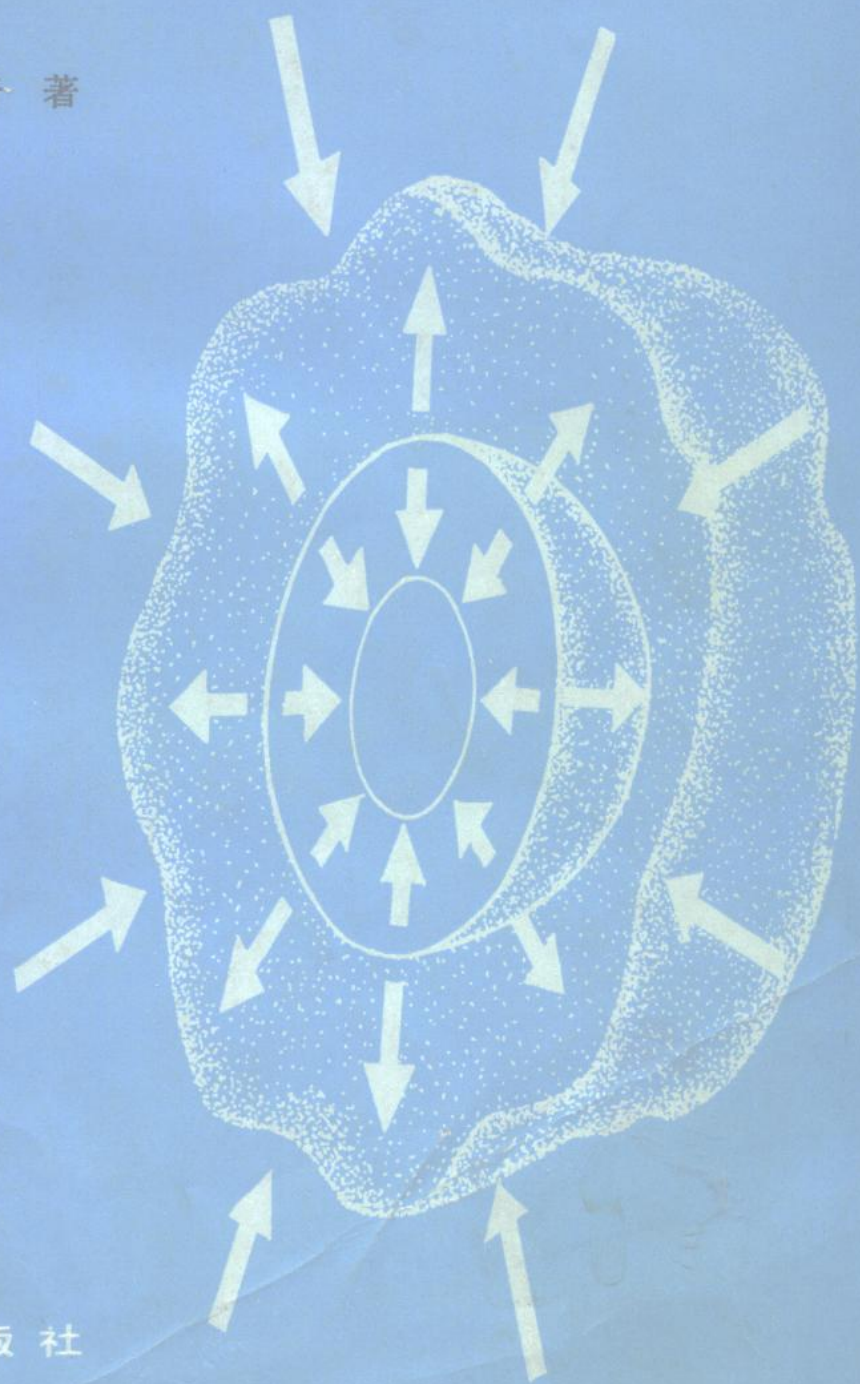


127

能量转换原理

[美] A. W. 卡尔普 著



机械工业出版社

能量转换原理

〔美〕A. W. 卡尔普 著

李增佐等 译



机械工业出版社

本书比较客观和全面地提供了能量转换的基本理论以及几乎全部能量转换装置，重点介绍了那些普遍采用的生产大量燃料能量的装置，对太阳能等新能源和装置，也作了简要的介绍，此外还编入了各类例题，对读者深入理解与掌握所叙述的内容，大有裨益。

本书在美国是一本适合于有关能量生产、转换和应用等工程学科的高年级大学生或低年级研究生学习的教材，其内容不但适合于我国高等院校的师生阅读，也可供有关工程技术人员参考。

2768/02

Principles of energy conversion

Archie W. Culp, Jr.

