



关于动量流的几点思考

皇甫泉生 吴国玠 顾铮尧

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

摘要 动量流这一概念的引入,为人们开启了一扇重新认识物理学,尤其是重新认识力学的大门.以动量流为主线阐述力学原理,可以使力学和电学之间的相似性清楚地显现出来,为这两门物理学分支学科中的动量与电(荷)量、动量流与电流、速度与电势等各个相应物理量及其计算式之间开展类比奠定坚实的基础.这种类比不仅使物理学在整体上能得到浓缩或简化,而且在认知层次上也能得到一定的提升.就力学自身而言,运用动量流的概念代替力的概念在许多场合下有助于以生动、形象、简便的方式解释物理现象,解决物理学问题,从而增强学生的学习兴趣,改进物理教学的效果,因而值得推介并进一步深入研究.

关键词 动量;动量流(强度);电流;类比

SOME THOUGHTS ABOUT THE CONCEPT OF MOMENTUM CURRENT

Huangfu Quansheng Wu Guobin Gu Zhengxian

(Department of Physics, College of Science, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093)

Abstract The introduction of the concept of momentum current opens a door for people to think afresh about physics, particularly mechanics. Momentum current could be taken as the main thread weaving through all chapters of mechanics and elaborating the mechanical principles. As a result, the similarities between mechanics and electricity are clearly highlighted and a solid foundation for the analogy between such corresponding physical quantities as momentum and electric charge, momentum current and electric current, velocity and electric potential, and their formulas in both the branches of physics can be laid. The analogy can not only make physics simplified and condensed on the whole, but also get some improvement in the cognitive level. As for mechanics itself, the use of the concept of momentum current instead of that of force would in many circumstances provide a vivid, visual, simple and convenient way to explain physical phenomena, solve physical problems, enhance the students' interest in learning physics and improve the teaching effectiveness, and thereby should be worth a recommendation and further investigation.

Key words momentum; the momentum current strength; current; analogy

物理学研究物质运动最基本、最普遍的规律,物理学的原理不仅是自然科学的基础,也是当代工程技术的重大支柱.因此大学物理无疑是理工科学生最重要的基础课程之一.物理学在与其他学科相互渗透、融合的过程中得到了迅速发展,其知识量的急剧增长与目前不断缩减的大学物理教

学课时之间产生了明显的冲突,成为当前困扰大学物理教育的一个难题.如何破解这道难题,是当

收稿日期: 2014-06-15

作者简介: 皇甫泉生,男,讲师,主要从事大学物理教学科研工作.
hufken@163.com

今物理教育工作者所面临的一项重要任务. 笔者认为, 动量流强度概念的引入可以在某种程度上为此提供一条颇具可操作性的新思路. 与此同时, 它对于拓宽学生的学术视野, 改进他们的思维方式, 提高他们的创新意识, 均具有积极意义.

如果有两个物体发生了相互作用, 那么这两个物体的动量都会发生变化, 而且人们早就发现其中一个物体动量的增加量一定等于另一个物体动量的减少量, 并且认为动量变化的原因是物体之间作用力的时间积累效应, 过程遵循动量守恒定律. 对于这一现象, 我们是否可将其中的动量想象成与电荷一样是一种能够流动的“物质”或“流体”^[1], 可以从一个物体流入另一个物体, 且其过程同样也遵循守恒定律呢? 这种想象能否有助于我们从另一个角度来看待力学, 看待物理学, 从而会有新的发现呢? 本文试图通过动量与电量、动量流与电流、速度与电势等力学与电学中相对应的物理量的类比, 来凸显出它们的物理过程和计算式方面的相似性, 更好地揭示出自然界现象的内在联系和普遍规律. 文中通过使用动量流的概念来解释一些力学现象, 显得更贴近人们的生活经验, 更容易被理解, 而且在许多场合下求解力学问题也会变得更加直观, 更加简便.

