高等学校物理学小丛书

质量与能量

陈方培 编

人民教育出版社

高等学校物理学小丛书

质量与能量

陈方培 编

人民教育出版社

量、扩大知识面并配合高等学校普通物理课教学需要而编写的参考读物。可供有关学生和任课教师阅读。本册较全面地论述了物理学中质量与能量这两个重要的基本概念随物理学理论的发展而发生的深刻变化，叙述深入浅出，有利于读者深入理解这些概念的本质。

高等学校物理学小丛书

质量与能量

陈方培 编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32　印张 3.25　字数 79,000

1979年8月第1版　1979年12月第1次印刷

印数00,001—28,000

书号 13012·0374　定价 0.26 元

目　录

前　言

不论在经典物理学中或是在近代物理学中，质量与能量都是最基本的物理概念。“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”①在生产斗争和科学实验的推动下，几个世纪以来，物理学的理论经历了巨大的发展，现在仍然在不停地发展着。随着物理学理论的发展，质量与能量这两个基本概念也发生了深刻的变化。现在人们对这两个概念的内容和它们所反映的物质基本属性的认识已经愈来愈深入，愈来愈全面了。

写作本书的目的，主要是为学过大学普通物理课的学生、物理教师和其他对物理学基本理论感兴趣的读者进一步介绍质量和能量这两个基本概念。我们将着重阐明质量和能量的物理实质，以及这两个概念从经典物理过渡到近代物理是如何演变和发展的。为了便于理解，我们先在经典物理学的范围内，然后再转到近代物理学的范围，这样分别进行讨论。但并不一定按照历史发展的顺序来讲解。为了节省篇幅，我们将不叙述质量和能量两概念的发展史料。

由于质量和能量牵涉到物质的基本属性，它们同哲学密切相关。对这两个基本概念随着物理学实验和理论的进展所发生的变化，必须在辩证唯物主义的指导下，从物理学的理论本身着手，总结近代物理学的成就，来进行深入和全面的科学分析。

在本书写作过程中承梁昆淼、陈俊文等同志帮助审阅稿件，提出了许多宝贵意见，特此致谢。

① 转摘自《周恩来总理在第三届全国人民代表大会第一次会议上的政府工作报告》，1964年12月31日《人民日报》。

第一章　经典力学中的质量

在物理学中存在着三种不同的质量，这就是：惯性质量、引力质量和测度质量(即“物质之量”)。在经典力学中，这三种质量在数值上是彼此相等的，但是它们分别反映着物质不同的属性，因而它们的物理意义并不相同。下面我们对它们逐一地来进行讨论。

一、惯性质量

惯性质量是物体惯性的量度。牛顿第二定律$\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$中的$m$，就是惯性质量。在经典力学中每个可看作质点的物体，其机械运动都要遵守牛顿第二定律，因此每个质点都具有惯性质量。至于一个不能看作质点的物体，常常可以把它看作一质点系(连续体可看为质点系的特殊情况)。稍后我们将要说明，这类物体的惯性质量等于组成它的全部质点的惯性质量的总和。

为什么把牛顿第二定律$\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$中的$m$看为惯性质量？或者，从何说明它量度着物体(或质点)的惯性大小呢？这可以通过下述分析来理解。设有二质点，质量各为m_1和m_2。在它们彼此之间有力相互作用而又不受到其它外力作用的时候，按照牛顿第二定律

$$\boldsymbol{F}_1=m_1\boldsymbol{a}_1 \tag{1}$$

$$\boldsymbol{F}_2=m_2\boldsymbol{a}_2 \tag{2}$$

在上二式中，$\boldsymbol{a}_1$和$\boldsymbol{a}_2$分别是质点m_1和m_2的加速度，$\boldsymbol{F}_1$是质点m_1所受到的来自质点m_2的作用力，$\boldsymbol{F}_2$是质点m_2所受到的来自

质点 m_1 的作用力。根据牛顿第三定律

$$\boldsymbol{F}_1 = -\boldsymbol{F}_2 \tag{3}$$

由式(1)、(2)、(3)易得

$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{\boldsymbol{a}_2}{\boldsymbol{a}_1}$$

即

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \tag{4}$$

式(4)说明，在同样大小的力作用下，m较大者得到的加速度数值较小，这表明其运动状态较难改变，即惯性较大。总起来看，就可以得出结论：m较大者，惯性也较大。上述结论说明了牛顿第二定律中的m量度的是物体惯性的大小，因此便把它叫做惯性质量。