McGraw-Hill Book Company

1979

能量转换原理

[美]A. W. 卡尔普 著

李增佐等 译

责任编辑 袁 明

封面设计 田淑文

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

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22 · 字数537千字

1987年9月重庆第一版·1987年9月重庆第一次印刷

印数 0.001—2,564 · 定价：5.20 元

统一书号：15033·6487

译者的话

能源的利用和能量的转换是当今世界各国普遍重视的问题。我国目前较全面地介绍能量转换的理论及其装置的有关参考书尚不多见。

本书作者 A. W. Culp, Jr. (美国 Missouri-Rolla 大学 机械工程副教授) 以他最新的研究成果为基础, 编写了本书。它在美国是一本适合于有关能量生产、转换和应用等工程学科的高年级大学生或低年级研究生学习的教材。作者在序言中称“人们能找到几种在原子工程和反应装置方面的优秀教科书, 也可能找到在矿物燃料装置和直接能量转换方面的好书。可惜很少有书能较全面地包括能量转换的各个方面; 不但阐明理论而且叙述装置。本书试图填补这方面的空白”。

书中比较客观地提供了能量转换的基本理论以及几乎全部能量转换装置, 重点介绍了那些普遍采用的生产大量燃料能量的装置。对太阳能等新能源和装置, 也作了简要的介绍。此外还编入了各类例题, 对读者深入理解与掌握所叙述的内容, 大有裨益。

本书一般都采用了与我国法定计量单位相符合的国际单位制符号, 书中出现的少数与我国法定计量单位不相符的单位符号, 我们编写了换算表, 以便读者参考。

参加本书翻译工作的有: 李增佐 (译者的话、序言、第四章, 附录), 工力 (第一、六章), 穆纬丰 (第二章), 萧镜 (第三章), 李宜春 (第五章), 吴柏青 (第七章), 唐允祥 (第八、九章) 等同志; 由李增佐同志校订。

本书不但适合于大专院校师生阅读, 对有关工程技术人员也是一本很好的参考书, 所以我们把它翻译出版, 奉献给读者。由于我们水平有限, 缺点和错误在所难免, 敬希读者批评指正。

译者 1985年7月

序 言

能量转换的范围是一个广泛的领域，它包括的学科很多，所以它是一门难于讲授的课程。况且，在这个领域有那么多研究工作正在进行，使该领域不断地发生变化。该领域由于政府的决策和管理而更模糊不清^①。写一本能量转换方面的课本就象在一些有强烈争论的题目上写一篇客观的政治或宗教论文一样不容易。每一位“专家”在有关能量规划方面有一种他所得意的能源和（或）转换装置，他（或她）觉得应当被利用起来。

作者已力求比较客观地提供能量转换的基本理论以及几乎全部能量转换装置。对那些普遍采用的生产大量燃料能量的装置进行了比较详细地叙述。因为太阳能和某些外国的有发展前途的能量装置未广泛地包括在本书中（虽然包括了基本原理），无疑地将发生某些争论。作者并非认为太阳能或某些其他的装置是不重要的能源，仅仅是想在这个历史时期，太阳能和其他装置只生产我们燃料能量的很少一部份，要给那些大量生产我们燃料能量的装置以更多的注意和说明。这样一种作法能更好地使学生对在能量领域内可能从事的专业做好准备。

人们能找到几种在原子工程和反应装置方面的优秀教科书，也可找到在矿物燃料装置和直接能量转换方面的好书。可惜很少有书能较全面地包括能量转换的各个方面，不但阐明理论而且叙述装置。本书试图填补这方面的空白。

这里提供给机械工程课程方面关于能量转换的大部分材料，是作者近五年来的研究成果。这个课程是所有机械工程学生所需要的，它取代了在蒸气-动力装置方面开设的一种课程以及在旧机械工程课程表中的现代物理学课程。

本书适合于有关能量生产、转换和应用的各种工程学科的高年级大学生或低年级研究生使用。这些学科包括化学、电机、机械和核子工程等传统工程领域。这就要求学生在基础课传统的热力学方面，有比较好的基础。

因为本书提供的材料范围广阔，要在三学期的课程中讲完本书是困难的。如果是作为三学期的课程，教师必须对内容涉及的范围作一些选择；某些内容可能和其他基础课程的内容重复，要依靠学生的基础知识。如果这样的话，教师可酌情将某些内容很快地复习一下或全部省略掉。

第一和第二章应相当充分地介绍象该两章所提供的那些基本的基础知识和基本的转换原理。第三、七和八章分别论及热能、机械能和电能的生产，应放在其次的优先地位。第六章能使学生深入了解有关能量生产的环境污染问题，以及某些可能解决的办法。第四章对传统的矿物燃烧装置和它们的构件提供了较详细的叙述。第五章应适用于准备深入研究核反应堆设计和运行的某些细节的人们参考。第九章介绍一些在能量贮存装置方面的一般基础知识资料。

本书包括有若干例题，但许多例题能用量纲分析来简单地运算。强调学生写下有关每一个参数以及那些相应的换算因素的量纲。如同在运算习题时的数字能被约去一样，量纲也应能被约去。除了实际上没有量纲能被约去之外，这种方法已经在大多数例题中被采用。

^① 此处指一些国家的能源政策对能源利用的干扰，较难客观地分清对能源利用方面的正确或欠妥之处。——译者注

如果教师发现书中的任何错误（无疑地会有一些印刷上或理论上的错误），或教师感到某些地方应当介绍更详细一些，请他（或她）同作者联系。事实上作者愿意接受有关评论本书好、坏或很差的任何意见。

作者衷心感谢我的家庭和朋友们在准备本书稿时所给予的精神鼓励，也衷心感谢H. J. 索埃杰尔（Sauer, Jr.）博士帮助搜集一些技术资料。最后，作者感激哈里波顿（Halliburton）石油公司毫无保留地支持机械工程系为了专科的发展，允许作者在1977年夏天把全部时间投入了手稿的准备工作。

