

是能量形式还是能量携带者？*

[德]G. Falk, F. Herrmann, G. Bruno Schmid 著

陈敏华 译

williammhchen@hotmail.com

摘 要:我们通常说, 能量以各种不同的形式存在, 并且在物理过程中由一种形式转化为另一种形式。然而, 仔细分析一下会发现, 用能量形式(energy form)这一说法是不妥的, 在概念上甚至有误导作用。由于大多数教材用了“能量形式”这一术语, 但没有详细说明区分不同“形式”的能量的方法, 故本文讨论了区分流动着的能量和储存着的能量的严格判据。这些判据表明, “能量形式”这一术语所对应的分类是不好的, 原因是它容易导致一种错误的理解, 即存在着不同种类的能量, 而这一理解与把能量想象为一种不变的东西这一简单而在物理上正确的图像相违背。考虑到一个大家熟悉的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** (energy carrier) 的概念。这一概念给我们提供了能量的传递、交换和储存这一清晰的图像。这一图像在科学上是严格正确的, 并且很简单, 容易在初级水平的学生中介绍。

I. 引言

本文的目的是要说明, “能量形式”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本质的概念“**能量携带者**”来代替。

本文由以下几部分构成: 在第 II 节, 介绍了实物型物理量 (substance-like quantity) 的概念。在第 III 节, 用一条常用的但很少被认识到的自然规律来给“能量形式”下一个严格的物理学定义。在第 IV 节, 论证了本文所提出的“能量携带者”的概念比传统的能量形式的概念更适合于清晰地理解能量。

II. 能量的实物型本质

*本译文系浙江省教科规划 2013 年重点研究课题“传统物理课程的不足之研究: 课程考古学的方法”(SB067) 的研究成果之一。

有一类物理量，它们是广延量，有相应的密度，特别容易被想象。这些物理量包括电荷、质量、物质的量（粒子数）等。由于这些物理量在整个科学中担任着基本的角色，也由于这些物理量分布在空间，并能在空间流动，故我们专门给它们取了一个名称：**实物型物理量**。

某个物理量是实物型的，这意味着它被包含在某一空间区域。这就是说，我们可以谈及这一物理量在某一空间区域的数量，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，只有当某个物理量是实物型的，并且服从或违反某一连续性方程，谈论这个物理量是局域守恒的或不局域守恒的才是恰当的。另一方面，对于像电场强度、温度和速度等非实物型物理量，谈论它们是守恒的或不守恒的是不恰当的。有些实物型物理量总是守恒的，如电荷；而有些实物型物理量只有在特殊情况下才守恒，如物质的量（它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”是两个不完全等同的概念：“实物型物理量”是含义更广的概念。^[1]

在传统上，人们已经认识到上面所提到的电荷和物质的量是实物型物理量。然而，在本文中，我们感兴趣的是另一个实物型物理量：能量。

能量的实物型本质基于这样的事实：对于能量，有相应的密度和流（能流就是通常所说的“功率”）。能量的实物型本质也可以从能量的局域守恒这一事实中看出。确实，能量是一个守恒的实物型物理量。

III. 能量形式

“能量形式”这一术语通常与静止能、动能、热能、重力势能、结合能、辐射能、弹性势能、势能、电能、化学能、核能等大量不同的名称合在一起使用。细心的学生会感到困惑，想弄清楚包含在蓄电池中的能量是电能还是化学能。实际上，即使在一些著名的教科书中，对“能量形式”的定义也是彼此不同的。在一些教科书中^[2]的意思是，各种形式的能量可以相互转化；在另一些教科书中^[3]的意思是，各种形式的能量可以储存在某处；还有的教科书^[4,5]在使用这一术语时似乎同时意味着上述两种含义。因此，我们可以看出，能量形式这一概念具有颇为含糊的物理解释。结果是，这一概念的价值更多地体现在日常生活中，而不是在科学领域。这一节的目的是要提供一个能量形式的精确定义。

能量可以用两种完全不同的方式来加以分类^[6]：第一种分类是根据能量是如何变化的，或等量的能量是如何流动的（例如，能量流入或流出一个物理系统，

导致这个系统的能量发生变化)；第二种分类是根据能量是如何**储存**的。在第一种分类中，我们有诸如电能、化学能、热量、功等概念。在第二种分类中，我们有诸如内能、电场能、动能、势能等概念。遗憾的是，在许多教材中把这两种情况中的能量都叫作**能量形式**。

