对一些物理概念和规律的思考

（经典物理部分）

陈方培　著

大连理工大学出版社

内 容 简 介

本书是一本大学普通物理课程的参考书，它对经典物理学中的一些基本概念和基本规律进行了较深入和较全面的探讨，对某些物理概念的通常叙述和传统观点提出了质疑，并发表了作者的见解和看法。它能够启发读者进行思考，有利于培养学生钻研问题和解决问题的能力。

本书是一本普通物理课程的参考书，可供理工科大学生、大学和中学物理课教师参考。

对一些物理概念和规律的思考

Dui Yixie Wuligainian He Guilüde Sikao

(经典物理部分)

陈方培 著

大连理工大学出版社出版发行　　辽宁省金州印刷厂印刷

(大连市甘井子区凌水河)

开本：787×1092　1/32　印张：$5^1/_4$　字数：113千字

1989年3月第一版　　1989年3月第一次印刷

印数：0001—3000册

责任编辑：许芳春　责任校对：苗　田　封面设计：姜严军

ISBN　7-5611-0095-7/O·16　定价：0.93元

前　言

写作本书的目的，主要是向正在学习普通物理课程的理科和工科的大学生提供一本参考书，帮助他们更好地理解所学的物理基本概念和基本规律，巩固和增加获得的物理知识。本书也可供大学基础物理课教师、中学物理教师以及其他对物理基本概念和基本规律感兴趣的读者参考之用。

本书对物理学中的一些基本概念和基本规律进行了较深入和较全面的讨论，着重于对基本概念的物理本质的分析和探讨。本书还对某些物理概念的通常叙述和传统观点提出了质疑，并发表了作者自己的见解和看法。作者希望这本书能启发读者进行思考，培养他们钻研问题和解决问题的能力。考虑到大学一、二年级的数学知识水平，本书尽量少地使用程度较高的数学工具。

本书由20篇文章组成，每一篇文章讨论一个（或彼此有密切联系的几个）物理基本概念或一个物理基本规律（或原理）。每篇文章是独立的，但相互之间也有着一些联系，而且按文章的内容使次序的安排与普通物理教科书所讲内容的次序是一致的，故每一篇文章也可作为书的一节。

本书各篇文章都是根据作者过去长期从事大学普通物理课教学工作所累积的资料整理后写成的，其中有些问题是学生提出来的，有些问题是在备课中发现的。有两篇文章过去曾发表过，由于尚有参考价值和为了使本书的内容更为完整，在稍作修改后一并收入。

本书内容限于讨论经典物理的基本概念和基本规律，20篇文章涉及经典物理的力学、热学、电学和波动光学几个方面。对于近代物理方面的问题打算另写一本专集。

目　　录

1.参照系与坐标系

在数学中为了确定空间几何点的位置，需要坐标系。有了坐标系，就可以用称为坐标的一组数来表示一个几何点的位置。比较广泛的坐标系是斜坐标系，它由一组相交于一点的有向直线以及单位长度构成，有向直线称为坐标轴，坐标轴的交点称为坐标原点。在三维空间中，描述质点的位置需要三个独立变量，这就要有三条不共面的坐标轴。在图 1-1 中画出的是三维斜坐标系，O 为坐标原点，X、Y、Z为斜坐标轴，这三条轴形成相交于坐标原点的三个平面XOY、YOZ、ZOX，Ol、Om、On 各为 X、Y、Z 轴上的单位长度，它们不必相等。如果我们要确定一点P的坐标，可通过 P点作三个平面分别平行于YOZ、ZOX、XOY，各与 X、Y、Z

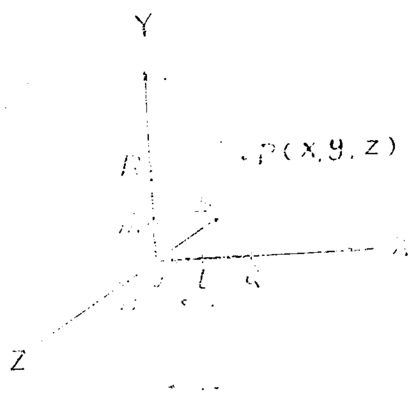

图 1-1

轴相交于 Q、R、S 点，若 $\vec{OQ}=x\vec{ol}$，$\vec{OR}=y\vec{om}$，$\vec{OS}=z\vec{on}$，则 (x, y, z) 就是P点在斜坐标系中的坐标。

