

C2版

张三慧 编著

大学物理学 下册

(第三版)

清华大学出版社

张三慧 编著

C2版

大学物理学

下册

(第三版)

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是张三慧编著的《大学物理学》(第三版)C2版下册,包括振动与波动,光学,气体动理论,热力学基础,相对论基础和量子物理基础。光学部分讲了光的干涉、衍射、偏振等规律。热力学基础主要介绍热力学第一和第二定律。量子物理基础部分包括微观粒子的二象性、薛定谔方程(定态)、原子中的电子能态、分子的结构和能级。各部分内容均配置了适量的联系实际的例题和习题。书末还列出了历年诺贝尔物理学奖获得者名录及其创新课题。本书基本内容讲解简明有序,扩展内容通俗易懂。

本书可作为高等院校的物理教材,也可以作为中学物理教师或其他读者自学的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学: C2版. 下册/张三慧编著. --3版. --北京: 清华大学出版社, 2011.9
ISBN 978-7-302-26603-7

I. ①大… II. ①张… 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(2011)第 177370 号

责任编辑: 朱红莲

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 北京国马印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260

印 张: 16.25

字 数: 371 千字

版 次: 2011 年 9 月第 3 版

印 次: 2011 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 28.00 元

产品编号: 043049-01

前言

FOREWORD

这部《大学物理学》(第三版)内容完全涵盖了2006年我国教育部发布的“非物理类理工学科大学物理课程基本要求”。书中对物理学的基本概念与规律进行了正确明晰的讲解。讲解基本上都是以最基本的规律和概念为基础,推演出相应的概念与规律。笔者认为,在教学上应用这种演绎逻辑更便于学生从整体上理解和掌握物理课程的内容。

力学是以牛顿定律为基础展开的。除了直接应用牛顿定律对问题进行动力学分析外,还引入了动量、角动量、能量等概念,并着重讲解相应的守恒定律及其应用。除惯性系外,还介绍了利用非惯性系解题的基本思路。

电磁学部分讲述电磁学的基本理论,包括静止和运动电荷的电场,运动电荷和电流的磁场,介质中的电场和磁场,电磁感应,电磁波等。

光学篇以电磁波和振动的叠加的概念为基础,讲述了光电干涉和衍射的规律。第13章光的偏振讲述了电磁波的横波特征。

热力学基础的讲述是以微观的分子运动的无规则性这一基本概念为基础的。除了阐明经典力学对分子运动的应用外,特别引入并加强了统计概念和统计规律,包括麦克斯韦速率分布律的讲解。对热力学第一定律也阐述了其微观意义。对热力学第二定律是从宏观热力学过程的方向性讲起,说明方向性的微观根源,并利用热力学概率定义了玻耳兹曼熵并说明了熵增加原理。这种讲法最能揭露熵概念的微观本质,也便于理解熵概念的推广应用。

刚体的转动、振动与波动这两章内容都是上述基本概念和定律对于特殊系统的应用。狭义相对论的讲解以两条基本假设为基础,从同时性的相对性这一“关键的和革命的”(杨振宁语)概念出发,逐渐展开得出各个重要结论。这种讲解可以比较自然地使学生从物理上而不只是从数学上弄懂狭义相对论的基本结论。

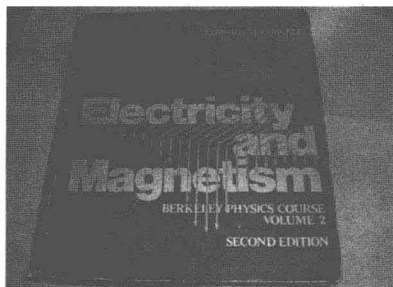
以上各部分的内容基本上都是经典理论,但也在适当地地方穿插了量子理论的概念和结论以便相互比较。

