

动量、动能与牛顿的力

——动力学的基础概念与图像

陈征^{1,†} 魏红祥² 张玉峰³ 郑永和⁴

(1 北京交通大学理学院 北京 100044)

(2 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(3 北京教育科学研究院 北京 100036)

(4 北京师范大学科学教育研究院 北京 100875)

2022-01-29收到

† email: chenzheng@bjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220208

1 引子：“不变性”是认识自然的基础

在人类探索自然的过程中，无论是将其归因于“造物主的完美”，还是基于“实用主义的必须”，有一条基本的信念始终贯穿其中，那就是宇宙中一定存在某些永恒不变的东西，它或许是组成世界的元素，又或许是物体上承载的某种性质，亦或是支配事物运行变化的法则。

这其实不难理解。因为如果不存在必要的不变性，比如物质如果可以凭空产生或消失，此时此地发现的规律如果因为换个时间、地点就失去效力，那么这世界对人类而言就将是无法认知的。无论是自然哲学还是现代科学都将失去意义，我们甚至将完全无法从自然运行中找到端倪从而趋吉避凶，让人类在残酷的生存斗争中存活下来。

因此，古代自然哲学中业已存在的有关“不变性”的思想，如古希腊留基伯、德谟克利特学说中原子的不生不灭，或是中国古代张载的“形聚为物，形溃反原”等^[1]，在以物理学为代表的近代科学建立

过程中并没有被抛弃，而是被进一步继承、完善和发扬。在物理学当中，有关物质和物质承载性质的不变性表现为一系列的“守恒律”，而有关规律的不变性则表现为“相对性原理”，两者共同构成了近代物理学大厦的基石。

动力学就是在“守恒律”的基础上建立起来的，它最核心的几个基本概念：力、动量、冲量、动能、功，也是在对运动中守恒量问题的探讨甚至争论中逐渐厘清和明确的。回顾这个过程，对理解动力学的基础概念与图像颇有益处。

2 动量与动量守恒

如本专栏曾反复提及的“物理学是用量描述质的学科”，研究物体的运动，建立定量描述物体运动的物理量是物理学家首先要做的第一步。

伽利略最早在研究打击现象时定性地提出“应该考虑锤子的重量和速度对打击效果的影响”；而笛卡儿(图1)则在《哲学原理》中写道：“如果物质的一个部分以两倍于另一个部分的速度作运动，而另一个部分的大小是这个部分的两倍，那么

我们必须认为这两部分中有同样的运动的量；而如果一部分减慢，我们必须设想某一大小相同的其他部分的速度增加了同样的数目”，并且在关于碰撞问题的讨论中提出：“如果一个物体与另一个强于它的物体相碰撞，它并不失去任何运动；但如果它与一个较弱的物体碰撞，它就会失去与它传给那另一个物体相同的运动的量。”^[2]这里不但看到“运动的量”的定量方案，即“运动的量”可以通过它的大小与速率的乘积来度量，而且看到了运动的量守恒的观念^[1]。

当然，笛卡儿的这个方案并不是今天我们熟悉的动量(mv)，首先它是一个没有方向的标量；其次从笛卡儿的哲学体系来看，物质世界的一切归结为广延和运动，而物体的本性仅仅在于广延，运动是“上帝”在每一瞬间注入物体的，那么这个“运动的量”更像“上帝”给予的某种“力”^[2]而非对运动状态的描述。

在《哲学原理》出版后不久，惠更斯(Christiaan Huygens, 图2)在1669年用一个思想实验证明了笛卡儿“运动的量”守恒的提法严格说

1) 笛卡儿在《哲学原理》中将运动描述为：“神是运动的初始(primary)原因；他总是保持着宇宙中相同的运动的量。”由此看出，笛卡儿的守恒思想有一定经验事实基础，但也有一定的主观信念因素。而今天物理学中的守恒观念则完全基于大量实验事实。

2) 这里带引号的“力”是指笛卡儿体系中引起运动的“被注入”的东西，或可称为“笛卡儿力”，而非我们熟悉的基于牛顿定律定义的力。



图1 笛卡儿(1596—1650)



图2 惠更斯(1629—1695)



