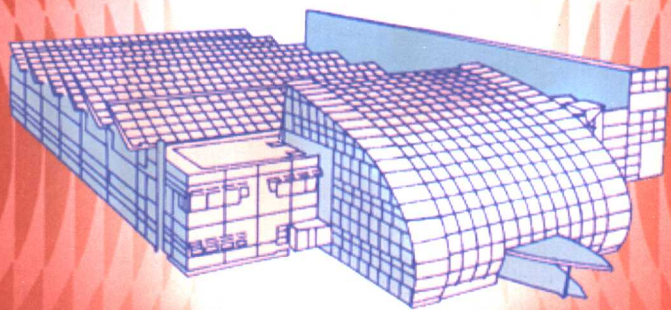


SOLAR ENERGY PHOTOVOLTAIC SYSTEM ENGINEERING

太阳能光伏发电系统工程

李安定 著



北京工业大学出版社

太阳能光伏发电系统工程

李安定 著

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能光伏发电系统工程/李安定著. —北京: 北京工业大学出版社, 2001.12

ISBN 7-5639-1079-4

I. 太… II. 李… III. 太阳能发电-系统工程
IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 086885 号

太阳能光伏发电系统工程

李安定

※

北京工业大学出版社出版发行

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

※

2001 年 12 月第 1 版 2001 年 12 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 32 开本 9.375 印张 250 千字

印数: 1~3000 册

ISBN 7-5639-1079-4/T·186

定价: 20.00 元



出 版 前 言

电工科学是一门有着上百年发展历史、理论基础比较完善的技术科学，对国民经济发展起着举足轻重的作用。跨入 20 世纪 90 年代，世界进入科学技术更加迅猛发展和科技成果更加快速转向生产实践的时代，电工科学和其他学科一样，也面临着汲取别的新兴学科成就促进自身创新和向其他学科渗透并派生出新的交叉学科的任务。对于我国这样一个发展中的开放的大国来说，拓宽电工学科领域，增加电工学科活力，发展电工电能高新技术，使之更好地服务于提高国力的各项建设，更是不容忽视的课题。

30 多年来，我国电工界的科学技术人员为发展电工电能新技术进行了大量艰苦卓绝的研究工作，在电工新材料、新工艺、新能源、先进制造技术，以及环保、医学、生物中的高新电工技术等方面取得了一批批成果。

由丁肇中教授主持的 α 磁谱仪中的大型永磁设备主要是中国科学院电工研究所的研制成果，就充分地证实了这一点。

为了向国内外读者介绍近年来我国电工电能高新科学技术的发展情况和主要研究成果，为促进我国高新科学技术发展尽一份力量，1996年以来，我们特请中国科学院电工研究所研究员万遇良、沈国镠为学术顾问，朱尚廉、张瑚为选题策划，先后组织中国科学院电工研究所、中国科学院物理研究所、北京大学、东南大学等单位的资深研究人员，就超导电工新技术、磁流体发电、超导磁流体推进、太阳能发电、风力发电、宽离子束加工、电子束加工、永磁和永磁机构等撰写了一批学术专著，于1998年至2002年陆续出版。其中不乏“863”国家高技术研究发展计划主题项目，有的还是率先发表的著作。在选题和选题计划实施过程中得到了中国科学院院士、中国科学院电工研究所原所长严陆光先生和北京市新闻出版单位的指导与支持，在此谨致谢意。

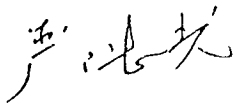
北京工业大学出版社

2001年12月

序 言

太阳能是绿色能源，是人类取之不竭、用之不尽的可靠能源。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。李安定是中国科学院电工研究所研究员，中国太阳能学会副秘书长，长期从事可再生能源的研究开发工作。他曾负责世界海拔最高、我国容量最大的西藏双湖等光伏电站的设计建设工作，解决了当地的无电问题。作者以深厚的学术基础和丰富的实践经验，写成了《太阳能光伏发电系统工程》一书。该书的出版无疑将对我国太阳能的广泛应用起到促进作用。

中国科学院院士



2001年11月20日

作者简介



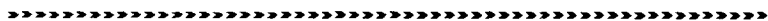
李安定 1966年7月毕业于中国科学技术大学，1968年1月到中国科学院电工研究所工作至今。初期从事磁流体发电研究，1978年起从事太阳能发电研究至今。1979年晋升为助理研究员，1989年晋升为副研究员，1995年12月晋升为研究员。先后任太阳能发电研究室副主任，新能源研究室光伏发电研究组组长、室副主任，电工研究所主管科研的副所长等职。社团组织中，历任中国太阳能学会副秘书长、常务理事，中国可再生能源研究会副会长兼秘书长，中国农村能源行业协会常务理事，小型电源专业委员会主任，中国科学院能源研究委员会委员。作为能源领域内知名专家还参与国家有关宏观计划的决策和起草工作，现为S-863能源领域“节能与可再生能源”主题负责人。



