李炳虎 编

大学物理学习指导

COLLEGE PHYSICS GUIDE BOOK

湖南大学出版社

内容简介

本指导书共分五篇，分别介绍了力学、热学、振动波动与光学、电磁学和近代物理的有关内容。每篇中有：教学基本要求、基本框架、主要公式、重要概念、解题指导、典型例题、自测题。通过对这些内容的系统学习可使读者对各部分内容有更明确的认识，对各种基本规律和定理有深入的理解，从而能够站到更高的位置上去认识自然界中的普遍规律及它的指导意义。

大学物理学习指导

Daxue Wuli Xuexi Zhidao

李炳虎　编

□责任编辑　戴东宁

□出版发行　湖南大学出版社

社址　长沙市岳麓山　邮码　410082

电话　0731－8821691　0731－8821315

□经　　销　湖南省新华书店

□印　　装　湖南大学印刷厂

□开本　850×1168　大32开　□印张　7.5　□字数　182千

□版次　2000年2月第1版　□2000年2月第1次印刷

□印数　1－8 000册

□书号　ISBN 7－81053－261－8/O・13

□定价　9.00元

前　言

大学物理是理工科各专业学生的一门必修基础课，为了帮助广大学生学好本课程及为大学中的后续课程和今后的深造打下牢固、扎实的基础，本人在长期大学物理教学实践和教学研究的基础上，根据自己的经验和体会，编写了这本大学物理学习指导书。

本指导书包括：力学、热学、振动波动与光学、电磁学和近代物理五篇。每篇中有以下内容：教学基本要求、基本框架、主要公式、重要概念、解题指导、典型例题、自测题。通过这几部分的学习使学生对各章节的基本要求有明确的认识，对各章节的基本规律和定理有深入的理解，而且能站到更高的位置上去认识自然界中的普遍规律及它的指导意义。在此基础上对各章节基本规律和定理的运用以及解题方法作了具体的指导，并列举了典型例题，特别对解题方法和一题多解作了详细介绍。各篇的最后配有两套自测题，可供读者自我检查之用。

我希望通过本书的学习使同学们有所收获。但由于本人水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请批评、指正。

编　者

1999 年 12 月

目　　次

第一篇　力　学

第二篇　热　学

第三篇　振动与波动

第四篇　电磁学

第五篇　近代物理

附录

第一篇

力　学

基本要求

(1)掌握位矢、位移、速度、加速度、角速度和角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计算质点在平面内运动时的速度、加速度。能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。

(2)掌握牛顿三定律及其适用条件。能用微积分方法求解一维变力作用下的简单质点动力学问题。

(3)掌握功的概念,能计算直线运动情况下变力的功。理解保守力作功的特点及势能的概念,会计算重力、弹力和万有引力势能。

(4)掌握质点的动能定理和动量定理。通过质点在平面内运动情况理解角动量(动量矩)和角动量守恒定律,并能用他们分析、解决质点在平面内运动时的简单力学问题。掌握机械能守恒定律、动量守恒定律,掌握运用守恒定律分析问题的思想和方

法，能分析简单系统在平面内运动的力学问题。

（5）了解转动惯量概念。理解刚体绕定轴转动的转动定律和刚体绕定轴转动情况下的角动量守恒定律。

力学的基本框架

- 力学
  - 运动学
  - 动力学
    - 牛顿定律
    - 守恒定律
      - 动量守恒定律
      - 机械能守恒定律
      - 动量矩守恒定律

牛顿定律适用范围：宏观物体在低速情况下的运动规律。

守恒定律适用范围：无论是宏观物体、微观物体，他们在低速下运动或是在高速下运动都应遵守的运动规律。因此守恒定律比牛顿定律显得更广泛和更重要

力学公式总表

物体的平动（线量）	刚体的定轴转动（角量）
位置矢量 $\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}$	角位置 θ
位移 $\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1$	角位移 $\Delta\theta$
速度 $\boldsymbol{v} = = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$	角速度 $\omega = \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$
加速度 $\boldsymbol{a} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}$	角加速度 $\beta = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}$
线量与角量的关系 $v = R\omega$ $a_n = \frac{v^2}{R} = R\omega^2$ $a_\tau = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = R\beta$	

