物理学习指导与考研试题精选

杨宝胜 周宗文
汤玉梅 陈国平 编著

南开大学出版社

内容提要

本书是为《物理学》编写的配套辅导教材，包括力学、热学、电磁学、光学、原子物理和狭义相对论等。全书共十九章。每一章都有学习要求、内容总结、解题示例、习题和部分习题解答或提示。附录还给出了自测题以及考研模拟题。

本书可供大专院校学习普通物理学的学生阅读，也可供从事基础教学工作的教师参考，对有志报考研究生的学生，也是一本难得的复习指导书。

物理学习指导与考研试题精选

杨宝胜 周宗文 汤玉梅 陈国平 编著

南开大学出版社出版

（天津八里台南开大学校内）

邮编：300071 电话：23508542

新华书店天津发行所发行

天津宝坻县印刷厂印刷

1998年5月第1版 1998年5月第1次印刷

开本：850×1168 1/32 印张：16.25

字数：406千 印数：1-2000

ISBN 7-310-01066-3

O·104 定价：20.00元

前　言

本书是为《物理学》(马根源、王松立、金庆华编著)编写的配套辅导教材。每一章都有学习要求,内容总结,解题示例,部分习题解答。书后还附有自测题。

在学完《物理学》的基础上,阅读这本辅导书是最合适的。它能帮助你总结和条理化所学的知识,帮助你巩固和加深对基本概念和基本规律的理解,提高你的分析问题和解决问题的能力。对本书的学习应首先阅读每一章的学习要求(这个要求是和教学大纲相一致的);其次是阅读内容总结,并和自己的总结相比较,以加深对基本概念、原理、定律等的理解和记忆,然后阅读解题示例;要认真体会如何运用基本概念、原理和定律分析问题。解题示例是多年来我们在物理学习题课上使用的题目,这些题目体现了物理学的主要内容和基本要求,以及对问题的分析方法和技巧,具有典型性、概括性和一定的难度,具有示范作用。同时,本书对某些题目作了适当的讨论和引申,以启发学生思考和探索,达到培养学生科学素质之目的。对习题和思考题,读者应首先自己分析它,解决它,然后将所得出的结果同书上的结果比较对照,切不可先翻阅答案,再去解题。

本书力学和热学部分(一～七章)由杨宝胜编写,电磁学部分(八～十四章)由周宗文编写,光学部分(十五章～十七章)由汤玉梅编写,量子力学和现代物理部分(十八～十九章),由陈国平编写。

本书可供从事基础物理教学工作的大学教师参考，也可供物理系学生及广大物理爱好者阅读学习。对于有志于攻读有关学科硕士研究生的读者，学习本书也不失为一条简捷的复习途径。

《物理学》作者马根源、王松立、金庆华以及潘维济、韩绍先教授对书稿的不同章节进行了认真审阅，对此我们向他们表示由衷的感谢。

我们恳请广大读者对本书提出批评和指正。

编者　谨识

1997年3月于南开大学

目　　录

第一章 运 动 学

1.1 学习要求

1. 掌握描述质点运动状态各物理量的意义，明确它们的相对性、瞬时性、矢量性和独立性。

2. 理解运动方程和轨迹方程的意义。能由已知条件熟练求得运动方程，并进而求得速度和加速度。

3. 熟记元位移、速度和加速度公式在直角坐标系、平面极坐标系和自然坐标系中的形式。

1.2 主要内容

1. **质点** 在研究一个物体机械运动时，为了简单和方便，有时可以忽略物体的形状和大小，而将其看成一个只有质量的几何点，称为质点。质点是一个理想模型。一个物体可否看成质点，要看研究的具体问题而定。

2. **参照系** 描述一个物体是在运动还是静止，需要同另一物体或物体系作比较，这个用作比较的物体或物体系称做参照系。为了定量描述物体位置的变化，在参照系中建立坐标系。常用的坐标系有直角坐标系、平面极坐标系、自然坐标系等。

