高等学校教材

物理学基本教程

第三册　张达宋　主编

高等教育出版社

高等学校教材

物理学基本教程

第三册

张达宋 主编

参加编写人：
李行一 袁长寿 王安安 陈大德 刘 坤
王文楷 于永香 董勋德 贾惠凯 张 平

高等教育出版社

内容简介

本书系作者根据长期教学积累的经验编写而成，比较系统全面地阐述了工科大学物理（即原普通物理学）课程的基本内容．全书共分三册．第一册内容为力学、气体分子运动论和热力学基础，第二册内容为电磁学，第三册内容为振动与波动和近代物理学基础．第三册共包括八章：机械振动、机械波、电磁振荡和电磁波、波动光学、狭义相对论基础、光的量子性、原子的量子理论、固体能带理论基础，每章后附有习题．书末附有习题答案．本书由洪晶主审，杨仲耆、周勇志、方光耀和胡盘新等参加审稿．

本书内容的选取和讲述的深度主要依据国家教委1987年颁布的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》，可作为工科类各专业本科《大学物理》课程的基本教材，也可供非工科类有关专业选用．

责任编辑：黄元铭

（京）112号

高等学校教材

物理学基本教程

第三册

张达宋　主编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本850×1168　1/32　印张10.5　字数260 000

1989年11年第1版　1992年2月　第5次印刷

印数30 373—38 883

ISBN7-04-001628-1/O·350

定价　3.05元

前　　言

本书初稿系根据1980年原教育部颁布的高等工业学校普通物理教学大纲的基本要求（即不打*号的内容）结合编者的教学经验并借鉴国内外部分教材而编写的，1984年经全国高等学校工科物理课程教学指导委员会组织评审通过，随即按照评审意见对原稿作了修改、试用，以后又根据1986年西安审稿会所提意见及1987年国家教委颁布的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》作了进一步的修改和补充，经复审后于1987年9月定稿.

本书编写的指导思想是：1°要便于教师教和学生学，要符合人的认识过程，既与高中物理衔接，又避免不必要的重复，起点不要太高，但又必须达到国家教委颁布的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》(以下简称基本要求).2°由于本课程内容多学时少，教材要编写得紧凑，又要把问题阐述清楚，使之便于自学.3°概念的讲述要清楚，推理论证要严谨，要有逻辑性和系统性.

本书除打*号部分外，绝大部分内容都是属于《基本要求》的范围，可根据专业的需要选用.本书参考总学时为130～140学时，各部分内容基本上按照《基本要求》的先后次序安排的，只是牛顿力学的相对性原理放在“狭义相对论基础”一章的开头，玻耳兹曼分布律放在“激光”一节之前，本书采用国际单位制，各物理量名称及有关单位的名称均采用国家标准规定的名称.

参加本书编写工作的有李行一，袁长寿、王安安、陈大德、刘坤、王文楷、于永香、董勋德、贾惠凯及张平等同志.

本书审稿人有哈尔滨工业大学洪晶同志(主审)、天津大学杨

仲者同志、华南工学院周勇志同志、华东工程学院方光耀同志及上海交通大学胡盘新同志等，他们对本书原稿进行了详细审阅并提出宝贵意见和具体建议，对本书的修改工作帮助很大，在此表示衷心感谢.

南京空军气象学院、成都地质学院、广东工学院及华东工程学院等院校的同志对本书原稿提出许多宝贵意见和建议，云南大学李德修教授对本书固体能带理论基础一章提出了宝贵和具体的修改意见．使编者深受教益，在此一并表示感谢.

由于本书的编写及修改工作量很大而时间又十分仓促，更主要的是由于编者的水平有限，本书缺点错误一定不少，衷心希望使用本书的同志多多提出宝贵意见.

编者

1987年9月

目　录

第四篇　振动与波动

第五篇　近代物理学基础

第四篇　振动与波动

第十五章　机械振动

物体在一定位置附近来回往复的运动称为机械振动．例如钟摆的运动、汽缸中活塞的运动、机器开动时各部分的微小颤动都是机械振动．振动现象是非常普遍的，并不限于机械振动．振荡电路中电流的变化，电磁场的变化，虽然和机械振动有本质的不同，但它们的变化规律和数学描述与机械振动相类似（见第十七章），所以也称为振动．一般地说，凡是描述物质运动状态的某一物理量，在某一数值附近作周期性的变化都可称为振动．在自然界和科学技术中振动是普遍存在的，因此不论研究自然科学或工程科学都必须研究振动的规律．

在所有振动中最简单最基本的振动是谐振动，可以证明，任何复杂的振动，都可认为是由几个或多个谐振动合成．本章主要是讨论谐振动，并简要介绍阻尼振动和受迫振动．

§15-1　谐　振　动

一、谐振动

弹簧振子的运动是谐振动的典型例子，下面以弹簧振子为例来说明谐振动的规律．如图15-1，将弹簧一端固定，另一端连接一物体，使物体能在光滑水平面上沿左右方向运动．弹簧的质量与物体的质量相较甚小，可以忽略不计，这一系统即为第一册p.

