

501
7/5034
下3

· 579735

电路、器件和系统

下 册

(美) 拉·杰·史密斯 著

大连工学院电工学教研室 译



人民教育出版社

34

电路、器件和系统

电工初级教程

下 册

[美] 拉·杰·史密斯著
大连工学院电工学教研室译

人 民 教 育 出 版 社

内 容 提 要

本书是一本电工入门教材,分电路、电子器件与机电器件三篇,译本分为上、中、下三册。上册第一篇主要讲述网络分析及信号响应,并介绍了系统概念;中册第二篇侧重于数字装置和运算放大器;下册第三篇则简要地叙述了电机并讲解了控制系统。全书比较注重基础理论的阐述,反映了一些电工领域的新成就,可供高等工业院校师生及科技人员参考之用。

电路、器件和系统

下 册

[美] 拉·杰·史密斯著

大连工学院电工学教研室译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 11.75 字数 123,000

1978年10月第1版 1979年9月第1次印刷

印数 000,001—35,000

书号 15012·0194 定价 1.00 元

下 册 目 录

第三篇 机-电 器 件

第二十章 能量转换现象	423
20-1 能源	423
20-2 电能的生产	425
第二十一章 磁场和磁路	433
21-1 磁场	433
21-2 磁路	438
第二十二章 变压器	449
22-1 交流励磁的磁路	449
22-2 变压器的运行	454
22-3 线性电路模型	457
22-4 变压器的性能	464
第二十三章 电机学原理	471
23-1 平移换能器	471
23-2 旋转换能器	476
23-3 动铁换能器	484
第二十四章 直流电机	497
24-1 直流发电机	497
24-2 直流电动机	503
第二十五章 交流电机	516
25-1 交流发电机	516
25-2 同步电动机	520
25-3 感应电动机的运行	525
25-4 感应电动机的性能	529
第二十六章 自动控制系统	540
26-1 控制系统的特性	541
26-2 机电器件的动态响应	543
26-3 反馈控制系统	549
第二十七章 仪表和测量系统	559
27-1 电指示仪表	559
27-2 电子指示仪表	564
27-3 仪用变换器	568
27-4 仪表测量系统	574
附录	580
习题选答	590
索引	596

第三篇 机-电 器 件

第二十章 能量转换现象

能源 电能的生产

从某种意义上来说,文明就是人类从物质世界的限制中努力获得自由的过程。我们在征服自然进而达到控制周围环境方面所取得的成就,是和我们控制少量能量和大量能量的能力直接有关的。例如,精密的控制装置已大大地扩大了我们的观感能力,使我们大到可以与任何辽阔的远方通信联系,而小到可以窥视一个原子核。在本书的第二篇中,我们主要讨论了用来控制和处理信息的电子装置,而把与之有关的能量问题的讨论放在次要的地位。

文明的进展也依赖于人类超出自身体力的限制而工作的能力。很早以前,人们学会了用牲畜来提供动力,后来成功地将风力及河川的动力进行转换以实现我们的目的。只是到近代,我们才学会了利用贮藏在燃料中的能量来发展机械动力,更近一些时期才发展了电力。第三篇主要讨论把其它形式的能量转换成电能和把电能转换成其它形式的能量的设备。由于现实的原因,重点放在利用磁场来实现电能-机械能转换的设备上。但是,我们先一般性地了解一下能源、能量转换的方法以及将来很有希望的某些值得注意的新设备。

20-1 能 源

能量的供应

人口的剧增、革新的愿望以及石油问题的政治化增强了对能量转换方法的兴趣。目前,我们所用能量的大约94%是来自地下燃料(煤18%,天然气32%,石油44%),剩下的是来自水力(4%)和原子能(2%)发电站。世界的地下燃料资源的估计出入很大,但是按照我们目前的消耗率来看,它的供应似乎可以持续一千年左右。令人宽慰的是,除非我们考虑人口和生活标准发生的变化,资源枯竭的时间好象还远。

现在的世界人口约为30亿,而且每30年增加一倍。在美国,每人所用的能量已是20年前的两倍。但是,如果世界上的人都享有我们认为是理所当然的生活标准,那么能量消耗必须增加很多倍。如果考虑人口增加的空前的需要,那么地下燃料供应的完结仅在几十年后就会出现。我们必须找到新的能源和更好的转换方法,同这些新发展有关的疑难问题的解决,将要求很多工程师们共同努力。

能源

当前和今后的重要能源包括太阳辐射、化学反应和原子核反应。利用地热能也是一种很有

意义的想法。

太阳能源 每天以直接辐射的形式从太阳送给地球的能量，相当于目前我们好几年的消耗量。夏天的辐射强度每平方米约为 1 千瓦，如果能有高效率的转换方法，那么地球表面的很小一部分就足以供给我们目前所需要的能量。直接辐射的某些应用已在远距离动力装置上和空间实验室中实现，并且已计划发展大型的利用太阳能发电的卫星，但是就目前来说，太阳辐射的间接作用更为重要。

辐射能中有些会引起海水蒸发，而后又通过下雨返回地面。山上的水力发电站就是这样间接地从太阳获得能量的。辐射能的另一部分能促使植物和动物的生长，这些植物和动物是人类作为燃料消耗来维持体力所需要的。地下燃料是几百万年对有生命的有机体辐射累积作用的结果，煤和石油就是由此转换而来的。有趣的是，今后还有可能利用太阳能生长出能高效率地产生葡萄糖的农作物，而葡萄糖能转变成酒精，一种多用途的燃料。

化学能源 化学的基本思想是把氢、碳和氧等元素化合成象甲烷、二氧化碳和水等化合物，这些化合物具有和组成它们的元素完全不同的性质。化学键本质上就是一种电现象。在离子键中，一个或多个电子从一个原子转移到另一个原子，由此产生的带电离子通过电的吸引力而聚合在一起。例如，普通的盐就含有被 Cl^- 离子包围的 Na^+ 离子。在共价键中，每个原子都献出其价电子去形成共用电子对，使得在带正电的原子核之间区域内负电荷的密度增加。例如在大多数碳的化合物中，碳形成四个共价键。