1 力学与电学的类比

1.1 动量流与电流

电荷(q)在导体中流动形成电流, 单位时间内流过任一截面的电荷量称为电流强度(I): $I = dq/dt$; 动量(p)在动量导体内流动所形成的流被称为动量流, 而单位时间内流过任一截面的动量称为动量流强度(I_p): $I_p = dp/dt$, 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^[2]. 对照牛顿第二定律: $F = dp/dt$, 可见动量流就是我们熟知的力, 近代物理学奠基人之一 M·普朗克早在 1908 年就指出, 动量流(强度)实质上就是力^[3]; 而事实上在工程电动力学中, 在 20 世纪就引入了动量流和动量流密度来解释电磁场与带电体之间因相互作用而发生的动量转移的现象和动量守恒定律.

如果在某区域对电流进行时间积分, 则可得: $\Delta q = \int_0^t I dt$, 可知该区域电荷的增量等于净流入该区域的电量, 若净流入该区域的电量为零, 则该区域的电量守恒. 如果在某区域对动量流进行时

间积分, 同样得: $\Delta p = \int_0^t F dt = I$, 表明该区域动量的增量(冲量)等于净流入该区域的动量, 若净流入该区域的动量为零, 则该区域的动量守恒.

电荷的传输可分成两种情况, 电荷在导线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就是运流电流. 同样, 动量的传输也有两种方式, 动量在动量导体如棒、拉伸的绳中传输的传导动量流, 和由运动物体携带传输的运流动量流, 如帆船就是由运动的空气即风携带传递来的动量而航行的.

传导电流的材料可分为导体和绝缘体, 传导动量流的材料也可分为导体和绝缘体. 传导动量流的导体如固体材料、受拉伸的绳子和磁场等, 绝缘体则如空气和无摩擦的轮子等^[4].

1.2 速度差与电势差

引导电荷流动的驱动力为电势差, 当用导体连接两带电体时, 电荷会自动地从高电势处流向低电势处, 直到两带电体的电势相等为止; 引导动量流动的驱动力为运动速度差, 当两个相对运动的物体互相接触并发生滑动摩擦时, 动量将自动从具有较高速度的物体流向具有较低速度的物体(速度方向相同), 直到两物体的速度相等为止. 如果将带电体接地, 其电荷将全部流入地球, 最后电势为零; 如果运动物体与地面发生摩擦, 其动量也将全部流入地球, 最后速度为零. 如果要改变电荷的自然流向或者在没有电荷流动的地方产生电流, 需要外界的干预, 加入电源(电泵)产生电势差; 同样如果要改变动量的自然流向或者在没有动量流的地方产生动量流, 也需要外界的干预, 可以加入电动机(动量泵)产生速度差.

电荷运动时可以输送能量, 输送的能量流强度(功率)为电势差与电流的乘积, 即 $P = U \cdot I$; 动量流动时也可以输送能量, 输送的能量流强度等于动量导体的速度与动量流的乘积, 即: $P = v \cdot F$.

1.3 质量与电容

电荷可以在一个封闭的回路内流动, 形成稳定电流, 也可以在电容器上累积, 使电容器两端的电势差上升, 累积的电荷与电势差的关系为: $\Delta q = C\Delta U$; 动量也可以在一个封闭的回路内流动, 形成稳定的动量流, 也可以在物体上累积, 使物体的速度上升, 累积的动量与速度差的关系为: $\Delta p = m\Delta v$, 可见物体的质量可看作为物体的动量容^[5].

由以上的类比可明显地看出,一旦动量像电荷一样流动起来后,力学与电学具有让人惊异的相似性,对应物理量的数学关系如出一辙,具有运用类比法教学的潜力.当然,尽管电流和动量流在相应的物理过程中表现出许多的相似性,但它们毕竟不是同一个物理量,具有各自的特性,如:电流是标量,电势差也是标量,只有正负之分,计算时所遵循的是代数运算法则;而动量流是矢量,速度也是矢量,不仅有大小还有方向,它们在计算时所遵循的是矢量代数运算法则,因此物体速度大小只有对同方向上的速度分量进行比较才有意义.

