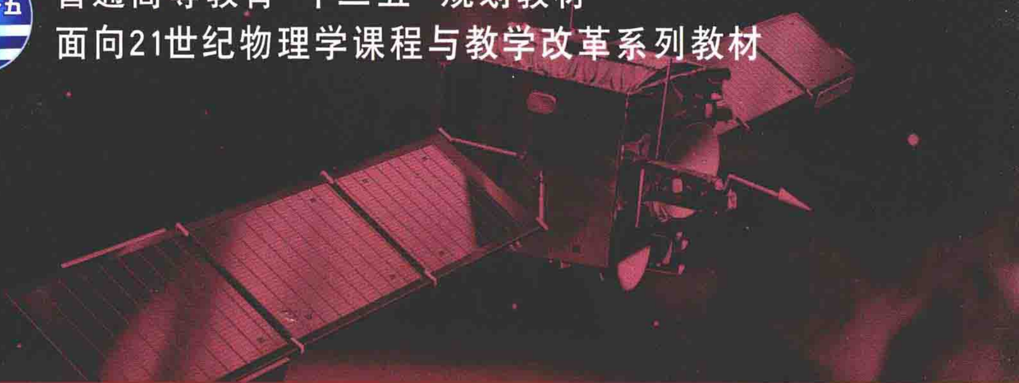
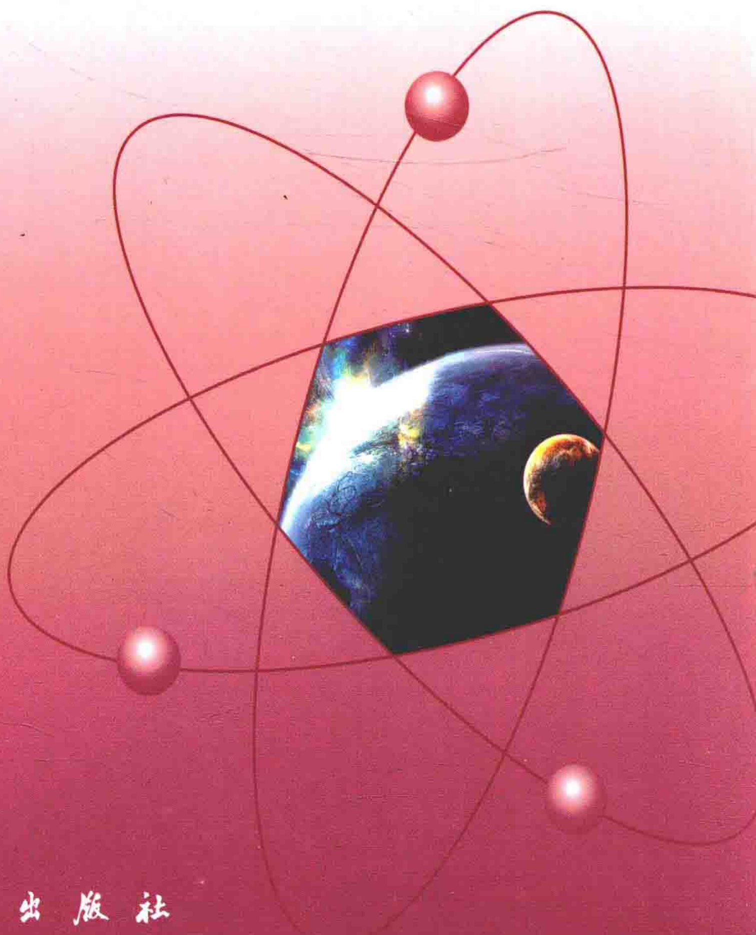
普通高等教育“十二五”规划教材

面向21世纪物理学课程与教学改革系列教材



大学物理（下册）

马为川　罗春霞　主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
面向21世纪物理学课程与教学改革系列教材

大学物理（下册）

马为川　罗春霞　主编

科学出版社
北京

内容简介

本书是根据教育部非物理专业物理基础课程教学指导委员会最新制定的《理工科非物理专业大学物理课程教学基本要求（讨论稿）》编写而成的. 书中包括了基本要求中的所有核心内容，可供不同专业选用.

全书分为上、下两册. 上册包括力学和电磁学，下册包括振动、波动、光学、气体动理论、热力学基础、狭义相对论和量子物理简介等. 和本书相配套的还有《大学物理学习指导与习题解答》.

本书可作为高等学校理工科非物理专业的教材，也可供文科及专科的相关专业选用及物理爱好者阅读.

