



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

University Physics

大学物理学

(第5版) 下册

主编 王少杰 顾牡 王祖源

高等教育出版社

育“十一五”国家级规划教材

University Physics

大学物理学

主 编 王少杰 顾牡 王祖源

副主编 吴天刚 陈静

(第5版) 下册

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材和国家级精品课程使用教材,是根据教育部物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)改编的。全书以基本要求的A类知识点为核心内容,对B类知识点有选择地作了适当拓展,既保证基本教学内容,又便于教师循序渐进地开展教学。在选材上加强近代物理讲解,关注物理前沿,突出物理图像,弱化数学推演。

上册有力学和电磁学两篇内容,包括质点运动学、质点动力学、刚体力学基础、流体力学简介、狭义相对论、电荷与电场、电流与磁场、电磁场与麦克斯韦电磁场方程组等。下册有热学、振动、波动和光学以及近代物理基础三篇内容,包括气体动理论、热力学基础、振动学基础、波动学基础、几何光学、波动光学、量子物理、原子核物理和粒子物理简介、固体与分子、天体物理和宇宙学等。每章都有思考题和习题,书末附有习题答案。

本书还适当考虑双语教学需求,增加了物理量和物理学名词的英文注释。值得一提的是本书在教学技术的应用和教学模式的多样化上作了适当尝试,可通过扫描二维码阅读文档、视频、数字物理应用案例的源程序、演示实验和精彩的阅读材料,适应了高等教育发展的新趋势,成为本书的一大亮点。

本书难度适宜,可作为高等学校理工科非物理类专业大学物理课程的教材或参考书,也可供文科相关专业和社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册 / 王少杰, 顾牡, 王祖源主编
-- 5版. -- 北京: 高等教育出版社, 2017.5
ISBN 978-7-04-047324-7

I. ①大… II. ①王… ②顾… ③王… 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(2017)第020830号

Daxue Wulixue

策划编辑 高聚平 责任编辑 程福平 封面设计 张志奇 版式设计 徐艳妮
插图绘制 杜晓丹 责任校对 陈旭颖 责任印制 赵义民

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	大厂益利印刷有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787 mm×1092 mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	22.25	版 次	1995年7月第1版
字 数	450千字		2017年5月第5版
购书热线	010-58581118	印 次	2017年5月第1次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	46.30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 47324-00

数字课程

大学物理学

(第5版)

王少杰 顾牡 王祖源

登录方法:

1. 访问 <http://abook.hep.com.cn/1250693>, 点击“注册”。在注册页面输入用户名、密码及常用的邮箱进行注册。已注册的用户直接输入用户名和密码登录即可进入“我的课程”界面。
2. 课程充值: 点击“我的课程”页面右上方“绑定课程”, 正确输入教材封底防伪标签上的 20 位密码, 点击“确定”完成课程绑定。
3. 在“我的课程”列表中选择已充值的数字课程, 点击“进入课程”即可开始课程学习。

账号自登录之日起一年内有效, 过期作废。

使用本账号如有任何问题,

请发邮件至: ecourse@hep.com.cn。



重要通知



大学物理学(第5版)

“大学物理学(第5版)”数字课程与纸质教材一体化设计, 紧密配合。数字课程涵盖动画、视频、文本、图片等资源。充分运用多种形式媒体资源, 极大地丰富了知识的呈现形式, 拓展教材内容。在提升课程教学效果同时, 为学生学习提供思维与探索的空间。

用户名: 密码: 验证码:  忘记密码? 注册 记住我(30天内免登录)

“大学物理学(第5版)”数字课程与纸质教材一体化设计, 紧密配合。数字课程涵盖动画、视频、文本、图片等资源。充分运用多种形式媒体资源, 极大地丰富了知识的呈现形式, 拓展教材内容。在提升课程教学效果同时, 为学生学习提供思维与探索的空间。