量子物理基础是从波粒二象性出发以定态薛定谔方程为基础讲解的。介绍了原子、分子和固体中电子的运动规律以及核物理的知识。

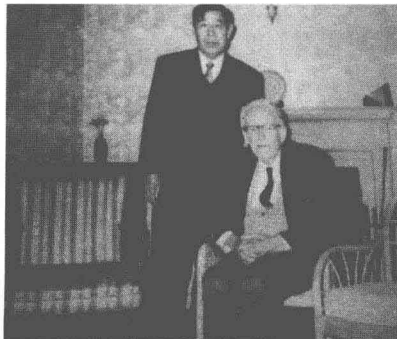
本书各章均配有习题,以帮助学生理解和掌握已学的物理概念和定律或扩充一些新的知识。这些题目有易有难,绝大多数是实际现象的分析和计算。题目的数量适当,不以多取胜。也希望学生做题时不要贪多,而要求精,要真正把做过的每一道题从概念原理上搞清楚,并且用尽可能简洁明确的语言、公式、图像表示出来,需知,对一个科技工作者来说,正确地书面表达自己的思维过程与成果也是一项重要的基本功。

本书在保留经典物理精髓的基础上,特别注意加强了现代物理前沿知识和思想的介绍。本书内容取材在注重科学性和系统性的同时,还注重密切联系实际,选用了大量现代科技与我国古代文明的资料,力求达到经典与现代,理论与实际的完美结合。

物理教学除了“授业”外,还有“育人”的任务。在此我还要介绍一下我和帕塞尔教授的一段交往。帕塞尔教授是哈佛大学教授,1952年因对核磁共振研究的成果荣获诺贝尔物理学奖。我于1977年看到他编写的《电磁学》,深深地为他的新讲法所折服。用他的书讲述两遍后,于1987年冒然写信向他请教,没想到很快就收到他的回信(见附图)和赠送给我的教材(第二版)及习题解答。他这种热心帮助一个素不相识的外国教授的行为使我非常感动。



帕塞尔《电磁学》(第二版)封面



本书作者与帕塞尔教授合影(1993年)

HARVARD UNIVERSITY

DEPARTMENT OF PHYSICS

LYMAN LABORATORY OF PHYSICS
CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS 02138

November 30, 1987

Professor Zhang Sanhui
Department of Physics
Tsinghua University
Beijing 100084
The People's Republic of China

Dear Professor Zhang:

Your letter of November 8 pleases me more than I can say, not only for your very kind remarks about my book, but for the welcome news that a growing number of physics teachers in China are finding the approach to magnetism through relativity enlightening and useful. That is surely to be credited to your own teaching, and also, I would surmise, to the high quality of your students. It is gratifying to learn that my book has helped to promote this development.

I don't know whether you have seen the second edition of my book, published about three years ago. A copy is being mailed to you, together with a copy of the Problem Solutions Manual. I shall be eager to hear your opinion of the changes and additions, the motivation for which is explained in the new Preface. May I suggest that you inspect, among other passages you will be curious about, pages 170-171. The footnote about Leigh Page repairs a regrettable omission in my first edition. When I wrote the book in 1963 I was unaware of Page's remarkable paper. I did not think my approach was original — far from it — but I did not take time to trace its history through earlier authors. As you now share my preference for this strategy I hope you will join me in mentioning Page's 1912 paper when suitable opportunities arise.

Your remark about printing errors in your own book evokes my keenly felt sympathy. In the first printing of my second edition we found about 50 errors, some serious! The copy you will receive is from the third printing, which still has a few errors, noted on the Errata list enclosed in the book. There is an International Student Edition in paperback. I'm not sure what printing it duplicates.

The copy of your own book has reached my office just after I began this letter! I hope my shipment will travel as rapidly. It will be some time before I shall be able to study your book with the care it deserves, so I shall not delay sending this letter of grateful acknowledgement.

Sincerely yours,

Edward M. Purcell
Edward M. Purcell

EMP/cad

帕塞尔回信复印件

他在信中写道“本书 170—171 页关于 L. Page 的注解改正了第一版的一个令人遗憾的疏忽。1963 年我写该书时不知道 Page 那篇出色的文章,我并不认为我的讲法是原创

的——远不是这样——但当时我没有时间查找早先的作者追溯该讲法的历史。现在既然你也喜欢这种讲法,我希望你和我一道在适当时机宣扬 Page 的 1912 年的文章。”一位物理学大师对自己的成就持如此虚心、谦逊、实事求是的态度使我震撼。另外他对自己书中的疏漏(实际上有些是印刷错误)认真修改,这种严肃认真的态度和科学精神也深深地教育了我。帕塞尔这封信所显示的作为一个科学家的优秀品德,对我以后的为人处事治学等方面都产生了很大影响,始终视之为楷模追随仿效,而且对我教的每一届学生都要展示帕塞尔的这一封信对他们进行教育,收到了很好的效果。

