



潮

汐

电

站

● 沈祖诒 主编

中国电力出版社

潮汐电站

沈祖诒 主编

电力科技专著出版基金资助项目

中国电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍潮汐能源及其开发利用,潮汐电站的建设规划、效益分析、枢纽布置、水工建筑物、特殊水力学等问题,以及贯流式水轮发电机组的结构、水力特性与水力计算、自动控制等。全书图文并茂,内容翔实,适合从事潮汐研究及有关水力发电工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

潮汐电站/沈祖诒主编. -北京:中国电力出版社,1997
ISBN 7-80125-381-7

I. 潮… II. 沈… III. 潮汐发电-发电厂
IV. TM612

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第08920号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 邮政编码100044)

三河市实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998年3月第一版 1998年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 28.25印张 645千字 2插页

印数0001—1000册 定价37.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

潮汐是人类早已注意并利用的一种能源。利用潮汐能的历史可追溯到距今约 1000 年前,那时已出现了潮汐磨,即利用潮汐能推动磨子,加工粮食。近代潮汐电站的研究和兴建则始于 20 世纪 30 年代。1967 年世界上第一座较大规模的潮汐电站——朗斯 (La Rance) 潮汐电站在法国投入商业运行,该站装机 240MW ($24 \times 10\text{MW}$)。1968 年前苏联建成基斯洛湾 (Кислая Губа) 潮汐电站,装机 0.8MW ($2 \times 0.4\text{MW}$)。1984 年加拿大建成安纳波利斯 (Annapolis) 潮汐电站,装机 20MW ($1 \times 20\text{MW}$)。1985 年中国建成江厦潮汐试验电站,装机 3.2MW ($1 \times 0.5\text{MW}$, $1 \times 0.6\text{MW}$, $3 \times 0.7\text{MW}$)。与此同时,各国还对潮差较大的海湾作了许多可行性研究和开发方案。此外,还有一些容量很小的潮汐电站建成并投入运行。

有关潮汐电站的研究、开发方案及设计做了许多,但建成投运的潮汐电站为数甚少,主要的就是上述四个。其主要原因是潮汐电站的造价相对较高,如朗斯潮汐电站单位千瓦投资是当时水电站的 2.5 倍。潮汐电站出力的日不均匀性也是阻碍潮汐能开发利用的重要因素。

随着世界经济发展,人口增长,人类能源总需求快速增加,储量有限的有机燃料难以满足要求。有机燃料燃烧以及核电站运行引起的环境问题也日益受到人们的重视。因此,各国均开始重视再生能源的开发利用,如水能、太阳能、风能等。潮汐能也是一种再生能源,又是一种“清洁”能源,因而再次受到瞩目。同时,科学和技术的进步,如贯流式水轮发电机组、浮运施工法等,使潮汐电站的造价有所降低;而有机燃料价格上升,使常规火电站成本增高;所以,已经有几个百万千瓦级的大型潮汐电站在经济上经论证为合理的。

我国自 1958 年开始兴建小型潮汐电站,至 1985 年建成了江厦潮汐试验电站。目前尚在运行或具备运行条件的潮汐电站共有 8 座。随着改革开放的深入,沿海地区对能源的需求快速增长,而沿海地区属于缺煤少水电资源的地区,因此,潮汐能的开发利用对沿海地区的经济发展有重要意义。

在中国电力出版社支持下,作者根据国内外潮汐能研究和开发的历史与现状,编写了本书。潮汐电站是水电站的一种类型。本书主要介绍潮汐电站特殊性的方面,但亦不可避免地要涉及水电站一些共有的问题。作者期望本书的出版对我国潮汐能的开发利用起到有益的推动作用。

为了从满足能源总需求和再生能源的开发利用的角度来认识潮汐能开发利用的重要性,本书第一章简要地介绍全球能源需求和再生能源的开发利用。第二章介绍潮汐现象的基本概念,潮汐能的估计和潮汐能基本开发方式。第三章介绍潮汐电站站址选择和主要参数选择等。第四、五章介绍贯流式水轮机特性、水力计算和结构等。第六章介绍贯流式水轮机的控制。贯流式水轮机不仅用于潮汐电站,而且还用于一般低水头水电站,是当前在

04805/62

发展和推广的机种，故本书从较广泛的意义上介绍贯流式水轮机及其控制。第七、八章介绍潮汐电站枢纽布置，水工建筑物和厂房的特点、设计计算和施工，引用了大量实例。第九章介绍水力计算，包括海湾中和机组流道中的不稳定流计算。第十和第十一章介绍国内外潮汐能源的开发和利用。由于实际建成的潮汐电站为数甚少，故对一些潮差较大的海湾的各种开发利用方案作了许多介绍，供读者参考。

本书第一、二和六章由沈祖诒编写，第三、十章由赵雪华编写，第四、五章由陈新方编写，第七、八和九章由索丽生编写（其中第九章部分内容由耿兆铨编写），第十一章由周潮生编写。全书由沈祖诒主编。

本书承蒙沙锡林教授级高工审稿，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于建成的潮汐电站较少，规划设计资料又不齐全，再加上作者水平有限，故编写中失误在所难免，敬请读者指正，来信请寄（210024）南京河海大学沈祖诒收。

