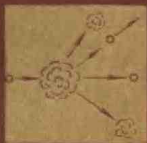


高等学校试用教材



新能源发电

陈听宽
西安交通大学 章燕谋 合编
温 龙

机械工业出版社

新 能 源 发 电

西安交通大学陈听宽 章燕谋 温龙 合编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 18·字数 435 千字

1982 年 7 月北京第一版·1982 年 7 月北京第一次印刷

印数 6,001—7,000·定价 1.85 元

*

统一书号: 15033·5129

前 言

本书是根据1978年4月在天津召开的一机部高等学校对口专业座谈会的精神和1978年8月在哈尔滨召开的锅炉专业教材会议制订的《新能源发电》编写大纲编写的全国试用教材。

全书阐述了各种新能源,包括核能、太阳能、地热能、海洋能、氢能、风能以及新型发电方式,如磁流体发电、电流体发电的基本原理及其利用技术,介绍了各种新能源发电的发展历史及前景,论述了新能源发电装置的设计要点以及存在的问题。本书可作为高等院校锅炉专业高年级学生的教材,也可供动力类其它专业采用,并可供从事能源工作的有关工程技术人员参考。

本书由西安交通大学陈听宽副教授、章燕谋副教授和温龙同志合编。哈尔滨工业大学李之光副教授担任主审。

本书责任编辑——郝育生。

1981年元月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 能源概述	1
§ 1-2 能源的分类和利用	2
§ 1-3 新能源利用的展望	3
第二章 核能发电	8
§ 2-1 概述	8
一、核电站发展概况	8
二、核电站一般工作原理	9
三、核电站评价	14
§ 2-2 反应堆物理基础	15
一、原子核结构、放射性和放射性衰变	15
二、核能和核反应	17
三、核裂变自持链式反应	20
四、反应堆控制原理	25
五、核燃料的转换和增殖	29
§ 2-3 反应堆材料	30
一、核燃料	31
二、包壳和结构材料	33
三、慢化剂	35
四、冷却剂	36
五、控制材料	37
§ 2-4 反应堆热工	39
一、反应堆内的释热	39
二、反应堆内热量传递过程	41
三、沿燃料流道的轴向温度分布	47
四、反应堆流体系统设计	48
五、热管和热点因子	51
六、堆芯的热工设计	52
§ 2-5 核电站动力回路及反应堆结构	53
一、压水堆核电站	53
二、沸水堆核电站	62
三、重水堆核电站	64
四、高温气冷堆核电站	67
五、钠冷快中子增殖堆核电站	70
§ 2-6 核电站安全性	73
一、辐射对人体的危害及其防护标准	73
二、核电站安全措施	75

三、核电站三废处理	76
四、核电站事故危险性分析	77
§ 2-7 受控核聚变	78
一、受控核聚变的条件	78
二、磁约束系统	79
三、惯性约束系统	86
第三章 太阳能发电	89
§ 3-1 概述	89
§ 3-2 有关太阳辐射的基本知识	90
一、太阳辐射通量和太阳常数	90
二、地球外太阳辐射光谱	90
三、地球表面上的太阳辐射	91
四、投射到斜面上的太阳直接辐射的计算	97
§ 3-3 太阳能集热器	99
一、平板型集热器	99
二、聚焦型集热器	103
三、以翅参数分析集热器的性能	125
§ 3-4 太阳能热发电	127
一、太阳能热发电现状	127
二、典型的太阳热电站	128
三、太阳能热电站的蓄能装置	132
四、最大循环输出功时太阳能集热器的最佳运行条件	137
五、太阳能-矿物燃料混合电站	139
§ 3-5 太阳能热发电的前景	143
第四章 磁流体发电	146
§ 4-1 概述	146
一、磁流体发电的基本原理	146
二、磁流体发电的特点和应用范围	148
三、磁流体发电的发展简况	150
§ 4-2 磁流体发电的循环系统	152
一、磁流体发电的热力循环	152
二、磁流体发电的开式循环系统	155
三、磁流体发电的闭式循环系统	157
四、磁流体发电的液态金属循环系统	159
§ 4-3 气体的电离及其电导率特性	160
一、平衡电离	161
二、非平衡电离	165
三、霍尔效应和离子滑移	169
§ 4-4 磁流体发电通道的流体力学分析	172
一、基本方程	172
二、相互作用长度	174
三、发电通道中的气流边界层	175

