高等学校教学参考书

大学物理学
学习指导

主编　李廷占　刘保良

$E=nh\nu$

气象出版社

前 言

大学物理学是工科大学生必修的一门基础理论课，是每一个高级工程技术人员所必备的理论基础。为了配合工科学生学好大学物理学，我们根据国家教委（现为教育部）颁发的《高等学校工科本科大学物理课程教学基本要求》(1995 年) 简称《基本要求》编写了这本《大学物理学学习指导》，在编写过程中，综合了编者多年来的教学经验，参考了国内外同类参考书，并汲取了它们的优点。

本书编写的指导思想是："根据《基本要求》突出重点、难点，抓住基本概念、基本规律和基本方法，精选例题和习题"。本书编写力求做到结构紧凑，概念清楚，举例分析全面深刻，难易程度恰到好处，例题小结力争做到准确，具有指导意义。典型习题提示解力争做到提示简明，引导正确。编者认为，本书对学生学习物理学，培养学生的综合能力和综合素质是大有好处的。

本书共有十个单元，编写的具体分工为：徐敏（第一、二、七单元），李廷占（第三、八单元），王东升（第四、五、十单元），刘保良（第六、九单元）。

本书所有插图都是由陈秋菊绘制。

本书由李廷占、刘保良主编，王东升、徐敏任副主编。

在本书编写过程中，关智武教授、王西汉、于天池和赵东山

副教授提出了许多宝贵意见和建议。在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者 2001 年 3 月

目　录

第一单元　质点力学

一、基本要求

1. 理解质点模型和参照系、惯性系等概念。掌握坐标系的选取方法。

2. 掌握位置矢量（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。能够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。能够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. 能够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。能用它们分析、解决质点在平面内运动时的动力学问题。

5. 掌握功的概念，能熟练地计算直线运动情况下变力的功。掌握保守力作功的特点及势能的计算，会计算势能。

6. 掌握质点的动能定理和动量定理，能用它们分析、解决质点在平面内运动时的简单力学问题。

7. 掌握机械能守恒定律、动量守恒定律及它们的适用条件。掌握运用守恒定律分析问题的思路和方法，能分析简单系统在平面内运动的力学问题。

二、内容提要

1. 质点的位置矢量：表示质点位置的矢量。在直角坐标系中，

位矢表示为：

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

质点的运动方程：表示质点的位置随时间变化的函数。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$$

或

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

2. 质点的位移：表示质点位置变动的物理量。

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$$

在直角坐标系中：

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

学习时要注意位移 $\Delta\mathbf{r}$ 与路程 ΔS 的区别。

3. 质点的速度：描述质点运动快慢及方向的物理量。其定义为：

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

在直角坐标系中，可写成分量式：

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} \\ &= v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \end{aligned}$$

注意区分速度 $\mathbf{v}$ 与速率 v.

速率定义式：

$$v = \frac{dS}{dt}$$

或

$$v=|\mathbf{v}|=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}$$

4. 质点的加速度：描述质点运动速度变化快慢的物理量。其定义为：

$$\mathbf{a}=\frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

在直角坐标系中，可写成分量式：

$$\begin{aligned}\mathbf{a}&=\frac{dv_x}{dt}\mathbf{i}+\frac{dv_y}{dt}\mathbf{j}+\frac{dv_z}{dt}\mathbf{k}\\&=a_x\mathbf{i}+a_y\mathbf{j}+a_z\mathbf{k}\end{aligned}$$

若质点作平面曲线运动，有时也采用自然坐标系。

在自然坐标系中，加速度的分量式为：

$$\mathbf{a}=a_n\mathbf{n}_0+a_\tau\boldsymbol{\tau}_0$$

式中 $a_n=\dfrac{v^2}{\rho}$ 为法向加速度，用来描述速度方向的改变。$a_\tau=\dfrac{dv}{dt}$ 为切向加速度，用来描述速率变化的快慢。$\mathbf{n}_0,\boldsymbol{\tau}_0$ 分别表示自然坐标系中法向轴和切向轴上的单位矢量。

