本书是《太阳能实用技术丛书》之一。

本书首次较全面、系统地介绍了并网型太阳能光伏发电系统的基本原理、设备组成、各部分的特点、系统的安装、运行和维护，并列举了部分并网光伏系统实例。本书内容新颖，实用性强，对广大从事太阳能应用技术研究的技术和科研人员具有重要的参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

并网型太阳能光伏发电系统/崔容强，赵春江，吴达成编著. —北京：化学工业出版社，2007.7

（太阳能实用技术丛书）

ISBN 978-7-122-00630-1

Ⅰ.并… Ⅱ.①崔…②赵…③吴… Ⅲ.太阳能发电 Ⅳ.TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 084790 号

责任编辑：戴燕红　郑宇印

责任校对：蒋　宇　　装帧设计：关　飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号　邮政编码 100011）

印　　装：北京市彩桥印刷有限责任公司

720mm×1000mm　1/16　印张 9¾　字数 174 千字　2007 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686）　售后服务：010-64518899

网　　址：http://www.cip.com.cn

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定　　价：**32.00** 元

版权所有　违者必究

前　言

由工业革命开创的现代文明，都是建立在大规模开采、使用化石燃料的基础上的，“石油是工业的血液，煤是工业的粮食”就是这一现状的最好诠释。但是，人类已经开始面对潜在的能源危机——化石燃料终将枯竭。根据国际能源机构预测，全世界煤炭只能用 220 年，油气开采峰值位于 2012 年附近，并将在 30～60 年后消耗殆尽。我国的能源形势更加严峻，据估计，我国的煤只可开采 80 年，天然气只可开采 30 年，石油只够开采 20 年。全世界能源结构将在本世纪发生根本改变。

太阳辐射能预计在 100 亿年里可保持近似恒定的辐射输出，太阳能堪称无限的能源。太阳辐射能完全可以转换成各种人类需要的能源，其中，光能转换为电能是最为重要的一种转化过程。这是因为电能是一种高级的能源形式，它可以方便地转换成热能、动力能、化学能等各种形式的能源，以满足人类生活、生产的需要，自然界中最丰富的电能来源于太阳能发电。

《京都议定书》在人类历史上首次以法规的形式限制温室气体排放，并以支付履约费的形式，对超出排放限制的国家进行处罚。

大规模使用化石能源已对地球生态环境造成了巨大的破坏，为了更好地保护人类的生存环境，全球 185 个国家和地区参与了《京都议定书》的讨论，其中 142 个国家和地区签署该协议。1997 年，我国正式加入了《京都议定书》签约国行列。

我国能源结构以煤为主，CO_2 排放量已经处于世界第二，限排压力很大。受《京都议定书》影响，我国火力发电发展的优势已经丧失。太阳能光伏发电技术是利用“光生伏打效应”将光能直接转换为电能，整个转换过程中无排放，是最清洁、最环保的绿色能源。同时，我国又是世界上太阳能资源丰富的国家之一，全年辐射总量在 917～2333kW・h/m^2 之间，理论总储量为 147×10^{18} GW・h/年。我国现有荒漠面积 108 万平方公里，主要分布在光照资源丰富的西北地区，如果用十分之一，即 10.8 万平方公里的荒漠安装并网光伏发电系统，按照我国现有光伏发电技术水平，每平方米光伏电池方阵（考虑方阵之间的间隔）的有效输出功率为 70W，西北地区的全年辐射总量 1700kW・h/m^2，系统效率按 80％计算，则每年可发电 1.03×10^{13}kW・h，几乎相当于我国 2020 年预计用电量 5.4×10^{12}kW・h 的 2 倍，因此光伏发电在我国有巨大的发展潜力。

并网型光伏发电就是把光伏方阵在阳光下发出的直流电转换为符合入网标准的交流电与电网联结，主要有并网型光伏屋顶和并网型光伏电站。前者的优点是可以利用建筑物具有的供电电路并网，在电网末端构建许多分布式发电系统，为电网提供调峰电力，减少输电损耗。光伏屋顶也可延伸到光伏幕墙、光伏屋檐和光伏窗檐，使光伏组件成为一种特殊的建材与建筑物有机结合，即所谓的光伏建筑一体化，英文名为 BIPV（Building Integrated Photovoltaic），形成新型的节能建筑、零能耗建筑和产能建筑。并网光伏电站可以建在空旷的场地上、沙漠里、海滨、湖滨、河边以及道路顶棚上，往往需要有高压电网与之相配，是大规模光伏发电的一个重要方向。

“到处阳光到处电”是人类美丽的理想，“太阳能＋蓄能＝全部能源需求”则是这一理想最完美的实施方式。采用先进的蓄能系统和并网发电系统，弥补太阳能光伏发电周期性、间歇性、随机性和区域性的缺点，不仅能够为边远无电地区人民提供绿色电力，更可推进中国的“百万（乃至千万）太阳能屋顶计划”。建设中国的光伏屋顶的大型并网光伏电站，将促进太阳能光伏发电由“补充能源”向“替代能源”过渡，由此，我们将在本世纪迎来第一个辉煌的“太阳能世纪”。

