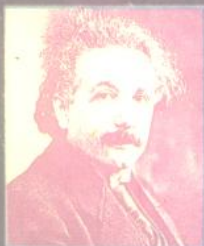


大学物理学

第三分册

波动学

秦德培 主编



重庆大学出版社

内 容 提 要

本书根据全国高等学校工科物理课程教学指导委员会制定的《大学物理课程教学基本要求》及其修改意见编写。全书分《力学·热学》、《电磁学》、《波动学》和《近代物理及物理学在现代科学技术中的应用》4个分册出版。本分册包括振动和波、电磁振荡和电磁波、波的叠加、光的干涉、光的衍射和光的偏振等内容。每章均附有内容提要，配置有现今较为流行的习题和思考题。

本书可作为工科院校大学物理课程的通用教材，也可作为其它院校非物理专业和成人教育学院、职工大学等院校各工科专业的教学参考书。

大学物理学 第三分册

波动学

秦蓉蓉 汪斌

责任编辑 黄开植

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆通信学院印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:6.5 字数:167千

1996年8月第2版 1996年8月第5次印刷

印数:30501-38000

ISBN 7-5624-0023-X/O·10 定价:6.50元

(川)新登字020号

常用物理常量表

名 称	符 号	数 值
引力常量	G	$6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
地球质量	M	$5.98 \times 10^{24} \text{kg}$
地球半径	R	$6.4 \times 10^6 \text{m}$
阿伏伽德罗常量	N_A	$6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$
气体常量	R	$8.31 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
玻耳兹曼常量	k	$1.38 \times 10^{-23} \cdot \text{K}^{-1}$
理想气体标准状态 下的摩尔体积	V_m	$22.4 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
标准大气压	p_0	$1.013 \times 10^5 \text{Pa}$
电子电量	e	$1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
电子静质量	m_e	$9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$
电子静能	E_e	0.511MeV
质子静质量	m_p	$1.673 \times 10^{-27} \text{kg}$
中子静质量	m_n	$1.675 \times 10^{-27} \text{kg}$
1 电子伏特能量	eV	$1.602 \times 10^{-19} \text{J}$
真空电容率	ϵ_0	$8.85 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
真空中光速	c	$3.00 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
普朗克常量	h	$6.63 \times 10^{-34} \cdot \text{s}$
里德伯常量	R_∞	$1.097 \times 10^7 \text{m}^{-1}$
玻尔半径	a_0	$5.29 \times 10^{-11} \text{m}$
电子康普顿波长	λ_c	$2.426 \times 10^{-12} \text{m}$

主要物理量的符号

振动量	y	介质中光的波长	λ_n
振幅	A	折射率	n
周期	T	光强	\bar{I}, I
频率	ν	光程	L
角频率	ω	光程差	ΔL
初相	φ	薄膜厚度	e
波速	u	单缝宽度	a
波长	λ	光栅常量	d
振动和波的能量	W	衍射角	φ
波的能量密度	w		
波的能流密度	I		
波的强度	\bar{I}		
波的能流	P		
坡印亭矢量	S		
真空中的光速	c		
介质中的光速	c_n		
真空中光的波长	λ		

前 言

本书是为工科各专业编写的大学物理课程教材，是何世湘主编西南地区十一所院校联合编写的《大学物理学》的再版。在原书的编写过程中，各参编单位进行了卓有成效的合作，对各校的教学工作都起到了积极的促进作用。教学形势在不断发展，为适应各校教改的需要，不少的院校已先后编出并在教学中使用了一批切合本校实际的新教材。作为主编和参编人员较集中的重庆大学，经连续八年的教学实践，也深感有必要对原书进行合理的修订，在各参编单位的理解和赞同下，决定继续发扬该书的成果，改由重庆大学修订再版。

再版充分吸收了原版的优点，并认真总结了校内广大教师长期积累的教学经验，力求编成一套便于学生阅读，有利教师教学的简明教材。再版在以下几个方面作了改进：

- (1) 对教学中的重点和难点，作了更深入细致的分析。
- (2) 根据修订后的《基本要求》，对内容作了相应的调整，删去了绝大部分的超纲部分，重点更突出，内容更精炼。
- (3) 物理概念和基本规律的阐述更符合近代科学的发展水平。
- (4) 例题更切合基础教学的需要，习题和思考题的配置，更符合当前教学的要求。

