

高等院校理工类公共基础课『十三五』规划教材

UNIVERSITY
PHYSICS

大学物理

(下)

主编 » 陈义万



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

高等院校理工类公共基础课『十三五』规划教材

UNIVERSITY
PHYSICS

大学物理

(下)

主 编	陈义万		
副主编	胡 妮	裴 玲	朱进容
参 编	别业广	邓 罡	周挽平
	徐国旺	闵 锐	龚姣丽
	成纯富	张金业	陈之宜
	李文兵		



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

大学物理(上、下)/陈义万主编. —武汉:华中科技大学出版社,2014.9
ISBN 978-7-5680-0416-9

I. ①大… II. ①陈… 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(2014)第 224890 号

大学物理(下)

陈义万 主编

策划编辑:彭中军

责任编辑:狄宝珠

封面设计:龙文装帧

责任校对:李 琴

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉鑫昶文化有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:34.25

字 数:888 千字

版 次:2014 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:68.00 元(含上、下册和 1CD)



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

序 言

1. 物理学的研究对象

物理学的研究对象是物质的结构和规律。物质的结构,从微观到宏观,再到天体和宇宙,尺度之大,范围之广,涵盖了所有的物质形态。微观范畴,如原子的结构、原子核的结构、粒子如何构成原子核,宏观范畴,如凝聚态的结构、材料的性质,天体范畴,如银河系的构成、河外星系的结构等,都属于物理学研究的对象。除了研究各个层次的物质的结构,还要弄清物质的运动规律。就目前的科学水平,在微观,主要的物理理论是量子力学,在宏观,起支配作用的是经典物理学,也就是力学和电磁学;在宇宙的尺度,主要的理论是广义相对论。这些理论,在人类不断加深对自然界认识的基础上不断发展。

2. 三次工业革命与物理学的关系

第一次工业革命 发生于 1760—1840 年,主要的标志是蒸汽机的发明和使用。由于有了蒸汽机代替人力和畜力,生产效率得到极大提高。火车代替了小马车,蒸汽机驱动的纺织机械代替了手工纺织,社会的产品极大丰富,出现了主要用于交换的商品,人类进入一个大发展时期。而蒸汽机的原理就是物理学中热学的内容。

第二次工业革命 发生于 1840—1950 年,主要的标志是电的发明和使用。电作为动力,在火车、汽车、电梯等方面得到广泛使用,成为最广泛使用的动力;电作为信息传输载体,在有线和无线通信,如电话、电报、传真、互联网等方面,得到非常广泛的使用。物理学电磁场的理论就是电的理论基础。

第三次工业革命 也叫作信息革命、知识经济时代(1950 年至今),是指以电子技术、集成电路、计算机为核心的信息技术时代。这个时代,改变了资本和有形的物质作为工业主体的格局,信息和知识作为工业的主体,计算机在许多方面代替了人的脑力劳动,知识的地位大大提升。这个时代的核心是计算机,而计算机的核心部件是 CPU。CPU 的基本元件是 PN 结和三极管,它们都是在硅(锗)的基片上形成的。固体物理是 CPU 的理论基础。

不仅与三次工业革命有紧密的联系,即使在当代,物理学与新技术也密不可分。比如 2007 年的诺贝尔物理学奖巨磁阻效应,2009 年的诺贝尔物理学奖光纤、CCD 电荷耦合技术,2010 年的石墨烯,这些物理学的成果,已经或者即将形成技术突破,极大地改变人类的生活。作为理工科的大学生,学习物理,了解物理学的新进展,是十分必要的。

3. 学习大学物理的作用

首先,大学物理作为公共基础课,与各个专业的后续课程都有关系。比如,机械类和土木类专业的同学,在后续要学习理论力学、材料力学、机械原理,都需要物理的力学作为基础;而检测类的专业,有不少课程与光学有关;电气信息类的同学,后续课程与电磁理论有关,都需要把大学物理作为基础;轻化类的同学,后续课程与热力学、量子力学有关。

其次,大学物理作为科学素养,是理工科同学必备的。人们在生活和工作中,不仅用到专业知识,更多的时候要与非专业的问题打交道,需要有物理的知识背景。比如,普遍使用的复印机,与电学有关;夏天雨后的彩虹,就是光的折射现象;检查身体的 X 光机、核磁共振仪与原

