

# 试论一种新的能量观

吴国玠<sup>1</sup> F. Herrmann(何富理)<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 上海理工大学, 上海 200093; <sup>2</sup> 德国卡尔斯鲁厄大学)

(收稿日期: 2010-10-10)

**摘要** 本文论述一种新的能量观. 作者建议使用“能量载体”的概念来代替“能量形式”. 因为后者容易产生某种误导作用. 事实上, “能量载体”这个概念有利于反映能量的本质. 它不仅能够用来清晰地描述能量的输运、交换和储存过程, 而且其科学含义精确, 表述通俗易懂. 作者认为, 新的能量观念会有助于改进物理教学并推动物理学自身的发展.

**关键词** 能量; 物质型物理量; 能量载体; 能量转载体; 能量供体; 能量受体; 能流图

## 1 引言

人们通常说, 能量以不同的形式存在, 而且在各种物理过程中不同能量形式之间还会发生相互转换. 然而, 如果我们仔细地分析一下就不难发现, 用能量形式(energy form)的概念来思考和讨论问题其实并不恰当, 有时甚至还会起到某种误导作用. 能量形式的概念容易使人们误认为存在着不同类型的能量, 或者认为能量善于“变脸”, 会以多种不同的面貌出现, 从而忽视这样一个简单而正确的物理概念: 能量自身实际上是一种不变的东西. 事实上, 当人们试图去定义并区分各种能量形式的时候就必然会感到棘手. 请问, 在一个氧分子所具有的能量中, 有谁能说得清楚哪一部分是动能、势能、热能、化学能、电能或磁能呢? 谁又能说得清楚哪些部分是有序的, 哪些部分是无序的能量呢? 此外, 许多人往往不明白两种不同的能量分类方法(根据储存的能量或根据流动的能量进行分类)之间的区别. 不少物理学家甚至还无法解释清楚为什么像“能量以热量的形式储藏”这样的提法在物理学上是不正确的.

从形式上去区分能量其实是完全不必要的. 要区分能量的形式有点像要去区分水的不同形式: 海水、河水、雨水、自来水、矿泉水、凝结水、地下水、污水和纯净水等. 水的这些分类或不同形式并不表明水本身出现任何不同或者有任何特殊. 水其实只有一种: 液态  $H_2O$ . 上述各种水的“形式”所透露的其实只不过是关于水的一些附加信息: 水来自何处, 它作何用途, 它以何种方式输

送, 以及它含有何种添加物或杂质, 等等而已. 不难看出, 所谓“水的形式”这种提法本身就不太恰当.

能量的情况与此完全相同. 能量其实也只有一种. “能量形式”的提法本身同样是欠妥的, 因为实际上并不存在着不同形式或类型的能量.

## 2 能量是一个物质型的物理量

大家知道, 有一类称作广延量的物理量, 包括电荷量、质量、动量、物质的量以及熵等, 它们的整体值都等于各部分值的和, 而且都可以确定它们各自的密度值. 由于这些在整个自然科学中起着极其重要作用的物理量可以连续地分布在空间内, 并且可以在空间内流动, 因此具有一种有利于我们对它们进行分析研究的共同特点, 即我们可以像处理物质那样地处理它们. 换言之, 我们可以在研究过程中采用一种“物质模型(substance model)”, 把这些量想象成一种“物质”来进行处理. 为了突出这一共性, 我们不妨为它们起一个能够反映这种特性的名字: 物质型物理量(substance-like quantity). 应当指出, 这里所说的物质在严格意义上应该是指连续介质, 即一种不考虑物质分子之间实际存在的空隙而连续地分布在空间的假想物质.

如果一个量是物质型的, 那么“它被包含在某一空间区域内”的说法是有意义的. 这就是说, 人们想知道该空间区域所包含的这个物理量有多少数量, 并将其变化与流入或流出该区域的同一物理量相联系起来的想法和做法是有道理而且行得

通的.事实上,我们还可以这样认为,一个物理量只有当它属于物质型时,才能够根据它是否遵守连续性方程来谈论它是否局域守恒(local conservation).反之,如果我们去谈论压强、温度、速度或电场强度等强度量(非物质型物理量)的守恒或不守恒问题,那就不正确了.有些物质型物理量(例如电荷量)始终是守恒的;然而,另一些物质型物理量只有当它们处于某种特殊条件下时才是守恒的.比如,物质的量(amount of substance)只有在不发生化学反应的条件下才是守恒的.由此可见,物质型物理量和守恒的物理量(conserved quantity)的概念并不完全等同,前者的综合性更强或覆盖面更广一些.

