

融合教材

太阳能发电 原理及应用

郭苏 张恽 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

融合教材

太阳能发电 原理及应用

郭苏 张恽 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书系统阐述了太阳能光伏、光热技术的基本科学原理及实际工程应用，主要内容包括：太阳能资源相关基础知识，太阳能光伏电池工作原理及发展，太阳能光伏电站系统设计及优化，太阳能光热发电原理及工程光学设计，太阳能光热电站聚光集热部分设计及优化，各类太阳能储能技术等，理论联系实际，注重应用科学理论解决实际工程问题。

本书既是新能源科学与工程相关专业的教材，也可用作从事太阳能利用相关领域的科研和工程技术人员的参考书。

图书在版编目（C I P）数据

太阳能发电原理及应用 / 郭苏, 张恽编著. — 北京:
中国水利水电出版社, 2021. 5
ISBN 978-7-5170-9583-5

I. ①太… II. ①郭… ②张… III. ①太阳能发电—
研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第086755号

书 名	太阳能发电原理及应用 TAIYANGNENG FADIAN YUANLI JI YINGYONG
作 者	郭苏 张恽 编著
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 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	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	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.25印张 347千字
版 次	2021年5月第1版 2021年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	62.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序



P R E F A C E

随着能源与环境问题的日益紧迫，可以预见人类社会的发展将在很大程度上依赖于可再生能源技术。太阳能发电技术主要涵盖光伏发电与光热发电，该技术可以将取之不竭的太阳能转化为电能，是可再生能源中最具发展潜力的技术，有望成为未来电力能源的主体。

光伏发电技术的原理是半导体材料的光生伏特效应，能量等于或高于半导体带隙的光子被吸收并转化为载流子，直接产生电力。基于半导体二极管结构的太阳电池，正是依赖于这种十分简洁而且低熵值的运作方式产生电能。光伏发电技术发展十分迅速，无论是已经实现大规模产业化的硅太阳电池，基于Ⅲ-V族半导体的高效率聚光电池，还是基于碲化镉、钙钛矿等材料的新一代薄膜太阳电池，都在一次次技术变革中更接近理论极限。

然而，对于低于或远高于半导体带隙的光子而言，太阳电池无法将其能量有效转化，由此产生的热也无法被利用。此时，光热发电技术可以有效弥补对太阳能转化过程中的这种相对“低品质”的热能利用的不足。事实上，根据热力学原理，只要通过聚光设计并且合理利用材料的热学性质，光热发电的能量转化效率可以接近甚至超越光伏发电的效率。

无论着手研发哪一类太阳能发电技术，都需要对发电元器件的原理以及整个系统的运作有一个全面的认识。这将涉及多方面的内容，包括最初的如何将太阳光有效收集的光学相关的知识，太阳电池与光热发电装置的设计与原理，以及相关系统所需的储能与电力输送设备的设计等。

由郭苏和张恽等学者精心编著的《太阳能发电原理及应用》一书，对上述关键内容进行了全面与深入的阐述。本书内容翔实、逻辑严谨，同时兼顾太阳能发电的基础理论与最新技术进展，特别适合作为从事太阳能发电研究的科研人员与高校师生了解本领域的参考教材，也可作为制定有关政策所用的参考资料。此外，大力开发利用以太阳能及风能为主要的新能源

是早日实现“2030 碳达峰及 2060 碳中和”战略目标的重要手段之一。本书的出版也可为太阳能利用技术领域相关专业人才的培养提供一定支撑及参考，进一步促进我国太阳能产能事业的健康可持续发展。

相信各位同行与笔者一样能从阅读中受益，最后在此祝贺本书成功出版！

狄大卫

浙江大学 光电科学与工程学院

2021 年 2 月

前言



FOREWORD

太阳能发电是当今可再生能源利用中非常重要的发展方向。光伏发电和光热发电是太阳能发电的两种最主要形式。本书系统全面地讲解了太阳能光伏发电、光热发电所涉及的理论，并在论述基础理论的基础上对光伏发电和光热发电的常见应用进行了介绍。

