

大学物理学

宋伟 朱艳英 范力茹 主编

第二册

机械工业出版社



大学物理学

第二册

主 编 宋 伟 朱艳英 范力茹



机械工业出版社

0125.621

本书是根据国家教委颁布的《高等工业学校物理课程教学基本要求》的基本精神编写的。在编写过程中,吸收了国内、外同类教材的优点、注意了与中学物理的衔接。在确保基本要求的前提下,适当调整了教材结构体系,提高了起点,更新了教学内容。

全书分一、二两册,第一册包括力学、狭义相对论、振动和波动、波动光学;第二册包括分子物理和热力学、电磁学、近代物理。各章均附有思考题、计算题及参考答案。

本书可作为高等工科院校本科生教材,也可作为农、林、医、商等高等院校或电大、函大及师专的教材或参考书。由于教材中叙述清楚,亦适于自学者使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学 第2册/宋伟等主编. —北京:机械工业出版社,1998.7

ISBN 7-111-06269-8

I. 大… II. 宋… III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 12254 号

出 版 人 马九荣(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:李宜春 版式设计:杨丽华 责任校对:贾立萍

封面设计:李 明 责任印制:侯新民

北京市昌平振南印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 8 月第 1 版·1998 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm^{1/32}·14^{3/4} 印张·327 千字

0 001—3 500 册

定价:22.00 元

前 言

《大学物理学》是根据国家教委高等学校工科物理课程教学指导委员会制定的《大学物理课程基本要求》的基本精神,在总结多年来教学及教学改革经验的基础上编写而成。全书共分一、二两册。适用范围是高等工科院校本科生,适当删减后也可供工程专科、高等师范非物理专业使用。

本书在编写中力求体现以下特点:1. 适当调整教材结构体系 本书在目前《大学物理》传统教材的基础上作了适当调整。第一册包括力学、振动和波、狭义相对论和波动光学;第二册包括热学、电磁学和近代物理部分。这样安排的好处有两点,其一,可避免传统教材体系中电磁学的内容被两个学期分成两部分;其二,将整个教材的重点内容——力学和电磁学及难点内容——近代物理分别放在两个学期讲授,重点、难点分散,便于教师讲授和学生学习。

2. 提高起点,解决好与《中学物理》内容的衔接问题 如何处理好《大学物理学》与《中学物理》内容的衔接是许多物理教学工作者长期以来一直想要解决的问题。本书在学生可接受的前提下,适当地提高了起点。凡是中学已讲过的内容,本书一般不再重复讲授。在力学和电磁学两部分内容的编写中做了较大的改动,力求在结构上避免与《中学物理》重复,在层次上能在《中学物理》的基础上得以深化,在内容上便于纳入更多的现代物理信息。

3. 适当地增加例题的数量并提高了质量 本书除了保

留一些典型例题外,增加了一些题意新、难度较大的例题和习题,并加强了矢量代数和微积分方法的应用。以此加深学生对讲课内容的理解,启发解题的思路,进一步掌握用数学工具解析物理问题的方法。

本书第一册由宋伟、范力茹、朱艳英主编,第二册由宋伟、朱艳英、范力茹主编。全书由赵德信教授主审。在编写过程中参考了若干现有教材和参考书,这里难以一一列出,仅在此一并致谢。

由于编者水平有限,错误与不妥之处在所难免,望从事《大学物理学》教学的同仁和读者批评指正,编者不胜感谢。

编者

1997年7月

目 录

前言

第十一章 气体动理论	1
第一节 气体动理论的基本概念	1
第二节 气体的状态参量 平衡态与平衡过程	5
第三节 理想气体的压强公式和温度公式	7
第四节 能量按自由度均分原理	15
第五节 麦克斯韦速率分布律	21
第六节 分子的碰撞和平均自由程	28
习题	32
第十二章 热力学基础	37
第一节 功 热量 内能 热力学第一定律	37
第二节 理想气体的等值过程与摩尔热容	41
第三节 绝热过程与多方过程	54
第四节 循环过程 卡诺循环	61
第五节 热力学第二定律	70
*第六节 熵 熵增加原理	77
习题	87
第十三章 真空中的静电场	95
第一节 物质的电结构 电荷 电荷守恒定律	96
第二节 库仑定律 电场 电场强度	99
第三节 场强叠加原理 场强的计算	107
第四节 电场线 电通量 高斯定理及其应用	116
第五节 静电场的环路定理 电势	126
第六节 等势面 电场强度与电势的关系	136

