书共分为 6 章,主要内容包括绪论、燃料电池混合电源系统结构、燃料电池电控技术、燃料电池内阻测试技术、燃料电池内阻测试用交流电流源技术、燃料电池混合电源能量控制等。本书是作者长期从事燃料电池混合电源检测与控制研究取得的成果的总结,可为燃料电池的应用与研究提供技术参考。

本书可供电气、自动化、能源、船舶、汽车等领域的研究人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业本科生、研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池混合电源检测与控制/陈启宏,全书海著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-040441-1

I. ①燃… II. ①陈… ②全… III. ①燃料电池-混合电源-检测
②燃料电池-混合电源-控制 IV. ①TM911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 075556 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩/封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 4 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2014 年 4 月第一次印刷 印张:14 3/4

字数:300 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

能源一直是制约人类社会发展的一个重要因素，社会的每一次重大进步，都离不开新能源的开发与应用。随着石油、煤炭等不可再生能源的日趋枯竭，环境污染日益严重，开发新能源，发展低碳经济已成为当今世界的重要主题。目前我国已成为世界第二能源消耗大国、二氧化碳排放第一大国，在国际上面临的节能减碳压力越来越大。我国政府正在从战略上调整目前的能源结构，大力研究开发清洁能源技术。

氢能在整个新能源体系中占有举足轻重的地位，它是一种清洁能源，燃烧或电化学反应后的排放物是水蒸气，无碳排放。我国是世界第一产氢大国，氢气年产量已超过千万吨，在氢能开发与利用领域具有明显的优势。燃料电池是高效利用氢能的新能源发电装置，被公认为是继火电、水电和核电之后的第四代发电技术，可用于新能源汽车、备用电源、水下电源、航空电源、固定电站、便携式电源等诸多领域。美国《时代周刊》将燃料电池列为 21 世纪即将改变人类生活的十大高科技之首。

近年来我国的燃料电池技术取得了长足的进步，在复合质子交换膜、催化剂、气体扩散层等燃料电池关键材料的国产化方面取得了较大进展，电堆的性能及寿命都得到了很大的提高，成功进行了一系列示范运行，形成了几个相对稳定的研发团队。国内已出版很多关于燃料电池原理、制备方法及建模、模拟与控制方面的著作，但尚未见到从工程应用出发，以燃料电池混合电源检测与控制技术为主题的著作出版。

燃料电池的电性能、能量转换效率及寿命与检测和控制技术密切相关。如不能对燃料电池单片电压进行准确的实时检测，有可能出现单片电压过低甚至反极，则不能保证燃料电池安全可靠运行；如不能实时检测与控制燃料电池运行时的气体湿度、压力、流量、温度等信息，则不能保证燃料电池工作在最佳工作状态；如不恰当地控制导致燃料电池负载频繁变化，则容易出现氧气饥饿、质子交换膜忽干忽湿，导致膜疲劳损伤，催化剂局部氧化、脱落等现象，影响燃料电池的寿命。同时，燃料电池的检测与控制又是一个难点问题，存在干扰强、检测信号弱、不确定因素多、参数耦合严重等特点。因此，非常有必要针对燃料电池检测与控制技术开展深入研究。本书正是针对这些特点，总结作者多年从事燃料电池检测与控制研究的成果撰

