国际电气工程先进技术译丛

Springer

光伏发电系统的优化——建模、仿真和控制

Optimization of Photovoltaic Power Systems

Modelization, Simulation and Control

（阿尔及利亚）Djamila Rekioua
（比利时）Ernest Matagne 著

杨立永 毛鹏 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书特色

本书立足于讨论光伏发电系统建模以及实际应用中存在的问题。主要目的是让电气工程专业的本科生以及研究生快速地理解光伏发电系统的概念，掌握光伏发电系统的模型，优化光伏发电系统在一些独立发电系统中的应用。本书给出了每个系统的数学模型并且在每一部分的结尾处都给出了在MATLAB/Simulink环境下相对应的例子。与本书配套的还有每个应用的原理图及在DSPACE环境下的最终实现。本书还介绍了一些电机控制的方法，譬如矢量控制和直接转矩控制。

本书内容深入浅出、通俗易懂，可为从事光伏发电系统相关研究和应用的工程技术人员提供参考，也可作为高等院校相关专业学生的教材使用。



国际电气工程先进技术译丛

光伏发电系统的优化
——建模、仿真和控制

（阿尔及利亚）Djamila Rekioua （比利时）Ernest Matagne 著
杨立永 毛 鹏 译

机 械 工 业 出 版 社

本书是作者在长期从事光伏发电系统的研究与应用的基础上，参考大量文献编写而成的。在本书中，即讨论了太阳光辐射理论、光伏电池建模理论、光伏发电用电力电子系统的建模理论等光伏发电系统中的基本问题，又从光伏发电系统的实际应用角度出发，深入浅出地讨论了一些实际问题：最大功率点跟踪、电池储能、光伏水泵系统以及混合式光伏发电系统等，为光伏发电系统的实际应用提供了理论基础。

本书可为从事光伏发电系统相关研究和应用的工程技术人员提供参考，也可作为高等院校相关专业学生的教材使用。

Translation from the English language edition：〈Optimization of Photovoltaic Power Systems：Modelization，Simulation and Control〉by Djamila Rekioua and Ernest Matagne.

© Springer-Verlag London Limited 2012 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。

北京市版权局著作权合同登记：图字 01-2012-5078 号

图书在版编目（CIP）数据

光伏发电系统的优化：建模、仿真和控制/（阿尔及）瑞奇奥（Rekioua，D.）等著；杨立永，毛鹏译. —北京：机械工业出版社，2014.1

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Optimization of photovoltaic power systems modelization，simulation and control

ISBN 978-7-111-45649-0

Ⅰ.①光… Ⅱ.①瑞…②杨…③毛… Ⅲ.①太阳能发电-系统优化 Ⅳ.①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 020352 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：江婧婧 责任编辑：江婧婧 版式设计：霍永明

责任校对：刘怡丹 肖 琳 封面设计：马精明 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2014 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13.75 印张 · 298 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-45649-0

定价：59.80 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 教 材 网：http://www.cmpedu.com

销 售 一 部：（010）68326294 机工官网：http://www.cmpbook.com

销 售 二 部：（010）88379649 机工官博：http://weibo.com/cmp1952

读者购书热线：（010）88379203 **封面无防伪标均为盗版**

译 者 序

在世界范围内，常规化石能源日趋枯竭，同时环境污染问题日益引起人们的关注，因此，各国政府越来越重视可再生能源的发展。太阳能取之不尽，用之不竭，而且在转换过程中不会污染环境。与传统发电方式不同，在太阳能转换为电能的过程中，具有无转动部件、模块化结构、运行维护简单、建设周期短以及可以利用荒漠土地和建筑屋顶资源等一系列独特的优点，是一种清洁和安全可靠的可再生能源，所以光伏发电作为能源革命的主要内容而受到了世界各国的广泛重视。

