

国外教学

热力学定律和牛顿运动定律的结合*

——德国卡尔斯鲁厄物理课程的启示

陈敏华 (浙江省绍兴县豫才中学 浙江 312000)

摘 要 德国卡尔斯鲁厄物理课程有其显明的物理课程结构:电荷量、动量、焓和物质的量等物理量像空气和水这种实物一样,能在相应的势差作用下自发地流动,形成电流、动量流、焓流和物质的量流,并可以伴随着能量的流动,直到势差为零为止。这其实是热力学第二定律在物理学各分支学科中的体现。它规定了实物型物理量自发流动的方向性。在解决力学问题中,我们经常在不自觉地结合牛顿运动定律和热力学定律,但没有明确提及它。

关键词 卡尔斯鲁厄物理课程 实物型物理量 势差 热力学第二定律

1. 问题的提出

在教育部考试中心编的《2006 年普通高等学校招生全国统一考试理科综合科考试大纲的说明(浙江省专用)》一书中有这样一道例题^[1]:

两块长木板 A 和 B,质量相等,长度都是 $l=1.0\text{ m}$,紧贴在一起,静置于光滑水平的地面上。另一小物块 C,质量与长木板相等,可视为质点,位于木板 A 的左端,如图 1 所示。现给物块 C 一向右的初速度,速度大小 $v_0 = 2.0\text{ m/s}$ 。已知物块与木板之间的滑动摩擦因数 $\mu = 0.10$ 。问木板 A 最终运动的速度为多少?

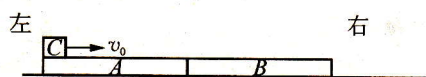


图 1

书中对这道题的解答过程是这样的:

物块 C 在木板上运动时,摩擦力使物块 C 减速,使木板加速。如果最终结果是 C 停在木板 A 上,则 A、B、C 三者都以相同的速度运动。若最终结果是物块滑离木板 A 后停在木板 B 上甚至滑离木板 B,则木板 A 最终的速度是物块 C 刚滑离 A 时的速度。

设物块在木板 A 上滑行 x 距离后便停在 A 上;在这个过程中,木板 A 和 B 滑动的距离都是 s ,如图 2 所示;物块 C 停在木板 A 上时,A、B、C 三者速度相等,均为 v 。根据动能定理有

$$\begin{aligned} \mu mg(s+x) &= \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv^2 \\ \mu mgs &= \frac{1}{2}(2m)v^2 \end{aligned}$$

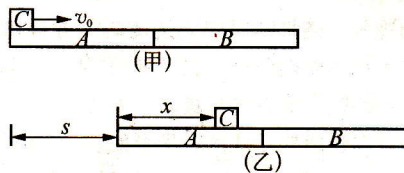


图 2

由动量守恒定律,有

$$mv_0 = 3mv$$

由上述三式可得

$$x = \frac{v_0^2}{3\mu g}$$

代入数据得

$$x = \frac{4}{3}\text{ m}$$

因 $x > l$,与物块停在木板 A 上的假设不符,表明 C 要滑离木板 A 并在木板 B 上滑动。

物块在木板 A 上滑动距离 l 后,到达木板 B。设在 C 刚滑离 A 时,C 的速度为 u 。这时 A 与 B 的速度相等,设为 v 。在这一过程中,A 与 B 一起滑动的距离为 s_1 。则由动能定理和动量守恒定律有

$$\begin{aligned} \mu mg(s_1+l) &= \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mu^2 \\ \mu mgs_1 &= \frac{1}{2}(2m)v^2 \\ mv_0 &= mu + 2mv \end{aligned}$$

消去 s_1 ,代入有关数据,得

* 本文系 2011 年浙江省教育科学规划课题(SC223)的研究成果之一。

$$u + 2v = 2$$

$$2v^2 + u^2 - 2 = 0$$

解得

$$v = \frac{1}{3} \text{ m/s}, u = \frac{4}{3} \text{ m/s}$$

或

$$v = 1 \text{ m/s}, u = 0$$

第二组解不符合题意,因按第二组解,当物块 C 滑到木板 A 的最右端时,速度为零;但木板 A 却具有方向向右、大小为 $v = 1 \text{ m/s}$ 的速度,即 C 静止, A 却运动,这不符合物理原理,故所求的木板 A 的最终速度为 $v = 1/3(\text{m/s})$ 。

这里所指的“物理原理”到底是什么?书中没有明确说明。实际上,我们平时在解题中经常在使用这条“物理原理”,但在物理教科书中却没有专门提及它。而德国卡尔斯鲁厄物理课程(Der Karlsruher Physikkurs,简称 KPK)^[2]的结构正好明显地体现了这条“物理原理”。这足以证明它的重要性。然而,这条原理到底是什么?德国卡尔斯鲁厄物理课程为什么会如此重视这条原理?

