



黄树红 张燕平 刘洋 编
Huang Shuhong, Zhang Yanping, Liu Yang

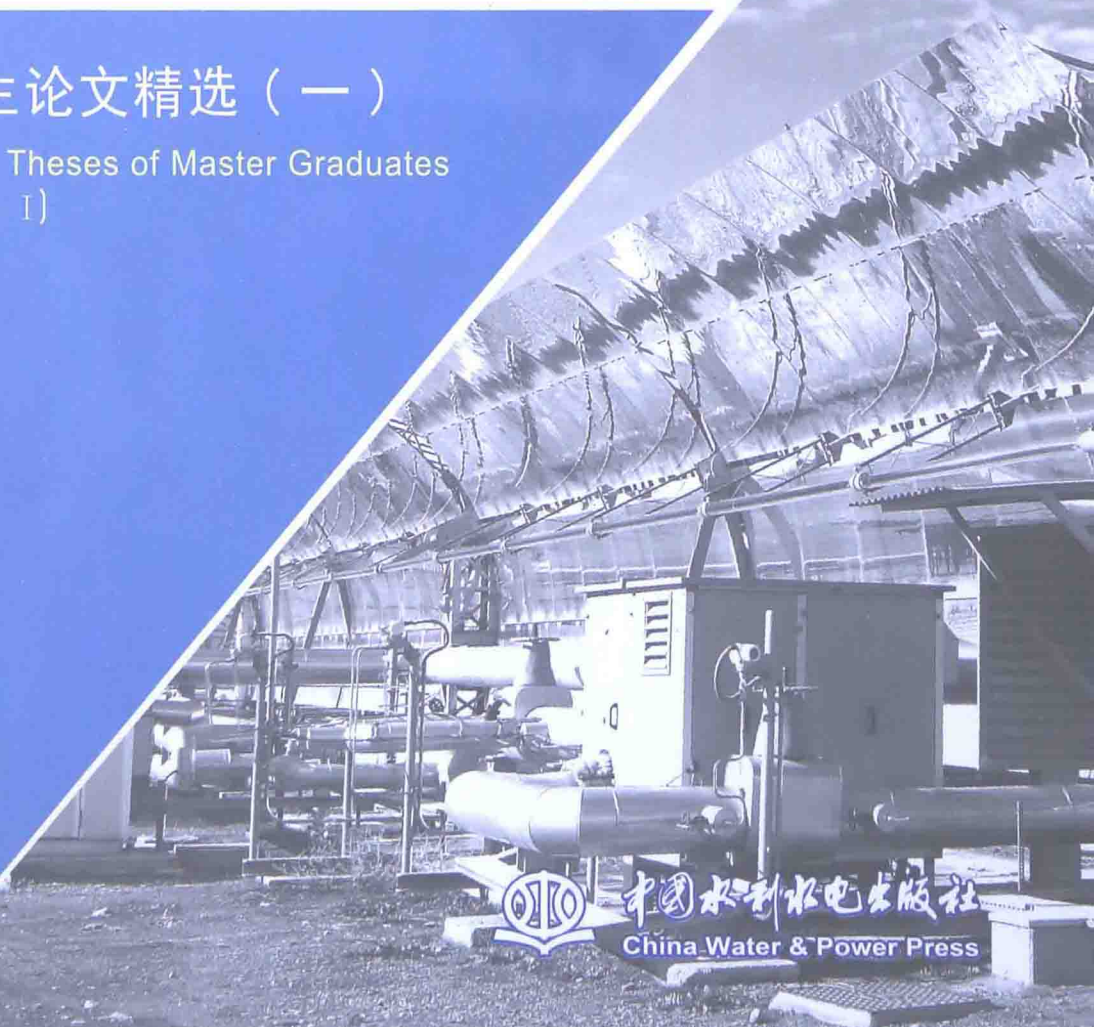
Research for Clean and Renewable Energy
Solar Thermal Utilization

清洁与可再生能源 研究

太阳能热利用

研究生论文精选（一）

Selected Theses of Master Graduates
(Volume I)



中国水利水电出版社
China Water & Power Press



ICARE

华中科技大学中微清洁与可再生能源学院
China-EU Institute for Clean and Renewable Energy
at Huazhong University of Science & Technology

太阳能热利用

黄树红 张燕平 刘 洋 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书收录了近两年中欧清洁与可再生能源学院获得中欧双学位的部分硕士毕业生在太阳能热利用方面的中英文优秀论文。这些论文涉及太阳能制冷、供热及发电等多种利用方式,并探讨系统集成、参数优化以及材料改性等多个方面,是探索培养中欧合璧人才的结晶,体现了中欧导师合作指导研究生的成果。