目前，随着我国光伏发电系统装机容量连续几年快速增长，数十 MW 的大型地面电站和建筑光伏发电系统也不再罕见，表明国内光伏发电系统已经进入了大规模的推广应用阶段。为了将国外的先进光伏发电理论和工程应用技术引入到我国光伏产业的建设中，并且为新能源领域的研发和工程建设输送合格人才，受机械工业出版社的委托，我们有幸翻译了该书。

这本书强调系统建模，结合仿真说明，重视系统优化。首先对光伏发电系统中的各个关键环节进行了理论分析和数学建模；其次在数学模型的基础上，搭建仿真系统，利用仿真手段对相关理论进行说明，本书还依托模型、仿真以及理论结果，为设计和应用中存在的实际问题提供了解决思路和优化方案。衷心希望本书能够对促进我国光伏发电系统领域的教学、科研和工程实践等方面的发展有所帮助。

本书涉及了太阳光辐射照度、光伏电池、光伏发电用电力电子装置、最大功率点跟踪算法、电池储能系统、光伏水泵系统和混合式发电系统等方面的内容。本书的第 1、2、3 章的翻译工作主要由毛鹏完成，第 4 章的翻译工作主要由陈智刚完成，第 5、6、7 章的翻译工作主要由杨立永完成。北方工业大学的张卫平教授在百忙之中对于这本书的翻译工作给予了中肯的指导。

最后感谢机械工业出版社给予的厚爱和支持。

由于译者的水平有限，本书可能存在一些翻译不当之处，欢迎读者提出宝贵的修改意见和建议。

杨立永　毛　鹏

2013 年 12 月

原 书 前 言

世界上的绝大多数地方都拥有着丰富的太阳能资源，因为其无偿性以及无限性，所以它在很多应用中是一种经济的能源。太阳辐射到地球上的能量是巨大的、持续的，它半个小时所释放的能量就可以供应整个世界一年的能量消耗。太阳能是一种清洁的可再生能源，在利用过程中，它既不会释放引起温室效应的气体，也不会产生有毒垃圾。

光伏发电是将来自太阳的辐射能量转化成直流电能的技术。光伏系统最主要的优点如下所述：

1. 光电转化是一个完全固态且封闭的过程。
2. 转换过程没有移动的部件，也没有物质的消耗和释放。
3. 转换过程不会排放污染物。
4. 它可以独立运行，不需要和现有的能量或者燃料供给相连接。
5. 它也可以与其他的电能组合，以提高整个系统的可靠性。
6. 它可以承受极端的气候条件，包含多云天气。
7. 它不需要消耗化石燃料，它的“燃料”来源是无偿的、无限的。
8. 它可以作为组合式建筑块进行安装与升级，只要增加光伏组件的数量便可满足更多的能量需求。

自 20 世纪 70 年代以来，随着单位瓦特的峰值功率价格的大幅度下降，光伏发电系统在许多有前景的领域得到了大规模的应用。较传统的化石燃料而言，世界上偏远地区的人们也往往青睐于选择小规模的独立光伏发电系统。目前小规模的光伏发电系统为世界提供了大量的能量。目前在发展中国家尚有 20 亿左右的人口没有得到电力供应，在这些地方光伏发电系统将有更大的应用潜力。

本书的目的

市场上有许多书是讨论太阳电池的，例如电池的半导体的结构特性，本书立足于讨论光伏发电系统建模以及实际应用中存在的问题。

本书的主要目的是让电气工程专业的本科生以及研究生快速地理解光伏发电系统的概念，掌握光伏发电系统的模型，优化光伏发电系统在一些独立发电系统（例如农村电气化、水泵、海水淡化）中的应用。本书给出了每个系统的数学模型并且在每一部分的结尾处都给出了在 MATLAB/Simulink 环境下相对应的例子。与本书配套的还有每个应用的原理图及在 DSPACE 环境下的最终实现。本书还介绍了一些电机控制的方法，譬如矢量控制和直接转矩控制。除此之外，为了优化光伏发电系统，本书还引

入了智能技术。通过本书的编写，我们完善了已有的光伏发电领域的知识，同时读者也能学习到如何建模以及如何通过应用不同控制策略对应用最为广泛的独立光伏发电系统进行优化。

