

燃料电池系统 建模与优化控制

张立炎 全书海 著

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

燃料电池系统建模与优化控制

张立炎 全书海 著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书紧密结合当前质子交换膜燃料电池的研究热点,对质子交换膜燃料电池系统建模与优化控制的研究进行了较为详尽的分析和总结。全书共分为六章,主要内容包括绪论、质子交换膜燃料电池系统建模、质子交换膜燃料电池模拟仿真、质子交换膜燃料电池空气供应系统控制、质子交换膜燃料电池水管理、质子交换膜燃料电池系统控制。

本书可供从事电气、自动化、能源、环保、船舶、汽车领域的科技工作者和工程技术人员使用,也可供高等院校有关专业师生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池系统建模与优化控制 / 张立炎, 全书海著. —北京: 电子工业出版社, 2011.11

ISBN 978-7-121-14637-4

I. ①燃… II. ①张… ②全… III. ①燃料电池—系统建模 ②燃料电池—系统最优化 IV. ①TM911.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第190600号

责任编辑: 董亚峰 特约编辑: 王 纲

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 850×1168 1/32 印张: 7.875 字数: 252千字

印 次: 2011年11月第1次印刷

定 价: 36.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

质子交换膜燃料电池（PEMFC）具有低噪声、清洁环保、电流密度和比功率高、发电效率高等优点，它不仅可用于航天、军事等特殊领域，而且随着制造成本的降低和电堆系统性能的优化，在电动汽车、混合动力机车、燃料电池电站等方面都具有很大的市场潜力。质子交换膜燃料电池系统安全高效、长时间地运行，需要对其操作条件（空气流量和压力、温度、湿度等）进行有效的控制，而且相关变量之间的耦合性很强，因此质子交换膜燃料电池系统控制是一个多输入/多输出、强耦合的复杂系统控制问题。燃料电池系统优化控制要提高燃料电池系统工作效率，即对各控制量进行优化控制，提高燃料电池系统的净输出功率（燃料电池堆发出的电力减去各辅助系统消耗的电力）；燃料电池系统是一个电源系统，动态响应要求高，而燃料电池堆及其辅助系统自身存在着时滞特性，需要深入研究燃料电池系统控制策略，提高燃料电池系统的动态响应能力；目前，燃料电池在实验室稳态运行条件下的使用寿命远远大于室外动态工况下的使用寿命，因此也需要合适的控制策略提高室外动态工况下燃料电池的使用寿命。

本书紧密结合当前质子交换膜燃料电池的研究热点，对质子交换膜燃料电池系统建模与优化控制的研究现状进行了较为详尽的分析和总结。

全书共分为 6 章，第 1 章为绪论，介绍了质子交换膜燃料电池的基本原理，以及在汽车、舰船、固定电站、备用电源、移动电源等方面的应用。第 2 章总结了质子交换膜燃料电池系统建模国内外研究现状；建立了质子交换膜燃料电池机理模型，包括电压模型、

阴极流道模型、阳极流道模型、质子交换膜水模型、温度模型及辅助设备模型；并建立了基于 Elman 神经网络的燃料电池模型。第 3 章介绍了质子交换膜燃料电池系统模拟仿真，仿真软件包括输入界面、Simulink 模型和输出界面三部分，可以方便地对燃料电池系统进行仿真；利用该仿真软件，对影响燃料电池系统动态性能的各种因素进行了动态分析和仿真。第 4 章介绍了质子交换膜燃料电池空气供应系统控制，采用 Elman 神经网络预测空气参数随燃料电池堆输出功率和电池堆工作温度等参数变化的趋势，进行空气流量控制和空气压力控制研究，提出自适应神经网络控制方法对燃料电池空气供应系统进行控制。第 5 章主要介绍了质子交换膜燃料电池系统水管理，进行了基于回归神经网络优化的模型预测控制研究，并研究了基于湿度软测量的 PEMFC 水管理。第 6 章在第 4 章和第 5 章的基础上，介绍了质子交换膜燃料电池系统控制，包括质子交换膜燃料电池系统预测控制器设计和基于神经网络优化的 PEMFC 多模型切换控制。全书较系统地介绍了质子交换膜燃料电池系统建模与优化控制的最新成果和发展方向，总结了作者的研究成果。

