



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

李安定 吕全亚 编著

太阳能光伏发电 系统工程



化学工业出版社



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

太阳能光伏发电系统工程

李安定 吕全亚 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

太阳能是人类取用不竭的绿色能源,光伏发电产业是新兴的朝阳产业,对于节约常规能源、保护环境具有重要的现实意义和深远的历史意义。本书共分为上、下两篇,上篇为基础篇,下篇为应用篇。上篇系统阐明太阳辐射能的源泉和特点、测量和计算;光伏发电系统工作原理、构成及其分类;光伏发电系统的设计原理和方法,以及地面大型集中式并网光伏电站、屋顶并网光伏发电系统与独立光伏发电系统的设计应用;光伏发电系统构成的主要和关键部件,即太阳电池、逆变器、控制器、储能装置、直流汇流和交流配电系统以及监控测试系统、辅助电源、整流充电设备、升压变压器等辅助设备的必备知识。下篇则详细介绍太阳能光伏发电系统工程具体应用内容,重点介绍典型案例与分析,以飨读者。

本书紧扣“光伏发电系统工程”主题,内容翔实,图文并茂。本书可供广大太阳能光伏发电设计与科研人员、生产人员、管理人员及施工建设人员阅读使用,还可供大专院校有关专业师生及关注新能源的人士参考。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏发电系统工程/李安定,吕全亚编著.
北京:化学工业出版社,2012.7
ISBN 978-7-122-14424-9

I. 太… II. ①李…②吕… III. 太阳能发电
IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 112931 号

责任编辑:朱 彤
责任校对:吴 静

文字编辑:丁建华
装帧设计:刘丽华



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 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张26¼ 字数712千字 2012年10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:98.00 元

版权所有 违者必究

序 一

为保证人类稳定、持久的能源供应，保护人类赖以生存的生态环境，必须采取措施减少化石能源的耗用，大力开发利用清洁、干净的新能源和可再生能源，走与生态环境相和谐的能源之路。

太阳能堪称无限的能源。太阳辐射能完全可以转换成人类所需要的能源，其中，光能转换为电能是重要的一种转化过程，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。通过太阳电池将资源无限、清洁干净的太阳辐射能转换为电能的太阳能光伏发电技术，是新能源和重要的可再生能源技术之一。专家们预言，到21世纪中叶，太阳能光伏发电将发展成为重要的发电方式，在世界可持续发展的能源结构中占有相当的比例。

由中国科学院电工研究所李安定研究员等撰写的《太阳能光伏发电系统工程》一书是一部全面系统、深入介绍光伏发电技术及其应用最新成果的技术专著。该书主笔李安定研究员，长期从事太阳能发电技术研发工作，具有深厚的学术功底和丰富的实践经验，在我国光伏领域享有盛名。全书可读性和实用性俱佳，是一部重要的行业参考书。该书的及时出版将对提高我国光伏发电技术水平及广泛应用具有重要的推动作用。

本书的出版将对同行和相关领域专家、技术人员以很大的帮助和启迪。

中国工程院院士

顾国彪



2012年6月

序 二

近两百年来，人类在不断地以爆炸式增长的方式向地球索取能源，使得化石能源行将消耗殆尽并导致环境日益恶化。为此，世界各国政府、科技界和产业界已经共同认识到，大力开发和利用太阳能是建立起清洁和可持续发展的能源体系的必由之路。

太阳能光伏发电是开发和利用太阳能的最灵活最方便的方式。近年来得到了飞速的发展。2011年，全球新增并网光伏装机容量已经达到了29.685GW，累计并网光伏装机容量则达到了69.684GW。预计到2016年，全球新增并网光伏装机容量将达到75GW，累计并网光伏装机容量将达到300GW。近些年来，因能源需求旺盛和国家政策支持，我国的光伏发电产业发展十分迅速。2008年，我国并网光伏装机增量仅为45MW，而到2011年，这一数字增加到2200MW，足见光伏发电产业在我国的强大生命力和广阔的发展前景。