本书的撰写和修订得到了清华大学物理系老师的热情帮助(包括经验与批评),也采纳了其他兄弟院校的教师和同学的建议和意见。此外也从国内外的著名物理教材中吸取了很多新的知识、好的讲法和有价值的素材。这些教材主要有:新概念物理教程(赵凯华等),Feynman Lectures on Physics, Berkeley Physics Course (Purcell E M, Reif F, et al.), The Manchester Physics Series (Mandl F, et al.), Physics (Chianian H C.), Fundamentals of Physics (Resnick R), Physics (Alonso M et al.) 等。

对于所有给予本书帮助的老师和学生以及上述著名教材的作者,本人在此谨致以诚挚的谢意。清华大学出版社诸位编辑对第三版杂乱的原稿进行了认真的审阅和编辑,特在此一并致谢。

张三慧

2011 年 1 月

于清华园

目 录

CONTENTS

第 3 篇 光 学

第 10 章 振动与波动	3
10.1 简谐运动	4
*10.2 阻尼振动 受迫振动 共振	10
10.3 同一直线上简谐运动的合成	14
10.4 简谐波	16
*10.5 物体的弹性形变和弹性介质中的波速	22
10.6 波的能量	26
10.7 惠更斯原理与波的反射和折射	29
10.8 波的叠加 驻波	32
*10.9 多普勒效应	36
提要	39
习题	41
第 11 章 光的干涉	45
11.1 杨氏双缝干涉	45
11.2 相干光	49
11.3 光程	51
11.4 薄膜干涉(一)——等厚条纹	53
11.5 薄膜干涉(二)——等倾条纹	57
*11.6 迈克耳孙干涉仪	60
提要	61
习题	62
第 12 章 光的衍射	64
12.1 光的衍射和惠更斯-菲涅耳原理	64

12.2	单缝的夫琅禾费衍射	66
*12.3	光学仪器的分辨本领	70
12.4	光栅衍射	72
*12.5	X射线衍射	77
提要		79
习题		80
 第 13 章 光的偏振		81
13.1	光的偏振状态	81
13.2	线偏振光的获得与检验	83
13.3	反射和折射时光的偏振	85
*13.4	由散射引起的光的偏振	87
13.5	双折射现象	88
*13.6	椭圆偏振光和圆偏振光	92
*13.7	偏振光的干涉	93
*13.8	人工双折射	95
提要		96
习题		97

第 4 篇 热 学

第 14 章 温度和气体动理论	101
14.1 平衡态	101
14.2 温度的概念	102
14.3 理想气体状态方程	103
14.4 气体分子的无规则运动	104
14.5 理想气体的压强	105
14.6 温度的微观意义	109
14.7 能量均分定理	110
14.8 麦克斯韦速率分布律	113
14.9 麦克斯韦速率分布律的实验验证	116
提要	118
习题	119
第 15 章 热力学基础	122
15.1 热力学第一定律	123

15.2 热容	128
15.3 绝热过程	132
15.4 循环过程	135
15.5 热力学第二定律	141
15.6 玻耳兹曼熵公式与熵增加原理	146
15.7 可逆过程	151
提要	153
习题	155

第 5 篇 狭义相对论与量子物理

第 16 章 狭义相对论基础	159
16.1 牛顿相对性原理和伽利略变换	159
16.2 爱因斯坦相对性原理和光速不变	162
16.3 同时性的相对性和时间延缓	163
16.4 长度收缩	168
16.5 洛伦兹坐标变换	170
16.6 相对论速度变换	172
16.7 相对论质量	174
16.8 相对论动能	175
16.9 相对论能量	177
16.10 动量和能量的关系	179
提要	182
习题	183
第 17 章 量子物理基础	185
17.1 黑体辐射 光电效应	185
17.2 光的二象性 光子	190
17.3 康普顿散射	193
17.4 粒子的波动性	196
17.5 概率波与概率幅 不确定关系	199
17.6 薛定谔方程	206
17.7 无限深方势阱中的粒子	208
17.8 氢原子	217
17.9 微观粒子的不可分辨性和泡利不相容原理	223
17.10 各种原子核外电子的组态	225