写而成。

本书共 6 章。第 1 章为绪论,简要介绍燃料电池的基本原理及分类、发展历史与现状,以及燃料电池在电动汽车、舰船等领域的应用情况。第 2 章主要介绍燃料电池混合电源结构,包括燃料电池系统内部的氢气供给系统、空气供给系统和温度调节系统,分析辅助供电装置的特性,并对燃料电池与辅助供电装置组成的混合电源结构进行介绍和比较分析。第 3 章开展燃料电池电控系统设计,提出分布式电控系统总体设计方案,探讨燃料电池低温启动方法;具体设计燃料电池单电压巡检仪、状态监测单元及控制单元,并重点研究燃料电池启停控制策略。第 4 章介绍燃料电池内阻测试原理,设计内阻测试系统总体方案,在此基础上进行模块化的硬件和软件设计,并通过模拟测试和实际测试验证所设计的燃料电池内阻测试系统的有效性。第 5 章介绍内阻测试用交流电流源设计方法,从理论上对设计结果进行分析,并经实际测试对设计方案进行验证。第 6 章分析燃料电池混合电源系统能量流,分别针对电动汽车和机器人应用背景,提出混合电源系统的自适应控制策略、多模型预测控制策略和非线性预测控制策略,并通过仿真验证控制策略的有效性。

本书第 1~3 章及第 6 章由陈启宏撰写,第 4~5 章由全书海撰写,全书由陈启宏统稿。本书是作者及燃料电池湖北省重点实验室、武汉理工大学新能源检测与控制研究中心多年的研究成果。本书撰写过程中,作者与课题组潘牧教授、罗志平教授、詹志刚教授、张立炎教授、石英教授、谢长君副教授、黄亮副教授、邓坚副教授、孙晓明副教授等老师进行过深入讨论,获益匪浅;课题组研究生韩锐、吴正辉、吴昕、邓舜禹、张鸽、江竑旭、梁家宁、温进、李洁等参与了部分研究工作,在此一并致以诚挚的谢意!

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(NO.61374050)、国家高技术研究发展计划(863)项目(NO.2012AA110601、2008AA05Z105)及中央高校基本科研业务费专项资金(NO.WUT 2013-Ⅱ-016)的资助,在此致谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2014 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 燃料电池简介	2
1.2.1 燃料电池分类	2
1.2.2 质子交换膜燃料电池工作原理	3
1.3 燃料电池的发展历史与现状	6
1.4 燃料电池的应用	10
1.4.1 电动汽车	10
1.4.2 舰船电源	15
1.4.3 备用电源	18
1.5 燃料电池混合电源检测与控制的任務	20
第 2 章 燃料电池混合电源结构	23
2.1 概述	23
2.2 氢气供给系统	24
2.2.1 氢气供给系统结构	24
2.2.2 氢源	24
2.2.3 氢气流量与能量转换效率	26
2.2.4 氢安全	27
2.3 空气供给系统	29
2.3.1 空气供给系统结构	29
2.3.2 加湿装置	31
2.4 温度调节系统	33
2.4.1 风扇冷却系统	35
2.4.2 板式换热系统	36
2.5 燃料电池电路结构	37
2.6 电电混合电源结构	41
2.6.1 辅助供电装置选择	41
2.6.2 混合电源结构	43

2.7	本章小结	48
第3章	燃料电池电控技术	49
3.1	概述	49
3.2	电控系统方案分析	50
3.2.1	集中式设计方案	50
3.2.2	分布式设计方案	50
3.3	单片电压巡检仪设计	52
3.3.1	总体结构设计	52
3.3.2	硬件设计	54
3.3.3	软件设计	61
3.4	状态监测单元设计	64
3.4.1	温度检测电路设计	65
3.4.2	信号采集通道设计	69
3.5	控制单元设计	71
3.6	通信接口设计	74
3.6.1	CAN 通信接口	74
3.6.2	USB 通信接口	75
3.6.3	SCI 通信接口	78
3.7	燃料电池控制策略	79
3.8	燃料电池低温启动	82
3.8.1	冷启动方案设计	84
3.8.2	低温启动系统建模	88
3.9	本章小结	92
第4章	燃料电池内阻测试技术	93
4.1	引言	93
4.2	燃料电池内阻测试方案	93
4.2.1	内阻等效模型	93
4.2.2	内阻测试方法	95
4.2.3	内阻测试总体方案	96
4.3	PEMFC 内阻测试系统硬件设计	98
4.3.1	前置放大器设计	98
4.3.2	高阶跟踪滤波器设计	101
4.3.3	低噪声线性电源设计	103
4.3.4	相位幅值检测电路	106
4.3.5	MCU 控制器硬件电路设计	109
4.4	燃料电池内阻测试系统软件设计	112

