论能量守恒及转化定律

〔苏〕Р. Г. 盖沃尔加因著

商 务 印 书 馆

论能量守恒及转化定律

〔苏〕Р. Г. 盖沃尔加因 著

拜鞠 译

商 务 印 书 馆

1980年·北京

Р. Г. ГЕВОРКЯН

О ЗАКОНЕ СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Москва 1960

据苏联国家科技出版社莫斯科1960年版译出

论能量守恒及转化定律

〔苏〕Р. Г. 盖沃尔加因 著

拜 鞠 译

商 务 印 书 馆 出 版

（北京王府井大街36号）

新华书店北京发行所发行

北京第二新华印刷厂印刷

850×1168 毫米 1/32　4 3/8 印张　101 千字

1980 年 7 月第 1 版　1980 年 7 月北京第 1 次印刷

印数 1—6,300 册

统一书号：2017·230　定价：0.45 元

内 容 提 要

本书研究了能量守恒及转化定律的各种表述。指出了应用势能概念时所发生的困难。联系到量子力学的测不准原理，考虑了速度和动能的量度问题;书中断言,粒子在给定时刻的精确定位的几率，应被认为等于零。书中考虑了电子的电场能量和磁场能量之间的联系，提出了电子的质量、电荷和能量之间的关系的新解释。联系到这种解释,考虑了相对原理、物理学定律的协变性和坐标及时间的变换方程之间的联系。

书中证明，最小能量耗散原理可以推广到其中发生着单向进行的能量变换的一切现象。书中阐明，熵增定律是能量按照体系各粒子在其各能级上的存在时间而在各能级间进行再分配的结果。

目　录

引　言

能量守恒及转化定律是自然界最重要的基本定律之一；在现时代，或许用不着强调它在一切科学领域中的无与伦比的意义了。

但是，讲述能量守恒定律的文献，在数量方面却是和这一定律的意义完全不相适应的。撇开这一定律的特殊应用不谈，连详细论述这一定律的基本内容以及与该定律的各种应用有关的那些物理概念的专著都是很少的①；甚至这一定律的简单表述都有讨论的必要。“能量既不消失也不创生，而只从一种形态变为另一种形态”；这样的论断很快地就要求阐明：这样的“能量形态”是什么，怎样发现它们，按照什么样的标志在具有能量量纲的一切物理量中分出那些恰恰是能量的不同形态的量，以及“能量转化”通常意味着什么。如果我们假设每一种能量形态都是和某种运动联系着，而能的数量则是对该种运动在形形色色的物理现象中所起作用的估价，那么，仅仅指出计算公式或者仅仅断言能量守恒定律是时间单向性的后果就显然是不行的了。

特别不清楚的是如何理解各种形态的“势能”；一般总是没有明白地指出它们表征着什么运动形态，应该怎样理解势能转化为动能的过程以及相反的过程。例如，已经知道，具有能量的电场会使在场中运动着的电子的动能发生改变，而在也具有能量的磁场中却不会发生这样的改变。在描述物体向地球的降落时，我们说

① 在这些专著中，M. 普朗克(Planck)的《能量守恒原理》一书(1887，俄译本于1938年出版)是内容很丰富的。

位置的势能变成了落体的动能，但是，“位置势能”意味着什么，它是不是和某种形态的运动联系着，当物体降落时在万有引力场中和在物体本身的内部是否发生某种变化，或者这样的变化是否被假设——这些问题都是需要讨论的。

本书简短地列举了联系到能量守恒定律(在普通物理范围内)的各种应用而出现的一些问题。此外，这里也给出了作者关于能量转化现象的某些研究。

在第1、2、3节中，考虑了能量守恒定律的各种表述，揭示了和各种“能量形态”的定义有关的困难，讨论了能量和功的概念之间的联系并且指出了应该用来划分“能量形态”的方法。

在第4节中，单独讨论了和测量基本形态的能量(即运动物体的动能)有关的问题；在这里揭示出来，描述物体的简单的机械移动，就需要用到几率理论。

在第5节中，考虑了由两个电子组成的最简单体系中的电磁现象：能量守恒及转化定律对这一体系的应用，导致关于电场能量和磁场能量的某些结论。

在第6节中，讨论了热力学体系的温度、热能及熵的概念，指出了体系中保证着体系向平衡状态过渡的那种能量再分配过程的特点。

最后，在第7节中，揭示了将著名的“能量最小耗散原理”推广到其中发生着单向进行的能量转化过程的一切现象的可能性。这里举出了一系列的例子，它们证明着一个论断：单向能量转化过程的平衡进程是由这些过程的最小功率值来表征的。