A. W. 卡尔普

目 录

译者的话

序 言

第一章 能量的分类、来源及其利用.....	1
1.1 引 言.....	1
1.2 质量和能量的关系.....	2
1.3 能量的类型及其分类.....	2
1.4 能量来源.....	4
1.5 能量利用.....	7
1.6 电力生产和消费.....	9
1.7 增长比率.....	10
1.8 能量储存.....	11
1.9 能量经济.....	13
1.10 能量和功率的单位.....	16
1.11 能量转换矩阵.....	20
参考文献.....	21
第二章 能量转换的主要燃料.....	22
2.1 引 言.....	22
2.2 矿物燃料.....	22
2.3 核 燃 料.....	35
2.4 太 阳 能.....	56
参考文献.....	64
第三章 热能的生产.....	66
3.1 引 言.....	66
3.2 机械能的转换.....	66
3.3 电能的转换.....	66
3.4 电磁能的转换.....	66
3.5 化学能的转换.....	67
3.6 核能的转换.....	79
参考文献.....	106
第四章 矿物燃料系统.....	108
4.1 引 言.....	108
4.2 流体运送装置.....	108
4.3 燃烧方法和设备.....	119
4.4 蒸气发生器.....	132
参考文献.....	150
第五章 核反应堆的设计和运行.....	151
5.1 引 言.....	151
5.2 动力反应堆系统.....	151

5.3	反应堆热工设计	163
5.4	反应堆运行	172
	参考文献	189
第六章	发电厂运行对环境的影响	190
6.1	引言	190
6.2	粒子散发物	190
6.3	气体污染	195
6.4	热污染	201
6.5	固体废物污染	203
	参考文献	206
第七章	机械能的生产	208
7.1	引言	208
7.2	热能的转换	208
7.3	涡轮机	242
7.4	电能-机械能的转换	252
	参考文献	260
第八章	电能的生产	261
8.1	引言	261
8.2	热能转换为电能	261
8.3	化学能转换为电能	275
8.4	电磁能转换为电能	281
8.5	核能转换为电能	286
8.6	机械能转换为电能	287
	参考文献	295
第九章	能量的贮存	297
9.1	引言	297
9.2	机械能的贮存	298
9.3	电能的贮存	302
9.4	化学能的贮存	303
9.5	核能的贮存	304
9.6	热能的贮存	305
	参考文献	307
附录A	物理常数	308
附录B	换算系数	308
附录C	美国煤的平均分析 (摘自美国矿业局公报)	312
附录D	近似分析到元素分析的换算	314
附录E	液体燃料	317
附录F	气体燃料分析	318
附录G	反应物的特性	319
附录H	按字母顺序的元素表	320
附录I	一部分同位素表	321
附录J	放射性同位素燃料	339

附录 K 太阳位置和照射值	340
附录 L 太阳辐射量随纬度的变化	343
本书采用的非法定计量单位与法定计量单位换算表	344

第一章 能量的分类、来源及其利用

1.1 引言

在人类历史上，文化的重大进步，总是伴随着能量消费的增加。今天，能量的消费显然直接与人民的生活水平和国家工业化的程度有关。凡是能量供应充足的国家，基本上都实现了工业的高度增长，同时整个国民生产总值也相应增长。在许多情况下，利用廉价能量会导致能量利用上的浪费，有时甚至会造成生态的严重破坏。可是，要想提高世界上大多数人民的生活水平，显然当今的能量消费还必须大大发展。图1.1所示是在不同的国家里，人均能量消费和以人均国民生产总值计算的人民生活水平之间的关系。

