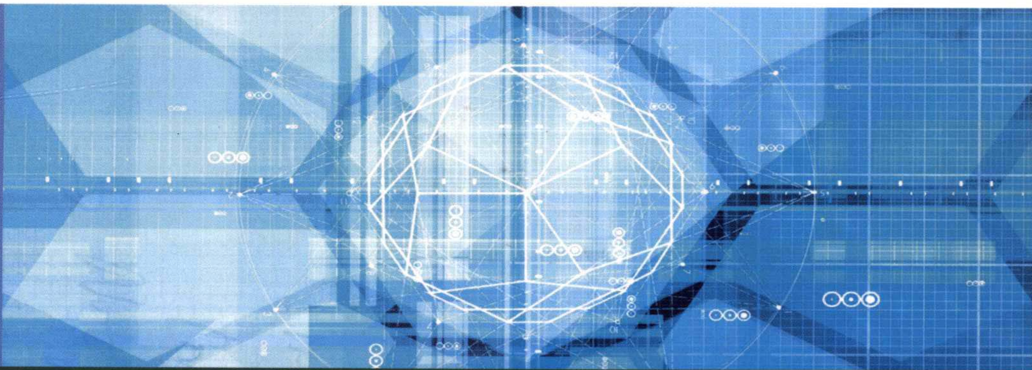
大学物理

下册

University Physics



主 编 肖剑荣 梁业广 陈鼎汉 李 明

高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

大学物理

下册

Daxue Wuli

主 编 肖剑荣 梁业广 陈鼎汉 李 明

高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》（2010年版）并结合编者多年的教学实践经验而编写的。本书在确保基础扎实、内容简练的前提下，着重于物理基本概念、基本知识及思维方式的介绍，尽量避免一些繁琐的数学运算，体现了创意新、视点高和内容现代化的特色。

本书分为上、下两册。上册内容包括：质点运动学、质点动力学、刚体力学、真空静电场、真空恒定磁场、电磁感应、麦克斯韦方程组、狭义相对论；下册内容包括：振动、波动、光学、气体动理论、热力学基础、量子物理。

本书可作为高等学校理工科类大学物理课程的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.下册／肖剑荣等主编.--北京:高等教育出版社,2012.9

ISBN 978-7-04-036103-2

Ⅰ.①大… Ⅱ.①肖… 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(2012)第200247号

策划编辑	高　建	责任编辑	张海雁	特约编辑	张竹琪	封面设计	于　涛
版式设计	余　杨	插图绘制	尹　莉	责任校对	杨凤玲	责任印制	尤　静

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社　　址	北京市西城区德外大街4号	网　　址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印　　刷	化学工业出版社印刷厂	网上订购	http://www.landraco.com
开　　本	787mm×960mm　1/16		http://www.landraco.com.cn
印　　张	11.75	版　　次	2012年9月第1版
字　　数	210千字	印　　次	2012年9月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定　　价	19.00元

物 料 号　36103-00

目 录

振动　第9章

振动是一种很普遍的运动形式,从日常生活到生产技术以及自然界中到处都存在着振动,如钟摆的摆动,心脏的跳动,汽缸活塞的往复运动,以及微风中树枝的摇曳等,这些都是振动。物体在一定位置附近做周期性的往复运动,叫做机械振动。

一般来说,任何一个物理量在某一量值附近随时间作周期性变化都可以称为振动。例如,交流电中电流和电压的周期性变化;在交变电磁场中,电场强度和磁场强度的周期性变化;无线电接收天线中,电流的受迫振荡等,都属于振动的范畴。

