



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理

(第二版)下册

University
Physics

罗圆圆 吴 评 主编

龚勇清 卢 敏 胡跃辉 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划

大学物理

(第二版) 下册

Daxue Wuli

罗圆圆 吴 评 主编
龚勇清 卢 敏 胡跃辉 副主编



高等教育出版社·北京

内容提要

本书根据《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版),在吸取广大教师教学经验并考虑当前多数院校教学实际情况的基础上修订而成。全书突出基本概念、基本规律,突出物理思路、方法及其应用,注意联系生活实际,联系工程实际,力求物理图像清晰,着力培养学生分析问题、解决问题以及独立获取知识的能力。

本书上册包括力学、相对论和电磁学,下册包括热学、振动和波动、光学以及量子物理等内容。

本书可作为高等学校理工科各专业大学物理课程的教材,也可供其他读者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理·下册/罗圆圆,吴评主编.—2版.—北京:高等教育出版社,2014.6

ISBN 978-7-04-039486-3

I. ①大… II. ①罗…②吴… 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069598号

策划编辑 程福平

责任编辑 程福平

封面设计 于涛

版式设计 于婕

插图绘制 杜晓丹

责任校对 陈杨

责任印制 韩刚

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

印刷 河北新华第一印刷有限责任公司

开本 787mm × 960mm 1/16

印张 17.5

字数 310千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

版次 2010年7月第1版

2014年6月第2版

印次 2014年6月第1次印刷

定价 27.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 39486-00

物理量的名称、符号和单位(SI)一览表

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
长度	l, L	米	m
面积	S, A	平方米	m^2
体积, 容积	V	立方米	m^3
时间	t	秒	s
[平面]角	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$	弧度	rad
立体角	Ω	球面度	sr
角速度	ω	弧度每秒	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
角加速度	α	弧度每二次方秒	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$
速度	v, u, c	米每秒	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
加速度	a	米每二次方秒	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
周期	T	秒	s
旋转频率	n	每秒	s^{-1}
频率	ν, f	赫[兹]	Hz($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$)
角频率	ω	弧度每秒	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
波长	λ	米	m
波数	σ	每米	m^{-1}
振幅	A	米	m
质量	m	千克(公斤)	kg
密度	ρ	千克每立方米	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
面密度	ρ_s, ρ_A	千克每平方米	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
线密度	ρ_l	千克每米	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$
动量	P	} 千克米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
冲量	I		
动量矩, 角动量	L	千克二次方米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
转动惯量	J	千克二次方米	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$

续表

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
力	F	牛顿	N
力矩	M	牛[顿]米	N · m
压力, 压强	p	帕[斯卡]	Pa
相[位]	φ	弧度	rad
功	W, A	} 焦[耳] } 电子伏[特]	J eV
能[量]	E		
动能	E_k, T		
势能	E_p, V		
功率	P	瓦[特]	W
热力学温度	T, Θ	开[尔文]	K
摄氏温度	t, θ	摄氏度	°C
热量	Q	焦[耳]	J
热导率(导热系数)	λ, κ	瓦[特]每米开[尔文]	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
热容[量]	C	焦[耳]每开[尔文]	$J \cdot K^{-1}$
比热[容]	c	焦[耳]每千克开[尔文]	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
摩尔质量	M	千克每摩尔	$kg \cdot mol^{-1}$
摩尔定压热容	$C_{p,m}$	} 焦[耳]每摩尔开 } [尔文]	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
摩尔定容热容	$C_{v,m}$		
内能	U	焦[耳]	J
熵	S	焦[耳]每开[尔文]	$J \cdot K^{-1}$
平均自由程	$\bar{\lambda}$	米	m
扩散系数	D	二次方米每秒	$m^2 \cdot s^{-1}$
电荷[量]	Q, q	库[仑]	C
电流	I	安[培]	A
电荷[体]密度	ρ	库[仑]每立方米	$C \cdot m^{-3}$
电荷面密度	σ	库[仑]每平方米	$C \cdot m^{-2}$
电荷线密度	λ	库[仑]每米	$C \cdot m^{-1}$
电场强度	E	伏[特]每米	$V \cdot m^{-1}$
电势	V	} 伏[特]	V
电势差, 电压	U		
电动势	\mathcal{E}		