本书的结构

本书共有7章。第1章中介绍了光伏发电的过程，影响发电相关的气象因素，太阳光的辐射以及光伏发电系统的结构。在该章中还介绍了光伏系统规模的估算以及光伏发电系统的维护。

第2章注重于太阳光辐射以及电池的建模。该章提出了描述太阳电池工作原理的不同模型，并且给出了在MATLAB/Simulink环境下的仿真程序。

第3章专门介绍电力电子系统的建模以及应用于光伏发电系统中的各种变换器的结构。

第4章介绍了常用的最大功率点跟踪的算法，并且给出了在MATLAB/Simulink环境下一些简单的例子。

第5章介绍了储能装置的建模，研究并建立了常用的电池组的模型以及铅酸蓄电池的实验方案。

第6章介绍了基于直流电动机和交流电动机的光伏水泵系统。分别对每一个部件进行了建模，然后连接成子系统进行仿真。同时介绍了许多控制算法，如标量控制算法，矢量控制算法，直接转矩控制算法。该章还采用了经典的最优算法并且对比了光伏水泵系统和柴油发电机在经济上的可行性。此外，还从环境方面考量了光伏水泵系统。

第7章专门介绍了不同结构、不同组合的混合式光伏发电系统。同时给出了不同的整体方案和仿真实例。

目　　录

译者序
原书前言

第 1 章　光伏发电应用概述 …… 1

1.1　光伏效应的定义 …… 3
1.1.1　辐射照度和太阳辐射 …… 3
1.1.2　光伏电池技术 …… 3
1.1.3　光伏电池以及光伏组件 …… 5
1.2　光伏系统简介 …… 10
1.2.1　独立光伏系统 …… 10
1.2.2　并网光伏系统 …… 13
1.3　光伏系统的结构规划 …… 14
1.3.1　确定负载曲线 …… 14
1.3.2　太阳辐射分析 …… 14
1.3.3　光伏发电量估计 …… 14
1.3.4　光伏发电系统的面积 …… 14
1.3.5　电池组的数量 …… 15
1.3.6　逆变器的选择 …… 16
1.3.7　直流导线的规格 …… 17
1.3.8　交流电缆的规格 …… 18
1.3.9　直流熔断器的规格 …… 19
1.4　光伏系统的可行性 …… 19
1.4.1　估计光伏发电系统大小 …… 19
1.4.2　估计光伏发电系统的成本 …… 19
1.5　光伏系统的维护 …… 21
1.5.1　太阳电池板清洗 …… 21
1.5.2　检查 …… 21
1.5.3　蓄电池组的定期维护 …… 21
1.5.4　逆变器的控制 …… 21

第 2 章　太阳辐射照度模型以及电池模型 …… 22

2.1　辐射模型 …… 24

2.1.1　原理以及假设 …… 24
2.1.2　天空和大地的辐射模型 …… 27
2.1.3　大气模型 …… 29
2.2　光伏阵列的模型 …… 37
2.2.1　理想模型 …… 37
2.2.2　双二极管光伏阵列模型 …… 58
2.2.3　功率模型 …… 59
2.2.4　光伏阵列总结 …… 62

第3章　电力电子的建模 …… 65

3.1　电力电子变换器中功率损耗的原因 …… 66
3.1.1　电力电子基础 …… 66
3.1.2　基本损耗的建模方法 …… 67
3.1.3　常用的电力半导体器件 …… 68
3.1.4　从功率损耗的角度分析半导体器件的特性 …… 69
3.2　电力电子变换器的拓扑结构及其对效率的影响 …… 69
3.2.1　直接与直流母线相连的结构 …… 70
3.2.2　DC/DC 变换 …… 70
3.2.3　DC/AC 变换 …… 72
3.3　变换器的经验模型 …… 76
3.3.1　输入电压恒定时的情况 …… 76
3.3.2　输入电压变化时的情况 …… 77
3.3.3　实验中测试损耗的注意事项 …… 77
3.4　电路建模 …… 77
3.5　额定功率选择的注意事项 …… 77
3.6　用于分布式能源系统控制的多级系统 …… 78
3.6.1　多级系统（MAS） …… 78
3.6.2　电力系统中的多级系统 …… 79
3.6.3　分布式电力系统 …… 79
3.6.4　逆变器的控制系统 …… 79
3.6.5　应用 …… 79
3.7　结论 …… 80