图3 莱布尼茨(1646—1716)

事实上莱布尼茨在分析中将物体下落的高度作为力的度量,并且默认物体的质量与它拥有的“力”成正比,导致他试图反对的运动量的守恒其实已经隐含在自己的论证之中,两者并没有根本的矛盾。达朗贝尔在1743年发表的《论动力学》

来并不准确。(实验是这样的:分别从匀速行驶的船上和河岸两个参考系,考察同一个碰撞过程,依据笛卡儿的碰撞定律进行计算,得到的结果不满足笛卡儿也承认的相对性原理。)在指出错误的同时,他也提出了解决方案,即为“运动的量”引入方向^[3]。笔者虽然并不确定惠更斯对“动量”的理解是否也和笛卡儿一样是“上帝赋予的某种力量”,但至少形式上形成了今天我们熟悉的描述运动的物理量——动量(momentum)。

惠更斯还提出了多个物体碰撞时的共同重心保持匀速直线运动的定律,与今天我们熟悉的“(物体或质点的)系统动量守恒定律”内容上一致。而1670年,英国数学家沃利斯(John Wallis)最早将对运动(motion)的描述明确区分为两个物理量:力(vis)和动量(momentum)。牛顿在1687最早出版《自然哲学之数学原理》时,沿用了这种区分。

3 动能与能量守恒

惠更斯在碰撞问题的研究中还发现了另外一个守恒量:质量与速度平方的乘积(mv^2)。从今天的视角

看,这个惠更斯从完全弹性碰撞中发现的守恒量其实是动能的前身,这个守恒关系其实就是完全弹性碰撞中的动能守恒。但当时惠更斯并没有赋予这个守恒量一个明确的物理意义。

1686年,莱布尼茨(图3)在《学人辑刊》(*Acta Eruditorum*)上发表的《对笛卡儿和其他人关于自然法则的著名错误的简短证明》掀起了一段著名的科学史公案——“活力(vis viva)之争”,从哲学上对笛卡儿的“运动的量”概念发起了挑战。在笛卡儿的体系中,上帝赋予了物体运动,意味着运动就是“力”;而莱布尼茨指出运动应该是物体自己的性质,是物体位置的变化,和“力”是不同的东西。他通过对落体运动的分析,认为运动中守恒的不是“运动的量”而是“力”,并且提出这个“力”的度量是物质的多少与速度平方的乘积 mv^2 。

mv^2 被莱布尼茨看作了一种“力”。因为这种力能够在现实中产生对应的效果,如最终总能转化为将一个重物抬高或是降低一定的高度,莱布尼茨把这种“力”(vis viva)又叫做“活力”(living force)。

(*Traité de dynamique*)终结了这段争论。按照今天的观点,“笛卡儿力”对应的动量是牛顿定义下的力对时间累积的结果,其守恒是以等量时间为基准;而莱布尼茨的“活力”对应的动能则是牛顿定义下的力在空间中累积的结果,其守恒是以等量距离为基准。

当1807年托马斯·杨引入能量(energy)的概念,1829年科里奥利引入功的概念和动能的数学表达 $\frac{1}{2}mv^2$,1849—1851年开尔文勋爵引入术语:动能(kinetic energy),1853年兰金(Rankine)引入势能(potential energy),今天形式的机械能守恒定律得以表述。在功与能概念完善的基础之上,经过以迈尔、焦耳、亥姆霍兹等为代表的大量科学家对永动机、热功转换乃至化学、生理等方面大量过程的研究,进一步形成了更为广泛的能量守恒定律,其应用范围比动量守恒更广。

