



论物理量的守恒和不守恒

陈敏华

浙江省绍兴市鉴湖中学,浙江 绍兴 312031



作者简介:陈敏华,男,1962年生,浙江绍兴人,特级教师,正高,博士。

摘要:能量、动量、电荷和熵都是广延量。广延量有守恒量和不守恒量之分。在物理教科书中,存在着对物理量的守恒和不守恒的错误表述。本文提出了纠正这些错误表述的建议。

关键词:守恒;广延量;强度量

中图分类号:G633.7 文献标识码:A 文章编号:1003-6148(2015)5-0001-4

1 引言

根据吉布斯(Josiah Willard Gibbs, 1839—1903)基本方程(Gibbs fundamental form)^[1]

$$dE = vdp + \varphi dq + TdS + \dots, \quad (1)$$

描述一个物理系统的某种性质的基本物理量是广延量和强度量。广延量与系统的体积有关,具有相应的密度,是可加的。强度量反映了系统的局域性质,是不可加的。从(1)式我们可以看出,动量 p 是描述物理系统所含运动多少的物理量,电荷 q 是描述物理系统所含电的多少的物理量,熵 S 是描述物理系统所含热的多少的物理量。这里特别要指出的是,所谓的运动、电和热指的是物理系统的某种性质,而不是物理系统本身。

通过对物理量的测量我们发现,对于某些广延量(如,动量、电荷和能量等),某一系统的这些量的增加(或减少)完全是由于别的系统的这些量的减少(或增加)所引起的,这种广延量我们叫做守恒量(conserved quantity)。然而,不是所有广延量都是守恒的,例如,熵是不守恒的广延量。

显然,对于强度量来说,无所谓守恒或不守恒。

在现行物理教科书中,对物理量的守恒和不守恒的表述主要存在以下三方面的不足:

- 1)把守恒量当作物质;
- 2)不关注对不守恒定律的表述;

3)在对守恒定律的表述中有时加上关于系统的条件。

这些不足不利于学生对物理学本质的理解。本文将分别讨论教科书中出现的上述三个方面的问题,并提出相应的改进意见。

2 守恒量不是物质

一个物理实在具有多种物理性质。物理学家通常用物理量来描述物理实在的某些物理性质。从理论上讲,无论我们用多少个物理量来描述一个物理实在,我们总不能把它的所有物理性质都描述出来。因此,物理量不能等同于物理实在。

尽管物理量不是物理实在,但是,我们用物理量所描述的物理性质是同我们对物理实在的直觉联系在一起。为了对某些物理概念有直观的理解,我们通常将广延量想象为像实物一样可以储存和流动。

虽然我们可以把广延量想象为实物,但我们绝不能将它们误认为实物或物质。物质是客观存在的,而物理量是人们为了描述物质的某些物理性质而创造出来的。然而,在现行的物理教科书中,我们可以看到一些把守恒量当作物质的表述。现列举如下:

2.1 把能量当作物质

根据普朗克(Max Planck, 1858—1947)的能量量子化理论,振动着的带电微粒是以最小能量

基金项目:本文为浙江省教科规划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。

值为单位一份一份地辐射或吸收电磁波的,这个不可再分的最小能量 $h\nu$ 叫做能量子。显然,电磁波是物理实在,而能量子是描述电磁波的一个物理量。

然而,在一些物理教科书中,却把能量子当作光子这种物质了^[2]。“……光本身就是由一个个不可分割的能量子组成的,频率为 ν 的光的能量子为 $h\nu$, h 为普朗克常量。这些能量子后来被称为光子(photon)。”

以上表述之所以是错误的,是因为光子的能量特征不能替代它的全部特征。实际上,电磁辐射是一种物质,单独用能量来描述电磁辐射是不够的。光子是电磁辐射的基本组成部分,显然,这个基本组成部分不是能量子。光子还需要用除了能量以外其他的物理量(如,动量、角动量和温度等)来描述。