第4章　光伏阵列的优化 …… 81

4.1　最优算法简介 …… 81
4.2　MPPT 算法 …… 83
4.2.1　扰动观测法 …… 85

4.2.2 改进的扰动观测法 …… 86
4.2.3 电导增量法 …… 86
4.2.4 改进的电导增量法 …… 90
4.2.5 爬山法 …… 90
4.2.6 基于比例关系的 MPPT 控制方法 …… 90
4.2.7 曲线拟合法 …… 92
4.2.8 查表法 …… 93
4.2.9 滑模控制 …… 93
4.2.10 寄生电容模型法 …… 96
4.2.11 模糊控制技术 …… 97
4.2.12 人工神经网络 …… 103
4.2.13 神经-模糊方法 …… 103
4.2.14 遗传算法 …… 104
4.3 MPPT 算法的效率 …… 106
4.4 不同算法的比较 …… 106

第 5 章 储能系统建模 …… 108

5.1 不同储能系统的简介 …… 109
5.1.1 电池组系统 …… 109
5.1.2 电池组模型 …… 115
5.1.3 电池组的等效电路 …… 117
5.1.4 动力模型 …… 122
5.1.5 应用：CIEMAT 模型 …… 122

第 6 章 光伏泵系统 …… 130

6.1 基于直流电动机的光伏泵系统 …… 131
6.1.1 概述 …… 131
6.1.2 系统建模 …… 132
6.1.3 应用 …… 135
6.2 基于交流电动机的光伏泵系统 …… 137
6.2.1 概述 …… 137
6.2.2 系统建模 …… 137
6.2.3 基于标量控制的光伏系统 …… 144
6.2.4 基于感应电动机矢量控制的光伏系统 …… 146
6.2.5 基于直接转矩控制（DTC）的光伏系统 …… 148
6.3 光伏泵系统的 MPPT …… 154
6.3.1 使用直流电动机 …… 154

6.3.2　使用交流电动机 …… 154
6.4　经济研究 …… 155
6.4.1　水泵所需能量估计 …… 155
6.4.2　全生命周期成本（LCC）计算 …… 155
6.4.3　光伏系统的环境效益 …… 157

第 7 章　混合光伏系统 …… 162

7.1　混合系统的优缺点 …… 164
7.1.1　混合系统的优点 …… 164
7.1.2　混合系统的缺点 …… 164
7.2　混合系统的结构 …… 165
7.2.1　直流母线结构 …… 165
7.2.2　交流母线结构 …… 165
7.2.3　直流-交流母线结构 …… 166
7.2.4　混合系统的分类 …… 167
7.3　混合系统的不同组合形式 …… 167
7.3.1　光伏/柴电系统 …… 167
7.3.2　混合风电/光伏/柴电系统 …… 169
7.3.3　混合风电/光伏系统 …… 179
7.3.4　混合光伏/风电/水电/柴电系统 …… 188
7.3.5　混合光伏/燃料电池系统 …… 188
7.3.6　混合光伏/电池/燃料电池系统 …… 189
7.3.7　混合光伏/电解装置/燃料电池系统 …… 189
7.3.8　混合光伏/风电/燃料电池系统 …… 200

