



国际电气工程先进技术译丛

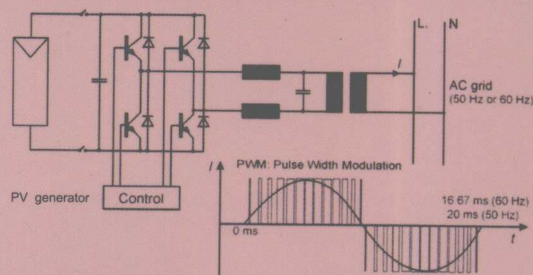
太阳能发电 — 光伏能源系统

**Solar Electric
Power Generation
— Photovoltaic
Energy Systems**

(德) Stefan Krauter 著

王 宾 译
董新洲

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

太阳能发电-光伏能源系统

(德) Stefan Krauter 著

王 宾 董新洲 译



机械工业出版社

本书从实际应用的角度全面介绍了光伏发电系统,主要分为三部分:第一部分,包括第1~5章,介绍了太阳能基础知识和光伏发电系统的基本构成、现场安装等技术问题;第二部分,包括第6~9章,通过研究组件生产、运行维护和循环再利用的整个生命周期中光伏发电系统的能量平衡,详细阐述了光伏发电对二氧化碳减排的积极作用;最后部分给出了提高光伏发电系统运行特性的具体措施。另外,附录中提供了光伏发电中常用的指标参数和丰富的实测数据。

本书阐述的理论分析方法,对科研院所、大专院校、设备制造商的研究分析工作有重要的借鉴价值;同时,该书也十分有利于政策指导机构以及相关的银行基金组织研究太阳能光伏发电的现状与未来。

Translation from the English language edition: Solar Electric Power Generation-Photovoltaic Energy Systems by Stefan C. W. Krauter.

Copyright© 2006 Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Springer is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights 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 01-2007-5080 号

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能发电-光伏能源系统/(德)克劳特(Krauter, S.)著;王宾,董新洲译. —北京:机械工业出版社, 2008. 4

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Solar Electric Power Generation-Photovoltaic Energy Systems
ISBN 978-7-111-23649-8

I. 太... II. ①克... ②王... ③董... III. 太阳能发电
IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 031890 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:付承桂 版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉
封面设计:马精明 责任印制:洪汉军
北京汇林印务有限公司印刷

2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷
169mm × 239mm · 13.25 印张 · 256 千字
0001-4000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-23649-8
定价: 30.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010)68326294
购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010)88379764
封面无防伪标均为盗版

译者的话

您可能早已听说过了太阳能发电技术，甚至亲身感受过了太阳能电力，但是太阳能是如何转变为电力的？为什么我们要积极地推动太阳能发电技术的快速发展？

在本书中，会给您一个全面的、通俗易懂的答案。不要担心您没有深厚的光学、热学、电学专业知识，本书的一个最大特点就是虽然全面介绍了光伏发电系统的各个方面，但是并没有过多地关注技术细节，而是从实用的角度探讨了光伏发电系统的技术特点和应用价值。

与其他介绍太阳能发电书籍的不同之处在于，这本书还研究了光伏发电系统整个生命周期中的能量平衡问题，详细阐述了光伏发电对二氧化碳减排的积极作用，重要的是定量地给出了生产应用中各个阶段的减排效果，因此如果您关注于环保问题，我相信这本书也会给您提供很大的帮助。

这本书还有一大特点，其包含了非常丰富的举例、图片和数据列表。书末给出的详尽的参考文献，对于研究太阳能光伏发电领域的读者来说，会起到极好的引导作用。

原书中存在的一些明显的笔误或印刷错误，在翻译过程中已经改正但有些未加以说明。原书的部分符号不符合我国的使用习惯或国家标准，为保持与原书一致，翻译过程中没有加以改变。

