

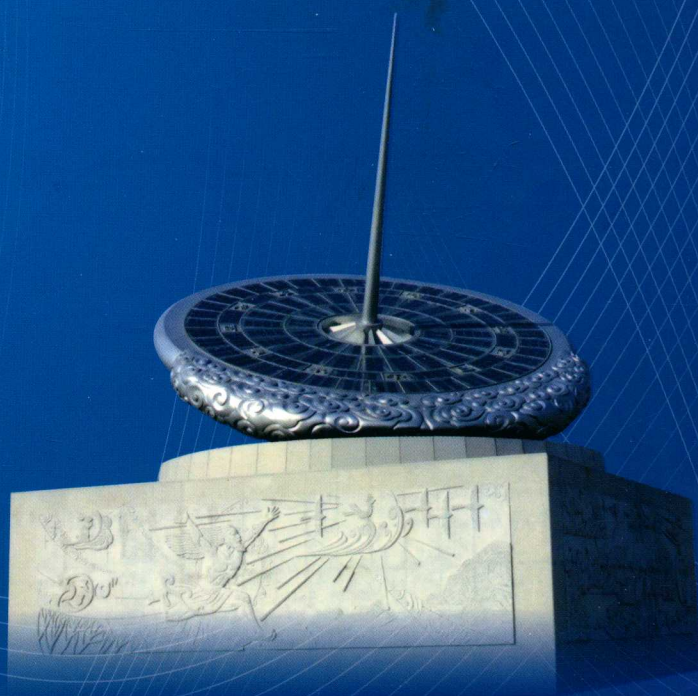


“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

21世纪全国高职高专机电系列技能型规划教材

光伏发电技术简明教程

静国梁 付新春 主编



教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

21 世纪全国高职高专机电系列技能型规划教材

光伏发电技术简明教程

主 编 静国梁 付新春

副主编 查超麟 闫树兵



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书本着“浅显易懂、全面实用”的原则,按照光伏发电系统的一般构成,分别介绍了太阳能资源评估、光伏组件及阵列、储能装置、控制器、逆变器等,全面阐述了太阳能光伏发电系统的设备组成、功能、选型等。

本书可作为高职院校光伏发电或相近专业学生的教材或教辅资料,也可供太阳能光伏发电领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光伏发电技术简明教程/静国梁,付新春主编.—北京:北京大学出版社,2015.6
(21世纪全国高职高专机电系列技能型规划教材)

ISBN 978-7-301-25650-3

I. ①光… II. ①静…②付… III. ①太阳能发电—高等职业教育—教材 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 067595 号

- | | |
|-------|--|
| 书 名 | 光伏发电技术简明教程 |
| 著作责任者 | 静国梁 付新春 主编 |
| 策划编辑 | 刘晓东 |
| 责任编辑 | 李娉婷 |
| 标准书号 | ISBN 978-7-301-25650-3 |
| 出版发行 | 北京大学出版社 |
| 地 址 | 北京市海淀区成府路 205 号 100871 |
| 网 址 | http://www.pup.cn 新浪微博: @北京大学出版社 |
| 电子信箱 | pup_6@163.com |
| 电 话 | 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 |
| 印 刷 者 | 北京富生印刷厂 |
| 经 销 者 | 新华书店 |
| | 787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 296 千字 |
| | 2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷 |
| 定 价 | 29.00 元 |

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

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

前 言

我国太阳能光伏产业在历经美国和欧盟“双反”政策冲击后，正逐渐走向理性发展轨道，随着国家一系列鼓励光伏应用政策的实施，一大批光伏生产企业将逐渐转产下游。随之而来的是对人才的需求也逐渐向下游过渡，这其中，掌握一定专业知识，并具备娴熟操作技能的高职高专人才最为紧缺，高职光伏发电类专业人才的培养迫在眉睫。本书正是为适应此需求而编写的光伏发电入门教程，本书最初是作为校本教材使用，在编写过程中体现了以下几个特点：

1. 行文浅显易懂，适合高职学生使用；
2. 每章最后都附有一篇课外阅读，信息量丰富；
3. 个别地方有本校校本教材印记，编写按化整为零原则展开。

本书共分为7章，讨论了光伏发电系统的基础性知识：第1章介绍了光伏发电系统的工作原理、基本构成和分类；第2~6章分别介绍了太阳能资源、太阳能电池、蓄电池、控制器、逆变器等系统发电组成的作用及基本特点；第7章简要介绍了两种不同运行模式的光伏发电系统应用。

本书由静国梁和付新春担任主编，查超麟和闫树兵担任副主编，孙琪博士主审。本书编写分工如下：静国梁(绪论、第1章)，查超麟和王涛(第2章)，李光叶和房庆圆(第3章)，廖东进和付龙(第4章)，付新春(第5章)，高吉荣和吴琼华(第6章)，闫树兵和屈道宽(第7章)。在本书编写过程中得到了有关专家和光伏厂商的大力支持，同时参考了大量的著作和文献，无法全部列出，谨向有关作者表示诚挚的感谢。