四、在特殊情况下通道长度的确定	176
§ 4-5 磁流体发电的磁系统	177
一、磁流体发电对磁体的要求	177
二、新月形截面线圈	179
三、矩形截面线圈	181
四、超导线圈	181
§ 4-6 磁流体发电装置的主要部件	183
一、燃烧室	183
二、发电通道	184
三、磁体	188
四、高温空气预热器	189
五、蒸汽发生器	190
六、种子回收装置	191
七、逆变换装置	192
§ 4-7 磁流体发电的运行调节问题	192
第五章 地热发电	194
§ 5-1 概述	194
§ 5-2 地热基础知识	195
一、地球的构造	195
二、地热资源	196
§ 5-3 地热发电装置	198
一、地热发电的基本型式	198
二、地热电站的设计特点	201
§ 5-4 地热动力循环的热学分析	206
一、焓和焓效率	206
二、循环中参数变化的影响	207
三、冷凝温度	209
四、热交换器中的不可逆损失	209
§ 5-5 各种改进型式的地热电站	210
一、多级减压扩容蒸汽循环	211
二、多级扩容低沸点工质循环	213
三、双重蒸汽循环	214
四、全流系统	215
五、地热发电方式的比较	216
§ 5-6 地热发电的进展	217
一、利用干热岩发电	217
二、地热和矿物燃料混合式电站	221
三、直接接触式和流化床式热交换器	221
四、卤水发电和矿物原料回收的联合系统	223
第六章 其它能源发电	225
§ 6-1 海洋能发电	225
一、潮汐能发电	225

二、波浪能发电	229
三、海洋温差发电	232
四、海流发电	236
§ 6-2 氢能发电	237
一、氢能利用的背景	237
二、氢的特点	237
三、氢的制取	239
四、氢能的利用	243
§ 6-3 风能发电	248
一、风能利用概述	248
二、风轮机基本理论	249
三、风轮机的迎风装置和超速控制	257
四、风能发电装置	261
§ 6-1 电流体发电	267
一、电流体发电的基本原理	267
二、单极性电荷的产生、输送和收集	269
三、电气体发电的热力循环	276

第一章 绪 论

§ 1-1 能 源 概 述

能源是国民经济发展的动力,是实现四个现代化的物质基础。随着国民经济的发展,对能源的需要量日益增加,如果能源的供应赶不上经济发展的需要,将会出现能源危机,从而影响四个现代化的进展。

我国是一个能源资源比较丰富的国家,煤的探明储量居世界第三位;水力资源的理论蕴藏量达 6.8 亿千瓦,居世界首位,其中可开发利用的为 3.8 亿千瓦,每年可得电能 1.9 万亿度,约为我国 1979 年总发电量的七倍;此外,还有储量较丰富的石油和天然气。因此从能源资源的总储量来看,我国无疑是世界上拥有雄厚资源的国家之一。但由于我国人口众多,按人口平均计算的能源资源占有量不仅低于苏联、美国很多,甚至还不及世界的平均水平,因此,我们在能源资源上决不能盲目乐观。再从能源消费来看,我国 1979 年能源消费总量为 5.86 亿吨标准煤,居世界第三位,但按人均平均仅为 0.6 吨,仅为世界平均水平 2.3 吨的四分之一,同发展中国家相比,也属于中等偏低水平。

从世界能源状况来看,目前工业发达国家的能源消费都以油、气为主,我国则以煤为主,见表 1-1。可是世界油、气资源的储量有限,1978 年世界石油探明储量为 879 亿吨,开采量近 30 亿吨,因此石油供应渐趋紧张,用石油作为发电厂燃料的时代将趋结束。天然气的情況大致与石油类似,今后不大可能大规模地作为发电厂的燃料。为了保证能源的供应,除了煤炭可以继续保证外,则应大力发展核能与其它新能源。煤是世界上储量丰富的矿物燃料资源。据估计,世界煤的总储量约 10 万亿吨,适合于商业开采的储量为 6400 亿吨,按目前的需求量,可开采 250 年,可满足本世纪和下一世纪不断增长的能源消费。但是,煤的开采、运输费用均较大,环境污染严重,同时煤也是重要的化工原料,烧掉可惜,因此世界各国都很重视核能和其它新能源的开发,预计世界能源的构成将逐步变化,如表 1-2 所示,到 1990 年以后,石油的比重将明显下降,核能的比重将迅速增加。

表 1-1 几个国家和世界平均的能源供应组成情况 (%) (1977)

国 家	石 油	天 然 气	煤	水 力	核 能
中 国	24	7.5	62	6.5	—
英 国	43	28	21	5	2
西 德	49	13	35	1	2
英 国	47	14	35	1	3
法 国	64	9	17	8	2
日 本	75	3	15	5	2
世界平均	44	18	30	6	2

表1-2 世界能源组成的预测 (%)

年	代	石 油	天 然 气	煤	水力及其它	核 能
1973		46	18	30	6	0.4
1977		44	18	30	6	2
1985		45	20	24	6	5
1990		48	15	20	7	10
2000		29	20	25	13	13
2020		10.5	12.5	26	19.5	31.5

自然界蕴藏着多种多样的能源资源，为了解决能源紧张的局面，许多国家认为，必须走多样化开发能源的道路。我国有着丰富的多种多样的能源资源，应根据扬长避短、因地制宜的原则，进行多种开发以充分利用这些有利条件。

