



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

物 理 学

下 册 第 四 版

东南大学等七所工科院校 编
马文蔚 解希顺 谈漱梅 柯景凤 改编



高 等 教 育 出 版 社
HIGHER EDUCATION PRESS

(京)112号

图书在版编目(CIP)数据

物理学 下册/东南大学等七所工科院校编;马文蔚等
改编. - 北京:高等教育出版社,1999
面向21世纪课程教材
ISBN 7-04-007465-6

I. 物… II. ①东… ②马… III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第37190号

物理学 下册 第四版
东南大学等七所工科院校 编
马文蔚 解希顺 谈漱梅 柯景凤 改编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街55号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 北京外文印刷厂

纸张供应 山东高唐纸业集团总公司

开 本 787×960 1/16

版 次 1978年6月第1版

1999年11月第4版

印 张 23.25

印 次 1999年11月第1次印刷

字 数 430 000

定 价 22.10元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

04
98-4

413052

内 容 简 介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材、普通高等教育“九五”国家级重点教材和教育部高等学校工科物理课程教学指导委员会“九五”规划教材.本书是在原第三版的基础上修订而成的,在修订过程中注意保持了原书体系结构合理、深广度适当、注意教法、分量适中、适应面宽等特点,同时吸取了近年来国内外出版的物理教材的优点,以现代的观点来处理经典物理的体系结构及其内容选取,精选并加强近代物理部分的内容,适当介绍当代物理的成就以及对工程技术的深远影响.全书共分三册,上册包括力学和热物理学;中册包括电磁学;下册包括波动过程、近代物理学和物理学与新技术等内容.

本书可作为高等学校工科各专业的教科书,也可供文理科有关专业选用和社会读者阅读.

波动过程和近代物理的量 and 单位

量		单 位		换算关系
名称	符号	名称	符号	
周 期	T	秒	s	
频 率	$f(\nu)$	赫 兹	Hz	
角 频 率	ω	弧度每秒	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$\omega = 2\pi\nu$
波 长	λ	米	m	
角 波 数	k	每米	m^{-1}	$k = \frac{2\pi}{\lambda}$
光 速	c	米每秒	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
振动位移	x, y	米	m	
振动速度	v	米每秒	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
声 强	I	瓦特每平方米	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	
辐射强度	I	瓦特每平方米	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	
辐射能密度	$w(u)$	焦耳每立方米	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$	
原子序数	Z			N, A, Z 无量纲,
中 子 数	N			$A = N + Z$
核 子 数	A			
电子静质量	m_e	千克	kg	
质子静质量	m_p	千克	kg	
中子静质量	m_n	千克	kg	
元 电 荷	e	库仑	C	
普朗克常量	h	焦耳秒	$\text{J} \cdot \text{s}$	
玻尔半径	r_1	米	m	
里德伯常量	R	每米	m^{-1}	
轨道角动量量子数	l			$l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$
自旋角动量磁量子数	m_s			$m_s = \pm \frac{1}{2}$
主量子数	n			$n = 1, 2, \dots$
轨道角动量磁量子数	m_l			$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$
波 函 数	ψ			

目 录

第十四章 机械振动	1
14-1 简谐运动.....	1
14-2 简谐运动中的振幅 周期 频率和相位.....	3
一 振幅	4
二 周期	4
三 相位	4
四 常数 A 和 φ 的确定	5
14-3 旋转矢量.....	6
14-4 单摆和复摆	12
一 单摆	12
二 复摆	13
三 大角度摆	13
14-5 简谐运动的能量	15
14-6 简谐运动的合成	17
一 两个同方向同频率简谐运动的合成.....	17
二 多个同方向同频率简谐运动的合成.....	19
三 两个同方向不同频率简谐运动的合成.....	20
四 两个相互垂直的同频率的简谐运动的合成	23
五 两个相互垂直的不同频率的简谐运动的合成	26
14-7 阻尼振动 受迫振动 共振	26
一 阻尼振动	26
二 受迫振动	30
三 共振	31
问题.....	35
习题.....	37
第十五章 机械波	42
15-1 机械波的几个概念	42
一 机械波的形成	42
二 横波与纵波	42
三 波长 波的周期和频率 波速	44
四 波线 波面 波前.....	47
15-2 平面简谐波的波函数	48