参考文献 …… 202

第 1 章　光伏发电应用概述

符号表：

A_{PV}	太阳电池的面积（m^2）
b	系数，对于三相系统而言，该系数等于$\sqrt{3}$；对于单相系统而言，该系数等于 2
c	光速（m/s）
$C_{\mathrm{batt,u}}$	单元电池的容量（Ah）
$C_{\mathrm{batt,min}}$	电池组中最小的电池容量（Ah）
$\cos\phi$	功率因数（ϕ 为交流电压与交流电流之间的相位差）
DOD	放电深度
$E_{\mathrm{J,i}}$	导体 i 中焦耳损耗所耗散的电能
E_L	光伏发电装置提供给负载的总电能
$E_{L,m}$	负载每月需要的电能
$\overline{E_L}$	年度平均每月所需要的电能
E_{pv}	光伏发电产生的电能
$E_{\mathrm{pv,m}}$	光伏发电系统每月在单位面积上产生的电能（$\mathrm{kW\cdot h/m^2}$）
$\overline{E_{pv}}$	光伏发电系统的年度平均每月的发电量（$\mathrm{kW\cdot h/m^2}$）
f_b	电池能量释放比
FF	填充因子
ff	光伏系统发出的电能占负载消耗能量的比例
FT	温度因子
G	太阳总的辐射照度（$\mathrm{W/m^2}$）
h	普朗克常数
I_o	二极管的饱和电流
I_d	二极管的电流（A）
I_i	导体 i 中的平均电流（A）
I_{max}	最大电流（A）
I_{max}	电池板并联的最大电流（A）
I_{mpp}	最大功率点处的电流（A）
I_{ph}	光生电流（A）
I_{pv}	输出端的电流（A）
I_{Rsh}	并联漏电流（A）

$I_{sc-T_{jref}}$	标准辐射照度下的短路电流（A）
L_l	电缆的长度（m）
l_c	电缆长度（m）
N_{batt}	电池使用的数量
N_j	自给的天数
$N_{maximalpv_serial}$	光伏组件最大的串联数量
$N_{minimalpv_serial}$	光伏组件最少的串联数量
N_{pv}	光伏组件的数量
$N_{pv-serial}$	光伏组件的串联数量
R_i	导体 i 的电阻（Ω）
R_{serial}	串联电阻（Ω）
R_{sh}	并联电阻（Ω）
S	电缆的截面积（m^2）
S_1	导体的截面积（mm^2）
T_{dur}	持续时间
T_j	电池板的温度（°K）
T_{jref}	光伏电池的参考温度（K）
U_{batt}	电池的电压（V）
V_{max}	最大可接受的输入电压（V）
V_{mpp}	最大功率点处的电压（V）
V_n	额定电压（V）
$V_{oc-Tjref}$	参考温度下的开路电压（V）
α_{sc}	数据表中给出的短路电流的相对温度系数（/K）
β_{oc}	数据表中给出的开路电压的相对温度系数（/K）
γ_{MPP}	数据表中给出的 MPP 处的功率的相对温度系数
ΔV	压降（V）
ε	允许压降
η_1	光伏板的效率
η_2	考虑结温影响的效率
η_3	考虑线缆上焦耳热效应影响的效率
η_4	考虑逆变器损耗的效率
η_5	考虑最大功率点跟踪影响的效率
η_{batt}	电池的效率
λ	波长
λ_c	导体电抗（Ω/m）
ρ_c	电缆的电阻率（Ω·m）
ρ_{c1}	导体材料（铜或铝）的电阻率（Ω·m）

1.1　光伏效应的定义

光伏效应是吸光材料吸收光子，释放电荷，将光能直接转化为电能的过程。人们利用这一效应可以实现发电，并将最基本的发电单元称为光伏电池（PV cell）。

1.1.1　辐射照度和太阳辐射

辐射照度是表征单位面积上瞬时接收的太阳辐射入射通量的物理量，单位用 kW/m^{2}表示。太阳在外大气层的辐射照度为 1.373kW/m^2[1]，但是地球表面能接收的最大辐射照度仅为 1kW/m^2。太能光在给定时间向特定区域辐射的能量用辐射量来衡量，是辐射照度在时间上的积分。例如，每日辐射照度可以用 kW·h/m^{2}表示。辐射照度也可以用日照时间来表示。参考标准辐射照度 1000W/m^2，日照时间通常以小时计算。图 1-1 给出了辐射照度和日照时间之间的关系。

