

国际机械工程先进技术译丛

燃料电池模拟、控制和应用

(美) Bei Gou Woon Ki Na Bill Diong 著
刘 通 译



机械工业出版社

本书侧重于质子交换膜燃料电池系统的模拟和控制技术,并详细讲述了在汽车和混合发电系统方面的应用。模拟和控制技术对于燃料电池系统的设计和性能至关重要。这本权威著作由直接参与研究的专家所著,内容深入浅出,概括了这个领域的最新研究成果,给出了大量建模和控制的例子、测试结果和重要文献。

本书适用于燃料电池和能源领域的教师、学生、顾问、制造商、研究人员和工程师,既可以作为一本燃料电池模拟和控制设计的入门教材,又可以作为一本深入研究的参考书。

Fuel Cells Modeling, Control, and Applications/by Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong/ISBN: 978-1-4200-7161-0

Copyright© 2010 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2010-1528

图书在版编目 (CIP) 数据

燃料电池模拟、控制和应用/ (美) 北勾等著;
刘通译. —北京: 机械工业出版社, 2011. 7
(国际机械工程先进技术译丛)
ISBN 978-7-111-34782-8

I. ①燃… II. ①北…②刘… III. ①燃料电池—研
究 IV. ①TM911. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 093674 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 孔 劲 责任编辑: 郑 铨

版式设计: 霍永明 责任校对: 吴美英

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 10 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13 印张 · 256 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-34782-8

定价: 48.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑: (010) 88379772

社服务中心: (010) 88361066

网络服务

销售一部: (010) 68326294

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是 20 世纪 80 年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持。制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面；制造技术既有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流渊源流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验、引进、消化、吸收、创新，提高自主创新能力，形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式，早在20世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料要方便习惯，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值 and 收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选译严谨，质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方

法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员, 高等院校的教师和学生, 可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者, 积极推荐国外相关优秀图书, 仔细评审外文原版书, 推荐评审和翻译的知名专家, 特别要感谢承担翻译工作的译者, 对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意, 同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助, 欢迎广大读者不吝指教, 提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译者序言

由于传统使用的石油和煤炭等化石类燃料造成了日益严重的环境污染问题，很多国家都在研究推广使用可再生替代能源。在众多可再生能源中，质子交换膜燃料电池因其清洁性、高效率、低工作温度和与风能、太阳能的互补性等诸多优点，已经引起越来越多的重视。质子交换膜燃料电池的发展已经有近 50 年的历史。1962 年，美国通用电力公司首先开发了这种燃料电池，并成功用于“双子星”和“阿波罗”登月计划。1993 年，加拿大 Ballard Power Systems 公司演示了第一辆燃料电池公共汽车。之后，这个公司又与诸多汽车公司合作开发出多种燃料电池汽车。除了用于汽车以外，燃料电池的另一个主要应用领域是发电。现在世界各地已经有从亚千瓦的便携式燃料电池到数兆瓦的燃料电池发电厂。

在我国最近几个五年计划中，都把燃料电池列为重点发展的前沿技术，并投入了大量研究的人力和物力。2010 年，第二十五届世界纯电动车、混合动力车和燃料电池车大会在深圳举行，这是自 1999 年之后这个世界大会再次选择在中国召开，这也是对我国在燃料电池领域研究发展的认同。

尽管已经出版了一些燃料电池方面的著作，但本书更侧重于质子交换膜燃料电池系统的模拟和控制技术，并详细讲述了在汽车和混合发电系统方面的应用。模拟和控制技术对于燃料电池系统的设计和性能至关重要。这本权威著作由直接参与研究的专家所写，内容深入浅出，概括了燃料电池领域的最新研究成果，给出了大量建模和控制的例子、测试结果和重要文献。

本书适用于燃料电池和能源领域的教师、学生、顾问、制造商、研究人员和工程师。既可以作为一本燃料电池模拟和控制设计的入门教材，又可以作为一本深入研究的参考书。

希望本书能够在燃料电池模拟和控制设计的研发上起到推动作用。

译者

作者序言

在过去五年中，德克萨斯大学阿灵顿分校一直在独立开展燃料电池研究，同时也与德克萨斯基督教大学进行了合作。主要研究重点是用精确线性化控制法，进行质子交换膜燃料电池的建模和非线性控制设计。