§9.1　简谐振动

9.1.1　简谐振动的描述

振动现象是多种多样的,其中最简单和最基本的振动是简谐振动。一切复杂的振动都可以看作是由若干个简谐振动合成的结果。下面以弹簧振子为例,研究简谐振动的运动规律。

1. 弹簧振子

如图 9-1 所示,将一轻弹簧(轻弹簧的质量相对于物体来说可以忽略不计)的一端固定,另一端连一质量为 m 的物体,这样的弹簧和物体系统就称为弹簧振子。若将弹簧振子放置在光滑水平面上,当物体在位置 O 时,弹簧为原长,物体所受的合力为零,处于平衡状态,这个位置称为物体的平衡位置。现把物体从平衡位置向右移动后释放,这时由于弹簧被拉长,产生了指向平衡位置的弹性力,在弹性力的作用下,物体便向左运动。当回到平衡位置时,虽然物体所受到的弹性力减小到零,但是由于物体的惯性,它将继续向左运动,致使弹簧被压缩,便出现向右的指向平衡位置的弹性力,阻碍物体继续向左运动,使物体的运动速度减小,直到物体到达速度为零的位置。之后,物体又将在弹性力的作用下向右运动。这样物体在弹性力作用下,在平衡位置附近往复运动。

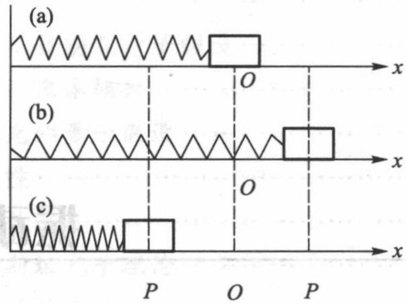


图9-1 弹簧振子的振动

取平衡位置O为坐标原点,水平向右为x轴的正方向。根据胡克定律,物体所受的弹性力$\boldsymbol{F}$与物体相对平衡位置的位移$\boldsymbol{x}$成正比,即

$$\boldsymbol{F} = -k\boldsymbol{x}$$

式中k是弹簧的劲度系数,它由弹簧本身的性质(材料、形状、大小等)所决定,负号表示力与位移的方向相反。

设物体的质量为m,根据牛顿第二定律$F=ma$和$a=\frac{d^2x}{dt^2}$,物体的加速度为

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{kx}{m} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad 即 \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \tag{9-1}$$

对于一个给定的弹簧振子,k与m都是正的常量,可令

$$\frac{k}{m} = \omega^2 \tag{9-2}$$

代入上式得

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \tag{9-3}$$

这一微分方程的解是

$$x = A\cos(\omega t + \varphi) \tag{9-4}$$

其中A和φ是积分常量,其物理意义将在后面讨论。由上式可知,物体运动时,如果离开平衡位置的位移按余弦(或正弦)函数关系随时间变化,这种运动叫做简谐振动。

把(9-4)式对时间求一阶和二阶导数,可分别得到物体做简谐振动时的速度和加速度:

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A\sin(\omega t + \varphi) \tag{9-4a}$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A\cos(\omega t + \varphi) \tag{9-4b}$$

上述各式中,(9-3)式揭示了简谐振动中的受力特点,故称为简谐振动的动力学方程,而(9-4)式反映的是简谐振动的运动规律,故称为简谐振动的运动学方程。

2. 单摆

如图9-2所示,一根质量可以忽略并且不会伸缩的细线,上端固定,下端悬挂一个可看作质点的质量为 m 的重物。当细线静止地处于竖直位置时,重物在其平衡位置 O 处。若把重物从平衡位置略为移开后放手,重物就在平衡位置附近来回摆动,这种装置称为单摆。

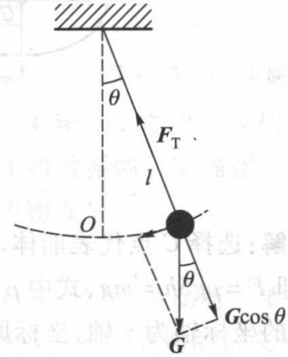


图9-2 单摆

设在某时刻,单摆的摆线与竖直方向的夹角为 θ,忽略一切阻力时,重物受到重力 $\boldsymbol{G}$ 和线的拉力 $\boldsymbol{F}_\mathrm{T}$ 作用。重力的切向分量 $mg\sin\theta$ 决定重物沿圆周的切向运动。设摆线长为 l,沿逆时针方向转过的 θ 为正,根据牛顿运动定律得

