



学术专著
Academic Monograph



新能源供电系统 优化控制

刘立群 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

新能源供电系统优化控制

刘立群 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以可与建筑集成的光伏发电系统和风力发电系统为研究对象,针对光伏发电和风力发电系统的优化控制问题进行了较为深入的研究,突出了可与建筑集成的光伏发电系统和风力发电系统的最大功率跟踪控制、并网控制、混合多种可再生能源系统的优化分析等内容,以提高系统输出效率、改善电能质量、优化系统配置和提高经济效益为目的,希望可以为我国实现低碳城市的目标贡献微薄之力。

本书对从事能源相关专业研究的专家学者及学生具有重要的参考价值,也可供新能源领域的工程技术人员借鉴参考。

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

新能源供电系统优化控制 / 刘立群著. —北京: 电子工业出版社, 2012.7
ISBN 978-7-121-17408-7

I. ①新… II. ①刘… III. ①新能源—供电系统—系统最优化—研究 IV. ①TM72
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 140060 号

责任编辑: 赵 娜

文字编辑: 谭丽莎

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:

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: 720×1000 1/16 印张: 13 字数: 270 千字

印 次: 2012 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 39.80 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 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

总 序

2012年，太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际，我校的专家学者推出了这套学术丛书，以此献礼，共襄盛举。

六十年前，伴随着新中国的成立，伟业初创，百废待兴，以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起，太原科技大学应运而生。六十年来，几代科大人始终心系民族振兴大业，胸怀制造强国梦想，潜心教书育人，勇担科技难题，积极服务社会，为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场，涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一，今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主，“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明，多学科协调发展的教学研究型大学，成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围，众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘，硕果累累。这套丛书的编撰出版，定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义

2012年6月

前 言

随着全球变暖、海平面上升、矿石燃料价格上升和环境污染等问题的日益严重，可再生能源的开发和应用已经得到了世界各主要国家的重视。特别是哥本哈根会议后，低碳城市、低碳交通、低碳生活等概念的提出，给我们勾勒出未来的能源供应体系，并提出了未来发展的方向。

可与建筑一体化的新能源供电系统是未来低碳城市和低碳建筑的发展方向，像风力发电系统、光伏发电系统、太阳集热系统、生物质能系统、太阳热风系统等都可以与现有建筑集成，这样不仅可以满足建筑自身能源需求，还可以将多余电能输入电网，将现有耗能建筑变为绿色建筑或产能建筑。低碳建筑成功的关键，在于创造性地将可再生能源与传统建筑相结合，而如何将可再生能源与建筑相结合，以及如何尽可能地提高可再生能源系统的输出效率，产生尽可能多的电能或热能，实现可再生能源系统的优化控制是科研和工程人员应该重点考虑的问题。

作者多年从事太阳能、风力发电、太阳热应用等领域的科研工作，实现可再生能源与建筑的一体化优化控制是作者多年来不断追求的目标。希望本书能够给予读者一些启发、一丝灵感，追求更高、思维更新、技术更为先进，实现我国经济和社会的可持续发展，提高我国新能源领域的技术水平。届时可再生能源的技术发展就不是今天我们所能够想象的了，也一定会远超过本书所讲述的深度和广度。

全书从我国的能源利用现状、太阳能和风能的资源分布、发展现状和相关技术、与建筑一体化新能源供电系统发展现状入手；对光伏发电系统优化控制进行了详细的分析，针对相同辐射状况提出了优化电流、快速优化电流、优化电压、模糊逻辑和小脑神经网络 MPPT 技术；针对部分遮蔽状况提出了电流折算和电压叠加算法的光伏遮蔽 Matlab 模型，以及基于遗传改进粒子群、模糊扰动和改进传统 P&O 法的 MPPT 技术；针对小型水平轴风力发电系统提出了改进模糊逻辑和 PO 相结合的 MPPT 控制方法；针对 H 型升力型垂直轴风力发电系统提出了变桨

距控制方法；并从系统并网的角度对三种 D-Q 变换锁相环技术进行了比较，从改善电能质量的角度将免疫反馈理论应用与光伏、风力发电系统、风光互补发电系统的电能质量改善；最后，介绍了可再生能源供电系统优化匹配分析的重要性，并利用 Homer 和 RETScreen 软件对具体案例进行了讲解。

