

5. 是能量形态还是能量携带者

G. Falk, F. Herrmann, and G. Bruno Schmid

【内容摘要】 我们通常说,能量以各种不同的形态存在,并且在物理过程中由一种形态转变为另一种形态。然而,仔细分析一下会发现,用能量形态这一概念来研究问题是不恰当的,在概念上甚至会造成误解。由于大多数教材运用了“能量形态”这一名词,但没有详细说明区别不同“形态”的方法,故本文讨论了区别流动着的能量和贮存着的能量的严格判据。这些判据表明,“能量形态”这一名词对于个别情况来说是不满意的,因为它容易导致产生一种错误的理解,即存在着不同种类的能量,而这一理解是与能量是一种不变的东西这一简单而正确的图象相违背的。考虑到一个大家熟悉但很少被认识到的一条自然规律,即能量总与至少一个别的物理量同时流动,我们引入了能量携带者的概念。这一概念给我们提供了能量的传递、转换和贮存的清楚的图象。这一图象在科学上是严格正确的,并且很简单,故容易在初级水平的学生中介绍。

一、引言

本文的目的是要说明,“能量形态”这一概念容易使人误解,并建议把这一概念彻底抛弃,而用另一个更能反映能量的实物型性质的概念——能量携带者——来代替。

本文由以下几部分组成:在第二节,介绍了实物型物理量的概念。在第三节,用一个常用的但很少被认识到的自然定律来给“能量形态”下一个严格的定义。在第四节,论证了“能量携带者”的概念可能比传统的能量形态的概念更适合于清晰地理解能量。

二、能量的实物型性质

有一类物理量,这就是那些密度可以被确定的广延物理量,它们的性质特别容易描述,这些量包括电量、质量、物质的量(粒子数)等。由于这些量在整个科学中担任着基本的角色,也由于这些量分布在空间并能在空间流动,故我们专门给它们取一个名词,叫做实物型物理量。

某个量是实物型的,这意味着它包含在空间某一区域。这就是说,我们可以谈及这一物理量在空间某一区域的数量,并可以将这数量与这个物理量向这一区域流进或从这一区域流出的多少联系起来。实际上,只有这个量是实物型的,并且服从或违反某一连续性方程,谈论这个量是局域守恒或不守恒才是恰当的;另一方面,对于象电场、温度或速度这类非实物型量,谈论守恒或不守恒是不恰当的。某些实物型物理量总是守恒的,如电量;而另一些实物型物理量只有在特殊情况下才守恒,如物质的量,只有在不发生化学反应时才守恒。因此,“实物型物理量”和“守恒量”是二个不同的概念:“实物型物理量”是含义更广的概念¹。

上面提到的二个物理量,电量和物质的量,传统地被认为是实物型的。然而,在本文中我们感兴趣的是另一个实物型物理量:能量。

能量的实物型性质基于这样的事实,即对于能量,存在着

密度和流(能流传统地被叫做“功率”)。也可以从能量的局域守恒这一事实看出能量的实物型性质。诚然,能量是一个守恒的实物型物理量。

三、能量形态

“能量形态”这一名词常与静止能、动能、热能、重力能、结合能、辐射能、弹性能、势能、电能、化学能、原子核能等大量不同的名称一起使用。细心的学生当他想弄清楚包含在蓄电池中的能量是电能还是化学能时当然会感到困惑。的确,即使一些著名的教科书,在定义“能量形态”这一名词时也是彼此不同的。在一些书里²的意思是,能量形态的定义和各种能量转换方式有关;在另一些书里³的意思是,能量形态的定义和各种能量贮存方式有关;还有的书^{4,5}使用这一名词时似乎有上述二种含义。因此,能够看出能量形态这一概念具有颇为含糊的物理解释,所以这一概念的价值更多地在于通俗口语中,而不在于科学上。这节的目的是要提供一个关于能量形态的精确定义。

能量可以用二种完全不同的方法来加以分类⁶:第一种是根据能量是怎样转换的,或者用与此相同的说法,根据能量是怎样流动的(例如流进或流出能量正在增减的物理系统)来分类;第二种是根据能量是怎样被贮存的来分类。在第一种情况中,得出电能、化学能、热、功等概念。在第二种情况中,得出内能、电场能、动能、势能等概念。遗憾的是,许多书同时谈及二种情况下的能量形态。

