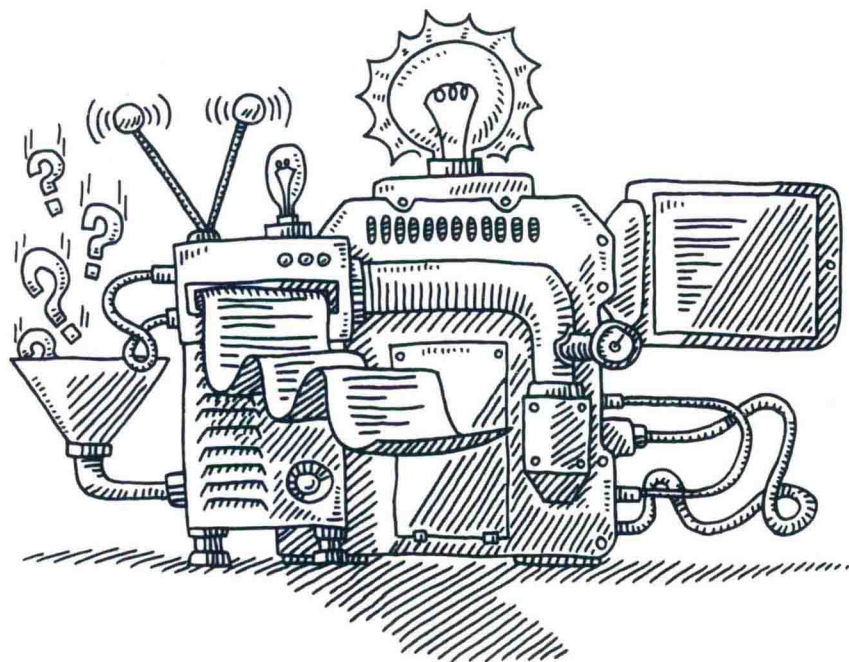


高等教育公共基础课精品系列规划教材



大学物理学

(下册)

主编 范纬世 蒋文科

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高等教育公共基础课精品系列规划教材

大学物理学

(下册)

主 编 范纬世 蒋文科
副主编 李玲玲 张艳娇 李敬瑜

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是按照高等学校非物理专业物理基础课程教学指导分委会制定的《非物理类理工科大学物理课程教学基本要求》，并结合一般应用型工科院校专业教学特点编写而成。全书内容包括：力学、电磁学、振动和波动、波动光学等。根据本课程在教学体系中的性质和地位，书中着重阐述了物理基本概念、基本理论、应用知识及科学分析问题的思路和方法。本书既是多年物理教学实践的一次总结，也是教学改革的一次尝试。

本书可作为高等院校理工科非物理类专业大学物理课程的教材或参考书，也可供其他专业和社会读者阅读。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理学. 下册/范纬世, 蒋文科主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 9
ISBN 978-7-5682-3111-4

I. ①大… II. ①范… ②蒋… 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 (2016) 第 216971 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / [http://www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 虎彩印艺股份有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 10

字 数 / 235 千字

版 次 / 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 24.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 马振武

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言 Preface

物理学主要研究物质结构和物质运动的基本规律。物理学属于基础科学，它是所有技术科学及工程科学的理论基础。

大学物理学是一门面向非物理专业本科生的基础课程，该课程向大学生介绍物理学的基本理论和研究方法，为后续的技术基础课及专业基础课奠定必要的物理基础。大学物理学注重培养学生的科学素质，最终的教学目的是为学生进入社会准备一个合理的知识—能力结构，使之具有继续学习的能力和开拓创新的能力。物理教学为人才的综合素质培养服务，特别是要培养学生的唯物主义思想和科学的方法论，以及在科学进步中不断探索的献身精神。

为了紧跟最新教育发展趋势，普通大学教育向应用型教育的转变，以及各学校不同程度降低大学物理课程课时的需要，我们根据教育部颁布的《非物理类理工科大学物理课程教学基本要求》编写了这本大学物理学教材。大学物理学将给学生建立一个基本完整的物理理论框架，这包括若干有内在联系的知识模块，并涵盖最基本、最重要的知识点。教学内容原则上不包含具体的专业技术知识，专业技术内容应放在技术基础课中讲授。新技术的基本物理原理如激光原理、半导体原理等纳入物理教学内容。教学内容中包括并强调能力的培养，如观察能力、思维能力、自学能力等。