本书参考了世界银行/国家发改委/世界环境组织/世界银行中国可再生能源发展项目办公室组织编案的《光伏发电系统设计、安装、维护手册》，也参考了国内外近期出版的光伏书籍，在此，我们表示感谢。本书由崔容强教授、赵春江研究员、吴达成研究员编著，上海交通大学太阳能研究所孟凡英副教授、徐林副教授、周之斌副教授及博士研究生陈凤翔、于化从、赵占霞、王珺、苦史伟、杨乐，硕士研究生赵百川、陈东、赵亮、彭华、姜维、安静、田晨、汪建强、胡宇，上海交通大学 LDK 太阳能联合实验室的杜嘉斌等人参与了编写工作，在此一并致以深切的谢意。限于作者的水平，书中难免有一些疏漏和不当之处，敬请各位读者批评指正。

编者

2007 年 **4** 月

目　　录

第 **1** 章　概论…… 1
1.1　太阳能在未来能源结构中的地位 …… 1
1.2　太阳能利用方式分类 …… 3
1.3　国内外光伏发电发展现状及前景 …… 4
第 **2** 章　太阳和太阳能…… 8
2.1　太阳的结构和辐射能来源 …… 8
2.2　日地运动规律…… 12
2.3　太阳的电磁波谱…… 15
2.4　地球表面上的太阳辐射能…… 15
2.5　太阳辐射能的计算…… 17
2.6　太阳光谱…… 20
2.7　太阳辐射能的测量…… 21
2.8　世界和中国太阳能资源分布情况…… 22
第 **3** 章　太阳电池 …… 26
3.1　太阳能光伏发电的物理基础…… 26
3.2　太阳电池的结构及工作原理…… 30
3.3　太阳电池分类…… 38
3.4　主要太阳电池的基本特性…… 38
3.5　太阳电池的制造工艺…… 43
第 **4** 章　太阳电池组件及光伏方阵 …… 55
4.1　太阳电池组件分类…… 55
4.2　太阳电池组件的结构及工作原理…… 55
4.3　晶体硅太阳电池组件的封装工艺流程…… 60
4.4　光伏方阵的结构及工作原理…… 61
第 **5** 章　逆变器 …… 67
5.1　逆变器的结构及工作原理…… 67
5.2　逆变器的分类…… 72
5.3　逆变器的测试方法…… 72
5.4　逆变器基本特性及评价…… 73

5.5 美国 ASTROPOWER 生产的 XP 系列逆变器实例介绍 …… 75
第 6 章 蓄能系统 …… 77
6.1 蓄能方式 …… 77
6.2 光伏并网发电系统中常用蓄电池的类型、基本结构及工作原理 …… 77
6.3 蓄电池的基本特性 …… 86
6.4 蓄电池使用与维护中的几个问题 …… 87
第 7 章 BIPV 建筑一体化 …… 93
7.1 BIPV 基本概念 …… 93
7.2 BIPV 太阳电池组件的分类 …… 93
7.3 BIPV 设计的评价标准 …… 95
7.4 BIPV 设计的核心问题 …… 96
7.5 BIPV 电学方面需要注意的问题 …… 98
第 8 章 并网光伏发电系统 …… 100
8.1 并网光伏系统分类及入网申报 …… 100
8.2 最大功率跟踪 …… 105
8.3 电网系统的无功需求与补偿 …… 111
8.4 孤岛效应及其检测方法 …… 114
第 9 章 太阳能光伏并网发电系统的安装、运行与维护 …… 123
9.1 安装太阳能光伏发电系统的一般规定 …… 123
9.2 太阳能光伏并网发电系统的安装 …… 125
9.3 光伏系统的检测与调试 …… 129
9.4 光伏系统常见故障 …… 133
9.5 日常维护 …… 139
第 10 章 并网光伏系统实例 …… 141
10.1 43kW 小区屋顶式光伏并网发电系统 …… 141
10.2 638kW 斜墙式光伏并网发电系统 …… 142
10.3 50kW 屋顶光伏并网发电系统 …… 143
10.4 200kW 屋顶光伏并网发电系统（临港工程） …… 144
10.5 MW 级太阳能光伏并网发电系统（深圳） …… 145

第 1 章　概　　论

1.1　太阳能在未来能源结构中的地位

国际能源机构预测，全世界煤炭只能用 220 年，油气开采峰值位于 2012 年，并将在 30～60 年后消耗殆尽。据估计我国的煤只可开采 80 年，天然气可开采 30 年，石油可开采 20 年。图 1-1 是未来能源供应结构（预测）图，由图 1-1 可见，本世纪全世界能源结构将发生根本的改变。