79讲过的弹簧振子.因为假定水平面是光滑的，没有摩擦力作用，所以在水平方向上物体只受到弹簧的弹性力作用.

设物体处在位置O时，所受的合外力为零，这个位置称为物体的平衡位置．现将物体略向右移到位置B然后释放，这时由于弹簧被拉长，便有一指向左边即指向平衡位置的弹性力作用在物体上，迫使物体向左运动．当物体回到平衡位置时，虽然作用在物体上的弹性力变为零，但物体是运动着的，由于惯性将继续向左运动．当物体运动到平衡位置的左边时，弹簧被压缩，便有指向右边即指向平衡位置的弹性力作用在物体上，阻止物体向左运动，使物体的运动速度减小，直到物体到达速度变为零的位置C，之后物体又将在弹性力的作用下向右运动．这样物体在弹性力的作用下，就在平衡位置附近来回往复运动．以上我们定性地分析了弹簧振子的振动过程，下面研究它的运动规律.

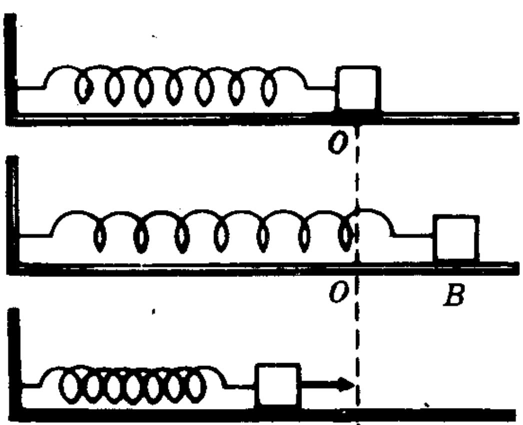

图 15-1

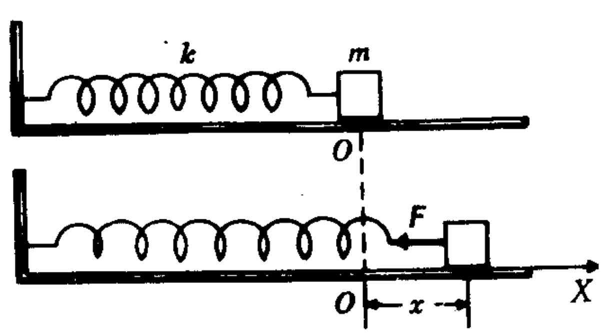

图 15-2

取平衡位置O为坐标的原点，OX轴的正方向向右，如图15-2，设x为物体的坐标，则x亦为物体相对于平衡位置的位移（振动质点的位移都是相对于平衡位置的位移）．根据胡克定律，在弹性限度内，物体受到的弹性力F与物体的位移x成正比，即

$$F=-kx$$

式中 k 是弹簧的倔强系数，与弹簧的材料、形状、大小有关．“－”号表示力的方向与位移的方向相反．

设物体的质量为m，在弹性力F的作用下产生的加速度为a，则由牛顿第二定律得

$$a=\frac{F}{m}=-\frac{k}{m}x \tag{15-1}$$

对于给定的弹簧振子 k 和m都是正的常数，可写

$$\frac{k}{m}=\omega^2 \tag{15-2}$$

代入（15-1）式得

$$a=-\omega^2 x \tag{15-3}$$

这一结果表明，弹簧振子的加速度与位移成正比，而方向相反．我们把加速度与位移成正比而方向相反的振动称为谐振动．作谐振动的物体称为谐振子．因

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

所以（15-3)式也可写成

$$\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2 x=0 \tag{15-4}$$

这是谐振动的微分方程，从高等数学知道它的解是

$$x=A\cos(\omega t+\varphi) \tag{15-5}$$

式中的A、φ是两个积分常数，它们的意义和数值将在下节中讨论．又因$\cos(\omega t+\varphi)=\sin\left(\omega t+\varphi+\frac{\pi}{2}\right)$，如果令$\varphi'=\varphi+\frac{\pi}{2}$，

则（15-5）式可改写成

$$x=A\sin(\omega t+\varphi') \tag{15-5a}$$

（15-5）或（15-5a）式称为谐振动方程．因此我们也可以说，位

移是时间的余弦函数或正弦函数的运动称为谐振动．本章中我们采用余弦函数的形式来表示谐振动．

二、谐振动的旋转矢量表示法

谐振动也可以用旋转矢量法来描述．如图15-3，从原点O作一个矢量$\boldsymbol{A}$，它的大小等于谐振动方程（15-5）式中的A，设想矢量$\boldsymbol{A}$在图平面上沿反时针方向转动，其角速度等于（15-5）式中的ω，$t=0$时$\boldsymbol{A}$与OX轴的夹角等于（15-5）式中的φ，这个矢量$\boldsymbol{A}$称为旋转矢量．

