

原子能知识丛书



能的直接转换



原子能知识丛书

能的直接转换

〔美〕W.R. 科利斯 著
江 月 译

原子能出版社

能直接转换

〔美〕W.R.科利斯 著

江月 译

原子能出版社出版

（北京2103信箱）

张家口地区印刷厂印刷

（张家口市建国大街4号）

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/8}$ ·印张 $14^{1/4}$ ·字数25千字

1980年11月第一版·1980年11月第一次印刷

印数001—3100·统一书号：15175·258

定价：0.18元

出 版 说 明

一提到原子能，就要和不可捉摸的放射性联系在一起，一些人往往望而生畏，敬而远之，这说明原子科学领域对于许多人来说还是陌生的。其实原子能既不可怕，也不神秘，它在我们的生活中正在起着愈来愈大的作用。

为了介绍原子能的基本知识和应用情况，我们有选择地翻译出版美国当代原子能学者和专家编写的原子能知识丛书 (Understanding the Atom Series)。这套丛书取材广泛，内容丰富，语言生动，深入浅出，具有中等文化水平的读者，花一些气力，读懂它是不成问题的。

在科学技术急速发展的今天，书中引用的有些材料稍嫌过时，但是这些材料对于理解基本概念还是有价值的。

目 录

绪言	1
直接转换与动力转换的比较	2
能的转换所遵循的定律	7
热电效应	12
热离子转换	16
磁流体转换	20
化学电池	23
燃料电池——连续补充燃料的电池	25
太阳电池	28
核电池	30
先进的转换概念	32
习题解答	35

绪 言

手电筒中的电池没有可动的机械零件，它把本身包含的化学能直接转换成电能，供给我们使用。

早期的直接换能装置，如1795年出现的伏打电池，为安培、奥斯特和法拉第这些科学家提供了第一批实验室用的电源。他们研究了电能以及电与磁的密切关系。利用这些知识，人们造出了强大的涡轮电能转换装置——汽轮机和水轮机，为现代文明奠定了基础。

伏打电池经过人们一系列改进之后，已经成为一种非常可靠、体积通常很小、携带方便的电源。只是到最近，核动力和空间探索的迅速发展提出了新的要求，才促使我们去寻求新的直接换能方法。

在外层空间和地球上的偏远地区，例如南极、北极等地，我们需要特别可靠、重量很轻并且长期运行无需人照管的电源来供应电力。利用直接换能技术的核动力装置，使我们为外层空间和偏远地区提供这种性能卓越的电源的愿望有了实现的可能性。除此之外，直接转换动力装置本身还有运行起来无声无息的优点，这对于多种军事用途来说具有重要的意义。

美国原子能委员会（现已改为美国能源部）、国防部和国家航空和宇宙航行局共同负责直接换能方面的研究发展工作，每年要花几千万美元。特别是原子能委员会，它支持工业界和洛斯阿拉莫斯科学研究所热电和热离子换能方面的

十几个科学研究计划，以及在阿贡国立研究所和布鲁克海文国立研究所的其他直接换能研究。多种利用直接换能方法的反应堆和放射性同位素电源，在美国原子能委员会的 SNAP（英文“核辅助动力系统”的缩写）计划项目下进行生产，其中有些装置目前已在有源人造卫星、南北极的气象站以及导航浮标上使用。

在其他方面的应用，目前正在研究之中。但是直接换能装置的成本太高，最近的将来还不能作为普通电源使用。直接换能技术将首先用于其独特优点带来的好处超过其高昂代价的场合。

直接转换与动力转换的比较

动力转换支配的时代

我们生活在一个运动着的世界里。在这个世界里，工程师的主要任务是寻找更好、更有效的途径，把潜藏于阳光或煤、铀原子核之类燃料中的能量转换为运动的能量。目前世界上几乎全部能量都是通过旋转机械或往复机械转换的。我们把汽油和空气混合气体的爆发能量，通过往复式的发动机——内燃机，传到汽车轮子上，带动汽车。水电站的水轮发电机把水落差蕴藏的能量转换为电能。这种旋转机械或往复机械就是所谓的“动力转换”装置。

新的设想——直接转换

能的转换方法正在经历着一场革命。大家知道，现在我们已经能使物质载带热和电的电子不经过转轴和活塞而直接做有用功。不经运动机械而转换能量，就是所谓的“直接转换”，它是现代科学技术的最新成就之一。

图1中涡轮发电机上面画出的热电元件，说明了直接转换与动力转换之间的不同。热电元件把热直接转换成电能，没有任何在涡轮发电机上看到的中间机械。

直接转换有什么好处？

在有些场合下，要求换能设备必须连续运行数年而无需维修；在另一些场合下，要求设备绝对可靠，如在科学卫星上，特别是在载人宇宙飞船上。就这些用途来说，看来直接转换设备比动力转换设备更为可靠。