$$-mg\sin\theta = ml\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}$$

当 θ 很小时,$\sin\theta\approx\theta$,所以

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}+\frac{g}{l}\theta = 0$$

与(9-3)式相比较可知,单摆在摆角很小时的振动是简谐振动。

3. 复摆

如图9-3所示,一个任意形状的刚体,支在通过 O 点的光滑的水平转轴上,质心 C 离转轴的距离为 h。当质心在 O 轴正下方时,物体可保持静止。现将刚体拉开一个角度后释放,该刚体就会在重力作用下来回摆动,这种装置称为复摆。

设复摆对轴 O 的转动惯量为 J,复摆在角度 θ 处受到的重力矩为 $M=-mgh\sin\theta$,当摆角很小时,$\sin\theta\approx\theta$,$M=-mg\theta h$,由转动定律得

$$-mgh\theta = J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}\quad 即\quad \frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}+\frac{mgh}{J}\theta = 0$$

与(9-3)式相比较可知,复摆在摆角很小时的振动是简谐振动。

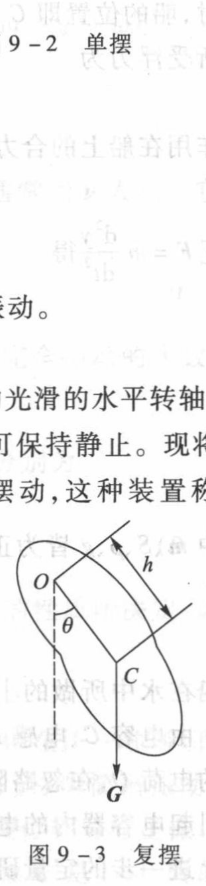


图9-3 复摆

例 9-1 一远洋海轮，质量为 m，浮在水面时其水平截面积为 S。设在水面附近海轮的水平截面积近似相等，如图 9-4 所示。试证明此海轮在水中作幅度较小的竖直自由振动是简谐振动。

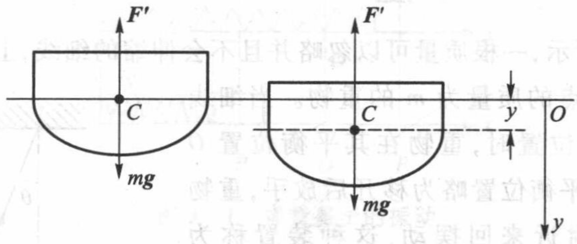


图 9-4

解：选择 C 点代表船体。当船处于静浮状态时，此时船所受浮力与重力相平衡，即 $F=\rho gSh=mg$，式中 ρ 是水的密度，h 是船体 C 以下的平均深度。取竖直向下的坐标轴为 y 轴，坐标原点 O 与 C 点在水面处重合。设船上下振动的任一瞬时，船的位置即 C 点的坐标为 y（y 即是船相对水面的位移，可正可负），此时船所受浮力为

$$F'=\rho gS(h+g)$$

则作用在船上的合力为

$$\sum F=mg-F'=\rho gSy$$

由 $\sum F=m\dfrac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}$ 得

$$m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}=-\rho gSy$$

即

$$\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}+\frac{\rho gS}{m}y=0$$

式中 m、S、ρ、g 皆为正，故可令 $\omega^2=\dfrac{\rho gS}{m}$，则

$$\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2y=0$$

故船在水中所做的小幅度的竖直自由振动是简谐振动。

由电容 C、电感 L 所组成的一个回路，如图 9-5 所示。若给电容器充上一定的电荷 Q，在忽略阻力的情况下，就能形成在电路内周期性往返流动的电流，并引起电容器内的电场和电感线圈中的磁场的周期性变化，导致无阻尼电磁振荡。进一步的定量研究表明，在无阻尼的电磁振荡过程中，电容器极板上的电荷

