



“十二五”国家重点图书出版规划项目

新能源电能变换与控制技术丛书

太阳能光伏发电 最大功率点跟踪技术

Maximum Power Point Tracking Technology
for Photovoltaic Power Generation

◆ 赵争鸣 陈 剑 孙晓瑛 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源电能变换与控制技术丛书

太阳能光伏发电最大功率点 跟踪技术

赵争鸣 陈剑 孙晓瑛 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

最大功率点跟踪 (MPPT) 技术是高效光伏发电系统中的关键技术之一, 提高 MPPT 技术是人们在光伏发电逆变器应用过程中的重点和难点。它涉及光伏阵列建模、优化技术、电力电子变换技术及现代控制等技术, 实际应用中仍然存在很多的问题。本书从论述最大功率点跟踪原理和光伏电池模型入手, 介绍并比较了多种最大功率点跟踪的方法, 列举了一些 MPPT 方法的综合应用范例。本书可供从事电气工程与光伏发电相关工作的科技人员和管理人员参考, 也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能光伏发电最大功率点跟踪技术/赵争鸣, 陈剑, 孙晓瑛编著. —北京: 电子工业出版社, 2012. 4

(新能源电能变换与控制技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 121 - 16638 - 9

I. ①太… II. ①赵… ②陈… ③孙… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 054648 号

责任编辑: 苏颖杰 (suj@phei.com.cn)

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 14.75 字数: 371.2 千字

印 次: 2012 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册

定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

“新能源电能变换与控制技术丛书”编委会

主 任：徐德鸿

顾 问：王兆安

委 员：（以姓氏笔画为序）

孔 力 王凤翔 阮新波

肖湘宁 张 兴 张 波

张纯江 杨震宇 周雏维

段善旭 姜建国 赵争鸣

赵丽松 黄念慈

秘 书：苏颖杰 谌平平

丛 书 序

自工业革命以来，人类活动对传统能源的大规模利用已造成严重环境问题，在能源问题上必须寻找新的出路，需要开发多种可持续的节能环保的能源加以利用，并建立相应的新能源供应体系，以减少污染排放，实现社会的可持续发展。因此，绿色环保、节能减排已成为全社会各行各业的发展方向。

电力电子技术的精髓是能源的高效率利用和提升生产效率，它在工业、能源、交通、信息、国防、教育等重要领域有着举足轻重的作用。如果把计算机比作人的大脑，电力电子就可以看作是肌肉，它是连接信息与制造业的纽带，是实现信息化制造的支撑科技。同时，电力电子技术也是发展智能电网、新能源和节能减排的核心技术，已被列入国家科技发展规划。

在此背景下，由中国电源学会、电子工业出版社共同发起，组织成立了“新能源电能变换与控制技术丛书”编委会，旨在建立一个相关领域专家学者交流学习的平台，及时将适合的理论、技术、科研成果等著为图书并出版。丛书的定位为具有一定广度和研究深度的科技专著，主题围绕新能源应用与电能变换及相关控制技术的结合，介绍具体设计或应用，内容以研究过程、结果和应用实例为主；读者对象为相关专业工程技术人员、科研人员及高等院校师生。

丛书内容目前包括风力发电、光伏发电、燃料电池、半导体照明、分布式逆变电源系统、微电网等多个方向，并将根据相关技术的发展不断推陈出新；丛书主要作者均为长期从事相关领域高校教学及科研工作、在业内颇具影响力的学者。相信这套丛书的出版，将对新能源电能变换与控制技术的发展和传播起到促进作用，为我国新能源产业的发展贡献一份力量。

浙江大学 徐德海

前言

Preface <<< <<<

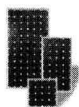
随着当今世界正迅速地从工业化社会向低碳化社会转化，发展绿色能源成为重大课题。太阳能光伏发电由于其可再生性、清洁性及取之不尽、用之不竭等特点，正在发展成为全世界绿色能源组成中的重要部分。

高效应用太阳能是人们一直追求的目标，在整个光伏发电系统中，太阳光伏电池技术和光伏变换控制技术是两大支撑技术。最大功率点跟踪（MPPT）技术是高效光伏发电系统中的关键技术之一。提高 MPPT 技术是光伏发电逆变器应用过程中的重点和难点。因此，研究和应用最大功率点跟踪技术具有重要理论意义和实际应用价值。

