# 普通物理学(三)

陈广汉　吴孟怡　编

北京理工大学出版社

## 内容简介

本书是根据原教育部颁发的《普通物理函授教学大纲》的要求编写的，全书共分三册．第一册包括力学和热力学基础，第二册包括电磁学；第三册包括振动和波动，光学和近代物理学基础．

本书语言简洁、深入浅出，重点内容叙述详尽细致．每章后有相当数量的思考题和习题，每篇后有测验题，便于函授和自学．

本书可作为高等院校工科各专业函授教材，亦可作为电大、夜大、职工大学及本科生各专业普通物理课参考书．


**图书在版编目（CIP）数据**

普通物理学（三）/陈广汉，吴孟怡编．—北京：北京理工大学出版社，（2000.8重印）

高校教材

ISBN 7-81013-036-6

Ⅰ.普… Ⅱ.①陈… ②吴… Ⅲ.普通物理学-高等学校-教材 Ⅳ.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字（97）第 17705 号

北京理工大学出版社出版发行

（北京市海淀区白石桥路 7 号）

邮政编码 100081　电话（010）68912824

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

*

787 毫米×1092 毫米　32 开本　13.75 印张　308 千字

1988 年 6 月第 1 版　　2000 年 8 月第 7 次印刷

印数：27016—29015 册　　定价：10.00 元

# 目　录

## 第四篇　振动和波动

## 第五篇　波动光学基础和光的量子性

## 第六篇　原子物理学和原子核物理学简介

# 第四篇　振动和波动

## 第一章　机械振动

机械振动和机械波是机械运动中的重要运动形式．因为机械振动是产生机械波动的根源，所以前者是后者的基础．

机械振动是在日常生活、生产和工程技术等方面经常遇到的一种运动．例如：人在讲话时，声带的运动；用木棒击鼓时，鼓膜的运动；热机工作时，气缸内活塞的运动；机床开动时，各个部分的微小运动等等都是机械振动．我们把物体在一定位置的附近所作的来回往复的运动称为机械振动．

物体作机械振动可以是周期性的，也可以是非周期性的．来回往复的运动轨道可以是一条直线，也可以是平面或空间曲线．运动轨道是一条直线的振动称为直线振动．力学量的变化在相等时间内，完全重复一次的直线振动称为周期性直线运动，最简单的周期性直线振动是简谐振动．简谐振动是振动中最简单、最基本和最重要的一种振动．本章中，我们将首先介绍机械振动中的简谐振动的规律，然后再简单介绍一些较复杂的机械振动，如阻尼振动和受迫振动等．其他内容还有同方向简谐振动的合成及相互垂直的简谐振动的合成．重要的物理概念有：振幅，周期，圆频率，周相(或位相)和旋转矢量等．

## §1-1 简谐振动

以弹簧振子为例，说明什么是简谐振动，并从中总结出简谐振动的规律.

