



21世纪高等院校教材

工科类

大学物理

下册

主 编 王纪龙
副主编 周希坚 郝虎在
编 委 王云才 王钢柱 汤洪明

科学出版社

21 世纪高等院校教材

大学物理

(下 册)

主 编	王纪龙	
副主编	周希坚	郝虎在
编 委	王云才	王钢柱
	汤洪明	

科学出版社

2002

内 容 简 介

本书是根据“高等工业学校大学物理课程教学基本要求”的精神,按照面向 21 世纪课程体系、教学内容改革的要求,在吸取了现行的国内外一些较有影响的同类教材的成功经验后编写而成的。全书分上、下两册,共五篇。上册包括力学(含相对论)、电磁学;下册包括波动学、量子物理基础、热物理学。

本书可作为高等工业学校各专业本、专科学生的大学物理教材,也可用作其他类大专院校非物理专业以及成人教育的物理教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理(上、下册)/王纪龙主编. —北京:科学出版社,2002

(21 世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-010093-X

I. 大… II. 王… III. 物理学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 004182 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002 年 2 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2002 年 2 月第一次印刷 印张: 26 3/4

印数: 1—8 000 字数: 512 000

定价: 60.00 元(含上、下册)

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

本书中涉及的物理量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	量 纲	备 注
振 幅	A	米	m	L	
周 期	T	秒	s	T	
频 率	V	赫[兹]	Hz	T^{-1}	
角 频 率	ω	每秒	s^{-1}	T^{-1}	
相 位	φ	-	-	-	
波 长	λ	米	m	L	
波 数	σ	每米	m^{-1}	L^{-1}	主要用于光谱学
波 速	u, c	米每秒	$m \cdot s^{-1}$	LT^{-1}	
角 波 数	k	每米	m^{-1}	L^{-1}	
波的强数	I	瓦[特]每平方米	$W \cdot m^{-2}$	MT^{-3}	
坡印亭矢量	S	瓦[特]每平方米	$W \cdot m^{-2}$	MT^{-3}	
声 压	p	帕[斯卡]	Pa	$L^{-1}MT^{-2}$	
声 强 级	L_I	贝	B	-	常用分贝 (dB)为单位
折 射 率	n	-	-	-	
光 程 差	δ	米	m	L	
辐[射]出[射]度	$M(T)$	瓦[特]每平方米	$W \cdot m^{-2}$	MT^{-3}	
单色辐出度	$M_\lambda(T)$	瓦[特]每立方米	$W \cdot m^{-3}$	$L^{-1}MT^{-3}$	
单色吸收比	$\alpha(\lambda, T)$	-	-	-	
斯特藩-玻 尔兹曼常量	σ	瓦[特]每平方米 四次方开[尔文]	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$	$T^{-3}M\Theta^{-4}$	
维 恩 常 量	b	米开[尔文]	$m \cdot K$	$L\Theta$	米·开 常用电子伏特 (eV)为单位
逸 出 功	Φ	焦[耳]	J	L^2MT^{-2}	
康普顿波长	λ_C	米	m	L	
普朗克常量	$h, \hbar$	焦[耳]秒	$J \cdot s$	L^2MT^{-1}	
波 函 数	Ψ				
概 率 密 度	$\Psi^* \Psi$	每立方米	m^{-3}	L^{-3}	
主 量 子 数	n	-	-	-	
角 量 子 数	l	-	-	-	
磁 量 子 数	m	-	-	-	
自旋量子数	s	-	-	-	
自旋磁量子数	m_s	-	-	-	
质 量 数	A	-	-	-	

