



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

燃料电池 微电网应用

Fuel Cell Micro-grids

(日) S. Obara 著
甘全全 李晓楠 孙基文 等译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



013034530

TM911.4
19

国际电气工程先进技术译丛

燃料电池微电网应用

Fuel Cell Micro-grids

(日)S. Obara 著

甘全全 李晓楠 孙基文 等译



机械工业出版社



北航 C1642225

TM911.4
19

0000000000

中国

本书以日本札幌及东京地区实际的供能为样本进行介绍。首先,从质子交换膜燃料电池(PEMFC)独立系统着手,前八章全面分析了燃料电池作为微电网中的核心供电单元的特性。并且在其中尝试引入商用电网,通过数个模型的数值模拟计算得出,燃料电池可以对商用电网实现平峰削谷的作用,同时降低整体成本;后面五章,每一章中都引入了一个新的元素,如生物质发电机、太阳能、风能等。在每一种新能源的引入过程,都会根据前八章对燃料电池的讨论结果,重新建立模型给出最佳匹配的结果。

本书细致具体地给出了以燃料电池为基础,结合各种新能源的实际研究方案,具有很高的实用参考价值,非常适合从事新能源应用,特别是燃料电池应用的研究人员、学者及相关专业师生。

Translation from the English language edition: "Fuel Cell Micro-grids" by Shin'ya Obara(Eds).

(edition:1;year of publication:2009);ISBN 978-1-84996-788-4.

Copyright©2009 Springer NY.

Springer NY as part of Springer Science + Business Media.

All Right Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

本书版权登记号:图字 01-2011-3600 号

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池微电网应用/(日)小原伸哉著;甘全全等译. —北京:机械工业出版社,2013.1

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Fuel Cell Micro-grids

ISBN 978-7-111-41446-9

I. ①燃… II. ①小…②甘… III. ①燃料电池-应用-电网-研究 IV. ①TM911.4②TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 026100 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:王欢 责任编辑:王欢

版式设计:霍永明 责任校对:张媛

责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·14 印张·267 千字

0 001—2 500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-41446-9

定价:68.00 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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

译者序

燃料电池技术在十年前乃至五年前在我国还是一个放在实验室里的“稀罕物”。除了中科院的那些研究员和博士们，或许也没有太多人关心它到底有什么用处。而今天伴随石油价格高涨乃至石油危机、能源危机和日益恶化的自然环境，更多人开始关注能源问题和环境问题，开始关心我们和环境做了什么，环境给我们带来了什么。燃料电池作为这一潮流中的“宠儿”，备受关注。严格来讲，这样的说法并不准确，其实早在20世纪60年代，美国阿波罗号进入太空时，燃料电池就已经在航天器上，作为备用供电电源使用。真正在全球再次引起重视是在2003年左右，欧洲开始宣传氢能经济。在2003年至今的十年历程中，燃料电池由逐渐不被重视又再次回到大众视野。而这些是因为燃料电池自身的一些技术特性导致的。

燃料电池种类较多，而以质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC）最被看好。其工作原理即为氢气和氧气在催化剂表面反应发电，并生成水和热。其中，氧气使用空气中的氧气即可，反应温度一般在100℃以下，对系统的复杂程度要求较低，同时单位体积的功率密度较大，因而是移动能源的首选。在我国北京奥运会以及上海世博会期间使用的燃料电池客车、轿车所使用的即为PEMFC。