本书作者之一李安定研究员不仅是我国太阳能光伏发电工程领域的先驱者和开拓者，也是我国光伏产业早期发展的主要推动者。早在20世纪70年代，他就开展了太阳能光伏发电技术的研究。几十年来，李安定研究员辛勤耕耘于光伏发电工程领域，取得了一系列重大科技成就，他不仅具有深厚的学术功底，而且具有丰富的实践经验。例如，1994年，他就负责建成了世界海拔最高、我国当时容量最大的西藏双湖镇25kW光伏电站工程，1999年，他又领导建成了西藏安多100kW光伏电站，解决了当地的无电问题。

由李安定研究员和吕全亚先生所著的《太阳能光伏发电系统工程》一书涵盖了光伏发电技术的基本原理、系统设计原理和方法、关键装备及系统并网技术等全面内容，并介绍了一系列光伏发电工程应用实例，是当前光伏发电领域不可多得的著作。

值此机会，很荣幸为本书作序，相信本书的出版将对我国该领域的人才培养和产业发展起到有力的推动作用，对于提高我国光伏发电技术水平和建设环境友好社会也将做出重大贡献。

中国科学院电工研究所所长、研究员

肖立业



2012年6月

前言

太阳能是绿色能源，是人类取用不竭的可靠能源。太阳能光伏发电是利用太阳能最灵活方便的一种方式，近年来在国际上受到广泛重视并取得了长足进展。光伏发电产业也是新兴的朝阳产业，对于节约常规能源、保护环境、促进经济发展都有极为重要的现实意义和深远的历史意义。

进入 21 世纪以来，我国太阳能电池及其相关产业发展突飞猛进，产能和产量均超过世界总量的一半以上。历经一年多时间讨论修订，国家“十二五”可再生能源规划目标终于定案：到 2015 年，其中太阳能发电将达到 1500 万千瓦，年发电量 200 亿千瓦时。显然，“十二五”期间，中国光伏发电将在规模和基本产业链条形成的基础上，在质量和应用方面实现飞跃发展。

当前国家需要大量光伏科研人才和应用人才，为满足这一需要，适应行业快速发展步伐，在 10 年前出版同名专著基础上，增添必要章节，丰富内容，笔者重新撰写本书。全书分为上、下两篇，上篇为基础篇，下篇为应用篇。

本书上篇，深入系统阐明太阳辐射能的源泉和特点、测量和计算；光伏发电系统工作原理、构成及其分类；光伏发电系统的设计原理和方法，以及地面大型集中式并网光伏电站、屋顶并网光伏发电系统与独立光伏发电系统的设计应用；光伏发电系统构成的主要和关键部件太阳能电池、逆变器、控制器、储能装置、直流汇流和交流配电系统以及监控测试系统、辅助电源、整流充电设备、升压变压器等辅助设备的必备知识。本书下篇则落笔具体应用的丰富内容，精心搜集了领域关注焦点，重点介绍了典型案例，以飨读者。

本书是笔者长期从事光伏发电系统工程研发、设计和现场工作的结晶，凝聚了理论与实践紧密结合的宝贵经验。在本书写作过程中一度征求相关专家、基层太阳能利用技术工作者的意见，经过反复修订后才定稿。全书内容紧扣“系统工程”主题展开，内容翔实、图文并茂、文字流畅。笔者尽其所能，在书中反映了光伏发电领域最新进展内容，特别是在独立光伏发电系统与并网光伏发电系统（大型集中式并网光伏电站、屋顶并网光伏发电系统）工程设计、并网逆变器等方面进行深入阐述。全书脉络清晰，层层递进，从基础和应用角度全面系统地对太阳能光伏发电系统进行分析和讲解，并详细论述太阳能光伏发电系统工程研发、设计、安装中的关键点。本书不仅适合太阳能光伏发电系统行业科研人员、生产人员和管理人员使用，还可作为高等院校教材及关注新能源行业人士的参考技术书籍。

本书的出版，要特别感谢付出辛勤劳动的陈丹婷、王海波等同事，还要特别感谢化学工业出版社对本书顺利出版提供的鼎力支持。

由于时间有限，书中难免有疏漏或不当之处，敬请读者不吝赐教。

编著者
2012 年 5 月

目 录

上篇 基础篇

第1章 太阳辐射能 2

1.1 太阳辐射能的源泉	2
1.1.1 太阳的构造	3
1.1.2 太阳辐射的起源	4
1.1.3 太阳与地球	5
1.2 地球上的太阳能	8
1.2.1 地球大气层上界的太阳能	9
1.2.2 地球表面上的太阳能	10
1.3 斜面上的太阳辐射能	13
1.3.1 斜面上的太阳总辐照度	13
1.3.2 水平面上太阳辐射转化成斜面上太阳辐射	16
1.4 太阳辐射的测量和资源计算	17
1.4.1 太阳辐射测量和标准	17
1.4.2 太阳能资源计算与分区	22
参考文献	25