16057/03

续表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	量纲	备 注
电 荷 数	Z	—	—	—	
里德伯常量	R	每米	m^{-1}	L^{-1}	
玻 尔 磁 子	μ_{s}	焦[耳]每特[斯拉]	$\text{J} \cdot \text{T}^{-1}$	$\text{L}^2 \text{I}$	
核 磁 子	μ_{p}	焦每特[斯拉]	$\text{J} \cdot \text{T}^{-1}$	$\text{L}^2 \text{I}$	
质量亏损	B	千克	kg	M	
核的结合能	ΔE	焦[耳]	J	$\text{L}^2 \text{MT}^{-2}$	
比 结 合 能	$\Delta E/A$	焦[耳]	J	$\text{L}^2 \text{MT}^{-2}$	
衰变常数	λ	每秒	s^{-1}	T^{-1}	
半 衰 期	T	秒	s	T	
压力(压强)	p	帕斯卡	Pa	$\text{L}^{-1} \text{MT}^{-2}$	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
热力学温度	T	开尔文	K	Θ	
摄氏温度	t	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	Θ	$t^{\circ}\text{C} = (T - 273.15) \text{K}$
摩尔质量	M_{mol}	千克每摩尔	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	MN^{-1}	
分子质量	m	千克	kg	M	
分子有效直径	d	米	m	L	
分子平均自由程	$\bar{\lambda}$	米	m	L	
分子平均碰撞次数	$\bar{Z}$	次每秒	$1 \cdot \text{s}^{-1}$	T^{-1}	
碰撞截面	σ	平方米	m^2	L^2	$1 \text{ b}(\text{靶恩}) = 10^{-28} \text{ m}^2$
体积分子数	n	每立方米	$1 \cdot \text{m}^{-3}$	L^{-3}	
热 量	Q	焦耳	J	$\text{L}^2 \text{MT}^{-2}$	
比 热 容	c	焦耳每千克开尔文	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{L}^2 \text{T}^{-2} \Theta^{-1}$	
热 容	C	焦耳每开尔文	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{L}^2 \text{MT}^{-2} \Theta^{-1}$	
摩尔定体热容	$C_{V,m}$	焦耳每摩尔开尔文	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{L}^2 \text{MT}^{-2} \cdot \Theta^{-1} \text{N}^{-1}$	
比 热 容 比	γ	—	—	—	
黏 度	η	帕秒	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{L}^{-1} \text{MT}^{-1}$	
热 导 率	$\kappa, (\lambda)$	瓦每米开尔文	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{LMT}^{-3} \Theta^{-1}$	
扩散系数	D	二次方米每秒	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{L}^2 \text{T}^{-1}$	
熵	S	焦耳每开尔文	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{L}^2 \text{MT}^{-2} \Theta^{-1}$	

前 言

大学物理因其在培养大学生科学素质、科学思维方法和科学研究能力,特别是培养大学生的创新思维 and 创新能力方面具有独特的、不可替代的作用,因而成为高等工业学校各专业重要的必修基础课。进入 21 世纪以来,科学技术的发展、人类文明的进步对人才培养提出了更高的要求。为适应新世纪高新技术人才的培养,大学物理课已被公认为高等工科院校四大重点基础课程之一。能力培养、素质教育正在不断地向传统的大学物理教学提出挑战,所以编写一套符合时代需求的《大学物理》教材,既是物理教学的需要,也是高校广大物理教师的期盼。

编者长期从事大学物理教学,从 20 世纪 80 年代以来,先后多次正式出版大学物理教学参考书和大学物理教材,并被多所院校近 2 万人次使用。此次出版的《大学物理》是根据“高等工业学校物理课程教学基本要求”的精神,在深厚的教学积累基础上,分析比较了目前国内外一些比较优秀的同类大学物理教材,汲取了其中比较成功的经验之后,在编者已出版的《大学物理学》基础上,经过较大修改而成的。编写中突出了以下特点:

1. 加强近代物理部分在全书的比重,使这部分内容占到全书的三分之一以上。让学生更多地感受到近百年来物理学的新进展,为大学生在校学习和毕业后知识更新和终身教育打下扎实的理论基础。
2. 结合中学物理教材改革现状,适当地、前瞻性地调整了大学物理各部分的起点,避免与中学物理教材的过多重复。特别在力学部分强调了坐标系的建立、矢量运算和微积分的应用,这一思想体现在教学内容、例题、习题诸方面,让学生尽早感受大学物理与中学物理的不同,以便引起学生对大学物理的重视和兴趣。
3. 把大学生的科学素质教育和能力培养贯穿于教学中,体现在教材内。适时、适度地引入物理学史,以激发学生对物理的兴趣,同时以物理学家严谨的治学态度、科学的思维方式影响学生,培养学生的创新思维能力。为鼓励学生的个性发展,在每章后面附上相关的物理学前沿内容,供学有余力的学生阅读,扩展学生的知识面,为其个性发展留出空间。书中还有一部分带“*”的内容供有兴趣的学生自学。
4. 在保持理论框架不变的前提下,除引入每章后的专题介绍外,将教学内容更新融合在整个教学过程中,包括例题、习题、书中举例等,使学生在近代物理不断发展的动态氛围中学习经典理论,以避免给学生留下经典物理过于遥远、没什么用处的错觉。

