



教学经验交流

动量流强度和动量流密度及其破坏作用 ——从一个 KPK 教学实验案例谈起

吴国玟

(上海理工大学, 上海 200093)

(收稿日期: 2011-04-25; 修回日期: 2011-11-25)

摘要 本文较为详尽地阐述了 KPK 物理教程中有关动量流强度和动量流密度的概念, 讨论了它们对于物体所产生的破坏作用. 作者希望以此为例来表明在物理教学中采用这些 KPK 概念的有效性和优越性.

关键词 卡尔斯鲁厄物理教程(KPK); 教学实验; 动量流(强度); 力; 动量流密度; 应力; 类比; 辩证唯物主义原理; 对比教学

1 引言

在科学发展史上曾经多次出现过这样一种情况: 由于当时科学技术发展和人们认识水平的限制, 一些重要的著作和研究成果在刚刚面世的时候并不被科学界所接纳. 多年之后, 当人们普遍开始意识到它们的重要价值时, 往往已经为时过晚. 因为此时再想去改变现状或进行纠正(尽管这种纠正极其必要而且十分有用), 已经变得相当困难, 不花费很长时间不下很大工夫就难以纠正过来. 物理学中关于动量流的概念就是一个突出的例子.

由牛顿所构建的物理量“力”及其相应的名词术语相当复杂而且繁琐. 其实, 力的本质就是动量流的强度. 德国著名物理学家普朗克(Max Planck)在他于 1908 年出版的著作中早就提出过这一观点^[1], 可惜长期以来一直为人们所忽视. 在德国卡尔斯鲁厄物理教程(KPK)中, 一些埋没许久的有价值的研究成果被挖掘了出来并受到了应有的重视. 事实上它们不仅得到了接纳, 而且还成为了 KPK 教程的重要组成部分. 在 KPK 力学中, 首先引入的物理概念是动量和动量流, 而不是力. 这是因为组成动量的两个物理量(质量和速度)直接来自基本物理量, 其定义简单清晰, 而且其概念很容易与日常生活经验直接联系起来, 学生一听就懂. 动量的时间变化率(动量流)的概念也不难理解, 学生容易掌握. 相比之下, 传统物

理学中力的概念要复杂得多. 它的引入显得有点颇费周折、勉为其难, 不得不在一开始就讨论力的种类、力的作用效果和要素等具体内容, 进行一大堆说明. 这种形似严格, 实为繁琐的定义, 与定义自身的要求(确切而简扼)相悖. 这样建立起来的概念会使人感到不易捉摸, 当然更难让学生透彻理解. 我国开展 KPK 教学实验虽然时间不长, 但实践已清楚地表明, KPK 力学不仅完全能够为师生所掌握, 而且容易激发学生的学习兴趣和创新意识, 教学效果可以得到显著改善. 本文将从 KPK 教学实验中的一个具体案例出发, 围绕着有关动量流这一概念的若干问题开展讨论.

2 动量流强度与力

为了便于说明问题, 下面的讨论仅限于物体的一维运动. 设在时间间隔 Δt 内流过动量导体(即能够传导动量的物体, 如一根拉动小车的绳子)横截面的动量为 $\Delta p = \Delta(mv)$, 那么在单位时间内流过该横截面的动量就定义为动量流强度 I_p ,

$$I_p = \Delta p / \Delta t \quad (1)$$

容易看出, 动量流强度实际上就是动量流的流量(flow rate). 对于有动量流入的物体(如上述被绳子拉动的小车)而言, 如果它的动量在 Δt 时间内的增量为 Δp , 那么该物体的动量变化率就是 $\Delta p / \Delta t$. 可见式(1)还可以用来表示, 流入物体的动量流强度等于该物体的动量变化率. 与电流强度可

