高等学校适用教材

大学物理教程

主　编　刘裕勤　马文采
副主编　王玉林　徐昌业　夏思泥

中国计量出版社

高等学校适用教材

大学物理教程

主　编　刘裕勤　马文采

副主编　王玉林　徐昌业　夏思淝

中国计量出版社

(京)新登字 024 号

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程／刘裕勤，马文采编. —北京：中国计量出版社，1996.10
ISBN 7-5026-0896-6／O・9

Ⅰ.大…　Ⅱ.①刘…②马…　Ⅲ.物理-高等学校-教材　Ⅳ.O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 18514 号

中国计量出版社出版
北京和平里西街甲 2 号
邮政编码 100013
河北省永清县第一胶印厂印刷
新华书店北京发行所发行

*
787×1092 毫米　16 开本　印张 26　字数　660 千字
1996 年 12 月第 1 版　1996 年 12 月第 1 次印刷
*
印数 1—6000　**定价：31.00 元**

前　言

本书是根据国家教委审定的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求(修订稿)》(1992年10月)的精神，结合编者多年的教学经验，并借鉴国内外教材的优点编写而成的。在编写过程中，我们力求做到以下几点：

一、以辩证唯物主义思想为指导，阐明物质的基本运动形式及其相互联系、相互转化的基本规律。

二、既注重知识的传授，又注重能力的培养，为此，在对物理概念的讲述上，力求清晰、简明、严谨，有明确的定义，使学生了解它的来龙去脉和物理涵义，从而建立起明确的物理图像，在接受物理知识的同时，又能领略到物理思想，逐步养成科学的思维方法，提高物理素养，使他们逐步学会抓住事物的本质，忽略次要因素，建立“理想模型”的科学方法。

三、注意了与中学物理的衔接和与后继课的合理分工，适当提高了起点，避免了不必要的重复。精选内容，合理编排，遵循教学规律，循序渐进，逐层深化，积极运用高等数学表达物理规律，使本教材有较强的系统性、科学性和实用性。

四、贯彻理论联系实际的原则，在讲清物理规律的同时，适当介绍在科学技术及日常生活中的应用，以开阔学生视野、激发学习热情。另外，还通过一些与实际联系密切的例题、习题、思考题等，以加强学生对基本概念和规律的理解，培养运用所学理论处理实际问题的能力。

参加本书编写工作的有：郭成信、黄玉成、马裕民、武瑞兰、王廷津、刘裕勤、李富珮、李月芬、马文采、王玉林、高建华、刘东红、李蕾、管立、刘文利等同志。马文采做了大量的组织协调工作。本书先在部分班级试用，在试用的基础上进行了全面的修改和补充，刘裕勤承担第一至第七章，徐昌业承担第八至第十二章，王玉林承担第十三至第十七章，马文采承担第十八至第二十二章，全书最后由刘裕勤统稿。

在本书编写过程中，得到陈广桐、王蕴珊等同志的热情支持，在此表示感谢。

由于我们的学识和教学经验的限制，错误和不当之处在所难免，敬请专家、同仁和使用本书的师生指正。

编　者

1996年5月

目　　录

第一篇　力　学

第二篇 热物理学

第三篇 电磁学

第四篇　振动与波动

第五篇　波动光学

第六篇 近代物理

第一篇 力　学

自然界是由形形色色的物质组成的，一切物质都在不停地运动着。而物质的运动形式又是多种多样的，其中最简单最基本的是机械运动。所谓机械运动是指物体之间或物体各部分之间相对位置随时间而变化的过程。如地球绕太阳的运行，火车在铁路上的行驶，机器的运转等都是机械运动。力学是研究机械运动的客观规律及其应用的科学。

为研究的方便，常把力学分为运动学和动力学，前者的主要任务是描写运动，而后者则是研究物体运动变化的原因和规律。

第一章 质点运动学

力学中描述质点的位置如何随时间变化的这部分内容叫做质点运动学。在这一章中，主要介绍为了定量描述质点的运动而引入的几个重要物理量，如位置矢量、位移、速度、加速度、角速度和角加速度等，以及这些物理量之间的关系。

第一节 参考系 质 点

一、参考系和坐标系

房屋、电杆、桥梁等相对地球是静止的，但地球既绕地轴自转，又绕太阳公转，太阳又绕着银河系的中心运动，银河系也在运动。宇宙间一切物体都处在永不停息的运动中。绝对静止的物体是没有的，这就是运动的绝对性。