在化学反应过程中，不是吸收能量就是放出能量。在给蓄电池充电时，参加反应的化合物的重新排列需要输入能量，所输入的能量就等于所增加的化学能。汽油燃烧时，新的化合物占的化学能较少，而剩下的变成了可以利用的热能。当前世界上的动力很大一部分是靠燃烧地下燃料取得的，它的供应受到了很大的限制。

核能源 当氢或碳的分子燃烧时，释放出来的能量是几个电子伏特。对比之下，原子核裂变时，每个原子所释放出来的能量却有几百万电子伏特。按每单位质量释放出来的能量计，铀裂变“燃料”的效力接近于煤的三百万倍；按每单位价格所产生的能量计，铀燃料的效力大约是煤的 400 倍。贮藏在地壳内的可裂变物质中的总能量和地下燃料可能供应的能量几乎是相同的数量级。核发电厂的数目正在迅速地增加，而且可以断定，到 2000 年时世界上的动力接近一半将要靠原子核反应堆来产生。

重原子核在裂变过程中分裂时，原有质量的大约 0.1% 转换成了能量。两个重氢（氢的同位素）聚变而形成氦原子时，原有质量的大约 0.6% 转换成了能量。由于在所有氢中有很小一部分（0.015%）是以重氢的形式存在的，如果能引起并控制聚变反应，那么普通的海水就可以提供无限的能量。为了克服两个重氢之间的静电排斥力，需要相当于几百万度温度的能量。这样的热核反应可以利用原子弹爆炸（核裂变）引起，利用聚变释放出来的能量来维持，这样便得到能产生相当于数百万吨 TNT 能量的氢弹。如果要从聚变中获得有用的动力，就必须找到限制和控制热核反应的方法。一种有希望的办法是利用大功率的激光脉冲去加热微小的裂变燃料，使它开始聚变并在它能飞散之前产生能量。

地热能源 地球内部的热是一种潜在的能源。如果困难的环境和技术问题(噪声、空气污染、腐蚀)能够解决,那么由穿过断裂岩石的循环水产生出来的天然蒸汽或蒸汽就能为解决我们的能量资源问题作出重大的贡献。

能量和熵

在一般考虑能量转换时有两条基本原理,这两条原理最早是结合热力学来阐述的。热力学第一定律指出:能量可以从一种形式转换成另一种形式,但是能量既不能创造也不能消灭。在应用这一所谓的“能量转换律”时,物质作为能量的一种形态也是包括在内的。一种应用就是热平衡,详细的解释就是:系统的全部输入能量必定等于全部输出能量的总和加上储存能量的任何增加。我们在分析机电器件的性能时将要利用这种分析方法。

热力学第二定律指出:没有哪种实际的或理想的装置能够既连续地又完全地将热转换成功,总有一部分热能是不能利用的,而且必定会损失掉。例如,若只靠水的冷却而不产生其它影响,那就没有一种机器能够从海水提取热能并将它转换成功。这个所谓的“能量递降律”规定了什么样的能量转换才是可能的,而第一定律则决定了在这种可能的能量转换中的能量关系。能量的不可利用性是通过叫做熵的特性来衡量的,熵具有概率的某些特性。能量均匀分布时相当于熵很大。我们说,宇宙的能量是保持恒定的,而熵则趋向于最大值。工程师的主要工作之一就是控制那种不可避免的能量降级,以便在转换过程中能获得某些有益的成果。

能量的一个重要特征就是它的形态要么是有序的,要么是无序的。导体中的电流的能量或正在转动的飞轮的能量可以说是有序的。相反地,固体中的电子或原子的随机的热运动的动能可以说是无序的。象用电流加热或飞轮的摩擦制动生热那样,能量从有序的形态向无序的形态转换是可以在效率为100%的情况下实现的。象在发电机中那样,能量在有序形态之间的转换效率可以接近100%。但是象汽轮机(热能变机械能),从无序的形态向有序的形态转换的效率,因为要损失某些能量而受到限制。这种转换可能出现的最高效率是 $(T_1 - T_2)/T_1$,其中 T_1 是循环内的最高温度(K), T_2 是可利用的最低自然温度。这种关于热机的有限的效率概念,是在1824年由28岁的法国工程师卡诺提出来的。

20-2 电能的生产

电能之所以有用,一个理由就是它是非常有序的,从而能高效率地转换为其它形式的能量。另一方面,它不能很方便地储存起来,所以通常是在需要的时候才产生。在图20.1中列出了很多种能量转换的可能形式。

大部分的电能仍然是用爱迪生于1882年在他的第一个中心站所用过的方法产生的。燃烧地下燃料获得的热量将水变为蒸汽,蒸汽驱动机器运转,使导体经过磁场而产生电压和电流。原子能发电站与之不同之处,仅仅是这些热量是从核反应取得的。在水力发电站中,发电机由取代汽轮机的水轮机带动。磁场发电机的优点是磁导率高的材料容许有大的能量密度,从而能从一定体积的机器中得到很大的输出功率。热-机械-电发电系统的总效率比较低(由1920年小于20%增加到1974年典型的40%),由于廉价燃料丰富,所以过去是允许的。