1984年2月至1985年9月曾到法国任访问学者，从事与太阳能利用相关的基础理论问题的研究。

李安定负责研建的“西藏双湖 25 千瓦光伏电站”1997 年获中国科学院科技进步二等奖；“西藏安多 100 千瓦光伏电站”获 2001 年中国科学院科技进步二等奖；参与编写的“西藏阳光计划”1994 年获中国科协优秀建议二等奖；负责的“一型太阳能视听中心”、“SL 太阳能照明灯”项目 1988 年 5 月获农业部二等奖；领导的“七五”攻关项目“2 千瓦光伏示范电站”、“250 瓦光伏水泵系统”和“九五”攻关项目“太阳能中高温工业热利用”等被评为重要成果。发表论文 14 篇，编著(或合作编著)了《太阳能利用和前景》、《法汉机电工程辞典》、《太阳能基础和应》、《金属材料的高温强度理论设计》、《相似模拟理论及应用》、《太阳能应用》等图书。

目 录



第一章 太阳和太阳能	(1)
一、巨大的火球.....	(1)
二、无比的能量.....	(4)
三、地球上的太阳能.....	(6)
四、我国丰富的太阳能资源	(16)
第二章 太阳能光伏发电系统概要	(30)
一、太阳能光伏发电系统的工作原理及组成	(30)
二、太阳能光伏发电系统的分类	(38)
第三章 太阳能光伏发电系统的设计原理	(43)
一、参数分析法	(45)
二、LOLP法	(54)
三、模拟法	(57)
第四章 太阳能光伏发电系统的设计及实例	(70)
一、太阳能光伏发电系统的设计	(70)
二、太阳能电池板入射能量的计算	(75)
三、光伏电站系统工程设计案例	(77)

第五章 太阳能电池及太阳能电池方阵	(98)
一、太阳能电池及其分类	(98)
二、太阳能电池的工作原理、特性及制造方法	(101)
三、太阳能电池方阵	(113)
第六章 贮能蓄电池组	(117)
一、铅酸蓄电池的结构及工作原理	(117)
二、电解液的配制	(122)
三、蓄电池的安装	(125)
四、蓄电池的充电	(126)
五、固定型铅酸蓄电池的管理和维护	(129)
第七章 充、放电控制器	(138)
一、充电控制	(138)
二、放电保护	(147)
三、具有特殊功能的电压调节器	(151)
四、光伏电站用直流控制柜	(161)
第八章 直流-交流逆变器	(171)
一、逆变器基本工作原理及电路系统构成	(174)
二、光伏发电系统用逆变器的分类及特点	(176)
三、逆变器的主要技术性能及评价和选用	(181)
四、光伏电站逆变器的操作使用与维护检修	(185)
第九章 交流配电系统	(191)
一、光伏电站交流配电系统的构成和分类	(191)
二、光伏电站交流配电系统的主要功能和原理	(192)
三、对交流配电系统的主要要求	(193)
四、高压配电系统	(197)
五、JKJP-60k-3CH 交流配电柜的操作使用	(198)
第十章 配套系统设备	(209)
一、整流充电设备	(209)

二、柴油发电机组·····	(221)
三、低压架空配电线路·····	(248)
四、微机监控系统·····	(256)
五、微机监控系统实例·····	(262)
附录·····	(276)
一、接地·····	(276)
二、防雷和防雷设备·····	(280)
参考文献·····	(283)

第一章 太阳和太阳能

一、巨大的火球

万物生长靠太阳。太阳以它灿烂的光芒和巨大的能量给人类以光明，给人类以温暖，给人类以生命。太阳和人类的关系是再密切不过了。没有太阳，便没有白昼；没有太阳，一切生物都将死亡。人类所用的能源，不论是煤炭、石油、天然气，还是风能和水利，无不直接或间接来自太阳。人类所吃的一切食物，无论是动物性的，还是植物性的，无不有太阳的能量包含在里面。完全可以这样认为：太阳是光和热的源泉，是地球上一切生命现象的根源，没有太阳便没有人类。

那么，太阳到底是什么样子的，它距离我们有多远，究竟有多大，是由什么组成的，构造又是怎样的呢？

我们肉眼看见的太阳，高悬在蔚蓝的天空，金光灿烂，绚丽多姿，轮廓清晰，表面十分平静。但是，实际上太阳却是一个巨大的球状炽热气团，整个表面是一片沸腾的火海，极不平静，每

