



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

光伏系统工程 原书第3版

Photovoltaic Systems Engineering,
3rd edition

(美) Roger A. Messenger

(美) Jerry Ventre

王一波 廖华 伍春生

著

译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

光伏系统工程

(原书第3版)

(美) Roger A. Messenger 著
Jerry Ventre

王一波 廖 华 伍春生 译



机械工业出版社

本书全面介绍了光伏系统设计方面的工程基础知识,并从电气、机械、审美三方面入手,阐述了与光伏系统设计相关的理论、原因和方法,深入浅出地介绍了能源生产和消费的背景,理解能源供需所用到的数学基础,光伏系统能量捕获、各种关键元件等的相关知识,不同光伏系统设计方法和实施过程。此外,本书附录还给出了典型朝向的光伏阵列输出数据和光伏设计方案推荐格式以供参考。

本书适合高等院校相关专业高年级本科生、研究生,以及国内光伏工程领域的产业技术人员和研发人员阅读参考。

Photovoltaic Systems Engineering, 3rd edition © 2010 by Taylor & Francis Group, LLC.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All Rights Reserved.

本书中文简体翻译版授权机械工业出版社独家出版,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发生本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2010-5972。

图书在版编目 (CIP) 数据

光伏系统工程:原书第3版/(美)梅辛杰(Messenger, R. A.)等著;王一波,廖华,伍春生译. —北京:机械工业出版社,2012.6

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Photovoltaic Systems Engineering (3rd edition)

ISBN 978-7-111-38350-5

I. ①光… II. ①梅…②王…③廖…④伍… III. ①太阳能发电-系统工程 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 098077 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:付承桂 责任编辑:任 鑫 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:马精明 责任印制:张 楠

北京振兴源印务有限公司印刷

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 25.5 印张 · 522 千字

0001-3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-38350-5

定价:98.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版



——我们并非从父辈继承了这个世界，而是借自我们的孩子。（无名氏）

我们非常希望阅读本书的工程师们能够投身于创建一个世界，让子子孙孙拥有可供呼吸的空气和可供饮用的水，让人类和自然能够相互滋养。

译者序

我们首次看到《Photovoltaic System Engineering (2nd Edition)》是在 2008 年，意识到它是学习太阳能光伏系统知识的一本好教材，也是指导工程设计实践的一本重要参考资料。同样在 2008 年至 2011 年期间，我国光伏系统装机容量连年成倍增长，数十兆瓦的大型地面电站和建筑光伏系统不再罕见，表明国内光伏系统已经进入大规模推广应用阶段。因此，当该书推出第 3 版时，我们毫不犹豫地决定完成翻译工作，希望把国外的先进理念和成熟经验引入到我国光伏系统的建设中。重读这本光伏系统工程的经典之作，依然被深深地吸引，书中翔实而全面的知识，简明而令人信服的应用案例都值得认真地分析和研读。本书是由机械工业出版社委托翻译，由中国科学院电工研究所王一波主译，廖华博士和伍春生博士参与翻译，具体分工如下，前言和第 1~3、5、9~11 章由王一波翻译，第 4 章由伍春生翻译，第 6~8 章和附录由廖华翻译，全书由王一波定稿。机械工业出版社付承桂和诸多同志为本书的出版付出了辛勤的努力，在此我们表示诚挚的感谢。

我们衷心希望本书的翻译和出版对于我国光伏系统方面的教学科研和工程实践能有所帮助。由于时间和水平有限，书中难免存在许多不足之处，敬请读者批评指正。

译者
2012 年 5 月

原 书 前 言

本书目标是全面介绍光伏系统设计方面的工程基础，帮助工程师理解与光伏系统设计相关的电气、机械、经济和审美方面的理念（What）、原因（Why）和方法（How）。本书将为工程师提供光伏系统设计方面的知识，使工程师在需要进行工程性判断时，能够基于对各种参数的清晰理解，做出明智的决定。

