

新锐丛书

21世纪高等学校教材

大学物理学学习指导

DAXUE WULIXUE XUEXI ZHIDAO

主 编 汪晓元

复旦大学出版社

新锐丛书

21 世纪高等学校教材

大学物理学

学习指导

主编 汪晓元

复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学学习指导/汪晓元主编. —上海:复旦大学出版社,
2006.8

(新锐丛书)

ISBN 7-309-05104-1

I. 大… II. 汪… III. 物理学-高等学校-教学参考资料
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 083743 号

大学物理学学习指导

汪晓元 主编

出版发行 复旦大学出版社 上海市国权路 579 号 邮编 200433
86-21-65642857(门市零售)
86-21-65118853(团体订购) 86-21-65109143(外埠邮购)
fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

责任编辑 白国信
总编辑 高若海
出品人 贺圣遂

印刷 浙江省临安市曙光印务有限公司
开本 787×960 1/16
印张 15.5
字数 278 千
版次 2006 年 8 月第一版第一次印刷

书号 ISBN 7-309-05104-1/O·369
定价 21.00 元

如有印装质量问题, 请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

内 容 简 介

这本《大学物理学学习指导》是结合当前高等学校大学物理课程教学改革实际情况和多年教学经验,按照“高等工业院校物理课程教学基本要求”的精神编写的.根据大学物理课程的实际特点,全书分为16章,每章有基本要求、内容提要、解题指导与示例、自测题四个栏目.

本书可与《大学物理学》(复旦大学出版社,2006年版)配套使用,也可作为大学物理、普通物理学的教学或自学的辅导参考书.

序

物理学是研究物质的组成、性质、运动和相互作用,并以此阐明物质运动规律的科学.它是自然科学中最重要的基础学科之一.物理学的基本概念、方法和知识已被应用到所有的自然科学领域,因此,大学物理是一门不可替代的基础课.

大学生培养从应试教育向素质教育的转变,对大学物理课程提出了新的要求:在传授物理知识的同时,应特别注重向学生传授有关物理学的研究方法和思维方式,以提高学生的科学素质.

物理学内容广泛,难度不一.作为一名理工科大学学生,学习大学物理的时间和精力有限,要想在较短的时间内掌握尽可能多的物理知识,选择一本好的教材尤为重要.

这套教材将传统编写思路发扬光大,兼顾了科学发现的历史顺序和科学本身的逻辑关系.教材由浅入深地讲述了物理学基本概念,形象地描绘了物理模型,适当地介绍了物理学在其他学科和新技术领域的应用,特别是用普通物理的语言讲述了近代物理的内容,使得整套教材的可接受性突出;教材淡化了复杂的数学运算,突出了物理概念的重要性.全套教材的编写紧扣教学大纲,密切联系理工科专业大学物理教学的实际,富有创意和特色.教材选材合理,理论严谨,内容深入浅出,语言通俗易懂,很适合于初学者阅读.

参加本书编写的教师多年来一直从事大学物理教学工作,有着丰富的教学经验,对大学物理课程教学有深刻的认识.该套教材凝聚了编者多年的心血,是一本难得的好书.

本人有感于他们对物理教材建设和大学物理教育所作的努力和贡献,特为之序.



于复旦大学

引 言

编写一本既符合教学改革的精神,又适合目前我国高等教育实际的大学物理课程的教材,一直被高校的广大物理教师所关注,这是一项具有非常重要意义的工作.近一个世纪以来,由于物理学的发展及其与物理学紧密联系的新技术的出现和广泛应用,使得这项工作变得不容易,甚至比较复杂.许多从事物理教学工作的教师在这方面做了许多有益的尝试和探索,取得了一些成果和经验.我们编写的这套《大学物理学》,就是从物理课程教学改革的需要和教学实际情况出发所做的一种尝试和探索.

本套书根据“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的精神,借鉴国内、外关于教材建设与改革的经验,结合多年来我们的教学实践编写成的.它包括了工科大学物理课程指导委员会制定的教学基本要求的全部内容,同时,适度介绍了近代物理的知识以及新技术的物理基础.力图使这套书成为既满足各个层次大学物理课程教学及改革的实际需要,又符合高校实际情况,具备鲜明特色的好教材.本教材特点主要有以下几点:

1. 精选经典内容,构建教材新体系.力学部分,省略了高中阶段已经掌握的知识,如直线运动、抛体运动、物体碰撞,主要介绍运动学描述方法及运动定律、定理和守恒定律等,与中学阶段的力学体系既有联系,但又完全不同.同时,把相对论纳入力学部分,使之与经典的时空概念形成鲜明的对照,有助于学生理解掌握.