本书文笔流畅,内容广泛,信息量大,对于高等学校相关专业师生、相关行业的科技人员和管理工作者以及关注这个领域的公众来说,是有价值的参考书。

Abstract

This book is a collection of outstanding theses in both Chinese and English languages, from graduates of the China - EU Institute for Clean and Renewable Energy's (ICARE) double master's degree programme in the recent two years. Concerned with subjects including system integration, parameter optimization, and material modification in utilizations of solar thermal energy including solar-powered cooling, heating and power generation, these theses are fruits of labor from students and their advisors at ICARE, and represent the achievements of China - EU joint-education in energy technologies. The information in this book should prove the value for educators, students, researchers, managers and all people interested in the field of solar thermal utilization.

图书在版编目(CIP)数据

太阳能热利用 : 汉、英 / 黄树红, 张燕平, 刘洋编
— 北京 : 中国水利水电出版社, 2015.3
(清洁与可再生能源研究)
ISBN 978-7-5170-3019-5

I. ①太… II. ①黄… ②张… ③刘… III. ①太阳能
利用—文集—汉、英 IV. ①TK519-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第052408号

书 名	清洁与可再生能源研究 太阳能热利用
作 者	黄树红 张燕平 刘 洋 编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010)68367658(发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 29.25印张 794千字
版 次	2015年3月第1版 2015年3月第1次印刷
定 价	74.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

编 委 会

(Editorial Committee)

主 任 (Directors of editorial committee)

黄树红 胡 松 Dider Mayer

委 员 (Committee members)

(按首字母排序)

Alain Thorel	Amaya Martinez	Antonia Gil	Antonio Valero
蔡顺康	陈 娣	陈 刚	陈汉平
程 强	程晓敏	Christian Beauger	Cristobal Cortes
Dong Wei	Edward Bentley	Enrico Bocci	Enrico Pandeli
Floryan De Campo	George Caralis	Georges Kariniotakis	
何 刚	黄素逸	黄亚继	黄云辉
胡 辉	胡 茜	胡平放	Hubert Thieriot
Ian Forbes	Inmaculada Arauzo		Joaquim Nassar
Laurent Fulcheri	Laurent Catoire	黎 斌	李 箭
李敬东	李学敏	廖奇志	林一歆
刘劲松	刘 洋	Luis Romeo	罗小兵
Michel Aublant	Michel Farine	Pere Roca i Cabarrocas	
Philippe Barboux	Pier Ugo Foscolo	蒲 健	Reddy Kotte
Robert Miles	舒水明	舒朝晖	Stephen McPhail
Takis Chaviaropoulos	Vasileios Riziotis	王 军	谢春华
徐静平	闫云君	杨 晴	杨海平
杨君友	姚 洪	易 辉	曾祥斌
张军营	周文利	邹雪城	邹旭东

丛书主编 (Chief editors of serial books)

黄树红 胡 松 Dider Mayer

前 言

清洁与可再生能源包括太阳能、风能、生物质能、地热能、海洋能以及清洁利用的传统能源等。随着传统能源日益紧缺和对环境带来的压力,清洁与可再生能源的开发与利用得到世界各国的广泛关注,越来越多的国家颁布了鼓励发展的政策和措施,清洁与可再生能源的产业规模和对社会发展的影响力正在不断增强,是进一步促进绿色经济以及社会可持续发展的重要因素。中国和欧盟都是世界上的主要经济体,也是主要的能源消费经济体,双方在能源领域的合作对世界的可持续发展有重大意义。

华中科技大学中欧清洁与可再生能源学院(China-EU Institute for Clean and Renewable Energy,简称 ICARE)是由中国政府和欧盟委员会共同发起建立的中外合作办学机构,得到了中国政府和欧盟资助。是中欧能源合作的一个节点。中国华中科技大学与法国巴黎高科作为牵头大学,联合中国东南大学、中国武汉理工大学、意大利罗马大学、西班牙萨拉戈萨大学、希腊雅典国家技术大学、英国诺森比亚大学、法国佩皮尼昂大学等共6个国家9所重要大学和国际水资源办公室共同创办该学院。学院旨在为清洁和可再生能源领域培养高素质人才,搭建中国和欧洲的专家、学者和研究机构长期深度合作的平台,满足中国经济社会可持续发展以及中国融入世界可持续发展对清洁与可再生能源人才和技术日益增长的需求。学院于2012年3月获得中国教育部批准,正式启动办学,已培养了一批能源领域的中欧双硕士毕业生。