本书编写的基本指导思想：教材定位准确，充分突出理工科素质教育的教学特点，内容简明扼要、深入浅出、信息量大、实用应用性强，注重学生职业岗位相关能力和职业道德修养的培养，提高学生综合运用知识的能力，引导学生全面发展。按照本课程教学基本要求，充分体现理论与实践的结合，知识传授与能力、素质培养的结合，在讲清物理概念，明确物理现象，提高学生分析问题、解决问题能力的基础上强化物理原理在现代工程技术中的应用。

在教材内容的处理上，秉承“必需、够用”为度的原则，以改革的精神，删减重复、陈旧的内容，精选、补充现代精华的内容，在有力强化物理基础知识的同时，加强

高新技术、前沿科学知识的引进,把最新的科技知识和成果带进课堂。跳出了本科教育课程设置的框架,突破传统学科体系,形成有职业本科教育特色的通识课课程体系。寓物理学方法论于知识性教学之中,融理论阐述、概念辅导、综合应用于一体。教学中应注重方法论的教育,如归纳与演绎、分析与综合,如抽象与建模、假设与试探、类比与等效、对称与守恒、决定性与概然性等,借以增强学生把握本质,提出问题,分析解决问题的能力。《大学物理学》作为一门基础理论课程的教材有其自身的风格,一些科普性的阅读内容未纳入这本教材中,使教材的表述较为统一,容量也较小。把教学重点放在基本概念和基本理论与实际应用的结合方面;在内容先后次序安排上采用循序渐进的方法,以便读者吸收掌握;在文字叙述上,力求通俗易懂,适当采用一些实例(或案例),概念的引出、定理的证明和例题的阐述力求简明清晰,并尽量配合图形,以形象地阐明相关知识,深入浅出地详尽展示每一个知识点,使文字说明易于理解,使读者易于接受,同时习题的编排从难度系数、专业应用等角度进行了合理编排,并有与之配套的习题册,这样可以更为有效地激发学生学习的的热情和兴趣,巩固学生的学习成果。本教材注重可教性,注重学生的认知规律,在重点和难点的处理上,融入了更多的教学经验。对于最基本的知识点,如物理模型的建立,物理概念的引入以及物理规律的确立方面,作了较多的阐述。对于学习上的难点,例如高等数学在物理中的应用等,在本教材中都有恰当的处理,从形象到抽象,由浅显而深入,循序渐进,便于阅读。教材的每一章都有简略的内容提要,帮助学生总结复习。教材的习题、例题较多,内容和形式也较多,便于教师选择和学生自学。

每篇均有安排背景聚焦和相关阅读资料,旨在使读者从物理学家们的成功与失败的经验教训中获得启示与鉴戒,帮助其更生动、更深刻地理解物理概念的内容实质,受到科学方法论的启迪和世界观的教育。在现有的物理教材中往往缺乏这些物理史料的介绍,常会造成一种物理学中无矛盾的假象,使学生难于从理性思维的高度把握本门学科的发展,也难于启发学生创造性的思维能力。本书通过这种形式在激发学生阅读的同时力图弥补教材的这种不足。

另外,我们正在积极制作配套课件、习题集、试题库、大学物理计算机考试系统、视频教学资源、课堂实物演示器材等,努力使本教材成为全方位的立体化教材。

本书由范纬世主编。力学部分由李敬瑜编写,电磁学部分由张艳娇编写,热学部分由范纬世编写,光学部分由李玲玲编写。

由于编者水平有限,考虑不周之处肯定在所难免,望读者谅解和指正。

编者

2015年10月

于河北科技学院

目 录 Contents

第三篇 振动与波动

第 9 章 振动	3
9.1 简谐振动	3
9.1.1 简谐振动实例	3
9.1.2 简谐振动的描述方法	6
9.1.3 简谐振动的能量	12
9.1.4 简谐振动的合成	14
* 9.2 阻尼振动	17
* 9.3 受迫振动、共振	19
9.3.1 受迫振动	19
9.3.2 共振	19
本章小结	20
习 题	21
第 10 章 波动	27
10.1 机械波的几个概念	27
10.1.1 机械波的形成	27
10.1.2 横波与纵波	28
10.1.3 波长 波的周期和频率 波速	29
10.2 平面简谐波	30
10.2.1 平面简谐波的表达式	30