<http://abook.hep.com.cn/1250693>

目 录

第 3 篇 热 学

第 9 章 气体动理论	003	推证	020
§ 9.1 状态参量 平衡态		§ 9.7 能量均分定理 理想	
准静态过程	003	气体的内能	021
9.1.1 气体的状态参量	003	9.7.1 自由度	021
9.1.2 平衡态	005	9.7.2 能量均分定理	022
9.1.3 准静态过程	006	9.7.3 理想气体的内能	023
§ 9.2 理想气体的物态		§ 9.8 真实气体	024
方程	006	9.8.1 真实气体的等温线	024
§ 9.3 麦克斯韦速率分布	009	9.8.2 范德瓦耳斯方程	025
9.3.1 麦克斯韦速率分布律	009	§ 9.9 气体分子的平均自由程	
9.3.2 三个统计速率	011	和平均碰撞频率	027
9.3.3 麦克斯韦速率分布律的		* § 9.10 气体内的输运过程 ...	030
实验验证	013	9.10.1 黏性现象(内摩擦) ...	030
§ 9.4 玻耳兹曼分布	014	9.10.2 热传导	032
9.4.1 玻耳兹曼分布律	014	9.10.3 扩散现象	033
* 9.4.2 重力场中微粒按高度的		9.10.4 低压下的热传导	033
分布	015	思考题 9	034
* 9.4.3 统计规律性与涨落	015	习题 9	035
§ 9.5 理想气体的压强	016	第 10 章 热力学基础	038
9.5.1 理想气体的微观模型	016	§ 10.1 热力学第一定律	
9.5.2 平衡状态气体的统计假设		内能 功 热量	038
(又称分子混沌性		10.1.1 热力学第一定律	038
假设)	016	10.1.2 内能	039
9.5.3 理想气体压强公式及其		10.1.3 功	040
统计意义	017	10.1.4 热量和热容量	040
§ 9.6 温度的微观本质 理想		§ 10.2 热力学第一定律的	
气体物态方程的推证 ...	019	应用	042
9.6.1 温度的微观解释	019	10.2.1 等体过程	042
* 9.6.2 理想气体物态方程的		10.2.2 等压过程	043

10.2.3 等温过程	044	表述	059
§ 10.3 理想气体的绝热 过程	046	* 10.5.3 热力学第二定律两种表述 的等效性	060
10.3.1 理想气体的准静态绝热 过程	047	10.5.4 可逆和不可逆过程	061
* 10.3.2 非静态绝热过程	048	* 10.5.5 卡诺定理	062
* 10.3.3 多方过程	049	§ 10.6 热力学第二定律的统计 意义和熵的概念	063
§ 10.4 循环过程和卡诺 循环	053	10.6.1 热力学第二定律的统计 意义	063
10.4.1 循环过程	053	10.6.2 熵和玻耳兹曼熵公式及 熵增加原理	064
10.4.2 卡诺循环	054	10.6.3 熵的热力学表示及熵差 计算	066
§ 10.5 热力学第二定律和不可 逆过程 卡诺定理	059	思考题 10	068
10.5.1 自然过程的方向性	059	习题 10	070
10.5.2 热力学第二定律的两种			

第 4 篇 振动、波动和光学

第 11 章 振动学基础	077	11.3.3 相互垂直的简谐振动的 合成	091
§ 11.1 简谐振动的描述	077	§ 11.4 阻尼振动	093
11.1.1 弹簧振子	077	§ 11.5 受迫振动 共振	094
11.1.2 简谐振动的表达式	077	§ 11.6 电磁振荡	096
11.1.3 简谐振动的速度和 加速度	078	思考题 11	097
11.1.4 振动的相位	079	习题 11	099
11.1.5 旋转矢量表示法	080	第 12 章 波动学基础	103
§ 11.2 简谐振动的动力学 特征	081	§ 12.1 机械波的产生和 传播	103
11.2.1 简谐振动的动力学 定义	081	12.1.1 机械波的形成	103
11.2.2 简谐振动的实例	084	12.1.2 描述波动的物理量	105
11.2.3 简谐振动的能量	085	§ 12.2 平面简谐波的 波函数	106
§ 11.3 简谐振动的合成	088	12.2.1 波函数的建立	106
11.3.1 两个同方向同频率简谐 振动的合成	088	12.2.2 波函数的物理意义	107
11.3.2 两个同方向不同频率 简谐振动的合成	089	§ 12.3 波动方程与波速	111
		12.3.1 物体的弹性形变	111
		12.3.2 波动方程	112