以简称为电流一样,动量流强度通常也可简称为动量流.由于动量流强度和力(force)所描述的实际上是同一个物理量,所以在KPK力学中也用符号 F 来表示动量流强度.这样,式(1)可改写为

$$F = \Delta p / \Delta t = \Delta(mv) / \Delta t \quad (2)$$

在SI制中,动量流强度的单位名称是牛顿,其中文符号为“牛”,国际符号为“N”.十分明显,公式(2)的微分形式不是别的,正是大家所熟悉的牛顿第二定律.在KPK力学教材中,动量和动量流的概念在先,动量流强度(力)的概念在后.与传统物理学相比,这样的次序顺理成章,有利于教与学.除此以外,使用动量流的概念来解释许多物理现象要比使用力的概念胜出一筹.其优越性不仅表现在能使学生容易掌握所学的物理知识本身上面,而且还表现在它可以启发学生通过类比来掌握其他学科的一些有用知识,做到举一反三,融会贯通^[2].比如在讨论动量流(即牛顿力学中的力)对于物体的破坏作用时,借助于上述公式就可以带来许多方便.

当流过物体的动量流过大时,物体就有可能发生断裂或破碎.人们往往希望避免出现这样的现象,当然有时也会利用这种现象去达到某种目的.现在先来讨论前一种情况.例如当你想用一根细绳来拉动一个重物时,你就得让动量通过手臂流经绳子到达重物.为了避免将绳子拉断,你不能拉得太猛,而是得慢慢地使劲,即耗费较长的时间来启动重物使之达到一定的速度;否则,细绳可能断裂.换言之,你可以通过控制时间 Δt 的长短来控制动量流的大小.又如打篮球时,有点经验的人在接篮球时总是会使自己的手掌跟着球运动一小会儿,再让它停在手中,以保证接球平稳而且防止受伤.再如,为了减轻车祸给乘客带来伤害,在许多汽车的构造中专门设计了一个所谓的“挤压区”.当汽车发生碰撞时,这个区域可以产生一定程度的折叠,从而延缓了动量流的传递过程(加大 Δt),减小了动量流的强度.在上面几个例子中,人们都通过延长动量流流过的时间,即增大式(2)的分母 Δt 来减小动量流的强度 F ,以避免可能发生的破坏作用.现在再来看看相反的情况.当人们有意去破坏某个物体时往往会通过缩短 Δt 来增加动量流强度.例如,当你想用榔头砸碎一块砖头的时候,你就必须猛然敲击砖块,让动量流在很短的瞬间内流入砖块,也就是说,通过缩

短作用时间来减小式(2)中的分母 Δt ,以增大动量流.此时,任何拖泥带水(即延长 Δt)的动作显然是不能奏效的.

综上所述,可见由于时间因素 Δt 的介入,运用动量流的概念来解释上述各种物理现象显得理由充足、清晰明了、令人信服,教师感到得心应手,学生觉得明白易懂.然而运用传统物理学中力的概念来解释这些现象是不易达到如此效果的.

3 动量流密度与应力

实际上,动量流是否具有破坏作用并不仅仅取决于其强度的大小.为了避免前面例子中提到的那根细绳发生断裂,除了延长 Δt 以外,我们还可以使用较粗的即横截面积较大的绳子来代替细绳.为了深入讨论此类问题,有必要引入一个新的物理概念:动量流密度.如果在时间间隔 Δt 内流过横截面积为 A 的物体的动量为 $\Delta p = \Delta(mv)$,那么在单位时间内流过单位横截面积的动量就定义为动量流密度 j_p ,

$$j_p = \Delta p / A \Delta t = \Delta(mv) / A \Delta t = F / A \quad (3)$$

如果动量流强度以牛顿(N)为单位,面积用米²(m²)为单位,那么动量流密度的单位就是牛/米²(N/m²).这个单位称为帕斯卡(Pascal),简称帕,国际符号为“Pa”.由此可见,动量流密度就是流过单位横截面积的动量流强度(流量),因而实际上也就是动量流的流速(velocity).动量流强度与动量流密度之间的关系,就像电流强度与电流密度之间的关系一样,都是一种流量与流速之间的关系,二者几乎毫无差别.事实上,由于动量流密度和应力(stress)所描述的是同一个物理量,所以我们可以用应力的符号 σ 来表示动量流密度,从而得到

$$\sigma = \Delta p / A \Delta t = \Delta(mv) / A \Delta t = F / A \quad (4)$$

以前面讨论过的绳子为例,假定细绳的横截面积为 $A_1 = 1\text{cm}^2$,当有强度为50N的动量流流过绳子时(此时相应的动量流密度为50N/cm²),绳子被拉断了.现在若用一根横截面积为 $A_2 = 2\text{cm}^2$ 的绳子来代替,那么在动量流强度保持不变的条件下,流过绳子的动量流密度减小了一半,变为25N/cm²,因而不易拉断.这里的动量流密度实际上就是绳子内的拉伸应力.又如,设计斜拉桥拉索直径(或横截面积)的一项基本要求就是拉