目前的文献非常关注燃料电池接口的控制设计，而对燃料电池本身的控制设计研究却未给予应有的注意。这可能是由于控制设计的复杂性造成的。然而，控制对于燃料电池的运作和效率是非常重要的，本书将介绍这个专题。

本书详细讨论了燃料电池建模、分析和非线性控制，并给出了模拟的例子和测试结果，可再生能源领域的教师、学生、顾问、制造商、研究人员和设计师应该对本书感兴趣。阅读本书的读者需要掌握控制理论与燃料电池化学反应的基本知识。

本书全面介绍了质子交换膜燃料电池的建模和控制，描述了燃料电池建模和控制设计方案的典型做法和取得的成就，也包括了线性和非线性模型及控制设计。

为了方便读者，本书的结构是独立的，非常详细地介绍了最新质子交换膜燃料电池建模和控制设计研究成果的精髓。在附录中提供了线性控制和非线性控制的初步数学知识。

本书的结构设计反映了本书的宗旨。第1章和第2章简单介绍了燃料电池和燃料电池发电系统，为燃料电池系统及其部件奠定了基础。它们也是下面各章的铺垫。第3章介绍了燃料电池动态的线性和非线性建模。它为第4章涉及的线性和非线性控制设计做了预备。第4章讨论了燃料电池线性和非线性建模及控制设计的典型方法，并比较了线性和非线性控制设计及其有效性。第5章介绍了在 Simulink 中模拟燃料电池，其中包括质子交换膜燃料电池建模和控制设计，也介绍并比较了线性和非线性控制器的模拟结果。第6和第7章讨论了燃料电池在汽车、公用电力系统和独立系统中的应用，介绍并讨论了典型模型和控制方案的细节。第8章讨论了混合可再生资源发电系统的建模和分析，包括燃料电池、风能发电和太阳能发电一体化，也介绍并研究了配置和控制方案的详细情况。

我们试图在以下的讨论中保留一般性：质子交换膜燃料电池的先进建模和控制技术，以及燃料电池目前在汽车、公用电力系统和独立系统中的应用。

我们借此机会感谢德州大学阿灵顿分校 (University of Texas at Arlington, UTA) 和德州基督教大学 (Texas Christian University, TCC)，以及美国能源部 (U. S. Department of Energy, DOE) 的支持。我们还要感谢德州大学阿灵顿分校电机工程系的 Kai S. Yeung 博士及前研究生 Yunzhi Chen 和 Zheng Hui 博士、德州大学艾

VIII 燃料电池模拟、控制和应用

尔帕索分校 (University of Texas at El Paso, UTEP) 机械与工业工程系的 Carter 博士和前研究生 Lu-Ying Chiu, 以及美国能源部的 Randall S. Gemmen 博士。

我们也想借此表达对 Taylor & Francis 出版集团的感激, 谢谢他们给我们机会出版这本书。

Bei Gou

Woon Ki Na

Bill Diong

写自德克萨斯州

欲了解 MATLAB[®] /Simulink[®] 软件产品信息, 请联系:

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA 01760 - 2098 USA

电话: 508 - 647 - 7000

传真: 508 - 647 - 7001

电子邮件: info@mathworks.com

网站: www.mathworks.com

目 录

译丛序言

译者序言

作者序言

作者介绍

第1章 简介	1
1.1 燃料电池的历史、现状和未来	1
1.1.1 什么是燃料电池?	1
1.1.2 燃料电池的种类	2
1.2 燃料电池系统的典型组织结构	2
1.3 燃料电池动力学的重要性	2
1.4 本书的组织结构	3
参考文献	3
第2章 燃料电池的原理	4
2.1 简介	4
2.2 质子交换膜燃料电池的组件	5
2.2.1 电解质膜	5
2.2.2 膜电极组	6
2.2.3 双极板	6
2.2.4 加热或冷却板	7
2.3 配套设备的组件	7
2.3.1 水管理	8
2.3.2 热管理	8
2.3.3 燃料储存和加工	8
2.3.4 功率调节	8
参考文献	9
第3章 燃料电池的线性和非线性动态模型	10
3.1 简介	10
3.2 符号命名	10