太阳光辐射的能量由光子自身携带的能量 E_{ph} 组成。E_{ph}满足下式：

$$E_{ph} = h\frac{c}{\lambda} \tag{1-1}$$

式中，λ 是光的波长；h 是普朗克常数；c 是光速。

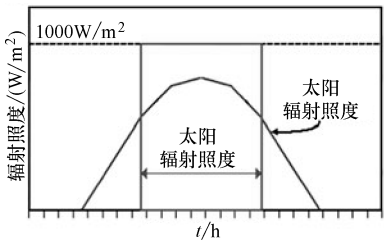


图 1-1　太阳的辐射照度与太阳日照时间

全辐射主要由三部分组成：

——直接太阳辐射：直接来自太阳的被接收的太阳辐射。

——被大气层或云层散射的散射辐射。

——由于地面反射产生的反射辐射。

太阳的辐射照度可以用日射强度计测量总辐射或者使用日温计测量直接辐射，在一段时间内辐射照度的积分就是太阳辐射。

1.1.2　光伏电池技术

太阳电池是光伏（PV）系统中最基本的单元。太阳电池将太阳能直接转化为直流电流。典型的太阳电池结构是一个由半导体材料制作的 PN 结，非常类似于一个二极管。太阳电池中应用最广泛的半导体材料就是硅。材料不同，效率不同，成本也不同。主要有以下几种材料：

- 单晶硅（c-Si）

这是目前应用最广泛的电池材料（见图 1-2）。

但是因为种种因素限制了其效率。单晶硅太阳电池最高效率约为 23%，而采用另外一些半导体材料，效率可达 30%。这主要取决于半导体[2]材料以及所吸收光的波长。

图 1-3 是 1977～2010 年间单晶硅的效率走势。

- 多晶硅

由多晶硅制成的电池称为多晶硅电池。将熔化硅铸造成锭，然后形成多晶。这类电池光电转换效率略低于单晶硅电池。由于单晶硅和多晶硅电池的可靠性高，大多应用于

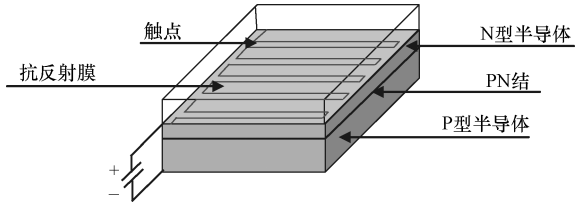


图 1-2　单晶硅电池

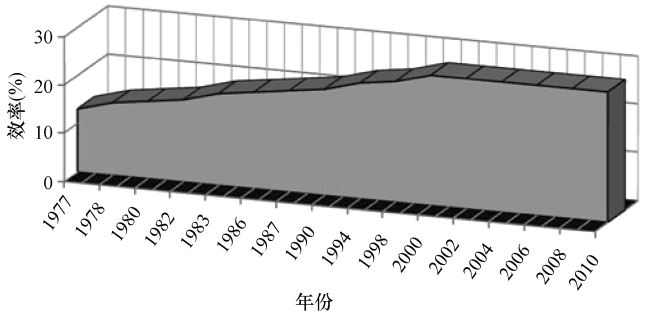


图 1-3　晶体硅电池效率曲线

户外的光伏发电系统中。晶体硅的市场占有率如图 1-4 所示[3]。

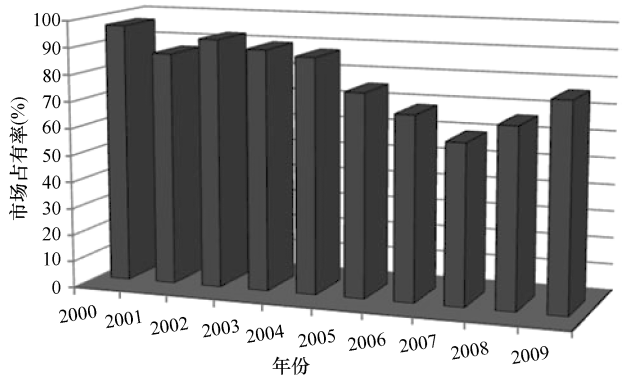


图 1-4　晶体硅市场占有率

- 薄膜材料

薄膜太阳电池（TFSC）也被称为薄膜光伏电池（TFPV），是由厚度大约为几微米甚至更薄的薄膜材料制成。薄膜太阳电池通常为：[4]