一	平面简谐波的波函数	48
二	波函数的物理含义	50
三	波动微分方程	55
15-3	波的能量	56
一	波动能量的传播	56
二	能流和能流密度	58
15-4	惠更斯原理 波的衍射、反射和折射	59
一	惠更斯原理	59
二	波的衍射	60
三	波的反射和折射	60
15-5	波的干涉	62
一	波的叠加原理	62
二	波的干涉	63
15-6	驻波	67
一	驻波的产生	67
二	驻波方程	68
三	相位跃变	71
四	驻波的能量	71
五	振动的简正模式	71
15-7	声波 超声波 次声波	73
一	声波	73
二	超声波	76
三	次声波	78
15-8	多普勒效应	78
一	波源不动,观察者相对介质以速度 v_0 运动	79
二	观察者不动,波源相对介质以速度 v_s 运动	79
三	波源与观察者同时相对介质运动	80
	问题	83
	习题	84
第十六章 电磁振荡和电磁波		88
16-1	电磁振荡	88
一	振荡电路 无阻尼自由电磁振荡	88
二	无阻尼电磁振荡的振荡方程	90
三	无阻尼自由电磁振荡的能量	91
16-2	电磁波	92
一	电磁波的产生与传播	93
二	电磁波的特性	97
三	电磁波的能量	97

四 电磁波谱	99
* 五 从麦克斯韦电磁场方程导出平面电磁波的波动微分方程	100
问题	103
习题	103
第十七章 波动光学	106
17-1 相干光	107
17-2 杨氏双缝干涉实验 双镜 劳埃德镜	109
一 杨氏双缝干涉实验	109
* 二 杨氏双缝干涉的光强分布	112
* 三 缝宽对干涉条纹的影响 空间相干性	112
四 双镜	113
五 劳埃德镜	114
17-3 光程 薄膜干涉	116
一 光程	116
二 透镜不引起附加的光程差	117
三 薄膜干涉	118
* 四 等倾干涉	121
17-4 劈尖 牛顿环	121
一 劈尖	121
二 牛顿环	125
17-5 迈克耳孙干涉仪 时间相干性	127
一 迈克耳孙干涉仪	127
* 二 时间相干性	129
17-6 光的衍射	130
一 光的衍射现象	130
二 惠更斯-菲涅耳原理	131
三 菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射	132
17-7 单缝衍射	132
17-8 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	139
17-9 衍射光栅	142
一 光栅	142
二 光栅衍射条纹的形成	144
三 衍射光谱	146
17-10 X射线的衍射	148
* 17-11 全息照相简介	151
17-12 光的偏振性 马吕斯定律	154
一 自然光 偏振光	154
二 偏振片 起偏与检偏	155

三 马吕斯定律	156
17-13 反射光和折射光的偏振	157
17-14 双折射 偏振棱镜	159
一 双折射的寻常光和非常光	159
二 尼科耳棱镜	161
三 惠更斯原理对双折射现象的解释	162
四 1/4 波片和半波片	163
五 人为双折射现象	164
17-15 旋光现象	165
17-16 偏振光的干涉	166
一 椭圆偏振光和圆偏振光	166
二 偏振光的干涉	167
17-17 非线性光学现象	169
一 倍频现象	169
二 混频现象	170
三 自聚焦现象	170
问题	171
习题	174
第十八章 相对论	179
18-1 伽利略变换式 牛顿的绝对时空观	180
一 伽利略变换式 经典力学的相对性原理	180
二 经典力学的绝对时空观	182
18-2 迈克耳孙-莫雷实验	182
18-3 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换式	185
一 狭义相对论的基本原理	185
二 洛伦兹变换式	186
三 洛伦兹速度变换式	189
18-4 狭义相对论的时空观	190
一 同时的相对性	190
二 长度的收缩	191
三 时间的延缓	194
四 关于时间延缓和长度收缩的实验证明	195
18-5 光的多普勒效应	196
18-6 相对论性动量和能量	199
一 动量与速度的关系	199
二 狭义相对论力学的基本方程	201
三 质量与能量的关系	202
四 质能公式在原子核裂变和聚变中的应用	205

