

可 再生能源开发应用技术丛书

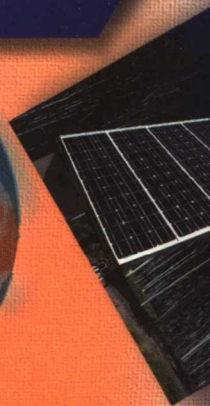
Technology
应用技术

燃料电池系统

——原理·设计·应用

(原书第二版)

[英] 詹姆斯·拉米尼 著
安德鲁·迪克斯 译
朱红 校
衣宝廉 校



科学出版社

www.sciencep.com

可再生能源开发应用技术丛书

燃料电池系统

——原理·设计·应用

(原书第二版)

[英] 詹姆斯·拉米尼 著
安德鲁·迪克斯 著
朱 红 译
衣宝廉 校

科学出版社

北 京

图字: 01-2005-0894 号

内 容 简 介

本书是《可再生能源开发应用技术丛书》之一。本书首先对燃料电池的基本原理、种类和应用作概述性的介绍,使读者对燃料电池有一个清晰的了解。随后详细介绍主要类型的燃料电池、技术发展前景、燃料电池操作和热力学性能、燃料处理以及氢的存储和生产。对燃料电池系统组件,如压缩机、涡轮机、电动机、直流电压转换器、逆变器、并网、燃料电池/电池或超电容混合系统与燃料电池车的动力链和从油井倒车轮的全过程分析等也进行了详细的论述。书中不但给出了燃料电池系统的模型、设计和工艺,而且还选择一些应用实例对其进行说明,使读者对该类型的燃料电池有更深入的了解。

本书结构新颖,内容深入浅出,实用性强,可供普通高校化工类、应用化学类专业师生和研究生学习参考,也可作为电气、能源、化学和汽车领域的技术及研究人员的参考和指导用书。

书名原文: **Fuel Cell Systems Explained(Second Edition)**

Copyright © 2003 by John Wiley & Sons Ltd.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Ltd.

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池系统/(英)拉米尼等著. 朱红译. 衣宝廉校. —北京:科学出版社,2005
(可再生能源开发应用技术丛书)

ISBN 7-03-015642-0

I. 燃… II. ①拉… ②朱… ③衣… III. 燃料电池-系统 IV. TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 058627 号

责任编辑:肖京涛 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 祥

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年2月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006年2月第一次印刷 印张: 22 3/4

印数: 1—4 000 字数: 428 000

定 价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

序

燃料电池,由于具有燃料利用效率高、无污染、容量可根据需要而定等等多种优势,受到了各方面的极大关注。因此各国政府都在这方面增加研发资金,推动其商业化的进程。

近几十年中,虽然燃料电池技术得到了长足的发展,相关的论著也逐渐增多,但多为侧重于某一方面的论述,系统全面论述的著作较少。

《燃料电池系统》一书英文版在英国出版后,受到广大读者和专家的好评。本书内容由浅入深,图文并茂,对燃料电池系统的原理、设计和应用作了基本的介绍。书中详细介绍了主要类型的燃料电池及其技术发展前景,介绍了燃料电池操作和性能、燃料处理、氢的存储和生产;对燃料电池系统组件,例如压缩机、涡轮机、电动机、直流电压转换器、逆变器、并网、燃料电池/电池或超电容混合系统与燃料电池车的动力链和从油井到车轮的全过程分析等也进行了比较详细的论述。书中不但给出了燃料电池系统的模型、设计和工艺,而且还选择一些应用实例对其进行说明。本书可作为燃料电池系统的入门教材,也可以作为电气、能源,化学和汽车领域技术及研究人员的参考书。