1. 非晶硅（a-Si）和其他薄膜硅（TF-Si）太阳电池。非晶硅太阳电池的效率通常为 10% ~13%，较晶体电池而言，使用寿命较短。

2. 碲化镉（CdTe）太阳电池。是由碲和镉复合形成的晶体构成的，其效率为 15% 左右。

3. 铜铟镓硒（CIS 或 CIGS ）太阳电池。由铜、铟、镓、硒构成，效率为 16.71% 左右。

4. 染料敏化太阳电池（DSC）。由光敏阳极和电解液构成，效率为 11.1% 左右。

较晶体硅电池而言，薄膜电池价格便宜，其所占市场份额如图 1-5 所示[3]。

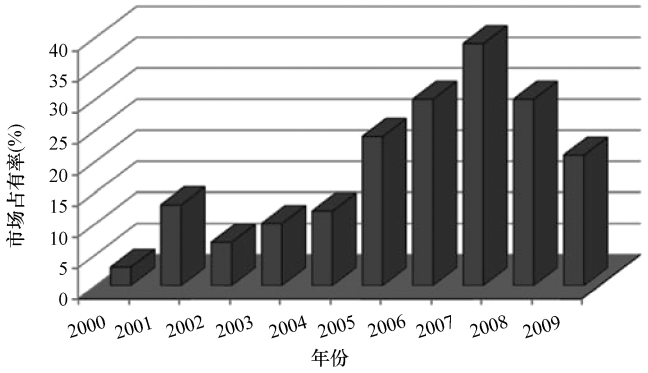


图 1-5　薄膜材料的市场占有率

- 其他新技术

1. 有机太阳电池（OSC）。由很薄的有机材料构成，有机太阳电池通常有以下三种：由所谓的小分子（小分子太阳电池）或者聚合物（聚合物太阳电池）构成的有机半导体材料或者是称之为染料敏化太阳电池的有机太阳电池。[5]

2. 多层或叠层电池。从顶层到底层，由适于不同光谱范围的不同半导体材料依次构成。

3. 含反射镜和透镜装置的聚光电池。这种设备只适用于直射辐射较强的区域，并且需要跟踪太阳光的附加机构。在直射辐射条件下，其效率为 42.4% 左右。

4. 金属-绝缘体-半导体（MIS）反型层电池。半导体内部电场由薄氧化层的结产生。

1.1.3　光伏电池以及光伏组件

1.1.3.1　太阳光传播过程的重要定义

电池与电池板

通常采取一定数量的光伏电池串并联来获得较高的输出功率。光伏组件就是由一定数量在工厂连接和密封好的光伏电池构成，它是商品型单元。由一个或者多个光伏组件以共同的支持结构连接形成了光伏电池板（见图 1-6）。

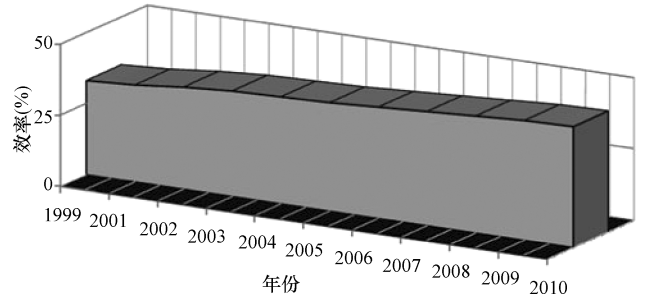


图 1-6　聚光电池效率变化曲线[4]