

通过热力学与电学的类比加深对于熵的理解

吴国玠¹, 皇甫泉生², 顾铮尧²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 理学院, 上海 200093)

摘要: 恰当地开展分支学科之间的类比是理解物理学的一条有效途径。在借鉴电荷概念引入热荷概念之后, 继而直接将熵定义为热荷量, 使之成为一个通俗易懂的物理量。以此为基础, 在电流与熵流的连续性、驱动力, 以及它们与能流之间的关系和电流与熵流在流动过程中的熵产生等方面对热力学与电学进行了较为全面的类比。这样不仅能凸显出热力学与电学的一些基本物理过程之间的相似性或共性, 以及客观世界的内在和谐性, 而且能更加鲜明地反衬出它们之间的差异即各自的个性, 从而加深对于熵的理解。

关键词: 类比; 熵; 热荷; 热荷量; 物质型物理量

中图分类号: O 055 **文献标志码:** A

A More In-Depth Understanding of Entropy by Drawing Analogy Between Thermodynamics and Electricity

WU Guobin¹, HUANGFU Quansheng², GU Zhengtian²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To make correct analogies between different branches of physics is an effective way to understand physics as a whole. By studying the concept of electric charge in electricity, the idea of thermal charge was introduced in thermodynamics. Entropy was then defined as quantity of thermal charge. Accordingly, it is now a physical quantity that is more understandable. Based on this, further comprehensive analogies were made between thermodynamics and electricity including the continuity and driving forces of electric current and entropy current, their relations with energy current as well as the entropy generated in both currents. Consequently, the analogies highlight the similarities and commonalities in the physical processes in thermodynamics and electricity, signify the harmony within the objective world, but also reveal the unique characteristics and differences between the two. Thus, we are allowed to understand entropy more in depth.

Keywords: analogy; entropy; thermal charge; quantity of thermal charge; substance-like quantity

众所周知, 类比(analogy)是一种认知过程。人们将陌生的对象与已经熟悉的对象作比较, 寻

找出两个或两个以上不同对象之间的相同点或相似点, 以便有效地将未知变为已知。因此, 类比

实际上也是人类进行思考时常用的一种逻辑推理方法。在研究和讲授物理学的过程中,人们也经常使用类比。例如,万有引力定律与库伦定律、平动与转动、电场与磁场、声波与电磁波、电容与电感之间的类比,等等。然而,除了局部或单项的类比之外,有没有可能在物理学各分支学科之间从整体上进行类比呢?具体地说,能否从它们的物理量、物理量之间的关系或数学结构、物理现象、描述物理现象的模型和术语,以及物理实验和应用技术装置等方面开展系统性的全方位类比呢?答案是肯定的。然而要想开展这种类比,就必须恰当地选择各门分支学科最基本的核心物理量,使得它们既能最大限度地展示各分支学科自身的特点,又能凸显出这些分支学科之间在结构上的相似性。在这方面,德国卡尔斯鲁厄理工学院编写的物理教程(简称KPK)^[1]为我们提供了一个值得借鉴的范例:在每一分支学科中选取一个能反映自己特征的广延量以及一个与之搭配的强度量构成一对所谓的中心物理量(central quantities)。比如,在力学和电学中分别选取动量与速度、电荷量和电势作为各自的中心物理量^[2]。其中动量和电荷量是广延量,而速度与电势则是强度量。每一分支学科中的两个中心物理量之间关系密切。这两个量本身虽然都不具有能量的量纲,但它们某种形式的组合却可以用来表示能量或能流强度(单位时间内流过的能量,即功率)。例如,速度与动量流强度(力)的乘积,角速度与角动量流强度(力矩)的乘积,电势差与电流的乘积,以及温度与熵流强度的乘积等都直接表示着能流强度(见吉布斯关系式)^[3]。也就是说,这样选择出来的一对对中心物理量使得力学、电学和热学等不同分支学科能够通过能量这根主线贯穿在一起。通俗点说,如果把这些物理量比作一个个牛鼻子环的话,那么人们就能用能量这根绳子穿过这些环来牵住物理学的牛鼻子。事实上,各门分支学科之间的这种可类比性所反映出来的既是物理学自身的精美,也是客观世界内在的统一与和谐^[4]。