3. **运动方程和轨迹方程** 质点的位置矢量随时间的变化关系

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t) \tag{1.1}$$

即为质点的运动方程。质点在空间运动时所描绘的路线称为轨迹

方程。例如，质点作平面运动时，其轨迹方程为

$$y=y(x) \tag{1.2}$$

4. **位置矢量** $\boldsymbol{r}$（简称位矢）和**位移矢量** $\Delta\boldsymbol{r}$　t 时刻从相对参照系静止的参考原点 O 引向质点 P 的方向线段 $\overrightarrow{OP}=\boldsymbol{r}(t)$ 为 t 时刻质点的位置矢量；$t+\Delta t$ 时刻的位矢 $\boldsymbol{r}(t+\Delta t)$ 和 t 时刻的位矢 $\boldsymbol{r}(t)$ 之差 $\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t+\Delta t)-\boldsymbol{r}(t)$ 称为质点的位移矢量，也就是质点在 t 时刻的位置 P 点引向质点在 $t+\Delta t$ 时刻的位置 P' 点的矢量 $\Delta\boldsymbol{r}=\overrightarrow{OP}$；当 $\Delta t\to \mathrm{d}t$ 时，$\Delta\boldsymbol{r}\to\mathrm{d}\boldsymbol{r}$，则 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 称为元位移；质点在 Δt 时间内轨迹的长度 $\overset{\frown}{PP'}$ 称为路程；$\overline{PP'}$ 称为距离，如图 1.1 所示。

5. **速度和加速度**　描述一个质点运动快慢的物理量称做速度；描述一个质点运动速度变化快慢的物理量称做加速度。它们都是矢量。其定义如下：

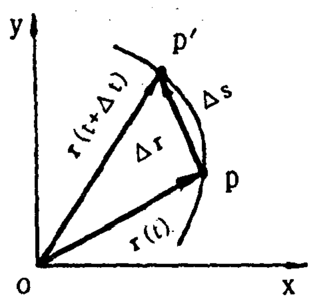

图 1.1

平均速度　$\langle\boldsymbol{v}\rangle=\dfrac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}$

瞬时速度　$\boldsymbol{v}=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\dot{\boldsymbol{r}}$　(1.3)

平均加速度　$\langle\boldsymbol{a}\rangle=\dfrac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}$

瞬时加速度　$\boldsymbol{a}=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\dot{\boldsymbol{v}}=\ddot{\boldsymbol{r}}$　(1.4)

6. 上述物理量在直角坐标系、平面极坐标系和自然坐标系中的具体表达式如下。

(1) 直角坐标系中

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

元位移　$\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\mathrm{d}x\boldsymbol{i}+\mathrm{d}y\boldsymbol{j}+\mathrm{d}z\boldsymbol{k}$

速度　$\boldsymbol{v}=\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}=\dot{x}\boldsymbol{i}+\dot{y}\boldsymbol{j}+\dot{z}\boldsymbol{k}$

加速度　$\boldsymbol{a}=\ddot{x}\boldsymbol{i}+\ddot{y}\boldsymbol{j}+\ddot{z}\boldsymbol{k}$

运动方程　$x=x(t),y=y(t),z=z(t)$

轨迹方程　$y=y(x)$（二维情况）

注意：单位矢量 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 大小和方向都不变，故有

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{i}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{j}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{k}}{\mathrm{d}t}=0$$

（2）平面极坐标系中（如图 1.2 所示）

位矢　$\boldsymbol{r}=r\boldsymbol{r}^0$

元位移　$\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\mathrm{d}r\boldsymbol{r}^0+r\mathrm{d}\theta\boldsymbol{\theta}^0$

运动方程　$\begin{cases}r=r(t)\\ \theta=\theta(t)\end{cases}$

速度　$\boldsymbol{v}=v_r\boldsymbol{r}^0+v_\theta\boldsymbol{\theta}^0$

$$v_r=\dot{r};\quad v_\theta=r\dot{\theta}$$

加速度　$\boldsymbol{a}=a_r\boldsymbol{r}^0+a_\theta\boldsymbol{\theta}^0$

$$a_r=\ddot{r}-r\dot{\theta}^2;$$

$$a_\theta=r\ddot{\theta}+2\dot{r}\dot{\theta}$$

$$=\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(r^2\dot{\theta})$$

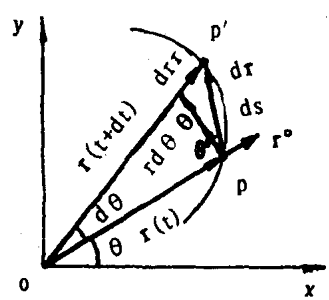

图 1.2

其中 v_r 和 v_θ、a_r 和 a_θ 分别为速度和加速度的径向分量和横向分量。

注意：径向和横向单位矢量 $\boldsymbol{r}^0$ 和 $\boldsymbol{\theta}^0$，其长度均为 1 个单位，但方向随时间改变，这和直角坐标系中的单位矢量 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 不同，且有