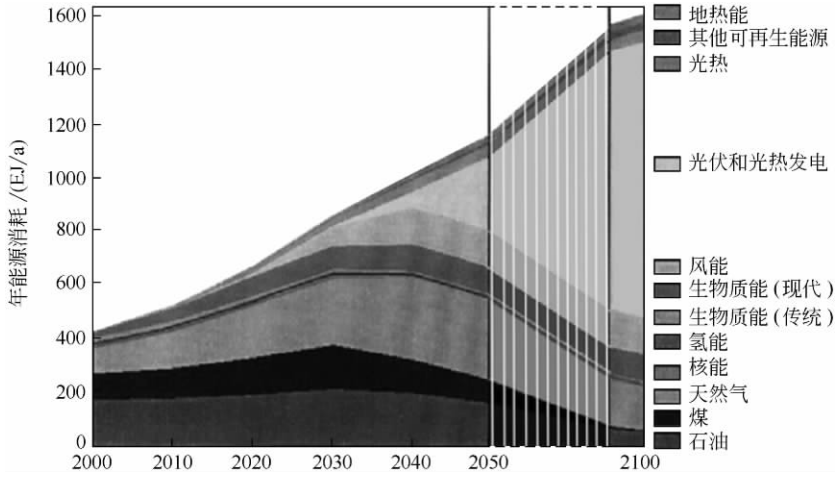


图 1-1　未来能源供应结构图

虽然不同机构的预测数据有差别，但基本结论是共同的：

(1) 能源需求和供应将持续上升，2030 年世界能源需求将从 2000 年的 91 亿吨标油增加到 (153～214)亿吨标油，2050 年将可能增加到 (213～320)亿吨标油；

(2) 未来 50 年，化石燃料仍然占据重要位置，2020 年保持在 90％左右，

2050 年仍将占 60%～70%；

（3）天然气的份额明显扩大，从 2000 年的 22.7%上升到 2020 年的 25%～30%，2050 年为 26%～35%；

（4）石油和煤炭所占比例将逐渐下降，石油从 2000 年的 39%下降到 2020 年的 33%～38%，2050 年下降到 15%～22%，煤炭利用总量增长有限；

（5）可再生能源在 2030 年之后开始逐渐进入大规模应用，2050 年可以达到 20%以上，但也有相当一部分研究认为，在可再生能源应用技术迅速发展的情况下，其在能源结构中的比例将增加得更多；

（6）发展中国家未来的能源需求可能增长迅速，特别是在亚洲地区，发展中国家在全球一次能源中的比例由 2000 年的 30%上升到 2030 年的 40%左右，2050 年达到 50%～60%。

同有限的化石燃料能源相比，太阳辐射能预计在 100 亿年里可保持近似恒定的辐射输出，堪称无限的能源。太阳光辐射经过日地平均距离 1.5×10^8km 传到地球大气层外的辐射强度为 1.376kW/m^2（称为大气质量为零时的太阳辐射，简称为 $AM0$）；阳光垂直入射到地表，经空气、水汽吸收和微尘散射后，衰减大约 30%，辐射强度为 1kW/m^2（大气质量为 1 时的太阳辐射，$AM1$）；再考虑斜入射到地表的情况，即入射距离为 1.5 倍大气层厚度的情况，辐射强度为 0.87kW/m^2（称为大气质量为 1.5 时的太阳辐射，$AM1.5$）。光子能量完全可以转换成各种人类需要的能源，其中，光能转换为电能是最为重要的一种转化过程，这是因为电能是一种高级的能源形式，电能可以方便地转换成热能、动力能、化学能等各种形式的能源，从而满足人类生活、生产的不同需要。自然界中最丰富的电能来源就是太阳能发电。

太阳能是一种理想的可再生能源，开发利用太阳能的主要途径是光伏发电，它具有如下优点：无噪声、无污染，能量随处可得且取之不尽，不受地域限制，可以无人值守，建设周期短，规模设计自由度大等，这些优点都是常规发电和其他发电方式所不能比拟的。目前，开发利用太阳能已成为世界上许多国家可持续发展的重要战略决策。

我国能源结构以煤、石油、天然气为主，CO_2 排放量已经处于世界第二，其他温室气体的排放量也居高不下，限排压力很大。受《京都议定书》的影响，今后我国开发火力发电，特别是燃煤发电将受到极大地制约，火电未来发展的优势已经丧失。我国开始进入工业化中期，即重化工业阶段，重化工业的快速发展成为拉动经济增长的主要力量，进而拉动能源消耗，近年来的能源消耗增长速度显著高于经济增长速度。然而，我国人均能源消费仅为世界平均水平的 45%左右，国民经济和社会发展的现代化必然导致城市人口持续增加、居民消费结构升

级，以住宅、现代化交通和制造业为龙头的经济增长等都会对能源增长提出更高的要求。

我国是世界上太阳能资源非常丰富的国家之一，全年辐射总量为 917～2333kW·h/m^2，理论总储量为 147×10^{18}GW·h/a。我国有荒漠面积 108 万平方公里，主要分布在光照资源丰富的西北地区。如果用十分之一，即 10.8 万平方公里的荒漠安装并网光伏发电系统，按照我国现有光伏发电技术水平，每平方米光伏电池方阵（考虑方阵之间的间隔）的有效输出功率为 70W，西北地区的全年辐射总量为 1700kW·h/m^2，系统效率按 80％计算，则每年可发电 1.03×10^{13}kW·h，几乎相当于我国 2020 年预计用电量 5.4×10^{12}kW·h 的 2 倍，光伏发电在我国有巨大的发展潜力。