5. 内容安排上遵循学生的认识规律和便于教学的原则。上册包括力学(含相对论)、电磁学,下册包括波动学、量子物理基础、热物理学。按照一般工科院校的教学安排,大学物理教学分两个学期,每个学期讲一册。这样安排有如下好处:①把相对论放在上册,一方面把近代物理的两大理论支柱分别放在两个学期教学,均衡了教学压力,更有利于激发学生学习物理的兴趣;另一方面,与力学放在一起,有利于学生及早接受正确的时空观。②把电磁学放在上册,一方面保证了教学的完整性和系统性不受学期间隔的影响;另一方面,在学习大学物理的第一学期就完整学完电磁学,可引起学生对本课程的重视,使学生明显感觉到中学物理与大学物理之间存在一个台阶。③把热学放在量子物理基础之后,可把量子概念引入气体动理论和热力学中,对相关内容和概念从经典到量子化给出更深刻的解释。这一部分还加强了热力学第二定律和熵的介绍。这一安排体现了加强近代部分的指导思想。但也避免了把大学物理编成理论物理初级教材。

本教材适合授课时数 130~140 学时。

全书采用国际单位制,书中用到的物理量的名称、符号、单位和量纲列表于书前,所以书中不再介绍物理量的量纲。

本书的编写分工如下:第一、二、三章由周希坚编写,第五、六、七章由王钢柱编写,第四、八、九、十章由郝虎在编写,第十一、十二、十九章由汤洪明编写,第十三、十四、十五章及附录由王纪龙编写,第十六、十七、十八、二十章由王云才编写。在本书编写过程中,李秀燕博士和北京师范大学杨学军博士都给予了很大的帮助,在此谨向他们表示衷心感谢。

由于水平所限,本书难免存在一些不足,恳请使用本书的各位同行与读者批评指正。

王纪龙

2001 年 10 月于太原

目 录

前 言

第三篇 振动和波动

第十一章 机械振动和电磁振荡	3
§ 11-1 简谐振动	3
§ 11-2 阻尼振动	17
§ 11-3 受迫振动 共振	19
§ 11-4 电磁振荡	22
§ 11-5 同方向的简谐振动的合成	27
§ 11-6 相互垂直的简谐振动的合成	30
习题	33
专题选读 1 声学简介(一)	38
第十二章 机械波和电磁波	47
§ 12-1 机械波的产生和传播	47
§ 12-2 平面简谐波的波动方程	53
§ 12-3 波动方程的动力学推导	59
§ 12-4 波的能量 波的强度	61
§ 12-5 声波	65
§ 12-6 电磁波	69
§ 12-7 惠更斯原理 波的衍射 反射和折射	83
§ 12-8 波的叠加原理 波的干涉 驻波	86
§ 12-9 多普勒效应	96
习题	101
专题选读 J 声学简介(二)	107
第十三章 光的干涉	112
§ 13-1 人类对于光本性的认识	112
§ 13-2 光源 光的相干性	114
§ 13-3 光程 光程差	116
§ 13-4 杨氏双缝实验	119
§ 13-5 薄膜干涉	129
§ 13-6 劈尖的干涉 牛顿环	134
§ 13-7 迈克耳孙干涉仪	143

习题	145
专题选读 K 光学与光电子学简介(一)	150
第十四章 光的衍射	160
§ 14-1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	160
§ 14-2 单缝和圆孔的夫琅禾费衍射	163
§ 14-3 衍射光栅	173
§ 14-4 X 射线的衍射 布拉格方程	180
习题	182
专题选读 L 光学与光电子学简介(二)	185
第十五章 光的偏振	200
§ 15-1 自然光和线偏振光	200
§ 15-2 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	202
§ 15-3 反射和折射时光的偏振	205
§ 15-4 光的双折射现象	207
* § 15-5 偏振光的干涉 人为双折射 波晶片	213
* § 15-6 旋光现象	217
习题	218
专题选读 M 光学与光电子学简介(三)	221
专题选读 N 凝聚态物理学简介(四)	225
第四篇 量子物理基础	
第十六章 从经典物理到量子物理	233
§ 16-1 黑体辐射 普朗克的能量子假说	233
§ 16-2 光电效应 爱因斯坦的光量子论	239
§ 16-3 原子结构和原子光谱 玻尔的量子论	249
习题	255
专题选读 O 核技术应用简介(一)	258
第十七章 量子力学基础	264
§ 17-1 实物粒子的波粒二象性 德布罗意波	264
§ 17-2 波函数及其物理意义	266
§ 17-3 不确定性原理	269
§ 17-4 薛定谔方程	271
§ 17-5 定态问题	274
§ 17-6 氢原子	282
* § 17-7 多电子原子和元素周期表	291
习题	295
专题选读 P 凝聚态物理学简介(五)	297
* 第十八章 原子核和基本粒子简介	302