清华大学电机工程与应用电子技术系自 1999 年开始了光伏发电变换技术的研究和应用，先后研究了光伏扬水和照明综合系统、太阳能光伏照明（节能灯、高压钠灯、LED 灯等）、光伏并网发电系统等，解决部分并正在研究光伏发电中的一些关键性问题，特别在研究和应用光伏最大功率点跟踪技术方面取得了一些有意义的研究与应用成果。

MPPT 技术是光伏发电中的一个通用综合性技术，涉及光伏阵列建模、优化技术、电力电子变换技术及现代控制技术等。人们在光伏发电应用中普遍采用 MPPT 技术，以求高效应用太阳能，但实际应用中仍然存在很多的问题，因此系统地总结 MPPT 技术应用很有必要。

正是基于这样的认识，我们尝试总结了多年来在太阳能光伏发电 MPPT 技术方面的应用体会，同时汇集了许多专家学者在这方面的研究成果，编著了本书。全书共分 8 章，第 1 章为概述，回顾了当前太阳能光伏发电领域的发展及光伏发电技术基础，概述了光伏发电系统 MPPT 技术的特征及存在的问题；第 2 章介绍了光伏电池模型、MPPT 原理及其检测方法；第 3 章介绍了基于采样数据的直接 MPPT 控制方法，包括恒电压控制、干扰观测法和电导增量法等；第 4 章介绍了基于人工智能 MPPT 控制及其他相关 MPPT 方法，包括模糊逻辑控制法、神经元网络控制法和其他



智能型 MPPT 方法；第 5 章着重分析主要 MPPT 方法的实现和比较，分析了温度对 MPPT 的影响；第 6 章介绍了一些有关 MPPT 的应用；第 7 章介绍基于物理跟踪的光伏系统 MPPT；最后，作为面向光伏发电系统的应用，在第 8 章中介绍 MPPT 方法的发展及综合应用。

本书由赵争鸣编写第 1、6、8 章，陈剑编写第 3、4、5 章，孙晓瑛编写第 2、7 章，全书由赵争鸣负责统筹和定稿，孙晓瑛负责公式与符号校核。贺凡波为本书提供了重要的素材，在此特别表示感谢。本书部分内容是基于曾经在我们研究室工作和学习过的吴理博、陈昆仑、王健、周德佳、邓夷、冯博等的博士和硕士论文相关工作，还得到研究室其他老师和同学，如鲁思兆、田琦、雷一、尹璐、袁立强、鲁挺、胡仙来、葛俊杰、钟山和杨晟等的帮助和支持，在此一并表示感谢。另外，在编写本书的过程中，我们参阅了大量的论著文献，主要的已经列入本书后的参考文献，在此对这些论著文献的作者表示衷心感谢。

本书是在电子工业出版社的鼎力支持和帮助下完成的。另外，本书部分内容是在台达环境与教育基金会电力电子科教发展计划重大项目（DREM200902）资助下完成的，如光伏阵列的仿真建模、MPPT 控制方法的实验比较、大规模光伏阵列并网 MPPT 应用等，在此一并深表感谢。

本书可供从事电气工程与光伏发电的科技人员和有关科技管理人员参考。

由于作者水平有限，编写时间仓促，且光伏发电 MPPT 技术研究仍在研究发展之中，作者及其所在的研究室在这方面仅做了初步的工作，书中难免存在许多的不足，甚至是错误，恳请广大读者批评指正。

编著者

2011 年 10 月于清华园

目录

Contents <<< <<<

第1章 概述	1
1.1 光伏发电应用	1
1.1.1 光伏发电系统分类及其市场	2
1.1.2 光伏发电技术	5
1.2 光伏发电系统成本与效率	12
1.2.1 成本分析及发展	12
1.2.2 效率及其技术改善	14
1.3 MPPT 技术的发展	21
1.3.1 MPPT 技术的发展轨迹	21
1.3.2 MPPT 技术在应用中存在的问题	23
第2章 光伏电池模型及最大功率点跟踪原理	27
2.1 太阳能光伏电池模型	27
2.1.1 光伏电池的工作原理	27
2.1.2 光伏电池模型与特性	28
2.1.3 光伏电池的仿真建模	30
2.2 MPPT 技术	32
2.2.1 最大功率点受外界影响	32
2.2.2 MPPT 过程	33
2.2.3 MPPT 的性能检测方法	35
2.3 各种 MPPT 控制方法的分类介绍	36
2.3.1 基于参数选择方式的间接控制法	36
2.3.2 基于采样数据的直接控制法	38
2.3.3 基于现代控制理论的智能控制法	41