如果斜坐标系中的坐标轴 X、Y、Z 互相垂直，并且令各轴上的单位长度相等，斜坐标系便变成了直角坐标系。直角坐标系是最常用的坐标系，用它表达的一些几何关系也比较简单，例如在直角坐标系中，从坐标原点至坐标为（x、y、z）的P点的距离 r 满足关系

$$r^2=x^2+y^2+z^2$$

但在斜坐标系中这个关系不成立。

从以上对斜坐标的介绍中可以看出，用坐标系来确定点的坐标实质上包含着两方面的内容：第一，坐标系具有一套用来确定坐标的基准，坐标轴、坐标原点、单位长度都是一些基准；第二，还要有一套决定坐标的方法，如上述在斜坐标系中用以决定P点坐标x、y、z的方法。

除斜坐标系和直角坐标系外，还存在许多不同的坐标系，它们各有自己的基准和决定坐标的方法。例如球坐标系也是一种常用的坐标系，它可看成由直角坐标系演化而成。如图1-2所示，$OXYZ$为直角坐标系，P为待定坐标点，作一直线段连接 O、P两点，按照取定的长度和角度单位，分别量出 OP 的长度 r、OP 与Z轴的夹角 θ 以及平面 POZ 及平面XOZ之间的夹角φ，则（r、θ、φ）就是 P 点在球坐标系中的坐标。球坐标系的基准乃是Z轴、XOZ 平面、坐标原点O、以及长度和角度的单位。

在物理学上常根据物理问题的特点和求解的方便来选用各种各样的坐标系。在这里没有必要也没有可能对这些坐标系一一加以介绍。但必须强调，不管坐标系如何千变万化，

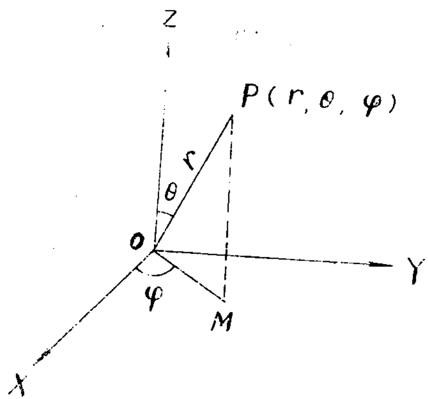

图 1-2

它们的作用都是以坐标来表示几何点的位置，它们都有其基准和决定坐标的方法。还要指出，在各种坐标系的坐标之间存在一些代数关系，例如在直角坐标系同球坐标系的坐标之间存在下述关系：

$$z=r\cos\theta$$

$$x=r\sin\theta\cos\varphi$$

$$y=r\sin\theta\sin\varphi$$

$$x^2+y^2+z^2=r^2$$

利用坐标系坐标之间的代数关系可以从一种坐标系变换到另一种坐标系。

以上谈的只是确定几何点的位置的数学方法，还没有与物理学联系起来。物理学所研究的“位置”是具体物体的位置，物理学认为一个物体(或质点)的位置只能相对于其它物体来确定。从物理学的角度看来，不仅几何点有其物质基础

——质点，并且坐标系也不能脱离物质凭空存在，具体地说，作为坐标系基准的坐标轴或坐标平面必须固定在一个特定的物体或一群特定的质点之上。这就必须引入参照系的概念，下面比较详细地说明这个问题。

首先应指出，在物理学中对质点运动的研究是研究复杂物体运动的基础，因为任何物体都可以看作是由许多质点所组成的①。为简单起见，我们只研究质点的运动。

运动具有相对性，一个质点相对于不同的物体所表现出的运动状态是不相同的，因此在描述质点的位置及其变化时必须指明是相对于那一个物体而言的，这个被指明的物体称为参照物体。参照物体的作用就是供观察者在它上面安置坐标系。

