高等学校试用教材

普通物理学

第三册

（第三版）

程守洙
江之永 主编

人民教育出版社

高等学校试用教材

普通物理学

第三册

(第三版)

程守洙
江之永 主编

人民教育出版社

本书1961年8月第一版，1964年6月第二版，1979年11月第三版．全书分三册．第三版与前两版相比，内容变动较大，很多章节是重新编写的．

本书可作高等工业院校各专业的物理课教材，也可供综合大学、高等师范院校非物理系的物理课教学参考使用．

本书责任编辑：汤发宇．

高等学校试用教材

普 通 物 理 学

第 三 册

程守洙 江之永 主编

*

人民教育出版社出版
新华书店上海发行所发行
上海商务印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 13 8/16 插页 1 字数 325,000
1961年8月第1版 1979年11月第3版
1980年6月第1次印刷
印数 1—400,000

书号 13012·0397 定价 1.00 元

本书中物理量的符号及单位

量的名称	符号	单位名称	单位代号 中文	单位代号 国际	量纲	备注
振幅	A	米	米	m	L	
周期	T	秒	秒	s	T	
频率	ν, f	赫兹	赫	Hz	T^{-1}	
圆频率	ω	1 每秒	1/秒，秒$^{-1}$	s^{-1}	T^{-1}	
位相	ϕ	—	—	—	—	
波长	λ	米	米	m	L	
波数	$\tilde{\nu}$	1 每米	1/米，米$^{-1}$	m^{-1}	L^{-1}	
波速	u, c	米每秒	米/秒	m/s	LT^{-1}	
波的强度	I	瓦特每平方米	瓦/米^2	W/m^2	MT^{-3}	
坡印廷矢量	$\mathbf{S}$	瓦特每平方米	瓦/米^2	W/m^2	MT^{-3}	
声压	p	帕斯卡	帕	Pa	$ML^{-1}T^{-2}$	
声强级	L_I	—	—	—	—	常用贝耳，分贝(db)为单位
折射率	n	—	—	—	—	
相对折射率	n_{21}	—	—	—	—	
单色发射本领	e_λ					
单色吸收系数	a_λ	—	—	—	—	
总发射本领	E	瓦特每平方米	瓦/米^2	W/m^2	MT^{-3}	
逸出功	ϕ, A	焦耳	焦	J	ML^2T^{-2}	常用电子伏特(eV)为单位
波函数	Ψ					
几率密度	$\Psi\Psi^*$	每立方米	米$^{-3}$	m^{-3}	L^{-3}	
质量数	A	—	—	—	—	
电荷数	Z	—	—	—	—	
主量子数	n	—	—	—	—	
副量子数	l	—	—	—	—	
磁量子数	m_l	—	—	—	—	
自旋量子数	s	—	—	—	—	
自旋磁量子数	m_s	—	—	—	—	
宇称	P	—	—	—	—	
同位旋	I	—	—	—	—	