1 熵的百年艰辛求真探索之路

自从克劳修斯于1865年以微积分形式提出了熵的概念后,人们发现孤立系统的熵只会增加而不会减少,亦即不符合物质守恒原理,不具有物质性。所以人们对系统状态量熵的解释一般都比较抽象:熵在宏观上是能量不可用程度的量度,

在微观上是组成系统的大量微观粒子无序度的量度^[5]。熵增原理使得熵成为描述自然界一切过程具有单向性特征的物理量,独一无二地拥有“时间之箭”的标志性称谓。其结果是使得熵的概念被蒙上了一层深奥莫测的神秘色彩,成为最难理解的物理量之一。在我国学术界有人给熵加上一个耐人寻味的后缀,称为“熵透脑筋”^[6]。无独有偶,在西方也流传着一句类似的戏言“如果你能搞定熵,那么你就能搞定一切(If you can live with entropy you can live with anything)”^[7]。世界各国物理教育界普遍认为,热学是教师最难教、学生最难学的课程之一。其中熵的概念是一个突出的难点。

为了改变这种被动的局面,一批欧洲科学家长期坚持不懈,努力求真探索。自1911年以来,他们不断尝试破解熵的宏观物理意义这个延续至今达一百五十多年的难题,其中包括英国的Callendar,德国的Job, Falk, Herrmann以及瑞士的Fuchs等知名物理学家^[8-9]。尽管各人的视角有所不同,比如:有人认为熵就是卡诺所指的热质(caloric);有人则认为熵就是热(entropy as heat);也有人认为熵就是人们在日常生活中所说的热或热量(quantity of heat),其数值表示物体所含热的数量,但是这些努力归纳起来有以下共同特点:他们都力图把熵的概念建立在人们对于热的直觉感知即感性认识的基础之上,而且直接将熵看作为是热的一种量度(这种量度不具有能量的量纲,因而并非能量);他们都主张将熵与温度放在一起组成热力学最基础的物理量(中心物理量),然后以此为出发点来阐述整个学科内容并开展教学。对于传统热力学来说,这些观念无疑是具有重大创新意义的突破。从微观上看,玻耳兹曼的熵关系式 $S = k \ln \Omega$ (式中: S 为宏观系统的熵值; k 为玻耳兹曼常数; Ω 表示系统内可能的微观态数)告诉我们,熵是系统内分子热运动无序性的一种量度。它与前面“熵是热的一种量度”的说法相合,因为热的本质就是分子热运动的宏观表现。容易看出,熵分布于物体的各个区域,它的整体值等于其各部分值之和,所以熵既是状态量,又是广延量。另一方面,从克劳修斯的熵定义式(微分形式) $dS = dQ/T$ (式中: Q 为热量; T 为热力学温度)中可看出,热量的传输总是与熵的流动相伴随。因此,各种热效应既可以认为是由于物体吸收或排出热量所引起的,也可以理解为是由于熵的输入或输出物体而造成的。这就意味着,熵是一个与热量密切相关

的物理量。不过这样的话，容易引起混淆的新问题就出现了：若将熵值视为物体含热的数量，那么它是热量吗？显然不是。首先二者的量纲不同：热量具有能量单位焦耳(J)，而熵的单位是焦耳/开尔文(J/K)；其次二者的类别也不一样，熵是状态量，而热量作为能量是过程量。那么它是“热质”吗？当然也不是。因为热质可以通过摩擦而无限地产生，所以它作为物质是不存在的，事实上也早已被学界彻底否定。概而言之，熵既非物质，又非能量。十分明显，熵(含热的量)与热量这两个在汉语词义上几乎完全相同的术语用来表示两个完全不同的概念，必然会产生混淆，使人困惑。顺便提一句，这个问题在有些英语文献中实际上表现得更为突出，在那里熵与热量的解释经常会使用同一个术语：quantity of heat。难怪在 KPK 热力学引入我国的过程中，熵作为物体含热量的新概念在理解和接受上遇到较大障碍，乃至举步维艰。那么究竟应该如何正确地理解熵呢？