索内的拉伸应力不能超过拉索的强度极限。换言之,流经拉索的动量流密度不得超过规定的安全数值;否则就有可能发生拉索断裂、桥梁垮塌的事故。可见,在讨论动量流的破坏作用时,运用动量流密度的概念要比运用动量流强度的概念更为恰当。

钉子、凿子、刀子和剪刀等工具之所以锐利,可以用来钉入、破碎、切割或剪断物体,就是因为它们的尖端或锋刃横截面积 A 很小,致使流入物体的动量流密度极大,从而对物体造成破坏(钉入墙面或剪断布料)。与此相反,安装在拖拉机和坦克车上的宽阔履带可以大大减小流入大地的动量流密度,使得这些车辆即便在松软的土壤上也能行走自如,不至于因其自重而深陷地面不能自拔。

汽车的安全带和安全气囊的设计融合了对于式(4)分母中时间间隔 Δt 和横截面积 A 这两方面因素的考虑。汽车发生碰撞事故时通常会在瞬间内停住。此时,汽车迅速地将它的动量传递出去,传到交通隔离栏上,传到建筑物上,传到大树上,或者传到另一辆被撞的汽车上,等等。同时,车内乘客身上的动量也必然一起传出体外。在这个传递过程中,如果动量流的强度过大,汽车就会损坏,乘客就会受到伤害。为了避免或减轻可能产生的严重后果,除了前面提到过的在汽车构造中设计一个“挤压区”之外,还应当安装直接保护人身安全的安全带和安全气囊。安全带具有好几种功能。首先,在碰撞过程中,安全带可以产生一定程度的伸长,从而延长动量从乘客流到汽车上的时间,达到减小动量流强度之目的。其次,由于安全带的宽度(即与人体接触的面积)较大,致使从人体流出的动量流密度显著下降,因而大大减轻动量流对人体的伤害作用。当然,安全带还有将乘客相对固定在座椅上的功能,以确保乘客不会撞到车内一些外凸或带有锐利棱角的物体上。安全带的另一个功能是让乘客身上的动量流经由那些非致命的部位传送出去。如果动量流经过人的头部等要害部位传出,那么就相当危险了。安全气囊的效果当然会更好,因为安全气囊与人体接触面积要大得多。这意味着,所传送出去的动量流密度将会小得多,因此在汽车上安装安全气囊可以大大降低对人体造成伤害的可能性。

综上所述,可见要想判断动量流对动量导体所产生的破坏作用,不应单纯考虑动量流强度的

大小,更加重要的是要看动量流密度即应力(包括拉伸应力和压缩应力)的大小。在工程上,通常使用许用应力(allowable stress)来表示机械零部件的承载能力或强度极限。所有机器设备上的机械零部件在运行过程中所承受的应力(动量流密度)一概不得超过各自的许用应力,以保证它们运行的绝对安全可靠。应当指出,不同材料的许用应力是各不相同的,所以机械零件和建筑结构是否遭到破坏不仅与其所承受的应力大小有关,而且还与这些零件和结构所用的材料密切相关。这就是说,材料这个因素在工程设计中,在我们有关动量流的破坏作用的讨论中实际上是不容忽视的,尽管它并不是本文讨论的主要内容。

4 关于动量流破坏作用的类比举例

KPK 物理学的主要特色之一就是广泛采用类比(analogy)这一科学方法^[2]。通过各种各样的类比,物理学各分支学科之间在结构上的相似性或规律性得以凸显出来,它们之间实际存在着的内在有机联系得以揭示出来,从而使它们被整合在一个统一的结构框架内成为可能。就物理教学而言,类比的积极意义也是显而易见的。因为这种统一的结构和有机联系不但有利于学生的理解和记忆,而且还能帮助他们融会贯通,产生触类旁通、事半功倍的良好效果,即只要牢固掌握一门分支学科中的某些物理概念,就容易掌握其他各门分支学科里的相应概念,从而大大提高学习效率,改进学习效果。下面将通过一些实例来加以说明。