本书由北京交通大学的朱红教授翻译,衣宝廉院士校对,将本书在国内翻译出版发行,展现给读者,对推动我国燃料电池事业的发展必将起到积极的作用。

王德明

中文版序

《燃料电池系统》一书于2000年首次以英文形式出版。第一版的销售量表明这本书是很有市场的。该书不仅对一套完整燃料电池系统的各个不同方面进行了详细地阐述,而且还介绍了不同类型的燃料电池及其辅助系统(例如燃料处理、氢的生产与储存等)和一些重要装置(诸如压缩机、泵和电力系统等)。这本书是为对燃料电池没有任何专门知识和经验的人士而写的,而且对在这个领域内工作的人员所遇到的许多工程问题也给出了非常完整的介绍。

第一版的销售量和读者的反响都很好,读者反映这本书清晰易懂。内容的全面性在2003年出版的英文第二版中得到了进一步加强。第二版的另外一个特征是新增加了甲醇燃料电池与中温固体氧化物燃料电池的内容,且对用不同方式生产和存储氢的材料作了介绍,还增加了对一个完整的燃料电池系统进行分析的一章。第二版也受到了广大读者的欢迎。

然而,直到最近这种对燃料电池工程的详细和全面的阐述还局限在英文版中,作者非常高兴这本书能以中文的形式出版,并对译者和出版者付出的努力表示感谢。我们感谢他们使我们的工作能在世界上最重要的新兴经济体中得到利用。将来中国的能源需求将是非常大的。他们所做的这些工作将使燃料电池能够被更多的人更好的理解,使这种最有效的能量供应方式得到更广泛地建立。

作者将与出版者和译者一起祝福读者,同时希望我们的努力有助于你们更好的理解这种最有趣、最有潜力的技术。

詹姆斯·拉米尼
安德鲁·迪克斯

译者序

燃料电池可以高效、环境友好地将储存在燃料中的化学能等温和地转化为电能，氢是燃料电池的最佳燃料。今天，发达国家中与汽车、能源相关的大公司均在加速进行燃料电池的开发。专家们预计燃料电池的应用将在未来几年里会激增。它广泛应用于众多领域，小到家用电器、手机、笔记本电脑；大到发电站、电动汽车、航空航天等领域。

近年来，燃料电池技术发展迅速。为了使广大科学工作者和读者较全面系统地了解各种燃料电池，科学出版社将《燃料电池系统》一书翻译出版献给广大读者。

《燃料电池系统》一书对燃料电池技术进行了详细的介绍。本书的内容全面详实，逻辑严密，层次分明，循序渐进，既从理论上介绍了燃料电池的基本原理、各种主要类型的燃料电池及其主要部件和附属装置，又根据实践经验和列举出的燃料电池实例对燃料电池堆的组装方式和各种影响燃料电池工作性能的因素进行了详细讨论，反映了燃料电池最新发展水平，体现了未来燃料电池的发展方向和目标。

该书英文版由英国牛津-布鲁克斯大学詹姆斯·拉米尼和澳大利亚昆士兰大学的安德鲁·迪克斯共同编写，由 WILEY 出版社出版。詹姆斯·拉米尼是英国 BG 技术公司的前首席科学家；安德鲁·迪克斯也是英国政府燃料电池咨询小组成员和澳大利亚能源学会氢分会的奠基人之一。他们二人均多年从事燃料电池的研究，在燃料电池方面有很高的造诣。

本书以北京交通大学朱红教授为主翻译；中国科学院大连化学物理研究所研究员，中国工程院院士衣宝廉对全书进行了认真详细的校订。

在翻译过程中，本研究所的部分研究生，特别是王芳辉、张生生、郭洪范、杨武斌、魏世雄和张宁等，参与了部分章节的翻译工作，付出了辛勤劳动；赵莉同志参与了本书第 3 章的翻译工作；本书的翻译还得到了康晓红博士的热情支持与帮助。在此成书之际，特向他们表示诚挚的谢意。

科学出版社对本书的翻译给予了大力的支持和帮助，在此对他们的关心和辛勤劳动，表示衷心感谢。

由于译者的水平和能力有限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

译者

原书第二版前言

《燃料电池系统》第一版无论是在销售,还是读者和专家的反响,都取得了很大的成功。但是,我们不能在成功面前止步不前,近几年来在燃料电池领域取得的巨大进展促使我们必须再版此书。

