

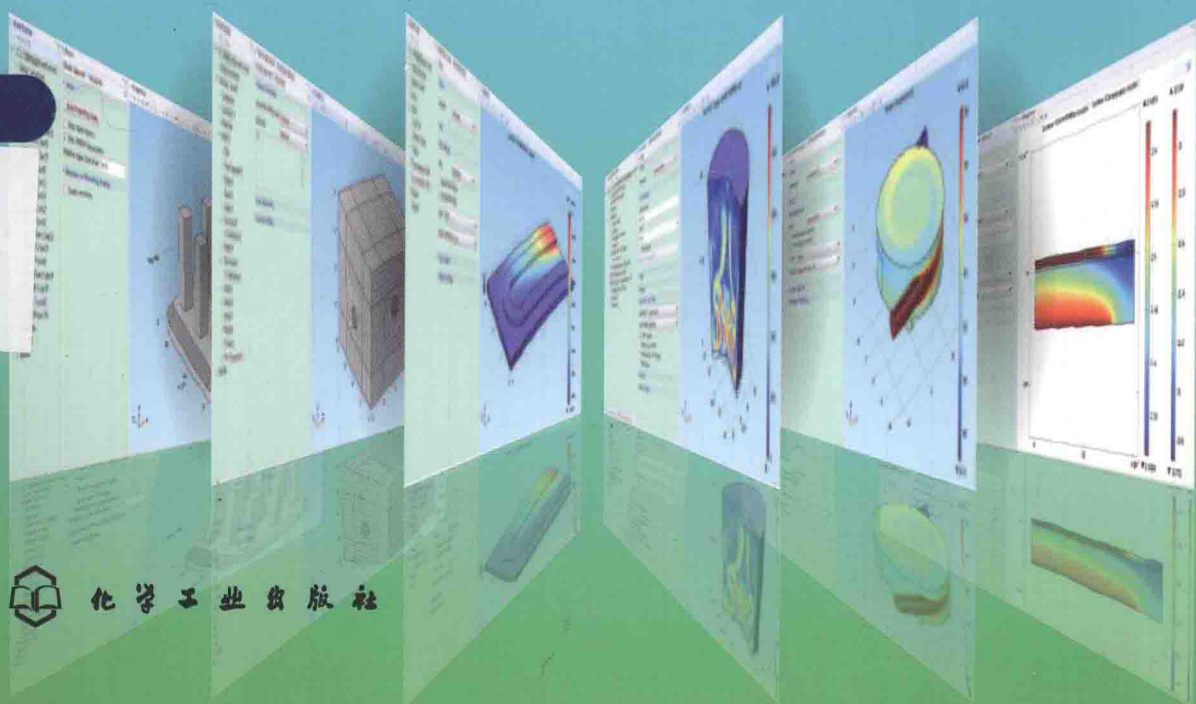
苏石川 孔 为 陈代芬 等编著

热能工程与先进能源技术 仿真与设计

RENENG GONGCHENG

YU XIANJIN NENGYUAN JISHU FANGZHEN YU SHEJI

基于comsol multiphysics软件平台的
传热传质仿真分析

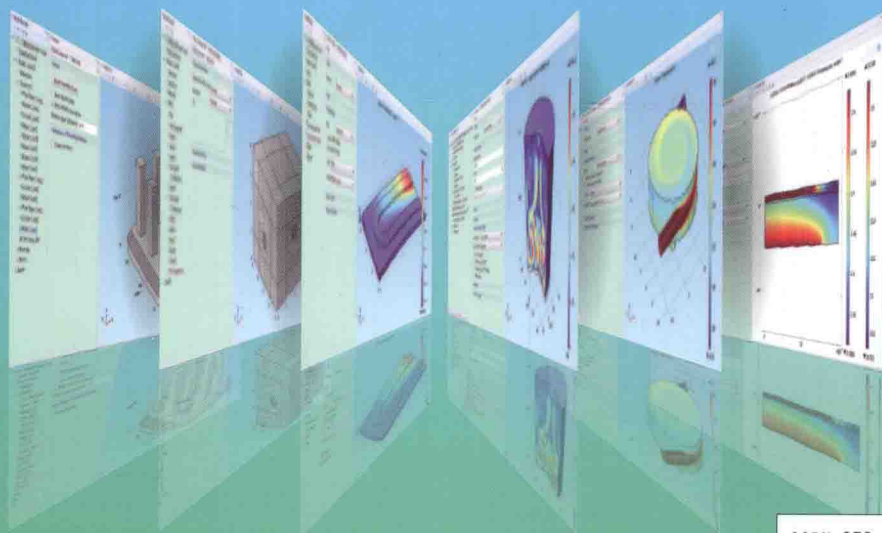


化学工业出版社

热能工程与先进能源技术 仿真与设计

RENENG GONGCHENG

YU XIANJIN NENGYUAN JISHU FANGZHEN YU SHEJI



ISBN 978-7-122-21942-8



9 787122 219428 >

 www.cip.com.cn
读科技图书 上化工社网

 销售分类建议：能源、软件应用

定价：68.00元

苏石川 孔 为 陈代芬 韩雷涛 编著

热能工程与先进能源技术 仿真与设计

RENENG GONGCHENG

YU XIANJIN NENGYUAN JISHU FANGZHEN YU SHEJI



化学工业出版社

· 北京 ·

能量转化的核心基础可能是多种多样的,但就其整个能源应用装置而言,大部分能源利用技术的研究、发展到最终的商业化都涉及传热、传质及导电过程的工程分析设计。

本书主要以 COMSOL Multiphysics[®] 软件为工具 (Image made using COMSOL Multiphysics[®] and is provided courtesy of COMSOL[®]), 首先介绍了传质、传热、导电等单个物理过程的仿真, 然后以燃料电池为例详细介绍多物理场间的耦合仿真。在经典物理的范畴内, 大部分工程问题都可抽象为二阶及二阶以下的微分方程形式, 因此本书中基于传热、传质及导电的耦合研究方法完全可推广应用于能源应用研究过程中遇到的其他物理、化学过程的工程建模分析。读者通过对本书的阅读和理解, 可系统掌握使用有限元工程软件针对能源应用研究过程中遇到的各种工程问题进行数值建模和分析优化设计的技能。