时每刻都在不停地进行着热核反应。据科学家们的研究和探索，可把太阳分为大气和内部两大部分。

太阳大气的结构可分为三个层次：最里层为光球层，中间为色球层，最外面为日冕层，如图 1-1 所示。

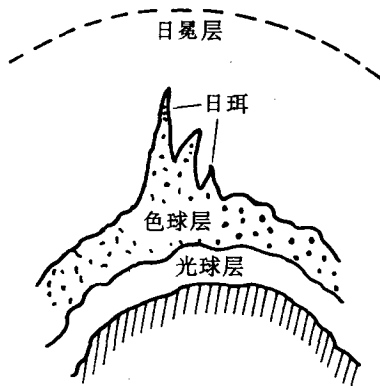


图 1-1 太阳大气结构示意图

光球层 我们平常所见太阳的那个光芒四射、平滑如镜的圆面，就是光球层。它是太阳大气中最下面的一层，也就是最靠近太阳内部的那一层，厚度为500 km左右，仅约占太阳半径的万分之七，非常薄。其温度在5 700 K左右，太阳的光辉基本上就是从这里发出的。它的压力只有大气压力的1%，密度仅为水密度的几亿分之一。

色球层 在发生日全食时，在日轮四周可以看见一个美丽的彩环，那就是太阳的色球层。它位于太阳光球层的上面，是稀疏透明的一层太阳大气，主要由氢、氦、钙等离子构成。厚度各处不同，平均厚度为2 000 km左右。色球层的温度比光球层要高，从光球层顶部的4 600 K到色球层顶部，温度可增加到几万热力学温度(K)，但它发出的可见光的总量却不及光球层。

日冕层 在发生日全食时，我们可以看到在太阳的周围有一圈厚度不等的银白色环，这便是日冕层。日冕层是太阳大气的最外层，在它的外面，便是广漠的星际空间了。日冕层的形状很不规则，并且经常变化，同色球层没有明显的界限。它的厚度不均匀，但很大，可以延伸到 $5 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6$ km 的范围。它的组成物质特别稀少，密度只有地球高空大气密度的几百万分之一。亮度也很小，仅为光球层亮度的 100 万分之一。可是它的温度却很高，达到 100 多万热力学温度(K)。根据高度的不同，日冕层可分为两个部分。高度在 1.7×10^5 km 以下的范围叫内冕，呈淡黄色，温度在 10^6 K 以上；高度在 1.7×10^5 km 以上的范围叫外冕，呈青白色，温度比内冕略低。

太阳的物质，几乎全部集中在内部，大气在太阳总质量中所占的比重极小，可以说是微不足道的。在太阳内部的最外层，紧接着光球的，是对流层。这一区域的气体，经常处于升降起伏的对流状态。它的厚度大约为几万千米。

科学家利用太阳光谱分析法，已经初步揭示出了太阳的化学组成。目前在地球上存在的化学元素，大多数在太阳上都能找到。地球上的 109 种自然元素中，有 66 种已先后在太阳上发现。构成太阳的主要成分是氢和氦。氢的体积占整个太阳体积的 78.4%，氦的体积占整个太阳体积的 19.8%。此外，还有氧、镁、氮、硅、硫、碳、钙、铁、钠、铝、镍、锌、钾、锰、铬、钴、钛、铜、钒等 60 多种元素，但它们所占的比重极小。

太阳是距离地球最近的一颗恒星。地球与太阳的平均距离，最新测定的精确数值为 149 597 892 km，一般可取为 1.5×10^8 km。

用肉眼观看，太阳和月亮的大小差不多，都宛如一个大圆盘子。但是在实际上，太阳的体积却是极其巨大的，堪称一个庞大的星球。到目前为止，据最精确的测定，太阳的直径为

1 392 530 km,一般可取为 1.39×10^6 km,相当于九大行星直径总和的 3.4 倍,比地球的直径大 109.3 倍,比月亮的直径大 400 倍。太阳的体积为 $1.412 2 \times 10^{18}$ km³,为地球体积的 130 万倍。我们肉眼之所以看到太阳和月亮的大小差不多,那是因为月亮同地球的平均距离仅为 384 400 km,不足太阳同地球平均距离的四百分之一。

太阳的质量,据推算,约有 1.982×10^{27} t,相当于地球质量的 333 400 倍。

标准状况下,物体的质量同它的体积的比值,称为物体的密度。太阳的密度,是很不均匀的,外部小,内部大,由表及里逐渐增大。太阳的中心密度为 160 g/cm³,为黄金密度的 8 倍,是相当大的;但其外部的密度却极小。就整个太阳来说,它的平均密度为 1.41g/cm³,约等于水的密度(在 4℃ 时为 1 g/cm³)的 1.5 倍,比地球物质的平均密度 5.5 g/cm³ 要小得多。