第2章 太阳能光伏发电系统概要 26

2.1 太阳能光伏发电系统的工作原理及分类	26
2.2 太阳能光伏发电系统的组成	28
2.2.1 独立型光伏发电系统	28
2.2.2 并网型光伏发电系统	31
2.3 太阳能光伏发电系统的应用	34
2.3.1 光伏发电系统大规模应用的条件	34
2.3.2 光伏发电系统的应用分类	36
2.3.3 光伏发电系统应用的前景	38
参考文献	42

第3章 太阳能光伏发电系统的设计原理和方法 43

3.1 参数分析法	44
3.1.1 基本公式	44
3.1.2 设计参数的定义	47
3.2 LOLP 法	49
3.2.1 LOLP 法的思路和特点	49
3.2.2 LOLP 法的基本公式	49
3.2.3 LOLP 法参数的确定方法	50
3.2.4 LOLP 法的计算流程	50

3.3 模拟法 51

3.3.1 模拟法的思路 51

3.3.2 光伏系统构成部件的模拟基本公式 52

参考文献 56

第 4 章 太阳能光伏发电系统的设计———— 57

4.1 独立光伏发电系统的设计 57

4.1.1 独立光伏发电系统的容量设计 57

4.1.2 逆变器、控制器的选配 62

4.1.3 独立光伏发电系统设计的验证 66

4.2 大型集中式并网光伏电站的设计 71

4.2.1 项目前期工作 72

4.2.2 大型集中式并网光伏电站的配置 73

4.2.3 电站直流发电系统设计 75

4.2.4 并网逆变器的选配 85

4.2.5 光伏电站交流电气系统设计 87

4.2.6 电气二次部分 88

4.2.7 光伏电站的监控系统设计方案 90

4.2.8 光伏电站的防雷接地 95

4.2.9 发电量计算与节能减排效益 98

4.3 屋顶并网光伏发电系统的设计 98

4.3.1 系统分类 98

4.3.2 BIPV 系统设计 99

4.3.3 BIPV 设计要点 102

4.3.4 BIPV 对太阳电池组件提出的一些特殊要求 103

4.3.5 BIPV 的电气连接方式 105

4.3.6 BIPV 设计及安装实例 106

4.4 光伏系统设计软件——RETScreen 使用方法简介 108

参考文献 113

第 5 章 太阳电池、组件及方阵———— 114

5.1 太阳电池 114

5.1.1 太阳电池及其分类 114

5.1.2 太阳电池的工作原理及基本特性 116

5.1.3 晶体硅太阳电池的制造 140

5.1.4 薄膜太阳电池 149

5.1.5 聚光太阳电池 162

5.2 太阳电池组件及方阵 162

5.2.1 太阳电池组件 162

5.2.2 太阳电池方阵 167

参考文献 172

第 6 章 储能装置———— 173

6.1 概述 173

6.1.1 储能的必要性及意义	173
6.1.2 储能的定义及分类	174
6.2 储能蓄电池组	174
6.2.1 铅酸蓄电池的结构及工作原理	174
6.2.2 电解液的配制	177
6.2.3 蓄电池的安装	178
6.2.4 蓄电池的充电	179
6.2.5 固定型铅酸蓄电池的管理和维护	180
6.2.6 后记	184
6.3 飞轮储能	185
6.3.1 飞轮储能简介	185
6.3.2 飞轮储能装置	186
6.3.3 飞轮储能特性	191
6.4 电化学电容器	194
6.4.1 定义和类别	194
6.4.2 超级电容器	194
6.5 压缩空气储能	197
6.6 超导储能	199
6.7 抽水蓄能	201
6.8 其他储能电池	201
6.8.1 锂离子电池	201
6.8.2 液流电池	202
6.8.3 熔融盐电池	203
6.8.4 镍氢电池	203
6.8.5 金属-空气电池	203
6.8.6 燃料电池	203
参考文献	204