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}^0}{\mathrm{d}t}=\dot{\theta}\boldsymbol{\theta}^0;\quad \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\theta}^0}{\mathrm{d}t}=-\dot{\theta}\boldsymbol{r}^0 \tag{1.5}$$

（3）自然坐标系中（如图 1.3 所示）

运动方程　$s=s(t)$

元位移　$\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\mathrm{d}s\boldsymbol{\tau}^0$

速度　$\boldsymbol{v}=v\boldsymbol{\tau}^0=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}^0$

加速度　$\boldsymbol{a}=a_t\boldsymbol{\tau}^0+a_n\boldsymbol{n}^0$

$$a_t=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t};\quad a_n=\frac{v^2}{\rho}$$

其中 a_t、a_n 分别为切向加速度和法向加速度，ρ 为曲线的曲率半径

$$\rho=\left|\frac{(1+y'^2)^{3/2}}{y''}\right|=\frac{(\dot{x}^2+\dot{y}^2)^{3/2}}{|\dot{x}\ddot{y}+\ddot{x}\dot{y}|}$$

注意：切向和法向单位矢量 $\boldsymbol{\tau}^0$ 和 $\boldsymbol{n}^0$ 长度均为一个单位，但方向随时间变化，且有

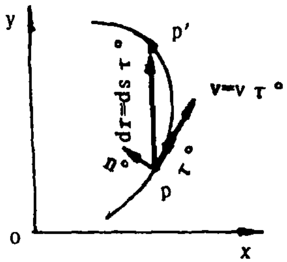

图 1.3

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\tau}^0}{\mathrm{d}t}=\dot{\theta}\boldsymbol{n}^0 \tag{1.6}$$

这里还应注意速度、速率和速度分量的区别与联系。以后一提到速度，若没有特别指明，就是 t 时刻的速度，是矢量，有大小和方向。其大小称为速率，以 v 表之，并有 $v=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=\left|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right|=\sqrt{v_r{}^2+v_\theta{}^2}=\sqrt{v_x{}^2+v_y{}^2}$；其方向沿轨迹的切线方向，并指向质点的前进方向。由于不同坐标系中轴的取向不同，故速度的分量式不同。但速度大小却只有一个值，即 $v=\sqrt{v_r{}^2+v_\theta{}^2}=\sqrt{v_x{}^2+v_y{}^2}$。

7. 在已知速度和加速度的情况下，通过积分可以求得物体的位移和速度：

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_0+\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{v}\mathrm{d}t,\quad \boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_0-\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{a}\mathrm{d}t \tag{1.7}$$

特别是对匀加速运动直线的情况，有

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_0+\boldsymbol{a}t;\quad \boldsymbol{v}^2=\boldsymbol{v}_0^2+2\boldsymbol{a}\cdot\Delta\boldsymbol{r};\quad \Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{v}_0t+\frac{1}{2}\boldsymbol{a}t^2$$

8. **相对运动** 研究一个质点相对于两个参照系（一个静止，另一个运动）运动时各物理量之间的关系。

（1）平动情况 K' 系以速度 $\boldsymbol{v}_0$ 相对 K 系运动，且 K' 系和 K 系各坐标轴始终平行，如图 1.4 所示，因为 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_0+\boldsymbol{r}'$，求导得

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_0+\boldsymbol{v}' \tag{1.8}$$

$$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}_0+\boldsymbol{a}'$$

其中 $\boldsymbol{v}$ 和 $\boldsymbol{a}$ 称为绝对速度和加速度，$\boldsymbol{v}'$ 和 $\boldsymbol{a}'$ 称为相对速度和加速度，$\boldsymbol{v}_0$ 和 $\boldsymbol{a}_0$ 称为牵连速度和加速度。

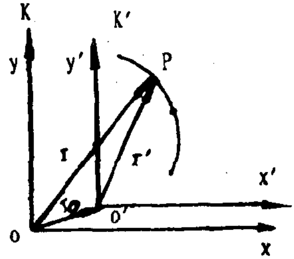

图 1.4

(2)转动情况　K'系以匀角速度 ω 绕 K 系的 Z 轴旋转，且 K'系和 K 系的原点同 Z'轴和 Z 轴始终重合，如图 1.5 所示。有

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}'$$

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}'+\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}' \tag{1.9}$$

$$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}'-2\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{v}'+\boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}') \tag{1.10}$$