续表

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
电位移	D	库[仑]每平方米	$C \cdot m^{-2}$
电位移通量	Ψ	库[仑]	C
电容	C	法[拉]	F(1 F = 1 C · V ⁻¹)
电容率(介电常数)	ε	法[拉]每米	F · m ⁻¹
相对电容率 (相对介电常数)	ε_r	—	1
电偶极矩	p, p_e	库[仑]米	C · m
电流密度	J, S	安[培]每平方米	A · m ⁻²
磁场强度	H	安[培]每米	A · m ⁻¹
磁感应强度	B	特[斯拉]	T(1 T = 1 Wb · m ⁻²)
磁通量	Φ	韦[伯]	Wb(1 Wb = 1 V · s)
自感	L	}亨[利]	H(1 H = 1 Wb · A ⁻¹)
互感	M		
磁导率	μ	亨[利]每米	H · m ⁻¹
相对磁导率	μ_r	—	1
磁矩	m	安[培]平方米	A · m ²
电磁能密度	w	焦[耳]每立方米	J · m ⁻³
坡印廷矢量	S	瓦[特]每平方米	W · m ⁻²
[直流]电阻	R	欧[姆]	Ω (1 Ω = 1 V · A ⁻¹)
电阻率	ρ	欧[姆]米	$\Omega \cdot m$
光强	I	瓦[特]每平方米	W · m ⁻²
折射率	n	—	1
发光强度	I	坎[德拉]	cd
辐[射]出[射]度	M	}瓦[特]每平方米	W · m ⁻²
辐[射]照度	I		
声强级	L_I	分贝 ^①	dB
核的结合能	E_B	焦[耳]	J
半衰期	$T_{1/2}$	秒	s

① 分贝是可与 SI 单位并用的我国的法定计量单位。

目 录

第十一章 气体动理论	1
§ 11.1 气体动理论的基本概念	1
§ 11.2 平衡态 理想气体物态方程	5
§ 11.3 理想气体的压强公式 温度公式	9
§ 11.4 能量按自由度均分原理 理想气体的内能	14
§ 11.5 麦克斯韦速率分布定律	18
§ 11.6 玻耳兹曼分布律	23
§ 11.7 气体分子的平均自由程	25
§ 11.8 气体内的输运现象	28
§ 11.9 真实气体的范德瓦耳斯方程	31
习题	33
科学家介绍 玻耳兹曼	36
第十二章 热力学基础	38
§ 12.1 热力学第一定律	38
§ 12.2 热力学第一定律在等值过程的应用	41
§ 12.3 绝热过程	46
§ 12.4 循环过程 卡诺循环	51
§ 12.5 热力学第二定律	58
§ 12.6 可逆与不可逆过程 卡诺定理	60
§ 12.7 热力学第二定律的统计意义	64
§ 12.8 熵 熵增加原理	66
习题	69
第十三章 振动学基础	74
§ 13.1 简谐振动的描述	74
§ 13.2 简谐振动的能量	87
§ 13.3 阻尼振动和受迫振动 共振	89
§ 13.4 电磁振荡	94
§ 13.5 简谐振动合成	99
习题	106

第十四章 波动学基础	111
§ 14.1 机械波的形成与传播	111
§ 14.2 平面简谐波的表达式 波动微分方程	114
§ 14.3 波的能量和能流	123
§ 14.4 声波	127
§ 14.5 惠更斯原理	131
§ 14.6 波的叠加原理 波的干涉	132
§ 14.7 驻波 半波损失	136
§ 14.8 电磁波	143
§ 14.9 多普勒效应	147
习题	152
第十五章 波动光学	158
§ 15.1 光源 光的相干性	158
§ 15.2 分波阵面干涉	161
§ 15.3 光程和光程差	165
§ 15.4 分振幅干涉	168
§ 15.5 迈克耳孙干涉仪	175
§ 15.6 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	177
§ 15.7 单缝夫琅禾费衍射	179
§ 15.8 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	184
§ 15.9 衍射光栅和光栅光谱	186
§ 15.10 偏振光 马吕斯定律	192
§ 15.11 反射和折射时产生的偏振 布儒斯特定律	196
§ 15.12 双折射现象	197
§ 15.13 偏振光的干涉	201
习题	206
第十六章 量子物理	211
§ 16.1 黑体辐射 普朗克量子假设	211
§ 16.2 光的量子性	215
§ 16.3 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论	222
§ 16.4 微粒的波粒二象性	227
§ 16.5 不确定关系	229
§ 16.6 波函数 薛定谔方程	233
§ 16.7 一维定态问题	235