2. 力求内容现代化.教材中除讲述相对论和量子物理等近代物理内容外,还介绍了许多当前新技术中的基础物理原理,包括熵、全息、光纤通信、激光、超导、能带理论、纳米科学.在通篇教材中,加大了现代化内容的比重,使学生能接触到更多新的物理知识和概念,对提高学生学习的兴趣、培养学生的探索精神有益处.

3. 力求内容精炼、综合.抓住主要内容,去粗取精,突出物理学中的重要定理与定理,从物理学发展的过程和教学实际情况的两个方面组织教学内容,精选例题、习题,用基本的、通俗的方法讲述物理内容.力求既满足广大师生的教学需要,又能激发学生的学习兴趣和培养学生的创新能力.

4. 适度开“窗口”、重视科学素质培养. 在现代物理部分大胆地“渗透”一些科技前沿信息,并介绍了非线性物理的一些内容和概念.有些内容对学生学习可能有一定困难,但让学生尽早了解这些内容,有益于激发、培养学生的求知欲望和独立思考能力,提高学生的科学素质.

全套书由武汉理工大学汪晓元教授主编,参加讨论和编写的有赵明、陈德彝、廖红、邓伟明、雷杰、罗来龙、赵黎、黄学洪、杨应平、刘想宁、陈清明、张甫宽等.邓伟明编写质点运动学和原子核物理部分,刘想宁编写质点动力学,罗来龙编写角动量与刚体部分,廖红编写机械振动和机械波,陈德彝编写热学,赵黎编写静电学,雷杰编写相对论和稳恒电流,汪晓元编写稳恒磁场及磁介质,黄学洪编写电磁感应和电磁波,赵明编写光学,杨应平编写量子物理基础,陈清明编写量子物理基础的部分内容及工程新技术的物理基础.《大学物理学学习指导》的相关部分仍由以上教师负责分工编写.全套书由汪晓元负责统稿和定稿.在编写的过程中,参加编写的教师们付出了大量的辛勤劳动,同时得到了许多同行们很好的建议及出版社等方面的大力支持和帮助;复旦大学钱列加教授审查了本书并为本书作序.在此一并表示真诚的感谢.

由于编者水平有限,错误及不妥之处在所难免,请广大师生批评指正,以便今后逐步完善和提高.

编 者
2006年3月

目 录

第一篇 力 学

第 1 章 运动学	1
自测题一	12
第 2 章 运动定律与力学中的守恒定律	18
自测题二	42
自测题三	48
第 3 章 相对论	51
自测题四	60

第二篇 机械振动与机械波

第 4 章 机械振动	63
第 5 章 机械波	72
自测题五	82

第三篇 热 学

第 6 章 气体动理论	85
第 7 章 热力学基础	100
自测题六	114

第四篇 电 磁 学

第 8 章 静电场	119
自测题七	140
第 9 章 稳恒电流与稳恒电场	145
第 10 章 稳恒电流的磁场	151
自测题八	162
第 11 章 电磁感应	165

第 12 章 电磁场和电磁波	181
自测题九	185

第五篇 波动光学

第 13 章 光的干涉	190
第 14 章 光的衍射	198
第 15 章 光的偏振	205
自测题十	209
自测题十一	212

第六篇 量子物理基础

第 16 章 量子物理基础	215
自测题十二	225
自测题参考答案	227

第1章 运动学

基本要求

1. 理解描述运动的三个必要条件:参考系(以及坐标系);合理的物理模型(质点);运动的初始条件.
2. 熟练掌握用矢量描述运动的方法,即掌握位矢 r 、位移 Δr 、速度 v 、加速度 a 的概念及其在直角坐标系和自然坐标系中的表述方式;能熟练地计算质点做一维、二维运动时的运动学物理量.
3. 掌握用微积分的方法处理运动学中的两类问题.
4. 掌握质点做圆周运动的线量、角量描述.
5. 理解相对运动的有关概念和基本处理方法.

内容提要

一、运动学物理量:位矢 r 、位移 Δr 、速度 v 、加速度 a

1. 在直角坐标系中

$$r = xi + yj + zk$$

大小

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

方向

$$\alpha_i = \arctan \frac{i}{r} \quad i = x, y, z$$

$$\Delta r = \Delta xi + \Delta yj + \Delta zk$$

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

速率

$$v = |\boldsymbol{v}| = \left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dv_y}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dv_z}{dt}\boldsymbol{k}$$

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

2. 在自然坐标系中

$$\boldsymbol{v} = v\hat{\boldsymbol{\tau}} = \frac{ds}{dt}\hat{\boldsymbol{\tau}}$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{dv}{dt}\hat{\boldsymbol{\tau}} + \frac{v^2}{\rho}\hat{\boldsymbol{n}}$$

二、圆周运动的角量描述

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}(t)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}$$

线量与角量的关系

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{R}$$

$$a_t = R\beta$$

三、两类运动学问题

1. 第一类: 已知运动方程, 求速度、加速度. (导数运算)

几何法: 求(或比较) $x-t$ 图、 $v-t$ 图上曲线的斜率.