§ 18-1 核的组成和基本性质	302
§ 18-2 核力与原子核结构	305
§ 18-3 原子核衰变	307
§ 18-4 基本粒子简介	311
习题	317
专题选读 Q 核技术应用简介(二)	319
 第五篇 热物理学 	
第十九章 气体动理论	329
§ 19-1 热力学平衡的基本概念	329
§ 19-2 压强和温度的微观解释	332
§ 19-3 能量按自由度均分定理	337
§ 19-4 麦克斯韦速率分布律	342
* § 19-5 玻尔兹曼分布律与量子统计简介	346
* § 19-6 真实气体的范德瓦尔斯方程	350
§ 19-7 气体分子的平均自由程	351
§ 19-8 输运过程	354
习题	358
专题选读 R 光学与光电子学简介(四)	362
第二十章 热力学基础	367
§ 20-1 热力学第一定律	367
§ 20-2 热容量	370
§ 20-3 第一定律对于气体热力学过程的应用	374
§ 20-4 循环过程 卡诺循环	385
§ 20-5 热力学第二定律	392
* § 20-6 卡诺定理	395
* § 20-7 熵与熵增加原理	398
§ 20-8 热力学第二定律的微观意义	402
习题	406
专题选读 S 非线性科学简介(三)	412
参考文献	418

第三篇 振动和波动

振动是自然界中最常见的运动形式之一。物体在平衡位置附近作具有时间周期性的往复运动,称为机械振动。例如,钟摆的运动,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。振动现象是非常普遍的,并不局限于机械振动。分子的热运动、振荡电路中电流的变化、电磁场的变化、晶体中原子的运动等虽属于不同的运动形式,各自遵循不同的运动规律,但是就其中的振动过程来讲,它们都具有共同的物理特征。故广义地讲,任何一个物理量(如位置矢量、电流、电压、电量、电场强度、磁感应强度等)在某个定值附近反复变化,都可称为该物理量在振动。

在不同的振动中,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,也就是说,可以把复杂的振动看成是几个简谐振动的合成。甚至从更广泛的意义上讲,任何复杂的非周期性运动,也属于振动的研究范畴,因为非周期性运动可以分解为频率连续分布的无限多个简谐振动的叠加,所以振动是声学、地震学、建筑力学、机械原理、造船学所必需的基础知识,也是光学、电学、交流电工学、无线电技术及原子物理学等不可缺少的基础。

波是振动在空间的传播。所以说,振动和波动关系十分密切,振动是产生波动的根源,而波是振动的传播。声波、水波、电磁波、光波等都是波,各种各样信息的传播几乎都要借助于波,如果没有波,我们将处于黑暗和寂静之中,没有波的世界是不可想像的。尽管波的种类繁多,通常我们可以把它分成两大类:机械振动在弹性媒质中的传播称为机械波;电磁振动在空间的传播称为电磁波。机械波和电磁波是本质上完全不同的两类波,产生的条件和方法不同,与物质相互作用的规律也不一样,但是,它们又有许多波的共同的特征。例如,它们在波动过程中都伴

随着能量的传播,它们都能产生反射和折射现象,它们都会出现干涉和衍射现象。不仅如此,机械波和电磁波还遵守一些共同的传播规律,能够用同样的数学方法进行研究和描述。

光是一定波段的电磁波,光的波动性已在其干涉、衍射及偏振现象中得到了充分的证明。这些现象已在现代科学技术中有着广泛的应用。因此波动学是一门实用性很强的学科,在工程技术和近代科学研究中有着广泛的应用。例如,产品机械加工,质量的检验,长度的精密测量,材料内部受力情况的探测,物质结构的研究,以及无线电通信,激光通信,全息摄影和遥感遥测技术等等,它们都是以波动学为理论依据的。波不仅广泛存在于我们周围的宏观世界,近代物理的研究证明,微观粒子也同样具有波动性,所以波普遍存在于自然界,是物质的一种重要的、基本的运动形式。