本书可供 COMSOL 软件用户, 化工领域的本科生、研究生, 能源动力类的本科生、研究生使用, 也可供能源行业技术人员、研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热能工程与先进能源技术仿真与设计 / 苏石川, 孔为, 陈代芬, 韩雷涛编著. —北京: 化学工业出版社, 2014.12

ISBN 978-7-122-21942-8

I. ①热… II. ①苏… ②孔… ③陈… ④韩…
III. ①热能-仿真设计②新能源-仿真设计 IV. ①TK11②TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 228349 号

责任编辑: 袁海燕 陈 丽
责任校对: 吴 静

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 516 千字 2015 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

能源应用技术是人类社会文明发展的主要推动力。近年来,随着不同专业技术的发展,人类能源应用方式也日新月异。总的来说,虽然大部分能源应用技术都是基于能量转化原理运作的,但就整个能源应用体系而言,绝大部分能源应用系统是一个多学科知识体系相互交叉应用的过程。简单而言,无论基于化学能-热能转化原理的燃煤发电技术,还是基于光-热转化原理的集光型热动力发电技术、基于核能-热能转化原理的核发电技术、抑或是基于电化学发电原理的燃料电池发电技术,从整个能源应用系统层面来看,大部分能源应用过程大都会涉及动量传递、传热、传质以及导电过程的研究。因此,发展和掌握对某种具体能源应用技术进行动量传递-传质-传热-电磁工程等多物理场数值仿真分析技能,对于从事能源学科领域的操作和分析工作具有重要的意义,这也是本书内容设计和介绍的重点。

全书共分 10 章,依次介绍能源的利用、COMSOL Multiphysics® (“Image made using COMSOL Multiphysics® and is provided courtesy of COMSOL®”)几何结构的创建、COMSOL Multiphysics®网格的划分、各种方程的求解、传质理论及仿真、传热理论及仿真、导电理论及仿真、燃料电池基础理论和燃料电池的仿真。

第 1 章:首先就目前能源使用与环境进行了简单阐述;其次针对当前多种多样的能源应用方式进行了概述,并主要从燃煤发电、太阳能热水系统、太阳能制冷、塔式/碟式/槽式太阳能热动力发电、太阳能烟囱发电、太阳能光伏电池、纳米晶太阳能电池、核能发电、燃料电池发电、潮汐能/波浪能/洋流/海洋温差能发电、水力能/风能/生物质能/地热能发电等能源利用技术的工作原理、系统组成和工作过程进行了简单介绍;最后,在对各种能源使用技术进行归纳分析的基础上,阐述了发展传热-传质-电磁工程仿真技术的重要性。

第 2 章:介绍了一维、二维、三维规则几何结构的创建、几何结构间的布尔运算以及几何结构的变换如阵列、移动、缩放、旋转、镜像等,最后针对二维和三维分别介绍了一个综合实例。

第 3 章:介绍了自由网格、结构网格、边界网格、拉伸网格等的绘制方法,以及网格大小分布的控制方法,最后介绍了一个网格划分的综合实例。

第 4 章:结合实例介绍了代数方程、超越方程、常微分方程、偏微分方程、微分代数方程的求解方法。

第 5 章:介绍了四种不同的传质模型 Fick's model、Stefan-Maxwell model、Dusty gas model、具有菲克定律形式的尘气模型,并分别介绍了 Fick's model、Stefan-Maxwell model、具有菲克定律形式的尘气模型的应用实例。

第 6 章:介绍了热传导、热对流和热辐射三种传热机制,并分别针对热传导、热对流和热辐射介绍了三个实例。

第 7 章:介绍了自由空间中的动量方程和多孔介质中的动量方程,然后针对层流和湍流分别介绍了一个实例。

第 8 章:介绍了电荷守恒方程和电子电导率和离子电导率的计算,然后介绍了随机多孔介质有效电导率的计算。

第 9 章:介绍了燃料电池起源、发展、分类、 $I-V$ 曲线和开路电压的计算,然后介绍了

燃料电池工作过程所涉及的控制方程。

第 10 章:介绍了固体氧化物燃料电池多物理场模型的控制方程、边界设置、模型参数以及建模过程。

本书具有鲜明的特色,主要体现在以下几方面。

(1) 考虑多物理场间的相互作用。

多物理场间的相互作用比较复杂,为了让读者更好地理解多物理场间的相互耦合,本书首先介绍了传质过程、传热过程、导电过程等单个物理过程的仿真,然后以燃料电池为例详细介绍多物理场间的耦合。