物体的平动(线量)	刚体的定轴转动(角量)
匀变速运动 $v = v_0 + at$ $S - S_0 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ $v^2 - v_0^2 = 2a(S - S_0)$	匀变速转动 $\omega = \omega_0 + \beta t$ $\theta - \theta_0 = \omega t + \frac{1}{2}\beta t^2$ $\omega^2 - \omega_0^2 = 2\beta(\theta - \theta_0)$
质量 m　力 $\boldsymbol{F}$ 牛顿定律　$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$	转动惯量$I = \sum_i \Delta m_i r_i^2$　力矩$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}$ 转动定律　$M = I\beta$
动量　$m\boldsymbol{v}$ 动量定理 冲量 $= \int_{t_1}^{t_2} \boldsymbol{F}\mathrm{d}t = m\boldsymbol{v} - m\boldsymbol{v}_0$	动量矩　$I\omega$ 动量矩定理 冲量矩 $= \int_{t_1}^{t_2} M\mathrm{d}t = I\omega - I\omega_0$
动量守恒定律 条件　$\sum \boldsymbol{F}_{外} = 0$ $\sum_i m_i \boldsymbol{v}_i =$ 恒矢量	动量矩守恒定律 条件　$\sum M_{外} = 0$ $\sum I\omega =$ 恒量
平动动能　$\frac{1}{2}mv^2$ 动能定理 $A_{12} = \int_1^2 \boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r}$ $= \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$	转动动能　$\frac{1}{2}I\omega^2$ 刚体定轴转动的动能定理 $A = \int M\mathrm{d}\theta = \frac{1}{2}I\omega^2 - \frac{1}{2}I\omega_0^2$
机械能守恒定律 条件　$A_{外} + A_{非} = 0$　(或只有保守力作功) $\frac{1}{2}mv^2 + mgh_c + \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}kx^2 =$ 恒量	

1　运动学

1.1　运动学中的重要概念

（1）平动中描述物体作机械运动的四个物理量

位置矢量($\boldsymbol{r}$)：描述物体在空间位置的物理量。

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

位移($\Delta\boldsymbol{r}$)：描述物体在空间位置变化的物理量。物体从位置 $\boldsymbol{r}_1$ 变化到位置 $\boldsymbol{r}_2$

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 = (x_2 - x_1)\boldsymbol{i} + (y_2 - y_1)\boldsymbol{j} + (z_2 - z_1)\boldsymbol{k}$$

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

速度($\boldsymbol{v}$)：描述物体位置变化快慢及方向的物理量。物体位置从 $\boldsymbol{r}_1$ 变化到 $\boldsymbol{r}_2$，同时时间从 t_1 变化到 t_2($\Delta t = t_2 - t_1$)

平均速度　$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x\boldsymbol{i} + \Delta y\boldsymbol{j} + \Delta z\boldsymbol{k}}{\Delta t} = \bar{v}_x\boldsymbol{i} + \bar{v}_y\boldsymbol{j} + \bar{v}_z\boldsymbol{k}$$

瞬时速度　$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} = v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k}$$

加速度($\boldsymbol{a}$)：描述物体速度变化快慢及方向的物理量。

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} = a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k}$$

加速度在自然坐标中的表示

$$\boldsymbol{a} = a_n\boldsymbol{n} + a_\tau\boldsymbol{\tau} = \frac{v_2}{\rho}\boldsymbol{n} + \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}$$

(2) 质点作圆周运动时描述运动的物理量

角位置	θ	(rad)
角位移	$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$	(rad)
角速度	$\omega = \lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta\theta}{\Delta t} = \dfrac{d\theta}{dt}$	(rad/s)
角加速度	$\beta = \lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta\omega}{\Delta t} = \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{d^2\theta}{dt^2}$	(rad/s^2)

