



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

新能源发电技术

于国强 主 编
孙为民 崔积华 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

新能源发电技术

主 编 于国强
副主编 孙为民 崔积华
编 写 肖 键 耿春景 姜秀华
主 审 宋长华



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

本书重点介绍了目前常用的新能源发电技术的开发及应用现状,内容包括太阳能光伏发电技术、太阳能热发电技术、风力发电技术、核能发电技术、洁净煤发电技术、生物质能发电技术、地热发电技术、海洋能发电技术、燃料电池发电技术等。

本书可作为高职高专电力技术类专业相关课程教材,也可供对新能源发电技术感兴趣的工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

新能源发电技术/于国强主编. —北京:中国电力出版社, 2009

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5083-8885-4

I. 新… II. 于… III. 能源开发—发电—技术—职业教育—教材 IV. TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 084793 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 394 千字

定价 26.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

为实现经济社会发展目标，中国能源发展“十一五”（2006~2010年）目标是：到“十一五”末期，能源供应基本满足国民经济和社会发展需求，能源节约取得明显成效，能源效率得到明显提高，结构进一步优化，技术取得实质进步，经济效益和市场竞争能力显著提高，与社会主义市场经济体制相适应的能源宏观调控、市场监管、法律法规、预警应急体系和机制得到逐步完善，能源与经济、社会、环境协调发展。

面对21世纪人类面临的环境问题和可持续发展问题，我国有必要建立以资源无限、清洁干净的可再生能源为主的多样化，复合型的能源结构，逐步优化资源有限、不可再生的化石能源为基础的能源结构，走经济社会的可持续发展之路；大力开发利用清洁、干净的新能源与可再生能源，逐步减少化石能源的耗用，走与生态环境和谐的绿色能源之路。

随着国民经济的快速发展，优化传统的电力工业和大力发展核电、风力发电和太阳能发电等新能源发电技术，以满足日益增长的电力需求。新能源的快速发展意味着这一领域就业机会的快速增长。近些年来，随着越来越多的大中专院校的毕业生走入了与新能源相关的工作岗位，全国各大院校，尤其是电力职业院校的学生，因其独特的专业优势，对新能源发电技术方面的知识充满了渴望与期待，本书正是在这种背景下应运而生的。

本书由保定电力职业技术学院于国强主编，郑州电力高等专科学校孙为民、哈尔滨电力职业技术学院崔积华副主编，保定电力职业技术学院姜秀华、耿春景、肖键参编。绪论、第七章、第八章、第九章由于国强编写，第一章、第二章由姜秀华编写，第三章由耿春景编写，第四章由肖键编写，第五章由孙为民编写，第六章由崔积华编写。

由于编者的水平所限，书中定有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2009年4月

目 录

前言

绪论	1
第一节 能源的含义及分类	1
第二节 世界能源消费现状及发展趋势	2
第三节 中国的能源现状与未来发展对策	3
第四节 中国新能源与可再生能源的发展前景	5
第一章 太阳能光伏发电技术	7
第一节 概述	7
第二节 太阳能电池的构造及工作原理	10
第三节 太阳能电池制造工艺	16
第四节 太阳能光伏发电系统的组成设备	25
第五节 两种类型的太阳能光伏发电系统	27
第六节 中国太阳能光伏系统应用实例	29
复习思考题	32
第二章 太阳能热发电技术	33
第一节 太阳能热发电系统简介	33
第二节 太阳能热发电系统的组成	34
第三节 太阳能热发电系统的基本类型	36
复习思考题	49
第三章 风力发电技术	50
第一节 风与风力资源	50
第二节 风力机工作原理和特性	53
第三节 风力发电系统及装置	60
第四节 风力发电运行方式	69
第五节 海上风力发电技术	75
第六节 风力发电的现状与展望	78
复习思考题	82
第四章 核能发电技术	83
第一节 核能及其机理	83
第二节 核燃料	85
第三节 核反应堆	86
第四节 核电站	90
第五节 核电站运行特点	99
第六节 核电站的辐射防护	101

第七节	核电站放射性废物的处理与处置	103
第八节	核能发电技术的现状与发展前景	104
	复习思考题	108
第五章	洁净煤发电技术	110
第一节	概述	110
第二节	煤的净化技术	113
第三节	洁净燃烧与发电技术	118
第四节	煤炭转化技术	135
第五节	污染物控制和再资源化技术	139
第六节	洁净煤发电技术展望	147
	复习思考题	148
第六章	生物质能发电技术	150
第一节	概述	150
第二节	生物质能转化技术	150
第三节	生物质发电技术	177
第四节	生物质发电的现状 & 前景预测	196
	复习思考题	198
第七章	地热发电技术	199
第一节	地热能基础知识	199
第二节	地热资源	202
第三节	地热发电原理	205
第四节	地热发电系统及其运行	210
第五节	地热发电的现状 & 展望	214
	复习思考题	218
第八章	海洋能发电技术	219
第一节	海洋能	219
第二节	潮汐能发电技术	222
第三节	中国潮汐能发电的现状 & 前景	229
	复习思考题	232
第九章	燃料电池发电技术	233
第一节	概述	233
第二节	碱性燃料电池	235
第三节	磷酸型燃料电池	237
第四节	熔融碳酸盐燃料电池	239
第五节	固体氧化物燃料电池	243
第六节	质子交换膜燃料电池	245
第七节	直接甲醇型燃料电池	248
	复习思考题	249
	参考文献	251