在经典力学中，惯性质量具有确定性和可加性这两种重要特性。

所谓惯性质量的确定性指的是：对于一个指定的质点（或物体），其惯性质量具有确定的数值。在经典力学中，这种确定性还表现在物体的惯性质量不随运动状态（位置和速度等）而变。这是经典力学的基本假设之一，它乃是真实情况的近似表现。狭义相对论认为物体的惯性质量要随其运动速度而改变，但当速度一定时，物体的惯性质量仍是确定的。

所谓惯性质量的可加性指的是：若一个物体由 n 个质点（或 n 部分）所组成，这 n 个质点（或 n 部分）的惯性质量分别为 m_1、m_2、…、m_i、…、m_n，则该物体的总惯性质量将为 $M=\sum\limits_{i=1}^{n} m_i$。

为了说明惯性质量的可加性，首先要弄清楚一个不能看作质点的物体（或质点系）的惯性质量如何确定？我们已经知道，对于质点，其惯性质量可以根据牛顿第二定律用比值$\frac{F}{a}$来确定。但是对于不能看作质点的物体，一般说来其运动是比较复杂的（既有整

体的平动、转动、还可能有各部分之间的相对运动)，不可能像质点那样，简单地把牛顿第二定律 $\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$ 直接应用于研究整个物体的全部运动。然而，对于一个不能看作质点的物体，其质心运动则比较简单，遵守所谓质心运动定理①:

$$M\frac{d^2\boldsymbol{r}_c}{dt^2}=\boldsymbol{F} \tag{5}$$

式(5)中的M等于组成物体的全部质点惯性质量的总和，即

$$M=\sum_i m_i \tag{6}$$

式(5)中的 $\boldsymbol{r}_c$ 为质心的位置矢量，因而$\frac{d^2\boldsymbol{r}_c}{dt^2}$为质心的加速度，$\boldsymbol{F}$ 是

---

① 质心运动定理可证明如下:

设质点系中任一质点 m_i 的位置矢量为 $\boldsymbol{r}_i$，所受的外力和内力分别为 $\boldsymbol{F}_i^{(e)}$ 和 $\boldsymbol{F}_i^{(l)}$

则 $m_i\frac{d^2\boldsymbol{r}_i}{dt^2}=\boldsymbol{F}_i^{(e)}+\boldsymbol{F}_i^{(l)}$, $i=1,2,\cdots,n.$

因而

$$\sum_{i=1}^{n} m_i\frac{d^2\boldsymbol{r}_i}{dt^2}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i^{(e)}+\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i^{(l)}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i^{(e)}=\boldsymbol{F}$$

$$\left(\because\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i^{(l)}=0\right) \tag{a}$$

质点系的质心位置系由下式确定:

$$\boldsymbol{r}_c=\frac{\sum\limits_{i=1}^{n} m_i\boldsymbol{r}_i}{\sum\limits_{i=1}^{n} m_i}$$

由此可得

$$\sum_{i=1}^{n} m_i\frac{d^2\boldsymbol{r}_i}{dt^2}=\left(\sum_{i=1}^{n} m_i\right)\frac{d^2\boldsymbol{r}_c}{dt^2}=M\frac{d^2\boldsymbol{r}_c}{dt^2} \tag{b}$$

将式(b)代入式(a)，即得到质心运动定理:

$$M\frac{d^2\boldsymbol{r}_c}{dt^2}=\boldsymbol{F}$$

物体所受全部外力的合力。质心运动定理可以这样来理解：如果把所考虑的物体(或质点系)缩集在其质心上，形成一个惯性质量为M的虚构质点，这个虚构质点在合力$\boldsymbol{F}$作用下所得到的运动，便是所考虑物体(或质点系)的质心的运动。既然这个虚构的质点可设想是由整个物体缩集而成的，那末就有理由认为：这个虚构质点的惯性质量M，就是整个物体的惯性质量。这一关系就是说，对于不能看作质点的物体(或质点系)，其惯性质量可以根据质心运动定理(即式(5))，用比值$\dfrac{\boldsymbol{F}}{\dfrac{d^2\boldsymbol{r}_c}{dt^2}}$来确定。在物理学中，正是如此来确定任意物体的惯性质量的，这也就是具有线度的物体(或质点系)，其惯性质量的定义。式(5)中的M由式(6)所确定，因此与上述定义相联系，惯性质量必然具有可加性。