12.3.3 决定波速的因素	113	13.1.3 费马原理	143
§ 12.4 波的能量	114	§ 13.2 几何光学成像的基本概念 和薄透镜成像规律	145
12.4.1 平面简谐纵波传播时介质 元的能量	114	13.2.1 同心光束 物和像	145
12.4.2 波的能量密度和能流 密度	115	13.2.2 光在平面上的反射	146
12.4.3 波的吸收	116	13.2.3 光在球面上的折射和 反射	146
12.4.4 球面波	117	13.2.4 薄透镜	151
§ 12.5 惠更斯原理	118	§ 13.3 光学仪器	155
12.5.1 惠更斯原理	118	13.3.1 照相机	155
12.5.2 惠更斯原理的应用	119	13.3.2 显微镜	156
§ 12.6 波的叠加原理 波的 干涉	120	13.3.3 望远镜	157
12.6.1 波的叠加原理	120	§ 13.4 光的相干性	158
12.6.2 波的干涉	120	13.4.1 光源	158
§ 12.7 驻波	122	13.4.2 光的干涉现象	160
12.7.1 驻波的形成	122	13.4.3 光程	162
12.7.2 驻波的波函数	124	§ 13.5 双缝干涉	163
12.7.3 半波损失	126	13.5.1 杨氏双缝干涉	163
12.7.4 弦线振动的简正模式	126	13.5.2 菲涅耳双镜	164
§ 12.8 多普勒效应	127	13.5.3 劳埃德镜	165
* § 12.9 声波	129	§ 13.6 薄膜干涉	166
12.9.1 声压	129	13.6.1 薄膜的等倾干涉	166
12.9.2 声强和声强级	129	13.6.2 薄膜的等厚干涉	170
§ 12.10 电磁波	131	13.6.3 迈克耳孙干涉仪	173
12.10.1 电磁波及其性质	131	13.6.4 多层薄膜系统	174
12.10.2 电磁波的能量	132	§ 13.7 单缝衍射	176
12.10.3 电磁波的产生与 传播	133	13.7.1 惠更斯-菲涅耳原理	176
12.10.4 电磁波谱	135	13.7.2 单缝衍射	178
思考题 12	136	§ 13.8 光栅衍射	180
习题 12	138	13.8.1 衍射光栅	180
第 13 章 光学	141	13.8.2 光栅衍射的光强分布	181
§ 13.1 几何光学的基本 原理	141	§ 13.9 光学仪器的分辨 本领	184
13.1.1 几何光学的基本定律	141	§ 13.10 X 射线衍射	186
13.1.2 全反射	143	§ 13.11 偏振光与自然光	187
		13.11.1 偏振光	188
		13.11.2 自然光	189

§ 13.12 马吕斯定律	189	13.15.1 椭圆偏振光和圆偏振光	198
13.12.1 偏振片	189	13.15.2 波片	199
13.12.2 马吕斯定律	190	13.15.3 偏振光的检验	200
§ 13.13 反射和折射时光的偏振	192	§ 13.16 偏振光的干涉 人为双折射现象 旋光现象	201
§ 13.14 双折射现象	193	13.16.1 偏振光的干涉	201
13.14.1 双折射的寻常光和非常光	193	13.16.2 人为双折射现象	202
13.14.2 光轴和主平面	194	13.16.3 物质的旋光性	204
13.14.3 双折射现象的解释	195	思考题 13	204
13.14.4 偏振棱镜	196	习题 13	207
§ 13.15 椭圆偏振光和圆偏振光 波片	198		