**一、弹簧振子的振动** 一个由质量可以忽略的弹簧和一个物体所组成的振动系统，称为弹簧振子. 弹簧振子是将振动系统的质量集中在一个物体上，将系统的弹性集中在轻弹簧上的一个理想模型.

图1-1($a$)所示就是一个弹簧振子，轻弹簧的左端固定，右端系一质量为$m$的物体. 物体放在光滑的水平面上. 设弹簧为自然长度时，物体在位置$O$处. 这时，物体在水平方向上不受力，在竖直方向上所受的合外力为零. 位置$O$称为平衡位置. 取平衡位置$O$为坐标原点，水平方向向右为$X$轴的正方向，如把物体从位置$O$向右移到位置$B$而静止，这时物体在$X$轴方向上除受向右的外力$\boldsymbol{F}$作用外，还要受到由于弹簧被拉长而形成指向平衡位置$O$的弹性力$\boldsymbol{f}$的作用，如图1-1($b$)所示. 显然这两个力是互相平衡的，即合力为零. 当把外力$\boldsymbol{F}$撤去以后，物体就在弹性力$\boldsymbol{f}$的作用下，向左运动. 这时物体的速度$v$逐渐增加，所受的弹性力$f$(和加速度$a$)逐渐减小，物体作变加速直线运动. 当物体回到平衡位置$O$时，弹性力$f$(和加速度$a$)变为零，速度$v$达到最大值，如图1-1($c$)所示. 由于惯性，物体继续向左运动，弹簧将被压缩，物体将受到向右并指向平衡位置$O$的弹性力$f$的作用. 因为弹性力$f$(和$a$)的方向与物体运动的方向相反，并且它的量值逐渐增大，所以物体作变减速直线运动，当物体到达位置$C$时，速度$v$减小到零，弹性力$f$(和$a$)达到最大值，如图1-1($d$)所示. 接着，物体又

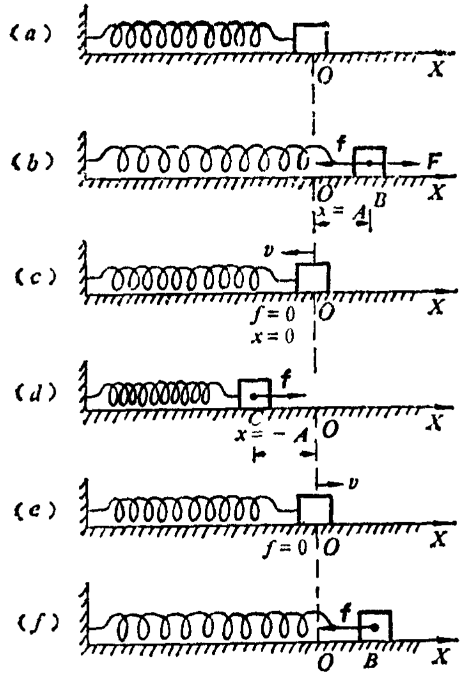


图1-1

在指向平衡位置$O$的弹性力$f$作用下，向右运动，当回到平衡位置$O$处时，速度$v$达到最大值，弹性力$f$(和$a$)又变为零，如图1-1($e$)所示．此后，物体由于惯性继续向右运动，当返回位置$B$处时，速度$v$又减小到零，弹性力$f$(和$a$)又达到最大值，如图1-1($f$)所示．这时物体完成了一次完全振动。此后，物体将不断地重复上述运动过程，即在平衡位置$O$的附近往复地运动．综上所述：物体受外力$F$的作用而离开平衡位置$O$，到达$B$点处时撤去外力，此后，一方面由于弹性力(系统的内力，为保守力)的作用，将物体拉回到平衡位置，另一

方面由于惯性，又使物体继续向另一侧运动．由于弹力性和惯性的交替作用，才使物体能在平衡位置附近往复地运动．

**二、简谐振动的运动方程** 仍以图1-1所示的弹簧振子为例，用数学方法研究简谐振动的运动学特征和运动方程．

物体偏离平衡位置$O$点($x=0$)的位移(表示物体的位置)用坐标$x$的代数值表示，位移的量值等于$|x|$，位移的方向由$x$的正负来决定．当$x$为正(即弹簧伸长)时，物体位移的方向从$O$点指向右，如图1-1($b$)；而弹性力的方向则指向左，与$X$轴的负方向相同，故$f$为负；当$x$为负(即弹簧缩短)时，物体位移的方向从$O$点指向左，如图1-1($d$)；而弹性力的方向则指向右，与$X$轴的正方向相同，故$f$为正．由此可知：弹性力$\boldsymbol{f}$的方向总是与位移$\boldsymbol{x}$的方向相反，所以这种弹性力是一种恢复力．