在燃料电池消耗氢气发电过程中，除了电能还会有几乎与电能同等的热能伴随产生。大功率电源大多以循环液形式将热能携带出来。这种热能几乎是可以直接利用的，不会有太多损耗。因此，在燃料电池使用之初，人们便想到了燃料电池热电联供的特性。氢气是单位重量携带能量较高的能源，对于那些边远地区，特别是寒冷地区的用户来说这是一个好消息。但是，同时问题也来了，燃料电池本身造价较高。这是由于燃料电池电堆的核心催化剂是纳米化的铂颗粒。同时，其他的部件如流场、供风设施等由于使用条件苛刻，尚未产业化等原因导致燃料电池系统造价一直居高不下。这也是上面说的燃料电池从20世纪到今天一直未广泛应用的主要原因。在目前这种条件下，如何才能解决这些问题呢？另外，氢气来源也是一个很大的问题。除了燃料电池，我们还有很多其他的新型环保的能源，如风能、太阳能等。而这些能源又是怎样与燃料电池配合的？这些问题在本书中都能找到答案。

本书英文版作者就是就职于日本国立北见工业大学的小原伸哉（Shin'ya Obara）教授。在本书中，原书作者首先从PEMFC独立系统着手，在前八章充

分分析了燃料电池作为微电网中的核心供电单元的特性。并且在其中尝试引入商用电网，通过数个模型的数值模拟计算得出燃料电池可以对商用电网实现平峰削谷的作用，同时降低整体成本。

继而由第9~13章，每一章中都引入了一个新的元素，如生物质发电机、太阳能、风能等。在每一种新能源的引入过程，都会根据前八章对燃料电池的讨论结果，重新建立模型给出最佳匹配的结果。

在本书中，原书作者并没有陷入繁琐的数值计算中，或给出一些脱离实际问题的结论。而是以日本札幌地区实际的供能为样本，并使用到每个模型中，其数值计算结果可以直截了当看到整个系统的负载响应特性、二氧化碳排放量、热能供应等诸多需关注的结果。其中，例如生物质发电机等部件则是直接使用了实际测试结果。这些使得我们可以立于当下，一览燃料电池的未来运行状况。目前，市场上乃至研究单位还没有类似的书籍介绍，十分难得。因此，这对燃料电池推广使用必然会起到很大的推动作用。

在此，要感谢在这11个月中一同进行翻译工作的各位老师（排名无先后次序）：孙基文、江洪春、宋晓茜、吕萍、付宇、胡景春、杨芳、宋书范、张茂锋、石伟玉、黄东波、邹秀伟、王仁芳。

最后，感谢大连化学物理研究所衣宝廉院士和大连交通大学徐洪峰老师在翻译过程中给予的指点和鼓励，以及新源动力股份有限公司中国氢能与燃料电池工程中心的领导和同事们对我的支持和帮助！

限于译者首次合作翻译，水平有限，望请读者不吝指正。

甘全全、李晚楠

目 录

译者序

文字符号说明

第 1 章 就部分加载和负载波动而言的小范围燃料电池热电联产系统	1
1.1 简介	1
1.2 系统配置	2
1.2.1 系统概述	2
1.2.2 能量损失和质量损失	4
1.2.3 系统模型和方程	4
1.2.4 部分负载运行	6
1.3 能量平衡和目标函数	7
1.3.1 能量平衡	7
1.3.2 电热器的运行	8
1.3.3 储热运行	9
1.4 能量输出特性	9
1.4.1 系统调度图	9
1.4.2 负载波动和燃料消耗	10
1.5 案例研究	11
1.5.1 系统概述	11
1.5.2 运行方案结果	12
1.5.3 系统年度运行成本	12
1.6 结论	13
第 2 章 成本最低优化的燃料电池能量网络设备布局规划	14
2.1 简介	14
2.2 系统概述	15
2.2.1 能量网络	15
2.2.2 燃料电池系统	15
2.2.3 有序热源	15
2.2.4 市政燃气重整	16
2.2.5 系统运行模型	16
2.3 热水管网 (HWN) 散热量	18
2.4 能量平衡	19
2.4.1 功率平衡	19