提要	229
习题	231
元素周期表	235
数值表	236
习题答案	238
诺贝尔物理学奖获得者名录	244

第

3

篇

光 学

光 (这里主要指可见光)是人类以及各种生物生活不可或缺的**最**普通的要素。现在我们知道它是一种电磁波,但对它的这种认识却经历了漫长的过程。最早也是最容易观察到的规律是光的直线传播。在机械观的基础上,人们认为光是由一些微粒组成的,光线就是这些“光微粒”的运动路径。牛顿被尊为是光的微粒说的创始人和坚持者,但并没有确凿的证据。实际上牛顿已觉察到许多光现象可能需要用波动来解释,牛顿环就是一例。不过他当时未能作出这种解释。他的同代人惠更斯倒是明确地提出了光是一种波动,但是并没有建立起系统的有说服力的理论。直到进入 19 世纪,才由托马斯·杨和菲涅耳从实验和理论上建立起一套比较完整的光的波动理论,使人们正确地认识到光就是一种波动,而光的沿直线前进只是光的传播过程的一种表观的近似描述。托马斯·杨和菲涅耳对光波的理解还持有机械论的观点,即光是在一种介质中传播的波。关于传播光的介质是什么的问题,虽然对光波的传播规律的描述甚至实验观测并无直接的影响,但终究是波动理论的一个“要害”问题。19 世纪中叶光的电磁理论的建立使人们对光波的认识更深入了一步,但关于“介质”的问题还是矛盾重重,有待解决。最终解决这个问题的是 19 世纪末叶迈克耳孙的实验以及随后爱因斯坦建立的相对论理论。他们的结论是电磁波(包括光波)是一种可独立存在的物质,它的传播不需要任何介质。

本篇先介绍振动与波动,关于光的波动规律的讲解,基本上还是近 200 年前托马斯·杨和菲涅耳的理论,当然有许多应用实例是现代化的。正确的基本理论是不会过时的,而且它们的应用

将随时代的前进而不断扩大和翻新。现代的许多高新技术中的精密测量与控制就应用了光的干涉和衍射的原理。激光的发明(这也是40年前的事情了!)更使“古老的”光学焕发了青春。第11~13章就讲解波动光学的基本规律,包括干涉、衍射和偏振。在适当的地方都插入了若干这些规律的现代应用。所述规律大都是“唯象的”,没有用电磁理论麦克斯韦方程说明它们的根源。

光在均匀介质中沿直线传播的认识虽然是对光的波动本性的一种近似的描述,但在大量的光学实用技术中这种描述可以达到非常“精确”的程度,因而被当作理论基础。由此形成的光学理论叫几何光学。

从本质上说,光不仅是电磁波,而且还是一种粒子,称为光子。关于这方面的知识,将在本书第5篇相对论与量子物理中介绍。

振动与波动

物体在一定位置附近所作的往来的运动叫机械振动,简称振动。它是物体的一种运动形式。从日常生活到生产技术以及自然界中到处都存在着振动。一切发声体都在振动,机器的运转总伴随着振动,海浪的起伏以及地震也都是振动,就是晶体中的原子也都在不停地振动着。

广义地说,任何一个物理量随时间的周期性变化都可以叫做振动。例如,电路中的电流、电压,电磁场中的电场强度和磁场强度也都可能随时间作周期性变化。这种变化也可以称为振动——电磁振动或电磁振荡。这种振动虽然和机械振动有本质的不同,但它们随时间变化的情况以及许多其他性质在形式上都遵从相同的规律。因此研究机械振动的规律有助于了解其他种振动的规律,本章着重研究机械振动的规律。

振动有简单和复杂之别。最简单的是简谐运动,它也是最基本的振动,因为一切复杂的振动都可以认为是由许多简谐运动合成的。简谐运动在中学物理课程中已有较多的讨论,下面先简述简谐运动的运动学和动力学,然后介绍阻尼振动和受迫振动,再说明振动合成的规律。