2. 第二类: 已知加速度函数及初始条件 \boldsymbol{r}_0 和 \boldsymbol{v}_0 , 求运动方程. (积分运算)

若 $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}(t)$, 即加速度为时间的函数

$$v_x = v_{0x} + \int_0^t a_x dt$$

$$x = x_0 + \int_0^t v_x dt$$

y, z 分量求法同上.

条件合适时可用几何法求解, 即求(或比较) $a-t$ 图、 $v-t$ 图上曲线与坐标轴围成的面积.

若 $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}(v)$, 以直线运动为例, 由于 $\boldsymbol{a}(v) = \frac{dv}{dt}$, 则

$$\int_{v_0}^v \frac{dv}{a(v)} = \int_0^t dt$$

解出 $v=v(t)$, 就可以求出运动方程

$$x = x_0 + \int_0^t v(t) dt$$

若 $a=a(x)$, 由恒等变换

$$a(x) = \frac{dv}{dt} = \frac{dv dx}{dx dt} = \frac{dv}{dx} v$$

$$\int_{x_0}^x a(x) dx = \int_{v_0}^v v dv$$

解出 $v=v(x)$, 再由 $v(x) = \frac{dx}{dt}$, 则

$$\int_{x_0}^x \frac{dx}{v(x)} = \int_0^t dt$$

就可以解出运动方程了.

四、相对运动的描述方法

1. 约定系统

在地面参考系中建立直角坐标系 $xOyz$, 在对地面以匀速 u 做直线运动的参考系中建立直角坐标系 $x'O'y'z'$. 取 x 和 x' 轴为沿做相对运动的直线, y 和 y' , z 和 z' 分别平行. 假定, $t=t'=0$ 时刻, O 与 O' 相重合. 以后我们称 O 所在的参考系为惯性系 S ; O' 所在的参考系为惯性系 S' . 这样设定的条件称为约定系统.

2. 伽利略变换

在远小于光速的条件下, 在约定系统中, 两个不同惯性系上的观察者对同一质点运动的描述可能不同(物理量不同), 这两套运动学物理量之间的转换关系称为伽利略变换, 其形式为

$$\mathbf{r} = \mathbf{u}t + \mathbf{r}'$$

速度变换(速度合成公式)

$$\mathbf{v} = \mathbf{u} + \mathbf{v}'$$

加速度变换

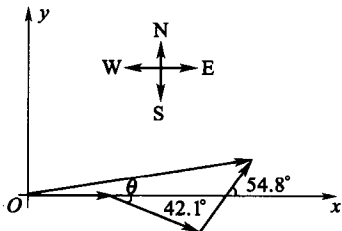
$$\mathbf{a} = \mathbf{a}'$$

投影式见教材式(1-38).

解题指导与示例

例 1-1 一艘巡逻艇离开港口, 并向正东航行了 231 km 的距离, 为躲避暴

风雨,它转向东偏南 42.1° 航行了 209 km ,然后又向东偏北 54.8° 航行了 262 km ,求合位移的大小和方向(忽略地球表面的弯曲,假定所有的位移都位于同一平面内).



例 1-1 图

解 作图、建坐标,将各段位移依次称为 Δr_i ($i=1,2,3$),并将其在图中各坐标轴上投影,计算出投影分量,即

$$\Delta x_1 = 231\text{ km}$$

$$\Delta y_1 = 0$$

$$\Delta x_2 = 209\cos(-42.1^\circ) = 155\text{ km}$$

$$\Delta y_2 = 209\sin(-42.1^\circ) = -140\text{ km}$$

$$\Delta x_3 = 262\cos 54.8^\circ = 151\text{ km}$$

$$\Delta y_3 = 262\sin 54.8^\circ = 214\text{ km}$$

注意 Δx_2 的角度用 -42.1° 表示,因为从 x 轴正向顺时针度量角度为负(依据右手螺旋法则).合位移 Δr 的两个分量分别为

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 = 537\text{ km}$$

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3 = 74\text{ km}$$

给出了两个分量,合位移就算得到了.但按照题目的要求,必须明确给出合位移的大小和方向

$$|\Delta r| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = 542\text{ km}$$

$$\theta = \arctan \frac{74}{537} = 7.8^\circ$$

例 1-2 假设一长雪橇沿一直的雪坡向上滑,速度减慢至瞬时停顿后又往回滑下斜坡,分析雪橇的运动得出其运动方程为

$$x = 18 + 12t - 1.2t^2 \text{ (SI)}.$$

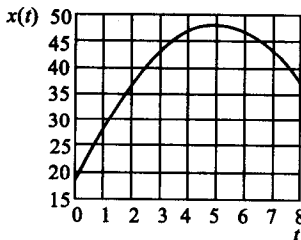
请画出雪橇运动的 $x-t$ 图;