* 10.2.2 波动微分方程	33
10.3 波的能量	34
10.4 惠更斯原理	35
10.5 波的干涉	36
10.5.1 波的叠加	36
10.5.2 波的干涉	37
本章小结	38
习 题	39

第四篇 波动光学

阅读: 光的本性认识的发展	45
---------------------	----

第 11 章 光	58
----------------	----

11.1 光的本性	58
11.2 光的干涉	59
11.2.1 相干光	59
11.2.2 杨氏双缝干涉实验	61
* 11.2.3 薄膜的干涉	66
* 11.2.4 劈尖的干涉 牛顿环	68
11.3 光的衍射	70
11.3.1 光的衍射现象	70
11.3.2 惠更斯-菲涅耳原理	70
11.3.3 单缝的夫琅和费衍射	71
* 11.3.4 衍射光栅	73
* 11.4 光的偏振	73
11.4.1 自然光 偏振光	73
11.4.2 偏振片 起偏与检偏	74
11.4.3 马吕斯定理	75
11.5 光的传播	75
本章小结	77
习 题	78

第五篇 热 学

背景聚焦——能源的未来	85
-------------------	----

第 12 章 气体分子运动论	88
----------------------	----

12.1 热学概述	88
12.2 热力学系统的平衡态、物态方程	90
12.2.1 热力学系统的平衡态	90

12.2.2 态参量和态函数	90
12.2.3 热力学第零定律温度	91
12.2.4 气体的物态方程	93
12.3 理想气体的压强公式	94
12.3.1 分子运动论的基本观点	94
12.3.2 理想气体的基本微观假设	96
12.3.3 理想气体的压强公式	97
12.3.4 统计规律	99
12.4 麦克斯韦速率分布律	100
12.4.1 麦克斯韦速率分布律	100
12.4.2 麦克斯韦速率分布律的实验验证	102
12.5 温度的微观解释	103
12.5.1 温度的微观解释	103
12.5.2 基本公式的验证	103
12.6 理想气体的内能	104
12.6.1 自由度	105
12.6.2 能量按自由度均分定理	106
12.6.3 理想气体的内能	107
12.7 气体输运过程的宏观规律和微观解释	107
12.7.1 气体分子的平均碰撞频率和自由程	107
12.7.2 粘滞现象的宏观规律及其微观解释	109
12.7.3 热传导现象的宏观规律及其微观解释	110
12.7.4 扩散现象的宏观规律及其微观解释	110
本章小结	111
习 题	112
第 13 章 热力学基础	114
13.1 热力学第一定律	114
13.1.1 准静态过程	114
13.1.2 准静态过程的功	115
13.1.3 内能	116
13.1.4 热量	116
13.1.5 热力学第一定律	117
13.2 理想气体的热容	118
13.2.1 热容、比热容和摩尔热容	118
13.2.2 理想气体的定容摩尔热容和定压摩尔热容	119
13.3 热力学第一定律对理想气体的应用	119
13.3.1 等容过程	120
13.3.2 等压过程	120

13.3.3 等温过程.....	120
13.3.4 绝热过程.....	121
13.4 循环过程卡诺循环.....	122
13.4.1 可逆过程与不可逆过程.....	122
13.4.2 循环过程.....	123
13.4.3 卡诺循环.....	125
13.4.4 卡诺定理.....	127
13.5 热力学第二定律.....	128
13.5.1 热力学第二定律的两种表达.....	128
13.5.2 热力学第二定律的实质.....	130
13.5.3 熵与熵增加原理.....	131
13.5.4 热力学第二定律的统计意义.....	134
本章小结.....	135
习 题.....	136
阅读: 热力学第二定律的发现.....	139
阅读: 熵的概念的建立和热寂说的起源.....	145
参考文献.....	152