3.3 质子交换膜燃料电池的非线性动态模型	11
3.3.1 稳态和动态电压-电流特性的统一模型	11
3.3.2 模拟结果	13
3.3.3 质子交换膜燃料电池非线性模型的控制应用	14
3.4 质子交换膜燃料电池的状态空间动态模型	16
3.5 质子交换膜燃料电池的电化学电路模型	20
3.5.1 等效电路	20
3.5.2 模拟结果	22
3.6 质子交换膜燃料电池的线性动态模型	23
3.6.1 Chiu 等人的模型	23
3.6.1.1 燃料电池的小信号模型	24
3.6.1.2 仿真和测量结果的比较	29
3.6.2 Page 等人的模型	31
3.6.3 南阿拉巴马大学的模型	31
3.6.4 其他模型	32
3.7 燃料电池输出响应的参数敏感性	32
3.7.1 燃料电池的动态响应及敏感性分析	33
3.7.1.1 敏感性函数	33
3.7.1.2 敏感性函数图	34
3.7.2 小结	42
参考文献	42
第4章 燃料电池的线性和非线性控制设计	45
4.1 简介	45
4.2 燃料电池的线性控制设计	45
4.2.1 燃料电池的分布参数模型	45
4.2.2 燃料电池的线性控制设计和模拟	46
4.2.2.1 功率控制回路	46
4.2.2.2 功率和固体温度的控制回路	47
4.2.2.3 多输入输出的控制方案	48
4.2.2.4 比例控制	50
4.3 燃料电池的非线性控制设计	52
4.4 接口的非线性控制设计	56
4.5 控制设计分析	59
4.6 质子交换膜燃料电池非线性控制的模拟	62
参考文献	69

第 5 章 在 Simulink 中实现燃料电池模型和控制器	71
5.1 简介	71
5.2 在 Simulink 中实现燃料电池模型	71
5.3 在 Simulink 中实现燃料电池控制器	77
5.4 模拟结果	78
参考文献	84
第 6 章 燃料电池在汽车中的应用	85
6.1 简介	85
6.2 燃料电池汽车的部件	86
6.2.1 燃料电池和燃料电池子系统	86
6.2.1.1 气体流动管理子系统	86
6.2.1.2 水管理子系统	86
6.2.1.3 热管理子系统	86
6.2.2 氢气储存和燃料处理器	89
6.2.3 电驱动物子系统	90
6.3 混合电力汽车和电力汽车的燃料电池系统设计	91
6.3.1 串联混合电力汽车	91
6.3.2 平行混合电力汽车	92
6.3.3 串联-并联混合电力汽车	93
6.3.4 燃料电池汽车	94
6.3.4.1 燃料电池汽车的功率管理系统	95
6.3.4.2 燃料电池汽车的电动机和电动机控制器/逆变器	96
6.3.4.3 燃料电池汽车中的辅助系统	98
6.4 用于电力汽车的混合燃料电池系统控制	99
6.4.1 动力传动控制	99
6.4.2 功率控制	99
6.4.3 燃料电池控制	100
6.4.4 燃料处理器或转化器	101
6.5 混合燃料电池系统的故障诊断	102
6.5.1 燃料电池堆	102
6.5.2 氢气供应系统	102
6.5.3 空气、加湿器和水管理系统	103
6.5.4 氢气扩散和冷却系统	103
6.5.5 安全电子系统	103
参考文献	104

第7章 燃料电池在公用电力系统和独立系统中的应用	106
7.1 简介	106
7.2 公用电力系统和住宅应用	106
7.2.1 燃料电池分布式发电系统的模拟和控制	108
7.2.1.1 质子交换膜燃料电池模拟	108
7.2.1.2 等效电路	109
7.2.1.3 热动力学的能量平衡	109
7.2.1.4 质子交换/电解质膜燃料电池的控制设计	109
7.2.2 操作方案	110
7.3 独立的应用	112
7.3.1 燃料电池与超级电容组的动态模拟	112
7.3.1.1 燃料电池模拟	112
7.3.1.2 超级电容组的模拟	114
7.3.2 燃料电池和超级电容组组合的控制设计	114
7.3.3 独立燃料电池系统的主动和被动控制	116
参考文献	116
第8章 混合可再生能源系统的控制和分析	117
8.1 简介	117
8.1.1 风能	117
8.1.2 混合能源	118
8.1.3 燃料电池能源	118
8.2 包括燃料电池和风能的混合系统	119
8.2.1 混合系统的仿真组件和方程	119
8.2.1.1 风力涡轮机子系统	120
8.2.1.2 直流发电机子系统	121
8.2.1.3 风力涡轮机和直流发电机控制器	122
8.2.1.4 质子交换膜燃料电池子系统	123
8.2.1.5 燃料电池控制器	125
8.2.1.6 电解槽子系统	125
8.2.1.7 等效负载和系统互联	125
8.2.2 模拟结果	126
8.2.2.1 低于额定风速 (风能 > 负载)	126
8.2.2.2 高于额定风速 (风能 > 负载)	127
8.2.2.3 低于额定风速 (风能 < 负载)	128
8.2.2.4 湍流风低于额定风速 (风能 < 负载)	129
8.2.3 结论	131