2 熵其实是一个容易理解的物理量

笔者认为，借鉴电学中电荷的概念，在热力学中引入“热荷”的概念十分有助于解决如何理解熵的问题^[10]。热荷与电荷一样也是物质的一种属性，只不过它是一种与热相关的属性。热荷同样没有质量，同样不能离开物质而单独存在，而且同样可以量化，它的数量就是熵。这就是说，熵就是热荷量，与电荷量相对应。热荷的概念实际上十分简单，它就是人们在日常生活中直观感受到的热的概念：它可以通过摩擦、燃烧或通电等过程而产生，可以存储在暖房或保温瓶内，可以自发地从高温处向低温处流动，但是它却无法被消灭。不过既然如此，那么为什么要为热另外起一个专门的名字呢？这是因为在物理学中使用热荷这个术语可以带来显而易见的益处：首先，“熵就是热荷量”使得熵有了一个基于直观的简单而清晰的定义，变得通俗易懂，从而移除了热力学教学上长期存在的一大障碍；其次，热荷量(quantity of thermal charge)与热量(quantity of heat)这两个虽然都与热密切相关但却又截然不同的物理量得以清晰地区分开来，彻底消除了之前的熵概念可能引起的冲突或混淆；第三，热荷量与电荷量的直接对应使得热学与电学之间的类比能够

从根基上开始，变得更加全面而且深入。

热现象其实就是与热荷的产生、分布和流动密切相关的现象。尽管热荷并非物质，但它随着物质分布在各个空间区域内。由于任何可逆过程都是等熵过程，所以如果 A 单元和 B 单元的相互接触经历了一个可逆过程，那么 A 单元减少多少熵，B 单元必定会增加多少熵。这一过程可视为热荷从 A 单元流入了 B 单元。换句话说，热荷可以像气体和液体以及电荷和动量那样从一个空间区域流入另一个空间区域，亦即热荷或熵的流动在许多场合下可以当作流体的流动来处理。事实上除了熵以外，在对另一些重要的物理量进行思考和处理时，也可以将它们想像成是一种可流动的“物质”。早在 20 世纪 70 年代，KPK 奠基人 Falk 教授就曾建议将动量、角动量、电荷量和熵等具有某种类类似于物质特性的非物质物理量称为物质型物理量(substance-like quantity)^[11]，以突出这种特性。另一个将这些物理量作如此归类的重要原因是它们同属所谓的能量载体(energy carrier)，都能够携带着能量进行传输。不过这已超出本文的讨论范围，此处不拟赘述。

3 电流与熵流之间的类比

3.1 电流与熵流的连续性

电荷在导体内流动形成电流，单位时间内流过任一截面的电荷量 q 称为电流强度(简称电流)，用 I 表示， $I = dq/dt$ 。相应地，热荷在传热导体内流动形成热流，而单位时间内流过任一截面的热荷量 S 称为熵流强度(简称熵流)，用 I_S 表示， $I_S = dS/dt$ 。

根据电荷守恒定律，在导体内任取一闭合曲面 A ，单位时间内从该曲面流出的电荷量总和，必定等于该曲面所包围的空间区域 V 内减少的电荷量，即

$$\sum I = \oint_A \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A} = -\frac{dq}{dt} \tag{1}$$

式中： $\mathbf{j}$ 为电流密度，即单位面积上流过的电流； $d\mathbf{A}$ 为曲面 A 上的面积微元矢量。这就是电流连续性方程。

若净流出该区域的电荷量为 0，则该区域内的电荷量将保持不变。然而在热力学中，根据熵增原理，不可逆过程的熵必定会增加，即都会产生热荷(熵产生)，而一切自发过程都是不可逆的。因此，在发生不可逆过程的区域内仿佛隐藏着一个

“泉眼”，随时会向外冒出额外的热荷。若在该区域内任取一闭合曲面 A ，那么单位时间内从该曲面流出的热荷量总和，必定等于该曲面所包围的空间区域 V 内减少的热荷量加上其中新产生出的热荷量(熵)，即

$$\sum I_S = \oint_A \mathbf{j}_S \cdot d\mathbf{A} = \frac{dS'}{dt} - \frac{dS}{dt} \tag{2}$$