绪 论

能源是国民经济发展和人民生活水平所必需的重要物质基础，是人类生产和生活必需的基本物质保障。以煤、石油、天然气为代表的常规化石能源终将被开采殆尽，同时由于大量使用这些化石燃料导致一系列的环境问题，制约着社会的可持续发展。从长远来看，能源的生产、消费及其对环境产生的影响应该符合可持续发展的要求，否则就会威胁到人类自身的生存和发展。但目前世界各国基本都依赖于石油天然气等不可再生的能源，研究和一些可持续使用的或可再生的替代能源一直是人们努力的方向。

我国国民经济和社会发展“十一五”规划纲要指出：要“大力发展可再生能源，实行优惠的财税、投资政策和强制性市场份额政策，鼓励生产与消费可再生能源，提高在一次能源消费中的比重。大力开发风能，建成 30 个 10 万 kW 及以上的大型风电项目，在内蒙古、河北、江苏、甘肃等省区形成百万千瓦风电基地。加快开发生物质能，支持发展秸秆、垃圾焚烧和垃圾填埋气发电，建设一批秸秆和林木质电站，扩大生物质固体成型燃料、燃料乙醇和生物柴油生产能力。并网风电装机、生物质发电装机分别达到 500 万 kW 和 550 万 kW。积极开发利用太阳能、地热能、海洋能”。风能、生物质能、太阳能、地热能、海洋能等新能源的研究、开发和利用对于能源结构优化、满足多样化的能源需求和可持续发展战略都具有重要的意义。

电力工业是能源领域的主要组成部分。我国一次能源消费构成中，煤炭占了 67% 左右，与世界能源的消费构成存在很大的差别，这种严重依赖于燃煤发电的电源局面，显然不利于可持续发展的要求。根据我国的能源状况、社会科技和经济发展水平，当前我国电力工业发展和能源结构调整的基本原则是优先发展水电，积极发展核电，优化发展火电，重点发展资源潜力大、技术基本成熟的风力发电、生物质发电、太阳能发电等，以规模化建设带动产业化发展。

第一节 能源的含义及分类

我们把能量的来源称为能源，是指能够转换成机械能、热能、电能、化学能等某种能量形式的自然资源。按照不同的要素，可把能源分成以下几种形式。

(1) 按照能源的生成方式可分为一次能源和二次能源。一次能源是自然界中以天然形态存在的能源，是直接来自自然而未经人们加工转换的能源，故又称其为自然资源。煤炭、石油、天然气、水能、风能、生物质能、太阳能、地热能、海洋能等都是二次能源。通常我们所说的能源是指一次能源。二次能源是指在一次能源的基础上经过转换以符合人们使用要求的能源。电能、汽油、柴油、焦炭、煤气、蒸汽、氢能等都是二次能源。随着科学技术的发展和现代化，二次能源在整个能源消费系统中的比重将日益增大。

(2) 按照能源在社会经济生活中的地位可分为常规能源和新能源。常规能源是指那些普遍使用的、利用技术成熟的、在生产生活中起着重要作用的能源，目前主要是煤炭、石

油、天然气、水能和核能等。新能源是指尚未被人类大规模利用、正在研究开发和探索的能源，如风能、太阳能、地热能、海洋能及核聚变能等。所谓新能源，是相对而言的。

(3) 按照一次能源能否再生而循环使用，可分为可再生能源和非再生能源。可再生能源是不会随其本身的转化或人类的利用而减少的能源，具有自然恢复的能力。如太阳能、风能、水能、生物质能、地热能以及海洋能等，是可再生的能源。非再生能源是指那些随着人类的利用而逐渐减少的能源。如化石燃料和核燃料等。

(4) 按照一次能源来源的不同，可分为来自地球以外天体的能源、来自地球内部的能源和地球与其他天体相互作用产生的能源等三类。来自地球以外天体的能源，主要是指太阳能及其作为太阳能固化形式的煤、石油、天然气和生物质能，以及作为太阳能转化形式的风能、水能、海水温差能等。来自地球内部的能源，主要是指地下热水、地下蒸汽、岩浆等地热能和铀、钍等核燃料所具有的核能。地球与其他天体相互作用产生的能源，主要是指由于地球、月亮和太阳之间的引力作用导致的海水有规律的涨落而形成的潮汐能。