§ 16.8 氢原子的量子力学描述 电子自旋	239
§ 16.9 原子的电子壳层结构	242
§ 16.10 固体能带结构	244
§ 16.11 激光	250
习题	258
科学家介绍 薛定谔	261
习题参考答案	263

第十一章 气体动理论

热学是研究物质热现象和热运动规律及其应用的学科。

在日常生活和生产实践中，常用温度来表示物体的冷热程度。当物体的温度发生变化时，物体的许多性质也将发生变化。例如，物体受热后，温度升高，体积膨胀；水在不同的温度下可处于固态、液态或气态；软的钢件经过淬火(加热到一定温度后放入水中或油中迅速冷却)，可提高硬度；硬的钢件经过退火(加热到一定温度后缓慢降温冷却)，可以变软；蒸汽机中，加热的蒸汽膨胀可以对外做功……这些与温度有关的物理性质及状态的变化，称为热现象。研究热现象的理论称为热学。

热学从宏观和微观两方面研究热现象，由于出发点和研究方法不同，而形成了两种理论：一种是宏观理论，称为热力学；一种是微观理论，称为统计物理学。热力学是从能量的观点出发，根据由观察和实验所总结出来的热力学定律，用严密的逻辑推理方法，研究宏观物体的热学性质。统计物理学则是从物质的微观结构和分子动理论出发，依据分子运动所遵循的力学规律，用统计的方法研究宏观物体的热学性质。热力学理论具有高度的可靠性，用它可以检验统计物理学理论的正确性；而统计物理学的理论则可以揭示热力学理论的微观本质。因此，这两种理论对热现象的研究是相辅相成的。

热学的理论，曾有力地推动过产业革命，在现代工程技术中也获得了广泛的应用。

气体动理论，是统计物理学的一个重要组成部分。由于气体动理论使用了简单的理想气体模型，使它成为统计物理最先发展起来的部分，本书主要讨论这部分内容。

本章从气体动理论的基本概念出发，运用统计的方法研究气体宏观性质与气体分子热运动之间的关系，从而阐明气体的压强、温度、热容、内能等宏观参量的微观本质。本章介绍气体分子热运动遵守的统计规律，气体内的输运现象和真实气体的范德瓦耳斯方程。

§ 11.1 气体动理论的基本概念

本节从物质微观结构出发，阐明气体动理论的一些基本概念。

一、宏观物体是由大量分子(或原子)组成的

自然界中常见的气体、液体、固体等宏观物体都是由大量分子(或原子)组成的. 实验证明, 1 mol 任何物质的分子数均为 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, N_A 称为阿伏伽德罗常量.

实验表明, 组成物体的分子之间存在一定的间隙. 气体很容易被压缩, 说明气体分子间存在间隙. 50 cm^3 的水和 50 cm^3 的酒精混合后总体积不是 100 cm^3 , 而是 97 cm^3 , 说明液体分子间存在间隙. 钢表面可以渗入碳, 半导体可以掺入杂质等, 说明固体分子间也有间隙. 目前, 用高分辨率的电子显微镜已能观察到某些晶体横截面内原子结构的图像, 这使宏观物体由分子、原子组成以及分子之间有间隙的概念得到了最有力的证实.

二、物体内的分子在永不停息地做无规则运动

在房间里打开一瓶香水的盖子, 香味便会传到整个房间, 这是气体的扩散现象. 装着两种不同气体的瓶子连通后, 它们会因扩散而互相掺和, 直到两种气体均匀混合, 不论两个瓶子的相对位置如何, 结果都一样. 这说明, 气体分子的扩散不是靠外力(例如重力), 而是分子无规则运动的结果. 在一杯清水中滴进几滴红墨水, 不多久, 它就会扩散开来, 均匀地分布于整杯水中. 这是液体的扩散现象. 它说明液体的分子也在做无规则的运动. 将两种不同的金属如铜块和金块挤压接触, 经过较长时间, 就会发现, 在接触表面上会有微量的金属渗入对方, 结果铜中有金, 金中有铜. 这是固体内的扩散现象.