本书的编写得到了上海交通大学王志新研究员、太原科技大学刘春霞副教授，以及杨国韬、郑旭阳等的帮助，写作过程中，作者始终抱着认真求索和勤奋学习的态度，力免出错，但由于水平有限，书中一定会有不少差错和谬误，恳请广大读者和业界同仁批评指正。

太原科技大学 刘立群

2012年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 太阳能资源分布、发展现状和相关技术	5
1.2.1 我国太阳能资源分布	5
1.2.2 我国光伏发电发展现状	6
1.2.3 光伏发电相关技术	9
1.3 风能资源分布、发展现状和相关技术	11
1.3.1 我国风能资源分布	11
1.3.2 我国风力发电发展现状	12
1.3.3 风力发电相关技术	15
1.3.4 太阳能和风能的发展趋势	16
1.4 与建筑一体化新能源供电系统发展现状	17
1.4.1 太阳能与建筑一体化	18
1.4.2 风力发电系统与建筑一体化	19
1.4.3 风光互补系统与建筑一体化	21
第 2 章 光伏发电系统优化控制	24
2.1 相同辐射强度下的最大功率跟踪技术	24
2.1.1 基础知识	24
2.1.2 传统的 MPPT 技术	37
2.1.3 优化电流 MPPT 技术	41
2.1.4 快速优化电流 MPPT 算法	53
2.1.5 优化电压 MPPT 算法	57
2.1.6 基于模糊逻辑理论的 MPPT 技术	62
2.1.7 基于小脑模型神经网络的 MPPT 技术	65
2.2 部分遮蔽下的 MPPT 技术	67
2.2.1 部分遮蔽情况下的光伏输出特性	68
2.2.2 基于电流折算法的输出特性 Matlab 模型	73
2.2.3 基于电压叠加算法的输出特性 Matlab 模型	77
2.2.4 基于遗传改进粒子群的 MPPT 技术	80

2.2.5	基于模糊扰动的 MPPT 技术	87
2.2.6	基于改进传统 P&O 法的 MPPT 技术	90
第 3 章	风力发电系统优化控制	92
3.1	水平轴风力发电系统 MPPT 技术	92
3.1.1	基础知识	92
3.1.2	小型水平轴风力发电系统 MPPT 技术	99
3.2	垂直轴风力发电系统 MPPT 技术	106
3.2.1	垂直轴风力发电机的受力分析	109
3.2.2	垂直轴风力机的理论受力分析	110
3.2.3	变桨距方案的设计及验证	115
3.3	风力发电技术应用于潮汐流发电系统	118
3.3.1	基础知识	119
3.3.2	潮汐流发电技术	119
第 4 章	新能源发电系统并网控制技术	126
4.1	并网基础知识	126
4.2	三种 d-q 变换锁相环技术	132
4.2.1	SSRF-SPLL 技术	133
4.2.2	DDSR-SPLL 技术	135
4.2.3	EPLL-SSRF-SPLL 技术	138
4.2.4	技术比较	140
4.3	基于免疫理论的电能质量改善技术	152
4.3.1	免疫基础理论	153
4.3.2	模糊免疫理论	155
第 5 章	混合多种能源供应系统优化	164
5.1	Homer 优化算例	164
5.1.1	具体算例分析	166
5.1.2	算例敏感性分析	173
5.2	RETscreen 优化算例	175
	参考文献	183

