

高等学校教学参考书

物理学

波动、光学
量子物理

部分

余守宪 陈广汉 余国贤 祁祥麟



高等教育出版社

本书内容包括:机械振动和电磁振荡、机械波和电磁波、波动光学、微观粒子的二象性、原子的量子理论、晶体的原子理论、原子核与基本粒子。全书注意了在保证经典物理学的基础上,适当增加近代物理及近代工程的物理基础知识。书中例题较多,叙述详细,便于自学。

全书共分三册,即“物理学”力学和热学部分,“物理学”电磁学部分,“物理学”波动、光学、量子物理部分。

本书可供高等工科学院校物理教师及学生参考,也可供有高中以上文化基础知识的读者自学使用。

2P50/3f
10

物 理 学

波动、光学、量子物理部分

余守宪 陈广汉 编
余国贤 祁祥麟

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 15.5 字数 360,000

1984年1月第1版 1985年3月第1次印刷

印数 00,001—10,220

书号 13010·0968 定价 3.90 元

编者序

物理学是工科各专业的一门重要基础课。本书系以我们历年的教学经验为基础，并借鉴了部分国内外教材而编成的。在编写过程中，我们力求在内容深广度、科学水平及教学方法上都有所提高，以适应四个现代化的需要。

我们根据基础课的主要任务，编写时力求做到：一、以辩证唯物主义思想为指导，阐明物理学的基本规律，着重讲授物质的基本运动形式及其相互联系、相互转化的基本规律；二、在保证经典物理学的基础上，适当增加近代物理及近代工程技术的物理基础的知识，在介绍宏观规律的同时，注意适当阐明物理现象的微观本质；三、注意精选内容和贯彻理论联系实际的原则，注意适当说明物理学规律在科学技术及日常生活中的应用。通过例题、习题等多种方式，加深学生对基本概念的理解，指导学生运用理论处理实际问题；四、积极运用高等教学方法表达物理规律，培养学生运用高等教学工具解决物理问题的能力；五、注意启发学生思路、教给方法，并努力做到论述清晰易懂，便于自学。

全书采用国际单位制。力学部分就对高等数学有一定要求，因此，适于一年级第二学期上物理课使用。

本书初稿承哈尔滨工业大学、福州大学、北方交通大学、北京工业学院、北京邮电学院、北京航空学院等校试用，提出了许多宝贵意见，并承华东师范大学许国保教授审阅；在编写和修改过程中，编者所在学校（北方交通大学、北京工业学院、北京邮电学院、北京航空学院）又从各方面给予大力支持和帮助，对此我们衷心感谢。

本书经编者共同研究、分工编写，相互修改后由余守宪统稿。由于编者水平有限，缺点、错误在所难免，衷心希望读者提出宝贵意见，以便逐步改进和提高。

编者 1983年11月

目 录

第四篇 波动

第一章 机械振动和电磁振荡

§ 1. 弹簧振子和谐振动	3
一、弹簧振子的振动	3
二、谐振动的数学分析法	5
三、谐振动的矢量图表示法	19
四、谐振动的能量	27
§ 2. LC 振荡电路 无阻尼自由振荡	32
一、 LC 振荡电路 无阻尼自由振荡	32
二、无阻尼自由振荡的振荡方程	35
三、无阻尼自由振荡的能量	37
§ 3. 阻尼振动(阻尼自由振动)	44
一、什么是阻尼自由振动	44
二、机械振动系统的阻尼自由振动	45
三、电路中的阻尼自由振荡	49
§ 4. 受迫振动 共振	52
一、什么是受迫振动	52
二、机械振动系统的受迫振动和共振	53
三、振荡电路的受迫振荡和共振	59
§ 5. 同方向谐振动的合成	63
一、同方向同频率的谐振动的合成	64
二、同方向不同频率的谐振动的合成 拍	68
§ 6. 相互垂直的谐振动的合成	72
§ 7. 复杂振动的分解 频谱	82
问题	85
习题	86