Q 和电路中的电流 i 皆满足(9－3)式的微分方程。

由此可见,谐振动的规律不仅出现于力学范畴,它还出现于电磁学、原子物理学、光学及其他领域。因此,一个物理系统,若描写其状态的物理量符合谐振动的定义式(9－3),皆可广义地称为谐振子。

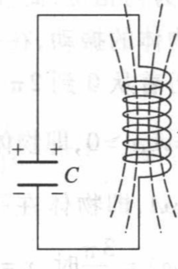


图 9－5 LC 电路

9.1.2 简谐振动的振幅、周期、频率及相位

1. 振幅

在简谐振动方程(9－4)中,物体的振动范围在 $+A$ 和 $-A$ 之间。我们把做简谐振动的物体离开平衡位置的最大位移的绝对值 A 叫做振幅。它描述了振动物体往返运动的范围和幅度。这是个反映振动强弱的物理量。

2. 周期和频率

运动的周期性是振动的基本性质。我们把物体完成一次全振动所需要的时间称为振动的周期,用 T 表示。它的单位为秒,符号为 s。根据周期的定义有

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

上式方程中 T 的最小值应满足 $\omega T = 2\pi$,因此

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad 或 \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \tag{9-5}$$

单位时间内物体完成全振动的次数称为振动的频率,通常用 ν 表示。它的单位是赫兹,符号是 Hz。显然,频率与周期的关系为

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad 或 \quad \omega = 2\pi\nu \tag{9-6}$$

由(9－6)式知 ω 表示物体在 2π 个单位时间内所做的完全振动的次数,称为角频率,也称圆频率,它的单位是 rad/s。

对于弹簧振子,有$\frac{k}{m} = \omega^2$,所以弹簧振子的周期和频率分别为

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

由于弹簧振子的质量 m 和劲度系数 k 由振动系统本身的性质所决定,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(9－4)式可知,当振幅 A 和角频率 ω 一定时,振动物体在任一时刻 t 的运动状态(位置、速度、加速度等)都由$(\omega t + \varphi)$决定。$(\omega t + \varphi)$称为简谐振动在 t 时刻的相位。它是决定 t 时刻运动状态的物理量。一定的相位就对应于振动物体在一定时刻的振动状态,即一定时刻的位置和速度。显然 φ 是 $t = 0$ 时的相

位,称为初相位,简称初相。

物体的振动,在一个周期之内,每一时刻的运动状态都不相同,这相当于相位经历着从 0 到 2π 的变化。例如图 9-1 所示的弹簧振子,当相位 $(\omega t+\varphi)=0$ 时,$x=A$,$v=0$,即物体在正位移最大处而速度为零;当相位 $(\omega t+\varphi)=\frac{\pi}{2}$ 时,$x=0$,$v=-\omega A$,即物体在平衡位置并以最大速率 ωA 向 x 轴负方向运动;而当相位 $(\omega t+\varphi)=\frac{3\pi}{2}$ 时,$x=0$,$v=\omega A$,这时物体也在平衡位置,但以最大速率 ωA 向 x 轴正方向运动。可见,不同的相位表示不同的运动状态。凡是位移和速度都相同的运动状态,它们所对应的相位相差 2π 或 2π 的整数倍。由此可见,相位是反映周期性特点,并用以描述运动状态的重要物理量。

对于一个简谐振动,如果 A、ω 和 φ 都确定了,就可写出它的运动方程,也就是全部掌握了该谐振动的特征。因此,这三个量叫做描述简谐振动的三个特征量。

4. A 和 φ 的确定

如上所述,谐振动方程 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$ 中的角频率 ω 是由振动系统本身的性质所决定的。在角频率一定的条件下,如果知道在 $t=0$ 时的物体相对平衡位置的位移 x_0 和速度 v_0,就可以确定谐振动的振幅 A 和初相 φ。由(9-4)式和(9-4a)式可得

$$x_0=A\cos\varphi$$

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

由上两式可得

$$\left.\begin{aligned}A&=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}}\\ \varphi&=\arctan\frac{-v_0}{\omega x_0}\end{aligned}\right\}\qquad(9-8)$$