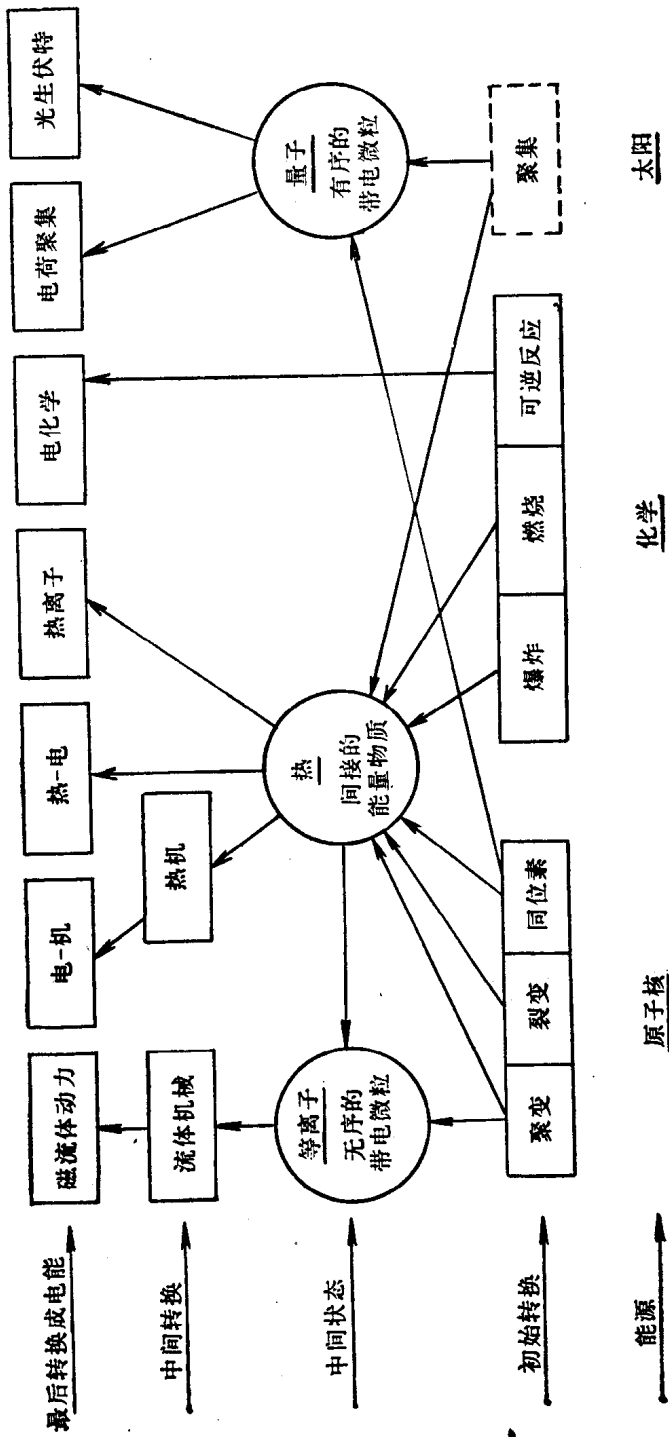


图 20.1 转换成电能能量(经通用电气公司同意转载)

由于化学能比热能更加有序,所以在利用化学反应的发电装置中,高效率的能量转换是有可能的。在伏打电池里,两个不同的电极被电解液隔开,导电是靠电解液中正离子和负离子的运动来实现的。在电极和电解液接触面上的化学反应为电流的连续流动提供了能量。象普通的干电池或汞极电池组那样的原电池,能量的转换是伴随着电池结构中的非可逆性变化而发生的,因此电池的寿命是有限的。象酸性的铅蓄电池那样的二次电池,化学反应是可逆的。在放电时,生成了硫酸铅和水。生成的水将硫酸电解液稀释;电解液的比重是充电状况的标志。蓄电池是从外部电源以相反的方向向电解液通入电流来进行充电的。它的化学反应过程是相反的,在负的和正的极板上分别生成铅和二氧化铅,于是蓄电池便恢复到原来的状态。

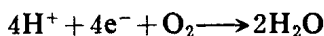
燃料电池

连续地将燃料中的化学能直接转换成电能的装置是非常引人注目的。免除了变为热能这一中间步骤,可以消除热—机械—电的转换装置的费用和复杂性,并且卡诺的效率限制可以去掉。燃料电池在空间运载工具上已被用来提供动力,而且今后是大有发展前途的。

用于双子星座宇宙飞船上的氢-氧燃料电池的工作原理在图 20.2 中加以说明。电池由两个容室和两个被电解液隔开的多孔电极组成。通入上面容室中的氢气经扩散穿过电极 A,在有催化剂的情况下,与电解液反应而形成正离子和自由电子。离子通过电解液而移动到电极 B 上。电子则通过外部负载电路后到达电极 B,它们在电极 B 上与氧和正离子化合而生成水。在电极 A 上的反应是



在电极 B 上的反应是



重要的一点是,在反应完成之前电子被驱使作有用的功。一个设计适当的电池,在燃烧反应中以热的形式表现出来的能量,大部分是以电能的形式加以利用的。

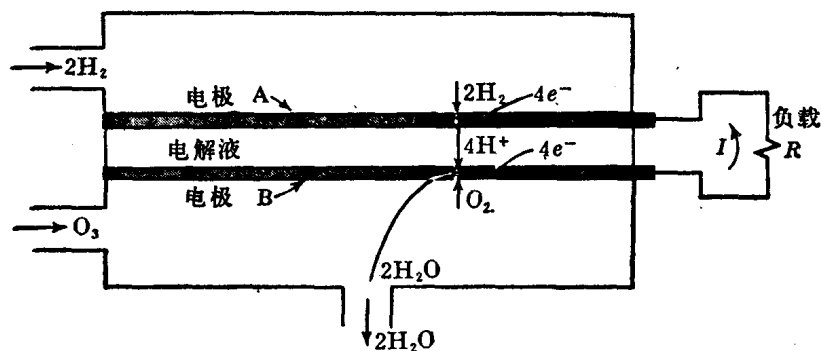


图 20.2 氢氧燃料电池的工作

“氢氧”燃料电池组能给出比相同重量的蓄电池大几倍的能量,随同每千瓦小时的电能而生成的以品脱计量的水是一种有用的副产品。有人指出,某种型式的燃料电池的效率在理论上可以超过 90%,效率超过 80%的在实验室中已经做出。用普通的碳氢燃料在空气中燃烧的燃料电池已经可以买到。以 80% 的效率工作的廉价的碳氢燃料电池组,能够使我们的地下燃料资源的