本书分为三篇共 11 章。第 1 篇介绍了太阳能利用的基础知识，其中：第 1 章为绪论，对太阳能的特性、利用的基本方式、光伏发电和光热发电的发展现状进行了综述；第 2 章介绍了太阳和太阳辐射的相关知识；第 3 章介绍了太阳辐射的透过、吸收和反射现象。第 2 篇介绍了光伏发电原理及其应用，其中，第 4 章介绍了光伏发电原理与太阳电池的相关内容；第 5 章介绍了光伏发电系统的设计与应用。第 3 篇介绍了光热发电原理及应用，其中，第 6 章介绍了光热发电原理，对其各种形式进行了综述和比较；第 7 章介绍了太阳能工程光学设计原理；第 8 章和第 9 章分别对目前较常见的塔式光热电站和槽式光热电站的聚光集热部分进行了详细介绍；第 10 章介绍了光热电站中的储能；第 11 章对具有代表性的商业化光热电站进行了简介。本书第 4 章、第 5 章由张悱编写，第 8 章由郭铁铮编写，其余各章由郭苏编写，全书由郭苏统稿。本书光伏部分内容主要参考了澳大利亚新南威尔士大学光伏与可再生能源工程学院 Martin Green 和 Stuart Wenham 教授撰写的两部经典光伏专业教材 *Applied Photovoltaics* 和 *Solar Cells - Operating Principles, Technology and System Applications*；光热部分内容主要参考了 W. B. Stine 和 R. W. Harrigan 撰写的 *Solar Energy Systems Design* 以及 William Stine 和 Michael Geyer 在此基础上修订的 *Power From the Sun*，J. A. Duffie 和 W. A. Beckman 著、葛新石教授编译的《太阳能—热能转换过程》，以及张鹤飞教授的《太阳能热利用原理与计算机模拟（第 2 版）》，并借鉴了最近十年发表在国内期刊上的大量优秀专业论文以及作者的专著《槽式太阳能直接蒸汽发电系统集热场建模与控制》。

在本书编写过程中，东南大学张耀明院士，河海大学刘德有教授、吴峰教授、许昌教授、王冰教授，青海省电力设计院张玮工程师等在各方面对作者给予了大力支持。研究生裴焕金、何意、宋国涛、王琛等在资料收集、文本整理等方面做了大量工作。河海大学新能源科学与工程专业 2008—2018 级共 11 届本科学生对本书提出了大量宝贵意见。在此，作者对各位教授、专家和学生表示衷心的感谢。河海大学刘德有教授审阅了全部书稿，为本书的完成做出了重要贡献，在此特致敬意。

在本书完稿之际，对书末所附参考文献的作者也致以衷心的感谢。

由于作者学识有限，加之编写时间仓促，书中难免有疏漏及错误，殷切希望读者批评指正。

作者

2021 年 3 月

于河海大学能源与电气学院

目录

CONTENTS

序

前言

第1篇 基础知识

第1章 绪论

1.1 太阳能的特性	3
1.2 太阳能利用基本方式	4
1.3 光伏发电现状	4
1.4 光热发电现状	5
1.5 小结	6

第2章 太阳和太阳辐射

2.1 概述	7
2.2 地球绕太阳的运行规律	8
2.3 天球与天球坐标系	10
2.4 天球坐标系的变换	12
2.5 太阳光线相关角度的定义	13
2.6 日照时间	14
2.7 太阳常数	15
2.8 与太阳辐射相关的名词	16
2.9 地球大气层外水平面上的太阳辐射	16
2.10 大气层对太阳辐射的影响	16
2.11 太阳辐射量的计算	20
2.12 接收器表面的太阳直射辐射	25
2.13 世界及中国太阳能分布简述	25
2.14 小结	26

第 3 章 太阳辐射的透过、吸收、反射及光谱选择性材料

3.1 物体及其表面的光辐射性质	27
3.2 半透明体对太阳辐射的吸收、透过和反射	28
3.3 半透明体的有效透过率、吸收率和反射率	30
3.4 光谱选择性材料	32
3.5 小结	35

第 2 篇 太阳能光伏发电原理及其应用

第 4 章 太阳能光伏发电原理与太阳电池

4.1 光伏效应及太阳电池发展	39
4.2 半导体的物理特性	39
4.3 半导体 p-n 结	45
4.4 太阳电池特性	56
4.5 第二代太阳电池	59
4.6 第三代太阳电池	66
4.7 太阳电池互联和组件装配	69
4.8 小结	77