(2) 本书采用理论+实例的方式,使读者容易上手。

数值仿真首先需要彻底理解研究问题所满足的物理规律即控制方程以及边界条件。明确了控制方程和边界条件之后,接下来是如何使用软件对研究问题进行求解。因此本书采用了理论+实例的方式。首先介绍相关的理论知识,然后针对具体的案例分析其所涉及的控制方程和边界条件,最后再一步一步地介绍如何实现对本案例的仿真。

(3) 详细的实例介绍+提供实例模型。

本书详细介绍了实例的每一步操作,而大多数仿真书籍对实例的介绍都不足够详细,导致在学习书中实例时不知如何实现书中所展示的结果。为了使读者顺利完成本书所讲实例,书中不仅详细说明了实例每一步操作如何实现,而且还提供了实例模型,以供参考。

(4) 实例讲解采用了文字说明+插图的方式,让读者一看就懂,一学就会。

仿真涉及大量的操作,如果没有操作插图,因找不到相应的按钮,可能会给读者带来很大的学习障碍。为了节约学习时间,提高学习效率,本书提供了大量的操作插图,降低了错误操作的可能性。

(5) 本书实例具有代表性。

本书的实例是基于多年的仿真研究精心挑选出来的,所选实例基本覆盖了不同机制的传热传质过程。例如,传热的三种机制:热传导、热对流、热辐射,在本书第 6 章第一个例子中涉及热传导、热对流,第 6 章第二个例子中涉及热传导、热对流和热辐射。

本书主要由苏石川、孔为、陈代芬、韩雷涛编著,王亮、邵长斌、高祥、张强、何欢欢、张顺东、张文、雷洪涛也参与了本书的编写,在此一并表示感谢。感谢 COMSOL Multiphysics 公司和王刚工程师、安琳工程师、李淑云经理在建模方面的帮助。此外,特别感谢化学工业出版社的相关编辑在本书的编写过程中所给予的帮助和支持!由于作者水平有限,疏漏与不足之处在所难免,敬请同行与读者不吝赐教。

书中的相关实例请到百度网盘(<http://pan.baidu.com/>)中下载,用户名:2568675707@qq.com,密码:comsol123456。若读者在学习过程中遇到困难可以加入 QQ 群(122901261)咨询。

编 著 者
2014 年 6 月

目录

C O N T E N T S

第1章 绪论

1.1 能源使用与环境	1
1.2 当前能源利用概述	2
1.2.1 锅炉燃烧及燃煤发电概述	2
1.2.2 太阳能直接热利用概述	3
1.2.3 太阳能光伏发电概述	8
1.2.4 核能发电技术概述	8
1.2.5 燃料电池发电技术概述	10
1.2.6 海洋能(潮汐能、波浪能、洋流能、海洋温差能)利用概述	11
1.2.7 水力能、风能、生物质能、地热能利用概述	13
1.3 发展传热-传质-电磁工程仿真技术的重要性	16
参考文献	20

第2章 几何结构

2.1 建立一维几何结构	21
2.1.1 点的建立	21
2.1.2 线段的建立	23
2.1.3 多段线的建立	24
2.2 建立二维几何结构	24
2.2.1 圆的创建	25
2.2.2 椭圆的创建	27
2.2.3 矩形的创建	28
2.2.4 正方形的创建	29
2.2.5 多边形的创建	30
2.3 二维几何结构的布尔运算	30
2.3.1 并集	30
2.3.2 交集	32
2.3.3 差集	33
2.3.4 组合	36
2.4 编辑二维几何结构	37
2.4.1 选择几何结构对象	38
2.4.2 修改几何结构对象	39
2.4.3 创建几何结构对象副本	43
2.5 倒角与圆角	49
2.5.1 倒角	49

2.5.2 圆角	50
2.6 二维综合实例	52
2.7 建立三维几何结构	63
2.7.1 长方体的创建	63
2.7.2 圆柱体的创建	64
2.7.3 圆锥体的创建	66
2.7.4 球体的创建	67
2.8 通过二维对象创建三维模型	68
2.8.1 拉伸	68
2.8.2 旋转	69
2.9 三维几何结构的布尔运算	72
2.9.1 并集	72
2.9.2 交集	73
2.9.3 差集	74
2.10 编辑三维几何结构	76
2.10.1 阵列	76
2.10.2 复制	79
2.10.3 镜像	80
2.10.4 移动	82
2.10.5 旋转	83
2.11 三维综合实例	85
参考文献	97

第3章 网格划分

3.1 建立自由三角形网格	98
3.1.1 根据系统默认尺寸直接生成自由网格	98
3.1.2 利用 Size 控制不同边的网格尺寸	98
3.1.3 利用 Size 控制不同区域的网格尺寸	100
3.1.4 利用 Distribution 控制不同边的网格数量	101
3.2 建立结构网格	103
3.3 建立自由四边形网格	104
3.4 建立边界层网格	105
3.5 建立拉伸网格	107
3.6 建立双重网格	109
3.7 建立装配体网格	111
3.8 边网格	114
3.9 复制网格	117
3.9.1 复制面网格	117
3.9.2 复制体网格	119
3.10 网格转换	121
3.10.1 面转换	121
3.10.2 体转换	123

3.11 网格划分综合实例	124
参考文献	129

第4章 数学方程求解

4.1 代数方程	130
4.1.1 COMSOL [®] 默认算子、常数及函数	130
4.1.2 一元一阶方程求解过程	131
4.1.3 一元多阶方程的求解	133
4.1.4 二元一阶方程组求解	134
4.1.5 二元多阶方程组	136
4.2 超越方程	137
4.3 微分方程	138
4.3.1 COMSOL 符号约定	138
4.3.2 微分方程的分类	139
4.3.3 常微分方程	139
4.3.4 偏微分方程	144
4.3.5 微分代数方程	153
4.3.6 经典微分方程	155
参考文献	160