潜在能量加大一倍。对一部分负载具有较高的效率以及可以长时期地稳定运行是它的另一些优点。

太阳电池

当我们知道在太阳辐射中有巨大的能量可以利用时，我们就感到有可能得到将光能直接转换为电能的装置。半导体太阳电池能在满意的效率下工作，具有无限长的寿命，并且每单位重量具有较大的容量。它已经成为长期运转的卫星的一种重要能源，工作特性的不断改进还将使它成为其它应用领域的竞争者。

它的工作可以用我们对 pn 结二极管的知识加以说明。结(参看图 11.10 和 11.11)附近的多数载流子扩散的结果形成了位垒。在正向偏置(图 20.3a)的条件下，位垒稍微降低，具有足够能量爬上位垒“高地”的多数载流子的数量增多，于是有净正向电流通过。当结区域被具有足够能

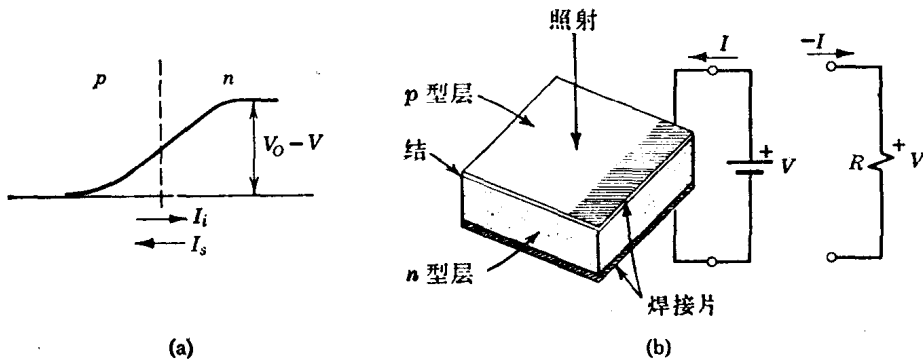


图 20.3 太阳电池的原理和构造

量的光子辐射时，就形成电子-空穴对，少数载流子密度大大地增加(因偏压只增加百分之几，多数载流子的增加是很少的)。实际上，全部少数载流子都通过漂移而穿过结，因而使二极管的电流多出了一个分量 I_p 。因为 I_p 与由热产生的载流子所形成的电流 I_s 的方向相同，因此式 11-21 变成

$$I = I_s e^{eV/kT} - I_s - I_p \quad (20-1)$$

当光强高和偏置电压低时，总电流

$$I = I_s (e^{eV/kT} - 1) - I_p \quad (20-2)$$

是负的，太阳电池就向偏压电池充电。于是这种 pn 结的二极管成了电源。换句话说，太阳电池可以向负载 R 供电，这时 $V = (-I)R$ 。

实际做成的太阳电池， pn 结暴露在光线能照射的地方。如图 20.3b 所示，由受主原子向大量掺杂的 n 型硅晶片扩散而形成非常薄的 p 型层。利用半透明的薄镍片(未画出)和复盖在底部和顶端一边的焊接片引出电极。因为单个电池的输出电流和电压都很小，所以通常以串联和并联的形式联接成太阳电池组。总效率是在 10% 到 15% 的范围内，卫星装置中的太阳电池组每一磅能提供 10 到 15 瓦的功率。这些有利的工作特性、主要成分硅的充足的供应以及部件容易大批生产等优点都增加了太阳电池在能量转换方向的应用。

热电转换器

燃料电池是以旧的概念为基础的。近来,由于基础科学的进步,终于使它成为效率较高的重要能源。太阳电池是近代的一种新发展,它是以对半导体现象的新的理解为基础的。热电转换器代表旧概念的新应用。1821年,斯贝克注意到,在不同金属的联接点上加热时,在闭合电路中能产生很小的电流。但是转换效率是如此之低,以致由它做成的热电偶仅能作测量之用。固态理论和技术的进步使效率进一步提高,并设计出了实际的能量转换器。

半导体转换器的工作原理和太阳电池相似,增加的能量在 pn 结附近产生了电子-空穴对,结的单向导电性引起电荷的分离,于是有可用来作功的电流流动。如图 20.4a 所示,热端用输入的热能将温度维持在 T_1 。在结附近产生的空穴,越过结而漂移到 p 区,电子则漂移到 n 区。在冷端很少有这种现象,因此便有由 n 型材料中的电子和 p 型材料中的空穴组成的电流在流动。