2.4.2	热平衡	20
2.5	成本计算和目标函数	20
2.5.1	成本计算	20
2.5.2	目标函数	20
2.6	分析方法和案例研究	21
2.6.1	遗传算法优化	21
2.6.2	设备特性模型	22
2.6.3	储热罐和锅炉的运行	23
2.6.4	热水管路和热水循环泵的规格	23
2.6.5	分析流程	23
2.6.6	分析条件	25
2.7	分析结果	26
2.7.1	燃料电池和重整气运行方案	26
2.7.2	热水放热量和热水管路径	28
2.7.3	热水循环泵流量	28
2.7.4	储热罐和锅炉的运行	29
2.7.5	成本分析结果	31
2.7.6	关于分析精度的思考	31
2.8	结论	33
第3章	基于分区合作管理提高发电效率	35
3.1	简介	35
3.2	系统结构	35
3.2.1	FC 微电网略图	35
3.2.2	系统结构	36
3.2.3	运行方法	37
3.3	FC 微电网安装方案	38
3.3.1	微电网发电效率	38
3.3.2	电力需求模型	39
3.3.3	分析方法	41
3.4	案例研究	41
3.5	分析结果与讨论	42
3.5.1	单机系统发电效率	42
3.5.2	中央系统发电效率	43
3.5.3	分区合作系统发电效率	44
3.6	结论	47

第 4 章 使用负载分级方法减少燃料电池设备容量和热量损失的燃料电池网络系统	48
4.1 简介	48
4.2 燃料电池负载平衡和布局规划方案	48
4.2.1 燃料电池网络系统	48
4.2.2 燃料电池发电特性	50
4.2.3 电解水负载平衡	51
4.2.4 燃料电池的分布	51
4.2.5 能量平衡方程	52
4.2.6 系统操作方法	53
4.3 分析方法	53
4.3.1 分析程序	53
4.3.2 相关参数	55
4.4 案例研究	55
4.4.1 能量需求模型和网络系统	55
4.4.2 燃料电池设备容量减少产生的影响	56
4.4.3 热水管路径方案分析结果	57
4.4.4 燃料电池布局规划方案分析结果	58
4.5 结论	59
第 5 章 由柴油发电机和燃料电池组成的复合互连微电网的设备方案	60
5.1 简介	60
5.2 复合互连微电网 (CIM)	61
5.2.1 微电网模型	61
5.2.2 CIM 模型	61
5.2.3 设施略图	61
5.2.4 CIM 运行方法	64
5.3 设备特性	64
5.3.1 柴油发电机 (DEG)	64
5.3.2 质子交换膜燃料电池	66
5.4 分析方法	66
5.4.1 复合互连电网的路径方案	66
5.4.2 分析步骤	66
5.4.3 电力需求模型	67
5.5 案例研究	69
5.5.1 市区模型	69
5.5.2 复杂社区	69
5.5.3 居民区模型	71

5.6	结论	73
第6章	高效利用分布式燃料电池废热的方法	74
6.1	简介	74
6.2	燃料电池网络系统概述	75
6.2.1	系统概述	75
6.2.2	热水管路径和散热量	76
6.2.3	热量平衡	78
6.2.4	热水管网散热量	78
6.3	燃料电池模型	79
6.3.1	电功率和热输出特性	79
6.3.2	能量需求模型和燃料电池容量	80
6.4	案例分析	82
6.4.1	日本札幌地区天气情况	82
6.4.2	分析方法	82
6.5	分析结果	83
6.5.1	热水管网的优化路径和散热量	83
6.5.2	能量需求模型和热水管网优化路径	83
6.5.3	负载波动的影响	86
6.6	结论	87
第7章	寒冷地区燃料电池独立系统的响应特性	88
7.1	简介	88
7.2	系统概述	89
7.2.1	系统框图	89
7.2.2	供电策略	91
7.2.3	供热策略	91
7.2.4	辅助系统和控制	91
7.2.5	操作控制模型	92
7.3	设备的时间常数	93
7.3.1	燃料电池的时间常数	93
7.3.2	市政燃气重整器	96
7.3.3	逆变器和系统连接设备	97
7.3.4	热泵的时间常量	98
7.4	分析方法	98
7.5	结果和讨论	100
7.5.1	控制器控制变量	100
7.5.2	系统步进响应特性	101
7.5.3	带浮动负载的电功负载阶跃响应特性	103