由于编者水平和经验有限，书中难免会有些疏漏之处，恳请读者批评指正，以使本书不断改进、不断完善。

编 者
2015年2月

目 录

绪论	1	4.2 光伏发电系统蓄电池选型与 容量计算	116
第 1 章 太阳能光伏发电入门	8	4.3 蓄电池的安装、维护和保养	121
1.1 认识光伏	9	本章小结	130
1.2 光伏发电系统的组成	15	课外趣味阅读——飞轮储能电池	130
1.3 光伏发电系统类型	23	思考与练习	132
本章小结	32	第 5 章 光伏控制器	133
课外趣味阅读——中国太阳谷	32	5.1 控制器功能	134
思考与练习	35	5.2 控制器原理	138
第 2 章 太阳能资源评估	36	5.3 控制器类型	143
2.1 太阳能和太阳辐射	37	5.4 控制器选型	149
2.2 地球表面太阳辐射能量的影响因素	41	本章小结	153
2.3 太阳辐射的基本定律	50	课外趣味阅读——智能电网	153
2.4 光伏领域太阳辐射计算	59	思考与练习	155
本章小结	65	第 6 章 逆变器	156
课外趣味阅读——太阳能资源开发	65	6.1 逆变器的工作原理及系统构成	157
思考与练习	67	6.2 逆变器的主要功能与技术要求	162
第 3 章 太阳电池、光伏组件及 光伏阵列	68	6.3 逆变器的结构与选型	164
3.1 太阳电池	69	本章小结	168
3.2 光伏组件与光伏阵列	76	课外趣味阅读——太空光伏电站	169
本章小结	100	思考与练习	170
课外趣味阅读——耗能巨兽 摩天大楼	100	第 7 章 光伏发电系统应用介绍	172
思考与练习	101	7.1 离网型光伏发电系统	173
第 4 章 光伏系统储能装置	103	7.2 并网型光伏发电系统	183
4.1 铅酸蓄电池与阀控密封型 铅酸蓄电池(VRLA)	104	参考文献	196

绪 论

在人类文明的历史长河中，人类不断地从自然界索取、探求适合生存和发展所需的各种能源，能源的利用水平折射出人类文明的进步步伐，因此可以说人类文明的发展史就是一部能源利用史。

1. 能源危机与环境污染

地球在长期的演变中积累下来的化石能源一直是满足人类社会能源需求的基础。尤其在 19、20 世纪，诸如煤炭、石油、天然气等化石能源带动了人类科学技术飞速发展，物质财富空前增加。进入 21 世纪，化石能源的储量正随着人类文明的高度发展而迅速枯竭，世界能源形势紧迫，能源的可持续发展已成为世界各国关注的热点。

地球上化石能源储量是有限的，如图 0.1 所示。全球能源消耗的年增长率约为 2%，近 35 年来世界能源消费量已经翻了一番。预计到 2025 年全球能源消耗还将再增加一倍。同时，世界能源储量分布极其不均衡。中东石油储量占世界的 56.8%；天然气跟煤炭储量最多是欧洲，各占 54.6%和 45%；亚洲、大洋洲除煤炭稍多(占 18%)以外，石油、天然气都只有 5%多一点。而世界各国的能源消费程度差别很大，占世界 1/4 的工业化国家消耗了世界能源的 3/4。伴随着世界经济的发展、世界人口的剧增和人民生活水平的不断提高，世界能源需求量持续增大，对能源资源的争夺将日趋激烈，争夺的方式也更加复杂。

化石能源的大量利用对人类生存环境也有着日趋严重的破坏作用。每年燃烧化石能源所产生的 CO₂ 排放量高达 210 亿吨，且年排放量还在呈上升趋势。众所周知，CO₂ 的温室效应导致全球气候变暖。据推算，如果全球变暖 1.5~4.5℃，海平面将上升 25~145cm，沿海低洼地区将被淹没，这将严重影响到许多国家的经济、社会和政治结构。此外，大量燃烧矿物燃料，会在大范围内形成酸雨，严重损害森林和农田，目前全球已有数以千计的湖泊酸性度不断提高，已接近鱼类无法生存的地步；酸雨还损坏石造建筑、破坏古迹、腐蚀金属结构，甚至进入饮用水源，释放出潜在的毒性金属(如镉、铅、汞、锌、铜等)，威胁人类健康。因此，人类文明的高度发展与生存环境的极度恶化形成了强烈的反差。

从我国的化石能源储量和消耗量来看，煤炭是我国的主要能源，其消耗量占总能源消耗量的 67%，而煤炭的直接燃烧造成我国大气的严重污染。研究表明，我国近年雾霾天气之所以增多，主要是因为化石能源消费增多造成的大气污染物排放逐年增加。据世界银行