五 动量与能量的关系	207
18-7 广义相对论简介	209
一 广义相对论的等效原理	209
二 广义相对论时空特性的几个例子	211
问题	213
习题	214
第十九章 量子物理	217
19-1 黑体辐射 普朗克量子假设	217
一 黑体 黑体辐射	218
二 斯特藩-玻耳兹曼定律 维恩位移定律	219
三 黑体辐射的瑞利-金斯公式 经典物理的困难	222
四 普朗克假设 普朗克黑体辐射公式	224
19-2 光电效应 光的波粒二象性	229
一 光电效应实验的规律	229
二 光子 爱因斯坦方程	230
三 光电效应在近代技术中的应用	234
四 光的波粒二象性	235
19-3 康普顿效应	235
19-4 氢原子的玻尔理论	240
一 氢原子光谱的规律性	241
二 卢瑟福的原子有核模型	242
三 氢原子的玻尔理论	246
四 氢原子玻尔理论的困难	249
19-5 弗兰克-赫兹实验	250
19-6 德布罗意波 实物粒子的二象性	252
一 德布罗意假设	252
二 德布罗意波的实验证明	255
三 应用举例	258
四 德布罗意波的统计解释	259
19-7 不确定关系	259
19-8 量子力学简介	262
一 波函数 概率密度	263
二 薛定谔方程	264
三 一维势阱问题	266
四 对应原理	269
五 一维方势垒 隧道效应	271
19-9 氢原子的量子理论简介	272
一 氢原子的薛定谔方程	273

二	三个量子数	274
三	氢原子在基态时的径向波函数和电子的分布概率	276
19-10	多电子原子中的电子分布	278
一	电子自旋 自旋磁量子数	278
二	多电子原子中的电子分布	280
19-11	激光	289
一	自发辐射 受激辐射	289
二	激光原理	290
三	激光器	293
四	激光的特性和应用	295
19-12	半导体	296
一	固体的能带	296
二	本征半导体和杂质半导体	299
三	pn 结	301
四	光生伏特效应	303
19-13	超导电性	303
一	超导体的转变温度	303
二	超导体的主要特性	305
三	超导电性的 BCS 理论	306
四	超导的应用前景	307
	问题	308
	习题	310
* 第二十章	物理学与新技术	313
20-1	等离子体与受控核聚变	313
一	等离子体	313
二	等离子体的基本性质	313
三	等离子体在磁场中的特性	314
四	受控核聚变	315
20-2	光导纤维	317
一	光纤	317
二	均匀折射率光纤导光原理	318
三	光纤的传播模式	319
四	光纤的损耗	320
五	光纤的色散	320
六	非均匀折射率光纤	321
七	光纤的应用	323
20-3	液晶	324
一	液晶的分类	324

二 液晶的各向异性和电光效应	325
三 液晶的应用	327
20-4 新一代扫描显微镜	329
一 STM 的原理简介	330
二 STM 的基本结构	331
三 STM 的工作方式	332
四 STM 的应用	332
五 原子力显微镜	333
20-5 纳米材料简介	334
一 纳米微粒	335
二 纳米固体	336
三 纳米材料的制备	336
四 一种纳米新材料——碳纳米管	337
五 应用	339
问题	339
习题答案	341
索引	347
照片说明	355

第十四章 机械振动

振动是物质的一种很普遍的运动形式。所谓机械振动,是指物体在一定位置附近所作的周期性往复运动。例如心脏的跳动、钟摆的摆动、活塞的往复运动、固体中原子的振动等,都是机械振动。除机械振动外,自然界中还存在着各种各样的振动。广义地说,凡描述物质运动状态的物理量,在某一数值附近作周期性的变化,都叫做振动。例如,交流电路中的电流在某一电流值附近作周期性的变化;光波、无线电波传播时,空间某点的电场强度和磁场强度随时间作周期性的变化等。这些振动虽然在本质上和机械振动不同,但对它们的描述却有着许多共同之处,所以,机械振动的基本规律也是研究其他振动以及波动、波动光学、无线电技术等的基础,在生产技术中有着广泛的应用。