第 三 篇

振动与波动

振动是自然界最普遍的现象之一。大至宇宙，小至亚原子粒子，无不存在振动。各种形式的物理现象，包括声、光、热等都包含振动。人们生活中也离不开振动：心脏的搏动、耳膜和声带的振动，都是人体不可缺少的功能；人的视觉靠光的刺激，而光本质上也是一种电磁振动；生活中不能没有声音和音乐，而声音的产生、传播和接收都离不开振动。在工程技术领域中，振动现象也比比皆是。例如，桥梁和建筑物在阵风或地震激励下的振动，飞机和船舶在航行中的振动，机床和刀具在加工时的振动，各种动力机械的振动，控制系统中的自激振动，等等。一些振动拥有比较固定的波长和频率，一些振动则没有固定的波长和频率。两个振动频率相同的物体，其中一个物体振动时能够让另外一个物体产生相同频率的振动，这种现象叫做共振，共振现象能够给人类带来许多好处和危害。不同的原子拥有不同的振动频率，发出不同频率的光谱，因此可以通过光谱分析仪发现物质含有哪些元素。在常温下，粒子振动幅度的大小决定了物质的形态（固态、液态和气态）。不同的物质拥有不同的熔点、凝固点和汽化点也是由粒子不同的振动频率决定的。我们平时所说的气温就是空气粒子的振动幅度。任何振动都需要能量来源，没有能量来源就不会产生振动。物理学规定的绝对零度就是连基本粒子都无法产生振动的温度，也是宇宙的最低温度。振动原理广泛应用于音乐、建筑、医疗、制造、建材、探测、军事等行业，有许多细小的分支，对任何分支的深入研究都能够促进科学的向前发展，推动社会进步。

波动是振动的传播过程，振动是波动的源。波动是一种常见的物质运动形式，例如绳上的波、空气中的声波、水面波等，这些波都是机械振动在弹性介质中的传播，称为机械波。此外，无线电波、光波也是一种波动，这种波是变化的电场和变化的磁场在空间的传播，称为电磁波。本篇波动是质点群联合起来表现出的周而复始的运动现象。其成因是介质中质点受到相邻质点的扰动而随着运动，并将形振动形式由远及近地传播开来，各质点间存在相互作用的弹力。

本篇主要讨论简谐振动的特征和机械波传播的规律，掌握了这些知识对其他复杂的振动和波动就不难理解了。

物体在一定位置附近作周期性的往返运动，如钟摆的摆动、心脏的跳动、气缸活塞的往复运动，以及微风中树枝的摇曳等，这些都是振动。广义地说，凡描述物质运动状态的物理量，在某个数值附近作周期性变化，都叫振动。

在许多情况下，振动被认为是消极因素。例如，振动会影响精密仪器设备的功能，降低加工精度和光洁度，加剧构件的疲劳和磨损，从而缩短机器和结构物的使用寿命，振动还可能引起结构的大变形破坏，有的桥梁曾因振动而坍塌；飞机机翼的颤振、机轮的抖振往往造成事故；车船和机舱的振动会劣化乘载条件；强烈的振动噪声会形成严重的公害。

然而，振动也有它积极的一面。例如，振动是通信、广播、电视、雷达等工作的基础。上世纪 50 年代以来，陆续出现许多利用振动的生产装备和工艺。例如，振动传输、振动筛选、振动研磨、振动抛光、振动沉桩、振动消除内应力等。它们极大地改善了劳动条件，成十、百倍地提高劳动生产率。可以预期，随着生产实践和科学研究的不断进展，振动的利用还会与日俱增。

9.1 简谐振动

9.1.1 简谐振动实例

在振动中，最简单最基本的是简谐振动，一切复杂的振动都可以看作是由若干个简谐振动合成的结果。在忽略阻力的情况下，弹簧振子的小幅度振动以及单摆的小角度振动都是简谐振动。

1. 弹簧振子

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，如图 9-1 所示，当弹簧为原长时，物体所受的合力为零，处于平衡状态，此时物体所在的位置 O 就是其平衡位置。在弹簧的弹性限度内，如果把物体从平衡位置向右拉开后释放，这时由于弹簧被拉长，产生了指向平衡位置的弹性力，在弹性力的作用下，物体便向左运动。当通过平衡

位置时, 物体所受到的弹性力减小到零, 由于物体的惯性, 它将继续向左运动, 致使弹簧被压缩。弹簧因被压缩而出现向右的指向平衡位置的弹性力, 该弹性力将阻碍物体向左运动, 使物体的运动速度减小直到为零。之后物体又将在弹性力的作用下向右运动。在忽略一切阻力的情况下, 物体便会以平衡位置 O 为中心, 在与 O 点等距离的两边作往复运动。