第 5 篇 近代物理基础

第 14 章 量子物理	215	14.5.2 电子衍射实验	235
§ 14.1 黑体辐射和普朗克量子假设	215	§ 14.6 波函数的统计解释	237
14.1.1 黑体辐射	216	14.6.1 关于粒子和波的分析	237
14.1.2 普朗克量子假设和普朗克公式	218	14.6.2 波函数的统计解释	238
§ 14.2 光电效应和爱因斯坦光子理论	220	14.6.3 态叠加原理	240
14.2.1 光电效应	220	§ 14.7 不确定关系	241
14.2.2 爱因斯坦光子理论	221	§ 14.8 薛定谔方程	243
14.2.3 光的波粒二象性	222	14.8.1 薛定谔方程的引入	243
§ 14.3 康普顿效应 (康普顿散射)	223	14.8.2 定态薛定谔方程	244
§ 14.4 氢原子光谱和玻尔理论	227	§ 14.9 一维定态	245
14.4.1 经典原子模型	227	14.9.1 一维无限深方势阱	246
14.4.2 氢原子光谱	228	14.9.2 隧道效应	249
14.4.3 玻尔氢原子理论	229	14.9.3 一维线性谐振子宇称	251
§ 14.5 德布罗意假设与电子衍射实验	233	§ 14.10 原子中的电子 原子的壳层结构	253
14.5.1 德布罗意假设	233	14.10.1 氢原子中电子的波函数及其概率分布	253
		14.10.2 电子的自旋 施特恩-格拉赫实验	256

14.10.3 泡利原理 多电子原子的壳层结构	258	§ 15.9 守恒定律	287
14.10.4 元素周期表	260	15.9.1 轻子数和重子数	287
思考题 14	262	15.9.2 同位旋 I 和同位旋 z 分量 I_z	287
习题 14	263	15.9.3 奇异数	287
* 第 15 章 原子核物理和粒子物理简介	266	15.9.4 电荷共轭	288
§ 15.1 原子核的基本性质	266	15.9.5 宇称	288
15.1.1 原子核的组成	266	§ 15.10 夸克 (层子) 模型	289
15.1.2 核素图	267	§ 15.11 相互作用及其统一性探索	291
15.1.3 原子核的大小和形状	267	15.11.1 相互作用	291
15.1.4 核的自旋和磁矩	268	15.11.2 统一性探索	291
§ 15.2 原子核的结合能	269	思考题 15	295
§ 15.3 核力	270	习题 15	295
15.3.1 核力的一般性质	270	第 16 章 分子与固体	297
15.3.2 核力的介子理论	271	§ 16.1 化学键	297
§ 15.4 原子核的放射性	272	16.1.1 离子键	298
15.4.1 放射性的一般现象	272	16.1.2 共价键	299
15.4.2 衰变规律	272	16.1.3 金属键	301
15.4.3 放射性强度与辐射剂量	273	16.1.4 分子间的作用力	301
§ 15.5 核反应	274	§ 16.2 晶体结构	302
15.5.1 核反应	274	16.2.1 晶格的周期性	303
15.5.2 Q 方程	275	16.2.2 晶体分类	304
15.5.3 反应截面	276	§ 16.3 能带理论	307
15.5.4 核反应机制	277	§ 16.4 导体、绝缘体、半导体	308
§ 15.6 原子核的裂变和聚变	277	16.4.1 导体、半导体和绝缘体的能带差异	308
15.6.1 重核裂变	277	16.4.2 半导体的导电机理	309
15.6.2 裂变机制	278	16.4.3 n 型半导体、 p 型半导体	309
15.6.3 裂变能的利用	278	16.4.4 pn 结	310
15.6.4 轻核聚变	279	思考题 16	311
§ 15.7 粒子物理的基本特点	282	第 17 章 天体物理与宇宙学	312
§ 15.8 粒子的分类	282	§ 17.1 广义相对论印证	313
15.8.1 粒子的分类	282	17.1.1 广义相对论的等效原理	313
15.8.2 共振态	283		