既然宇宙间一切物体都在运动，为了描述物体在空间的位置及运动状态，必须选择另一个物体或物体系作为参考，这个被选作参考的物体或物体系称为参考系。在运动学中参考系的选择是任意的，通常要看问题的性质和研究的方便。例如研究地面上物体的运动，选择地面作参考系最为方便。研究地球和其它行星的运动，通常选择太阳作为参考系。

同一物体的运动，由于选择的参考系不同，对它运动状态的描述就不相同。例如在沿水平方向作匀速直线运动的车厢中，有一物体自由落下，若以车厢为参考系，物体作竖直的匀加速直线运动；若以地面为参考系，物体作平抛运动。同一物体的运动在不同的参考系有不同描述，这一事实称为运动描述的相对性，因此在描述物体的运动时必须指明所选取的参考系。

为了定量描述物体的运动情况，还需要在参考系上建立坐标系，物体的位置完全由坐标确定。一般对三维空间的运动，常用空间直角坐标系(x,y,z)，对二维平面运动，常用平面直角坐标系(x,y)或极坐标系(r,θ)。究竟选用什么坐标系为好，应以研究问题的方便、简捷为准。

二、质 点

物体都有一定的大小和形状，在一般情况下，物体上各点的运动情况是各不相同的，而且物体的大小和形状也可能发生变化。但在某些情况下，如果物体本身的线度远小于问题中的其它线度，物体的大小和形状不起作用或所起作用很小，这时为了抓住主要因素和掌握物体的基本运动情况，就可以把物体看作一个只具有质量而不考虑大小和形状的理想物体，并将其称为质点。

质点是一个理想化的模型，是从具体事物中抽象出来的一个简化概念。这样的理想模型，对突出主要性质，忽略次要性质，简化问题的研究是非常必要的。除质点外，以后涉及的刚体、理想气体、点电荷、绝对黑体等都是理想化的模型。

一个物体能否看作质点要由问题的性质而定。例如，研究地球绕太阳公转时，由于地球的

平均半径(约 6 400 km)比地球与太阳间的距离(约为 1.5×10^{8} km)小得多,地球上各点相对太阳的运动可视为相同。这时,地球的大小和形状就可忽略不计,地球便可视为质点。但在研究地球自转时,其大小和形状就不能忽略了。

三、时间和时刻

在研究质点运动时,我们应该区别"时间"和"时刻"这两个概念。"时刻"是指时间过程中的某一瞬时,例如火车 8 点整从甲站开出,10 点整到达乙站,这个 8 点和 10 点就是火车运动的起始和终止"时刻"。从 8 点到 10 点经过 2 小时,这 2 小时就是从起点到终点所经过的时间间隔,简称"时间"。质点运动经过某一位置时对应某一时刻,经过某一段路程对应某一段时间。

第二节　质点的位移　速度和加速度

一、质点的运动方程　位置矢量

1. 运动方程和轨迹方程

当质点运动时,其位置随时间连续变化。描述质点位置随时间变化的函数式称为质点的运动方程。

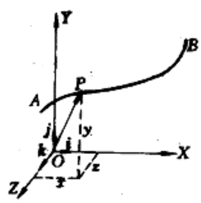

图　1—1

如图 1—1 所示,当采用直角坐标系讨论质点的运动时,其任一时刻的位置可由三个正交坐标 x,y,z 来确定,它们是时间 t 的函数,则式(1—1)所示的方程组就是质点的运动方程在直角坐标系中的表达式。

$$\begin{cases} x=x(t) \\ y=y(t) \\ z=z(t) \end{cases} \tag{1—1}$$

由式(1—1)可以求得质点在各个时刻的坐标,从而可以画出质点的运动路径,质点运动的路径称为轨迹。式(1—1)也可以看作是轨迹的参数方程。如果我们要用坐标间的函数式来表示轨迹方程,那么只需将式(1—1)联立消去时间 t 就可得到。

例 1—1　设质点的运动方程为

$$\begin{cases} x=R\cos\omega t \\ y=R\sin\omega t \\ z=\dfrac{h}{2\pi}\omega t \end{cases}$$

其中 $h>0,\omega>0$,求此质点的运动轨迹。

解　将第三方程分别代入第一和第二两方程,得到 $x=R\cos\dfrac{2\pi z}{h}$ 和 $y=R\sin\dfrac{2\pi z}{h}$ 两曲面方程,两曲面的交线即为质点的运动轨迹,显然它是在 $x^2+y^2=R^2$ 这一圆柱面上,螺距为 h 的螺旋线,如图 1—2 所示。

