



“十一五”规划教材

大学物理

(下册)

张学恭



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



“十一五”规划教材

物理学

大学物理

(下册)

张学恭



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书按照教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会制定的理工科大学物理课程教学基本要求编写,大学物理课程教学基本要求中将教学内容分为 A、B 两类,其中 A 类为核心内容,是课程的基本要求,B 类为扩展内容。本书基本上是根据核心内容的要求编写的,也加入了少量的扩展内容。本书适用于主要以核心内容为教学要求的各类高等院校的工科专业和理科非物理专业的本科物理课程。全书共 14 章,分上、下册出版。上册 7 章分别为质点的运动规律、运动的守恒定律、刚体的定轴转动、真空中的静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒磁场、电磁感应与电磁场;下册 7 章分别为气体动理论、热力学基础、机械振动、机械波、波动光学、狭义相对论、量子物理基础。每节后有思考题,每章后有习题,书后给出了习题答案,可供读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 下册/张学恭编著. —西安:西安交通大学出版社,2010.3
ISBN 978-7-5605-3370-4

I. ①大… II. ①张… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 239419 号

书 名 大学物理(下册)
编 著 张学恭
责任编辑 李海丽 桂 亮

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 陕西新世纪印刷厂

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 18.25 字数 334 千字
版次印次 2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-3370-4/O·309
定 价 26.00 元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82664954
读者信箱:jdjgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

序

物理学是现代自然科学中的一门重要的基础学科。它的任务是：研究物质运动最一般的规律，物质的基本结构和物质之间的相互作用，并由此探索各种可能的实际应用。

我们所在的宇宙由客观存在的多种形态的物质组成。大家最熟悉的普通物质（下文简称物质）由各种粒子（如电子、质子、中子、夸克等）和场（如引力场、电磁场）构成。这类物质常常组合为原子、分子等，形成固态、液态、气态、等离子态等各种形态。此外，还有许多物质，如“暗物质”、“暗能量”等，虽然客观存在，但目前人类不仅不能通过自身器官，如眼、耳等直接感觉到，甚至还不能利用现有的仪器设备观测到，只能通过某些自然现象间接地觉察其存在。现在的科学家和工程技术人员大多是对已知的物质进行理论和实验研究，不断扩大和加深对物质世界内在奥秘的认识，为人类谋福祉；还有少数先行者则在探寻那些人类尚未进入的领域，为21世纪、22世纪人类和科学的发展开辟目前还不清楚的全新的途径。

物质有多种存在形态和运动形式。各门自然科学分别研究特定对象的运动发展规律。物理学的特点则是它探索的是物质运动最普遍的规律，例如时间空间的性质，能量、动量、质量、电荷的守恒等，对于任何学科都是十分重要的。因此，尽管各种专业千差万别，但都必须在中学物理基础上，进一步提高和扩展物理知识，这就是开设大学物理课程的目的。

随着科学研究的深入和技术水平的提高，物理学的研究范围越来越广，小至粒子，大至宇宙，分工越来越细，形成了许多发支，这些分支又各自发展成为独立的学科。例如按运动形式的不同，形成了力学、电磁学、热学、光学、声学等；按研究对象的不同，形成凝聚态物理、粒子物理、地球物理、天体物理等。这些学科又分别派生出新的分支。同时，许多物质运动过程往往是多种运动形式的综合，不能仅仅孤立地考察其中某一种运动形式，因而在学科分化得越来越细的同时，又产生了许多交叉性的新学科。例如物理化学、量子化学、生物物理、量子生物学等。这样的分支现在已经成百上千，仍在不断出现新的变化。

物理学还充当着发展生产力的先锋的作用，在不断的创新中转化为新兴的先进技术，从而又衍生出大量应用物理类的工程性学科。例如核工程、激光物理、微

电子学等。

显然,大学物理课程不可能也不必要面面俱到。在本书中,只按物质运动的几种常见的形式择要讨论其核心内容,虽然只是沧海一粟,但只要真正弄清了主要内容,打下了必要的基础,在今后需要更深入的物理知识时,就完全可以通过自学和独立研究来达到目的。