5. 圆周运动的角量描述

运动方程：

$$\theta=\theta(t)$$

角位移：

$$\Delta\theta=\theta_2-\theta_1$$

角速度：

$$w=\frac{d\theta}{dt}$$

角加速度：

$$\beta=\frac{dw}{dt}=\frac{d^2\theta}{dt^2}$$

角量与线量的关系：

$$\Delta S = R\Delta\theta \text{ 或 } dS = Rd\theta$$

$$v = R\omega$$

$$a_\tau = R\beta$$

$$a_n = R\omega^2$$

6. 相对运动

$$\mathbf{r}_{AC} = \mathbf{r}_{AB} + \mathbf{r}_{BC}$$

$$\mathbf{v}_{AC} = \mathbf{v}_{AB} + \mathbf{v}_{BC}$$

$$\mathbf{a}_{AC} = \mathbf{a}_{AB} + \mathbf{a}_{BC}$$

7. 牛顿第二定律

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

注意牛顿第二定律仅适用于宏观低速物体的平动，而且只适用于惯性系。

在直角坐标系中，投影式为：

$$F_x = ma_x,\ F_y = ma_y,\ F_z = ma_z$$

在自然坐标系中，投影式为：

$$F_n = ma_n = m\frac{v^2}{\rho},\ \ F_\tau = ma_\tau = m\frac{dv}{dt}$$

8. 冲量、动量和动量定理

冲量：力的时间累积效应，其定义为：

$$\mathbf{I} = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}dt$$

冲量是矢量。冲量与力的作用过程有关，是过程量。

动量：动量是机械运动的一种量度，其定义为：

$$\mathbf{P} = m\mathbf{v}$$

动量是矢量，它的方向即速度方向。动量与物体运动状态有关，是状态量，具有瞬时性。

动量定理：物体所受合外力的冲量等于物体动量的增量，即

$$\mathbf{I} = \Delta\mathbf{P}$$

$\Delta\mathbf{P} = \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1 = m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1$ 称为动量的增量。

对状态量而言，“增量”指末状态量减去初状态量，即

$$\text{增量} = \text{末状态量} - \text{初状态量}$$

9. 功、动能、动能定理

功：功是描述力的空间累积作用的物理量，是一个过程量。其定义如下：

$$A = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$$

功是标量，但有正负。中学物理讨论的是恒力作功，大学物理要研究变力作功的问题。

动能：是物体由于运动而具有的能量。

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

动能是状态量，具有瞬时性。

动能定理：合外力对物体所作的功等于物体动能的增量。

$$A_{ab} = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \frac{1}{2}mv_b^2 - \frac{1}{2}mv_a^2$$

或 $$A = \Delta E_k$$

10. 保守力的功、势能、功能原理

(1) 保守力的特点：作功与路径无关，只与系统内物体的始末相对位置有关。例如

重力的功：

$$A_{ab} = \int_{h_a}^{h_b} -mgdh = -(mgh_b - mgh_a)$$

弹性力的功：

$$A_{ab} = \int_{x_a}^{x_b} -kxdx = -(\frac{1}{2}kx_b^2 - \frac{1}{2}kx_a^2)$$

万有引力的功：

$$A_{ab} = \int_{r_a}^{r_b} -G\frac{Mm}{r^2}dr = -[(-G\frac{Mm}{r_b}) - (-G\frac{Mm}{r_a})]$$

(2) 势能：根据保守力作功与路径无关的特征，可以引入一个仅与系统内各物体相对位置有关的物理量 —— 势能，用 E_P 表示，于是，保守力的功等于势能增量的负值。

$$A_C = -\Delta E_P$$

势能是由系统内各物体相对位置决定的能量，因此势能是属于整个系统的。

势能差是绝对的，而势能值是相对的，为确定某处的势能值，应先在保守力场中选取势能零点。

在重力场中，可选任意位置处为势能零点。于是，任意一点的重力势能为

$$E_P = mgh$$

在弹力场中，常选弹簧的自然伸长处为势能零点。于是，任意位置处的弹性势能为

$$E_P = \frac{1}{2}kx^2$$

在万有引力场中，常选无限远处为势能零点。于是，物体在万有引力场中某点的势能为

$$E_P = -G\frac{Mm}{r}$$

(3) 功能原理：外力和非保守内力作功之和等于系统机械能的增量。

$$A_{外} + A_{非保内} = \Delta E$$

11. 守恒定律

(1) 动量守恒定律：如果系统在一段时间内不受外力或所受合外力为零，则该系统在这段时间内的总动量保持不变。

$$\Sigma \mathbf{F}_i = 0, \quad \Sigma m_i \mathbf{v}_i = \text{恒矢量}$$

如果系统所受合外力在某方向的分量等于零，则系统的总动量在该方向的分量守恒。

在碰撞和打击问题中，由于系统的内力比外力大得多，外力可忽略，则动量守恒。

动量守恒定律仅适合于惯性系。

动量守恒的条件是

$$\Sigma \mathbf{F}_i = 0$$

而不是

$$\mathbf{I} = \int_{t_1}^{t_2} \Sigma \mathbf{F}_i dt = 0$$

$\mathbf{I} = 0$ 只表明 t_1,t_2 两个时刻的动量相等，而动量守恒则是指从 t_1 到 t_2 这段时间内，各个时刻的动量都相等。

(2) 机械能守恒定律

如果作用于系统的外力和非保守内力在某一过程中都不作功，系统的机械能在该过程中保持不变。

$$\begin{cases} A_{\text{外}} = 0 \quad E = E_k + E_p = \text{恒量} \\ A_{\text{非保内}} = 0 \end{cases}$$