1.2 太阳能利用方式分类

（1）光-热转换　太阳能光-热转换是太阳能热利用的基本方式，它是利用太阳能将水加热储于水箱中以便于利用的方式，这种热能可以广泛应用于采暖、制冷、干燥、温室、烹饪以及工农业生产等各个领域。光热产品则是直接把太阳能转换为热能，如太阳能热水器，太阳能制冷空调系统、太阳能干燥、太阳房、太阳灶、太阳能热发电聚光集热装置等。主要利用方式为高温利用＞800℃；中温利用为 200～800℃；低温利用为 200℃以下。

（2）光-电转换　它是利用光生伏打效应原理制成太阳电池，可将太阳的光能直接转换成电能加以利用。光电产品可以直接把太阳能转换成电能储存起来，成为随时可用的电源，但因其价格昂贵，目前我国光电产品还处于小范围应用阶段。

主要利用方式有以下两种。

① 直接光发电　光伏发电、光偶极子发电。

② 间接光发电　光热动力发电、光热离子发电、热光伏发电、光热温差发电、光化间接发电、光生物电池。

（3）光-化学转换　光-化学转换尚处于研究开发阶段，这种技术包括半导体电极产生电而电解水产生氢，利用氢氧化钙或金属氢化物热分解储能等形式。太阳能制氢问题解决了，才有真正意义上的氢利用（包括燃料电池），这将引起时代的变革。

光-电化学转换的主要利用方式有以下三种。

① 动力应用　热力机-斯特林发动机、光压转轮。

② 化学应用　光聚合、光分解。

③ 生物应用　速生植物、油料植物。

1.3　国内外光伏发电发展现状及前景

自 1839 年发现“光生伏打效应”和 1954 年第一块实用的光伏电池问世以来，太阳能光伏发电取得了长足的进步，但是它的发展仍然比计算机和光纤通讯要慢得多。1973 年的石油危机和 20 世纪 90 年代的环境污染问题大大促进了太阳能光伏发电的发展。随着人们对能源和环境问题认识的不断提高，光伏发电越来越受到各国政府的重视，科研投入不断加大，鼓励和支持光伏产业发展的政策也不断出台。以 1997 年美国总统克林顿的“百万太阳能光伏屋顶计划”为标志，日本还有欧洲的德国、丹麦、意大利、英国、西班牙等国也纷纷开始制定本国的可再生能源法案，刺激了光伏产业的高速发展。

2000 年以来，全球光伏产业连续 6 年以 30％～60％以上的速度增长，2002 年全球光伏电池产量为 560MW/a，到 2003 年已高达 750MW/a，增长了 34％。2004 年开始，德国对可再生能源法进行了修订，新的补贴法案促成了德国光伏市场随后的爆发，随之而来的是发达国家间新一轮的政策热潮和全球光伏市场的更高速膨胀。2004 年世界光伏电池年产量达到 1256MW，年增长率高达 68％，2005 年产量达 1818MW，增长率仍有 45％（图 1-2）。2006 年，美国加州州长施瓦辛格提出了要在加州实施“百万个太阳能屋顶计划”，在未来 10 年内建设 3000MW 光伏发电系统的提案，这象征着美国光伏政策的新纪元的到来。正是由于欧洲、日本和美国强有力的政策推动，全球太阳能光伏发电系统市场才呈现出今天欣欣向荣的景象，太阳能光伏发电的前景无限光明（图 1-3～图 1-7）。