习题	142
第十四章 静电场中的导体和电介质	149
第一节 静电场中的导体	149
第二节 静电场中的电介质 有介质时的高斯定理	159
第三节 电容 电容器	172
第四节 静电场的能量	188
习题	192
第十五章 真空中的稳恒磁场	199
第一节 磁场 磁感应强度 磁通量	199
第二节 毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律	206
第三节 运动电荷的磁场	216
第四节 安培环路定理	218
第五节 磁场对运动电荷的作用	227
第六节 磁场对载流导线的作用	242
第七节 磁场对载流线圈的作用	248
第八节 磁力的功	253
习题	256
第十六章 磁介质	264
第一节 磁介质的磁化 磁化强度矢量	264
第二节 磁场强度 有磁介质时的安培环路定理	270
第三节 铁磁质	275
习题	282
第十七章 电磁感应	284
第一节 法拉第电磁感应定律	284
第二节 动生电动势和感生电动势	291
第三节 自感和互感	311
第四节 磁场的能量	319
* 第五节 暂态过程	324
习题	330

第十八章 电磁场与电磁波	339
第一节 麦克斯韦电磁场理论的基本概念	339
第二节 电磁波	347
* 第三节 振荡电路 赫兹实验	354
第四节 电磁波谱	364
习题	367
第十九章 光的量子性	370
第一节 热辐射 绝对黑体	370
第二节 普朗克量子假说 普朗克公式	374
第三节 光电效应	376
第四节 光子 爱因斯坦方程	379
第五节 康普顿效应 光的波粒二象性	382
习题	387
第二十章 微观世界的图像	389
第一节 氢原子光谱的规律	389
第二节 玻尔的氢原子理论	392
第三节 实物粒子的波粒二象性	399
第四节 不确定关系	403
习题	407
第二十一章 量子力学初步	409
第一节 波函数	409
第二节 薛定谔方程	413
第三节 一维无限深势阱	416
第四节 一维势垒 隧道效应	419
第五节 氢原子问题的量子力学处理	420
第六节 电子的自旋	426
第七节 多电子原子系统 元素周期表	428
习题	431
第二十二章 激光及其应用	432

第一节	受激吸收 受激辐射和自发辐射	432
第二节	激光的形成	438
第三节	常用激光器简介	442
第四节	激光的特性及其应用	446
习题		450
附录 A	常用物理量	452
附录 B	习题答案	453

第十一章 气体动理论

物质的运动形式是多种多样的。在力学中已经研究了物质最简单的运动形式——机械运动。这一章和下一章将研究物质的热运动。通常的固体、液体和气体都是宏观物体。实验和理论都已指出,宏观物体是具有微观结构的,即由大量微观粒子(分子、原子等)所构成,而这些微观粒子不停地作热运动。本章是从物质微观结构出发,以气体为研究对象,并着重研究处于热平衡状态下的理想气体,运用统计的方法,研究大量气体分子热运动的规律。重点在于建立温度、压强等宏观量与描述气体分子特征的微观量之间的联系。

第一节 气体动理论的基本概念

一、物质的微观结构模型

气体动理论是从物质的微观结构出发来阐明热现象的规律的。有关物质微观结构模型的基本概念,都是在一定的实验基础上总结出来的,现在分别叙述如下。

1) 宏观物体或物质是由大量微观粒子(分子或原子等)组成的。关于物质结构的微粒学说,公元前5世纪至公元前4世纪古希腊已有“原子说”,认为万物皆由大量不可分割的微小物质粒子组成,这种粒子称为原子(希腊文为 *atomo*, 即“不可分割”之意)。古希腊的“原子说”只是一种朴素的臆测。19世纪初道尔顿(J. Dalton, 1766—1844)和阿伏加德罗(A. Avogadro, 1776—1856)等在研究总结了化学变化的许多