三、典型例题分析

例 1.1 已知质点从静止开始沿 x 轴运动，初始位置为 $6m$，其加速度 $a = 6 - 6t(\mathrm{SI})$，求

(1) 质点的运动方程；

(2) 从第 1 秒末到第 3 秒末质点的位移和所通过的路程。

解 (1) 由题意知 $t = 0$ 时，$x_0 = 6m, v_0 = 0$，

由 $\dfrac{dv}{dt} = 6 - 6t$ 得 $dv = (6 - 6t)dt$

积分

$$\int_0^v dv = \int_0^t (6 - 6t)dt$$

得 $$v = 6t - 3t^2$$

由 $\dfrac{dx}{dt} = 6t - 3t^2$ 得

$$dx = (6t - 3t^2)dt$$

积分

$$\int_6^x dx = \int_0^t (6t - 3t^2)dt$$

得质点的运动方程：

$$x = 6 + 3t^2 - t^3$$

(2) 第 1 秒末和第 3 秒末质点的位置

$$t_1 = 1\text{s} \quad x_1 = 8m$$
$$t_2 = 3\text{s} \quad x_3 = 6m$$

位移

$$\Delta x = x_3 - x_1 = -2m$$

负号表示位移方向与 x 轴正方向相反。

令

$$v = 6t - 3t^2 = 0$$

得： $t = 0$ 或 $t = 2\text{s}$ 。

$t = 0$ 为质点的运动起点， $t = 2\text{s}$ 时质点的位置 $x_2 = 10m$ 。

路程

$$\begin{aligned}\Delta S &= |x_2 - x_1| + |x_3 - x_2| \\ &= |10 - 8| + |6 - 10| \\ &= 6m\end{aligned}$$

题结 求解本题关键要注意位移与路程的区别。

例 1.2 某电动机转子半径 $r = 0.1m$ ，转子转过的角位移与时间的关系为

$$\theta = 2 + 4t^3$$

求 (1) 当 $t = 2\text{s}$ 时，边缘上一点的法向加速度和切向加速度的大小；

(2) 当电动机的转角 θ 多大时，其合加速度与半径成 45^0 角？

解 由 $\theta = 2 + 4t^3$ 得转子的角速度

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = 12t^2$$

角加速度

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} = 24t$$

根据角量与线量的关系得

$$a_\tau = r\beta = 24rt$$

$$a_n = r\omega^2 = 144rt^4$$

(1) 以 $t = 2s$ 代入以上两式得

$$a_\tau = 24 \times 0.1 \times 2 = 4.8m \cdot s^{-1}$$

$$a_n = 144 \times 0.1 \times 2^4 = 2.3 \times 10^2 m \cdot s^{-2}$$

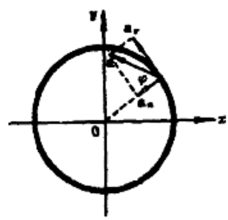
(2) 当合加速度与半径成 45^0 角时, $\mathbf{a}$ 与 $\mathbf{a}_n$ 成 45^0 角, 此时

$$\frac{a_\tau}{a_n} = \mathrm{tg}45^0 = 1$$

即 $\quad a_\tau = a_n$

$$24rt = 144rt^4$$

解得: $t_1 = 0$ (舍去) $t_2 = 0.55s$



例 1.2 解图

所以

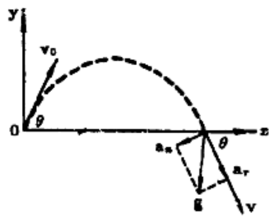
$$\theta = 2 + 4t^3 = 2 + 4 \times (0.55)^3$$
$$= 2.67rad$$

题结 此题的目的在于说明如何根据角量运动方程, 用微分法求 ω, β, 并进而利用角量与线量的关系求得 a_τ, a_n 等物理量。

例 1.3 一小球由地面开始作斜上抛运动，初速度的大小为 v_0，与水平方向成 θ 角，试求(设地面是水平的，且忽略空气阻力)：

(1) 小球在任意时刻 t 的位置坐标及轨迹方程；

(2) 小球落地时的切向加速度，法向加速度及此时轨道的曲率半径。



例 1.3 解图

解 (1) $x = v_0 \cos\theta t$

$$y = v_0 \sin\theta t - \frac{1}{2}gt^2$$

消去 t 得轨迹方程为：

$$y = \mathrm{tg}\theta x - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2\theta}x^2$$

(2) 小球落地时，速度大小为 $v = v_0$，方向与水平成 θ 角，总加速度为 $\mathbf{g}$。

把总加速度 $\mathbf{g}$ 投影到切向轴和法向轴上，得：

$$a_\tau = g\sin\theta,\quad a_n = g\cos\theta$$

由 $a_n = \dfrac{v^2}{\rho}$ 得：

$$\rho = \frac{v^2}{a_n} = \frac{v_0^2}{g\cos\theta}$$

题结 本题第 (2) 问提供了一种求 a_τ, a_n 及 ρ 的简捷方法，即：已知某位置速度的大小、方向及总加速度，可用投影法求 a_τ, a_n，再应用公式 $a_n = \dfrac{v^2}{\rho}$ 可进一步求得 ρ。