作 者

1997年4月

目 录

前 言

第一章 再生能源及其开发利用	1
第一节 能源需求和再生能源	1
第二节 再生能源的开发和利用	7
参考文献	25
第二章 潮汐能的开发利用	26
第一节 潮汐物理现象	26
第二节 潮汐能评估	36
第三节 潮汐能的工况特点	43
第四节 潮汐发电的开发方式	47
参考文献	58
第三章 潮汐电站规划和效益分析	59
第一节 潮汐电站站址选择	59
第二节 潮汐电站主要参数确定方法	62
第三节 潮汐水力计算在规划中的应用	78
第四节 潮汐电站的综合利用及效益分析	85
参考文献	90
第四章 贯流式水轮机水力特性及水力计算	91
第一节 概述	91
第二节 贯流式水轮机的水力特性	99
第三节 贯流式水轮机的工作特性	110
第四节 贯流式水轮机过流通道及主要参数的选择	115
第五节 贯流式水轮机转轮的水力计算	128
第六节 贯流式水轮机导水机构的水力设计	144
参考文献	146
第五章 贯流式水力机组结构	147
第一节 灯泡贯流式机组结构	147
第二节 其他贯流式机组结构	156
第三节 斜向导水机构的运动图和受力分析	160
第四节 贯流式水轮机导水机构的简化	164
附 录 国外贯流式水轮发电机组典型结构图	168
参考文献	171

第六章 贯流式水力机组的自动控制	172
第一节 贯流式水力机组控制的特点	172
第二节 贯流式水轮机调节系统数学模型	175
第三节 贯流式水轮机调节系统动态特性	195
第四节 贯流式水轮机控制策略	203
参考文献	211
第七章 潮汐电站的枢纽布置和水工建筑物	212
第一节 潮汐电站的枢纽布置	212
第二节 潮汐电站的水工建筑物	222
第三节 潮汐电站的浮运法施工	244
第四节 潮汐电站水工建筑物及金属结构的防腐与防生物附着	254
参考文献	257
第八章 潮汐电站的厂房	259
第一节 厂房类型与布置设计	259
第二节 厂房的整体稳定分析和结构计算	268
第三节 浮运式厂房	274
参考文献	287
第九章 潮汐电站的特殊水力学问题	289
第一节 潮位及潮流分析	289
第二节 波浪运动	309
第三节 泥沙运动	317
第四节 水击与涌波	326
参考文献	335
第十章 中国潮汐能源的开发利用	337
第一节 历史的回顾	337
第二节 运行中的潮汐电站	340
第三节 万千瓦级中间试验潮汐电站规划选点和可行性研究	354
第四节 大型潮汐电站展望	371
参考文献	377
第十一章 国外潮汐能源的开发利用	378
第一节 法国潮汐能源的开发利用	378
第二节 英国潮汐能源的开发利用	390
第三节 美国和加拿大潮汐能源的开发利用	404
第四节 前苏联和俄罗斯潮汐能源的开发利用	428
第五节 其他国家潮汐能源的开发利用	436
参考文献	442

第一章

再生能源及其开发利用

潮汐是一种再生能源。本章介绍再生能源在未来世界能源利用中的重要性及再生能源开发利用的可能性和现实性。

第一节 能源需求和再生能源

一、全球能源总需求

随着社会生产力发展和生活水平的提高,能源消费亦不断增长。据有关资料,全球平均个人能量消费量在1970年为1.9t标准煤,至1980年提高为2.9t标准煤,折算为电能则分别为15400kW·h和23500kW·h。全球总能量消费自1950年至1980年提高了3.3倍,即从29亿t标准煤提高到125亿t标准煤。

众所周知,能量需求的增长速度总是超过人口增长速度,因为平均个人能量消费在一定程度上反映了人的生活水平。例如,从1860年到1960年这100年间,人口增长了1.5倍,而能量消费增长了3倍。又例如,自1960年至1975年,人口平均增长率为2.1%,能量消费增长率则为4.3%。

在未来的年代里,能量需求将会更快地增长。

首先,在一些资源的容易获取部分消耗后,为了获取同样数量的资源,需要消耗更多的能量。例如,石油和矿产在表层的部分开采完竭后,为开采深层的石油和矿产就需要消耗更多的能量。又例如,为满足人类对食物的需求,需要开垦新的较为贫瘠的土地,这同样需要消耗更多的能量。

其次,为工业、农业和生活所需的淡水供应亦是十分紧张的。虽然在地球上存在 $1.49 \times 10^9 \text{km}^3$ 的水,但其中97.3%为海洋中的咸水和其他不能使用的水。在余下的2.7%的淡水中,75%存在于冰河中,24.5%在地下,只有0.36%才是人们易于取用的江湖水,而这部分水由于人类的过度使用亦正在减少。为了满足国民经济建设和人民生活的需要,不得不花费许多能量进行水资源的重新分配和储存。如我国京津地区严重缺水,因此正在进行大规模的南水北调等跨流域调水工程。

世界上有些国家由于缺少淡水,不得不耗费大量的能量进行海水淡化工程。据有些专家估计:为满足一个人每天2500kcal(1cal=4.1868J)热量食物的需要,每年要消耗约365t淡水。为了通过海水淡化得到这些淡水,则要花费2.5t标准煤。可见海水淡化需要的能量是相当多的。

最后,为了解决环境和生态问题,也需要越来越多的能量。

同时,人口增长亦是较快的。据联合国有关资料所载,按当时人口增长率——3人/s计算,至20世纪末,全球人口将达61~62亿。预测至2025年全球人口将达到82亿,至2050年达到95亿,至21世纪末期望人口能稳定在105亿。同时个人消费也将不断增长。