此外，鉴于物理学正在现代科学技术和工程实践中发挥着越来越重要的作用，为开阔学生视野，激发学生学习物理学和自然科学的兴趣，除基础教学内容之外，本书还选编了一些反映物理学在现代科学技术中应用的简明专题材料，供学生课外阅读或作专题

选讲。

本教材由秦德培主编,唐南任副主编。参加编写的有王佳眉、陈宁、金属东和林德华(以姓氏笔划为序)。本分册由秦德培(第一、三、六章)、陈宁(第四章)和金属东(第二、五章)编写,由秦德培统稿。

前课程指导委员会委员、原主编何世湘教授对再版工作给予了热忱的指导和帮助,原版的一些作者也表达了对再版工作的关心。在此,我们对她(他)们表示衷心的感谢;对于编写过程中借鉴的其它教材的作者们,也谨致诚挚的谢意。限于编者的业务水平和教学经验,书中难免有不当和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

1995年10月

目 录

第四篇 波动学

第一章 振动和波	(1)
§ 1.1 简谐机械振动	(2)
一、简谐振动	(2)
二、简谐振动的特征量	(2)
三、简谐振动的振动曲线与旋转矢量表示法	(3)
§ 1.2 简谐振动的微分方程和简谐机械振动的动力学条件	(8)
§ 1.3 简谐振动的能量	(12)
§ 1.4 机械波	(15)
一、机械波的产生	(15)
二、波的分类	(16)
三、描述波的物理量	(17)
§ 1.5 平面简谐波方程	(21)
§ 1.6 波的能量	(27)
§ 1.7 多普勒效应	(31)
内容提要	(34)
思考题	(37)
习题	(41)
第二章 电磁振荡和电磁波	(51)
§ 2.1 电磁振荡	(51)
§ 2.2 电磁波的基本性质	(55)
一、电磁波	(55)
二、电磁波的基本性质	(55)
§ 2.3 平面简谐电磁波	(57)
一、平面简谐电磁波方程	(57)
二、电磁波的能量	(58)

内容提要	(59)
思考题	(60)
习题	(61)
第三章 波的叠加	(62)
§ 3.1 振动的合成	(62)
一、同方向简谐振动的合成	(62)
二、相互垂直方向简谐振动的合成	(67)
三、振动的分解	(68)
§ 3.2 波的叠加原理	(70)
一、波的叠加原理	(70)
二、惠更斯原理	(71)
三、惠更斯-菲涅耳原理	(76)
§ 3.3 波的干涉	(76)
§ 3.4 驻波	(81)
一、驻波的特征	(81)
二、驻波的能量	(83)
三、反射波的半波损失	(84)
内容提要	(86)
思考题	(88)
习题	(90)
第四章 光的干涉	(96)
§ 4.1 光的相干性	(96)
一、普通光的发光特性	(96)
二、光的相干性	(97)
三、相干光的获得	(97)
§ 4.2 相位差和光程差	(99)
一、光程和光程差	(99)
二、相干长度和相干时间	(101)
三、光反射时的相位跃变和半波损失	(102)
四、薄透镜的等光程性	(102)
§ 4.3 双缝干涉	(104)
一、双缝干涉的实验装置	(104)

二、干涉极值的一般公式和双缝干涉中明、暗条纹的位置	(106)
三、双缝干涉条纹的特征	(108)
四、干涉条纹的光强分布	(109)
§ 4.4 薄膜干涉	(114)
一、等厚干涉	(114)
二、垂直入射等厚干涉条纹的特征	(117)
三、等倾干涉	(118)
§ 4.5 几种常见的等厚干涉	(122)
一、劈形膜干涉	(122)
二、牛顿环	(123)
三、干涉在生产和科学技术中的应用	(125)
§ 4.6 迈克耳逊干涉仪	(130)
内容提要	(132)
思考题	(134)
习题	(137)
第五章 光的衍射	(142)
§ 5.1 夫琅禾费衍射和菲涅耳衍射	(142)
一、菲涅耳衍射	(142)
二、夫琅禾费衍射	(143)
§ 5.2 单缝夫琅禾费衍射	(143)
一、用半周期带法确定明、暗衍射条纹的位置	(144)
二、衍射条纹的光强分布	(147)
三、单缝衍射条纹的特征	(149)
§ 5.3 光栅衍射	(151)
一、光栅方程	(151)
二、光栅衍射条纹的特征	(153)
三、谱线的亮度与缺级现象	(155)
§ 5.4 光学仪器的分辨本领	(159)
§ 5.5 X 射线衍射	(162)
内容提要	(164)
思考题	(165)
习题	(166)

