

质子交换膜燃料电池系统

发电技术及其应用

P 陈维荣 李 奇◎著
*roton Exchange Membrane Fuel Cell System
Power Generation Technology and Its Application*



科学出版社

质子交换膜燃料电池系统 发电技术及其应用

陈维荣 李 奇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

燃料电池技术由于具有高效、环境友好的特点,被视为一种具有发展前景的新能源技术。与其他类型的燃料电池相比,质子交换膜燃料电池(PEMFC)具有运行温度低、功率密度高、响应快、稳定性好,以及当使用纯氢气时不会造成环境污染等特点,适用于便携式动力源、交通运输工具及分布式发电。本书在简介PEMFC特性的基础上,重点总结作者的科研团队在PEMFC系统发电控制技术及应用方面取得的研究成果,以及本领域的一些技术发展。

本书可作为高等院校电气工程专业及相关专业师生的教材,也可作为从事燃料电池发电技术领域相关工作的科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

质子交换膜燃料电池系统发电技术及其应用 / 陈维荣, 李奇著.
— 北京: 科学出版社, 2016.7
ISBN 978-7-03-047376-9

I. ①质… II. ①陈… ②李… III. ①质子交换膜燃料电池-发电-研究 IV. ①TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 031963 号

责任编辑: 杨 岭 华宗琪 / 责任校对: 贺江艳 贾娜娜
责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年7月第 一 版 开本: B5 (720×1000)
2016年7月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 230千字
定价: 65.00元

序

近年来，随着经济的快速发展，能源消耗日益增大，世界范围内的能源短缺和环境污染问题日益严重，对经济的可持续发展带来了严重的挑战。加大研发和利用清洁能源、可再生能源已成为世界能源发展的必然趋势，风能、太阳能、氢能等新能源得到了世界各国的高度重视和快速发展。其中，利用氢能效率最好的氢燃料电池，直接将化学能转化为电能，是一种高效、环境友好的发电装置，被视为一种非常具有发展前景的能源技术，已成为新能源研究领域的热点和重点之一。

在各种燃料电池中，由于质子交换膜燃料电池(PEMFC)具有高效、安全、环保和功率密度高等突出优点，在电力、通信以及交通运输等领域得到成功应用，并展现出良好的发展前景。PEMFC 是一个非线性、强耦合的复杂动态系统，其动态特性涉及流体力学、热力学以及电化学等众多学科，开展 PEMFC 系统动态模型、控制方法以及多能量源控制策略的深入研究，将为燃料电池的实际应用提供重要的指导作用，具有重要的学术意义和实用价值。

西南交通大学陈维荣教授所带领的研究团队，长期从事 PEMFC 系统的研究与教学工作，在国内率先开展了大功率燃料电池在轨道交通中的基础与应用研究，近几年取得了丰硕的研究成果，尤其在燃料电池机理模型、优化控制等方面做了大量的研究工作，取得了系列创新成果，为大功率燃料电池的应用奠定了坚实的理论基础。2013 年，研究团队成功研制了中国首辆燃料电池电动机车，使我国成为世界第五个拥有燃料电池电动机车的国家；2016 年，成功研制世界首辆燃料电池/超级电容混合动力商用型有轨电车。

本书主要介绍了本领域的一些技术进展总结以及陈维荣教授团队多年的研究成果，很好地阐述了 PEMFC 建模、控制和应用等关键问题，具有重要的学术与应用价值，对从事燃料电池发电技术领域的科研人员和工程技术人员具有很高的参考价值。

中国工程院院士 

2016 年 1 月 26 日

前 言

目前,人类使用的主要能源来自于化石燃料,而使用化石燃料的热机不仅效率低下,并且其排放物造成了严重的大气污染。随着化石燃料的短缺和环境问题越来越严重,全球都在积极进行清洁能源和可再生能源的研究与应用。

氢能是一种环境友好型的能源,氢燃料电池是直接将氢能转换成电能的装置,其能量转换效率高(40%~60%),不排放有害气体,只排出清洁的水。正是由于这些突出的优点,燃料电池和氢能被认为是未来新能源的重要组成部分。世界各国政府和企业都对燃料电池技术的研究和开发非常重视,目前正掀起一轮燃料电池研发和应用的高潮。我国作为世界第一产氢大国,氢气年产量超千万吨,在氢能的开发和应用领域具有明显的优势。