根据胡克定律，在弹性限度内，物体所受的弹性力$f$与弹簧的伸长量或缩短量(即物体的位移$x$)之间的关系为

$$f=-kx \tag{1-1}$$

式中比例系数$k$是弹簧的倔强系数，负号表示弹性力与物体位移的方向相反．

设物体的质量为$m$，物体在任一位置的瞬时加速度为$a$．在忽略摩擦阻力的理想情况下，由牛顿第二定律$f=ma$可得

$$ma=-kx$$

或

$$a=-\frac{k}{m}x \tag{1-2}$$

因为$k$和$m$都是正数，所以它们的比值可以用另一常量$\omega$的平方来表示，即令

$$\frac{k}{m}=\omega^2 \tag{1-3}$$

将上式代入式(1-2)，得

$$a=-\omega^2 x \tag{1-4a}$$

或

$$\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2 x=0 \tag{1-4b}$$

式(1-4)和(1-2)的物理意义相同．它们表明：在弹性限度内，弹簧振子的振动加速度和位移成正比而反向．具有这种特征的运动称为简谐振动．式(1-4)和(1-2)均表征了简谐振动的运动学特征．式(4-4b)称为简谐振动的微分方程．根据高等数学中的微分方程理论可解得：

$$x=A\cos(\omega t+\phi) \tag{1-5a}$$

因为$\cos(\omega t+\phi)=\sin\left(\omega t+\phi+\frac{\pi}{2}\right)$，所以如令$\phi'=\phi+\frac{\pi}{2}$，

则式(1-5a)可改写为

$$x=A\sin(\omega t+\phi') \tag{1-5b}$$

$A$和$\phi$是待定的常量，$\omega$由式(1-3)决定．式(1-5a)和(1-5b)都是简谐振动的运动方程(也称为振动方程)，它们反映出简谐振动的运动规律．

式(1-5)表明物体作简谐振动时，位移是时间的余弦或正弦函数．换句话说，物体的位移如果是时间的余弦或正弦函数，则该物体的振动就是简谐振动．

把式(1-5a)对时间求一阶和二阶导数，可得作简谐振动的物体的速度和加速度分别为

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-\omega A\sin(\omega t+\phi) \tag{1-6}$$

$$a=\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega^2A\cos(\omega t+\phi) \qquad (1\text{-}7)$$

式(1-6)和(1-7)分别表明：物体作简谐振动时，它的速度和加速度也是时间的余弦或正弦函数．

由式(1-6)和(1-7)还可以看出，简谐振动是变加速直线运动，这和前面的定性分析是一致的．

由式(1-6)和(1-7)可知：速度的最大值$v_m=\omega A$，加速度的最大值$a_m=\omega^2A$．$v_m$和$a_m$分别称为速度振幅和加速度振幅．

应用式(1-5a)、(1-6)和(1-7)可以分别画出作简谐振动物体的位移$x$、速度$v$和加速度$a$随时间$t$变化的图线，如图1-2所示．由图可以看出，在$t=0$时，物体的位移为正最大值，速度为零，加速度为负最大值．

应该指出：一个振动物体若不受任何阻尼力的影响，只在回复力作用下所作的振动称为无阻尼自由振动．只有当回复力与位移成正比反向时，物体所作的无阻尼自由振动才是简谐振动．

**三、简谐振动的周期、频率和圆频率**

1．周期　在图1-1所示的弹簧振子的振动中，物体从位置$B$经$O$到达$C$，再从位置$C$经$O$返回$B$称为一次完全振动．物体每完全一次完全振动所需的时间称为周期，用$T$表示，单位是秒(s)．