尽管燃料电池的基本原理没有改变,但是最近3年中燃料电池的技术工艺有了重大进展。英文第二版中加入了低温和高温燃料电池的内容。尤其是扩充了直接甲醇燃料电池和中温固体氧化物燃料电池的内容。前者独立成第6章,后者则成为第7章高温燃料电池的组成部分。我们还更新了其他章节的内容,包括第4章质子交换膜燃料电池,第8章燃料供应等。在燃料供应部分新增了氢的储存(包括纳米纤维的应用)、生物制氢和电解制氢的内容,以更好地帮助读者理解燃料电池在可持续能量系统中的作用。

读者对第一版的最大反响是本书清晰易懂。燃料电池包含了许多方面的内容,使新接触这一领域的读者易于看懂是我们编写第一版时最主要的宗旨。但是我们还要做得更好,第二版中在图表上做了许多变化,不仅增加了一些图表,同时也做了很大改进,使之更加清晰。第二版中还增加了一个新的章节,把系统设计和分析中涉及的内容串起来,并引入了一些新的概念,如石油开采到应用全程分析,它是目前在交通运输应用的系统研究中至关重要的一部分。新章节中还有一些固定式和移动式应用的实例,使得本书对燃料电池系统的分析更加完整。

显然,本书第一版在燃料电池工业以及相关工业的工程师中广为使用并且受到好评。另外,本书还有相当一部分读者是大学或者工业学校的学生及老师,他们中的一部分人可能会需要一些测试题来判断他们的理解程度。我们会提供相关的材料,但是为了方便迅速更新,我们决定把这些材料放到出版社的网站上。我们会把一个定期扩充的问题库放到网站上以检验学生是否理解,问题包括计算题,但更多的是讨论题。网址是:www.wiley.co.uk/fuelcellsystems。

我们向全体读者问好,并希望此书能够帮助读者们更好地理解燃料电池这个有趣而又有用的技术。

詹姆斯·拉米尼

安德鲁·迪克斯

原书第一版前言

任何新技术都要经历相当长一段时间才能完全投入使用。而燃料电池经历的时间尤其长,尽管它可以产生清洁、高效的能源。

燃料电池最早由 William Grove 爵士于 1839 年提出,20 世纪 50 年代培根 (Bacon) 做了一些先驱性的工作。之后燃料电池取得了巨大的进展,用于美国的载人航天计划。这一巨大成功以及航空技术商业化的政策,促进了美国和日本在 20 世纪七八十年代,以及欧洲近年来实质性发展计划的出台。

在 20 世纪的最后几年里发生了许多变化,使人们对燃料电池技术产生了新的、更大的兴趣。对全球变暖效应的关注以及 CO₂ 的减排问题促使人们寻求更高能量转化效率的能量利用方法。对于汽车工业,除了要寻求高的燃料转化效率之外,还必须找到减少尾气排放量的方法,最终实现汽车尾气零排放。一些公司,在提高自身竞争力的同时也在努力减少环境污染。

由于这些要求的提出,人们对燃料电池产生了更浓厚的兴趣。从化学到工程学甚至到战略分析等各个行业,许多原本不太熟悉燃料电池技术的人感觉到了解燃料电池的必要性。他们非常需要一个统一的、易懂的、最新的关于这项技术及其应用的说明,这也正是给本书提出的要求。

燃料电池本身是这项技术的关键,对其特点的了解是最基本的内容,而一个实际的燃料电池系统是由燃料处理、热交换、能量调节以及控制系统等各部分集成的电堆。每个组件和他们的集成技术的重要性在此客观详细地强调,使化学和工程行业的人员能够理解这一新技术的系统需求。

了解燃料电池技术的人主要是为数不多的一些由电化学和催化剂方面的化学家或化学工程师组成的研究小组,因此有必要让更多的人了解燃料电池技术。对燃料电池及其应用缺乏通俗易懂的解释限制了高校、本科生及研究生课程中对此课题的教授。本书阐述了燃料电池技术及其应用的基本内容,为把燃料电池引入大学课程及研究生科研活动中打下了一个理想的基础。