必须指出，质心的运动只可用来代表物体(或质点系)的平动，而不可能反映物体(或质点系)的转动以及物体各部分之间的相对运动；因此由式(5)所确定的惯性质量M，只能作为整个物体(或质点系)平动惯性的量度。大家知道，物体除平动的惯性外，还具有转动的惯性，而后一惯性是由转动惯量来量度。

在经典力学中，根据惯性质量的确定不变性和可加性，就可推出惯性质量守恒定律：一个物质封闭的力学体系（同外界无物质的交换），其总惯性质量保持不变。这个推论是很容易得出的，因为在经典力学中，一个物质封闭体系所包含的质点数目是不变的；根据惯性质量的确定不变性，每个质点的惯性质量应保持不变，再根据惯性质量的可加性，这个物质封闭的力学体系的总惯性质量当然也要保持不变了。

质量守恒定律早在十八世纪，在化学开始成为一门科学的时候，便从大量的实验事实中总结出来了。但是我们要指出，当时实验所测定的质量乃是引力质量，因此那时直接由实验得到的质量

守恒定律，乃是引力质量守恒定律。可是，我们将要说明，惯性质量和引力质量是彼此等效的，因此若引力质量守恒定律成立，惯性质量守恒定律也必然成立。

二、引 力 质 量

引力质量是物体产生引力作用和感受引力作用能力的量度。牛顿万有引力公式 $F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$ 中的 m_1 或 m_2 就是引力质量。引力质量又可更细致地区分为主动引力质量和被动引力质量，前者是物体产生引力作用“能力”的量度，后者则是物体感受来自其它物体的引力作用“能力”的量度。每个物体既产生引力作用又感受引力作用，因此每个物体都既具有主动引力质量又具有被动引力质量。对同一物体的这两种引力质量，当然不能先验地断定它们相等，但如果牛顿第三定律成立的话，我们便可证明，这两种引力质量总是互成比例的。

设有两个物体(更严格地说应为质点)，距离为 r，物体 1 的主动引力质量为 m_1^I、被动引力质量为 m_1^P，物体 2 的主动引力质量为 m_2^I、被动引力质量为 m_2^P，则物体 1 所感受到来自物体 2 的引力为

$$F_{2\to1}=G\frac{m_1^P m_2^I}{r^2} \tag{7}$$

物体 2 所感受到来自物体 1 的引力为

$$F_{1\to2}=G\frac{m_2^P m_1^I}{r^2} \tag{8}$$

根据牛顿第三定律

$$F_{1\to2}=F_{2\to1}$$

结合(7)、(8)两式可以推出

$$\frac{m_1^I}{m_1^P}=\frac{m_2^I}{m_2^P}=\kappa \tag{9}$$

这就是说：主动引力质量与被动引力质量永远是成正比的，而且比值是普适常数 κ。通过适当的单位选择，我们总可以使式(9)中的普适常数 $\kappa=1$，于是可以认为：对于任何物体，其主动引力质量与被动引力质量总是相等的，因此以后我们就不用再区分这两种引力质量了，可把它们统称为引力质量并以 $m^{引}$表之，即

$$m^I=m^P=m^{引}$$

下面结合着地球对物体的引力(即重力)来讨论引力质量。设地球近旁存在某一物体 A，其引力质量为 $m^{引}$，地球的引力质量为 $M^{引}$，则物体 A 所受到来自地球的引力为