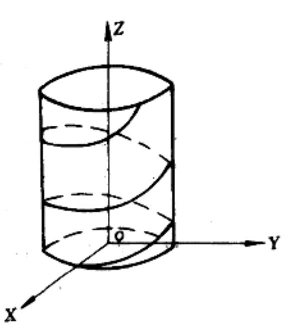

图　1—2

2. 位置矢量

质点的位置也可用由原点 O 引向质点所在位置的径矢 $\boldsymbol{r}$ 表示,$\boldsymbol{r}$ 称为位置矢量,简称位矢。$\boldsymbol{r}$ 的方向表明质点相对于原

点的方位，$\boldsymbol{r}$ 的模表明原点到质点的距离。显然，质点的坐标 x,y,z 是 $\boldsymbol{r}$ 在正交坐标轴上的分量，它们之间的关系为

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k} \tag{1—2}$$

其中 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别为 X、Y、Z 轴上的单位矢量。质点的运动方程亦可用矢量函数表示为

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t) \tag{1—3}$$

如果质点在一直线上运动，可取该直线为 X 轴，则质点的运动方程可用一个标量函数表示为

$$x=x(t)$$

如果质点在一平面上运动，可在该平面上建立一平面直角坐标系 XOY，则质点运动方程的分量式为

$$\begin{cases}x=x(t)\\y=y(t)\end{cases}$$

其矢量式可表示为

$$\boldsymbol{r}=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}$$

二、位　移

为简单起见，我们只讨论质点作平面运动的情况，如图 1—3 所示，在 t 时刻质点位于 P 点，其位置矢量为 $\boldsymbol{r}_1$，在 $t+\Delta t$ 时刻质点运动到 Q 点，其位置矢量为 $\boldsymbol{r}_2$，从 P 引向 Q 的有向线段 $\Delta\boldsymbol{r}$，称为质点在 Δt 时间内的位移。位移是矢量，其大小等于由 P 到 Q 的距离，方向由 P 指向 Q。由图 1—3 和式(1—2)可知

$$\begin{aligned}\Delta\boldsymbol{r}&=\boldsymbol{r}_2-\boldsymbol{r}_1\\&=\Delta x\boldsymbol{i}+\Delta y\boldsymbol{j}\\&=(x_2-x_1)\boldsymbol{i}+(y_2-y_1)\boldsymbol{j}\end{aligned}$$

位移的大小 $|\Delta\boldsymbol{r}|=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}$，位移的方向可用$\Delta\boldsymbol{r}$ 与 OX 轴的正向夹角 φ 表示：

$$\mathrm{tg}\varphi=\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$$

位移和路程都是描写质点运动的物理量，但两者是不同的。路程 Δs 是质点运动路径的长度，是标量，而位移$\Delta\boldsymbol{r}$ 是矢量，一般$|\Delta\boldsymbol{r}|$与 Δs 不相等。

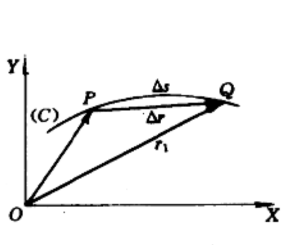

图　1—3

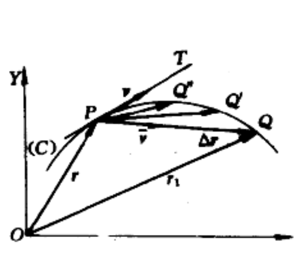

图　1—4

三、速　度

设质点在图 1—4 所示的曲线上运动，运动方程 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$，$t$ 时刻质点的位置矢量为 $\boldsymbol{r}_1=\boldsymbol{r}(t)$，$t+\Delta t$ 时刻质点的位置矢量为 $\boldsymbol{r}_2=\boldsymbol{r}(t+\Delta t)$，则在 Δt 时间内质点的位移为$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_2-\boldsymbol{r}_1$，将位移$\Delta\boldsymbol{r}$ 与时间 Δt 的比值定义为质点在这段时间内的平均速度，用 $\overline{\boldsymbol{v}}$表示，即

$$\overline{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}$$

平均速度是矢量，其大小为$|\overline{\boldsymbol{v}}|=|\Delta\boldsymbol{r}|/\Delta t$，其方向为$\Delta\boldsymbol{r}$ 的方向(由 P 指向 Q)。平均速度一般与所取时间间隔 Δt 有关，所以说到平均速度时，必须指明是哪一段时间内的平均速度。