我们先来考虑第一种能量分类：能量变化或能量流动。**经验表明，能量总与至少一个别的实物型物理量同时流动**。这一表述表达了一条自然规律。这条规律可写为：^[1]

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

这里， I_E 、 I_Q 、 I_n 、 \mathbf{I}_p 和 I_S 分别表示能流、电流、物质的量流、动量流^[7,8]和熵流， φ 、 μ 、 \mathbf{v} 和 T 分别表示电势、化学势、速度和绝对温度。例如，能量通过导线与电荷一起同时流入烤面包炉（能流用坡印亭矢量场来确定）；能量与（燃料+氧气）的物质的量同时流入汽车的发动机；能量与动量一起流过拉动货车的绳子；能量与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“形式”转化为另一种“形式”。在上述例子中，我们分别谈及到电能、化学能、功和热量。顺便说一下，也可以用同样的方法按照在一个系统中与能量一起变化的其他物理量来进行能量形式的分类。这种分类的数学依据就是在热力学中大家所熟悉的吉布斯基本方程（Gibbs Fundamental Form）。^[9,10]

把**储存的能量**分解为不同的部分要基于另一种考虑：一个系统的能量总可以表示为该系统的其他变量的函数。例如，如果我们把这些变量记为 x_1 、 x_2 、 x_3 ...，则有 $E = E(x_1, x_2, x_3, \dots)$ 。如果适当选择变量，则系统完全能够用这个函数来描述。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]许多我们所熟悉的物理系统的能量函数可以分解为几个独立的项，每一项所依赖的变量在其他项中不出现。例如，有这样的函数： $E = E'(x_1, x_2) + E''(x_3)$ 。在这种情况下我们可以给能量函数中的每一项取不同的名称，从而可以把每一项叫作能量的一种“存在形式”。

我们以电容器为例来说明这种分类方式。电容器的能量可写为： $E(Q) = E_0 + Q^2/2C$ 。这里， Q 是电荷， C 是电容。式中右边第一项与 Q 无关；第二项与 E_0 无关，叫作“电场能”。如果把电容器的运动也考虑在内，其能量可写为 $E(Q, p) = E_0 + Q^2/2C + p^2/2m$ 。这里， p 是电容器的动量， m 是它的质量。式中

右边第一、二项前面已经提到； $p^2/2m$ 这一项与 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”）。

一般来说，只要系统的能量函数可以分解为几个独立的项，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函数不可以分解为几项独立的熵 S 、体积 V 和物质的量 n 的函数。一般地，对于任何能量转换器的能量函数，与能量转换中的各种能量形式相关的变量都是不独立的。例如，把热量 TdS 转换为功 $-pdV$ （这里的 p 表示压强）的热机的能量函数不可能分解为两项独立的 S 和 V 的函数。

不同于根据能量函数的分解来命名各种能量形式，能流则总可以按照 (1) 式来分类。因此，根据能流来对能量进行分类比把储存能分解为不同项来对能量进行分类更具有普遍性。然而，把这些能流所对应的能量叫做“能量形式”是不妥的。说“不同形式的能量”是会使人误解的。关于这一点，我们将在下一节来讨论。我们主张，用一种更新的能量分类法——用能量携带者的概念——来对能量进行分类。

IV. 能量携带者

如果我们接受上述对能流分类的方法，那么普遍的能量形式的概念错在哪里呢？回答这一问题的最好方法是先考虑对另一个问题的回答，例如，“说不同形式的电荷错在哪里？”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的离子电荷“转换”成电子电荷（或相反）？或者为什么不说在 β^+ 衰变中质子电荷转换成正电子电荷？显然，给电荷以不同的名称会给人以错误的印象：它们是不同的物理量。其实，上述每种情况下只涉及一个相同的物理量：电荷。如果我们对待能量的实物型本质像对待电荷的实物型本质一样认真的话，那么，说不同形式的能量与说不同形式的电荷一样会导致误解。并不是通过电磁场、燃料输送管或房间的墙壁所传递的能量不同，而是在各种情况下与能量一起流动的别的实物型物理量不同。因此，在所谓的“能量转换器”（energy transformer or energy converter）中，能量实际上并没有转换（transformed or converted）。正确的说法是，与能量一起流动的别的实物型物理量在这种装置中进行了**交换**（exchanged）。例如，能量与煤和氧气[科学地