按目前科学技术水平,能量需求完全靠有机燃料(煤、石油和天然气等)、水能和原子能满足。据1990年统计,世界总能源消耗量为 $439 \times 10^{18} \text{J}$ (相当于149亿t标准煤),其中煤 $97 \times 10^{18} \text{J}$ 、占22%,石油 $174 \times 10^{18} \text{J}$ 占40%,天然气 $81 \times 10^{18} \text{J}$ 占18%,水力和地热 $20 \times 10^{18} \text{J}$ 占5%,原子能 $67 \times 10^{18} \text{J}$ 占15%。有机燃料提供的能量占80%。然而有机燃料的储量是非常有限的。据1979年联合国有关机构统计,全球有机燃料的储量折算至电能为 $7 \times 10^{15} \text{kW} \cdot \text{h}$ 。90年代初全球每年总能量消耗为 $120 \times 10^{12} \text{kW} \cdot \text{h}$,预计至2000年为 $140 \times 10^{12} \text{kW} \cdot \text{h}$,而至2010年将增至 $160 \times 10^{12} \text{kW} \cdot \text{h}$ 。由此可见,如仍以有机燃料为主解决能量需求,则有机燃料的储藏可能在下世纪消耗完。预计在21世纪前期有机燃料只能满足全球能量需要的不足一半,而其他部分要靠其他能源满足,此外,有机燃料的利用常常带来环境污染,所以也必须有所限制。

与上述全球总能量需求相比,水力资源也是很有限的,它只能解决全球能量总需求的一小部分。水力资源是一种再生能源,是目前广泛开发使用的再生能源,亦是一种相对“清洁”的能源,所以凡有条件的地方,总是优先开发水力资源。我国是水力资源比较丰富的国家,开发率亦比较低,因此必然要予以大力开发利用。举世瞩目的装机容量达1820万kW的三峡水电站已开工建设。另一方面水力资源的分布很不均匀,沿海经济发达地区恰恰缺乏水力资源,而且水力资源开发还遇到淹没、移民和环境生态等问题。

当前世界上正在大力发展核能利用,各工业发达国家已建设了不少核电站。我国兴建的秦山核电站和大亚湾核电站均已投入运行。核反应能产生巨大的能量,但是按一般的技术,核电站能提供的能量仍然是有限的。

当前核电站反应堆使用的燃料主要是天然铀,其中包括铀238(99.28%),铀235(0.714%)和铀234(0.006%)三种同位素。铀的分布很广,但含量很低。据统计全球大陆部分地壳中铀的平均含量为1t岩石中含铀1g,即含量为 $10^{-4}\%$ 。按美国资料,只有在含量超过0.1%的地方开采铀矿才是比较经济合理的。

一般核电站上的热中子反应堆中主要利用铀235,它只占天然铀的0.714%,而实际只能利用0.5%。如考虑到核反应中产生的同位素钚239能引起部分铀238裂变,则天然铀在反应堆中的利用率最多亦只能达1.5%。

考虑到上述因素,专家估计铀的储量相当于 $8 \times 10^9 \text{t}$ 标准煤,或 $0.65 \times 10^{15} \text{kW} \cdot \text{h}$ 电能。可见核能储量亦是有限的。

但是核技术是不断发展的,如快中子核反应堆中天然铀的利用率可高达30%~45%,从而大大提高核电站的经济效益。如以开采成本为金属铀300美元/kg为界限计算,则可开采铀相应的核能储量估计为 $732 \times 10^{15} \text{kW} \cdot \text{h}$ 。这就可以满足全球能量需求了。而且,可控热核聚变技术的应用将进一步大大提高核能利用的效益。

从上述可见,有机燃料是当前人类能量的主要来源,但其储藏量是有限的。水力资源是一种再生能源,但其总储藏量较少,只能满足部分能源需求。核能是当前迅速发展中的

一种能源，随着技术的进步，核能反应是满足人类能量需求的重要能源。

但是不管是有机燃料还是核能，它们在满足人类能量需求的同时，在全球总的热量平衡中加入了补充的热能，即在某种程度上破坏了原来地球的热平衡，这可能会带来严重的后果。有关专家估计，人类在地球接受到的太阳能（约 10^{17}W ）外，如另外再增加 1%（约 10^{15}W ），则地球大气平均温度 14°C 可能提高 5%，约 0.75°C 。这一温度提高可能引起冰河溶化，海平面上升等一系列环境、生态方面灾难性的变化。从这个角度认为应该把补充热量限制在 10^{14}W 。目前世界总功率约为 $1.5 \times 10^{13}\text{W}$ ，考虑到能量消费每 25 年翻一番的速度，那么在 80~100 年间将达到 10^{14}W 的极限。因此核能虽然从数量上可以满足人们的能量需求，但从环境和生态来说核能不能无限制发展。

由于上述原因，当前世界先进国家许多有识之士正在积极开展其他能源开发利用的研究和应用，其中主要是再生能源的开发和利用。

二、再生能源

再生能源是基于地球上经常存在或周期发生的能量流的能源。典型的再生能源有太阳能、水能等。太阳能的周期为 24h，水能的周期为一年。再生能源存在于周围环境中，它并不是人类活动的结果，这一点是再生能源的特点。

非再生能源是地球上蕴藏的物质，它可用来产生人们所需形式的能量，但物质会消耗掉，如煤、石油、天然气和核燃料为非再生能源。

由于当前使用的能源主要是非再生能源，故常把非再生能源称为传统能源，把再生能源称为非传统能源。水能是当前使用的主要能源之一，它可称为传统能源，但它又是再生能源。故本书将使用再生能源一词，而不再使用非传统能源一词。