$$W=G\frac{m^{引}M^{引}}{(R+h)^2} \tag{10}$$

式中 R 为地球的半径，h 为物体与地面(或标准海平面)，的距离。若物体 A 位于地面附近，$h \ll R$，则

$$W \approx m^{引}\left(G\frac{M^{引}}{R^2}\right)$$

令
$$g=G\frac{M^{引}}{R^2} \tag{11}$$

(后面我们将要说明 g 就是地面附近的自由落体加速度)于是在地面附近，物体所受到的重力可近似地写成

$$W=m^{引}g \tag{12}$$

这个公式是大家很熟悉的。

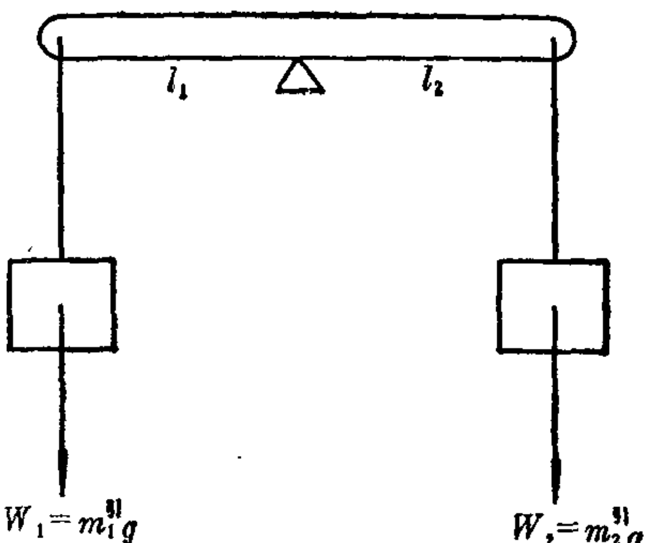


图 1

引力质量可用天平或秤来测定，其理论依据是杠杆的平衡条件。如图 1 所示，一杠杆两端分别悬挂重量各为 W_1 及 W_2 的物

体，相应的力臂各为l_1、l_2。当杠杆平衡时，必有

$$\frac{l_1}{l_2}=\frac{W_2}{W_1}=\frac{m_2^{引}}{m_1^{引}} \tag{13}$$

根据式(13)就可用比较法来测定引力质量。在实验室、工厂和商店，目前我们多半是使用天平或秤来测定质量，因此所测得的乃是引力质量。

引力质量与惯性质量分别表示着物质的两种不同属性，然而实验事实告诉我们：物体的惯性质量与引力质量在数值上总是互成比例的，并且这一比值对任何物体都是相同的，与物体的成分和结构无关。任何物体的自由落体加速度彼此均相等，就是这类事实中最简单又最明显的一个。下面我们对这个事实进行一些讨论。设有两个物体在真空中自由落下，它们所受到的重力分别为W_1、W_2，惯性质量分别为$m_1^{惯}$、$m_2^{惯}$，则根据牛顿第二运动定律

$$m_1^{惯}a_1=W_1 \tag{14}$$

$$m_2^{惯}a_2=W_2 \tag{15}$$

上二式中a_1、a_2分别为两物体的加速度。根据实验观察的结果

$$a_1=a_2=a_0 \tag{16}$$

a_0是自由落体加速度，其值大约为9.80米/秒^2。又前面讲过

$$W_1=m_1^{引}g \tag{17}$$

$$W_2=m_2^{引}g \tag{18}$$

$m_1^{引}$、$m_2^{引}$分别为两物体的引力质量。由式(14)、(15)、(16)、(17)、(18)不难推出

$$\frac{m_1^{惯}}{m_1^{引}}=\frac{m_2^{惯}}{m_2^{引}}=\frac{g}{a_0}=c \tag{19}$$

式中　$c=\dfrac{g}{a_0}$ 是一普适常数。式(19)具体说明了物体的惯性质量与引力质量在数值上总是互成比例，比值c为普适常数。把式

(11)代入 $c=\frac{g}{a_0}$中，就可求出常数 c：

$$c=\frac{g}{a_0}=\frac{GM^{引}}{a_0R^2}$$

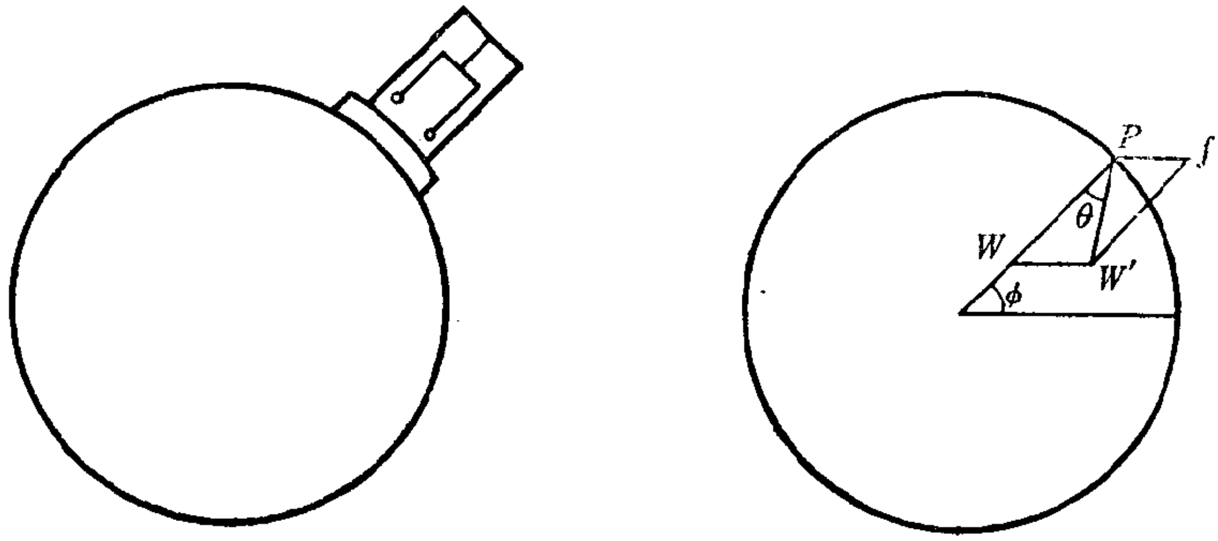
只要对引力质量选择适当的单位，总可以做到使 $c=1$，于是 $g=a_0$，亦即由式(11)所决定的 g 就等于自由落体的加速度。在物理学中通常总是使 $c=1$。若 $c=1$，式(19)告诉我们，物体的惯性质量在数值上也就等于引力质量了。这样一来，我们便可对这两种质量不加区分而合称为质量了，实际上这只是表示是一个存在关系：