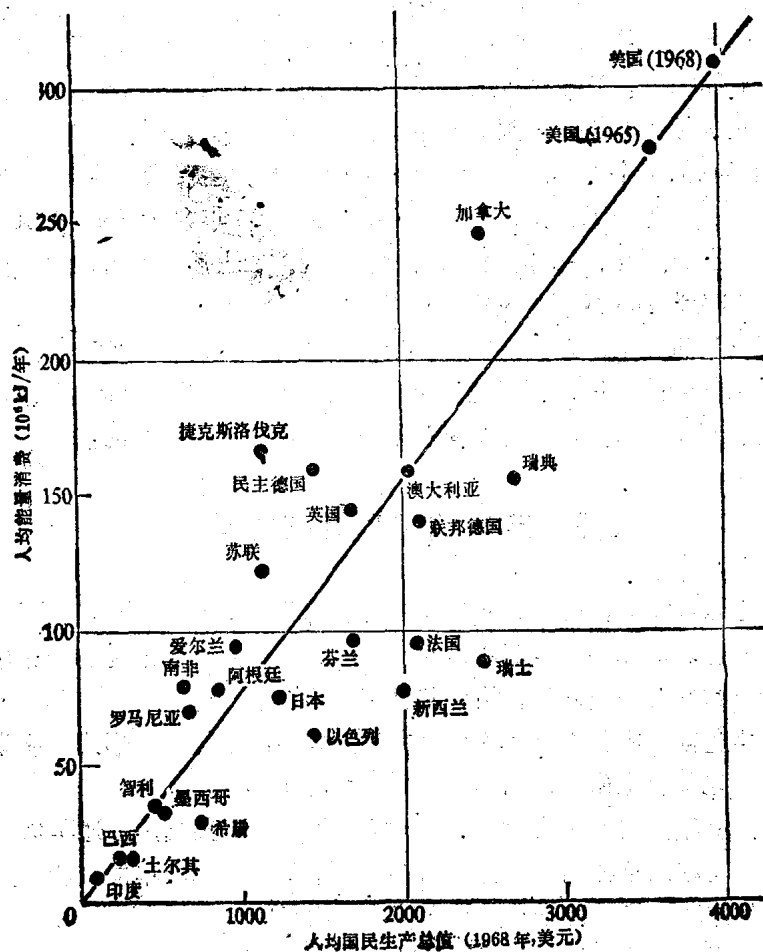


图1.1 1968年国民生产总值与能量消费的比例关系

最近，由于“能源危机”的出现，世界上能源依赖国的人民已经日益意识到转换，贮存和发展新能源的重要了。

科学家、动力工程师、技术人员的职责，是要找到、利用并开发这些新的能源。为了实

这一任务,必须使这些人具有关于各种能的形式、来源、能量转换技术和能量贮存方法以及它们的局限性和内在问题的精辟知识。

二十世纪的前半世纪,开发能源最基本的考虑是经济——廉价。今天,动力工程师就必须关心“3E”,即能量、经济性和生态学(energy、economy、ecology)了。因而,现代的工程师必须采取下述的开发方式,即:在对环境影响程度最小的情况下,经济地开采大量的能源。正确地权衡“3E”,乃是一个重大的技术课题。

1.2 质量和能量的关系

热力学第一定律早先的提法认为,实际上在任何过程中都存在着能量。有一条基本原理说,物质既不能被创造也不能被消灭。1922年,阿伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)曾经假设能量和质量之间的实际关系如下式所示:

$$E=mc^2 \quad (1.1)$$

式中 E 表示释放的能量,单位为焦耳(J), m 表示转变为能的实际的质量,单位为千克(kg), c 表示光速($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。这个公式实际说明的是一个可逆过程,但重要的是质量和能量的总和在任何能量的转换过程中,必须保持不变。

由公式(1.1)可知,一个很小的质量完全消失后,能够产生巨大的能量。一个600000kW[⊙]烧煤的火力发电厂,不停地工作,每小时耗煤约220t,每年耗煤约2000000t。一个600000kW_e的核电站,不停地工作,每年消耗大约1t燃料铀。在上述两种方法中,实际转变为能量的燃料质量,每年约为640g或不超过1.5lb。

在化学或核反应过程中,产生或释放能量时,质量一定会相应地减少。在本书中,论述实际能量或转变为能量的质量,没有什么区别。当提到化学能或核能时,实际是说整个反应物质量的一部分能够在某种类型的能量转换过程中,转变为另一形式的能。

1.3 能量的类型及其分类

能量的类型通常有两种:变迁中的能和贮存着的能。变迁中的能是动能,就是说它可以在装置之间传递。贮存着的能,不言而喻,也是能的一种形式,它象物质一样存在于力场中。这种贮存中的能常常很容易地就被转换为某种形式的动能。

对于能的分类目前没有什么公认的划分方法,本书准备把不同形式的能分为六大类。这六类是:机械能、电能、电磁能、化学能、原子核能和热能。

在热力学中,机械能被解释为一种能举起重量的能。在美国,普通单位制中机械能的单位叫做英尺·磅、功率的单位叫做马力。本书通常采用国际标准单位制(SI)。在这个单位制中,能的单位叫做焦耳(或瓦特秒),功率的单位叫瓦特。

机械能的传递形式叫做功。机械能既可以以势能的形式也可以以动能的形式被贮存。势能是一种由一个给定量的物质在力场中所占的位置而拥有的能。它包括重力势能、与被压缩流体相关联的能、与磁性物质在磁场中的位置相关联的能以及象在弹簧或扭力棒中那样的与弹

⊙ W_e表示电功率单位“瓦”。——校者注

性变形相关联的能。动能是由于一定质量的物质相对于另一物体而运动所产生的能。飞轮就是将机械能贮存于动能之中的一种装置的例子。机械能是一种很有用的能，并且能很容易而有效地被转换为其他形式的能。

电能是和电子的流动和积累有关的一种能。这种能通常是以功率与时间的单位来表示的，如瓦特小时、千瓦小时。电能的传递形式就是电流，它通常要通过某种导体来传递。电能既可以以静电场能也可以以感应电场能那样被贮存。静电场能是与由积聚在电容器板上的电子所产生的电场有关的能。感应电场能有时称做电磁场能，是一种与被穿过感应线圈的电流所产生的磁场有关的能。电能和机械能一样，是一种很有用的能，因为它能容易而有效地转换为其他形式的能。

电磁能是和电磁辐射相关联的能。辐射能通常用电子伏特(eV)或百万电子伏特(MeV)这种很小的能量单位来表示。这种能量单位也常用于原子核能量的计算。

电磁放射是一种和质量无关的单纯的能量形式。这种放射能仅以传递如光速(c)的变迁能量的形式存在。这种放射波的速度 c 相当于频率 ν (周每秒或赫兹) 与波长 λ (米) 的乘积。这些波的能量 E 与放射的频率 ν 成正比，其关系式如下：

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

式中 E 表示能量 (焦耳)， h 表示普朗克常数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$)， ν 表示频率， λ 表示波长。电磁波愈强其波长愈短、频率愈高。