估计，我国由于空气污染造成的环境和健康的损失，2020年将占总GDP的13%。

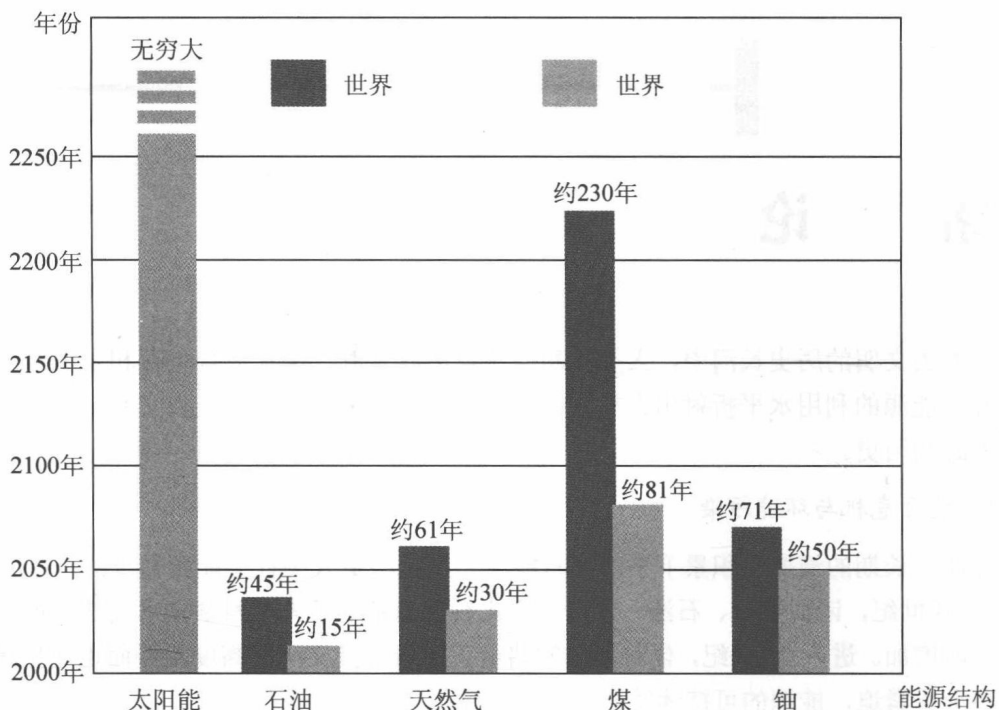


图 0.1 我国能源的剩余探明储量与世界比较

2006 年全球人口是 65 亿，能源需求折合成装机量是 14.5TW；到 2050 年全世界人口大概要达到 100 亿，按照每人每年 GDP 增长 1.6%，GDP 单位能耗按照每年减少 1%来计算，则能源需求装机量将达到 30~60TW。为此，为了解决日益突出的能源紧缺和生态平衡严重破坏等全球性问题，大力发展清洁的新能源和可再生能源是实现经济增长与环境保护协调发展的必由之路。目前，人类可利用的新能源包括风能、水能、海洋能、生物质能、光电、光热等，如图 0.2 所示。

2. 太阳能的主要利用形式和光伏发电的运行方式

世界上潜在水能资源为 4.6TW，经济可开采的只有 0.9TW；风能实际可开发资源为 2~4TW；可开发的生物质能为 3TW；水能、风能和生物质能总共加起来才有 8TW。只有太阳能是唯一能够保证人类未来需求的能量来源，其潜在资源 120 000TW，实际可开采资源高达 600TW。

目前太阳能的利用形式主要有光热利用、光电利用和光化学利用 3 种形式。光热利用具有低成本、方便、利用效率较高等优点，但不利于能量的传输，一般只能就地使用，而且输出能量形式不具备通用性。光化学利用在自然界中以光合作用的形式普遍存在，但目前人类还不能很好地利用。光电利用以电能作为最终表现形式，具有传输极其方便的特点，在通用性、可存储性等方面具有前两者无法替代的优势。同时，由于太阳电池的原料——硅的储量十分丰富，太阳电池转换效率的不断提高，生产成本的不断下降，都促使光伏发电技术在能源、环境和人类社会未来发展中占据重要地位。

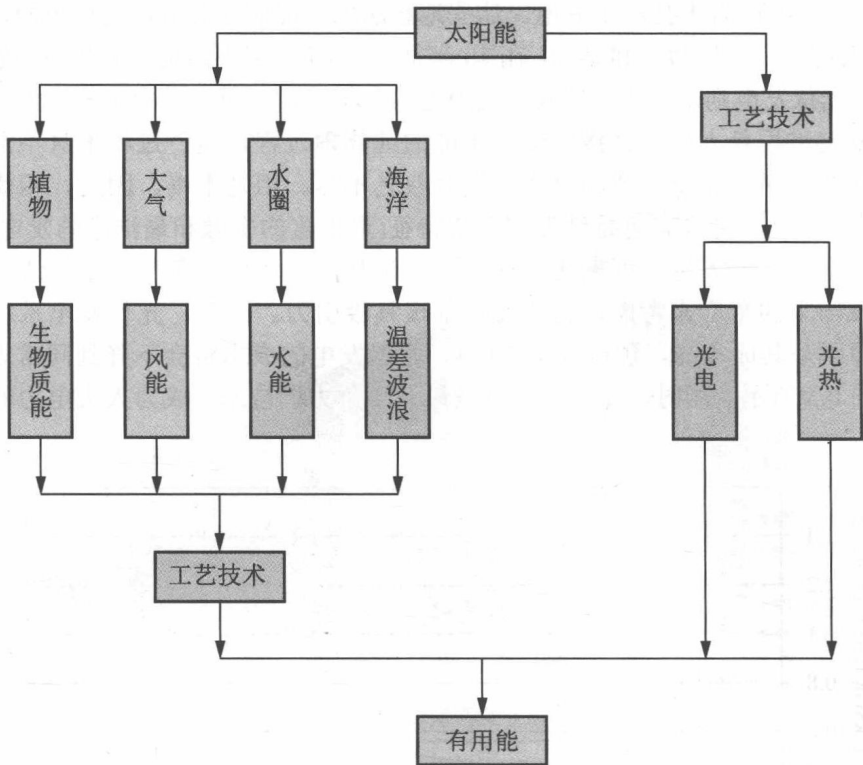


图 0.2 利用太阳能的开发

从能源的稳定性、可持久性、设备成本、利用条件等诸多因素考虑，利用光电转换技术将是最理想的太阳能开发形式。特别是进入 20 世纪 70 年代后，由于石油危机的影响，光伏发电在世界范围内受到高度重视，发展很快。从远期看，光伏发电将以可再生分布式电源进入电力市场，并逐步取代或部分取代化石能源；从近期看，光伏发电可以作为常规能源的补充，解决特殊应用领域，如通信、信号电源和边远无电地区民用生活用电需求，在环境保护及能源战略上都具有重大的意义。2011 年全世界太阳电池的产量达到 37.2GW，累计安装量达到 67.4GW，预计到 2030 年，光伏发电在世界的总发电量中将占到 5%~20%。光伏发电已经在许多应用领域都被证明：在技术上是成熟的，在经济上是合算的。同时，光伏发电是一种不带来任何环境问题的发电技术。平均而言，每千瓦光伏发电系统每年将减排 16kg 氮氧化物、9kg 氧化硫、150kg 固体粉尘以及 600~2 300kg 二氧化碳，是获取电力的最清洁的途径。