第3章 基于采样数据的直接 MPPT 控制法	44
3.1 恒电压控制法	44
3.1.1 恒电压控制的原理	44
3.1.2 恒电压控制的仿真与实验分析	46
3.1.3 恒电压控制的改进和发展	48
3.2 干扰观测法	49
3.2.1 干扰观测法的基本原理	49
3.2.2 干扰观测法的仿真和实验分析	58
3.2.3 干扰观测法的改进和发展	60
3.3 电导增量法	68
3.3.1 电导增量法的原理	68
3.3.2 电导增量法的仿真实验分析	69
3.3.3 电导增量法的改进	71
第4章 人工智能 MPPT 控制及其他控制法	79
4.1 模糊逻辑控制法	79
4.1.1 模糊逻辑控制法的工作原理	79
4.1.2 模糊逻辑控制法的具体实现	82
4.1.3 模糊逻辑控制法的应用情况	87
4.2 神经网络控制法	88
4.2.1 神经网络控制法的原理	88
4.2.2 神经网络控制法的分类	90
4.2.3 神经网络控制法的实现	91
4.3 其他 MPPT 控制方法	92
4.3.1 开路电压与短路电流比例法	92
4.3.2 曲线拟合和寄生电容法	93
4.3.3 滑模变结构控制法	96
第5章 MPPT 控制方法的实现与分析比较	101
5.1 基于嵌入式目标模块的快速代码生成	101
5.1.1 快速代码生成的设置与功能	101
5.1.2 快速代码生成的模块库与外设操作	107
5.1.3 快速代码生成的工程实例	110
5.2 各种主要 MPPT 控制方法具体实现	112
5.2.1 实验平台和实验仪器	113
5.2.2 实验平台的运行验证	115
5.2.3 各种主要 MPPT 控制方法的实验比较	116



5.3	不同方法的控制效果分析与适用条件	117
5.3.1	主要方法的控制效果分析	117
5.3.2	光伏系统 MPPT 控制适用条件	121
5.4	温度与 MPPT 控制	122
5.4.1	温度对光伏电池 $P-U$ 曲线的影响	122
5.4.2	温度变化下的 MPPT 控制	122
第6章	MPPT 控制方法的实际应用	124
6.1	MPPT 在光伏 LED 照明控制系统中的应用	124
6.1.1	光伏 LED 照明系统	124
6.1.2	光伏 LED 照明系统的仿真建模	126
6.1.3	光伏 LED 照明系统中的 MPPT	129
6.2	MPPT 在光伏水泵与照明综合控制系统中的应用	132
6.2.1	光伏水泵与照明综合系统	132
6.2.2	MPPT 的一阶控制策略	133
6.2.3	具有一阶 MPPT 控制策略的光伏水泵控制器设计与实现	136
6.3	MPPT 在光伏并网控制系统中的应用	141
6.3.1	采用变步长 MPPT 控制算法的单相光伏并网系统	141
6.3.2	可调度式光伏并网系统中的 MPPT 技术	147
6.3.3	大规模光伏阵列 MPPT 应用	150
第7章	基于物理跟踪的光伏系统 MPPT	156
7.1	太阳与光伏电池板的最佳角度	156
7.1.1	太阳与地球运行的坐标系	157
7.1.2	太阳日照变化规律与计算	159
7.1.3	光伏电池板安装角度的设定	166
7.2	太阳光机械跟踪系统	170
7.2.1	太阳光机械跟踪的跟踪模式	170
7.2.2	太阳光机械跟踪的控制模式	173
7.2.3	太阳光机械跟踪的系统建立	176
7.3	聚光式光伏发电系统	178
7.3.1	聚光式光伏发电的简介	178
7.3.2	聚光式光伏发电的系统	180
7.3.3	基于物理跟踪光伏发电的综合应用	182
第8章	MPPT 方法改进及其综合应用	184
8.1	单相光伏逆变器的 MPPT	184
8.1.1	单相单级式光伏并网逆变器的 MPPT	184