4.4.1 软件开发环境	112
4.4.2 CPLD 逻辑电路软件设计	113
4.4.3 MCU 内阻测试软件设计	116
4.5 实验与结果分析	120
4.6 本章小结	127
第 5 章 燃料电池内阻测试用交流电流源设计	128
5.1 需求分析	128
5.2 交流电流源总体方案	129
5.3 半桥变换器设计	134
5.3.1 器件选择与参数计算	136
5.3.2 变压器设计	138
5.3.3 占空比与死区时间计算	139
5.3.4 半桥变换电路设计	141
5.3.5 半桥变换器仿真	143
5.4 信号生成电路设计	145
5.4.1 DDS 理论分析	145
5.4.2 DDS 硬件电路设计	149
5.4.3 FPGA 逻辑设计	153
5.4.4 程控增益放大电路设计	157
5.5 功率放大电路设计	158
5.5.1 电压放大级设计	158
5.5.2 功率放大级设计	160
5.5.3 电路参数计算与元件选择	162
5.5.4 功率电路仿真	163
5.6 交流电流源模型	164
5.7 实验研究	169
5.7.1 功率放大器电路实验与分析	170
5.7.2 程控增益控制器电路实验与分析	171
5.7.3 交流电流源性能测试	172
5.8 本章小结	178
第 6 章 燃料电池混合电源能量流控制研究	179
6.1 概述	179
6.2 燃料电池混合电源能量流分析	182
6.3 车用燃料电池混合电源能量流的自适应控制	184
6.3.1 能量流控制目标和原则	185
6.3.2 能量流自适应分配策略	186

6.4	混合电源系统的多模型预测控制·····	189
6.4.1	混合电源系统描述·····	190
6.4.2	总体控制方案·····	192
6.4.3	多模型建模·····	194
6.4.4	模型预测控制·····	198
6.4.5	自适应切换控制·····	202
6.4.6	实验与仿真·····	203
6.5	机器人燃料电池混合电源的非线性预测控制·····	208
6.5.1	系统描述·····	209
6.5.2	混合电源系统建模·····	210
6.5.3	控制器设计·····	215
6.5.4	实验与仿真·····	216
6.6	本章小结·····	220
参考文献	·····	221

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

能源短缺、环境污染、气候变暖是全球能源领域面临的共同挑战。进入 21 世纪以来,随着石油、煤炭等不可再生能源的日趋枯竭,环境污染日益严重,节能与环保已成为世界各国亟待解决的两大问题。

根据美国能源部下属能源情报署的数据,2012 年全球石油需求量为 8905 万桶/日;瑞士银行 2012 年年底的报告称目前世界已证实石油储量有 1.8 万亿桶,这意味着按现有石油消费水平和当前证实的石油储量,世界石油还可开采 46 年。国际能源署预测^[1],至 2035 年,全球年能源需求将从 2009 年的 120 亿吨石油当量增加到 170 亿~180 亿吨石油当量;二氧化碳排放方面,如果保持当前的排放政策,排放量将从 2009 年的 290 亿吨上升到 430 亿吨,即使采用新规,排放量也会上升到 360 亿吨。汽车排放约占总排放的四分之一。

目前我国已成为世界第二能源消耗大国。2012 年消耗石油 4.93 亿吨,原油对外依存度为 56.42%,达历史最高值。预计到 2030 年,我国 80%的石油将依赖进口,能源安全问题日益严峻。在 2009 年 12 月 7 日召开的哥本哈根联合国气候变化大会上,我国政府再次重申了到 2020 年非化石能源占一次能源消费比重达到 15%左右的目标,并首次提出到 2020 年,我国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%的减排计划。而我国正处于工业化背景下较高碳当量的经济运行状态,实现减碳目标任重而道远。2013 年 10 月,工信部节能与综合利用司官员表示,我国已经是二氧化碳排放第一大国,增量也占全球的 70%以上,在国际上面临的节能减碳压力越来越大。