上述结果表明,谐振动的振幅 A 和初相 φ 是由初始条件决定的。

例 9-2 如图 9-1 所示,一轻弹簧的劲度系数 $k=50\ \mathrm{N\cdot m^{-1}}$,今将质量为 2 kg 的物体,从平衡位置向右拉长到 $x_0=0.02$ m 处,并以 $v_0=-\frac{\sqrt{3}}{10}\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 的速度开始运动,试求:(1) 谐振动方程;(2) 物体从初位置运动到第一次经过 $-\frac{A}{2}$ 处时的速度。

解:(1) 要确定物体的谐振动方程,需要确定角频率 ω、振幅 A 和初相 φ 三个物理量。

角频率为

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{50}{2}}\ \mathrm{rad \cdot s^{-1}} = 5\ \mathrm{rad \cdot s^{-1}}$$

振幅和初相由初始条件 x_0 及 v_0 决定,已知 $x_0 = 0.04\ \mathrm{m}$,$v_0 = -\frac{\sqrt{3}}{10}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$,由(9-8)式得

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} = \sqrt{0.02^2 + \frac{(-\sqrt{3}/10)^2}{5^2}}\ \mathrm{m} = 0.04\ \mathrm{m}$$

$$\varphi = \arctan \frac{-v_0}{\omega x_0} = \arctan \frac{\sqrt{3}/10}{5 \times 0.02} = \arctan \sqrt{3}$$

根据题意 x_0 为正,v_0 为负,故 $\varphi = \frac{\pi}{3}$

将 A、ω、φ 代入谐振动方程 $x = A\cos(\omega t + \varphi)$ 中,可得

$$x = 0.04\cos\left(5t + \frac{\pi}{3}\right)(\mathrm{m})$$

(2) 欲求 $x = -\frac{A}{2}$ 处的速度,需先求出物体从初位置运动到第一次抵达 $-\frac{A}{2}$ 处的相位。

由 $x = A\cos(\omega t + \varphi) = A\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)$ 得

$$\omega t + \frac{\pi}{3} = \arccos \frac{x}{A} = \arccos \frac{-A/2}{A} = \arccos\left(-\frac{1}{2}\right) = \frac{2\pi}{3}\left(\text{或}\frac{4\pi}{3}\right)$$

按题意,物体由初位置 $x_0 = 0.02\ \mathrm{m}$ 第一次运动到 $x = -\frac{A}{2}$ 处的相位为 $\omega t = \frac{\pi}{3}$。

将 A、ω 和 ωt 的值代入速度公式,可得

$$v = -A\omega\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) = -0.04 \times 5\sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{3}\right)\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

$$= -\frac{\sqrt{3}}{10}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} = -0.173\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

负号表示速度的方向沿 x 轴负方向。

5. 简谐振动的旋转矢量表示法

简谐振动的旋转矢量表示法可以帮助我们更直观地了解简谐振动的位移和时间的关系以及简谐振动中 A、ω 和 φ 三个物理量的意义,并为后面讨论简谐振动的合成提供简捷的方法。