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

传统能源的大规模生产和应用提高了世界各国人民的生活水平，并提供了世界各国发展的强大动力，但随着全世界对能源需求的不断增长，传统能源的储量却越来越少，其价格必将不断升高；同时传统能源的大量使用导致生态环境受到巨大破坏。我国是世界上最大的发展中国家，目前我国的能源消耗总量已经排在世界的第二位，仅 2009 年，我国能源消费总量就为 30.66 亿吨标准煤，其中煤炭消费量达到了 30.2 亿吨，原油消费量为 4.08 亿吨，天然气消费量为 887 亿立方米，其中原油的进口量达到 2.19 亿吨，对外依存度超过 51%。而二氧化硫的排放量近年来一直超过 2000 万吨，在全世界排名第一。能源的大量进口和消耗不仅对国家的能源安全有巨大威胁，而且带来了一系列的问题。传统能源的大量消耗使得我国拥有了数十个能源枯竭的城市，如黑龙江大庆、新疆克拉玛依、河南平顶山和山西大同等；同时我国还拥有世界上污染最严重的城市，如太原和兰州。大量的传统能源消耗所释放出来的 CO_2 、 SO_2 和 NO_x 对全国的环境产生了巨大的影响，温室效应、酸雨和污染每年造成的经济损失高达数千亿元。究其根本原因是不合理的能源消费结构和较低的能源使用效率。长期以来煤炭在我国的能源结构中占有较大比重，多年来一直保持在 70% 左右。图 1.1 显示了中国在 2009 年的能源结构，可以看出其对一次能源的依赖非常高，可再生能源的比例较低，其中对煤炭的依赖度达到 70.3%，石油占 18%，天然气占 3.9%，其他能源包括核能和可再生的水能、太阳能和风能一共占 7.8%。由图可知在我国可再生能源所占比重十分有限，直到最近几年，我国的风能太阳能利用才有所发展，但在整个能源结构中的比例仍然较低。2011 年我国风电新增装机容量 1763 万千瓦，累计



装机容量达到 6236.4 万千瓦，但是同我国 10.5 亿千瓦的电力装机容量相比依然较少^[1~16]。

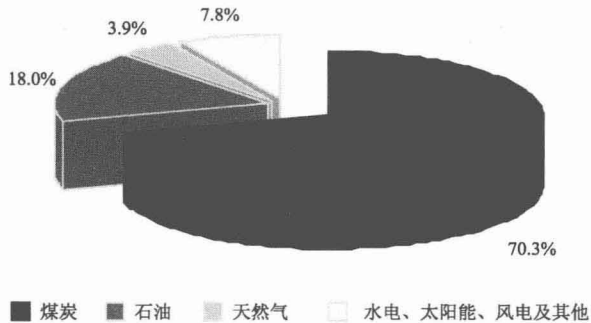


图 1.1 我国 2009 年的能源消费结构（来源：国家统计局^[13]）

高度依赖矿物燃料给我国的经济、能源安全和环境带来了巨大的负面影响。图 1.2 显示了过去 30 年，中国主要能源供应结构，由图可知，自改革开放以来的三十年多年中，随着我国经济与社会快速发展，对能源需求也迅速增长，但不合理的能源结构几乎没有任何改变^[17]。

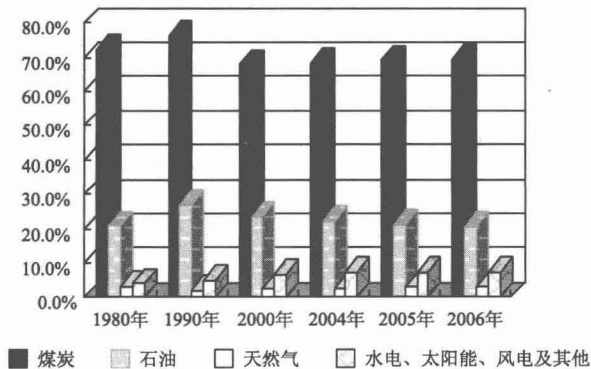


图 1.2 过去三十年我国能源供应结构（来源：国家发改委^[18]）

我国有着丰富的矿产资源，特别是中西部地区，一直以来，国人大多数都认为我国地大物博，那么我国的矿石能源储量与世界相比是否真的如此呢？根据国家发展改革委员会的数据，图 1.3 显示了我国各种主要能源储量与世界的对比。由图可知我国主要的能源储量中，煤炭是最重要的矿物燃料，但也只有大约 105 年的开采时间，而世界煤炭能源可以利用大约 216 年；我国的石油资源在大约



15年后将开采枯竭，与之相比世界石油资源还可以开发大约45年；我国天然气和铀资源分别可开采约30年和50年，而世界天然气和铀矿还可以开采约61年和71年。因此，我国的能源状况与世界相比是非常严峻的，如不尽快解决，必将影响我国社会和经济的可持续发展^[19]。