第二章 机械波和电磁波

§ 1. 机械波的产生和传播 波动方程	91
---------------------	----

一、机械波的产生和传播 横波和纵波 波面和波线	91
二、波的频率和周期 波长 波速	97
三、平面简谐波的波动方程	101
四、平面波波动方程的微分形式	108
§ 2. 电磁波的产生和传播 平面电磁波的波动方程	111
一、电磁波的产生和传播	111
二、平面电磁波波动方程 电磁波的性质	118
三、电磁波谱	124
§ 3. 波的能量 能流密度	126
一、机械波的能量 能流密度	127
二、电磁波的能量 能流密度	135
三、传输线和波导	139
§ 4. 惠更斯原理 波的反射、折射和衍射	140
一、惠更斯原理	141
二、波的反射定律	142
三、波的折射定律	144
四、波的衍射	145
§ 5. 波的叠加原理 波的干涉	147
一、波的叠加原理	147
二、波的干涉	148
§ 6. 驻波	155
§ 7. 多普勒效应	163
一、声源相对媒质静止, 观察者以速度 v 相对媒质运动	164
二、观察者相对媒质静止, 声源以速度 v_s 相对媒质运动	165
三、声源和观察者同时相对媒质运动	166
§ 8. 超声波	169
问题	171
习题	172

第三章 波动光学

§ 1. 光的干涉现象 获得相干光的方法	178
一、光的干涉现象 杨氏双缝实验	178
二、光的相干性	183
三、菲涅耳双面镜和双棱镜实验	185

四、洛埃镜实验	186
§ 2. 薄膜的干涉 光程 光程差	187
一、平行平面薄膜的干涉现象	187
二、薄膜干涉条纹的条件 光程和光程差	188
§ 3. 劈尖的干涉 牛顿环	195
一、劈尖的干涉 等厚干涉条纹	195
二、牛顿环	200
三、相干长度	205
§ 4. 迈克耳孙干涉仪	208
§ 5. 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	211
一、光的衍射现象	211
二、惠更斯-菲涅耳原理	212
§ 6. 单缝衍射	213
一、菲涅耳波带法	214
二、光强分布的定量研究——积分法	221
§ 7. 光学仪器的分辨本领	225
§ 8. 衍射光栅	229
一、衍射光栅的衍射现象	229
二、光栅衍射条纹的形成	230
三、衍射光谱	235
§ 9. 晶体的伦琴射线衍射 布喇格公式	240
§ 10. 全息照相原理	244
§ 11. 自然光与偏振光	249
§ 12. 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	252
一、偏振片的起偏和检偏	252
二、马吕斯定律	253
§ 13. 反射和折射起偏	255
一、反射起偏	255
二、折射起偏	257
§ 14. 双折射现象 应用双折射产生偏振光的仪器	258
一、双折射现象	258
二、应用双折射产生偏振光的仪器	264
§ 15. 椭圆偏振光和圆偏振光 波片	266

§ 16. 偏振光的干涉·····	269
§ 17. 人为双折射现象·····	272
一、光弹性效应·····	272
二、克尔效应·····	273
问题·····	274
习题·····	276

第五篇 微观粒子的运动

第一章 微观粒子的二象性

§ 1. 热辐射 普朗克公式·····	280
一、热辐射·····	280
二、基尔霍夫定律·····	282
三、绝对黑体的辐射·····	284
四、经典理论的困难·····	285
五、普朗克量子假设·····	286
六、斯忒藩-玻耳兹曼定律和维恩位移定律·····	288
§ 2. 光电效应 爱因斯坦方程·····	292
一、光电效应的实验定律·····	293
二、经典理论解释光电效应的困难·····	297
三、光子 爱因斯坦方程·····	297
四、光电效应的应用·····	300
§ 3. 伦琴射线的散射 康普顿效应·····	303
§ 4. 德布罗意波及其实验验证·····	310
§ 5. 测不准关系式·····	315
问题·····	319
习题·····	319

第二章 原子的量子理论

§ 1. 玻尔的原子理论·····	322
一、原子的核型结构与经典理论的困难·····	323
二、原子光谱的规律性与玻尔的基本假设·····	326
三、夫兰克与赫兹的实验·····	338
§ 2. 量子条件和量子数 空间量子化 电子的自旋·····	341