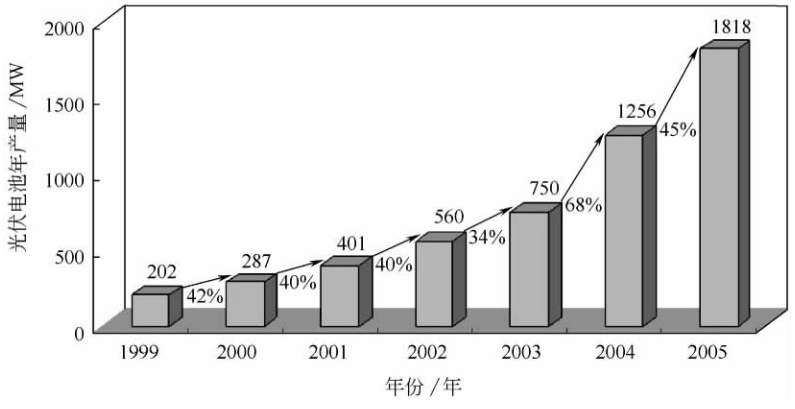


图 1-2　世界太阳电池历年产量

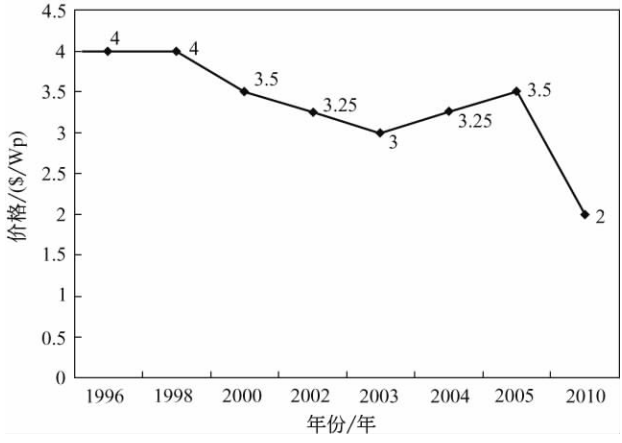


图 1-3　世界光伏组件生产成本下降趋势（图中 2010 年为预测值）

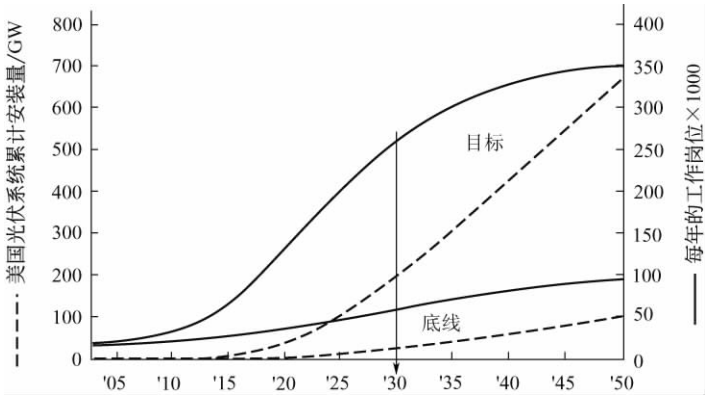


图 1-4　美国光伏发展路线图

世界光伏发电的高速发展主要表现在以下几方面。

（1）光伏电池产量持续增长　多年来光伏产业一直是世界增长速度最高和最稳定的领域之一，1999～2005 年间，光伏电池产量以年均增长率超过 40％的速度高速发展，太阳电池的产量从 1999 年的 202MW 增加到 2005 年的 1818MW，增长了 9 倍。

（2）生产规模不断扩大　光伏产业的领头企业电池年产量早已突破 100MW，且有越来越多的企业已经提出了建设年产 1000MW 电池生产线的目标。

（3）光伏市场飞速膨胀，不断有新的国家出台激励光伏发展的政策　2004 年德国补贴法修订后，仅用了一年，即在 2005 年，德国市场年装机容量便达到了 837MW，占全球市场的 57％，政府政策对光伏的激励可想而知。而 2006 年，