再生能源存在于周围环境中，人类利用其中一部分生产出所需要的能量，使用后又返回环境中，原则上对周围环境不产生影响，参见图 1-1 (a)。

非再生能源通过人们的活动，将原来的化学能、核能变为人们需要的能量，使用后进入周围的环境中，因此原则上对周围环境产生影响，参见图 1-1 (b)。

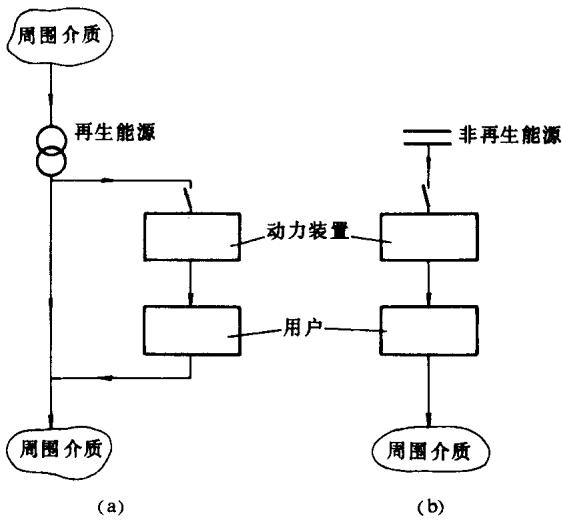


图 1-1 再生能源和非再生能源的利用过程示意图

表 1-1 示出再生能源与非再生能源的特性的比较。虽然常规的水力发电也是再生能源，但它的一些特性与非再生能源相近，例如规模较大、设备价格不高、出力稳定性好等等，因此未列入表 1-1 内。

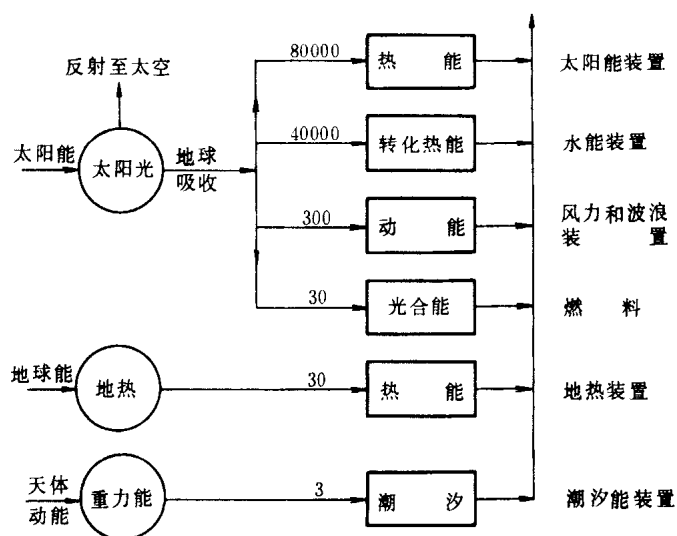
从表 1-1 可见，从目前技术水平出发，大多数再生能源装置只是分散的和小型的，可以满足局部地区的能量需求。

表 1-1

再生能源与非再生能源的特性比较

	再生能源*	非再生能源
能源举例	太阳能, 风能、潮汐能	煤、石油、天然气
蕴藏地点	分散在周围环境	集中在一些地方
天然存在形式	能量流	化学能, 核能
密集度	密集度低, $300\text{W}/\text{m}^2$ 及以下	密集度高, $100\text{kW}/\text{m}^2$ 及以上
能源本身价格	无价格	价格不断上升
设备价格	价格高, 例如可达 2000 美元/kW	价格中等, 例如 500 美元/kW
稳定性或可控性	出力的稳定性差, 宜采用前馈控制的负荷调节	出力的稳定性好, 宜采用反馈控制的流量调节
利用限制	受地方条件和能量需求制约	一般不受制约
规模	目前小规模系统是可行的	一般规模较大
应用范围	目前主要是地方性负荷包括农业和小工业	不受限制
安全性	较安全	需安全措施
独立性	能源独立	受燃料供应限制
对环境影响	一般较小	周围环境易受污染

* 不包括常规的河川水电站。

图 1-2 再生能源分布及其利用 (单位: 10^{12}W)

但是, 再生能源理论上的数量是巨大的。图 1-2 所示为再生能源的分布和利用途径。

从图 1-2 可见, 再生能源可分为三大类: 太阳能、地能和星球运动能。太阳能通过太阳光传到地球, 为地球及其周围大气吸收。它又可分为:

(1) 热能。其功率达 $80000 \times 10^{12}\text{W}$, 可以通过太阳能装置来利用。

(2) 转化了的热能。其中包括水能，即太阳能提升水份至大陆地区，并形成河流。转化了的热能功率达 $40000 \times 10^{12} \text{W}$ ，其中一部分可通过水力发电装置或其他水力装置来利用。