第二节 世界能源消费现状及发展趋势

一、世界能源消费现状及特点

1. 受经济发展和人口增长的影响，世界一次能源消费量不断增加

随着世界经济规模的不断增大，世界能源消费量持续增长。《BP 世界能源统计》自 1951 年问世以来始终致力于用数据解读能源，为业界和政策制定者提供优质、详实、客观，且全球一致的数据。2008 年《BP 世界能源统计》的数据显示，尽管金融市场在 2007 年 8 月开始出现动荡，2007 年世界经济增长依然强劲，并继续带动全球能源消费。世界一次能源消费在 2007 年增长了 2.4%，较 2006 年略有放缓，但仍连续第五年高于过去十年的平均水平。

2. 世界能源消费呈现不同的增长模式，发达国家增长速率明显低于发展中国家

过去 30 年来，北美、中南美洲、欧洲、中东、非洲及亚太等六大地区的能源消费总量均有所增加，但是经济、科技与社会比较发达的北美洲和欧洲两大地区的增长速度非常缓慢，其消费量占世界总消费量的比例也逐年下降。其主要原因，一是发达国家的经济发展已进入后工业化阶段，经济向低能耗、高产出的产业结构发展，高能耗的制造业逐步转移至发展中国家；二是发达国家高度重视节能与提高能源使用效率。

3. 世界能源消费结构趋向优质化

自 19 世纪 70 年代的产业革命以来，化石燃料的消费量急剧增长。初期主要是以煤炭为主，进入 20 世纪以后，特别是第二次世界大战以来，石油和天然气的生产与消费持续上升，石油于 20 世纪 60 年代首次超过煤炭，跃居一次能源的主导地位。虽然 20 世纪 70 年代世界经历了两次石油危机，但世界石油消费量却没有丝毫减少的趋势。此后，石油、煤炭所占比例缓慢下降，天然气的比例上升。同时，核能、风能、水力、地热等其他形式的新能源逐渐被开发和利用，形成了目前以化石燃料为主和可再生能源、新能源并存的能源结构格局。

4. 能源贸易及运输压力增大

根据 2008 年《BP 世界能源统计》的数据显示，中东地区、非洲、中南美洲与亚太、北美和欧洲的石油产量存在着不均衡性，煤炭资源与天然气资源也存在巨大的不均衡性。随着

世界一些地区能源资源的相对枯竭，世界各地及国家之间的能源贸易量将进一步增大，能源运输需求也相应增大，能源储运设施及能源供应安全等问题将日益受到重视。

二、世界能源供应和消费趋势

根据美国能源信息署（EIA）最新预测结果，随着世界经济、社会的发展，未来世界能源需求量将继续增加。伴随着世界能源储量分布集中度的日益增大，对能源资源的争夺将日趋激烈，争夺的方式也更加复杂，由能源争夺而引发冲突或战争的可能性依然存在。

随着世界能源消费量的增大，二氧化碳、氮氧化物、灰尘颗粒物等环境污染物的排放量逐年增大，化石能源对环境的污染和全球气候的影响将日趋严重。

面对以上挑战，未来世界能源供应和消费将向多元化、清洁化、高效化、全球化和市场化方向发展。

1. 多元化

世界能源结构先后经历了以薪柴为主、以煤为主和以石油为主要的时代，现在正在向以天然气为主转变，同时，水能、核能、风能、太阳能也正得到更广泛的利用。可持续发展、环境保护、能源供应成本和可供应能源的结构变化决定了全球能源多样化发展的格局。未来，在发展常规能源的同时，新能源和可再生能源将受到重视。在欧盟 2010 年可再生能源发展规划中，风电要达到 4000 万 kW，水电要达到 1.05 亿 kW。

2. 清洁化

随着世界能源新技术的进步及环保标准的日益严格，未来世界能源将进一步向清洁化的方向发展，不仅能源的生产过程要实现清洁化，而且能源工业要不断生产出更多、更好的清洁能源，清洁能源在能源总消费中的比例也将逐步增大。同时，过去被认为是“脏”能源的煤炭和传统能源薪柴、秸秆、粪便的利用将向清洁化方面发展，洁净煤技术、沼气技术、生物柴油技术等将取得突破并得到广泛应用。一些国家，如法国、奥地利、比利时、荷兰等国已经关闭其国内的所有煤矿而发展核电，它们认为核电就是高效、清洁的能源，能够解决温室气体的排放问题。

3. 高效化

世界能源加工和消费的效率差别较大，能源利用效率提高的潜力巨大。随着世界能源新技术的进步，未来世界能源利用效率将日趋提高，能源强度将逐步降低。世界发展中国家与发达国家的能源强度差距较大，节能潜力巨大。

4. 全球化

由于世界能源资源分布及需求分布的不均衡性，许多国家和地区越来越需要依靠其他国家或地区的资源供应，主要能源生产国和能源消费国将积极加入到能源供需市场的全球化进程中，世界贸易量将越来越大。