其中 $\boldsymbol{a}_c=2\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{v}'$ 称科里奥利加速度。它是 K'系的转动和质点相对运动的联合效果。$\boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}')$称为向心加速度。

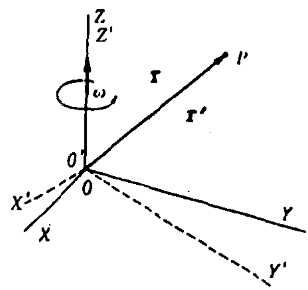

图 1.5

9. 有关相对论部分移至第二章后部。

1.3　解题示例

运动学的基本任务之一是求解质点的速度和加速度，这就需要知道质点的运动方程，然后求导得出。在一些题目中，如何求得质点的运动方程是解题的关键。求质点运动方程的步骤大体如下：①建立合适的坐标系。一般说来，质点作直线运动时，取直角坐标系；若质点作曲线运动，且曲线形状又已知，则取自然坐标系。若曲线形状不知道，则取平面极坐标系。②质点在任意 t 时刻的位置用坐标表示出来，切记不能是特殊时刻，如初始时刻的位置等。③借助几何关系或物理规律得出运动方程，往往借助几何关系，因此，

画好示意图，就显得很重要。

运动学基本任务之二，是在已知速度或加速度的情况下，由积分求得位移或速度。

运动学基本任务之三，是求解相对运动问题。

【例 1.1】 试讨论自由落体的平均速度和瞬时速度。

解：设质点开始下落处为坐标原点 0，x 轴向下为正，则质点的运动方程 $\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}=(\frac{1}{2}gt^2)\boldsymbol{i}$，由于是一维运动，用正负号表示方向，方程写为 $x=\frac{1}{2}gt^2$，则平均速度

$$\bar{v}=\langle v\rangle=\frac{x_2-x_1}{t_2-t_1}=\frac{\frac{1}{2}gt_2{}^2-\frac{1}{2}gt_1{}^2}{t_2-t_1}=\frac{1}{2}g(t_2+t_1)$$

令 $t_2-t_1=\Delta t, t_2=t_1+\Delta t$，则有

$$\bar{v}=\frac{1}{2}g(2t_1+\Delta t)=gt_1+\frac{1}{2}g\Delta t$$

上式表明，平均速度不仅和时间间隔大小有关，还和时间间隔的起点有关。

当 $t_1=0$ 时，则 $\bar{v}=\frac{g\Delta t}{2}$，此时平均速度只和时间间隔有关。

当 $\Delta t\to 0$ 时，则 $\bar{v}=gt_1$，此时，平均速度只和起点有关（就是 t_1 时刻的瞬时速度了）。由此看来，平均速度的概念是粗糙的，近似的。

【例 1.2】 路灯距地面高为 H，身高为 h 的人以匀速率 v_0 离灯而去，求人头顶的投影移动的速度。

解：首先将质点位置用坐标表示，然后由几何关系找出含有用坐标表示质点位置的方程。为此，取坐标系如图 1.6 所示。设 t 时刻人在 x_A 处，头顶的投影在 x_B 处，因为$\triangle ABD\backsim\triangle OBC$，则有

$$x_B(H-h)=x_AH$$

对上式求导，得

$$\dot{x}_B=\frac{\dot{x}_A H}{H-h}=\frac{H}{H-h}v_0$$

式中 $\dot{x}_A=v_0$，$\dot{x}_B$ 即为人头顶的投影移动的速度。而影速与人速之差为 $\dot{x}_B-\dot{x}_A=\frac{h}{H-h}v_0$。

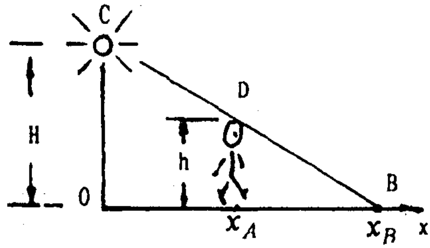

图 1.6(例 1.2)

