

21世纪新能源丛书

太阳能热发电系统 集成原理与方法

洪 慧 金红光 刘启斌 韩 巍 著



科学出版社

21 世纪新能源丛书

太阳能热发电系统集成原理与方法

洪 慧 金红光 著
刘启斌 韩 巍

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从聚光太阳能的能量转换基础问题出发,在理论、关键技术、系统集成三个层面,重点阐述了聚光太阳能与化石能源互补发电系统集成原理与方法。通过对太阳能与化石燃料的热力循环互补、太阳能与化石燃料热化学互补的典型实例深入讨论,诠释了多能源梯级利用的“能量互补、品位耦合”的科学本质内涵。重视聚光太阳能转化过程的不可逆性,介绍了槽式广角跟踪聚光技术、中低温太阳能燃料转化技术、槽-塔结合发电技术等新技术;从技术经济性方面,分析了中低温太阳能燃料转化在分布式冷热电系统的应用,指出了太阳能热化学互补在发展高效、低成本聚光太阳能热发电方面的作用。最后分析了太阳能热化学储能和 CO₂ 捕集一体化方法,在各章节的讨论中,还特别指出了各种技术面临的问题和未来的发展方向。

本书可供从事多能源互补应用理论和技术研究,特别是太阳能与燃煤互补发电技术、太阳能热化学燃料转换技术、太阳能分布式供能技术等科研和工程技术人员参考,也可作为高等院校高年级本科生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能热发电系统集成原理与方法/洪慧等著. —北京:科学出版社, 2018. 6

(21 世纪新能源丛书)

ISBN 978-7-03-057352-0

I. ①太… II. ①洪… III. ①太阳能发电-系统工程-研究
IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 093283 号

责任编辑:钱 俊 / 责任校对:彭玲玲

责任印制:张 伟 / 封面设计:耕者设计

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 6 月第一次印刷 印张:17 彩插:5

字数:323 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪新能源丛书》编委会

主 编 徐建中

副主编 陶文铨 匡廷云 欧阳平凯 金红光

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁 静 马重芳 王如竹 王志峰

朱锡锋 李小森 吴创之 何雅玲

汪集旸 张明明 张寅平 陈海生

姜胜耀 骆仲泱 郭烈锦 戴松元

《21 世纪新能源丛书》序

物质、能量和信息是现代社会赖以存在的三大支柱。很难想象没有能源的世界是什么样子。每一次能源领域的重大变革都带来人类生产、生活方式的革命性变化,甚至影响着世界政治和意识形态的格局。当前,我们又处在能源生产和消费方式发生革命的时代。

从人类利用能源和动力发展的历史看,古代人类几乎完全依靠可再生能源,人工或简单机械已经能够适应农耕社会的需要。近代以来,蒸汽机的发明唤起了第一次工业革命,而能源则是以煤为主的化石能源。这之后,又出现了电和电网,从小规模的发电技术到大规模的电网,支撑了与大工业生产相适应的大规模能源使用。石油、天然气在内燃机、柴油机中的广泛使用,奠定了现代交通基础,也把另一个重要的化石能源引入了人类社会;燃气轮机的技术进步使飞机突破声障,进入了超声速航行的时代,进而开始了航空航天的新纪元。这些能源的利用和能源技术的发展,进一步适应了高度集中生产的需要。

但是化石能源的过度使用,将造成严重环境污染,而且化石能源资源终将枯竭。这就严重地威胁着人类的生存和发展,人类必然再一次使用以可再生能源为主的新能源。这预示着人类必将再次步入可再生能源时代——一个与过去完全不同的建立在当代高新技术基础上创新发展起来的崭新可再生能源时代。一方面,要满足大规模集中使用的需求;另一方面,由于可再生能源的特点,同时为了提高能源利用率,还必须大力发展分布式能源系统。这种能源系统使用的是多种新能源,采用高效、洁净的动力装置,用微电网和智能电网连接。这个时代,按照里夫金《第三次工业革命》的说法,是分布式利用可再生能源的时代,它把能源技术与信息技术紧密结合,甚至可以通过一条管道来同时输送一次能源、电能和各种信息网络。