因此,我们不能说“光子就是能量子,就是 $h\nu$ ”,而应该说“一个光子的能量为 $h\nu$ ”。

2.2 把电荷当作物质

在现行教材中,^[3]对电、电荷和电荷量这三个名称的使用是很混乱的。教材中用“电”这个词来“表示琥珀经过摩擦以后具有的性质”,可后来又增加了“电荷”和“电荷量”这两个词,并指出:“电荷的多少叫电荷量”。显然,电荷量是一个物理量。那么,电荷就只能指电这种性质了,也就是说,电荷与电是同义词。然而,我们发现,现行教材给“电荷”一词赋予了多种含义:在“自然界的电荷只有两种”的表述中,把“电荷”当作一种物质,因为如果它指的是一种性质(电的别名)的话,它只有电这种性质;如果它指的是一个物理量(电荷量的别名)的话,它应该有正、负和零三种。在“电荷守恒定律”的表述中,把“电荷”又当作一个物理量,因为守恒是对物理量来说的,而不是对物质来说的;在对点电荷的定义中,又把电荷当作带电体。总之,教材作者一会儿把“电荷”当作物质,一会儿又把它当作物理量,实质上是对物理量和它所描述的物质的混淆。

出现这种错误表述是有历史原因的。在历史上,美国杰出的政治家和科学家富兰克林(Benjamin Franklin, 1706—1790)曾把电荷当作物质,并提出了“电液”(electrical fluid)的概念和单流质模型(one-fluid model)。这在当时是一大进步。然而,现在看来,电不是物质,而是物质的一种性质。

我们建议,把电荷与电荷量作为同一个概念

的两个不同名称,即它们都是物理量,从而把“电荷守恒定律”理解为“电荷量守恒定律”。

2.3 把磁荷当作物质

磁荷也是一个守恒量。这个物理量麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)早就提出过,当时他把它叫做磁量(amount of magnetism):“磁体的一个极的磁量一定等于另一个极的磁量,但符号相反。更一般地说,每一个磁体的总磁量(代数和)为零。”^[4]本来,有了磁荷这个物理量,我们就可以像定义电场强度一样定义磁场强度($\mathbf{H}=\mathbf{F}/q_m$)。然而,人们由于找不到携带净磁荷的粒子(或者说磁单极子),并误认为磁荷就是这种物质,因而把磁荷这个重要的物理量抛弃了。这样,原本可以教给中学生的磁场强度这个物理量就被放到大学里去教了。并且,在大学教材中人们都先引入磁感应强度 \mathbf{B} , 然后再根据 \mathbf{B} 和磁化强度 \mathbf{M} 来定义 \mathbf{H} , 使得 \mathbf{H} 失去了它本来应该有的直觉意义,成为一个很难懂的物理量。在中学物理教材中,在向学生解释为何不引入磁场强度时也出现不恰当的表述。例如,有教材是这样解释的^[5]:“与电场强度相对应,我们本可以把描述磁场强弱的物理量叫做磁场强度。但历史上磁场强度已经用来表示另一个物理量,因此物理学中用磁感应强度(magnetic induction)来描述磁场的强弱。”“但是,N极不能单独存在,因而不可能测量N极受力的大小,也就不可能确定磁感应强度的大小了。”实际上,我们很容易测出N极在磁场中受到的力。我们只要将一根细长的磁针的一个极放入被测的磁场中,就可以测出磁极在该处受到的磁场力。更重要的是,将磁荷与电荷这两个物理量类比后,关于磁的公式与电的公式完全相同(包括磁的库仑定律),并且电场和磁场的理论可以一直平行地发展下去。^[6]反过来,如果没有磁荷概念,我们就不能定量地描述永久磁体,磁场强度就变成了一个很抽象的物理量了。

我们建议,在中学物理教材中引入磁荷和磁场强度这两个物理量,在引入磁场强度后再引入磁感应强度,让学生知道磁场强度和磁感应强度都是用来描述磁场强弱的。

3 不守恒量同样重要

导致人们把有些广延量当成物质的主要原因是因为这些广延量是守恒的。相反,当发现某一广延量不守恒时,人们在抛弃把这一广延量当成物质的错误观念的同时,也抛弃了这个广延量。描