1. 能量守恒及转化定律的各种表述

我们来考虑能量守恒及转化定律的几种表述。

1）能量既不创生也不消失，而只从一种形式转化为另一种形式。

在这里，能量守恒定律是作为经验资料的某种哲学概括而被提出的。为了使这一论断成为物理定律，必须预先指出如何理解不同形式的能量，如何发现它们和测量它们(每一种形式的能量的测量结果应该是单值的)，而且也要指出，能量当从一种形式变到另一种形式时是遵循什么样的定量关系的。

能量的定义将在以后再来考虑。我们假设，一切形态的能量的测量方式已经选定。于是，上面这种表述下的能量守恒定律的实质就在于，某种形态的能量的减少(或增加)必然是和另一些形态的能量的增加(或对应地为减少)相伴随的，同时，在不同形态的能量改变量之间存在着严格确定的关系。如果在我们周围的自然界中，只觉察到一种形态的能量的减量 ΔE_1 和另一种形态的能量的增量 ΔE_2(而其他形态的能量保持不变)，那么，就可以断言发生了从一种形态的能量到另一种形态的能量的转化。测量表明，比值 $\Delta E_1/\Delta E_2=k_{12}$ 对于 ΔE_1 的不同值保持为恒量；对于相反的过程，当发生第一种形态能量的增量和对应的第二种形态能量的减量时，这一比值也保持不变。针对每两种不同形态的能量观察类似的相互转化，我们就得到一系列的量:

$$\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2}=k_{12};\ \frac{\Delta E_1}{\Delta E_3}=k_{13};\ \cdots\cdots;\ \frac{\Delta E_2}{\Delta E_3}=k_{23};\ \frac{\Delta E_2}{\Delta E_4}=k_{24};\ \cdots\cdots$$

于是，这些比例关系中的每一个，都表征着两种确定形态的能量的相互变化(转化)，而这时其他一切形态的能量则假设为保持不变。在这种条件下，k_{12}, k_{13}, ……, k_{23}, k_{24}, ……这些数是属于彼此独立进行的物理现象的。因此，一直没有理由假设这些数之间存在着某种联系。在问题的这种提法下，数k_{ij}之间的联系，是能量守恒及转化定律的附加要求，其内容在于下述的论断：存在一些数k_1, k_2, k_3, ……，它们满足下列的条件：

$$\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2}=k_{12}=\frac{k_1}{k_2},\ \frac{\Delta E_1}{\Delta E_3}=k_{13}=\frac{k_1}{k_3},$$

$$\cdots\cdots,\ \frac{\Delta E_2}{\Delta E_3}=k_{23}=\frac{k_2}{k_3},\ \cdots\cdots$$

于是，对于从一种形态到另一种形态的每一个能量转化过程，就得到：

$$\frac{\Delta E_1}{k_1}=\frac{\Delta E_2}{k_2},\ \frac{\Delta E_1}{k_1}=\frac{\Delta E_3}{k_3},\ \cdots\cdots,\ \frac{\Delta E_2}{k_2}=\frac{\Delta E_3}{k_3},\ \cdots\cdots$$

k_{ij}这些量表明了不同形态能量的测量单位之间的关系，因子$1/k_i$使我们能够用同一种单位来表示不同形态的能量。因此，在更加复杂的情况，当同时有几种形态的能量发生变化时，能量守恒定律可以表示为下列方程：

$$\frac{\Delta E_1}{k_1}+\frac{\Delta E_2}{k_2}+\cdots\cdots=0;\qquad \sum\frac{\Delta E_i}{k_i}=0, \tag{1.1}$$