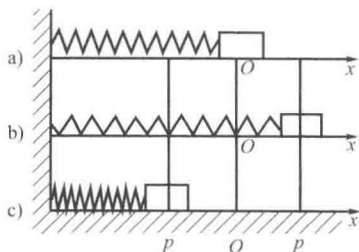


图 9-1 弹簧振子的振动

图中, 取物体的平衡位置 O 为坐标原点, 物体的运动轨迹为 x 轴, 向右为正方向。在小幅度振动时, 由胡克定律可知, 物体所受的弹性力 F 与弹簧的伸长即物体相对平衡位置的位移 x 成正比, 弹性力的方向与位移的方向相反, 总是指向平衡位置。即

$$F = -kx$$

式中 k 是弹簧的劲度系数, 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 $F = ma$ 和 $a = \frac{d^2x}{dt^2}$, 物体的加速度为

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{kx}{m} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad \text{即} \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (9-1)$$

对于一个给定的弹簧振子, k 与 m 都是常量, 而且都是正值, 故我们可令

$$\frac{k}{m} = \omega^2 \quad (9-2)$$

代入上式得

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (9-3)$$

这一微分方程的解是

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (9-4)$$

式中 A 和 φ 是积分常数, 它们的物理意义将在后面讨论。由上式可知, 弹簧振子运动时, 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, 我们把具有这种特征的运动称为简谐振动。

根据速度和加速度的定义, 将式 (9-4) 分别对时间求一阶导和二阶导, 可分别得到物体作简谐振动时的速度和加速度:

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) \quad (9-4a)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) \quad (9-4b)$$

上述各式中, 式 (9-3) 揭示了简谐振动中的受力特点, 故称之为简谐振动的动力学方程, 而式 (9-4) 反映的是简谐振动的运动规律, 故称为简谐振动的运动学方程。

2. 单摆

如图 9-2 所示, 一根不会伸缩的细线上端固定, 下端悬挂一个体积很小质量为 m 的重物。细线静止地处于铅直位置时, 重物在其平衡位置 O 处。

把重物从平衡位置略为移开后放手, 重物就在平衡位置附近来回摆动, 这种装置称为单摆。

设在某时刻, 单摆的摆线与竖直方向的夹角为 θ , 忽略一切阻力时, 重物受到重力 G 和线的拉力 T 作用。重力的切向分量 $mg \sin \theta$ 决定重物沿圆周的切向运动。设摆线长为 l , 沿逆时针方向转过的 θ 为正, 根据牛顿运动定律得

$$-mg \sin \theta = ml \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

当 θ 很小时, $\sin \theta \approx \theta$, 所以

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \theta = 0$$

式中令 $\omega^2 = \frac{g}{l}$ 。与式(9-3) 相比较可知, 单摆在摆角很小时的振动是简谐振动。

3. 复摆

一个可绕固定轴 O 转动的刚体称为复摆。如图 9-3 所示。

平衡时, 摆的重心 C 在轴的正下方, 摆动到任意时刻, 重心与轴的连线 OC 偏离竖直位置一个微小角度 θ , 我们规定偏离平衡位置沿逆时针方向转过的角位移为正。设复摆对轴 O 的转动惯量为 J , 复摆的质心 C 到 O 的距离 $OC = h$ 。

复摆在角度 θ 处受到的重力矩为 $M = -mgh \sin \theta$, 当摆角很小时, $\sin \theta \approx \theta$, 所以 $M = -mgh \theta$, 由转动定律得

$$-mgh \theta = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad \text{即} \quad \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{mgh}{J} \theta = 0$$

式中令 $\omega^2 = \frac{mgh}{J}$, 与式(9-3) 相比较可知, 复摆在摆角很小时的振动是简谐振动。

例 9-1 一远洋海轮, 质量为 M , 浮在水面时其水平截面积为 S 。设在水面附近海轮的水平截面积近似相等, 如图 9-4 所示。试证明此海轮在水中作幅度较小的竖直自由振动是简谐振动。

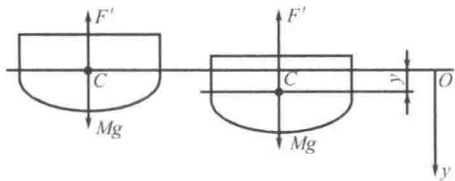


图 9-4

解: 选择 C 点代表船体。当船处于静浮状态时, 此时船所受浮力与重力相平衡, 即 $F = \rho g Sh = Mg$, 式中 ρ 是水的密度, h 是船体 C 以下的平均深度。

