

# 大学 物理学

第Ⅲ册

华中理工大学  
物理系编写

华中理工大学出版社

DAXUE  
WULI XUE



# 大学物理学

## 第三册

李天应

主编 (第一册系胡迪文)

张文华 黄伯坚

李天应 编

贺渝龙 张端明

《大学物理学》 第三册

**波 和 粒 子**

李天应 主编

责任编辑 周筠

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本: 787×1092

印张: 13.75 字数: 302 100

1979年9月第1版

1989年9月第1次印刷

印数: 1—3 000

ISBN 7-5609-0339.8/O·53

定价: 3.95元

## 本社物理类书目

| 书 名                                    | 作 (译) 者             |
|----------------------------------------|---------------------|
| 近代物理简明教程                               | 王永久、房思廷等            |
| 物理学与物理学家                               | 杨建鄯等                |
| 物理学计算机程序设计50例                          | 刘 祁等                |
| 固体物理基础                                 | 陈 洗                 |
| 大学物理学(I) }<br>大学物理学(II) }              | 华中理工大学物理系编          |
| 大专物理学                                  | 吴永盛等                |
| 大学物理学(上) }<br>大学物理学(中) }<br>大学物理学(下) } | 十三所工科院校合编           |
| 二十个重大的科学实验                             | (英)罗姆·哈富<br>李思梦 殷正坤 |
| 电磁学疑难解析                                | 王荣槐                 |
| 物理光学(长春)                               | 孙柏忠                 |
| 激光基础                                   | 徐启阳                 |

## 内 容 提 要

本册分三篇编写：第五篇振动与波动，包括振动、波动通论和声学基础知识共三章；第六篇波动光学，包括光波的干涉、衍射、偏振以及光波的吸收、色散和散射共四章；第七篇量子物理学基础，包括早期量子论和量子力学基础及应用共两章。

另外，书中还编入了非线性光学简介和亚原子物理简述，作为阅读材料供读者参阅。

本书以实验事实为基础，着重于物理概念和规律的阐述，力求思路清晰，叙述清楚、重点突出，深入浅出。

## 前 言

振动和波动是自然界物质运动的普遍形式，从宏观物质世界到微观物质世界，无处不存在振动和波动运动。

最基本的振动形式是简谐振动，最基本的波动形式则是简谐波。我们在介绍简谐振动和简谐波的一般规律的基础上，分别介绍机械波和电磁波的基本规律。对于光波段电磁波的描述形成了物理学中的一个重要部分——波动光学，在这一册中我们将用一整篇的篇幅介绍波动光学的主要内容。为便于同学们了解一些现代光学知识，我们还编入了非线性光学的简要内容，供阅读用。

宏观物质要么具有粒子性质，要么具有波动性质，但是微观粒子却同时具有波-粒二象性，一切微观粒子均伴随着物质波。微观世界的突出特征是量子现象，描述微观世界基本规律的量子理论，包括早期量子论和更为精确的量子力学。早期量子论的学习不只是认识上从经典理论向量子力学过渡的桥梁，它的许多结论至今仍具有实用意义，应有足够的重视。量子力学的数学形式很复杂，在大学物理学范围内应着重于物理思想的学习。

对物质结构的了解，原子——由少数基本粒子组成的“小体系”这一层次具有重要意义，我们在较详细地介绍了原子内部过程之后，简要介绍了一些有关固体的知识。在阅读材料中还编入了对亚原子物理学的介绍。

由粒子、波动到微观粒子的波-粒二象性，由经典物理学至量子理论的发展，充分体现了本书序言中指出的物理学理论

和谐统一的特点，学习中应注意把握。

本书第五篇由张文华执笔，第六篇由黄伯坚执笔，第七篇由李天应执笔，阅读材料1由贺渝龙执笔，阅读材料2由张端明执笔。武汉工业大学张金如教授审阅了全部书稿，并提供了宝贵意见。