式中的能量改变量ΔE_i带有适当的正负号。于是，如果选定了各种形态的能量的定义及测量方式，则能量守恒定律的内容归结为各量k_i的恒定性，也就是归结为下列的论断：

2）当一种形态的能量转化为另一种形态的能量时，在它们的

改变量之间永远存在着确定的比例关系。如果把一切形态的能量都用同一种单位来表示，则代替方程(1.1)的将是：

$$\Delta E_1+\Delta E_2+\cdots\cdots=0, \quad \sum \Delta E_i=0. \tag{1.2}$$

由此即得，一切形态的能量的总和应该保持为恒量：

$$E_1+E_2+\cdots\cdots=\text{恒量}。 \tag{1.3}$$

我们强调指出，如果每一种形态的能量的改变量ΔE_1、ΔE_2、ΔE_3、……可以彼此独立地被确定，则不同形态能量的测量单位之间的比例关系的实验确定（亦即系数k_{ij}或k_i的求得）是可能的。这就意味着，ΔE_1应该是按体系的一个参量的变化来测定的，ΔE_2是按另一个参量的变化来测定的，余类推；也就是说，不同形态的能量E_1、E_2、E_3……是体系的不同参量的函数。显然，只有在这种情况下，才能够按照体系参量的变化来单值地确定每一种形态的能量发生了什么变化。如果能量E_1、E_2、E_3……被表示为包含公共参量的一些函数的形式，则当这些参量变化时，所有各形态的能量将同时发生变化，这时，针对每两个改变量ΔE_1和ΔE_2、ΔE_1和ΔE_3等等来寻求系数k_{ij}或k_i就将是不可能的了。但是，对其各种形态能量E_1、E_2、E_3……既依赖于公共参量又依赖于不同参量的那种物理体系，却可以进行下列的手续：例如，可以进行（如果是可以实现的话）一种体系状态的变化，在变化中，公共参量保持不变。这时，按照其他各参量的变化，就可以测定ΔE_1、ΔE_2、ΔE_3……并求得它们之间的比例关系。

因此，当利用(1.3)这种形式的能量守恒定律时，必须有可能单值地分别测定每一种形态的能量的量值，以便在测量结果中有可能确认这些数量的这种或那种改变量ΔE_1、ΔE_2、ΔE_3……，并从而断定从一种形态到另一种形态的能量转化。E_1、E_2、E_3……的确定量值，只有对于闭合物理体系才能得到。关系式(1.3)表明：

3）在闭合物理体系中，一切形态的能量的总和在时间过程中保持恒定；体系的能量只能通过从外界向体系或从体系向外界输送某些能量而发生改变。如果在体系和周围物体之间没有这样的能量交换，则体系内部可能发生从一种形式向另一种形式的能量转化，而且不同形态能量的改变量之间存在着严格的比例关系。

在能量守恒定律的这种表述下，人们假设有可能确定所给物理体系是不是闭合的；这就意味着，研究体系中进行的过程，我们就完全有可能确定所观察到的一种形态能量的改变是由于能量从外界流入（或向外界输出）而发生的呢，还是由于体系中发生了能量的转化。在很多情况下，这样的可能性是存在的或是有相当理由被假设为存在的。

此外，上面已经说过，能量守恒定律的这一表述，只适用于那样的物理体系：对于该体系来说，每一种形态的能量E_1、E_2、E_3……都可以单值地和彼此独立地被测定出来。在这种情况下，物理体系的总能，可以写成各种形态的能量的总和：

$$E=E_1+E_2+E_3+\cdots\cdots \tag{1.4}$$

如果这样的体系是孤立的，则按照能量守恒定律（1.3），体系的总能在时间进程中将不改变。

但是，物理体系的总能写成若干单项之和的形式，而其中每一项又代表某种确定形态的能量，这并不是永远可能的①。这样的分解通常和所考虑体系的这种或那种理想化的程度联系着。如果对于某一物理体系尝试着把总能量写成（1.4）的形式，则一般说来E_1、E_2、E_3……各项会依赖于一些相同的参量。但是，可能存在那样的物理体系，例如，它的能量E_1很强地依赖于参量x_1而很弱地依赖于其他的参量x_2、x_3……，另一种形态的能量E_2决定于参量

① М. А. Леонтович, Введение в термодинамику（有汉译本，《热力学概论》，张厚玫译，高等教育出版社 1955 年版），ГИТТЛ，1951，стр. 21.

x_2 的值而很弱地依赖于 x_1、x_3……，余类推。在这种情况下，可以对体系进行理想化，即假设 E_1 只是 x_1 的函数，E_2 只是 x_2 的函数，余类推，而这时体系的总能量就可以在令人满意的近似下写成不同形态能量的总和的形式了。例如，如果体系包括一种理想气体和一个在气体中转动着的固体，那么，忽略了物体在加热时的膨胀，就可以假设转动物体的能量不依赖于温度，而气体的内能则决定于它的温度等等。

对于很多物理体系，可以把总能量分成实质上不同的两部分：决定于体系各组成部分的质量及速度的动能，和决定于体系各组成部分的坐标及其彼此之间相互作用的特点的势能。发生在这种体系中的过程，被认为是动能向势能的转化或是相反的转化，而这两种形态的能量之和则在没有外界影响时保持恒定。