《清洁与可再生能源研究》丛书是一套集合了中欧清洁与可再生能源学院双硕士毕业生中英双语优秀学位论文的论文集。本套丛书包含太阳能热利用、太阳能电池、风能、生物质能、新型电池及电池材料、能源效率等。中欧清洁与可再生能源学院成立以来,已经有100多位中国教授和60多位欧洲教授在学院授课和指导研究生。本丛书反映了这些中国与欧洲学者和他们指导的学生现阶段在清洁与可再生能源方面从事的工作,是探索培养中欧双硕士人才的成果展示,也是中欧导师合作指导研究生的结晶。希望此丛书的出版,能勉励中欧清洁和可再生能源学院毕业生勇于承担时代赋予的使命与责任,在清洁与可再生能源领域发挥所长,实现自我,为中国与世界的清洁与可再生能源事业与社会的可持续发展做出自己的贡献;同时将他们的研究进展系统地介绍给公众,抛砖引玉,为从事清洁与可再生能源行业的科技人员、管理人员以及大专院校相关专业的学生提供参考。

感谢中国政府和欧盟委员会的资助!感谢中国教育部、商务部、科技部和欧盟驻北

京使团的指导、关心和爱护！感谢中共湖北省委、湖北省人民政府、中共武汉市委、武汉市人民政府的支持和帮助！感谢法国驻华使馆和法国驻武汉总领馆的协助！感谢华中科技大学、巴黎高科、东南大学、武汉理工大学、罗马大学、萨拉戈萨大学、雅典国家技术大学、诺森比亚大学、佩皮尼昂大学、国际水资源办公室的直接领导和参与！感谢华中科技大学相关职能部门和兄弟院系的悉心指教和鼎力合作！

感谢所有参与中欧清洁与可再生能源学院授课、指导学生、面试与答辩、运行与管理的教师、客座专家和工作人员！

感谢所有中欧清洁与可再生能源学院学生贡献的聪明才智！

编委会
2015. 2

Preface

Clean and renewable energy encompasses solar, wind, biomass, geothermal, marine energy and other clean energy sources, as well as traditional energy resources developed using cleaner methods. As the consumption of traditional energy resources and the environmental pollution pressures increase, the development and utilization of clean and renewable energy have received worldwide attention. With increasingly more nations enacting policies that encourage its development, the clean and renewable energy industry has grown fast in scale and influence, becoming an important facilitator of green economic and sustainable development. China and the European Union are both major economies of the world, as well as great energy consumers. China – EU collaboration in energy sectors will play an important part in the world's sustainable growth.

China – EU Institute for Clean and Renewable Energy (ICARE), is an institute jointly initiated, established and sponsored by the Chinese government and the European Union. As a key node in China – EU energy cooperation, ICARE is a collaboration between 9 universities from 6 countries and the International Office for Water. The participating universities are China's Huazhong University of Science and Technology (HUST), Southeast University, and Wuhan University of Technology, and EU's ParisTech, National Technical University of Athens, University of Zaragoza, Northumbria University, Sapienza University of Rome, and University of Perpignan, with HUST and ParisTech functioning respectively as hosts on the Chinese and European sides. The goal of ICARE is to cultivate high quality talents in fields of clean and renewable energy to facilitate a platform for the long – term and in – depth cooperation between Chinese and European professors, experts, researchers and research institutes, and to satisfy the increasing demands for talents and technologies of clean and renewable energy promoted by economic and social development in China. In the March of 2012, ICARE started its operation with the accreditation by the Ministry of Education of China. In the following two years, 100 students have graduated from ICARE with both Chinese and EU master's degrees.

The *Clean and Renewable Energy Research* series is a collection of outstanding master's theses in both Chinese and English languages, from the graduates of the ICARE double master's degree programme. The series consist of volumes dedicated to Solar Thermal Utilization, Energy Storage Batteries, Wind Energy, Biomass Energy, New Type Battery and Battery Material, and

Energy Efficiency. Since its establishment, more than a hundred professors from China and more than sixty professors from EU have lectured and worked as supervisors for master's candidates at the institute. These articles are fruits of labor from students and their supervisors at ICARE, and represent the achievements of China – EU cooperation in the education of energy technologies. It is our hope that with the publication of the book series, ICARE graduates can be encouraged to shoulder the responsibilities of our times, realize their potential in the field of clean and renewable energy, and make their own contributions to the sustainable development of China and of the world. It is also hoped that the series can introduce the works of ICARE to the public, serving as references for educators, students, researchers and managers interested in clean and renewable energy.