一定的扰动的传播称为波动,简称波。机械扰动在介质中的传播称为机械波,如声波、水波、地震波等。变化电场和变化磁场在空间的传播称为电磁波,如无线电波、光波、X射线等。虽然各类波的本质不同,各有其特殊的性质和规律,但是在形式上它们也具有许多相同的特征和规律,如都具有一定的传播速度,都伴随着能量的传播,都能产生反射、折射、干涉和衍射等现象。本章主要讨论机械波的基本规律,其中有许多对电磁波也是适用的。近代物理研究发现,微观粒子具有明显的二象性——粒子性与波动性,因此研究微观粒子的运动规律时,波动概念也是重要的基础。本章后面几节先介绍机械波特别是简谐波的形成过程、波函数及其特征。再说明波的传播速度和弹性介质的性质的关系以及波动传送能量的规律。接着讲述波的传播规律——惠更斯原理,以及波的一种叠加现象——驻波。最后介绍多普勒效应。

10.1 简谐运动

质点运动时,如果离开平衡位置的位移 x (或角位移 θ) 按正弦规律随时间变化,这种运动就叫简谐运动(图 10.1)。因此,简谐运动常用下一数学式作为其运动学定义:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (10.1)$$

式中, A 为简谐运动的振幅,它表示质点可能离开原点(即平衡位置)的最大距离; ω 为简谐运动的角频率,它和简谐运动的周期 T 有以下关系:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (10.2)$$

简谐运动的频率 ν 为周期 T 的倒数,因而有

$$\omega = 2\pi\nu \quad (10.3)$$

将式(10.2)和式(10.3)代入式(10.1),又可得简谐运动的表达式为

$$x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) = A \cos(2\pi\nu t + \varphi) \quad (10.4)$$

ω , T 和 ν 都是表示简谐运动在时间上的周期性的量。

根据定义,可得简谐运动的速度和加速度分别为

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) = \omega A \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (10.5)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) = \omega^2 A \cos(\omega t + \varphi + \pi) \quad (10.6)$$

比较式(10.1)和式(10.6)可得

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x \quad (10.7)$$

这一关系式说明,简谐运动的加速度和位移成正比而反向。

式(10.1)、式(10.5)、式(10.6)的函数关系可用图 10.2 所示的曲线表示,其中表示 x - t 关系的曲线叫做振动曲线。

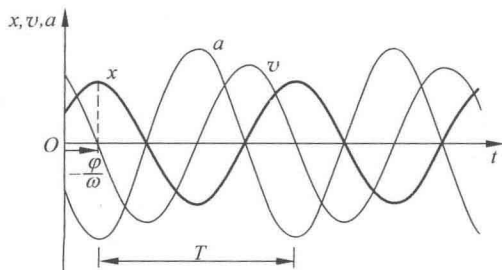


图 10.2 简谐运动的 x, v, a 随时间变化的关系曲线

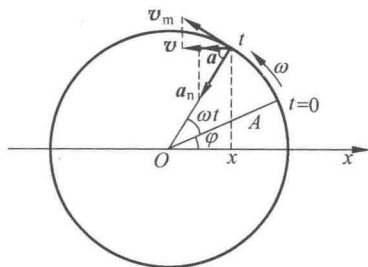


图 10.3 匀速圆周运动与简谐运动

质点的简谐运动和匀速圆周运动有简单的关系。如图 10.3 所示,质点沿着以平衡位置 O 为圆心,半径为 A 的圆周作角速度为 ω 的圆周运动时,它在一直径(取作 x 轴)上投

影的运动就是简谐运动。以起始时质点的径矢与 x 轴的夹角为 φ , 在时间 t 内该径矢转过的角度为 ωt , 则在任意时刻 t 质点在 x 轴上的投影的位置就是

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

这正是简谐运动的定义公式(10.1)。从图 10.3 还可以看出, 质点沿圆周运动的速度和加速度沿 x 轴的分量, 即质点在 x 轴上的投影的速度和加速度的表达式, 也正是上面简谐运动的速度和加速度的表达式——式(10.5)和式(10.6)。

正是由于简谐运动和匀速圆周运动的这一关系, 就常用圆周运动的起始径矢位置图表示一简谐运动。例如图 10.4 就表示式(10.1)所表达的简谐运动, 简谐运动的这一表示法叫**相量图法**, 长度等于振幅的径矢叫**振幅矢量**。