不过应该认识到，我们相信直接转换的优越性，只是出于直观，而不是出于证据。确实，直接转换装置既不会发生活塞连杆脱落，也不会发生润滑剂流失事故，然而，由于太阳质子的轰击使太阳能电池性能恶化而引起卫星电源失效的事例，仍时有发生。在后面将要介绍的其他类型的一些直接转换装置，也会因至今不明的原因而失效。尽管如此，从现代知识来看，我们仍然可以期望直接转换将比动力转换更为稳妥可靠。直接转换装置正被采用作为小型电源，功率不大于500瓦，设计可在外层空间和海洋深处长期运行。总有一天，大型中心电站可利用直接转换来改善它的效率和可靠性。

能是怎样转换的？

什么是能？我们如何改变它？能是科学上的一个基本概

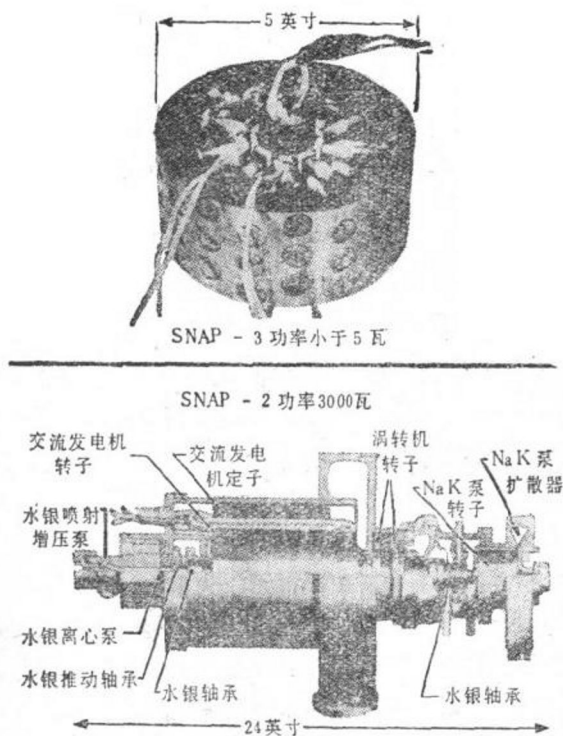


图 1 直接转换与动力转换的比较

上图为直接转换装置 SNAP-8 放射性同位素电源中的轮辐状碲化铅热电元件，可把热直接转换为电，其中没有运动零件。

下图为 SNAP-2 动力转换装置，其中包括高速涡轮、发电机和泵，也可由热产生电。（NaK 是钠和钾的液态混合物。）

念，它表示做功的本领。**动能**或**机械能**是最常见的一种能的形式，它的定义是

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

其中 E ——动能（以焦耳表示）；

m ——运动物体的质量（以千克表示）；

v ——运动物体的速度（以米/秒表示）。

能量可以贮存在化学物质、核物质或水坝拦住的水中。这种处于静态的能，我们叫它“**势能**”。假如一种物质中潜藏的势能极为丰富并且容易放出，那么这种富能物质就叫“**燃料**”。

能的转换矩阵

能的形式是可以互相转换的。汽油在内燃机中燃烧后，其中的化学能就变成热能，而一部分热能（大约百分之二十五）又转换成机械运动的能量。剩下的热即为废热，必须从内燃机中排出。