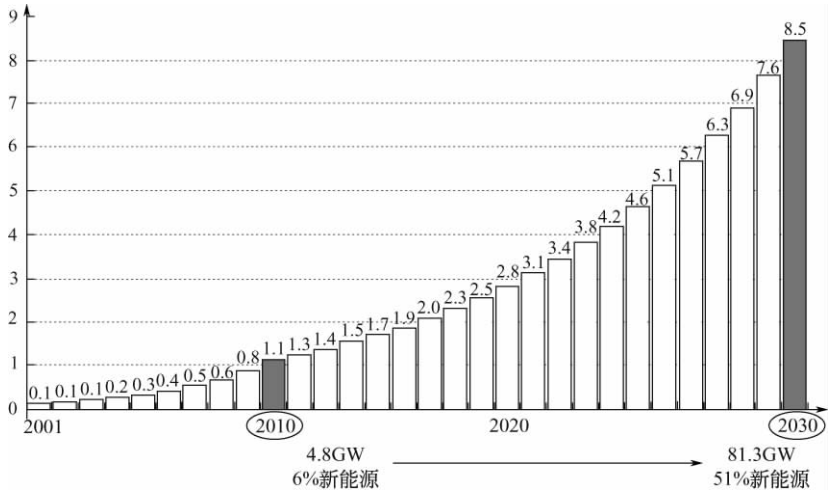


图 1-5　日本光伏发展路线图（2010 年目标为 4.8GW，2030 年为 81.3GW）

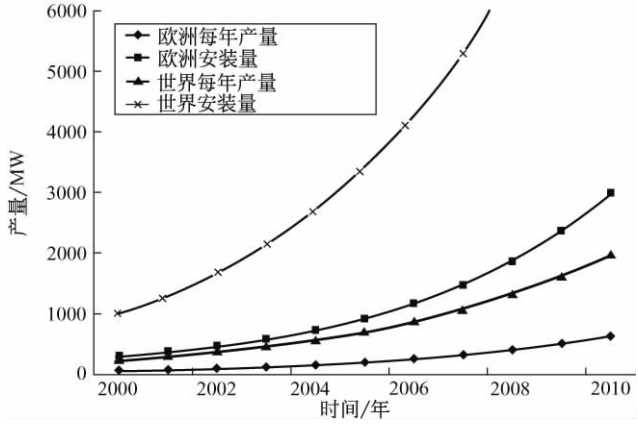


图 1-6　欧洲光伏发展路线图

（2010 年目标为 3GW，2050 年为 442GW）

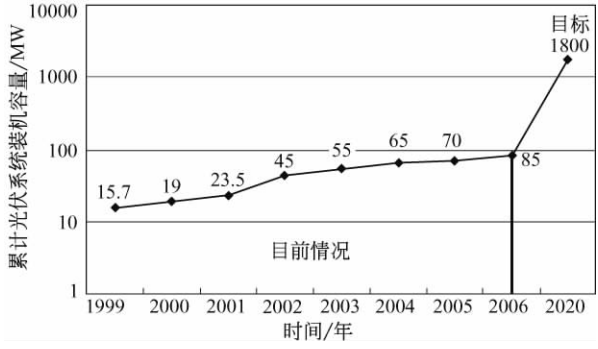


图 1-7　中国光伏系统装机容量发展路线图

美国加州正式出台3000MW光伏安装计划，带动美国其他各州也纷纷仿效。美国将成为继日本、欧洲之后又一个大的光伏市场。

（4）新技术不断出现，电池效率不断提高　随着自动化程度和生产技术水平的提高，电池效率将由现在的水平（单晶硅16%～18%，多晶硅15%～17%）向更高水平（单晶硅18%～20%，多晶硅16%～18%）发展。少数公司采用最先进的生产工艺，已经率先到达了效率20%的目标，如SunPower的背接触电池、三洋的HIT电池等。

（5）光伏电池、组件的成本不断降低　光伏电池自诞生以来，其价格就不断下降，从1996年到2003年，组件整体价格下跌了50%。然而近年来，随着光伏产业飞速发展，多晶硅材料供不应求，价格飞涨，造成了组件价格反弹，但这只是暂时现象，一旦原材料供应得到缓解，光伏产品的价格必然再次进入下行轨道，预计到2010年，组件价格将降到2$/Wp以下（表1-1）。

表 **1-1**　全球部分光伏系统装机容量（MWp）及价格走势

项　　目	时间/年							
	1996	1998	2000	2002	2003	2004	2005	2010
消费产品	22	30	40	60	70	75	80	160
离网住宅系统(美国)	8	10	15	25	30	30	35	100
离网系统(农村)	15	24	38	60	75	80	90	350
信号中继站用系统	23	31	40	60	75	80	90	350
商业离网系统	12	20	30	45	50	55	60	140
并网系统	7	35	120	270	350	700	1375	4500
大型电站(>100kWp)	2	2	5	5	8	20	30	400
预测总装机量/(MWp/a)							1400	6000
实际总装机量/(MWp/a)	89	152	288	525	658	1040	1550	
预计平均价格/($/Wp)							3.00	2.00
实际平均价格/($/Wp)	4	4	3.5	3.25	3	3.25	3.5	

第 2 章　太阳和太阳能

万物生长靠太阳，太阳对地球来说是唯一永恒的能源。为了利用太阳能发电，必须首先了解太阳，包括太阳的结构、太阳的活动规律、太阳辐射的性质、太阳与地球相对运动的规律，到达地面的太阳辐射能的特点等。

2.1　太阳的结构和辐射能来源

太阳的结构还远远没有弄清楚。光谱分析表明，地球上已发现的 109 种元素，除 17 种人造元素以外，其余 92 种元素太阳里都有，这也表明太阳和地球有着密切的关系。太阳是距离地球最近的一颗恒星，日地距离为 1.49597892×10^{8}km，太阳直径为 1.392×10^{6}km，是地球的 109 倍；体积比地球大 130 万多倍，太阳平均密度为 1.4g/cm^3，即比水的密度大 50%，太阳内部密度约为 160g/cm^3，因此日心引力比地心引力大 29 倍左右。太阳的物质组成就质量而言，H 占 78.4%；He 占 19.8%；金属和其他元素总计占 1.8%。太阳和地球的物理性质见表 2-1 和表 2-2。

表 **2-1**　太阳的物理性质

太阳的物理性质	数　　值
太阳直径/km	1.39196×10^{6}
在日地平均距离上太阳的径向角	32′2.4″
太阳表面积/km^2	6.093×10^{12}
太阳质量/g	1.989×10^{33}
太阳体积/cm^3	1.4122×10^{33}
太阳平均密度/(g·cm^{-3})	1.400
表面加速度/(cm·s^{-2})	2.7395×10^{4}
冠温度/K	≈1000000
光球表面温度(相对于黑体辐射)/K	5762
阳光辐射率/(erg·s^{-1}·cm^{-2})	6.5×10^{10}

续表

太阳的物理性质		数　　值
太阳表面抛物线速度/(km/s)		617.0
太阳自转周期/d		24.65
太阳视差		8.80
太阳成分(按重量)	氢/%	75
	氦/%	24.25
	重元素/%	0.75
惯性矩/(kg/m^2)		6.0×10^{46}
太阳常数值		1.95 ± 0.02cal·cm^{-2}·min^{-1}或 1370W/m^2
能量产生率/W		3.90×10^{16}
表面逸出速度/(km/s)		618

表 **2-2**　地球的物理性质

地球的物理性质	数　　值
地球赤道直径/km	12756
地球极间直径/km	12631
地球质量/g	5.977×10^{27}
地球体积/cm^3	1.08322×10^{27}
地球平均直径/km	12742.02
表面加速度(标准值)/(cm·s^{-2})	980.665
扁平度	0.003352
地球轨道偏心度	0.01673
海平面平均压力/kPa	101.325
平均日地距离/km	1.495985×10^{8}
地球平均半径/km	6371
地球表面积/m^2	5.101×10^{14}
远日点距离/m	1.471×10^{11}
近日点距离/m	1.521×10^{11}
绕转轴惯量矩/(kg·m^2)	8.04×10^{37}
地球表面逸出速度/(m/s)	11.2
赤道旋转速度/(m/s)	465
公转轨道平均速度/(km/s)	29.78