We hereby wish to express our gratitude for the financial support of the Chinese government and the European Union, and for the guidance from the Ministry of Education, the Ministry of Commerce, and the Ministry of Science and Technology of China, and the Delegation of the European Union to China and Mongolia. We are grateful for the support from the CPC Hubei Provincial Committee, the People's Government of Hubei Province, the CPC Wuhan Municipal Committee, and the People's Government of Wuhan Municipality, and for the assistance of French Embassy in China and Consulate General of France in Wuhan. We appreciate the direct participation of Huazhong University of Science and Technology, ParisTech, Southeast University, Wuhan University of Technology, Sapienza University of Rome, University of Zaragoza, National Technical University of Athens, Northumbria University, University of Perpignan, and the International Office for Water. We have the same heartfelt gratitude for our colleagues at Huazhong University of Science and Technology, whose help and cooperation are indispensable for the institute's success.

Our thanks to all the professors, teachers, visiting researchers and institute staff who contributed to the courses, supervision, student interviews, examinations, operation and management of ICARE.

Last but not least, our thanks to all ICARE students for their works.

Editorial Committee
2015. 2

目 录

前言

Preface

1

30MW 太阳能冷热电联供系统研究

吴一梅

001

2

基于碳纳米管的太阳能吸附制冷复合吸附剂的性能研究

程 颖

053

3

基于干工质的有机朗肯循环参数优化及太阳能热发电系统设计

吴晓楠

107

4

多周期换热网络的算法研究及其与太阳能热能的整合利用

吴志琳

181

5

Simulation of a Hybrid Solar/Coal Power Plant with Aspen Plus

Wu Yimei

235

6

The Building of the Test Rig for Composite Adsorbent Based Solar Adsorption Refrigeration

Cheng Ying

287

7

Medium-temperature Small Power Solar Based Organic Rankine Cycle Working Fluids Selecting and System Designing

Wu Xiaonan

341

8

Multi-period Heat Exchanger Network Synthesis and Its Integration with Solar Thermal

Wu Zhilin

389

30MW太阳能冷热电联供系统研究

学位申请人：吴一梅

中方导师：舒水明 [华中科技大学]

欧方导师：Laurent Catoire [巴黎高科]

摘 要

过去两百年中建立在化石燃料基础上的能源体系极大地推动了人类的发展，但也带来诸多环境及社会方面的问题。在当前能源危机的时代背景下，太阳能技术获得了世界的密切关注。相对于电驱动空调，溴化锂吸收式制冷利用低温热源制冷回收低温热量，减少了能量损失及电量消耗。应用太阳能技术的冷热电三联产系统可以减少化石能源消耗，增加电网可靠性。

本文在某 30MW 燃煤电站的基础上，根据子系统对温度的不同需求提出太阳能辅助加热及溴化锂吸收式制冷机相结合的冷热电联供方案。首先分析我国各地的太阳能分布及采暖制冷需求关系，发现我国南部地区太阳能辐射相对较小但是制冷需求很大，特别适合利用 $300 \sim 600 \text{ W/m}^2$ 范围内的太阳能来辅助发电及制冷。其次，分析了太阳能集热场系统传递关系，并建立了太阳能场、煤燃烧模块、蒸汽循环模块及溴化锂吸收式制冷模块的数学模型。根据文献中提供的数据建立模型并进行验证及变工况分析。结果显示各模块模型误差较小，结果可靠。当太阳能辐照强度较低时，传热工质进口温度升高将导致集热场净效率降低。最后，基于集热场流量约束考虑，提出针对不同辐照强度应采用不同的运行工况：无光照工况、光照不足工况及光照充足工况。结果显示，在无光照工况下，随着吸收式制冷机组抽取的蒸汽量增加，系统发电量降低，但是一次能源利用效率及化石能源节约率升高；在光照不足工况下，集热场进出口参数设为 $110^\circ\text{C}/200^\circ\text{C}$ ，随着光照的增强，系统的一次能源利用效率及化石能源节约率均上升；在光照充足工况下，集热场进出口参数设为 $293^\circ\text{C}/391^\circ\text{C}$ ，随着光照的增强，系统的发电量增加，当 $\text{DNI} = 0.9 \text{ kW/m}^2$ 时，系统的发电量可以增大 8.2MW。