图书在版编目（CIP）数据

大学物理. 下册/马为川，罗春霞主编. —北京：科学出版社，2015. 1

普通高等教育"十二五"规划教材　面向21世纪物理学课程与教学改革系列教材

ISBN 978-7-03-042700-7

Ⅰ. ①大…　Ⅱ. ①马…　②罗…　Ⅲ. ①物理学－高等学校－教材　Ⅳ. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 287107 号

责任编辑：吉正霞/责任校对：肖　婷

责任印制：高　嵘/封面设计：苏　波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行　各地新华书店经销

*

开本：B5（720×1000）

2015年1月第　一　版　印张：13

2015年1月第一次印刷　字数：260 000

定价：30.50元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前　言

本书是根据教育部最新发布的《非物理类理工学科大学物理教学基本要求》，借鉴众多优秀大学物理教材，结合多年教学改革与实践经验编写而成.

物理学是一门以实验为基础的自然学科，是高等学校理工科各专业学生重要的通识教育必修课. 大学物理所教授的基本理论和基础方法是学生科学素养的重要组成部分，是科学研究工作者和工程技术人员所必备的基本技能和知识，同时，大学物理课程在培养学生科学的世界观和方法论，增强学生分析问题和解决问题的能力，培养学生的探索精神和创新意识等方面，具有其他课程不能替代的重要作用.

在教育部的指导和支持下，许多高校正在转型发展，培养应用型人才，转型发展的结果必然是大学物理这类基础理论课的学时减少. 如何适应少学时下的大学物理教学，本书做了一些尝试，力求每章理论部分用简单明了的语言论述，准确把握物理概念、物理模型、物理思想，同时加强物理方法，特别是数学方法（微分法）在物理学中的应用. 本教材特别适用于少数教学如 96 学时、80 学时使用，既适用于本科也适用于专科.

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免存在不妥和错误，敬请读者和同仁批评指正.

编　者

2014 年 10 月 25 日于武汉

目　　录

第九章　振　　动

振动是自然科学和社会科学中的一种运动形式，例如，行星的运动，血液的循环，还有社会科学中的生态循环、消费指数的振荡等，这些运动共同的特点就是具有周期性，所谓周期性运动是指在时间上具有重复性或往复性的运动. 在日常的生活中，也有很多的振动，例如，心脏的跳动、钟摆的摆动、活塞的往复运动等，这些运动具有自身的特点，我们称之为机械振动.

第一节　简谐振动　振幅　周期和频率　相位

简谐振动是一种最简单、最基本的振动，任何复杂的振动都可以由简谐振动合成. 因此，学习简谐振动的规律十分必要.

一、简谐振动

物体振动时，决定其位置的坐标是时间的正弦（或余弦）函数的运动，称为简谐振动. 简谐振动是一种最简单、最基本的振动. 下面以弹簧振子为例，研究简谐运动的基本规律.

如图 9-1-1 所示，把轻弹簧（质量忽略不计）的左端固定，右端连一质量为 m 的物体，放置在光滑的水平面上，物体所受阻力忽略不计. 当物体在位置 O 时，弹簧具有自然长度，此时物体在水平方向所受的合外力为零，位置 O 叫做平衡位置. 取平衡位置 O 为坐标原点，水平向右 Ox 为正方向，现将物体向右移动到位置 A，然后放开，由于弹簧伸长而出现指向平衡位置的弹性力，在弹性力作用下，物体向左运动，当通过位置 O 时，作用在 m 上弹性力等于 0，但是由于惯性作用，m 将继续向 O 点左边运动，使弹簧压缩. 此时，由于弹簧被压缩，而出现了指向平衡位置的弹性力并将阻止物体向左运动，使 m 速率减小，直至物体静止于 B（瞬时静止），之后物体在弹性力作用下改变方向，向右运动. 这样在弹性力作用下物体左右往复运动，即为机械振动.