在学习大学物理时,我们不仅要学习物理知识本身,正确理解基本概念,掌握最重要的定律、公式,了解它们的适用范围。还要通过学习过程领会更多的科学思维方法。如:怎样发现和提出问题;怎样在解决问题时判断主要因素和次要因素,建立各种简化的理想模型;怎样使理论和实验两方面的研究成果相辅相成,相互推动;怎样正确理解生产力发展的需求与学科自身发展相互促进的关系;等等。学到科学的思想方法,不仅对学好本课程,而且对今后从事任何工作都会产生十分积极的作用,这也是学习大学物理课程的一个重要目标。

吴寿镛

2009年9月于西安交通大学

前 言

物理学是研究物质的基本结构、相互作用和物质最基本最普遍的运动形式(机械运动、电磁运动、热运动、微观粒子的运动等)及其相互转化规律的学科。物理学的研究对象具有极大的普遍性,它的基本理论渗透于自然科学的各个领域,应用于生产技术的各个部门,是其它自然领域和工程技术发展的基础。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻地影响着人类对物质世界的基本认识,深刻地影响着人类的思维方式和社会生活,是人类文明发展的基石,在人才的科学素质培养中具有极为重要的地位。

物理学是一门基础学科,它是当代工程技术科学的主要支柱之一。在许多科学技术领域和生产部门之中,都广泛地应用着物理学中的力学、热学、电磁学、振动、波动、光学和近代物理等各方面的基本理论和基本知识。在高等理工科院校中,“大学物理”是一门重要的基础课。物理学在理工科学生的知识结构中具有奠基的作用,进入科学技术的任何一个领域,都必须通过物理学的大门。

本书是根据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会于2004年12月制定的非物理类理工学科学大学物理课程教学基本要求内容,结合编者数十年大学物理课程的教学经验,并参考了国内现行的部分大学物理课程教科书编写而成的。大学物理课程教学基本要求中将大学物理课程的教学内容分为A、B两类,其中A类为核心内容,是课程的基本要求,B类为扩展内容。本书基本上是根据核心内容的要求编写的,也写入了少量的扩展内容。本书适用于主要以核心内容为教学要求的各类高等院校的工科专业和理科非物理专业的本科物理课程。

在本书的编写过程中,编者力求能使学生学到物理学中最基本的规律和概念,掌握比较完整的物理图像,而在理论深度上要求适度。在内容的精选和更新上,在深广度的掌握上,都作了认真的探讨。编者的目的,是使本书除了帮助学生掌握物理学的基本内容和基本规律外,还要使学生掌握科学的分析方法和思维方法。本书对物理概念的阐述和分析,力求清晰、简明,富有系统性、逻辑性、哲理性,隐含方法论;在系统阐述物理的基本规律、基本方法、基本概念的同时,引导和培养学生用

高等数学来分析和解决物理问题的能力,以便对学生进行科学思维的训练。

学生学物理要入门,必须强调先掌握“物理语言”,强调物理语言的准确性,强调物理语言、物理量符号、物理量单位等的规范、简明和统一性。本书还强调了要学生会掌握物理模型的概念、思想及方法,自然界中的各种物质、现象,相互作用,相互联系,相互制约,千变万化,物理学要培养学生掌握运用物理模型的科学研究方法。各种定律、定理、公式都是针对各种理想的物理模型的,强调掌握各种物理模型的条件。本书贯穿了对这方面能力的培养。

全书采用国际单位制,本书在每节后都附有几道思考题,是根据该节中应掌握的主要概念和应思考清楚的主要问题专门编写的。通过对这些思考题的理解,使学生能够基本掌握该节的主要思路、概念和方法。每章附有习题,书后附有习题参考答案。

西安交通大学吴寿镠教授对书稿进行了非常认真仔细地审阅,提出了许多宝贵的意见和具体建议;在本书的编写过程中,还得到了西安思源学院、西安邮电学院、西安理工大学、西安交通大学等院校从事物理课程教学的一些同志的大力支持,在此向他们一并表示衷心的感谢。