第7章 控制器

205

7.1 光伏系统控制器的特点和主要功能	205
7.1.1 特点	205
7.1.2 主要功能	206
7.2 充电、放电控制器	210
7.2.1 充电控制	210
7.2.2 放电保护	214
7.2.3 具有特殊功能的电压调节器	216
7.3 带微处理器的系统控制器	219
7.3.1 充电控制	219
7.3.2 太阳电池阵列光伏特性的检测及微机系统	219
7.3.3 系统功能	220
7.4 光伏电站用直流控制柜	221
7.4.1 主要参数和技术指标	222
7.4.2 机柜面板和内部布局	222
7.4.3 工作原理	223

7.4.4 机柜安装	223
7.4.5 操作使用	224
7.4.6 与微机监控系统的连接调试	225
7.4.7 故障的检查处理	226
7.5 最大功率跟踪控制器	227
7.5.1 恒压控制	228
7.5.2 最大功率跟踪控制	229
参考文献	232

第 8 章 DC-AC 逆变器

233

8.1 逆变器分类及主要功能	233
8.1.1 逆变器分类	233
8.1.2 逆变器主要功能	233
8.2 逆变器的技术要求及性能指标	236
8.2.1 逆变器技术要求	236
8.2.2 逆变器性能指标	236
8.3 离网逆变器的结构和工作原理	238
8.3.1 离网逆变器的结构及选用	238
8.3.2 正弦波逆变器的工作原理	239
8.4 并网逆变器的结构及工作原理	247
8.4.1 两级式逆变器的结构及原理	247
8.4.2 单级并网型逆变器	250
8.4.3 并网逆变器的孤岛检测技术	250
8.4.4 并网逆变器的低电压穿越	255
8.5 逆变器的发展沿革、现况和趋势	256
8.5.1 逆变器的发展沿革	256
8.5.2 逆变器的现况及趋势	258
8.5.3 对光伏并网逆变器拓扑的评价	260
8.5.4 光伏逆变器其他技术目前普遍存在的问题及发展趋势	260
8.6 逆变器市售产品	261
参考文献	266

第 9 章 交流配电系统

267

9.1 光伏电站交流配电系统的构成	267
9.2 光伏电站交流配电系统的主要功能和原理	268
9.3 对交流配电系统的主要要求	269
9.3.1 通用要求	269
9.3.2 技术要求	269
9.3.3 结构要求	270
9.3.4 交流配电柜的保护功能	270
9.4 高压配电系统	271
9.5 JKJP-60k-30CH 交流配电柜的操作使用	271
9.5.1 主要参数和技术指标	271
9.5.2 机柜面板和内部布局	272

9.5.3	工作原理和防雷保护	273
9.5.4	机柜安装	274
9.5.5	操作使用	274
9.5.6	与微机监控系统的连接调试	275
9.5.7	故障判断	276
9.5.8	注意事项	276
参考文献		277

第 10 章 配套系统工程设备

278

10.1	整流充电设备	278
10.1.1	整流充电设备的组成、分类和特点	278
10.1.2	整流充电的工作原理	278
10.1.3	整流充电设备的安装调试	281
10.1.4	整流充电设备的操作和使用	283
10.1.5	整流充电设备的维护和保养	284
10.2	柴油发电机组	285
10.2.1	柴油发电机组的特点和组成	285
10.2.2	柴油发电机组的操作使用与维修保养	286
10.2.3	柴油发电机组常见故障的处理方法	290
10.3	低压架空配电线路	296
10.3.1	结构与组成	296
10.3.2	运行管理	299
10.4	微机监控系统	301
10.4.1	微机监控系统功能与结构	301
10.4.2	硬件系统	301
10.4.3	软件系统	302
10.4.4	可靠性设计	303
10.4.5	微机监控系统实例	304
10.5	接地和防雷	311
10.5.1	接地	311
10.5.2	防雷及防雷设备	313
10.6	电力线缆及其选择	315
10.6.1	按机械强度条件选择导线截面积	315
10.6.2	按导线载流量条件选择导线截面积	315
10.6.3	按电压损失选择导线截面积	316
10.6.4	按短路条件选择导线截面积	319
10.6.5	按经济电流密度选择导线截面积	321
10.6.6	线路选择条件分析	321
10.6.7	保护线的选择	322
10.7	电力变压器及其选择	323
10.7.1	常用电力变压器的种类和容量系列	323
10.7.2	变压器容量与数量的选择原则	323
参考文献		324