把能从一种形式转换成另一种形式的方法和设计，已经发现或发明了不少。在图 2 中我们列出了一些；那些记有 * 号的，都属于直接转换方法，将在本书中讨论到。

让我们以汽车内燃机里的各种转换为例，来说明如何使用图 2 上的表。所有地下的煤和石油（也就是所谓的化石燃料）都是从阳光获得能量的，我们就从阳光开始。

第一步，当然是从电磁能（光是一种电磁波），经过植物的光合作用，而变成化学能。顺着“电磁能”那一行往下看，直到标有“化学能”的一列，我们发现那方格中标的正

至 ↓	由 →	电	磁	能	化学能	核能	热能	动能	电能	重力势能
电磁能					化学发光 (萤火虫)	γ 反应 ^{60}Co 放射源 原子弹	热辐射 (热熨斗)	加速带电粒子 (回旋加速器) 磷光*	电磁波辐射 (电视发射机) 电发光	未知
化学能		光合作用 (植物) 光化学 (照相底片)				辐射催化 (腈化工厂) 离子化 (云雾室)	沸水 (水/蒸汽) 受热分解	放射线照射 分解	电解 (提炼铝)	未知
核能		γ -中子反应 ($^{9}\text{Be} + \gamma \rightarrow ^{8}\text{Be} + n$)			未知		未知	未知	未知	未知
热能		阳光吸收物 (热的人行道)			燃烧 (火)	核裂变 (燃料元件) 核聚变		摩擦 (刹车)	电阻发热 (电炉)	未知
动能		辐射计 太阳能电池*			肌肉	放射性 (α 粒子) 原子弹	热膨胀 (涡轮机) 内燃机		电动机 电铃 (压电晶体喇叭)	落体
电能		光电效应 (光度计) 无线电天线 太阳能电池*			燃料电池* 电池*	核电池*	电* 热* 热* 热* 磁* 磁* 铁*	磁流体 发电机* 一般发电		未知
重力势能		未知			未知	未知	未知	上升物 (火箭)	未知	

图 2 能的转换矩阵

(括号内为所举之例；带*者在本书中将要提到)

是“光合作用”。下一步是燃烧，由化学能变为热能。顺着“化学能”那一行往下移到“热能”一列，我们发现“燃烧”正处在自己的位置上。第三步，也就是最后一步，是热能通过内燃机的转换作用而变为机械能。

以这种方法重复使用能的转换矩阵，我们可以找出任何能的形式间的转换。

习 题 1

在汽车的例子中，继续使用能的转换矩阵两次，指出机械能如何转换为化学能而贮存于汽车电瓶中。

习 题 2

如1克汽油（大约一汤匙）燃烧时能产生48000焦耳热量，它可使1000公斤重的汽车跑得多快？假设汽车由静止状态起动，发动机效率为25%。

（习题答案见第35页）

能的转换所遵循的定律

无处不起作用的热力学

在我们目前的知识范围内，能量和质量的总和在任何转变过程中都是守恒的。从这一经验中，我们归纳出一个科学的基本规律：能量和质量的守恒律。这个定律说明，质量和能量的总和永远不能改变。小到敲一枚钉子，大到发射一支宇宙飞船，这一定律无不适用。虽然科学家的责任使得他们仍在不懈地核对此定律的真实性，但这个定律实在是科学中

的一大堡垒。

能量和质量守恒定律又称为热力学第一定律。与之相联系的热力学第二定律，也是与能的转换有关的。这第二定律说：事实上，在任何热机中，都不可避免地要损失掉部分能量。热力学的头两个定律可简单地解释为：（1）你不可能“无中生有”，（2）你不可能做到“收支平衡”。让我们更仔细地看看这两个定律。

你不可能“无中生有”

我们以前常认为能量和质量是单独守恒的。对目前许多实际问题，仍然可以这样考虑。然而爱因斯坦却用一个有名的公式把质量和能量联系起来，这个公式是

$$E=mc^2$$

其中 E ——能量（以焦耳计）；

m ——质量（以千克计）；

c ——光速（每秒30万公里）。

我们可以看到，这个公式与前面的动能表达式相似。由上式可知，没有质量的亏损，就不可能有能量的增加。燃料中的能量在放出之前，是以质量的形式贮存于燃料之中的。在前面汽油燃烧的问题中，1克汽油在空气中燃烧可获得48000焦耳能量。根据爱因斯坦公式可以算出这时的质量亏损为

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{4.8 \times 10^4}{9 \times 10^{16}} = 5.3 \times 10^{-13} \text{ 千克}$$

也就是说，约为1克的二十亿分之一。然而当一颗氢弹爆炸时，会有几克甚至几千克的质量转换为能量。

在直接转换的过程中，我们不必担心质量改变会引起什

么麻烦，但必须随时弄清全部能量的来龙去脉。例如，在外层空间的宇宙飞船上，燃料（甚至包括食物）放出的全部能量最后都要辐射到空间中去，不然的话，飞船的温度会不断升高，以至于焚毁。

你不可能做到“收支平衡”

任何一个工程师都为他不得不扔掉一些能量而烦恼。能量为什么一定得浪费掉呢？在这里，热力学第二定律起了支配作用。经验告诉我们，热不可能以百分之百的效率转换成其他形式的能。我们无法解释大自然的这种乖僻的安排，但既然我们必须生活在这个世界上，就得接受这样一个事实：任何以热能开始的换能装置，最后必得浪费掉部分能量（图3）。

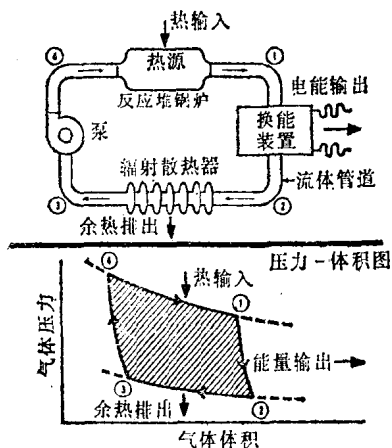


图3 典型的热机

图上表示出热输入、有用能量输出和不可避免要排到环境中去的余热。下图表示一封闭气体轮机循环的压力-体积图。圆圈内的数字是对应的。画阴影线部分的面积代表产生的能量。对所有热机都可画出这种图，它对研究热机性能是很有用的。