本书前三章阐述了燃料电池的工作特点以及决定其工作性能的基本热力学原理和物理原理。只有很好地理解了这些原理,才能在与常规以燃烧为基本原理的技术比较中,发现燃料电池系统及其工作性能上的优势。燃料电池的一大特点是它有五种不同类型的电池系统,每种都有自己的工作特性和应用范围,它们将分别

在本书的 4~7 章中加以介绍。

燃料电池的首选燃料是氢气。在一些实际应用中,氢气可以直接使用,如太空飞行器,局部运输系统等。而在不久的将来,对于其他固定的或移动的应用需求,燃料的选择以及燃料向富氢气体的转化将是实际系统的本质特征。第 8 章阐述了燃料电池中可选用的燃料及其处理过程。第 9 章和第 10 章则介绍了要组成一个完整的燃料电池工厂所必须的机械及电学组件。

这本书给刚接触燃料电池的人一个清晰易懂的解释和进一步加深理解的机会,给熟悉燃料电池技术的人一个参考。我也希望它有利于提高燃料电池的知名度,让人们更多地了解燃料电池。使这项 21 世纪激动人心的技术能够最大范围地被应用,使我们的能源供应走上可持续发展的道路。

加里·埃克瑞斯
(Johnson Matthey 公共股份有限
公司前任研究主管)

致 谢

本书中介绍的燃料电池是跨学科领域。为本书的编写提供建议、资料和图片的公司很多,更是有力地说明了这一点。作者把这些公司和机构分列如下,特此表示衷心感谢:

- 英国先进能源有限公司(Advanced Power Sources Ltd, UK)
- 英国 Advantica 公司, (Advantica plc, UK, 前 BG 技术有限公司)
- 阿斯通-巴拉德股份有限公司(Alstom Ballard GmbH)
- 美国阿姆斯壮(Armstrong)国际(有限)公司(Armstrong International Inc, USA)
- 加拿大巴拉德能源系统(有限)公司(Ballard Power Systems Inc, Canada)
- 戴姆勒-克莱斯勒公司(DaimlerChrysler Corporation)
- 美国 DCH 技术(有限)公司(DCH Technology Inc, USA)
- 美国易顿(有限)公司(Eaton Corporation, USA)
- 美国 Epyx (Epyx, USA)
- 德国 GfE 金属材料股份有限公司(GfE Metalle und Materialien GmbH, Germany)
- 美国国际燃料电池公司(International Fuel Cells)
- 美国 IdaTech(有限)公司(IdaTech Inc, USA)
- 英国庄臣万丰公司(Johnson Matthey plc, UK)
- 德国(Hamburgische Electricitäts Werke AG, Germany)
- (Lion Laboratories Ltd, UK)
- 德国 MTU 腓德烈斯哈芬公司(MTU Friedrichshafen GmbH, Germany)
- (ONSI Corporation)
- (Paul Scherrer Institute, Switzerland)
- 美国质子能源公司(Proton Energy Systems, USA)
- 美国西门子西屋能源公司(Siemens Westinghouse Power Corporation, USA)
- (Sulzer Hexis AG, Switzerland)
- (SR Drives Ltd, UK)
- (Svenska Rotor Maskiner AB, Sweden)

致 谢

(W. L. Gore and Associates Inc, USA)

英国 Zytek 集团公司(Zytek Group Ltd, UK)

此外,还有许多人对本书的编写提供了有益的建议和帮助。在此,作者特别感谢 Paul Scherrer 研究院的 Felix Büchi,牛津大学的 Richard Stone 和 Colin Snowden,罗切斯特(Rochester)研究院的 Ramesh Shah,牛津-布鲁克斯大学的 Tony Hern 和 Jonathan Bromley,他们对本书不同章节的编写提供了非常有益的建议。最后,作者也要感谢家人、朋友和同事在我们编写本书时给予的诸多帮助。