8.1.2 单相两级式光伏并网逆变器的 MPPT	188
8.2 具有功率前馈控制的变步长增量 MPPT 方法	193
8.2.1 光伏电源与电网之间的功率传递	194
8.2.2 光伏并网控制系统设计	195
8.2.3 PI 控制器参数选择	198
8.3 基于优化原理的 MPPT 方法	206
8.3.1 算法原理	207
8.3.2 仿真分析与实验	208
8.4 将 MPPT 与无功补偿综合控制的三相光伏并网系统	210
8.4.1 并网逆变器和基于瞬时无功理论的并网策略	211
8.4.2 无功和谐波检测算法的仿真分析	213
参考文献	217



太阳能光伏发电由于其可再生性、清洁性及取之不尽、用之不竭等特点，正在发展成为世界能源组成中的重要部分。图 1.1 所示为欧盟联合研究中心对 21 世纪世界能源使用结构的预测。从图中可见，到 21 世纪 30 年代，光伏发电比重将逐渐增加；到 21 世纪 40 年代，光伏发电比重将加速扩大；至 21 世纪 50 年代之后，光伏发电将成为世界能源主要组成部分。尽管该图显示的仅仅是一个预测，但充分显示了太阳能光伏发电开发利用的广阔前景。

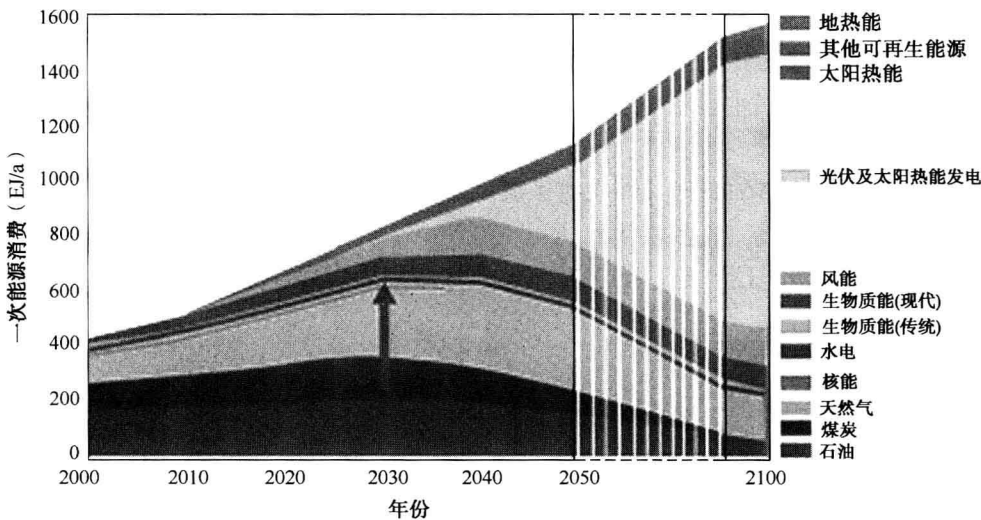


图 1.1 欧盟联合研究中心对 21 世纪世界能源使用结构的预测图

1.1 光伏发电应用

光伏发电最先始于 1839 年。当时，法国物理学家 A. E. 贝克勒(Becqurel)利用酸性水溶液和贵金属电极进行实验，意外地发现了“光生伏打效应”(photovoltaic effect)。1876 年左右科学家们开始了固体光电器件的研究，这其中主要包括硒及硒的氧化物势垒中的光电导和光电效应。大约在 1880 年，光电导硒光伏电池开始了第一次商业应用。1954 年，贝尔实验室研制出了第一块实用晶体硅光伏电池，太阳能转换为电能的实用光伏发电技术随之诞生，从此开辟了太阳能光伏发电应用的新时代。



1.1.1 光伏发电系统分类及其市场

光伏发电系统发展到现在，主要有四种应用形式：户用离网系统、非户用离网系统、分布式并网系统和集中式并网系统。

户用离网系统主要为离大电网较远的用户提供照明、冷藏及其他一些简单家用电器的用电，以保证其日常生活需要。根据人们多年的实践经验，在年光照大于 2500h 的地区，当距离电网在 25km 以上时，常规电网供电成本大于光伏发电的成本。因此，该系统在电网不能覆盖的地区有较大的市场。

而非户用离网系统的应用比较广泛，一般用做通信、水泵、路灯及导航等设备的工业电源和商品电源。在地广人稀的地区，特别是光照充足的山区有着不可替代的作用。

分布式并网系统主要应用在城市屋顶并网、光伏建筑一体化和光伏声屏障系统等方面。这种系统占地少、安装灵活、投资门槛低。与离网系统相比，分布式并网系统可以最大化地提供功率，因为有电网电能支撑，基本上不用考虑负载特性，且可省去蓄电池，由此降低系统成本。在德国、日本、美国等提供上网电价补贴的发达国家，普通居民均可投资建设并获取利润。