子物理有关。对我们在日常生活中遇到的仪器设备,即使我们只要对它们稍作了解,就需要有大学物理知识。更不用说理工科的学生,在以后的工作中,要结合自己的专业,把物理的最新知识应用到专业中去。如前面提到的巨磁阻效应、石墨烯等等,可以预见在不久的将来会在技术上突破,只有及时地把这些物理上的进展,与自己的专业结合,才可能取得突出的成绩。

最后,也是就业的需要。学生进校后,学习的专业是确定的,而就业则带有偶然性。由于社会需求的变化,可能很多同学要跨专业就业,在另外一个专业领域,学生以前学习的非常专业化的知识这时候起不到多少作用。我们都知道,很多问题,最后都归为物理模型和数学方程,所以,大学物理为同学们提供了一个普遍的可以长期使用的工具。

4. 学习大学物理的要求

第一,做好预习。预习对于集中注意力听课,做到当堂理解,培养自己的自学能力都有好处。

第二,适当地做笔记。把教师在课堂上讲的与教材不同的地方记下来,供课后复习参考。

第三,独立完成作业。作业不在多,在精练,要独立完成,真正培养自己独立解决问题的能力。

第四,适当阅读其他参考书。中外有很多优秀的大学物理教材和参考书,同学们要善于利用,在教师指导下,有选择性地阅读,扩大自己的知识面。

前 言

本套教材按照教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会制定的基本要求编写,包括了所有规定的 A 部分的内容,也有选择性地包含了 B 部分的内容,可以供理工类本科和专科各类学生学习大学物理使用。

本书的编写有以下几个特点。

(1)注重书的历史厚重感。在讲解物理的重要知识时,简要地讲述它的背景和来龙去脉,让学生更好地把握科学的发展历程,而不至于感到物理知识是断裂的、片段的知识。

(2)穿插介绍近 20 多年来与人类生活密切相关的诺贝尔物理学奖,让学生及时接触、了解物理学的前沿领域的发展。

(3)考虑到一些对力学要求比较高的专业的需要,增加了分析力学基础一章。

在最后的 4 章,专门介绍了物理学与新技术:激光及其应用,纳米科技,非线性科学、混沌、分形、孤立子,量子信息。这些内容虽然不在传统的大学物理教学范围内,但是,可以作为选讲内容或学生课外阅读材料。

(4)每一章和节的标题,以及每章中的重要定理都附有英语翻译。主要是考虑到目前大多数学生还没有机会学习物理的双语课程,通过此种形式,让学生尽早地接触英语中重要的物理名词。

本书还按照内容,分为几大篇,便于不同专业按照模块安排教学。

这些改进或者说特色,是我们对物理教学的一点尝试,效果如何,还要看实践的检验。也希望使用本书的教师和学生及时反馈修改意见。

本书的参编人员大多数为湖北工业大学教师,周挽平为湖北工业大学工程技术学院教师。

本书编写过程中,参考了国内外多种优秀教材及网络资料,在此对原作者一并致谢。

本书主编为陈义万,上册副主编为别业广、闵锐、邓罡,下册副主编为胡妮、裴玲、朱进容。本书编写人员如下:别业广(第 1 章、第 10 章、第 11 章、物理学诺贝尔奖介绍 1),邓罡(第 2 章、第 4 章、第 18 章、第 31 章、物理学诺贝尔奖介绍 4),周挽平(第 3 章、附录),陈义万(第 5 章、第 6 章、第 23 章、第 25 章、第 29 章、第 30 章、物理学诺贝尔奖介绍 3、7),徐国旺(第 7 章),闵锐(第 8 章、第 13 章、第 14 章、物理学诺贝尔奖介绍 6、8),裴玲(第 9 章、第 15 章、第 27 章、物理学诺贝尔奖介绍 2),龚姣丽(第 12 章),朱进容(第 16 章、第 17 章),胡妮(第 19 章、第 24 章、第 26 章、物理学诺贝尔奖介绍 5),成纯富(第 20 章),张金业(第 21 章),陈之宜(第 22 章),李文兵(第 28 章)。