詹姆斯·拉米尼

安德鲁·迪克斯

缩略语

AC	交流电	LSGM	镧、锶、镓、镁的氧化混合物
AES	空气电极支撑	MCFC	熔融碳酸盐(电解质)燃料电池
AFC	碱性(电解质)燃料电池	MEA	膜电极“三合一”组件
ASR	单位面积电阻,每平方米燃料电池所受电阻	MOSFET	金属氧化物半导体场效应晶体管
BLDC	无刷直流电发动机	MWNT	多壁纳米管
BOP	辅助系统	NASA	美国国家航空航天局
CFM	立方英尺/分	NL	常温常压升,常温常压下的1升
CHP	热电联供	NTP	常温常压(20℃和1atm或1.01325bar)
CPO	催化剂局部氧化	OCV	开路电压
DC	直流电	PAFC	磷酸燃料电池
DIR	直接内部重整	PDA	个人数字助理
DMFC	直接醇类燃料电池	PEM	质子交换膜或聚合物电解质膜(同一物质有不同的名称,幸好它们的简称相同)
EC	欧共体	PEMFC	质子交换膜燃料电池或聚合物电解质膜燃料电池
EMF	电动势	PFD	工艺流程图
EVD	电化学气相沉积	PM	永磁铁
FCV	燃料电池汽车	ppb	十亿分之(几)
FT	费-托法(Fischer-Tropsch)	ppm	百万分之(几)
GHG	温室气体	PROX	优先氧化(预氧化)
GNF	石墨纳米纤维	PURPA	公共事业调节政策法案
GT	汽轮机	PTFE	聚四氟乙烯
GTO	门极可关断	PSI	磅每平方英寸
HDS	加氢脱硫(法)	PWM	脉冲宽度调制
HEV	混合电车	SCG	模拟煤气
HHV	高热值	SL	标准升;标准温度和压力条件下的1升
IEC	国际电工委员会	SOFC	固体氧化物燃料电池
IGBT	绝缘栅双极晶体管	SPFC	固体聚合物燃料电池(=质子交换膜燃料电池)
IIR	间接内部重整		
IT	中温		
LHV	低热值		
LH ₂	液态(降温的)氢		
LPG	液化石油气		

缩略语

SPP	小型动力设备(发电厂)(小功率 发电厂)	THT	四氢噻吩
SRM	开关磁阻电动机	TLV	阈值
SRS	标准参照状态(25°C, 1 bar)	TOU	使用时间
STP	标准温度和压力(=SRS)	UL	保险业实验室
SWNT	单壁纳米管	WTT	(石油)生产到储存
TEM	透射电镜	WTW	(石油)生产到应用
t/ha	公吨/(公顷·年)	YSZ	三氧化二钇稳定的氧化锆

符 号

a	常用对数形式 Tafel 方程系数; 化学活度	i_n	电池内的穿透电流值
a_x	某种物质 x 的化学活度	i_o	某电极/电解质界面上的交换电流密度
A	自然对数形式 Tafel 方程的系数; 面积	i_{oc}	阴极交换电流密度
B	传质电压损失方程的系数	i_{oa}	阳极交换电流密度
C	不同方程中的常数; 电容	m	质量
c_p	常压下的比热[容], 单位 $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$	\dot{m}	质量流速
\bar{c}_p	常压下的摩尔比热[容], 单位 $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$	m_x	某物质 x 的质量
d	电容器中的电荷分离层	N	阿伏伽德罗常数, 6.022×10^{23} ; 每秒转数
e	每个电子携带的电量, 1.602×10^{-19} 库[仑]	n	每个电池堆中的单电池节数; 摩[尔]数
E	开路电压	\dot{n}	每秒钟的摩[尔]数
E^0	标准温度和压力下, 纯反应物的电动势	P	压力
F	法拉第常数, 每摩[尔]电子携带的电量, 96 485 库[仑]	P_1, P_2	某一过程不同阶段的压力
G	吉布斯自由能	P_x	气体 x 的分压
ΔG^0	纯物质标准温度和压力下的吉布斯自由能变	P^0	标准压力, 100kPa
ΔG_{T_A}	室温下的吉布斯自由能变	P_{SAT}	饱和蒸汽压
\bar{g}	摩尔吉布斯自由能变	P_e	电功率
\bar{g}_t	摩尔吉布斯生成自由能	R	摩尔或普适气体常数, 8.314 $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$, 或电阻
$(\bar{g}_t)_x$	某种物质 x 的摩尔吉布斯生成自由能	r	单位面积电阻
H	焓	S	熵
\bar{h}	摩尔焓	\bar{s}	摩尔熵
\bar{h}_t	摩尔生成焓	$(\bar{s})_x$	某物质 x 的摩尔熵
$(\bar{h}_t)_x$	某种物质 x 的摩尔生成焓	T	温度
I	电流	T_1, T_2	某一过程不同阶段的温度
i	电流密度(单位面积的电流大小)	T_A	室温
i_t	极限电流密度	T_c	燃烧温度
		t	时间
		V	电压
		V_c	电堆中每节电池的平均电压
		V_o	活化过电压
		V_r	欧姆电压损失