7.5.4 寒冷地区独立住宅应用	105
7.6 结论	107
第8章 限定燃料电池数量的微电网负载响应特性	109
8.1 简介	109
8.2 微电网模型	110
8.2.1 微电网的电能质量	110
8.3 系统配置设备的响应特性	113
8.3.1 内燃机发电机的发电特性	113
8.3.2 燃料电池的发电特性	114
8.3.3 市政燃气重整器输出特性	114
8.3.4 逆变器和互连设备	115
8.3.5 燃料电池发电效率	115
8.4 控制变量和分析方法	116
8.5 微电网负载响应特性	117
8.5.1 阶跃响应特性	117
8.5.2 住宅电力需求模型应用	118
8.5.3 燃料电池系统发电效率	120
8.6 结论	121
第9章 燃料电池/木质生物质发电机混合微电网动态特性	122
9.1 简介	122
9.2 系统方案	123
9.2.1 混合微电网	123
9.2.2 微电网系统运行策略	125
9.3 PEMFC 与 SEG 的控制响应特性	126
9.3.1 控制框图	126
9.3.2 PEMFC 响应特性	126
9.3.3 SEG 响应特性	128
9.4 PWHC 微电网动态特性分析结论	129
9.4.1 PWHC 的功率响应特性	129
9.4.2 住宅电功负载模式下微电网中 SEG 和 PEMFC 的响应特性	131
9.5 结论	133
第10章 燃料电池-加氢燃气发动机混合系统及其部分负载时的效率提升	135
10.1 简介	135
10.2 系统概述	136
10.2.1 HCGS 模型	136
10.2.2 系统运行策略	137

10.3	设备特性	138
10.3.1	加氢 NEG 输出特性	138
10.3.2	燃料电池输出特性	142
10.4	HCGS 的电功输出和热功输出特性	143
10.4.1	NEG 和 PEMFC 的输出特性	143
10.4.2	根据负载临界值确定 PEMFC 或 NEG 的运行方法 (OM-C 模型)	144
10.4.3	PEMFC 负担基载的运行方法 (OM-D 模型)	145
10.5	案例分析	146
10.5.1	热力需求和电力需求模型	146
10.5.2	分析方法	147
10.6	结果和讨论	147
10.6.1	市政燃气的消耗情况	147
10.6.2	发电效率和总效率	148
10.6.3	二氧化碳的排放	149
10.6.4	储热罐的储热能力	150
10.7	结论	151
第 11 章	燃料电池与加氢燃气发电机混合微电网的二氧化碳排放特性	152
11.1	简介	152
11.2	系统概述	152
11.2.1	IMPE 模型	152
11.2.2	微电网运行方法	153
11.2.3	设备规划	154
11.3	设备特性	155
11.3.1	燃气发电机输出特性	155
11.3.2	NEG 的二氧化碳排放量	157
11.3.3	燃料电池系统	158
11.4	案例分析	158
11.4.1	市区模型	158
11.4.2	电力需求模型	159
11.4.3	流程分析	159
11.5	结果和讨论	162
11.5.1	微电网电功负载	162
11.5.2	发电设备容量	163
11.5.3	发电效率	163
11.5.4	二氧化碳排放量	163
11.5.5	热力需求和废热输出	165
11.6	结论	165