式中： $\mathbf{j}_S$ 为熵流密度，即单位面积上流过的熵流； $\sum I_S$ 是单位时间内从该区域表面 A 流出的热荷量总和； $\frac{dS}{dt}$ 是单位时间内该区域中减少的热荷量； $\frac{dS'}{dt}$ 则是单位时间内该区域中新产生出的热荷量，如图1所示。这就是熵流的连续性方程，亦称平衡方程，类似于流体力学中带源汇项的连续性方程。对于可逆过程，没有熵产生，故式(2)可简化为 $\sum I_S = -\frac{dS}{dt}$ ，与式(1)具有相同的形式。

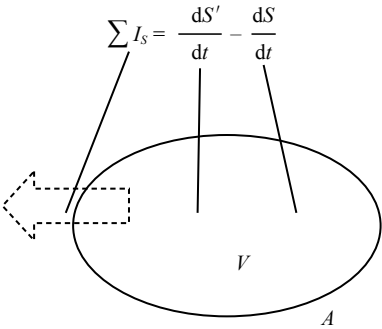


图1 熵流的连续性示意图
Fig.1 Continuity of entropy currents

电荷的流动有两种不同形式：电荷在电导体中流动时形成的传导电流，以及由带电体运动而形成的运流电流(如显像管内的电子流)。热荷的流动也具有类似的两种不同形式：热荷在热导体内流动时形成的传导熵流，以及由携带热荷的物体运动而形成的运流熵流(如热荷随着冷热空气对流而形成的输运-对流熵输运)。不仅如此，热荷还可以通过辐射来传输。地球就是通过辐射将每天产生的大量热荷输送到太空，以维持自身的生机。

3.2 电流与熵流的驱动力

无论是电荷还是热荷，在导体内流动时都需要驱动力(driving force)。电荷流动的驱动力是电势差。当用导线连接两个带电体时，电荷会自动地从高电势处流向低电势处，直到二者的电势相同为止。由于存在电阻，电荷在流动过程中会有热荷产生。类似地，热荷流动的驱动力是温度差，当两个物体互相接触时，热荷会自动地从高

温物体流向低温物体，直到二者的温度相等达到热平衡为止。由于存在热阻，热荷在流动过程中也会有新的热荷产生。如果我们要想改变电荷的自然流向，使电荷从低电势处流向高电势处，或者在没有电荷流动的导体中产生电流，那就必须依靠外部电源(电池或发电设备)。同样，如果我们要改变热荷的自然流向，使热荷从低温处流向高温处，或者在没有熵流的地方产生熵流，那就必须使用附加设备热泵(制冷机)。

3.3 电流、熵流与能流之间的关系

在任何有电流和热流的地方必然有能量流过。电荷的流动在输送着能量，所以电荷量是一种能量载体。类似地，热荷的流动也在输送着能量，所以热荷量同样是一种能量载体。众所周知，能流与电流之间的关系可以用下式表示：

$$P = \Delta UI$$

式中： P 为能流强度，即单位时间内流过的能量(功率)，简称能流； ΔU 为电势差； I 为电流强度。

相应地，能流与熵流之间的关系可用下式表示^[10]：

$$P = \Delta T I_S$$

式中， ΔT 为温差。由此可知：当温差不变时，能流强度与熵流强度成正比；当熵流强度不变时，能流强度与温差成正比。将上式右侧展开成两项后，就变成不同温度下的能流强度之差。其中每一项实际上代表着熵流在该温度下所对应的能流强度。这样的理解可以使我们以零为基准，更方便地将能流强度直接记为

$$P = T I_S \tag{3}$$

此式清楚地表明：若熵流的温度越高，那么它所运载的能量就越多；反之，熵流的温度越低，那么它所运载的能量也就越少。

图2所示为热机的能流图^[1]。容易看出，热机实际上是一部转载能量的机器。它先借助于能量载体熵将能量输入热机，然后通过热机的旋转轴以角动量为能量载体将能量输出热机，用来驱动与之连接的设备(如发电机)。热荷在绝对温度 T_1 下从高温热源流入热机，释放出能量后流回温度为 T_2 的低温热源。另一方面，由KPK力学知，从角速度 ω_0 为零开始的角动量从地球经底座流入热机，而以较高的角速度 ω_2 经输出轴流出热机去驱动与之连接的机器。这就是说，在此过程中热机在起着一种转换能量载体的作用：一部分能量