为了反映我国新能源领域的最高科研水平及最新研究成果,为我国能源科学技术的发展和人才培养提供必要的资源支撑,中国工程热物理学会联合科学出版社共同策划出版了这套《21 世纪新能源丛书》。丛书邀请了一批工作在新能源科研一线的专家及学者,为读者展现国内外相关科研方向的最高水平,并力求在太阳能热利用、光伏、风能、氢能、海洋能、地热、生物质能和核能等新能源领域,反映我国当前的科研成果、产业成就及国家相关政策,展望我国新能源领域未来发展的趋势。本丛书可以为我国在新能源领域从事科研、教学和学习的学者、教师、研究生

提供实用系统的参考资料,也可从事新能源相关行业的企业管理者和技术人员提供有益的帮助。



中国科学院院士

2013年6月

前 言

聚光太阳能热发电是人类未来规模化利用可再生能源的重要基础之一,对未来能源技术革命和社会经济可持续发展将产生重大影响。当前,国内外聚光太阳能热发电发展迅速,截至 2015 年 12 月底,全球已建成投运聚光太阳能热发电电站装机容量已接近 5GW。但与光伏发电相比,聚光太阳能热发电尚处于产业化前期。太阳能热发电的单位装机投资是常规发电的数倍,大规模发电需要大面积聚光镜和跟踪,聚光镜场的成本占一次投资的 40%~70%。不稳定的太阳辐照强度和聚光过程中存在的较大能量损失,使得由镜场到吸收器的光热转化效率较低,太阳能热发电年平均效率较低(仅 12%~20%)。这些都成为当前聚光太阳能热发电发展的重要“瓶颈”。虽然聚光、跟踪、传输、储能、转化等单一过程技术都有长足进步,但聚光太阳能热发电仍旧面临年均效率低、成本高的难题。

作者所在研究集体前身是我国著名科学家吴仲华教授组建的联合循环课题组,三十多年来,一直秉承吴仲华先生的“能的梯级利用与总能系统”思想,专门从事能源动力系统基础研究和相关技术的创新。近十年,课题组为了加快促进我国聚光太阳能热发电的发展,从能的品位概念,创建了“能量互补、品位耦合”的太阳能与化石能源互补利用原理,发展了吴仲华教授“温度对口、梯级利用”的思想,自主创新研发了聚光太阳能与化石能源互补新技术。我们撰写本书的目的就在于,从聚光太阳能、热力循环到关键技术层面,阐述低成本、高效的聚光太阳能热发电系统集成原理与方法,以及系统集成创新与应用。

本书涵盖了课题组多年来一系列重要成果,共 6 章。内容主要包括聚光太阳能单一热发电和太阳能与化石能源互补发电的基础理论和关键技术。第 1 章着重讲述了聚光太阳能热发电技术存在的科学问题,以及可能解决的途径与方向。第 2 章侧重从聚光方式与热力循环相结合的层面,概述了聚光太阳能热发电系统的基本形式。第 3 章概述了大型规模化的单一太阳能热发电系统集成理论,重点讨论了太阳热与做功工质品位匹配的集成机理与方法,介绍了双级蓄热、槽-塔结合的太阳能单一热发电新技术。在第 4、第 5 两章中,重点讨论了聚光太阳能与化石能源的热互补、热化学互补发电技术。第 4 章介绍了太阳能与燃煤热互补关键技术,深入槽式聚光余弦效应减小的方法,介绍了自主研制的槽式广角跟踪聚光技术,以及在提高年均槽式聚光集热性能方面的作用。第 5 章阐述了中低温太阳能与化石燃料热化学互补的品位耦合机理,结合典型方案,侧重探讨了能量互补、品位耦合的全工况系统集成设计方法,并应用于分布式冷热电供能技术,强调了中低