2 动量在物体中流动的规律

把动量想象成与电荷一样是可以流动的“流体”,那么动量在物体中又是怎样流的呢?让我们用一个弹簧将 A、B 两个物体连接起来,把它们放置在光滑的平面上,如图 1 所示,观察动量在其中流动的规律.

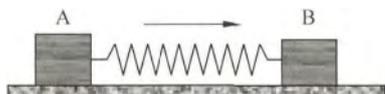


图 1 由弹簧连接的两个物体

取向右为动量正方向,在初始静止的系统中给予 A 物体向右的动量, A 物体开始向右运动,则弹簧将被压缩, A 物体的运动速度慢慢地变小, B 物体的运动速度渐渐地增加,说明 A 物体的动量通过弹簧逐渐地流入了 B 物体,直到弹簧恢复原状为止;之后,弹簧将被拉伸, B 物体的运动速度慢慢地变小, A 物体的运动速度渐渐地增加,说明 B 物体的动量又通过弹簧逐渐地流回了 A 物体,直到弹簧恢复原状为止.这非常清楚地告诉我们,物体中动量流动的方向与动量正方向的设定和物体的形变(应力状况)密切相关:当物体无形变时,物体中无动量流过;当物体被压缩(受压应力)时,动量流流向正方向;当物体被拉伸(受张应力)时,动量流流向负方向.

3 动量流概念的应用

尽管动量流和力(物体的动量变化率)所描述的实际上是同一个物理量,如果只是将力的名称改成了动量流强度,而没有实质观念上的变化,这一改变就显得毫无意义了.动量流的意义在于强

调动量的流动,在于用动态的方式来诠释传统物理中静态的力,在于建立力学与电学之间的类比.也就是说力的含义已经变为了动量流(强度),用动量流观念来阐述物理原理,解释物理现象^[6],解决力学问题.让我们通过下面的例子来体会两者的差别.

3.1 用动量流的概念解释力学现象

吊灯集照明与装饰于一体,常见于宾馆和家庭.对于如图 2 所示的吊灯,根据经典的力学知识可知,在这个平衡系统中至少有 4 个不同的力,其中一对是通过引力场作用在吊灯和地球上的万有引力,一对是通过悬绳作用在吊灯和天花板上的弹力,每一对力都遵循牛顿第三定律,而作用在吊灯上的两个力构成了一对平衡力,这 4 个力的大小都相等.

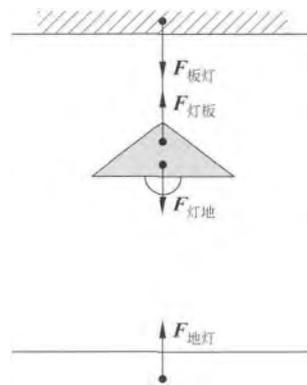


图 2 吊灯

当把动量想象成与电荷一样是可以流动的物理量时,所谓的力实际上是动量流,则上述事件可以这样来描述:动量从天花板流出,经过悬绳流入吊灯,再从吊灯流出,经引力场流入地球回到天花板,各处的动量流相等,没有地方有动量的累积,系统保持原来的运动状态.这里只有一个闭合回路,在其中流动的是动量,简洁明了,就像在水管中流淌着的是水,在电路中流动着的是电荷,通俗易懂,易于教学.反观上述牛顿力学中描述 4 个力用了 4 个不同名称,仿佛是把同一电路中 4 个不同地方的电荷用了 4 个不同的名字来命名一样,让人感觉完全是没有必要的,多余的.

3.2 用动量流方法解决平面桁架内力问题

桁架作为一种工程结构,在铁路桥梁、油田井架和大跨度的公共建筑中得到了广泛的应用.而桁架中各杆件的受力情况则是桁架的设计、材料的选择等方面的参考依据.在常见的理论力学教材中,大都采用节点法或截面法来求解桁架内力

问题,比较繁琐,略显复杂.因此,它很少出现在大学物理教材中.

如果我们不再依赖传统力学中力的概念,不再对桁架进行受力分析,而是作桁架的动量流图^[7],用动量流方法来求解桁架的内力问题,会简洁一点吗?