重要规律的基础上,提出了原子分子的科学假说,19 世纪后期,形成了“原子分子学说”,明确了一切物质都是由大量分子或原子组成的科学概念。

2) 物体内的分子在不停地运动着,这种运动是无规则的,其剧烈程度与物体的温度有关。扩散现象可以说明,一切物体内的分子都在不停地运动着。布朗(R. Brown, 1773—1858)运动间接表明了流体内部分子运动的无规则性。实验指出,扩散的快慢和布朗运动的剧烈程度都与温度的高低有明显的关系,这实际上反映了分子无规则运动的剧烈程度与温度有关,温度越高,分子的无规则运动就越剧烈。所以通常把这种运动称为分子的无规则热运动。

3) 分子之间有相互作用力——分子力。大量实验事实表明,构成一切物体的大量分子之间有相互作用力,这种力叫做**分子力**。分子力使固体和液体保持一定的体积、固体保持一定的形状,使固体和液体难以压缩等等。当分子间的距离极小时(约 10^{-10}m),分子力表现为斥力;当分子间的距离较大时,分子力表现为吸引力,但随距离增大很快减小。分子之间的作用力与分子的电性结构有关,而万有引力的作用在这里是微不足道的。

二、理想气体的微观结构模型和统计假设

1. 理想气体的微观结构模型 上面讲了一般物质体系的微观结构模型,它适用于气体、液体以及固体。理想气体是特殊的物质体系,理想气体的微观结构模型符合上述一般物质的微观结构模型并具有自己的特点。

气体很容易被压缩,实验表明,通常情况下气体凝结成液体时,体积将缩小上千倍,而液体中分子几乎是紧密排列的,即分子本身线度与两相邻分子中心之间的距离是大约相等

的,由此可知气体分子的平均间距,就数量级来讲,大约是分子本身线度的10(即 $\sqrt[3]{1000}$)倍。可见通常的气体分子间距比分子线度大得多,或者说通常情况下的气体分子在空间的分布是相当稀疏的。尽管如此,但作为宏观系统的气体分子总数是相当大的(1mol 气体的分子数为 6.022×10^{23} 个)。于是,不停地作无规则热运动的分子碰撞是非常频繁的(例如,在 0°C 和一个大气压下每秒约碰撞几十亿次)。频繁的碰撞使分子不断地改变其运动的方向与速度的大小,分子做忽左忽右、忽上忽下、忽前忽后、忽快忽慢的无规则运动,其运动轨迹是一条极不规则的折线,如图11-1所示。这就是气体分子无规则热运动的微观图像。因为一般气体分子间距很大,所以,除了碰撞瞬间外分子间的相互作用力是极其微小的,因而可以认为分子在连续两次碰撞之间作匀速直线运动,即惯性自由运动,这连续两次碰撞间的直线长度称为自由程。

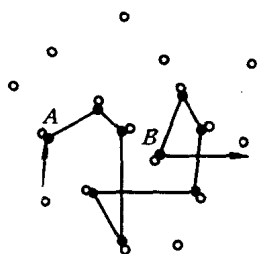


图 11-1 气体分子碰撞的示意图

基于上述,提出了**理想气体的微观模型**,即**理想气体分子模型**:第

一,气体分子的大小与气体分子间的距离比较,可以忽略不计。所以可以把气体分子看作大小可忽略不计的小球或质点,其运动遵守牛顿运动定律;第二,可以把每个分子看作完全弹性的小球,分子间相互碰撞或分子与器壁相碰撞时,遵守能量守恒定律和动量守恒定律;第三,气体分子之间的平均距离相当大,所以除碰撞的瞬间外,分子间的相互作用也可忽略不计。这样,气体就可看作是自由地、无规则地运动着的弹性球分子的集合。这是根据实验对构成理想气体这一宏观体系中

每个微观分子的力学特性作出的合理假设。这个理想化的微观模型,在一定范围[压强不太大(与大气压相比)、温度不太低(与室温相比)]内与真实气体的性质相当接近。

2. 统计假设 前面已经指出,微观理论是从微观结构模型出发,运用统计方法,求得宏观量与微观量统计平均值的关系,所以还要对理想气体大量分子的集体特征作出合理的统计假设:第一,对于容器中处于平衡状态的理想气体,分子的空间分布是均匀的,即分子数密度处处一样,或者说,容器中任一位置处单位体积内的分子数不比其他位置占有优势;第二,由于分子热运动的高度无规则性,分子沿任一方向的运动不比其他方向的运动占有优势,或者说,分子沿各个方向运动的可能性(即概率)一样,可谓机会均等。