气体、液体、固体的扩散现象都说明物体内的分子在永不停息地做无规则运动(或称为无序热运动). 布朗运动实验是证实分子做无规则运动的著名实验. 1827年英国植物学家布朗在显微镜下观察悬浮于水中的花粉时, 发现这些花粉不停地做无规则运动; 颗粒越小, 运动越剧烈. 液体中花粉小微粒的这种杂乱无章的运动, 称为**布朗运动**. 布朗运动是由花粉小微粒在液体中受到液体分子碰撞的不平衡力的作用而引起的运动, 因此, 布朗运动间接证明了液体分子在做永不停息的无规则运动. 布朗运动如图 11.1. 布朗运动的剧烈程度随温度的升高而增大, 这反映了分子运动随温度的升高而加强.

经验告诉我们, 扩散现象是和温度有关的. 温度越高, 扩散进行得越快, 扩散现象越显著. 这说明, 温度越高, 分子的无规则运动越剧烈. 所以把分子无规则运动称为**分子的热运动**. 温度反映了物质分子热运动的剧烈程度.

三、分子间存在相互作用力

拉断一根钢丝要用很大的力，这说明物体的分子间存在着相互吸引力。在一定的温度下气体可凝聚成液体和固体的事实也说明，分子间有相互吸引力。液体和固体是很难压缩的，这又说明，分子之间除了引力，还有斥力。根据实验和理论的分析，分子之间的相互作用力(称为分子力)，可以看成是分子间引力和分子间斥力的合力。引力和斥力以及它们的合力 F 随分子间距离 r 变化的关系如图 11.2 所示。图中的原点 O 表示一个分子的中心，另一个分子中心的位置用坐标 r 表示。

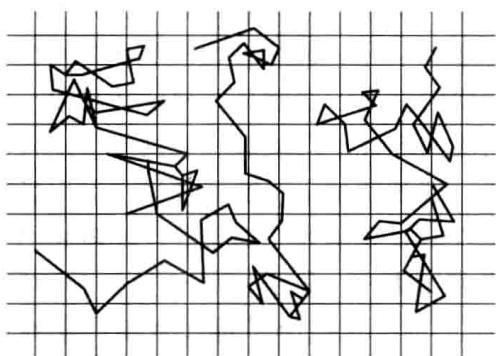


图 11.1

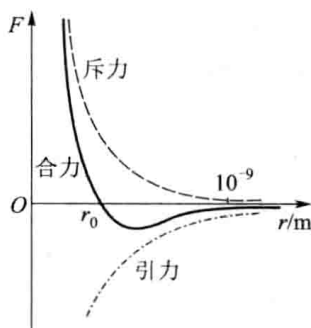


图 11.2

由图 11.2 可见，当两个分子中心间距离 $r = r_0$ (约为 10^{-10} m) 时，分子力 $F = 0$ ；当 $r < r_0$ 时，斥力大于引力，分子力表现为斥力，且斥力大小随 r 的减小而急剧增加，因此， r_0 可近似看做分子的直径，称为分子的有效直径 d ；当 $r > r_0$ 时，引力大于斥力，分子力表现为引力；当 $r > 10^{-9}$ m 时，分子之间的作用力变得十分微弱，分子力就可忽略不计了。

分子力的作用会使分子聚集在一起，在空间形成某种规则的分布，形成有序排列。而分子的无规则运动会破坏这种有序的排列，使分子分散开来。物质分子在不同的温度下之所以会表现为三种不同的聚集态，正是由这两种相互对立的作用所决定的。在较低的温度下，分子无规则运动不够剧烈，分子在相互作用力的影响下被束缚在各自的平衡位置附近做微小的振动，这时便表现为固体状态。当温度升高时，无规则运动剧烈到某一限度时，分子力的作用已不能把分子束缚在固定的平衡位置附近做微小的振动，但还不能使分子分散远离，这样便表现为液体状态。当温度再升高，无规则运动进一步剧烈到一定的限度时，不但各个分子不再在微小范围内振动，而且各个分子将互相分离，只有在两个分子之间距离很接近时分子间的相互作用力才显示其作用。这时，分子互