本书第3版的诞生，缘起于前两版取得了广泛认可，也得益于光伏产业的显著增长和创新，以及作者近5年来在光伏系统设计和安装方面的经验积累，当然也离不开出版商的推动。值得注意的是，美国能源部现在估计在2009年至2017年期间，并网光伏系统将增长14倍。这由多方面因素决定，例如可再生能源激励政策、传统燃料的可用性和价格等。因此，很可能有许多工作机会正在等待着学习本书的人们，这谁又能料到呢？

“理念（What）”问题在本书前三章作为重点，阐述了能源生产及消费的背景，介绍了用于理解能源供给和需求的数学基础，并综述了太阳光谱、太阳定位方法、光伏系统能量最佳捕获、光伏系统的各种元件等方面知识。第2章增加了一节关于赤纬时差图的内容。第3章略有缩减，如果课程只有3学分，则可以在大约第六周时开始实际设计工作。

“原因（Why）”和“方法（How）”问题分布在剩余章节，着重解释为什么特定的光伏系统设计要按照特定方式进行，设计过程又该如何实施。第8章和第9章讨论的经济与环境问题也属于光伏设计准则的“原因”部分。第5章介绍机械和结构设计相关的理论背景，并补充了现实考虑因素。第4、6和7章根据最近的实用技术和设计安装实践，进行了彻底修改和重组。

考虑到直接并网光伏系统是当前市场主流，而直接并网光伏系统的设计恰好也比较容易，章节进行了重新排布，本版第4章完全用于介绍这方面知识。这也使教师可以在课程早期布置相关的设计习题，避开期末考试时间。我们发现如果在期末考试前布置重要的设计项目，学生们更愿意把时间花在设计项目上，然而这段时间应该更重视期末考试，特别是在期末考试占总成绩比重较高的情况下。否则，有可能出现优秀设计师的课程成绩却不高的矛盾现象。

本版书保留了附录A，附录A列出了5个朝向的光伏阵列输出数据，Web网站上现在有任意规定朝向光伏阵列的输出数据可供参考。Web网站略去了该附录，因为我们发现它比设备过时得还要快。附录B列出了用于许可或审查的光伏设计方案推荐格式，作者已经在佛罗里达州广泛使用了该格式。

本书使用了一种改进的自上而下方法,通过设计模式使读者快速了解光伏系统的各个组成模块。甚至第10章的光伏电池物理特性、第11章的电池现状与未来电池也采用设计模式进行介绍,其重点在于如何调整光伏电池参数,使性能得以优化,同时介绍光伏电池工作的物理基础。

由于分析能力对于理解如何进行良好的设计具有基础作用,课外习题也有分析和设计方面的要求。许多习题有多个解,例如“计算你的出生地在你生日那天的日照时数”。我们去掉了一些有关旧技术的课外作业,并增加了大量基于当前技术的新习题。希望这些习题足以让学生加深对相关知识的理解。

我们推荐在第4章结束时,学生能够投入一个全面的设计项目;在第7章结束时,学生能够设计相对复杂的系统。我们建议布置两个设计项目:第4章的直接并网系统,第6章的带蓄电池备用的并网系统。指导教师也可以考虑,在第7章后布置一个独立系统的设计项目,或者用独立系统设计项目取代带有蓄电池备用的并网系统设计项目。

如果要在3学分课程内完成本书所有内容,可能需要略过一些主题,这由指导教师来判断。例如,第4章中的每个设计案例均介绍了一些新内容,但是一些案例可以留给读者作为练习,指导教师仅需要指出案例中有哪些新内容。另外,通过总结每个案例的旧知识,然后介绍新知识,重点强调新概念。

本书章节顺序实际上是为了培养读者在内容相关性和重要性方面的兴趣。题材涵盖的议题十分广泛,从化学到电路分析、电子学、固态设备理论和经济学。本书内容适用于已完成电路和电子学课程的高年级工程专业本科生。