§ 1-2 能源的分类和利用

煤、石油、天然气都是我们熟知的能源。除此之外，各种自然过程，如风、流水、潮汐和地震等也包含着能量，因此，也都是能源。地球上的能源归纳起来，大体上可以分为三大类：

第一类是来自地球以外的天体的能量。其中最主要的是太阳辐射能，此外，还有其它恒星或天体发射到地球上的各种宇宙射线的能量；

第二类是地球本身蕴藏的能量。如海洋和地壳中储存的原子核能以及地球内部的热能；

第三类是由于地球和其它天体相互作用而产生的能量，如潮汐能等。

按照能源的来源分类，我们可以把地球上形形色色的能源归纳为表 1-3。

表1-3 根据能源来源的分类表

第一类能源 (来自地球以外)	太阳辐射能	煤、石油、天然气、油页岩、草木燃料、沼气和它由于光合作用而固定的太阳辐射能 风、流水、波浪、海流 海洋热能 直接的太阳辐射
	宇宙射线、流星和其它星际物质带进地球大气中的能量	
第二类能源 (来自地球内部)	地球热能	地震、火山活动 地下热水和地热蒸汽 热岩层
	原子核能	铀、钍、镭、氡等
第三类能源 (来自地球和其它天体的作用)	潮汐能	

宇宙射线、流星和其它星际物质带进地球大气中的能量在数量上是极为微小的，地球上的能源主要是由太阳辐射能、地球热能、原子核能和潮汐能所构成，其总量占地球上全部能源的99.99%以上。

通常把以现成的形式存在于自然界中的能源称为一次能源，而把需要依靠其它能源来制

取或产生的能源称为二次能源。电能、氢能、汽油、火药等都属于二次能源。一次能源还可以按照能否再生而进一步加以分类。所谓再生能源就是不会随着它本身的转化或人类的利用而日益减少的能源，风、流水、海洋热能、地热、直接的太阳辐射以及草木燃料都是再生能源，它们可以源源不断地从自然界中得到补充。化石燃料和核燃料则不然，它们将随着人类的利用而越来越少。我们把这些随着人类的利用而逐渐减少的能源称为非再生能源，其分类如表 1-4 所示。

表 1-4 一次能源和二次能源、再生能源和非再生能源分类表

一次能源	再生能源	风、流水、海流、海洋热能、潮汐能 草木燃料、直接的太阳辐射 地震、火山活动、地下热水、地热蒸汽、热岩层
	非再生能源	化石燃料(煤、石油、天然气、油页岩) 核燃料(铀、钍、钷、钷等)
二次能源	电能、氢能、汽油、煤油、柴油、火药、酒精、甲醇、丙烷、苯胺、硝化棉和硝化甘油等	

按照能源本身的性质，能源还可以分为含能体能源和过程性能源两大类。各种化石燃料、核燃料、地下热水和地热蒸汽、高位水库、氢能等都是含能体能源，风、流水、海流、地震、潮汐以及我们广泛应用的电能等都是过程性能源。过程性能源无法直接地大量储存，如需把它们储存起来，一般必须先把它们转变成含能体能源的能量。例如，为了储存流水的动能，就要修筑水坝，把流水的动能转化为高位水的势能；又如，为了储存电能，采用蓄电池，实际上，蓄电池中储存的已经不是电能，而是化学能了。在各种能源中，目前已应用得比较普遍的，如煤、石油、天然气、水力等，称为常规能源；新近才利用的能源或正在开发研究的能源，如核裂变、核聚变、太阳能、地热能、海洋能、风能等，称为新能源。所谓新能源，是相对而言。现在的常规能源在过去也曾是新能源，今天的新能源将来又要成为常规能源。例如核裂变，目前基本上已经成熟，在许多国家中已经把它作为常规能源。对于常规能源，目前正在研究新的利用技术，如磁流体发电就是利用

煤、石油、天然气作燃料，使气体加热成为高温等离子体，在通过强磁场时直接发电。磁流体-蒸汽动力联合循环电站的热效率可达 50~60%，而一般火电厂的效率为 30~40%，因而可大幅度地提高能源的利用率。

各种能源的转换和利用的情况如图 1-1 所示。上面一排表示各种能源。天然

气、石油、煤、有机物及由有机物产生的沼气、由太阳能和核能从水中产生的氢等，除一部分（虚线表示）作为原料使用外，绝大部分都在各种炉子和工业热装置中通过燃烧转化为热能。核能则通过反应堆转化

