

大学物理 (上册)

主 编 吴於人
于明章
刘云龙

21世纪网络版系列教材

同济大学出版社

21 世纪网络版系列教材

大学物理

上册

主编 吴於人 于明章 刘云龙
参编 赵跃英 刘钟毅 王治国

同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.上册/吴於人等主编. —上海:同济大学出版社,2003.1

(21 世纪网络版系列教材)

ISBN 7-5608-2530-3

I. 大… II. 吴… III. 物理学 - 高等学校 - 教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 093158 号

大学物理(上册)

主编 吴於人 于明章 刘云龙

责任编辑 孙一风 责任校对 徐 栩 封面设计 陈益平

出 版 行 同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏大丰印刷二厂印刷

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 17.5

字 数 350000

印 数 1—4000

版 次 2003 年 1 月第一版 2003 年 1 月第一次印刷

书 号 ISBN 7-5608-2530-3/O·222

定 价 23.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

《21 世纪网络版系列教材》编委会

主 任 李国强

副主任 薛喜民 张大也 周 箴 凌培亮

编 委 孙其明 肖蕴诗 周 俭 顾 牡

崔子钧 童学峰 郑惠强 徐鸣谦

吴泗宗 郭 超 周克荣

序

21 世纪,将是中华民族复兴的世纪。肩负着这一空前历史重任的人民,要求必须具有与之相适应的素质。这也将是新世纪对教育提出的新任务和新要求,也就是说,教育必须适应大众化和终身化的要求。所谓“大众化”,是指人们有着更多的机会接受教育,包括高等教育在内;所谓“终身化”,是指人生过程都伴随着接受教育的机会。

在某种意义上说,网络教育正是为适应教育大众化和教育终身化的要求而产生的。信息技术和网络技术的空前发展,为网络教育的实施提供了切实可行的手段和方式,也可以说,信息和网络技术催生了网络教育。它可不受人力、地域、场地和时空的限制。网络教育方式的出现,在提升教育使命、丰富教育理念、扩大教育规模、革新教育手段、优化教育资源和提高教育质量等方面起着重要的作用。

网络教育采用的是借助现代信息技术的一种全新的教学形式,这就为网络教育的教材编写工作提出了新的要求。它更需要以其视听性、自学性、选择性、层次性、灵活性的特点去满足读者的需要,让每一个学习者都可以寻求到适应自己层次的知识。我高兴地看到,参加这套网络系列教材编写工作的教师,都具有深厚的专业学识、丰富的教学经验,以及对现代教育技术的理解,这是整套教材的质量水平的可靠保证。

我期望,这套教材的出版,将会有助于推动教育大众化和教育终身化的进程,有利于促进网络教学的发展,有助于满足人们日益追求知识的愿望,有助于创造一个学习型社会的氛围,为中华民族的复兴作一点贡献。

吴峰迪

2002 年 8 月 8 日写于同济园

前 言

网络教育是信息社会的产物。利用现代信息技术,网络大学为千千万万的人圆了大学梦。网络教育事业的发展前景极为广阔。

然而,作为新生事物,在教育观念、教育体制、教育技术、教材等方面还有许许多多的课题有待研究,任重而道远。就拿大学物理课程来说吧,市面上相应的教材很多,其中不乏优秀教材,但是专为网络大学的学生编写的教材很少。结合目前我国网络教育的特点,我们编写了这套适用于工科大学生使用的大学物理教材——《大学物理》,以期填补空白,抛砖引玉。

编写本书的宗旨是希望学生掌握物理学的基本概念、基本知识、基本规律和基本方法,了解当代物理学发展的概况,了解当代高新技术发展的物理基础,使工科学生在学习物理的同时提升科学素养。所以在本教材中,我们注重了以下几个方面:

一、兼顾不同基础的学生

网络教学面对的对象,学习基础差距大。本教材为了使基础不同的学生均能顺利学习,适当降低了内容论述的起点,但所有内容最终均达到现行大纲的基本要求,有些地方甚至超出大纲,补充了一些物理新成果。

书中页面分两栏,分别为正文栏与提示拓展栏。对正文中的一些重点难点,提示拓展栏中会有相应的图文进行说明与归纳,或者提出问题引导学生思索。同时,提示栏也会有一些与正文相关的拓展内容,供阅读。拓展内容不是考试内容,所以写得比较简单。对拓展内容感兴趣的同学可以通过网络和图书馆查阅相关资料,在学习物理的同时学习信息的查寻与处理,非常有益。