5. 市场化

世界能源利用的市场化程度越来越高，世界各国政府直接干涉能源利用的行为将越来越少，政府为能源市场服务的作用在相应增大，在完善各国、各地区的能源法律法规并提供良好的能源市场环境方面，将更好地发挥作用。

第三节 中国的能源现状与未来发展对策

中国是一个能源消费大国，据 2008 年《BP 世界能源统计》显示，中国 2007 年一次能

源消费总量达 18.634 亿油当量 (26.62 亿 t 标准煤), 占世界一次能源消费量的 16.8%。能源是经济发展的原动力, 是现代文明的物质基础, 如何保持能源经济和环境的可持续发展是我们面临的一个重大战略问题。

一、中国能源存在的问题

1. 能源需求持续快增

虽然我国能源资源总量丰富, 但人均能源资源贫乏, 能源问题将面临长期的挑战。近年来, 我国在优质能源的消费方面, 如煤炭、石油、天然气、水力等都处于上升趋势。并且, 随着我国工业化、城镇化进程的加快, 国民经济的快速增长, 内外需求的强劲拉动, 新形成的生产能力必然对能源消费产生很大拉动, 能源供需矛盾仍将持续存在。

2. 能源技术相对落后

不可否认, 我国能源技术近年来取得了较大进步, 但与经济发展的要求相比还有相当大的差距。可再生能源、清洁能源、替代能源等技术的开发相对滞后, 节能降耗、污染治理等技术的应用还不够广泛, 一些重大能源技术装备自主设计制造水平还不高, 这直接导致了我国的能源利用效率和产出经济效率一直处在比较低的水平。

3. 能源资源赋存分布不均衡

我国能源资源分布广泛但不均衡。煤炭资源主要赋存在华北、西北地区, 水力资源主要分布在西南地区, 石油、天然气资源主要赋存在东、中、西部地区和海域。我国主要的能源消费地区集中在东南沿海经济发达地区, 资源赋存与能源消费地域存在明显差别。大规模、长距离的北煤南运、北油南运、西气东输、西电东送, 是我国能源流向的显著特征和能源运输的基本格局。

4. 能源资源开发难度较大

与世界相比, 中国煤炭资源地质开采条件较差, 大部分储量需要井工开采, 极少量可供露天开采。石油、天然气资源地质条件复杂, 埋藏深, 勘探开发技术要求较高。未开发的水力资源多集中在西南部的高山深谷, 远离负荷中心, 开发难度和成本较大。非常规能源资源勘探程度低, 经济性较差, 缺乏竞争力。

5. 能源安全问题严峻

根据目前有关机构的估计, 2050 年我国国内一次能源最大可能的获得量约为 35~40 亿 t 标准煤, 与 50 亿 t 标准煤的需求有相当大的缺口。依靠从国际市场上进口来解决如此巨大的供应缺口并不现实可行, 因为这既要受国际市场供应能力限制, 又将受供应安全保障的巨大政治风险。

二、中国能源未来的发展对策

国家“十一五”规划中, 提出了“十一五”时期经济社会发展的主要目标是在优化结构、提高效益和降低消耗的基础上, 实现 2010 年人均国内生产总值比 2000 年翻一番, 要求资源利用效率显著提高, 单位国内生产总值能源消耗比“十五”期末降低 20% 左右。

1. 提高能源利用效率

与发达国家相比, 我国的能源利用效率很低, 关键在于产业结构低度化, 高耗能产业如钢铁、电解铝、水泥等比重过高, 而低耗能、高附加值产业如电子信息、精密制造和第三产业比重过低。高能耗产品产量的高速扩张, 并不是建立在充分提高技术和效率的基础之上。在形成世界最大产业的过程中, 我国的高耗能行业并没有形成国际领先的生产技术, 单位产

品能耗和工艺能耗比国际先进水平仍有很大差距。为此,必须通过转变增长方式和结构调整,改变以高投入、高消耗来实现经济快速增长的局面,坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少的新型工业化之路。

2. 大力发展替代技术

我国煤炭储量丰富,煤多油少是能源结构的基本特点。目前,在我国的一次能源结构中,煤炭占67%。解决石油储量不足和燃料油供给问题,要立足于从煤炭液化技术找出路。根据目前国际石油价格暴涨和我国石油进口剧增的新形势,应当进一步抓紧发展煤制油产业的有关工作,从而使我国油品供应建立在主要依靠国内生产的基础之上。

3. 调整优化能源结构

我国高度依赖煤炭资源,这种以煤为主的能源消费结构,是客观上造成我国与国外相比,能源经济利用效率低、污染严重、产品能源成本高、市场竞争能力差的根本原因。目前,世界能源消费结构在经过战后几十年的发展,完成由煤炭向石油的转换后,正朝着高效、清洁、低碳或无碳的天然气、核能、太阳能、风能方向发展。