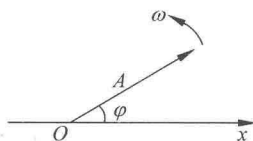


图 10.4 相量图

在简谐运动定义公式(10.1)中的量 $(\omega t + \varphi)$ 叫做在时刻 t 振动的**相(或相位)**。在相量图中, 它还有一个直观的几何意义, 即在时刻 t 振幅矢量和 x 轴的夹角。从式(10.1)和式(10.5), 或者借助于图 10.3, 都可以知道, 对于一个确定的简谐运动来说, 一定的相就对应于振动质点一定时刻的运动状态, 即一定时刻的位置和速度。因此, 在说明简谐运动时, 常不分别地指出位置和速度, 而直接用相表示质点的某一运动状态。例如, 当用余弦函数表示简谐运动时, $\omega t + \varphi = 0$, 即相为零的状态, 表示质点在正位移极大处而速度为零; $\omega t + \varphi = \pi/2$, 即相为 $\pi/2$ 的状态, 表示质点正越过原点并以最大速率向 x 轴负向运动; $\omega t + \varphi = (3/2)\pi$ 的状态表示质点也正越过原点但是以最大速率向 x 轴正向运动; 等等。因此, 相是说明简谐运动时常用到的一个概念。

在初始时刻即 $t=0$ 时, 相为 φ , 因此, φ 叫做**初相**。

在式(10.1)中, 如果 A, ω, φ 都知道了, 由它表示的简谐运动就确定了。因此, A, ω 和 φ 叫做简谐运动的三个特征量。

相的概念在比较两个同频率的简谐运动的步调时特别有用。设有下列两个简谐运动:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

它们的相差为

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_2) - (\omega t + \varphi_1) = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (10.8)$$

即它们在任意时刻的相差都等于其初相差而与时间无关。由这个相差的值就可以知道它们的步调是否相同。

如果 $\Delta\varphi = 0$ (或者 2π 的整数倍), 两振动质点将同时到达各自的同方向的极端位置, 并且同时越过原点而且向同方向运动, 它们的步调相同。这种情况我们说二者**同相**。

如果 $\Delta\varphi = \pi$ (或者 π 的奇数倍), 两振动质点将同时到达各自的相反方向的极端位置, 并且同时越过原点但向相反方向运动, 它们的步调相反。这种情况我们说二者**反相**。

当 $\Delta\varphi$ 为其他值时, 一般地说二者**不同相**。当 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 > 0$ 时, x_2 将先于 x_1 到达各自的同方向极大值, 我们说 x_2 振动超前 x_1 振动 $\Delta\varphi$, 或者说 x_1 振动落后于 x_2 振动 $\Delta\varphi$ 。当 $\Delta\varphi < 0$ 时, 我们说 x_1 振动超前 x_2 振动 $|\Delta\varphi|$ 。在这种说法中, 由于相差的周期是 2π , 所以我们将 $|\Delta\varphi|$ 的值限在 π 以内。例如, 当 $\Delta\varphi = (3/2)\pi$ 时, 我们常不说 x_2 振动超

前 x_1 振动 $(3/2)\pi$, 而改写成 $\Delta\varphi = (3/2)\pi - 2\pi = -\pi/2$, 且说 x_2 振动落后于 x_1 振动 $\pi/2$, 或说 x_1 振动超前 x_2 振动 $\pi/2$ 。

相不但用来表示两个相同的作简谐运动的物理量的步调, 而且可以用来表示频率相同的不同的物理量变化的步调。例如在图 10.2 中加速度 a 和位移 x 反相, 速度 v 超前位移 $\pi/2$, 而落后于加速度 $\pi/2$ 。

例 10.1

简谐运动。一质点沿 x 轴作简谐运动, 振幅 $A=0.05\text{ m}$, 周期 $T=0.2\text{ s}$ 。当质点正越过平衡位置向负 x 方向运动时开始计时。

(1) 写出此质点的简谐运动的表达式;

(2) 求在 $t=0.05\text{ s}$ 时质点的位置、速度和加速度;

(3) 另一质点和此质点的振动频率相同, 但振幅为 0.08 m , 并和此质点反相, 写出这另一质点的简谐运动表达式;