在普遍情况下，必须考虑到那样一些物理体系，它们的能量不能进行这样的分解，从而应该认为整个体系具有一个确定的能量值 E。因此，应该赋予能量守恒定律以更普遍的表述，这种表述应能适用于任意的物理体系，而不取决于是否能够在这些体系中把总能量分解为不同形态能量的总和。

4）物理体系的能量，是体系状态的单值函数；这就是说，它是完全地决定着体系每一状态的那些参量的单值函数。

我们指出，如果不能在体系中把体系的总能量分解为不同形态能量的总和，那就绝不能说在这种体系的内部可以发生能量的相互转化。确实，如果在体系中不能区分一种形态和另一种形态的能量，即不能把不同形态的能量表示为体系的不同参量的相互独立的函数，那么，就绝不能依据体系参量的改变来单值地确定这一或那一形式的能量在该体系内发生了什么样的改变。对于能量被表示为决定体系状态的所有参量的一个“不可分解的”函数形式（即其能量函数不能被分成不同参量的函数的总和）的那种体

系，能量守恒定律只有一种用处：它使我们能够在体系受到一切种类的外来影响时（当体系从外界获得或向周围环境放出某一能量时）确定体系总能的改变量。在各种物理体系中，这样的体系将起特殊的作用：它只输出能量或获得能量。在这种体系的内部，能量的相互转化不可能被觉察到，从而能量守恒和转化定律也不可能被应用。研究只在这种体系的内部进行的过程，既不能确立也不能验证这一定律。因此，如果存在一组具有不可分解的能量函数的不同体系（在特例，体系能量可以只依赖于单独一个状态参量），则每一个这样的体系应被看成一种确定形式的能量的“负载者”。这些能量形式从而也就被叫做不同的形式。

如果一个物理体系是孤立的，那么在体系参量的一切可能的变化下（即不论体系中进行什么过程），体系的能量都保持恒定。这就意味着，和体系能量的给定值对应的，是一组不同的体系状态。但是，如果指定了某一确定的体系状态，则和该状态相对应的是体系能量的一个唯一的值。因此，如果体系状态是决定于多个参量的，则给出这一或那一能量值并不能区分出该体系的一个确定状态，而且也不能决定体系状态在时间进程中发生变化的方向。在这种意义上，能量守恒定律是“消极的”，或者准确点说是**保守性**的定律，它不同于**指导性**的定律，那种定律决定着发生于体系中的过程的方向和强度，即决定着体系在时间进程中通过的那些状态的顺序以及这些状态在体系中发生代换的快慢。

把物理定律分成指导性的和保守性的，这种分法对于理论可以有很大意义；特别说来，这种分法使我们能够把能量守恒定律从另一些联系着具有能量量纲的量的定律中区分出来。

2．论不同形态的能量的存在

能量概念首先是在力学定律的研究中出现的。对于质量为m而速度为$\boldsymbol{v}$的点状物体，利用力学第二定律$\boldsymbol{F}=m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}$，即得：

$$\boldsymbol{F}\cdot d\boldsymbol{s}=m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}\cdot d\boldsymbol{s}=m\boldsymbol{v}\cdot d\boldsymbol{v}=d\left(\frac{mv^2}{2}\right).$$

式中的量

$$E=\frac{mv^2}{2}, \tag{2.1}$$

叫做该物体的动能。

我们来推导适用于力学体系的动能的表示式，体系的各组成部分具有质量m_1、m_2……，而这些物体在某时刻的速度等于$\boldsymbol{v}_1$、$\boldsymbol{v}_2$……；用$\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{F}_2$……代表不属于体系的那些周围物体作用在体系各组成部分上的外力，用$\boldsymbol{f}_{12}$、$\boldsymbol{f}_{13}$……$\boldsymbol{f}_{21}$、$\boldsymbol{f}_{23}$……$\boldsymbol{f}_{ij}$……代表体系各组成部分之间相互作用的内力。根据力学第二定律，在时间dt内，速度的改变量$d\boldsymbol{v}_1$、$d\boldsymbol{v}_2$……和物体的位移$d\boldsymbol{s}_1$、$d\boldsymbol{s}_2$……是由下列关系式来相互联系的：

$$(\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{f}_{12}+\boldsymbol{f}_{13}+\cdots+\boldsymbol{f}_{1j}+\cdots)\cdot d\boldsymbol{s}_1=m_1\boldsymbol{v}_1\cdot d\boldsymbol{v}_1,$$
$$(\boldsymbol{F}_2+\boldsymbol{f}_{21}+\boldsymbol{f}_{23}+\cdots+\boldsymbol{f}_{2j}+\cdots)\cdot d\boldsymbol{s}_2=m_2\boldsymbol{v}_2\cdot d\boldsymbol{v}_2,$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