在众多的燃料电池中,质子交换膜燃料电池(PEMFC)除了具有燃料电池的共同优点,相对其他种类的燃料电池还具有可在室温下快速启动、寿命长、无电解液流失等优点。PEMFC技术已经在交通、通信、航空航天、潜艇等领域得到了广泛应用,如基于PEMFC的物料搬运叉车、PEMFC混合动力商用大巴车和轿车、通信基站后备电源、PEMFC无人飞机、PEMFC机车,以及潜艇应用等,尤其是2015年以来,丰田、宝马、奔驰、现代、上汽等众多汽车公司已推出或计划推出PEMFC轿车。PEMFC的大规模商业应用正在兴起。

PEMFC是一个涉及流体力学、热力学以及电化学等众多学科的非线性、强耦合复杂动态系统。为了保证PEMFC系统的可靠运行,必须对燃料电池工作原理进行深入研究,并找到适合PEMFC系统的优化控制方法。近年来,燃料电池混合动力车辆的研发在全世界范围内受到极其广泛的关注,对燃料电池混合动力系统实现有效的能量管理是确保混合动力车辆正常、稳定、高效工作的前提。为了实现PEMFC系统的高性能、高可靠性和长寿命运行,开展PEMFC系统动态模型、控制方法以及多能量源控制策略的研究,具有重要的学术意义和实用价值。

本书重点介绍作者所在的科研团队长期从事燃料电池技术研究所取得的研究成果以及本领域的一些技术进展总结,全书围绕PEMFC的建模、控制和应用展开,共分为6章:第1章简要介绍燃料电池基本原理、分类,在建模、控制与应用方面的研究现状;第2章主要讨论燃料电池电特性及其影响因素;第3章介绍质子交换膜机理模型、辅机模型的建模及其模型辨识;第4章详细介绍燃料电池

温度、流量与压力的最优控制方法；第 5 章、第 6 章分别介绍燃料电池在混合动力车辆以及在分布式发电中的应用。

本书第 1、5、6 章由陈维荣撰写，第 2、3、4 章由李奇撰写，全书由陈维荣统稿。在本书写作工程中，得到了团队教师刘志祥研究员、戴朝华副教授、张雪霞讲师和郭爱讲师的大力支持，研究生韩莹、邓惠文、刘涛、杨寒卿、张国瑞、尹良震、洪志湖、于爽、王伟颖、邱宜彬也为本书的完成作出了贡献。在此，对他们表示衷心的感谢。本书包括了团队研究生田维民、王珂、王旭峰、冒波波、刘小强、郭亮、张异、冉莉莉等的部分共同研究成果，在此也对他们表示衷心的感谢！同时，还要特别感谢钱清泉院士对本书相关研究工作的指导和支持。

本书的研究工作得到了国家科技支撑计划(No. 2014BAG08B00)，国家自然科学基金(No. 51177138, 61473238, 51407146)，四川省杰出青年基金(No. 2015JQ0016)，高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20120184120011)的资助，在此致谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不足，敬请读者批评指正。

本书写成时，正值西南交通大学建校 120 周年，谨以此书为母校 120 周年校庆献礼。

作 者

2015 年 12 月于成都

目 录

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	3
1.2.2 PEMFC 工作原理	5
1.3 PEMFC 应用现状	6
1.4 PEMFC 系统建模与控制研究现状	8
第 2 章 PEMFC 特性	12
2.1 极化特性	12
2.1.1 开路电压	12
2.1.2 活化极化	13
2.1.3 欧姆极化	15
2.1.4 浓差极化	15
2.2 空冷型质子交换膜燃料电池运行特性分析	16
2.2.1 阳极排气影响的机理分析	16
2.2.2 瞬时短路影响的机理分析	17
2.2.3 风速影响的机理分析	21
第 3 章 PEMFC 系统建模	22
3.1 系统结构	22
3.2 机理模型	23
3.2.1 输出电压模型	23
3.2.2 阴极流量模型	26
3.2.3 阳极流量模型	28
3.2.4 膜水合模型	30
3.2.5 供应管道模型	31
3.2.6 回流管道模型	32
3.3 辅助系统模型	32
3.3.1 空气压缩机模型	32
3.3.2 冷却器模型	33