本章主要研究简谐运动,并简要介绍阻尼振动、受迫振动和共振现象等。

14-1 简谐运动

振动的形式是多种多样的,情况大多比较复杂。简谐运动是最简单、最基本的振动。下面以弹簧振子为例,研究简谐运动的运动规律。

如图 14-1 所示,把轻弹簧(质量可以忽略不计)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。物体所受的阻力略去不计。当物体在位置 O 时,弹簧具有自然长度[图 14-1(a)],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,水平向右为 Ox 轴的正方向。现将物体向右移到位置 B [图 14-1(b)]。此时,由于弹簧被拉长而使物体受到一个指向平衡位置的弹性力。撤去外力后,物体将会在弹性力的作用下向左运动,当抵达平衡位置时,物体所受的弹性力减小到零,但物体的惯性会使它继续向左运动,致使弹簧被压缩,因弹簧被压缩而出现的弹性力将阻碍物体的运动,使物体的运动速度减小,到达点 C 时,速度减小到零[图 14-1(c)],此时物体又将在弹性力的作用下,从 C 点返回,向右运动。这样,在弹性力作用下,物体将在平衡位置附近作往复运动,这一包含弹簧和物体的振动系统就叫做弹簧振子。

由胡克定律可知,物体所受到的弹性力 F ,与物体相对于平衡位置的位移 x 成正比,弹性力的方向与位移的方向相反,始终指向平衡位置,故此力常称为回复力。于是有

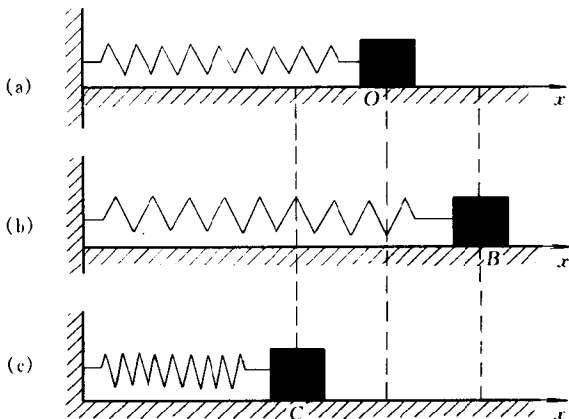


图 14-1 弹簧振子的振动

$$F = -kx$$

式中比例常数 k 为弹簧的劲度系数,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.根据牛顿第二定律,物体的加速度为

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x \quad (14-1)$$

对于一个给定的弹簧振子, k 与 m 都是常量,而且都是正值,它们的比值可用另一个常量 ω 的二次方表示,即

$$\frac{k}{m} = \omega^2 \quad (14-2)$$

这样式(14-1)可写成

$$a = -\omega^2 x \quad (14-3)$$

上式说明,弹簧振子的加速度 a 与位移的大小 x 成正比,而方向相反.人们把具有这种特征的振动叫做简谐运动.

由于 $a = \frac{d^2 x}{dt^2}$,式(14-3)可写成

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 x \quad (14-4)$$

这就是简谐运动的运动微分方程,其解为

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (14-5)$$

它是简谐运动的运动方程^①,简称简谐运动方程.式中 A 和 φ 是积分常量,它们

^① 简谐运动的运动方程也称简谐振动方程.

的物理意义将在第 14-2 节中讨论. 由上式可知, 当物体作简谐运动时, 其位移是时间的余弦函数^①. 这也就是为什么把运动方程具有式(14-3)~(14-5)形式的振动叫做简谐运动的原因.

将式(14-5)对时间求一阶、二阶导数, 可分别得到简谐运动物体的速度 v 和加速度 a 为

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) \quad (14-6)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) \quad (14-7)$$

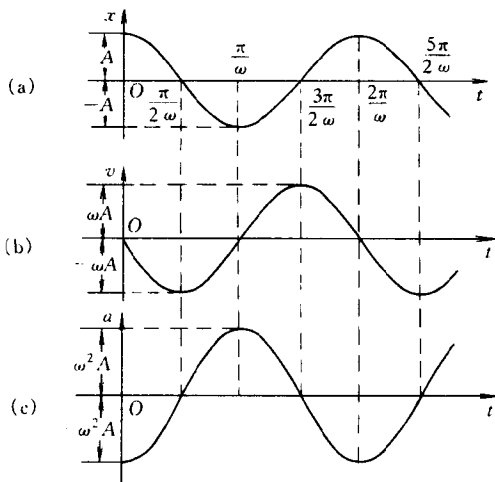


图 14-2 简谐运动图解 ($\varphi=0$)

由式(14-5)、(14-6)、(14-7), 可作出如图 14-2 所示的 $x-t$ 、 $v-t$ 和 $a-t$ 图. 由图可以看出, 物体作简谐运动时, 它的位移、速度和加速度都是周期性变化的.