我们认为如果作为学士学位课程,则应再减少学分,当本科生选择选修课程时,可选择的弹性空间将很小。本书内容也可用于研究生初期水平的课程。

虽然本书的初衷是在课堂上使用,重点在光伏系统电气元件。我们也努力使本书足够全面,成为一本有用的参考书,服务于执业工程师。

本书的一名作者曾使用本书第1版讲授过两次因特网课程。完全跟上课程进度的学生们普遍反映,教材非常可读、合理,能够替代讲座。如果通过因特网授课,我们强烈建议经常进行测验,使学生感觉到本课程与线性系统分析课程同样重要。此外,召集非正式讨论会也很有用。

光伏领域正在迅速演变。尽管本书已尽一切努力来提供最新的材料,然而几乎可以确定,当其出版时,其中的一些材料将会过时。对于那些希望不断更新光伏知识的工程师而言,可以利用本书提供的许多参考文献和网站,光伏会议论文集、座谈会、研讨会,以及厂商提供的数据也特别有用。

本书还为工程师提供了知识性工具,用于理解这个快速兴起领域的新技术和新观念。作者希望,在每4.6837名学生中至少有1名学生将为丰富光伏知识做出他(或她)自己的贡献。

本书对于某些材料的表述尽管可能比较有趣或实用，但有可能过于实际，我们首先致以歉意。我们充分认识到，工科学生希望工程类课程具有较高的理论性和少量的实际案例。我们已经尽力融入厚重的理论知识，来满足这种希望。

下面的网站提供额外的材料及更新：<http://www.crcpress.com/product/isbn/9781439802922>。

致 谢

如果没有朋友、家人和同事们的鼓励、指导与帮助，我们相信承接并完成这样一项工作几乎是不可能的。

对于这个版本，我们再次询问了许多人许多问题，收集到了与主题相关的广泛信息。最有价值的信息来源于美国国家可再生能源实验室（NREL）和圣地亚国家实验室（SNL），以及各种光伏系统组件的制造商和经销商，包括 SolarWorld 公司、SunPower 公司、Xantrex 公司、Outback Power Systems 公司、Satcon 公司和 Direct Power and Water 公司。我们深信，如果继续询问，还能够获得更多合作和资料。当然，学生们对本书第 2 版的反馈意见也提供了重要参考，使我们更加清楚如何使材料容易理解。希望我们实现了这个目标。

特别感谢 VB Engineering 公司 Kimandy Lawrence 在正常工作时间内外针对特定系统相关细节进行多次讨论，包括但不限于交流耦合的蓄电池备用系统、微逆变器系统和其他实验性设计。此外，特别感谢 Christian Smith 和 Tom Bennett 在解决新的课后习题方面所做的工作。

最后，感谢 Nancy Ventre 和 Jane Caputi 鼓励我们完成了手稿工作，而不是打高尔夫球、网球或看电视。

Roger A. Messenger
Jerry Ventre

关于作者

Roger A. Messenger 博士，美国博卡拉顿市佛罗里达大西洋大学电气工程名誉教授。他获得美国明尼苏达大学电气工程专业博士学位，并且是注册专业工程师、注册电气承包商和 NABCEP 认证的光伏安装商，他喜欢现场安装工作，同样也喜欢讲授课程、系统设计或思考系统运行原理。他的研究工作范围从气体放电管的电子噪声，到用于能量保存方面的硅材料深度掺杂。他曾参与佛罗里达州建筑施工能源效率初始规范开发和发布工作，并进行了建筑物与游泳池能耗与储能的扩展领域研究。

自 2005 年 Roger A. Messenger 博士从佛罗里达大西洋大学退休，他担任了博卡拉顿市 VB Engineering 有限公司的副总裁。VB Engineering 的工程团队至今已完成数百个光伏设计项目，包括佛罗里达州奥兰多市奥兰治县会议中心屋顶的 5808 块组件、占地 4acre^① 的 1MW 系统。他还一直活跃在美国佛罗里达州太阳能工业协会和可再生能源佛州联盟，并且是美国能源部的评审专家，他还是佛罗里达州太阳能中心政策咨询委员会委员。他还曾召集多次关于光伏系统设计、安装和检验的研讨会。