二、适合自学者使用

本教材风格的设计上努力与自学者进行心理对接,每章前面有导学、后面有小结,正文旁有提示,使学习可以更为轻松有效。

为了远程学习者作业递交及复习的方便,另配有活页作业《大学物理习题册》配套出版。

本教材内容的表现力求基本概念、基本规律突出,物理图像描述清晰、准确。整套教材强调好学、易懂、有趣、难忘。

三、注重能力与情操的培养

整套教材内容的编排与取舍既保持传统教材中循序渐进、注重逻辑、易教易学的合理原则,又注意适当穿插知识的跳跃,使学生逻辑思维、发散思维同时得到训练,从而提高创新能力。物理学家、物理成果的图文点缀在教材之中,希望读者能感受科学规律获得的艰辛,体会科学、科学家的伟大,从而进一步培养科学的情操。

在同济大学网络学院与同济大学出版社的帮助与支持下,同济大学物理系教师赵跃英(第1至3章)、刘云龙(第4章)、刘钟毅(第5章)于明章(第6、7章)、王治国(第8、9、15、16章)、李文蔚(第10、11章)、刘海兰(第12、13章)、倪忠强(第14章)吴於人(第17章)共同编写了此书。全书由吴於人、于明章、刘云龙主编。严导淦、刘云龙、章南陵、吕美安、沈旆先生对本书进行了审核。

由于教学急需,本书的编写与出版较为仓促,加上编者水平有限,书中的缺憾之处肯定不少。我们想,本书出版之日,便应是下一版着手修改之时,恳请读者及时批评指正,不胜感激。

编者

2002.10

目 录

前言

第一章 质点运动学	(1)
导读	(1)
第一节 几个基本概念	(3)
第二节 描述质点运动的物理量	(4)
第三节 几种常见的运动	(7)
第四节 相对运动	(19)
小结	(21)
第二章 质点动力学	(24)
导读	(24)
第一节 力	(25)
第二节 牛顿运动定律	(29)
第三节 牛顿运动定律应用	(32)
小结	(36)
第三章 机械能守恒定律 动量守恒定律	(40)
导读	(40)
第一节 功和功率	(41)
第二节 动能和动能定理	(45)
第三节 保守力的功和势能	(47)
第四节 功能原理和机械能守恒定律	(52)
第五节 动量定理	(57)
第六节 动量守恒定律及其应用	(60)
小结	(64)

第四章 刚体的定轴转动	(68)
导读	(68)
第一节 刚体运动概述	(69)
第二节 刚体定轴转动定律	(73)
第三节 角动量 角动量守恒定律	(81)
第四节 力矩的功 刚体绕定轴转动的动能定理	(87)
第五节 旋进 回转效应	(92)
小结	(95)
第五章 狭义相对论简介	(98)
导读	(98)
第一节 力学相对性原理和伽利略变换	(100)
第二节 狭义相对论基本原理	(104)
第三节 时空的相对性	(105)
第四节 洛伦兹变换与间隔不变性	(112)
第五节 相对论动力学	(119)
小结	(126)
第六章 振动学基础	(129)
导读	(129)
第一节 简谐振动的描述	(130)
第二节 简谐振动的动力学特征	(137)
第三节 简谐振动的合成	(146)
第四节 阻尼振动	(153)
第五节 受迫振动共振	(155)
小结	(157)
第七章 波动学基础	(160)
导读	(160)
第一节 机械波的产生和传播	(161)
第二节 平面简谐波的波函数	(164)
第三节 波动方程与波速	(173)

目 录

第四节 波的能量	(177)
第五节 惠更斯原理	(182)
第六节 波的叠加原理 波的干涉	(185)
第七节 驻波	(189)
第八节 多普勒效应	(194)
小结	(198)
第八章 气体分子动理论	(200)
导读	(200)
第一节 平衡态 理想气体状态方程	(202)
第二节 气体的压强和温度	(207)
第三节 能量均分定理 理想气体的内能	(213)
第四节 麦克斯韦速率分布律	(218)
第五节 玻耳兹曼分布律 重力场中粒子按高度的分布	(222)
第六节 分子的平均碰撞次数和平均自由程	(225)
第七节 真实气体 范德瓦耳斯方程	(228)
小结	(232)
第九章 热力学基础	(235)
导读	(235)
第一节 热力学第一定律	(236)
第二节 热力学第一定律的应用	(239)
第三节 循环过程 卡诺循环	(247)
第四节 热力学第二定律	(251)
第五节 可逆过程和不可逆过程 卡诺定律	(253)
第六节 熵 熵增加原理	(256)
第七节 热力学第二定律的统计意义	(263)
小结	(266)