目 录

C 篇 热 学

第 15 章 气体动理论	(3)
15.1 热力学与统计物理研究方法 平衡态	(3)
15.2 热力学第零定律 温标	(4)
15.3 理想气体状态方程	(5)
15.4 分子运动论的基本概念	(7)
15.5 统计规律的特征	(8)
15.6 理想气体的压强与温度	(9)
15.7 麦克斯韦速率分布律	(13)
15.8 玻耳兹曼分布律	(18)
15.9 理想气体的内能	(19)
15.10 气体分子的碰撞	(23)
15.11 非平衡态 输运过程	(25)
【思考题与习题】	(27)
第 16 章 热力学第一定律	(31)
16.1 功 热量 内能 热力学第一定律	(31)
16.2 几种典型的热力学过程	(35)
16.3 绝热过程 多方过程	(38)
16.4 循环效率 卡诺循环	(40)
【思考题与习题】	(43)
第 17 章 热力学第二定律	(48)
17.1 可逆过程 宏观过程的方向	(48)
17.2 热力学第二定律	(49)
17.3 热力学第二定律的统计解释	(52)
17.4 玻耳兹曼熵公式 熵增加原理	(54)
17.5 卡诺定理	(55)
17.6 克劳修斯熵公式	(56)
【思考题与习题】	(59)
物理学诺贝尔奖介绍 5	(62)
2007 年 巨磁电阻效应	(62)
第 18 章 机械振动	(66)
18.1 简谐振动	(66)
18.2 简谐振动的能量	(71)
18.3 简谐振动和匀速圆周运动的关系	(72)
18.4 简谐振动的合成	(74)

18.5 阻尼振动	(78)
18.6 受迫振动 共振	(79)
【思考题与习题】	(81)
第 19 章 机械波	(84)
19.1 机械波的基本概念	(84)
19.2 平面简谐波方程	(87)
19.3 平面简谐波的能量	(92)
19.4 惠更斯原理	(94)
19.5 波的叠加 驻波	(96)
19.6 声波	(100)
19.7 多普勒效应	(103)
19.8 相速度和群速度	(105)
【思考题与习题】	(109)
第 20 章 光的干涉	(114)
20.1 光与光程	(114)
20.2 双缝干涉	(117)
20.3 薄膜干涉	(119)
20.4 迈克尔逊干涉仪	(123)
【思考题与习题】	(125)
第 21 章 光的衍射	(128)
21.1 光的衍射 惠更斯-菲涅尔原理	(128)
21.2 夫琅禾费单缝衍射	(131)
21.3 夫琅禾费圆孔衍射	(134)
21.4 光栅衍射	(138)
21.5 X 射线衍射	(143)
【思考题与习题】	(145)
第 22 章 光的偏振	(148)
22.1 光的偏振	(148)
22.2 偏振光的获得和检测 马吕斯定律	(150)
22.3 由反射与折射获得偏振光 布儒斯特定律	(152)
22.4 双折射现象	(154)
22.5 偏振光的干涉	(156)
22.6 旋光现象	(159)
【思考题与习题】	(160)
物理学诺贝尔奖介绍 6	(162)
2009 年 光纤 CCD 电荷耦合技术	(162)
第 23 章 狭义相对论基础	(168)
23.1 伽利略变换 经典物理内部矛盾	(168)
23.2 狭义相对论基本假设	(171)
23.3 洛伦兹变换 洛伦兹速度变换	(172)

23.4 狭义相对论的时空观·····	(175)
23.5 狭义相对论力学简介·····	(178)
【思考题与习题】·····	(180)
物理学诺贝尔奖介绍 7 ·····	(183)
2010 年 石墨烯 ·····	(183)
第 24 章 量子物理的实验基础 ·····	(187)
24.1 黑体辐射·····	(188)
24.2 光电效应·····	(191)
24.3 康普顿效应·····	(194)
24.4 氢原子光谱·····	(197)
24.5 微观粒子的波粒二象性·····	(200)
【思考题与习题】·····	(201)
第 25 章 量子力学基础 ·····	(205)
25.1 概率波函数·····	(205)
25.2 不确定关系·····	(206)
25.3 薛定谔方程·····	(208)
25.4 无限深势阱问题·····	(209)
25.5 势垒穿透·····	(211)
【思考题与习题】·····	(212)
第 26 章 原子结构的量子理论 ·····	(214)
26.1 氢原子的量子理论·····	(214)
26.2 电子的自旋·····	(217)
26.3 原子的电子壳层结构·····	(218)
【思考题与习题】·····	(220)
第 27 章 分子与固体 ·····	(222)
27.1 化 学 键·····	(222)
27.2 分子的振动与转动·····	(224)
27.3 金属电子理论·····	(224)
27.4 固体的能带理论·····	(226)
27.5 绝缘体 导体 半导体·····	(228)
【思考题与习题】·····	(233)
物理学诺贝尔奖介绍 8 ·····	(234)
2012 年 操纵单个量子粒子 ·····	(234)
第 28 章 激光及其应用 ·····	(238)
28.1 激光的历史·····	(238)
28.2 激光产生的基本原理·····	(239)
28.3 各种激光器·····	(243)
28.4 激光的特性及应用·····	(250)
第 29 章 纳米科技 ·····	(254)
29.1 纳米技术的含义·····	(254)