本文工作独特之处在于针对不同光照强度提出了不同的系统集成方式并讨论其技术可行性，可以对光照强度不高但是制冷需求较大的南方地区的冷热电系统发展提供参考。

关键词：太阳能；冷热电联产；吸收式制冷

目 录

摘要 3

1 绪论 9

1.1 研究背景与意义 9

1.2 研究应用现状及发展趋势 10

1.3 模拟软件介绍 12

1.4 主要研究内容 12

2 太阳能集热系统研究 14

2.1 太阳能资源介绍及选址 14

2.2 太阳能集热场介绍 15

2.3 太阳能集热场模型建立及变工况讨论 18

2.4 本章小结 22

3 30MW 燃煤发电系统研究 23

3.1 电站介绍 23

3.2 燃烧部分 25

3.3 蒸汽循环 27

3.4 本章小结 31

4 蒸汽双效溴化锂吸收式制冷循环 32

4.1 热驱动制冷系统介绍 32

4.2 蒸汽双效并联吸收式制冷循环模型的建立 33

4.3 本章小结 36

5 30MW 太阳能冷热电联供系统研究 37

5.1 工况描述 37

5.2 评价指标 38

5.3 变工况分析 39

5.4 本章小结 44

6 总结与展望 45

6.1 总结 45

6.2 展望 45

参考文献 47

附录 50

图 1-1	中国能源消耗比例·····	9
图 1-2	冷热电联产系统与分布式能源系统的关系 ·····	10
图 1-3	冷热电联产系统策略图 ·····	13
图 2-1	深圳 1~12 月平均气温、平均最高气温和平均最低气温 ·····	15
图 2-2	1973~2002 年深圳标准日太阳直射辐射量 ·····	15
图 2-3	30MW SEGS VI 太阳能发电站的原则性热力循环图 ·····	17
图 2-4	SEGS VI 集热场布局 ·····	17
图 2-5	换热元件的传热分析 ·····	18
图 2-6	集热场模型 ·····	19
图 2-7	4 月单位面积集热器上能量分布 ·····	19
图 2-8	10 月单位面积集热器上能量分布 ·····	19
图 2-9	集热场出口温度不变时单位面积热量随进口温度变化的趋势 ·····	20
图 2-10	出口温度及环境温度改变时集热场热效率的变化趋势·····	20
图 2-11	传热介质吸热量与其流量随 DNI 变化的趋势 ·····	21
图 2-12	集热场热效率随 DNI 变化的趋势 ·····	21
图 2-13	进出口温差为 100°C 时集热场热效率变化趋势 ·····	22
图 3-1	30MW 机组热力循环图 ·····	23
图 3-2	非常规组分煤的成分输入 ·····	26
图 3-3	燃烧炉模型 ·····	26
图 3-4	燃炉中各热量随给煤量变化的变化 ·····	26
图 3-5	两股流换热器 ·····	27
图 3-6	两股流换热器模型 ·····	27
图 3-7	回热器原理图 ·····	27
图 3-8	回热器模型 ·····	28
图 3-9	级组原理图 ·····	28
图 3-10	级组模型·····	29
图 3-11	蒸汽循环模型·····	30
图 4-1	吸收式制冷机原理图 ·····	33
图 4-2	吸收式制冷各状态点 ·····	33
图 4-3	高压发生器模型 ·····	35
图 4-4	吸收器模型 ·····	35
图 4-5	双效溴化锂吸收式制冷机模型 ·····	35
图 5-1	无太阳能工况模块连接方式 ·····	37

图 5-2 太阳能不足工况模块连接方式 38

图 5-3 太阳能充足工况模块连接方式 38

图 5-4 无光照情况下冷热电系统的连接图 39

图 5-5 吸收机组热源变化对汽轮机抽汽参数影响 40

图 5-6 各级组做功量随热源蒸汽流量的变化情况 40

图 5-7 系统各性能参数随热源蒸汽流量的变化情况 41

图 5-8 一次能源利用率及化石能源节约率随 DNI 的变化情况 42

图 5-9 太阳能辅助加热时的系统连接图 43

图 5-10 系统性能参数随太阳能辐照强度的变化情况 43

表 目 录

表 2-1	太阳能资源分布表	14
表 2-2	4 种主要聚光型太阳能集热技术	16
表 2-3	SEGS VI 的参数	18
表 2-4	太阳能集热场模型验证	19
表 3-1	锅炉煤质	24
表 3-2	汽轮机运行参数	24
表 3-3	额定工况下各级组参数	24
表 3-4	抽汽模拟计算结果与参考值的对比	30
表 3-5	换热器端差计算值	31
表 3-6	热流及冷流	31
表 4-1	吸收式制冷及概况	32
表 4-2	溴化锂制冷机参数	33
表 5-1	工况基本情况	37
表 5-2	系统在不同条件下的性能状况	40
表 5-3	变工况条件下系统能量及性能参数	41
表 5-4	变工况条件下系统能量及性能参数	43
附表 1	集热器光学参数及参考值	51
附表 2	真空状态下的参数	52