第 12 章 使用太阳能重整燃料电池系统的快速运行算法研究	167
12.1 简介	167
12.2 系统概述	168
12.2.1 生物乙醇太阳能重整燃料电池系统	168
12.2.2 FBSR 的安装方法	168
12.2.3 重整燃料控制	169
12.3 能量和质量平衡	169
12.3.1 能量平衡	169
12.3.2 质量平衡	170
12.4 SRF 系统的运行动态预测	170
12.4.1 系统运行预测算法的分析过程	170
12.4.2 神经网络结构	171
12.4.3 神经网络训练计算	172
12.4.4 运行状态的预测过程	173
12.5 使用遗传算法计算训练信号的预处理方法	174
12.5.1 代表日的动态运行方法	174
12.5.2 染色体模型和分析流程	174
12.5.3 系统运行	174
12.5.4 目标函数与染色体适应值	176
12.6 案例分析	176
12.6.1 系统分析	176
12.6.2 系统特性	176
12.6.3 状态分析	177
12.7 结果和讨论	179
12.7.1 FBSR 供能系统	179
12.7.2 运行状态预测的分析精度	179
12.7.3 废热存储量预测的误差分析	181
12.7.4 气候差异性与运行状态预测误差的关系	182
12.8 结论	184
第 13 章 风能发电-燃料电池微电网的发电特性	185
13.1 简介	185
13.2 微电网模型	186
13.3 系统配置设备的响应特性	186
13.3.1 燃料电池发电特性	186
13.3.2 市政燃气重整器输出特性	187
13.3.3 风力发电机的发电特性	187
13.3.4 燃料电池系统发电效率	188

13.3.5 逆变器和系统互连设备	189
13.4 控制参数与分析方法	189
13.5 微电网负载响应特性	190
13.5.1 阶跃响应	190
13.5.2 低温地区住宅的负载响应特性	191
13.5.3 发电效率	193
13.6 结论	194
参考文献	196

第1章 就部分加载和负载波动而言的小范围燃料电池热电联产系统

1.1 简介

人们用固体高聚合物薄膜燃料电池（如 PEMFC）系统作为交通供电设备，取代了内燃机。随着 PEMFC 热电联产系统（Cogeneration System, CGS）作为分布式电源，越来越多地向个人住宅、公寓等设施提供电力，从而有望减轻环境负担^[1-3]。像燃料电池这样的分布式电源系统的使用日益增加，有望减少能量转换损耗，增加废热回收。因此，燃料电池相比传统电力的能源方式可以有效减少二氧化碳排放。到目前为止，还没有特别有效的办法把氢气输送到个人住宅内并存储。天然气和甲醇重整氢气作为燃料气体的燃料电池热电联产系统比较有发展前景。为了获得较高的电池效率和通过甲醇重整进行催化反应，我们必须对燃料电池进行热管理^[4-7]。蒸汽重整反应后的重整气内含有约 3% 的一氧化碳，如果直接将之输送到燃料电池内会引起催化剂中毒，造成发电能力下降。因此，在重整反应后重整气体通过转换单元和一氧化碳氧化单元的作用，将一氧化碳浓度降低到 10ppm[⊖]。转换反应、一氧化碳氧化反应和重整反应均需要在催化剂作用下进行，每个反应均需要在适宜的温度范围内进行。然而，甲醇燃料（甲醇溶液）的蒸发和重整反应是吸热反应，而其他反应是放热的（如电池反应）。如果没有在适宜的温度范围下运行反应系统，会使催化剂反应过程中反应副产物生成速率增加，未反应物增多。带有重整器的燃料电池系统是一个复杂的热系统，就用户需求的电能和热能来说，应具备有能量缓冲装置，比如蓄电池和热量储蓄装置，用以维持化学反应稳定。

我们的研究以最佳操作条件下的系统为基础，此时燃料消耗最少（等于运行消耗）。此外，还引入了日本札幌[⊙]个人住宅能量消耗模式系统进行模拟计算，研究系统的运行情况及运营成本，并与传统能量系统进行比较。

⊖ ppm: parts per million, 百万分之一, $1\text{ppm} = 1 \times 10^{-6}$ 。在国际标准 ISO31-0: 1992 中已停用该单位。在此认为是体积比率。

