学习指导书

朱一龙　刘岳雄　张遵林　胡厚其

中国科学技术大学出版社

165 《大学物理》（江山　王志珪主编）

学习指导书

朱一龙　刘岳雄　张遵林　胡厚其

中国科学技术大学出版社
1991.12

本书是为配合江山、王志珪主编的《大学物理》的教学，并结合当前工科和军事院校的教学实际而编写的，供教师和学生使用．本书各章次序和原书相同，每章内容包括目的要求、基本内容、典型例题、问题讨论、选择题选等五部份．书中还配有六套自测题，供学生在学完有关部份之后作自测之用．书末附有全部试题答案．

本书第一至第四章由刘岳雄编写，第五至八章由张遵林编写．第九至第十一章由朱一龙编写．第十二章至第十七章由胡厚其编写，全书由朱一龙负责统稿．作者姓名按编写章次的先后排列．

《大学物理》学习指导书
朱一龙　刘岳雄
张遵林　胡厚其

中国科学技术大学出版社出版
（安徽省合肥市金寨路96号，230026）
解放军电子工程学院印刷所印刷
安徽省新华书店发行
*
开本：787×1092．1/32　印张：14.8　字数：329千
1991年12月第1版　1991年12月第1次印刷
印数：1-5000册
ISBN7-312-00358-3/O・116

［皖］第08号　　定价：6.50元

目　录

第一章　质点的运动规律

目 的 要 求

1　理解质点等理想模型和参照系、惯性系等概念．了解引入这些模型和概念在科学研究方法上的重要意义；

2　掌握位置矢量、位移、速度、加速度等描述质点运动和运动变化的物理量．能借助于直角坐标系熟练地计算质点在平面内运动时的速度和加速度．能熟练地计算质点作圆周运动时的角速度、角加速度、切向加速度和法向加速度；

3　能分析与平动有关的相对运动问题；

4　掌握牛顿三定律及其适用条件．

力学是大学物理其它部分的基础，是最基本又十分重要的部分．从内容上看，学好力学部分是顺利学习大学物理其它部分及某些后继课程所必需的．在本章学习一开始就要树立严肃认真的学习态度，逐步熟悉科学的学习方法，培养独立获取知识的能力，尤其要明确大学物理与中学物理的联系和区别，尽快适应大学物理的学习规律．

在本章学习中，学生将首次运用矢量、微积分等数学工具，要注意学会把物理语言"翻译"成数学语言，培养运用高等数学解决物理问题的能力．

基 本 内 容

一　质点　参照系

质点是从实际物体抽象出来的一种理想模型．具有质量而线度可忽略的物体，称为质点．它保留了实际物体的两个

主要特征：质量和空间位置．当所讨论的问题，不必计及物体的形状和大小时，可以用一个质点代表整个物体；当物体不能视为质点时，整个物体可看成一大群质点的集合．把物体抽象成质点，实际上就是研究物体的平动．处理物理问题时，往往首先建立理想模型，然后用理想模型的研究代替对实际物体的研究，这是物理学研究中常用的方法．质点是物理学中最基本的理想模型．

参照系就是为描述质点的运动而选定的参照物体．选用的参照系不同，对同一质点运动情况的描述就可能不同，所以，描述运动时，首先必须明确所采用的参照系．为了定量地描述质点相对于参照系的位置，应在参照系上建立适当的坐标系，本教材采用的坐标系有直角坐标系、自然坐标系和平面极坐标系等三种．

二　质点运动的描述

1．描述质点运动的基本物理量

位置矢量、位移、速度、加速度是分别从不同角度描述质点运动状态或运动状态变化的基本物理量．

位置矢量（简称位矢）　在直角坐标系中，位矢 $\boldsymbol{r}$ 可用三个互相正交的分量来表示

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}$$

其大小为

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

其方向可用方向余弦表示

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}$$

$$\cos\beta = \frac{y}{r}$$

$$\cos\gamma = \frac{z}{r}$$

位移 位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 是由初始位置指向末位置有向线，其大小为两位置间距离，即

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t+\Delta t) - \boldsymbol{r}(t)$$

它只与质点的始、末位置有关，而与中间经历的过程无关. 在直角坐标系中，位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 为

$$\Delta\boldsymbol{r} = \Delta x\boldsymbol{i} + \Delta y\boldsymbol{j} + \Delta z\boldsymbol{k}$$

其中

$$\Delta x = x(t+\Delta t) - x(t)$$

$$\Delta y = y(t+\Delta t) - y(t)$$

$$\Delta z = z(t+\Delta t) - z(t)$$

要注意区分位移与路程这两个不同的概念.