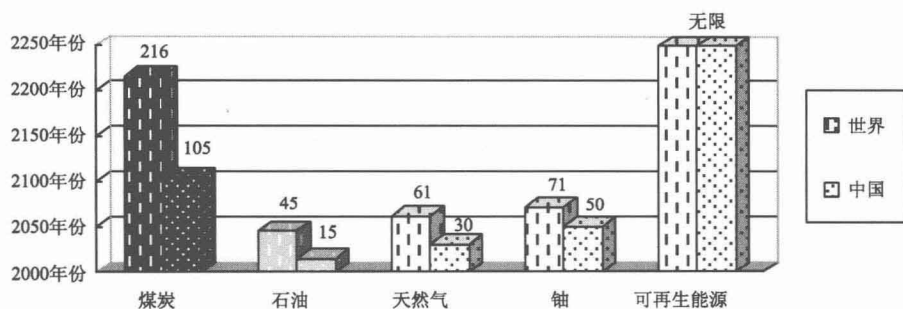


图 1.3 中国与世界能源储量比较 (来源: 国家发改委^[18])

根据工业和信息化部数据, 2011年我国的石油进口量超过2.6亿吨, 对外依存度已超过55%, 而到2020年, 对外依存度可能会超过60%, 这种情况使得我国的能源供应受国际市场价格波动的影响越来越大, 并已经严重影响到我国的国家安全。大量的矿石能源的消耗, 给我国本已脆弱的生态环境带来了巨大的破坏, 根据CCTV的报道, 每年我国因环境污染带来的损失超过2万亿元。当然我国政府已经注意到这一问题, 因此, 我国政府把可再生可替代的能源开发和应用作为经济和社会可持续发展的重要组成部分, 《中华人民共和国可再生能源法》已由中华人民共和国第十届全国人民代表大会常务委员会第十四次会议于2005年2月28日通过, 现予公布, 自2006年1月1日起施行。2009年7月22日, 十一届全国人大环境与资源保护委员会第十三次会议讨论通过了《中华人民共和国可再生能源法修正案(草案)》, 对原可再生能源法的一些条款进行了修改, 2009年8月28日, 十一届全国人大常委会第十次会议初次审议了《中华人民共和国可再生能源法修正案(草案)》。我国政府希望可再生能源在未来的能源结构中扮演重要的角色。

根据世界气象组织的统计数据, 2010年几乎肯定排名自1850年有气候记录仪器以来前三个的最热的年份, 而2001—2010年是最热的十年, 全球温度比



1961—1990 年的平均温度上升了 0.43°C ，图 1.4 显示了全球温度 1850—2010 年的异常变化^[20]。人口剧增、大气环境污染、海洋生态环境恶化、土地遭侵蚀、盐碱化、沙化等破坏、森林资源锐减、酸雨危害、物种加速灭绝、水污染因素和有毒废料污染等人为因素正在使全球温室气体浓度不断上升，而全球变暖导致了海平面上升、冰川融化、物种消失和疾病流行等一系列问题。而据美国环保署 2008 年报告，在所有的温室气体排放中，建筑业占到 38% 以上，在城市中这一比率约为 60%。据统计数据显示，我国每建成一平方米建筑，约排放 0.8 吨碳，而近三十年来，我国每年完成房屋建筑面积在 15 亿~20 亿平方米，即排放的碳多达 12 亿~16 亿吨，约等于排放 44 亿~58.6 亿吨 CO_2 ，而 2006 年我国的年 CO_2 排放量约为 60 亿吨。因此传统高耗能建筑的碳排放已经严重影响到我国节能减排目标的实现，而绿色建筑在我国的比率不到 1%；同时我国的建筑普遍存在保温隔热性能差，采暖用能浪费严重的问题，单位面积采暖能耗相当于纬度相近的发达国家的 2~3 倍。因此要实现国家制定可持续发展的目标，低耗能的绿色建筑是未来我国的发展方向。