下篇 应用篇

第 11 章 独立光伏发电系统

326

11.1 西藏双湖光伏电站系统工程案例	326
11.1.1 双湖光伏电站设计的基本指导思想	327
11.1.2 双湖特别行政区的地理概况及基本气象资料	327
11.1.3 双湖城镇 1993 年供、用电负荷实况及 1995 年负荷预测	328
11.1.4 双湖光伏电站的技术及工程设计	329
11.1.5 双湖 25kW 光伏电站的运行状况及技术创新和特色	335
11.1.6 双湖光伏电站技术经济性能分析	335
11.2 点亮乡村之光——“送电到乡”工程概况	337
11.2.1 “送电到乡”工程的背景	337
11.2.2 “送电到乡”工程的建设情况	338
11.2.3 “送电到乡”工程部分光伏电站图文介绍	339
参考文献	344

第 12 章 并网光伏发电系统

345

12.1 蚌埠曹山 2MWp 非晶硅薄膜并网光伏示范电站	345
12.1.1 项目概况	345
12.1.2 项目总图	345
12.1.3 关键设备和技术	345
12.1.4 安装及调试过程中的技术问题	350
12.1.5 电站性能参数测试及分析	351
12.2 深圳国际园林花卉博览园 1MWp 并网光伏发电系统	357
12.2.1 工程简述	357
12.2.2 系统设计与安装	357
12.2.3 工程关键器件与设备的选型	358
12.2.4 工程设计建设中的几个技术亮点	358
12.2.5 工程的节能减排效益	360
参考文献	360

第 13 章 光伏发电系统在农业上的应用

361

13.1 光电水泵系统	361
13.1.1 光电水泵系统简介	361
13.1.2 光电水泵系统的构成及各部分工作的特性	361
13.1.3 光电水泵系统的设计计算	370
13.1.4 光电水泵系统的工作特性	372
13.1.5 光电水泵系统的经济性	375
13.1.6 一种新型光伏水泵系统	379
13.2 太阳能杀虫灯	382
13.2.1 太阳能杀虫灯工作原理	382
13.2.2 太阳能杀虫灯的特点	382
13.2.3 太阳能杀虫灯的效益	383
13.2.4 安装注意事项	384

13.2.5	太阳能杀虫灯系统组成	384
13.2.6	日常维护和注意事项	385
13.2.7	存在问题及解决方法	385
13.2.8	应用前景	386
参考文献		386

第 14 章 光伏发电系统在工业上的应用————387

14.1	阴极保护电源	387
14.1.1	阴极保护的原理	387
14.1.2	光伏系统用于阴极保护的设计特点	388
14.1.3	设计案例	390
14.2	太阳能光伏发电在车船交通上的应用	390
14.2.1	太阳能游船	390
14.2.2	太阳能观光电动车	394
参考文献		395

第 15 章 太阳能电子产品————396

15.1	太阳能电钟	396
15.1.1	太阳能电钟的特征和用途	396
15.1.2	太阳能电钟的工作原理	396
15.1.3	太阳能电钟的结构及部件	396
15.2	新型能源树——太阳能利用的新思路	403
参考文献		405

上篇 基础篇

第 1 章

太阳辐射能

- 1.1 太阳辐射能的源泉
- 1.2 地球上的太阳能
- 1.3 斜面上的太阳辐射能
- 1.4 太阳辐射的测量和资源计算

物质在分子运动中，将以电磁波的形式向四周辐射能量。太阳是一个巨大的炽热球体，其表面的平均热力学温度高达 6000K，这一热体以电磁波的形式向四周辐射能量，即太阳辐射能。

1.1 太阳辐射能的源泉

太阳是太阳能取之不尽的源泉，其直径约 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ ，是地球直径的 109 倍。太阳的体积为 $1.42 \times 10^{27} \text{ m}^3$ ，是地球的 130 万倍，其质量 $1.98 \times 10^{27} \text{ t}$ ，是地球质量的 33 万多倍。太阳不停地向四周空间放射出巨大的能量，其总量平均每秒即达 $3.865 \times 10^{26} \text{ J}$ ，而地球所接收到的能量仅是太阳发出总量的 22 亿分之一。尽管如此，每秒也有 $1.765 \times 10^{17} \text{ J}$ 之多，折合标准煤 $6 \times 10^6 \text{ t}$ 。图 1-1 所示为太阳能与地球保有的能量之间的关系。