由于编者学识和教学经验所限,可能对课程基本要求的理解不够,或对某些问题认识不深,因此书中缺点和错误在所难免,诚恳希望广大读者给予批评指正。

编 者

2009 年 10 月于西安

目 录

第8章 气体动理论	(1)
8.1 气体的状态参量 理想气体的状态方程	(1)
8.2 理想气体的压强公式	(8)
8.3 气体分子的平均平动动能与温度的关系	(12)
8.4 能量按自由度均分定理 理想气体的内能	(13)
8.5 麦克斯韦速率分布定律	(19)
8.6 分子的平均碰撞次数和平均自由程	(24)
习题	(27)
第9章 热力学基础	(31)
9.1 功与热量	(31)
9.2 热力学第一定律 热力学系统的内能	(35)
9.3 热力学第一定律对理想气体等值过程的应用	(37)
9.4 热力学第一定律对理想气体绝热过程的应用	(42)
9.5 循环过程 卡诺循环	(45)
9.6 热力学第二定律	(53)
9.7 可逆过程和不可逆过程 卡诺定理	(58)
9.8 热力学第二定律的统计意义	(61)
9.9 熵 熵增加原理	(65)
习题	(67)
第10章 机械振动	(74)
10.1 简谐振动及其描述	(74)
10.2 简谐振动的旋转矢量图示法	(84)
10.3 简谐振动的能量	(87)
10.4 阻尼振动 受迫振动和共振	(89)
10.5 简谐振动的合成 拍	(93)
习题	(98)

第11章 机械波	(103)
11.1 机械波的产生与传播	(103)
11.2 平面简谐波的波动方程	(108)
11.3 波的能量传播	(115)
11.4 惠更斯原理	(119)
11.5 波的叠加原理 波的干涉 驻波	(124)
11.6 多普勒效应	(131)
习题	(136)
第12章 波动光学	(142)
12.1 光的单色性和相干性	(143)
12.2 用分割波阵面法实现光的干涉	(145)
12.3 光程 光程差	(149)
12.4 用分割振幅法实现光的干涉	(151)
12.5 惠更斯-菲涅耳原理 夫琅禾费单缝衍射	(161)
12.6 光栅 光栅衍射	(171)
12.7 自然光和偏振光 马吕斯定律	(178)
12.8 反射和折射时光的偏振 布儒斯特定律	(183)
习题	(187)
第13章 狭义相对论	(193)
13.1 力学相对性原理 伽利略变换	(194)
13.2 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换	(198)
13.3 狭义相对论的时空观 速度变换	(203)
13.4 相对论动力学的一些基本结论	(211)
习题	(216)
第14章 量子物理基础	(220)
14.1 量子论的起源 普朗克能量量子假设	(220)
14.2 光电效应的实验规律 爱因斯坦光子假设	(225)
14.3 康普顿效应	(230)
14.4 玻尔氢原子理论	(235)
14.5 德布罗意假设 实物粒子的波粒二象性	(242)
14.6 海森伯不确定关系式	(246)

14.7 波函数及其统计解释 定态薛定谔方程.....	(249)
14.8 一维无限深势阱 势垒和隧道效应.....	(253)
14.9 氢原子的量子力学处理方法简介 能量和角动量量子化.....	(258)
14.10 电子的自旋 多电子原子的壳层结构	(262)
习题.....	(270)
习题答案	(275)

第 8 章 气体动理论

物质的运动形式是多种多样的,在本章和下一章中将研究物质的热运动。本章从物质微观结构的观点出发,以气体为研究对象,运用统计的方法,研究大量气体分子热运动的规律。这部分内容称为气体动理论。

8.1 气体的状态参量 理想气体的状态方程

8.1.1 分子运动的基本概念

气体、液体、固体这些物质都由分子组成,对这些物质中分子的运动规律,由实践和实验得出了如下的一些基本认识。

1. 这些物质都是由大量的其间有一定间隙的微粒所组成,这些微粒称为分子

这些分子是可以独立存在且能保持该物质原有性质的最小微粒。在国际单位制中,物质的量的单位是摩尔,用符号 mol 表示。实验证明,1 mol 的任何物质中所含有的分子数都相同,其值即为阿伏加德罗常数 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。在标准状态下,即压强为 1 atm,温度为 0°C 时,1 mol 任何气体的体积都为 22.4 L。可见,在常温常压下,单位体积的物质内包含的分子数(即分子数密度)是十分巨大的。例如,氧气的 $n = 2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,即每立方厘米中就有 2.5×10^{19} 个分子,其分子数实际上是不可数的。