本书第 1~3 章由张立炎撰写，第 4~6 章由全书海、张立炎、黄亮、卫国爱共同撰写，全书由张立炎统稿。本书是作者及其课题组多年研究的成果，作者在研究过程中得到了武汉理工大学潘牧教授的热情指导，课题组研究生张天贺、蒋卫、杜文朝等也先后参与了相关研究工作，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在一些错误和不足之处，恳请广大同行、读者批评指正。

作者
2011 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 燃料电池工作原理	2
1.3 质子交换膜燃料电池应用	4
1.3.1 燃料电池汽车	4
1.3.2 燃料电池舰船	10
1.3.3 燃料电池固定电站	13
1.3.4 燃料电池通信备用电源	15
1.3.5 移动电源	16
1.4 燃料电池系统建模与优化控制研究	17
第 2 章 质子交换膜燃料电池系统建模	20
2.1 燃料电池系统结构	20
2.2 燃料电池系统建模研究现状	21
2.2.1 稳态模型和动态模型	21
2.2.2 燃料电池子系统建模	22
2.2.3 燃料电池系统模型	27
2.2.4 几种商业化软件与模型	29
2.3 质子交换膜燃料电池机理模型	31
2.3.1 燃料电池电压模型	31
2.3.2 阴极流道模型	34
2.3.3 阳极流道模型	36
2.3.4 燃料电池质子交换膜水模型	37
2.3.5 燃料电池温度模型	48

2.3.6	辅助设备模型	50
2.3.7	小结	55
2.4	燃料电池系统神经网络建模	56
2.4.1	非线性动态系统神经网络辨识	57
2.4.2	Elman 神经网络算法分析	65
2.4.3	基于 Elman 神经网络的燃料电池系统辨识	71
2.4.4	模拟仿真及结果分析	80
2.4.5	小结	81
第 3 章	质子交换膜燃料电池系统模拟仿真	82
3.1	概述	82
3.2	燃料电池系统模拟仿真软件开发	83
3.2.1	输入界面	83
3.2.2	Simulink 模型	84
3.2.3	输出界面	85
3.3	燃料电池动态分析及仿真结果	85
3.4	小结	101
第 4 章	质子交换膜燃料电池空气供应系统控制	102
4.1	空气供应系统模型	102
4.2	PEMFC 空气供应系统控制国内外研究现状	103
4.3	PID 控制	109
4.3.1	PID 控制算法	109
4.3.2	控制方法实现	110
4.3.3	PID 控制仿真结果及分析	111
4.4	PEMFC 空气参数解耦设计	112
4.4.1	多变量过程控制系统解耦理论	113
4.4.2	PEMFC 空气参数解耦设计	114
4.5	空气流量控制策略研究	120
4.5.1	控制系统结构	121
4.5.2	空气流量 Fuzzy-PID 复合控制	122

4.5.3	空气流量神经 PID 控制	130
4.5.4	空气流量不同控制策略比较与分析	133
4.6	空气压力控制策略研究	133
4.6.1	控制系统结构	134
4.6.2	基于参数辨识模型的神经 PID 控制	136
4.6.3	基于神经网络辨识模型的神经 PID 控制	146
4.6.4	空气压力不同模型控制策略比较与分析	150
4.6.5	小结	150
4.7	基于自适应神经网络的空气供应系统控制	152
4.7.1	状态空间模型	152
4.7.2	神经网络模型	153
4.7.3	自适应神经网络控制器	154
4.7.4	仿真结果	156
第 5 章	质子交换膜燃料电池系统水管理	159
5.1	概述	159
5.2	基于回归神经网络优化的模型预测控制	160
5.2.1	模型预测控制的表示	163
5.2.2	基于回归神经网络优化的模型预测控制的体系结构	168
5.2.3	收敛性分析	170
5.2.4	仿真结果	173
5.3	基于湿度软测量的 PEMFC 水管理	177
5.3.1	燃料电池电堆的湿度控制模型	179
5.3.2	控制系统的网络结构	180
5.3.3	控制系统的模糊逻辑设计	182
5.3.4	控制系统的学习算法	184
5.3.5	仿真结果	186
第 6 章	质子交换膜燃料电池系统控制	190
6.1	概述	190
6.2	国内外研究现状	191