集中式并网系统则主要指大型光伏并网电站，作为大电源直接向高压电网送电。因为需要大量土地，且成本较高，一般建于大漠之中，主要由政府部门出资建设。

图 1.2 所示为典型的光伏并网发电系统示意图，它主要由光伏电池（太阳能电池）、光伏逆变器及电网构成。光伏电池将太阳光能转变为直流电能，光伏逆变器将直流电能变换为可控的交流电能，电网则将交流电能输送到具体用户。

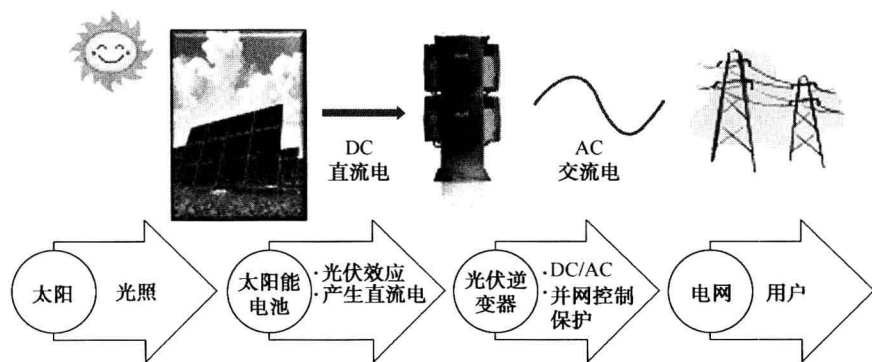


图 1.2 光伏并网发电系统示意图

近十年来，光伏并网发电系统发展迅速。图 1.3 显示了截至 2008 年全球光伏系统的累计安装量。其中，四种光伏发电系统的市场份额如图 1.4 所示。可以看到，并网系统，特别是分布式并网系统，以大部分的市场份额已经毫无争议地占据了市场的主导地位。这主要是由于欧美等发达国家通过政策鼓励居民投资屋顶并网发电系统。而在非洲、亚洲等发展中国家，由于电网覆盖面积有限，所以在初级阶段主要发展离网



型发电系统。在全球市场上，光伏并网发电系统在全部光伏系统容量中占到了 90% 左右。

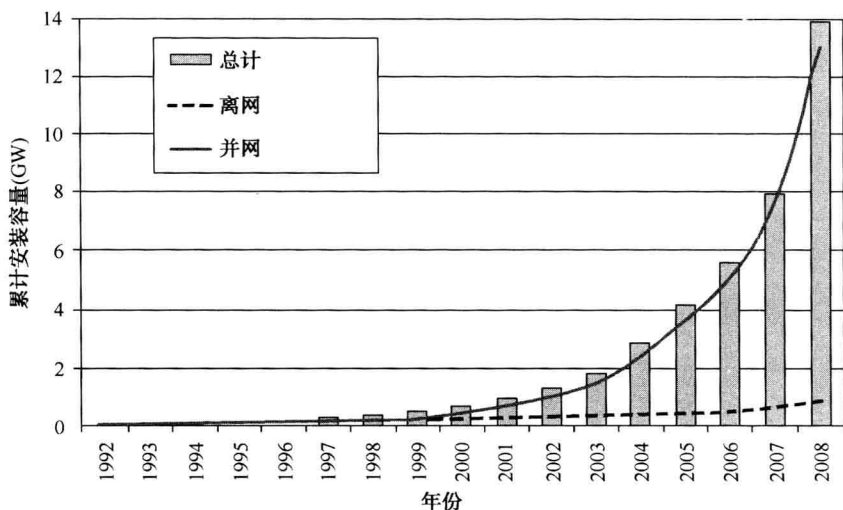


图 1.3 全球光伏系统累计安装量

2009 年全球光伏系统装机总容量（并网 + 离网）约为 6.43GW，如图 1.5 所示，尽管当年全球处于金融危机的形势下，仍比 2008 年增长约 10%。全球光伏市场的总营业额高达 380 亿美元。其中欧洲光伏装机容量为 4.75GW，占全球需求的 74%，前三名分别是德国、意大利和捷克，共计 4.07GW。同时，美国和日本在 2009 年的光伏装机容量均超过 485MW，比 2008 年增长了 36%。