Jerry Ventre 博士，光伏系统工程顾问，在系统设计、产品认证和劳动力开发方面具有专长。他曾领导中佛罗里达大学佛罗里达太阳能中心的光伏和分布式发电项目 25 年。在此期间，他还负责为美国能源部管理光伏东南区域试验站。他在辛辛那提大学航天工程专业取得学士、硕士和博士学位，拥有超过 35 年的研究、开发、设计和系统分析经验。他曾服务于辛辛那提大学和中佛罗里达大学的航天工程团队，是一位注册专业工程师，他曾讲授过许多课程，并任教研究生水平的光伏系统课程。他曾为通用电气公司先进发动机技术部设计固体火箭发动机和喷气发动机，并为美国航天局、国家再生能源实验室、桑迪亚国家实验室、橡树岭国家实验室、美国海军、美国联邦航空局和美国能源部等许多机构实施研究工作。他拥有超过 150 个技术性出版物，一直活跃在技术协会，并因在工程和工程教育方面的贡献获得了众多奖项。

① 1 acre = 4046.856m²，后同。——译者注

目 录

译者序

原书前言

致谢

关于作者

第1章 背景	1
1.1 介绍	1
1.2 人口与能源需求	1
1.3 能量单位	2
1.4 当前世界能源使用模式	3
1.5 指数增长	6
1.5.1 介绍	6
1.5.2 复利	6
1.5.3 倍增时间	6
1.5.4 累积	8
1.5.5 指数环境中的资源生命周期	8
1.6 哈伯特-高斯模型	9
1.7 净能、英热单位经济和可持续性试验	10
1.8 光伏实现的阳光向电力直接转换	11
习题	13
参考文献	15
推荐阅读	16
第2章 太阳	18
2.1 介绍	18
2.2 太阳光谱	18
2.3 大气层对太阳光的影响	19
2.4 太阳光照的规范	21
2.4.1 介绍	21
2.4.2 定义	21
2.4.3 地球轨道和自转	22
2.4.4 跟踪太阳	24
2.4.5 太阳光照测量	29

2.4.5.1 精密测量	29
2.4.5.2 较低准确度的测量	29
2.5 太阳光线捕获	29
2.5.1 采光器的太阳辐射量最大化	29
2.5.2 遮挡	31
2.5.2.1 遮挡物的现场测试	32
2.5.2.2 确定遮挡的计算方法	33
2.5.3 特殊朝向考虑	34
2.5.3.1 水平安装	34
2.5.3.2 非南向安装	34
习题	36
参考文献	39
推荐阅读	39
第3章 光伏系统介绍	40
3.1 介绍	40
3.2 光伏电池	41
3.3 光伏组件	44
3.4 光伏阵列	46
3.5 能量存储	46
3.5.1 介绍	46
3.5.2 铅酸蓄电池	47
3.5.2.1 铅酸蓄电池的化学原理	47
3.5.2.2 铅酸蓄电池的特性	48
3.5.3 镍镉蓄电池	52
3.5.3.1 镍镉蓄电池的化学原理	52
3.5.3.2 镍镉系统的特性	52
3.5.4 其他蓄电池系统	53
3.5.5 氢储能	54
3.5.6 燃料电池	55
3.5.7 其他储能方式	56
3.6 光伏系统负荷	56
3.7 光伏系统的有效性	57
3.8 相关的系统电子部件	60
3.8.1 介绍	60
3.8.2 充电控制器	60
3.8.2.1 充电考虑因素	61
3.8.2.2 放电考虑因素	63