17.1.2 光线引力偏折和弯曲 时空	313	17.2.2 中子星	316
17.1.3 引力辐射	314	17.2.3 黑洞	317
17.1.4 引力红移	315	§ 17.3 宇宙论	317
§ 17.2 白矮星 中子星		17.3.1 哈勃定律与膨胀宇宙	317
黑洞	315	17.3.2 大爆炸宇宙学说	318
17.2.1 白矮星	316	17.3.3 暴胀宇宙学问世	320
		思考题 17	321
部分习题参考答案			322
附录			329
附录 1 书中物理量及单位的符号			329
附录 2 名词索引			331
参考文献			343

第 3 篇 热 学

热学是研究物质热性质和热现象规律及其应用的科学。

热学研究的对象是由大量微观粒子（分子、原子等）所组成的宏观物体，称为**热力学系统**（thermodynamic system），系统以外的物体称为**外界或环境**。例如，研究气缸内气体的体积、压强等变化时，该气体就是**系统**，而气缸壁、活塞、发动机的其他部分以及大气等都是**外界**。

分子或原子处于永不停息的无规则运动之中，这种运动称为**热运动**（thermal motion）。热运动的特点是：**大量微观粒子中个别粒子的运动都是不规则的和随机的，但在总体上，在一定的宏观条件下，却遵循确定的规律，即统计规律性**。这就决定了对热运动的研究有宏观的与微观的两种不同的描述方法。

由观察和实验总结归纳出的有关热现象的规律，构成热学的宏观理论，称为“**热力学**”（thermodynamics）；而从物质的微观结构出发，运用分子运动理论来研究热现象的规律，构成了热学的微观理论，称为“**统计物理学**”（statistical physics）。虽然二者的研究对象都是热现象，但它们所采用的方法却截然不同。热力学以观察和实验总结出来的宏观热现象所遵循的基本定律为基础，用逻辑推理方法，研究宏观物体的热性质。热力学所得到的结果，并不依赖于各种简化假设，因此，它具有高度的可靠性和普遍性。但是，热力学没有考虑物质的微观结构，因此，它不能对宏观热现象的规律给出其微观本质的解释。统计物理学恰能弥补热力学的不足，采用统计的方法，找出宏观量与微观量之间的关系，从微观上揭示了宏观热现象的本质，给出了宏观规律的微观解释，揭示宏观规律成立的条件。在对热现象的研究上，热力学和统计物理学起到了相辅相成的作用。

气体动理论（kinetic theory of gases）是统计物理学的一个组成部分，它是由麦克斯韦、玻耳兹曼，克劳修斯等人在 19 世纪中期建立的。这一理论从气体的微观结构模型出发，根据力学定律和大量分子运动所表现出来的统计规律来解释气体的热性质。鉴于我们在本篇所研究的对象主要是气体，因此，在介绍热力学之前，本书将着重介绍气体动理论，而不对统计物理学作全面介绍。

第 9 章

气体动理论

气体动理论是研究气体热现象的微观理论，是统计物理学中最简单最基本的内容。气体是由大量分子或原子组成的，1 mol 气体包含 6.022×10^{23} 个分子，该常量称为阿伏伽德罗常量，以 N_A 表示，即

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

分子或原子统称为微观粒子，其线度小于 10^{-10} m，分子或原子都以不同的形式永不停息地运动着。

气体动理论对个别分子的运动应用力学规律，对大量分子的集体行为应用统计平均的方法，认为系统的宏观性质是大量微观粒子运动的统计平均结果，宏观量与相应的微观量的统计平均值有关。例如，气体对容器壁的压强是大量气体分子撞击器壁的集体效果，所以，气体的压强就与气体分子因撞击器壁而引起的冲量的平均值有关。

本章着重讨论平衡态理想气体的性质——压强和温度及其微观本质；讨论平衡态理想气体所遵循的统计规律——能量均分定理和麦克斯韦速率分布律；并进一步讨论非平衡态理想气体的性质。

