

文章编号:1000-582X(2005)01-0153-04

物质之量的量度——质量与物质 惯性的量度——动量*

邓昭镜

(西南师范大学物理系,重庆 400715)

摘要:提出了“动量是惯性的量度”的新的惯性量度定义,从建立“惯性”概念的根据、惯性的测量、惯性与物质运动状态间的关系、以及质能关系与惯性定义间的关系等几个方面详细地论述了“动量是惯性的量度”定义的正确性,揭示了“质量是惯性的量度”定义中存在的各种矛盾。

关键词:质量;动量;惯性

中图分类号:031

文献标识码:A

当笔者提出质量是物质之量的量度(这是牛顿早已提出过的概念)和动量是惯性的量度之后^[1],引起了物理学界许多同仁,尤其是中学物理教师的反对^[2]。这是不奇怪的,延续了两个多世纪的经典力学的基础概念,要对它有所触动势必会遭到反对,这也可以被理解为人们认识上的一种“惯性”。为此不得不再论质量是物质之量的量度,动量是惯性的量度。

1 $f = ma$ 不能作为引入“惯性”概念的根据

自从欧拉(1736年)提出质量是惯性的量度之后,直到现在几乎所有的教材在引入惯性概念时都是沿引 $f = ma$ 这个公式来定义质量,即对给定的力 f , 物体的质量 m 与其加速度成反比

$$m = \frac{f}{a} \quad (1)$$

然而这个公式是很不严格的,它只近似地适用于低速运动情况,对于高速运动,当 v/c 不很小时,这个式子会产生明显的误差。显然,对于引入作为物理学中最基础性的概念——惯性时,所依据的必须是牛顿定律的严格形式。事实上,牛顿第二定律的严格形式应表示为^[3]。

$$f = \frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} = ma + \frac{f \cdot v}{c^2} v \quad (2)$$

式(2)中的最后一项不能随意丢掉,这不仅是因为这一项与速度的平方成正比,随着速度升高这一项对惯

性的贡献会愈来愈重要;更重要的是由于第2项 $v/c^2 \cdot (f \cdot v)$ 中包含有 f 因子,它使得 m 和 a 之间的关系不可能是简单的反比关系,而是以 f 因子反复迭代所形成的 a 的复杂函数。同时这个复杂函数又以 $(v/c)^2$ 之比依赖于速度,因此随着速度升高这种复杂函数关系必然会显得愈来愈重要。由此可见,那种完全依据仅在低速、低能运动时 m 与 a 之间才存在较好的简单反比关系;而在高速、高能运动已不再存在这样关系的式(1)来引入惯性概念,并将质量定义为惯性的量度显然是错误的。由此笔者才提出不能用式(1)作为引入物理学普适的基础概念——惯性的依据,而必须采用牛顿第二定律的严格形式,即:

$$\frac{dp}{dt} = f \quad (3)$$

式(3)断言,外力,也只有外力 f 才能产生物质运动的动量 p (不是 m , 也不是 v) 的变化率,当外力 $f = 0$ 时,有 $\frac{dp}{dt} = 0$, 这时 p (不是 m , 也不是 v) 保持守恒。就是

说在不受外力时,表征物质机械运动的动量 p 自身要保持恒定不变。若静止, $p = 0$, 它绝不会无缘无故地自己产生运动。 $p \neq 0$, 它绝不会无缘无故地自己改变 p 值,而随意运动,它将以恒定 p 值作匀速直线运动。若要进一步追问为什么物质的运动在不受外力作用时,其机械动量 p 要保持守恒呢? 这实际上已涉及宇宙观问题,而对于唯物论者,总是坚持物质运动不灭这

* 收稿日期:2004-08-20

作者简介:邓昭镜(1932-),男,湖北宜昌人,西南师范大学教授,主要从事热力学与统计物理研究。

个基本观点,这是认识的出发点。于是牛顿在此基础上(不管牛顿本人是否自觉地意识到)提出了他的著名的第一定律——惯性定律,即:物质运动恒有保持其运动状态 p 不变的本性,或保持静止,或作匀速直线运动($p = \text{常矢}$),直到它所受的外力足以改变其运动状态为止^[4],由此可见,根据严格的牛顿第二定律形式,物质的机械运动量 p 具有自身保持不变的本性,即惯性,因此笔者提出动量是惯性的量度。