目　　录

第四篇　振动和波动

第十五章　振动 ……………………………………………… 1

§15-1　简谐振动 ……………………………………………… 2

§15-2　谐振子 ……………………………………………… 10

§15-3　阻尼振动 ……………………………………………… 18

§15-4　受迫振动　共振 ……………………………………………… 21

§15-5　同方向的简谐振动的合成 ……………………………………………… 25

§15-6　相互垂直的简谐振动的合成 ……………………………………………… 31

§15-7　振动的谱 ……………………………………………… 36

§15-8　电磁振荡 ……………………………………………… 40

习题 ……………………………………………… 45

第十六章　机械波 ……………………………………………… 51

§16-1　机械波的产生和传播 ……………………………………………… 51

§16-2　波的传播速度　波长　波的周期和频率 ……………………………………………… 57

§16-3　简谐波　波动方程 ……………………………………………… 63

§16-4　波的能量　能流密度 ……………………………………………… 73

§16-5　惠更斯原理 ……………………………………………… 79

§16-6　波的迭加原理　波的干涉　驻波 ……………………………………………… 83

§16-7　多普勒效应 ……………………………………………… 93

§16-8　声波、超声波、次声波 ……………………………………………… 98

习题 ……………………………………………… 105

第十七章　电磁波 ……………………………………………… 111

§17-1　电磁波的波动方程 ……………………………………………… 112

§17-2　电磁波的能量　坡印廷矢量 ……………………………………………… 120

§17-3　振荡偶极子辐射的电磁波 ……………………………………………… 124

§17-4　电磁波谱 ……………………………………………… 133

§17-5 电磁波的反射和折射 ……137
习题 ……144
第十八章 波动光学 ……147
§18-1 光源、光的单色性和相干性 ……148
§18-2 相干光的获得 ……153
§18-3 多光束的干涉 光栅 ……159
§18-4 薄膜干涉 ……165
§18-5 干涉仪 ……177
§18-6 惠更斯-菲涅耳原理 单缝衍射 ……184
§18-7 光学仪器的分辨本领 ……192
§18-8 X射线的衍射 ……197
§18-9 全息照相原理 ……201
§18-10 自然光和偏振光 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律 ……208
§18-11 反射和折射时光的偏振 ……214
§18-12 光的双折射现象 ……218
§18-13 椭圆偏振光和圆偏振光 偏振光的干涉 ……225
§18-14 人为双折射现象 ……231
§18-15 旋光现象 ……235
§18-16 液晶 ……239
§18-17 非线性光学简介 ……243
习题 ……248

第五篇 量子物理

第十九章 波和粒子 ……257
§19-1 热辐射 普朗克量子假说 ……257
§19-2 光电效应 爱因斯坦的光子理论 ……268
§19-3 康普顿效应 ……275
§19-4 德布罗意波 波粒二象性 ……280
习题 ……289
第二十章 量子力学基础 ……292
§20-1 玻尔氢原子理论及其缺陷 ……292

§ 20-2 测不准关系式 微观粒子的古典理论的应用范围 …………301
§ 20-3 量子力学的基本概念 薛定谔方程 ……………………………305
§ 20-4 势阱中的粒子 势垒 ……………………………………………309
§ 20-5 谐振子 氢原子 …………………………………………………318
§ 20-6 电子的自旋 泡利原理 原子的壳层结构 ……………………326
§ 20-7 激光 ………………………………………………………………335
§ 20-8 固体的能带结构 …………………………………………………344
§ 20-9 半导体的导电机构 半导体的特性和应用 ……………………349
§ 20-10 电子气 电导性 接触电势差……………………………………355
§ 20-11 超导性……………………………………………………………360
习题 ……………………………………………………………………362

第二十一章 原子核和基本粒子简介 ……………………………365

§ 21-1 原子核的电荷和质量 ……………………………………………365
§ 21-2 原子核的大小和形状 ……………………………………………367
§ 21-3 原子核的组成 ……………………………………………………369
§ 21-4 原子核的结合能 …………………………………………………373
§ 21-5 核力和介子 ………………………………………………………377
§ 21-6 核子和核的自旋与磁矩 …………………………………………381
§ 21-7 反粒子、奇异粒子和基本粒子……………………………………386
§ 21-8 对称性和守恒定律 ………………………………………………392
§ 21-9 宇称 ………………………………………………………………395
§ 21-10 同位旋……………………………………………………………399
§ 21-11 基本粒子模型……………………………………………………402
习题 ……………………………………………………………………404

结束语：回顾与展望 …………………………………………………407

附录

I. 常用的光学数据 ……………………………………………………414
II. 化学元素周期表
III. 同位素表(节录) ……………………………………………………415
IV. 常用物理基本常数表 ………………………………………………419

习题答案 ………………………………………………………………420

(本册可选择的内容未加星号(＊)，请采用此书的教师自行确定内容的取舍.)