本篇将在第十一章对简谐振动和电磁振荡作比较详细的讨论;在第十二章对机械波和电磁波的基本规律作比较细致的阐述,有关声波的一些知识将在后续的讲座知识中作一介绍;对光的干涉、衍射和偏振将在第十三、十四、十五章中作较全面的论述。

第十一章 机械振动和电磁振荡

§ 11-1 简谐振动

自然界中大量的振动是周期性的,其中,最简单的周期性振动是简谐振动。物体运动时,如果离开平衡位置的位移(或角位移)按余弦函数(或正弦函数)的规律随时间变化,这种运动称为简谐振动,简称谐振动。在忽略阻力的情况下,弹簧振子的小幅度振动、单摆的小角度振动以及 LC 电磁振荡电路都是简谐振动。下面以弹簧振子为例讨论简谐振动的特征及其有关规律。

一、简谐振动的特征

质量为 m 的物体系于一端固定的轻弹簧(弹簧的质量相对于物体来说可以忽略不计)的自由端,这样的弹簧和物体系统就称为弹簧振子。

如将弹簧振子水平放置,当弹簧为原长时,物体所受的合力为零,处于平衡状态,此时物体所处的位置就是平衡位置,如果把物体略加移动后释放,这时弹簧被拉长或被压缩,便有指向平衡位置的弹性力作用在物体上,迫使物体返回平衡位置。这样,在弹性力的作用下,物体就在其平衡位置附近作往复运动,如图 11-1 所示。

若取物体的平衡位置为坐标原点,物体的运动轨道为 x 轴,向右为正方向,在小幅振动情况下,按照胡克定律,物体所受的弹性力 f 与弹簧的伸长(即物体相对于平衡位置的位移 x)成正比,即

$$f = -kx$$

式中 k 是弹簧的倔强系数,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

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

对于一个给定的弹簧振子, $m > 0, k > 0$,

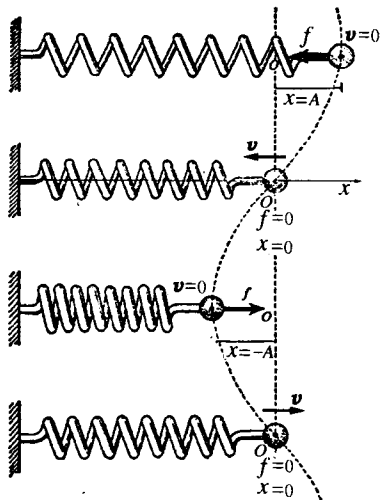


图 11-1 弹簧振子的振动

且 m 与 k 均为常量,故可设

$$\frac{k}{m} = \omega^2 \quad (11.1)$$

代入上式得

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 x \quad (11.2)$$

或

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

这一微分方程的解为

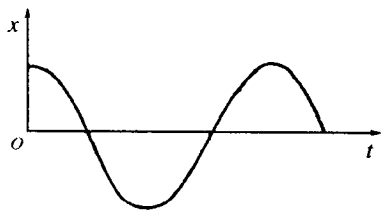
$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (11.3)$$

或

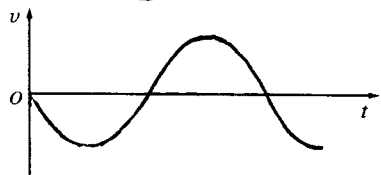
$$x = A \sin(\omega t + \varphi'_0)$$

式中 $\varphi'_0 = \varphi_0 + \pi/2$, 显然 A 和 φ_0 (或 φ'_0) 为积分常数, 它们的物理意义和确定方法将在后面讨论。由上可见, 物体相对平衡位置的位移按余弦 (或正弦) 函数关系随时间变化, 所作的正是简谐振动。为了方便起见, 本书均采用余弦函数关系随时间变化的表达式 [即式 (11.3)] 为简谐振动的运动方程。