(3) 动能。它包括风能和海洋流等，其功率为 $300 \times 10^{12} \text{W}$ 。风能可以通过风力发电装置来利用。

(4) 光合能，它的功率达 $30 \times 10^{12} \text{W}$ ，可利用植物作为燃料，获得能量。

(5) 地能。主要是指地热，其功率亦有 $30 \times 10^{12} \text{W}$ ，可以通过地热发电等装置来利用。

(6) 星球运动能。主要体现在潮汐现象，其功率为 $3 \times 10^{12} \text{W}$ ，可通过潮汐发电站等来利用。

上面是按能量来源对再生能源分类。从能量载体角度分类，则可将再生能源分为太阳能、海洋能、风能、地热能和水能等。全球再生能源和非再生能源的储量见表 1-2。

从表 1-2 可见，将再生能源与非再生能源相比，再生能源的蕴藏量是很大的。但目前的科学技术水平尚不允许大规模利用再生能源。有些再生能源目前还无法利用。

表 1-3 所示为再生能源的一些特性参数。对再生能源，应注意它的以下几个特性。

表 1-2 全球各类能源的储量			表 1-3 再生能源的特性参数			
能源类别		储量($10^{12} \text{kW} \cdot \text{h}$)	能源	周期	特性参数	备注
非再生能源	有机燃料	55364	直接太阳光	24h	光照强度(W/m^2)	只白天有
	核能	547000		1 年	照射角度	
再生能源(按年计)	太阳能	665000	间接太阳光	24h	云层情况	
				1 年		
	海	含盐量梯度	生物燃料	1 年	土壤条件,光照强度,水份燃料特性	多种形式,森林和农业资源
		生物能				
	洋	海洋流	风	1 年	风速,高程	波动的
		潮汐能				
	能	波浪能	波浪	1 年	浪高,周期	能量集中达 $50 \text{kW}/\text{m}$
		温度梯度	水能	1 年	水头,流量	水头需人工集中
	风能	17360	潮汐	12h	潮差,水库面积,海湾宽,海湾深	海湾地形好可增加潮差
	地热能(按 3km 深计)	25		25min		
	水能	33	热能	非周期		

再生能源的时间性：大多数再生能源是周期性的，从表 1-3 可见，直射太阳光以 24h 和 1 年为周期，潮汐能则主要以 24h25min 为周期。再生能源的周期性与能量需求的时间要求不一定重合，从而需要进行调节。如水电站的水库视库容大小有日调节，周调节、季调节、年调节和多年调节等调节方式。对再生能源装置可以采用不同的调节方式，参见图 1-3。

再生能源装置定义为，能把再生能源的能量转化为用户可使用的能量形式的装置。例如，风力发电装置可把风力转化为电能供用户使用。

图 1-3 中示出再生能源装置的 4 种不同的调节方式。

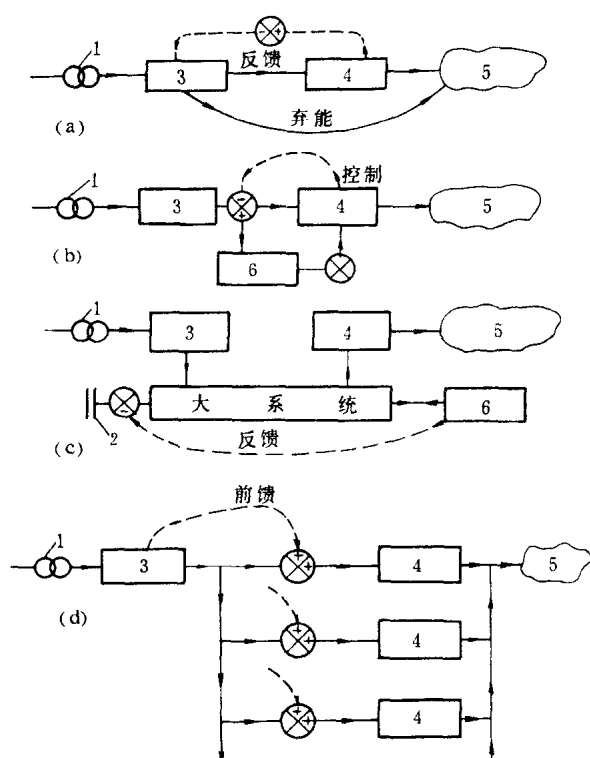


图 1-3 再生能源装置的调节方式

(a) 负反馈调节；(b) 带储能装置的负反馈调节；

(c) 与大系统并列工作；(d) 前馈调节

1—再生能源；2—非再生能源；3—再生能源装置；

4—用户；5—周围环境；6—储能装置

图 1-3 (a) 所示为负反馈调节方式。在用户所需能量较少时，负反馈信息使部分能量弃之不用。此时，再生能源装置的容量应等于或大于用户的最大需要容量，在运行中有较大的能量损失。

图 1-3 (b) 所示为带有储能装置的负反馈调节方式。在用户需求小于再生能源装置输出时，将部分能量储存起来，在用户需求大于再生能源装置输出时，这部分能量再从储能装置中放出来。

图 1-3 (c) 所示为与大系统并列工作方式。再生能源装置不直接与用户相连，而是接入大系统中，大系统另外具有较大容量的包括非再生能源的能源装置。用户间接地从大系统中获得所需能量。这是一种比较经济合理的调节方式。

图 1-3 (d) 所示为前馈调节方式。根据再生能源装置输出大小调整用户。这种方式通常较难实现。

再生能源的质量：能源质量定义为某种形式的能可转变为机械能的比例的大小。如电能质量高，其 80%~90% 可通过电动机转变为机械能。再生能源中的水能、风能、波浪能和潮汐能的质量较高。风能质量约 30%，水能质量约 80%，波浪能和潮汐能则达 75%。以热能形式存在的再生能源质量较低，如现代蒸汽轮机的效率只有 35%。以光能形式存在的再生能源质量低，现代光电池的效率只能达到 14%。