第 5 章 太阳能光伏发电系统的设计与应用

5.1 光伏系统组成和应用	79
5.2 独立光伏发电系统设计	82
5.3 住宅和集中型并网光伏发电系统设计	91
5.4 光伏系统设计案例	98

第 3 篇 光热发电原理及应用

第 6 章 光热发电原理

6.1 光热发电原理及特点	105
6.2 光热发电形式简介	106
6.3 小结	117

第 7 章 太阳能工程光学设计原理

7.1 几何光学的基本理论	118
7.2 太阳能工程光学设计	119
7.3 小结	134

第 8 章 塔式光热电站的聚光集热部分

8.1 塔式光热电站的聚光器——定日镜	135
8.2 塔式光热电站的吸热器和接收塔	143
8.3 镜场设计	147
8.4 吸热器接收面能流密度分析	151
8.5 能量损失	156
8.6 塔式光热电站举例	156
8.7 小结	160

第 9 章 槽式光热电站的聚光集热部分

9.1 槽式光热发电系统中的聚光集热器	161
9.2 槽式抛物面聚光集热器的光学特性	166
9.3 槽式抛物面聚光集热器的热力学特性	168
9.4 槽式光热电站举例	177
9.5 小结	184

第 10 章 储能

10.1 显热储能	185
10.2 潜热储能	190
10.3 热化学储能	191
10.4 显热储能的成本	192
10.5 小结	193

第 11 章 系统设计实例

11.1 努奥 510MW 光热发电项目	194
11.2 青海共和 50MW 熔盐塔式光热发电项目	198
11.3 德令哈 50MW 槽式光热发电项目	199

11.4 节能敦煌 100MW 熔盐塔式光热发电项目	202
11.5 小结	203

附 录

附录 1 墨尔本水平面上直接和漫射辐射的月平均读数	207
附录 2 部分国家和地区光伏系统安装标准	208
附录 3 正态积分的解析逼近	213
参考文献	214

◆ 第1篇

基 础 知 识

第 1 章 绪论



1.1 太阳能的特性

目前，全人类都面临着同样的能源问题。一方面，经济和社会的可持续发展与环境可承载能力之间存在巨大矛盾，经济和社会的发展离不开能源，而燃烧常规化石燃料会产生大量的二氧化碳，二氧化碳是主要的温室气体。观测资料表明，在过去的 100 年里，全球平均气温上升了 $0.3\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ ，全球海平面平均上升了 $10\sim 25\text{cm}$ ，这就是所谓的温室效应。目前，经济和社会正在迅速发展，但环境的可承载力已接近极限。另一方面，常规能源的不断匮乏与能源需求的急剧增加是当今社会急需解决的主要矛盾。当面临全球污染严重、常规能源近乎枯竭，又急需大量能源的双重矛盾时，全人类达成了共识：依靠科技进步，大规模地开发利用太阳能、风能、生物质能等可再生能源。

与其他形式能源相比，太阳能具有如下明显的优越性：

(1) 储量的无限性。太阳每秒钟向太空放射的能量约为 $3.8\times 10^{23}\text{kW}$ ，一年内到达地球表面的太阳能总量高达 $1.8\times 10^{18}\text{kW}\cdot\text{h}$ ，是目前全球能耗的数万倍。相对于常规能源储量来说，太阳能的储量几乎是无限的，取之不尽，用之不竭。

(2) 存在的普遍性。相对于其他形式能源来说，太阳能对于地球上绝大多数地区具有存在的普遍性，可就地取用。这就为常规能源缺乏的国家和地区解决能源问题提供了美好前景。

(3) 利用的清洁性。太阳能像风能、潮汐能等其他清洁能源一样，在开发利用时几乎不产生二次污染。

(4) 开发的经济性。在目前的技术水平下，相较于其他能源，太阳能的开发利用已经具有一定的竞争力。随着科学技术的不断发展和突破，从中长期角度看，太阳能的开发利用将具有显著的经济性。