这里有几种依放射波 (能) 或放射源而定的不同的电磁射线。 γ 射线是最强的电磁能，它们大多是从原子核放射出来的。其次一种较强的射线是 x 射线，由脱离轨道的电子产生。热辐射是一种由原子振动而产生的电磁能。这一类电磁能的频带很宽，它包括了高温 (或紫外) 线，窄频带的可见射线和低温 (或红外) 线。微波和毫米波射线是又一种次强的射线，用于雷达和微波炉。最弱的一种电磁射线是无线电波。电磁能的频谱如图1.2所示。

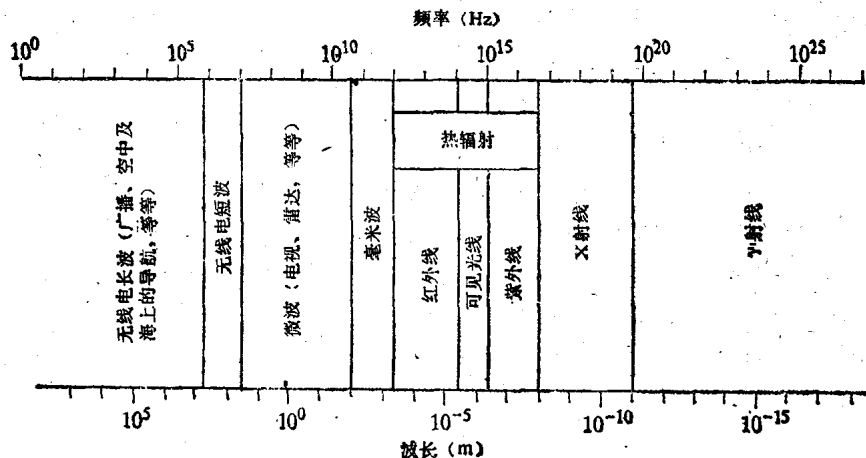


图1.2 电磁能频谱

化学能是由电子相互作用而释放的能，在这个过程中，两个或两个以上的原子和 (或) 分子相结合而产生一种更稳定的化合物。化学能仅以一种贮存能的形式存在。如果是从化学反应中释放能，就叫做放热反应。这种能通常以单位质量的燃料反应物所放出的卡路里或英制热量单位(Btu)的数量来表示。有的化学反应中要吸收能量，这类反应就叫吸热式反应。

对人类来说最重要的燃料能源是放热式化学反应，叫做燃烧。燃烧反应包括矿物燃料的氧化。

原子核能是仅以贮存能存在的又一种能的形式，它是粒子相互作用或原子核中的粒子相互作用而释放的能。这种能被设想为是在产生一种更稳定的粒子结构时所释放的。这种能的单位通常以每一个反应的百万电子伏特来表示。原子核反应通常有三种类型，即：放射性衰变、裂变和聚变。放射性衰变是相对于多数稳定的原子核来说，仅有一个不稳定的原子核或一种放射性同位素，偶然地衰变为更稳定的结构并释放出粒子和能量的过程。裂变反应，是原子核反应堆的主要反应过程，这是当一个重质量的原子核吸引了一个中子，然后激发那个与它（中子）结合在一起的原子核使它分裂为两个或两个以上的原子核，并释放出能量的过程。在聚变反应中，两个轻质量的原子核结合，产生更稳定的结构并释放出能量。

湮灭反应通常被列为一种原子核反应，但它确实是一种独立的、不需与原子核相联系的反应过程。这种反应是最终的能量转换反应，在这一反应中所有的反应物都转换为能量。在湮灭反应中物质和非物质相结合并转换为电磁能。这种反应是仅有的一种使原子微粒完全湮灭的反应，而在这类唯一已知的自然界发生的反应中，还包含了亚原子微粒这样一种不太重要的反应。

最后一类重要的能量就是热能，这种能和原子及分子的振动有关。热能是一种基本的能量形式，所有其他能量形式都能完全转换为热能形式，但是热能转换为其他形式的能要受到热力学第二定律的严格限制。热能的传递形式就是发热，它的单位通常以卡路里或英制热量单位来表示。热能能以任何方式贮存，既可以是显热也可以是潜热。显热贮存是一个伴随着温度不断升高的过程，而潜热贮存则是一个与相变相联系的等温过程。

1.4 能量来源

能的来源可归纳为两个普通的范畴——一种是来自天空的或吸入能量，这种能是从外部空间到达地球的；一种是基本的能量，这种能源存在于地面上或地球内部。吸入能量包括太阳能和月球能，而基本的能源则包括地热能源和原子能能源。

天空能源实际上包括所有可能从外部空间对地球提供的能源。即包括电磁力、地球引力、来自恒星和行星的粒子能，还有月球上的陨石进入地球大气层的势能。唯一有用的天空能源是来自地球上空的太阳的电磁能——叫做直接太阳能，和月球的引力，它能引起潮汐。天空能源的利用是十分诱人的，因为它们是取之不尽用之不竭的能源，同时也因为它们没有污染——而这正是人们甚为关心的问题。