# 目 录

## 第五篇 振动与波动

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| 引 言 .....                  | ( 1 )   |
| 第一章 振 动 .....              | ( 3 )   |
| § 1.1 简谐振动 .....           | ( 4 )   |
| § 1.2 简谐振动与旋转矢量 .....      | ( 8 )   |
| § 1.3 摆动 .....             | ( 15 )  |
| § 1.4 $LC$ 电路的电磁振荡 .....   | ( 19 )  |
| § 1.5 简谐振动的能量 .....        | ( 26 )  |
| § 1.6 阻尼振动 .....           | ( 31 )  |
| § 1.7 受迫振动与共振 .....        | ( 38 )  |
| § 1.8 同方向简谐振动的合成 .....     | ( 46 )  |
| § 1.9 方向相互垂直的简谐振动的合成 ..... | ( 55 )  |
| 第二章 波动通论 .....             | ( 63 )  |
| § 2.1 机械波的产生 .....         | ( 63 )  |
| § 2.2 振动曲线与波形曲线 .....      | ( 69 )  |
| § 2.3 波长 周期与频率 波速 .....    | ( 72 )  |
| § 2.4 多普勒效应 .....          | ( 82 )  |
| § 2.5 电磁波的产生 .....         | ( 84 )  |
| § 2.6 电磁波的波动方程 .....       | ( 88 )  |
| § 2.7 波的能量 能流密度 .....      | ( 90 )  |
| § 2.8 惠更斯原理 波的衍射现象 .....   | ( 97 )  |
| § 2.9 波的反射与折射 .....        | ( 101 ) |
| § 2.10 波的迭加原理与波的干涉 .....   | ( 104 ) |



|                            |         |
|----------------------------|---------|
| § 2.11 机械驻波 .....          | ( 109 ) |
| § 2.12 电磁驻波 .....          | ( 119 ) |
| <b>第三章 声学基础知识</b> .....    | ( 122 ) |
| § 3.1 声速与声压 .....          | ( 122 ) |
| § 3.2 声波的能量 .....          | ( 127 ) |
| § 3.3 响度级与等响曲线 .....       | ( 132 ) |
| § 3.4 声波在大气中的反射与折射现象 ..... | ( 134 ) |

## 第 六 篇 波动光学

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| <b>引 言</b> .....             | ( 137 ) |
| <b>第一章 光波的干涉</b> .....       | ( 139 ) |
| § 1.1 光波 光程 费马原理 .....       | ( 139 ) |
| § 1.2 光扰动的迭加 相干光 .....       | ( 144 ) |
| § 1.3 分波阵面干涉 .....           | ( 150 ) |
| § 1.4 光波反射时的位相 .....         | ( 158 ) |
| § 1.5 分振幅干涉 .....            | ( 162 ) |
| § 1.6 干涉现象的应用 .....          | ( 168 ) |
| <b>第二章 光波的衍射</b> .....       | ( 176 ) |
| § 2.1 两种衍射 惠更斯-菲涅耳原理 .....   | ( 176 ) |
| § 2.2 单缝夫琅和费衍射 .....         | ( 179 ) |
| § 2.3 双缝衍射与干涉 .....          | ( 186 ) |
| § 2.4 多缝——衍射光栅 .....         | ( 192 ) |
| § 2.5 X射线衍射 布喇格公式 .....      | ( 200 ) |
| § 2.6 圆孔衍射 光学仪器的分辨率 .....    | ( 204 ) |
| § 2.7 全息照相 .....             | ( 210 ) |
| <b>第三章 光波的偏振</b> .....       | ( 216 ) |
| § 3.1 偏振光与自然光 .....          | ( 216 ) |
| § 3.2 通过选择吸收产生偏振 马吕斯定律 ..... | ( 221 ) |
| § 3.3 由反射产生偏振 .....          | ( 226 ) |

|       |                                                |         |
|-------|------------------------------------------------|---------|
| § 3.4 | 双折射 .....                                      | ( 230 ) |
| § 3.5 | 波晶片 偏振光的干涉 .....                               | ( 235 ) |
| § 3.6 | 偏振面的旋转——旋光 .....                               | ( 240 ) |
| *第四章  | 光波的吸收 色散和散射 .....                              | ( 243 ) |
| § 4.1 | 光的吸收 .....                                     | ( 243 ) |
| § 4.2 | 光的色散 .....                                     | ( 246 ) |
| § 4.3 | 光的散射 .....                                     | ( 250 ) |
| § 4.4 | 散射光的偏振 .....                                   | ( 254 ) |
| 附录1   | 许多频率的简谐波的迭加 .....                              | ( 259 ) |
| 附录2   | 空间相干性公式 $b \sim L \frac{\lambda}{d}$ 的推导 ..... | ( 263 ) |
| 附录3   | 费涅尔公式的导出 .....                                 | ( 266 ) |