直接换能装置也不例外。因此，所有的热电元件或热离

子转换器都得妥善处理那些余热。然而设计人员总是尽力去提高热机的效率，以减少无用的余热。图4画出的是计划用于远距离宇宙航行任务的 SNAP-50 直接转换发电装置，两端伸出的方翼是余热蓄积器。

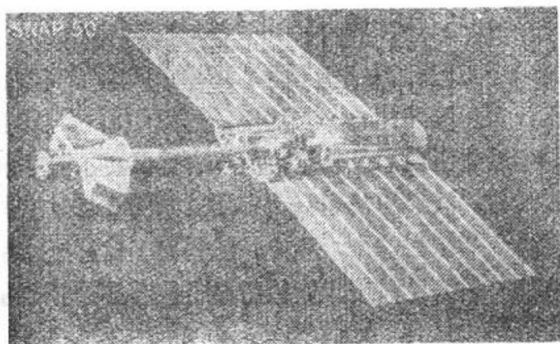


图4 计划用于远距离宇宙航行任务的 SNAP-50 发电装置的模型

外伸的两翼是余热蓄积器。此系统可发出300到1000千瓦的电力。

卡诺效率

在1824年，一个年青的法国工程师沙迪·卡诺设想了一种理想的热机。这种理想热机的效率为

$$e = 1 - \frac{T_c}{T_h} = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

其中 e ——所谓的卡诺效率（无单位）；

T_c ——余热蓄积器的温度〔以绝对温度K表示。绝对温度又称凯氏温度，它与摄氏温度和华氏温度

的关系为

$$K = ^\circ\text{C} + 273$$

$$K = \frac{9}{5} (^\circ\text{F} + 460) ;$$

T_h ——热源温度（以绝对温度K表示）。

遗憾的是 T_c 永远不能达到0 K，也就是说 e 永远到不了1，效率永远达不到100%。尽管物理学家在实验室里已获得低于百分之一的低温，但他们证明，绝对零度永远不能达到。

因为余热只能排放到周围大气、外层空间或江河湖海中，而这些地方的平均温度约为300K（27°C）左右，所以 T_c 就总是在300K以上。这一事实成为卡诺效率的基本限制。 T_c 升高，效率就要降低，这就是为什么喷气式飞机在热天起飞困难的原因。

卡诺效率是任何热机最高效率的极限值。提高卡诺效率的一种方法，是在热机不烧毁的前提下尽可能提高 T_h 。例如一个烧煤电站， $T_h=600\text{K}$ ， $T_c=300\text{K}$ ，那么它的卡诺效率为

$$e = 1 - \frac{300}{600} = 0.5 = 50\%$$

实际效率比这个理想数值多少还要低一些，因为水泵和其他发电厂设备也要消耗电力，另外还有不可避免的热损失。后面我们将看到，使用磁流体动力发电机， T_h 可提高数百度。

我们上面关于热力学第二定律所作的说明（你不可能做到“收支平衡”），适用于任何由热能开始转换的热机。如

果我们由动能或化学能开始，不把能量先转换成热，而直接转变成电能，就能跳出卡诺效率的限制。化学电池正是采取了这种途径。燃料电池、太阳电池和我们要讨论的其他直接换能装置也都是走的这个路子。我们采用卡诺效率不起作用的过程，也就避开了卡诺效率的限制。

习 题 3

在有些空间发电系统中打算用飞船舱内的热量 ($T_h=300\text{K}$) 去推动热机，而把余热排入火箭燃料液态氢中 ($T_c=20\text{K}$)。试求此热机的卡诺效率。

热 电 效 应

140年以后席贝克取得成就

最早的直接转换热机是热电偶。把两种不同的物质（通常是两种不同的金属丝）联结起来，加热接合处，那么在不加热的两端就能测到电压，或者说是电动势。席贝克1821年在他柏林的实验室里首先发现了这种效应，不过他错误地解释了这一现象的原因，因而也就没有去探索它的实际用途。一直到最近，这一发现在发电方面的应用才取得实际的进展。借用苏联研究热电的先驱约飞的譬喻说，热电效应就象是法国童话中的睡美人，一连沉睡了一百多年。唤醒她的王子，就是半导体。

由于过去所用金属丝的热电转换效率很低，教科书的作者们断言，热电效应根本不能用来发电。要想利用这种效应