鉴于上述特性，太阳能必将在世界能源结构转换中担当重任，成为理想的替代能源。

1.2 太阳能利用基本方式

太阳能利用的基本方式主要包含以下方面：

(1) 光热利用。光热利用的基本原理是将太阳辐射能收集起来，通过与物质的相互作用转换成热能加以利用。主要有太阳能热水器、太阳能干燥器、太阳能蒸馏器、太阳房、太阳能温室、太阳能制冷、太阳灶等等。

(2) 太阳能发电。太阳能发电主要分为光伏发电、光热发电。光伏发电是利用光生伏特效应将太阳辐射能直接转换为电能。光热发电是太阳辐射能—热能—电能的转换，即利用太阳辐射所产生的热能发电。光热发电系统主要包含两部分：一个是光—热转换部分；一个是热—电转换部分。光热转换部分利用聚光器、吸热器等特殊设备将太阳光收集起来，产生很高温度的热能；热电转换部分和普通火电厂很类似。

(3) 光化学利用。光化学利用主要指物质分子吸收了外来光子的能量后会激发某些化学反应。这一部分主要包括太阳能制氢、光化学电池等。

(4) 光生物利用。光生物利用是利用植物的光合作用实现太阳能转换成生物质的过程，包括油料作物、速生植物（如薪炭林）等。

1.3 光伏发电现状

光伏太阳能电池组件由于成本原因最先仅被用于太空卫星的持续供电。随着太阳能电池组件技术和基础配套设备的日趋完善，光伏组件成本逐渐下降并被应用于地面光伏发电。同时，该类电池的能量转换效率在近 30 年内也获得了很大的提高。其中商业太阳能电池组件效率从 20 世纪 60 年代的不到 10% 到 2020 年稳定在 20% 左右，而实验室太阳能电池效率最高已达到 40% 左右。此外，各种太阳能电池材料和结构近年来获得迅猛发展，由此衍生出第二代薄膜太阳能电池和第三代高级概念太阳能电池等。太阳能光伏发电虽然具有高度自动化、工作周期长、无须机械转动等优点，但其持续稳定的工作性能也受到天气、环境温度、空气灰尘等不利因素的影响。此外，在用电量较高的夜晚或弱光环境下，太阳能光伏电站无法工作，而是更多依赖于储能装置或其他形式对负荷提供电能。

在工程应用领域，自 2000 年起，由于可观的光伏补助和政府发展可再生能源的政策，独立光伏项目在我国快速发展，由此带动了一批与光伏相关的上下游产业。主要的发电集团也相继成立了新能源部门参与以太阳能和风能为主的新能源项目建设和设计。

随着国际光伏发电产业日臻成熟，近年来光电成本逐渐降低，全球范围内的光伏补贴呈现退坡态势。然而各国的光伏补贴政策不同，其相关光伏产业发展也大相径庭。2019 年，美国太阳能新增装机量占美国能源新增装机总量的近 40%，达到 13.3GW 是该行业历年以来最大份额，比 2018 年增长了 23%。2015 年日本新增光伏装机量为 10.8GW，而 2019 年日本新增光伏装机容量降至 7GW。2010—2013 年德国每年新增光伏装机达到 7GW，到 2015 年德国光伏新增装机容量仅为 1.3GW 左右。2019 年 3 月 31 日英国正式进

入无补贴时代，光伏发展缓慢，2019年其仅有233.4MW的新增太阳能发电量并入电网，显著低于2018年记录的297.1MW并网装机容量。

中国的太阳能光伏产业链已逐渐成熟。2010年后，在欧洲经历光伏产业需求放缓的背景下，我国光伏产业迅速崛起，成为全球光伏产业发展的主要动力。2019年我国新增光伏并网装机容量为30.1GW，截至2019年年底，我国累计光伏并网装机容量达到204.3GW，继续保持全球第一。

基于我国光伏电站效率不断提升，国内电站成本不断下降，光伏上游企业盈利能力不断增强，电站规模不断扩大的情况，2018年6月我国正式实施光伏补贴下调政策。尽管在政策调整下，我国光伏应用市场有所下滑，但受益于海外市场的增长，我国光伏各环节产业规模依旧保持快速增长势头。在产业制造端各环节，单晶电池和组件产品价格快速下降，体现出了更好的性价比优势，市场需求，尤其是海外市场需求开始逐步转向单晶。单晶产品占比快速提升，2019年单晶硅片市场占比首次超过多晶，达到约65%，同比增加20个百分点；多晶硅片市场占比由2018年的55%下降至2019年的32.5%。同时，铸锭单晶产品在2019年内逐渐进入市场，2019年市场占比约为2.5%。而且，近年来我国光伏产业出口表现亮眼，实现出口额、出口量“双升”。2019年我国光伏产业出口额超过200亿美元，创下新高。其中，组件出口增长最为突出，出口量超过65GW，出口额为173.1亿美元，超过2018年全年光伏产品出口总额。