第六章 光的偏振	(169)
§ 6.1 自然光和偏振光	(169)
§ 6.2 偏振片的起偏和检偏	(171)
一、偏振片的起偏和检偏	(171)
二、马吕斯定律	(173)
§ 6.3 反射和折射时光的偏振	(175)
§ 6.4 光的双折射	(177)
一、双折射现象	(177)
二、单轴晶体的双折射	(177)
三、惠更斯原理对双折射现象的解释	(179)
§ 6.5 偏振光的应用	(184)
一、消除反射炫光和晃眼的汽车灯光	(184)
二、测定旋光物质的浓度	(184)
三、人为双折射及其应用	(185)
内容提要	(186)
思考题	(187)
习题	(188)
习题答案	(190)

第四篇 波动学

波是能量传播的一种方式。振动在空间的传播就是波。机械振动在弹性介质中的传播叫做机械波,如水波、声波和地震波;电磁振动在空间的传播叫做电磁波,如无线电波、光波。机械波和电磁波在本质上是两类不同的波,产生的条件和产生的方法不同,与物质发生相互作用的规律也不一样。然而,机械波和电磁波又有许多相同的地方,都能产生反射和折射,也都会发生干涉和衍射,都可以用波长、频率、波速等物理量描述其特征,又都可以用相同的数学方法进行研究,用统一的数学方程来表达。

波动学主要讨论波的传播问题,是一门实用性很强的学科,在工程技术和近代科学研究中都有着广泛的应用。例如,光的干涉、衍射用于物理量的精确测量和机械加工质量的检验,光弹性用于探测构件内部的受力情况,X射线衍射用于研究物质结构。许多正在深入发展和日益获得广泛应用的新技术,如激光通讯、全息摄影和防伪,以及遥感遥测技术等,也都在很大程度上以波动学的理论为基础。

在《大学物理学》的波动学中,将依次讲述振动和波的基本概念、波的传播和叠加规律,并以此为理论基础,在波动光学中,具体地研究光的干涉、光的衍射和光的偏振。

第一章 振动和波

本章通过机械振动和机械波说明振动和波的基本概念及其描

述方法。

§ 1.1 简谐机械振动

描述系统状态的物理量,在一定量值附近来回往复的变化,如温度、电流和电压的周期性变化,在广义上都叫做振动。最常见的一种振动,是物体在一定位置附近来回往复的运动,称为机械振动。关于振动,以后若不加说明,通常就是指机械振动。

一、简谐振动

物体作机械振动时,振动量是物体偏离平衡位置的位移。 y 按

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.1)$$

或 $y = A \sin(\omega t + \varphi') \quad (\varphi' = \varphi + \frac{\pi}{2})$

规律随时间 t 变化的振动,叫做简谐机械振动或简称简谐振动。

简谐振动是一种理想的振动,产生简谐振动的理想模型叫做简谐振子,如物体和连接轻弹簧组成的弹簧振子、单摆。

简谐振动又是一种最简单、最基本的振动。理论和实践都证明,任何复杂的振动,都可以看作是若干个不同的简谐振动的叠加,通过研究简谐振动,就可以由简谐振动的合成了解任何复杂的振动。

二、简谐振动的特征量

1. 振幅 A

在用 $y = A \cos(\omega t + \varphi)$ 表示的简谐振动中, A 是物体离开平衡位置的最大位移量,反映振动的强弱,称为简谐振动的振幅。

2. 周期 T 、频率 ν 和角(圆)频率 ω

振动状态完全重复一次所需的时间,叫做振动的周期。由于余弦函数的周期为 2π ,由 $\omega(t+T) = \omega t + 2\pi$,可得简谐振动的周期

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1.2)$$

单位时间内振动状态完全重复的次数,也即单位时间内完全振动的次数,叫做振动的频率。按定义,简谐振动的频率

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.3)$$

$\omega = 2\pi\nu$ 为频率的 2π 倍,称为振动的角频率(或圆频率)。

周期、频率和角频率表征简谐振动的快慢。在SI中, T 的单位是s(秒), ν 的单位是Hz(赫芝,1/s), ω 的单位是rad/s(弧度/秒)。

3. 相位和初相

相位是描写简谐振动振动状态的物理量。机械振动的振动状态由位移 $y = A\cos(\omega t + \varphi)$ 和速度 $v = \frac{dy}{dt} = -\omega A\sin(\omega t + \varphi)$ 描写,它们共同由 $\varphi(t) = \omega t + \varphi$ 唯一确定。因此, $\varphi(t)$ 是描写简谐振动振动状态的一个十分方便的物理量,称为简谐振动的相位,亦称周相或简称相。用相位表示振动状态能够鲜明地表示出振动状态以 2π 为周期。