如图9-6所示，从 Ox 轴的原点 O 作一矢量 $\boldsymbol{A}$，其模等于谐振动的振幅 A，并令 $t=0$ 时，$\boldsymbol{A}$ 与 Ox 轴的夹角等于谐振动的初相 φ，设矢量 $\boldsymbol{A}$ 绕 O 点以大小等于谐振动的角频率 ω 的角速度沿逆时针方向转动。这个矢量 $\boldsymbol{A}$ 称为旋转矢量。经过时间 t 后，$\boldsymbol{A}$ 与 Ox 轴的夹角等于谐振动的相位（$\omega t+\varphi$）。在时刻 t 旋转矢量 $\boldsymbol{A}$ 在 Ox 轴上的投影为 $A\cos(\omega t+\varphi)$，这正是物体在 t 时刻的位移 x。因此，做匀速转动的矢量 $\boldsymbol{A}$，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 点做匀速圆周运动，通常把这个圆称为参考圆。一个简谐振动可以借助于一个旋转矢量来表示。简谐振动的位移 x 等于旋转矢量 $\boldsymbol{A}$ 在 Ox 轴上的投影 $A\cos(\omega t+\varphi)$，简谐振动的振幅 A 等于旋转矢量的长度，简谐振动的角频率 ω 等于旋转矢量转动的角速度，简谐振动的初相 φ 等于初始时刻 $t=0$ 时旋转矢量 $\boldsymbol{A}$ 与 Ox 轴的夹角。

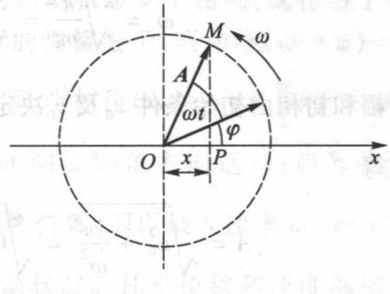


图9-6 简谐振动的旋转矢量图示法

由此可见，简谐振动的旋转矢量表示法把描写简谐振动的三个特征量非常直观地表示出来了。必须注意，旋转矢量本身并不在做谐振动，而是旋转矢量端点在 Ox 轴上的投影点在做谐振动。

利用旋转矢量图，可以很容易地表示两个简谐振动的相位差。

在简谐振动过程中，相位 $\omega t+\varphi$ 随时间线性变化，变化速率为角频率 ω。即在 Δt 时间间隔内，相位变化为 $\Delta\varphi=\omega\Delta t$。把握住这一点，配合旋转矢量图，就可以巧妙地解决一些看来似乎困难的问题。

例9-3 用旋转矢量法求解上例中的初相 φ 及物体从初位置运动到第一次经过 $-\dfrac{A}{2}$ 处的时间。

解：(1) 根据初始条件画出振幅矢量的初始位置如图9-7所示。由图可得

$$\varphi=\arccos\frac{x_0}{A}=\arccos\frac{0.02}{0.04}$$

$$=\arccos\frac{1}{2}=\frac{\pi}{3}$$

(2) 从振幅矢量图9-8可知：从初位置 x_0 运动到第一次经过 $x=-\dfrac{A}{2}$ 处时，旋转矢量转过的角度是 $\pi-2\times\dfrac{\pi}{3}=\dfrac{\pi}{3}$，这就是两者的相位差。由于振幅矢量的角速度为 ω，所以可得到所需的时间

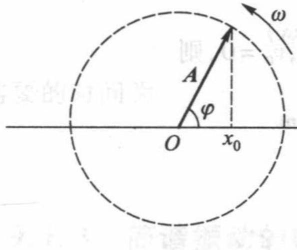


图 9－7

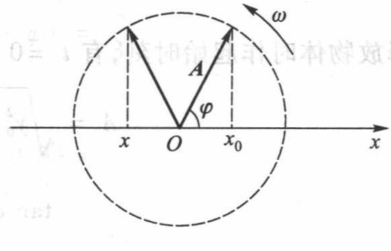


图 9－8

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{\omega} = \frac{\frac{\pi}{3}}{5}\ \text{s} = \frac{\pi}{15}\ \text{s} = 0.209\ \text{s}$$

6. 振动曲线

简谐振动的位置 x 随时间 t 的变化关系曲线叫做振动曲线，又称 $x-t$ 图。$x-t$图是描述简谐振动的一种几何工具，它形象而直观地反映出一个特定的谐振动的运动规律，还可方便地对几个谐振动作出比较。