§9.1 状态参量 平衡态 准静态过程

9.1.1 气体的状态参量

用来描述热力学系统运动状态的物理量称为状态参量。在力学中，描述物体系统作机械运动状态的力学量有位置矢量、速度和加速度。而本章所要研究的对象是气体。在热力学中把气体看做由大量分子组成的一个宏观系统，气体分子处于永恒的、杂乱无章的运动之中。每个分子都具有质量、速度、动量以及能量，这些物理量统称为微观量 (microscopic quantity)。在热力学实验中，一般不能直接对微观量进行观察与测量，我们所能测量到的只是气体的体积、压强和温度，因此，通常把这三个物理量称为气体的状态参量 (state parameter)。描写气体宏观性质的状态参量称为宏观量 (macroscopic quantity)。

体积 (volume) 一般用 V 表示，其国际单位制单位为 m^3 。应该注意，气体的体积 V 是指气体分子活动所能达到的空间，而容器的容积则为气体活动空间与分子实体体积之和，二者不能混谈。当不计分子大小时，气体体积才等于容器的容积。

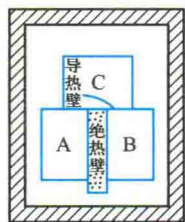
气体的压强 (pressure) 用 p 表示，在工程上也叫压力，其宏观定义是气体

作用于容器壁单位面积上指向器壁的垂直作用力。压强的国际单位制单位为“帕斯卡”，简称为帕，用 Pa 表示 ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$)，其实用单位有标准大气压和工程大气压，现已不推荐使用，其换算关系为：

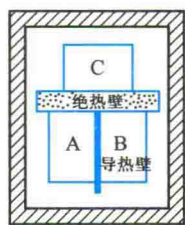
$$1 \text{ 标准大气压} = 1.013\ 25 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ 工程大气压} = 9.806\ 65 \times 10^4 \text{ Pa}$$

温度 (temperature) 可以用 T 或 t 表示。在本质上，它与物体内部大量分子热运动的剧烈程度密切相关。下面将对温度这一重要的状态参量做出严格的科学定义。



(a)



(b)

图 9-1 热平衡
说明图

假设两个系统通过导热壁相互接触后达到一个共同的平衡态 (见 9.1.2)，我们称这两个系统处于**热平衡 (thermal equilibrium)**。

设想把系统 A、B 用绝热壁隔开，而分别通过导热壁与处于确定状态的热源 C 接触，如图 9-1 (a) 所示，经过足够长时间后，A 和 B 分别都和 C 达到热平衡。然后将绝热壁与导热壁互换，如图 9-1 (b) 所示，则观察不到 A、B 的状态发生任何变化，这表明 A 与 B 也已处于热平衡。上述实验可概括为热力学定律：“如果两个系统分别与处于确定状态的第三个系统达到热平衡，则这两个系统彼此也将处于热平衡。”历史上，由于这个定律被公认为在该独立公理之前，热力学第一定律和第二定律已被命名，因此，就称它为**热力学第零定律 (the zeroth law of thermodynamics)**。

热力学第零定律揭示了互为热平衡的系统之间必定存在一个共同的反应物体冷热程度宏观性质，我们将这个**表征系统热平衡的宏观性质的物理量定义为温度**，一切互为热平衡的系统都具有相同的温度。

热力学第零定律不仅给出了温度的宏观定义，而且指出了利用温度计测量温度的方法。但要定量地确定温度的数值，还必须给出温度的数值表示法——**温标 (thermometric scale)**。

在热学中常用的温标是**热力学温标 (thermodynamic scale)**，它在历史上最先得由开尔文引入，所以也叫**开尔文温标**，用这种温标所确定的温度叫**热力学温度 (thermodynamic temperature)**，用 T 表示，它的国际单位制单位叫**开尔文**，简称“开”，记作 K。

生活和技术中常用的温标为**摄氏温标 (Celsius temperature scale)**，它所确定的温度叫**摄氏温度**，用 t 表示，单位记作 $^{\circ}\text{C}$ ，它和开尔文温标的关系定义为