我国是世界上太阳能资源最丰富的国家之一，全国总面积 2/3 以上地区年日照时数在 2 200h 以上，年辐射总量大约在每年 928~2 324kWh/m²，相当于 110~250kg 标准煤。我国西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏、内蒙古高原的总辐射量和日照时数均属于世界太阳能资源丰富地区。光伏发电资源开发对优化我国能源结构、保护生态环境、促进经济社会可持续发展具有十分重要的作用。我国西部地区地域广阔，便于集中式光伏发电的开发利用；在中东部广大地区，受到环境条件的限制，分布式光伏发电将成为未来发展的重点。我国是个发展中国家，地域辽阔，有许多边远省份和经济不发达地区，光伏发电技术也是解决我国边远地区和特殊领域供电的重要途径。据统计，目前尚有约 900 万户、2 800 万人口还

没有用上电, 60%的有电县严重缺电。这些地区的农牧民居住分散, 远离电网, 而且用电水平很低(人均年用电仅为 120kWh), 在 10 年甚至 20 年内都不可能靠常规电力解决他们的用电问题, 光伏发电则是解决分散农牧民用电的理想途径, 市场潜力十分巨大。

光伏发电过程是太阳能直接转变为电能的纯物理过程, 这一过程本身不消耗任何其他资源和物质, 而且太阳能资源分布广泛且取之不尽、用之不竭。因此, 相比化石能源和核能发电, 它是一种具有可持续发展理想特征(最丰富的资源和最洁净的发电过程)的可再生能源发电技术。无论从近期还是远期, 无论从能源环境的角度还是从边远地区和特殊应用领域需求的角度来考虑, 光伏发电都极具吸引力。目前, 光伏发电系统大规模应用的唯一障碍是其成本高, 预计到 2020 年, 光伏发电的成本将会下降到同常规能源发电相当, 如图 0.3 所示。届时, 光伏发电将是最具竞争力的技术, 成为人类电力的重要来源之一。

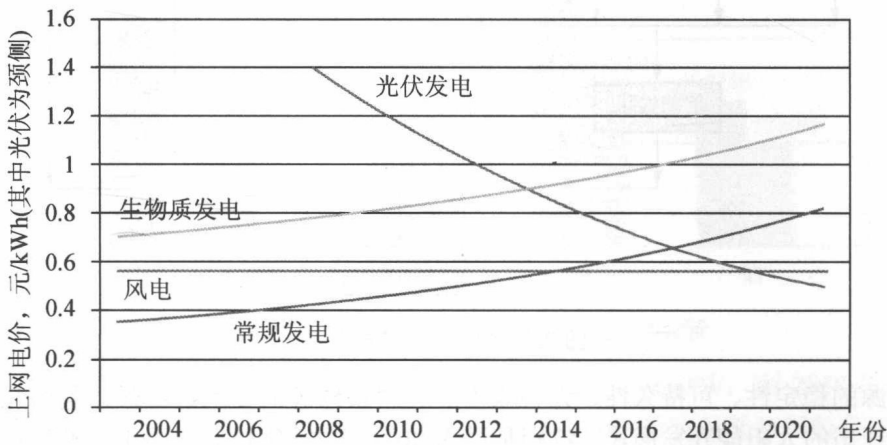


图 0.3 光伏发电成本与常规上网电价比较

由于太阳能资源具有分散性, 而且随处可得, 光伏发电系统特别适合作为独立的电源使用, 例如边远地区的村庄及户用供电系统、光伏照明系统、光伏水泵系统以及大部分的通信电源系统等都属此类。光伏发电系统还可以同其他发电系统组成互补型供电系统, 例如风—光互补型光伏发电系统。由于风力发电系统成本低, 将风能和太阳能资源作为开发对象而构成的互补型光伏发电系统可以大大提高供电的稳定性, 其价格比单一的光伏发电系统至少可减少 1/3。除此之外, 光伏发电系统还可以与国家公共电网相连而构成并网型光伏发电系统。它是将太阳能电池发出的直流电通过并网型逆变器直接汇入电网, 从而可以大大减少蓄电池的存储容量。

3. 太阳能光伏技术的发展及前景

以石油、煤炭和天然气为代表的化石能源是有限的且不可再生, 最终将耗尽。2004 年欧洲光伏工业协会(EPIA)根据化石能源储量和消耗速度以及各种能源技术发展潜力及资源量做出人类未来能源发展长期预测, 如图 0.4 所示, 人类能源结构将在 2030 年左右发生根本性变革。光伏发电在 21 世纪会占据世界能源消费的重要席位, 不但要替代部分常规能源, 而且将成为世界能源供应的主体。预计到 2030 年, 可再生能源在总能源结构中占到 30% 以上, 而光伏发电在世界总电力供应中的比重也将达到 10% 以上; 到 2040 年, 可再生能源



将占总能耗的 50%以上,光伏发电将占总电力的 20%以上;到 21 世纪末,可再生能源在能源结构中占到 80%以上,光伏发电将占到 60%以上。这些数字足以显示出光伏产业的发展前景及其在能源领域重要的战略地位。