首先应当指出,类比是一种逻辑推理方法,其内容、形式和层次都可以有所不同,不必拘泥于某种固定的模式。类比可以在不同的物理学分支学科之间进行,可以在同一分支学科内部进行,也可以跨学科地进行。在形式上,类比可以通过 KPK 类比表进行,也可以经由其他途径进行。如果我们以流强度(流量)和流密度的概念在力学和电学之间进行类比,那么就不难发现,与动量流强度过大会破坏动量导体一样,电流强度过大也会烧坏电导体。为了防止发生火灾或者烧坏电器和电子元件,通常必须在电路内安装保险丝。一旦电流过大,保险丝就会熔断,起到自动保护电器和电子设备的作用。保险丝直径的粗细(横截面积 A 的

大小)决定或限制了电路内的最大电流,所以实际上我们真正应该予以关注的是电流密度而不是电流强度. 换言之,我们应该使用电流密度而不是电流强度作为判别导体是否会被烧坏的依据. 在力学领域内,我们可以进行相似的类比. 比如,当处于汛期的河水流量即水流强度或流速过大(超过水坝最大设计泄洪量)时,就有可能冲垮水坝,侵蚀河床和河岸,造成破坏性的严重后果.

如果我们从应力(动量流密度)的角度出发进行类比,那么就很容易看出:与前面所讨论的细绳内的拉伸应力过大时会造成绳子断裂一样,当流体输送管道内的压强(应力)过高时也会使管道遭受损坏. 一些城市里经常发生的水管爆裂就属此类. 不过流体压强是一种压缩应力或正应力,因而与绳子内的拉伸应力有点区别,但其作为动量流密度的力学本质是完全相同的. 为了防止工业管道(尤其是石油天然气或化工管道)发生爆裂事故,通常必须在管道上安装安全阀. 一旦管内压强超过设定的安全数值时,安全阀就会自动打开释放压力. 由此可见,管路安全阀所起的作用与保护电路的保险丝十分相似.

上述例子表明,类比确实具有某种多样性,可以从不同的角度去进行. 事实上,许多类比还可以在不同的学科之间进行. 这样的类比往往能够引发热烈的课堂讨论. 例如,学生会将动量流过大时的破坏作用与道路上车流量过大时所产生的“拥堵”现象,与公共场所人流量过大时发生的“踩踏”事故,甚至与货币流动性过大所导致通货膨胀等社会和经济现象联系起来. 此外,对于那些人们不希望出现的因流量过大而发生的破坏作用,也可以通过类比来加以分析并提出有效的解决办法,以提高管理水平和控制能力. 比如,在上海世博会期间所采取的增加出入口数量(包括陆路和水路,地面、地下和高架)以及出入口宽度等做法都可以理解为增大流通面积 A 的措施,安装隔离栏和设置蛇行区等都可以理解为延长流动时间 Δt 以降低人流密度的手段. 类比的多样性可以启发学生的联想和系统思维能力,它们往往会给学生留下深刻印象,其中有的甚至可能使他们终生难忘.

实践经验证明,在 KPK 物理教学中采用多样化的类比不仅有利于活跃课堂氛围,加强师生互动,提高学生的学习兴趣,而且还能激发他们的创

新意识,帮助他们开阔视野,拓展思路. 几乎所有参加实验的学生都对 KPK 物理课程反映良好,普遍感到这门课程贴近生活、联系实际,容易牢固掌握,感到所学的知识实实在在,而且还能够在扩大知识面的同时,巩固他们已经建立起来的物理学知识体系,所以在相当大的程度上实现了在相同的时间内学到更多知识的目标.