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

表 9-1 列出了一些典型温度的实例。

表 9-1 典型温度实例

名称	温度/K
宇宙汤 (宇宙大爆炸发生 0.01 s 后)	10^{11}
中子星中心	6×10^9
氢弹爆炸中心	10^8



文档：开尔文

续表

名称	温度/K
太阳中心和表面	1.5×10^7 , 6×10^3
等离子体	10^5
地球中心和表面	6×10^3 , 288
钨熔点	3.6×10^3
水三相点	273.16
高温超导临界温度 ($Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$, 1988)	125
最早发现超导 Hg 临界温度 (昂内斯, 1911)	4.15
宇宙背景辐射	2.7
4He 超流转变, 3He 超流转变	2.17, 0.0027
顺磁盐绝热退磁	10^{-3}
原子核绝热退磁	10^{-6}
迄今世界最低温纪录两级原子核 (铜核) 绝热退磁 (芬兰, 艾可姆)	5×10^{-8}

9.1.2 平衡态

热学研究物质的热性质, 即研究系统的宏观状态及状态变化的规律, 系统的宏观状态可分为平衡态和非平衡态, 为了理解平衡态的含意, 我们先举例说明.

设有一封闭容器, 用隔板分成 A、B 两部分, A 部储有气体, B 部为真空, 如图 9-2 所示. 当隔板抽去后, A 部的气体向 B 部扩散, 经过一定时间后, 容器内气体各处的状态由不均匀达到均匀一致, 此后, 如果没有外界影响 (即不存在能量的传递和转化), 则容器中的气体将始终保持这一状态, 即气体不再发生宏观变化.

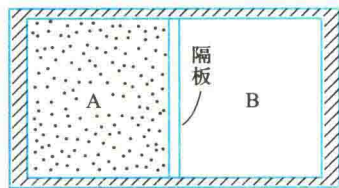


图 9-2 平衡态说明图

又如冷热程度不同的两个物体, 相互接触后, 热的物体变冷而冷的物体变热, 最后两物体达到各处冷热程度均匀一致的状态, 这时, 如果没有外界影响, 则两物体将始终保持这一状态, 不再发生宏观变化.

类似的现象还可以举出许多, 这种在不受外界影响 (即系统与外界没有物质或能量的交换) 的条件下, 无论初始状态如何, 系统的宏观性质在经充分长时间后不再发生变化的状态, 叫做平衡态 (equilibrium state). 当然, 不满足上述条件的系统状态即为非平衡态 (nonequilibrium state).

平衡态是个理想的概念, 在许多实际问题中, 可把系统处于相对稳定的实际状态近似地当作平衡状态来处理. 但必须指出, 平衡态是指在不受外界影响的条件下, 系统的宏观性质不随时间变化而变化的状态, 但从微观上看来, 组成系统的大量分子仍处于一种杂乱无章的热运动状态, 只不过此时分子热运动的平均效

果不随时间的变化而变化而已. 因此, 热力学中的平衡态实质上是一种**热平衡状态** (thermodynamical equilibrium state).

9.1.3 准静态过程

当热力学系统受到外界的影响, 发生质量或能量的交换时, 其状态会发生变化. 这时我们就说系统在经历一个**热力学过程** (thermodynamics process). 在过程进行中的每一时刻, 系统的状态不会是平衡态. 在热力学中, 为了能利用系统处于平衡态时的性质来研究过程的规律, 引入了准静态过程的概念: **在过程中的任意时刻 (或过程中的每一步) 系统的状态都无限接近于平衡态, 这样的过程叫做准静态过程** (quasi-static process). 系统在经历一个准静态过程时, 其间任一时刻的状态都可以当作平衡态来处理.

应当指出, 准静态过程是一个理想过程, 而实际状态变化过程是连续的, 中间任一时刻没有确定的状态值. 这样的过程称为**非静态过程**. 但是, 如果过程进行得足够缓慢, 以致在系统状态变化中的每一步都能及时达到或接近于一个平衡态, 这样的过程就可以当作准静态过程来处理. 在实际问题中, 只要过程进行得不是非常快 (如爆炸过程就是非常快的过程), 一般情况下都可以把实际过程近似看做准静态过程.