一、主量子数和角量子数	341
二、空间量子化和磁量子数	343
三、电子自旋 自旋磁量子数	347
§ 3. 多电子原子与元素周期表	351
一、泡利不相容原理	352
二、能量最小原理	354
§ 4. 多电子原子的光学光谱和 x 光谱	358
§ 5. 量子力学的基本概念 薛定谔方程	362
一、波函数和它的统计解释	362
二、薛定谔方程	364
§ 6. 薛定谔方程的简单应用	366
一、一维方位阱	366
二、一维位垒 隧道效应	372
三、氢原子	374
§ 7. 受激辐射 激光	379
一、光和原子的相互作用	380
二、粒子数反转	382
三、谐振腔 激光的形成	384
四、激光的一些应用	386
问题	388
习题	389

第三章 晶体的电子理论

§ 1. 金属导电的电子理论 费米-狄拉克统计	391
一、金属的经典电子理论及其困难	392
二、金属电子的量子理论 费米-狄拉克分布	395
§ 2. 金属的接触电位差 温差电动势	402
一、金属的接触电位差 伏打定律	402
二、温差电现象	405
§ 3. 固体的能带理论简介	406
一、晶体中电子的共有化 能带的形成	406
二、满带和空带 导体、绝缘体和半导体	409
§ 4. 半导体的导电机构	412
一、半导体导电性的特点	412

二、本征半导体 电子与空穴	413
三、 n 型半导体和 p 型半导体	417
§ 5. p - n 结 晶体管的整流和放大作用	420
一、 p - n 结的位垒的形成	420
二、 p - n 结的整流作用	422
三、晶体三极管及其放大作用	423
§ 6. 超导体简介	426
问题	430

第四章 原子核与基本粒子

§ 1. 原子核的性质和组成	431
一、原子核的电荷和质量	431
二、原子核的大小和密度	432
三、原子核的自旋和磁矩	433
四、原子核的组成	434
§ 2. 结合能和核力	435
一、结合能和核能的应用	435
二、核力和核模型	438
§ 3. 放射性 衰变定律	442
一、放射性	442
二、衰变定律	443
三、位移定则	446
四、射线的探测	447
五、放射性同位素的应用	449
§ 4. “基本”粒子 研究“基本”粒子的意义和途径	450
一、引言	450
二、研究“基本”粒子的意义	451
三、研究“基本”粒子的途径	452
§ 5. “基本”粒子的性质和分类	453
一、“基本”粒子的性质	453
二、“基本”粒子的分类	456
§ 6. “基本”粒子的相互作用	458
§ 7. “基本”粒子模型简介	467
§ 8. “基本”粒子的应用前景	469

问题.....	471
习题.....	472
附录一 谐振动方程的解.....	474
附录二 受迫振动方程的解.....	475
附录三 傅里叶级数的系数的计算.....	477
习题答案.....	480

第四篇 波 动

波动是自然界中很普遍的一种现象。机械波、电磁波(光波是一种电磁波)是不同本质的波动过程。尽管它们具有各自不同的特点,但都遵从一些共同的波动规律。波动过程就是振动的传播过程,所以振动是波动的基础。因此,在讨论波动的规律以前,需要先讨论振动和它的规律。

本篇共分三章:第一章介绍机械振动(或振荡)和电磁振荡的一些规律;第二章介绍机械波和电磁波的一些规律;第三章介绍有关光的波动性,如干涉、衍射和偏振等现象。

实物粒子如电子、质子和中子等具有波动性,光具有粒子性。关于这些问题,我们在第五篇中介绍。

第一章 机械振动和电磁振荡

振动是在生活、生产和工程技术等方面都经常会遇到的一种运动,因此,振动是自然界中很普遍的一种现象。我们把物体在一定位置附近作来回往复的运动,叫做机械振动。例如:机床开动时,各个部分的微小运动;收音机广播时,喇叭膜的运动;人在讲话时,声带的运动;拉小提琴时,琴弦的运动;汽油机或柴油机工作时,气缸中活塞的运动;摇动水杯时,杯中水来回的晃动等,都是机械振动。声波传播时空气微团的运动也是机械振动。在电学中,我们将一个电学量在某一数值附近作往复的变化,叫做电磁振荡,例如:交流电路中的电流在某一电流值附近作周期性的变化;光波、无线电波