6.2.1	传统方法	191
6.2.2	预测控制	191
6.2.3	模糊控制	192
6.2.4	神经网络控制	192
6.2.5	自适应控制	193
6.2.6	鲁棒控制	194
6.3	质子交换膜燃料电池系统预测控制器设计	195
6.3.1	燃料电池发动机预测模型	196
6.3.2	基于神经网络自适应 PID 的预测控制	197
6.3.3	基于模糊推理的反馈校正技术	201
6.3.4	燃料电池发动机预测控制仿真与分析	204
6.4	基于神经网络优化的 PEMFC 多模型 切换控制	207
6.4.1	切换系统的优化控制	209
6.4.2	混合神经网络优化	211
6.4.3	仿真结果	214
6.4.4	小结	221
	参考文献	222
	符号及下标说明	240

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

能源是发展国民经济和提高人民生活水平的重要物质基础，也是直接影响经济发展的一个重要因素。人类社会对能源的需求越来越大，但人类赖以生存的三大化石能源（煤、石油、天然气）正在减少。世界能源组织调查显示，以现有的能源资源储量，石油不出几十年就会消耗殆尽，煤也只能供人类用 200 年左右。另外，随着人类物质文明的进步，人类对自身生活环境质量的要求也越来越高，而传统能源的消耗造成了严重的环境污染，如煤和石油的燃烧排放出大量的二氧化碳、二氧化硫、一氧化碳和氮氧化物，它们是导致温室效应、酸雨、臭氧层面积减小和光化学烟雾形成的主要原因。传统能源结构及其利用方式越来越难以适应人类生存发展的需要。新的能源利用技术将不断地被开发并利用起来，燃料电池就是一种潜力巨大的新能源。

燃料电池是一种将氢燃料和氧化剂之间的化学能通过电极反应直接转化成电能的装置。它从外表上看有正负极和电解质等，像一个蓄电池，但实际上它不能“储电”，而是一个“发电厂”。燃料电池被誉为继水力、火力、核电之后的第四代发电技术，正在美、日等发达国家崛起，以急起直追的势头快步进入以工业规模发电的行列。燃料电池具有能量转换效率高、低温快速启动、低热辐射和低排放、运行噪声低、适应不同功率要求等优点，具有非常好的前景。

1.2 燃料电池工作原理

燃料电池根据电解质的性质不同，可分为碱性燃料电池（Alkaline Fuel Cell, AFC）、磷酸燃料电池（Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC）、熔融碳酸盐燃料电池（Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC）、固态氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cell, SOFC）和质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC）。

PEMFC 的电解质是一种固态高分子聚合物，所以它又被称为高分子电解燃料电池（Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC），即用固体高分子膜做电解质，将氢和氧的化学能通过电极反应直接转换成电能的新型发电装置。图 1.1 为 PEMFC 工作原理示意图。

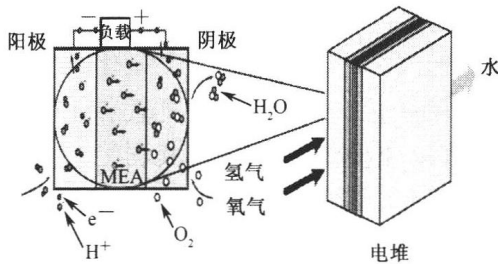
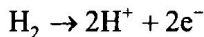