组成物质的分子之间都有一定的间隙。一般气体分子之间的间隙都较大,而液体和固体分子之间的间隙相对来说要小得多,所以气体更容易被压缩。

2. 分子在永不停息地作无规则的热运动

实验表明,组成物质的分子在永不停息地作无规则的热运动。人们熟悉的气体及液体的扩散现象就是分子不停息运动的例证。固体也有扩散现象,把两种不同的金属,如将铝和铜互相压紧,经过几个月后,会在铝中发现有铜,在铜中发现有铝,这说明固体分子也在运动。在制造半导体器件时,为了改变半导体材料的物理性能,在纯净的半导体材料中掺入某种杂质,就是利用固体中的扩散现象。布朗在

1827 年用显微镜观察悬浮在水中的植物花粉时,发现花粉作纷乱无定向的运动,这种运动称为布朗运动。布朗运动是由杂乱的液体分子碰撞植物颗粒(花粉)引起的,它虽然不是液体分子本身的运动,却反映了液体分子的运动情况。通过布朗运动,可以间接地证明分子运动的无规则性。

实验还表明,分子无规则运动的剧烈程度和物质的热状态(温度)有关。温度越高,分子无规则运动的剧烈程度越高,所以不管物质温度高或低,分子的无规则运动都称为分子的热运动。分子热运动的基本特征是分子的永恒运动和频繁地相互碰撞。从宏观上看,分子热运动具有混乱性和无序性,一切热现象都是物体内大量分子热运动的集体表现。

3. 分子间有相互作用力

既然物体是由一个个分子组成的,那么为什么固体和液体的分子聚集在一起而不会分散开呢?这是因为分子之间存在着相互吸引力。分子间的引力使分子互相靠拢而不分散开,折断一支粉笔需要用力,拉伸固体要受到抵抗,都是因为物体分子间的引力作用阻碍它们分开。分子之间的相互作用力不仅表现有吸引力,而且还表现为排斥力,液体和固体都很难压缩,就说明分子之间存在排斥力,阻碍它们相互靠拢。

分子间的吸引力和排斥力统称为分子力,分子力与分子间的距离有关,其关系如图 8-1 所示。图中横坐标表示分子间的距离 r ,纵坐标表示分子力 f , f 为正表示斥力, f 为负表示引力。当分子间的距离为 r_0 (如对一般的气体, r_0 约为 10^{-10} m)时,分子间作用力的合力 $f=0$ 。当分子间的距离小于 r_0 时,分子力的合力表现为斥力,并且随分子间距离的减小,斥力增加得很快,这就是液体和固体很难压缩的原因。当分子间的距离大于 r_0 时,分子力的合力表现为引力,随着分子间距离的增加,合力(引力)慢慢增加,当分子间的距离大到某一值 r_m 时,合力(引力)达到最大值,然后随着 r 的增大又慢慢减小,当分子间的距离大到 10^{-9} m 时,分子间的作用力就可以忽略不计了。可见,分子力的作用范围是极小的,分子力属于短程力。在低压情况下,气体分子间的作用力可以不必考虑。

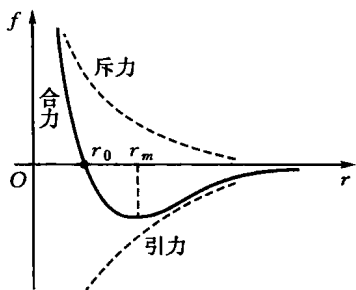


图 8-1 分子力与距离关系图

8.1.2 热力学系统的平衡状态

在热学中,常把我们的研究对象称为热力学系统,比如在一个容器中有一定量

的气体,这是由大量的微观粒子(气体分子)所组成的宏观系统,当我们从热学的角度来研究这个系统的性质和运动规律时,称这个系统为热力学系统(简称系统)。用力学的观点来看,一个个分子就是质点,这系统就是一个庞大的质点系,所有能够与这个系统发生相互作用的一切其它物体称为系统的外界。