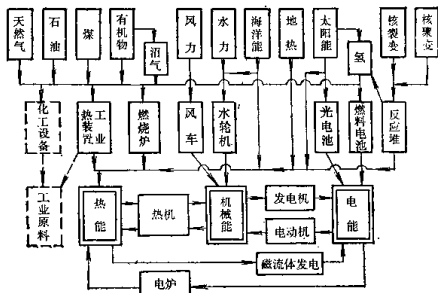


图 1-1 各种能源的转换和利用情况

为热能。此外还可从地热、太阳能直接得到热能。水力可以通过水轮机，风力可以通过风车而直接转变成机械能。使用光电池或燃料电池，可以直接从太阳能或各种燃料得到电能。但是由于经济上的考虑，实际上目前绝大多数电能都是通过发电机从机械能转化来的。电能比较容易通过电动机或电炉等再转化为机械能或热能，而且输送方便，所以是使用比较方便的形式。实际上，人们使用得最多的三种能量形式——热能、机械能和电能，都是可以通过一定的设备如热机等相互转化的。目前绝大多数能源都是首先经过热的形式，或者直接使用，或者通过热机转化为机械能和电能再使用。

由上述可见，自然界中蕴藏着丰富的能源。现在，我们已能利用多种能源，从最普通的草木燃料到电能、原子核能。人类是随着生产和科学技术的发展，逐步地扩大能源利用范围的。在历史发展过程中，人类首先使用火来供应所需要的能量，后来又增加了风力、水力等自然动力作为能量的来源。煤、石油、天然气的应用很早，但长期以来主要用于提供热能和照明方面，直到十八世纪，当蒸汽机发明后，人们才第一次把蕴藏在煤中的能量转变为动力（即机械能）。近代，电能得到了广泛的应用，本世纪四十年代以来，人们又开始利用原子核能。可以说，每一次能源利用范围的扩大，都伴随着生产技术的重大变革，甚至引起整个社会生产方式的革命。在能源利用史上，火的使用、蒸汽机的发明、电能和原子核能的应用对社会生产力的发展起了非常重大的推动作用，因而可以说是人类能源利用史上的四个重大发展阶段。人类利用能源的历史表明，随着科学技术和社会生产的发展，旧的能源不断地被新的能源所代替，因而能源的更替是一种不可避免的趋势。因此，我们在大力发展和利用常规能源的同时，必须充分注意探索和发展新的能源。

能源的种类很多，各有优缺点，从目前的技术水平来看，评价能源品质的技术指标主要有以下几个方面：

1. 能流密度。也就是在一定空间或面积内从某种能源实际所能得出的能量或功率。显然，如果能流密度很小，就很难作为主力能源。按照目前的技术水平，太阳能和风能的能流密度很小，大约每平方米100瓦左右；核能的能流密度则很大；各种常规能源的能流密度也比较大。

2. 开发费用和设备价格。太阳能、风力等，不花任何成本就能得到；各种化石燃料与核燃料，从勘测、开采，到加工、运输等都需要人力和物力的投资，而且有的工序对劳动者还有一定的危险性和损害人体健康。可是如果考虑到设备的价格，那么根据目前的技术水平，太阳能、风力、海洋能等发电设备的单价为每千瓦几千元到上万元，初投资太大，资金周转太慢；而烧天然气和石油的装置价格只有前者的几十分之一，初投资便宜。燃煤和水力的设备单价每千瓦为几百元到一千元，也比太阳能、风力等便宜得多。开采和利用的价格与能源的转化和利用的技术难度关系很大，后者还直接决定了各种能源的利用历史的先后。风力、水力、有机物等比较容易利用，几千年前就已开始利用，核聚变能则估计要到下一个世纪才能用上。

3. 存储可能性与供能连续性。即不用时可以存储起来，需用时能立即发出能量。这方面太阳能、风力等目前还不容易做到，而各种化石燃料和核燃料则比较容易实现。

4. 运输费用与损耗。太阳能、风力、地热等是难以运输的，而石油和天然气则很容易从产地输送到用户。运煤稍为困难一些。水力发电站如果远离用户，则远距离输电按目前技术水平损失也不小，而且还是一项投资较大的基建工程。

5. 对环境的污染。污染的主要来源是耗能设备,随着耗能量的增加,产生的污染程度也越来越严重。原子能的可能危险性大家都重视,应用时一定会采取各种安全措施,但是对烧煤的污染危害性目前还重视不够。水力也有其独特的“污染”,如对生态平衡、土地盐碱化、灌溉与航运等的影响,也需加以注意。太阳能、风能等则基本上是没有污染的能源。

6. 存储量。这是必要条件。我国煤炭、水力资源丰富,其它常规能源和新能源资源也不少,有些正在勘探中,前景很好。与储量有关的评价还应考虑其再生可能性和地理分布情况。太阳能、水力、风力、地热、有机物等是可再生能源,化石燃料与核燃料则不能再生。能源的地理分布对它的使用很有关系。例如我国煤炭资源偏西北,水力资源偏西南,都对它的使用有影响。