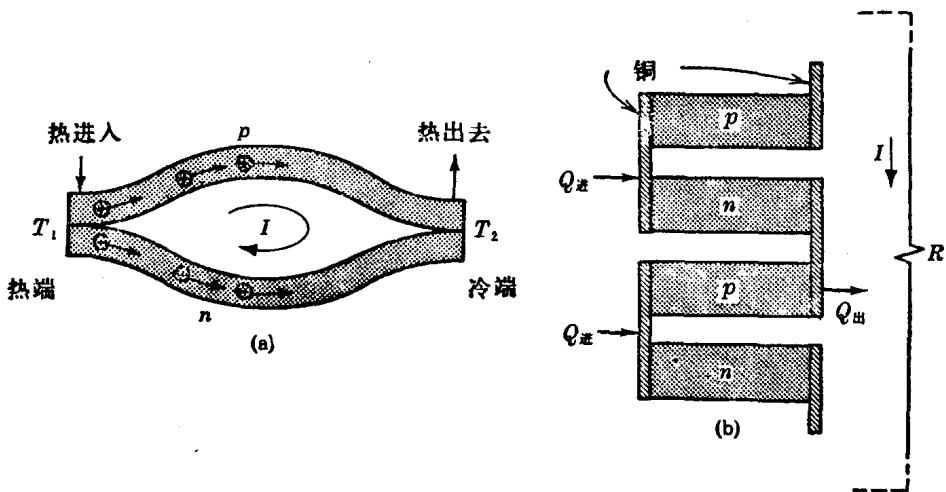


图 20.4 半导体热电转换器

请注意,如果少数载流子通过漂移而越过 pn 结,它们就必将获得能量,这种能量是由热源提供的。假如少数载流子以图 20.4a 所示的方向被强制通过结 1,那么结 1 就要冷却下来。这就是珀耳帖效应,而 pn 结是起加热器的作用还是起冷却器的作用,则是由电流的方向决定的。在这种情况下,电能是用来提供热泵作用的。

图 20.4b 表示转换器更实用的装备方式。因为好的热电材料一般不是好的传热体,所以有效连接元件要短,而且采用象铜那样对导热和导电都很好的导体将热输送进去。这对总的热电效应没有影响。由于输出仅仅是每 $^{\circ}\text{K}$ 为 100 微伏左右,所以要将很多结串联起来;按照热的流向来看,这些元件又是并联的。

热电转换器的一个很大的优点是各种形式的热能都可以利用。但是,由于输入能量是无序的,所以这种装置的效率只能接近于卡诺的理想值 $(T_1 - T_2) / T_1$ 。材料的改进已经使得转换效率可以高达 13%,但是实际的设备还是在相当低的效率下工作。苏联的工程师为了轻便而牺牲效率,曾研制出了一种烧煤油的设备,用它向边远地区的无线电接收机提供必要的数瓦特的功率。

热离子转换器

正象从半导体二极管引出近代的热电转换器一样，真空二极管是另一种能将热能直接转换为电能的新装置的基础。在热离子转换器中，阴极(发射极)加热后发射电子，这些电子具有比足以克服阴极的逸出功更多的能量。电子逸出后具有足够的能量逆着包括负载两端输出电压在内的电位差方向运动到阳极(集电极)。在实际的转换器中，空间电荷的阻碍作用必须保持很小，而且为了防止阳极发射，阳极的温度必须保持很低。

将阴极-阳极之间的间隔做得很小，能够减小空间电荷的作用，不过这在大设备中是难以实现的。另一种可能性，就是用运动缓慢的正离子去复合负的空间电荷。如果用铯蒸汽充满空间，可以大大地减少空间电荷，还能够改善阴极和阳极表面的有效逸出功。在图 20.5a^①中，用图来表示充气热离子转换器的工作。加到阴极上的热产生大量的电子，这些电子所具有的能量与图 20.5b 中的点 1 的电位对应。发射极表面附近的负空间电荷多，使逸出能量的相当一部分损失掉了。更小得多的电位降落(从 V_2 到 V_3) 在阴极-阳极间复合空间的平衡区域里出现。阴极附近的自由电子因进入阳极格栅结构而减小了相当于 $V_3 - V_4$ 的能量。能用来对外部负载作功的那一部分有用的能量相当于电位 V_4 。

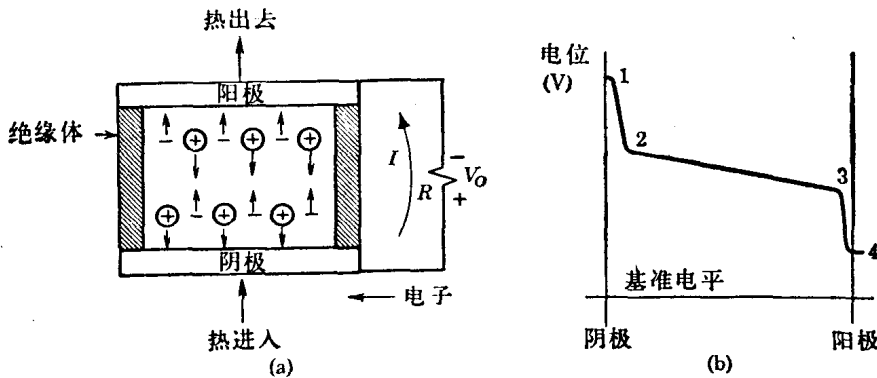


图 20.5 充气热离子转换器

热离子转换器是一种高温、低电压、大电流的设备。阴极在大约 2000K 的温度下高效率地工作，这可以和来自太阳炉或原子反应堆的能量所供给的温度相比。效率虽受热力学第二定律的限制，但是有希望在不久能达到接近 20%。由于这种设备轻便而又坚固，所以它有希望成为小型和轻便型的发电站。另一个有前途的应用是作为核动力站的第一级。阳极上废弃的热能够被一般的汽轮机所利用，从而提高动力站的总效率。

磁流体动力转换器

要创造就需要认识已知事实之间的新关系。请考虑以下事实：在磁场中运动的导体能感应出电压；热能可以以高速气流的形式转换成动能；通过电离作用或者通过渗入电离蒸汽能够使气体导电。根据研究充气管的特性、冲击波的传播、当导弹重返回大气层时空气的电离等所得到的知识来看看上述事实，工程师们便设想出以磁流体动力学(MHD)^②这种新科学为基础的发电

① 参看 V. C. Wilson, "Thermionic Power Generation," *IEEE Spectrum*, May 1964, p. 75.