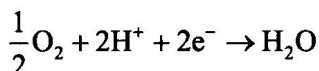
图 1.1 PEMFC 工作原理示意图

PEMFC 的基本结构主要由阳极、阴极、电解质和外电路组成，其电解质将电池分隔成阴极与阳极两部分。在阳极中，氢气在催化剂的作用下，降低活化能，离解成氢离子与电子：



氢离子通过质子交换膜往阴极移动，而电子则经由外电路对外负载做功后移往阴极。阴极的反应则是氧分子、电子及氢离子

在催化剂的作用下发生还原反应，生成水：



PEMFC 反应除了产生水与电子之外，还会产生热，为了保持燃料电池在低温（<85℃）下工作，必须进行冷却。在 PEMFC 的典型工作温度下，阴极生成的水以液态水与水蒸气的形态同时存在，这些产物将由空气带离燃料电池。

虽然燃料电池单体电压不高（正常工作时电压在 0.5~1.2V 之间），但若干个单体电池串联起来就可以达到数百伏电压。在实际使用时根据所需功率和电压将若干个单体电池串联组成电堆，大功率燃料电池通常由几百片单片电池串联组成。

燃料电池系统从本质上说是水电解的逆装置，氢气和氧气在燃料电池中通过电化学反应生成水，并释放出电能。它是一个大的发电系统，由燃料电池堆、辅助系统（包括氢气供给系统、空气供给系统、加湿系统、热管理系统）及控制系统（通过传感器采集相关信号，控制各种阀、泵和风机等，调节水、热、气的供给）组成。

燃料电池堆由大量的电池单体（几片到几百片）组成，而电池单体主要由膜电极（阴极和阳极）、密封圈和带有导气通道的集流板组成。集流板通常由石墨制成，由于其两侧均刻有导气通道，因而集流板也被称为双极板。膜电极的中间为质子交换膜，它除了有质子交换功能外，还可以起到隔离燃料气和氧化剂气体的作用；膜两边是气体电极，它由兼做电极导电支撑体和气体扩散层的碳纸和催化剂组成。PEMFC 的工作方式如下：氢气和氧气通过双极板上的导气通道分别到达电池的阴极和阳极，反应气体通过电极上的扩散层到达质子交换膜。在膜的阳极一侧，氢气在阳极催化剂的作用下离解为氢离子（质子）和带负电的电子。氢离子以水合质子的形式，在质子交换膜中从一个硫磺基转移到另一个硫磺基，最后到达阴极，实现质子导电。质子的这种转移导致阳

极出现带负电的电子积累，从而变成一个带负电的端子（负极）。与此同时，阴极的氧分子与催化剂激发产生的电子发生反应，变成氧离子，使阴极变成带正电的端子（正极），其结果就是在阳极的带负电终端和阴极的带正电终端之间产生了一个电压。如果此时通过外部电路将两极相连，电子就会通过回路从阳极流向阴极，从而产生电能。同时，氢离子与氧离子发生反应生成水。

氢气供给系统为燃料电池系统提供燃料——氢气，氢气一般由氢气瓶供给，要保持一定的压力。

空气供给系统向燃料电池系统鼓入空气，提供氧化剂——氧气，空气要保持流量和压力。

加湿系统对燃料电池堆中的水进行控制，因为水太多会淹膜，水太少会阻碍质子在膜中的传递，两者都会使燃料电池堆电压降低，从而使燃料电池系统输出功率下降。

热管理系统对燃料电池堆内的温度进行控制，燃料电池系统除了发电之外，还会产生大量的热，因此需要及时将电池生成热带走，否则会发生过热，烧坏电解质膜，使燃料电池系统不能工作。

1.3 质子交换膜燃料电池应用

质子交换膜燃料电池在燃料电池汽车、舰船、固定电站、通信备用电源及移动电源方面得到很多应用。

1.3.1 燃料电池汽车

随着经济的发展，环境问题和能源危机问题日益突出，严重影响了人类社会的可持续发展。传统的汽车内燃机由于卡诺循环的限制，由发动机经驱动系统到车轮的综合效率只有 11%左右，使汽车消耗了大量的石油，排放了大量尾气，从而使全球能源和