先来考虑第一种能量分类,即按能量转换或能流来分类。经验表明,能量总与至少一个别的实物型物理量同时流动。这句话说明了一个自然定律。它可以写为¹

$$I_E = \phi I_Q + \mu I_n + \mathbf{v} \cdot \mathbf{I}_p + T I_S + \dots \quad (1)$$

这里 I_E 、 I_Q 、 I_n 、 \mathbf{I}_p 和 I_S 分别表示能流、电流、摩尔流、动量流^{7,8} 和熵流,而 ϕ 、 μ 、 \mathbf{v} 和 T 分别表示电势、化学势、速度和绝对温度。例如,(用坡印亭矢量场来确定的)能流通过导线与电流一起同时流入烤面包炉;能量与物质的量(燃料+氧气)同时流入汽车发动机;能量与动量一起流过拉动货车的绳子;能量和熵一起流经房屋的墙壁,等等。在这些例子中,根据与能量同时流动的物理量,我们可以谈论能量从一种“形态”转换成另一种“形态”,在上述各个例子中,我们分别谈及到电能、化学能、功和热。顺便说说,也可以用同样方法按照在一系统中与能量一起增减的物理量来区分能量形态。这种分类法的数学表达式就是热力学中熟知的吉布斯基本齐次式^{9,10}。

把贮存能分解为不同的部分是基于另一种考虑:系统的能量总可以表示为该系统的某些其他变量的函数。例如,如果我们把这些变量记为 x_1, x_2, x_3, \dots , 则有 $E = E(x_1, x_2, x_3, \dots)$, 如果适当选择这些变量,则系统完全能够用这函数描述。在这种情况下,能量函数通常(在力学中)被称为系统的“哈密顿量”或(在热力学中)被称为“热力学势”¹¹。许多熟悉的物理系统的能量函数可以分解为独立的项,每一项所依赖的变量在其他项中不出现。例如,可能有这样一个函数: $E = E'(x_1, x_2) + E''(x_3) + \dots$ 。在这种情况下,可以给能量函数中的每一项取不同的名称,从而我们可以把每一项叫做能量的“存在形态”。

这种分类方法的一个例子是电容器。它的能量可以写为 $E(Q) = E_0 + Q^2/2C$, 这里 Q 是电量, C 是电容,式中右边一项与 Q 无关;第二项与 E_0 无关,叫做“电场能”。如果把电

容器的运动也考虑在内,其能量可写为 $E(Q, p) = E_0 + Q^2/2C + p^2/2m$ 。式中 p 是电容器的动量, m 是它的质量。式中右边第一、二项与前面提到的式子中的相同。 $p^2/2m$ 与 Q 和 E_0 无关,因而可以专门给以一个名称:“动能”(或“运动的能量”)。

一般地说,只要系统的能量可以分解为几个独立的项,并且每一项所依赖的变量在其他项中不出现,我们就可以给每一不同的项取上一个名称。然而,情况并不总是如此。实际上,许多重要的物理系统不允许作这样的分解。例如,理想气体的能量是熵 S 、体积 V 和物质的量 n 的不可分解的函数。一般地,任何能量转换器的能量函数对于与转换中的各种能量形态相关的变量来说是不可分开的。例如,能把热 TdS 转换为功 $-pdV$ (这里 p 代表压强) 的任何热机的能量函数都是 S 和 V 的不可分解的函数。

不同于根据能量函数的分解来命名各种能量形态,能流则总可以按照公式(1)来分类。因此,根据能流来对能量进行分类是比把贮存能分解为不同项来对能量进行分类更具有普遍性。然而,把这些能流叫做“能量形态”是不适宜的。从教学法的角度来说,说“不同形态的能量”是会使人误解的。这一点将在下一节讨论。我们主张用一种更新的能量分类法——用能量携带者的概念——来分类。