相分散远离，分子的运动近似为自由运动，这样便表现为气体状态。

综上所述，一切宏观物体都是由大量分子(或原子)组成的；所有的分子都处在永不停息的无规则热运动中；分子间有相互作用力。这是气体动理论的三个基本概念。统计理论就是以此为基础发展起来的。

四、微观量 宏观量 统计规律

分子热运动，虽然个别分子的运动是无规则的，但就大量分子的集体表现来看，却存在着一定的统计规律，我们以掷硬币来说明什么是统计规律。

一枚1元的硬币，一面印着图案，一面印着“1元”，落地后哪面朝上，完全是偶然的，掷十次、二十次也没有什么规律，但掷成千上万次，统计一下就会发现，各面朝上的次数都很接近总数的一半，即统计概率为 $1/2$ 。重复实验，或同时掷出成千上万枚，会得到同样的结论。这就是一种统计规律。然而具体的一次实验统计结果往往与多次实验的统计平均值有一个偏差，这种偏差称为涨落。在一次实验中掷的次数越多，涨落就越小。统计规律是对大量偶然事件整体起作用的规律，参与的偶然事件的数量越大，则这种规律就越明显。

从微观上看，热现象是组成物体的微观粒子(分子、原子)热运动的结果。宏观物体都是由大量的分子(或原子)组成的。这些分子都在永不停息地做无规则运动，运动剧烈程度与物体的温度有关，因此这种运动称为分子热运动。每一个分子都有它的体积、质量、速度和能量，这些描述个别分子的量称为**微观量**。用实验直接测定这些微观量是相当困难的，有的甚至是办不到的，一般实验能观察的不是个别分子的微观量，而是大量分子的微观量的某种平均值，它表征大量分子集体的特性。这种表征大量分子集体特性的量称为**宏观量**。如压强、温度、体积、内能等。就物体内部单个分子来看，由于受到其他分子的复杂作用，其运动的状态瞬息万变，显得杂乱无章，具有很大的偶然性。但在整体上，大量分子热运动却遵循确定的规律，这种规律称**统计规律**。描写物体的宏观量与描写分子的微观量之间，存在着必然的联系。研究表明，物质的热现象是物质内大量分子热运动的集体表现。正是这种特点，使分子热运动成为区别于其他运动形式的一种基本运动形式。因此说，热学是研究分子热运动规律的学科。

复习思考题

- 11.1 气体动理论有哪些基本概念？如何理解这些概念？
- 11.2 气体为什么能够被压缩，但又不能无限压缩？

11.3 1 cm^3 水中有多少水分子？水分子的质量为多少？

§ 11.2 平衡态 理想气体物态方程

一、平衡态

通常，我们把热学中所研究的物体或物体系（它们都是由大量分子或原子组成），称为热力学系统，简称系统；而处于系统以外的物质，称为外界。如果系统与外界之间既无能量交换，也无物质交换，这样的系统又称为孤立系统。

经验表明，一个孤立系统在足够长时间内，必定会趋向一个最终的宏观状态，因孤立系统不受外界影响，宏观性质不再随时间变化，这时我们就说系统达到了平衡态。否则是非平衡态。

例如，有一个如图 11.3 所示的封闭容器，用隔板分成 A 和 B 两室。起初，A 室充满气体，B 室是真空；当把隔板抽走，A 室内的气体就会向 B 室运动。开始，A、B 内各处气体是不均匀的，并且随时间变化，经过一定时间后，整个容器中的气体将到处均匀一致，如果没有外界影响，则容器中的气体将始终保持这一状态，不再发生宏观变化。这时容器内的气体所处的状态，就叫做平衡态。