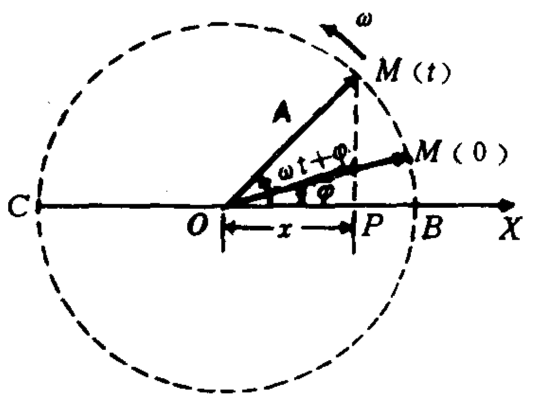

图 15-3

当旋转矢量$\boldsymbol{A}$绕O点旋转时，它的端点M在以O点为圆心、A为半径的圆周上作匀速圆周运动，这个圆称为参考圆．M点在OX轴上的投影点P在直径上B、C两点之间作来回往复的运动，任一时刻P点的位移为

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

此式与（15-5）式相同．因此对一个给定的谐振动（A、ω和φ都是已知的），我们可以用旋转矢量$\boldsymbol{A}$的端点的投影点P的运动来描述，这种方法称为谐振动的旋转矢量描述法，对解决振动的某些问题比较方便．

三、谐振动的速度和加速度

将谐振动方程（15-5）式对时间求一阶导数和二阶导数便可以得出作谐振动物体的速度和加速度．

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-\omega A\sin(\omega t+\varphi) \qquad (15\text{-}6)$$

$$a=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-\omega^2A\cos(\omega t+\varphi)=-\omega^2x \qquad (15\text{-}7)$$

由此可见物体作谐振动时，其位移、速度和加速度都是时间的正

弦或余弦函数．以时间 t 为横坐标，位移、速度和加速度为纵坐标，并假定 $\varphi=0$，便可画出如图15-4的 $x-t$、$v-t$ 和 $a-t$ 曲线．

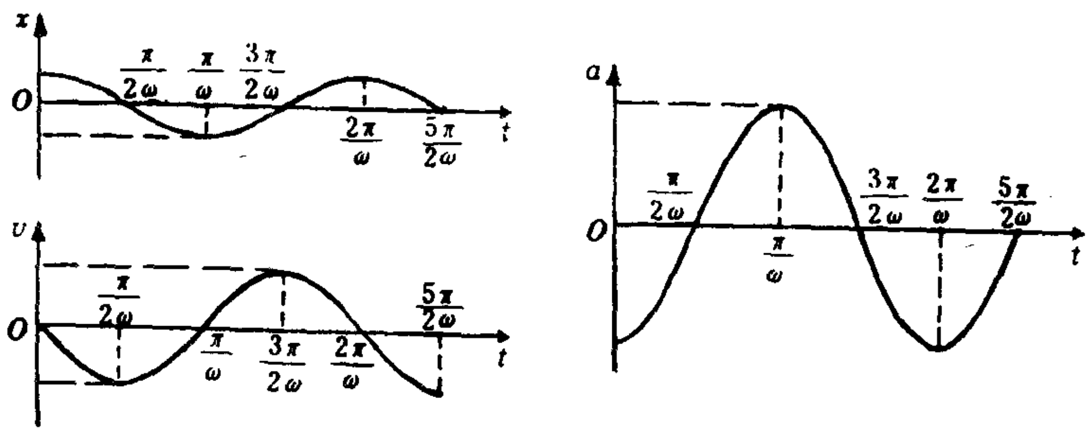

图 15-4

从这三条曲线可以看出：谐振动的位移、速度和加速度都是周期性地变化的，即每隔一定的时间它们重复原来的数值一次．但它们随时间变化的步调不一致，当位移最大时，速度为零，加速度的绝对值最大；当位移为零时，速度的绝对值最大，加速度为零．

§ 15-2　谐振动的振幅、周期、频率和位相

上节我们得出了谐振动方程 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$，现在来说明式中各个量的物理意义．

1．**振幅**

谐振动方程中的 A 称为振动的振幅．因余弦的绝对值不能大于1，故位移 x 的绝对值不能大于 A，所以振幅 A 是振动物体离开平衡位置最大位移的绝对值．物体振动时就是在平衡位置 O 附近，在 $x=+A$ 和 $x=-A$ 之间来回往复运动．振幅的大小反