$$m^{惯}=m^{引}=m \tag{20}$$

在物理学中把式(20)所表明的关系叫做惯性质量等效于引力质量。必须强调，惯性质量同引力质量的等效性并不意味着惯性与那种产生和感受引力作用的特性变成了同一属性，更不表示这两种属性中有一种消失，只剩下另一种了。我们认为惯性质量同引力质量的等效性只不过说明：物体的惯性与其产生和感受引力作用的特性，在一定的条件下总是同时存在、同时变化的，以至它们在数量上存在着正比的关系，因而在适当选择单位时，可用同一数量来表征这两种质量。

惯性质量同引力质量的等效性，不仅在经典力学中是一个基本关系，在广义相对论中也是研究引力特性的一个基本出发点。鉴于它的重要性，在物理学的历史上，曾不断地做实验对它进行过多次检验。伽利略在斜塔上对自由落体的著名观察，是物理学初期所进行的这类检验。由于条件的限制，那时实验的精确度当然是不高的，比较精确的实验是从 Eötvös 开始的。

Eötvös 实验是在 1890 年做的。这个实验的示意图如图 2.a，两个引力质量相等但材料不同的物体分别悬挂在扭秤的两臂上，



(a)　　(b)

图 2

实验的目的是要确定惯性质量同引力质量是否等效，这也就是要确定悬挂在扭秤上的两个物体的惯性质量是否相等。下面我们来说明：如果惯性质量与引力质量不等效，则杆将受到转矩而偏转。

设有一物体位于纬度为ϕ的P点(图2.b)，它受到地球引力$W=m^{引}g$。由于地球自转，在固定于地面的参照系中，物体还受到惯性离心力$f=m^{惯}\omega^2R\cos\phi$，ω是地球自转的角速度，R为地球的半径。必须注意，重力W系与引力质量$m^{引}$成正比，而惯性离心力系与惯性质量$m^{惯}$成正比。如图2.b所示，物体所受到的合力即表观物重W'与地球半径成一θ角。如果惯性质量与引力质量等效，则在同一地点，θ角不随物体而异，即任何物体所受表观重力的方向都是相同的，于是，悬在扭秤上的两个物体所受到的表观重力，在方向上是彼此平行的，因而杆将不受到转矩；但若惯性质量与引力质量不等效(即在Eötvös实验中两物体的惯性质量不相等)，则θ角即W'的方向将随不同的物体而异，结果悬在扭秤上的两个物体所受到的表观重力，在方向上彼此便不平行，因而杆将受到转矩的作用，结果就要绕悬线发生偏转了。

Eötvös 用一些材料不同的物体悬在扭秤上做过多次实验，在一定误差范围内观察到杆不发生偏转。从而得出结论：在精确度（即相对误差）为 10^{-8} 的范围内，物体的惯性质量与其引力质量可以认为是相等的。后来这个实验被重复过多次，精确度逐渐提高，到了六十年代和七十年代，一些物理学者用大改后的实验仪器重做了 Eötvös 实验，现在的精度已提高到 0.9×10^{-12}。Eötvös 实验是精度相当高的著名的物理实验。