3.8.3 最大功率点跟踪器和线性电流助推器	64
3.8.4 逆变器	67
3.8.4.1 方波逆变器	67
3.8.4.2 修正正弦波逆变器	68
3.8.4.3 脉宽调制逆变器	70
3.8.4.4 其他可取的逆变器特征	73
3.9 发电机	74
3.9.1 介绍	74
3.9.2 发电机类型和容量	75
3.9.3 发电机运行特性	76
3.9.3.1 转速	76
3.9.3.2 效率	76
3.9.3.3 燃料类型	76
3.9.3.4 海拔的影响	77
3.9.3.5 波形谐波含量	78
3.9.3.6 频率稳定性	78
3.9.3.7 电压幅值稳定性	78
3.9.3.8 噪声水平	78
3.9.3.9 起动类型	78
3.9.3.10 过负荷特征	78
3.9.3.11 功率因数的考虑	79
3.9.4 发电机的维护	79
3.9.5 发电机的选择	79
3.10 系统平衡部件 (BOS)	79
3.10.1 开关、断路器、熔断器和插座	80
3.10.2 接地故障、浪涌和防雷保护	80
3.10.3 逆变器旁路开关和电源电路汇流箱	81
3.10.4 接地器件	81
习题	82
参考文献	85
推荐阅读	85
第4章 电网交互式并网光伏系统	86
4.1 介绍	86
4.2 应用规范和标准	86
4.2.1 国家电气规范	88
4.2.1.1 介绍	88
4.2.1.2 电压降和导线标准	88
4.2.2 IEEE 1547—2003 标准	90

4.2.2.1 介绍	90
4.2.2.2 具体要求	91
4.2.2.3 光伏逆变器与机械旋转发电机的比较	93
4.2.2.4 孤岛分析	93
4.2.3 其他议题	95
4.2.3.1 美观性	95
4.2.3.2 电磁干扰	95
4.2.3.3 浪涌保护	96
4.2.3.4 结构考虑	96
4.3 直接并网光伏系统的设计考虑	97
4.3.1 确定系统能量输出	97
4.3.2 阵列安装	98
4.3.3 逆变器的选择和安装	98
4.3.4 其他安装问题	100
4.4 基于年系统性能需求的系统设计	100
4.4.1 阵列定容	100
4.4.2 逆变器选择	101
4.4.3 组件选择	101
4.4.4 平衡系统	103
4.4.4.1 组件延长线、屋顶接线箱、组件与阵列框架的接地	104
4.4.4.2 从屋顶接线箱到逆变器的导线和导线管	105
4.4.4.3 直流断路器、交流断路器和过电流保护	107
4.4.4.4 公用电网连接点	108
4.4.4.5 最终系统电气原理图	109
4.5 基于有效屋顶空间的系统设计	110
4.5.1 阵列选择	110
4.5.2 逆变器选择	112
4.5.3 平衡系统	113
4.5.3.1 组件延长线、屋顶接线箱和组件及阵列框架接地	113
4.5.3.2 从屋顶接线箱到逆变器的导线和导线管	113
4.5.3.3 直流断路器、交流断路器与过电流保护	114
4.5.3.4 公用电网连接点	114
4.5.3.5 估计系统年性能	114
4.5.3.6 最终系统电气原理图	115
4.5.4 设计扩展到较低风速地区	115
4.6 基于微逆变器的系统设计	116
4.6.1 介绍	116
4.6.2 系统设计	116

4.6.3 警铃和警哨 (即监控的可能性)	118
4.7 向三相配电箱馈电的一个额定 21kW 系统的设计	118
4.7.1 介绍	118
4.7.2 阵列配置	119
4.7.3 系统直流布线	119
4.7.4 系统交流布线	122
4.7.4.1 导线和过电流保护的大小	122
4.7.4.2 电压降计算	123
4.7.4.3 连接到 Y 联结 277/480V 电源	124
4.8 额定 250kW 系统的设计	124
4.8.1 介绍	124
4.8.2 配置阵列	125
4.8.3 源支路电压降计算	126
4.8.4 直流断路器和过电流保护	129
4.8.5 交流导线规格、断路器和过电流保护	129
4.9 系统性能监控	132
习题	132
参考文献	135
第 5 章 机械性能考虑	136
5.1 介绍	136
5.2 材料的重要属性	136
5.2.1 介绍	136
5.2.2 机械属性	137
5.2.3 应力与应变	138
5.2.4 材料强度	141
5.2.5 长柱弯曲	142
5.2.6 热胀冷缩	142
5.2.7 化学腐蚀与紫外线衰减	144
5.2.8 钢的属性	146
5.2.9 铝的属性	146
5.3 确立机械系统要求	148
5.3.1 机械系统的设计过程	148
5.3.2 功能要求	148
5.3.3 运行要求	149
5.3.4 约束条件	149
5.3.5 折中考虑	150
5.4 设计和安装导则	150