② MHD 是英文 magnetohydrodynamics 的缩写——译者注。

机。在今后的十年里,应用这种概念的装置将会推进太阳系外层空间射程的火箭的发展,或者在地面上产生巨大的电能。

虽然实用的磁流体动力发电机的设计对某些最好的工程师和科学家们来说也是复杂的,但是它的工作原理是简单的。如图 20.6 所示,电离的气体或等离子体以很高的速度离开喷嘴而进入横向的磁场。带电的微粒受力 $f = qu \times B$ 的作用,这个力驱使正离子向上运动,负离子和电子向下运动。如果提供导电的通路,电流就从上面的电极经过外部的负载流向下面的电极。正象汽轮机那样,电能是靠消耗从运动的气体中取得的机械能而获得的。这种能量转换过程是可逆的,如果供给的电能使得电流向反方向流动,那么等离子体的平均速度增加,这时装置是作为发动机而工作的。

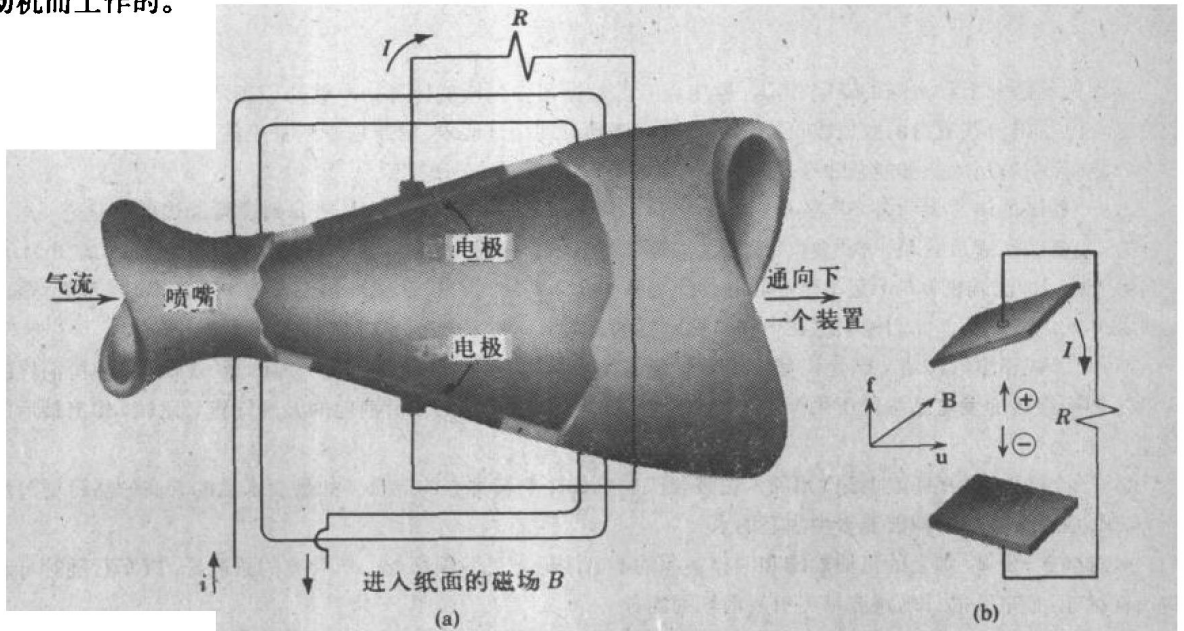


图 20.6 基本的磁流体动力发电机

磁流体动力发电机的工作特性为它可能的应用提供了指导。它在高温(约 3000 K)下能很好地工作,这表明在发电站中它可能总效率很高(55%以上)。它的输出随着体积的增大而迅速地增加,而损失却较慢地增大。磁流体动力发电机在大型设备中(数百兆瓦)将具有更强的竞争力。连续工作时,对通道和电极的材料方面的要求是很严格的,但是用固体喷气燃料的火箭发动机和简单的磁流体动力转换器,能在极短的爆发时间内提供很大的电功率。尽管在获得高电导率的等离子体、很高的燃烧速度和传热速率以及耐用的材料等方面还有未解决的问题,然而磁流体动力的产生看来是具有光明前途的。

提 要

- ◆ 未来文明的发展决定于人类提高使用现存能量资源的效率和发展新能源的能力。
- ◆ 我们知道,地下燃料的供应要满足将来因人口的增加和革新的愿望而提出的要求是不充足的。

◆ 化学反应、太阳辐射和核反应是不久以后和遥远未来的重要能源。

◆ 热力学第二定律指出了什么样的能量变换是可以实现的；第一定律制约了在可能进行的能量变换中的能量关系。

能量转换的效率决定于能量是有序的还是无序的(随机的)。

把热能转换为机械能的最大可能的效率是由卡诺关系给出的。

◆ 虽然大量的电能目前是由传统的热—机械—电的装置产生的,但是燃料电池、太阳电池以及热能的、热离子的和磁流体动力的转换器将是有前途的。后四种都和前面已学过的电子器件有密切的联系。

问 题

下面的问题和工程实际的课题相似,题中现有的数据用作精确的计算是不够的。必须作简化的假设;你们的教师可以指出一些适当的数值或可查阅的手册。必须说明全部假设,清楚地表明推论的思路。