设有一质量可以忽略不计的桁架上载有物体,如图3所示,下面用动量流方法来求解各杆的内力.选取水平向右为 x 正方向,竖直向上为 y 正方向.对于图3所给定的桁架,可知各支撑点均处于压缩状态,则动量流由支撑点流入桁架,经桁架流进物体,再从物体流入重力场.而水平的梁杆不传递竖直方向的动量流,所以 y 方向的动量流只能在桁架的斜杆中流动.根据桁架的结构与对称性,可方便快速地绘出 y 方向的动量流,如图4所示.进一步地,根据 y 方向动量流的流向可判断出斜杆所处的应力状态,从中间向左右两边数第一根斜杆受压应力,第二根斜杆受张应力,最外面的斜杆受压应力,由此可确定 x 方向的动量流向,得到 x 方向的动量流,如图5所示,而且都是没有动量泵的动量流回路.根据 x 方向动量流的流动方向同样可确定上横杆为受压应力,下横杆为受张应力.



图3 载有物体的桁架



图4 y 方向的动量流图



图5 x 方向的动量流图

由图5可见, x 方向的动量流构成了一个个的闭合回路;图4中 y 方向的动量流也构成闭合回路,即从物体流出的动量经重力场进入地球再从支撑点流入桁架再流回到物体.每个环路动量

流的数值并不一定相同,但同一环内的动量流的数值一定相同.将在同一动量导体(杆)内的动量流分解为几个互相重叠的、自然流动的回路,不仅画起来方便,反映了动量的流动状况,而且非常直观,犹如一幅光弹应力光图,一眼就可看出桁架的受力(动量流)情况,也有利于数值运算.不妨设每根斜杆与水平方向的夹角为 45° ,桁架上所载的物体重 20N .由对称性可得,每条 y 方向的动量流均为 10N , 45° 的斜杆意味着每条斜杆上 x 方向与 y 方向的动量流相等,也是 10N ,即每条 x 方向的动量流也均为 10N .据此可以确定,每根斜杆上的应力为 14.14N ,上横杆应力为 20N ,下横杆中部应力为 30N ,两边应力均为 10N .

通过本例可见,与经典力学方法相比,动量流图的作图过程相对简单,而且动量流图简明直观,物理意义明确,数值运算也很简便,完全可以在大学物理课中进行教学.因此动量流取代力对解决实际问题不但没有障碍,而且更易理解,物理图像更清楚.

4 结语

在动力学教学中从动量入手,建立动量流的概念,使力学与电学在教学中运用类比方法成为可能,符合人们认识事物的规律和当代教育心理学规律.利用类比促使学生将新知识纳入到已有知识的系统中来,使相关物理知识建立起知识网络,不但有利于学生的理解与记忆,而且还能帮助学生融会贯通,举一反三,产生触类旁通的效果,即只要掌握物理学的一个分支学科,就能比较容易掌握其他的分支学科,从而大大提高学习效率,改进教学效果,缓解日益增加的物理知识与不断缩减的教学课时之间的矛盾.动量流概念降低了物理教与学的难度,这就为在教学中提升物理教学的广度和深度提供了有利的条件,为丰富物理教学内容,拓展物理知识面开辟了道路.根据德国F. Herrmann和G. Job教授采用动量流概念,运用类比法编著的卡尔斯鲁厄物理课程(KPK)初、高中物理翻译^[4]与改编^[8]的中文教材已出版,所涉及的知识除了经典物理学、量子物理学和狭义相对论的内容之外,还涉及化学、物理化学、信息学、天文学、液体力学、固体物理、宇宙学等其他学科,范围之广令人惊叹.只是没有见到大学物理

(下转第38页)