由图1-2所示的曲线可以看出，经过时间$2\pi/\omega$，物体的运动状态(位置和速度)就完全重复一次．因此，时间$2\pi/\omega$就是该弹簧振子的周期，即

$$T=\frac{2\pi}{\omega} \qquad (1\text{-}8)$$

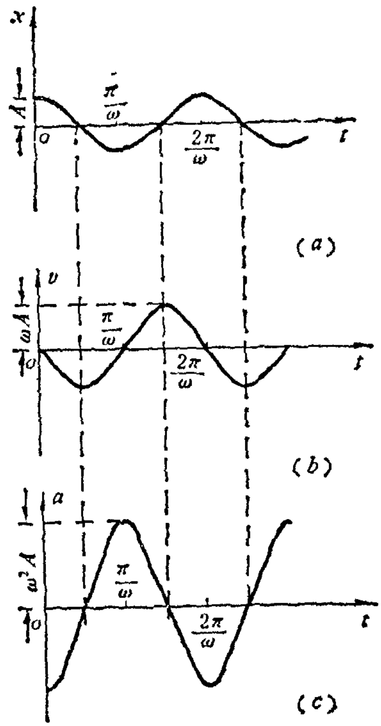


图1-2

2.*频率* 周期的倒数，即单位时间内物体所作完全振动的次数称为频率，用$\nu$表示，单位是$s^{-1}$，称为赫兹，代号为Hz，则

$$\nu=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi} \qquad (1\text{-}9)$$

3.*圆频率* 在$2\pi$秒内物体所作完全振动的次数称为圆频率，即

$$\omega=2\pi\nu \tag{1-10}$$

由式(1-3)可得

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

将上式分别代入式(1-8)和(1-9)，可得弹簧振子的周期和频率分别为

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{1-11}$$

$$\nu=\frac{1}{T}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1-12}$$

因为质量$m$(惯性)和倔强系数$k$(弹性)表示弹簧振子本身的力学性质，所以弹簧振子的周期$T$和频率$\nu$(或圆频率$\omega$)都由它本身的力学性质所决定. 这种由振动系统本身性质所决定的周期和频率又分别称为**固有周期**和**固有频率**.

简谐振动的运动方程也常用周期或频率来表达. 将式(1-8)及(1-9)分别代入式(1-5a)，可得

$$x=A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t+\phi\right) \tag{1-13}$$

和

$$x=A\cos(2\pi\nu t+\phi) \tag{1-14}$$

**例1-1** 一弹簧振子竖直悬挂，$l_0$为自然长度，$l$为平衡时弹簧的伸长量，如图1-3所示. (1)今将物体向下拉动一段距离，然后释放，这时弹簧振子作何种运动？求其运动方程. (2)已知物体的质量$m=0.025\text{kg}$，弹簧的倔强系数$k=1.6\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$，求振动的圆振率、频率及周期

**解** (1)为了研究弹簧振子的运动，首先要选定坐标. 取平衡时的$O$点为坐标原点，并取竖直向下的方向为$X$轴的正方向. 沿$X$轴向下拉动一段距离$x$，释放时，因为弹性回复

力$f$大于重力$P=mg$，且二者方向相反，所以物体将沿$X$轴负方向运动．设某一时刻，物体的位移为 $x$(正值)，如图1-3($b$)所示．这时物体所受向上的弹性力 $f=k(l+x)$，而物体所受的合力为

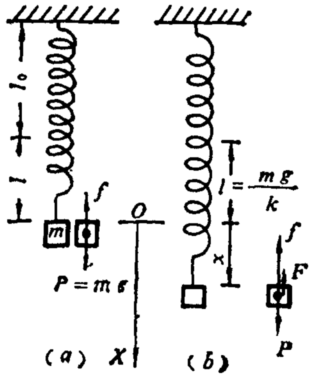

图1-3

$$F=mg-f$$
$$=mg-k(l+x) \quad ①$$

因为在平衡时，物体所受的重力与弹性力相等，所以有

$$mg=kl \quad ②$$

式②代入式①，得

$$F=mg-f=-kx \quad ③$$

式中负号表示合力$F$与位移$x$的方向相反．与图1-3($b$)所示相同．根据牛顿第二定律，式③可改写为

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=-kx$$

即

$$\frac{d^2x}{dt^2}=-\frac{k}{m}x=-\omega^2x$$

$$\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x=0 \quad ④$$

式中$\omega=\sqrt{k/m}$，式④与式(1-4$b$)相同．它表明物体的运动为简谐振动．故式④为简谐振动的微分方程，它的解为

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

上式为弹簧振子竖直放置时，作简谐振动的运动方程．

(2)求简谐振动的三个物理量

圆频率 $\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}=\sqrt{\frac{1.6}{0.025}}=8.0\mathrm{s}^{-1}$