直接太阳能也能产生一些间接的用之不尽的能源。太阳的热能随着地球的自转，在大气中产生一种很大的对流风，在海里产生洋流。太阳能的吸收作用也能在大洋中产生较大的具有潜在能量的温度坡度。此外，地面水的蒸发产生云，在高空凝聚成雨，还可提供水力和水电站能源。风所引起的巨大的海洋波，也具有产生能量的势能。

另一个重要的天空能源或吸入能量就是月球能，它主要是指月球的引力。月球的引力能基本上可以从潮汐流上显示出来；在帕塞马科底湾(Passamaquoddy Bay)其变化可从几英寸到25~30ft。帕塞马科底湾是芬地湾(Fundy Bay)的一部分，位于美国的缅因(Main)和加拿大的新布伦瑞克(New Brunswick)之间。

已经有几个利用潮汐能发电的计划，包括在帕塞马科底湾建一个800~14000MWe的潮汐电站。这个工程包括在潮汐水槽入口处建造一个水坝，让水头来回穿过几个装在水坝上的可逆水轮机。

有两个潮汐发电站已经建成：苏联在莫尔曼斯克(Murmansk)以北600mile的克斯拉亚犹巴(Kislaya Guba)建了一个2MWe的小型潮汐发电厂；法国在仑斯湾(Rance Estuary)外的弗仑斯(France)海峡群岛之滨建了一个240MWe的潮汐发电厂。它的24个水轮机组见图1.3。这个工厂也可作为一个抽水贮能工程。当动力需要在低峰时期，发电机组就逆转并将海水泵入海湾，然后在高峰时再放入海中。

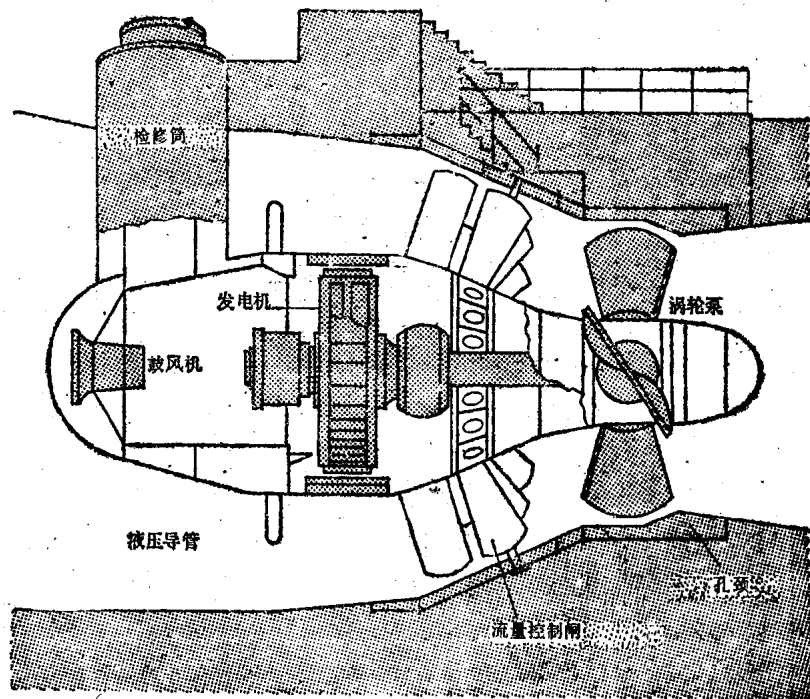


图1.3 仑斯潮汐电站的一组涡轮泵，这个电站有24个这样的10MWe的机组

全世界所有潮汐发电装置的总发电量估计约为64000MW，这是一个很大的能量，可是要和美国1970年356800MWe的发电量相比又算是小的了。虽然潮汐能的利用不能解决世界能源需要的问题，但是这种能源却是取之不尽的，并且也基本上是无污染的。

目前开发的主要的基本能源是原子能。这里所说的原子能是指任何一种原子反应所释放的能，包括化学能和原子能。原子能和化学能前面已作了一些阐述，有关这些能源形式的能量转换问题更详细的情况，将在以后的章节中论述。

最后一种主要的可利用的燃料能源是地热能源。这种能源实际上就是收集埋藏在地壳下面的热能。这种能以蒸气、热水和（或）岩浆形式出现，并以天然的火山喷气、间歇喷泉、温泉和火山喷发的形式释放出来。虽然在地壳下面埋藏有极大的热能资源，但尽管经过数次尝试，也未能将地壳打通将它全部开发出来。因此，唯一可利用的地热资源不过是从地壳下很小的一块地区找出的，象这样的小块地区一般都靠近活性断层带。

地热能源的利用已不是一项新技术了，第一个地热气井是1904年在意大利的拉德里罗(Larderello)钻出的，并已建立了一个容量为370MW的发电厂。太平洋天然气电力公司在

加利福尼亚的盖塞威尔(Geyserville)搞了一个400MWe的地热能综合利用。一种典型的地热动力装置如图1.4所示。

许多人倡议搞地热能，把它当作一种无污染的重要能源。然而，根据仔细的调查发现，地热能也许并不象倡议者所说的那样干净。由于存在浓厚的放射性气体和硫化氢(H_2S)之类的有毒气体，对地热装置来说，空气污染将是一个重要问题。因为与放出蒸气较少的装置相比，一个地热发电厂为了发出与传统的矿物燃料装置相同的一个给定单位的电量，通常要向大气中放出三倍于传统的矿物装置放出的热能。这就叫做“热污染”。地热能源的热水，