第5章 传质仿真

5.1 物质扩散涉及的物理量	161
5.2 Fick's model 简介	163
5.3 Stefan - Maxwell model 简介	163
5.4 Dusty gas model 简介	164
5.5 具有菲克定律形式的尘气模型简介	166
5.5.1 两组分尘气模型	166
5.5.2 多组分尘气模型	167
5.6 FM 应用实例	169
5.6.1 引言	169
5.6.2 模型定义	169
5.6.3 结果与讨论	169
5.6.4 模型简介	169
5.7 SMM 应用实例	177
5.7.1 引言	177
5.7.2 模型定义	177
5.7.3 模型简介	178
5.8 DGMFM 应用实例	186
5.8.1 引言	186
5.8.2 模型定义	186
5.8.3 模型简介	187
参考文献	193

第6章 传热仿真

6.1 热传导	194
6.2 热对流	195
6.3 热辐射	195
6.4 换热器仿真	196
6.4.1 引言	196
6.4.2 模型定义	197
6.4.3 结果与讨论	197
6.4.4 模型简介	197
6.5 汽车刹车盘在刹车前后温度变化仿真	205
6.5.1 引言	205
6.5.2 模型定义	205
6.5.3 结果与讨论	207
6.5.4 模型简介	207
6.6 水杯中的自然对流仿真	216
6.6.1 引言	216
6.6.2 模型定义	216
6.6.3 结果与讨论	216
6.6.4 模型简介	218
参考文献	224

第7章 动量仿真

7.1 自由空间中的动量方程	225
7.2 多孔介质中的动量方程	226
7.3 流体阀仿真	227
7.3.1 引言	227
7.3.2 模型定义	227
7.3.3 模型简介	228
7.4 混合器内部流场数值模拟	234
7.4.1 引言	234
7.4.2 模型定义	234
7.4.3 结果与讨论	235
7.4.4 模型简介	236
参考文献	242

第8章 导电仿真

8.1 电荷守恒方程	243
8.2 电导率	244
8.3 有效电导率的计算	247
8.3.1 引言	247

8.3.2	模型定义	247
8.3.3	结果与讨论	247
8.3.4	模型简介	248
	参考文献	254

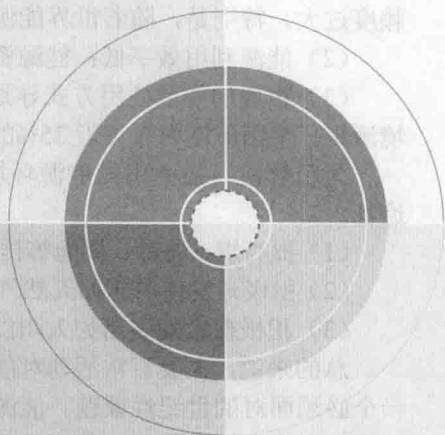
第9章 燃料电池理论基础

9.1	能源危机	255
9.2	燃料电池简介	255
9.2.1	燃料电池起源与发展	255
9.2.2	燃料电池的分类	256
9.2.3	固体氧化物燃料电池的开路电压 (Nernst 势)	256
9.2.4	固体氧化物燃料电池的 $I-V$ 曲线	258
9.3	固体氧化物燃料电池的数学模型	259
9.3.1	固体氧化物燃料电池的几何结构	259
9.3.2	动量守恒方程	260
9.3.3	能量守恒方程	261
9.3.4	质量守恒方程	262
9.3.5	导电方程	263
9.3.6	电化学模型	264
	参考文献	267

第10章 固体氧化物燃料电池仿真

10.1	固体氧化物燃料电池多物理场模型	269
10.1.1	引言	269
10.1.2	模型定义	269
10.2	模型简介	274
10.2.1	模型向导	274
10.2.2	全局定义	274
10.2.3	创建几何模型	276
10.2.4	定义设置	277
10.2.5	边界条件设置	282
10.2.6	网格划分	290
10.2.7	计算	292
10.2.8	结果与讨论	292
	参考文献	293

第1章 绪论



1.1 能源使用与环境

能源一般指在一定条件下能够提供可利用能量的物质资源。能量是量度能源大小的一个重要物理量，按照不同的存在方式，包括有机械能、热能、电能、辐射能、化学能、核能等多种形式。按照不同的能源形成方式包括有一次能源和二次能源。一次能源特指以原形态利用的能源资源，包括煤、石油、天然气、太阳光、地热、潮汐等自然界中固有的能源形式。而二次能源特指经过二次加工提取得到的能源形式，如电、汽油、煤气和蒸汽等多种形式。