我们首先要研究的是这个系统在不_受外界影响的情况下的运动规律。所谓系统不受外界影响,即系统与外界不交换任何能量(做功或传递能量)和物质,这样的系统是_{完全}封闭的,称为_{孤立}系统。对于一个孤立系统,在经过相当长的时间后,此系统整体的宏观性质将不再随时间变化,且具有确定的状态。热力学系统所处的这种宏观性质不随时间变化的状态称为平衡状态,简称_{平衡态}。实际上,热力学系统总是不可避免地会与外界发生程度不同的能量或物质的交换,没有任何交换只是一种理想化的状态。但即使存在微小的交换,如果系统的宏观性质变化很微小,可以忽略不计,则系统的状态可以近似看作平衡态。系统处于平衡态的另一个特征,表现为系统内部没有宏观的能量流和粒子流。

我们只是说,热力学系统处于平衡态时,其宏观性质不随时间变化,但从微观上看,系统处于平衡态时,组成系统的微观粒子仍处于不停的无规则的热运动状态,只是它们的统计平均效果不随时间变化。因此,热力学平衡态是一种动态平衡,称为_{热动平衡}。

还有一种经常遇到的状态叫做稳恒态,稳恒态中各处的性质不随时间变化,但系统受到外界的影响,在系统内部存在能量流或粒子流。例如,将一根金属棒的两端分别浸入温度不同的两个容器中,两个容器的温度都保持不变。将金属棒作为一个系统来看,由于它的两端存在着恒定的温度差,因此在金属棒内部有稳定的能量流,金属棒上各处的温度也不随时间变化,但各处的温度值不相同,这时的金属棒所处的状态称为稳恒态,但它不是平衡态,而是非平衡态。平衡态的条件应为系统的宏观性质不随时间变化和系统不受外界影响,二者缺一不可。

8.1.3 气体的状态参量

为了描述研究对象(物体、系统)的状态及其变化规律,我们通常采用一些表示其有关特性的物理量。用来描述热力学系统的平衡态宏观性质的物理量称为系统的状态参量。对一定量(即质量 m 一定)的气体,当处于平衡状态时,一般用体积 V 、压强 P 及温度 T 这三个宏观物理量来描述其状态,这三个量即为气体系统的状态参量。

1. 体积 V

气体体积的意义是指气体分子可以自由运动的空间的大小。通常研究的气体

系统总是存在于某一个容器之中的,虽然气体的热运动总是使气体充满整个容器,但从严格的意义上讲,由于气体分子具有一定的大小,气体的体积 V 应等于容器的容积减去所有气体分子本身所占的体积。实际中,由于气体分子的体积极小,在一般状态下,气体分子本身所占的总体积很小,通常都忽略不计,所以容器容积的大小即为气体的体积 V 。

在国际单位制中,体积的单位为立方米(m^3),经常用到的体积单位还有立方厘米(cm^3)和升(L),其换算关系为 $1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$,即 1 L 为 1 立方分米(dm^3)。

2. 压强 P

由于气体分子无规则地热运动,致使任一时刻都有数量极其多的分子和器壁相碰撞,大量气体分子对容器器壁碰撞的宏观表现为气体对器壁的压力,不管容器器壁表面的形状如何,压力恒垂直于器壁表面。气体的压强是指气体作用于器壁单位面积上的压力,用符号 P 表示。在气体内部任一点也存在着压强,这是指按照通过该点的一个小面积处两侧气体间的相互作用力,折算成单位面积所受到的垂直压力,小面积的方位可以是任意的。当气体处于平衡状态时,同一点处不同方位的面积上的压强都相等,也都等于容器器壁上的压强。

在国际单位制中,压强的单位是帕斯卡,简称帕(Pa)

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} (\text{牛顿} \cdot \text{米}^{-2})$$