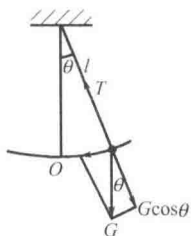


图 9-2 单摆

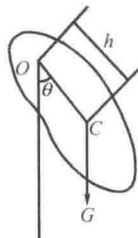


图 9-3 复摆

取竖直向下的坐标轴为 y 轴, 坐标原点 O 与 C 点在水面处重合。设船上下振动的任一瞬时, 船的位置即 C 点的坐标为 y (y 即是船相对水面的位移, 可正可负), 此时船所受浮力

$$F' = \rho g S(h + y)$$

则作用在船上的合力

$$\Sigma F = Mg - F' = \rho g S y$$

由 $\Sigma F = M \frac{d^2 y}{dt^2}$ 得:

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = -\rho g S y$$

即

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{\rho g S}{M} y = 0$$

式中 M 、 S 、 ρ 、 g 皆为正, 故可令 $\omega^2 = \frac{\rho g S}{M}$,

则

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

可见, 描写船位置的物理量 y 满足简谐振动的动力学方程, 故船在水中所作的小幅度的竖直自由振动是简谐振动。

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。

简谐振动是一种理想的运动过程。严格的简谐振动是不存在的, 但对处于稳定平衡的系统, 当它对平衡状态发生一微小的偏离后所产生的振动, 在阻力很小而可以忽略时, 就可以近似地看作是简谐振动。因此, 谐振子是一个重要的理想模型。

例 由电容 C 、电感 L 所组成的一个回路, 如图 9-5 所示。若给电容器充上一定的电荷 Q , 在忽略阻力的情况下, 就能形成在电路内周期性往返流动的电流, 并引起电容器内的电场和电感线圈中的磁场的周期性变化, 导致无阻尼电磁振荡。进一步的定量研究表明, 在无阻尼的电磁振荡过程中, 电容器极板上的电荷 Q 和电路中的电流强度 I 皆满足式(9-3)的微分方程。此 $L-C$ 电路系统遵循简谐振动的规律, 故亦可称为谐振子。

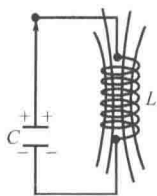


图 9-5 $L-C$ 电路

另外, 对微观领域中的某些运动也可以利用谐振子的模型进行研究, 像分子、原子、电子的振动等。

由此可见, 简谐振动的规律不仅出现于力学范畴, 它还出现于电磁学、原子物理学、光学及其他领域。因此, 一个物理系统, 若描写其状态的物理量符合简谐振动的定义式(9-3), 皆可广义地称为谐振子。

9.1.2 简谐振动的描述方法

简谐振动的运动学方程式(9-4) 即 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ 反映了简谐振动的运动规律。下面我们逐个分析方程中出现的量。

1. 振幅

在简谐振动的表达式(9-4) 中, 因余弦(或正弦)函数的绝对值不会大于 1, 所以物

体的振动范围在 $+A$ 和 $-A$ 之间。我们把作简谐振动的物体离开平衡位置的最大位移的绝对值 A 叫作振幅。它描述了振动物体往返运动的范围和幅度。这是个反映振动强弱的物理量。

2. 周期和频率

振动的特征之一是运动具有周期性。我们把完成一次完整全振动所经历的时间称为周期,用 T 来表示。单位是s。因此,每隔一个周期,振动状态就完全重复一次。

设某时刻 t 物体的位置为 x ,在 $t+T$ 时刻物体到达位置 x'

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

$$x' = A \cos[\omega(t+T) + \varphi]$$

由周期性, $x = x'$ 即 $A \cos[\omega(t+T) + \varphi] = A \cos(\omega t + \varphi)$

上式方程中 T 的最小值应满足 $\omega T = 2\pi$ 所以

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{或} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (9-5)$$

单位时间内物体完成完全振动的次数称为频率,用 ν 或 f 表示。它的单位是赫兹,符号是Hz。显然,频率与周期的关系为

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{或} \quad \omega = 2\pi\nu \quad (9-6)$$

可见振动方程中的 ω 是一个与振动的周期有关的物理量。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rad/s。