7. 能源品位。能够直接变成机械能和电能的能源(如水力),品位要比必须先经过热这个环节的能源(如化石燃料)高一些。在热机循环中,热源温度越高,冷源温度越低,则循环热效率就越高,即热量可以转化为机械功的部分越大。我们对能够得到较高热源温度的能源称为高品位能源,否则是低品位能源。在使用时应当安排好不同品位能源的合理应用,使其用得其所。

§ 1-3 新能源利用的展望

从钻木取火到煤炭、石油、电能、原子核能的利用,充分说明了人类利用能源技术水平在不断提高。人类学会使用火以后,蒸汽机的发明是一个重要的进展。随着蒸汽机和各种机器的大量应用,煤炭、石油、电能获得了广泛的利用,从此,世界能源消耗量愈来愈大,几乎依指数曲线的速度向上增长,如图 1-2 所示。近几十年来,每年的能耗增长率为 5%,即 10 年多增长一倍。预计到二十一世纪初,全世界能量消耗将比现在增长 2~3 倍,这使能源问题愈益成为重要问题。现在人们正在积极寻找各种方法,以扩大获得能量的途径。除了更有效地开发和利用已有的能源外,人们还在大力探索和发展各种新能源。图 1-3 表示历史上能源构成的变化及这种变化的趋势。图中 A 点年份表示公元 500 年,那时草木燃料的消耗占总能耗的 90% 以上;到 B 年份(公元 1965 年),煤、石油、天然气已经成为主要能源;到 C 年份(公元 3000 年),估计原子核能、太阳辐射能和各种新能源将被广泛利用。

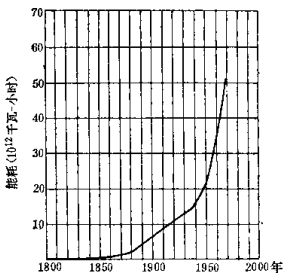


图1-2 世界能耗的增长

由上述可见,目前能源的主力仍然是煤、石油和天然气,原子核能的比重将迅速增长,其它各种新能源暂时还不可能占很大的比重。但是这些能源大多来源便宜,污染少,当一些关键性的科技问题有了突破以后,在下一世纪将成为实用的能源,并将逐步得到大量的应用。

核能是目前比较理想的一种能源。当前核电站已经达到技术上成熟、经济上有竞争能力、

工业上可以大规模推广的阶段。目前比较成熟的有三种堆型：轻水堆、天然铀石墨气冷堆和天然铀重水堆，今后的发展趋势是轻水堆、天然铀重水堆和快中子增殖堆。轻水堆用低浓缩铀作燃料，其结构紧凑、功率密度大、建设周期短，因而经济性能好，已成为核能发电的主要型式。天然铀重水堆的优点是可用廉价的天然铀作燃料，体积小，加燃料时不需要停堆，因此使用效率比轻水堆高，缺点是建造成本较高。快中子

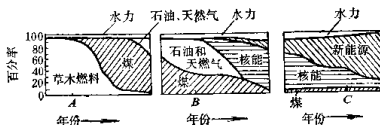


图1-3 历史上能源构成的变化及未来的趋势

增殖堆的燃料能使用铀-238和钍-232，对燃料能起增殖作用，分别生产出可裂变的钚-239和铀-233，因此快中子增殖堆是解决核燃料高度利用和开辟近期新能源的重要途径。未来的能源将主要依靠核聚变来解决。在受控核聚变获得成功以后，海洋中的氘将可为人类提供无穷无尽的能量。因此，受控核聚变的研究，是当代科学技术中一个极为重要的研究课题，目前已取得许多进展，预计到2000年将进入实际应用的阶段。

太阳能是一种取之不尽，用之不竭，又无污染的能源。据估计，地球表面一年从太阳获得的总能量约达60亿亿千瓦·小时，比全世界目前一年内利用各种能源产生的总能量还大一万多倍。但是，由于地面上的太阳能比较分散，即能量密度不高，同时受到气候、昼夜等自然条件的影响，到达量很不稳定，加上大规模的能量收集、转换和储存问题没有解决，因此，长期以来一直没有得到重视。近些年来，一些主要的资本主义国家由于面临能源危机和严重的环境污染问题，太阳能利用的研究又重新兴起。目前，太阳能的利用方式，一是利用太阳辐射能直接转换成热能（即光-热转换）；二是利用太阳辐射能直接转换成电能（即光-电转换）。光-热转换的基本原理是使太阳光聚集，用它来加热某种物体，获得热能。目前，应用得比较多的有平板型集热器和抛物面型反射聚光器，其应用十分广泛，可用于建筑物的采暖和空调、干燥、蒸馏、造冰、制取淡水、高温处理、产生动力和热发电等方面。太阳能电池是利用光电效应将太阳辐射能直接转换成电能的装置。目前常用的太阳能电池是硅电池，它的转换效率较高，一般可达13~20%，在宇宙空间，如卫星上，其转换效率高达35%。目前主要用于空间技术，地面使用成本太高，每瓦约需成本20美元。因此，许多国家都在加紧研究制造太阳能电池的新工艺和新材料，研究的目的是在10年左右的时间内把硅太阳能电池的成本降低到目前的1%以下。从能源利用的前景来看，光-电转换将是利用太阳辐射能较为切实的方式，它必将为人类大规模利用太阳辐射能开辟道路。此外，还可利用太阳辐射照射到水中的半导体上，半导体产生电流使水直接分解制氢，也很有前途。