4. 积极发展洁净煤技术

由于自身资源特点、经济发展水平和历史等因素,中国一直保持着以煤炭为主要能源的能源结构,煤炭在未来几十年内仍将是中国的主要能源。因此,积极发展洁净煤技术,高效清洁地开发利用煤炭资源,努力降低燃煤对于环境的污染,应成为中国能源发展的重大措施之一。

5. 大力开发利用新能源和可再生能源

近年来,世界新能源与可再生能源发展飞速,技术上逐步成熟,经济上也逐步为人们所接受。我国在《新能源与可再生能源发展纲要(1996~2010)》中指出:到2010年,全国新能源与可再生能源的开发利用总量达到39 000万t标准煤,约占能源消费总量的10%。

6. 增强能源安全保障,加快能源法制建设

我国的《能源法》于2007年12月1日开始向社会广泛征集修改、完善的意见和建议。此次公布的征求意见稿,以能源问题的法制化为核心,确立了国家的能源战略框架,为国家能源对策体系的建立提供了基础。

- (1) 加快建立石油战略储备体系。
- (2) 积极扶持我国大型跨国公司。
- (3) 广泛参与国际能源合作。
- (4) 加快推进能源体制改革。

第四节 中国新能源与可再生能源的发展前景

新能源与可再生能源是中国能源优先发展的领域。新能源与可再生能源的开发利用,对增加能源供应、改善能源结构、促进环境保护具有重要作用,是解决能源供需矛盾和实现可持续发展的战略选择。中国已经颁布《可再生能源法》,制定了可再生能源发电优先上网、全额收购、价格优惠及社会公摊的政策。建立了可再生能源发展专项资金,支持资源调查、技术研发、试点示范工程建设和农村可再生能源开发利用。发布了《可再生能源中长期发展规划》,提出到2010年使可再生能源消费量达到能源消费总量的10%,到2020年达到15%

的发展目标。中国将推进水电流域梯级综合开发，加快大型水电建设，因地制宜开发中小型水电，适当建设抽水蓄能电站。推广太阳能热利用、沼气等成熟技术，提高市场占有率。积极推进风力发电、生物质能和太阳能发电等利用技术，将建设若干个百万千瓦级风电基地，以规模化带动产业化。积极落实可再生能源发展的扶持和配套政策，培育持续稳定增长的可再生能源市场，逐步建立和完善可再生能源产业体系和市场及服务体系，促进可再生能源技术进步和产业发展。中国新能源与可再生能源的发展前景美好，到 21 世纪中叶将有可能逐步发展成为重要的替代能源。

太阳能光伏发电技术

第一节 概 述

太阳是地球永恒的能源，万物生长靠太阳。太阳能因其分布广泛，取之不尽、用之不竭，且无污染，被公认为是人类社会可持续发展的重要清洁能源。

太阳表面温度大约 5700°C ，中心温度高达约 $2 \times 10^7^{\circ}\text{C}$ ，压力约为 2000 多亿标准大气压。太阳内部不断进行核聚变反应，是太阳能量的主要来源。太阳的能量是向四面八方辐射的，每秒钟投射到地球上的能量约为 $1.757 \times 10^{17}\text{J}$ ，相当于 $6 \times 10^6\text{t}$ 标准煤。据估算，地球上每年接收的太阳辐射能高达 $1.8 \times 10^{18}\text{kW} \cdot \text{h}$ ，相当于地球上每年燃烧其他燃料所获能量的 3000 倍。在石油、天然气和核矿藏终将枯竭的今天，充分利用太阳能显然具有持续供能和环保双重意义。

一、太阳能利用方式

太阳能的利用方式有很多，主要可以分为 4 类，见表 1-1。

表 1-1 太阳能利用方式

序 号	利用方式	内 容
1	光热利用	将太阳辐射能收集起来，通过与物质的相互作用转换成热能加以利用。 低温利用 ($<200^{\circ}\text{C}$)：太阳能热水器、太阳能干燥器、太阳能蒸馏器、太阳房、太阳能温室、太阳能空凋制冷系统等。 中温利用 ($200 \sim 800^{\circ}\text{C}$)：太阳灶、太阳能热发电聚光集热装置等。 高温利用 ($>800^{\circ}\text{C}$)：高温太阳炉等
2	太阳能发电	光—热—电转换：即利用太阳辐射所产生的热能发电。一般是用太阳集热器将所吸收的热能转换为工质的蒸气，然后由蒸气驱动汽轮机带动发电机发电。如光热动力发电、光热离子发电等。 光—电转换：其基本原理是利用光生伏打效应将太阳辐射能直接转换为电能，即光伏发电。它的基本装置是太阳能电池。 其他太阳能发电方式有光感应发电、光化学发电和光生物发电等
3	光化利用	利用太阳辐射能直接分解水制氢的光—化学转换方式
4	光生物利用	通过植物的光合作用来实现将太阳能转换成为生物质的过程。目前主要有速生植物（如薪炭林）、油料作物和巨型海藻等