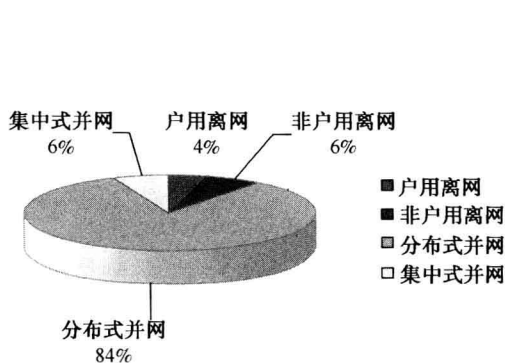


图 1.4 四种光伏发电系统的市场份额

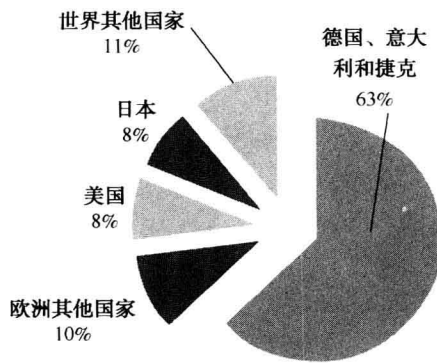
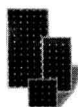


图 1.5 2009 年全球光伏系统装机容量

2008 年全球光伏并网系统装机总容量约为 5.8GW，各国所占份额如图 1.6 所示。对比 2009 年的数据排名可以发现，德国、美国和日本是光伏应用发展比较平稳的国家，而西班牙、意大利、捷克等国家，由于其光伏政策的摇摆，光伏应用市场大起大落。

另外，全球光伏市场中的光伏电池组件产量呈迅猛发展的趋势。图 1.7 所示为截



至 2008 年全球光伏市场中的光伏电池组件产量情况。

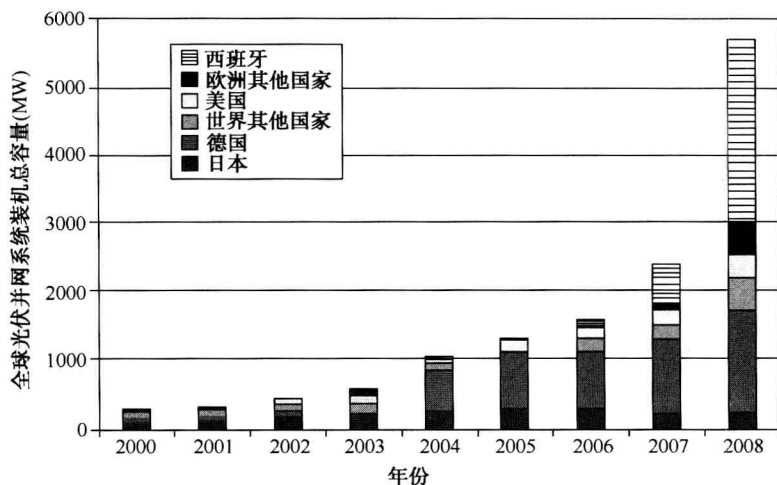


图 1.6 2000—2008 年全球光伏并网系统装机总容量

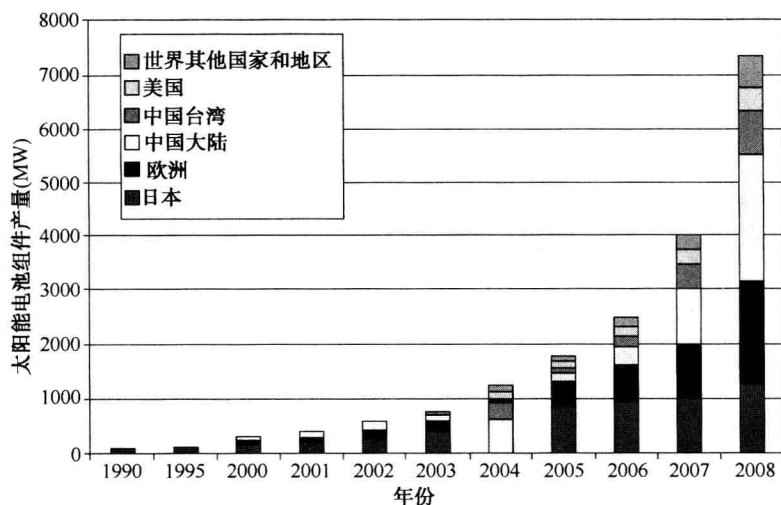


图 1.7 2008 年全球光伏市场光伏电池组件产量

根据欧盟的预测，2008—2015 年全球光伏电池组件计划产能增长如图 1.8 所示，至 2012 年，全球产能将达到 54GW。其中，中国占 32%，欧洲占 20%，日本占 12%。