映了振动的强弱．用旋转矢量表示谐振动时，矢量A的大小就表示振幅，所以旋转矢量又称为振幅矢量．

2．周期和频率

振动物体作一次完全振动（即来回往复一次）所需的时间称为振动的周期，通常用T表示，单位是秒．用旋转矢量表示谐振动时，矢量A转过2π角度所需的时间等于它的端点的投影点在参考圆的直径上作一次完全振动所需的时间，即等于谐振动的周期T．因矢量A的旋转角速度是ω，所以

$$T=\frac{2\pi}{\omega} \tag{15-8}$$

单位时间内，振动物体所作完全振动的次数称为频率，通常用ν表示，因为T是振动物体作完全振动一次所需的时间，所以单位时间所作完全振动的次数为$1/T$，故

$$\nu=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi} \tag{15-9}$$

频率的单位是赫兹，简称为赫，符号为Hz，$1\text{Hz}=1\text{s}^{-1}$．$\omega$又称为谐振动的圆频率或角频率，由（15-9）式得

$$\omega=2\pi\nu \tag{15-10}$$

所以圆频率等于2π秒时间内的振动次数．

对于弹簧振子，由（15-2）式得

$$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{15-11}$$

所以振动的周期和频率可写为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{15-12}$$

$$\nu=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{15-13}$$

对于给定的弹簧振子，m和k都是一定的，所以谐振动的周

期和频率完全由弹簧振子本身的性质决定，与初始条件（即初位移x_0和初速度v_0）无关．因此这种周期和频率又称为固有周期和固有频率．对其他的振动系统也可以得到同样结论．

因为 $\omega=2\pi\nu=\frac{2\pi}{T}$，所以谐振动方程可以写成以下各种形式中任一种形式

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

$$x=A\cos(2\pi\nu t+\varphi)$$

$$x=A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t+\varphi\right)$$

3．位相

谐振动方程中的（$\omega t+\varphi$）称为谐振动在t时刻的位相，它是表示振动物体的位置和运动方向的物理量．用旋转矢量表示谐振动时，（$\omega t+\varphi$）即是t时刻矢量$\boldsymbol{A}$与OX轴间的夹角．假设谐振动的振幅A为已知，如果知道位相（$\omega t+\varphi$），由（15-5）式可决定t时刻振动点的位移x，又由（15-6）式可决定速度的正负号，亦即决定振动点的运动方向：反之如果知道t时刻振动点的位移x和运动方向，便可决定位相（$\omega t+\varphi$）（参见例题15-2）．

谐振动方程中的φ是$t=0$时的位相，称为初位相，它可以由振动物体在$t=0$时刻的位移及运动方向确定．用旋转矢量$\boldsymbol{A}$表示谐振动时，φ等于$t=0$时矢量$\boldsymbol{A}$与OX轴间的夹角．

A和φ的决定

对给定的一个振动系统ω是已知的．谐振动方程中的振幅A和初位相φ，可由初始条件即$t=0$时的位移x_0及速度v_0决定．因为

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

$$v=-\omega A\sin(\omega t+\varphi)$$

在此两式中令 $t=0$，得

$$x_0 = A\cos\varphi$$

$$v_0 = -\omega A\sin\varphi \text{ 或 } \frac{-v_0}{\omega} = A\sin\varphi$$

将两式平方、相加及化简可得

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} \tag{15-14}$$

初位相φ可决定如下：由$\cos\varphi = \dfrac{x_0}{A}$可决定$\varphi$的两个可能值，再由$\sin\varphi = \dfrac{-v_0}{\omega A}$的正负号，可从这两个可能值中决定$\varphi$的值（参见例题15-1）.

例题15-1　如图15-5，一弹簧振子放置在光滑的水平面上．已知弹簧的倔强系数$k = 1.60\,\mathrm{N/m}$，物体的质量$m = 0.40\,\mathrm{kg}$．试就下列二情形分别求谐振动方程.

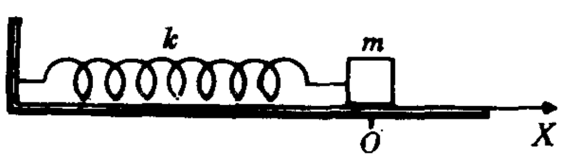

图 15-5

（1）将物体从平衡位置向右移到$x = 0.10\,\mathrm{m}$处后释放.

（2）将物体从平衡位置向右移到$x = 0.10\,\mathrm{m}$处后并给物体以向左的速度$0.20\,\mathrm{m/s}$.

解：（1）这弹簧振子的角频率为

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{1.60}{0.40}} = 2\ \mathrm{s}^{-1}$$

根据初始条件：

$$t = 0 \text{ 时}\quad x_0 = 0.10\,\mathrm{m},\ v_0 = 0$$