温太阳能热化学互补对发展高效、低成本聚光太阳能热发电的作用。第 6 章介绍了控制 CO_2 捕集的太阳能与化石燃料化学链燃烧发电技术,重点讨论了从能源转换源头实现太阳能储能和 CO_2 捕集一体化的方法,从典型系统概念性设计、热力性能分析、化学链燃烧载氧体材料研制,说明未来聚光太阳能与化石能源热化学互补在温室气体控制方面的意义。

本书在撰写过程中,曾得到赵雅文副研究员及方娟、王瑞林、曲万军、王肖禾、许达、张浩、彭硕、刘秀峰等同学的各种帮助,在此一并表示感谢。本书及其有关的科研项目都得到国家自然科学基金委员会和科技部的大力支持,特此深表谢意。

由于书中谈论的问题涉及工程热物理、光学、材料学、化工、机械等学科和技术领域,作者的理论水平和实践经验有限,书中难免存在不足之处,殷切希望广大读者和有关领域的专家给予批评和指正。

作 者

2017 年 5 月于北京中关村

符 号 表

q_{ape}	采光口能流密度
I	太阳辐照强度
C	光学聚光比
M	采光面积
m	接收器面积
ϕ_{rim}	半聚光角
f	焦距
d	太阳经过抛物面镜的成像宽度
θ	最大夹角
η_{col}	太阳能集热器的集热效率
η_A	考虑集热器里光路缺失造成能量损失的效率
α	吸收器的有效吸收率
ε	吸收器的有效发射率
σ	玻尔兹曼常量
T	温度
W	做功
T_{H}	高温
Q_{H}	热机在高温下吸收的热量
m_{s}	高压过热蒸汽流量
m_{o}	导热油流量
h_{t2}^{g}	进入高温蓄热换热器的蒸汽焓值
h_{t3}^{g}	高温蓄热换热器出口的蒸汽焓值
C_{po}	导热油在 240~350℃ 的平均定压比热
t_{350}	导热油进入高温蓄热换热器的温度
t_{240}	导热油出高温蓄热换热器的温度
Q_{l1}	高温蓄热过程的热损失
Q_{l2}	高温蓄热单元放热过程的热损失
dm_{s}	进入低温蓄热器中的蒸汽瞬时量
h_{t4}^{g}	进入低温蓄热器中蒸汽的焓值
t_0	低温蓄热器中的低温未饱和水的初始温度

h_0	低温蓄热器中的低温未饱和水的焓值
t	换热后的终温
h	换热后的焓值
dm_s	低温蓄热器的蒸汽注入量
C_{pw}	水的比热
dm_1	低温蓄热器的瞬时蒸汽产生量
h'_h	蓄热器初始饱和水的焓值
h'_l	汽轮机的滑行压力下的饱和水的焓值
h''_l	饱和水蒸气的焓值
S	单位面积聚光镜(无阴影)吸收的太阳能
ρ	聚光镜的反射率
γ	吸收器接收到聚光镜反射的太阳能的比例
τ	吸收器外玻璃套管的透过率
$K_{\gamma\alpha}$	入射到聚光镜的太阳能偏离垂直入射的程度
θ	入射角
φ	该地区纬度
δ	太阳赤纬角
ω	太阳时角
h_i	金属吸收管管内对流换热系数
Δt_i	管内传热温差
A_i	吸收管内表面积
R_b	金属管的导热热阻
λ_b	玻璃套管的热导率
l_b	金属管长度
T_{b_o}	金属管外壁的辐射换热
T_{g_i}	玻璃套管内壁之间的辐射换热
A_{b_o}	金属管外壁表面积
d_{b_o}	金属管外径
d_{g_i}	玻璃管内径
ε_{ab}	金属表面镀膜发射率
ε_g	玻璃套管表面发射率
h_d	低密度残余气体的换热系数
k_{air}	空气在标准大气压下的导热系数
λ	在环形区域内的低压气体平均自由程
δ	空气分子直径