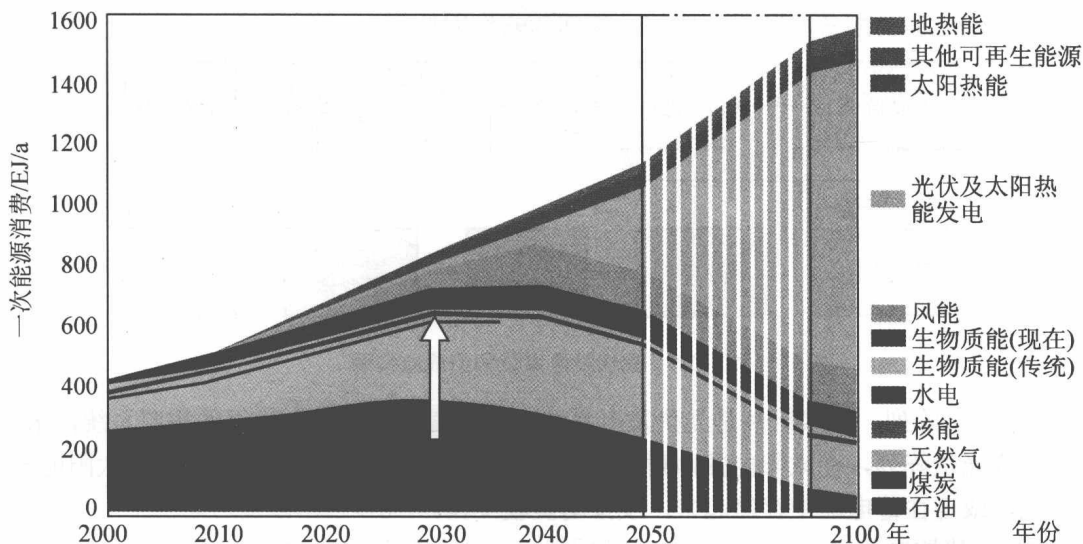


图 0.4 世界能源结构变化趋势预测

太阳能电池最早用于空间技术,至今宇宙飞船和人造卫星的电力仍然基本上依靠太阳能电池系统来供给。20 世纪 70 年代以后,太阳能电池在地面得到广泛应用,目前已遍及生活照明、铁路交通、水利气象、邮电通信、广播电视、阴极保护、农林牧业、军事国防、并网调峰等各个领域。随着太阳能电池发电成本的进一步降低,它将进入更大规模的工业应用领域,如海水淡化、光电制氢、电动车充电系统等,对于这些系统,目前世界上已有成功的示范。光伏发电最终的发展目标,是进入公共电力网的规模应用,包括中心并网光伏电站、风—光互补电站、分布式光伏并网电站等。展望光伏发电的未来,人们甚至设想出大型的宇宙发电计划,即在太空中建立人造同步卫星光伏电站。因为大气层外的太阳辐射比地球上要高出 30%以上,而且由于宇宙没有黑夜,卫星电站可以连续发电。一组 $11\text{km}\times 4\text{km}$ 的光伏组件,在空间可产生 $8\,000\text{MW}$ 的电力,一年的发电量将高达 700 亿 kWh。空间电站可以将所发出的电通过微波源源不断地传送回地球供人们使用。

4. 本课程构架结构及内容

本课程内容涵盖从太阳辐射、太阳能电池/光伏组件/光伏阵列、太阳能电池对光的吸收、转换到给负载供电的完整过程,围绕着太阳能通过光伏组件转换为电能,在产生电能后,对电能进行控制、变换、传输、储存、利用等方面展开。本书的主要内容如下所述。

1) 光伏发电系统工作原理

光伏发电系统是利用半导体界面的光生伏特效应将太阳能直接转变为电能的一种技术,这种技术的关键元件是太阳能电池。从太阳能获得电力,需通过太阳能电池进行光电变换来实现。太阳能电池经过串、并联后进行封装保护可形成一定输出功率的光伏组件,再配合上功率控制器等部件就形成了光伏发电系统装置。

2) 光伏发电系统的组成

如图 0.5 所示,光伏发电系统包括光伏阵列、光伏控制器、蓄电池;在直流负载时,需要 DC/DC 功率转换器;在输出要求为交流电源时,需要配置 DC/AC 逆变器;与国家电网并网时,还需要配备并网保护器等。各部分的作用如下。

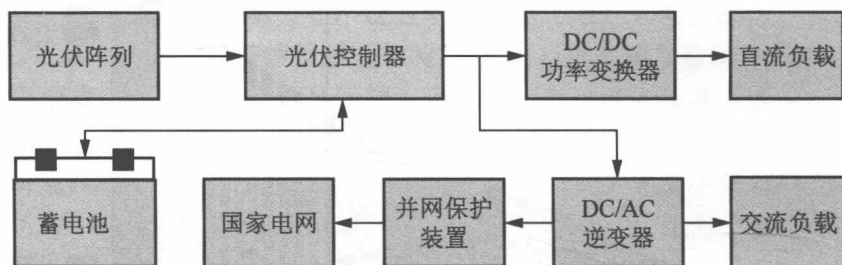


图 0.5 光伏发电系统的组成结构图

(1) 光伏阵列。光伏组件是光伏发电系统中的核心部分,由光伏组件按照系统需求串、并联形成光伏阵列,在太阳能的照射下将太阳能转换成电能输出。其作用是将太阳能转化为电能,或送往蓄电池中存储起来,或推动负载工作。

(2) 光伏控制器。光伏控制器包括传感器、控制与智能监测 3 个方面,其作用是控制整个系统的工作状态,对蓄电池的充、放电条件加以规定和控制,并按照负载的电源需求控制光伏组件和蓄电池对负载的电能输出,是整个系统的核心控制部分。控制器通过传感器可获取每组光伏组件串联的发电情况和逆变器的转换功率。随着太阳能光伏产业的发展,控制器的功能越来越强大,有将传统的控制部分、逆变器以及监测系统集成的趋势。在温差较大的地方,还应具备温度补偿的功能。其他附加功能如光控、时控、太阳光最大化采集、温度、辐照强度、气压、湿度、风速的监控等都应当是控制器的可选项。控制系统可以连接外置显示屏显示户外系统运行情况,也可以与远程监控器、智能仪器、微机等相连,以便远程管理员随时了解到系统的运行情况。