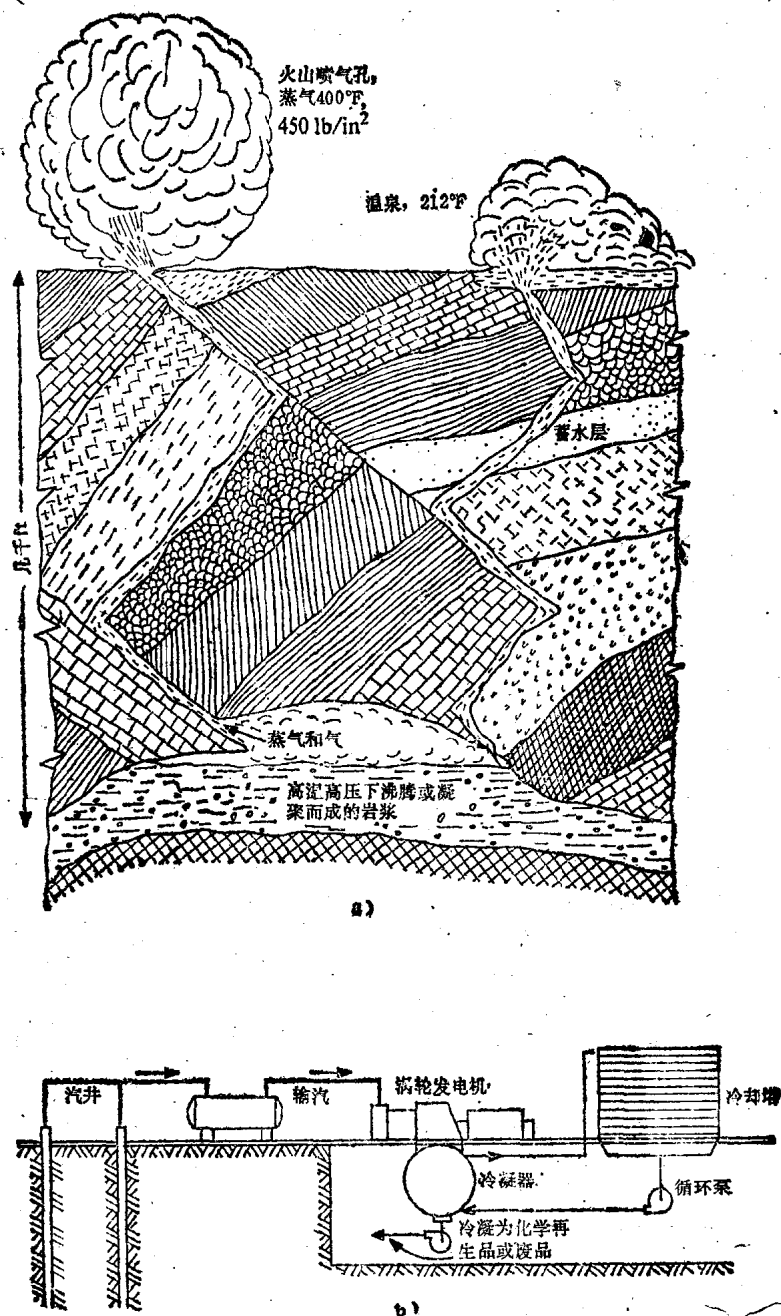


图1.4 典型的地热贮存和地热发电厂示意图

物质含量很高,使冷却水的处理成为问题。还有与地热能利用有关的一些严重问题,包括可能发生的陆地沉降,地震活动上升,特别是将水注入岩浆而重新获得热能时,上述现象更为严重。

地热发电厂的目前概况和对近期发展情况的预计,参见表1.1^①。虽然有大量的地热能埋藏在地壳下的地幔和地核熔岩中,但可回收利用的地热能是相当有限的。况且这些地区和矿物燃料一样,当能量被移去后一般也就枯竭了。据全面估计从世界上主要地热地区可回收利用的能量约为 3000000MW_{th} ^②·年。

表1.1 地热能利用情况

国 家	地 区	投入商业性 生产年份	目前总发电 量(MWe)	能 源 类 型
中 国	广 东 省	1958	—	—
冰 岛	纳曼吉尔(Namafjall)	1969	3.0	热 水
意 大 利	拉德里罗(Larderello)	1912	375.0	蒸 气
	蒙蒂阿曼塔(Monte Amiata)	1959	25.5	蒸 气
日 本	松川(Matsukawa)	1966	20.0	蒸 气
	大竹(Otake)	1967	13.0	蒸 气
墨 西 哥	塞罗皮埃图(Cerro Prieto)	1973	75.0	热 水
新 西 兰	维瑞克(Wairakei)	1960	170.0	蒸 气
苏 联	帕热斯克(Pauzhetsk)	1967	13.0	热 水
美 国	德吉塞斯(The Geysers)	1960	395.0	蒸 气

1.5 能 量 利 用

有史以来,随着新能源的发现和更优越的能量转换方法的发展,人类利用的能量是愈来愈广泛了。最早的能源就是体力——开始是人力,后来用畜力。人类开化的初期,人们学会从燃烧碳水化合物(草和木头)取得能量。公元前三千年左右,人们学会利用风力推动船只,到中世纪他们又利用风力来带动风车。水力的首先利用是在公元前后,但是,不到十八世纪,热能已被作为机械能的大规模能源被利用了。