## 第 七 篇 量子物理学基础

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 引 言                      | ( 268 ) |
| 第一章 早期量子论                | ( 269 ) |
| § 1.1 热辐射 普朗克量子假说        | ( 269 ) |
| § 1.2 光电效应 爱因斯坦光子学说      | ( 278 ) |
| § 1.3 康普顿效应              | ( 282 ) |
| § 1.4 电磁辐射与物质的相互作用 电磁场量子 | ( 285 ) |
| § 1.5 氢原子光谱的实验规律         | ( 293 ) |
| § 1.6 玻尔氢原子理论            | ( 301 ) |
| 第二章 量子力学基础及应用            | ( 311 ) |
| § 2.1 德布罗意物质波假设          | ( 311 ) |
| § 2.2 测不准关系式             | ( 316 ) |
| § 2.3 波函数及其统计意义          | ( 320 ) |
| § 2.4 薛定谔方程              | ( 322 ) |
| § 2.5 势阱中的粒子             | ( 326 ) |
| § 2.6 势垒 隧道效应            | ( 333 ) |

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| § 2.7 氢原子 .....          | ( 338 ) |
| § 2.8 电子自旋 .....         | ( 346 ) |
| § 2.9 原子中的电子壳层结构 .....   | ( 351 ) |
| § 2.10 X射线与内层电子的跃迁 ..... | ( 363 ) |
| § 2.11 激光 .....          | ( 370 ) |
| § 2.12 半导体 .....         | ( 378 ) |
| 阅读材料1 非线性光学简介 .....      | ( 385 ) |
| 阅读材料2 亚原子物理简述 .....      | ( 402 ) |

## 第五篇 振动与波动

### 引 言

振动与波动是自然界非常普遍的两种运动形式，大至宇宙空间，小至分子、原子内部无不存在振动与波动现象。虽然振动与波动是两种不同的运动形式，但它们之间有着极其密切的联系。在自然界不同的物质系统中所产生的振动现象其机理不同，但仔细分析一下就会发现它们都遵守共同的基本规律。例如，某些振动体的位置总是以某一固定点为中心而作周期性的变化和LC电路中电场与磁场之间作周期性的交替变化，都可用形与 $\ddot{Q} + \omega^2 Q = 0$ 的振动微分方程来表示其规律，式中Q就是代表作周期性变化的某一物理量。对于不同的波动现象也可用波动方程 $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$ 表示其波动规律。式中u是波速， $\phi$ 是代表某一波动现象的物理量。

对于振动而言，广义地讲，当某一物质系统处于振动状态时，那么反映该系统振动状态的某一物理量就会以某一固定值为中心而随着时间作周期性的变化。所谓周期性是指一物质系统的运动状态经过一个固定的最短时间后，该系统的运动状态就重复出现，反映这种周期性变化的特点可用一简单的数学形式表示，如用函数 $x(t)$ 表示物质系统的某个状态随时间变化的情况，那么经过一个固定的最短时间T以后，则 $x(t+T)$ 就应该与原来的 $x(t)$ 相等。

即

$$x(t+T) = x(t)$$

这种表示方法就反映出物质系统处于周期性的振动状态。上述那个固定的最短的时间 $T$ 就称为周期。周期性是振动现象最主要的特点。

上述振动现象若能从空间某一处传播到另一处，而且这种传播能够持续地进行下去，这就形成波动现象。从本质上讲，波动现象就是某一物质系统的运动状态在时间，空间两个方面同时形成周期性变化的一种物理过程。