除上述种种利用太阳能的方式外，人们还在设想建立大功率卫星太阳能电站，利用微波输能到地球上，可以更充分地利用太阳能。卫星太阳能电站在宇宙空间中按一定轨道运转，它在接收太阳能时不受地球大气层的阻挡，其效率要比地面上高得多。在卫星站内，太阳能通过光电电池转变成电能，用微波发生器把电能转变成微波，然后以集束形式把微波发射到地面接收站，地面站再把微波转换成电能。这样，由许多卫星组成的卫星站网将能为人类提供源源不断的电力。

总的说来，目前对太阳辐射能的直接利用尚处在初期阶段，在近期内，太阳辐射能只能作为一种辅助能源来使用。但是，从长远看，太阳辐射能是人类最基本的能源，当直接利用

太阳能的技术有了根本性的改进后，必将在人类的能源构成中占有重要的地位。

磁流体发电是一种直接发电方式，它利用高温导电流体高速通过磁场，在电磁感应的作用下将热能转换成电能。导电流体可以是高温的气体，也可以是液态金属。导电流体的高温（三千度），可以用煤、石油、天然气等矿物燃料燃烧时获得，也可由核燃料在核反应堆中获得。如果将磁流体发电与火电厂组合成磁流体-蒸汽动力联合循环发电，则效率可从火力发电的30~40%大幅度提高到50~60%；如果将磁流体发电与核反应堆组合，则可提高核能发电的效率。因此，许多国家对磁流体发电的研究非常重视，认为是有广阔前景的一种新型发电方式。磁流体发电尽管由于需要三千度的高温而有一定的技术难度，然而国外倾向于八十年代取得完全成功，预期在九十年代开始大规模应用。

氢能是一种新的二次能源，是一种比较理想的代替石油的燃料。它没有污染，使用方便，还可以直接利用现有的热机。氢的原料是水，资源上不受限制。氢的用途极为广泛，它既可作为火电站或燃料电池的燃料以生产电力，亦可作为机动车辆的动力燃料使用，氢可转化为诸如氨、乙炔、联氨、甲烷、甲醇以及其它碳氢化合物等化工产品或新型燃料，还可代替焦炭作为还原剂用于炼铁等。因此，氢是一种理想的二次能源。要使氢成为广泛使用的新能源，关键是要解决廉价的制氢技术及安全、方便的储存和输送方法。目前采用的制氢方法主要有水电解法和化学热解法两种，但尚未达到经济合用的地步。随着核能和太阳能利用的发展，估计到下一个世纪可以大量应用。

地热能理论储量很大，是一种很廉价的能源，可用于取暖、供热和发电。凡是有地热资源的工业化国家，现在都在积极进行地热蒸汽和地热水的开发利用。但是，由于地热蒸汽和地热水均是低品位能源，可利用的资源有限，开发数量不大，在能源消费中不会占很大的比重。

海洋能的理论储量也很大，目前处于小规模研究阶段，如果因地制宜地加以开发利用，则可提供大量能源。由于技术水平的限制，估计大规模应用将在下一世纪实现。

辽阔的自然界蕴藏着无穷无尽的能源，随着科学技术水平的提高，我国能源资源必将得到充分的合理开发和利用，将为我国实现四个现代化和提高人民生活水平提供可靠的物质基础。

第一章主要参考文献

- [1] 吴仲华，《从能源科学技术看解决能源危机的出路》，光明日报1980.9.1。
- [2] 严家其等，《能源》，科学出版社，1976。

第二章 核能发电

§ 2-1 概 述

一、核电站发展概况

核能是原子核发生反应而释放出来的巨大能量。原子核反应有裂变反应和聚变反应两种。裂变反应是较重原子核（如铀-235）分裂成较轻原子核的反应，聚变反应是较轻原子核（如氘）聚合成较重原子核的反应。大家知道，一公斤汽油燃烧时放出的能量约为 4×10^7 焦耳，一公斤煤燃烧时放出的能量约为 3×10^7 焦耳，而一公斤铀-235 裂变时放出的能量为 8.32×10^{10} 焦耳，即相当于 2000 吨汽油或 2800 吨煤。一公斤氘聚变时放出的能量达 3.5×10^{14} 焦耳，相当于 4 公斤铀。如果核聚变能实现的话，则一桶水中含有的聚变燃料就相当于 300 桶汽油。因此核能的利用将为人类提供无穷无尽的动力，是人类历史上一次重大的技术革命。