频　率 $\nu=\frac{\omega}{2\pi}=\frac{8.0}{2\pi}=1.27\mathrm{Hz}$

周　期 $T=\frac{2\pi}{\omega}=\frac{2\pi}{8.0}=0.79\mathrm{s}$

讨论：

(1)水平放置的弹簧振子，振动的平衡位置在弹簧自然长度的自由端处，即在伸长量$l=0$处．竖直放置的弹簧振子，振动的平衡位置是当重力与弹性力相平衡时，弹簧从自然长度$l_0$向下移动到$l=mg/k$的距离处．如图1-3($b$)所示．

(2)两种放置方法，平衡位置不同，但系统所作的简谐振动具有相同的$\omega$、$\nu$和$T$．也具有相同形式的$x$、$v$和$a$的数学表达式．由此可知，振动系统除本身的弹性力以外，如还受到恒力(如本例的重力)作用时，系统仍作为简谐振动，只是平衡位置不同．

(3)式③虽然是在选取物体的位置在平衡点$O$的下方而得到的，但它同样适用于平衡点$O$的上方．物体在$O$点的下方时，它的位移$x>0$，弹性回复力$f>$重力$P$，合力$F<0$，即$F$的方向沿$X$轴负向．而物体在$O$点的上方时，$x<0$，$f<P$，合力$F>0$，即$F$的方向沿$X$轴正向．

**四、单摆和复摆**

1.单摆　一根长度为$l$的无伸缩的细线，上端固定，下端悬挂一个质量为$m$的小球．小球的线度远小于$l$，可以视为质点，细线的质量比$m$小很多，可以忽略不计．将小球稍加移动以后，就可以在竖直平面内来回摆动，这个系统称为

单摆，如图1-4所示．当单摆自然静止时，摆球处在平衡位置$O$点处．设空气的摩擦阻力很小，可以忽略不计．

设摆球在某时刻通过$P$点，其角位移为$\theta$．这时摆球受到重力$mg$和细线的拉力$T$的作用．重力在圆弧上$P$点处切线方向的分力为$f=mg\sin\theta$．力$f$起着回复力的作用，此点和弹性力类似，但本质不同，故称为准弹性力．当$\theta$角很小($5^\circ$以下)时，角位移$\theta$(以弧度为单位)几乎等于$\sin\theta$，即$\theta\approx\sin\theta$．这时有

$$f=-mg\theta$$

式中负号表明回复力的方向是使角位移$\theta$趋向减小的方向．已知摆球在$P$点的切向加速度和角加速度的关系为

$$a=l\beta=l\frac{d^2\theta}{dt^2}$$

根据牛顿第二定律$f=ma$可得

$$a=l\frac{d^2\theta}{dt^2}=\frac{f}{m}=-g\theta$$

上式可改为

$$\frac{d^2\theta}{dt^2}=-\frac{g}{l}\theta=-\omega^2\theta \qquad (1-15)$$

上式表明，单摆的角加速度$\frac{d^2\theta}{dt^2}$与角位移$\theta$成正比而转向相反．上式与简谐振动的定义式(1-4)相符合．由此可知，单摆在摆角很小($5^\circ$以下)时的无阻尼自由振动(称为小角幅振动)可视为是简谐振动．由于$\theta$为角量，所以通常称为角谐振动．

式(1-15)中$\omega^2=g/l$，$\omega$为单摆小角幅振动时的圆频率．由周期$T=2\pi/\omega$可求得单摆小角幅振动时的周期为

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (1-16)$$