$t = 0$ 时的相位 $\varphi = \varphi(0)$,为开始计时时刻的振动相位,称为初相。初相与人为选择的时间零点有关。初相与初始振动状态的关系为

$$\begin{cases} y_0 = A\cos\varphi \\ v_0 = -\omega A\sin\varphi \end{cases} \quad (1.4)$$

三、简谐振动的振动曲线与旋转矢量表示法

由振动方程 $y = A\cos(\omega t + \varphi)$ 所代表的简谐振动,可以用 $y-t$ 曲线直观地表示,称为振动曲线,也可以用旋转矢量在 y 轴上的投影形象地显示出来。如图1.1所示,在包含 y 轴在内的平面内,取

一个长度为 A 的位矢 $A = OM$, 让它在该平面内绕原点 o 作逆时针匀速转动, 如果开始时 A 与 y 轴成 φ 角, 转动角速度为 ω , 则 A 与 y 轴的夹角 $\varphi(t) = \omega t + \varphi$, 动端 M 在 y 轴上投影点 P 的运动, 就正好描述一个 $y = A\cos(\omega t + \varphi)$ 的简谐振动。可见, 用旋转矢量来描述简谐振动时, 旋转矢量 A 的长度、角速度和初角位置, 应分别等于简谐振动的振幅、角频率和初相。旋转矢量也称振幅矢量。图 1.1 是用旋转矢量和振动曲线描述的同—简谐振动。

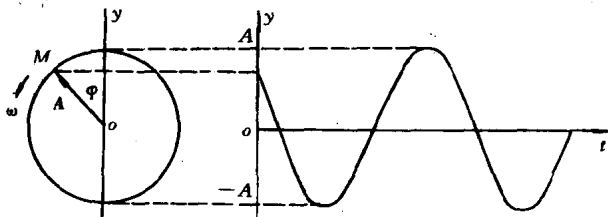


图 1.1 简谐振动的旋转矢量表示法及其振动曲线

用旋转矢量表示简谐振动, 能够很方便地比较两个同频率简谐振动振动步调的先后或振动的超前与落后。所谓振动的超前与落后, 是指两振动中具有相同相位的振动状态(例如振动曲线上波峰位置的振动状态)在时间上哪个先到达哪个后到达。

设两个同频率的简谐振动分别为

$$y_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$y_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

根据旋转矢量表示法, 初相比较大的旋转矢量应该领先于初相比较小的旋转矢量, 且领先的角度为

$$\Delta\varphi = |(\omega t + \varphi_2) - (\omega t + \varphi_1)| = |\varphi_2 - \varphi_1|$$

恒等于两振动的初相差。很显然, 由于旋转矢量与 y 轴的夹角代表振动的相位, 对于具有相同相位的任何一个振动状态, 初相比较大的振动都将领先或超前到达, 超前时间 Δt 与超前相位 $\Delta\varphi$ 的关系,

应为

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = 2\pi\frac{\Delta t}{T} \quad (1.5)$$

图 1.2 是两个有着不同初相的同频率简谐振动的旋转矢量和振动曲线。图(a)中 $\varphi_2 > \varphi_1$, 简谐振动 y_2 超前于简谐振动 y_1 , 超前时间为 $\Delta t = (\varphi_2 - \varphi_1)/\omega$, 图(b)中 $\varphi_2 = \varphi_1$, 两振动步调一致, 称为同相振动, 图(c)中 $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$, y_2 超前 y_1 半个周期, 称为反相振动。

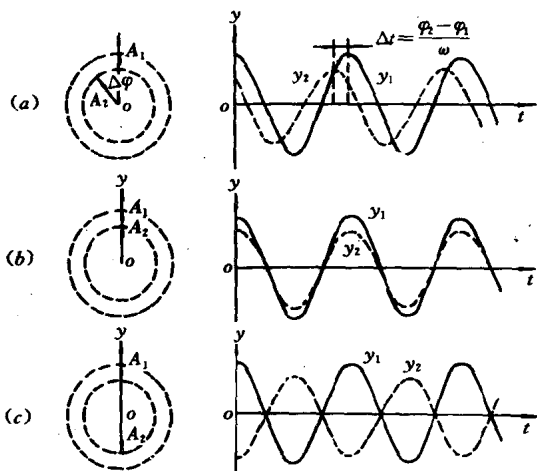


图 1.2 两个初相不同的同频率简谐振动的旋转矢量和振动曲线

应该指出, 由于简谐振动的相位以 2π 为周期, 超前与落后并不是绝对的, 一个振动比另一个振动相位超前 $\Delta\varphi$, 也可以说它比另一个振动相位落后 $2\pi - \Delta\varphi$ 。同理, 一个振动比另一个振动时间超前 Δt , 也可以说它比另一个振动时间落后 $T - \Delta t$ 。