前面所述的电荷量和物质的量这两个量在传统上都被认可为广延量或物质型物理量.不过在本文中,我们要着重讨论的是另外一个物质型物理量:能量.能量具有类似于物质的性质源于这样的事实:能量密度和能量流等量都是实际存在着的.还有一点很明显的是,能量的局域守恒也是成立的.因此,能量既是一个物质型的量,又是一个守恒的量.

### 3 关于能量形式的定义和分类

为了进一步说明能量形式这个概念及术语应予摒弃的理由,我们不妨先来审视一下它在目前各种文献资料里的定义和分类.我们将会发现,在不同的物理书籍中,关于能量形式的定义事实上各不相同.

实际上,即使在一些著名的物理教科书里,关于“能量形式”这个术语的定义也存在着明显差异.有些教科书认为能量形式的定义应该与能量交换的各种方式有关,另一些则认为这个定义应该与能量储存的各种方式有关,还有一些书中所使用的能量形式这个术语看上去与上述两种方式都有关.由此可以看出,能量形式这个概念本身的物理含义就相当模糊,因而与其说它具有科学上的价值,还不如说它更接近于日常生活用语.

能量形式一般按照两种完全不同的方式进行分类.第一种根据能量变化,或者说,根据能量流动(能量流入或流出一个物理系统使得其中的能量含量发生变化)来进行分类.此时能量可分为电能、化学能、热能和功,等等.第二种则根据能量如

何储存来进行分类.此时所涉及的形式有内能、电场能、动能和势能等.可惜,有不少书籍把这两种情况下的能量形式混为一谈.现在来讨论第一种将能量区分为各种能量流的分类方法.经验告诉我们,能量从不单独流动,它总是与至少一个其他物质型物理量相随着一起流动.这个陈述所表达的其实是一条自然定律.它可以书写成如下数学形式,即吉布斯(Gibbs)关系式

$$I_E = \Phi I_Q + \mu I_n + v I_p + T I_S \dots \quad (1)$$

式中, $I_E$ ,  $I_Q$ ,  $I_n$ ,  $I_p$ 和 $I_S$ 分别代表能量流、电荷流、摩尔流、动量流和熵流; $\Phi$ ,  $\mu$ ,  $v$ ,  $T$ 则分别代表电势、化学势、速度和绝对温度.例如,能量流与电荷流同时流经导线而进入电炉;能量与物质的量(燃油和氧气)一起流入汽车发动机;能量与动量一道流经绳子而拉动拖车;能量与熵相伴同时流过房屋的墙壁,等等.在这些情况下,人们通常会根据与能量一起流动的那个物理量,来谈论能量采取这样或那样的“形式”进行传输或转换.在上述例子中,人们分别把这些不同“形式”的能量称为电能、化学能、功和热.

将储存的能量细分为各个不同的部分则基于另一种考虑:一个系统的能量总是可以表示为该系统的某些其他变量的函数.例如,我们若用 $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , ... 来表示这些变量,便可以写出它们的能量函数 $E = E(x_1, x_2, x_3, \dots)$ .如果变量选得合适,那么整个系统就可以用这样的能量函数(energy function)来完全地加以描述.一般说来,只要一个系统的能量函数可以展开为一些分立的单项之和,而且每一项都各有各的自变量,相互独立,那么我们就能够为这个代表着该系统能量的和式中的每一项起一个不同的名称,从而得到不同的能量“存在形式”.可惜,情况并非总是如此理想.许多重要的物理系统不允许做这样的能量分解.比如,理想气体的能量就是变量熵 $S$ 、体积 $V$ 、以及物质的量 $n$ 的不可分解的函数.事实上,任何能量转换装置的能量函数一般都是不可分解的.各种热力发动机将热量 $TdS$ 转换为功 $-pdV$ (此处 $p$ 表示压强),它们的能量函数当中的自变量 $S$ 和 $V$ 都不能够做这种分解.