(3) 蓄电池。在一般光伏发电系统中蓄电池为铅酸电池,在小微型光伏发电系统中,也可用镍氢电池、镍镉电池或锂电池。其作用是在有光照时将光伏组件所发出的电能储存起来,到需要的时候再释放出来。在并网光伏发电系统中可以省略。

(4) DC/DC 功率转换器。在直流应用场合,需要使用多种直流电压的负载时,要用到 DC/DC 功率转换器,如将 24V DC 的电能转换成 48V DC 或 12V DC 的电能。

(5) DC/AC 逆变器。在很多场合,都需要提供 220V 的交流电源,因为太阳电池的输出是直流电。为了保证能向 AC 220V 的电器提供电能,需要将光伏发电系统所发出的直流电能转换成交流电能,因此使用 DC/AC 逆变器。

(6) 并网保护装置。光伏发电在并网时,需要各种完善的保护措施,除了应具有基本的保护功能(如短路、过压、过流、欠频、过频、过热等)以外,还应具有预防孤岛效应的特殊功能。光伏并网保护装置,一方面对光伏发电系统进行保护,防止孤岛效应等发生;另一方面防止线路事故或功率失稳。用以保证在光伏发电系统发生异常时,其不对电网产生较大的不良影响,还可以保证在电网发生故障时,电网不对光伏发电系统产生损坏,常用的并网保护功能有低电压保护、过电压保护、低频率保护、过电流保护和孤岛保护等。



3) 光伏发电系统应用案例

本书最后通过两个具体的典型案例，介绍了离网型光伏发电系统、并网型光伏发电系统，对本书的内容作了概括性总结。

“通过本书，希望读者能够熟悉光伏发电系统基本构成，各组成设备的功能及组成原理，了解离网型和并网型光伏发电系统的异同及今后研究的技术热点。并能够对特定的光伏应用场合选型适配设备，能够开发简单的光伏发电系统。”

第 1 章

太阳能光伏发电入门



内容引入

据前述,我们已经认识到能源是人类存在与发展的物质基础,而能源短缺与环境保护又是人类面临的两大挑战。那么,作为以太阳能为开发对象的光伏发电技术是什么?如何根据人类对电力的需求而构建不同方式的光伏发电系统?这就是本章所要讲解的内容——光伏发电系统工作原理及组成。



学习目标

- (1) 理解半导体 P-N 结与光伏效应。
- (2) 理解光伏发电原理。
- (3) 知道光伏发电系统的基本组成。



技能要求

- (1) 区分光伏发电系统的类型与用途。
- (2) 初步掌握光伏发电系统的结构与组成。



1.1 认识光伏

太阳能发电技术有两大类，分别是光热发电和光伏发电。通常说的太阳能发电指的是光伏发电(Photovoltaic Power Generation)，简称“光伏(Photovoltaic, PV)”。光伏发电的本质就是利用半导体 P-N 结的光伏效应来实现光电转换过程实现电能的输出。

1.1.1 半导体的基础知识

材料根据其导电能力的强弱，可分为导体、绝缘体、和半导体三大类。凡容易导电的物质称为导体；不容易导电的物质称为绝缘体；导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。

导体(如金、银、铜、铝、铁等金属物质)的电阻率很低，其导电能力极好；绝缘体(如玻璃、橡胶、塑料、陶瓷等物质)的电阻率很高，几乎不导电；半导体(如硅、锗、硫化镉、砷化镓等物质)的导电能力介于导体和绝缘体之间，见表 1-1。

表 1-1 不同材料的电阻率范围

材 料	导 体	半 导 体	绝 缘 体
电阻率/ $\Omega\cdot\text{cm}$	$<10^{-3}$	$10^{-3}\sim 10^9$	$>10^9$
导电粒子	自由电子	自由电子、空穴	

与导体和绝缘体相比较，半导体之所以得到广泛的应用，是因为它自身特性对掺杂、温度、光照等因素的变化响应明显。

1. 掺杂特性

在半导体中掺入少量特殊杂质，其导电能力显著地增强。比如纯硅(Si)，每 100 万个原子掺进一个 V 族元素(比如磷)时，其电阻率在室温下的 $214\ 000\ \Omega\cdot\text{cm}$ 左右下降至 $0.2\ \Omega\cdot\text{cm}$ 以下。

2. 温度特性

温度升高，使半导体的导电能力大大增强。对于半导体硅，在室温附近纯硅(Si)每增加 8°C 时，电阻率相应降低 50% 左右。

3. 光照特性

适当波长照射时，光照强度越大，半导体的导电能力越强。

1.1.2 光伏效应

当光照射到半导体器件时，在器件的两侧(P 和 N)产生电压的现象，称为光生伏打效应，简称“光伏效应”。利用半导体器件的光伏效应，将太阳辐射能直接转换为电能的发电技术称为光伏发电。

早在 1839 年，法国物理学家安东尼·亨利·贝克勒尔(Antoine Henri Becquerel)意外

地发现，用两片金属浸入溶液构成的伏打电池，在受到太阳照射时会产生额外的电压，他把这种现象称为光生伏打效应。后来有人发现当太阳光或其他光照射半导体的 PN 结时，就会在 PN 结的两边出现电压，称为光生电压，如果使 PN 结短路，就会产生电流，如图 1.1 所示。从而实现太阳能转换成电能的目的，人们把能够产生光生伏打效应的器件称为光伏器件。由于半导体 PN 结器件在阳光下的光电转换效率最高，所以通常把这类光伏器件称为太阳电池。太阳电池是光伏发电的核心部件。1954 年，美国科学家恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室首次制成功了实用型的单晶硅太阳电池，由此诞生了将太阳光能转换为电能的实用光伏发电技术。近年来太阳电池的转换效率得到提高，光伏发电技术逐渐成熟。