环境污染问题更加突出。燃料电池尤其是质子交换膜燃料电池具有噪声低、无污染、能量转换效率高和工作温度低等良好性能，特别适合做电动汽车动力源。各国政府、企业和科研机构都着重致力于研究质子交换膜燃料电池电动汽车，而燃料电池系统（又称燃料电池发动机）作为燃料电池电动汽车的心脏目前处于新的突破期，正在成为新的研发热点。

世界上第一轮燃料电池汽车研发高潮出现在 2000 年。当时，美国、欧洲和日本的各大汽车生产厂家，都在加紧开发燃料电池技术。企业界尤其是各大汽车生产厂家看到燃料电池巨大的市场潜力，纷纷投入巨资，组成联盟，进行燃料电池汽车的相关研究、实验与生产。各大汽车公司，包括奔驰、通用、丰田等都认为，到 2004 年燃料电池汽车将能够批量生产，实现产业化。戴姆勒—克莱斯勒甚至宣称，预计届时燃料电池汽车的售价将降至每台约 18100 美元。美国能源部长佩耶 1998 年在接受《纽约时报》的采访时也作出自己如意的预测：燃料电池进入家庭、汽车和其他领域的步伐将比人们想象的要快得多。

然而，事实却并非预料中的那么乐观。2003 年 7 月，最早将燃料电池汽车投入商业运营的日本丰田汽车公司，召回了其出租的 6 辆燃料电池汽车，并宣布推迟另外 6 辆燃料电池汽车的租赁。原因是储存氢燃料的高压氢气罐在加注氢气时出现了泄漏。几乎与此同时，各个国家都在燃料电池汽车的试运行中，发现了一系列防不胜防、需要马上就解决的难题。于是国际社会关于燃料电池汽车未来的预测改成了“要达到产业化至少要到 2015 年之后”。而对于燃料电池产业化的瓶颈，国际社会普遍认为是寿命和成本问题。当前，国际上燃料电池汽车进入了第二轮研发高潮，与前些年的热血沸腾、踌躇满志相比，现在人们对燃料电池汽车的研究持更加冷静的态度。2000 年之前，各国主要投入造车和示范；从 2001 年到现在，各国在继续进行示范的同时，都将重点转向应用基础研究，希望通过研究燃料电池各种基础性的问题，找到解

决车用燃料电池寿命问题的根本办法（如研究氢能本身的技术问题、制氢和储氢技术、高效的氢能转换技术等），即找到解决车用燃料电池（汽车的动力源）动态响应、环境适应性与降低贵金属担量等影响电池寿命、成本的办法。中国工程院院士、大连化学物理研究所燃料电池工程中心总工程师衣宝廉在谈到燃料电池汽车的未来走向时感慨地说：“氢源燃料电池汽车要真正走向商业化不是百米冲刺，而是厚积薄发的长跑。”

近几年来，各国政府、各大汽车公司及研究机构继续探索与实践燃料电池在电动汽车上的应用，取得了令人瞩目的成果。燃料电池示范项目在北美、欧洲与日本持续开展。示范的城市与车型在不断增加。Fuel Cell 在 2009 年 8 月发表的统计数据显示，目前世界范围内的加氢站已有 200 余个，在美国的加氢站已有 73 个。燃料电池汽车示范项目中最具代表性的是欧洲历时两年的燃料电池电动汽车演示项目（CUTE），27 辆客车在 9 个城市累计运行 62000 小时，行驶 85 万公里，承载乘客约 400 万。为了继续示范这些燃料电池公共汽车和基础设施，欧盟决定继续出资 1900 万欧元支持项目二期示范，即 HyFleet: CUTE 项目。到目前为止，示范的 36 辆燃料电池公共汽车已累计运行 250 多万公里。美国加利福尼亚州燃料电池伙伴合作计划（CaFCP）燃料电池示范项目也是其中的重要代表，它是汽车公司、燃料供应商、燃料电池技术公司和政府机构合作的项目。其伙伴成员有 32 个公司和组织，包括戴姆勒-克莱斯勒、福特、通用、本田、现代、尼桑、丰田、大众、Ballard、UTC、BP、Exxon Mobil、Shell、Chevron Texaco、加州能源委员会、加州南海岸空气质量管理局、美国能源部、美国交通部等。该项目于 1999 年启动，到 2008 年年底，在加利福尼亚州已有 200 余辆燃料电池汽车和 26 个加氢站。至 2009 年 5 月，在美国实际道路上行驶的燃料电池汽车已经超过 300 辆。近期，加州交通局在原有 3 辆燃料电池客车已运行 16.5 万英里后，又订购了 12 辆装备 UTC Power 的 Van Hool 客车。预计到 2014