1. 将现在所用的全部能量和今后二十年里将要利用的能量作一比较。
2. 一磅煤的热量大约是 10^7 焦耳。估算一下 100 瓦的灯泡每天点 6 小时,一年所需要的煤的数量。
3. 主要的家庭用具和一些“典型”的能量消耗量是:水加热器 15 千瓦小时/日,空气调节器 2 千瓦、电冰箱 4 千瓦小时/日,洗碗机 0.6 千瓦小时/周期,炉灶和烤炉 3 千瓦小时/日,洗衣机和干燥机 3 千瓦小时/周期,彩色电视 200 瓦。估算一下你们的家庭在一年里所消耗的能量。
4. 为了减小空气污染,已建议禁止使用瓦斯水加热器。试将一个家庭用的水加热器(效率 60%)所消耗的天然气和从很远的发电站中把所生产的电能输送到家里以加热同量的水所消耗的天然气的作一比较,作出最后的结论。
5. 一个 1000 兆瓦的发电站,用河水去吸收汽轮机的冷凝器排弃的能量。如果要水温的升高(“热污染”)小于 15°F ,估算一下每分钟需要多少加仑的水。
6. 比较一下 20 加仑的汽油贮罐和同样体积的蓄电池的下列各项指标:所具有的总能量;汽车行驶时可利用的机械能;按市区的行驶速度每英里所消耗的能量。
7. 在一个大的发电站中,汽轮机的输入蒸汽为 1000°F ,从湖泊引来的冷凝器冷却水是 50°F 。发电站的总效率是 40%。如果技术革新后容许用 1100°F 的蒸汽,试问可能达到的总效率是多少?
8. 如果在问题 7 中的汽轮机之前加一个阴极为 3000°F 、阳极为 2000°F 的热离子转换器,试问总效率将会有多大的改进?
9. 如果问题 7 中的汽轮机之前加一个进口温度 4000°F 、出口温度 2500°F 的磁流体发电机,而且直流转换为交流的效率为 95%,试问总效率将有多大的改进?
10. 在计划建造的发电站中,1000 兆瓦的核反应堆把 1400°C 的压缩氦气输送到排出气体为 1050°C 的磁流体发电机中去(等离子体电离系统和超导磁铁需要磁流体发电机输出功率的 2.5%,直流变换成交流的效率为 97.5%)。于是磁流体发电机排出的气体产生蒸汽以驱动汽轮机。汽轮机为压缩氦气提供 200 兆瓦,排弃了 500 兆瓦,剩下的去驱动效率为 98% 的交流发电机。估算一下这个磁流体-蒸汽发电站的输出和总效率。
11. 25 磅重的燃料电池连续工作时的容量为 200 瓦,6 磅重的插入式燃料盒在满载下可工作 15 小时。也可以利用容量为 40 瓦小时/磅的可以再充电的蓄电池。试比较向远处输送 200 瓦,工作 10 小时和工作 10 天的燃料电池和蓄电池的重量。
12. 假如你们城市的全部用电设备都利用太阳辐射能来供电,估算一下在城市总面积中被太阳电池遮盖的那一部分面积有多大。

第二十一章 磁场和磁路

磁场 磁路

正如第二十章中已指出的那样,能量转换有了某些令人鼓舞的新发展,但是在目前,实际上所有的电能都是由利用磁场的设备产生的。而且大部分的电能也是消耗在利用磁场将电能转换成机械能的设备上。在能量转换过程中,由于磁场起主要的耦合作用,因此将大多数的机电设备称为**电磁机械设备**更为合适。磁耦合的优点在于能用现有的普通磁性材料获得较高的能量密度。能量密度大可以使机器的每单位体积具有较大的容量。

我们已经在两种不同的情况下利用过磁场。我们曾经把衡量电路部件储存磁场能量的能力定义为电感(第一章),并且在分析呈现这种性质的电路时应用了由此所得到的 $v-i$ 特性。我们还根据磁场对运动电荷的作用力定义了磁通密度,并且在研究电子在均匀磁场中的运动时应用了这一概念(第十章)。在以下三章里,我们将要学习几种重要的能量转换装置的工作原理,以便学会分析它们的性能。为此我们必须先学会定量地分析磁场和用来建立磁场的磁路。

21-1 磁 场

电路的性能完全可以根据沿电路各不同点上的电压和电流来描述它。场的特点则大不相同,它分布在整个一个区域里,因而必须按照两维或三维量来定义它。什么是磁场呢?我们说,磁场就是具有某些非常有用的特性的空间区域。它实际上存在吗?从我们的观点来看,就它能很方便地描述和分析设备的性能这一点来说它是存在的。

磁通和磁通密度

磁场是由运动电荷引起的,而磁场的强弱则是由作用于运动电荷上的力来度量的。在矢量表示法中,定义式(式 1-6)是

$$f = qu \times B \quad (21-1)$$

当 1 库仑的电荷 q 垂直于磁场以每秒 1 米的速度 u 运动而受到 1 牛顿的作用力 f 时,就“存在” 1 特斯拉^① 的磁通密度 B 。如果 u 和 B 成 θ 角(见图 10.3),那么 f 的方向垂直于包括 u 和 B 在内的平面,而 f 的大小则是 $quB \sin \theta$ 。

由磁通密度对面积(图 21.1a)积分而求得的总和,是以韦伯为单位的磁通 ϕ ,用下式定义:

$$\phi = \int B \cdot dA \quad (21-2)$$

在描述磁场时,我们用**磁力线**或一些适当的线来表示磁通。在磁场的任一点上,磁力线都画

① 为了把 MKS 单位制换成 CGS 单位制,参看附录。

成与磁通密度矢量相切(图 21.1b)。磁通密度大的地方磁力线就密。磁力线的一个重要特点是：穿出任何闭合面的磁通总量正好等于穿入的总量，换句话说，磁力线是连续的。这一事实在数学上可以用下式表示：