14-2 简谐运动中的振幅 周期 频率和相位

现在我们来讨论式(14-5)中描述简谐运动特征的物理量 A 、 ω 、 $(\omega t + \varphi)$

^① 因为 $\cos(\omega t + \varphi) = \sin(\omega t + \varphi + \pi/2)$, 若令 $\varphi' = \varphi + \pi/2$, 则式(14-5)可写成

$$x = A \sin(\omega t + \varphi')$$

所以也可以说, 物体作简谐运动时, 位移是时间的正弦函数. 余弦和正弦函数都是简谐函数, 但为统一起见, 本书采用余弦函数.

及其相关概念:振幅、周期(频率、角频率)和相位(初相位),其中相位的概念尤为重要.

一 振幅

在简谐运动方程 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ 中,因 $\cos(\omega t + \varphi)$ 的值在 $+1$ 和 -1 之间,所以物体的位移亦在 $+A$ 和 $-A$ 之间,我们把简谐运动物体离开平衡位置最大位移的绝对值 A ,称做振幅.

二 周期

物体作一次完全振动所经历的时间叫做振动的周期,用 T 表示,周期的单位为 s. 例如在图 14-1 中,物体自位置 B 经 O 到达 C ,然后再回到 B ,所经历的时间就是一个周期. 所以物体在任意时刻 t 的位移和速度,应与物体在时刻 $t + T$ 的位移和速度完全相同,于是有

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

由于余弦函数的周期性,物体作一次完全振动后应有 $\omega T = 2\pi$. 于是,可得

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (14-8)$$

对于弹簧振子, $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, 所以弹簧振子的周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (14-9)$$

单位时间内物体所作的完全振动的次数叫做频率,用 ν 表示,它的单位名称是赫兹,符号是 Hz. 显然,频率与周期的关系为

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (14-10)$$

由此还可知

$$\omega = 2\pi\nu \quad (14-11)$$

即 ω 等于物体在单位时间内所作的完全振动次数的 2π 倍,叫做角频率(又称圆频率),单位是 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (弧度每秒). 至于弹簧振子的频率,不难得知为

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (14-12)$$

由于弹簧振子的角频率 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 是由弹簧振子的质量 m 和劲度系数 k 所决定的,所以周期和频率只和振动系统本身的物理性质有关. 这种只由振动系统本身的固有属性所决定的周期和频率,叫做振动的固有周期和固有频率.

三 相位

力学中,物体在某一时刻的运动状态,可用位矢和速度来描述,下面可以看

到,对振幅和角频率都已给定的简谐运动,它的运动状态可用“相位”这一物理量来决定.由式(14-5)和式(14-6)可看出,当振幅 A 和角频率 ω 一定时,振动物体在任一时刻相对平衡位置的位移和速度都决定于物理量 $(\omega t + \varphi)$.也就是说, $(\omega t + \varphi)$ 既决定了振动物体在任意时刻相对平衡位置的位移,也决定了它在该时刻的速度.量值 $(\omega t + \varphi)$ 叫做振动的相位,它是决定简谐运动物体运动状态的物理量.例如图 14-1 中的弹簧振子,当相位 $(\omega t_1 + \varphi) = \frac{\pi}{2}$ 时, $x = 0, v = -\omega A$, 即在 t_1 时刻物体在平衡位置,并以速率 ωA 向左运动;而当相位 $(\omega t_2 + \varphi) = \frac{3}{2}\pi$ 时, $x = 0, v = \omega A$, 即在 t_2 时刻物体也在平衡位置,但以速率 ωA 向右运动.可见,在 t_1 和 t_2 两时刻,由于振动的相位不同,物体的运动状态也不相同.此外,当振动物体的相位经历了 2π 的变化,亦即相位由 $(\omega t + \varphi)$ 变为 $[\omega(t + T) + \varphi]$, 振动经历了一个周期时,物体恢复到原来的运动状态.由此可见,用相位描述物体的运动状态,还能充分体现出简谐运动的周期性.