8.3	混合可再生发电系统在孤岛上的应用	132
8.3.1	仿真模型	132
8.3.2	控制方法	132
8.3.3	模拟结果	134
8.3.4	备注和讨论	144
8.4	一个独立风电/光伏/燃料电池发电系统的功率管理	144
8.4.1	系统配置	145
8.4.2	功率管理方案	146
8.4.3	模拟结果	146
8.4.4	小结	153
8.5	混合可再生能源系统的负载流量分析	154
8.5.1	配电系统的负载流量分析	154
8.5.2	在负载流量分析中的分布式发电机建模	156
8.5.2.1	分布式发电机的几个模型	157
8.5.2.2	测试结果	159
8.5.2.3	小结	163
	参考文献	163
	附录	166
	附录 A 线性控制	166
	A.1 简介	166
	A.2 线性系统与控制	166
	附录 B 非线性控制	169
	B.1 非线性坐标变换和微分同胚映射	169
	B.2 局部微分同胚映射	170
	B.3 非线性控制系统的坐标变换	170
	B.4 仿射非线性控制系统	171
	B.5 向量场的导出映射	171
	B.6 李导数和李括号	171
	B.7 向量场集的对合性	172
	B.8 一个控制系统的相关度	173
	B.9 精确线性化控制	173
	附录 C 燃料电池汽车应用的感应式电动机建模和向量控制	175
	C.1 感应式电动机的电压方程	175
	C.2 在固定参照系中的电压方程	176
	C.3 在同步参考系中的电压方程	177
	C.4 $d-q$ 等效电路	178
	C.5 状态空间形式的动态感应式电动机模型	179

C.6	转矩方程	180
C.7	转差率计算	182
C.8	在 d -轴转子磁通 λ_{dr}^* 的计算	182
C.9	转矩的计算	182
C.10	d - q 解耦控制与反电动势补偿控制	183
附录 D	坐标变换	183
D.1	从 abc 相到 $qd0$ 参考坐标系的变换	183
D.2	同步参考坐标系	184
D.3	静止参考坐标系	185
D.4	同步和静止坐标系之间的变换	186
附录 E	空间向量脉宽调制	186
	参考文献	190

第 1 章 简 介

1.1 燃料电池的历史、现状和未来

1.1.1 什么是燃料电池？

燃料电池就像普通电池一样地工作，把化学能转换成电能，但它又不同于普通电池。如图 1-1 所示，它借助燃料（如氢气）和氧化剂（如氧气）可持续产生直流电（同时也产生水和热量）。在 20 世纪 60 年代，美国研制出了第一个可实际应用的燃料电池，并在“双子星”和“阿波罗”空间计划中使用。从那时起，虽然从商业化的角度来看这仍是个“新”技术，但燃料电池已经被越来越多地用于陆地。随着一些根本障碍被克服，燃料电池对于某些应用已经更可行，而且被逐步开发和商业化。