λ_g	玻璃套管的导热系数
Q_{TubeLoss}	散热损失
Q_{EvaLoss}	蒸汽发生器的能量损失
Q_{power}	太阳能集热系统交换到动力侧的能量
W_a	集热器开口宽度
F	吸收器与聚光镜垂直距离
$m_{\text{coal}} \cdot \text{LHV}$	输入系统煤的热值
$W_{\text{ISST}}(t)$	互补系统出功
W_{coal}	燃煤发电系统出功
$m_{\text{coal}} \cdot \Delta \epsilon_{\text{coal}}$	输入系统煤的化学焓
W_{solar}	互补系统的太阳能净出功
ΔE_s	输入太阳热焓
A_{ed}	能量释放侧的品位
A_{ea}	能量接收侧的品位
A_{water}	互补前后能量接收侧品位均为给水吸热品位
η_{Carnot}	集热温度对应的卡诺循环效率
η_{col}	聚光集热效率
η_{power}	动力循环效率
ΔA	替代抽汽与集热品位差
η_{tur}	互补前的汽轮机内效率
$\eta_{\text{tur-hyb}}$	互补后的汽轮机内效率
W_{st}	互补前的汽轮机出功
$W_{\text{st-hyb}}$	互补后的汽轮机出功
$A_{\text{s-f}}$	太阳能燃料的品位
ΔH_T	太阳能燃料燃烧后产生的高温燃气的焓值
ΔE_T	太阳能燃料燃烧后产生的高温燃气的焓值
ΔEXL_c	太阳能燃料燃烧过程的焓损失
$\Delta E_{T,f}$	燃料直接燃烧过程产生的高温烟气热焓
ΔEXL	化石燃料直接燃烧过程的焓损失
λ_{sr}	反应床的有效导热系数
λ_g	混合气体的导热系数
λ_s	反应床的导热系数
ϵ	反应床的孔隙率
T_s	反应床的温度
h_{t-i}	吸收/反应管内对流换热系数

μ_f	管内流体的动力黏度
d_s	催化剂颗粒的当量直径
L_{bed}	催化床层的高度
G	反应物质量流率
$d_{t,i}$	吸收/反应管内径
Q_e	发电机组的发电量
Q_s	系统回收利用的余热量
Q_{HHV}	输入系统燃料的高位热值
Q_{sol}	输入系统的太阳能热量
$W_{sep,2}$	CO ₂ 分离功耗
η_2	太阳集热品位
α	燃料转化率
ξ	CO ₂ 捕集能耗降低度
G_{H_2}	氢气流量
G_M	甲醇燃料流量
H_M	甲醇燃料低位热值
Q_d	参考分产系统能耗
Q_{cog}	联产系统总能耗
Q_{cogf}	联产系统化石能源能耗
n_M	注入甲醇量
n'_M	未反应的甲醇量
Q_{che}	经过甲醇重整反应所实现的太阳热能转化为化学能的量
$\Delta_r H_M$	一定压力、一定反应温度下单位甲醇重整反应的反应焓
W_{ref}	甲醇直接燃烧联合循环的净输出功
$\eta_{th,ref}$	甲醇直接燃烧联合循环的热效率
S_{AP}	接收孔面积
W_{oxd}	氧载体中活性物质被完全氧化时的质量
W_{red}	氧载体中活性物质被完全还原成金属相
X_{ts}	氧载体的氧化程度
$k(T)$	速率常数

目 录

前言

符号表

第 1 章 太阳能热发电现状与发展动态	1
1.1 能源可持续发展与可再生能源战略需求	1
1.2 太阳能热利用与发电现状	3
1.2.1 太阳能热利用状况	4
1.2.2 太阳能热发电种类、方法	5
1.2.3 太阳能热发电国内外发展现状	12
1.3 国内外太阳能热发电问题与技术瓶颈	14
1.3.1 太阳能热发电问题	14
1.3.2 太阳能热发电关键技术瓶颈	15
1.3.3 光热发电的发展障碍	17
1.4 挑战与发展方向	17
参考文献	20
第 2 章 太阳能热发电基本构成与类型	22
2.1 聚光太阳能集热方式	23
2.1.1 塔式集热器	24
2.1.2 碟式集热器	26
2.1.3 抛物槽式集热器	27
2.1.4 线性菲涅耳式集热器	29
2.2 太阳能独立热发电系统	30
2.2.1 抛物槽式太阳能热发电系统	30
2.2.2 塔式太阳能热发电系统	34
2.3 太阳能与化石燃料热互补发电技术	39
2.3.1 太阳能与燃气蒸汽联合循环热互补系统	41
2.3.2 太阳能与燃煤电站热互补系统	43
2.4 太阳能热化学互补发电系统	44
2.5 其他太阳能热发电系统	46
参考文献	49