一般认为太阳是处于高温高压下的一个巨大火球，其结构如图 2-1 所示。太阳的结构由里向外可分为以下几部分。

(1) 太阳核　这里是太阳的中心，也是热核反应的进行区，日核的半径为 $0.2R_d$，仅占太阳半径的 20%左右，但却集中了一半左右的太阳质量，在这一区域内，温度高达数千万度，压强则高达数亿个大气压，在高温高压作用下，所有的物质都只能以离子形态存在。所以，在日核中，时刻进行着剧烈的热核反应，绝大部分的太阳辐射能量在热核反应过程中产生，并以对流和辐射的形式向外释放。

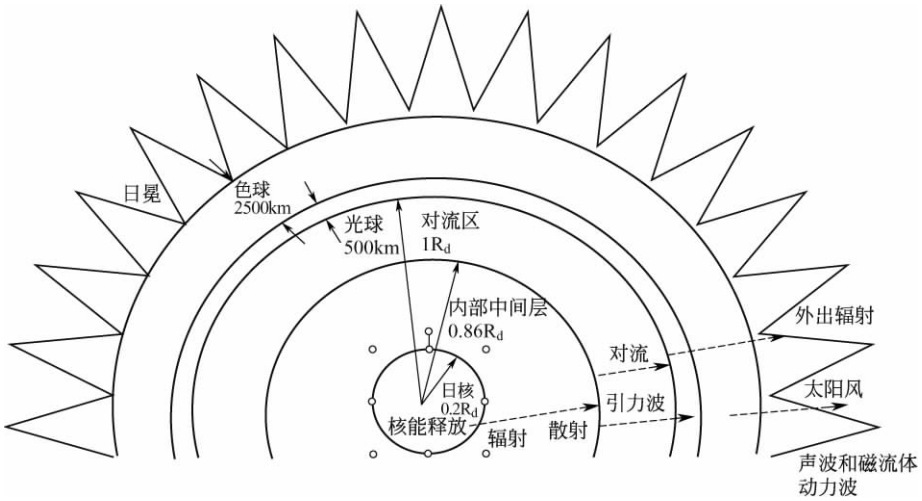


图 2-1　太阳结构示意图

（2）吸收层　日核外面的一层称为吸收层，厚度为 $0.6R_d$，辐射层的温度约为 70×10^4℃，压强也有数十万个大气压。由于从日核辐射出的能量是以高能伽玛射线的形式发出的，辐射层通过对这些高能粒子的吸收、再发射实现能量传递，经过无数次这种再吸收、再辐射的漫长过程（一个光子脱离太阳可能需要 1000 年的时间），高能伽马射线经过 X 射线、极紫外线、紫外线逐渐转变为可见光和其他形式的辐射。如果没有辐射层的中介作用，太阳将是一个仅发射高能射线的不可见天体。

（3）对流层　从吸收层以外至 1 倍太阳直径处称为对流层。大量的对流热传导在该区进行。这里的温度、压力和密度变化梯度很大，物质始终处在剧烈的上下对流状态，对流所产生的低频声波可以通过光球层传输到太阳的外层大气。

（4）光球层　对流层外面的部分称为光球层，厚度为 500km，表面温度接近 6000℃，即太阳的平均有效温度，光球内的温度随深度而增加，大气透明度有限，因此在观测中有临边昏暗现象，几乎全部可见光都是从这一层发射出的。光球上最显著的现象是太阳黑子，它实际上是具有强磁场的低温漩涡，由于它的温度相对较低，约为 4000℃，同周边区域相比，看起来是“黑”的，所以称为太阳黑子。太阳黑子活动对地球的气候和生态影响很大，通常是每 11 年就会遇到黑子活动的高峰期。黑子活动影响到地球，也就是光子群的活动。光球面上还存在一些不随时间变化且均匀分布的米粒状气团，它们是从对流层上升到光球的热气团，这些气团时而出现时而消失。

（5）色球层　色球层在光球层以外，其厚度约为 2000km，几乎是透明的，平常看不到，只有在日全食时能观察到，或者使用专门的滤光镜观测。色球层温

度从底层的数千度上升到顶部的数万度。色球上玫瑰红色的舌状气体如烈火升腾，称为日珥，大的日珥高于光球层几十万公里。还有无数被称为针状体的高温等离子小日珥，针状体可高达 9000km 还多，宽约 1000km，平均寿命约为 5min。日珥在日面上的投影称为暗条。在色球与日冕之间有时会突然发生剧烈的爆发现象，称为耀斑。耀斑爆发时，从射电波段到 X 射线的辐射通量会突然增强，同时伴随大量高能粒子和等离子体喷发，对地球空间环境产生很大影响。

（6）日冕　色球层外即是伸入太空的银白色日冕。日冕是由各种微粒构成的，包括一部分太阳尘埃质点、电离粒子和电子，密度为 $10^{-6}\mathrm{g/cm^3}$，温度高达 100 多万度。有时日冕能向太空伸展几万公里，形成太阳风，打击到地球大气层上，产生磁暴或极光，影响地球磁场和通讯。