速度 速度是描述质点位矢改变快慢的物理量，其定义为

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

在直角坐标系中，速度 $\boldsymbol{v}$ 可分解为三个分量

$$\boldsymbol{v} = v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k}$$

$$= \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}$$

要注意区分速度和速率这两个不同的概念.

加速度 加速度是描述速度改变快慢的物理量，其定义为

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}$$

在直角坐标系中，加速度 $\boldsymbol{a}$ 可分解为三个分量

$$\boldsymbol{a} = a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k}$$

$$=\frac{dv_x}{dt}i+\frac{dv_y}{dt}j+\frac{dv_z}{dt}k$$

$$=\frac{d^2x}{dt^2}i+\frac{d^2y}{dt^2}j+\frac{d^2z}{dt^2}k$$

2. 运动方程和轨迹方程

质点在运动时，位矢 r 随时间变化的函数关系式，称为该质点的运动方程. 即

$$r=r(t)$$

在直角坐标系中运动方程可表示为

$$r=r(t)=x(t)i+y(t)j+z(t)k$$

或

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

质点在运动时，位矢 r 的矢端在空间描绘出的一条连续曲线，称为该质点的运动轨迹. 从质点运动方程中消去时间 t，即可得到质点的轨迹方程.

已知质点的运动方程，就可以求出质点在任意时刻的位矢、速度和加速度. 这是运动学的第一类问题，是用微分法.

已知加速度（或速度）及初如条件，就可以用积分的方法求出质点在任意时该的速度和位矢，这是运动学的第二类问题. 有两种已知情况：一种是已知 $a=a(t)$及初如条件 $t=0$ 时 $v=v_0$，$r=r_0$；另一种是已知 $a=a(r)$及初始条件 $r=r_0$ 时 $v=v_0$.

3. 变速率圆周运动的自然坐标描述

在自然坐标系中，速度可表示为

$$\boldsymbol{v} = v\boldsymbol{\tau}$$

加速度为

$$\boldsymbol{a} = a_t\boldsymbol{\tau} + a_n\boldsymbol{n}$$

$$= \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau} + \frac{v^2}{R}\boldsymbol{n}$$

上式中，切向加速的大小 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 表示质点速率变化的快慢，法向加速度的大小 v^2/R 表示质点速度方向变化的快慢.

如果将圆的半径 R 用曲线的曲率半径 ρ 代替，就可以将质点的圆周运动推广到一般的曲线运动，这时加速度为

$$\boldsymbol{a} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau} + \frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{n}$$

曲线运动的加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向总是指向曲线的凹侧.

4. 圆周运动的角量描述

质点的圆周运动，除了用位矢、位移、速度、加速度等线量描述外，还常用角量描述.

角坐标（角位置）：θ

角位移：$\Delta\theta=\theta(t+\Delta t)-\theta(t)$

角速度：$\omega=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta\theta}{\Delta t}=\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$

角加速度：$\beta=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta\omega}{\Delta t}=\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}$

圆周运动的运动方程为

$$\theta = \theta(t), r = R$$

线量与角量之间有如下关系：

$$S = R\theta$$

$$v = R\omega$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = R\omega^2$$

$$a_t = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = R\beta$$

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2} = R\sqrt{\omega^4 + \beta^2}$$

匀变速率圆周运动的基本公式与匀变速直线运动的基本公式在形式上相似

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 + \beta t \\ \theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\beta t^2 \\ \omega^2 = \omega_0^2 + 2\beta(\theta - \theta_0) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v = v_0 + at \\ x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \\ v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \end{cases}$$