述热的多少的物理量熵就有过这样的历史性遭遇。

在 18 世纪,人们把描述热的多少的物理量叫做热质(caloric)。当时,人们普遍相信守恒原理。人们同样认为,热质在所有热学过程中应保持守恒。然而,有许多现象表明,热质是不守恒的。其中最主要的现象是摩擦生热。人们发现,摩擦作为热的源泉,能产生出不可穷尽的热。他们认为,任何与外界隔绝的物体能够无限制地提供出来的东西,决不可能是具体的物质。因此,除了把热看作是物质的“运动”以外,似乎很难把它看作是其他任何东西。热质说当然是错误的。然而,人们在否认热质说的同时把它作为描述热的多少的物理量这一合理成份也抛弃了。到今天为止,人们仍然不恰当地用一个能量型的物理量热量作为描述热的多少的物理量。能量型物理量热量描述的不是导致物体变热或因变热而使物体体积增大的性质(即热的多少的性质),而是导致物体质量变大或惯性增大的性质(即与能量有关的性质)。由此看来,热质说的错误是由于人们把它看成是物理实在了。如果把热质仅仅看作是一个物理量,用这个物理量来描述热的多少是正确的。我们可以想象,如果热质这个物理量像电荷、动量和能量一样也是守恒的,当时人们可能不会抛弃它了。

抛弃热质这一物理量给物理学带来的损失是巨大的。最可惜的是,当时人们把卡诺原理的合理性也否认掉了。法国工程师卡诺(Nicolas Léonard Sadi Carnot, 1796—1832) 在研究热机效率时提出了卡诺原理:热机所产生的动力不是由于热质的消耗,而是由于热质从高温物体到低温物体的传递。他把蒸汽机与水车类比。他认为,我们可以恰当地把热的动力和瀑布的动力相比;瀑布的动力依赖于它的高度和水量,热的动力则依赖于热机所用的热质的量和交换热质的物体之间的温度差,这一温度差可以称为热质的下落高度。显然,如果我们不把热质看作是一种物质,而把它看作是一个物理量,如果我们承认热质是一个不守恒的广延量,那么,卡诺原理是完全正确的。难怪人们经常这样评价卡诺原理:他由错误的观念出发却得出了正确的结论。

抛弃热质这一物理量给物理课程带来的损失也是巨大的。在现行物理教材中,一方面,没有将熵看成是描述热的物理量,而把它描述为“与 Ω 相关的物理量”(Ω 表示一个宏观状态所对应

的微观状态的数目);另一方面,没有从不守恒的角度来表述与熵有关的规律,而把这一规律描述为“熵增加原理”。^[6]

一方面,我们建议用一种直观的方式把熵教给中学生。熵可以被想象为包含在物体中使我们感到热的那种“东西”,它可以在温差的驱动下从高温物体流到低温物体,也可以在热泵的驱动下从低温物体流到高温物体。

另一方面,我们建议用“熵不守恒定律”来代替“熵增加原理”。一个守恒的物理量应该具有两方面的特性:它既不会产生,也不会消灭。熵在守恒性上缺少了“不会产生”这一特性。因此,我们可以把“熵不守恒定律”表述为:熵会产生,但不会消灭。而熵增加原理,仅指出了它“会产生”的一面,没有指出它“不会消灭”的一面。

4 守恒是对物理量来说的

对于某一系统内的每一个广延量 A ,都具有关系式

$$dA/dt = I_A + \Sigma_A \quad (2)$$

式中 I_A 是 A 的流, Σ_A 是在所研究的区域内 A 的产生率(或消灭率)。式(2)表明,系统内的 A 的变化率由两个可能的原因引起,一是通过系统边界流入或流出的 A 的流 I_A , 二是系统内 A 的产生率或消灭率 Σ_A 。如果 Σ_A 等于 0,则 A 是守恒的。由此我们知道, A 是否守恒,跟系统无关,是 A 本身的性质。当然 A 是否守恒,这是通过对 A 进行测量后才知道的。

在现行物理教材中,对不同物理量的守恒定律的表达方式很不相同。例如:

机械能守恒定律:“在只有重力或弹力做功的物体系统内,动能与势能可以互相转化,而总的机械能保持不变。”^[7]

能量守恒定律:“能量既不会凭空产生,也不会凭空消失,它只能从一种形式转化为另一种形式,或者从一个物体转移到别的物体,而在转化或转移的过程中,能量的总量保持不变。”^[7]