说，能量与煤和氧气的物质的量（单位是摩尔）]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“能量形式”这一术语在表达上述定律时会引起误解，并且是不妥当的，那么，用什么术语比较好呢？这里，我们可以再提一下有关电荷的类似问题，从而可以明确地得出这个问题的答案。这个答案就是**能量携带者**。我们可以这样说，当能量流动时，另一“携带着”能量的实物型物理量也随之流动。这一实物型物理量就是“能量携带者”。

当某种东西本身不变而仅改变携带者时，谈论它的形式是不妥当的。例如，考虑在运输过程中改变携带者的货物，如土豆。土豆从农田被运到家里通常需要经过很长的旅程：它们从农田被拖拉机运送到载货卡车上，再被载运到装载站，在那儿被装载在大货车上，再被转运到另一个城市，再被装载到运送卡车上，然后被送到超市，最终被运送到顾客手里。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”“大货车土豆”“运送卡车土豆”“超市土豆”等标签。另一方面，说土豆在从农田运送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“土豆形式”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，没有人会想到旅途中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“热量”或“功”时所做的事。

把能量和土豆相类比，来说明我们的论点，这并不像人们也许会认为的那样荒谬可笑。这样类比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；或者说，土豆是有形的实物，而能量是抽象的概念。这个类比的有效性仅基于这样的事实，即对能量和土豆我们都可谈及密度和流。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，或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。如果我们对它用得不过分天真，会给我们带来很大的好处。

像一个载货器，（比如载货卡车）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可多可少，

如 1kW 或 10kW，其多少是随电势差的大小而定的。因此，电势差是能量携带者“电荷”（electric charge or electricity）**载荷**能量多少的量度。电势差是**能量载荷因子**（energy load factor）。许多大家熟悉的强度量也是能量载荷因子。例如，绝对温度 T 是熵流携带能量多少的量度，化学势 μ 是摩尔流（译者注：物质的量流）携带能量多少的量度。如果注意到许多强度量作为能量载荷因子的作用，那么很容易发现它们的重要性。

用能量携带者和能量载荷因子的图像来描述传统地被称为“能量转换器”的那些装置是特别有用的。按照传统的说法，能量以一种形式流入这类装置，再以另一种形式从这种装置流出。遗憾的是，这种说法使人想到，在这种装置中，一种物理量转化为了另一种物理量。然而，实际上只不过是在中，装置中改变了能量携带者。换句话说，在这种装置中，能量由一种携带者传递给了另一种携带者。因此，“能量收发器”（energy transceiver）这一名称更适合于表述这种装置的真正功能。

在日常的自然和技术环境中大量能量收发器的例子。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**（energy flow diagram），我们容易用这种图示的方法来描述能量从某一装置或某一空间区域传递到另一装置或另一空间区域的情况。这种图向我们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（小学五、六年级的学生）开设的课程^[12,13]已经用这种图解法为基础设计出来了，并已有了与之相配套的教科书。^[14]我们关于能流图的初等应用的更详细的论述已在别的期刊中发表过。^[12-14]

V. 小结

能量是实物型物理量，分布在空间区域，可在空间区域流动。

由于“能量形式”这一术语造成了把不同能量形式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，我们借助于这样一条经验，即能量总与至少一个别的实物型物理量同时流动。这表明，如果我们能对能量传递作一恰当的描述，我们必须关注与能量一起流动的实物型物理量。

不用“能量形式”这一术语，用更合适的方法，即把能量想象为一种“实物”，这种“实物”只能被一种叫作**能量携带者**的另一种“实物”从一个地方“携带”

到另一个地方。在这一图像中，能量没有从一种形式转化为另一种形式，而是转换了它的携带者。这样，我们就得到了一个严格有效的、简单和容易理解的、甚至可以呈现给小学生的关于能量传递过程的图像。

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. I, 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. diSessa, *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 aufder Grund/age 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).

[陈敏华 2022 年译自 *Am. J. Phys.* **51** (12) , December 1983; 2022 年 8 月 1 日, 深圳]