第四篇　振动和波动

第十五章　振　　动

物体在一定位置附近所作的来回往复的运动称为**机械振动**. 这种振动现象在自然界是广泛存在的. 例如，摆的运动，气缸中活塞的运动，一切发声体的运动，机器开动时各部分的微小颤动等都是机械振动. 在不同的振动现象中，最基本最简单的振动是简谐振动. 一切复杂的振动都可以分解为若干个简谐振动，这就是说，可把复杂的振动看作若干个简谐振动的合成. 本章从讨论简谐振动的基本规律入手，进而讨论振动的合成与分解问题.

振动是声学、地震学、建筑力学、机械原理、造船学等所必需的基础知识，也是光学、电学、交流电工学、无线电技术以及原子物理学等所不可缺少的基础. 这是因为除机械振动外，自然界中还存在很多类似于振动的现象. 广义地说，任何一个物理量(如物体的位置矢量、电流、电场强度或磁场强度等)在某个定值附近反复变化，都可称为振动. 为此，我们在本章之末讨论了电磁振荡，以便突出振动的共性.

应该指出，振动和波动的关系是十分密切的. 振动是产生波动的根源，波动是振动的传播. 在本篇中，我们将依次探讨机械波、电磁波和光波(光波也是电磁波)的基本现象和基本规律，并为下篇介绍物质波的概念提供基础. 所以，把振动作为本篇的第一章，是很自然的.

§15-1 简谐振动

振动的一般概念 常见的机械振动往往是周期性的，也就是说每隔一个固定的时间，运动状态就完全重复一次．这固定时间 T 称为振动的周期．每秒内的振动的次数称为频率．频率常用 ν（或用 f）来表示，单位为赫兹．按照定义可知，周期和频率互成倒数，即 $\nu=\frac{1}{T}$．振动也可能是非周期性的，例如来回振动一次所需的时间前后不同，或者各次振动的幅度有变化，以致每一次振动都不能与上一次振动完全重复．

质点作机械振动时，来回往复的运动轨道，在最简单的情况下，往往在一条直线上，这种振动称为直线振动．在复杂的振动情况下，运动轨道可能是平面曲线甚至是空间曲线．以后将看到，平面振动或空间振动，都可视为几个不同方向的直线振动的迭加．

最简单的周期性直线振动是简谐振动．可以证明，任何复杂的振动，都可以是由几个或很多个简谐振动合成的．因此简谐振动是振动学的最基本的内容．

任何作机械振动的物体，都始终徘徊在某一定位置的附近，这个一定位置常称为平衡位置．为什么物体不能远离平衡位置而去呢？从动力学的观点来分析，这一事实表明，振动物体不在平衡位置时，必定要受到一个指向平衡位置的回复力的作用，正是这种回复力促使离开了平衡位置的物体重新回到平衡位置．在返回平衡位置的过程中，振动物体获得了速度．所以物体到达平衡位置时，虽然回复力已变为零，但由于惯性，物体不会停留在平衡位置上，它将重新离开平衡位置，从而使振动继续下去．由此可见，机械振动的成因既离不开物体所受的回复力，也离不开物体所具有的惯性．至于回复力的具体形式，将在具体问题中去说明．

简谐振动及其表式　在周期性直线振动中，最基本和最重要的是简谐振动．我们知道，任一直线运动都可以用位移的时间函数来表征，例如匀速直线运动的方程是 $x=x_0+v(t-t_0)$．现在，我们要讨论的是表征简谐振动的方程．

在振动的研究中，我们常用振动质点相对于平衡位置的位移来表示振动质点的位置．一个作直线振动的质点，如果取其平衡位置为原点，取其运动轨道沿 X 轴，那么当质点离开平衡位置的位移 x 随时刻 t 而变化的规律，遵从余弦函数或正弦函数(本书采用余弦函数)时，

$$x=A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t+\phi\right) \tag{15-1}$$