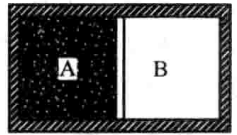


图 11.3

平衡态是一个理想化的概念，它是在一定条件下对实际情况的概括和抽象。在许多实际问题中，可以把实际状态近似地当做平衡态来处理。

应当指出的是，平衡态是指系统的宏观性质不随时间变化。从微观看，平衡态下，组成系统的分子仍在永不停息地做无规则热运动，只不过分子运动的平均效果不随时间变化，而这种平均效果的不变在宏观上表现为系统达到了平衡态。因此热学中的平衡是动态平衡，通常把这种平衡叫做热动平衡。今后若不做特殊说明，系统的状态均指平衡态。

如果有三个物体 a、b、c，a、b 两个物体分别与处于确定状态的 c 达到了热平衡，那么 a、b 两个物体再相互接触，不会有能量的传递，a、b 两个物体状态也无任何变化，表明 a、b 两物体也处于热平衡状态，这就是热力学第零定律。

二、状态参量

系统处于平衡态时，可以用一些确定的物理量来表征系统的宏观属性，我

们把这些可以独立改变的，并足以确定系统平衡态的一组宏观物理量称为**状态参量**。如反映气体体积的几何参量；反映压强的力学参量；描述系统化学成分的化学参量；反映电磁现象的电磁参量。一般情况下，需用上述四类参量来描述热力学系统的平衡态。究竟需要用哪几个参量才能单值地确定一个系统的状态？这由系统的复杂程度和所研究问题的要求来确定。

我们主要讨论气体。对于一定量的气体(质量为 m , 摩尔质量为 M)处于平衡态时，有确定的体积 V ，气体内部各处的压强 p 和温度 T 也都相同，有确定的值，气体的状态可以用这三个宏观的物理量来描述。这三者就称为气体的**物态参量**。下面对它们的意义和单位作简单介绍。

体积 气体的体积是指气体分子所能到达的空间，通常是指盛装它的容器的容积。它是从几何角度描述气体的宏观状态，属于几何参量。应当注意，气体的体积和气体所有分子本身体积的总和是不同的。后者一般仅占气体体积的几千分之一。气体体积的单位，在国际单位制中是 m^3 (立方米)。

压强 气体的压强是指气体垂直作用于器壁表面单位面积上的力，它是大量气体分子与器壁碰撞的宏观表现。它是从力学的角度描述气体的宏观状态，属于力学参量。在国际单位制中，气体压强的单位是 Pa(帕斯卡)，即 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ (牛每平方米)，有时也用 atm(标准大气压)和 cmHg(厘米汞柱)等单位。它们之间的关系是

$$1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg} = 1.013\ 25 \times 10^5 \text{ Pa}$$

温度 温度是反映物体冷热程度的一个物理量，属于热学参量。从统计物理学的观点来看，温度是物体内部分子无规则热运动剧烈程度的量度，这在下一节将做进一步讨论。

经验告诉我们，冷热程度不同的物体相互接触时，最后将趋于冷热程度一致的热平衡态，具有相同的温度。因此，可利用某些物质具有的与冷热状态有关，并且易于测量的某一特性(例如汞柱的长度)制成温度计，将温度计与待测物体接触，待它们达到热平衡后，观测其温度特性的指示(如汞柱的高度)，就可测定物体的温度。

温度的数值表示法叫温标。在物理学中，常用的温标有两种，一种是热力学温标 T ，单位是 K(开尔文)，这是国际单位制中采用的基本温标；另一种是摄氏温标 t ，单位是 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度)，热力学温度 T 和摄氏温度 t 之间的数值关系是

$$T/\text{K} = t/^{\circ}\text{C} + 273.15$$

按照这一规定，标准大气压下，水的冰点是 $273.15 \text{ K}(0^{\circ}\text{C})$ ，三相点是 $273.16 \text{ K}(0.01^{\circ}\text{C})$ ，沸点是 $373.15 \text{ K}(100^{\circ}\text{C})$ 。