能源是人类活动的物质基础。从某种意义上讲，人类文明的发展离不开优质能源的开发和先进能源技术的使用。纵观人类文明历史，人工取火技术是人类最早的能源应用技术，火的使用是人类摆脱野蛮迈向文明的第一步。18世纪前柴草一直是人类主要能源，火不仅可以帮助人类避寒取暖、照明、煮熟食物等，而且火还可以烧制陶具、冶炼矿石、加工各种物品等。1712年英国铁匠托马斯·纽科门发明了纽科门蒸汽机，纽科门蒸汽机很快得到了推广应用，随后1781年瓦特发明了改良蒸汽机。蒸汽机的发明开辟了人类利用矿物燃料作动力替代人力和畜力的新时代，同时标志着人类第一次工业革命的到来。蒸汽机大规模使用促使煤炭一跃而成为人类的主要能源，从此人类进入了“煤炭时代”。1859年埃德温·德雷克在宾夕法尼亚州打出第一口油井，标志着现代石油工业诞生了。起初人们主要从石油中提炼煤油作为油灯的燃料，因此这一阶段石油工业发展缓慢。随着内燃机的发明、飞机迅速发展、汽车加速普及，石油作为它们的燃料逐渐在整个能源家族中扮演越来越重要的角色。1965年，石油首次取代煤炭在世界能源消费结构中占首位，世界进入了“石油时代”。1831年法拉第发明了世界上第一台发电机，电和机器的结合使人类在能源利用上开始了一场大革命。电灯、电话、电视、洗衣机、微波炉、电动机、空调、电炉炼钢、计算机等许多电和机器结合的结晶改变了人类社会的生活方式、生产方式、消费方式等，人类生活的舒适和方便已无法和电分离。

显然，随着人类文明的进一步发展，人类日常活动的每一个环节都对能源形成了全面的依赖。因此，如何建立可持续的能源供应体系，是一个无法回避的世纪性课题。我国作为一个能源消耗大国，《BP2009世界能源统计》数据显示2008年中国的能源消费占全球的17.7%，位于世界第二。21世纪我国面临的能源使用现状主要可归纳为以下3个方面。

(1) 能源资源储量紧缺：我国能源资源人均拥有量只有世界平均水平的一半。资源对外依

赖度过大。特别是，随着世界能源资源储量的下降，工业发展所需的能源成本将越来越高。

(2) 能源利用效率低：能源资源利用效率过低造成对有限资源的浪费。

(3) 粗放的能源使用方式导致环境问题突出：中国以煤为主的能源结构，造成了严重的环境污染。全国范围内有将近 35% 的酸雨覆盖率。全球 20 个高污染城市中，中国占 16 个。

为了解决日益突出的能源环境问题，进而实现社会的可持续发展。目前主要有三个解决途径。

(1) 提高煤、石油、核能等传统能源资源的利用效率，同时力求清洁使用、减少污染排放。

(2) 积极开发使用诸如天然气、氢气、生物质碳氢气体等可再生能源的相关环保节能技术。

(3) 积极探索发展诸如太阳能、地热、风能、水力等新能源形式。

总的来说，人类日常活动对能源全面依赖使得如何寻求可持续的能源来源和使用方式成为一个必须面对的世纪性课题。能源是经济发展的驱动力。从蒸汽机时代煤炭的大规模应用，到石油对煤炭大规模替代，其后都伴随着整个产业发展的高潮。因此，一旦在能源使用领域取得重大突破，将直接改变人们传统的能源使用方式，并带动整个产业链的规模发展。

自 2008 年金融危机以来，美国、欧盟、日本等代表性国家和地区均加大了对战略性能源产业的开发和支持。我国继《“十二五”规划纲要》提出生产总值能耗和排放下降目标后，2012 年 6 月国务院又发布了《节能与新能源汽车产业发展规划（2012~2020 年）》，大力推动电动汽车、燃料电池汽车和车用氢能源产业的发展。国家能源局也向国务院上报了《新兴能源产业发展规划》计划，预计在“十二五”期间针对新兴能源产业投入 5 万亿元，以带动能源产业链的规模发展。这预示着能源产业在未来 20 年内将形成高潮。因此加大新能源领域的人才培养变得尤为重要。

1.2 当前能源利用概述

地球拥有十分丰富的能源资源，且存在方式多样。如何利用能源收集和转化设备将这些储存的资源转化为我们日常生活中所用的能量形式，并清洁节约可持续高效利用是一个十分关键的环节。能源作为经济发展的直接驱动力，从蒸汽机时代煤炭的大规模应用，到石油对煤炭大规模替代，其后都伴随着整个产业的蓬勃发展。而今一旦在新能源技术领域取得重大突破，将直接改变人们传统的能源使用方式，并带动整个产业链的规模发展。就目前而言，能源与动力工程学科涉及的能源收集和转化应用技术可大致概述如下。

1.2.1 锅炉燃烧及燃煤发电概述

如图 1-1 所示，给出了以天然气（煤等矿物）为燃料的火力发电工作原理图。该系统主要由：a. 燃烧室；b. 涡轮机；c. 锅炉；d. 冷却塔；e. 发电机五个主要部件组成。其工作原理可大致描述为：

- ① 首先燃料气体和空气经过加压混合后在燃烧室里燃烧，释放的能量产生高压热气；
- ② 高压热气冲击第一级涡轮机并带动涡轮机叶片旋转；
- ③ 涡轮机带动发电机转子旋转切割磁力线发电；
- ④ 高热气体经过涡轮机后进入锅炉，并将热量传递给管路中的液态水，液态水吸热蒸发膨胀，产生高压蒸汽；
- ⑤ 高压蒸汽冲击第二级涡轮机，带动涡轮机叶片旋转，带动发电机发电；
- ⑥ 最后，经过第二级涡轮机的热蒸汽，进入冷却塔冷凝为液态水，重新回到锅炉中进行下一轮循环。