当 $t = 0$ 时,相位 $(\omega t + \varphi) = \varphi$, 故 φ 叫做初相位,简称初相.它是决定初始时刻(即开始计时的起点)振动物体运动状态的物理量.例如,若 $\varphi = 0$, 则在 $t = 0$ 时,由式(14-5)和式(14-6)可分别得出 $x_0 = A$ 及 $v_0 = 0$, 这表示我们所选的计时起点,是物体位于正最大位移处,且速率为零的这一时刻.

四 常数 A 和 φ 的确定

如前所述,简谐运动方程 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ 中的角频率 ω 是由振动系统本身的性质所决定的.那么,现在来说明在角频率已经确定的条件下,如果知道了 $t = 0$ 时物体相对平衡位置的位移 x_0 和速度 v_0 , 就可确定出振动的振幅 A 和初相 φ . 由式(14-5)和(14-6)可得

$$\begin{aligned} x_0 &= A \cos \varphi \\ v_0 &= -\omega A \sin \varphi \end{aligned}$$

而由此两式可得 A, φ 的解为

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} \quad (14-13)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{-v_0}{\omega x_0} \quad (14-14)$$

其中 φ 所在象限可由 x_0 及 v_0 的正负号确定.

物体在 $t = 0$ 时的位移 x_0 和速度 v_0 叫做初始条件. 上述结果说明,对一定的弹簧振子(即 ω 为已知量),它的振幅 A 和初相 φ 是由初始条件决定的.

总之,对于给定的振动系统,周期(或频率)由振动系统本身的性质决定,而

振幅和初相则由初始条件决定.

14-3 旋转矢量

本节介绍简谐运动的旋转矢量表示法.如图 14-3 所示,自 Ox 轴的原点 O

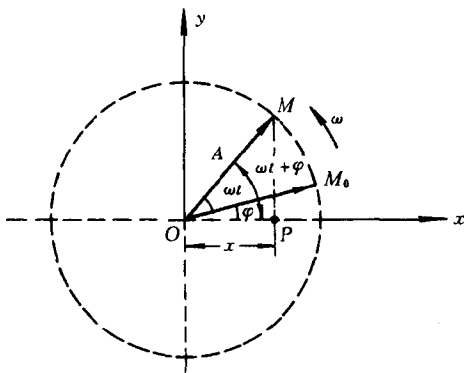


图 14-3 旋转矢量图

作一矢量 A , 使它的模等于振动的振幅 A , 并使矢量 A 在 Oxy 平面内绕点 O 作逆时针方向的匀角速转动, 其角速度与振动的角频率 ω 相等, 这个矢量就叫做**旋转矢量**. 设在 $t=0$ 时, 矢量 A 的矢端在位置 M_0 , 它与 Ox 轴的夹角为 φ ; 在 t 时刻, 矢量 A 的矢端在位置 M . 在这过程中, 矢量 A 沿逆时针方向转过了角度 ωt , 它与 Ox 轴间的夹角为 $\omega t + \varphi$. 由图可见, 矢量 A 在 Ox 轴上的投影为 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ ^①. 与式(14-5)比较, 它恰是沿 Ox 轴作简谐运动的物体在 t 时刻相对于原点 O 的位移. 因此, 旋转矢量 A 的矢端 M 在 Ox 轴上的投影点 P 的运动, 可表示物体在 Ox 轴上的简谐运动. 矢量 A 以角速度 ω 旋转一周, 相当于物体在 x 轴上作一次完全振动.

在旋转矢量图上, 不仅可以确定作简谐运动的物体的位移 x , 而且也能确定它的速度 v 和加速度 a . 由于作匀速圆周运动的物体的速率是 $v_m = \omega A$, 在 t 时刻, 它在 Ox 轴上的投影是 $v = v_m \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = -\omega A \sin(\omega t + \varphi)$, 这正是式(14-6)给出的物体作简谐运动的速度公式. 作匀速圆周运动的物体的向心加速度是 $a_n = \omega^2 A$, 在 t 时刻, 它在 Ox 轴上的投影是 $a = a_n \cos(\omega t + \varphi + \pi) = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi)$, 这正是

^① 矢量 A 既可以在 Ox 轴上投影 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$, 也可以在 Oy 轴上投影 $y = A \sin(\omega t + \varphi)$. 本书采用在 Ox 轴上的投影.