在第一篇力学中我们已经明确, 描述一个物体的运动状态, 经常用位移、速度及加速度等物理量来表示。为此, 根据速度和加速度的定义, 我们可以得到物体作简谐振动时的速度和加速度



$$\begin{aligned} v &= \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi_0) \\ &= -v_m \sin(\omega t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (11.4)$$



$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi_0) \\ &= -a_m \cos(\omega t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (11.5)$$

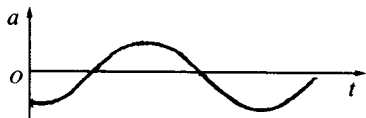


图 11-2 简谐振动的 $x-t$ 图线、 $v-t$ 图线与 $a-t$ 图线

式中 $v_m = \omega A$ 和 $a_m = \omega^2 A$ 称为速度幅值和加速度幅值。由此可见, 物体作简谐振动时, 其位移、速度及加速度都是随时间作周期性变化的, 图 11-2 给出了简谐振动的位移、速度和加速度与时间的关系。我们把物体作简谐振动时位移、速度及加速度随时间

周期性变化的特点推而广之,任何一个物理量,不管是位移、速度、加速度,还是电流、电压与电量等其他物理量,只要它们的变化符合余弦规律(或正弦规律),那么这个物理量就在作简谐振动。

通过弹簧振子的振动可知,如果物体受到的力的大小总是与物体对其平衡位置的位移成正比、而方向相反,那么,该物体的运动就是简谐振动,这是物体作简谐振动的动力学特征,这种性质的力称线性回复力。从式(11.2)还可以看出,作简谐振动的物体的加速度的大小总是与其位移的大小成正比、而方向相反,这一结论通常称为简谐运动的运动学特征。式(11.3)常称作简谐振动表达式。无论是运动学特征、动力学特征,还是简谐振动的表达式[即式(11.3)],都可以作为一个系统是否作简谐振动的判定根据。

二、简谐振动的振幅、周期、频率和相位

1. 振幅

在简谐振动表达式中,因余弦(或正弦)函数的绝对值不大于1,所以物体的振动范围只能处于 $+A$ 与 $-A$ 之间,通常把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。

2. 周期和频率

振动量完全重复一次所需要的时间,叫做振动的周期,常用 T 表示。由于每隔一个周期,振动状态就完全重复一次,所以

$$x = A \cos [\omega(t + T) + \varphi_0] = A \cos (\omega t + \varphi_0)$$

显然,满足上述方程的 T 的最小值应为 $\omega T = 2\pi$,故有

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (11.6)$$

单位时间内(即1s内)物体所作的完全振动的次数称做振动频率,用 ν 表示, ν 的单位为赫兹(Hz),显然频率与周期的关系是

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{或} \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \quad (11.7)$$

所以 ω 表示物体在 2π s的时间内所作的完全振动次数,称为振动的角频率,也称圆频率,它的单位是弧度·秒 $^{-1}$ (rad·s $^{-1}$)。

对于弹簧振子来讲, $m\omega^2 = k$,即 $\omega = \sqrt{k/m}$,所以弹簧振子的周期和频率为

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

对于一个质量 m 和倔强系数 k 都确定的谐振系统来说,其 ω 、 T 与 ν 都是由谐振

系统的结构特性来决定的,因此我们称之为谐振系统的固有周期和固有频率。

利用 T 和 ν , 谐振振动表达式可写成

$$x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right) \quad \text{或} \quad x = A \cos(2\pi\nu t + \varphi_0)$$

3. 相位和初相

由式(11.3)、(11.4)和(11.5)可知,在角频率 ω 和振幅 A 确定的情况下,振动物体在任一时刻 t 的运动状态(指位移、速度与加速度)都由 $(\omega t + \varphi_0)$ 决定。 $(\omega t + \varphi_0)$ 是决定简谐振动物体运动状态的物理量,称为振动的相位。显然 φ_0 是 $t = 0$ 时的相位,称为初相位,简称初相。