第一章 质点运动学

导读

力学是物理学发展的起点,也是现代科学技术的基石,如能量、动量的概念及相关规律对宇宙学的研究、基本粒子的研究,对生物、化学等学科的建立,对机械、电子等技术的发展,均为基本且至关重要。

学习力学,首先要掌握机械运动的描述。

机械运动是一个物体相对另一个物体的位置(或者一个物体的某些部分相对于其他部分的位置)随时间而变化的过程。本章主要研究如何描述物体机械运动的状态和运动状态的改变。

一、本章的特点

1. 首先将研究对象抽象为质点,然后,引入描述质点运动的物理量——位置、位移、速度和加速度及其与运动方程的关系。
2. 介绍几种简单的质点运动:直线运动、抛体运动以及圆周运动等,希望通过对典型运动的理解更好地掌握一般运动的描述。
3. 本章的概念、原理、定律等,在中学已有讲述,这里用微积分、矢量代数和微分方程等高等数学工具进行表述,从一般曲线运动出发,更深入地理解和掌握这些概念、原理和定律。

二、本章的要求

1. 了解物理学研究的对象和方法。理解参考系、质点等概念及运动描述的相对性。
2. 正确掌握描述质点运动的基本物理量位矢、位移、速度、加速度等概念,特别要弄清其矢量性、瞬时性和相对性。
3. 掌握运动学的两类问题。学会由质点运动方程求运动

速度和加速度以及由速度、加速度求质点运动方程的方法。

4. 掌握圆周运动中的法向加速度、切向加速度及角速度、角加速度等概念,并能根据给定的圆周运动的运动方程,求得 a_r, a_n, ω, α 等物理量。

5. 理解掌握相对运动物体之间的位移及速度的相互关系。

三、本章的学习方法

1. 注意概念的理解与总结。总结时注意类似概念的对比,比如速度与角速度、加速度与角加速度等。

2. 注意矢量的正确书写与计算。

① 书中表示物理量的字母为粗体字的,表明该量为矢量,而非粗体字表示的量为标量。如 $\mathbf{v}$ 表示速度,是矢量,有大小,也有方向;而 v 表示速率,是标量,只有大小,没有方向。在做笔记和作业时矢量上面要写箭头,如 $\mathbf{v}$ 写成 $\vec{v}$ 。

② 书写矢量式时要注意,矢量=矢量,比如计算的结果沿 x 方向的加速度是 $5\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,写成 $\vec{a} = 5\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 就不对了,因为矢量 $\neq$ 标量,可以写成 $\vec{a} = 5\hat{i}\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,其中, $\hat{i}$ 表示 x 方向上的单位矢量。

3. 解决运动学的问题,有时要用微分运算,有时要用积分运算,通过研究例题与自己做题,找出解决这类问题的规律。这是大学物理中的第一个难点。

问题

这么大的地球也能看成为质点吗?

有时候可以,有时候不可以。

请举例说明。

本章讨论的内容是描述物体的运动。我们首先建立一个理想的模型——质点以及时空的概念,然后,在引入描述物体运动的几个基本的物理量——位置矢量、位移、速度和加速度的同时,给出时间与空间的相互关系——运动方程。接着着重研究几类基本运动——直线运动、圆周运动以及抛体运动。最后,简单介绍关于相对运动的问题。

第一节 几个基本概念

一、质点

要准确描述物体的运动并不是一件容易的事情,影响物体运动的因素有许多,其中物体本身的质量、大小和形状是重要因素。但是,在某些情况下,可以将问题简化而把物体看成为一个没有大小和形状但具有物体全部质量的一个点,称为质点。

在实际问题中,一个物体是否可以当作一个质点,不是根据它的绝对大小,而是看它的大小和形状在所研究的问题中是否可以忽略。

若在所研究的问题中,物体大小和形状及其变化不能忽略时,原则上总可以把物体看作是由若干质点组成的系统。因此,弄清质点的运动规律,就为进一步解决整个物体的运动问题奠定了基础。