必须指出，参照物体也是由许多质点所组成的，或者说它是一个质点系。不是任何物体（或任何质点系）都可被选为参照物体，只有刚体（或刚性质点系）②，亦即其中任何二质点之间的距离保持不变的物体（或质点系），才可成为参照物体。这是因为如果物体本身的形状和线度在发生改变，坐标系基准将发生扭曲，便难以确切定出一个质点的位置和描述质点的运动。

如果选用一个刚体作为参照物体，在它上面安置坐标系是不难做到的。我们以常用的直角坐标系作为例子，这可在

---

① 一个物体总可以分为许多部分，每一部分足够小时就可视为质点，故一物体可以看成是由许多质点组成的。当这些质点之间的距离保持不变时，物体就成为刚体。

② 在相对论中由于作用的传播速度的有限性，一般来说刚体不可能存在，相对论中的参照系的概念需要另行讨论，本文的讨论限于经典力学。

刚体中任选一质点作为坐标原点，再通过原点和刚体中的其它一些质点作出三条彼此正交的坐标轴，每条坐标轴乃是原点和一些质点的联结线。在同一个刚体上面，可以安置许多不同的直角坐标系，它们的区别是坐标原点不同和坐标轴的取向不同。相对于这些不同的坐标系，同一质点在同一时刻的位置坐标是不同的，但质点的速度和加速度则是相同的，这是因为这些坐标系都固定在同一个刚体之上，不同坐标系的坐标轴之间彼此相对位置保持不变，亦即彼此无相对运动。因此，可以在这些坐标系中选用任何一个来描述所研究的质点的运动。如果参照物体不是刚体，就不会有这样简单的结论。研究发生在地球上的力学现象时，我们很自然地选用地球作为参照物体，这时便把地球看为刚体，通常把坐标原点和直角坐标系的二条坐标轴选置在地面上或实验台上。在做力学习题时，大家常常是这样选取的。

在刚体中画出的一条直线可以物化为一条刚性杆子。实际上，这条直线必穿过刚体中的一些质点，这些质点之间的距离是固定不变的，将它们联结在一起就抽象成一条刚性杆子。这样便可把三维斜坐标轴（或直角坐标轴）物化为三条相交于一点的并具有指向的刚性标杆，总称为三维标架①，今后我们简称之为标架。标架本身也是刚体，当然可用它代替原来的刚体作为参照物体。

必须指出，标架并不一定要固结在一个刚体之上，在研究天体的运动和天体物理问题时，往往选用如下的标架：把标

① 在相对论中可把三维标架推广为四维标架，标架的第四维代表时间轴，当然不可能把这时间轴也想像为一条刚杆。

架原点（即坐标原点）固定在太阳的中心，构成标架的三条刚性标杆（即坐标轴）分别指向三个遥远的恒星，这个标架称为日心标架。必须强调，日心标架与固结在太阳（视为刚体）之上的标架是两类不同的标架，固结在太阳之上的标架将随着太阳自转而转动，而日心标架则不受太阳自转的影响。

在一些物理教科书中把参照系定义为："描写物体运动状态所选作参照的物体（或物体群）"。可是参照系的英文名词为*Frames of reference*，意即参照的标架，我们认为把"参照的物体"改称为"参照的标架"更恰当一些。因为谈到参照的物体时易于使人把它理解为是一个实际存在的具体物体，然而有些标架并不是某一实际存在的具体物体（或一群物体）。例如日心标架只与太阳中心联系而与太阳的其它部分没有直接联系，这个标架所指向的三个遥远恒星，也仅仅起到指向的作用，它们本身并不依附在标架上。对于日心参照系来说，参照物体只是日心标架本身，它不是一个实际存在的具体物体，而实际存在的太阳、三个遥远的恒星都不是日心参照系选作参照的物体。因此，我们主张把参照系定义为"描写物体运动状态时所选作参照的标架"。