可见，中国作为世界工厂，在太阳能光伏产业，特别是光伏电池组件生产行业中，已经占有重要地位。中国的太阳能光伏产业在 21 世纪初期迅速崛起，但太阳能光伏应用市场与光伏电池制造业的成长并不平衡，主要表现在：

① 中国已是世界光伏电池三大生产国之一，2008 年产能为 2.4GW，占世界产能的 32%，见图 1.8。

② 从 2004 年到 2009 年，中国光伏发电装机总容量增加了 15 倍，但光伏发电装机总容量，即使在 2009 年仍仅为 160MW (如图 1.9 所示)，只占世界装机总容量

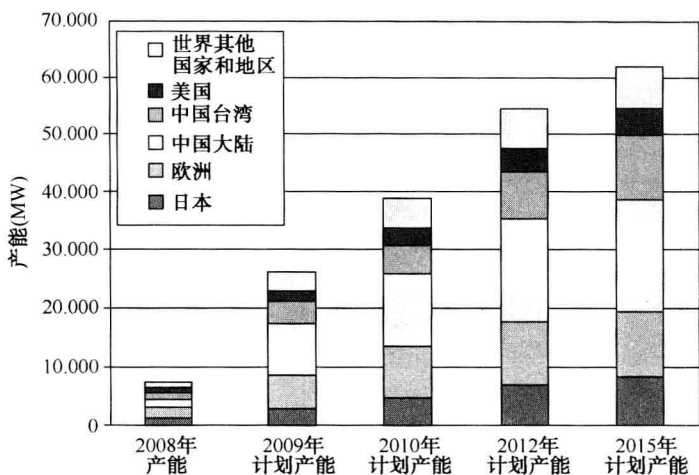


图 1.8 全球光伏电池组件计划产能增长

(6.54GW)的2.4%。

为推动国内的光伏应用市场，中国政府推出了一系列政策。《国家能源发展规划》规定了2010—2020年重点发展领域为：采用户用光伏发电系统或建设小型光伏电站，解决偏远地区无电村和无电户的供电问题；在现代化水平较高的大中型城市建设屋顶太阳能并网光伏发电设施；建设较大规模的太阳能光伏电站和太阳能热发电站。《中华人民共和国可再生能源法》及其实施细则确定了发展光伏的三条主要原则：全额收购可再生能源并网发电项目的上网电量；上网电价按照成本加合理利润的原则确定；上网电价的差额在全网中分摊。借鉴国外发达国家的经验，这些政策将极大地推动我国国内光伏产业的发展。中国的太阳能光伏发电与欧洲等国家“分散开发、低电压就地接入”的发展方式不同，呈现出“以大规模集中开发、中高压接入”与“分散开发、低电压就地接入”并举的发展特征。可以预见，中国及其全球的太阳能光伏发电的市场前景非常可观。