平均速度只能粗略地描述一段时间内质点的运动快慢和方向。为了描述质点运动的瞬时情况，就要把 Δt 取得尽量小，因此当 $\Delta t\to 0$ 时，比值$\Delta\boldsymbol{r}/\Delta t$ 的极限就能精确描述质点在 t 时刻运动的快慢和方向。我们将这个极限定义为质点在 t 时刻的瞬时速度，简称速度，并用 $\boldsymbol{v}$ 表示，即

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1-4}$$

瞬时速度 $\boldsymbol{v}$ 是矢量，它的方向是 $\Delta t\to 0$ 时位移$\Delta\boldsymbol{r}$ 的极限方向，即 P 点的切线 PT 方向；速度 $\boldsymbol{v}$ 的大小为

$$|\boldsymbol{v}|=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta\boldsymbol{r}|}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta\boldsymbol{r}|}{\Delta s}\cdot\frac{\Delta s}{\Delta t}$$
$$=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta s}\cdot\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}$$

式中 Δs 是 Δt 时间内质点沿轨迹经过的路程，比值 $\Delta s/\Delta t$ 称为质点在 Δt 时间内的平均速率。当 $\Delta t\to 0$ 时，比值 $\Delta s/\Delta t$ 的极限称为瞬时速率，并用 v 表示：

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} \tag{1-5}$$

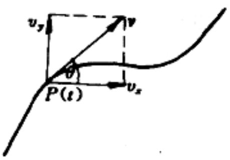

图 1—5

当 $\Delta t\to 0$ 时，$|\Delta\boldsymbol{r}|$与 Δs 趋于相等，即$\lim\limits_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta\boldsymbol{r}|}{\Delta s}=1$，所以速度的大小等于速率，即$|\boldsymbol{v}|=v=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$。因 $\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}$，所以

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j} \tag{1-6}$$

其中，$v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$，$v_y=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$为速度 $\boldsymbol{v}$ 在 X、Y 轴上的分量，所以速度的大小即速率可由下式计算：

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}=\sqrt{(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t})^2+(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t})^2} \tag{1-7}$$

速度的方向可用 $\boldsymbol{v}$ 与 X 轴正向的夹角 θ 表示为

$$\mathrm{tg}\theta=\frac{v_y}{v_x}=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\Big/\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$$

例 1—2　已知质点的运动方程为 $x=R(\frac{1}{2}+\cos\omega t)$，$y=R\sin\omega t$，其中 R、ω 为常量，求质点运动的轨迹和速度。

解　将运动方程改写为

$$x-\frac{R}{2}=R\cos\omega t,\ y=R\sin\omega t$$

两式联立消去 t 得轨迹方程

$$\left(x-\frac{R}{2}\right)^2+y^2=R^2$$

由此可见，质点的运动轨迹是圆心在点 $\left(\frac{R}{2},0\right)$ 处，半径为 R 的圆。速度分量分别为

$$v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-\omega R\sin\omega t,\ v_y=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=\omega R\cos\omega t$$

速度大小为

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}=\omega R\sqrt{\sin^2\omega t+\cos^2\omega t}=\omega R$$

因此质点作匀速率圆周运动。速度方向由 $\boldsymbol{v}$ 与 X 轴的夹角 θ 决定

$$\mathrm{tg}\theta=\frac{v_y}{v_x}=-\mathrm{ctg}\omega t$$

所以

$$\theta=\frac{\pi}{2}+\omega t$$

由图 1—6 可见，质点在圆周上沿逆时针方向运动。

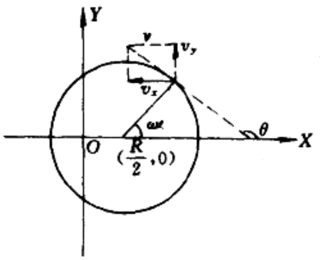

图 1—6

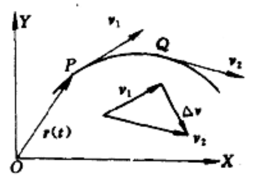

图 1—7

四、加 速 度

质点运动时，其速度通常随时间发生变化。如图 1—7 所示，质点的运动方程由 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$ 表示，在 t 时刻质点在 P 点，速度为 $\boldsymbol{v}_1$，经过 Δt 时间后，质点运动到 Q 点，速度变为 $\boldsymbol{v}_2$，则在 Δt 时间内速度的增量为 $\Delta\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_2-\boldsymbol{v}_1$。作速度矢量 $\boldsymbol{v}_1$、$\boldsymbol{v}_2$ 及其增量 $\Delta\boldsymbol{v}$ 的关系图，我们将速度增量 $\Delta\boldsymbol{v}$ 与产生这一增量所用时间 Δt 的比值定义为质点在 Δt 时间内的平均加速度，用 $\bar{\boldsymbol{a}}$ 表示，即

$$\bar{\boldsymbol{a}}=\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t} \tag{1—8}$$