29.2	纳米技术发展的原因	(255)
29.3	纳米制造技术	(256)
29.4	纳米科技的应用	(259)
第 30 章	非线性科学 混沌 分形 孤立子	(262)
30.1	混沌	(262)
30.2	分形	(264)
30.3	孤立子	(267)
第 31 章	量子信息	(270)
31.1	量子信息学简介	(270)
31.2	量子计算	(271)
习题答案		(273)

C 篇 热 学

人们在长期的生产实践中,积累了许多有关热学的知识,特别是蒸汽机等热力机械的发明,促使人们对热现象进行更为深入的研究。科学家从两个方向对热现象做了研究,并进而建立了统计物理学与热力学两门学科。

统计物理学的基本出发点是物质是由大量相互作用的分子构成的,而分子又在不停地做热运动,于是必须用统计的方法及一些理想的模型来研究宏观现象与微观图像之间的关系。统计物理学是研究热现象的微观理论。

热力学在历史上曾是研究热的现象和力的现象之间关系的理论。但是随着研究的深入,热力学研究的范围就超出了力学的研究范围,因为几乎所有的运动形式(例如电磁运动、化学运动等)都伴随有热现象的发生。热力学是通过观察和实验对某个“热力学系统”与外界的能量交换及其状态变化做的研究,从而得到一些规律,并确认一些可能或不可能发生的变化。热力学是研究热现象的宏观理论。

历史上,许多科学家对热现象的研究做出了贡献,其中著名的科学家有焦耳(J. P. Joule)、卡诺(Carnot)、克劳修斯(R. J. E. Clausius)、麦克斯韦(James Clerk Maxwell)、吉布斯(Josiah Gibbs)、玻耳兹曼(Ludwig Eduard Boltzmann)、昂纳斯(H. Kamerlingh Onnes)等。

本篇介绍统计物理学中的气体动理论以及热力学中的一些基本内容。

第 15 章 气体动理论

Chapter 15 The kinetic theory of gases

15.1 热力学与统计物理研究方法 平衡态

The thermodynamics and statistical physics research methods, Equilibrium state

15.1.1 热力学与统计物理研究方法

热学是物理学的一个组成部分,它是研究物质热现象,或者说是研究物质热运动所遵循规律的科学。

热学的研究方法通常有两种形式:一种是热力学方法,它是从宏观的角度出发,通过实验分析、归纳总结、逻辑推理等手段去研究物质状态发生变化时相应宏观量的变化以及热与功的转换规律;另一种是统计方法,它从物质的微观结构出发,通过合理的假设,采用统计法去建立宏观量(反映物质整体属性的物理量)与微观量(反映组成物质的单个微观粒子属性的物理量)的联系,揭示宏观现象的微观本质。因此,热力学方法可用统计方法来解释,统计方法可用热力学方法来验证,两种方法相辅相成。

15.1.2 平衡态

热学所研究的对象主要是一些由大量的微观粒子(如分子、原子等)所组成的物体或物体系。这些物体或物体系通常称为热力学系统,简称系统;一个热力学系统所处的外部环境则称为系统的外界,简称外界。

一般来讲,气体的状态是随气体内外条件的变化而变化的。如果能用一容器控制一定的气体,使之与外界孤立(既不交换物质,也不交换能量),则不管气体内部各部分原来的宏观特性(如冷热)如何不同,只要经过一定时间,便总会达到一致。此后,若无外界影响,则其宏观性质不再随时间变化,这种状态称为热力学平衡态,简称平衡态;反之就称为非平衡态。实验表明,任何系统,只要没有外界影响,便总可以达到平衡态。而这种平衡态一旦达到,则系统的宏观性质便不再改变,除非它又受到了外界的影响。