这里需要注意区分“光伏效应”不同于爱因斯坦的“光电效应”，光电效应是金属表面的电子在光照下被激发到真空中。

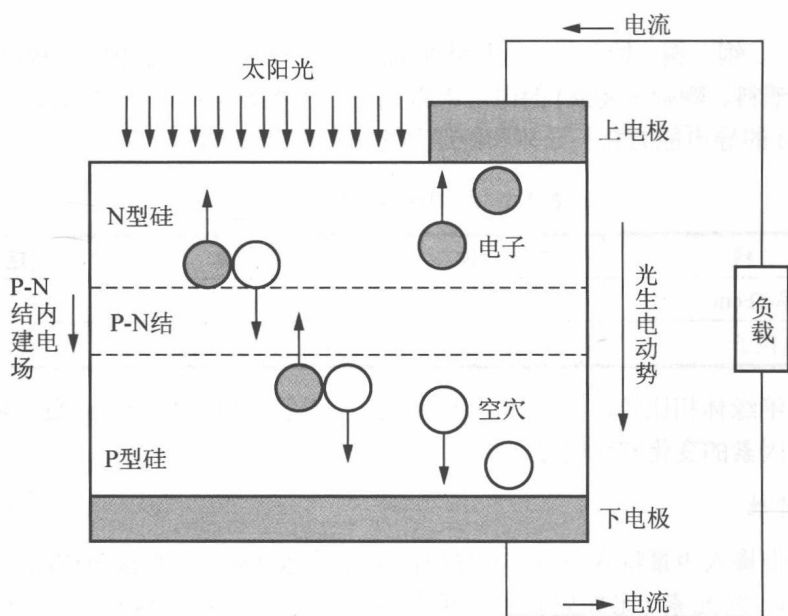


图 1.1 光伏效应

1.1.3 太阳能光伏发电

半导体在一定波长的光照射下，会发生电子-空穴对分离，电子、空穴均为导电粒子——在半导体中可以载运电流的带电粒子。其中，电子带负电荷，空穴带正电荷。但分离后的电子、空穴在晶体内部的游动没有一定的方向性，是杂乱无章的，在游动过程中又发生了电子-空穴对复合，失去了载运电流的作用，此时的半导体不能作为太阳电池发电，是由于其内部的电子和空穴两种导电粒子复合所导致的。

P-N 结使得太阳电池内部的电子-空穴对定向分离成为可能，它是太阳电池的“心脏”。下面通过 P-N 结的形成来介绍太阳电池的工作原理——光电转换机制。

1. 半导体硅的晶体结构

硅是半导体材料的典型代表，因为硅在自然界中储量丰富，占到地壳成分的 25% 左右。由于它的最外层有 4 个价电子，所以属于四价元素，如图 1.2(a) 所示。通过某种工艺，相邻



的两个硅原子最外层价电子通过共价键形成共用电子对。由于共价键有很强的结合力，使硅原子规则排列，形成晶体结构，如图 1.2(b)所示。

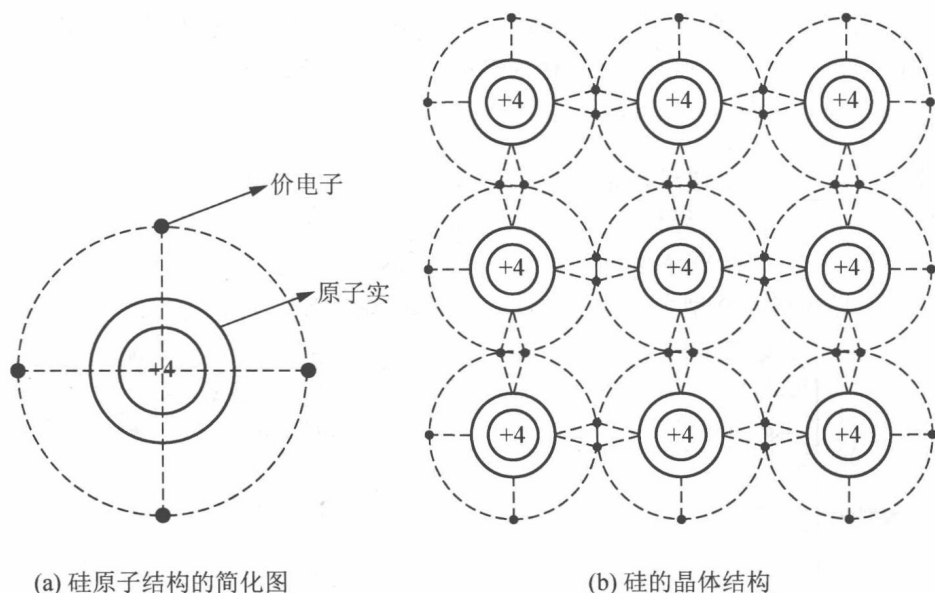


图 1.2 半导体晶体结构

2. 杂质半导体

当硅晶体中掺入某些不同少量的杂质(如硼、磷)时，就会使半导体的导电性能发生显著变化，形成两种杂质半导体。

在硅晶体中掺入少量的五价元素磷(P)，某些硅原子被杂质取代，磷原子的最外层有 5 个价电子，其中 4 个与相邻的半导体原子形成共价键，必定多出 1 个电子，这个电子几乎不受束缚，很容易被激发而成为自由电子。因此，自由电子数量远大于空穴数量的杂质半导体，叫做电子型半导体(N 型半导体)。此时，自由电子称为多数载流子(多子)，空穴称为少数载流子(少子)，如图 1.3(a)所示。