3.3.3	增湿器模型	34
3.4	辨识模型	35
3.4.1	基于神经网络的 PEMFC 模型辨识	35
3.4.2	基于 MPSO 的 PEMFC 模型参数辨识	40
第 4 章	基于 H_{∞} 次优控制方法的 PEMFC 系统控制	52
4.1	基于 PID 的 PEMFC 最优温度控制方法	52
4.1.1	最优工作温度	52
4.1.2	基于最优工作温度的 PID 控制	53
4.2	基于 MPSO 的 PEMFC 过氧保护 H_{∞} 次优控制方法	56
4.2.1	H_{∞} 混合灵敏度问题	57
4.2.2	加权函数的设计问题	59
4.2.3	结构奇异值分析	60
4.2.4	PEMFC 控制系统结构及模型线性化	62
4.2.5	基于 MPSO 的 H_{∞} 次优输出反馈控制器设计	63
4.2.6	仿真与实验结果分析	65
4.3	PEMFC 压力系统的非线性 H_{∞} 次优控制方法	76
4.3.1	非线性系统的状态反馈精确线性化	77
4.3.2	动态扩展算法	79
4.3.3	PEMFC 压力系统的状态反馈精确线性化	80
4.3.4	非线性 H_{∞} 次优输出反馈控制器设计	85
第 5 章	燃料电池混合动力车辆	90
5.1	燃料电池混合动力电动自行车	90
5.1.1	系统拓扑结构	91
5.1.2	混合动力系统仿真	93
5.1.3	混合动力系统硬件设计	97
5.1.4	样车测试	107
5.2	燃料电池混合动力汽车	108
5.2.1	燃料电池混合动力系统拓扑及建模	108
5.2.2	多能量源控制策略	115
第 6 章	燃料电池分布式并网发电系统	130
6.1	系统结构	130
6.2	系统运行模式及要求	133
6.2.1	运行模式	133
6.2.2	并网运行要求	133
6.2.3	独立运行要求	135

6.3 并网逆变器控制策略	136
6.3.1 并网运行控制	136
6.3.2 独立运行控制	144
6.4 滤波器设计	146
6.5 综合运行控制仿真测试	146
6.5.1 并网运行	147
6.5.2 孤岛运行	150
6.5.3 运行模式切换	153
参考文献	159

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

能源是经济增长和社会发展的驱动力，是人类赖以生存的物质基础。随着经济的快速发展、能源消耗日益增大、化石能源日益枯竭、环境污染日趋严重，能源危机、气候变化与环保问题成为目前世界各国所面临的巨大挑战，各国都制定了相应的能源政策。《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》明确了我国能源发展的总体方略和行动纲领，节能减排，开发和利用清洁低碳、可再生新能源成为能源发展的总体方向^[1]。

风能和太阳能已经成为新能源中的研究热点，但其缺点是不能提供稳定的能源供给，并且对环境和气候的要求较高。在众多新能源应用中，氢能作为一种清洁、高效、安全、可持续的新能源，被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源和人类战略能源的发展方向。氢燃料电池(Fuel Cell, FC)是直接将氢能转换成电能的装置，其能量转换效率高(40%~60%)^[2]，如实现热电联供效率更高，并且几乎不排放 CO₂ 和 SO₂ 等有害气体，理论上只排出水，且具有清洁、无污染、噪声低，模块结构、积木性强等优点，受到了世界各国的高度重视。

英国科学家郭瑞沃·威廉姆在 1839 年首次演示了氢氧发电实验，从而建立起了氢氧燃料电池的基本概念。由于科研水平和环境的限制，此概念在当时没有得到充分的重视和发展。直到 20 世纪 60 年代，由于航天和国防事业的研发需要，该领域的研究才逐渐开展和活跃起来。20 世纪末，随着燃料电池技术的发展，尤其是电极结构立体化、催化剂铂用量的大幅度降低、电极-膜-电极三合一组件等关键技术的突破，以及全球气候变暖、环境污染、石化能源紧缺等问题日趋严重，作为一种可以直接将化学能转化成电能电化学发电装置，和其他新能源一样，燃料电池受到越来越广泛的关注，其技术研发也备受各国科研机构的重视，技术水平得到了显著发展和提升^[3]。