【例 1.3】 质点在水平面内运动轨迹如图 1.7 所示，OA 为直线，$\overset{\frown}{AB}$、$\overset{\frown}{BC}$分别为半径 15 米和 30 米的两个$\frac{1}{4}$圆周。设 $t=0$ 时，质点 M 在 O 点，已知运动方程为 $s=30t+5t^2$(SI)，求 $t=2$ 秒时，质点 M 的切向加速度和法向加速度。

解：由于质点运动的路径已知，所以取自然坐标系，质点 M 的速度为

$$v=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}^0=(30+10t)\boldsymbol{\tau}^0$$

又因为 $t=2$ 秒时，质点 M 在半径 $R=30$ 米的 BC 弧上的某点处。所以切向加速度和法向加速度分别为

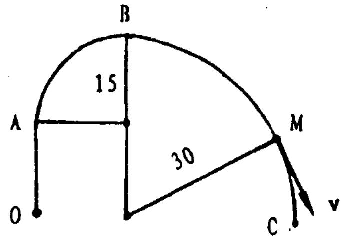

图 1.7(例 1.3)

$$a_t=\left.\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\right|_{t=2}=10(\text{米/秒})$$

$$a_n=\frac{v^2}{R}=\frac{(30+10\times2)^2}{30}=83.3(\text{米/秒})$$

【例 1.4】 一颗穿在车轮辐条上的小球，以恒定速率 u 沿辐条向外运动。它在 $t=0$ 时从轮中心出发，辐条角位置由 $\theta=\omega t$ 给出，ω 为常数，求小球的速度和加速度。

解：取平面极坐标系如图 1.8 所示。由于 $\dot{r}=u$，所以 $r=ut$ 和 $\ddot{r}=0$；又因为 $\theta=\omega t$，所以 $\dot{\theta}=\omega$ 和 $\ddot{\theta}=0$，因此有 $v=v_r\boldsymbol{r}^0+v_\theta\boldsymbol{\theta}^0$

$=\dot{r}\boldsymbol{r}^0+r\dot{\theta}\boldsymbol{\theta}^0=u\boldsymbol{r}^0+u\omega t\boldsymbol{\theta}^0$,

$$|\boldsymbol{v}|=\sqrt{v_r^2+v_\theta^2}=\sqrt{u^2+(u\omega t)^2}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a}&=a_r\boldsymbol{r}^0+a_\theta\boldsymbol{\theta}^0\\&=(\ddot{r}-r\dot{\theta}^2)\boldsymbol{r}^0+(r\ddot{\theta}+2\dot{r}\dot{\theta})\boldsymbol{\theta}^0\\&=-r\omega^2\boldsymbol{r}^0+2u\omega\boldsymbol{\theta}^0\\&=-u\omega^2t\boldsymbol{r}^0+2u\omega\boldsymbol{\theta}^0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}|\boldsymbol{a}|&=\sqrt{a_r^2+a_\theta^2}\\&=\sqrt{(u\omega^2t)^2+(2u\omega)^2}\end{aligned}$$

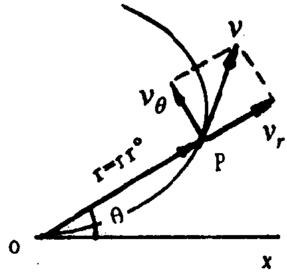

图 1.8(例 1.4)

从图中看出,小球任何时刻的速度都是沿轨迹的切线方向的。此题和例 1.3 都是曲线运动,差别在于例 1.3 已知曲线方程和曲率半径。用自然坐标系求解方便。而此题不知曲线运动方程,曲率半径求不出,故不能用自然坐标系求解,必须取平面极坐标系求解。

【例 1.5】 一物体沿 x 轴运动,其加速度和位置的关系为 $a=2+6x$,a 的单位是米/秒^2,x 的单位是米,物体在 $x=0$ 处的速度为 10 米/秒,求物体的速度和位置的关系。

解 解此类题目,需将加速度的表达式对时间的关系换成对坐标的关系。为此,在 $a=\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$式的等号右边乘以$\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}x}$,注意到$\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=v$,整理得到加速度以坐标表示的表达式

$$a=v\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}$$

代入 $a=2+6x$,得

$$2+6x=v\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}$$

即 $(2+6x)\mathrm{d}x=v\mathrm{d}v$

积分上式$\displaystyle\int_0^x(2+6x)\mathrm{d}x=\int_{10}^v v\mathrm{d}v$

得 $v=\sqrt{4x+6x^2+100}$(米/秒)