4 牛顿的力

从莱布尼茨与笛卡儿的争论中可以看出³⁾在物理学建立的早期,即便是在如笛卡儿、莱布尼茨这样的顶尖睿智的头脑中,“力”的概念依然是较为含混的。无论是笛卡儿

3) 这场争论持续了超过半个世纪,双方均有多位哲学家、数学家、科学家加入。

还是莱布尼茨,在其物理图像中的“力”都是物体自身拥有的某种东西的量度,更接近从推车、负重时人体肌肉的紧张或是体力的消耗中抽象出的那个自然语言中的“力量”的概念。

而我们今天熟悉的物理学中的力,即牛顿定义下的力($F = \frac{dP}{dt}$),表面看只是把动量对时间的变化率定义为力,实际上 $\frac{dP}{dt}$ 代表相互作用的效果强弱,它与笛卡儿、莱布尼茨的物理图像有着很大的不同。笛卡儿、莱布尼茨的“力”是物体自身拥有某种东西的量度,是属于每一个物体自己的;而牛顿定义下的力则是物体之间相互作用强度的量度,相互作用自然是属于两个物体之间的,单独一个物体并没有力可言。

基础物理中所说的各种力,其实只是相互作用按照不同机制(按性质分的力,如引力、电磁力、强相互作用力、弱相互作用力)或不同效果(按作用效果分的力,如拉力、压力、支持力、阻力等)分类的“别

称”。如果变换一套描述相互作用的方式,这些力甚至可以不出现。如拉格朗日力学和哈密顿力学,虽然仍是力学,也仅是对牛顿力学体系数学形式上的扩展,但其“语言体系”中已经没有我们熟悉的牛顿的力矢量(当然依然有对相互作用的描述,也可称为广义的力)。

5 动量、能量的守恒律与牛顿运动定律的关系

在基础物理的教学过程中,常常由牛顿第二、第三定律推导获得动量守恒定律,或是从牛顿第二定律推出动能定理,而后结合保守力做功得到机械能守恒定律,进而推广到能量守恒定律。于是给人一种感觉,仿佛动量守恒定律和能量守恒定律是牛顿运动定律的推论。

从前面的回顾中不难看出,无论是从碰撞问题中得到的动量守恒、动能守恒,还是重力场中的机械能守恒,乃至在电磁现象、热现象、化学现象、生命现象中广泛存在的能量守恒定律,都是基于大量实验的实验定律。伽利略、笛卡

儿、惠更斯等人对动量概念的构建和完善在大约1670年前就完成了,而出生于1643年的牛顿,其力学体系的构建显然受到了这些工作的影响,或可认为是对这些基于实验的工作的公理化。将动量守恒、动能或机械能的守恒看作牛顿定律的推论是不妥的。

从现代物理的角度看,植根于大量实验事实的动量守恒定律、能量守恒定律的普适性高于牛顿定律,在牛顿定律不适用的微观、高速等必须采用相对论、量子论物理的场景下,动量守恒、能量守恒(或扩展为质能守恒)依然有效,依然是支撑物理学大厦的基石。

参考文献

- [1] 王祖陶. 中国古代关于物质和运动守恒科学思想的发展. 自然科学史研究, 1982,1(2):97
- [2] 南星. 从“活力”之争看莱布尼茨的“力”概念. 科学文化评论, 2009,6(2):61
- [3] 吴童立. 巨人的对抗——作为笛卡儿反驳者的莱布尼茨动力学初探. 自然辩证法通讯, 2011,33(6):13

新书推荐

《磅礴为一》是中国科学院物理研究所曹则贤研究员继《一念非凡》和《惊艳一击》之后创作的“科学教育一字系列”的第三本,书名语出庄子《逍遥游》“磅礴万物以为一”,副标题“通才型学者的风范”则明确了本书的主角为科学史上一些被称为 polymath 的巨擘。本书包括序言、引子(庄周与李白——兼论学者的气象)以及正文十二篇,正文每篇介绍一位通才型学者,内容包括小传、主要学术成就分析及其在科学史上的影响等,力图揭示这些科学巨擘做出改

变世界的发现背后的思想渊源,涉及人物有伽利略、帕斯卡、欧拉、托马斯·杨、克里福德、格拉斯曼、哈密顿、勒庞、庞加莱、薛定谔、彭罗斯等。本书力求传达一个观念:渊博,渊博,欲成渊之深,必先为其博。认真探讨通才型学者的教育过程、成长过程及其创造生涯,对于未来学者的培养或有些许启发意义。本书的一个特点是针对所涉及的人物提供了详细的原始文献,即便是对专业的研习者也有参考价值。本书适于中学以上各知识阶层人士阅读。

读者和编者