这就是太阳的外观。

二、无比的能量

太阳的内部具有无比的能量,它一刻也不停息地向外发射着巨大的光和热。

太阳是一颗熊熊燃烧着的大火球,它的温度极高。众所周知,水烧到 100℃ 就会沸腾;炼钢炉里的温度达到 1 000℃,铁块就会熔化成炽热的铁水,如果再继续加热到 2 450℃ 以上,铁水就会变成气体。太阳的温度比炼钢炉里的温度高多了。太阳的表面温度为 5 770 K 或 5 497℃。可以说,不论什么东西在那里都将化为气体。太阳内部的温度,那就更高了。天体物理学的理论计算告诉我们,太阳的中心温度高达 $1.5 \times 10^7 \sim 2.0 \times 10^7$ ℃,压力比大气压力高 3 000 多亿倍,密度高达 160 g/cm³。这真是

一个骇人听闻的高温、高压、高密度的世界。

太阳是耀入人们眼帘中的一颗最明亮的恒星，人们称它为“宇宙的明灯”。骄阳当空，光芒四射，使人不敢正视。对于生活在地球上的人类来说，太阳光是一切自然光源中最明亮的。那么，太阳究竟有多亮呢？据科学家计算，太阳的总亮度大约为 2.5×10^{27} 烛光。这里还要指出，地球周围有一层厚达 100 多千米的大气，它使太阳光大约减弱了 20%，在修正了大气吸收的影响之后，理论上得到的太阳的真实亮度就更大了，大约为 3×10^{27} 烛光。这真是一个大得惊人的天文数字。

太阳的温度既然如此之高，太阳的亮度既然如此之大，那么它的辐射能量也一定会是很大的了。是的。平均来说，在地球大气外面正对着太阳的 1 m^2 的面积上，每分钟接受的太阳能量大约为 1 367 W。这是一个很重要的数字，叫做太阳常数。这个数字表面上看来似乎不大。但是不能忘记的是，太阳距离地球远在 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ 之外，它的能量只有 22 亿分之一到达地球之上。整个太阳每秒钟释放出来的能量是无比巨大的，高达 $3.865 \times 10^{26} \text{ J}$ ，相当于每秒钟燃烧 $1.32 \times 10^{16} \text{ t}$ 标准煤所发出的能量。

太阳的巨大能量是从哪里产生的呢？是在太阳的核心由热核反应产生的。太阳核心的结构，可以分为产能核心区、辐射输能区和对流区三个范围非常广阔的区带，如图 1-2 所示。太阳实际上是一座以核能为动力的极其巨大的工厂。氢便是它的燃料。在太阳内部的深处，由于有极高的温度和上面各层的巨大压力，使原子核反应得以不断地进行。这种核反应是氢变为氦的热核聚变反应。4 个氢原子核经过一连串的核反应，变成 1 个氦原子核，其亏损的质量便转化成了能量向空间辐射。太阳上不断进行着的这种热核反应，就像氢弹爆炸一样，会产生巨大的能量。其所产生的能量，相当于 1 秒钟内爆炸 910 亿个 10^6 t 级的氢弹，总辐射功率达 $3.75 \times 10^{26} \text{ W}$ 。

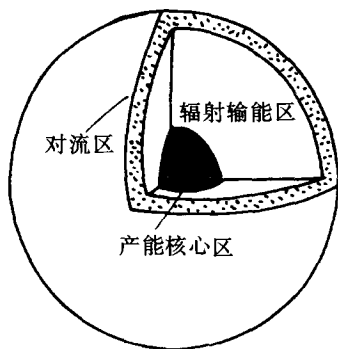


图 1-2 太阳内部结构示意图

三、地球上的太阳能

1. 太阳能量的传送方式

太阳是地球上的光和热的主要源泉。太阳一刻也不停息地把它巨大的能量源源不断地传送到地球上来。它是如何传送的呢？

热量的传播有传导、对流和辐射三种形式。太阳是以辐射的形式向广阔无垠的宇宙传播它的热量和微粒的。这种传播的过程，就称做太阳辐射。太阳辐射不仅是地球获得热量的根本途径，而且也是对人类和其他一切生物的生存活动以及地球气候变化产生最重要影响的因素。

太阳辐射可分为两种。一种是从光球层表面发射出来的光辐射，因为它以电磁波的形式传播光热，所以又叫做电磁波辐射。这种辐射由可见光和人眼看不见的不可见光组成。另一种是微粒辐射，它是由带正电荷的质子和大致等量的带负电荷的电子以及其他粒子所组成的粒子流。微粒辐射平时较弱，能量也不稳定；在太阳活动极大期最为强烈，对人类和地球高层大气有一定的影