5.4.1 标准与规范	150
5.4.2 建筑规范要求	151
5.5 光伏阵列的作用力	151
5.5.1 结构负载因素	151
5.5.2 静荷重	152
5.5.3 动荷重	153
5.5.4 风载荷	153
5.5.5 雪载荷	160
5.5.6 其他载荷	160
5.6 阵列安装系统的设计	160
5.6.1 介绍	160
5.6.2 阵列安装系统的设计目标	160
5.6.2.1 安装成本最小化	161
5.6.2.2 建筑集成的考虑因素	162
5.6.2.3 阵列-屋顶配置的成本和耐久性	163
5.6.3 增强阵列性能	163
5.6.3.1 辐射增强	163
5.6.3.2 遮挡	163
5.6.3.3 阵列散热	163
5.6.3.4 防止人为破坏	164
5.6.4 屋顶安装阵列	164
5.6.4.1 框架式安装	164
5.6.4.2 支架式安装	165
5.6.4.3 集成式安装	166
5.6.4.4 直接式安装	166
5.6.5 地面安装阵列	167
5.6.5.1 支架式安装	167
5.6.5.2 杆式安装	167
5.6.5.3 跟踪式安装	167
5.6.6 美观性	169
5.7 计算机械载荷和应力	169
5.7.1 介绍	169
5.7.2 回撤载荷	169
5.7.3 拉伸应力	169
5.7.4 弯曲	170
5.8 框架式屋顶安装范例	171
5.8.1 ASCE-7 风载荷分析表格法介绍	171
5.8.2 阵列安装设计：高风速情况	173

5.8.3 阵列安装设计：低风速情况	174
5.8.4 暴露度 C、暴露度 D 及其他校正因子	175
习题	176
参考文献	178
推荐阅读	179
第 6 章 具有蓄电池备用的并网光伏系统	180
6.1 介绍	180
6.2 蓄电池备用系统设计基础	181
6.2.1 介绍	181
6.2.2 负荷确定	181
6.2.3 逆变器定容	182
6.2.4 蓄电池定容	182
6.2.5 光伏阵列定容	183
6.3 基于待机负荷的单逆变器 120V 蓄电池备用系统设计	184
6.3.1 待机负荷的确定	184
6.3.2 逆变器的选择	185
6.3.3 蓄电池的选择	185
6.3.4 光伏阵列的定容	186
6.3.5 充电控制器和光伏组件选择	187
6.3.6 BOS 的选择和完成设计	189
6.3.6.1 光伏阵列安装设备	189
6.3.6.2 屋顶接线箱	190
6.3.6.3 支路汇流箱和浪涌保护装置	190
6.3.6.4 直流侧导线和断路器的规格	191
6.3.6.5 交流侧导线和断路器的规格	192
6.3.6.6 待机负荷布线	192
6.3.6.7 设备的接地导体和接地电极导体尺寸	193
6.3.7 逆变器和充电控制器的程序控制	194
6.3.8 化石燃料发电机连接的选择	196
6.4 基于可用屋顶空间的 120/240V 蓄电池备用系统	196
6.4.1 介绍	196
6.4.2 光伏组件选择和源电路设计	197
6.4.3 源支路汇流箱和充电控制器选择	197
6.4.4 逆变器的选择	198
6.4.5 待机负荷的确定和蓄电池的选择	199
6.4.6 BOS 选择和完成设计	200
6.4.6.1 屋顶接线盒	200
6.4.6.2 源支路汇流箱和浪涌保护装置	201