设气体系统中有 N 个同类理想气体分子,且处于平衡状态。根据上述假设可知:

1) 沿空间各方向运动的分子数目是相等的,即在这个系统中飞向上、下、左、右、前、后的分子数目各为 $N/6$ 。

2) 分子速度在各个方向上的分量的各种平均值相等。设某一时刻 N 个分子的速度分别为

$$v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_N$$

在空间直角坐标系中,第 i 个分子的速度可写为 $v_i = v_{ix}i + v_{iy}j + v_{iz}k$, 则系统中分子速度的平均值应为

$$\bar{v} = \frac{\sum v_i}{N} = \frac{\sum v_{ix}}{N}i + \frac{\sum v_{iy}}{N}j + \frac{\sum v_{iz}}{N}k = \bar{v}_x i + \bar{v}_y j + \bar{v}_z k$$

根据第二条统计假设,有

$$\bar{v} = 0$$

即

$$\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z = 0 \quad (11-1)$$

而第 i 个分子的速度平方为

$$v_i^2 = \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i = v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2$$

则气体分子速度平方的平均值为

$$\begin{aligned} \overline{v^2} &= \frac{\sum v_i^2}{N} = \frac{\sum v_{ix}^2}{N} + \frac{\sum v_{iy}^2}{N} + \frac{\sum v_{iz}^2}{N} = \\ &= \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} \end{aligned} \quad (11-2)$$

根据统计假设,处于平衡态的气体分子在三个方向上速度平方的平均值应相等,且等于 $\overline{v^2}/3$,即

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \quad (11-3)$$

应该认识到,这种统计的论断,只有在平均的意义上才是正确的,且气体的分子数愈多,准确度就愈高。

第二节 气体的状态参量 平衡态与平衡过程

一、气体的状态参量

在力学中研究质点的机械运动时,是用位置矢量和速度来描述质点的运动状态。而对于气体,位置矢量和速度只能用来描述分子的运动状态,不能描述整个气体的状态。对于由大量分子组成的一定量的气体,其状态可用气体的体积 V 、压强 p 和温度 T 来描述。所以气体的**体积、压强和温度**这三个物理量叫做**气体的状态参量**。从气体动理论的观点来看,气体的体积是指分子无规则热运动所能达到的空间,与气体分子本身体积的总和是完全不同的。气体的压强是气体作用在容器器壁单位面积上的正压力,是气体对器壁碰撞的宏观表现,下一节将从气体动理论的观点阐述气体压强的本质。气体的温度是气体冷热程度的量度,后面将阐述温度与表征大量气体

分子热运动激烈程度的物理量——平均平动动能之间的关系。

应该指出,气体的体积、压强和温度是描述大量分子热运动集体特征的物理量,它们都是**宏观量**。而组成气体的分子都具有各自的质量、速度、体积等,这些描述个别分子运动的物理量称为**微观量**。气体动理论就是根据所建立的气体分子模型,用统计方法研究气体宏观现象的微观本质,建立宏观量与微观量平均值之间的关系。

二、平衡态与平衡过程

与经典力学中的隔离体方法相类似,在热力学中也常把研究对象分离出来,称为**热力学系统**。系统以外的物质称为**环境**,也称**外界**。可以直接研究系统的状态,也可以通过系统与外界的相互作用来研究系统状态的变化。

把一定量的气体装在一给定体积的容器中,此容器中的气体看作热力学系统,经过一段时间以后,系统中各部分气体的压强 p 相等、温度 T 相同,单位体积中的分子数(即分子数密度) n 亦相同。此时气体的三个状态参量都具有确定的值。如果系统中的气体与外界没有能量交换,气体分子的能量也没有转化为其他形式的能量,则气体的状态参量将不随时间而变化,这样的状态叫做**平衡状态**,简称**平衡态**。应该指出,系统中的气体总不可避免地要与外界发生程度不同的能量交换,理想化了的平衡态是难以存在的。然而,若气体状态的变化很小,以致可以略去不计时,就可以把气体的状态近似看成平衡态。本章所讨论的气体状态,除特别指明外,指的都是平衡态。还应该指明的是,热力学的平衡态与力学的平衡态不同。处于平衡态的热力学系统的宏观性质不随时间变化,但其内部分子却在不停地作无规则热运动,所以热力学平衡态又叫做**热**