四、能量携带者

如果我们接受上述能流分类的方法,那么一般的能量形态的概念错在什么地方呢?回答这一问题的最好方法是先考虑另一个问题的回答,譬如“说不同形态的电荷错在什么地方?”换句话说,为什么不根据在电荷传递过程中的电荷携带

者给电荷取不同的名称,如“电子电荷”、“质子电荷”“ μ 子电荷”、“Cl离子电荷”?又如,为什么我们不说蓄电池电极上离子电荷“转换”成电子电荷(或相反)?或者为什么不说在 β^+ 衰变中质子电荷转变为正电子电荷?显然,给电荷以不同的名称会给人以错误的印象:它们表示不同的物理量,而每种情况下只涉及到一个相同的物理量:电荷。如果我们对待能量的实物型性质象对待电荷的实物型性质一样认真的话,那么,说不同形态的能量与说不同的形态的电荷一样会导致误解。并不是通过电磁场、燃料输送管或墙壁的能量具有不同性质,而是在各种情况下与能量同时流动的其他实物型物理量具有不同的性质。因此,在所谓的“能量转换器”中能量实际上并没有转换。正确的说法是,与能量一起流动的其他实物型物理量在这种装置中转变了。例如,能量与煤和氧气(科学地说,与煤和氧气的物质的量(以摩尔为单位))一起被带到发电厂,然后与电荷一起同时从发电厂流出。能量与电荷一起同时流入绕有绳子的电动机,再与动量一起通过绳子流出。

如果承认“能量形态”这一名称在表达上述定律时会引起误解而且是不适当的,那么用什么名称较好呢?这里可以提出有关电荷的类似问题,从而明显地得出答案。这个答案就是能量携带者。我们说,当能量流动时也流动的实物型物理量“携带”着能量,它就是“能量携带者”。

当某种东西本身不变而仅改变携带者时,谈论它的形态是不恰当的。例如,考虑在运输过程中改变其携带者的货物,如土豆。土豆从地里到家里常需要经过很长的旅程:它们从地面被拖拉机拖运到载货卡车上,再被载运到货站,在那儿它们被装载在双轮拖车上,被转运到另一个城市,再被装载到运

送卡车上, 然后被送到超级市场, 最终被送到顾客手里。然而, 谁也不会想到在旅途的每一段路程中分别给土豆贴上“拖拉机土豆”、“载货卡车土豆”、“双轮拖车土豆”、“运送卡车土豆”和“市场土豆”等标签; 另一方面, 说土豆在从地里到家里的途中改变了几次携带者, 这是很自然的。“土豆携带者”的概念是合理的, 而“土豆形态”的概念是不合理的。我们还可以再进一步利用这个比喻。例如, 没人会想到在旅程的某一特殊阶段中给土豆起一个完全不同的名称, 譬如“卡车减速器”或“生物淀粉”, 然而, 这正是在能量问题中人们说到“热”或“功”时所做的事。

把能量和土豆相比来说明我们的论点并不象人们也许会认为的那样荒谬可笑。这样来比较的基础与以下事实毫无关系: 土豆是看得见的, 而能量是看不见的; 或者, 土豆是有形的物体而能量是抽象的概念。这个比喻的正确性仅基于这样的事实, 即对能量和土豆我们都可以谈及密度和流。当然, 怎样在字面上理解“能量携带者”一词是有限度的。这里“携带”一词仅意味着能量的流动和能量携带者的流动之间的暂时关系, 而并不意味着能量和它的携带者必定占据同一空间位置, 甚至以相同速度流动。能量携带者电荷这一例子充分说明了这一点。“能量携带者”一词是教学法中的工具, 如果用得不过分天真, 能带来很大好处的。

就象一个载货器。譬如载货卡车, 能够载荷或多或少的货物一样, 能量携带者也可以“载荷”或多或少的能量。例如, $2A$ 的电流能携带的能量是可大可小的, 如 $1KW$ 或 $10KW$, 其大小是随电势差而定的。因此, 电势差是能量携带者“电荷”(或“电”)“载荷”能量多少的量度。电势差是“能量载荷因子”(energy load factor)。许多熟悉的强度量也是能量载荷因