标架可直接抽象为斜坐标系（或直角坐标系）。反过来看，有了斜（或直角）坐标系，只要指明坐标轴（或坐标平面）和坐标的原点的选择如何与实际物体（或质点系）相联系，就必定对应有一个标架，也就建立了一个参照系。这样，在物理学中往往用坐标系来代表参照系而不另提出参照系的名词。但我们认为对初学者来说，引入参照系的概念并搞清楚它与坐标系的关系对学好物理学还是很需要的。

众所周知，作为经典力学理论基础的牛顿运动定律只在惯性参照系中成立。观察和实验证实地球参照系（即固结在地球上的标架）、太阳参照系（即固结在太阳上的标架）都只是近似的惯性参照系。在近似程度上，太阳参照系比地球参照系较高。近似程度更高的惯性参照系是日心参照系。要深入研究惯性参照系就要讨论星系和整个宇宙的运动和演化，必然要涉及广义相讨论，这已超过本书的范围，我们就不多讲了。

2.惯性与惯性质量

惯性的存在和作为惯性量度的惯性质量的引入是由牛顿运动定律所决定的。

牛顿第一定律告诉我们，在不受到外力的情况下，任何（可视为质点的）物体都将保持静止状态或匀速直线运动状态。需要注意，在这条定律的表述中，应当把物体当作质点看待，因为线度不为零的物体在不受到外力的情况下还可以处在角动量不变的转动状态，这是牛顿第一定律所没有概括的。

静止或匀速直线运动都是速度不变的状态，因此牛顿第一定律意味着任何质点都具有倾向于保持其速度（包括大小和方向）不变的特性，我们把这种特性称为质点的惯性。

牛顿第一定律虽揭示了惯性的存在，但只对惯性作了定性的说明。要定量地描述惯性的大小还要依靠牛顿第二定律。

牛顿第二定律告诉我们，（可视为质点的）物体受合力$\vec{F}$作用时所获得的加速度$\vec{a}$可表示为

$$\vec{a}=\frac{\vec{F}}{m} \tag{2-1}$$

m是该物体的质量。需要注意，在牛顿第二定律里，也应当把物体当作质点看待，因为，（2-1）式中的加速度$\vec{a}_c$只对质点有意义。

现在我们用牛顿第二定律来说明质量m可作为惯性大小

的量度。由（2-1）式可知，在相同大小的F力作用下，质量m大者获得的加速度a小，质量m小者获得的加速度a大，加速度a小表示速度变化率小，意味着惯性大，加速度a大表示速度变化率大，意味着惯性小，因此我们可用一个质点的质量m的大小来量度这个质点的惯性的大小。这样，牛顿第二定律中的质量m也就被称为惯性质量。

我们对牛顿第二定律中的质量标以惯性二字除了强调它是惯性大小的量度外，还为了与引力质量相区别。引力质量是物体（质点）产生引力作用和感受引力作用能力的量度。牛顿万有引力公式为

$$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$$

式中的m_1或m_2就是引力质量。引力质量与惯性质量分别表示着物质两种不同的属性，不能先验地认为它们相等；然而实验事实告诉我们，物体的惯性质量同引力质量在数值上总是互成比例的，因之在适当选择单位时，可用同一数量来表征这两种质量。这叫做惯性质量同引力质量的等效性。由于这种等效性在经典物理中便对惯性质量与引力质量不加以区分，同称为质量。在广义相对论中，惯性质量同引力质量的等效性是研究引力理论的一个基本出发点。

前面已指出，牛顿第一、第二定律都只适用于质点，因之，惯性和惯性质量概念的引入，就其原义也是对质点而言的。现在让我们把这两个概念推广到线度不为零的任意物体。

任意物体可看成一质点系，它由n个质点所组成，这n个质点的惯性质量分别为m_1、m_2、…m_i、…m_n。设物体所

受到的合外力为$\vec{F}$，物体的质心加速度为$\vec{a}_c$，则按质心运动定理①

$$\left.\begin{aligned}\vec{a}_c&=\frac{\vec{F}}{M}\\ M&=\sum_{i=1}^{n} m\end{aligned}\right\}\qquad(2\text{-}2)$$

---

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$\vec{r}_i$，所受的外力和内力分别为$\vec{F}_i^{(e)}$ $\vec{F}^{(l)}$则 $m_i\frac{d^2\vec{r}_i}{dt^2}=\vec{F}_i^{(e)}+\vec{F}_i^{(l)}$，$i=1, 2, \cdots, n$.