将这一方程组的两端求和，即得：

$$\sum \boldsymbol{F}_i\cdot d\boldsymbol{s}_i+\sum_i\sum_j \boldsymbol{f}_{ij}\cdot d\boldsymbol{s}_i=\sum m_i\boldsymbol{v}_i\cdot d\boldsymbol{v}_i$$

和式 $\sum \boldsymbol{F}_i \cdot d\boldsymbol{s}_i = dA_{外}$ 代表外力在时间 dt 内对体系所作的功。和式 $\sum\limits_i \sum\limits_j \boldsymbol{f}_{ij} \cdot d\boldsymbol{s}_i = dA_{内}$ 就是相互作用的内力在同一时间内作的功。我们用 dE 代表这一方程右端的和式，并把它写成下列形式:

$$dE = \sum m_i \boldsymbol{v}_i \cdot d\boldsymbol{v}_i = \sum d\left(\frac{m_i v_i^2}{2}\right) = d \sum \frac{m_i v_i^2}{2}.$$

人们把

$$E = \sum \frac{m_i v_i^2}{2} \tag{2.2}$$

这个量叫做所给力学体系的动能。于是，

$$dA_{外} + dA_{内} = dE.$$

我们假设外力不存在(或是外力所作功的代数和等于零，即 $dA_{外}=0$)。内力的功和体系各组成部分的相对位形的改变量有关，即和这些物体的坐标 x_i、y_i、z_i 的改变量有关。我们假设，对于我们的体系，存在作为这些坐标的函数的一个量 $U(x_i, y_i, z_i)$，而且，当从一个状态过渡到另一个状态时，这个量的减量等于内力所作的正功:

$$-dU = dA_{内}. \tag{2.3}$$

这样选定的 $U(x_i, y_i, z_i)$这个量，叫做体系的势能，它可以被看成内力的功源：如果内力作了某些正功，则体系的势能将减少等于此功的一个量，因此可以肯定，内力作功是以体系的势能为代价的。当势能增加时，内力的功就是负的。

于是，在上述条件下，就有:

$$-dU = dE, \qquad d(U+E) = 0, \qquad E + U = \text{恒量}。 \tag{2.4}$$

由此可见，对于孤立力学体系来说，动能和势能的和在时间进程中是不变的。作为力学定律对所考虑体系的应用的直接结果，我们得到了能量守恒定律。

我们来分析一下这种论述。首先我们指出，能量概念起初是作为 $\frac{mv^2}{2}$（或者，对于物体系则是作为 $\sum \frac{mv^2}{2}$）这个量的有条件的名称而简单地引入的。至于坐标的函数 $U(x, y, z)$ 被看成某种形态的能量，则只是根据下列的论点：

1）$U(x, y, z)$这个量具有能量的量纲，

2）当孤立体系从一个状态过渡到另一个状态时，量 U 的改变量永远和等值而异号的体系中的动能改变量相伴随，即 $dU=-dE$。

早先选择函数 $U(x, y, z)$时是要它服从 $-dU=dA_{内}$ 这个条件，而这样也就预先规定了关系式(2.4)的求得，也就是保证了能量守恒定律的成立。(2.4)这种形式的能量守恒定律的存在，是通过选择体系参量的适当的、满足条件 $dE=-dU$ 的函数而出现的。如果这样的函数 $U(x, y, z)$是存在的，则可以把它看成一种形态的能量，而关系式 $dE=-dU$ 则被理解为能量守恒及转化定律的表示式。如果这样的函数竟然无法找到，则力学第二定律对孤立力学体系的应用只能导致关系式 $dE=dA_{内}$。

于是，就制订了揭露各种能量形态的下述方法。设有某一孤立物理体系，其动能 E 是构成该体系的那些物体的质量和速度的函数：改变量 ΔE 只和这些体系参量的改变量有关。如果通过分析体系中的变化所遵循的物理规律，能够找到另一些体系参量的一个函数 W，使得比值 $\frac{\Delta W}{\Delta E}=k$ 对于 ΔE 的一切可能值都为恒量，而改变量 ΔW 的正负号又和 ΔE 的正负号相反，那么就可以断言，W 是某种形态的能量，而且在所考虑的体系中进行着服从能量守恒定律的从动能向这种形态的能量（或相反）的转化。十分明显，不利用动能而利用也是容易测量的某种其他形态的能量作为“能量标本”，也可以找出另一些形态的能量。