最后，特别感谢北京紫光测控有限公司宋洁工程师、清华大学电机系丁磊博士后、青岛供电公司农电处宋海锋工程师所做的部分翻译及校对工作。

由于译者水平所限，难免出现差错，敬请读者指正。

译者

钟英京·凡群祺

丁磊博士，宋海锋

2002年10月10日于北京

原 书 前 言

当前，全球都在密切关注着能源储备问题。最近几年电力需求呈指数方式增加，如果人类对煤、石油、天然气的需求保持线性增长的趋势，那么每个国家都必须关注：本国的化石能源能维持多久？地球上，除了煤、石油之外，还有什么其他能源可以使用？因此，全世界都应该积极开发其他形式的能源，来增加煤炭的储备。

摘自 1950 年 8 月 5 日《自然》

1. 如果地球上人口增长、社会工业化、环境污染、粮食生产以及能耗增加等发展趋势保持不变，地球人口的增长只能持续 100 年。随后，最可能的结局是人口以及社会工业化水平的骤然失控性下降。

2. 改变这种增长趋势，建立生态和谐、经济性、可持续性的稳定社会环境是可以实现的。全球平衡状态可以通过规划，使得每个人的基本物质需要得到满足，每个人有均等机会实现其潜能。

3. 如果人类选择第二种结局，那么越早开始努力，则越可能成功实现。

摘自 1972 年麦道斯 (Meadows) 等“人口增长局限”摘要

《自然》中的文章已经发表了半个多世纪，罗马俱乐部报告摘要也超过了 25 年。经过 20 世纪 70 年代和 80 年代早期的激烈讨论，以前的强烈反对者已经接受了这些观点。甚至，这些曾被称为“恐慌制造”的观点已经成为了常识。尽管技术越来越先进，颁布的环境法案越来越严格，环境会议大量召开以及公众越来越有环保生态意识，但是近十年中全球变暖以及自然灾害的增多已经表明了以前的预测开始变为现实：1998 年是有史以来气温最高的一年，全球平均温度超过了 130 年来的最高温度（见 1998 慕尼黑再保险集团报告）。顺应社会的发展并没有让人类得到更多的满足。本书致力于研究可持续性发展，在此我衷心地感谢在本书创作过程中，给予我极大帮助的专家、朋友：Q-Cells 公司的保罗·格鲁诺博士、施普林格科技出版社的克里斯多佛·鲍曼博士和迪特尔·美科乐博士、纽约大学的基思·帕森，以及相关研究中所有参与的学生们。特别感谢弗朗茨·艾特博士和赫尔曼·谢尔博士为本书作序，以及马丁·格林教授对光伏发电领域研究的贡献。

斯特凡·克劳特

教授、工学博士

2005 年 10 月于里约热内卢、福塔雷萨

原书序言 1 (弗朗茨·艾特博士)

弗朗茨·艾特博士是电视记者、编辑、畅销书作家。曾荣获：2004 年和 1994 年德国太阳能奖，2003 年人权奖，2003 年时事通讯奖，环境在线奖，2002 年最佳商务奖，1997 年欧洲太阳能奖，1992 年金燕环境奖，1987 年本费弗尔奖、卡尔-赫尔曼-弗兰斯奖、德雷塞尔奖，1983 年汉斯-托马勋章，1979 年阿道夫格力莫奖，1978 年巴姆比电视奖。

太阳能可以改变地球

在最近的联合国世界首脑会议上，地球状况被描述为：

- 全球一半人口日均生活费少于 2 欧元；
- 由于饥饿和缺水，每天有 26,000 人口死亡；
- 工业化国家每天消耗的煤、石油、天然气等资源，需要 50 万天才能自然生成；
- 美国每 32h 花费的军费等于联合国的年预算费用；
- 温室效应使每天上百种动植物濒临灭绝；
- 地球每天平均增长 25 万人口；
- 美国最富有的 4 人拥有的财富比全球 10 亿穷人的总财富还多。