求雪橇在 $1\sim 7\text{ s}$ 间的位移和路程;

求雪橇在 $1\sim 7\text{ s}$ 和 $1\sim 4\text{ s}$ 间的平均速度;

求雪橇速度随时间的函数关系;

求雪橇加速度随时间的函数关系.



例 1-2 图

解 由于运动有往返,找出折返时刻(由 $x-t$ 图可以看出)

令 $\frac{dx}{dt} = 0$ (x 极大点,或者说是速度为零的点)

得 $t=5\text{ s}$ (这结果也可以由 $x-t$ 图看出)
 则

$$\Delta x|_{1\sim 7\text{s}} = x(7) - x(1) = 14.4\text{ m}$$

$$s|_{1\sim 7\text{s}} = |x(5) - x(7)| + |x(5) - x(1)| = 24\text{ m}$$

平均速度

$$\bar{v}|_{1\sim 4\text{s}} = \frac{x(4) - x(1)}{4 - 1} = 6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\bar{v}|_{1\sim 7\text{s}} = \frac{x(7) - x(1)}{7 - 1} = 2.4\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

(可见在变速运动中,不同时段平均速度大小和方向都可能不一样)

雪橇的速度 $v = \frac{dx}{dt} = (12 - 2.4t)\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

雪橇的加速度 $a = \frac{dv}{dt} = 2.4\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (显然这是匀加速运动)

例 1-3 一质点沿半径为 R 的圆周运动,运动方程为 $s = bt - 0.5ct^2$, b, c 均为常数,且 $b > \sqrt{Rc}$,其切向加速度和法向加速度相等,所经历的最小时间是多少?

解 由于

$$v = \frac{ds}{dt} = b - ct$$

$$a_t = \frac{dv}{dt} = -c$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{(b - ct)^2}{R}$$

故当 $a_t = a_n$ 时,则

$$\frac{(b - ct)^2}{R} = |-c|$$

得

$$t_{\min} = \frac{b}{c} - \sqrt{\frac{R}{c}}$$

例 1-4 一做直线运动的质点,其加速度为 $a = -kv$ (k 为常数), $t=0$ 时, $x=0, v=v_0$. 当质点速度减为 v_0/n ($n > 1$) 时,求质点经过的距离与质点能够移动的总距离之比.

解 由题设,质点任一时刻的加速度为

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

分离变量,两边积分

$$\int_{v_0}^v \frac{dv}{v} = -k \int_0^t dt$$

得 $\ln \frac{v}{v_0} = -kt$

所以 $v = v_0 e^{-kt}$

再由 $v = \frac{dx}{dt} = v_0 e^{-kt}$

分离变量,两边积分

$$\int_0^x dx = \int_0^t v_0 e^{-kt} dt$$

得 $x = \frac{v_0}{k} (1 - e^{-kt}) = x_{\max} (1 - e^{-kt})$

式中, $x_{\max} = \frac{v_0}{k}$ 是 $t \rightarrow \infty$ 时的 x 值,即质点能够移动的总距离(物理上不可能有 $t \rightarrow \infty$,这是数学模型上的问题.实际上,用不了很长时间,质点就能达到静止状态.因此, $t \rightarrow \infty$ 在物理上理解为“时间足够长”).

设 t_1 时刻,质点的速度减为 $v_1 = v_0/n$

于是 $\frac{v_1}{v_0} = \frac{1}{n} = e^{-kt_1}$

取对数,得 $t_1 = \frac{\ln n}{k}$

相应经过的距离 x_1 与 x_{\max} 之比为

$$\frac{x_1}{x_{\max}} = 1 - e^{-\ln n} = 1 - \frac{1}{n}$$

另解 按原题的要求,只要找到 v 与 x 的关系就可以了,无需解出时间函数,这样一来解题过程可以简化.