子。如绝对温度 T 是熵流载荷能量多少的量度, 化学势 μ 是摩尔流载荷能量多少的量度。如果注意到许多强度量作为能量载荷因子的作用, 很容易看出它们的重要性。

用能量携带者和能量载荷因子的图象来描述传统地称为“能量转换器”的那些装置是特别有用的。按照传统的说法, 能量以一种形式流进这类装置而以另一种形式流出。遗憾的是, 这种说法使人想到在装置中一种物理量转变成为另一种物理量。然而, 实际上只不过是装置中能量改变了携带者而已。换句话说, 在装置中能量由一种携带者传输给了另一种携带者。因而, 用“能量收发器”这一名称更适合于这种装置的真正功能。

在日常的自然和技术环境中充满了能量收发器的例子。例如, 在电炉中能量由携带者“电荷”传给携带者“熵”, 在发电厂中, 能量由携带者“物质的量”传给携带者“电荷”。

借助于能流图, 容易用图示法来表示能量从某一装置或空间某一区域传到另一装置或另一区域。这种图形提供了解决与能量有关的问题的简单图解法。一门为初学物理的学生(五、六年级学生)开设的课程^{12,13}已经以这种图解为基础设计出来了, 并已有了与之相配套的教科书¹⁴。关于能流图的初等应用的更详细论述已在别处发表过¹²⁻¹⁴。

五、小 结

能量是实物型物理量; 它分布在空间, 并能在空间流动。

由于“能量形态”一词造成了把不同能量形态错误地理解为不同物理量的机会, 因此必须用一个更合适的概念来代替它。为此, 我们相信这样一条经验, 即能量总与至少一个别的实物型物理量同时流动。这表明, 如果我们想对能量传递作

一恰当的描述,我们必须重点考虑与能量一起流动的实物型物理量。

不用“能量形态”一词,更合适的方法是把能量想象为一种“材料”,这种材料只有被一种叫做能量携带者的材料“携带”时才能从一个地方流到另一个地方。在这种图象中,能量不是从一种形式转换成另一种形式,而是改变了它的携带者。这样,我们就得到了一个严格有效的、简单而容易的、甚至能在初等水平介绍的关于能量传递过程的图象。

参 考 文 献

1. G. Falk and F. Herrmann, Konzepte eines Zeitgemässen Physikunterrichts (Schroedel-Verlag, Hannover, 1979), Vol. 3, pp. 14—22.
2. R. Resnick and D. Halliday, Physics for Students of Science and Engineering (Wiley, New York, 1963). Vol. 1, Chap. 8, p. 144.
3. C. Kittel, W. D. Knight and M. A. Ruderman, Berkeley Physics Course; Mechanics McGraw-Hill New York, 1973), Chap. 5, p. 150.
4. R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, The Feynman Lectures on Physics (Addison-Wesley, Reading, MA, 1964), Chap. 4
5. College Physics; Physical Science Study Committee (Heath, New York, 1968), Chap. 17.
6. G. Falk and F. Herrmann, Konzepte eines Zeitgemässen Physikunterrichts (Schroedel-Verlag, Hannover, 1977), Vol. 1, pp. 9—13.
7. G. Falk and F. Herrmann, Konzepte eines Zeitgemässen Physikunterrichts (Schroedel-Verlag,

Hannover, 1979), Vol. 3, pp. 80—87.

8. A. A. di Sessa, Am. J. Phys. 48(5), 365—369 (1980).
9. J. W. Gibbs, “On the Equilibrium of Heterogeneous Substances,” Trans. Conn. Acad. III (1875).
10. G. Falk, Theoretische Physik auf der Grundlage einer Allgemeinen Mechanik (Springer-Verlag, New York, 1968), Vol. II.
11. G. Falk and W. Ruppel, Energie und Entropie (Springer-Verlag, New York, 1976), pp. 127—146.
12. Reference 1, pp. 32—58.
13. G. B. Schmid, Phys. Educ. 17, 212—218 (1982).
14. G. Falk and F. Herrmann, Neue Physik; Das Energiebuch (Schroedel-Verlag, Hannover, 1981).
(译自 Am. J. Phys. 51(12), December 1983)