符 号

W 功
 W' 等熵条件下的功
 \dot{W} 功率
 z 反应转移电子数
 α 电荷传递系数
 Δ ……改变
 ϵ 介电常数

γ 气体比热[容]比
 η 效率
 η_c 压缩机或涡轮机的等熵效率
 ϕ 相对湿度
 λ (化学)计量比(数)
 ω 湿度比
 μ_t 燃料利用率

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 氢燃料电池基本原理	1
1.2 是什么限制了电流	4
1.3 把电池串联起来——双极板	5
1.4 供气和冷却	7
1.5 燃料电池的分类	11
1.6 其他类型的电池	13
1.6.1 生物燃料电池	13
1.6.2 金属-空气电池	13
1.6.3 氧化还原液流电池和可再生燃料电池	14
1.7 燃料电池系统的其他部分	15
1.8 比较各电池系统用的参数	17
1.9 优点和应用	18
参考文献	19
第 2 章 效率和开路电压	20
2.1 氢气燃料电池的能量和电动势(EMF)	20
2.2 其他燃料电池和普通电池的开路电压	23
2.3 效率和效率极限	24
2.4 效率和燃料电池电压	27
2.5 气体浓度和压力的影响	28
2.5.1 能斯特公式	28
2.5.2 氢气分压	30
2.5.3 燃料和氧化剂的利用率	31
2.5.4 系统压力	31
2.5.5 应用——血液中酒精含量的测定	32
2.6 总 结	33
参考文献	34

第 3 章 燃料电池工作电压	35
3.1 引 言	35
3.2 相关术语	36
3.3 燃料电池的不可逆性——电压降的原因	37
3.4 活化损失	38
3.4.1 Tafel 公式	38
3.4.2 Tafel 公式中的常量	39
3.4.3 降低活化过电压	42
3.4.4 活化过电压总结	42
3.5 燃料穿透和内部短路电流	43
3.6 欧姆损失	45
3.7 传质与浓度损失	46
3.8 不可逆性的综合考虑	48
3.9 双电层	49
3.10 区分各种不可逆性	50
参考文献	53
第 4 章 质子交换膜燃料电池 (PEMFC)	55
4.1 引 言	55
4.2 聚合物电解质是如何工作的	57
4.3 电极和电极结构	59
4.4 PEMFC 的水管理	62
4.4.1 总 论	62
4.4.2 空气流动和水蒸发	64
4.4.3 PEMFC 的空气湿度	66
4.4.4 不经另外加湿的 PEMFC 操作	68
4.4.5 外部加湿——原理	70
4.4.6 外部加湿——方法	72
4.5 PEMFC 的冷却和空气供给	74
4.5.1 阴极空气冷却法	74
4.5.2 反应空气与冷却空气分离法	75
4.5.3 PEMFC 的水冷却法	76
4.6 PEMFC 的内部连接——双极板	77
4.6.1 引 言	77