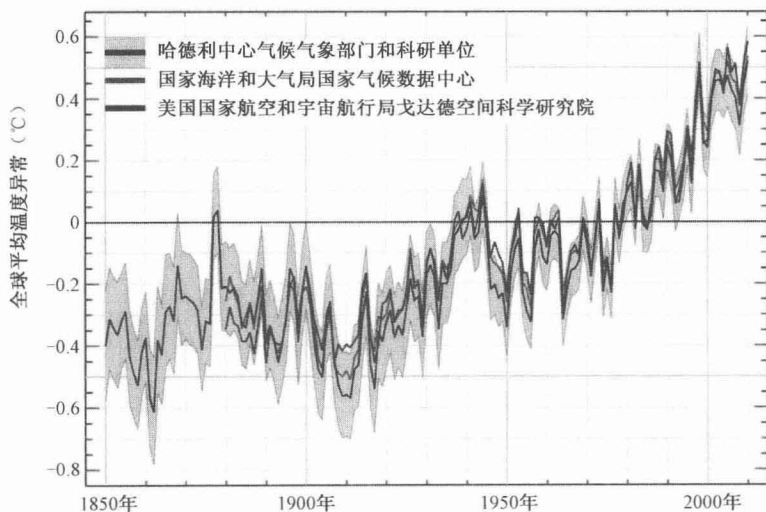


图 1.4 全球平均温度变化从 1850 到 2010 年 (来源: 世界气象组织^[20])

而与建筑一体化的光伏发电系统 BIPV，光伏附着于建筑上的 BAPV (Building Attached PV) 和与安装在建筑物顶部的风力发电系统等低碳建筑，已



经得到了世界各主要国家的重视，并已有了许多成功的案例。如世博零碳馆就充分利用了太阳能、风能和生物质能，实现了能源供应的自给自足。因此本书以可与建筑集成的光伏发电系统和风力发电系统为研究对象，针对光伏发电和风力发电系统的优化控制问题进行了较为深入的研究，希望可以提高系统输出效率、改善电能质量、优化系统配置和提高经济效益的目的，为我国实现低碳城市的目标贡献自己的微薄之力。

1.2 太阳能资源分布、发展现状和相关技术

1.2.1 我国太阳能资源分布

每年到达地球表面上的太阳辐射能约相当于 130 万亿吨煤，其总量属现今世界上可以开发的最大能源，风能、生物质能和矿石能源都是太阳能转变或积累而成的。我国幅员辽阔，有着十分丰富的太阳能资源，据统计每年中国陆地接收的太阳辐射总量相当于 24000 亿吨标煤，除四川和贵州两省外的广大地区年太阳辐射总量都很大，太阳能丰富区包括内蒙中西部和青藏高原等地，年总辐射在 $150\text{KCAL}/\text{cm}^2$ 以上；太阳能较丰富区包括北疆及内蒙东部等地，年总辐射 $130\sim 150\text{KCAL}/\text{cm}^2$ ；太阳能可利用区包括分布在长江下游、两广、贵州南部和云南，以及松辽平原，年总辐射量为 $110\sim 130\text{KCAL}/\text{cm}^2$ ；尤其是青藏高原地区的平均海拔高，大气层薄而清洁，透明度好，纬度低，日照时间长，年太阳辐射量仅低于非洲的撒哈拉沙漠地区^[21]。根据中国气象局风能太阳能评估中心的数据，我国太阳能资源分布图如图 1.5 所示。因此我国的绝大多数地区的太阳辐射强度要高于日本和欧洲地区，特别有利于太阳能的开发和应用^[22]。