相比之下,能量流倒总是能够根据公式(1)来进行分类的.因此,根据能量流来进行分类更加简单易行.不过必须指出,我们并不赞成把由此而区分开来的各种能量流称为不同的“能量形式”.那

么其理由何在呢?说能量具有不同的形式究竟错在哪里呢?在回答这个问题之前,我们不妨先考虑一下如何回答另一个问题:“说电荷具有不同形式究竟错在哪里呢?”或者换一种问法,我们为什么不根据电荷在传输过程中所使用的载体来替电荷起一些像“电子电荷”、“质子电荷”、“氯离子电荷”那样的不同名称呢?又如,我们为什么不设在蓄电池的电极处离子电荷“转换”成电子电荷,或反过来?或者为什么不设在 $\beta^+$ 衰变中质子电荷转换成正电子电荷呢?很明显,将电荷冠以不同的名称容易使人误认为这些名称表示着不同的物理量;而事实上在上述所有情况下都仅仅涉及一个相同的物理量——电荷,所不同的只是电荷的载体而非电荷本身。

如果我们对待能量能够像对待电荷那样严谨的话,那么就不难发现,谈论能量的不同形式会像谈论电荷的不同形式一样起误导作用。流过电磁场、燃油管路或房屋墙壁的能量本身并没有什么不同,所不同的只是在各种情况下随能量一起流动的那些其他的物质型物理量。使得能量被称作动能的原因并非该能量本身有何特殊,而是因为伴随着或携带着该能量的是动量;被称作热能的能量也不是由于它与其他能量有什么两样,而是因为伴随着或携带着该能量的是熵(热)。容易看出,这里所产生的差错实质上就是把那些本来属于动量、熵或其他物质型物理量的性质误认为是能量的属性。

由此可知,在那些所谓的“能量转换器”内,事实上并不会发生什么能量的转换。正确的说法应当是,在此类装置内,实际发生转换的是那些伴随着能量一起流动的其他的物质型物理量。

#### 4 能量载体和能量转载体

如果我们同意不再使用术语“能量形式”,那么应该选用什么样的术语来替代它比较好呢?回顾一下前面关于电荷的讨论,答案就会立即呈现在我们的面前,那就是使用“能量载体(energy carrier)”来取而代之。我们可以说,随同能量一起流动的那个物质型物理量“运载”着能量流动。它是一种“能量载体”。

当某种东西只是更换其载体而它自身并没有发生变化时,去谈论这种东西的形式显然是不合适的。例如,在把煤从矿井输送到一台普通锅炉内

的过程中需要不断更换它的运输工具。它们可能包括矿车、传送带、火车、船舶、卡车和手推车等。很明显,没有人会想去给每一段路程中的煤贴上诸如“矿车煤”、“传送带煤”、“火车煤”、“船舶煤”、“卡车煤”等不同的标签。与此相反,如果人们说煤在从煤矿到锅炉的输送路途中多次改变了运载工具或载体,倒是十分贴切和自然的。容易看出,“煤的载体”的概念是合理的,而“煤的形式”的概念则是不合理的。相应地,“能量载体”的概念是合理的,而“能量形式”的概念则是不合理的。

能量载体运载的能量可多可少,就像卡车运载货物可多可少一样。例如,2A 电流能够运载 1000W 也能够运载 10W 的能量流,量的多少取决于电势差或电压的高低。可见,电势是能量载体“电(荷)”能够运载多少能量的一种量度。于是,我们可以把电势称作为“能量载荷因子(energy load factor)”。其他一些强度量也是能量载荷因子。比如,绝对温度  $T$  是熵流能够运载多少能量的一种量度,而化学势  $\mu$  是摩尔流能够运载多少能量的一种量度。这些强度量所起的能量载荷因子的作用使得它们在能量的输运过程中变得十分重要。

能量载体和能量载荷因子的概念对于描述前面提及的“能量转换器”特别有用。按照传统的说法,能量以一种形式流入能量转换器并以另一种形式流出。这种说法容易使人认为在该装置里一个物理量转换成了另一个物理量。然而,实际上能量只不过在装置里改变了它的载体而已。换句话说,能量在那里从一个载体转移至另一个载体。因此,使用名称能量转载体(装置)(transcarrier)来描述此类装置的实际功能更为合适。

在人们日常生活和技术环境中,到处都充满着能量转载体的例子。比如,在电灯泡里,能量从载体“电荷”转载到载体“光”上;在电动机里,能量从载体“电荷”转载到载体“角动量”上;在发电站里,能量从载体“物质的量”转载到载体“电荷”上;在热机里,能量从载体“熵”转载到载体“角动量”上,等等。上述电灯泡、电动机、发电机和热机等都是能量转载体。