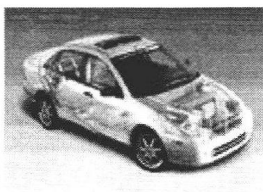
年，在加州将有 4300 辆燃料电池轿车交付使用。如图 1.2 所示为各大汽车公司生产的燃料电池轿车。



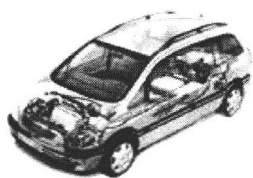
(a) 尼桑燃料电池轿车



(b) 丰田燃料电池轿车



(c) 福特燃料电池轿车



(d) 通用燃料电池轿车



(e) 戴姆勒-克莱斯勒燃料电池轿车



(f) 本田燃料电池轿车

图 1.2 各大汽车公司生产的燃料电池轿车

燃料电池巴士示范运营取得了很大进展。UTC 公司将型号为 PureMotion 120 的燃料电池发动机装载于 Alameda-Contra Costa Transit District (一家城市公交公司, 简称 AC Transit) 公交巴士上, 在加利福尼亚州的奥克兰市进行测试, 完全使用初始电堆而不更换电池, 结果一台发动机正常运行时间超过 7000 小时, 而另一台发动机运行时间也超过 6000 小时。3 辆配备了 UTC Power 燃料电池系统的 AC Transit 巴士至今已正常行驶了 25.5 万英里 (约 41 万公里), 平均燃料经济性比相同工况下行驶同样路线的柴油机巴士高 65%。以燃料电池作为动力源的公交巴士能在减少温室气体排放方面作出很大贡献, 如果氢气来自重整天然气, 则与柴油机巴士相比, 温室气体排放量能降低 43%; 如果氢气完全来自固定的可再生能源如太阳能和风能, 则温室气体排放量能降低 100%。如图 1.3 所示为各大汽车公司生产的燃料电池巴士。



(a) 戴姆勒-克莱斯燃料电池巴士



(b) Citaro燃料电池巴士



(c) Ballard燃料电池巴士



(d) UTC燃料电池巴士

图 1.3 各大汽车公司生产的燃料电池巴士

国际上在燃料电池商业化方向的努力近期也取得了突破性进展。截至 2010 年 6 月 29 日，美国 UTC 公司研发的 PureMotion 燃料电池在 AC Transit 的燃料电池电动汽车上，实际运行超过了 7000 小时，没有更换其中任何的电池部件，展现了解决车用燃料电池寿命问题的希望；美国通用公司研发的燃料电池系统体积已和相同功率的内燃机接近，系统功率密度达到适用水平；日本丰田公司的车用燃料电池的铂催化剂用量减至原来的 1/3，成本随之大幅降低。在加拿大的 2010 年温哥华冬奥会上，有 20 辆燃料电池客车投入使用，并在冬奥会后继续运行。加拿大的 Hydrogenics 公司已经拿到为商用卡车提供 HyPM16 燃料电池系统的合同。Ballard 公司在 2010 年年初又得到 480 万加元的政府资助，进一步发展燃料电池巴士。2011 年，加拿大宣称世界上第一个小规模