2 惯性的测量

惯性如何测量这是值得深究的问题,因为它直接涉及对惯性概念的认识。显然,用静止的天秤称量的方法只能称出物质含量之多少,即物质之量。这是最直观意义中的质量,即:质量是物质之量的量度。于是如何用动力学方法来测量或比较物质运动的惯性问题就成为相当实际的问题了。按传统的动力学方法,即在一个质料均匀的平面上,用质料相同而质量不相等的滑块(m_1, m_2)。以相同的初始速度 v ,从同一起始线沿速度 v 方向运动,滑块在其克服摩擦阻力的过程中,用比较两滑块滑过的距离来比较两滑块保持运动能力的强弱。初看起来这个方法似乎可行,但稍加分析就知道是行不通的。事实上由于滑块与平面间的摩擦力 $|f| = \mu mg$ 正比于滑块的质量,于是按牛顿第二定律所建立的滑块的运动方程中会自动地消去质量。其结果是滑块滑过的距离只决定于它的初始速度,与滑块的质量无关。同时又由于两滑块的初始速度相等,都等于 v ,于是两滑块质量(无论它们的质量是相等还是不等)必将滑过相等的距离,由式(4)给出:

$$x = \frac{v^2}{2\mu g} \quad (4)$$

因此,上述实验方法无法比较两滑块的惯性,但是若将上述实验改装一下就可以比较两滑块的惯性因质量不同所产生的差异。今在均质平面上置一质量为 M 的沙箱,另有两个质量为 m_1, m_2 的小球,现在令两球分别都以速度 v 射入沙箱,试看它们分别射入沙箱后,沙箱所滑过的距离。易于证明沙箱滑过的距离由式(5)给出:

$$x = \frac{v^2}{2\mu g} \left(\frac{m_i}{m_i + M} \right)^2 \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

式(5)表明质量 m_i 大者,滑过的距离就大,因而它所反映的惯性就愈强。但是若用质量为 m 的小球分别以不同的速度 v_1, v_2 射入沙箱时,沙箱所滑过的距离将由式(5)给出:

$$x = \frac{v_i^2}{2\mu g} \left(\frac{m}{m + M} \right)^2 \quad i = 1, 2 \quad (5')$$

这又表明速度愈大,滑过的距离也愈大,它所相应的惯性也会大。由此可见,沙箱所滑过的距离不仅依赖于小球的质量,同时还依赖于小球的速度,就是说沙箱滑过的距离将依赖于 m 与 v 的积,即动量 $p = mv$ 。因此,用沙箱滑过的距离来测定小球惯性的过程,在实际上就是测定小球的动量。就一般而论任何测量物体惯性的动力学方法,归根结底所测量的都是物体的动量和动量的变化,这是牛顿第二定律的必然结论。显然,这就表明动量是惯性的量度。

3 惯性与物质运动状态密切相关

笔者提出的观点——动量是惯性的量度与传统观点——质量是惯性的量度之间分歧最明显之处是如何认识静止($p = 0$)时物质运动所具有的惯性问题。按前一观点,物体的惯性与物体的运动状态密切相关,当 $p = 0$, 物体的惯性应当是零。按后一观点,认为惯性是不依赖于物体力学运动状态的固有属性,因此,物体的惯性与物体的力学运动状态毫无关系(至少在低速运动情况下是如此),物体的惯性只决定于它所具有质量。于是无论物体是运动还是静止,它的惯性始终是不变的。因此静止时物体的惯性绝对不可能等于零,而应当保持原有值。为了判明这2种观点谁是谁非,先来看一个熟悉的实例。当乘车时,车子启动瞬间,身体会突然后倾,这是由于身体产生的惯性作用所显示的效应。但是不多一会儿由身体产生的惯性作用效应在逐渐减弱,直到当身体与车子取得共同前进速度时,由身体相对于车子静止时,这种惯性作用效应就会完全消失。还有,当司机启动车子的过程非常缓慢时,身体产生的惯性作用就非常小,有时甚至觉察不到。反之,当司机启动极其迅速,或突然刹车时,身体产生的惯性作用就非常显著。于是要问为什么由身体产生的惯性作用会随时间逐渐减弱,甚至消失呢?为什么车子不同的启动(或停车)状态所引起的身体的“惯性作用”会迥然各异呢?可以看出,若按前一论点——动量是惯性的量度,这里有关“惯性作用”的产生、变化和消失等等现象均能得到满意地解释,而按后一论点——质量是惯性的量度,就会陷入难以克服的矛盾中。实际上,当车启动时,身体的重心与车箱之间产生了相对动量;同时又由于车子对身体的摩擦阻力作用,将使在车子启动时产生的相对动量逐渐减弱直至消失。这样就使人感受到由相对动量产生时最初明显,尔后又逐渐减弱直到消失的惯性作用过程,完全符合动量是惯性的量度这个论点。但是根据质量是惯性的量度的论点,由于质量(在一般情况下)是不依赖于