⊙ 日本札幌, 英文为 Sapporo, 平假名为さっぽろし。它是位于日本北海道道央地区的都会城市, 为全日本人口第五多的城市, 也是日本的政令指定都市之一。——译者注

1.2 系统配置

1.2.1 系统概述

图 1.1 所示为本书所研究的个人住宅用燃料电池热电联产系统的示意图。在本章，图 1.1 所示的蒸发单元 2、重整器单元 3、转换单元 4 和 CO 氧化单元 5 合称为重整部分。在蒸发单元 2 中，催化剂燃烧器 12 提供燃烧气体来蒸发甲醇燃料。甲醇燃料通过重整器单元 3 生成含大量氢气的重整气。转换单元 4 和 CO 氧化单元 5 除去重整气中的 CO_2 。燃料电池电堆 1 产生的电力通过 DC-AC 转换器 11 转换为交流电。电力输送至需求方变成商用电力系统或是带转换开关 6 的燃料电池系统。燃料电池废热存储在储热罐 10 内。储热罐内安装电加热器 9，电加热器 9 和备用锅炉 8 可加热罐内的热媒介。CGS 产能成本低于商用电力成本，并且电力可以通过高速转换开关 6 转换。此外 CGS 发电容量可设计得比最大电力需求量高一些。重整气的压力仅略高于大气压。催化剂燃烧器 12 中产生的废气进入重整器单元 3，重整反应温度受控。输送到用户的热量取决于用户的需求量，而不是蒸发单元 2 和位于催化剂燃烧器 12 燃料气间重整器单元 3 的吸热反应产生的热量，以及燃料电池堆 1 和备用锅炉 8 产生的废热量。所有的废热汇总进入储热罐 10，通过自来水进行热交换。如果废热超过储热罐的容量，一部分废热将通过散热器 7 释放到大气环境中。可以通过重整和备用锅炉运行消

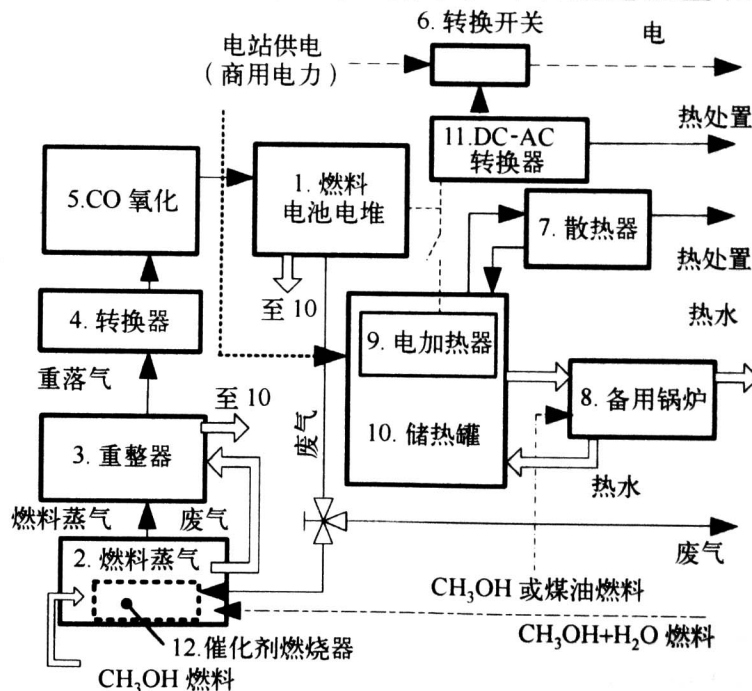


图 1.1 系统构造

耗的甲醇燃料数量来计算采样时间内的CGS的电能和热能运行成本。能量总成本是增加的，预计高于燃料成本和公用事业能源供应成本。

重整和电堆反应公式如图1.2所示。对于蒸发和重整反应，它们是吸热的。CO转化、CO氧化和电池反应都是放热反应。图1.3所示为每个反应系统的目标温度区域、热量输入和输出。CO燃烧和氢气的CO氧化反应放热283kJ/mol，燃料电池电化学反应放热是265kJ/mol。在甲醇蒸气温度达到570K后重整，此后，每个反应系统的目标温度下降。燃料电池排出的废气温度在340~360K。