这一直线振动便是简谐振动．考虑到三角函数和复指数之间存在着 $(\cos\theta+i\sin\theta)=e^{i\theta}$ 的关系，所以上式也可表示为

$$x=Ae^{i\left(\frac{2\pi}{T}t+\phi\right)} \tag{15-1a}$$

而取其实数部分．用复指数形式表示振动，其优点是运算比较方便．式(15-1)中，A 表示质点离开平衡位置 $(x=0)$ 的最大位移的绝对值，叫做振幅．如果用 $t+T$、$t+2T$、$t+3T$、… 等代替上式中的 t，所得 x 的量值不变，这就是说每隔一段时间 T，运动就完全重复一次，所以上式中的 T 就是简谐振动的周期．振动学中常把 2π 秒内的振动周期数称为圆频率，以 ω 表示．根据这个定义，圆频率 ω 与频率 ν 以及周期 T 三者之间的关系是

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

式(15-1)也可写成

$$x=A\cos(\omega t+\phi) \tag{15-3}$$

式中 $(\omega t+\phi)$ 角叫做简谐振动的周相角或位相．

在振动或波动的研究中，位相的概念很重要．质点的振动状态当然可以用位置和速度来表征，但常用的却是一种更方便的方

法，即用位相来表征振动状态．质点在振动一周期之内所经历的状态没有一个是相同的，这相当于位相经历着从0到2π的变化．图15-1画出了简谐振动的位移时间曲线，从图中可清楚地看出这一点．例如在a、b两个时刻，虽然质点的位移相同，但并不是相同的状态，因为它的速度并不相同．所以，质点在a、b时刻的位相也不同．要寻求和a时刻完全相同的状态，只有在另一个周期中去找，如图中c时刻的情况．质点在时刻a和c的振动状态完全相同，这就是说，不仅位移相同，而且速度也相同．对一个以一定频率作简谐振动的质点来说，凡是位移和速度都相同的状态，它们所相应的位相之间相差2π或2π的整数倍，每相差2π在时间上相当于相隔一个周期．由此可见，位相是决定质点在时刻t时的运动状态（位置和速度）的重要物理量．用位相表征质点振动状态的优点是它充分反映了振动的周期性这个特征．ϕ角表示$t=0$时的位相，称为**初位相**．在图15-1中，不难看出，振幅A是最大位移的绝对值，周相T是两个相邻的同状态的x值之间的时间间隔，而$t=0$时的位移则是由初位相ϕ决定的．

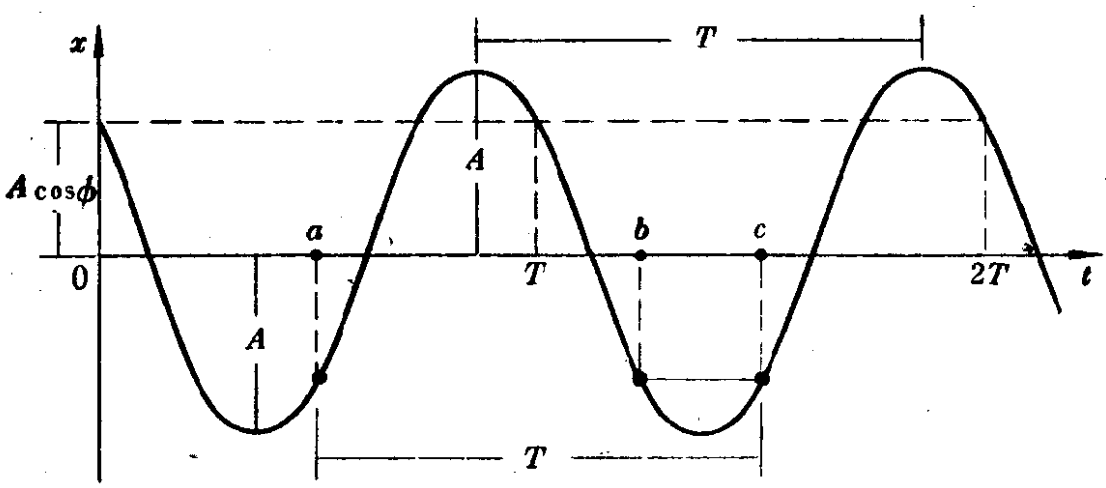

图15-1　简谐振动的位移时间曲线

此外，我们也要进一步认识存在于两个或许多个同周期简谐振动之间的在“位相”上的差异．图15-2a中，画出了同振幅、同频

率的两个简谐振动的位移时间曲线. 应该注意，简谐振动(1)和(2)具有恒定的位相差 $\phi'-\phi$，它们的变化在步调上相差一段时间 $\Delta t=(\phi'-\phi)/\omega$.