(4) 画出两振动的相量图。

解 (1) 取平衡位置为坐标原点, 以余弦函数表示简谐运动, 则 $A=0.05\text{ m}$, $\omega=2\pi/T=10\pi\text{ s}^{-1}$ 。由于 $t=0$ 时 $x=0$ 且 $v<0$, 所以 $\varphi=\pi/2$ 。因此, 此质点简谐运动表达式为

$$x = A\cos(\omega t + \varphi) = 0.05\cos(10\pi t + \pi/2) \text{ ①}$$

(2) $t=0.05\text{ s}$ 时,

$$x = 0.05\cos(10\pi \times 0.05 + \pi/2) = 0.05\cos\pi = -0.05\text{ m}$$

此时质点正在负 x 向最大位移处;

$$v = -\omega A\sin(\omega t + \varphi) = -0.05 \times 10\pi\sin(10\pi \times 0.05 + \pi/2) = 0$$

此时质点瞬时停止;

$$a = -\omega^2 A\cos(\omega t + \varphi)$$

$$= -(10\pi)^2 0.05\cos(10\pi \times 0.05 + \pi/2) = 49.3\text{ m/s}^2$$

此时质点的瞬时加速度指向平衡位置。

(3) 由于频率相同, 另一反相质点的初相与此质点的初相差就是 π (或 $-\pi$)。这另一质点的简谐运动表达式应为

$$x' = A'\cos(\omega t + \varphi - \pi) = 0.08\cos(10\pi t - \pi/2)$$

(4) 两振动的相量图见图 10.5。

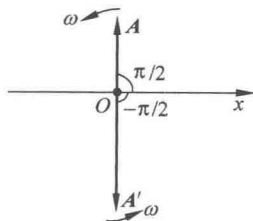


图 10.5 例 10.1 中两振动的相量图

作简谐运动的质点, 它的加速度和对于平衡位置的位移有式(10.7)所示的关系, 即

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

根据牛顿第二定律, 质量为 m 的质点沿 x 方向作简谐运动, 沿此方向所受的合外力就应该是

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} = -m\omega^2 x$$

① 本章表达式中各量用数值表示时, 除特别指明外, 均用国际单位制单位。

由于对同一个简谐运动, m, ω 都是常量, 所以可以说: 一个作简谐运动的质点所受的沿位移方向的合外力与它对于平衡位置的位移成正比而反向。这样的力称为回复力。

反过来, 如果一个质点沿 x 方向运动, 它受到的合外力 F 与它对于平衡位置的位移 x 成正比而反向, 即

$$F = -kx \quad (10.9)$$

其中, k 为比例常量, 则由牛顿第二定律, 可得

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \quad (10.10)$$

或

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x \quad (10.11)$$

微分方程的理论证明, 这一微分方程的解一定取式(10.1)的形式, 即

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

因此可以说, 在式(10.9)所示的合外力作用下, 质点一定作简谐运动。这样, 式(10.9)所表示的外力就是质点做简谐运动的充要条件。所以可以说, 质点在与对平衡位置的位移成正比而反向的合外力作用下的运动就是简谐运动。这可以作为简谐运动的动力学定义。式(10.10)就叫做简谐运动的动力学方程。

将式(10.7)和式(10.11)加以对比, 还可以得出简谐运动的角频率为

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (10.12)$$

这就是说, 简谐运动的角频率由振动系统本身的性质(包括力的特征和物体的质量)所决定。这一角频率叫振动系统的固有角频率, 相应的周期叫振动系统的固有周期, 其值为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (10.13)$$

和处理一般的力学问题一样, 除了知道式(10.9)所示外力条件外, 还需要知道初始条件, 即 $t=0$ 时的位移 x_0 和速度 v_0 , 才能决定简谐运动的具体形式。由式(10.1)和式(10.5)可知

$$x_0 = A \cos \varphi, \quad v_0 = -\omega A \sin \varphi \quad (10.14)$$

由此可解得

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} \quad (10.15)$$

$$\varphi = \arctan\left(-\frac{v_0}{\omega x_0}\right) \quad (10.16)$$

在用式(10.16)确定 φ 时, 一般说来, 在 $-\pi$ 到 π 之间有两个值, 因此应将此二值代回式(10.14)中以判定取舍。

简谐运动的三个特征量 A, ω, φ 都知道了, 这个简谐运动的情况就完全确定了。