能源问题一直是制约人类社会发展的一个重要因素,社会的每一次重大进步,都离不开能源的改进和更替。2012 年 6 月,著名的美国经济学家杰里米·里夫金^[2]提出,世界即将步入“后碳”时代,以互联网技术和可再生能源相结合为特征的第三次工业革命将是人类可持续发展、避免灾难性气候变化的希望。我国正在从战略上调整目前的能源结构,大力研究开发清洁可再生能源技术,包括风能、太阳能、氢能等能源的开发与应用。在国家政策的大力引导下,风能、太阳能的开发与利用

得到了迅猛的发展。2013 年 2 月,国家电网公司发布《关于做好分布式电源并网服务工作的意见》,明确指出家庭用户不但能用风能、太阳能等新能源发电装置给自己供电,还可以将电卖给电网。

氢能虽然是二次能源,但它在整个新能源体系中占有举足轻重的地位。早在 19 世纪,法国科幻小说鼻祖凡尔纳在其小说中就曾预言:有朝一日社会能源将会以氢为基础,能源结构将被彻底改造。这种重量很轻的气体是宇宙中最丰富的元素,它能够以水为原料制成,它出奇的洁净,燃烧时排放出基本上是新鲜的蒸汽。当被输入到产生电力的电化学反应堆中时,它提供空前的效率,高达内燃机的 2 倍。氢气来源广泛,可通过电解水制氢、生物质制氢、太阳能光解制氢、水煤气法制氢等多种方法获取,而且氢气是钢铁企业、石化企业等多个行业的副产品。我国氢气年产量已逾千万吨规模,位居世界第一。氢能还可以用于解决新能源开发利用中的能源储存问题,很多风能、太阳能丰富的区域人口密度低,当地能源需求量小,而将其转化为电能上网成本又太高,一个切实可行的方法就是将其转化为氢能储存起来。水电厂也可通过制氢来实现电力“平谷”。

燃料电池(Fuel Cell, FC)是高效利用氢能的新能源发电装置,被公认为是继火电、水电和核电之后的第四代发电技术,可用于新能源汽车、备用电源、水下电源、航空电源、固定电站、便携式电源等诸多领域。美国《时代周刊》将燃料电池列为 21 世纪即将改变人类生活的十大高科技之首。2012 年 8 月,时任美国能源部长的朱棣文在《Nature》上撰文^[3]指出,燃料电池具有效率高、零排放等优点,是电动汽车领域一个颇具潜力的发展方向。杰里米·里夫金认为将运输工具转为插电式以及燃料电池电动汽车是第三次工业革命的重要支柱之一。

1.2 燃料电池简介

燃料电池是一种将储存在燃料中的能量通过电化学反应直接转化为电能的装置。它不受卡诺循环的限制,能量转化效率高(40%~60%),环境友好,氢燃料电池的排放物只有水。只要有足够的燃料和氧气,它可以长时间连续稳定运行。

1.2.1 燃料电池分类

燃料电池按其电解质的不同,可分为以下 5 种类型:

(1) 碱性燃料电池(Alkaline Fuel Cell, AFC)。采用氢氧化钾作为电解液。这种电解液效率很高(可达 60%~90%),工作温度为 50~250℃,主要应用于航空航天和水下,但对影响纯度的杂质,如二氧化碳很敏感,因而运行中需要采用纯氢气和氧气。

这一点限制了它的推广应用。

(2) 质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)。采用极薄的质子交换膜作为电解质。这种电解质具有极高的体积功率密度和重量功率密度,工作温度为 50~120℃,可广泛应用于电动汽车、备用电源、水下电源等领域。