再生能源的分布密度：一般说再生能源分布密度只有 $1\text{kW}/\text{m}^2$ 的数量级。只有波浪能比较集中。水能可以通过人工造坝和引水的办法将分散的能量集中起来。

再生能源的开发利用对我国是十分重要的。一方面，虽然我国煤、石油和天然气的储量很丰富，但毕竟也是有限的，要珍惜这些财富，充分利用再生能源。另一方面，我国幅员辽阔，资源分布不匀，大电网不可能覆盖和满足所有地区的需要。各地区要充分发挥地区特点，充分利用地区优势以满足本地区经济发展和人民生活的需求。

我国在开发利用再生能源方面已取得了巨大成绩。1995 年我国水电装机已达 5000 万 kW 以上，占全国电力总装机约 25%，发电量约占 20%。同时我国在开发潮汐电站、风力发电站和太阳能装置等方面均有很多进展。

第二节 再生能源的开发和利用

再生能源主要包括太阳能、水能、潮汐能、风能、波浪能和地热能等。水能已作为当前常规能源开发利用，潮汐能的开发利用是本书的主要内容。本节仅介绍太阳能、风能、波浪能和地热能的开发利用。

一、太阳能的开发和利用

如前面所述，太阳能是巨大的。水能、风能和波浪能也是转化了的太阳能，即使煤、石油等也是过去转化了的太阳能。这里所讲的太阳能是指直接或间接光照的能量。

我国是一个太阳能资源十分丰富的国家。据实测资料，我国各地年辐射能量大约在 $335 \sim 835 \text{kJ/cm}^2$ 之间。北从大兴安岭西麓向南经北京西侧到兰州，再向南到昆明，沿横断山脉到西藏南部这一条折线，可将全国分为两大部分。在这条线的西北，除新疆北部局部地区外，年辐射能量均超过 585kJ/cm^2 ；在这条线以东，除四川、贵州两省外，年辐射能量平均在 500kJ/cm^2 。全年日照时间，西北和西南部分地区约 $2800 \sim 3300 \text{h}$ ，华北平原为 $2600 \sim 2800 \text{h}$ ，东南地区一般也在 2000h 以上。据中国科学院自然资源综合考察组的资料所载，全国主要地区的太阳能资源可分为五类，见表 1-4 所示。

表 1-4 我国太阳能资源分布

类别	全年日照 时数 (h)	年总量 (kJ/cm^2)	主 要 地 区
1	2800~3300	670~837	宁夏北部、甘肃北部、新疆南部、青海北部、西藏西部
2	3000~3200	586~796	河北西北部、山西北部、内蒙古、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部、新疆南部
3	2200~3000	586~670	山东、河南、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南、陕西北部、甘肃东南部、广东南部、福建南部、江苏北部、安徽北部
4	1400~2200	419~502	湖南、湖北、广西、江西、浙江、福建北部、广东北部、陕西南部、江苏南部、安徽南部、黑龙江
5	1000~1400	335~419	四川、贵州

(一) 太阳辐射

大气层外的太阳光谱如图 1-4 所示。太阳光谱可分为三部分。

- (1) 紫外线 (波长 $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$) 占 9%。
- (2) 可见光线 ($0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.7 \mu\text{m}$) 占 45%。
- (3) 红外线 ($\lambda > 0.7 \mu\text{m}$) 占 46%。

地球上某一点接受到的太阳辐射显然是变化的。地球自转一周需 24h ，因此某一点的太阳辐射就有周期为 24h 的变化。在单位水平面上一天接

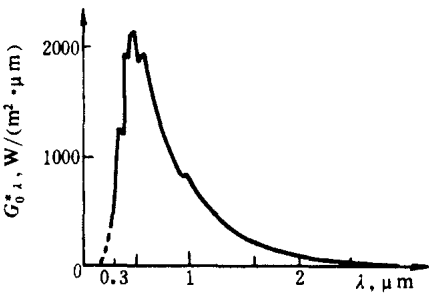


图 1-4 大气层外的太阳光谱

受到的总辐射 (H_h) 也是变化的, 它决定于该点所处的纬度、当时的季节等。图 1-5 示出在不同纬度上单位水平面上晴朗天气时, 一天内受到的辐射随季节的变化。

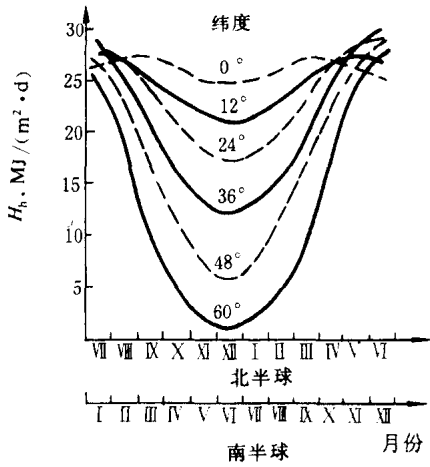


图 1-5 不同纬度单位水平面上在晴朗天气时一天内受到的辐射

由图 1-5 可见, 夏天各个纬度的辐射 H_h 相差不大, 大致为 $25\text{MJ}/\text{m}^2$, 但是在冬天, 各纬度上的辐射 H_h 相差甚大, 这取决于三个因素。