运动状态(p)的量,因此由质量显示的‘惯性作用’理应不随运动状态变化而变化,然而实际上‘惯性作用’存在着随时间而变化的过程,这个现象直接与质量是惯性的量度论点相对立。由此可见质量与惯性并不是一回事,质量是,也只能是物质含量多少的量度,即物质之量的量度,它基本上不依赖于物质的运动状态,在物质运动状态的变化中保持恒定不变。但惯性——保持物质运动状态不变的本性则直接依赖于物质运动状态和状态的变化。也即依赖于 p 和 p 的改变, p 愈大,要将 p 标识的力学状态完全刹住(即使它静止下来)所需要的制动冲量就愈大, p 愈小,所需的制动冲量就愈小; $p=0$,物质静止,所需的制动冲量就等于零。显然这里所需要的制动冲量的大小正反映了制动该力学状态的难易程度,也就是该力学状态所具有的保持其运动状态能力的强弱程度,即惯性。同样,一个原来相对静止的物质($p=0$),它不会无缘无故地自己产生运动。若要使物质由静止($p=0$)达到某个运动状态($p=p_0$),则需要外界的动力冲量, p_0 愈大,需要的动力冲量也愈大。对这种动力冲量的需要,正反映了物质由静止状态达到 p_0 状态时它所具有的反抗改变其运动状态的本性,即惯性。物质在其改变运动状态中,无论是对制动冲量的需要还是对动力冲量的需要,它所显示的保持运动状态能力的强度恰好以同样的反作用强度加在作用物体上,使用作物体感受到被制动(或推动)物体对它的反抗能力的强度。前面沙箱实验中,正是在沙箱对小球运动的制动过程中测量小球对沙箱的反作用冲量强度来反映被制动小球所需要的冲量之大小,进而以此来比较不同质量小球以相同速度运动时所具有惯性的大小。达朗伯尔在他提出的原理中引入的作用在所论运动物体上的虚拟的惯性力^[5-6],在本质上正是物体在外力强制下改变其运动状态时,由物体运动状态的改变所显示的反抗其改变的效应,而在实际上这个效应正以同样的真实力的强度反作用在使被作用物体运动状态改变的作用物体上,因此使作用物体感受到被作用物体因其运动状态改所产生的反抗状态改变的反作用强度,即感受到被作用物体保持其运动状态的能力——惯性的强弱程度。

总之,质量和惯性本不是一回事,质量是物质之量的量度,它在低速状态下基本上不随运动状态变化而变化;惯性则与物质的运动状态及其变化密切相关,并以运动过程中物质动量的变化来量度,因此笔者提出动量是惯性的量度。

4 质量和能量

应当指出的是,这里所提出的质量是物质之量的量度的概念与牛顿当时提出的质量是物质之量的量度概念之间有着本质的区别。在牛顿的概念中‘物质之量’是与运动(即能量)无关的,可以脱离运动的,自身没有转化能力的客观实际存在对象之多少的量。而在笔者提出的概念中,‘物质之量’是与运动(即能量)不可分离的,自身具有转化能力的客观存在对象之多少的量。这种与物质运动紧密联系的‘物质之量’的观点已在式(2)中体现出来。而更能充分体现物质与运动不可分离观点的则是爱因斯坦提出的著名的质-能关系^[7]:

$$E = mc^2, m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}, \beta = \frac{v}{c} \quad (6)$$

这个关系定量地确立了质量和能量间的等效性。既然认定质量是物质之量的量度,则能量也同样好地量度物质之量。不仅如此,式(6)还扩展了物质之量的内涵。也就是说式(6)中给出的物质的质量与能量间的关系不仅包含实物粒子同时还包含场(如光子场、介子场等)物质的质量和能量间的关系,这些已得到量子场论和高能物理的理论和实验的支持。但是,如果质量是惯性的量度,显然能量也同样是惯性的量度(只差一常数 c^2),这样一来以下一些矛盾难以解释:

1) 能量是作功的本领,当然质量也必然是作功的本领,是使物质由一种运动形式转化成另一种运动形式的能力。例如在氢聚变反应和铀裂变反应中,当质量达到临界质量时,就会产生剧裂核反应,形成能量形式的迅速转化。在这里质量和能量是物质中的活跃因素,是一种转化的动力。但惯性恰好相反是保持运动状态(当然更要保持运动形式)的本领,或者说是标示阻碍运动及其形式转化的能力。一个转化,一个保持,要把两者同熔于同一质量概念中必然导致自相矛盾。

2) 在电子、正电子湮灭实验中,湮灭前电子、正电子的静止能量是 $2m_0c^2 = 1.002 \text{ MeV}$,按质量是惯性量度的论点,其惯性也必然是 $2m_0$ 。经碰撞湮灭后产生了静止质量为零的子光子,请问这时原正、负电子对所具有的惯性 $2m_0$ 是否也随之消失了,因而惯性似乎是可以消失的!

3) 由于 m 、 E 都是速度 v^2 的函数(参看式(6)),因此只要速度 v 的大小不变, m 、 E 是不会变的,因而由它们量度的惯性也不会改变。现在设想2次弹性碰撞试验,一次是质量 m 的小球以速度 v 在质量为 M 的大

球表面 r 点的切平面附近对大球掠射;另一次是小球以速度 v 在 r 点对大球正碰。由于弹性碰撞中小球的速度平方(v^2)不变,因此小球的惯性都应该相等,于是,被大球感受到小球因保持其运动状态的‘惯性作用’也应该相同。但事实上2种碰撞在大球上反映的惯性作用迥然各异,正碰的效应大大于掠碰。

如果确认动量是惯性的量度,则以上各种矛盾均迎刃而解,事实上对于矛盾1),由于惯性不是由质量(能量)来量度的性质,因此不会出现2种对立性质熔于同一概念中的矛盾;对于矛盾2),由于正、负电子对在淹没实验中仍然遵守能量守恒和动量守恒定律,因此在淹没中虽然消灭了它们的静止质量($2m_0$)以及与之相应的能量和机械动量,但同时产生了 γ 光子的电磁能量 $h\omega$ 和电磁动量 $\frac{h\omega}{c} \frac{k}{k}$ (k 是波矢量), γ 光子的电磁动量在障碍物上产生的光压显示了由 γ 光子电磁动量标示的电磁惯性。可见物质的惯性并未消失,只是以电磁惯性的形式表现出来;对于矛盾3),在弹碰撞中虽然速度 v 的大小没有改变,但2种碰撞所引起

的动量变化大不相同,正碰引起的动量变化接近 $2mv$,掠碰引起的动量变化 $\Delta P \ll mv$,因此正碰对大球产生的惯性反作用远大于掠碰中的惯性反作用。

参考文献:

- [1] 邓昭镜,邓玉兰.质量是惯性的量度,还是物质之量的量度[J].物理教师,2001,21(12):33.
- [2] 徐祖年.质量是惯性或引力的量度[J].物理教师,2002,22(11):27.
- [3] MøLLER C. The Theory of Relativity[M]. London: Oxford University Press,1952. 74 - 75.
- [4] SOMMERFELD A. Mechanics[M]. New York: Academic Press INC, 1956.
- [5] HEXPACOGB A N. 理论力学教程[M].朱广才译.北京:高等教育出版社,1955. 258 - 260.
- [6] ROSENBERG R M. Analytical Dynamics of Discrete Systems[M]. New York: Plenum Press, 1977. 121 - 128.
- [7] 倪光炯.改变世界的物理学[M].第2版.上海:复旦大学出版社,1999. 385 - 387.

Measuring of Quantity of Matter-mass and the Measuring of Inertia of Matter-momentum

DENG Zhao-jing

(Department of Physics Southwest China Normal University, Chongqing 400715, China)

Abstract: A new definition of inertia, i. e. the momentum is the measuring of inertia of matter, is proposed. The article through and etc., subjects, the correctness of the new notion of inertia: The momentum is the measuring of inertia has been demonstrated, and the unsolved contradictions of the traditional definition of inertia. And the mass is the measuring of inertia has been revealed.

Key words: mass; momentum; inertia.

(编辑 张 苹)