由加速度的定义,利用恒等变换直接消去 t ,即

$$a = \frac{dv}{dt} = -kv = \frac{dv dx}{dx dt} = \frac{dv}{dx} v$$

$$-k dx = dv$$

两边积分

$$-k \int_0^x dx = \int_{v_0}^v dv$$

得 $x = \frac{v_0 - v}{k}$

当 $v=0$ 时, x 达到最大值 $x_{\max} = \frac{v_0}{k}$

所以当质点速度减为 $v_0/n (n>1)$ 时,得

$$\frac{x}{x_{\max}} = \frac{v_0 - v}{k} / \frac{v_0}{k} = 1 - \frac{1}{n}$$

可以推出,在任一时刻,该质点的位置与速度遵循以下规律

$$\frac{x}{x_{\max}} + \frac{v}{v_0} = 1$$

例 1-5 宽 L 的河流,流速与离岸的距离成正比,而两岸处的流速为零,河中心的流速为 v_0 . 一艘小船以恒定的相对速度 v_r 垂直于水流从一岸驶向另一岸. 在离岸 $L/4$ 处因故突然调头,以相对速度 $v_r/2$ 垂直于水流驶回本岸. 试求: (1) 小船的运动轨迹; (2) 小船返回后的靠岸点与原出发点之间的距离是多少? (较难的运动学综合题)

分析

(1) 为便于表述,建立直角坐标系.

(2) 根据题目给定的条件写出河流流速 u 的函数表达式,再写出已知的船相对水流的速度 v_r 的函数表达式,于是小船的绝对速度 $v = v_r + u$ 的表达式可得.

(3) 由 v 的两个坐标分量 $v_x = \frac{dx}{dt}$ 及 $v_y = \frac{dy}{dt}$ 的表达式消去 t , 即可得到能确定小船轨迹的微分方程,然后积分,得到轨迹方程.

(4) 用同样的方法,可得到小船返回本岸时的轨迹方程;全程轨迹得到后,位移自然可以给出.

解 取平面直角坐标,沿本岸水流方向为 x 轴, y 轴指向对岸,坐标原点设于出发点.

设流速

$$u = ky \mathbf{i} \quad (k \text{ 为比例系数})$$

由题意

$$y=0 \text{ 处 } u=0, \quad y=L/2 \text{ 处 } u=v_0$$

得

$$k = 2v_0/L$$

所以

$$u = \frac{2v_0}{L} y \mathbf{i} \quad \left(0 < y < \frac{L}{2}\right)$$

小船的相对速度

$$v_r = v_r \mathbf{j}$$

于是,小船的绝对速度

$$v = u + v_r = \frac{2v_0}{L} y \mathbf{i} + v_r \mathbf{j}$$

相应的坐标分量式为

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{2v_0}{L} y \\ v_y = \frac{dy}{dt} = v_r \end{cases}$$

消去 dt , 得
$$\frac{dx}{dy} = \frac{2v_0}{Lv_r} y$$

分离变量
$$dx = \frac{2v_0}{Lv_r} y dy$$

此即关于小船驶出阶段轨迹的微分方程. 两边积分

$$\int_0^x dx = \int_0^y \frac{2v_0}{Lv_r} y dy$$

得
$$x = \frac{v_0}{Lv_r} y^2$$

这是一条抛物线. 在离岸 $L/4$ 处, 小船的坐标为

$$\begin{cases} x = \frac{v_0}{Lv_r} \left(\frac{L}{4}\right)^2 = \frac{v_0 L}{16v_r} \\ y = \frac{L}{4} \end{cases}$$

返回本岸阶段
$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{u} + \frac{1}{2} \boldsymbol{v}_r = \frac{2v_0}{L} y \boldsymbol{i} - \frac{v_r}{2} \boldsymbol{j}$$

(注意第二项, 区别矢量和分量的符号表述. 为避免混淆, 这里转而采用大写符号, 以区别前段的运动)

则

$$\begin{cases} v_x = \frac{dX}{dt} = \frac{2v_0}{L} Y \\ v_y = \frac{dY}{dt} = -\frac{v_r}{2} \end{cases}$$

消去 dt , 得
$$\frac{dX}{dY} = -\frac{4v_0}{Lv_r} Y$$

分离变量
$$dX = -\frac{4v_0}{Lv_r} Y dY$$

此即小船返回本岸阶段轨迹的微分方程. 两边积分(从前段的终点开始)

$$\int_x^X dX = -\int_y^Y \frac{2v_0}{Lv_r} Y dY$$

得
$$X = -\frac{2v_0}{Lv_r} Y^2 + \frac{3v_0 L}{16v_r}$$

这仍然是一条抛物线. 回到本岸时, 小船的坐标为

$$\begin{cases} X = \frac{3v_0 L}{16v_r} \\ Y = 0 \end{cases}$$