以固体燃煤为燃料的火力发电装置,也具有类似的工作流程。由燃烧室的燃煤燃烧直接给锅炉供热,水受热膨胀为蒸汽,蒸汽冲击涡轮机带动叶片旋转,涡轮机带动发电机转子切割磁力线发电,最后经过涡轮机的蒸汽直接经由冷却塔冷却进入下一个循环。从整个工作流程来看,其能量转化过程可简单用下式描述。

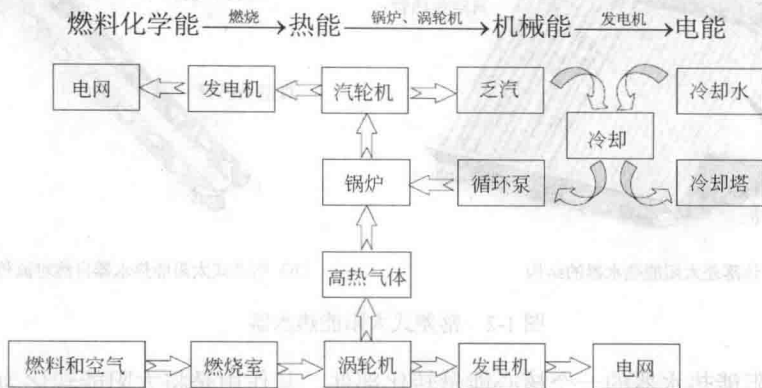


图 1-1 以矿物燃料为基础的传统热发电示意

1.2.2 太阳能直接热利用概述

根据爱因斯坦的质能方程,1 kg 氢元素聚变成氦的质量损耗约为 0.7%,可释放出 6.3×10^{14} J 的能量。按太阳每秒消耗氢燃料 6×10^{11} kg 计算,则太阳的辐射功率约为 3.8×10^{26} W。已知太阳到地球的距离约为 1.5×10^8 km,地球的直径约为 6.37×10^3 km,故根据圆周角并以 47% 的大气透光率计算可得,全年到达地球的阳光总能量高达 $\times 10^{17}$ kW·h。相当于燃烧 74 万亿吨标准煤的热值。可见太阳光中蕴含着大量的能量。从广义上讲,太阳能是除了地热以外地球上绝大部分能量的最终源泉。从狭义的太阳能利用讲,主要包括,太阳能直接热利用和太阳能光伏发电两方面。

就目前而言,涉及的太阳能直接热利用设备主要有太阳能热水器(包括太阳能落差式热水器、太阳能承压式热水器)、太阳能制冷机,太阳能热动力发电(包括塔式太阳能热动力电站、槽式太阳能热动力电站、碟式太阳能热动力电站)及太阳能烟囱等几种能源利用形式。大体概述如下。

(1) 太阳能热水器

如图 1-2 (a) 所示,给出了一种一体式落差式太阳能热水器的简单示意图。其核心部件主要包括:支架;真空集热器;漫反射板;储水箱。工作过程如下。

① 首先,当太阳光照射集热器时,集热器吸收太阳能给冷水加热,穿过的阳光在漫反射板的作用下再次经过集热器被二次吸收;

② 其次,利用集热器中水温与储水箱中水温的差别形成自然对流[如图 1-2 (b) 所示],将集热器中的热水输送到储水箱,并将储水箱中的冷水输入集热器;

③ 最后,当用户需要热水时,通过控制系统放热水,并补充一定量的冷水到储水箱进行加热。

承压式太阳能热水器也有相似的工作过程,其差别在于落差式热水器采用的是一个液体循环回路;而承压式热水器则通过一个热交换器把热质和水分在两个回路中,从而保证热水出口水压与进口冷水水压的一致。

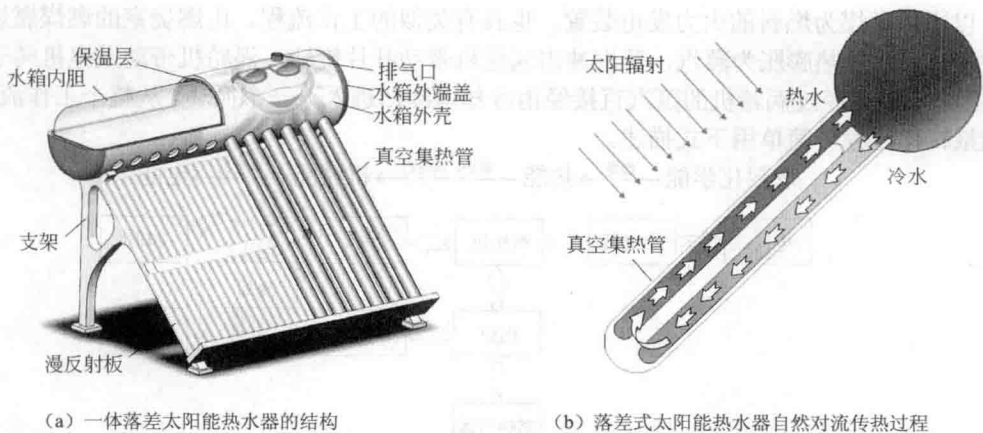


图 1-2 落差式太阳能热水器

集热器是太阳能热水器的一个核心能量转化部件，其作用是将太阳能转化为热能并带走。目前我国使用的太阳能集热器主要有两大类：① 平板型太阳能集热器，② 全玻璃真空管型太阳能集热器。两者的结构组成和工作过程相似，图 1-3 平板型太阳能集热器，其核心部件主要包括：吸热体；玻璃盖板；保温层；外壳四个部分。这四个部件都有其自身的作用。