2. 卡尔斯鲁厄物理课程的结构

德国卡尔斯鲁厄物理课程是在赫兹 1888 年发现电磁波的地方——德国卡尔斯鲁厄大学产生的。最早主持这一课程开发计划的是福克(G. Falk)教授,而福克在这方面所做工作的理论基础是吉布斯的热力学理论。福克去世后,这一课程的开发工作由他的同事赫尔曼(F. Herrmann)教授主持。这一课程包括初中版、高中版和大学版。所有版本的原始语言都是德语。后来,初中版被先后翻译为英文、意大利文和中文。中文版于 2007 年由上海教育出版社出版。^[3]根据高中水平的 KPK 改编而成的中文版也于 2009 年出版。^[4]他们所开发的任何水平的物理课程,其课程结构是相同的。

在传统的物理课程中,只有流体力学和电学具有势差(potential difference)和流(current)的结构:空气能自发地(spontaneously)从高压处流到低压处,直到无压强差为止;电量能自发地从高电势处流到低电势处,直到无电势差为止。这里,空气是一种实物,而电荷量是一种会流动的类似于实物的物理量,我们把它叫做实物型物理量(substance-like quantity)。^[5]

根据吉布斯基本方程式(Gibbs fundamental form)

$$dE = UdQ + vdP + TdS + \mu dn + \dots$$

我们得到相应的能流公式

$$I_E = UI_Q + v \cdot I_p + TI_s + \mu I_n + \dots$$

式中 I_E 、 I_Q 、 I_p 、 I_s 和 I_n 分别为能流(即功率 P)、电流、动量流(即力 F)、熵流和物质的量流; U 、 v 、 T 和 μ 分别为电势、速度、温度和化学势。由此我们可以看出,电量、动量、熵和物质的量都是实物型物理量,它们在相应的势差作用下都会

自发地流动,形成电流、动量流、熵流和物质的量流。这些实物型物理量的流动还可以伴随着能量的流动。因此,我们还可以把它们叫做能量携带者(energy carrier)。

显然,在传统的物理课程中,其他分支学科就没有体现出这种势差和流的结构。比如,在力学中,我们只强调高速运动的物体会自发地把能量传给低速运动的物体,直到它们的速度相同时为止;但我们没有注意到与此同时动量从高速运动的物体流到了低速运动的物体,动量起着携带能量的作用。同样,在热学中,我们虽然强调了热量(能量)能自发地从高温物体传到低温物体,直到它们的温度相同时为止;但我们没有注意到与此同时熵从高温物体流到了低温物体,熵起着携带能量的作用。因此,我们需要对力学、热学等分支学科的课程结构进行改革。KPK 就是在这方面所作的有益尝试的结果。