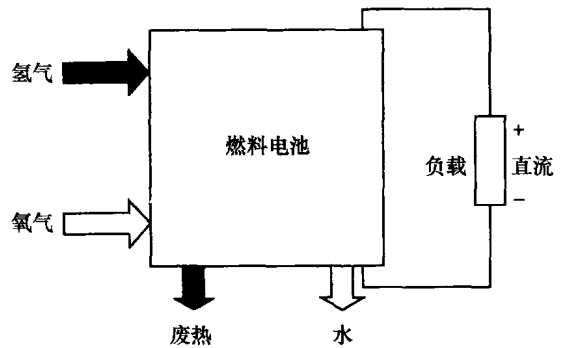


图 1-1 一个燃料电池的输入和输出

举例来说，1993 年 Ballard Power Systems 公司演示了燃料电池公共汽车。之后，所有主要汽车制造商在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初都开发了燃料电池汽车的样车，并且正在美国、日本和欧洲进行测试。在固定式电力方面的应用，现在已经在全球范围的医院、办公楼和公用电厂等地安装了 2 500 多个固定燃料电池电力系统。2005 年，三星电子公司还推出了便携式应用的燃料电池样品，可以驱动笔记本电脑工作约 15h。尽管如此，燃料电池的商业化仍面临许多挑战，其中最重要的问题是降低成本并提高运行的可靠性。

最近燃料电池的开发和商业化动力日益增强，是因为它有以下几个优点：“清洁”的副产品（例如使用纯氢气会生成水），这意味着“零排放”，如果有排放，也是极少的氮氧化物和硫氧化物。即使用额外的燃料处理和供给设备，由于没有任何移动部件，它们仍然能安静地工作。再者，它们有很高的能量密度和效率，发电效率一般超过 40%，比传统的内燃发动机/发电机更好。而且从燃料电池来的废热可以用于加热目的，因此增加了整体的效率。最后，它们能增加国家能源安全性，因为不同的燃料电池可以使用各种常规和可替代燃料，如氢气、甲醇、乙醇和天然气。而氢气本身可以通过提炼各种不同的可再生能源来得到，这样可以帮助国

家减少对外国石油的依赖。

1.1.2 燃料电池的种类

燃料电池通常根据所使用的电解质种类来分类。它们包括：质子交换/聚合物电解质膜燃料电池（Proton Exchange/Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEM-FCs），直接甲醇燃料电池（Direct Methanol Fuel Cells, DMFC），碱性燃料电池（Alkaline Fuel Cells, AFC），磷酸燃料电池（Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC），熔融碳酸盐燃料电池（Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC），固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cells, SOFC），锌空气燃料电池（Zinc Air Fuel Cells, ZAFC）和光子陶瓷燃料电池（Photonic Ceramic Fuel Cells, PCFCs）。它们需要的工作温度也各不相同。本书将集中介绍质子交换膜燃料电池，这种电池只需要在低温下工作。主要的汽车生产商都在研发这种电池，因为它适用于大规模燃料电池汽车的生产。这种电池也适用于办公室和居民应用。

1.2 燃料电池系统的典型组织结构

一个燃料电池发电系统的最基本组成包括燃料电池（最常见的是一个电池堆或多层连接的燃料电池）、燃料和氧化剂的供给、电负载和电力调节器（见图 1-2）。燃料和氧化剂供给及电力调节器通常与配套设备放在一起。配套设备包括燃料转化器、热管理子系统和加湿子系统。

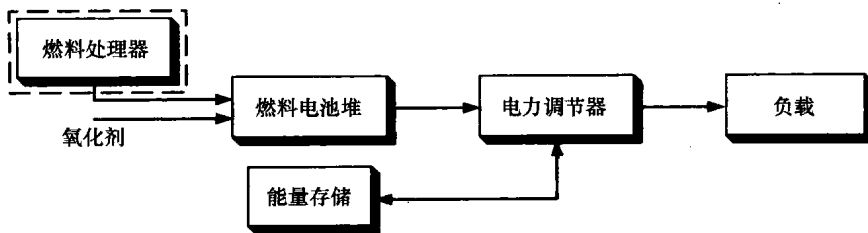


图 1-2 燃料电池发电系统的互联框图

1.3 燃料电池动力学的重要性

为了使燃料电池汽车能够成功地商业化，需要考虑它的性能、可靠性、耐久性、成本、燃料供应和价格，以及公众的接受程度^[1]。燃料电池现在最大的缺点是成本高，而燃料电池系统的瞬态变化性能是另一个关键因素。因为在瞬态，为了产生可靠有效率的功率响应，并且防止电解质膜损伤以及燃料电池堆有害的电压老化和氧气耗尽，必须设计更好的控制方案，以达到最佳的空气和氢气入口流率。也就是说，燃料电池控制系统可以根据燃料电池的电流，精确地进行空气和氢气压力