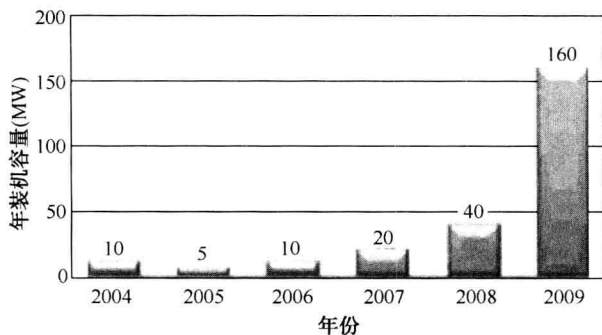


图 1.9 2004—2009年中国光伏系统装机容量

为推动国内的光伏应用市场，中国政府推出了一系列政策。《国家能源发展规划》规定了2010—2020年重点发展领域为：采用户用光伏发电系统或建设小型光伏电站，解决偏远地区无电村和无电户的供电问题；在现代化水平较高的大中型城市建设屋顶太阳能并网光伏发电设施；建设较大规模的太阳能光伏电站和太阳能热发电站。《中华人民共和国可再生能源法》及其实施细则确定了发展光伏的三条主要原则：全额收购可再生能源并网发电项目的上网电量；上网电价按照成本加合理利润的原则确定；上网电价的差额在全网中分摊。借鉴国外发达国家的经验，这些政策将极大地推动我国国内光伏产业的发展。中国的太阳能光伏发电与欧洲等国家“分散开发、低电压就地接入”的发展方式不同，呈现出“以大规模集中开发、中高压接入”与“分散开发、低电压就地接入”并举的发展特征。可以预见，中国及其全球的太阳能光伏发电的市场前景非常可观。

1.1.2 光伏发电技术

光伏发电技术是光伏发电系统的基础。在整个光伏发电系统中，光伏电池技术和光伏变换控制技术是其两大支撑技术。

1. 光伏电池

光伏电池是太阳能发电核心部件。通常的光伏电池是以半导体 P-N 结受太阳光照产生光生伏打效应为基础，直接将光能转化为电能的能量转换器。常用的光伏电池有



单晶硅、多晶硅、薄膜晶体硅和薄膜化合物等多种类型。工业上使用最为广泛的主要是以下几类半导体材料构成的光伏电池：单晶硅、多晶硅、非晶硅、铜铟锡(CIS)、铜铟镓锡(CIGS)。它们的外观如图 1.10 所示。

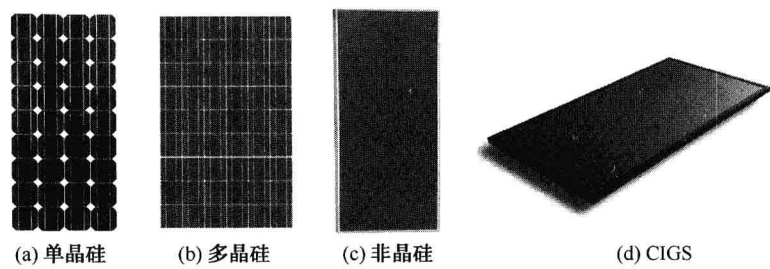


图 1.10 主要的光伏电池外观

光伏电池的典型输出特性如图 1.11 所示。由图可见，当输出电压较小时，光伏电池近似为恒流源；当输出电压较大时，光伏电池近似为恒压源。而且，光伏电池的输出功率在某点处达到最大值，称为最大功率点（Maximum Power Point, MPP）。对于光伏发电系统来说，光伏电池往往是成本比重最大的部件，因此总希望光伏电池能尽可能地输出最大功率，而相应的提高功率输出的控制方法被称为光伏电池的最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking, MPPT）策略。本书在以后的章节中，将详细分析各种 MPPT 方法的原理及其应用。

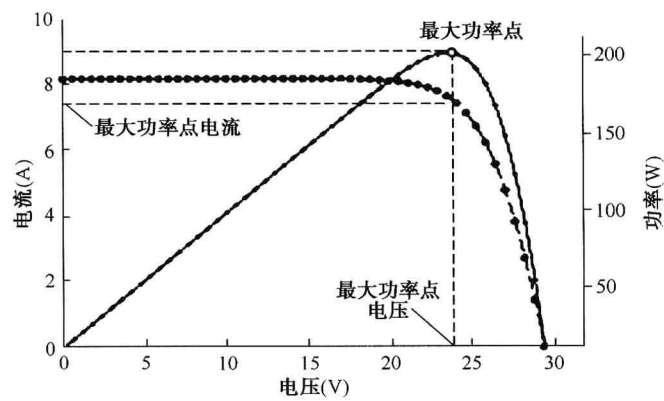


图 1.11 光伏电池的典型输出特性

光伏电池在应用上需要解决两大难题：一是提高光电转换效率；二是降低生产成本。目前，光伏电池的发展仍在围绕解决这两个问题进行。

按照光伏电池发展年代来划分，可以将目前已有的光伏电池划分为以下几类。

① 第一代光伏电池包括单晶硅光伏电池、多晶硅光伏电池、非晶硅光伏电池等。它们的生产技术已经成熟，但消耗硅材料及能源。多晶硅具有稳定的转换效率，性价比最高，是目前竞相开发的重点。

② 第二代光伏电池主要为薄膜晶体硅光伏电池，将很薄的光电材料铺在非硅材料