因而

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

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

质点系的质心位置系由下式确定：

$$\vec{r}_c=\frac{\sum_{i=1}^{n} m_i\vec{r}_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}$$

由此可得

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

将式（b）代入式（a），即得到质心运动定理：

$$M\vec{a}_c=\vec{F}$$

从（2-2）式可知，当合外力 $\vec{F}$ 为零时，物体质心的加速度 $\vec{a}_C$ 为零，即质心的速度（包括大小和方向）保持不变，这意味着任何物体都具有倾向于保持其质心速度不变的特性，我们把这种特性称为整个物体的惯性。将（2-2）式同（2-1）式对比，类似于前面对（2-1）式的讨论，我们有理由认为 M 是整个物体惯性大小的量度，可称之为整个物体的惯性质量。$M=\sum\limits_{i} m_i$ 表明整个物体的惯性质量是组成它的各部分的惯性质量之和，这叫做惯性质量的可加性。

也许有人认为，定义线度不为零的物体的惯性不必借助于质心运动，把一个物体的惯性定义为该物体具有保持平动速度不变的倾向，难道不可以吗？搞清楚这个问题是很有必要的，必须强调，除了刚体在特殊情况下(不仅所受合外力为零，其总动量矩也要等于零)，具有保持平动速度不变的特性外；对于一般的物体，在一般的情况下，纵使所受到的合外力为零，物体各点的速度一般来说也不可能相同，因此根本不存在使一般物体保持平动速度不变的那种倾向。当一个物体所受合外力和合力矩均为零时，这个物体的动量和角动量保持不变。也许又有人认为把线度不为零的物体的惯性定义为这个物体所具有的倾向于其保持其动量和角动量不变的特性，难道不更全面一些吗？这样的定义在定性上虽然也说得过去，但是如何来量度这种定义中的惯性的大小呢？实际上无法用一个单一的物理量来量度这种惯性（除惯性质量外，还要考虑转动惯量）因之这样的定义也不可取。只有象我们在本文前面讲过的那样，通过对质心运动的分析才能定义整个物体的惯性和惯性质量。

还要指出，推导质心运动定理必须应用牛顿第三定律，因此对线度不为零的任意物体来说，在定义惯性及惯性质量时，牛顿三条运动定律都要用到。

将（2-1）式改写为

$$m=\frac{\vec{F}}{\vec{a}}$$

这个关系告诉我们，质点的惯性质量可根据比值$\frac{F}{a}$来算出。在经典力学适用的范围内，实验事实告诉我们，每个质点都有各自的惯性质量，它是个不变的常量，与该质点的运动状态无关。可是，在相对论中，质点的惯性质量则随运动状态而变。

在经典力学中，既然每个质点的惯性质量 m_i 具有确定不变的数值，从$M=\sum m_i$可知，由若干质点组成的物体的惯性质量的数值也必定是确定不变的，这叫做惯性质量的确定性。一个封闭体系所包含的质点数目是不变的，由于惯性质量的确定性，这个封闭体系的总惯性质量就应不随时间而变，这便是质量守恒定律。

由于在经典力学中惯性质量具有确定性和可加性以及遵从质量守恒定律，这就使得人们把惯性质量用来作为“物质之量”的量度。牛顿早就提出过“物质之量”的概念并给出了定义：“物质之量就是综合它的密度与体积而得出的量度”①。可是在一般物理教科书中又把密度定义为“单位体积

---

① 牛顿，自然哲学的数学原理，见《物理学原著选读》威·弗·马吉编，蔡宾弃译，商务印书馆第1版（1986）第36页。