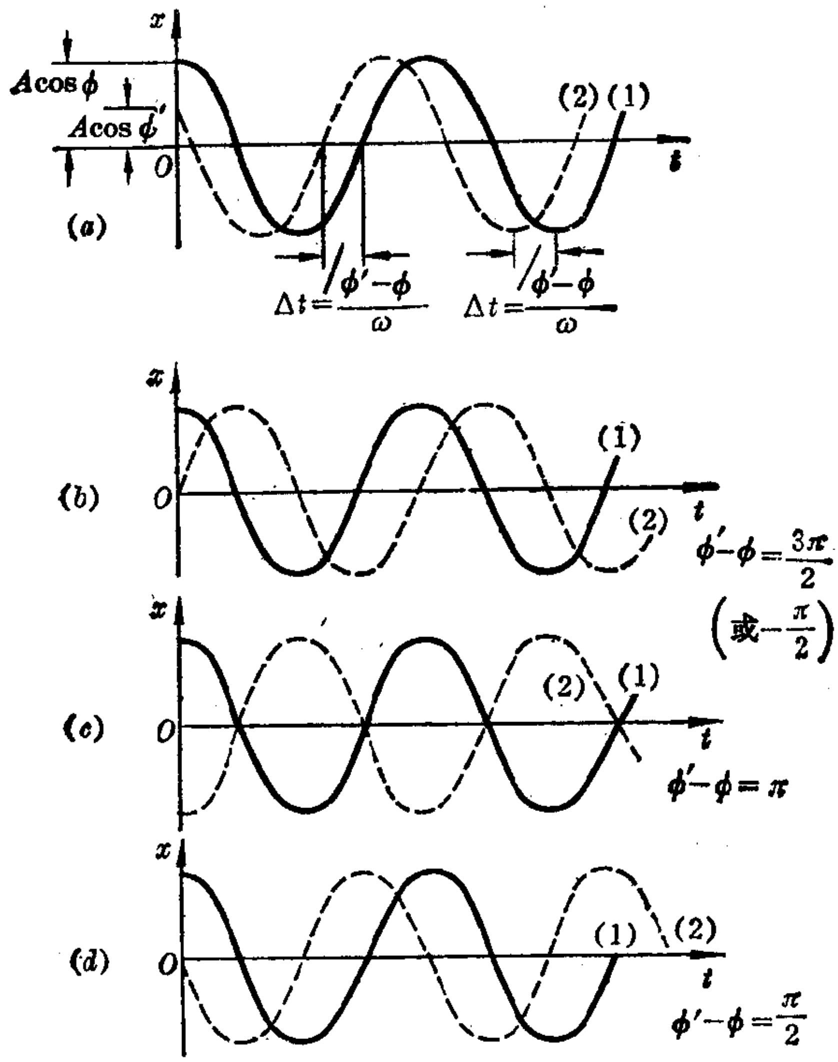

图 15-2 两个同振幅同频率而不同初位相的简谐振动的位移时间曲线

位相差 $\phi'-\phi$ 可正可负，相应地我们常说振动(2)比振动(1)超前或落后. 当 $\phi'=\phi$ 时，我们称这两个振动为同相或同步. 当 $\phi'-\phi=\pi$ 时，两个振动相差半周期，称为反相的简谐振动. 图15-2 b、c、d 表示几种具有不同位相差的简谐振动.

简谐振动的矢量图表示法 为了直观地领会简谐振动表达式中 A、ω 和 ϕ 三个物理量的意义，并为后面讲述振动迭加提供简洁的方法，我们介绍简谐振动的矢量表示法.