二、太阳能发电方式

利用太阳能发电的方式有多种，有通过热过程的太阳能热发电（见第二章）和不通过热过程的光伏发电、光感应发电、光化学发电及光生物发电等。

1. 光伏发电

1839 年，法国物理学家 A. E. 贝克勒尔 (Becquerel) 意外地发现，用两片金属浸入溶液构成的伏打电池，光照时会产生额外的伏打电势，他把这种现象称为“光生伏打效应”(photovoltaic effect)，简称“光伏效应”。半导体 p-n 结器件在太阳光照射下的光电转换效率最高，通常把这类光伏器件称为“太阳能电池”(solar cell)。1954 年，恰宾 (Charbin)

和皮尔松在美国贝尔电话实验室第一次做出了光电转换效率为6%的实用的单晶硅太阳能电池，开创了太阳能电池研究的新纪元。

2. 光感应发电

光感应发电是利用某些有机高分子团吸收太阳的光能后变成“光极化偶极子”的现象，把积聚在受感应的“光极化偶极子”两端的正负电荷分别引出，即得到光电流。因为要寻找合适的光感应高分子材料，使它们的分子团有序排列，并要在高分子团上安装极为精细的电极等步骤都具有较高的难度，所以这项技术目前还处于原理性实验阶段。

3. 光化学发电

光化学发电是指浸泡在溶液中的电极受到光照后，电极上有电流输出的现象。光化学发电具有液相组分，容易制成直接储能的太阳能光化蓄电池。目前，以多孔氧化钛类半导体作电极的“液结光化电池”，其光电转换效率已高达10%以上，具有成本低廉、工艺简单等诸多优点，但是还有工作稳定性等问题需要解决。

4. 光生物发电

光生物发电通常是指“叶绿素电池”发电。叶绿素在光照作用下能产生电流，这是最普遍的生物现象之一。但由于叶绿素细胞不断进行新陈代谢，要做成稳定的“叶绿素电池”目前还比较困难。

三、太阳能电池分类

太阳能电池的分类如图1-1所示。

四、太阳能光伏发电优缺点

1. 太阳能光伏发电的主要优点

(1) 取之不尽，用之不竭。太阳每天照射到地球上的能量要比人类消耗的能量大6000倍，达到地球表面的辐射能大约相当于2.5万亿桶石油，年辐射总量近6000MJ/m²。太阳日照一天的能量，相当于全球所有发电厂运行250年的总发电量。

(2) 太阳能电池质量轻、体积小、结构简单。输出40~50W的晶体硅太阳能电池组件，体积为450mm×985mm×4.5mm，质量为7kg。空间用太阳能电池尤其重视功率质量比，一般为60~100W/kg。

(3) 易安装，易运输，建设周期短。只要用简单的支架把太阳能电池组件支撑，使之面向太阳，即可以发电，特别适宜于作为小功率移动电源。

(4) 容易启动，维护简单，随时使用，保证供应。配备有蓄电池的太阳能光伏发电系统，其输出电压和功率都比较稳定。

(5) 不产生任何废弃物，无污染、噪声等公害，是理想的清洁能源。

(6) 可靠性高，寿命长。晶体硅太阳能电池寿命可长达20~35年。

(7) 降价速度快，能量偿还时间有可能缩短。据统计，太阳能光伏发电的成本，1950年为1.5美元/(kW·h)，1987年为35美分/(kW·h)，1992~1993年为24美分/(kW·h)，2003年为14美分/(kW·h)，与调峰电价相当，而到2010年可降为6~10美分/(kW·h)，可以与市电竞争。