由胡克定律可知，物体所受的弹性力 F 与物体相对于平衡位置的位移 x 成正

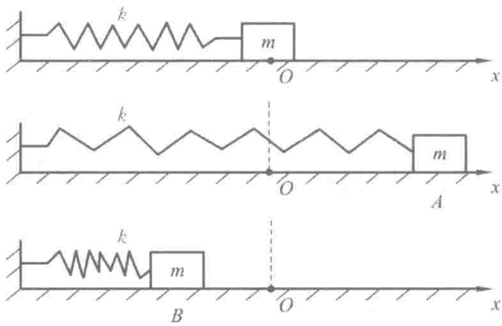


图 9-1-1

比,弹性力的方向与位移的方向相反,始终指向平衡位置,此力称为回复力. 于是 $F=-kx$,其中 k 为弹簧的劲度系数,"$-$"表示力与位移的方向相反. 由牛顿第二运动定律,物体的加速度为

$$a=\frac{F}{m}=-\frac{kx}{m} \tag{9-1-1}$$

又

$$a=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$$

所以

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+\frac{k}{m}x=0$$

令

$$\frac{k}{m}=\omega^2$$

上式可以写成

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2x=0 \tag{9-1-2}$$

式(9-1-2)是标准的简谐振动物体的微分方程. 它是一个常系数的齐次二阶的线性微分方程,它的解为

$$x=A\cos(\omega t+\varphi) \tag{9-1-3}$$

或

$$x=A\sin(\omega t+\varphi') \tag{9-1-4}$$

其中,$\varphi'=\varphi+\frac{\pi}{2}$.

式(9-1-3)、(9-1-4)是简谐振动的运动方程. 因此,我们也可以说位移是时间 t 的正弦或余弦函数的运动都是简谐运动,本书中用余弦形式表示简谐运动方程.

将式(9-1-3)对时间求一阶、二阶导数,可得到简谐运动物体的速度 v 与加速度 a 为

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-\omega A\sin(\omega t+\varphi) \tag{9-1-5}$$

$$a=\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega^2 A\cos(\omega t+\varphi) \tag{9-1-6}$$

可知 $$v_{max}=\omega A,\quad a_{max}=\omega^2 A$$

由式(9-1-3)、(9-1-5)、(9-1-6),可以作出如图 9-1-2 所示的 x-t 、v-t 和 a-t 图.

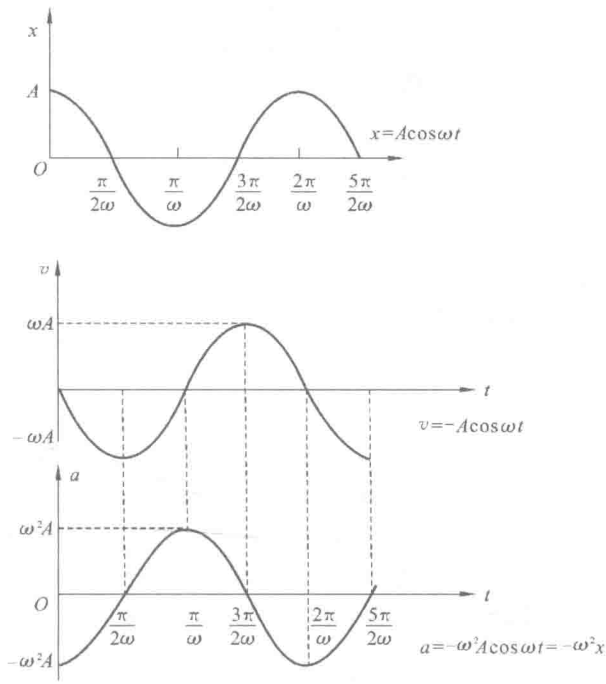


图 9-1-2

由图可见,做简谐运动的物体的位移、速度、加速度均为周期性变化,运动的周期性为简谐振动的基本特性.

二、描述简谐振动的物理量

1. 振幅

由简谐运动方程 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$ 可知,位移 x 的绝对值最大为 A. 做简谐振动的物体离开平衡位置最大位移的绝对值,称为振幅,记为 A,A 反映了振动的强弱.

2. 周期和频率

物体做一次完全振动所经历的时间叫做振动的周期,用 T 表示;在单位时间内物体所做的完全振动次数叫做频率,用 ν 表示;ω 表示在 2π 秒内物体所做的完

全振动次数,ω 称为角频率(或圆频率). 一般选取周期的单位为秒,频率的单位为赫兹,符号为 Hz,圆频率的单位为弧度·秒$^{-1}$,符号为 rad·s^{-1}. 其中,$\omega=\dfrac{2\pi}{T}$.

对于弹簧振子

$$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$$

所以弹簧振子的周期和频率分别为

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{9-1-7}$$

$$\nu=\frac{\omega}{2\pi}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{9-1-8}$$

由于弹簧振子的角频率 ω 取决于 m 和 k,所以 T、ν 完全由弹簧振子本身的性质所决定,与其他因素无关. 因此,这种周期和频率又称为固有周期和固有频率.