动平衡态。

对于质量为 M 处在平衡态的系统,它的状态可以用一组 p, V, T 值来表示。在以 p 为纵轴, V 为横轴的 $p-V$ 图上,气体的一个平衡态可以用一个确定的点来表示。如图 11-2 中的点 $a(p_1, V_1, T_1)$ 或点 $b(p_2, V_2, T_2)$ 。由于外界的影响,气体状态会从某一个初始的平衡态,经过一系列的中间平衡态,变化到另一个平衡态,这种状态变化过程

叫做平衡过程。图 11-2 中的 ab 曲线就表示气体状态变化的某一平衡过程。平衡过程也是理想化过程,实际过程不可能是绝对的平衡过程,但如果过程进行得足够缓慢,以至于每一个中间状态都无限接近于平衡状态,则该过程称为准静态过程,即平衡过程。

严格地说,准静态过程是无限缓慢的状态变化过程,它是实际过程的抽象,是一种理想的物理模型,利用它可使问题的处理大大得以简化。

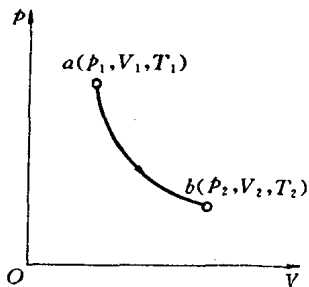


图 11-2 $p-V$ 图上一点
表示气体一个平衡态

第三节 理想气体的压强公式和温度公式

一、理想气体的压强公式

容器中气体的压强是气体对器壁单位面积的正向作用力。从气体动理论的观点来看,它是大量气体分子在与器壁碰撞时给以冲力作用的结果。每一个气体分子与器壁的每一次碰撞都会给器壁以一定冲量。虽然单个分子对器壁的作用在大小、位置和方向上都是随机的,但就大量分子而言,碰撞的统计平均效果就表现为给器壁一个均匀的持续的压强。这与

密集的雨点打到雨伞上,可以感到一个均匀的作用力颇为相似。

如图 11-3 所示,考虑一个边长分别为 l_1, l_2, l_3 的长方体容器,容器内有 N 个质量为 m 的气体分子,设其中第 i 个分子的速度为 v_i ,它在直角坐标系中的三个分量为 v_{ix}, v_{iy}, v_{iz} 。现在来考察第 i 个分子与 A_1 面碰撞前后沿 x 方向的运动。由于碰撞是完全弹性的,因而碰撞后该分子必然以速度分量 $-v_{ix}$ 由 A_1 面弹回,其动量增量为

$$(-mv_{ix}) - mv_{ix} = -2mv_{ix}$$

因此,分子施于器壁的冲量为 $2mv_{ix}$ 。由于分子沿 x 方向只与 A_1 和 A_2 两个面碰撞,而与 A_1 面相继两次发生碰撞所走过的距离为 $2l_1$,所需要的时间为 $2l_1/v_{ix}$,所以单位时间内该分子与 A_1 面相碰撞的次数为 $v_{ix}/(2l_1)$ 。因此单位时间内第 i 个分子施于 A_1 面的总冲量为

$$2mv_{ix} \left(\frac{v_{ix}}{2l_1} \right) = \frac{mv_{ix}^2}{l_1}$$

这也就是单位时间内对 A_1 面的平均冲力。

考虑到容器中的分子总数为 N ,则 A_1 面受到所有分子总的平均冲力 $\bar{F}$ 应等于每个分子对它的平均冲力之和,即

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^N \frac{mv_{ix}^2}{l_1}$$

由于

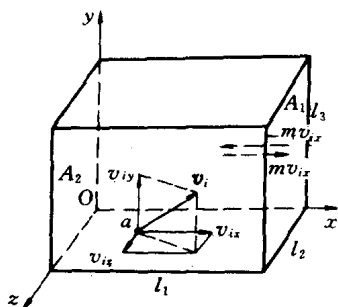


图 11-3 推导气体压强公式用图