准静态过程在 p - V 图 (或 p - T 图、 V - T 图) 上可用一条曲线来描述, 如图 9-3 所示. 曲线 AB 上的每一个点都代表系统的一个平衡态, 可以用确定的 p , V 值来表示. 整条曲线 AB 表示一个完整的准静态过程. 而曲线 AB 通常称为**过程曲线**. 显然, 非静态过程是不能在状态图上用一条曲线来表示的.

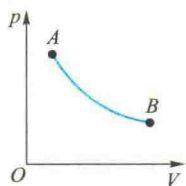


图 9-3 准静态过程

§9.2 理想气体的物态方程

实验表明, 对于一定质量的理想气体, 表示其平衡态的三个状态参量 p , V , T 之间存在着一定的关系.

玻意耳定律 (Boyle law) 表明, 一定质量的气体, 在一定的温度下, 其压强 p 和体积 V 的乘积是个常量. 即

$$pV = C.$$

对于不同的温度, 这一常量的数值是不同的, 通常, 在压强不太大、温度不太低的情况下, 各种气体都近似地遵守这一定律. 严格遵守玻意耳定律的气体称为**理想气体** (ideal gas).

由玻意耳定律得到, 对于一定质量的已知理想气体, pV 的乘积只决定于温度, 且与温度成正比, 即

$$pV \propto T.$$

该定义只能给出两个温度的比, 为了确定某一温度的数值, 还必须规定一个温度定点, 1954 年, 国际上规定以水的气、液、固三相平衡共存的温度, 即**水的三相点温度作为标准温度定点**, 规定它的数值为

$$T_3 = 273.16 \text{ K},$$

则

$$\frac{T}{T_3} = \frac{pV}{p_3 V_3}, \quad (9-1)$$

其中, p_3, V_3 为一定质量的理想气体在水的三相点温度下的压强和体积, p, V 为该气体在任意温度 T 时的压强和体积.

实验指出, 在一定的温度和压强下, 气体的体积和它的质量 m 或物质的量 $\frac{m}{M}$ (其中, M 为该气体的摩尔质量) 成正比, 即 $V = \frac{m}{M} V_m$ (其中, V_m 为气体的摩尔体积), 若用 V_{3m} 表示气体在水三相点温度下的摩尔体积, 即 $V_3 = \frac{m}{M} V_{3m}$, 那么, 式 (9-1) 可以写成

$$pV = \frac{m}{M} \frac{p_3 V_{3m}}{T_3} T. \quad (9-2)$$

阿伏伽德罗定律指出, 当气体压强趋于零时, 在相同温度和压强下, 1 mol 任何气体的体积都相同. 那么, 式 (9-2) 中 $\frac{p_3 V_{3m}}{T_3}$ 的值对各种气体都一样, 用 R 表示, 称为**摩尔气体常量** (molar gas constant), 即

$$R = \frac{p_3 V_{3m}}{T_3},$$

将它代入式 (9-2), 则得

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (9-3)$$

式 (9-3) 表示了理想气体在平衡态下三个状态参量 p, V, T 之间的关系, 称为**理想气体物态方程** (equation of ideal gases). 在通常的压强不太大和温度不太低情况下, 各种实际气体都近似地遵守这个方程.

R 的数值可以由 $\frac{p_3 V_{3m}}{T_3}$ 来推算, 也可以由 1 mol 理想气体在水的冰点 ($T_0 = 273.15 \text{ K}$) 及 1 个标准大气压 ($p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$) 下的体积 V_0 来推算. 因为 V_0 的值可根据实验结果准确求得, 实际上一般是用 V_0 来推算 R . 1 mol 理想气体在 273.15 K 及 1 个标准大气压下的体积为

$$V_0 = 22.41383 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1},$$

由此可算出

$$R = \frac{p_0 V_0}{T_0} = 8.31441 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}. \quad (9-4)$$

如果 p_0 的单位用 atm, V_0 的单位用 $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$, 则得

$$R = 8.20568 \times 10^{-2} \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

例 9-1 有一打气筒, 每打气一次, 可将原来压强为 $p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、温度为 $t = -3.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、