① 吸热体主要由吸热板和载热流体管路两部分组成：吸热体的主要作用是尽可能多地吸收太阳辐射能量，并转化为热能，最后将热能传递给载热管路；而载热流体管路的作用则是用流体工质，并把热能带到储水箱（热能储存作用）。

② 玻璃盖板的作用：一方面是让太阳光辐射透过；另一方面是与吸热体之间形成一个真空空腔，从而减小吸热体对环境的放热。

③ 保温层的作用是：减小集热器底部向周围环境的散热，从而提高集热器的热效率。

④ 外壳的作用主要是：将吸热板、盖板、保温材料组成一个整体，并保持一定的刚度和强度。

总体而言，整个太阳能热水系统的能量转化过程可通过下式进行描述。

太阳能 $\xrightarrow{\text{集热器}}$ 热能

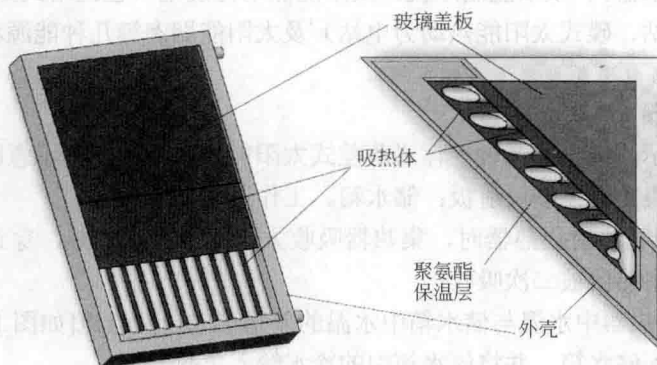


图 1-3 平板型太阳能集热器结构示意图及部件组成

(2) 太阳能制冷机

与传统的制冷机类似，太阳能制冷循环也包括① 空气压缩制冷循环，② 蒸汽压缩制冷循环，③ 吸附式制冷循环三种不同的类型。图 1-4 给出了相应的太阳能吸附式制冷机的大致工作

原理。

吸附式太阳能制冷系统的部件组成主要包括：a.太阳能集热器；b.蒸汽发生器；c.减压阀；d.溶液泵；e.吸收器；f.蒸发器；g.节流阀；h.冷凝器等部件组成。吸附式太阳能制冷技术与常规能源驱动的吸附式制冷装置基本一致，主要创新点在于采用太阳能集热器收集热能并给传统吸附式制冷机的蒸汽发生器供热。其工作原理可简述如下。

首先，通过太阳能集热器收集并将太阳能转化为热能，并传递给工质。

其次，载热工质将热量传递给蒸汽发生器，并加热蒸汽发生器里面的稀溴化锂溶液，将其中的水汽化为较高温度和压力的水蒸气。与此同时，发生器中由于水蒸发而变浓的浓溴化锂经减压后也流入吸收器。

第三，高温水蒸气进入冷凝器通过向冷却水放热而降温，凝结成饱和水。

第四，饱和水经节流阀降压降温后进入蒸发器吸热汽化，成为饱和蒸汽，随后送入吸收器。

第五，吸收器吸收由蒸发器来的饱和蒸汽，生成稀溴化锂溶液，再由液体泵加压进入发生器。从而达到对蒸发器（冷藏室）的制冷作用。

由其工作过程可见，该能量收集和转化装置的工作过程中同时涉及到流体的传热传质过程，欲对其装置进行优化设计必然需要具备较好的流体和传热传质的工程分析背景。

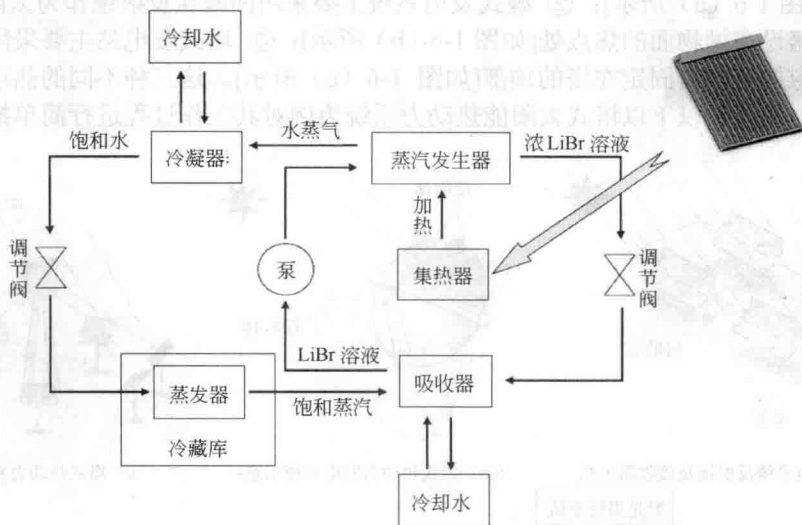


图 1-4 太阳能吸附式制冷循环工作原理示意图

(3) 集热型太阳能热动力发电

将吸收的太阳辐射热能转换成电能的发电技术称为太阳能热动力发电技术。太阳能热动力发电又称为集光型太阳能发电（concentrated solar power），英文缩写为 CSP。如图 1-5 所描述的，太阳能热动力发电技术与传统发电方式相类似，其创新点在于采用太阳能集热器和蓄热器来替代传统的矿物燃烧室。总体的工作过程可大致描述如下。