振动状态在空间的传播，实际上就是振动状态在空间形成一定的周期性分布。要使振动状态在空间的传播能够持续地进行下去，则波源必须不断地供给能量。所以振动状态在空间的传播也就是振动系统的能量沿着波的传播方向以一定的传播速度向外传播的过程。因而常说波动过程就是能量的传播过程。振动是产生波动的根源，波动是振动状态在空间的传播。

波动现象在空间所形成的周期性特点，常以物理量 $\lambda$ 表示， $\lambda$ 称为波长。这种空间周期性意味着振动状态在空间传播时，在传播方向上经过一个最短距离 $\lambda$ 以后，就要重复出现一定的振动状态。

波动现象遍及于物质系统的低速运动与高速运动中。光波速度之高，使得光速成为自然界中的极限速度。由于高速运动，导致人们关于在高速运动范围内对时间、空间等许多基本观点的认识有了变化，因而诞生了相对论。

波动现象既存在于宏观物质世界，又存在于微观物质世界。由此又使得人们对微观世界的认识不同于宏观世界，从而导致微观物质状态的一系列性质必以波—粒二象性的观点才能解释。于是，量子力学应运而生。

相对论的产生，量子力学的出现都曾物理学发展史中的

重要里程碑。

振动与波动又是许多技术科学的重要基础知识。如无线电技术、光学、声学、地震学等。所以，振动与波动就成为我们学习自然科学与工程技术的一个重要理论基础。

在自然界众多的周期性振动问题中，有一种最基本而又最重要的振动——简谐振动。简谐振动的重要性主要表现在两个方面：其一，它的规律反映了振动问题最基本的规律。其二，自然界许多复杂的振动现象均可分解为两个或多个不同频率的简谐振动之迭加。因此，在学习振动与波动问题的过程中，首先必须掌握简谐振动及简谐波的规律，为更深入的学习打下基础。在本篇教材中，我们首先学习机械简谐振动、电磁简谐振荡，再进而学习机械波、电磁波及其他有关内容。

## 第一章 振 动

在自然界的许多方面均表现出丰富多采的振动现象。以我们人类自身而言，就存在许多振动现象，如人体内心脏的跳动是维持人类生命的一个重要标志；再如人的行走，如果没有手和脚有规律的摆动，那么人的行走就不可能；人的听觉和语言交流都是某一部分器官的振动所致。光的传播、声音的传播、各种乐器的演奏、地震等都是—定的物质系统在一定的条件下产生振动的结果。

在许多振动现象中，最常见的有两大类振动：一种是机械振动，即振动体以一定的位置为中心作来回往复的运动。例如挂钟里的摆的运动就属于这一类。钟摆总是以其铅垂线的位置为中心而左右摆动。另外一种电磁振荡，这种振动现象是以“电场”与“磁场”相互之间的周期性变化为其特点。上述

两大类振动产生的机理是不同的，但是它们都遵守最基本的共同规律——简谐振动。因此，本章首先从简谐振动开始进行学习，除此之外还将学习阻尼振动、受迫振动以及振动的合成。

## § 1.1 简谐振动

### 一、振动的理想模型——弹簧振子

将一个质量为  $m$  的物体系于弹簧的一端，弹簧的另一端固定。在研究弹簧的振动过程中，为使问题简化，将弹簧本身的质量以及摩擦阻力均忽略不计。这个系统就称为弹簧振子，是一个理想的振动模型。