5. 运动描述的相对性

描述质点运动的四个基本物理量一般都与参照系有关，当运动参照系 S' 相对于参照系 S 作直线运动时，对质点 A 有如下关系：

$$\boldsymbol{r}_{AS} = \boldsymbol{r}_{AS'} + \boldsymbol{r}_{S'S}$$

$$\boldsymbol{v}_{AS} = \boldsymbol{v}_{AS'} + \boldsymbol{v}_{S'S}$$

$$\boldsymbol{a}_{AS} = \boldsymbol{a}_{AS'} + \boldsymbol{a}_{S'S}$$

三　牛顿运动定律

第一定律　自由物体永远保持静止或匀速运动状态．所谓自由物体是指不受其它物体作用的物体．

第二定律　物体受外力作用时，加速度大小与所受合外力大小成正比，与质量成反比，加速度方向与合外力方向相

同. 牛顿第二定律的普遍的数字表达式是

$$F=\sum_i F_i=\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(mv)}{\mathrm{d}t}$$

当质量 m 为恒量时，得到

$$F=m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=ma$$

在直角坐标系中，可用三个分量式表示：

$$\begin{cases}F_x=ma_x\\F_y=ma_y\\F_z=ma_z\end{cases}$$

在平面自然坐标系中，可用两个分量式表示：

$$\begin{cases}F_n=ma_n=m\dfrac{v^2}{R}=m\omega^2R\\[2ex]F_t=ma_t=m\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=mR\beta\end{cases}$$

第三定律　两物体之间发生相互作用时，作用力与反作用力大小相等，方向相反，同在一条直线上，但分别作用在两个不同物体上. 作用力与反作用力，同时出现，同时消失，没有主从之分，且属于同一性质的力.

牛顿运动定律的重要推论：系统内各物体间相互作用的内力，可以使系统内各物体的运动状态发生改变，但不改变系统质心的运动状态.

应用牛顿运动定律解题的一般步骤为：

(1) 选择研究对象，通常使用隔离体法；

(2) 进行受力分析，画出受力图；

(3) 建立坐标系；

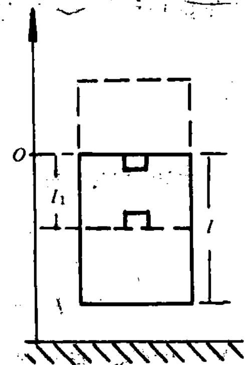
(4) 列出动力学方程，通常是分量式；若方程式数目少于未知量个数，应另找补充方程；

（5）解方程，进行必要的分析讨论.

典 型 例 题

例 1-1 高为 l 的升降机以加速度 a 上升，有一螺帽在其天花板上松落，试求螺帽落到底板所需的时间.

解 这是一道典型的运动学习题，选择不同的参照系，有不同解法.



例 1-1 用图

若以地面为参照系，则此参照系为惯性参照系. 如图所示，取 y 轴向上为正，坐标原点选在螺帽刚开始松落处. 设螺帽松落瞬时，升降机与螺帽的速度为 v_0，螺帽下落 l_1 后与底板相碰撞. 以螺帽为研究对象，并视为质点，它作初速为 v_0 的上抛运动，经过时间 t，$y=-l_1$，则螺帽的位移为

$$-l_1 = v_0t - \frac{1}{2}gt^2$$

以升降机底板为研究对象，它作初速为 v_0、加速度为 a 的匀加速直线运动，初始位置 $y_0=-l$，经时间 t 后，$y=-l_1$，则底板的位移为 $y-y_0$，即

$$-l_1 + l = v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

由以上两式，得

$$l = \frac{1}{2}(a+g)t^2$$

$$t=\sqrt{\frac{2l}{a+g}}$$

若以匀加速上升的升降机为参照系，则此参照为非惯性参照系. 取 y 轴向下为正，坐标原点选在螺帽松落处，则由相对运动可知，螺帽下落时的初速度为零，加速度为 $a+g$，经时间 t 后，$y=l$，即　$l=\frac{1}{2}(a+g)t^2$

所以

$$t=\sqrt{\frac{2l}{a+g}}$$

可见，虽然所选参照系不同，但计算结果相同. 对于运动学问题，坐标系的选择是任意的，选惯性系和非惯性系都可以，要看问题的性质和解题方便而决定采用什么坐标系. 值得注意的是，运用牛顿运动定律时，必须选择惯性系；若选用非惯性系，必须考虑惯性力.