回顾一下美国最近一百二十年左右燃料能量的主要来源或看看燃料能量的主要来源已经发生的变化,是很有意义的。在1850年,90%以上的燃料能量来自木料或木制品。六十年后,到1910年,燃料能量中煤的供应约达80%,而木料下降为10%。又过了六十年,到1970年,75%的燃料能量是来自燃烧石油和天然气,20%由煤供应。1970年期间,美国消耗能量将近 $73 \times 10^{18}\text{J}$ ($69 \times 10^{18}\text{Btu}$)。美国的能源及其利用情况如表1.2所示,最近五十年左右的能源及利用情况的数据示于图1.5。表示1970年间能源及其利用的流程见图1.6。

推测五十年以后的2030年时基本燃料能源的发展情况,也是很有意义的。那时是矿物燃料还是裂变反应堆、太阳能、聚变反应堆,还是别的其他能源是基本能源呢?谁能找到一些“能源专家”,他们也许会预言上述四种燃料中的任一种再加上别的能源将在2030年占支配地位。美国将来的能源及其消费的预测如图1.7所示。

① 表中无近期发展情况,原文有误。——校者注

② W_{th} 表示热功率单位“瓦”。——校者注

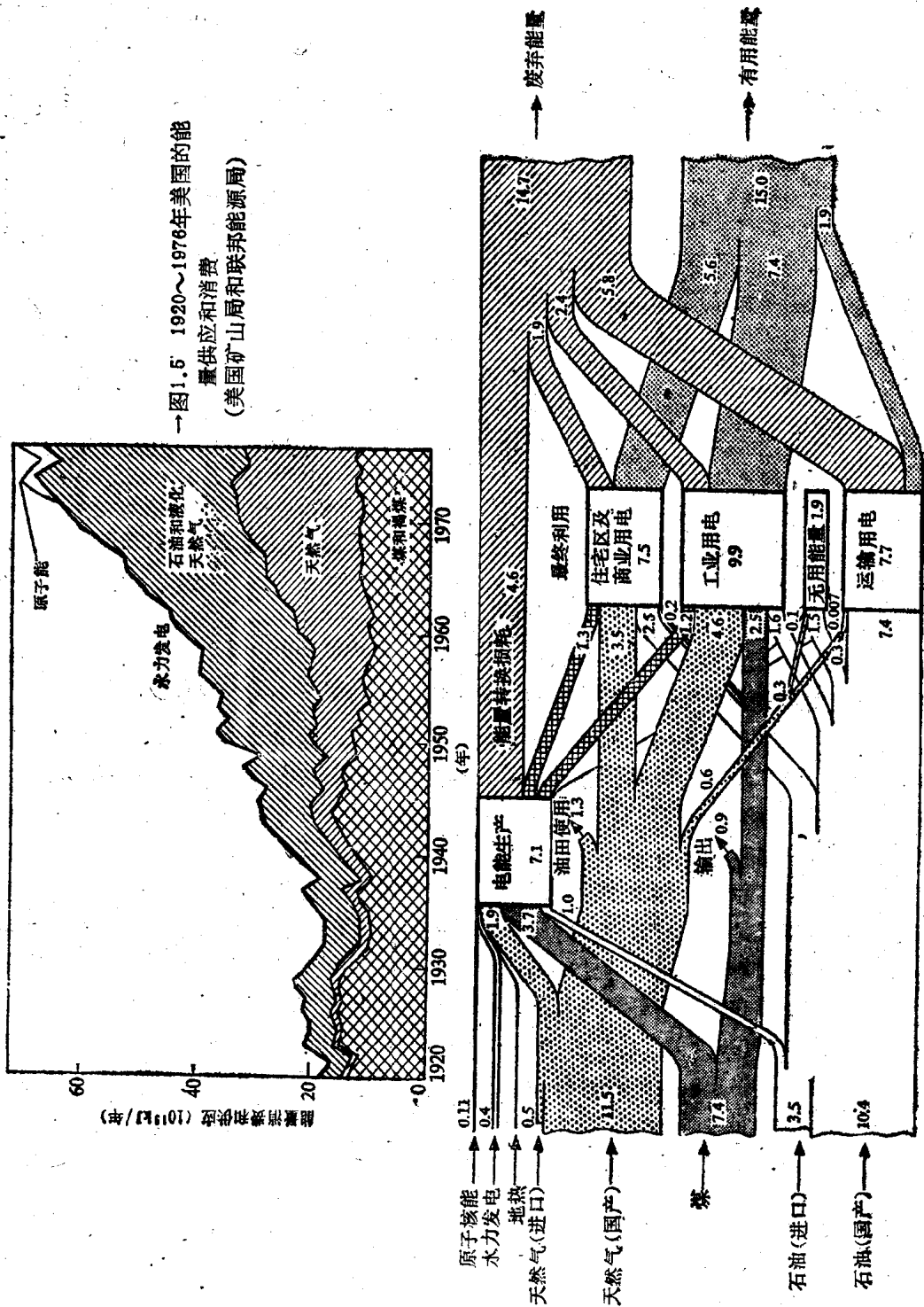


图1.6 1970年美国燃料能源的来源及其利用 (摘自1973年3月3日国会关于原子能问题讨论的会议文件)