(1) 白天历时的变化。纬度越高, 白天历时变化越大, 冬天的白天越短, 在北极圈内, 会出现没有白天的情况; 纬度低的地区, 白天历时变化较小。

(2) 水平面与太阳光夹角的变化。

(3) 大气层吸收太阳光的变化。冬天, 太阳光穿过大气层的距离加大, 被吸收的能量亦加大。

图 1-6 所示为在北纬 52° , 西经 0° 测到的太阳辐射在一天内的变化。

图 1-6 (a) 为晴天测到的结果。由图可见, 在 6 月份, 不但白天长, 而且辐射也强, 而在 1 月份, 白天短, 辐射也弱。图 1-6 (b) 为阴天测到的结果, 阴天时没有直射太阳光, 但有散射太阳光, 由图可见, 只有在下午一段时间才有一定强度的辐射。

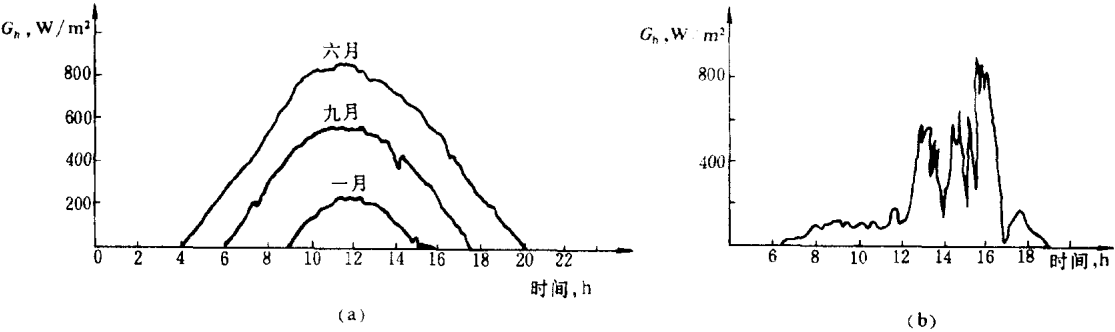


图 1-6 北纬 52° , 西经 0° 处太阳辐射在一天内的变化

(a) 晴天; (b) 阴天

太阳辐射还受到大气层的影响。到达大气层外的太阳光并不能都到达地球表面, 它受到大气层的多种影响。

(1) 反射。30%左右的太阳辐射被反射回大气层外, 大部分是被云层反射回去的, 少部分是地面上的雪和冰反射回去的。

(2) 吸收。

1) 远紫外线 ($\lambda < 0.3\mu\text{m}$) 几乎全部为氧、臭氧、氮及它们的离子所吸收, 到不了地面上。

2) 近紫外线 ($0.3\mu\text{m} < \lambda < 0.4\mu\text{m}$) 有很少一部分可能穿过大气层到达地面。

3) 可见光 ($0.4\mu\text{m} < \lambda < 0.7\mu\text{m}$) 几乎可以全部穿过洁净的大气层,到达地球表面,太阳辐射的一半是在这一段光谱中的。但是大气中的烟雾和灰尘等可能吸收相当部分的可见光。

4) 近红外线 ($0.7\mu\text{m} < \lambda < 2.5\mu\text{m}$) 有 20% 会被大气中的水蒸气和二氧化碳吸收。通常大气中的 CO_2 含量比较稳定,在 0.03% 左右,但水蒸气含量的变化很大,几乎达 4%,从而对近红外线的吸收有较大影响。在水蒸气含量多时会出现云层,这对太阳辐射影响更大。

5) 远红外线 ($\lambda > 12\mu\text{m}$) 几乎不能穿透大气层到达地球表面。

由上述可见,到达地球表面的太阳辐射有 24h 和 1 年周期的变化,且受到大气层的明显影响。

(二) 太阳能热水装置

首先广为使用的太阳能装置是太阳能热水装置。任何一种装置都是一方面吸收太阳能,一方面散发热量,不同的装置有不同的效率。图 1-7 所示为各种太阳能热水装置,表 1-5 则示出它们的特性。

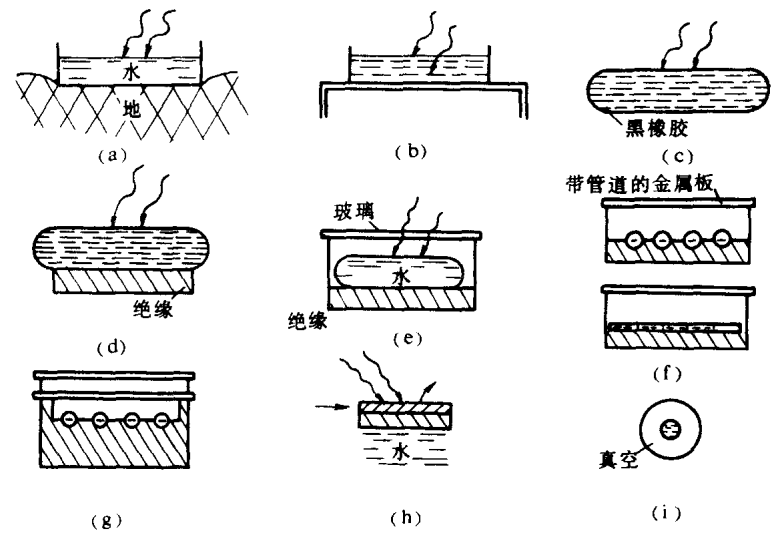


图 1-7 太阳能热水装置

- (a) 直接放在地面上的开敞式水箱; (b) 与地面隔开的开敞式水箱; (c) 黑色封闭水箱; (d) 与地面隔开的黑色封闭水箱; (e) 放在有玻璃盖的空间中的黑色水箱; (f) 带水管的金属板和充水的金属层; (g) 有双层玻璃盖的金属层; (h) 具有选择性性能平面的装置; (i) 用真空隔绝的热水装置