- ① 集热器将太阳辐射能集中并变成热能，经由蓄热器向蒸汽发生器（锅炉）供热。
- ② 冷凝器的液态工质从蒸汽发生器中吸热蒸发为高温高压蒸汽。
- ③ 蒸汽通过喷管加速后驱动涡轮机叶轮旋转。
- ④ 涡轮机带动发电机切割磁力线发电。工质离开涡轮机进入冷凝器向冷却介质释放潜热，并凝结为液体重新回到蒸汽发生器中循环使用。

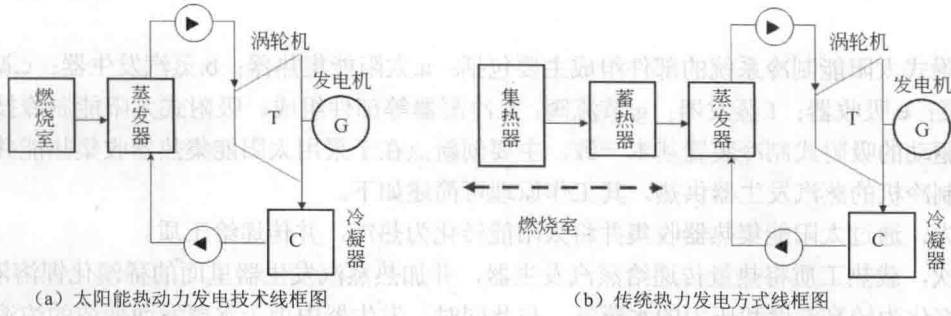
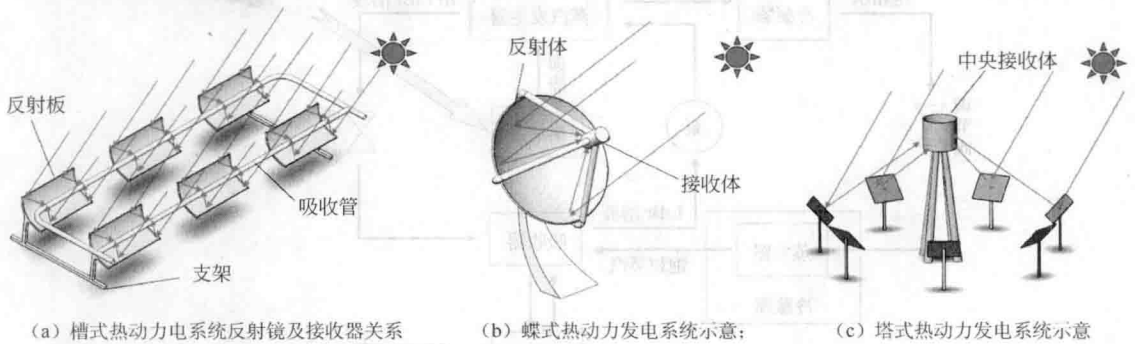


图 1-5 太阳能热动力发电与传统热力发电方式

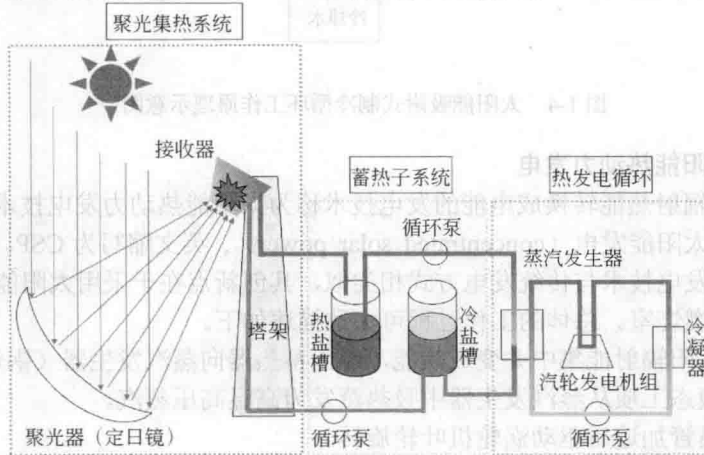
典型太阳能热动力发电系统除包括蒸汽发生器、涡轮机、发电机、冷凝器外，还包括聚光集热子系统以及蓄热子系统。由于太阳能是一种能量密度偏低的能量，因此需要利用集热器把大范围的低密度能量聚集到有限面积上形成高密度的优质能量。就太阳能热动力系统而言，其聚光集热子系统一般包括：聚光器、接收器、跟踪装置三个部分。

聚光器主要是用于收集阳光，并将其聚集到一个有限尺寸接收器上，从而提高单位面积上的太阳辐射强度。目前聚光型热动力发电系统主要根据不同的集热器和接收器划分为三大类型。

① 槽式发电站主要采用抛物柱面槽型反射镜作为聚光器，其对应的接收器设在圆柱中轴位置，形状为管状[如图 1-6 (a) 所示]；② 碟式发电系统主要采用凹碟状反射镜作为太阳能聚光器，其对应的接收器设在抛物面的焦点处[如图 1-6 (b) 所示]；③ 塔式发电站主要采用平面镜做为聚光器，其对应的接收器固定在塔的顶部[如图 1-6 (c) 所示]。这三种不同的热动力发电系统其工作原理较为相近，以下以塔式太阳能热动力系统为例对其工作过程进行简单描述。



(a) 槽式热动力发电系统反射镜及接收器关系 (b) 碟式热动力发电系统示意 (c) 塔式热动力发电系统示意



(d) 塔式热动力发电系统工作过程图示

图 1-6 太阳能热动力发电