太阳辐射来源于在高温高压下进行的热核聚变反应，通过热核反应，太阳一刻不停地向四周空间放射出巨大的能量。太阳的能源主要来自两种热核反应，分别是碳-氢循环和质子-质子循环。

① 碳-氢循环的过程可以用下列式子表示：

$$\mathrm{C_6^{12}+H_1^1\longrightarrow N_7^{13}+\gamma}$$
$$\mathrm{N_7^{13}\longrightarrow C_6^{13}+e^+}$$
$$\mathrm{C_6^{13}+H_1^1\longrightarrow N_7^{14}+\gamma}$$
$$\mathrm{N_7^{14}+H_1^1\longrightarrow O_8^{15}+\gamma}$$
$$\mathrm{O_8^{15}\longrightarrow N_7^{15}+e^+}$$
$$\mathrm{N_7^{15}+H_1^1\longrightarrow C_6^{12}+\alpha}$$

上述 6 个步骤周而复始地循环。如果忽略过程细节，可以看到上述过程似乎是 4 个质子碰撞的结果，而碳和氢在反应前后其总量不变，整个反应过程中被消耗的只有氢元素。

② 质子-质子循环过程可用下列式子表示：

$$\mathrm{H_1^1+H_1^1\longrightarrow D_1^2+e^++\bar{\nu}}+h\nu$$
$$\mathrm{D_1^2+H_1^1\longrightarrow He_2^3+\gamma}$$
$$\mathrm{He_2^3+He_2^3\longrightarrow He_2^4+2H_1^1}$$

式中，$\mathrm{D_1^2}$是重氢（又名氘，氢的同位素），$\mathrm{e^+}$是正电子，$\bar{\nu}$是中微子，$h\nu$是光子。

两种反应的结果是一致的，即每 4 个氢原子核合成 1 个氦原子核，氢核的质量是 $1.672\times10^{-24}\mathrm{g}$，氦核的质量是 $6.644\times10^{-24}\mathrm{g}$，在反应过程中，质量损耗是：

$$\Delta m=(4\times1.672-6.644)\times10^{-24}\mathrm{g}=0.044\times10^{-24}\mathrm{g}$$

又根据爱因斯坦的质能定律：

$$E=mc^2$$

式中，E 为能量；m 为质量；c 为真空中的光速。根据计算，1g 质量可以转化为 9×10^{13}J 能量。在热核反应过程中，4 个氢原子核合成 1 个氦原子核，质量损耗是 0.7%，也就是说，每 1g 氢原子在热核反应中产生的能量为：

$$9\times10^{13}\text{J}\times0.7\%=6.3\times10^{11}\text{J}$$

太阳辐射放射速度为 3.8×10^{26}J/s，按这一数值计算，要消耗 6.03×10^{8}t/s 氢燃料，这一过程中的质量损失约为 4.22×10^{6}t。太阳的质量约为 2×10^{27}t，按照目前的消耗水准，太阳上的氢含量足够维持 800 亿年的辐射消耗，相比地球 46 亿年的地质年龄，太阳能绝对可以称为永恒的能源。

2.2 日地运动规律

2.2.1 地球绕太阳运动

椭圆轨道称为黄道，在黄道平面内，长轴为 152×10^{6}km，短轴为 147×10^{6}km。

（1）赤黄交角　地轴与黄道平面的夹角称赤黄交角，数值为 23.45°。

（2）角速度　地轴相对太阳的转动速度不一样，对北半球夏天快、冬天慢，对南半球夏天慢、冬天快。

（3）南北回归线与夏至、冬至日　北半球夏至日（6 月 21 日）时，南半球恰好为冬至日，太阳直射北纬 23.5°的天顶。因而称北纬 23.5°N 纬度圈为北回归线。北半球冬至日即为南半球夏至日，太阳直射南纬 23.5°，因而称南纬 23.5°S 为南回归线。

（4）春分与秋分日　春分（3 月 21 日）与秋分（9 月 23 日），太阳恰好直射地球的赤道平面（图 2-2）。

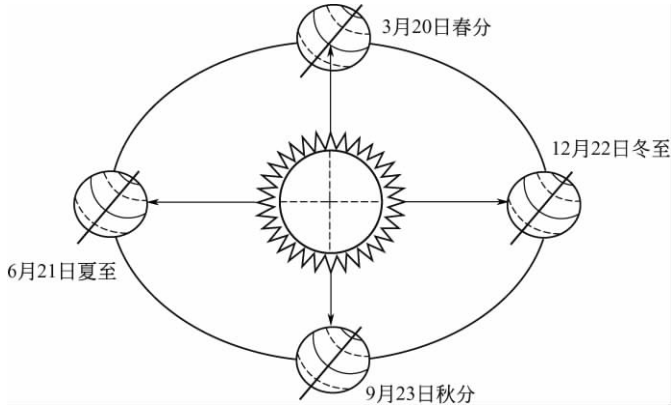


图 2-2　地球绕太阳运行图