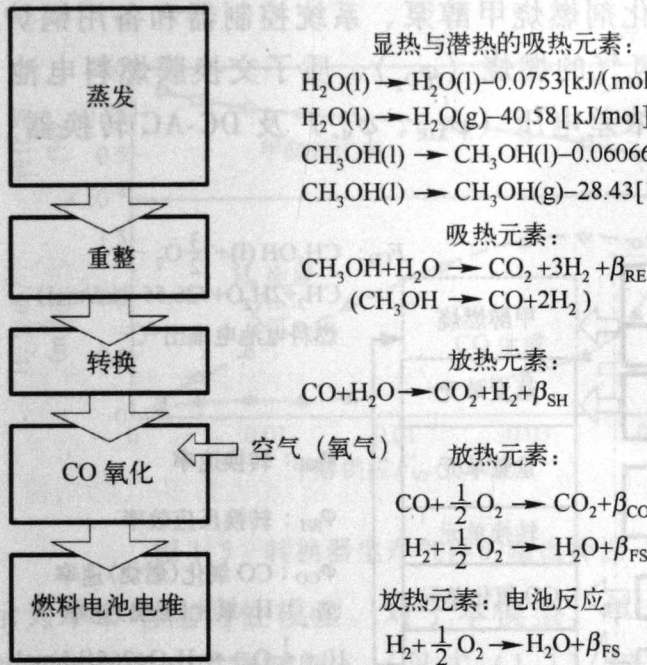


图 1.2 甲醇重整燃料电池系统

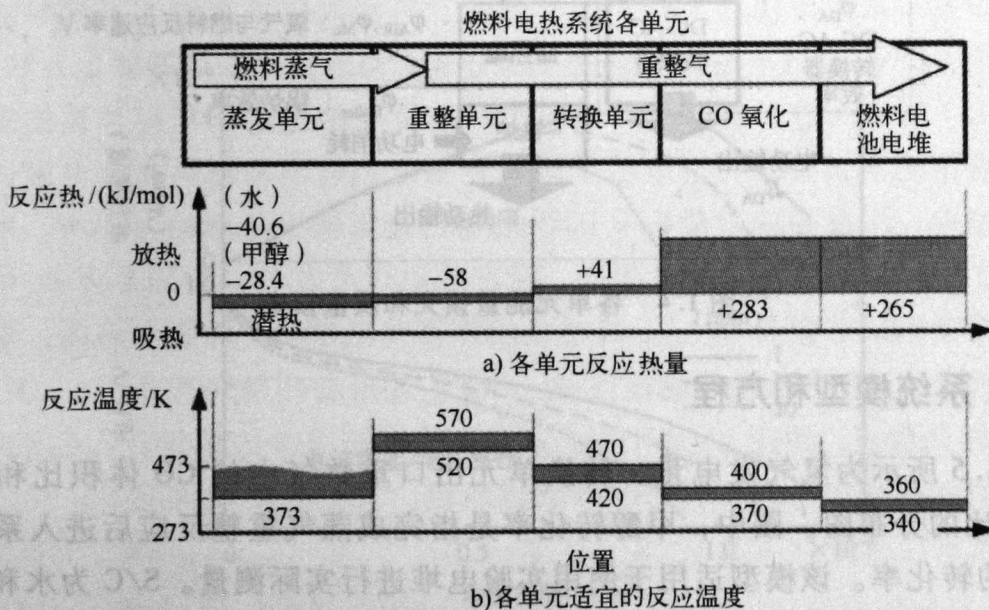


图 1.3 温度目标

1.2.2 能量损失和质量损失

图 1.4 所示为各单元的能量损失和质量损失。损失值不包括外壳和管路散失的热量。燃料电池电堆的废气作为蒸发和重整反应的热源。在需要其他热源的时候，甲醇在催化剂燃烧器内燃烧。产生的热量在转化和 CO 氧化单元内辐射。重整单元内甲醇转化成氢气的速率（效率）用 φ_{RE} 表示，备用锅炉的效率用 φ_{Boiler} 表示。在催化剂、燃烧器、CO 氧化单元和燃料电池内安装风机。所有上述风机、甲醇燃料泵和催化剂燃烧甲醇泵、系统控制器和备用锅炉都需要消耗电能。