人类是否非常疯狂？能否自我救赎？

本书将尝试解答这些重要的未来问题。

今天，我们面临着人类历史上前所未有的来自精神上、经济上以及社会上的挑战。我们已经经历了几次重要的斗争：

- 地球上的能源抢夺；
- 全球性人类与自然界的斗争。

气候变化可能转化为气候灾难，威胁人类的生命安全。全球变暖在最近几个月中给我们带来了：瑞士、奥地利以及德国巴伐利亚的洪水导致数亿欧元损失；东亚的台风使 150 人丧生；美国南部的狂风致数千人丧生以及 2000 亿美元的损失；还有加勒比海地区的狂风频繁。

气候学家令人吃惊地准确预言了这一现象。但是人类并不想深入了解并防治这种灾难。人类的贪婪比我们对自然规律的理解、谦逊以及希望改变它的意愿，更强大。

全球 65 亿人都希望未来能像目前工业化国家 8 亿人一样地幸福生活，我们

知道，地球是无法承受这种负担的。但是历史上发展中国家人民的抗争，已经告诉了我们这种向往美好生活的愿望是无法阻止的。

人类向着太阳、向着自由前进——太阳能时代开始

21 世纪是太阳能时代。在未来的 40 年中，人类可以实现 100% 的可再生能源供电。不再需要中东的石油、西伯利亚的天然气以及澳大利亚的铀。实际上，目前在我们家门口就已经获得了未来能源的载体：太阳、风力、水力、地热能，以及来自农田和林地的生物能。

根据欧盟报告，2050 年全球能源供给分配应当为：

- 40% 太阳能
- 30% 生物能
- 15% 风能
- 10% 水能
- 5% 原油

报告论述了如何达到这种经济、环保、和平并且可持续的能源供给状态。跨国石油公司，比如壳牌、惠普等，已经在向着这种能源供给状态发展。

石油、汽油、煤、天然气等越来越昂贵，而且污染环境；在未来几十年内将耗尽。因此，应明智地改变目前的能源方式。虽然这种转变需要一定的花费，但是如果不变将会付出整个地球为代价。

太阳能、风能、水能、地热能、生物能，可以保证价格合理、长期使用。所有的事情都将从中受益：气候、经济、工作机会、你和我，还有我们的孩子及后代。

目前可再生能源发展迅速。比如：

- 中国 2004 年安装了超过 1800 万 m^2 的太阳能采集板；
- 日本有全球最大的光伏发电企业，创造了大量的工作机会（主要采用德国技术）；
- 德国是全球风机生产和应用的领先者。2005 年德国电力的 6% 由风力发电提供；
- 加利福尼亚将在州长阿诺德·施瓦辛格的任期内，实现能源供给的 1/3 为可再生能源；与此同时，菲律宾将达到 40%；
- 巴西使用可再生原料，已经生产了超过 25% 的汽车燃料。

这种能源方式的转换能否得到财政保障？

可再生能源发电的经济优势是太阳、风力、水力、地热可以长期免费使用，而且可以随时随地使用，不需要复杂的地质变换过程。目前的关键是新能源转换

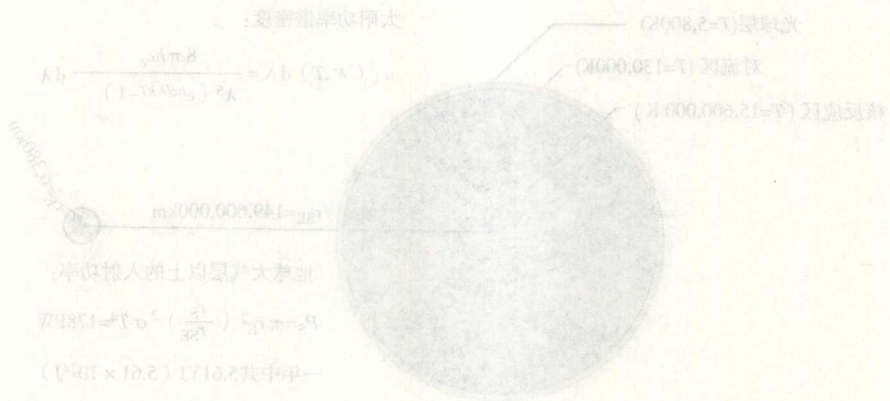
技术。相关设备的价格自 1995 年以来已经下降了 50%，而与此同时，传统能源的价格却增长了一倍。目前，燃烧木块的费用已经达到了燃油费用的一半。