周期和频率都是反映振动快慢的物理量。

对于弹簧振子, $\frac{k}{m} = \omega^2$,所以弹簧振子的周期和频率分别为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9-7)$$

由于弹簧振子的质量 m 和劲度系数 k 是其本身固有的性质,所以周期和频率完全由振动系统本身的性质所决定,因此被称为固有周期和固有频率。

对于单摆, $\omega^2 = \frac{g}{l}$,所以单摆的周期和频率分别为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$$

单摆的振动周期和频率也完全决定于振动系统本身的性质,即决定于重力加速度 g 和摆长 l ,因此也是固有周期和固有频率,并且周期和频率还与摆球的质量无关。在小摆角的情况下,单摆的周期又与振幅无关,所以单摆可用作计时。单摆为测量重力加速度 g 提供了一种简便方法。

对于复摆, $\omega^2 = \frac{mgh}{J}$ 所以复摆的周期和频率分别为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgh}} \quad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{mgh}{J}}$$

上式表明,复摆的振动周期和频率同样完全由振动系统本身的性质所决定,因此也是有周期和固有频率。由复摆的周期公式可知,如果测出摆的质量 m ,重心到转轴的距离 h ,

以及摆的周期 T , 就可以求得此物体绕该轴的转动惯量 J 。有些形状复杂物体的转动惯量, 用数学方法进行计算比较困难, 有时甚至是不可能的, 但用振动方法可以测定。

对于长为 l 、可绕过其一端的轴转动的细杆, $J = \frac{1}{3}ml^2$, 所以绕杆端轴线摆动的周期和频率分别为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2l}{3g}} \quad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{3g}{2l}}$$

3. 相位和初相

由式(9-4)可知, 当角频率 ω 和振幅 A 已知时, 振动物体在任一时刻 t 的运动状态(位置、速度、加速度等)都由 $(\omega t + \varphi)$ 决定。 $(\omega t + \varphi)$ 是决定简谐振动运动状态的物理量, 称为振动的相位。显然 φ 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。物体的振动, 在一个周期之内, 每一时刻的运动状态都不相同, 这相当于相位经历着从 0 到 2π 的变化。例如图 9-1 所示的弹簧振子, 我们用余弦函数表示的简谐振动, 若某时刻 $(\omega t + \varphi) = 0$, 即相位为零, 则可决定该时刻 $x = A$, $v = 0$, 表示物体在正位移最大处而速度为零; 当相位 $(\omega t + \varphi) = \frac{\pi}{2}$ 时, $x = 0$, $v = -\omega A$, 表示物体在平衡位置并以最大速率 ωA 向 x 轴负方向即向左运动; 而当相位 $(\omega t + \varphi) = \frac{3\pi}{2}$ 时, $x = 0$, $v = \omega A$, 这时物体也在平衡位置, 但以最大速率 ωA 向 x 轴正方向即向右运动。可见, 不同的相位表示不同的运动状态。凡是位移和速度都相同的运动状态, 它们所对应的相位相差 2π 或 2π 的整数倍。由此可见, 相位是反映周期性特点, 并用以描述运动状态的重要物理量。

相位概念的重要性还在于比较两个简谐振动之间在“步调”上的差异。设有两个同频率的简谐振动, 它们的振动表式为

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

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

它们的相位差为

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

即它们在任意时刻的相位差都等于它们的初相位之差。当 $\Delta\varphi$ 等于零或 2π 的整数倍时, 这时两振动物体将同时到达各自同方向的位移的最大值, 同时通过平衡位置而且向同方向运动, 它们的步调完全相同, 我们称这样的两个振动为同相。当 $\Delta\varphi$ 等于 π 或者 π 的奇数倍时, 则一个物体到达正的最大位移时, 另一个物体到达负的最大位移处, 它们同时通过平衡位置但向相反运动, 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 $\varphi_2 - \varphi_1 > 0$, 我们称第二个简谐振动超前第一个简谐振动 $\Delta\varphi$, 或者说第一个简谐振动落后于第二个简谐振动 $\Delta\varphi$ 。以此来表达它们振动步调上的差别。

引入相位差的概念, 不仅仅是为了描述两个同频率简谐振动之间的步调上的差异, 后面将看到, 当一个物体同时参与两个或两个以上同频率的简谐振动时, 合振动的强弱将取决于这几个振动之间的相位差。在波动理论和波动光学中, 相位差这一概念也将继续发挥重要的