(3) 线量与角量的关系

$$v = R\omega$$

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

$$a_\tau = \frac{dv}{dt} = R\beta$$

1.2 运动学解题指导

(1) 描述物体作平动的四个物理量：位置矢量 $\boldsymbol{r}$、位移 $\Delta\boldsymbol{r}$、速度 $\boldsymbol{v}$、加速度 $\boldsymbol{a}$ 都是矢量。要注意矢量的基本运算（矢量的加减法，两矢量的点积、叉积等基本运算法则）。

(2) 掌握解运动学两类问题的方法。

第一类问题是已知质点的运动及运动方程，求质点运动的速度和加速度。

第二类问题是已知质点的加速度及初始条件，求质点运动的速度和运动方程。

第一类问题利用数学上求解导数的方法，第二类问题用积分的方法。

1.3 典型例题

1－1 一质点在 xOy 平面内运动，其运动方程可能是：

(1) $x = 3t$, $y = 5 - 6t$;

(2) $x = 2t$, $y = 11 - 3t^2$;

(3) $x = 2\cos 3t$, $y = 2\sin 3t$;

(4) $x = 3\cos 2t$, $y = 4\sin 2t$;

(5) $x = 2t$, $y = 15 - \frac{5}{t}$。

问 表示质点作直线运动、圆周运动、双曲线运动、椭圆运动、抛物线运动分别是哪个方程？

解 质点在平面内作什么运动，只要求出质点在平面中运动的轨迹方程，从轨迹方程可分辨出质点的不同运动。已知运动方程，求轨迹方程的方法是：将运动方程中的时间 t 消去，即可得到轨迹方程，它们分别是：

(1) $y = 5 - 2x$, 直线；

(2) $y = 11 - \frac{3}{4}x^2$, 抛物线；

(3) $x^2 + y^2 = 4$, 圆；

(4) $\frac{x^2}{9} + \frac{y^2}{16} = 1$, 椭圆；

(5) $y = 15 - \frac{10}{x}$, 双曲线。

1－2 一质点在 xOy 平面内运动，运动方程为 $x = 4t$，$y = 5 - 3t^2$，式中 x、y 以米计，t 以秒计。求：

(1) 写出 $t = 3$ 秒时质点的位置矢量，并计算第 3 秒内的平均速度的大小；

(2) $t = 3$ 秒时，质点的速度和加速度；

(3) 什么时刻，质点的位置矢量恰与其速度矢量垂直？

解 (1)
$$\begin{aligned} \boldsymbol{r}|_{t=3} &= (x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j})_{t=3} = [4t\boldsymbol{i} + (-3t^2 + 5)\boldsymbol{j}]_{t=3} \\ &= (12\boldsymbol{i} - 22\boldsymbol{j})(\mathrm{m}) \end{aligned}$$

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\boldsymbol{r}_3 - \boldsymbol{r}_2}{t_3 - t_2}$$

$$= \frac{[4t\boldsymbol{i} + (-3t^2 + 5\boldsymbol{j}]_{t=3} - [4t\boldsymbol{i} + (-3t^2 + 5)\boldsymbol{j}]_{t=2}}{1}$$

$$= (4\boldsymbol{i} - 15\boldsymbol{j})(\mathrm{m/s})$$

(2) 第一种方法：

$$\boldsymbol{v} = \left.\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right|_{t=3} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[4t\boldsymbol{i} + (-3t^2 + 5)\boldsymbol{j}]_{t=3}$$

$$= (4\boldsymbol{i} - 6t\boldsymbol{j})_{t=3} = (4\boldsymbol{i} - 18\boldsymbol{j})(\mathrm{m/s})$$

$$\boldsymbol{a} = \left.\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}\right|_{t=3} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(4\boldsymbol{i} - 6t\boldsymbol{j})_{t=3} = -6\boldsymbol{j}(\mathrm{m/s^2})$$