燃料电池是一种直接把化学能转化为电能的装置，不同于普通电池，它的反应物不储存在电池内部而是由外部供给，因此其不用充电且能长时间提供能量。燃料电池分为碱性燃料电池、质子交换膜燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池和固体氧化物燃料电池等，大多使用纯氢或者富氢气体作为燃料。与内燃机相比，燃料电池的优势^[2,4,5]体现在以下方面。

(1) 高效：燃料电池的能量转化率通常高于活塞式或涡轮式内燃机。这种优势在小型系统上体现得最为明显，如热电联供系统的小型发电系统。

(2) 简易：燃料电池的工作原理简单，安装拆卸方便，可用于稳定性较高或需长期运行的系统中。

(3) 环保：燃料电池使用的燃料是氢，反应生成物仅是水和热，这就意味着真正实现了“零排放”的目标。此优势成为它在交通领域备受重视的主要原因。

(4) 低噪：即便安装有额外的燃料存储和传输设备，系统在运行过程中仍然非常安静。这符合便携式供电设备和分布式热电联供系统的工作要求。

在众多的燃料电池中，质子交换膜燃料电池(PEMFC)除了具有与燃料电池的共同优点，相对其他种类的燃料电池还具有可在室温下快速启动、寿命长、无电解液流失等优点。PEMFC 特别适合作为移动电源，或者作为分布式小型电源使用，在分散电站、电动汽车、移动式电源、潜艇、航空航天等方面有广阔的应用前景^[6,7]。

近十年来，燃料电池技术已成为新能源技术研究的一个重点和热点领域，燃料电池被认为是 21 世纪首选的清洁环保、高效方便的发电技术^[2,8,9]。燃料电池的一个重要应用领域是燃料电池新能源汽车。目前，燃料电池汽车的研发在全世界受到极其广泛的关注，美国、日本和欧洲等国家和地区的多家著名汽车公司已投入巨资对燃料电池汽车进行研发，已陆续推出了多款商用及乘用车辆，并得到各国政府在政策和法规上的大力支持。

PEMFC 是一个非线性、强耦合的复杂动态系统，其动态特性涉及流体力学、热力学及电化学等众多学科，对电池的设计、开发和应用有极其重要的影响，尤其是在燃料电池电动车等大功率使用时呈现出严重的非线性，要对其进行精确描述有相当大的困难。PEMFC 系统是一个复杂系统，各个子系统之间既相互独立又相互联系，其性能受系统流量、压力以及温度等影响。为了保证 PEMFC 系统可靠运行，有必要研究适合 PEMFC 系统流量、压力、温度的优化控制算法，使控制器满足性能设计指标的要求，并具有更好的鲁棒性，同时，对燃料电池混合动力系统实现有效的能量管理是确保混合动力车辆能够正常、稳定和高效工作的前提。

为了实现 PEMFC 系统的高性能、高可靠性和长寿命运行，开展 PEMFC 系统动态模型、控制方法以及多能量源控制策略的研究，具有重要的学术意义和实用价值。

1.2 燃料电池简介

燃料电池像一个蓄电池，是一种将储存于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置，从外表上看有正负极和电解质等，但实质上它不能像蓄电池

那样“储存电”而更像是一个“微型发电厂”。燃料电池的电化学反应不是热机过程，所以没有卡诺循环的限制，因而发电效率较高。

1.2.1 燃料电池分类

燃料电池最常用的分类方法是根据所采用电解质的性质进行分类，一般可分成五类：质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)、碱性燃料电池(Alkaline Fuel Cell, AFC)、磷酸型燃料电池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)、固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)等。也可根据工作温度进行分类，分为低温($<100^{\circ}\text{C}$)燃料电池，包括 AFC 与 PEMFC；中温($100\sim 300^{\circ}\text{C}$)燃料电池，包括 PAFC；高温($600\sim 1000^{\circ}\text{C}$)燃料电池，包括 MCFC 和 SOFC^[2,7]。