1938 年德国的哈恩和斯特拉斯曼首先发现了铀的核裂变现象，从而揭开了原子能技术发展的序幕。这一技术首先被用于军事目的，在第二次世界大战期间，在费米教授的领导下，美国于 1942 年建成第一座原子反应堆，1945 年制成第一颗原子弹。之后，苏联在 1954 年建成世界上第一座核电站，功率为 5000 千瓦，接着美国研制了轻水反应堆，英国和法国发展了气冷反应堆，加拿大发展了重水反应堆，并分别建成了实用的核电站。从五十年代后期起，核电站开始得到迅速的发展，到 1979 年底为止，已有 22 个国家和地区建成核电站反应堆共 228 座，总容量达一亿三千多万千瓦，其发电量占全世界总发电量的 8%，最大的反应堆电功率已达 130 万千瓦。目前正在建造和计划建造的核电站反应堆有 436 座，总容量四亿三千多万千瓦，核能发电的比例正在不断增加，预计到 1985 年将达到 16%，到本世纪末将达到 30% 以上，到时拥有核电站的国家将有 50 个以上。一些工业发达的国家，由于受能源危机的影响，已把发展核电站放在很重要的位置，核电的比例将增长得更加迅速。总之，从当前的技术水平来看，利用裂变能的核电站已经达到技术上成熟、经济上有竞争能力、工业上大规模推广的阶段，在这一段时间内将成为世界能源构成的重要组成部分。

核裂变反应堆是使核裂变链式反应被控制在适当速度下进行，从而取出热能的一种装置。作为核裂变链式反应媒介的中子，减速后成为热中子，用热中子轰击原子核容易引起核裂变，因此这种堆又称为热中子反应堆，简称热堆，现在广泛应用的核反应堆都是热中子反应堆。与此相反，使用未经减速的中子，即快中子的反应堆就叫做快中子反应堆，这种堆能增殖核燃料，故又称快中子增殖堆，简称快堆。

在热中子反应堆中使用的核燃料为铀-235 (^{235}U)，可是天然铀中铀-235 的含量仅占 0.7%，其余 99.3% 为铀-238，而铀-238 是非裂变元素，不能直接用作核燃料，因此仅仅使用热中子反应堆，则核燃料的资源很少，不能供应很长的时间。因此许多国家正在努力发展能增殖新燃料的增殖反应堆。在增殖堆中，可将一部分非裂变元素转变为可裂变元素，如利用铀-235 裂变中释放出的中子轰击铀-238 可以获得可裂变的元素钚-239 (^{239}Pu)，同样，可以

把大自然中大量存在的钍-232(^{232}Th) 转变为可裂变的元素铀-233。这样, 在这种反应堆中, 每消耗一定数量的原子核, 能产生更多的可裂变原子核, 也就是每消耗一定的核燃料, 可获得更多的核燃料, 此过程称为增殖, 因此这种反应堆称为增殖反应堆。由于快中子增殖堆的燃料能使用铀-238 和钍-232, 对燃料能起增殖的作用, 分别生产出可裂变的钚-239 和铀-233, 因此快中子增殖堆是解决核燃料高度利用和开辟近期新能源的有效途径, 现在美、苏、法、英、日、西德等国都在大力研究, 进展十分迅速。美国从 1947 年开始, 至今已建造了几座这种堆型的实验堆。在增殖堆方面, 法国处于领先地位, 25 万千瓦的示范性实验堆——“凤凰”快堆于 1974 年投入运行以来, 情况一直很好, 从 1977 年开始建造 120 万千瓦的“超级凤凰”商业性原型增殖堆, 预计 1983 年投入运行。苏联第一座快堆 BN-350(功率 35 万千瓦) 于 1973 年投入运行, 供发电及生产淡水之用, 功率 60 万千瓦的 BN-600 原型快堆已于 1980 年 4 月投入运行, 目前正在设计 160 万千瓦的快堆, 预计八十年代后期投入运行。英国于 1976 年建成 25 万千瓦原型增殖堆 (PFR), 目前正在设计 130 万千瓦商用示范性增殖堆。日本和西德也正在建设示范性增殖堆。从已建成的几个原型快堆的情况表明, 堆本身的性能是良好的, 从实验堆过渡到商用大型快堆的主要障碍是设备的构造而不是反应堆的原理。因此快中子增殖堆将是核电站的发展趋势, 预计到本世纪末, 快堆的容量将占整个核发电用堆的 18% 以上。

由于快中子增殖堆要达到实用阶段尚需一段时间, 日本正在发展一种新型转换堆 (ATR) 作为轻水堆与快中子增殖堆之间的过渡性堆型, 一座 16.5 万千瓦的原型堆“贤贤”已于 1979 年建成, 并已投入运行。