5 关于动量流的几点认识

(1) 关于物质型物理量 KPK 物理教程将那些能够“流动”的物理量(即所谓的物质型物理量),例如动量、电量、熵和能量等,视为各分支学科的中心物理量^[3]. KPK 作者通过建立“流(current)”的概念,引入时间因素,从而使得这些物理概念不仅与空间有关,而且也直接与时间有关. 这样的处理仿佛是在替此类物理量注入一种“生命力”,使得那些原来看上去“静止”的物理量“流动”起来了. 相应地,“流强度(流量)”和“流密度(流速)”等与时间相关联的概念也就此应运而生,从而不仅增加了人们的认知深度,也使得开展更加广泛的类比成为可能. 在 KPK 力学中,动量流强度概念的引入在很大程度上使得原来显得有点不易捉摸甚至抽象玄乎的力的概念变得更加实在、完整、准确而丰满. 换言之,力的本质在那里可以得到更加充分而且透彻的显现. 显然,由于时间和空间因素的同时引入,用动量流的概念来解释物理现象(比如破坏作用)显得更加令人信服,学生更加容易接受. 在这里,我们不妨来重温一下马克思主义哲学的一些基本原理.

首先,世界是物质的. 其次,物质是运动的,这是辩证唯物主义的观点. 也就是说,它既承认了世界的物质性,又承认了物质是运动的. 在物质世界中,同一物质在不同时间的特性是变化的,也就是说具有时间性. 空间也同样如此. 由于运动,同一物质所在的空间一直是变化的. 所以应当认为,时间和空间是运动物质的存在形式^[4]. 所谓运动是物质的存在方式,是说物质只有在运动中才能存在,或者说,物质只有在运动中才能表现出它的存在. 事实上,人们对物质的认识,就是通过认识物质的某种运动形式而获得的.

由此可以看出,KPK 物理学关于物质型物理量的构思和同时将时间空间因素融入一些物理量

的基本观念与辩证唯物主义的基本观点十分相符. 我们甚至可以认为, KPK 物理学之所以具有强大的生命力正是由于它体现了先进的哲学思想, 因而处处闪耀着智慧的光芒. KPK 教程的作者站在现代物理学最新成就的制高点上, 在严格审视传统物理学及其发展史的基础上, 把传统物理学当中一些不那么顺的概念体系理顺了, 对一些原来在理解上有缺陷或有差错的概念进行了修补和纠正. 因此, 它能够提升教师和学生以及研究人员对于物理学的认知层次. 它的科学性、逻辑性、合理性、包容性和实用性都在传统物理学之上. 换言之, 它源于传统物理学, 但高于传统物理学.

(2) 动量流和牛顿三大定律 在 KPK 力学中, 动量流强度 F 是一个定义. 它定义为单位时间内流过动量导体横截面的动量(所以实际上也就是动量的流量), 即

$$F = \Delta p / \Delta t = \Delta(mv) / \Delta t$$

这样的定义与电流强度的定义十分相似. 其实, 上述定义式的微分形式就是众所周知的牛顿第二定律. 对于一个给定的物体而言, 牛顿第二定律的含义是, 物体动量的变化率 dp/dt 等于流入该物体的动量的变化率, 即动量流强度 $F = dp/dt$. 这就是说, KPK 力学中的一个定义式在传统力学中俨然是一条定律. 在那里, 力的概念的建立和牛顿第二定律的导出都颇费一番周折. 然而在 KPK 力学中, 相应概念的引出却显得顺理成章、简单明了、轻松自然. 由此, KPK 力学的优点亦可见一斑.

实际上, 从现代物理学的观点来看, 牛顿的三条定律合在一起只不过是动量守恒原理的一种表述形式而已. 其中, 第一和第三定律事实上只是动量守恒原理在两种特殊情况下的特殊表述. 如果我们将力这个词(术语)换成其同义词动量流(强度)的话, 那么牛顿第一定律就可陈述为: 只要没有任何动量流入或流出一个物体, 那么该物体的动量 p 就保持不变; 而牛顿第三定律则变为: 每当有动量在 A 和 B 两个物体之间流动时, 流入物体 A 的动量流 F_A 总是等于流出物体 B 的动量流 F_B ; 反之亦然^[5]. 十分明显, 采用动量流的表述方式要比使用牛顿三大定律这种复杂的方式更胜一筹, 因为它不仅化繁为简, 而且脉络清晰、易于理解, 因而更有利于物理教学. 顺便指出, 在弄明白

了牛顿三大定律的真实含义以后, 我们有理由对于“牛顿三大定律是力学, 乃至整个物理学的支柱或基础”这种说法提出质疑.