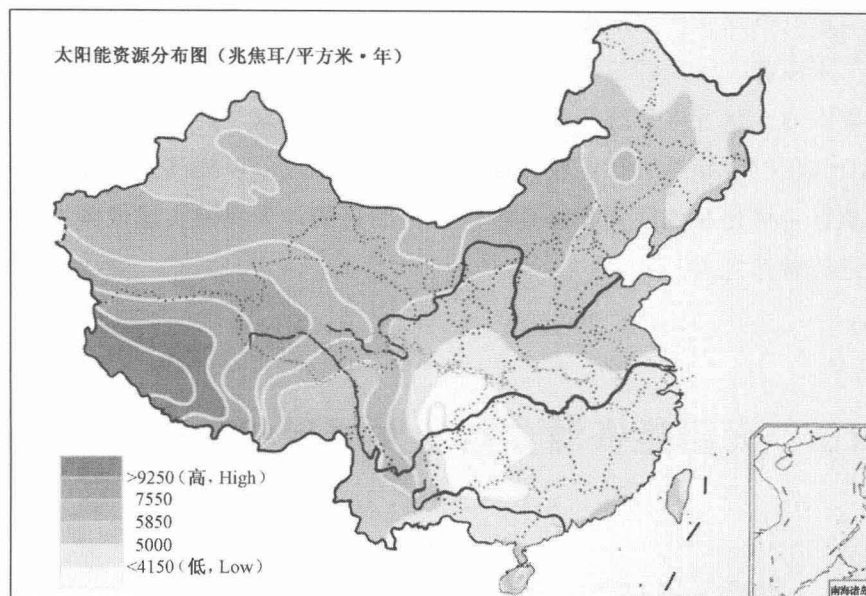


图 1.5 我国太阳能资源分布图 (来源: 国家气象局风能太阳能资源评估中心^[22])

1.2.2 我国光伏发电发展现状

太阳能应用已经成为世界各国争相发展的可替换能源, 随着传统能源的日渐枯竭, 太阳能以其无污染、分布广泛、可再生等优点在世界各国得到了快速发展, 如太阳能温室、太阳能空调、太阳能热水器、光伏发电和光伏照明等。虽然太阳能资源具有能量密度低、地区差异大、受外界因素干扰大等缺点, 但并不妨碍它在世界范围内的快速发展。目前, 光伏发电, 光伏一体化建筑 (BIPV), 光伏/太阳能集热器与建筑一体化 (BIPV/T), 太阳能热发电、太阳能盐池发电和太阳塔发电等技术在美、欧和日本等发达国家都得到了重视, 并建设了一些容量较大的验证项目, 特别是并网型的大规模光伏发电已经得到了大规模的应用。据统计, 在发达国家 80%左右的光伏电池被应用到了并网型发电领域, 而在我国最主要的太阳能应用是在太阳能温室和太阳能热水器领域, 当然在光伏并网发电领域我国政府也是非常重视的, 在 2008 年全球光伏产量达到了 5.5GW, 全球太阳能安装总量已累计达 15GW, 中国的产量占到了三分之一, 而到 2010 年, 国内



光伏产量已经达到 8GW，占世界总产量的一半，大量的资金已经被投入到了光伏领域。目前国内最大的光伏并网发电项目已经在新疆和田开工，装机总量达到 20MW，但和欧美发达国家相比，总安装容量仍然较少。

人类利用太阳能的历史悠久，几千年前的远古祖先就会利用太阳能进行晾晒衣物、谷物和制盐等工作，一直到近代这一状况基本没有改变，随着科技的进步太阳能的利用已经不再是简单利用太阳的热能，而是通过将太阳能转变为电能提供给航天、航空、航海和照明系统等，目前，太阳能的应用可以分为直接应用和间接应用两类。以我国为例，直接应用有太阳能温室大棚、太阳能炊具和太阳能建筑等。而间接应用又可分为两类，一类是通过太阳能集热器直接利用太阳能，如太阳能热水器、太阳能加热器和太阳能空调等；另一类是将太阳能通过太阳能电池即光伏转换成电能后再使用，如光伏发电、光伏水泵和太阳能照明系统等^[7]。

在我国，太阳热能应用在城市以太阳能热水器的应用最为广泛，近年的年生产量超过 2000 万平方米，据统计截至 2009 年底，我国太阳能热水器保有量超过 1.45 亿平方米，如图 1.6 所示。图 1.7 显示了世界各国太阳能热水器保有量的对比，由图可知中国是世界上最大的太阳能热水器生产国和保有国，产量和保有量均占世界的一半以上。在农村以太阳能温室大棚的应用最为广泛，每年冬季大棚生产的新鲜蔬菜、瓜果和鲜花等不但满足了我国民众的需要，而且为我国创造了大量外汇，并提高了农民的收入。