在斯特凡·克劳特博士的这本著作中，你会遇到更多类似的让人吃惊的例子。本书以及 RIO6 会议的宗旨是：

太阳能可以改变我们的星球，太阳能时代已经开始！

弗朗茨·艾特博士
2005 年 10 月于巴登-巴登
www.sonnenseite.com

太阳的直径为 1,392,700 公里，质量是地球的 333,000 倍。太阳的密度为 1.4 克/厘米³，比水的密度略大。太阳的表面温度为 5,800 K，核心温度为 15,000,000 K。太阳的寿命约为 100 亿年，目前已处于主序星阶段，约在 46 亿年前形成。太阳的能量来源于核聚变反应，每秒将约 600 万吨物质转化为能量。太阳对地球的影响至关重要，提供了光和热，驱动了地球的气候系统和生命活动。



太阳是一个巨大的等离子体球，其核心温度高达 1500 万开尔文。在核心区域，氢原子核通过核聚变反应结合成氦，释放出巨大的能量。这些能量以光子的形式向外传播，经过多次吸收和再发射，最终以可见光和红外线的形式到达地球。太阳的引力场对太阳系内的行星和彗星起着主导作用。太阳风是由太阳外层大气逃逸出的带电粒子流，它对地球的磁场和大气层产生影响。

光与热的传递——太阳辐射

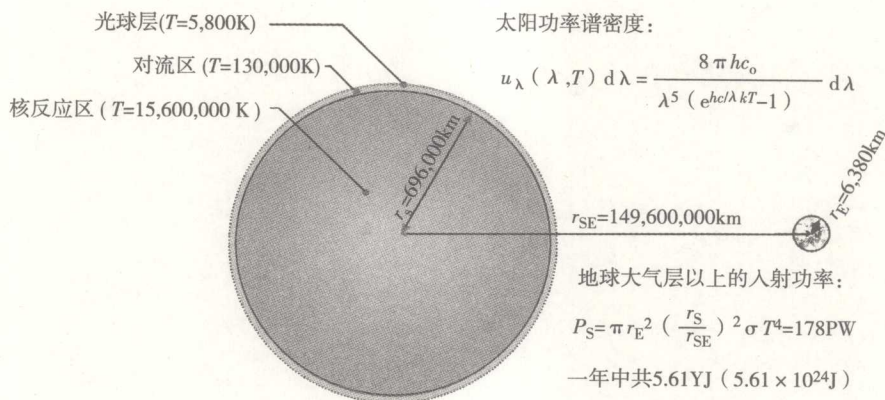
太阳辐射是太阳以电磁波的形式向周围空间传递能量的过程。辐射的能量主要集中在可见光和红外线波段。地球接收到的太阳辐射能量是维持地球生命和气候系统的基础。不同纬度的地区接收到的辐射能量不同，导致了气候的多样性。太阳辐射的强度还受到大气层和云层的影响。

原书序言2（赫尔曼·谢尔博士）

赫尔曼·谢尔博士为自1980年德国联邦议会连任议员，欧洲可再生能源协会主席，2001年世界可再生能源理事会常务主席。曾荣获：1998年全球太阳能奖，1999年诺贝尔环境奖，2000年全球生物能奖，2002年时代杂志绿色世纪风云人物奖，2004年全球风能奖以及全球可再生能源领导力奖。