在振动和波动的研究中,相位是一个十分重要的概念。质点在振动的一个周期内所经历的状态没有一个是完全相同的,对应的相位来看,相当于相位从 0 到 2π 的变化。在图 11-3 中,我们给出的是简谐振动的位移时间曲线,这里 x 表示振动质点相对于平衡位置的位移。当一组 A 、 ω 和 φ_0 的量值已给定时,根据式(11.3)就可画出相应的位移时间曲线。从图中可以看出, $t = 0$ 时的位移 $x_0 = A \cos \varphi_0$ 是由初相位 φ_0 决定的,其中振幅 A 是最大位移的绝对值。曲线上的 a 、 b 两个时刻对应的位移一样,但运动状态却不一样。在 a 时刻谐振质点的速度方向沿 x 轴反向,朝负的最大位移处运动,而 b 时刻振动质点的速度方向沿 x 轴正向,是振动质点由负的最大位移处返回,往平衡位置的运动。如果要寻找和 a 时刻完全相同的状态,那只有在另一个周期中才能找到,如图中的 c 点即是。振动质点在 a 时刻与 c 时刻的位移、速度(甚至加速度)是完全相同的,也就是说振动状态完全一样,从对应的相位来说, c 时刻的相位恰好比 a 时刻增加了 2π 。也可以看出,周期 T 是相位改变 2π 对应的两个状态完全一样的时刻之间的时间间隔。由此可见,凡是振动状态完全相同的两个时刻,它们对应的相位差必然是 2π 或 2π 的整数倍。所以,相位是确定振动质点在 t 时刻运动状态(一般指位移和速度)的重要物理量。

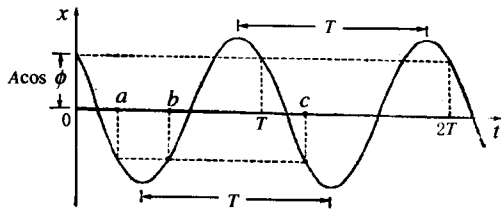


图 11-3 简谐振动的位移时间曲线

相位概念的重要性还在于比较两个谐振振动之间在“步调”上的差异。设有两个

同频率的谐振动,它们的表达式分别是

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_{10}), \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_{20})$$

它们的相位差为

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_{20}) - (\omega t + \varphi_{10}) = \varphi_{20} - \varphi_{10}$$

即它们在任意时刻的相位差恒等于其初相位差。当 $\Delta\varphi = 0, 2\pi, \dots, 2k\pi$ (k 为正整数) 时, 这时两振动物体将同时到达各自同方向的位移的最大值, 同时通过平衡位置且向同方向运动, 它们的步调完全一致, 我们称它们“同相”; 当 $\Delta\varphi = \pi, \dots, (2k+1)\pi$ (k 为正整数) 时, 两个谐振动物体, 一个到达正方向最大位移处, 而另一个却恰到负方向最大位移处, 它们同时到达平衡位置但运动方向相反, 即两个振动的步调完全相反, 我们称这样的两个振动为“反相”。

当 $\Delta\varphi$ 为其他值时, 如果 $\varphi_{20} - \varphi_{10} > 0$, 我们称第二个简谐振动超前第一个振动 $\Delta\varphi$, 或者说第一个振动落后于第二个振动 $\Delta\varphi$ 。

相位不但可用来比较简谐振动中同一物理量变化的步调, 也可以比较不同物理量之间变化的步调。如果我们把速度和加速度的表达式(11.4)与(11.5)改写成

$$v = -v_m \sin(\omega t + \varphi_0) = v_m \cos(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2})$$

$$a = -a_m \cos(\omega t + \varphi_0) = a_m \cos(\omega t + \varphi_0 \pm \pi)$$

可以看出, 速度的相位比位移的相位超前 $\pi/2$, 加速度的相位比位移的相位超前(或落后) π , 即二者恒反相。速度的相位比加速度落后 $\pi/2$ (或超前 $3\pi/2$)。

4. 振幅 A 和初相 φ_0 的确定

在谐振动的位移随时间变化的表达式(11.3)中, 除变量 x 与 t 外, 尚有三个特征量 A 、 ω 与 φ_0 , 前面已讲到 ω (或 ν 与 T) 由系统的结构特征来决定, 这里介绍振幅 A 与初相 φ_0 的确定。

如果在式(11.3)和(11.4)中, 以 $t=0$ 代入, 得

$$\begin{cases} x_0 = A \cos \varphi_0 \\ v_0 = -\omega A \sin \varphi_0 \end{cases} \quad (11.8)$$

由式(11.8)二等式可求得

$$\begin{cases} A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} \\ \varphi_0 = \arctan\left(-\frac{v_0}{\omega x_0}\right) \end{cases} \quad (11.9)$$