例 1-2　一质点在竖直平面内运动，其运动方程为

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_0+\boldsymbol{v}_0t+\frac{1}{2}\boldsymbol{b}t^2$$

式中，$\boldsymbol{r}_0$、$\boldsymbol{v}_0$、$\boldsymbol{b}$ 匀为恒矢量，且 $\boldsymbol{b}$ 的方向竖直向下. 求：

(1) 质点的速度、速率和加速度；

(2) 若 $b=g$，试分别导出下抛、上抛、平抛、斜抛的速率公式.

解　题给出的质点运动方程是矢量方程，为计算方便，通常在直角坐标系中变成分量方程. 建立如图所示的坐标系，取水平方向为 x 轴，竖直向上为 y 轴正向，由初始条件，当 $t=0$ 时，$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_0$，图中 $\boldsymbol{r}_0$、$\boldsymbol{v}_0$ 的指向是假定的. 由图得

$\boldsymbol{v}_0=v_{0x}\boldsymbol{i}+v_{0y}\boldsymbol{j}$

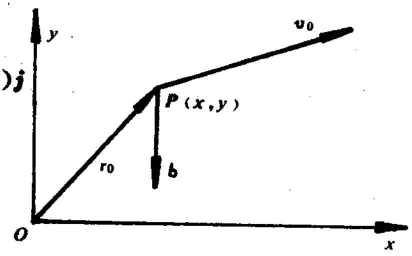
$$b = -bj$$

(1) 速度为

$$v = \frac{dr}{dt} = v_0 + bt$$
$$= v_{0x}i + (v_{0y} - bt)j$$

即

$$v_x = v_{0x}$$
$$v_y = v_{0y} - bt$$



例 1-2 用图

所以，速率为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$
$$= \sqrt{v_{0x}^2 + (v_{0y} - bt)^2}$$

加速度为

$$a = \frac{dv}{dt} = -bj$$

即加速度的大小为 b，方向沿 y 轴负向.

(2) 令 $b=g$，分别讨论如下.

下抛运动：初速 $v_{0x}=0$、$v_{0y}=-v_0$，所以

$$v = \sqrt{(-v_0 - gt)^2}$$
$$= v_0 + gt$$

若是自由落体运动，则 $v_0=0$，$v=gt$.

上抛运动：初速 $v_{0x}=0$、$v_{0y}=v_0$，所以

$$v = \sqrt{(v_0 - gt)^2}$$
$$= v_0 - gt$$

平抛运动：初速为 $v_{0x}=v_0$、$v_{0y}=0$，所以

$$v = \sqrt{v_0^2 + (-gt)^2}$$
$$= \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$$

斜抛运动：初速为 $v_0=v_{0x}i+v_{0y}j$，若为斜上抛，抛射角 α，则 $v_{0x}=v_0\cos\alpha$，$v_{0y}=v_0\sin\alpha$，那么

$$v=\sqrt{v_{0x}^2+(v_{0y}-gt)^2}$$

$$=\sqrt{(v_0\cos\alpha)^2+(v_0\sin\alpha-gt)^2}$$

可见，各类抛体的运动方程都可由矢量方程 $r=r_0+v_0t+gt^2/2$ 概括，取不同的初始条件，即可得到各个特定方向的分运动.这显示了在力学中引用矢量这一数学工具的优越性，由于矢量在牛顿力学中得到广泛的应用，牛顿力学常被称为矢量力学.

例 1-3 一伞兵从悬浮在空中的直升飞机上自由下落，已知加速度 $a=b-cv$，其中 b、c 为正的常数. 试求伞兵的下降速度和运动方程.

解 由题意可知，这是一个已知加速度和初如条件求速度和位置的问题，属于运动学的第二类问题. 因加速度是速度的函数，要先分离变量，再作积分.

取伞兵为研究对象，并视为质点. 取伞兵跳伞起点为坐标原点，下降方向为 x 轴正方向. 伞兵下降运动的初始条件为，当 $t=0$ 时，$x_0=0$，$v_0=0$.

求下降速度 $v(t)$时，因

$$a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=b-cv$$

分离变量，得

$$\frac{\mathrm{d}v}{b-cv}=\mathrm{d}t$$

两边积分，积分上下限由初始条件确定，即

$$\int_0^v\frac{\mathrm{d}v}{b-cv}=\int_0^t\mathrm{d}t$$