二、时间与时刻

时间是指从过去到未来的无限流逝过程。对于时间,可以用一条有向直线来表示,称为时间轴。时间轴上每一个点表示一个时刻。在时间轴上先后两时刻的间隔表示某一事件经历的时间,称为时间间隔。

三、参考系和坐标系

物体的运动是绝对的,而物体运动的描述是相对的,因此,在描述一个物体的运动时,就要选择另一个或几个物体作为标准,然后研究这个物体相对于标准物体是如何运动的。被选作标准的物体叫做参考系。原则上参考系的选取是任意的,但同一物体的运动,在不同参考系中的描述是不同的。

为了从数量上确定物体相对于参考系的位置,需要在参考系上选用一个固定的坐标系。本书主要采用直角坐标。

质点是一个简化后的物理模型。在以后的学习中你会逐步体会到,建立合理的物理模型,对解决实际问题至关重要。

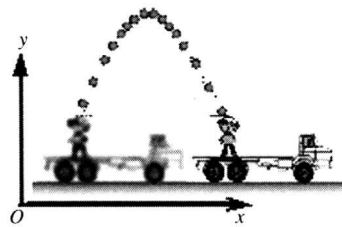


图 1.1 以地面为参考系观察
运动车上的抛体

在作匀速直线运动的车厢中,向上抛一个物体。以车厢为参考系,物体仍沿直线下落至原处;图示若以地面为参考系,则质点向前作抛体运动。

第二节 描述质点运动的物理量

一、位置矢量和位移

若质点作平面运动,某时刻位于 P 点,在所选取的参考系中建立坐标系 Oxy ,则 P 点的位置可用坐标 (x, y) 表示。质点在 P 点的位置也可由 O 点指向 P 点的一根有向线段 r 表示, r 称为位置矢量(简称位矢),如图 1.2 所示。它同时给出了质点对原点的方位和距离,它与两个坐标轴上的分量关系为

$$r = xi + yj + zk$$

$$r = xi + yj \quad (1-1)$$

其大小为

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

方向为

$$\cos \theta = \frac{x}{r} \quad (1-2)$$

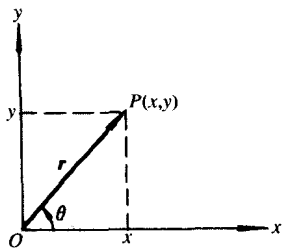


图 1.2 质点的位置矢量

质点的运动可用位矢表述,位矢 r 是时间 t 的函数,即

$$r = r(t) = x(t)i + y(t)j \quad (1-3)$$

或

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \end{cases} \quad (1-4)$$

式(1-3)称为质点的运动方程的矢量式。式(1-4)称为质点的运动方程的分量式。在式(1-4)中消去时间 t , 则 y 是 x 的函数,即 $y = f(x)$,称为质点运动的轨道方程,或称为轨迹方程。

在时刻 t_1 ,质点位于 A 点,位矢为 r_A ,经过一段时间后,在时刻 t_2 ,质点运动到 B 点,位矢为 r_B 。在 Δt 时间

第一章 质点运动学

内,运动质点的位置变化可用由 A 指向 B 的有向线段 $\Delta \mathbf{r}$ 表示,如图 1.3 所示, $\Delta \mathbf{r}$ 称为位移矢量,简称位移。即

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} \quad (1-5)$$

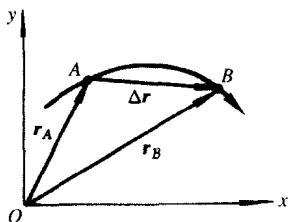


图 1.3 质点在平面中的位移

位移的大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

其方向从 A 指向 B。

二、平均速度矢量和速度矢量

速度是描述质点运动快慢和运动方向的物理量。

当质点在 t 到 $t + \Delta t$ 时间间隔内,完成了位移 $\Delta \mathbf{r}$ 时,为了表示运动在这段时间内的快慢和方向,我们把质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与相应的时间间隔 Δt 的比值,叫做质点在这段时间内的平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$:

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-6)$$

其方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同。

质点的运动路程 Δs 与相应的时间 Δt 的比值,叫做质点在这段时间内的平均速率 $\bar{v}$:

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-7)$$

当时间 Δt 无限地减小而趋近于零时,平均速度的极限称为 t 时刻的瞬时速度(简称速度),即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-8)$$

在直角坐标系中

必须注意,位移表示质点位置的改变,在图 1.3 中,可用从 A 指向 B 的有向线段,即矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 表示;而质点所经历的路程 Δs 是 A 与 B 之间的弧长,是标量。

问题

$\Delta \mathbf{r}$, Δr , $|\Delta \mathbf{r}|$ 的区别在哪里?