事实上,并不存在完全不受外界影响,从而使得宏观性质绝对保持不变的系统,所以说,平衡态只是一种理想的概念,它是在一定条件下对实际情况的抽象和近似。以后,只要实际状态与上述要求偏离不是太大,就可以将其作为平衡态来处理,这样既可简化处理的过程,又有实际的指导意义。此外,系统达到平衡态后,虽然宏观表现上系统状态的性质不会随时间变化,但从微观上看,各粒子仍在永不停息地做无规则的热运动,其微观量和系统的微观态都会不断地发生变化。因此,确切地说,平衡态应该是一种热动平衡的状态,它与机械运动中所说

的静态平衡是有区别的。

平衡态是热学中一个十分重要的概念,几乎所有的热力学参量都是在平衡态下定义的。

15.2 热力学第零定律 温标

The zeroth law of thermodynamics, Temperature scale

15.2.1 状态参量

描述系统平衡状态宏观性质的物理量称为状态参量,简称态参量。状态参量有多种,对于气体而言,主要用体积 V 、压强 p 和温度 T 三个物理量来描述气体的平衡态。

1. 体积

由于分子热运动的结果使容器内的气体可以充满容器整个空间,所以气体体积是指气体分子所能达到的几何空间,而不是指气体分子本身体积的总和,用符号 V 表示。在国际单位制中,体积的单位是立方米(m^3),常用单位还有升(L),两者的关系为

$$1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

2. 压强

气体的压强,是大量气体分子频繁碰撞容器壁产生的平均效果的宏观表现,这种碰撞的宏观表现是气体对单位器壁面积上的正压力,用符号 p 表示,显然与分子无规则热运动的频繁程度和剧烈程度有关。在国际单位制中,压强的单位是帕斯卡,简称帕(Pa),1 Pa 的大小表示 1 m^2 上受到 1 N 的正压力。

在工程技术上,常用的压强单位还有毫米汞高(mmHg)、标准大气压(atm)等,它们与帕斯卡的关系是

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

3. 温度

体积 V 和压强 p 都不是热学所特有的,体积属于几何参量,压强属于力学参量,而且它们都不能直接表征系统的冷热程度。因此,在热学中还必须引进一个新的物理量——温度(T)来描述系统宏观状态的热学性质。

在生活中,往往认为热的物体温度高,冷的物体温度低。简单地说,温度是物体冷热程度的表征。但是,这种凭主观感觉对温度的定性了解,在要求严格的热学理论和实践中,显然是不科学的。例如,冬天当我们分别用手去触摸放在一起的木块和铁块时,便会觉得铁块较冷,若按照上面的说法,应该是铁块的温度较低,事实上,用温度计去测量会发现两者的温度是一样的。因此,我们必须对温度建立起严格的科学的定义。

15.2.2 热力学第零定律 温标

假设有两个热力学系统 A 和系统 B,原先处在各自的平衡态,现在使系统 A 和系统 B 互相接触,使它们之间能发生热传递,这种接触称为热接触。一般来说,热接触后系统 A 和系统 B 的状态都将发生变化,但经过充分长的一段时间后,系统 A 和系统 B 将达到一个共同的平衡态。这种共同的平衡态是在有传热的条件下实现的,因此称为热平衡。如果有 A、B、C 三

个热力学系统,当系统 A 和系统 B 都分别与系统 C 处于热平衡,那么系统 A 和系统 B 此时也必然处于热平衡。这种同时与第三个系统达到热平衡的两个系统也必然热平衡的结论称为热力学第零定律(If objects A and B are separately in thermal equilibrium with a third object C, then A and B are in thermal equilibrium with each other)。它反映了热平衡的传递性,因此,热力学第零定律也叫热平衡传递定律。

这个定律为温度概念的建立提供了可靠的实验基础。根据这个定律,我们有理由相信,处于同一热平衡状态的所有热力学系统都具有某种共同的宏观性质,描述这个宏观性质的物理量就是温度。换言之,一切互为热平衡的系统都具有相同的温度。

从上面的分析可知,热力学第零定律不仅给出了温度的科学概念,也为我们用温度计测量物体或系统的温度提供了依据。我们可以事先选择好一个物体做标准,然后将它与待测物体进行比较,当它与待测物体达到热平衡时,标准物体所表示的温度就是待测物体的温度。