3. 相位和初相

由运动方程的位移和速度关系 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$,$v=-\omega A\sin(\omega t+\varphi)$可知,物体在某一时刻的运动状态由位置坐标和速度来决定,振动中,当 A、ω 给定后,物体的位置和速度取决于$(\omega t+\varphi)$,$(\omega t+\varphi)$称为相位(或位相).

由上可见,相位是决定振动物体运动状态的物理量. φ 是 $t=0$ 时的相位,称为初相位,简称初相,它决定了初始时刻振动物体的运动状态.

4. A、φ 的确定

对于给定的系统,ω 已知,振幅 A 和初相 φ 取决于振动开始时物体的位移值 x_0 和速度值 v_0,x_0 和 v_0 叫做初始条件.

初始条件 $t=0$ 时,$x=x_0$,$v=v_0$ 代入式(9-1-3)和(9-1-5)得

$$x_0=A\cos\varphi,\quad v_0=-\omega A\sin\varphi$$

由上面两式联立得

$$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}} \tag{9-1-9}$$

$$\varphi=\arctan\frac{-v_0}{\omega x_0} \tag{9-1-10}$$

由于振幅为正,所以式(9-1-9)中的开方取正号. 一般在 $0\sim2\pi$ 之间,有两个 φ 值的正切函数相同,由式(9-1-10)得出两个 φ 值,但两个中只有一个是正确的解,此解必须同时满足式(9-1-9)和式(9-1-10).

例 9-1-1 一弹簧振子在光滑水平面上,已知 $k=1.60\ \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$,$m=0.40\ \text{kg}$,试根据下列两种情况求出物体的振动方程.

(1) 将物体从平衡位置向右移到 $x_0=0.10\ \text{m}$ 处由静止释放并开始计时；

(2) 在 $x_0=0.10\ \text{m}$ 处并给物体一个向左的初速度 $v_0=0.20\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

解 (1) m 的运动方程为

$$x=A\cos(\omega t+\varphi)$$

由题意知

$$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}=\sqrt{\frac{1.60}{0.40}}=2\ (\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$$

初始条件 $t=0$ 时，$x_0=0.10\ \text{m}$，$v_0=0$，代入得

$$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}}=\sqrt{0.10^2+0}=0.10\ (\text{m})$$

$$\varphi=\arctan\frac{-v_0}{\omega x_0}=\arctan 0$$

因为 $x_0>0$，$v_0=0$，所以 $\varphi=0°$，得

$$x=0.10\cos(2t)\ \text{m}$$

(2) 初始条件 $t=0$ 时，$x_0=0.10\ \text{m}$，$v_0=-0.20\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$，代入得

$$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}}=\sqrt{0.10^2+\frac{(-0.20)^2}{2^2}}=0.1\sqrt{2}\ (\text{m})$$

$$\varphi=\arctan\frac{-v_0}{\omega x_0}=\arctan\left(-\frac{-0.20}{2\times 0.10}\right)=\arctan 1$$

因为 $x_0>0$，$v_0<0$，所以 $\varphi=\frac{\pi}{4}$，得

$$x=0.1\sqrt{2}\cos\left(2t+\frac{\pi}{4}\right)\ \text{m}$$

可见，对于给定的系统，若初始条件不同，则振幅和初相就有相应的改变.

第二节 旋转矢量

为了更直观更方便地研究简谐振动，我们引进旋转矢量的图示法. 通过这种方法，可以形象地理解简谐振动的各个物理量.

一、旋转矢量

如图 9-2-1 所示，自 Ox 轴的原点 O 作一矢量 $\boldsymbol{A}$，其模为简谐振动的振幅 A，并使 $\boldsymbol{A}$ 在图面内绕 O 点逆时针转动，角速度大小为谐振动角频率 ω，矢量 $\boldsymbol{A}$ 称为旋转矢量.