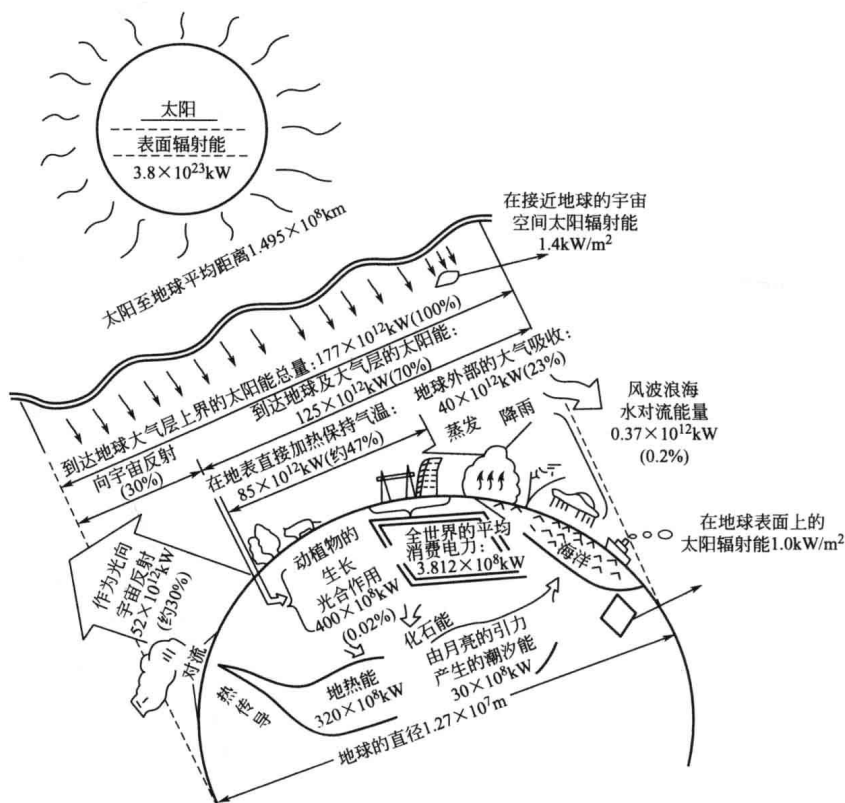


图 1-1 太阳能与地球保有的能量之间的关系

1.1.1 太阳的构造

太阳的结构尚未全部弄清。光谱分析表明，地球上已发现的 109 种元素中，除 17 种人造元素外，其余 92 种元素太阳里都有。这也表明太阳和地球有密切的关系。

一般认为，太阳是处于高温、高压下的一个巨大的气体团，由里向外可分为如图 1-2 所示的 6 个区域。

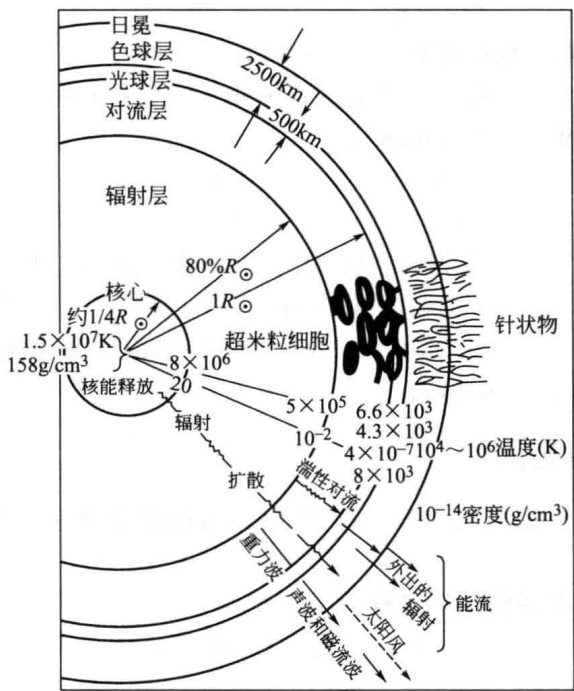


图 1-2 太阳的构造

① 太阳核。太阳核的直径约为太阳直径的 0.23 倍，质量约为太阳的 0.4 倍，体积为太阳的 0.15 倍，压力高达 10^9 atm ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$)，温度约为 10^7 K ，其中进行着激烈的热核反应，所产生的 90% 能量以对流和辐射的方式向外放射。