如图 15-3，在图平面内画坐标轴 OX，由原点 O 作一个矢量 $\overrightarrow{OM}$，矢量的长度等于振幅 A，这个矢量也称为 $\mathbf{A}$，以数值等于圆频率 ω 的角速度，在图平面内绕 O 点作逆时针匀速转动．$t=0$ 时，矢量 $\overrightarrow{OM}$ 与 X 轴之间的夹角等于简谐振动的初位相 ϕ；在时刻 t，$\overrightarrow{OM}$ 与 X 轴之间的夹角等于简谐振动在该时刻的位相 $(\omega t+\phi)$；这时矢量 $\overrightarrow{OM}$ 的末端在 X 轴上的投影点 P 的位移是

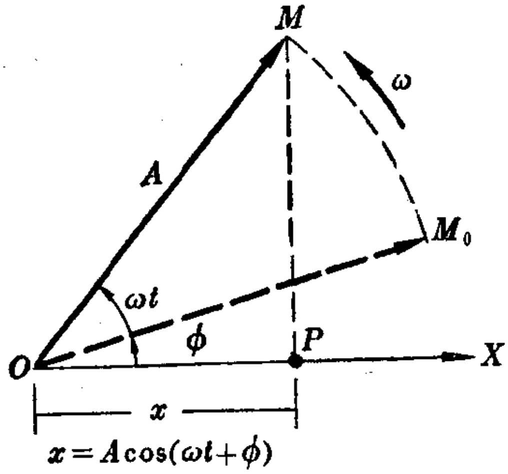

图 15-3　简谐振动的矢量图表示法

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

此式与式(15-3)相同．可见，矢量 $\overrightarrow{OM}$ 作匀速转动时，其端点 M 在 X 轴上的投影点 P 的运动是简谐振动．在矢量 $\overrightarrow{OM}$ 的转动过程中，M 点作匀速率圆周运动，通常把这个圆称为参考圆．矢量 $\overrightarrow{OM}$ 转一周所需的时间与简谐振动的周期相等．

由此可见，简谐振动的矢量图示法把描写简谐振动的三个重要物理量非常直观地表示出来了．矢量的长度即振动的振幅，矢量旋转的角速度即振动的圆频率，矢量与 X 轴的夹角为振动的位相，而 $t=0$ 时矢量与 X 轴的夹角就是振动的初位相．

〔例题 15-1〕　两个质点在 OY 轴方向上作简谐振动，两质点对各自的平衡位置的位移 y 分别为

$$y_1=A\sin(\omega t+\phi)$$

$$y_2=A\cos(\omega t+\phi)$$

问：(1)这两个振动之间的位相差是多少？(2) 在参考圆上怎样表示这两个振动？

〔解〕　在参考圆上，动点 M 在任一直径上的投影点 P 总是作简谐振动的．现设两振动分别由旋转矢量 $\overrightarrow{OM_1}$ 和 $\overrightarrow{OM_2}$ 表示，亦

即 M_1 和 M_2 在 OY 轴上的投影点 P_1 和 P_2 的运动分别代表这两个振动. y_2 已按余弦函数写出，其初位相 $\phi_2=\phi$，设 M_2 的初始位置 M_{20} 如图15-4中所示，即 $\angle YOM_{20}=\phi_2=\phi$. 把 y_1 改写作

$$y_1=A\cos\left[\frac{\pi}{2}-(\omega t+\phi)\right]$$
$$=A\cos\left(\omega t+\phi-\frac{\pi}{2}\right)$$