从载体熵转移至载体角动量, 致使熵流所携带的能量有所减少, 而角动量流所携带的能量却有所增加。现在来计算一下所谓的热机卡诺效率 $\eta_{\text{卡}}$, 亦即热机输出的能量(做功)与高温热源所提供的能量之比值。由于卡诺循环过程可逆, 熵流强度 I_S 保持不变, 故有

$$\eta_{\text{卡}} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} = \frac{T_1 I_S - T_2 I_S}{T_1 I_S} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (4)$$

式中: P_1 为从高温热源流入热机的能流, $P_1 = T_1 I_S$; P_2 为从热机返回低温热源的能流。上述计算方法比传统物理学著作和大学物理教材中通常所用的方法要简便得多, 而且更容易理解。卡诺效率亦称热机最大效率, 它仅与高温热源和低温热源的 温度有关。然而对于所有不可逆的实际热机而言, 由于存在着不可避免的能量损失, 其效率 $\eta_{\text{实}}$ 必定低于卡诺效率, 即 $\eta_{\text{实}} < \eta_{\text{卡}}$ 。

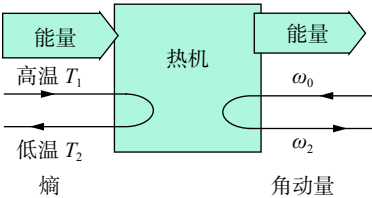


图 2 热机的能流图
Fig.2 Energy flow diagram of a heat engine

3.4 电流与熵流过程中的熵产生

当电荷流经电导体时, 由于导体中存在电阻总会导致热荷的产生(发热), 简称熵产生。类似地, 热荷流经热导体时, 由于导体中存在着热阻, 这也会造成附加热荷的产生, 即熵流流动过程中的熵产生^[1]。图 3 所示为一根导热性能良好的细棒, 其左右端分别与温度为 T_1 的高温热源和温度为 T_2 的低温热源保持接触。在温差的驱动下, 热荷从高温端流向低温端并很快达到平衡状态, 形成稳恒的熵流。假设导体其余部分与周围环境

绝热, 且棒内任何处不会出现能量堆积, 则流过每一截面的能流强度必然相等, 即 $P_1 = P_2$ 或者 $T_1 I_{S1} = T_2 I_{S2}$ 。由于 $T_1 > T_2$, 故必然有 $I_{S1} < I_{S2}$ 。这就是说, 当热荷从左向右流动时, 随着温度的逐步下降, 热荷量即熵流强度在逐步增加。这与前面提到的热荷流动时由于受到阻力而产生附加热荷是一致的。图 3 下部用宽度逐渐增大的箭头表示由熵产生所导致的附加熵流强度 $I_{S'}$ 会随着温度不断降低而增加。容易看出, $I_{S2} = I_{S1} + I_{S'}$ 或 $I_{S2} = I_S + I_{S'}$, 因为 $I_{S1} = I_S$ 。

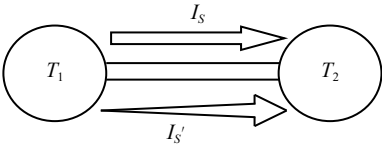


图 3 热传导过程中的熵产生
Fig.3 Entropy production in heat conduction

表 1 所示为电学与热力学的中心物理量及其基本关系式之间的类比, 反映出它们在结构上的相似性或共性。值得一提的是, 热荷量(熵)与电荷量之间虽然具有可以进行类比的一些共性, 但他们毕竟是物质的不同属性, 有着各自不同的个性。电荷有正负之分, 而且同性相斥、异性相吸, 但热荷却没有, 它只有一种。摩擦既能起电(电荷), 摩擦也能生热(热荷), 但它们之间是有明显差别的。摩擦产生的电实质上只是一种电荷的重新分配, 如果两个物体原来都不带电, 经摩擦后一个物体带正电荷, 另一个物体必然带相同数量的负电荷, 以保持电荷总量不变。然而两个物体摩擦产生的热荷, 是热荷的净增量, 即熵的净产生, 而且两个物体的热荷量或熵同时增加, 温度同时升高, 即热荷总量增加。电荷量是一个守恒量, 但热荷量只是一个半守恒量, 它只能产生, 却不能消灭。