太阳能

地球94%的能源由太阳提供：它温暖地球的表面以及大气层，使地表温度从外太空的 -273.2°C 升至平均温度 14.5°C ，保证了地球生命的存在。



如果没有太阳，地球温度将接近绝对零度，地球也将只是太空中的一个死亡星体，到那时人类要生存，则需要目前日均消耗能量的15倍还多，地球上的化石能源将在几年内就完全耗尽。

实际上，地球上的化石能源，像煤、石油、天然气等，均是通过光合作用储存的太阳能。地球花费了上亿年的时间吸收太阳能，生成化石能源，却仅仅能够维持200年的工业化人类文明。

光伏转换——太阳能最佳使用方式

通过太阳光辐射到电力的直接转换——光伏转换，太阳能发电使人类以一种清洁、持久、适用性强的方式来利用太阳光辐射。目前的商业化光伏转换可以实

现入射光 15% 的转换, 使用寿命 30 年。

本书提供了大量的信息, 涉及人类导致的气候变化, 不同情况下光伏发电对温室气体减排的作用 (并网发电或独立运行, 在热带地区以及欧洲中部的应用), 以及光伏发电系统的生命周期分析, 同时也介绍了元件的循环再利用等问题。本书的结论均基于精确的建模, 以及相应的光伏发电系统实际出力计算。模型考虑了入射光线到光伏电池板的各个层面折返射、光伏发电模块的温度布局设计以及热量传递机理、实际的光电转换效率等各个因素, 实现了光伏发电模块的准确出力计算以及性能优化, 从而降低了发电成本。

书中的表格数据对于光伏发电专业人员, 物理、工程、环境等专业的学生而言十分有价值, 同时也适用于对光伏发电感兴趣的所有人。

1	赫尔曼·谢尔博士	1
2	2005 年 11 月于柏林	1
4	变光全向角号知升降二	1.3
7	断部群断升降二	1.4
7	断部主再可断部断升	1.2
10	断部断升断升	1.6
11	变光断升断升	1.7
11	变光断升	1.7.1
11	变光断升	1.7.2
11	变光断升	1.7.3
12	变光断升	1.7.4
13	变光断升	1.7.5
13	变光断升	1.7.6
14	变光断升	1.7.7
19	变光断升	1.7.8
20	变光断升	1.7.9
25	变光断升	1.7.10
25	变光断升	1.7.11
25	变光断升	1.7.12
25	变光断升	1.7.13
25	变光断升	1.7.14
24	变光断升	1.7.15
24	变光断升	1.7.16
24	变光断升	1.7.17
24	变光断升	1.7.18

目 录

译者的话

原书前言

原书序言 1 (弗朗茨·艾特博士)

原书序言 2 (赫尔曼·谢尔博士)