物体作简谐振动 $y = A\cos(\omega t + \varphi)$ 时, 速度和加速度

$$v = \frac{dy}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) = \omega A \cos(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2})$$

$$a = \frac{d^2y}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) = \omega^2 A \cos(\omega t + \varphi + \pi)$$

也都作同频率的简谐振动。上述结果表明，速度和加速度的振幅，依次为 ωA 和 $\omega^2 A$ ，初相则分别超前 y 、 $\pi/2$ 和 π 。

公式(1.5) 不仅可以用来表达两同频率简谐振动到达同一振动状态的时间差与它们初相差的关系，对于同一个简谐振动，经过时间 Δt 以后的相位增加，也仍然是

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = 2\pi \frac{\Delta t}{T}$$

例 1.1 图 1.3

为某质点作简谐振动的振动曲线。试分别用(1)解析法，(2)旋转矢量法求质点的振动方程。

解 (1) 解析法
设简谐振动方程

为

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

则质点的振动速度

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

由图 1.3 的振动曲线可以直接得出振幅 $A = 4.0\text{cm}$ ，还可得 $t = 0$ 时

$$y_0 = A \cos\varphi = -2.0$$

$$v_0 = -\omega A \sin\varphi < 0$$

由此可得

$$\cos\varphi = \frac{y_0}{A} = -\frac{1}{2} \text{ 和 } \sin\varphi > 0$$

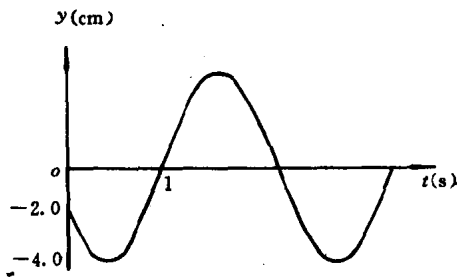


图 1.3 例 1.1 图

故初相

$$\varphi = \frac{2}{3}\pi$$

同理,由图 1.3 中 $t = 1\text{s}$ 时

$$y_1 = A \cos(\omega + \varphi) = 0$$

$$v_1 = -\omega A \sin(\omega + \varphi) > 0$$

可得

$$\omega + \varphi = \frac{3}{2}\pi + 2k\pi$$

以 $\varphi = \frac{2}{3}\pi$ 代入,得

$$\omega = \frac{3}{2}\pi + 2k\pi - \frac{2}{3}\pi = \frac{5}{6}\pi + 2k\pi (k = 0, 1, 2, \dots)$$

由图 1.3 知 $t = 0$ 和 $t = 1\text{s}$ 的时间差 $\Delta t = 1\text{s}$ 小于半周期, 两时刻的相位差 $\Delta\varphi = \omega\Delta t$ 应小于 π , 有

$$\Delta\varphi = \frac{5}{6}\pi + 2k\pi < \pi$$

故 $k = 0$,

$$\omega = \frac{5}{6}\pi$$

从而,振动方程为

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) = 4.0$$

$$\times 10^{-2} \cos\left(\frac{5}{6}\pi t + \frac{2}{3}\pi\right) \text{ m}$$

(2) 旋转矢量法

由 $y_0 = -2.0$, $v_0 < 0$ 和 $y_1 = 0$, $v_1 > 0$ 以及 $A = 4.0$, 分别作 $t = 0$ 和 $t = 1\text{s}$ 时刻的旋转矢量。由图 1.4 中两时刻旋转矢量的位置,可得初相 $\varphi = \frac{2}{3}\pi$, $t = 1\text{s}$ 时的相位 $\varphi_1 = \frac{3}{2}\pi + 2k\pi$ 。

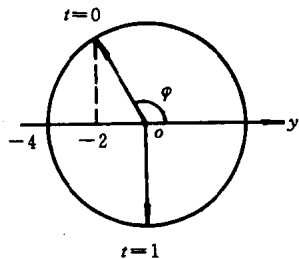


图 1.4 例 1.1 的旋转矢量图