温度的数值表示法称为温标,目前国际上通用的是热力学温标 T ,其单位是开尔文,用符号 K 表示。此外还有摄氏温标 t ,单位是摄氏度,用符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。 1°C 的大小与 1K 的大小相同,1960 年国际计量大会通过决议,规定摄氏温标与热力学温标的关系是

$$\frac{t}{^{\circ}\text{C}} = \frac{T}{\text{K}} - 273.15 \quad (15-1)$$

这就是说,热力学温标与摄氏温标仅有零点的差异,并无实质的不同。

15.3 理想气体状态方程

The state equation of an ideal gas

15.3.1 理想气体状态方程

理想气体是一个抽象的物理模型。从宏观上讲,实际气体在密度不太高、温度不太低、压强不太大的时候,严格地遵守气体的三个实验定律,即玻意耳定律、盖-吕萨克定律和查理定律。所以,凡严格遵守以上三个实验定律的气体均可视为理想气体,可以认为是常温常压下稀薄的气体。

理想气体物态方程是理想气体在平衡态时状态参量所满足的方程,可以由气体的三个实验定律推出,表示为

$$pV = \nu RT \quad (15-2(a))$$

式中: $\nu = \frac{m'}{M}$,称为气体物质的量, m' 为气体质量, M 为摩尔质量;

R 为摩尔气体常量,在国际单位制中, $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

于是可得

$$pV = \nu RT = \frac{m'}{M} RT \quad (15-2(b))$$

式(15-2(b))即理想气体的状态方程,它是理想气体各状态参量相互关联的表征。由式(15-2(b))可以看出,理想气体的三个态参量仅有两个是独立的,只要其中的两个态参量(如 p 、 V)被确定,第三个态参量(如 T)便自然而然地随之确定了。因此,描述理想气体的平衡态,只要两个态参量就足够了。

根据理想气体的微观模型所指出的,同种气体的分子质量都相同,设单个分子的质量为 m , 气体总分子数为 N , 则气体总质量 $m' = Nm$, $M = N_A m$ ($N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, 是阿伏伽德罗常数), 将其代入式(15-2(b)), 得

$$p = \frac{m'}{MV} RT = \frac{Nm}{N_A m V} RT = \frac{N}{V} \frac{R}{N_A} T = nkT \quad (15-2(c))$$

式中: $n = \frac{N}{V}$ 为分子数密度, 即单位体积内的分子数;

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31}{6.02 \times 10^{23}} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}, \text{ 为玻耳兹曼常数。}$$

式(15-2(c))是理想气体的状态方程的另一种形式, 它说明气体的压强与气体的热力学温度及气体分子数密度成正比。

例 15.1 (1)求在标准状态下 1 cm^3 气体中的分子数。

(2)如果获得真空度 $1.33 \times 10^{-10} \text{ Pa}$, 求此真空度下 1 cm^3 空气内有多少个分子? 已知温度为 27°C 。

解 (1)根据 $p = nkT$, $n = \frac{p}{kT}$, 标准状态下, $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T = 273.15 \text{ K}$ 。

分子数密度 $n = 2.69 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, 1 cm^3 气体中的分子数 $n' = 2.69 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

(2)如果 $p = 1.33 \times 10^{-10} \text{ Pa}$, $T = 300.15 \text{ K}$, 则 1 cm^3 空气中的分子数

$$n = \frac{p}{kT} = \frac{1.33 \times 10^{-10}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300.15 \times 10^6}, \quad n = 3.21 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

15.3.2 准静态过程

当气体受到外界影响时,其平衡态将发生变化,状态随时间的变化称为过程。这种变化破坏了气体原有的平衡态,使气体处于非平衡态;经过一段时间后才能达到新的平衡态。气体由非平衡态达到新的平衡态的过程称为弛豫,所需时间称为弛豫时间。当过程进行得非常缓慢,而且其中的每一步所经历的时间均比弛豫时间长得多时,每一步都有充分的时间建立新的平衡态,使过程的各中间状态均可近似地视为平衡态,这样的过程称为准静态过程;反之,则称为非准静态过程。

以 p 为纵坐标轴、 V 为横坐标轴所作的图称为 p - V 图,如图 15-1 所示。

由于理想气体的平衡态只需两个态参量便可确定,因此, p - V 图上的每一个点均代表着一个平衡态。反过来,每一个平衡态,均可在 p - V 图中找到一个相应的代表点。