第二种方法：速度和加速度是矢量，可分别求出它的大小和方向来表示。

$t = 3$ 秒的速度

$$v_x = \left.\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right|_{t=3} = \left.\frac{\mathrm{d}(4t)}{\mathrm{d}t}\right|_{t=3} = 4(\mathrm{m/s})$$

$$v_y = \left.\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right|_{t=3} = \left.\frac{\mathrm{d}(-3t^2 + 5)}{\mathrm{d}t}\right|_{t=3} = -18(\mathrm{m/s})$$

3 秒时速度的大小

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{4^2 + (-18)^2} = 18.4(\mathrm{m/s})$$

方向：3 秒时速度跟 x 轴所成的角度

$$\theta = \arctan\frac{v_y}{v_x} = \arctan\frac{-18}{4} = -77^\circ$$

$t = 3$ 秒的加速度

$$a_x = \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}x} = 0$$

$$a_y = \frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} = -6(\mathrm{m/s^2})$$

大小为 $6\mathrm{m/s^2}$，方向负 y。

(3) 两矢量垂直的条件是两矢量的点积为零。

$$\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{v} = [4t\boldsymbol{i} + (-3t^2 + 5)\boldsymbol{j}]\cdot[4\boldsymbol{i} - 6t\boldsymbol{j}]$$

$$= 16t - 6t(-3t^2 + 5)$$

$$=-14t+18t^3=0$$

$$t=0.88(\mathrm{s})$$

1－3 一质点在半径为 R 的圆周上运动，其速度与时间的关系为 $v=3t^3+2(\mathrm{SI})$，求：(1) t 时刻质点的切向加速度 a_τ 及法向加速度 a_n；

(2) 从 $t=0$ 到 t 时刻质点通过的路程。

解 (1) $a_\tau=\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(3t^3+2)=9t^2(\mathrm{m/s^2})$

$$a_n=\frac{v^2}{R}=\frac{(3t^3+2)^2}{R}(\mathrm{m/s^2})$$

(2) $S(t)=\displaystyle\int_0^t v\mathrm{d}t$

$$=\int_0^t(3t^3+2)\mathrm{d}t$$

$$=\frac{3}{4}t^4+2t$$

1－4 一质点沿半径为 R 的圆周运动，运动方程为 $\theta=3+2t^2(\mathrm{SI})$。求当切向加速度的大小为总加速度大小的一半时，$\theta$ 的值是多少？

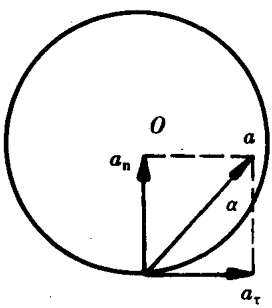

图 1-1

解 作出切向加速度、法向加速度、总加速度的矢量图，如图 1-1 所示。根据题意可知

$$\alpha=30°,\qquad \tan\alpha=\frac{a_\tau}{a_n}=\frac{\sqrt{3}}{3}\qquad a_\tau=\frac{\sqrt{3}}{3}a_n$$

$$a_\tau=R\beta,\qquad a_n=R\omega^2$$

$$\omega=\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(3+2t^2)=4t$$

$$\beta=\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=4$$

$$\therefore \qquad R\beta = \frac{\sqrt{3}}{3} R\omega^2$$

$$4 = \frac{\sqrt{3}}{3}(4t)^2 \qquad\qquad t^2 = \frac{\sqrt{3}}{4}$$

$$\theta = 3 + 2t^2 = 3 + 2\,\frac{\sqrt{3}}{4} = 3.87\text{rad}$$

2 经典力学的基本原理

2.1 牛顿运动定律的基本概念

(1) 牛顿运动三定律

第一定律 任何物体都保持静止或匀速直线运动状态，直到其他物体的作用迫使它改变这种状态为止。

第二定律 物体运动状态变化时，加速度的方向与所受合外力的方向相同，加速度的大小与合外力大小成正比，与物体的质量成反比。其数学表达式为：$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$。

第三定律 当物体 A 以力 $\boldsymbol{F}$ 作用于物体 B 时，物体 B 必定同时以大小相等、方向相反的同一性质的力 $\boldsymbol{F}'$ 沿同一直线作用于物体 A 上。其数学表达式为 $\boldsymbol{F} = -\boldsymbol{F}'$。