此外,在实际中,常用的压强单位还有毫米汞高(mmHg)和标准大气压(atm),它们的换算关系为

$$1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}$$

1 mmHg 是指 1 毫米高的水银柱作用在它的单位底面积上的力。

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

3. 温度 T

温度的概念起源于人们对物体冷热程度的感觉,不同的冷热状态要进行比较,就需要一个标度、衡量和比较冷热状态的物理量,这个表征冷热程度的物理量就是温度。上面提到,分子的热运动与物体的热状态有关,物体的温度越高,分子的热运动就越剧烈,所以物体的温度是物体内分子热运动剧烈程度的量度。温度的单位和数值的表示方法称为温标,各种各样的温度计的数值都是由各种温标决定的。物理学中常用的温标有热力学温标和摄氏温标。

在热力学温标中的温度用符号 T 表示,在国际单位制中,热力学温标的单位是开尔文,简称开(K),温度与长度、质量、时间、电流强度和摩尔等一样,都是国际单位制中的基本量,它们的单位都是基本单位。在实践中常用摄氏温标,用符号 t 表示,单位是摄氏度,简称度($^{\circ}\text{C}$)。一开温度和一摄氏度温度的量度相同,只是零

点比摄氏温标零点下移 273.15°C 。热力学温标和摄氏温标的换算关系为

$$T = t + 273.15 \quad (8-1)$$

温度是热学中特有的物理量,是热学中的重要概念。温度实质上反映的是组成系统的大量微观粒子无规则热运动的剧烈程度。由于热力学系统中分子的热运动不可能停止(分子被完全冻结),所以热力学温度的绝对零度永远不可能达到,这常被称为热力学第三定律。

对一定量的气体,其体积 V 即是容器的容积,当气体处在平衡状态时,气体内部的温度处处相同,压强也处处相同,而且都不随时间变化,所以一定量气体的平衡状态可以用一组参量 V, P, T 来描述。若气体处于非平衡状态,就表明或者是气体内部温度不均匀,或者是压强不均匀,或者是二者都不均匀,所以非平衡状态不能用一组参量来描述。在 $P-V$ 图(或 $P-T$ 图,或 $V-T$ 图)中,一定量气体的一个平衡状态可以用一个点来表示,而非平衡状态是不能在 $P-V$ 图中表示出来的。

8.1.4 热力学系统的平衡过程

一定量的气体,从某一个平衡状态变化到另一个平衡状态,这中间必然经历一个状态的变化过程。若这过程中所经历的每一个状态都可以看作是平衡状态,则这一过程称为平衡过程。平衡过程也是气体动理论中的一个很重要的概念。显然,平衡过程是一种理想过程,真正的平衡过程需要无限长的时间才能完成,实际发生的过程不可能是真正的平衡过程。因为状态要发生变化,就必然要破坏原来的平衡,而且实际发生的过程往往进行得比较快,在没有达到新的平衡之前又要进行下一步的变化,这就使得过程所经历的各个中间状态是一系列的非平衡状态,这样的实际过程称为非平衡过程。但是,只要过程进行得足够缓慢,过程中的任一时刻,系统都可以近似地认为是处于平衡状态,整个过程可以近似地按平衡过程来处理,这样的过程称为准静态过程。准静态过程在气体动理论中是有实际意义的,热力学中用到的平衡过程实际上都是准静态过程。

在 $P-V$ 图中,由于一个平衡状态对应于一个点,所以一个平衡过程可以用一条线来表示。对于一个非平衡过程不能在 $P-V$ 图中表示出来。

8.1.5 理想气体的状态方程

一定量的气体,当其处于平衡状态时,可以用一组状态参量 V, P, T 来描述。在一般情况下,当其中某一个参量发生变化时,另外两个参量也将随之改变。气体处于某一给定平衡状态时,这三个状态参量之间必有一定的关系,即其中一个参量