表 1-5 各种太阳能热水装置的特性

表 面	玻璃盖板	相应图号	r_{Pa}^* ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$)	$T_p^{(m)**}$ ($^\circ\text{C}$)	价格(美元/ m^2)
黑色	无	1-7(c)	0.031	40	20
黑色	一层	1-7(e), 1-7(f)	0.13	95	50~200
黑色	二层	1-7(g)	0.22	140	300
特殊表面	一层	1-7(f), 1-7(h)	0.40	240	300
特殊表面	二层	1-7(g), 1-7(h)	0.45	270	400
	真空隔绝	1-7(i)	0.48	160	500

* r_{Pa} 为热水装置表面对热量损失的阻力,热水装置温度为 90°C ,大气温度 20°C ,平均速度 5m/s 。

** $T_p^{(m)}$ 是在太阳光照为 $750\text{W}/\text{m}^2$ 、热量损失系数为 r_{Pa} 、热量交换正好平衡时的温度。

图 1-7 (a) 所示为最简单的太阳能热水装置, 价格最低, 但吸收效率相当低, 且水的热量很快传入地下而散失。

图 1-7 (b) 所示的太阳能热水装置, 虽然隔绝了向地下传递热量的通道, 但表面水分蒸发仍使许多热量散失, 总的效益不高。

图 1-7 (c) 为一种最基本的太阳能热水装置, 它一般装在房顶上。采用黑色表面水箱使吸热系数增加到 0.9, 有更多的热量传给水体。封闭水箱又杜绝了蒸发损失, 使装置效率提高。水温可达 $40\sim 45^{\circ}\text{C}$ 。装置价格较低, 因此得到广泛的应用。该型装置的主要问题是水箱在太阳直射下易于损坏。

图 1-7 (d) 所示的太阳能热水装置是由图 1-7 (c) 的装置底部加以绝热措施后构成的, 由于热量损失减少, 效率和水温均有提高。

图 1-7 (e) 所示为封闭式的太阳能热水装置。图 1-7 (c)、(d) 两种太阳能热水装置均暴露在外, 因受风吹, 故水温不易升高。如将其放在封闭环境中, 上面覆以太阳光可以穿透的玻璃盖板, 那么可以避免风吹引起的热量损失, 水温最高可达 95°C 。较好的盖板材料是玻璃, 但它易碎。透明的聚乙烯薄膜较便宜, 但它在日照下易于老化, 需经常更换。另外玻璃对红外线部分的导热性差, 故保暖性好。也可以使用与玻璃接近的有机玻璃材料, 后者不易破碎。计算和实践表明, 玻璃盖板可以将热水至周围空气热传导阻力提高 4 倍, 从而可使最高水温提高 50°C 左右。

图 1-7 (f) 所示为流动式的金属太阳能热水装置。水通过并行的水管流动, 水管安装在黑色金属板上, 一般使金属板与管间的热传导阻力很小。通常水管直径 2cm, 间距 20cm, 板厚 0.3cm。金属板和水管一起置于封闭空间内, 覆以玻璃盖板。该装置的效率与图 1-7 (e) 所示装置的效率相近。由于管道中水量很少, 需另设水箱, 水箱外有较好的绝热层, 从而降低该系统的热量散失。

图 1-7 (g) 为图 1-7 (f) 的装置再加上一层玻璃后构成, 可以进一步减少热量损失。

图 1-7 (h) 所示为具有选择性表面的太阳能热水装置。一般热水装置接受太阳能最多的波段是在 $\lambda=0.5\mu\text{m}$ 左右, 而热量损失最多的波段则是在 $\lambda=10\mu\text{m}$ 左右。如能制造一种有选择性的材料, 它对波段 $\lambda=0.5\mu\text{m}$ 的辐射有很好的单色吸热性, 而对波段 $\lambda=10\mu\text{m}$ 的远红外线则有很差的单色辐射性。这样就可制成一种效率相当高的热水装置。

用半导体和金属组合起来可以形成这样一种材料。半导体具有只能有效吸收某一波长以下的辐射能的性能, 如 Si 能有效吸收波长小于 $1.1\mu\text{m}$ 的辐射能, 而 Cu_2O 能有效吸收波长小于 $2\mu\text{m}$ 的辐射能。但是半导体的机械强度低, 导热性差, 因而难以单独作为制作热水装置的材料。

金属材料强度高, 导热性好, 价格也便宜, 但它会强烈反射可见光和红外线。例如对 $\lambda\gg 1\mu\text{m}$ 的辐射, 金属可反射其中 97%, 只吸收其中的 3%。但某些金属对波长小于一定值的辐射有较大的吸收率, 如铜对波长小于 $0.5\mu\text{m}$ 的辐射有较好的吸收率, 即它较多吸收蓝色光, 较多反射红色光, 因此是红色的。

如果在金属板上覆以一层半导体薄膜, 则可以形成有选择性材料, 如图 1-8 所示。

由图 1-8 所示, 对短波辐射来说, 半导体有很好的吸收作用, 从而使热量传入热水装置。