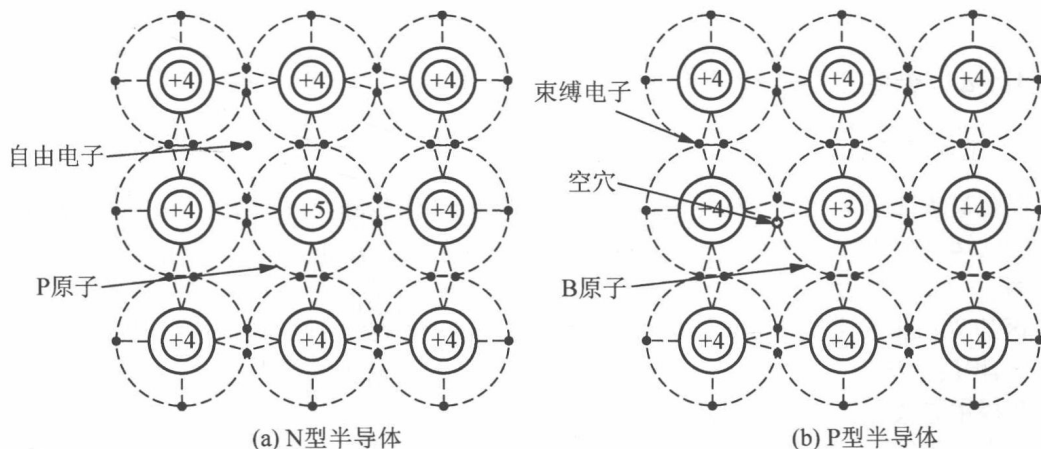


图 1.3 杂质半导体的内部结构

在硅晶体中掺入少量的三价元素硼(B), 某些硅原子被杂质取代, 硼原子的最外层有 3 个价电子, 与相邻的半导体原子形成共价键时, 产生一个空穴。这个空穴可能吸引束缚电子来填补。因此, 空穴数量远大于自由电子数量的杂质半导体, 称为空穴型半导体(P 型半导体)。此时, 自由电子是少数, 空穴称为多子, 如图 1.3(b)所示。

3. P-N 结

在同一晶体硅基片上通过掺杂工艺, 形成相互接触的 P 型半导体和 N 型半导体, 如图 1.4(a)所示。由于 N 型半导体中含有较多的自由电子, 而 P 型半导体中含有较多的空穴, 所以产生扩散过程, 便在半导体的交界面处形成 P-N 结。P-N 结形成之后, 半导体内部便形成由 N 型半导体指向 P 型半导体的内建电场(由实线箭头所示), 如图 1.4(b)所示。

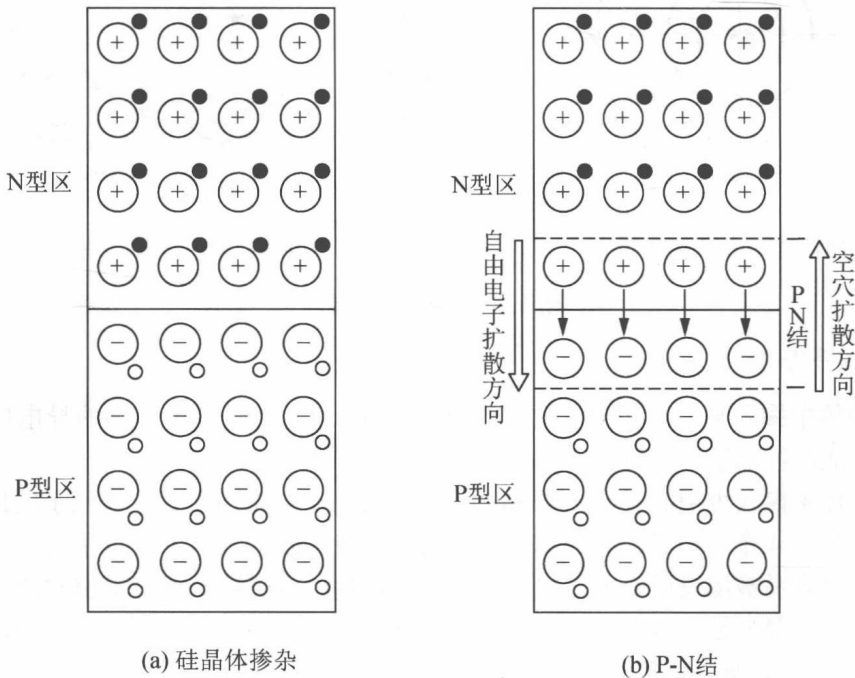


图 1.4 P-N 结的形成

1.1.4 太阳能电池发电原理

1. 光电转换原理

晶体硅太阳能电池的光电转换过程如图 1.5 所示。晶体硅在光照条件下, 形成的自由电子、空穴运动到 P-N 结附近, 就会在 P-N 结内建电场的作用下分离。电子逆着内电场的方向向 N 区运动, 而空穴沿着内电场的方向向 P 区移动。结果在 N 区边界积累了自由电子, 在 P 区边界积累了空穴。由此就在 P-N 结附近形成一个与 P-N 结内建电场方向(由 N 区指向 P 区)相反的光生电场(由 P 区指向 N 区), 晶体硅太阳能电池便形成光生电压, 如果将太阳能电池两极用导线连成回路后, 就会不断有电流从 P 区流出经负载从 N 区流入, 形成光生电流。在太阳光照下, 太阳能电池吸收光子所含的能量形成电荷分离的现象, 就是太阳能电池的光伏效应。此时, 只要被光照到, 具有 P-N 结的半导体薄片就可以作为太阳能电池直接进行发电, 输出电压及电流。