前面讲过，惯性质量具有确定性和可加性这两种特性，并且遵守惯性质量守恒定律。如果引力质量精确地等效于惯性质量，那末引力质量也必定具有确定性和可加性，并且也遵守引力质量守恒定律。通常在经典力学中总是把惯性质量守恒定律与引力质量守恒定律当作同一个定律，并简称为质量守恒定律。

三、测度质量（物质之量）

前面讲过，确定性和可加性是惯性质量的两种基本特性，我们再把这两种特性写在下面：

A_1. 惯性质量的确定性：每个物体（或质点）的惯性质量具有确定的数值。

A_2. 惯性质量的可加性：一物体的全部惯性质量是其各组成部分惯性质量的算术和。

从数学测度论①的角度来看，如果一个集合的某种性质具有确定性及可加性，那末这种性质便可作为该集合的测度。例如平面几何图形是几何点的一种集合，面积是这个集合的测度。这与面积具有确定性及可加性密切相关。

---

① 可参考 Halmos，测度论，王建华译，科学出版社（1958）。

B_1. 面积的确定性：每一平面几何图形具有确定的面积数值。

B_2. 面积的可加性：一平面几何图形的全部面积是其各组成部分面积的算术和。

比较一下就可很明显地看出，性质 A_1、A_2 与性质 B_1、B_2 是非常相类似的。

一群质点(或物体)也可看为一个集合，我们称之为物质集合。如同面积可作为几何图形的测度一样，惯性质量也可作为物质集合的一种测度。

另一方面，生产实践和生活经验告诉我们，物质在数量上是存在着多和少的差别的。一个物体或一群物体所含物质多少的量度，通常称为物质之量。物质之量这一概念包含如下两个基本特性：

A_1'. 物质之量的确定性：每个物体(或质点)所含有的物质数量具有确定的数值。

A_2'. 物质之量的可加性：整个物体所含有的物质数量，是其各组成部分所含有的物质数量的算术和。

显然这两个特性乃是测度特性，因此物质之量也是物质集合的一种测度。

如同惯性质量遵守其守恒定律那样，物质之量也遵守其守恒定律，即一个物质封闭的物理体系所含有的物质数量，在时间进程中是保持不变的。

联系到物质不灭原理，物质具有上述测度特性和遵守守恒定律，是理所当然的。物质不灭原理是公认的一条基本原理，它肯定物质是不依赖于意识而存在的客观实在，是既不能创造也不能消灭的。这就意味着每个物体必有其确定的物质数量，并且一个物质封闭的物理体系所包含的物质数量，也必定不可能随时间而变化。

惯性质量与物质之量既然都是物质集合的测度，它们之间应

当存在一一对应的关系。换句话说，我们可以用惯性质量来表示物质之量。事实上牛顿就是这样做的，众所周知，他把物质之量与惯性质量看作是同一个物理量。必须注意，物质之量只反映了物质的测度特性，而惯性质量却一身而兼二任，它既反映了物质的惯性，又反映了物质的测度特性。可是，惯性和测度特性乃是物质两种不同的属性，为了使人们不致于把这两种属性混淆起来，当惯性质量被用来反映物质的测度特性（即用来量度物质数量的多少）时，我们认为最好把它改称为测度质量，测度质量与物质之量可作为同义语看待。我们主张把惯性质量这一名称只用来直接反映物质的惯性。例如，在热容量的定义 $C=mc$ 及密度的定义 $\rho=\frac{m}{V}$ 这两个公式中，把 m 的物理意义理解为物质数量的多少似乎更为恰当，因此宜称之为测度质量；而在动能公式 $E_K=\frac{1}{2}mv^2$ 及质心动量公式 $M\boldsymbol{v}_c=\sum_{i=1}^{n}m_i\boldsymbol{v}_i$ 之中，m、m_i 及 M 系指惯性的大小，它们应称为惯性质量。

还应当指出，虽然在经典力学（以及狭义相对论）中，惯性质量具有测度的特性，可用它来表示物质之量，可是以后我们将谈到，在广义相对论中，由于弯曲时空的影响，惯性质量将不再具备测度的特性，不能用它来表示物质之量，但在广义相对论中，仍可望找到其它具有测度特性的物理量藉以表示物质之量。如果把测度质量与物质之量作为同义语，则在广义相对论中，惯性质量同测度质量将是两个完全不同的物理量了。这也就是我们引进测度质量使之与惯性质量相区别的更主要的原因。当然，在经典力学中，惯性质量、测度质量实际上是同一个物理量，而惯性质量又与引力质量彼此等效，因此在经典力学中，往往把这三种质量不加区分而统称为质量。