在 KPK 中,我们可以清晰地看到这样一幅物理图像:[注:这 8 张图由德国卡尔斯鲁厄物理课程的作者赫尔曼(F. Herrmann)教授提供]。

空气能自发地从高压处流到低压处。

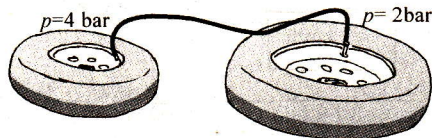


图 3

电荷量能自发地从电势高的物体流到电势低的物体(图 4)。

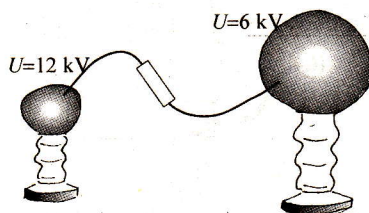


图 4

动量能自发地从高速物体流到低速物体(图 5)。

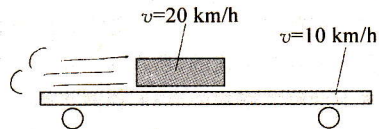


图 5

熵能自发地从高温物体流到低温物体(图 6)。

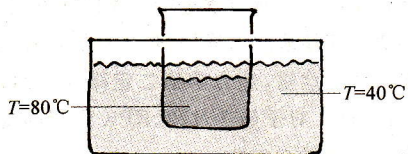


图 6

若要让空气从低压处流到高压处,就需要气泵(图 7)。

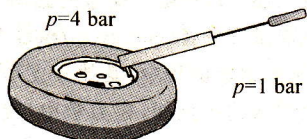


图 7

若要让电荷量从电势低的物体流到电势高的物体,就需要电泵(如电池、发电机)(图 8)。

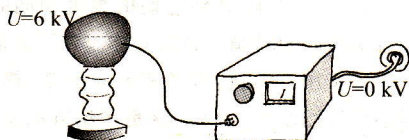


图 8

若要让动量从低速物体流到高速物体,就需要动量泵(如电动机、人)(图 9)。

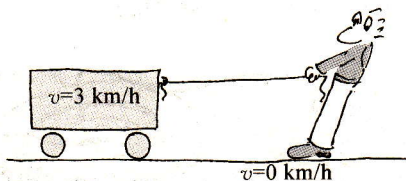


图 9

若要让熵从低温物体流到高温物体,就需要热泵(压缩机)(图 10)。

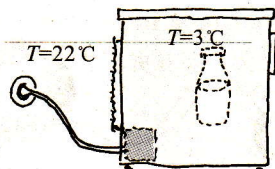


图 10

在 KPK 中,类似的结构也应用于信息学、化学和近代物理学中。例如,在化学中,我们也能看到一种能驱动物质的量和能量流动的反应泵(reaction pump)。

上述这一图像反映了 KPK 的课程结构。然而,这一结构的核心思想恰好就是热力学第二定律。由于自然界中各种不可逆过程都是互相关连的,所以每一个不可逆过程都可以选为表述热力学第二定律的基础,而热力学第二定律就可以有多种不同的表述方式。但不管具体表述方式如何,热力学第二定律的实质在于指出,一切与热现象有关的实际宏观过程都是不可逆的。热力学第二定律所揭示的这一客观规律向人们指出了实际宏观过程进行的条件和方向。^[6]热力学第二定律的克劳修斯表述这样说:热量不能自发地从低温物体传到高温物体。这里,热力学第二定律强调的是热量(能量)流动的方向性。对于热学过程,KPK 强调的是能量及其携带者熵自发流动的方向性。

有一点需要特别指出,即牛顿第二定律和它另外的表达

形式(如动能定理和动量定理)是等价的。在上面所举的例子中,我们仅用两个由动能定理得到的方程(这两个方程是对两个不同的物体应用动能定量而得到的,因而是独立的)还解不出所求的量的,必须再找另一个独立的方程。似乎上述第三个方程是应用动量守恒定律于两个物体得到的,因而好像它与前面两个方程是等价的。但实际上,这个方程中隐含着三个定律,即牛顿第二定律、牛顿第三定律和热力学第二定律,因而它是独立于前面两个方程的。我们之所以知道两个物体经相互作用后的最后速度相同,是因为我们运用了热力学第二定律。在取舍两组解时,我们实际上也应用了热力学第二定律。

显然,在分析力学过程和热学过程耦合在一起的问题时,我们需要同时运用牛顿运动定律和热力学第二定律。

3. 举 例

下面我们以 2009 年物理高考试题为例,来进一步说明 KPK 这一课程结构在分析力学过程和热学过程耦合的问题中的应用。

例 1 2009 年普通高等学校招生全国统一考试(辽宁、宁夏理综卷)第 20 题。

题目 如图 11 所示,一足够长的木板静止在光滑水平面上。一物块静止在木板上。木板和物块间有摩擦。现用水平力向右拉木板。当物块相对木板滑动了一段距离但仍有相对运动时,撤掉拉力。此后木板和物块相对于水平面的运动情况为 ()

- (A) 物块先向左运动,再向右运动
- (B) 物块向右运动,速度逐渐增大,直到做匀速运动
- (C) 木板向右运动,速度逐渐变小,直到做匀速运动
- (D) 木板和物块的速度都逐渐变小,直到为零



图 11

答案 BC

分析 由于木板向右运动的速度大于物块向右运动的速度,撤去拉力后,动量继续从木板流向物块(由于地面是光滑的,木板的速度始终大于物块的速度);木板的动量减少,物块的动量增加,直到两者速度相等(速度差为零)时为止。

例 2 2009 年普通高等学校招生全国统一考试(天津理综卷)第 10 题。

题目 如图 12 所示,质量 $m_1 = 0.3 \text{ kg}$ 的小车静止在光滑的水平面上。车长 $L = 1.5 \text{ m}$ 。现有质量 $m_2 = 0.2 \text{ kg}$ 可视为质点的物块,以水平向右的速度 $v_0 = 2 \text{ m/s}$ 从左端滑上小车,最后在车面上某处与小车保持相对静止。物块与车面间的动摩擦因数 $\mu = 0.5$ 。取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。求:

- (1) 物块在车面上滑行的时间 t ;
- (2) 要使物块不从小车右端滑出,物块滑上小车的左端的速度 v_0' 不超过多少?