三、理想气体物态方程

热力学系统处于平衡态时，其物态参量间满足的关系式称为物态方程。

一定质量的气体处于平衡态时，它的物态参量体积 V 、压强 p 和温度 T 之间有下列关系式，即物态方程为

$$\frac{pV}{T} = C \quad (11.1)$$

式中常量 C 随气体种类及气体的质量而定。上式当 T 为常量时，给出玻意耳定律；当 p 为常量时，给出盖·吕萨克定律；当 V 为常量时，给出查理定律。实验证明，当温度不太低（与室温比较）压强不太大（与大气压比较）时，气体遵守上述三条实验定律，我们把在任何情况下绝对遵守上述三条实验定律的气体称为理想气体。理想气体是气体的一个理想模型。

上式对任一平衡态 (p, V, T) 都成立。式中的常量 C 可以由气体在标准状态下的 p_0 、 V_0 、 T_0 值来确定，即

$$C = \frac{p_0 V_0}{T_0}$$

在标准状态下 ($p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_0 = 273.15 \text{ K}$)，1 mol 理想气体所占体积均为 $V_m = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ 。所以质量为 m 、摩尔质量为 M 的理想气体，在标准状态下的体积 $V_0 = (m/M) \cdot V_m$ 。则

$$C = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{m p_0 V_m}{M T_0}$$

用 R 表示上式的常量， $R = \frac{p_0 V_m}{T_0}$ ， R 是与气体种类无关的常量，通常称为普适气体常量（也称摩尔气体常量）。

在国际单位制中

$$\begin{aligned} R &= \frac{p_0 V_m}{T_0} = \frac{1.013 \times 10^5 \times 22.4 \times 10^{-3}}{273.15} \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \\ &= 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

于是，对于质量为 m ，摩尔质量为 M 的理想气体有

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (11.2)$$

这就是理想气体物态方程。它表达了理想气体处于平衡态时，各物态参量之间的关系。式中 m/M 是气体的物质的量，可用 ν 表示，即

$$\nu = \frac{m}{M}$$

[例 11.1] 容器里装有氧气 0.10 kg, 压强为 1.013×10^6 Pa, 温度为 47°C , 由于容器漏气, 经过一段时间后, 压强降为原来的 $5/8$, 温度降到 27°C , 若把氧气看做理想气体, 问: (1) 容器的容积有多大? (2) 漏去的氧气质量有多少?

[解] (1) 以容器内原有的全部氧气为研究对象, 根据理想气体物态方程

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

容器的容积为

$$\begin{aligned} V &= \frac{mRT}{Mp} = \frac{0.10 \times 8.31 \times (273 + 47)}{32 \times 10^{-3} \times 1.013 \times 10^6} \text{m}^3 \\ &= 8.20 \times 10^{-3} \text{m}^3 \end{aligned}$$

(2) 容器漏气后, 压强降为 p' ($p' = 5p/8$), 温度降为 T' ($= 273 \text{ K} + 27 \text{ K} = 300 \text{ K}$), 以容器中剩余的氧气(质量为 m')为研究对象, 由理想气体物态方程, 可得

$$\begin{aligned} m' &= \frac{Mp'V}{RT} \\ &= \frac{32 \times 10^{-3} \times 5/8 \times 1.013 \times 10^6 \times 8.20 \times 10^{-3}}{8.31 \times 300} \text{kg} \\ &= 0.067 \text{kg} \end{aligned}$$

所以漏去的氧气质量为

$$m - m' = 0.100 \text{ kg} - 0.067 \text{ kg} = 0.033 \text{ kg}$$

对一定质量的理想气体来说, 其物态参量 p 、 V 、 T 中只有两个是独立的. 所以任意给定两个参量的一组数值, 就确定了气体所处的一个平衡态. 在以 p 为纵轴, V 为横轴的 $p-V$ 图上, 任一点都对应着一个平衡态.

理想气体物态方程还可以表示成另一种形式. 设质量为 m 的气体, 其总分子数为 N , 每个分子的质量为 m_0 , 则 $m = Nm_0$. 因 1 mol 气体的分子数(阿伏伽德罗常量)为 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, 所以 $M = N_A m_0$ 代入式(11.2)可得

$$pV = \frac{N}{N_A}RT$$

或

$$p = \frac{N}{V} \frac{R}{N_A} T$$

用 k 表示 R/N_A , 则

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31}{6.022 \times 10^{23}} \text{J} \cdot \text{K}^{-1} = 1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$$