思考题

某人从 A 点出发,跑一圈后又回到 A 点,旁观者的结论对吗?

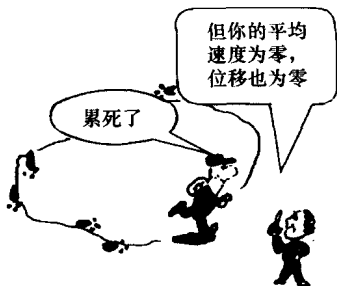


图 1.4 位移和平均速度示例

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j}$$

速度 $\mathbf{v}$ 是矢量, 大小为

注意: 速率等于速度的大小:

$$v = |\mathbf{v}|$$

$$|\mathbf{v}| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}$$

但是一般平均速率不等于平均速度的大小:

$$\bar{v} \neq |\bar{\mathbf{v}}|$$

$$\vartheta = \arctan \frac{v_y}{v_x} \quad (1-9)$$

式中, ϑ 为速度 $\mathbf{v}$ 与 x 轴之间的夹角。

问题

什么时候平均速率等于平均速度的大小?

瞬时速度是质点位矢 $\mathbf{r}$ 的瞬时变化率, 它的方向就是当 Δt 趋近于零时位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向, 即质点所在点的切线方向并指向质点前进的方向。

同样, 可以定义瞬时速率(简称速率) v 为

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-10)$$

瞬时速率等于瞬时速度的大小。

三、平均加速度和加速度矢量

加速度是描述质点速度变化率的物理量。质点在时间 Δt 内, 速度由 $\mathbf{v}_1$ 变为 $\mathbf{v}_2$, 可定义这段时间内的平均加速度 $\bar{\mathbf{a}}$ 为

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-11)$$

问题

为什么质点作曲线运动时, 加速度总是指向曲线凹的一边?

平均加速度的方向与速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的方向相同。

当 Δt 趋近于零时, 平均加速度的极限称为瞬时加速度(简称加速度), 即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-12)$$

应该注意: $\Delta \mathbf{v}$ 的方向和它的极限方向一般不同于速度 $\mathbf{v}$ 的方向, 因而加速度的方向一般与该时刻的速度方向不一致。

加速度 $\mathbf{a}$ 是矢量, 在直角坐标系中

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} = \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} = \frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \mathbf{j} \quad (1-13)$$

$$\text{其大小: } |a| = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2} \quad (1-14)$$

方向为速度变化的极限方向。

第三节 几种常见的运动

下面,我们来研究几种常见的运动——直线运动、圆周运动和抛体运动。

一、直线运动

质点相对于所取参考系作直线运动时,我们只须取一条与该直线轨迹相重合的坐标轴 x , 并选定适当的参考点为坐标原点 O 和规定坐标正方向。由于描述直线运动的物理量的方向,均在这条直线上,可以用正、负表示,也就是说,在直线运动中可用标量计算。

1. 直线运动的计算

在质点直线运动中涉及下述两类问题。

(1) 已知运动方程 $x = x(t)$, 求速度 v 和加速度 a 。

这类问题一般用微分的方法解决。

由速度和加速度的定义知, t 时刻质点的速度为

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (1-15)$$

t 时刻质点的加速度为

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (1-16)$$

值得注意,在直线运动中,若加速度 a 与速度 v 同号,两者方向一致,质点作加速运动;反之,若加速度 a 与速度 v 异号,两者方向相反,质点作减速运动。

(2) 已知质点加速度为 $a = a(t)$, 运动的初始条件为: $t = t_0$ 时 $v = v_0$, $x = x_0$, 求其速度 v 和运动方程。

由于 $a(t) = \frac{dv}{dt}$, 因此有

问题

正的加速度一定表示质点是作加速运动, 负的加速度一定表示质点是作减速运动吗? 举例说明。

这类问题一般用积分的方法解决。