平均加速度 $\bar{\boldsymbol{a}}$ 也是矢量，其方向就是 $\Delta\boldsymbol{v}$ 的方向，其大小为 $|\bar{\boldsymbol{a}}|=\frac{|\Delta\boldsymbol{v}|}{\Delta t}$。平均加速度只能粗略描述质点在 Δt 时间内速度变化的快慢程度。为了精确描述质点速度变化的快慢程度，需引入瞬时加速度的概念。我们将 $\Delta t\to 0$ 时，平均加速度的极限定义为瞬时加速度，简称加速度，用 $\boldsymbol{a}$ 表示，即

$$\boldsymbol{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} \tag{1—9}$$

加速度是矢量，它的方向为 $\Delta\boldsymbol{v}$ 的极限方向。而 $\Delta\boldsymbol{v}$ 是指向轨迹曲线凹的一侧，所以加速度 $\boldsymbol{a}$ 也总是指向轨迹曲线凹的一侧。因为

$$v=\frac{dr}{dt}=\frac{dx}{dt}i+\frac{dy}{dt}j$$

所以

$$a=\frac{dv}{dt}=\frac{d^2r}{dt^2}=\frac{d^2x}{dt^2}i+\frac{d^2y}{dt^2}j \tag{1—10}$$

令 $a_x=d^2x/dt^2$、$a_y=d^2y/dt^2$ 为加速度 a 在 X、Y 轴上的分量。由此可得加速度 a 的大小为

$$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2} \tag{1—11}$$

a 的方向，也可由 a 与 X 轴的夹角 α 来表示：

$$\mathrm{tg}\alpha=\frac{a_y}{a_x} \tag{1—12}$$

例 1—3 质点的运动方程仍为例题 1—1 中所给出的形式，试求质点的加速度。

解 由例题 1—1 中所得速度分量

$$v_x=\frac{dx}{dt}=-\omega R\sin\omega t, v_y=\frac{dy}{dt}=\omega R\cos\omega t$$

得加速度分量为

$$a_x=\frac{dv_x}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega^2R\cos\omega t, a_y=\frac{dv_y}{dt}=\frac{d^2y}{dt^2}=-\omega^2R\sin\omega t$$

由此可知加速度的大小为

$$a=\omega^2R\sqrt{\cos^2\omega t+\sin^2\omega t}=\omega^2R$$

t 时刻加速度 a 与 X 轴的夹角 α 由下式决定

$$\mathrm{tg}\alpha=\frac{a_y}{a_x}=\mathrm{tg}\omega t$$

所以

$$\alpha=\omega t$$

若将加速度表为矢量式，有

$$a=-(\omega^2R\cos\omega t i+\omega^2R\sin\omega t j)=-\omega^2[(x-\frac{R}{2})i+yj]$$

若令 ρ 表示从圆心$(\frac{R}{2},0)$到质点(x,y)的径矢，即 $\rho=(x-\frac{R}{2})i+yj$，则上式可改写为

$$a=-\omega^2\rho$$

可见，在匀速率圆周运动中，加速度沿半径指向圆心。

以上两例题是由已知的运动方程，用微分法求速度和加速度。反之，若已知加速度 $a(t)$ 及初始条件（初始速度和初始位置），可用积分法求得运动方程。

五、切向加速度和法向加速度

质点作平面曲线运动时，常用自然坐标中的切向加速度和法向加速度来描述速度的变化情况。如图 1—8 所示，t 时刻质点在 P 点，速度为 v_1，经过 Δt 时间运动到 Q 点，速度为 v_2，速度的增量为 Δv。在 $\Delta v=v_2-v_1$ 的矢量三角形中，从 AC 上截取 $AD=AB=v_1$，显然 $DC=v_2-v_1$。连接 BD，将 Δv 分解为 Δv_n 和 Δv_t，则

$$\Delta v=\Delta v_n+\Delta v_t$$

由加速度的定义知

$$a=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_n}{\Delta t}+\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v_t}{\Delta t} \tag{1—13}$$

式中第一项用 a_n 表示，即