(3) 磷酸型燃料电池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)。采用 200℃高温下的磷酸作为其电解质,很适合用于分散式的热电联产系统。

(4) 熔融碳酸盐燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)。以高温下熔融的碳酸锂、碳酸钾作为电解质,工作温度可达 600~1000℃,不仅可以直接利用余热进行供热,而且排出的高温气体可以带动汽轮机进行二次发电,可以组成大型复合式发电系统。

(5) 固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)。采用固态电解质(钴氧化物),工作温度约为 500~1000℃。因工作温度高、启动/停止过程慢,主要用于固定电站。

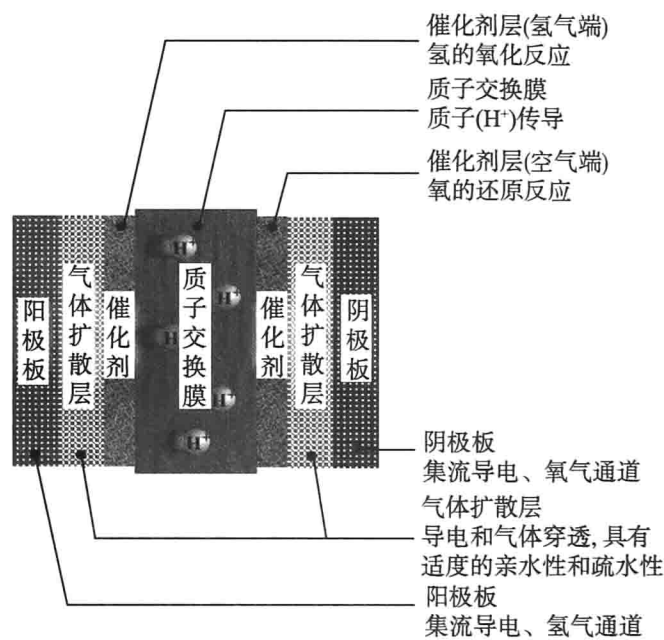
1.2.2 质子交换膜燃料电池工作原理

质子交换膜燃料电池由于具有工作温度低、能量转换效率高、无有害排放物质和易于操作等优点受到人们的青睐,日益受到各国政府、研究机构和企业的高度重视。

单片质子交换膜燃料电池由七层结构组成,包括阳极板、阳极气体扩散层、阳极催化剂层、质子交换膜、阴极催化剂层、阴极气体扩散层和阴极板,如图 1-1 所示。其中,阳极板和阴极板统称双极板,分别作为氢气和氧气的进出通道,并起到集流导电的作用,两块极板之间是冷却水流道;气体扩散层使参与反应的氢气和氧气在质子交换膜表面实现均匀分布,同时起到导电作用;催化剂层主要是贵金属铂(Pt),促进氢气的氧化反应和氧气的还原反应;质子交换膜由一层很薄的聚合物材料组成,是燃料电池的核心,主要起到氢离子(H^+)的传导作用。阳极气体扩散层、阳极催化剂层、质子交换膜、阴极催化剂层、阴极气体扩散层组成的部件称为膜电极(Membrane Electrode Assembly, MEA),膜电极是燃料电池的核心组件。

质子交换膜燃料电池单体的工作原理如图 1-2 所示。具体工作过程如下:

氢气通入阳极板,流经阳极板上的氢气流道,均匀穿过气体扩散层(微孔碳纸),与催化剂(通常用 Pt 或合金催化剂)充分接触,氢气在催化剂的作用下在质子交换膜上发生氧化反应,被分解为质子(即氢离子)和电子。质子黏附在膜表面的水分子上形成水合氢离子,这些水合氢离子穿过质子交换膜到达阴极,电子通过外电路到达



阴极端，氧气流经阴极板上的气体流道，均匀穿过气体扩散层到达催化剂层，在催化作用下发生还原反应，被分裂形成弱的 O-Pt 键附在 Pt 表面，然后每一个氧原子离开催化剂 Pt，与来自外电路的电子和从质子交换膜穿透过来的氢离子化合成