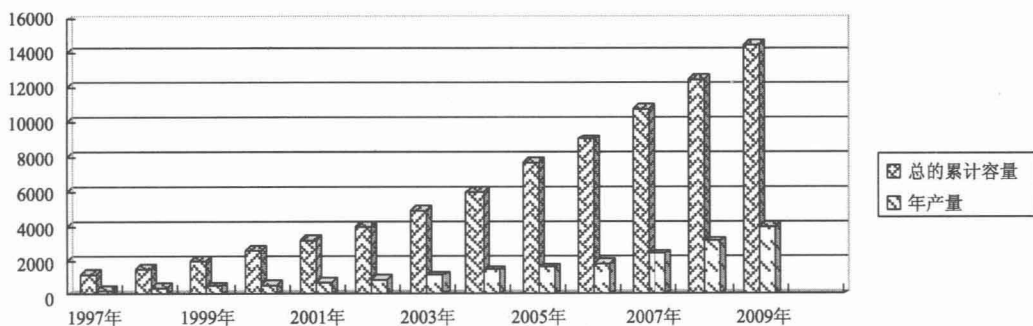


图 1.6 太阳能热水器的保有量和年产量 (来源: 国家发展改革委员会和新闻^[8])

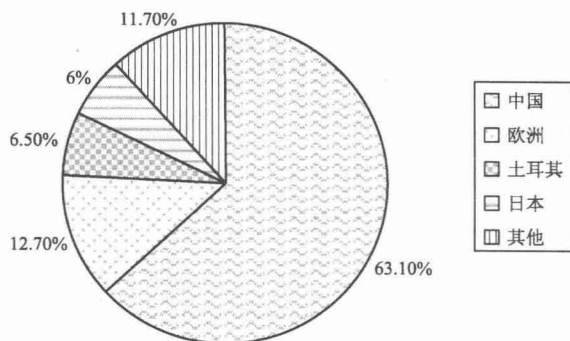


图 1.7 世界各国太阳能热水器的保有量 (来源: 21 世纪可再生能源政策网络^[9])

目前, 光伏的应用得到了中央政府和普通民众的关注, 在我国光伏建筑、光伏水泵、光伏电站、光伏航标灯等都得到了应用, 根据国家发展改革委员会和新闻的数据, 我国目前已经成为世界上最大的光伏生产国, 2008 年的产量超过 2000MW, 约占整个世界产量的 25%, 2009 年产量超过 4000MW, 而 2010 年我国光伏年产量超过 8000MW, 占世界总产量的比例超过 50%, 如图 1.8 所示。我国的光伏工业发展是非常快速的, 近几年的年增长率超过 100%, 一大批国内光伏公司正迅速成长为世界级光伏生产企业, 如无锡尚德和保定英利。

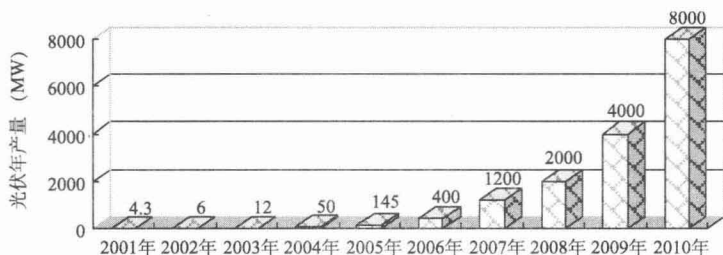


图 1.8 最近 10 年我国光伏年产量 (来源: 国家发展改革委员会和新闻)

在光伏工业快速发展的同时, 有一个不可回避的问题, 我国的光伏产品市场非常小, 截止到 2007 年年底, 我国总的光伏装机容量不过 110MW, 超过 99% 的光伏产品被出口到发达国家。我国 2006 年的光伏市场分配见表 1.1, 过去三十年国内光伏年装机量和累计装机量如图 1.9 所示。虽然政府非常重视光伏产业的发展, 希望太阳能可以在未来能源中扮演重要的角色, 当前一些小型独立式的太阳能供电系统已经被应用于西部的偏远乡村, 但总的来说我国的光伏市场的开