② 吸收层。从太阳核以外到约 0.8 倍太阳直径处称为吸收层，也称为辐射层。该层压力降到 10^{-2} atm ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$)，热核反应产生的大量氢离子在这里被吸收。

③ 对流层。从吸收层以外至 1 倍太阳直径处称为对流层，其间温度约为 $5 \times 10^3 \text{ K}$ ，大量的对流传热在该区进行。

④ 光球层。对流层之外 500 km 以内，有大量低电离的氢原子，这是肉眼可见的太阳表面，其亮度相当于 6000 K 的黑体辐射。光球层是非常重要的一层，太阳的绝大部分辐射从光球发射出去，同时还有对地球影响很大的黑子和耀斑在当中活动。

⑤ 色球层。色球层厚度约为 2500 km，大部分由低层压氦气、氢气以及少量离子组成，也称为太阳的大气层。

⑥ 日冕。色球层之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。温度高达 10^6 K 以上。有时日冕能向太空伸展几万公里，形成太阳风，冲击到地球大气层上，产生磁暴或极光，从而影响地球磁场和通信。

太阳的物理性质数值如下。

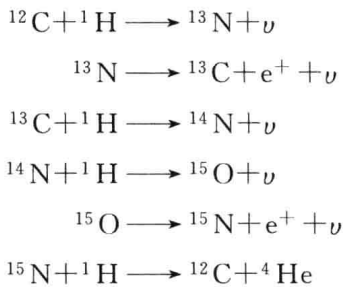
太阳的直径 $1.39196 \times 10^6 \text{ km}$

在日地平均距离上太阳的径向角	32°24″
太阳表面积	6.093×10 ¹² km ²
太阳质量	1.98×10 ³⁰ kg
太阳体积	1.42×10 ³³ cm ³
太阳平均密度	1.400g/cm ³
表面加速度	2.7395×10 ⁴ cm/s ²
太阳冠温度	约 10 ⁶ K
光球表面温度（相对于黑体辐射）	5762K
阳光辐射率	6.5×10 ¹⁰ erg/(s·cm ²) (1erg=10 ⁻⁷ J)
太阳表面抛物线速度	617.0km/s
太阳自转周期	24.65 天
太阳视差	8.80
太阳成分	氢 75%、氦 24.25%、重元素 0.75%
惯性矩	6.0×10 ⁴⁶ kg·m ²
太阳常数值	(1.95±0.02)cal/(cm ² ·min) 或 1368W/m ²
表面逸出速度	618km/s

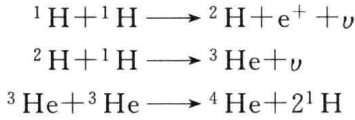
1.1.2 太阳辐射的起源

太阳辐射起源于太阳在高温、高压下进行的热核聚变反应。据此，目前有以下两种说法。

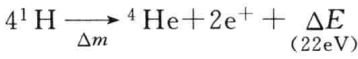
① 碳氮循环。碳氮循环的反应过程为



② 氢-氢链式反应。氢-氢链式反应的反应过程为



以上两种热核反应的结果都是将 4 个氢核聚变成 1 个氦核，同时释放出大量的能量，如下式所示



式中， Δm 表示反应中的质量亏损。

当 4 个氢核聚成 1 个氦核时，就发生了质量亏损，即 1 个氦核的质量 ($6.6477\times10^{-27}\text{kg}$) 比 4 个氢核的质量之和 ($4\times1.672648\times10^{-27}\text{kg}=6.690592\times10^{-27}\text{kg}$) 小 $4.29\times10^{-29}\text{kg}$ 。这部分亏损掉的质量，根据爱因斯坦的质能关系式，有

$$E=mc^2$$

式中， E 为能量； m 为质量； c 为光速 ($3\times10^8\text{m/s}$)。由此可知，1kg 质量可转化成 $9\times10^{16}\text{J}$ 的能量。也即发生了 $4.29\times10^{-29}\text{kg}$ 的质量亏损时，也就相应有