水分子，并产生一定的热量。还原反应为



燃料电池的总反应为



因此，只要源源不断给燃料电池提供反应所需的燃料——氢气和氧气，燃料电池就可以实现持续发电。

单片燃料电池的输出电压较低，理想开路电路在 1.2V 以上，实际开路电压一般不到 1V，而且燃料电池的特性较软，随着输出功率的增加，输出电压会不断下降，如图 1-3 所示。

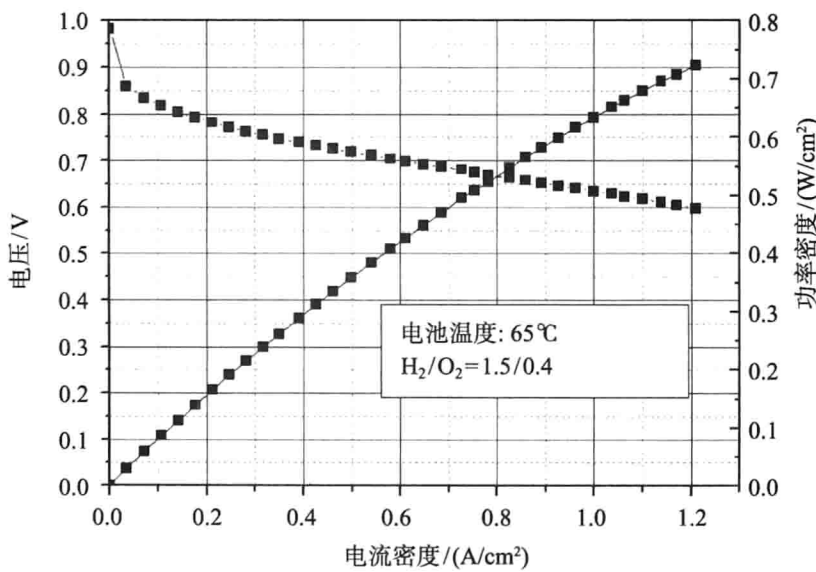


图 1-3 燃料电池特性曲线

单片燃料电池的额定工作电压一般设定在 0.7V 左右，额定电流密度设定在 1A/cm² 左右，单片燃料电池的面积一般不超过 300cm²，所以单片燃料电池的额定输出功率在 210W 以下。为了获取较大功率输出，通常需要将几十甚至几百片单电池串联，构成燃料电池电堆，如图 1-4 所示。