第 1 章 绪论 1

1.1 全球能源消费现状 1

1.2 人类的二氧化碳排放 2

1.3 二氧化碳导致的全球变暖 4

1.4 二氧化碳减排监测 7

1.5 传统能源与可再生能源 7

1.6 能源转换原则 10

1.7 本书采用的分析方法 11

1.7.1 生产方法 11

1.7.2 发电能力 11

1.7.3 能量平衡 11

1.7.4 系统优化 12

第 2 章 光伏转换 13

2.1 发展简史 13

2.2 光伏效应 14

2.3 光伏发电装置 19

2.3.1 电气特性 20

2.3.1.1 等效电路 21

2.3.1.2 旁路二极管 22

2.3.1.3 电力终端 23

2.3.1.4 并联连接 23

2.3.2 机械特性 24

2.3.2.1 层压结构 24

2.3.2.2 装配 24

2.3.2.3 安装固定	25
2.4 光伏发电装置运行特性	26
2.5 光伏模块的安装	26
2.6 光伏发电系统的发展方向	28
2.7 光伏发电的研究资助	30
2.8 光伏发电的市场开发	31
第3章 逆变器	35
3.1 独立光伏发电系统	35
3.2 并网型逆变器	35
3.3 逆变器类型	38
3.3.1 他励逆变器	38
3.3.2 自励逆变器	38
3.3.3 脉宽调制 (PWM) 型逆变器	39
3.4 并网	39
3.4.1 电网电压等级	39
3.4.2 并网参数限制	40
3.4.3 远距离输电	40
第4章 储能装置	42
4.1 硫化铅酸电池组	42
4.1.1 基本原理	43
4.1.2 放气	43
4.1.3 相对密度值	43
4.1.4 运行温度	43
4.1.5 自放电	44
4.1.6 深度放电	44
4.1.7 极板硫化	46
4.1.8 铅酸电池类型	46
4.1.8.1 车用电池	46
4.1.8.2 工业用电池	47
4.1.8.3 太阳电池	47
4.1.8.4 工业用电池变种	47
4.1.8.5 免维护电池	47
4.2 其他类型电池	48

4.2.1 镍镉电池	48
4.2.2 镍氢电池	48
4.2.3 锂电池	48
4.2.4 铁镍电池	49
4.2.5 电池性能比较	49
4.3 燃料电池	50
4.3.1 基本原理	50
4.3.2 燃料电池种类	50
4.3.2.1 磷酸型燃料电池	50
4.3.2.2 质子交换膜燃料电池	51
4.3.2.3 熔融碳酸盐燃料电池	51
4.3.2.4 固体氧化物燃料电池	51
4.3.2.5 碱性燃料电池	51
4.3.2.6 其他燃料电池	51
4.3.2.7 再生氢氧型燃料电池	51
第5章 热带地区的光伏发电系统	52
5.1 前期准备事项	52
5.1.1 计划外的特殊考虑	52
5.1.1.1 负荷需求选择	52
5.1.1.2 工程进度与时间限制	52
5.1.2 财政支持	53
5.1.3 进口	53
5.1.4 语言障碍	53
5.1.4.1 与官方沟通	53
5.1.4.2 现场安装	54
5.2 技术问题	54
5.2.1 安装	54
5.2.1.1 光伏发电模块固定	54
5.2.1.2 光伏发电系统接线	54
5.2.1.3 防盗	54
5.2.1.4 安全事项	54
5.2.2 光伏发电非最大功率点运行	54
5.2.3 储能	55
5.2.3.1 电池类型	55

5.2.3.2 额定电压级别	55
5.2.4 功率调节设备	55
5.2.4.1 开关器件	55
5.2.4.2 通风	56
5.2.4.3 充电控制器	56
5.3 运行维护	56
5.3.1 器件污损与老化	56
5.3.2 运行监测	56
5.3.3 其他建议	56
5.4 在热带地区建设光伏发电系统小结	57
第6章 建设光伏电站的能量消耗	58
6.1 序言	59
6.1.1 模型差异	59
6.1.2 等效一次能耗	59
6.2 生产原料的准备	59
6.2.1 矿产开发	59
6.2.2 提炼	60
6.2.3 运输	60
6.2.4 生产准备	61
6.2.5 建筑施工	62
6.3 生产过程中的直接能耗	63
6.4 光伏电池的生产	63
6.4.1 冶金级硅的生产 (MG-Si)	63
6.4.2 冶金级硅到半导体级多晶硅	63
6.4.3 单晶硅的生产	64
6.4.4 半导体级硅到多晶硅的生产	64
6.4.5 硅晶片 (单晶体与多晶体) 的生产	65
6.4.6 单晶硅片到单晶硅光伏电池	66
6.4.7 多晶硅片到多晶硅光伏电池	67
6.4.8 非晶光伏电池的生产	68
6.4.9 其他半导体材料光伏电池的生产	68
6.5 光伏发电模块的生产	69
6.5.1 层压处理	70
6.5.1.1 集成式层压机	71