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (21-3)$$

在这里，符号 \oint 表示对闭合面的积分。在图 21.1c 中，磁力线经磁铁内部闭合。

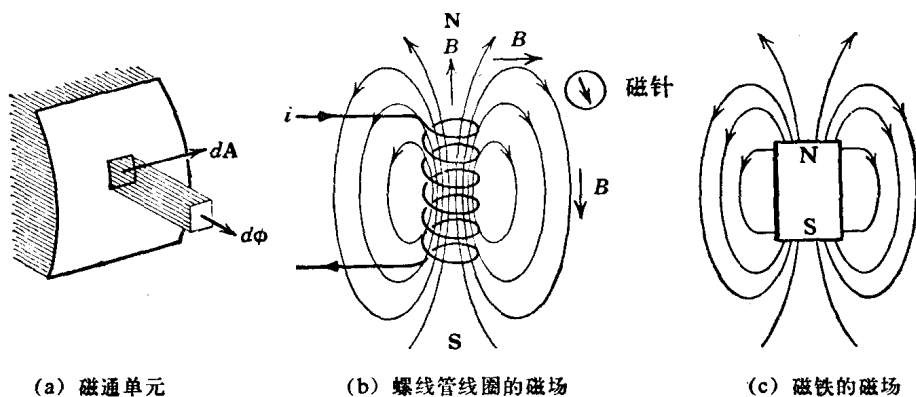


图 21.1 磁场的二维表示法

电流产生的磁场

在建立磁场时，我们关心的是如何安排电荷的运动以达到最大的效果。在很多场合下，把铜线绕成密集的线圈是一种有效的办法。为了确定在各种不同形状导体中运动的电荷的磁效应，我们首先考虑在导体的很短的单元 ds (图 21.2) 中流动的电流 i 的效果。如果这个单元中的全部电荷 dq 在时间 dt 内移动距离 ds ，则速度 u 为 ds/dt ，或者 $ds = udt$ 。于是

$$ids = \frac{dq}{dt}(udt) = dqu \quad (21-4)$$

可见，单元 ds 中的电流 i 和具有速度 u 的电荷 dq 是相当的。

实验(首先是由有才能的法国物理学家安培于 1820 年完成的)表明，单元 ds 中的电流 i 在均匀介质中 P 点上建立的磁通密度 dB ，与电流 i 和角度 α 的余弦成正比，而与距离 r 的平方成反比。在 MKS 单位制中，

$$dB = \mu \frac{id s \cos \alpha}{4\pi r^2} \quad (21-5)$$

式中的系数 μ 是表示导体周围介质性质的，称为磁导率，单位是韦伯/安培-米，相当于亨利/米。如图所示， dB 矢量的方向与圆心在 ds 的延长线上而且通过 P 点的圆周相切。判断 B 的方向的简便法则是：

如果用右手握住导体，用伸直的拇指指着电流 i 的方向，那么弯曲的手指所指的就是 B 的方向。

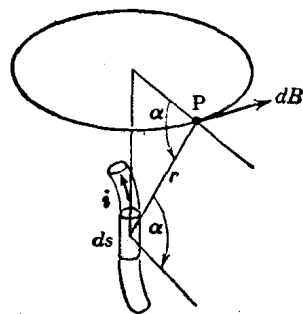


图 21.2 电流产生的磁场

磁场强度

自由空间的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米。任何物质的磁导率与自由空间的磁导率之比是一个无量纲的量,叫做**相对磁导率** μ_r 。大多数材料的相对磁导率接近于1。例如,空气和铜的磁导率实际上与自由空间的磁导率是相同的。铁磁材料(铁、钴、镍以及它们的合金)的相对磁导率可达几十万。换句话说,由绕在铁心上的线圈中的给定电流所产生的磁通密度,要比相同的电流和线圈在空气中产生的磁通密度大几千倍。

为了消除介质的影响,定义一个**磁场强度** H 就比较方便,即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (21-6)$$

H 的单位是安培/米。磁场强度是用来衡量运动电荷产生磁通密度的倾向的,所产生的 B 的实际数值则决定于介质的磁导率。

铁磁性

电子在轨道上旋转形成了电荷运动,因此在原子的能级上就引起了磁效应。在大多数材料的原子中,由于这些电子旋转的效果被其它电子的旋转所抵销,所以没有净剩的磁效应。但是在铁磁材料中,存在着不平衡的电子旋转,而且还有使自己与相邻的原子同方向排列的倾向,所以它们的磁效应是全部相加的^①。在未磁化的铁磁材料的样品中,有一些很小的**磁畴**,在这些磁畴里,所有的原子排列方向是相同的。各磁畴(大小约为一英寸的千分之一左右)都是一个强磁化区域。但是这些磁畴的方向是杂乱无章的(图 21.3a),样品对外显示不出有磁场存在。

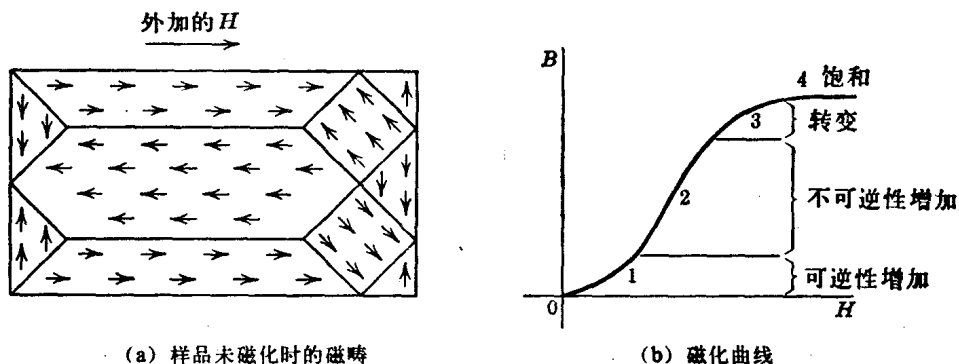


图 21.3 铁的样品的磁化

如果加上外磁场,这些微小的磁铁就具有排成与外加磁场方向一致的倾向,这就是**极化**作用,正象指南针会使自己的转向与地磁方向一致一样。在磁场强度 H 的数值很小时(图 21.3b 中的区段 1),磁化过程是弹性(可逆)的,在这一段过程里,排列方向与外磁场接近一致的磁畴因邻近的、排列方向与外磁场不一致的磁畴缩小而扩大,结果使得磁通密度 B 增加而超过了自由空间的数值。当 H 增加时(区段 2),磁化过程变为不可逆的,这时方向不一致的磁畴的磁化方向发生了变向,使得 B 迅速增加。在 H 较大时(区段 3),磁化方向都转变,直到所有磁畴都与外磁场的方

^① 参看 J.M. Ham and G.R. Slemon, *Scientific Basis of Electrical Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1961.