第3章 太阳能独立热发电	51
3.1 太阳能独立热发电系统研究进展	52
3.1.1 太阳能塔式热发电系统进展	52
3.1.2 太阳能槽式热发电系统进展	55
3.2 太阳能独立热发电系统热力性能分析与系统集成原则	58
3.2.1 太阳能独立热发电系统热力性能分析	58
3.2.2 太阳能独立热发电系统集成与设计原则	61
3.3 太阳热能发电系统集成	62
3.3.1 以水为吸热工质的塔式太阳能热发电系统	62
3.3.2 槽-塔结合的太阳能热发电	79
3.3.3 双级集热场的抛物槽式太阳能热发电系统	82
3.3.4 槽式太阳能集热性能实验研究	88
3.4 发展方向(关键技术与瓶颈、突破)	104
参考文献	105
第4章 太阳能与化石能源热互补发电系统	107
4.1 概述	107
4.2 太阳能与燃气蒸汽联合循环互补发电	108
4.2.1 太阳能 ISCC 发电	109
4.2.2 典型实例	111
4.2.3 太阳能预热燃气轮机压缩空气互补发电	114
4.3 太阳能与煤互补发电系统	116
4.3.1 基本概念	116
4.3.2 典型实例	119
4.4 热互补机理	124
4.4.1 太阳能互补净发电效率	124
4.4.2 太阳能净发电效率特征	126
4.4.3 互补发电的最佳聚光比	127
4.4.4 光煤互补系统集成原则	129
4.5 太阳能净发电效率修正	131
4.6 变辐照变工况热互补发电系统热力性能	133
4.6.1 系统流程描述	133
4.6.2 聚光集热岛与动力岛之间运行参数相互影响	135
4.6.3 四季典型日变工况及全息工况性能	138
4.6.4 聚光集热关键过程	142
4.7 变辐照主动调控聚光集热方法与关键技术	147

4.7.1 槽式广角跟踪聚光集热方法	147
4.7.2 广角跟踪聚光集热技术	151
4.7.3 可变面积槽式聚光集热技术	153
4.8 关键技术与发展前景	158
4.8.1 热互补发电系统的技术突破	158
4.8.2 近中期应用前景	158
参考文献	159
第5章 太阳能与化石燃料热化学互补发电系统	161
5.1 概述	161
5.2 太阳能与化石燃料热化学互补机理简述	161
5.2.1 太阳能热化学互补反应特点	161
5.2.2 太阳能热化学互补集成机理	162
5.2.3 太阳能热化学互补净发电效率增效表达式	166
5.3 中低温太阳能燃料转换方法	167
5.3.1 中低温太阳能热化学互补制氢简述	167
5.3.2 太阳能吸收反应器设计原则	168
5.3.3 中低温太阳能热化学燃料反应器	169
5.4 槽式太阳能吸热反应器设计优化	172
5.4.1 光-热-化学反应多场耦合	172
5.4.2 吸热反应器温度分布优化	174
5.4.3 太阳能吸收反应速率分布	176
5.4.4 太阳能吸收反应器管壁直径优化	178
5.4.5 反应床孔隙率的影响	181
5.4.6 非均匀能流密度的影响	183
5.5 变截面积吸收/反应器	189
5.6 中低温太阳能热化学互补发电示范装置及试验	191
5.6.1 太阳能集热品位提升实验验证	191
5.6.2 百 kW 太阳能热化学互补发电示范装置	192
5.6.3 中温太阳能热化学互补发电试验	198
5.7 中温太阳能与化石燃料互补分布式供能系统	201
5.7.1 热化学互补分布式系统集成原则与思路	202
5.7.2 太阳能与甲醇裂解互补冷热电典型方案	203
5.7.3 典型实例及热力性能	205
5.7.4 经济性分析	208
5.7.5 近中期发展前景	210