1. 质子交换膜燃料电池

质子交换膜燃料电池(PEMFC)也称为聚合物电解质膜燃料电池，由 General Electric 公司于 20 世纪 50 年代发明，被美国国家航空航天局(NASA)用来为其 Gemini 空间项目提供动力。

在 PEMFC 中，电解质是关键材料之一，为一片薄的聚合物膜(如全氟磺酸型质子交换膜)，质子能够渗透但不导电的 NafionTM 膜，而电极基本由碳组成，反应以电极上的一层薄的铂作为催化剂，PEMFC 的工作温度约为 80°C ，单电池能产生约 0.7V 的电压，为了得到更高的电压，须将多个单电池串联起来组成燃料电池电堆。

PEMFC 可在室温条件下快速启动，水易排出，寿命长，比功率大，比能量高，体积较小，是电动汽车和家庭用分布式发电的理想电源。此外，PEMFC 的工作效率较高，一般为 $40\%\sim 60\%$ ，而且动态响应好，能快速地根据用电需求调整其功率输出。但是 PEMFC 对氢气以及空气的质量要求比较高，因为铂催化剂很敏感，极易受到 CO 和硫化物等杂质的污染而中毒，从而失去催化活性，导致燃料电池特性迅速劣化，缩短电池的使用寿命。

2. 碱性燃料电池

碱性燃料电池(AFC)发展较早，也是发展很快的一种燃料电池，在 1960~1965 年期间，美国 Pratt-Whitney 公司为 Apollo 登月计划成功开发了碱性燃料电池。AFC 的设计与 PEMFC 的设计基本相似，但 AFC 使用的电解质为强碱水溶液(如氢氧化钾、氢氧化钠)，当发生电化学反应时，羟基(OH)从阴极移动到阳极与氢气发生氧化反应生成水和电子，这些电子为外部电路提供电能，之后回

到阴极与氧和水发生还原反应生成更多的羟基离子。

AFC 与 PEMFC 的工作温度相似,为 $80\sim 105^{\circ}\text{C}$,它的启动速度也很快,但其电流密度却为 PEMFC 的 10%左右,不太适合作为移动电源,然而 AFC 是燃料电池中生产成本最低的一种电池,因此可用于小型的固定发电装置,碱性燃料电池的催化剂对 CO 和硫化物等杂质也非常敏感。

3. 磷酸型燃料电池

磷酸型燃料电池(PAFC)是当前商业化很快的一种燃料电池,是在 AFC 的基础上发展而来的,其目的是避免酸性气体参与 AFC 的反应而影响电池的性能和寿命。PAFC 以液体磷酸为电解质,通常位于碳化硅基质中,其工作温度要比 PEMFC 和 AFC 的略高,为 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$,但仍需铂催化剂。PAFC 阳极和阴极反应与 PEMFC 相同,但工作温度略高,所以阴极上的反应速度要比 PEMFC 阴极的速度快,较高的工作温度也使 PAFC 对杂质的耐受性较强,当反应物中含有 1%~2%的 CO 和百万分之几的硫化物时,PAFC 也可以正常工作。PAFC 的效率为 40%左右,其预热时间比 PEMFC 长,但结构简单,运行稳定,电解质挥发度低,经过二十多年的大量研究,已有许多发电能力为 $0.2\sim 20\text{MW}$ 的 PAFC 发电装置为医院、学校、小型电站等提供动力。

4. 熔融碳酸盐燃料电池

熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)可以使用锂钾碳酸盐或者锂钠碳酸盐作为电解质,当温度达到 650°C 时,这种盐就会溶化,产生碳酸根离子,从阴极流向阳极,与氢结合生成水、二氧化碳和移动电子,电子通过外部回路流向阴极,形成电流。MCFC 以金属镍为主要的电催化剂,并且可以采用脱硫煤气或者天然气为燃料,电池隔膜与电极均采用带铸方法制备,工艺成熟,可以大量生产,其效率最高可达 60%,如果能够将其浪费的热量加以利用,其潜在的效率可高达 80%。不过,高温也会带来一些新问题,MCFC 启动需要较长时间,不宜用于移动式电源,同时,电解质的高温特性和腐蚀特性使得它们不适合用于家庭发电,但可以用于固定电站。