未来的能源将主要依靠核聚变来获得。将氢的同位素氘和氚加热到很高的温度, 使它们发生燃烧而聚合成较重的元素, 可释放出巨大的能量。氢弹的爆炸就是氘氚的热核聚变过程。太阳及其它恒星的巨大能量也来源于热核反应。如果能在地球上实现聚变能量的受控释放和利用, 人类就将最终地解决能源问题。因为作为热核燃料的氘可以直接从海水中提取, 一公斤水中大约含有 0.03 克氘, 地球上约有海水 10^{21} 公斤, 氘含量达 10^{17} 公斤, 能释放出能量 10^{31} 焦耳, 如按地球上能量消耗水平一年为 2×10^{20} 焦耳, 则可供人类几百亿年。因此受控核聚变的研究是当代科学技术的一个极为重要的研究课题, 各国科学工作者已进行了 20 多年的大力探索。目前这方面的研究已经出现一些成功的迹象, 估计到 2000 年将进入实际应用阶段。到目前为止, 聚变研究的各个途径都不同程度地取得进展, 各类装置的等离子体参数在不断更新, 托卡马克、磁镜、仿星器和箍缩装置以及激光聚变装置、电子束离子束聚变装置等, 现在都达到了较理想的结果。美国计划八十年代中期实现“点火”, 在本世纪末建成电功率为几十万千瓦的示范堆, 以验证聚变动力的经济性和能否作为此后商业用发电装置的基础。苏联、日本、西欧也相继提出在本世纪末或下世纪初建成示范堆的类似规划。

二、核电站一般工作原理

利用核能发电的电站称为核电站。核电站系统的示意图如图 2-1 所示, 核燃料在反应堆内进行核裂变的链式反应, 产生大量热量, 由冷却剂(水或气体)带出, 在蒸汽发生器中把热量传给水, 将水加热成蒸汽来转动汽轮发电机发电。冷却剂把热量传给水后, 再用泵把它打回反应堆里去吸热, 循环应用, 不断地把反应堆中释放的原子核能引导出来。核电站中的反应堆和蒸汽发生器相当于火电站中的锅炉, 所以有人把它叫做原子锅炉。核电站的其它设备与火电站基本相同。

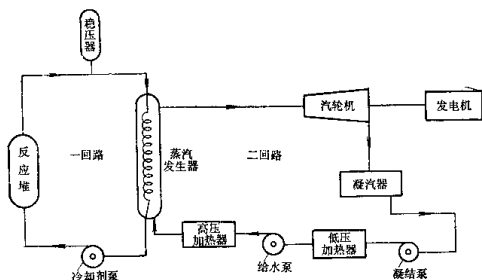


图2-1 核电站系统示意图

核电站反应堆按照反应堆中采用的中子慢化剂和冷却剂工质的不同可分成很多种类型，目前常用的可分为轻水反应堆、重水反应堆、石墨气冷堆和不用慢化剂的快中子增殖堆四大类，其详细分类如表2-1所示。

表2-1 核电站反应堆分类

堆 型		燃 料	慢 化 剂	冷 却 剂
轻水堆	压水堆	浓缩铀	轻水	轻水
	沸水堆	浓缩铀	轻水	轻水
重水堆	重水冷却型	天然铀	重水	重水
	轻水冷却型	天然铀、浓缩铀、钚	重水	轻水
石墨 气冷堆	天然铀气冷堆	天然铀	石墨	二氧化碳
	改进型气冷堆	浓缩铀	石墨	二氧化碳
	高温气冷堆	浓缩铀、钚	石墨	氦
快中子增殖堆		浓缩铀+钚	无	钠

1. 轻水堆

轻水堆包括压水堆和沸水堆是核电站目前所采用的最主要的堆型。在已运行的核电站中，轻水堆占78%，其中压水堆占49%，沸水堆占29%。在新建的核电站中，轻水堆占90%左右。轻水堆电站的突出优点是结构和运行比较简单，尺寸小，造价低，具有良好的安全性、可靠性与经济性，因而得到广泛的应用。压水堆示意图如图2-2所示。

压水堆是用含2~4%铀-235的低浓二氧化铀作燃料，烧结成芯块，装在圆管包壳中，最初的包壳材料是不锈钢，现在采用锆合金，两端密封构成细长状燃料元件棒，然后按15×15或17×17排列成正方形栅阵构成燃料组件，整个反应堆的堆芯由100~200个燃料组件和40~60个控制棒组件等组成，放在钢制的压力壳中，泡在高温高压水中构成核裂变反应的活性区——堆芯。高温高压水在堆芯中既作中子慢化剂，又作燃料棒的冷却剂，同时也是载热剂。水的压力保持在12~16兆帕的高压下，加热到300~330℃的高温，将热量带到蒸汽发生器内传给二回路的水，将水加热成蒸汽然后送到汽轮发电机组。由于一回路冷却剂温度的限制，