参考文献	211
第 6 章 回收 CO ₂ 的太阳能热化学方法与应用	213
6.1 概述	213
太阳能热化学与 CO ₂ 回收集成原则	213
6.2 捕集 CO ₂ 的太阳能热化学互补特性规律	215
6.2.1 燃料焓、吉布斯自由能、太阳集热焓、CO ₂ 分离功关联性	215
6.2.2 燃料化学能梯级利用对 CO ₂ 捕集能耗降低的作用	218
6.3 控制 CO ₂ 的中低温太阳能-甲醇重整制氢多功能系统	220
6.3.1 系统集成特征与热力性能	220
6.3.2 太阳能驱动甲醇重整制氢典型实验	223
6.4 控制 CO ₂ 排放的太阳能-化学链燃烧发电系统	228
6.4.1 系统描述	229
6.4.2 热力性能	230
6.5 太阳能-替代燃料化学链燃烧实验验证	233
6.5.1 氧载体材料制备	234
6.5.2 实验原理及方法	234
6.5.3 化学链燃烧反应动力特性	238
6.5.4 适合中温太阳能驱动 CLC 的新型氧载体的制备与性能研究	244
6.6 挑战与发展趋势	254
参考文献	255

彩图

第 1 章 太阳能热发电现状与发展动态

纵观人类科学技术的百年发展史,从蒸汽机“改变世界”、电力和内燃机开创新纪元,到人类计算机延伸人脑,能源是人类社会赖以生存的物质基础。进入 21 世纪,人类历史从来没有像现在面临如此困境:以煤、石油、天然气等化石燃料为主的能源资源的短缺,化石能源消耗导致生态环境恶化的日益凸现,传统化石能源供给减小与社会经济发展对能源旺盛需求之间的矛盾。随着国际社会越来越关注化石燃料燃烧造成二氧化碳排放问题,世界各国应对气候变化,采取加快推进能源供给的多元化,已经将发展可再生能源上升到国家能源安全战略。在当今以化石能源与可再生能源并举的能源消费结构达成共识的基础上,人类将迎接由可再生能源引领的新一轮的能源革命和新技术产业革命。

太阳能、生物能源、风能在可再生能源新技术革命风潮中各领风骚。本章以分析可再生能源发展趋势和特点为切入点,侧重太阳能热发电技术发展进程,梳理太阳能热发电技术现状和存在的技术瓶颈及科学问题,力求从理论创新和方法创新方面,指出当今太阳能热发电技术面临规模化、低成本应用紧迫性的挑战。

1.1 能源可持续发展与可再生能源战略需求

自工业化以来,人类社会主要依赖无节制地开发利用煤、石油、天然气等化石燃料资源以及水、土地、生物质等自然资源。首先将这些化石资源转换成能源,然后再将能源以热和功的形式加以利用,最后治理所产生的环境污染问题,即先污染后治理。这一模式导致奢侈的资源浪费、低效的能源利用和严重的环境污染。例如,中国以煤直接燃烧为主的工业能耗继续处于主导地位。在美国,以石油基燃料燃烧为主的建筑和运输能源消费约占总能量消费的 70%。可以说,这种基于资源、能源利用与环境之间链式连接的“串联”模式,恰恰是阻碍当今能源可持续发展的根本原因,也是造成环境污染、全球气候变化的重要因素。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的《减缓气候变化特别报告 2014》中指出(IPCC, 2014),如果不提高现有能源利用效率或者改善能源结构,预计 2050 年由传统能源消耗的直接二氧化碳排放将达 2010 年的排放水平的三倍以上。

进入 21 世纪,人类逐渐认识到开拓可持续能源新渠道、实施能源多元化的能源环境系统,对实现可持续能源发展具有重要战略意义。人类需要开拓新的化石燃料化学能利用方式或新型的燃烧方式,探索在燃料化学能转化的源头中分离污