5. 固体氧化物燃料电池

固体氧化物燃料电池(SOFC)采用氧化钇、氧化锆等固态陶瓷作为电解质,工作温度为 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$, O^{2-} 从阴极移动到阳极与燃料气体(主要是 H_2 和 CO 混合物)发生反应,阳极生成的电子通过外部电路产生电流。

SOFC 通常采用的结构为管型和平板型,管型 SOFC 电池组由一端封闭的管状单电池以串联、并联方式组装而成,工作温度为 $900\sim 1000^{\circ}\text{C}$,主要用于固定电站系统,其缺点是电流流过路径较长,使性能受限;平板型 SOFC 的空气电极

/YSZ 固体电解质/燃料电极烧结成一体, 组成三合一结构, 其优点是制备简单、造价低、电流均匀、路径短和输出电流密度高, 但是密封困难, 抗热循环性能差, 当工作温度降低到 600~800℃时, 可以在很大程度上扩展选材范围, 提高性能, 降低成本。

SOFC 对硫污染具有很大的耐受性, 由于它们使用固态电解质, 所以更稳定, 然而用来承受高温的材料却比较昂贵, SOFC 的效率为 60%左右, 可用于向工业生产供电和供暖, 也具有为交通工具提供备用动力的潜力。

表 1-1 为几种常见燃料电池的特性比较, 可以作为燃料电池选择的基础。

表 1-1 燃料电池特性比较^[7]

项目	低温(60~200℃)		中温(160~220℃)		高温(600~1000℃)
类别	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
电解质	KOH	全氟磺酸膜	磷酸	碳酸锂(钾)	氧化钇(锆)
导电离子	氢氧根离子	氢离子	氢离子	碳酸根离子	氧离子
燃料	纯氢	氢气、甲醇	氢气	氢气、天然气、煤气	氢气、天然气、煤气
效率	60%~90%	43%~58%	37%~42%	>50%	>50%~65%
优点	低污染、电效率高、维护需求低	低污染、低噪声、启动快	低污染、低噪声	能源效率高、低噪声、具有内重整能力	能源效率高、低噪声、具有内重整能力
缺点	燃料与氧化剂限制严格、寿命短	与常规发电技术相比价格贵	价格昂贵、发电效率相对较低	启动时间长、电解液具有腐蚀性	启动时间长、对材料要求苛刻
用途	宇航、潜艇	家用、汽车	发电	大容量发电	大容量发电

1.2.2 PEMFC 工作原理

PEMFC 的主要优点是: 转换效率高、系统结构紧凑、不存在腐蚀性、基本不受二氧化碳影响、环境友好、无噪声污染等。基本组成部件包含质子交换膜、电极、电催化剂、膜电极和双极板。

PEMFC 以全氟磺酸型固体聚合物为电解质, 铂/碳或铂-钌/碳为电催化剂, 氢气或净化重整气为燃料, 空气或纯氧为氧化剂, 两面有气体流动通道的石墨板或经过表面改性处理的金属板为燃料电池双极板。图 1-1 所示为 PEMFC 的结构和工作原理示意图。