表 1 电学与热力学之间的类比

Tab.1 Analogy between electricity and thermodynamics

分支学科	广延量	强度量	流定义	流定律	能流
电学	电荷量 q	电势 U	电流 $I = dq/dt$	$I = \Delta U/R$	$P = \Delta UI$
热力学	热荷量 S	温度 T	熵流 $I_S = dS/dt$	$I_S = \Delta T/R_S$	$P = \Delta T I_S$

树立类比思维(analogous thinking)是培育创新思维(creative thinking)的一个重要方面。类比有助于人们掌握自然现象之间的相似性、普遍性或共

性, 同时还更有利于显现出它们各自的特殊性或个性。在分支学科之间进行类比, 使得物理学工作者和教师有机会站在新的制高点上把握整个学

科体系。总之, 类比非但不会淡化每门分支学科的个性, 反而会使得它们各自的个性被反衬得更加鲜明, 使得千姿百态的多样化世界以更加精彩纷呈的面貌展现在人们的面前。

4 结 论

热荷与热荷量概念的引入不仅使得熵有了一个通俗易懂的定义, 丰富了它的内涵, 而且使两个容易混淆的物理量——热荷量(熵)与热量得以清晰地区分出来。在此基础上, 热力学与电学之间的类比可以变得更加全面更加透彻。如果进一步扩展视野, 人们在将电荷和热荷分别理解为物质的电学属性和热学属性的同时, 也许还可以将动量理解为物质的运动或力学属性, 称之为力荷(mechanical charge), 从而进一步把这种始于各门学科根基的全方位类比拓宽到电学、热学和力学三者之间。而且从这个角度去思考, 物理学也可以理解为一门**研究物质的各种基本属性和基本结构的学科**。爱因斯坦曾经深刻地指出: “要相信我们的理论构想能够用来理解客观实在, 相信我们世界的内在和谐性。没有这种信念, 就不会有任何科学。这种信念现在是, 并将永远是一切科学创造的根本动机”(注: 笔者译自原版著作^[12])。本文从最基本的概念热荷与电荷出发进行的热力学与电学之间的类比又一次表明, 我们的世界的确包含着内在的和谐性, 宇宙中发生的各种自然现象之间的确存在着深层次的内在联系。

参考文献:

- [1] HERRMANN F. 德国卡尔斯鲁厄物理教程: 热学、力学、电学(新物理教程·高中版)[M]. 上海: 上海教育出版社, 2010.
- [2] 皇甫泉生, 吴国玠, 顾铮无. 浅析动量流与电流相关性质的类比[J]. *物理与工程*, 2016, 26(2): 41–45.
- [3] 吴国玠, 章琢之. 德国卡尔斯鲁厄物理课程(KPK)的结构[J]. *大学物理*, 2012, 31(10): 42–45.
- [4] 吴国玠. 浅谈德国KPK物理教材的基本特点[J]. *物理与工程*, 2010, 20(5): 6–9.
- [5] 程守洵, 江之永. 普通物理学[M]. 6版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [6] 吴国玠. 关于德国KPK物理课程教学实验中若干问题的讨论[J]. *物理与工程*, 2011, 21(3): 43–45, 51.
- [7] POHLIG M, ROSENBERG J. Three chances for entropy[J]. *Latin-American Journal of Physics Education*, 2012, 6(SI): 49–58.
- [8] FALK G. Entropy, a resurrection of caloric—a look at the history of thermodynamics[J]. *European Journal of Physics*, 1985, 6(2): 108–115.
- [9] FUCHS H U. Entropy in the teaching of introductory thermodynamics[J]. *American Journal of Physics*, 1987, 55(3): 215–219.
- [10] 吴国玠, 皇甫泉生. 关于如何理解物理量熵的若干思考[J]. *上海理工大学学报*, 2018, 40(2): 103–109, 149.
- [11] FALK G. Was an der Physik geht jeden an?[J]. *Physikalische Blätter*, 1977, 33: 616–626.
- [12] EINSTEIN A, INFELD L. The evolution of physics[M]. New York: Simon & Schuster, 1967.

(编辑: 丁红艺)