6.5.1.2 通过式层压机	72
6.5.2 包覆式光伏模块的生产	73
6.5.3 层压式光伏模块的生产	73
6.5.4 输出功率调节	74
6.5.5 支撑结构	75
6.6 安装和运行	76
6.6.1 交通运输	76
6.6.2 安装	76
6.6.3 调试	76
6.7 运行开支	76
6.7.1 清理费用	77
6.7.2 维护费用	77
6.7.3 征地费用	77
6.8 分解费用	77
6.8.1 分解	77
6.8.2 运输	78
第7章 光伏发电	79
7.1 电池入射日照强度模型	79
7.1.1 太阳对地位置	79
7.1.2 太阳光穿过地球大气层的传播路径	81
7.1.2.1 太阳常数	81
7.1.2.2 地表日照强度	82
7.1.2.3 直接辐射	84
7.1.2.4 散射辐射	84
7.1.2.5 反射率	86
7.1.2.6 欧洲中部的年辐射分布	87
7.1.3 光伏发电模块的光学模型	87
7.1.3.1 表层光学接口	88
7.1.3.2 模板的透光度	91
7.1.3.3 内部传播和反射	93
7.1.3.4 双层模板的透光度	93
7.1.3.5 三层模板的透光度	95
7.1.3.6 多层模板的透光度	96
7.1.3.7 仿真结果	96

7.2 实际电池运行温度模型	99
7.2.1 热流输入	99
7.2.1.1 来自天空和大地辐射的热输入	100
7.2.1.2 外界气温的热输入	100
7.2.1.3 太阳辐射的热输入	101
7.2.2 模块内部的热量传递	101
7.2.2.1 温度模型的空间设计	102
7.2.2.2 模块内部静态热流	102
7.2.2.3 模块内部非稳态热流	103
7.2.3 热损耗	104
7.2.3.1 与天空和大地发生的辐射散热	104
7.2.3.2 大气温度的决定因素	106
7.2.3.3 自然对流散热	107
7.2.3.4 强制对流散热	109
7.2.3.5 自然和强制对流的总散热	110
7.2.4 模型计算	110
7.2.5 热力建模的验证	112
7.3 电气部分建模	113
7.3.1 电流	113
7.3.2 其他电气参数	114
7.4 光伏发电并网	114
7.4.1 逆变器建模	114
7.4.2 设计光伏电站的限制因素	115
7.5 系统规划	116
7.6 光伏发电系统的发电量举例	117
第8章 循环再利用带来的能量输入	118
8.1 物质成分分解	118
8.2 再生能量输入	119
第9章 全局能量平衡	121
9.1 能量转换损耗	121
9.2 能量平衡模型	121
9.3 输入-输出分析	122
9.4 进程链分析	123

9.5 光伏发电对二氧化碳减排的效果	124
9.5.1 单位排放平衡	125
9.5.2 德国光伏发电在二氧化碳减排中的作用	126
9.5.3 安装地点的变化	127
第10章 系统优化	131
10.1 光伏电池入射光照强度的提高	131
10.1.1 太阳追踪法	131
10.1.2 减少光反射法	132
10.1.2.1 光伏发电模块的表面构建	132
10.1.2.2 选择性构建	132
10.1.2.3 改进模块表层的折射系数匹配度	135
10.1.2.4 加抗反射涂层	135
10.2 减少安装费用	135
10.3 替换建筑材料	137
10.3.1 太阳能屋瓦	137
10.3.2 太阳能阳面墙	137
10.4 光伏发电模块的热特性改进	140
10.4.1 热带条件下实际运行的电池温度	140
10.4.2 光伏电池模块降温初探	140
10.4.3 光伏电池模块散热方案的改进	142
10.4.4 试验测试	143
10.4.5 TEPVIS 在非洲的建造、运行和测量	144
10.4.6 集成型家用光伏发电系统 (I-SHS)	145
10.4.6.1 系统合成	145
10.4.6.2 系统成本平衡	150
10.4.6.3 I-SHS 的优点	150
10.4.6.4 发展前景	150
第11章 结论	151
附录	153
附录1 符号和缩写的列表	153
附录2 数据表格	161
参考文献	183