可看出其初位相

$$\phi_1=\phi-\frac{\pi}{2}=-\left(\frac{\pi}{2}-\phi\right)$$

所以 M_1 的初始位置 M_{10} 应如图所示. 两振动的位相差

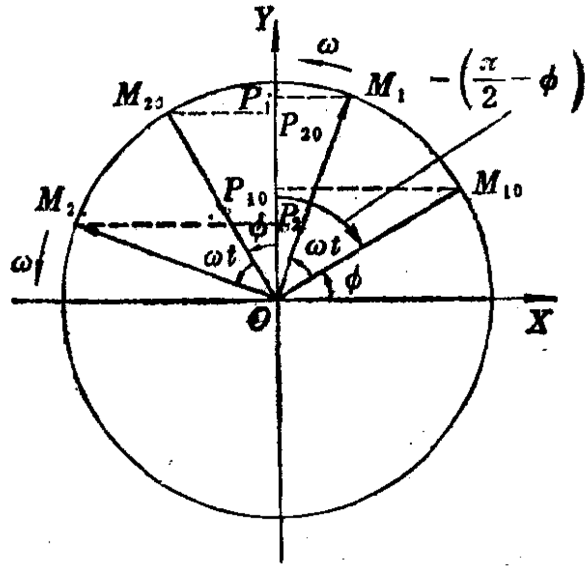

图15-4 沿 Y 轴方向的两个简谐振动的矢量图表示

$$\phi_2-\phi_1=\frac{\pi}{2}$$

亦即振动2比振动1超前 $\frac{\pi}{2}$ (或 $90°$). 这在参考圆中可以清楚地看到，M_1 和 M_2 均以匀角速度 ω 逆时针转动，M_2 总是在 M_1 之前 $90°$.

简谐振动的速度和加速度 我们把式(15-3)对时间求导数，即得简谐振动的速度为

$$v=\frac{dx}{dt}=-\omega A\sin(\omega t+\phi) \qquad (15\text{-}4)$$

上式也可写成

$$v=v_m\cos\left(\omega t+\phi+\frac{\pi}{2}\right) \qquad (15\text{-}5)$$

式中 $v_m=\omega A$，称为速度振幅.

把速度对时间求导数，即得加速度为

$$a=\frac{dv}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega^2A\cos(\omega t+\phi) \qquad (15\text{-}6)$$

或 $$a=\omega^2A\cos(\omega t+\phi\pm\pi)=a_m\cos(\omega t+\phi\pm\pi) \tag{15-6a}$$

式中 $a_m=\omega^2A$ 称为加速度振幅. 由式(15-5)和式(15-6a)可知, 作简谐振动的质点, 它的速度和加速度也是时间的余弦函数, 其速度振幅和加速度振幅分别为 $v_m=\omega A$ 和 $a_m=\omega^2A$, 而周期和位移的周期相等, 但速度、加速度和位移三者具有不同的位相. 将式(15-5)、式(15-6a)和位移的表达式(15-3)相比较, 除振幅不同外, 速度的位相比位移的位相多一项 $\frac{\pi}{2}$. 我们称速度的位相比位移的位相超前 $\frac{\pi}{2}$; 加速度的位相则比位移的位相超前 π (或落后 π), 也就是说加速度与位移反相.

将式(15-3)与式(15-6)相比, 我们得到一个重要的结果:

$$a=-\omega^2x \tag{15-7}$$

或

$$\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega^2x, \quad \frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x=0 \tag{15-7a}$$

上式说明简谐振动的加速度和位移恒成正比而反向. 这是简谐振动的运动学特征.

最后应该指出, 如果一个物理量随时间而变化的规律遵从余弦函数(或正弦函数)的关系, 那么广义地说, 这物理量就在作简谐振动. 不管这物理量是位移、速度、角位移等机械量, 还是电流、电势差、电场强度等电学量, 只要它们的变化符合简谐振动的规律, 尽管其本质有所区别, 但是简谐振动随时间而变化的数学规律却是普遍适用的.

〔**例题 15-2**〕 一物体沿 X 轴作简谐振动, 振幅为 12 厘米, 周期为 2 秒. 当 $t=0$ 时, 位移为 6 厘米, 且向 X 轴正方向运动. 求: (1)初位相, (2) $t=0.5$ 秒时物体的位置、速度和加速度, (3)在 $x=-6$ 厘米处, 且向 X 轴负方向运动时, 物体的速度和加速度, 以及从这一位置回到平衡位置所需的时间.