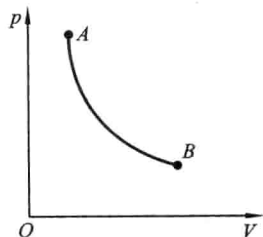


图 15-1 理想气体的 p - V 图

而准静态过程中的每一个中间状态都有确定的状态参量值,因此均可用 p - V 图中的一个对应点来表示。若将这些代表各平衡态的点连成一条曲线,则此曲线便可表示该准静态过程,即该过程的过程曲线。

图 15-1 中的 AB 曲线就是气体从 A 态经准静态过程变化到 B 态的过程曲线。由此可见,每一准静态过程都可用 p - V 图中的一条曲线来表示,而 p - V 图中的每一条曲线均代表一个相应的准静态过程。

15.4 分子运动论的基本概念

The basic concept of molecular kinetic theory

1. 宏观物体是由大量分子(分子泛指原子、分子等)组成的,分子间有一定距离

组成物质的分子或原子的数目是十分巨大的。例如,1 mol 的任何物质均含有 6.022×10^{23} 个分子或原子这一常量称为阿伏伽德罗常数,用 N_A 表示, $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。物质的分子不是连续分布的,彼此间有一定距离,分子的质量和体积都很小。例如,氧的摩尔质量是 0.032 kg/mol , 所以一个氧分子的质量为 $m = 0.032/N_A \text{ kg}$ 。氧分子本身的体积大约只有 $3.393 \times 10^{-27} \text{ L}$, 但在标准状态下,每个氧分子平均占有的体积约为 $3.721 \times 10^{-23} \text{ L}$ 。可见气体分子间的距离是相当大的。如果将分子看成是球体,它的平均有效直径大约是 10^{-10} m 的数量级,而气体分子间的距离则是分子直径的十几倍。物体的可压缩性也说明分子间有一定距离。气体比液体和固体的可压缩性大得多,也说明气体分子间的距离比液体和固体的大许多。

2. 分子永不停息地做无规则热运动

分子太小,很难直接观察到它们的运动,但有一些间接的实验足以说明分子的运动特点。扩散现象是重要的实验之一。每个分子运动的方向和速度大小都在不断地变化。在物体内部,分子是以各种不同的速度,沿各种可能的方向运动的。从这个意义上说,分子的运动是“无规则”的。实验证明,热现象是物体大量分子无规则运动的集体表现,而且这种运动的剧烈程度与物体的温度有关。所以,通常将分子的这种运动称为热运动。

3. 分子间存在相互作用力

根据分子运动论的观点,分子的热运动和分子间的相互作用力是决定物质各种性质的两个基本因素。分子间的作用力称为分子力。分子是一个复杂的带电系统,分子力的性质主要是电磁相互作用力。分子力的规律比较复杂,很难用简单的数学公式表示出来。但在分子运动论中,一般是在实验基础上采用一些简化模型,最常用的模型是假定两分子间的作用力只是和它们之间的距离 r 有关。分子力 f 随分子间距离 r 的变化关系如图 15-2 所示,图中 r 轴以上和以下的虚线分别表示斥力和引力,实曲线表示分子间总的的作用力 f 。由图中看到,当 $r < r_0$ (约 10^{-10} m , 称为平衡位置) 时,分子力为斥力,而且斥力的大小随 r 的减小急剧地增大;当 $r = r_0$ 时,斥力和引力相等,分子力为零;当 $r > r_0$ 时,分子力为引力;当 $r > 10^{-9} \text{ m}$ 时,引力较小可以忽略不计。由于气体分子间的距离很大,而分子力的有效作用直径($d \approx 10^{-9} \text{ m}$, 图中 R_0 称为分子作用半径)又很小,所以除了分子间及分子与器壁间碰撞的瞬间外,气体分子的分子力是极其微小的,可以忽略不计。同时由于分子质量小,所受重力也小,所以气体分子的重力一般也可忽略不计。因此,气体分子在相邻两次碰撞之间的运动,实际上可视为在惯性支配下的自由运动。

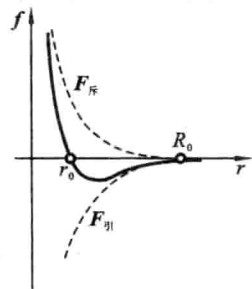


图 15-2 分子力随分子间距的变化关系