例 9－4 质量为 0.1 kg 的物体悬于弹簧的下端。把物体从平衡位置向下拉 0.1 m 后释放，测得其周期为 2 s，见图 9－9(a)。试求：

(1) 物体的振动方程；

(2) 物体首次经过平衡位置时的速度；

(3) 第二次经过平衡位置上方 5 cm 处时的加速度；

(4) 物体从平衡位置下方 0.05 m 处向上运动到平衡位置上方 0.05 m 处所需的最短时间。

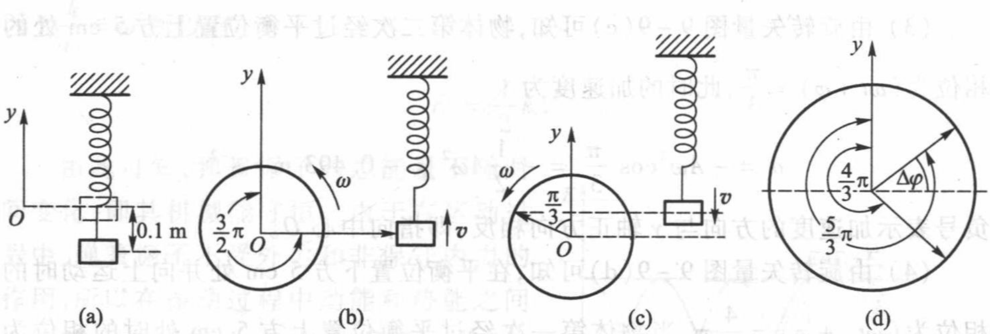


图 9－9

解：以弹簧挂上物体后的平衡位置为坐标原点，向上作为 y 轴的正方向。

(1) 已知 $T = 2$ s，则

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \pi \text{ rad/s}$$

以释放物体时作起始时刻，有 $t=0$ 时，$y_0=-0.1$ m，$v_0=0$，则

$$A = \sqrt{y_0^2 + \left(\frac{v_0}{\omega}\right)^2} = 0.1 \text{ m}$$

$$\tan\varphi = \frac{v_0}{y_0\omega} = 0$$

所以

$$\varphi = 0 \quad 或 \quad \varphi = \pi$$

因为 y_0 为负值，故

$$\varphi = \pi$$

所以弹簧振动的振动方程为

$$y = 0.1\cos(\pi t + \pi)(\text{m})$$

若向下为 y 轴的正方向，y_0 为正值，φ 应取 0，弹簧的振动方程则为

$$y = 0.1\cos \pi t(\text{m})$$

可见，对于同一个简谐振动，选取不同的坐标系，将会有不同形式的运动方程。

(2) 由旋转矢量图 9-9(b) 可知，物体首次经过平衡位置的相位为 $(\omega t+\varphi)=\frac{3}{2}\pi$，此时的速度为

$$v = -A\omega\sin\frac{3}{2}\pi = A\omega = 0.314 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

速度的方向向上，与坐标正方向相同。

(3) 由旋转矢量图 9-9(c) 可知，物体第二次经过平衡位置上方 5 cm 处的相位为 $(\omega t+\varphi)=\frac{\pi}{3}$，此时的加速度为

$$a = -A\omega^2\cos\frac{\pi}{3} = -\frac{1}{2}A\omega^2 = -0.493 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

负号表示加速度的方向与 y 轴正方向相反，即指向中心 O。

(4) 由旋转矢量图 9-9(d) 可知，在平衡位置下方 5 cm 处并向上运动时的相位为 $(\omega t_1+\varphi)=\frac{4}{3}\pi$，当物体第一次经过平衡位置上方 5 cm 处时的相位为 $(\omega t_2+\varphi)=\frac{5}{3}\pi$，在此过程中物体经历的相位变化为

$$\Delta\varphi = \frac{5}{3}\pi - \frac{4}{3}\pi = \frac{1}{3}\pi$$