〔解〕 (1) 设这简谐振动的表式为

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

现在 $A=12$ 厘米, $T=2$ 秒, $\omega=\frac{2\pi}{T}=\pi$ 秒$^{-1}$. $t=0$ 时,由

$$x=6=12\cos(0+\phi)$$

求得 $$\cos\phi=\frac{1}{2},\quad \phi=\pm\frac{\pi}{3}$$

因这时物体向 X 轴正方向运动,所以应取 $\phi=-\frac{\pi}{3}$.

(2) 由(1)的结果得到

$$x=12\cos\left(\pi t-\frac{\pi}{3}\right)$$

$$v=\frac{dx}{dt}=-12\pi\sin\left(\pi t-\frac{\pi}{3}\right)$$

$$a=\frac{dv}{dt}=-12\pi^2\cos\left(\pi t-\frac{\pi}{3}\right)$$

在 $t=0.5$ 秒时,从上列各式求得

$$x=12\cos\left(\pi\times0.5-\frac{\pi}{3}\right)=12\cos\frac{\pi}{6}=6\sqrt{3}=10.4\text{ 厘米}$$

$$v=-12\pi\sin\left(\pi\times0.5-\frac{\pi}{3}\right)=-6\pi=-18.9\text{ 厘米/秒}$$

$$a=-12\pi^2\cos\left(\pi\times0.5-\frac{\pi}{3}\right)=-6\pi^2\sqrt{3}=-103\text{ 厘米/秒}^2$$

(3) 当 $x=-6$ 厘米,设该时刻为 t_1, 得

$$-6=12\cos\left(\pi t_1-\frac{\pi}{3}\right),\quad \cos\left(\pi t_1-\frac{\pi}{3}\right)=-\frac{1}{2}$$

$$\pi t_1-\frac{\pi}{3}=\frac{2\pi}{3}\left(\text{因物体向}X\text{轴负向运动,所以不取}\frac{4\pi}{3}\right)$$

求得 $$t_1=1\text{ 秒}$$

此时速度和加速度分别为

$$v=-12\pi\sin\left(\pi-\frac{\pi}{3}\right)=-6\sqrt{3}\pi=-32.7\text{ 厘米/秒}$$

$$a=-12\pi^2\cos\left(\pi-\frac{\pi}{3}\right)=6\pi^2=59.2\ 厘米/秒^2$$

从 $x=-6$ 厘米处回到平衡位置，意味着回到位相为 $\frac{3\pi}{2}$ 处，设相应的时刻为 t_2，则由

$$\pi t_2-\frac{\pi}{3}=\frac{3\pi}{2}$$

求得

$$t_2=\frac{11}{6}\ 秒$$

所以从 $x=-6$ 厘米处回到平衡位置所需时间为

$$t_2-t_1=\frac{11}{6}-1=\frac{5}{6}\ 秒$$

§15-2 谐 振 子

上面，我们说明了简谐振动的运动学的特征．现在，我们要从动力学的观点分析几个具体的例子，从而认识并明确振动物体作简谐振动的条件．这就是：当物体所受的回复力与位移成正比而反向时，物体所作的振动是简谐振动．

在振动学中，也常引用“振动系统”这一名称．实际上，“振动系统”的含义比较广泛．它所指的对象可以任意选定，或视具体情况而选定．一个振动系统，如果指单个的振动物体或质点，那是最简单的了，如果指许多个、相互之间有弹性力连系的物体组，那就是一个很复杂的系统了．作简谐振动的物体，通常称为谐振子．这个物体，连同对它施加回复力的物体一起组成的振动系统，通常称为谐振系统．

①②③④⑤⑥

弹簧振子 在研究振动时，人们提出了弹簧振子的模型．我们知道火车、汽车的车厢是安装在弹簧上的，这个车厢和弹簧组成的振动系统可简化成一个系在弹簧一端的重物 由于重物质量比弹簧的大得多，因此，相对地说，可令弹簧的质量为零．这样一个