(3) 关于对比教学 由于我国所有参加 KPK 教学实验的教师和学生都曾经学习过传统物理学, 他们对于掌握传统力学中某些概念的难处有过切身体会, 因而更加容易领会 KPK 力学课程的长处, 它的有效性、先进性和优越性. 对于有关动量流的这个教学实验案例而言, 教师如果在课堂上有意识地在动量流强度和力以及动量流密度和应力之间进行适当的对比, 会有助于提升学生学习 KPK 物理课程的兴趣, 增强他们学习 KPK 物理课程的信心, 从而产生积极的效果. 下面仍以绳子断裂问题为例予以说明.

在传统的物理教学中, 也往往会涉及到一些类似于绳子是否会被拉断那样的问题. 在讨论此类问题的过程中, 具体做法一般是以分析“力的大小”为重点, 让学生根据力的大小去判断物体是否会受到破坏(比如绳子或拉索是否会被拉断). 学生的注意力以及对问题的思考通常被引向求解力的数值大小且往往止于此, 而不会进一步去讨论作用时间和作用面积这些真正与物体破坏有关的主要因素. 这样一来, 学生对于物理现象的认识深度, 或者说对于现象本质的了解就很难到位, 只能始终停留在较浅的层次上而难以深入下去, 其结果只能是“知其然而不知其所以然”. 在这种情况下, 学生的独立思考和发挥空间被大大压缩, 创新意识自然无从激发, 甚至有可能因为理论与实际脱节, 忽视思考“影响绳子断裂的因素”这一本质问题而受到误导, 误认为力的大小是绳子是否会被拉断的决定性乃至惟一的影响因素.

相比之下, 由于在 KPK 力学中同时引入时间空间因素, 并且使用动量流强度和动量流密度的概念来解释物理现象, 教师在教学中就能够充分掌握主导权, 在讲解有关动量流对物体的破坏作用时不仅能够触及现象的本质, 而且游刃有余. 事实上, 整个 KPK 课程所传授知识的深度和广度要比传统物理学大得多, 内涵要丰富得多. 这些知识不仅与学生的日常生活经验、切身感受和所见所闻密切联系, 因而生动活泼、通俗易懂, 而且具有很强的逻辑性和可类比性, 有利于帮助学生透过现象看本质, 进行逻辑推理和合理想象, 从

(下转第 55 页)

(上接第 51 页)

而大大激发他们的学习兴趣和创新思维,提高他们将学过的理论与实际物理现象紧密地联系起来(即学用结合)的能力,教学效果因此可以得到明显改善.

6 结论

动量和动量流(包括其强度和密度)是构成 KPK 物理课程框架的若干基本概念中的一个重要组成部分. 本文作者在对它们进行剖析的基础上,突出了时间因素在这些概念中所起的作用,并且强调了动量流密度(应力)这个物理量的应有地位. 牢固地掌握这些概念及其应用对于帮助我们理解这门课程(或者说入门)至关重要. 我国的 KPK 课程教学实验还刚刚起步. 尽管目前已经取得了初步成果,但前面还有很长的路要走,可以说是任重而道远. 我们强烈地意识到,要想让这门面貌全新的课程真正在中国生根开花结果,不可能一蹴而就,不可能“毕其功于一役”. 我们还必

须完成大量基础性的研究工作,必须对它进行深入细致的诠释,必须紧密结合中国国情,为它注入中国文化元素或者说使它实现本土化. 我们相信,在有关教育主管部门的领导和参与以及众多学校和有识之士的大力支持下,我国 KPK 课程教学实验的进一步深入和推广一定能够迅速取得进展.

参 考 文 献

- [1] [1] Max Planck: Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reaktion in der allgemeinen Dynamik. Physikalische Zeitschrift, 9. Jahrgang, Nr. 23 (1908), S. 828
- [2] 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
- [3] 吴国玠, F. Herrmann. 试论一种新的能量观[J]. 物理与工程, 2010, 20(6): 3 ~ 6
- [4] 肖前, 李秀林, 汪永祥. 辩证唯物主义原理[M]. 北京: 人民出版社, 1991
- [5] F. Herrmann. 科学知识所背负的历史包袱. 吴国玠译. 国际物理教育通讯, 2010, (45)