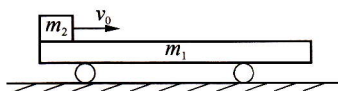


图 12

答案 $t = 0.24 \text{ s}$, $v_0 < 5 \text{ m/s}$

分析 开始时物块的速度大于小车的速度, 动量从物块流向小车。动量流的大小为 $\mu m_2 g$ 。动量的流动一直到两者速度相同时为止。设这个速度为 v 。因为地面光滑, 所以从物块流出的动量等于流入小车的动量, 即

$$m_2 v_0 - m_2 v = m_1 v$$

因为动量流即单位时间内流出或流入的动量, 所以,

$$\mu m_2 g t = m_2 v_0 - m_2 v$$

由上述两式可求出 $t = 0.24 \text{ s}$ 。上式实际上就是我们熟悉的动量定理。

第二个问题同样可以根据动量流的定义解出, 只不过在这里我们必须用物块或小车相对于地面的位移来表示动量的变化而已。其形式就是我们熟悉的动能定理。

所以, 动量定理和动能定理都源自动量流的概念, 或者说都源于我们熟悉的牛顿第二定律。因此, 牛顿第二定律告诉我们, 力就是动量流; 而动量定理和动能定理只不过是这个定律的两种不同形式, 它们和牛顿第二定律是等价的。上述第一个问题, 我们也可以用力能定理来解; 同样, 上述第二个问题也可以用动量定理来解。这两种解法在本质上是相同的, 都应用了同一个物理定律。

例 3 2009 年普通高等学校招生全国统一考试(全国卷一)第 21 题。

题目 质量为 M 的物块以速度 v 运动, 与质量为 m 的静止物块发生正碰。碰撞后两者的动量正好相等。两者质量之比 M/m 可能为 ()

(A) 2 (B) 3 (C) 4 (D) 5

答案 AB

分析 由于两物块的碰撞过程可能是非弹性的, 所以, 这是力学过程和热学过程耦合在一起的物理问题。

根据前面提到的吉布斯基本方程式, 我们知道, 电荷量、动量、熵和物质的量是能量携带者。它们在流动中能携带能量, 所携带能量的多少取决于相应的势的大小。

在这道题中, 能量开始时被质量为 M 的物块的动量所携带; 碰撞后, 一部分能量被两个物块所携带, 另一部分能量被熵所携带。考虑到由熵所携带的能量, 则在碰撞前后两个物块所携带的能量是不相同的; 而两个物体的动量作为能量携带者在碰撞前后是不变的。

根据题目所给的条件并综合上面的分析, 我们可以列出以下三式:

$$Mv = 2mv'$$

$$Mv'' = mv'$$

$$\frac{1}{2}Mv^2 \geq \frac{1}{2}Mv''^2 + \frac{1}{2}mv'^2$$

式中 v' 表示质量为 m 的物块在碰撞后的速度, v'' 表示质量为 M 的物块在碰撞后的速度。

由上述三式可以求出:

$$\frac{M}{m} \leq 3$$

参考文献

- [1] 教育部考试中心. 2006 年普通高等学校招生全国统一考试理科综合科考试大纲的说明(浙江省专用). 北京: 高等教育出版社, 2006, 66—68
- [2] F. Herrmann. The Karlsruhe Physics Course, *Eur. J. Phys.*, 2000(21): 49—58
- [3] F. Herrmann, G. Job 著, 陈敏华译. 德国卡尔斯鲁厄物理课程 中学物理 1—3 和教师用书. 上海: 上海教育出版社, 2007.
- [4] F. Herrmann 著, 陈敏华改编. 新物理教程高中版波动与信息. 上海: 上海教育出版社, 2009.
- [5] G. Bruno Schmid. An up-to-date approach to physics, *Am. J. Phys.* 1984(9): 794—799
- [6] 李椿等. 热学. 北京: 人民教育出版社, 1978, 210—211

(上接第 61 页)

- [10] 玉琦人. 北清通信[J]. 教育研究. 第 24 期, 明治三十五年(1906 年)转引自注 8: 590
- [11] 江苏谘议局调查两江师范学堂报告[R]. 教育杂志, 宣统三年(1910 年)第 3 卷第 3 期: 31—32
- [12] 李瑞清. 两江师范监督答之谘议局函[R]. 教育杂志, 宣统三年(1910 年)第 3 卷第 3 期: 37—38
- [13] 舒新城. 中国近代教育史资料(中册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1961: 511
- [14] 骆炳贤. 物理教育史[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 2011: 79
- [15] 汪向荣. 日本教育[M]. 北京: 中国青年出版社, 2000: 119