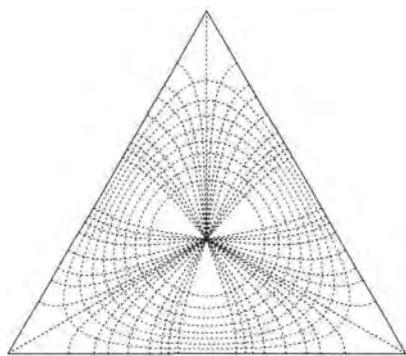


图5 正三角形中心点电荷的等势线和电场线

形上电流产生的等势线和电场线如图6所示。

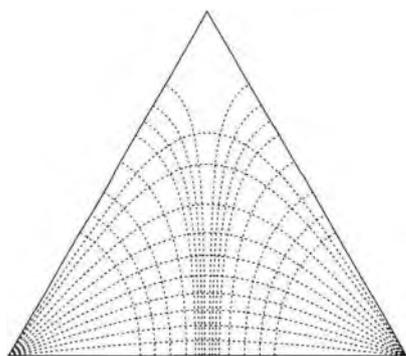


图6 正三角形上电流的等势线和电流线

由图6可以看出,越靠近电流流入(出)点,等势线越接近圆形,在边界处,等势线垂直于边界;越靠近边界,电流线越接近于边界,电流线与等势线垂直,电流线具有对称轴镜像对称性.这些图形性质符合从顶点流入流出正三角形上的电流(势)分布规律.

(上接第34页)

的教材,让人觉得有些遗憾.

让动量像电荷一样流动起来,用动量流取代力,将力学与电学在结构上的相似性或规律性凸显出来,符合物理学揭示客观世界最基本最普遍规律的宗旨,而由此体现出来的既是客观世界的对称与和谐,也是物理学的精彩和美.

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 吴国玠. 动量流强度和动量流密度及其破坏作用[J]. 物理与工程, 2012, 22(1): 47-51, 55.
- [3] Planck M. Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reak-

正方形或正三角形中心电荷所产生的电势(场),由于对称性,也可以用镜像电荷法做.这种情况下,镜像电荷有无穷多个,虽然电势表达式可以明显表示,但这种无穷求和式不大容易得到有限的解析表示,直接用它来数值求值,收敛速度慢,精度不够.文献[2-4]所给的保角变换和反变换,都可以用初等函数(或组合)得到,所以本文的第一种和第二种方法都可以使用.矩形或者三角形的保角变换涉及第一类不完全椭圆积分和不完全贝塔函数,其反变换解析表达式很难求出或者根本没有,就不能用文献[2-4]的方法来求等势线.我们将在另文中继续讨论数值求解保角反变换的例子.

参 考 文 献

- [1] 周凌燕,陈钢,郑洁梅. 电像法求解线电荷与带有半圆柱凸起的接地平板导体形成的电势和电场[J]. 大学物理, 2013, 32(1): 14-16.
- [2] 王福谦. 用保角变换法制作二维第一类格林函数[J]. 大学物理, 2010, 29(1): 26-29.
- [3] 王福谦. 求解二维静电场边值问题的一种方法[J]. 大学物理, 2013, 32(10): 24-26.
- [4] 王福谦. 复杂形状单连通区域二维第一类格林函数的制作[J]. 大学物理, 2013, 32(5): 20-23.
- [5] 高本庆. 椭圆函数及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1991.
- [6] 梁昆淼. 数学物理方法[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2010.

tion in der allgemeinen Dynamik [J]. Physikalische Zeitschrift, 1908 (23): 828-830.

- [4] Herrmann F, Job G. KPK 中学物理(初中版)[M]. 陈敏华,译. 上海:上海教育出版社, 2007.
- [5] Herrmann F, Schmid G B. Analogy between mechanics and electricity [J]. Eur Phys, 1985(6): 16-21.
- [6] 吴国玠. 关于德国 KPK 物理课程教学中若干问题的讨论[J]. 物理与工程, 2011, 21(3): 43-45.
- [7] Grabois M, Herrmann F. Momentum flow diagrams for just-rigid static structures [J]. Eur Phys, 2000(21): 591-601.
- [8] Herrmann F. KPK 新物理教程(高中版)[M]. 戚华,朱懿雄,陈敏华.等.改编. 上海:上海教育出版社, 2010.