和微波等传播时，空间某点的电场强度和磁场强度随时间作周期性的变化等，都是电磁振荡。

为了统一表述上述两类振动，下面我们给出振动的广义定义为：当一个物理量在观测时间内在极大值和极小值之间往复变化时，这种状态的变化就叫做振动。根据这个定义，如果作振动的物理量是一个力学量，例如位移或角位移等，则所作的振动就叫做机械振动；如果作振动的物理量是一个电学量，例如电荷、电流、电压、电场强度或磁场强度等，则所作的振动就叫做电磁振荡。

物体作机械振动可以是周期性的，也可以是非周期性的。来回往复的运动轨道可以是一条直线，也可以是平面或空间曲线。运动轨道是一条直线的振动叫做直线振动，力学量的变化在相等的时间间隔内完全重复一次的直线振动叫做周期性直线振动，最简单的周期性直线振动是谐振动。因为任何一个复杂的振动都可以认为是由若干个谐振动合成的，所以谐振动是振动中最简单、最基本和最重要的内容。本章将首先介绍机械振动中谐振动的规律，然后再介绍一些较复杂的机械振动，如阻尼振动和强迫振动等的规律。

电磁振荡的本质虽然和机械振动的本质不同，但其运动规律的数学描述却与机械振动相类似。因此，我们在介绍机械振动的规律时，将同时介绍电磁振荡的一些规律，并将它们一一对比。但对谐振动的合成与较复杂振动的分解，则以机械振动为主来进行讨论。

应该指出：机械振动是声学、地震学、建筑力学、机械原理、造船学、铁道工程和国防工程中必需的基础知识；电磁振荡则是电工学和无线电技术必需的基础知识。另外，机械振动和电磁振荡又分别是机械波和电磁波的基础。因此，学好这两类振动是很重要的。由于机械振动比较直观，所以先学习机械振动的一些规律将

有助于深入理解电磁振荡的一些规律。

§1 弹簧振子和谐振动

我们研究一个弹簧振子的振动,以说明什么是谐振动,并从中总结出谐振动的规律。

一、弹簧振子的振动

如图 4-1-1(a) 所示,一质量可以忽略不计的轻弹簧(弹簧各部分之间的摩擦也可以忽略不计)的左端固定,右端系一个质量为 m 的小球(视为质点),弹簧和小球都套在一根水平杆上,设弹簧为