#### 5 能流图及其构成单元

有了能量载体和能量转载体的概念之后,我们还可以用图形的方式来表示能量从一个装置或空间区域传输到另一个装置或空间区域的过程。

这种图形称为能流图(energy flow diagram). 图 1 所示为建筑物供暖系统的能流图. 在那里, 能量与能量载体(energy carrier)热水(焓)一起从锅炉流到各个散热器. 为了统一和方便起见, 我们把锅炉称作能量供体(energy supplier), 把散热器称作能量受体(energy receiver). 图 2 所示为汽车动力系统的能流图. 其中, 油箱是能量供体, 发动机是能量受体, 而汽油(物质的量)是能量载体. 在上述图中, 能量供体和受体分别用方框表示, 宽的空心箭头将这些方框连接起来, 以表示能量, 细的实线箭头则用来表示能量载体. 除了能量供体、载体和受体这三个构成要素之外, 真实自然环境和人工设备装置的能流图往往更复杂一些, 还会包括能量转载体这个要素. 在图 3 所示的例子中, 能量载体转换了三次. 其中的水轮机、发电机和电灯泡都是能量转载体. 图 4 所示为部分常见的能量转载体, 如锅炉、电灯泡、发动机和发电机等. 事实上, 能量转载体兼备能量受体和能量供体的功能, 而且几乎所有的能量受体都是能量转载体. 综上所述, 能流图的构成应该包括能量供体、能量载体、能量转载体和能量受体四个基本要素或单元. 能流图中不同的能量载体和转载体通常与不同的物理学分支学科相对应. 在实践中, 能流图为我们分析研究与能量有关的一些问题提供了一种简易便捷的图示方法.

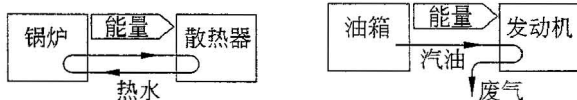


图 1 供暖系统的能流图



图 2 汽车动力系统的能流图

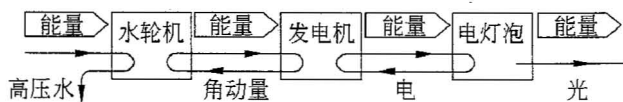


图 3 能量在流动过程中, 能量载体转换了三次

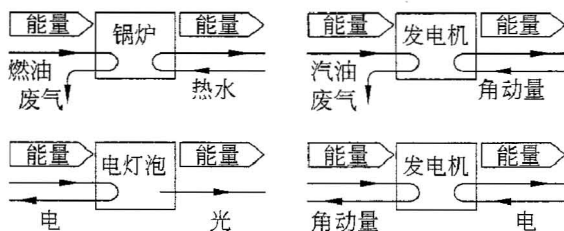


图 4 几种常见的能量转载体

应该指出, 科学概念必须依靠语言文字表达其意义, 名词术语是语言的基石、概念的符号. 译名如果不妥, 势必会影响整门学科表述的准确达

意, 甚至造成误解. 本文作者在征求多方意见之后将能流图中四要素以前的译名“能量携带者”、“能源”、“能量接收器”和“能量收发器”分别改为“能量载体”、“能量供体”、“能量受体”和“能量转载体”, 还将此前的译名“实物型物理量”改为“物质型物理量”.

## 6 结论

能量是一个物质型的物理量. 由于“能量形式”的概念容易引起误解, 所以必须用一个更为合适的概念来取代它. 通过分析那些伴随着能量一起流动的其他物质型物理量所起的作用, 作者认为应当采用术语“能量载体”来代替“能量形式”. 在新的概念框架里, 能量被想象成一种“物质”, 这种“物质”只有当它装载到另外一种叫做能量载体的“物质”上时, 才能从一处流动到另一处. 这就是说, 能量在传输过程中并没有从一种形式转换成另一种形式, 而只是改变了它的载体, 即从一种载体转载到另一种载体上. 由此, 我们得到了一种关于能量传输过程的既严格有效, 又通俗易懂的描述. 更为重要的是, 根据新的能量观念, 我们还能够方便地揭示出物理学各分支学科之间在结构上的相似性或共同规律, 从而不仅直接有利于改进物理教学, 而且对于促进物理学自身的发展也具有积极意义. 不过, 有关这方面内容的讨论, 将留待另文处理.

## 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] F. Herrmann. Energy density and stress: A new approach to teaching electromagnetism. *American J. Physics*, 1989, 57, 707~714
- [5] F. Herrmann and G. Job. The historical burden on scientific knowledge. *Eur. J. Phys.*, 1996, 17, 159~163
- [6] F. Herrmann and G. Job. Chemical potential—a quantity in search of recognition. *Eur. J. Phys.*, 2006, 27, 353~371