电荷守恒定律:“电荷既不会创生,也不会消灭,它只能从一个物体转移到另一个物体,或者从物体的一部分转移到另一部分;在转移过程中,电荷的总量保持不变。”^[3]

动量守恒定律:“如果一个系统不受外力,或者所受外力的矢量和为 0,这个系统的总动量保持不变。”^[2]

纵观上述物理量的守恒定律(下转第 6 页)

度系数”三个物理量的测量,就转化为对“最大形变量 x ”和“平衡位置形变量 x_0 ”的测量。只要 x 为 x_0 的两倍,就完成了实验验证。

我们发现,两个课堂结构各有特色,探究重点在实验和理论上有所不同侧重,教师可以依据学生的基础和课堂表现适当地加以采用。

4 两个实验技巧

①在示意图中,利用穿过弹簧的软绳释放钩码,可以很好地保证钩码在竖直方向上振动的稳定性。

②在示意图中,利用手机的录像功能记录实验过程,可以准确地捕捉钩码在最低点时指针所指的刻度值。如果手机有“慢镜头”功能,效果更佳。

5 教学感悟

在物理课堂上多让学生动手实验的意义,不仅在于提高学生的学习兴趣,更重要的是让学生体验和经历学习过程,学习和体会物理学的研究

方法。我们觉得中学物理教学应该把“逻辑推理+实验验证”的方法内化到学生的头脑中,这需要在课堂教学中不断强化,需要进行包含实验探究(或验证)环节在内的教学设计,而实验方案的突破则是改进教学设计的关键。

尽管开展中学物理实验的条件有限,我们还是可以充分利用基本的器材做“简单实验”。我们认为“简单实验”也能帮助师生出色地完成教学任务,还能让学生从学习中得到感悟:知识无处不在,简单的东西背后藏着深刻的物理规律,值得我们去探究。

参考文献:

[1]张维善,等.普通高中课程标准实验教科书《物理·必修二》[M].北京:人民教育出版社,2006.

[2]赵凯华,罗蔚茵.新概念物理教程·力学[M].北京:高等教育出版社,2004.

(栏目编辑 赵保钢)

(上接第3页)的表述,我们发现,教材的作者在描述有些物理量的守恒时加了关于系统的条件(如,机械能守恒定律和动量守恒定律),在描述另一些物理量的守恒时则没有加任何条件(如,能量守恒定律和电荷守恒定律)。其实,守恒或不守恒是对一个物理量来说的,而不是对系统来说的;一个物理量的守恒或不守恒,与系统无关;当某个系统的某个守恒量增加(或减少)时,一定有别的系统的这个物理量减少(或增加)了相同的数量。

因此,我们建议,对守恒定律的表达应采用以下简洁的方式:

能量守恒定律:能量既不会产生,也不会消灭。

电荷守恒定律:电荷既不会产生,也不会消灭。

动量守恒定律:动量既不会产生,也不会消灭。

对于机械能,它实际上是一个不守恒的量,它既会产生,也会消灭。当然,在某一条件下,它是守恒的,这正像熵在可逆情况下是守恒的一样。可是,过分地强调不守恒量在某一条件下的守恒性,会遮蔽它们本质上的不守恒性。

5 致谢

本文中的一些观点是笔者与德国 Friedrich Herrmann、Michael Pohlig 和瑞士 Hans U. Fuchs、Gary Bruno Schmid 等学者的讨论中形成的。在此,笔者向他们表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] J. W. Gibbs. On the equilibrium of heterogeneous substances. Trans. Conn. Acad. III(1875).

[2]张维善,等.普通高中课程标准实验教科书《物理·选修3-5》[M].北京:人民教育出版社,2010.

[3]张维善,等.普通高中课程标准实验教科书《物理·选修3-1》[M].北京:人民教育出版社,2010.

[4] J. C. Maxwell. Treatise on Electricity and Magnetism. Volume 2, 1873.

[5]赵凯华,陈熙谋.电磁学[M].北京:高等教育出版社,1984.

[6]张维善,等.普通高中课程标准实验教科书《物理·选修3-3》[M].北京:人民教育出版社,2007.

[7]张维善,等.普通高中课程标准实验教科书《物理·必修2》[M].北京:人民教育出版社,2010.

(栏目编辑 廖伯琴)