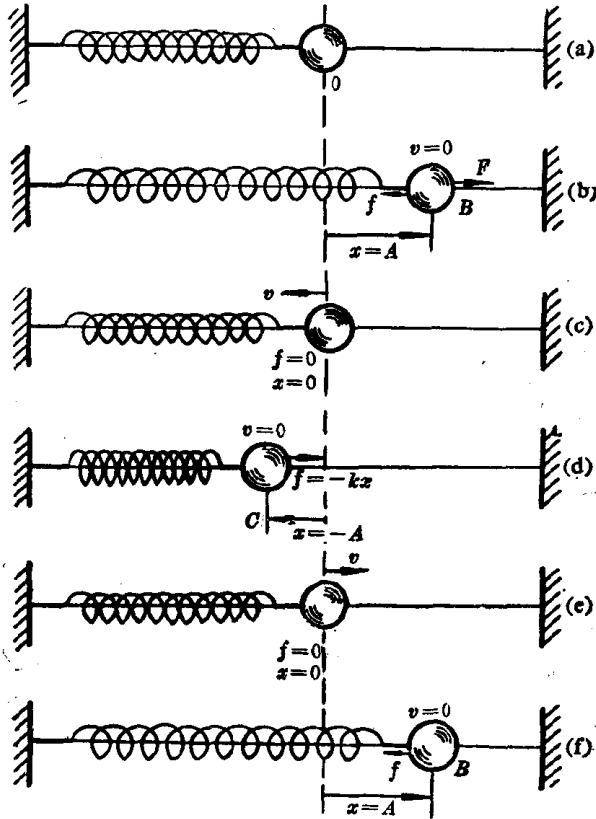


图 4-1-1 弹簧振子的谐振动

原长时, 小球在位置 O 处, 这时作用在小球上的合力等于零, 所以位置 O 是小球的平衡位置. 如把小球从位置 O 向右或向左略微移动一段距离然后放开, 小球就将在弹性回复力的作用下沿水平杆作左右往复的运动, 这样一个振动系统叫做弹簧振子, 所作的运动叫做自由振动. 若小球与水平杆之间的摩擦力和空气阻力等可以忽略不计时, 则所作的运动叫做无阻尼自由振动. 这就是说: 一个振动系统在不受任何阻力(即不受非保守力)的作用, 而受回复力作用时所作的运动, 叫做无阻尼自由振动. 若摩擦力和空气阻力等不能忽略不计(即有非保守力作用)时所作的自由振动, 叫做阻尼自由振动(简称阻尼振动)或衰减振动.

为了研究上述弹簧振子的无阻尼自由振动, 设水平杆为光滑的, 空气阻力忽略不计. 如果施一向右的外力 F 把小球略加移动到位置 B 而静止, 如图 4-1-1(b) 所示. 由于弹簧被拉长, 这时小球在水平方向上除受外力 F 的作用以外, 还受一个指向左方即指向平衡位置 O 的弹性力 f 的作用, 显然这两个力是互相平衡的. 在垂直杆的方向上, 小球受的重力和杆对它的支承力也是互相平衡的. 因此, 小球所受的合力为零. 当把外力 F 撤去, 小球将在指向平衡位置的弹性力 f 的作用下向左运动, 这时小球的速度 v 逐渐增加, 所受的弹性力逐渐减少(弹性力随小球偏离平衡位置 O 的距离的缩短而减少), 小球作变加速直线运动, 当小球返回平衡位置 O 时弹性力为零, 速度为最大值, 如图 4-1-1(c) 所示. 由于惯性, 小球将继续向左运动, 弹簧被压缩, 小球受一向右并指向平衡位置 O 的弹性力的作用, 因为弹性力的方向和小球运动方向相反, 弹性力的大小随小球偏离平衡位置 O 的距离的增加而增大, 所以小球作变减速直线运动, 当小球到达 C 点时, v 减为零, 弹性力达到最大值, 如图 4-1-1(d) 所示. 接着, 小球将在一向右并指向平衡位置 O 的弹性力作用下沿 CO 方向、向平衡位置 O 运动; 在到达平衡

位置 O 时, 小球的速度达到向右的最大值, 如图 4-1-1(e) 所示. 接着, 小球由于惯性将继续向右运动, 弹簧被拉伸, 小球受向左的弹性力作用作变减速运动, 沿 OB 方向返回 B 点, 如图 4-1-1(f) 所示. 以后, 小球将不断地重复上述运动过程, 即在平衡位置 O 的附近来回往复地运动. 综合以上的分析可知: 小球最初受外力 F 的作用而离开平衡位置 O , 当外力撤去以后, 一方面由于弹性力(系统的内力, 是保守力)的作用, 把小球拉回平衡位置; 另一方面由于惯性, 小球回到平衡位置后还要继续向另一侧运动. 正是由于弹性力和惯性的交互作用, 才使小球能够在平衡位置附近来回往复地运动.

我们把小球从 B 经 O 到 C , 再从 C 经 O 到 B 叫做一个完全振动. 物体每完成一次完全振动所需的时间叫做周期, 用 T 表示, 单位为秒. 周期的倒数, 即单位时间内物体重复振动的次数叫做频率, 用 ν 表示, 单位为 秒^{-1} , 叫做赫兹, 中文代号赫, 国际代号 Hz. 频率与周期的关系式为

$$\nu = \frac{1}{T}$$

周期和频率都能表示物体振动的周期性及物体振动的快慢.

上述弹簧振子的振动是最简单的周期性直线运动, 这种振动就是谐振动.

应该指出, 弹簧振子是把振动系统的质量集中在一个小球上, 把系统的弹性集中在轻弹簧上的一个理想简化模型.