是另外两个参量的函数,如

$$T = f(V, P)$$

这个方程即为一定量的气体处于平衡状态时的气体状态方程。一般说来,这个方程的形式是很复杂的,它与气体的性质和所处状态有关。

我们知道,任何一个物理定律都有一定的适用范围。实验表明,对一般气体,在压强不太大(与大气压相比较)和温度不太低(与室温相比较)的实验范围内,遵守玻意耳定律、盖·吕萨克定律和查理定律,我们把在任何情况下都遵守上述三条实验定律的气体称为理想气体。实际上,理想气体是不存在的,它只是真实气体在某种条件下共性的抽象概念,是一种理想模型,一般在常温常压下可以近似地用理想气体的模型来概括实际气体的性质。压强越低,温度越高,实际气体就越接近于理想气体。理想气体状态的三个参量 V, P, T 之间的关系即为理想气体的状态方程。

由气体的上述三个实验定律和阿伏加德罗定律可得:平衡状态时,一定量的某种理想气体的状态方程为

$$PV = \frac{m}{M}RT \quad (8-2)$$

式中: m 为气体的质量; M 为 1 mol 气体的质量,常称为摩尔质量; m/M 为气体的摩尔数,也常用 $\nu = m/M$ 来表示气体的摩尔数。当 $m=M$ 时,气体量为一个摩尔。式(8-2)通常也称为克拉珀龙方程,式中 R 为一常数,一般称为普适气体常数,也称为摩尔气体常数。从理想气体的状态方程可以看出,一定量的某种气体处在平衡状态时, V, P, T 这三个状态参量中,如有两个参量已确定,可利用状态方程求出第三个状态参量。

从上式中还可以看出,当一定量的某种气体从平衡状态 1(V_1, P_1, T_1)变化到平衡状态 2(V_2, P_2, T_2)时,对状态 1,有

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{m}{M}R$$

对状态 2,有

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M}R$$

所以有

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M}R = \text{恒量}$$

上式也可以推广到其它任一平衡状态,从而写成

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n V_n}{T_n} = \text{恒量} \quad (8-3)$$

在应用式(8-3)时,各个状态必须是平衡状态,从一个平衡状态变化到另一个平衡状态的中间过程,对平衡过程或非平衡过程,式(8-3)都适用。所不同的是,对平衡过程在 $P-V$ 图上可以用一条曲线表示,若是非平衡过程是不能在 $P-V$ 图上表示出来的。

对于任何一种理想气体,当 $m=M$ 时,即对 1 mol 气体,有

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = R$$

又因为 1 mol 的理想气体在标准状态(即 $P_0 = 1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_0 = 273.15 \text{ K}$)下,所占的体积(称为摩尔体积)为 $V_m = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$,所以可以由标准状态下的各量得出普适气体常数 R 的数值。在国际单位制中,计算时常用的 R 的量值为

$$R = \frac{1.013 \times 10^5 \times 22.4 \times 10^{-3}}{273.15} = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

气体压强也常用大气压(atm)表示,体积用升(L)表示,则 R 的量值为

$$R = \frac{1 \times 22.4}{273.15} = 0.082 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

例题 8-1 一容器内盛有氧气 0.120 kg,其压强为 10.0 atm,温度为 320 K,因容器缓慢漏气,稍后测得压强减为 6.25 atm,温度降低为 300 K。求:(1)容器的体积;(2)在两次观测之间漏掉了多少氧气?

解 已知氧气的摩尔质量为 $M = 32.0 \times 10^{-3} \text{ kg}$, $10 \text{ atm} = 1.013 \times 10^6 \text{ Pa}$, $6.25 \text{ atm} = 6.33 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

(1)由理想气体的状态方程

$$PV = \frac{m}{M}RT$$

求得容器的体积为

$$V = \frac{m_1 RT_1}{MP_1} = \frac{0.120 \times 8.31 \times 320}{32.0 \times 10^{-3} \times 1.013 \times 10^6} = 9.84 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

(2)设漏气后剩余氧气的质量为 m_2 ,由 $P_2 V = m_2 RT_2 / M$,得到

$$m_2 = \frac{MP_2 V}{RT_2} = \frac{32.0 \times 10^{-3} \times 6.33 \times 10^5 \times 9.84 \times 10^{-3}}{8.31 \times 300} = 8.00 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

所以漏掉的氧气质量为

$$\Delta m = m_1 - m_2 = (12.0 - 8.00) \times 10^{-2} = 4.00 \times 10^{-2} \text{ kg}$$