(8) 供电自主性。离网运行的光伏发电系统，具有供电的自主性、灵活性，并且可与其他能源整合操作，如光伏—风力发电或光伏—风力发电—柴油发电互补系统。

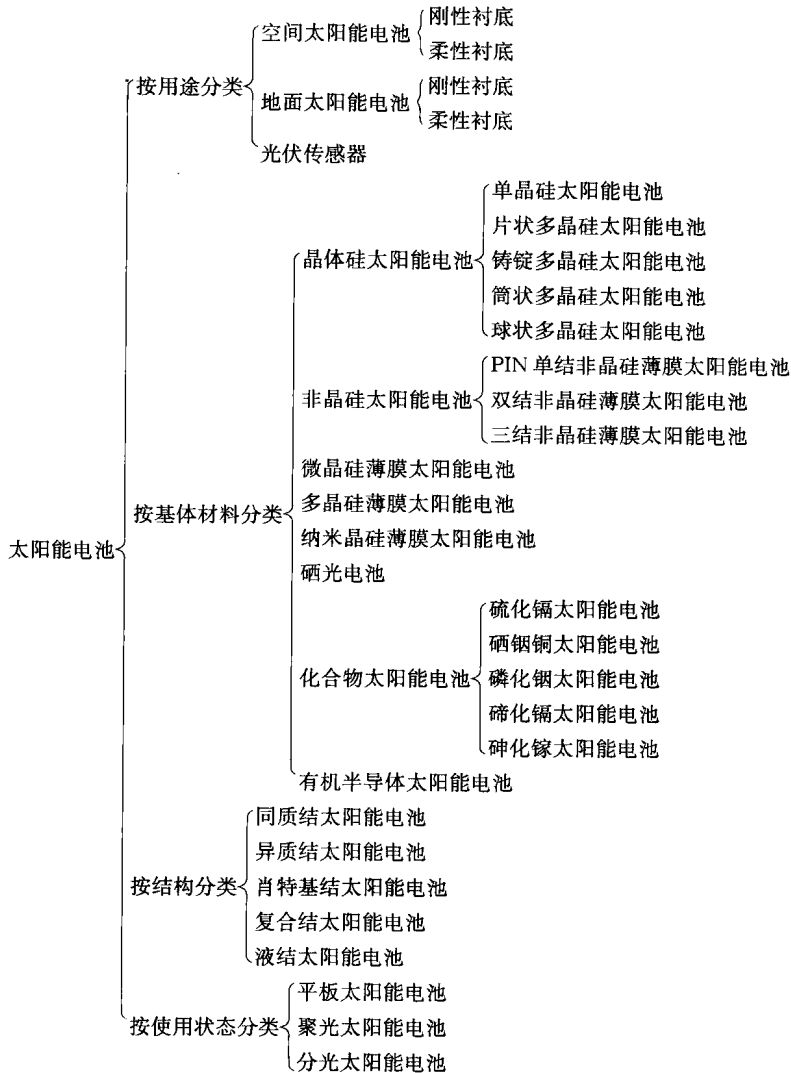


图 1-1 太阳能电池的分类

2. 太阳能光伏发电的主要缺点

(1) 初投资大。如果光伏系统的初投资减少，常规燃料的成本上升，则在经济方面光伏系统将更具竞争性。

(2) 日照不稳定，间歇性大，需要储能装置。除了昼夜这种周期变化外，太阳能光伏发电还常常受云层变化的影响。小功率光伏发电系统可用蓄电池补充，大功率光伏电站的控制运行比常规火电厂、水电站、核电厂要复杂。

(3) 地域性强。地理位置不同，气候不同，使各地区日照资源各异。因而功率相同的太阳能电池组件，在各地的实际发电量是不同的。因此理想的光伏发电系统均要因地制宜地进行设计计算。

(4) 效率有待改进。从投资的有效性出发，要求高效率的使用光伏系统资源，这意味着用户必须更换效率低的负载设备。

五、太阳能光伏发电的发展及前景

近些年来，世界太阳能电池的产量和装机容量以年增长率为 30% 左右的速度快速发展，2006 年全世界太阳能电池的产量达到 2204MW，安装的太阳能电池组件为 1744MW。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一定的比例。表 1-2 是欧洲各国和日本、美国制订的光伏发展计划。

表 1-2 欧洲、日本、美国制订的光伏发展计划 GW

国家	年份	2010 年	2020 年	2030 年
日本		4.8	30	205
欧洲各国		3.0	41	200
美国		2.1	36	200
其余世界各国		12	125	920

据国际能源协会下属光伏电力系统项目研究小组 (Photovoltaic Power System Programme) 在 2006 年发布的报告“光伏发电应用技术的趋势”一文中统计：2006 年中国光伏发电设备的年销售量为 15MW，光伏系统的总装机容量达到 85MW。光伏发电将在中国未来的电力供应中扮演重要的角色，预计到 2010 年中国的光伏发电累计装机容量将达到 600MW，2020 年累计装机容量将达到 30GW，2050 年将达到 100GW。根据中国电力科学研究院的预测，到 2050 年中国可再生能源发电将占到全国总电力装机的 25%，其中光伏发电将占 5%。

第二节 太阳能电池的构造及工作原理

一、太阳能电池的物理基础

1. n 型半导体

如果在纯净的硅中掺入少量的五价元素磷，这些磷原子在晶格中取代硅原子，并用它的 4 个价电子与相邻的硅原子进行共价结合。磷有 5 个价电子，用去 4 个，还剩 1 个，这个多余的价电子虽然没有被束缚在价键里面，但仍受到磷原子核的正电荷的吸引。不过，这种吸引力很弱，只要很少的能量就可以使它脱离磷原子到晶体内成为自由电子，从而产生电子导电运动。同时，磷原子缺少 1 个电子而变成带正电的磷离子。由于磷原子在晶体中起着施放电子的作用，所以把磷等五价元素叫做施主型杂质（或叫 n 型杂质）。在掺有五价元素（即施主型杂质）的半导体中，电子的数目远远大于空穴的数目，半导体的导电主要是由电子来决定，导电方向与电场方向相反，这样的半导体叫做电子型半导体或 n 型半导体。