在电池阳极, 氢气通过阳极流道和气体扩散层到达阳极催化层, 在催化剂的作用下, 氢气发生氧化反应, 分解成 H^+ 和 e^- 。



阳极反应生成的氢离子，因质子交换膜的选择透过性，穿过质子交换膜到达阴极。电子则通过外电路到达阴极。

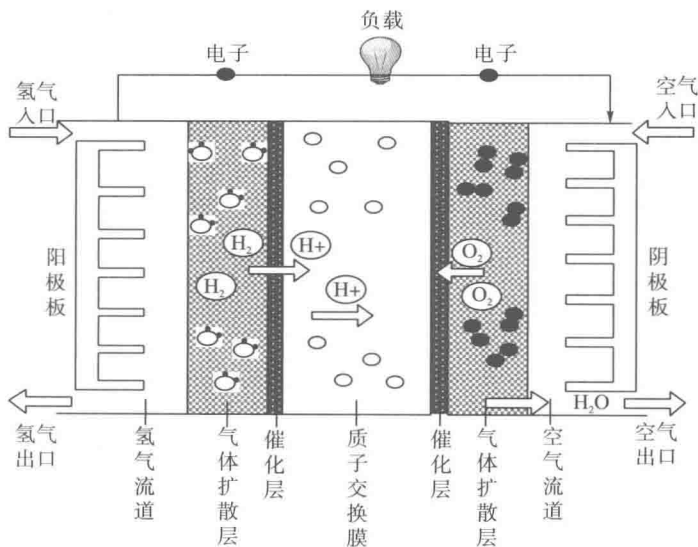


图 1-1 PEMFC 的结构和工作原理示意图

在电池阴极，空气或氧气通过阴极流道和气体扩散层到达阴极催化层，在催化剂的作用下，氧气发生还原反应，与从质子交换膜中获得的 H^+ 和从电极上获得的电子反应生成水。



总的反应方程式为



其中，燃料电池内部电化学反应生成的水，通过电极随反应尾气及时排出，防止造成电极水淹。若不间断地提供氢气和氧气，燃料电池内部的电化学反应就会持续进行，电子从阳极通过导线源源不断地传导到阴极，形成电流。在阳极和阴极之间加上负载，燃料电池就开始向负载提供电能，这就是燃料电池发电的基本原理。

1.3 PEMFC 应用现状

发展到现在，按照电解质类型，燃料电池经历了第一代的 AFC、第二代的 PAFC、第三代的 MCFC、第四代的 SOFC，目前已发展到第五代的 PEMFC。由于燃料电池成本下降，其应用也越来越广泛，图 1-2 为几种燃料电池的典型应用分布。

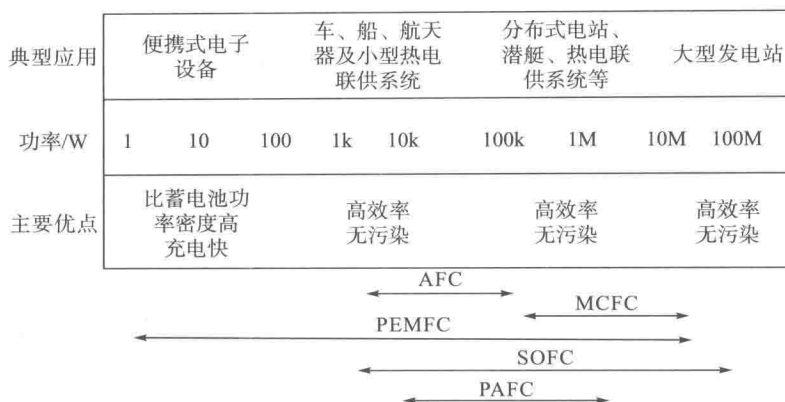


图 1-2 燃料电池应用范围

在所有燃料电池类型中，PEMFC 不仅具有燃料电池的一般优势，同时还具有机械结构设计简单、比能量高、使用寿命较长、排水简单、气体压强低、工作温度低等突出特点，其发展和应用前景尤其被看好。在中小功率燃料电池方面，各种燃料电池技术所占的比例，PEMFC 占主导地位，超过了 90%。PEMFC 应用前景广阔，对环境保护及经济的可持续发展具有重要意义，其主要应用领域包括：用作小型移动电源、备用电源等，适用于军事、通信、医院等领域；用作助力自行车、摩托车、汽车、机车、船舶等交通工具的动力源；用作分布式发电，适于用作为海岛、山区、边远地区以及新开发地区的电站^[2,7,8,10-13]。