燃料电池电堆无法独立发电，它必须与氢气供给子系统、空气供给子系统、循环冷却子系统和电控系统一起构成燃料电池系统，如图 1-5 所示。

电控系统实时检测燃料电池单片电压、电流及氢气和空气供给压力、流量、湿度、温度，并对这些操作条件进行实时控制，以保证燃料电池工作在最佳状态。

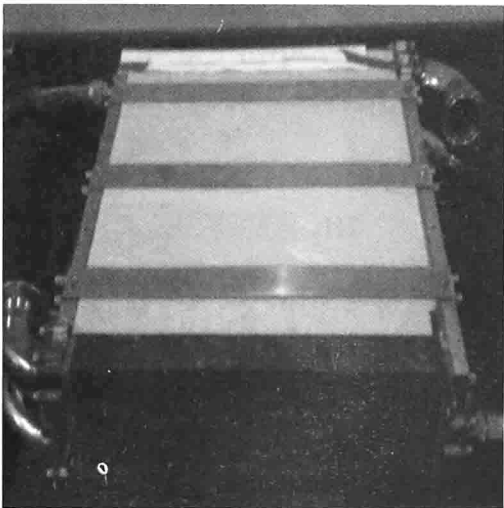


图 1-4 燃料电池电堆

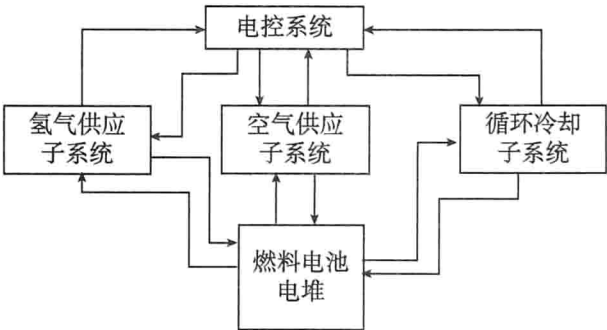


图 1-5 燃料电池系统结构

1.3 燃料电池的发展历史与现状

1839 年,英国人格罗夫(W. R. Grove)发表了世界上第 1 篇燃料电池研究报告^[4],并研制了第 1 个燃料电池。五十年后的 1889 年,蒙德(L. Mond)和朗格尔(C. Langer)研制出的氢氧燃料电池结构已接近现在的燃料电池。在输出电压为 0.73V 时,电流密度为 0.35mA/cm²。真正将燃料电池作为实际电源开发是 1960 年以后的事情,当时美国空间发展计划选用燃料电池作为电源,将其用于双子座飞船的主电源。20 世纪 80 年代以来,燃料电池的应用开始进入民用领域,得到了飞速发展。

膜电极是燃料电池的核心“芯片”,已经历 3 个发展阶段。第 1 代是基于气体扩散电极(Gas Diffusion Electrode, GDE)的膜电极,将催化剂涂覆在气体扩散层上,催化剂的涂覆厚度达 40μm,如图 1-6 所示。这种膜电极催化剂用量大,已基本淘汰。第 2 代是基于催化剂涂层膜(Catalyzer Coated Membrane, CCM)的膜电极,将催

化剂直接涂覆在质子交换膜上，催化剂厚度可降至 5 μm ，催化剂用量大大降低。这种膜电极界面阻抗小，电性能好，是目前国际上主流的膜电极制备方法。第 3 代是有序化膜电极，正在探索之中。

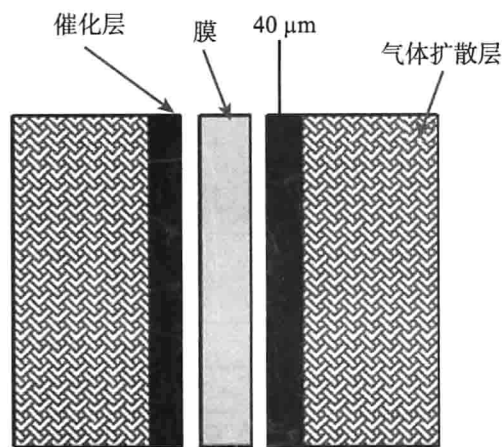


图 1-6 基于 GDE 的膜电极

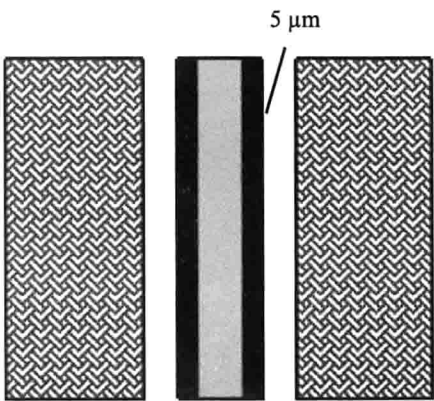


图 1-7 基于 CCM 的膜电极

我国的燃料电池膜电极技术已达到国际先进水平，武汉理工大学研制的第 2 代基于 CCM 技术的膜电极得到了国际燃料电池界的认可，已出口到美国、加拿大、德国、南非等多个国家，目前已累计出口 20 余万件膜电极产品。根据美国杜邦公司的数据，2009 年，武汉理工大学的膜电极产业化基地武汉新能源有限公司是国际上 6 大膜电极供应商之一，如图 1-8 所示。