(2) 惯性参照系

自然界有这样一类参照系，物体不受外力作用它将处于静止或匀速直线运动的状态，这类参照系称惯性系。

实验证明：以太阳中心为原点，坐标轴指向恒星的坐标系是惯性系。相对于惯性参照系作匀速直线运动的参照系也是惯性参照系。

(3) 牛顿定律的适用范围

牛顿定律只适用于惯性系中低速（跟光速相比速度显得很小）运动的宏观物体。对非惯性系、对高速运动、对微观（$10^{-10} \sim 10^{-15}$m）领域牛顿定律不适用。

2.2 牛顿定律解题指导

解牛顿定律的问题可分为两类：第一类是已知质点的运动，求作用于质点的力；第二类是已知作用于质点的力，求质点的运动。

求解牛顿定律问题一般采用隔离体法，即将连接在一起的物体相互隔开，并对隔离开的每一个物体受力分析，然后将这些力进行正交分解（即建立坐标系），列方程求解。在直角坐标系中方程为

$$\begin{cases} \Sigma F_x = m\dfrac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} \\ \Sigma F_y = m\dfrac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} \\ \Sigma F_z = m\dfrac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2} \end{cases}$$

自然坐标系中方程为（质点作圆周运动时常用自然坐标）

$$\Sigma F_\tau = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

$$\Sigma F_n = m\frac{v^2}{R} = mR\omega^2$$

2.3 典型例题

2－1 绳长为 l，摆锤质量为 m 的一单摆如图 2-1 所示。单摆运动方程 $\theta = \theta_0\cos\omega t$，$\theta$ 为细绳与铅直线所成的角，θ_0（$\theta_0 < 5°$）和 ω 均为常数。求绳子的张力

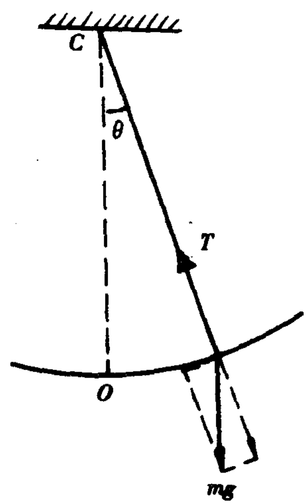

图 2-1

T。

解　选质点 m 为研究对象，当摆运动到图示角位置 θ 时，m 受重力及绳子张力 T。摆锤作圆弧运动，将力沿切向和法向分解，其法向分量的合力

$$\sum F_n = T - mg\cos\theta = ml\omega^2$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = -\theta_0\omega\sin\omega t$$

$$T = mg\cos\theta + ml\theta_0^2\omega^2\sin^2\omega t$$

2－2　桌上有一块质量为 $M = 1\text{kg}$ 的板，板上放一质量为 2kg 的物体，物体和板之间，板和桌面之间的滑动摩擦系数均为 $\mu = 0.25$，静摩擦系数为 $\mu_0 = 0.30$。求：

(1) 现以水平力 $\boldsymbol{F}$ 拉板，物体与板一起运动的加速度为 $a = 1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$，试计算物体和板，板和桌面间的相互作用力；

(2) 水平力 $\boldsymbol{F}$ 至少多大，才能将板从物体下抽出来？

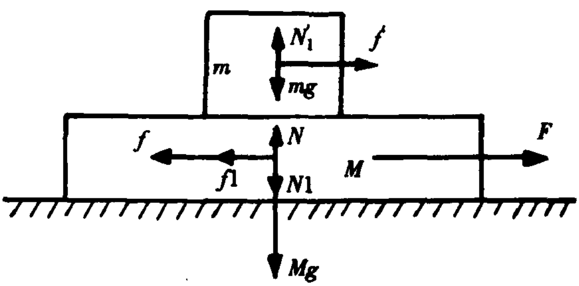

图 2-2

解　分别取 M、m 为研究对象，

m 受力：　重力 mg；

M 对 m 的支持力 N_1'；

M 对 m 的静摩擦力 f'。