2. p 型半导体

如果在纯净的硅中掺入少量的三价元素硼，它的原子只有 3 个价电子，当硼和相邻的 4 个硅原子作共价结合时，还缺少 1 个电子，所以要从其中 1 个硅原子的价键中获取 1 个电子填补，这样就在硅中产生了一个空穴，硼原子接受了一个电子而成为带负电的硼离子。硼原子在晶体中起着接受电子而产生空穴的作用，所以叫做受主型杂质（或叫 p 型杂质）。在含有三价元素（即受主型杂质）的半导体中，空穴的数目远远超过电子的数目，半导体的导电主要是空

穴决定的，导电方向与电场方向相同，这样的半导体叫做空穴型半导体或 p 型半导体。

图 1-2 是 n 型硅和 p 型硅晶体结构示意图。

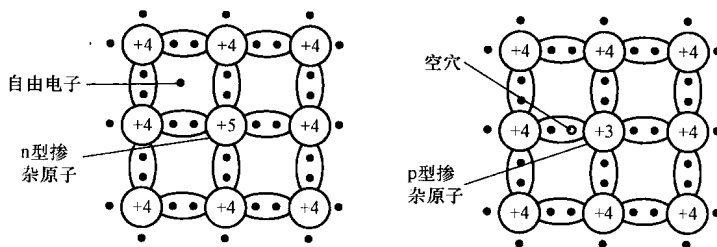


图 1-2 n 型硅和 p 型硅晶体结构示意图

3. p-n 结

如图 1-3 (a) 所示，使一块 n 型半导体和一块 p 型半导体紧密的接触形成 p-n 结。n 型和 p 型半导体接触后，由于交界面处存在电子和空穴的浓度差，n 型区中的多数载流子电子要向 p 型区扩散，p 型区中的多数载流子空穴要向 n 型区扩散。扩散后，在交界面的 n 区一侧留下带正电荷的离子施主，形成一个正电荷区域；同理，在交界面的 p 区一侧留下带负电荷的离子受主，形成一个负电荷区域。这样，就在 n 区和 p 区交界面的两侧，形成一侧带正电荷而另一侧带负电荷的一层很薄的区域，称为“空间电荷区”，即通常所说的 p-n 结，如图 1-3 (b) 所示。

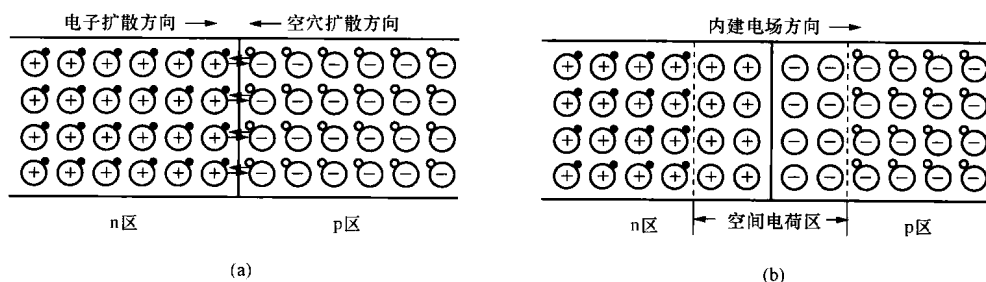


图 1-3 p-n 结示意图

(a) 形成 p-n 结前载流子的扩散过程；(b) 空间电荷区和内建电场

在 p-n 结内，有一个由 p-n 结内部电荷产生的从 n 区指向 p 区的电场，叫做“内建电场”或“自建电场”。由于存在内建电场，在空间电荷区内将产生载流子的漂移运动，使电子由 p 区拉回 n 区，空穴由 n 区拉回 p 区，其运动方向正好和扩散运动的方向相反。

开始时，扩散运动占优势，空间电荷区内两侧的正负电荷逐渐增加，空间电荷区增宽，内建电场增强；随着内建电场的增强，漂移运动也随之增强，阻止扩散运动的进行，使其逐步减弱；最后，扩散的载流子数目和漂移的载流子数目相等而运动方向相反，达到动态平衡。

当 p-n 结加上正向偏压（即 p 区接电源的正极，n 区接负极），此时外加电压的方向与内建电场的方向相反，使空间电荷区中的电场减弱。这样就打破了扩散运动和漂移运动的相对平衡，有电子源源不断地从 n 区扩散到 p 区，空穴从 p 区扩散到 n 区，使载流子的扩散运动超过漂移运动。由于 n 区电子和 p 区空穴均是多子，通过 p-n 结的电流（称为正向电流）很大。