国际上，各国政府和企业都加大了对 PEMFC 的研究开发与应用，尤其是在车辆和分布式发电上取得了很好的成果。加拿大在 PEMFC 方面居世界领先地位，一方面继续开发电动汽车、混合动力机车等交通用 PEMFC，同时也将 PEMFC 应用于分布式电站^[14]，已建成 1MW 的 PEMFC 示范电厂。早期的燃料电池汽车多是纯燃料电池的，例如，巴拉德公司 1993 年推出的第一辆燃料电池公共汽车样车，1994 年戴姆勒克莱斯勒与巴拉德联合研制的 NECAR1 燃料电池汽车等。但是燃料电池伏安特性较弱，电池中电化学反应速度较慢导致功率响应较慢，所以纯燃料电池的汽车必然导致其搭载的燃料电池冗余容量较大，并且燃料电池功率变动过于剧烈和频繁也会导致其寿命减少。因此基于燃料电池的混合动力系统应运而生，一般此类系统包括燃料电池和二次电池或超级电容等多种电源，辅助电源输出变化较快的功率，而燃料电池尽量输出较稳定的功率。2002 年福特推出第一批燃料电池混合动力车 FocuFCV，装配的混合动力系统包括巴拉德 85kW PEMFC 和镍氢蓄电池^[15]。韩国现代公司也于 2002 年升级其早先的 Santa Fe FCEV 纯燃料电池车为燃料电池混合动力车，同样采用了燃料电池和蓄电池的混合方式^[16]。2014 年 12 月，丰田汽车公司推出的全球首款面向普通市场发售的燃料电池车“Mirai”，Mirai 使用了液态氢作为动力能源，充满 Mirai 的储

氢罐需要 3~5min, 在 JC08 工况下, Mirai 的氢储量可以支持 700km 续航里程。该系统比内燃发动机更高效, 并且行驶过程中不会排放二氧化碳或其他有害物质。本田在 2015 年东京车展上推出了一款全新燃料电池车 CLARITY, 它的续航里程将超过 700km, 预计将于 2016 年初上市。该车的电池密度达到了 3.1kW/L, 动力输出为 130kW, 配有 70MPa 高压储氢罐, 最高续航里程可达 700km, 完全充电只需 3min, 几乎与日常加油时间相等。宝马公司于 2015 年 7 月展示了第一个氢燃料电池汽车原型, 即内置了丰田汽车公司燃料电池技术的宝马 5 系列 Gran Turismo 演示汽车^[17]。在机车方面也有公司作出了尝试, 东日本铁路集团公司(JR East)于 2005 年升级其柴油机蓄电池混合动力机车为燃料电池蓄电池混合动力机车, 北美 Burlington Northern Santa Fe(BNSF)铁路公司于 2007 年开发了燃料电池蓄电池的混合动力机车作为站场调车^[18]。

20 世纪 60 年代末, 我国科学家就已经开展了对燃料电池的研究, 然而由于种种原因, 在 70 年代后期许多研究工作相继停止, 这使得我国燃料电池技术与世界先进技术之间的差距逐渐扩大。进入 90 年代后, 由于国外燃料电池的迅速发展, 以及燃料电池的诸多优越性, 很多学者开始关注燃料电池技术。目前国内有许多科研单位和院校在从事燃料电池技术的研究, 及燃料电池在电动汽车、混合动力机车等方面的应用研究, 都取得了卓越的成效, 特别是基于 PEMFC 的电动汽车, 在 2008 北京奥运会和 2010 年上海世博会上, 都取得了不错的运行效果。但是燃料电池在分布式发电领域的研究还处于研究和试验阶段, 仅有少数单位开发出了相关试验系统, 例如, 中国科学院电工研究所于 2002 年开发了 75kW 燃料电池分布式发电试验系统, 浙江大学开发了 5kW PEMFC 分布式发电试验系统^[19], 华南理工大学建成 300kW 的 PEMFC 示范电站^[20], 2001 年我国首台 PEMFC 汽车在湖北十堰测试成功, 该车由清华大学、中国科学院大连化学物理研究所和同济大学等单位联合研制, 实现了零的突破。清华大学的燃料电池城市客车也采用了燃料电池和蓄电池的混合动力系统, 并且首次出口新加坡。2002 年同济大学研制了燃料电池混合动力轿车“超越一号”, 缩短了与世界先进水平的差距^[18]。2013 年 1 月 24 日由西南交通大学牵头研制的中国首辆燃料电池电动机车“蓝天号”诞生, 该机车用 150kW PEMFC 作为牵引动力, 持续牵引力为 20kN^[21]。综上, PEMFC 的研究与开发已成为了国际新能源和动力方面的研究热点^[22]。

1.4 PEMFC 系统建模与控制研究现状

1.4.1 PEMFC 系统建模研究现状

PEMFC 的工作原理涉及流体动力学、热力学、传质学、电化学以及材料学