二、谐振动的数学分析法

1. 谐振动的运动方程

我们仍以弹簧振子为例, 用数学分析法研究谐振动的运动学特征和运动方程. 如图 4-1-2 所示, 取平衡位置 O 点为原点, 水平杆为 x 轴, 并设 x 轴的正方向指向右. 小球偏离平衡位置 O 点的

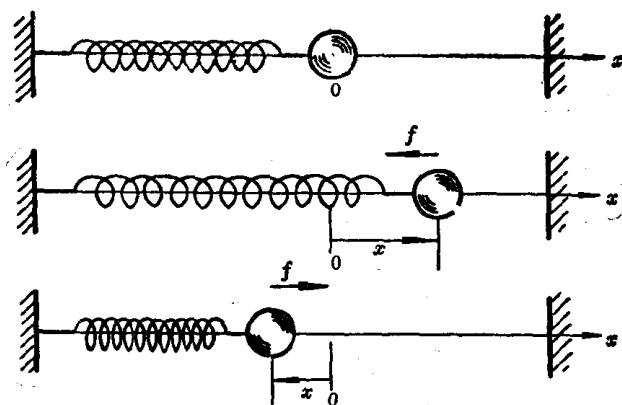


图 4-1-2

位移用 x 的代数值来表示，位移的大小等于 $|x|$ ，位移的方向由 x 的正负来决定。当 x 为正时，小球位移的方向从 O 点指向右（此时小球在 O 点的右边）；当 x 为负时，小球位移的方向从 O 点指向左（此时小球在 O 点的左边）。因为弹性力 f 总是指向平衡位置 O ，所以，由图 4-1-2 可以看出：当小球在 O 点的右边时，位移 x 为正，而弹性力 f 指向左为负；当小球在 O 点的左边时，位移 x 为负，而弹性力 f 指向右为正。由此可知，弹性力 f 的方向总是和位移 x 的方向相反。这种弹性力是一种回复力。

根据胡克定律，在弹性限度内，弹簧的弹性力 f 和弹簧的伸长量（或压缩量） x 成正比，即 $f = kx$ ， k 是弹簧的倔强系数。为了在公式中把上述 f 与 x 的方向总是相反的结论反映出来，式中应加一个负号，有

$$f = -kx \quad (1)$$

负号的意义即表示弹性力的方向和位移的方向相反。

设小球的质量为 m ，小球在任一点的瞬时加速度为 a 。因为摩擦阻力和弹簧的质量都忽略不计，所以由牛顿第二定律 $f = ma$ 可得

$$ma = -kx$$

或
$$a = -\frac{k}{m}x \quad (2)$$

因为 k 和 m 都是正数，所以它们的比值可用另一恒量 ω 的平方来表示，即令

$$\frac{k}{m} = \omega^2 \quad (3)$$

上式代入式(2)，得

$$a = -\omega^2 x \quad (4a)$$

或
$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x, \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (4b)$$

式(4)和式(2)的物理意义相同，它们表明振动的加速度和位移恒成正比而反向。这是谐振动的运动学特征。因为式(4)和式(2)是应用牛顿第二定律和胡克定律得到的，所以当振动系统所受的弹性力与位移之间的关系严格遵守胡克定律时，运动的规律才能符合式(4)，这时振动系统所作的无阻尼自由振动才是谐振动。后面讲到的无阻尼自由振动指的就是这种振动。

式(4b)叫做谐振动方程，在数学上它是一个微分方程(二阶常系数线性齐次微分方程^①)，因此式(4b)也叫做谐振动的微分方程。它表示小球的坐标 x 是时间 t 的函数 $x(t)$ ，这个函数对时间的二阶导数 $\frac{d^2x}{dt^2}$ 恰好等于该函数与常数 $-\omega^2$ 的乘积。在高等数学中，已知微分方程(4b)，即可求得函数 $x(t)$ ， $x = x(t)$ 叫做该微分方程的解。根据微分方程的理论可以求得式(4b)的解(见附录一)为

① 微分方程中未知函数导数的最高阶数为2时，叫做二阶微分方程，方程中的系数如果都是常数，并且方程中未知函数 x 及其导数 $\frac{dx}{dt}$ 、 $\frac{d^2x}{dt^2}$ [式(4)中不包括 $\frac{dx}{dt}$ 项] 都是一次的，这样的方程叫做二阶常系数线性微分方程。如果方程中仅含有未知函数及其导数这些项，这种方程叫做齐次方程。因此，式(4b)叫做二阶常系数线性齐次微分方程。