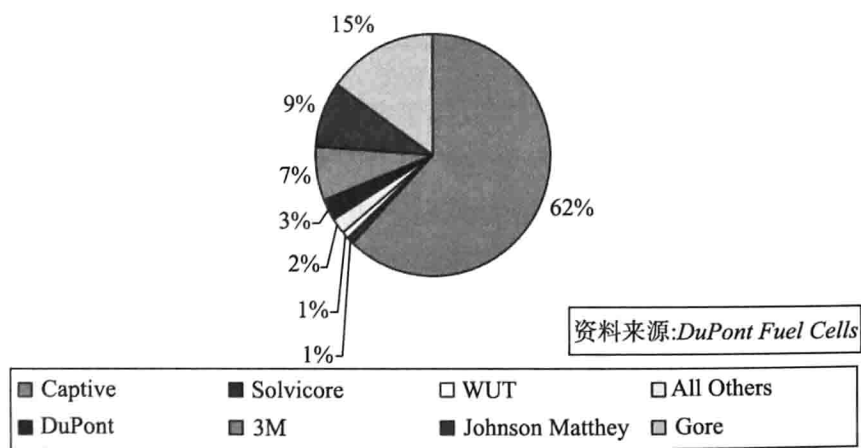


图 1-8 2009 年全球膜电极供应单位(其中 WUT 为武汉理工新能源有限公司)

美国能源部(Department of Energy, DOE)根据燃料电池的车用需求，提出 2015 年应达到的性能指标如表 1-1 所示。

表 1-1 美国 DOE2015 年燃料电池目标

序号	名称		单位	2015 年目标
1	燃料电池电堆	体积功率密度	W/L	2000
2		质量功率密度	W/kg	2000
3		效率@25%额定功率	%	65
4		效率@额定功率	%	55
5		成本	\$/kW	15
6	燃料电池系统	体积功率密度	W/L	650
7		质量功率密度	W/kg	650
8		效率@25%额定功率	%	60
9		效率@额定功率	%	50
10		车用工况寿命	h	5000
11		稳态工况寿命	h	40000
12		低温启动	℃	-40
13		成本	\$/kW	30
14	催化剂	催化剂 Pt 载量	mg/cm ²	0.2
15		Pt 用量	g/kW	0.2
16	双极板	双极板重量密度	kg/kW	<0.4
17		腐蚀电流	μA/cm ²	<1

这些指标的核心是提高燃料电池功率密度,降低催化剂贵金属用量,降低成本,提高寿命、可靠性和环境适应性。燃料电池技术是国际汽车企业竞争的热点,美国通用,日本丰田、本田、尼桑,德国戴姆勒等都拥有车用燃料电池技术,也代表了国际燃料电池技术的水平^[5]。

燃料电池商业化方向的努力近年取得了突破性进展。2010 年 3 月,通用汽车公司研制成功的第 5 代 93kW 燃料电池系统体积与相同功率的内燃机相当,重量减轻 100kg, Pt 用量从 80g 降至 30g,并计划于 2015 年降至 10g,即与传统汽车尾气三元催化所需 Pt 用量相当。美国 UTC 公司研发的 PureMotion 燃料电池装载在 AC Transit 运输公司的燃料电池电动汽车上,截至 2010 年 6 月,运行时间超过了 7000 小时,没有更换任何部件,展现了解决车用燃料电池寿命问题的希望。2012 年 9 月,丰田公司首次公开了计划用于量产车的燃料电池组,如图 1-9 所示,输出功率密度为 3kW/L。提高输出密度方面,最有效的是电极形成技术,为了在催化剂不凝结的状态下进行催化剂涂覆,开发了粒径为数 μm 级别的铂金(Pt)系催化剂生产技术。该技术不仅提高了燃料电池输出功率密度,Pt 用量“也减到了 1/3 以下”(丰田),因此还降低了成本。