将弹簧振子水平置放于光滑水平面上，使弹簧振子处于自然原长。在这里我们定义弹簧处于自然原长的状态为平衡状态，此时物体所处位置称为平衡位置。为了分析问题的方便，

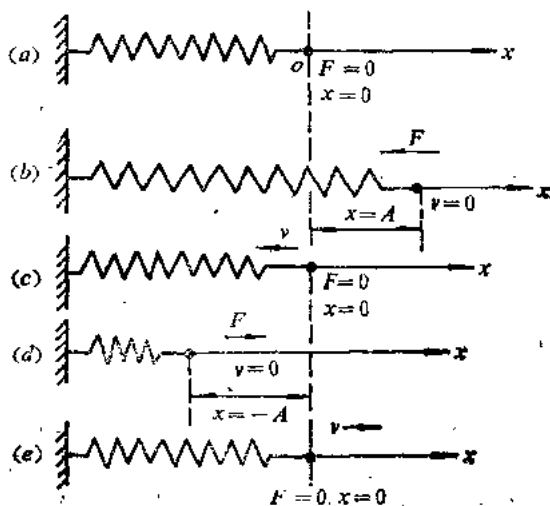


图5-1-1

一般将坐标原点取在平衡位置。在平衡位置由于弹簧没有发生形变，故质量为 $m$ 的弹簧振子受力为零。如图5-1-1所示。

将弹簧拉伸到一定长度后就释放，如图5-1-1b，此时物体就受到弹簧的弹性力作用，根据胡克定律此弹性力应是

$$F = -kx$$

式中 $x$ 是弹簧被拉伸的长度，也就是物体相对于坐标原点（即平衡位置）所发生的位移。负号表示弹性力方向与位移 $x$ 的方向相反，其方向总是指向平衡位置。 $k$ 为弹性系数。

## 二、弹簧振子的振动方程

弹簧振子在弹性力 $F = -kx$ 的作用下开始振动。其振动状况如图5-1-1所示。根据牛顿第二定律可以建立描述振子振动的微分方程为

$$ma = -kx \quad (5-1-1a)$$

$$\text{或} \quad a = \ddot{x} = -\frac{k}{m}x \quad (5-1-1b)$$

因为 $m$ 与 $k$ 皆为正的常数，所以它们的比值可以设为某一恒量 $\omega_0^2$ 的平方而代之。为此可令

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (5-1-2)$$

并代入(5-1-1b)式而得到

$$a = \ddot{x} = -\omega_0^2 x \quad (5-1-3)$$

将上式移项改写为常见的微分方程形式

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (5-1-4)$$

这就是弹簧振子作振动的微分方程。由导数运算可知，正弦函数或余弦函数正好满足(5-1-4)式。因此(5-1-4)式的解应是时间的正弦函数或余弦函数。凡是一个振动系统的振动方程以(5



-1-4)式的形式来表示, 则该系统的振动就称为简谐振动。

一般常以余弦函数

$$x = A \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (5-1-5)$$

的形式表示简谐振动的微分方程的解。式中的 $A$ 与 $\phi$ 是两个待定常数, 均由振动状态的初始条件决定。(5-1-5)式也就是弹簧振子在振动过程中偏离平衡位置的位移表示式。如果对 $x$ 求一次导数就得到振子振动的速度表示式为

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \phi) \quad (5-1-6)$$

若再对速度 $v$ 求一次导数可得到振子振动的加速度表示式为

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega_0^2 A \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (5-1-7)$$

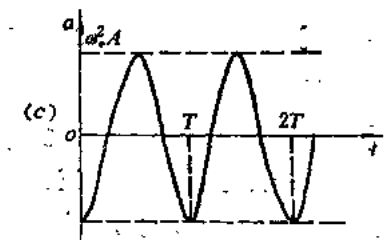
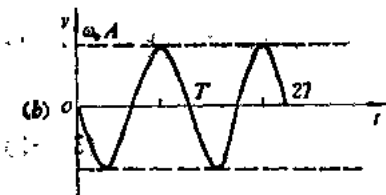
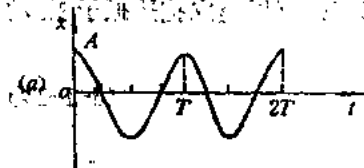


图5-1-2

从弹簧振子振动的位移 $x$ , 速度 $v$ 以及加速度 $a$ 的表示式可看出,  $x$ 的变化与 $a$ 的变化是“同步”的, 即它们同时达到各自的最大值或同时经过零值向各自的最小值变化。反之亦然。而 $v$ 的变化与 $x$ 的变化恰好是“此大彼小”。另外, 我们还看到 $x$ 、 $v$ 与 $a$ 均是随时间作周期性变化, 这仍是简谐振动最明显的特点。

如果给出一定的初始条件就能定出 $A$ 与 $\phi$ 的大小, 因而可画出 $x$ 、 $v$ 与 $a$ 随时间作周期