伴随着光伏组件成本的快速下降，2019年，我国光伏产业开始实现由补贴推动向平价推动的转变，中国开启了平价上网时代。尽管整体光伏市场有所下滑，但我国光伏产业规模依旧稳步扩大、技术创新不断推进、出口增速不断提升，光伏制造企业加速降低光伏发电成本，新技术的应用步伐不断加快，甚至将呈现超预期的发展态势，相信未来光伏发电成本将会进一步降低。经验表明，中国政府的政策导向将在未来一段时间内决定着中国光伏产业的发展水准和市场需求。相信在中国政府的扶持和正确引导下，历经捶打的中国太阳能光伏产业的定会有更加光彩夺目绚丽的明天。

1.4 光热发电现状

太阳能光热发电是目前除水电外唯一的稳定、可控、可靠的可再生能源技术。由于配置大容量、低成本、环境友好的储能系统，太阳能光热发电可以克服太阳能资源的间歇性和不稳定性，实现平稳可控、可调度的电力输出。太阳能光热发电是可以承担电力系统基础负荷的可再生能源发电形式，目前已在西班牙、美国以及中东、北非等国家和地区取得了良好的应用效果。

国际能源署发布的《能源技术展望2010》报告指出，到2050年，太阳能光热发电装机容量将达到10.89亿kW，产生电力占总发电量的11.3%。因此太阳能光热发电有非常广阔的发展空间。

就中国而言，中国正处于经济高速发展时期，能源的消耗量还将大幅增加，但中国的能源储量并不乐观。根据2002年的统计数据，原煤可采114.5年，原油可采20.1年，天然气可采49.3年，人均能源可开采储量更是远低于世界平均水平。由于历史原因，中国

的能源有效利用率非常低。从开采到利用，几乎都还停留在粗放型生产模式，这对环境造成的污染非常严重。中国是全球第二大二氧化碳排放国，也是第一大煤炭消费国，是世界上少有的几个能源结构以煤炭为主的国家。

中国的太阳能资源非常丰富。中国不仅拥有世界上太阳能资源最丰富的地区之一——西藏地区，而且陆地面积每年接受的太阳总辐射能相当于 2.4×10^4 亿 t 标准煤，约等于数万个三峡工程发电量的总和。如果将这些太阳能有效利用，对于缓解我国的能源问题、减少 CO₂ 的排放量、保护生态环境、确保经济发展过程中的能源持续稳定供应等都将具有重大而深远的意义。

“八五”以来，科技部就光热发电系统关键部件在技术研发方面给予了持续支持，“十一五”期间启动了 1MW 塔式太阳能热发电技术研究及系统示范。2013 年，国家高技术研究发展计划支持的青海中控德令哈塔式光热电站一期 10MW 项目示范工程并入青海电网发电，这标志着我国自主研发的太阳能光热发电技术向商业化运行迈出了坚实步伐，为我国建设并发展大规模应用的商业化光热电站提供了强力的技术支撑与示范引领。目前，大规模光热发电技术已有所突破，关键器件已实现国产化、产业化。

2021 年 4 月，国家能源局下发《关于报送“十四五”电力源网荷储一体化和多能互补工作方案的通知》。通知指出，鼓励“风光水（储）”“风光储”一体化，充分发挥流域梯级水电站、具有较强调节性能水电站、储热型光热电站、储能设施的调节能力，汇集新能源电力，积极推动“风光水（储）”“风光储”一体化。明确肯定了储热型光热电站的调节能力，为风光热储一体化多能互补项目配置光热电站释放了积极信号。

1.5 小结

本章主要对太阳能的特性、利用的基本方式、光伏发电和光热发电的发展现状进行了综述，以期帮助读者快速了解太阳能基础知识。