根据 CO 氧化单元氢气的燃烧 (φ_{O_2})、质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 的焦耳损失 (R_{FS})、电极浓差电压 (φ_{AIR} 、 φ_{Mc}) 及 DC-AC 转换器 ($1 - \varphi_{DA}$)，来计算消耗的电能。

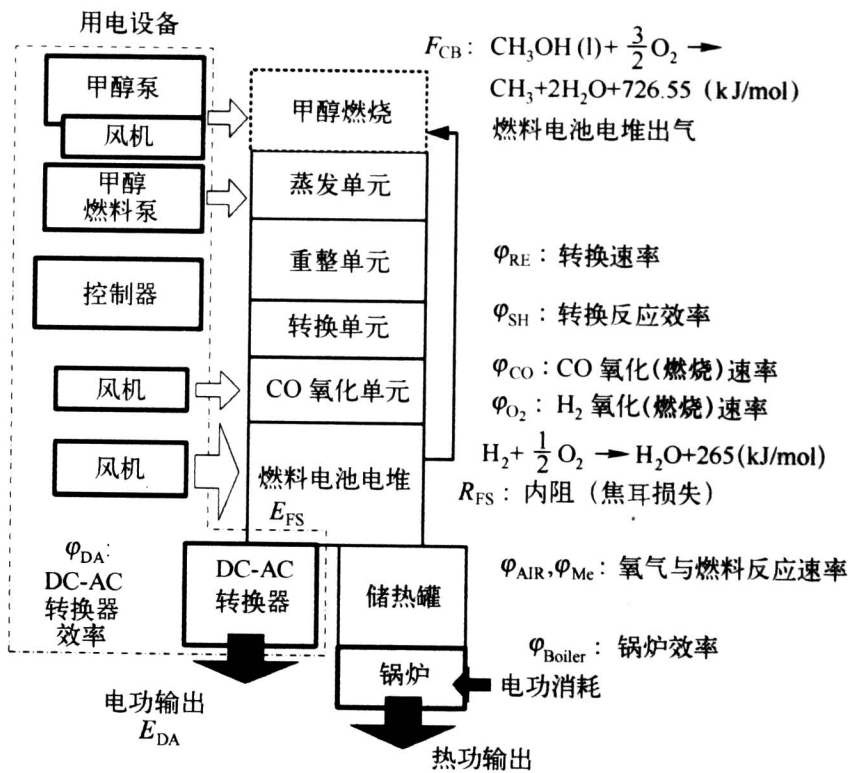


图 1.4 各单元能量损失和质量损失

1.2.3 系统模型和方程

图 1.5 所示为氢气发电量、转换单元出口重整气中的 CO 体积比和转化的 H₂ 体积比的分布图。图中，甲醇转化率是指完成蒸气重整反应后进入系统的甲醇燃料的转化率。该模型适用于使用实验电堆进行实际测量。S/C 为水和甲醇的摩尔比，在此模型中为 1.4。图 1.5 列出了试运行的 PEMFC 系统生产 3kW 电力的平均数据。本章中系统运行遵循如下假定：