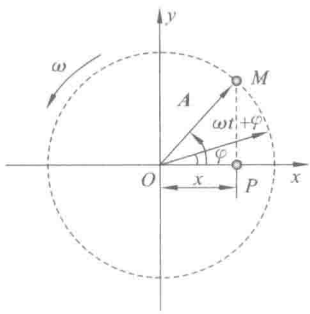


图 9-2-1

二、简谐振动的旋转矢量表示法

在图 9-2-1 中,旋转矢量 $\boldsymbol{A}$ 的矢端 M 在 x 轴上的投影点可表示为 x 轴上的简谐振动,振幅为 A,旋转矢量 $\boldsymbol{A}$ 以角速度 ω 旋转一周,相当于简谐振动物体在 x 轴上做一次完全振动,即旋转矢量旋转一周,所用时间与简谐振动的周期相同. $t=0$ 时刻,旋转矢量与 x 轴夹角 φ 为简谐振动的初相,t 时刻旋转矢量与 x 轴夹角$(\omega t+\varphi)$为 t 时刻简谐振动的相位,这时矢量 $\boldsymbol{A}$ 的末端在 x 轴上的投影点 P 的位移为 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$. 由此可见,旋转矢量 $\boldsymbol{A}$ 绕 O 点转动时,其端点 M 在 x 轴上的投影点 P 的运动是简谐振动. 在矢量 $\boldsymbol{A}$ 的转动过程中,M 点做圆周运动. 矢量 $\boldsymbol{A}$ 旋转一周所需要的时间等于相应的简谐振动的周期. 图 9-2-2 显示了旋转矢量与简谐振动 x-t 曲线的对应关系.

旋转矢量是研究简谐振动的一种直观、简便方法. 但是必须注意,旋转矢量本身并不在做简谐振动,而是它矢端在 x 轴上的投影点在 x 轴上做简谐振动.

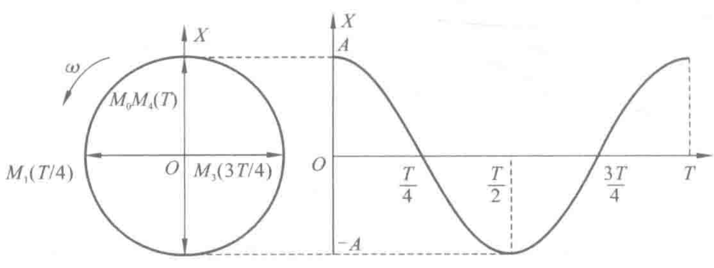


图 9-2-2

三、旋转矢量法应用举例

例 9-2-2 一物体沿 x 轴做简谐振动,振幅为 0.12 m,周期为 2 s. $t=0$ 时,位移为 0.06 m,且向 x 轴正向运动.

(1) 求物体振动方程;

(2) 设 t_1 时刻为物体第一次运动到 $x=-0.06$ m 处,试求物体从 t_1 时刻运动到平衡位置所用最短时间.

解 (1) 设物体谐振动方程为

$$x=A\cos(\omega t+\varphi)$$

由题意知

$$A=0.12\ \mathrm{m},\quad \omega=\frac{2\pi}{T}=\frac{2\pi}{2}=\pi\ (\mathrm{rad}\cdot\mathrm{s}^{-1})$$

方法一　用数学公式求 φ

$$x_0=A\cos\varphi$$

因为

$$A=0.12\ \mathrm{m},\quad x_0=0.06\ \mathrm{m}$$

得

$$\cos\varphi=\frac{1}{2}$$

则

$$\varphi=\pm\frac{\pi}{3}$$

由于

$$v_0=-\omega A\sin\varphi>0$$

则

$$\varphi=-\frac{\pi}{3}$$

$$x=0.12\cos\left(\pi t-\frac{\pi}{3}\right)\ \mathrm{m}$$

方法二　用旋转矢量法求 φ

根据题意，旋转矢量如图 9-2-3，可得

$$\varphi=-\frac{\pi}{3}$$

则

$$x=0.12\cos\left(\pi t-\frac{\pi}{3}\right)\ \mathrm{m}$$

由上可见，方法二简单.

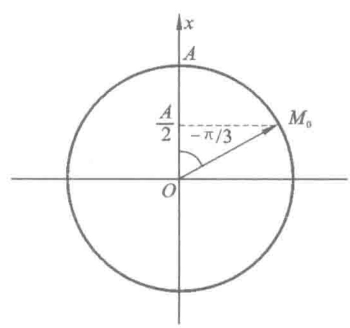


图 9-2-3

(2) **方法一**　用数学式子求 Δt

由题意有

$$-0.06=0.12\cos\left(\pi t_1-\frac{\pi}{3}\right)$$

由于

$$\omega t_1<\omega T=2\pi$$

得

$$\omega t_1-\frac{\pi}{3}<2\pi$$

所以

$$\omega t_1-\frac{\pi}{3}=\frac{2}{3}\pi$$

或