



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家级精品课程教材·上海市优秀教材(一等奖) (第4版)

D A X U E W U L I X U E

# 大学物理学 下册

主 编 王少杰 顾 牡 王祖源



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
国家级精品课程教材  
上海市优秀教材(一等奖)

# 大学物理学

第4版

下册

主编 王少杰 顾 牡 王祖源

参编 张 睿 于明章 吴天刚

顾 牡 王治国



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本教材根据教育部公布的最新“理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求”编写,系统地阐述了大学物理学的基本概念、基本理论和基本方法.上册有力学和电磁学两篇内容,包括质点运动学、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,包括热力学基础、气体分子动理论、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、固体和分子、天体物理和宇宙学等.每章配有阅读材料、思考题和习题,书末附有习题答案.全书以“基本要求”的A类知识点为核心内容,并对B类知识点有选择性地作了适当拓展,既保证基本教学内容,又便于教师循序渐进地开展教学.同时,在选材上加强近代理论讲解、关注物理前沿,突出物理图像,弱化数学推演.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.

本教材理论系统、讲解全面、难度适宜,可供普通高等院校用作120~140学时的非物理类专业的大学物理课程的教材,也可供相关专业的师生选用和参考.

### 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.--4版.  
--上海:同济大学出版社,2013.2  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-5608-5067-2  
I. ①大… II. ①王…②顾…③王… 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(2012)第319710号

---

---

## 大学物理学(第4版)下册

主 编 王少杰 顾 牡 王祖源

责任编辑 张 莉 责任校对 徐春莲 装帧设计 潘向葵

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)  
(地址:上海市四平路1239号 邮编:200092 电话:021-65985622)  
经 销 全国各地新华书店  
印 刷 苏州望电印刷有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 23.25  
印 数 1—3 100  
字 数 580 000  
版 次 2013年2月第4版 2013年2月第1次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5608-5067-2  
定 价 38.00元

---

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

# 目 录

第 3 篇 热学 .....	(1)
第 9 章 热力学基础 .....	(2)
§ 9.1 状态参量 平衡态 准静态过程 .....	(2)
9.1.1 气体的状态参量 .....	(2)
9.1.2 平衡态 .....	(4)
9.1.3 准静态过程 .....	(4)
§ 9.2 理想气体的状态方程 .....	(5)
§ 9.3 热力学第一定律 内能 功 热量 .....	(8)
9.3.1 热力学第一定律 .....	(8)
9.3.2 内能 .....	(8)
9.3.3 功 .....	(9)
9.3.4 热量和热容量 .....	(10)
§ 9.4 热力学第一定律的应用 .....	(12)
9.4.1 等体过程 .....	(12)
9.4.2 等压过程 .....	(13)
9.4.3 等温过程 .....	(14)
§ 9.5 理想气体的绝热过程 .....	(16)
9.5.1 理想气体的准静态绝热过程 .....	(17)
* 9.5.2 非静态绝热过程 .....	(18)
* 9.5.3 多方过程 .....	(19)
§ 9.6 循环过程和卡诺循环 .....	(24)
9.6.1 循环过程 .....	(24)
9.6.2 卡诺循环 .....	(25)
§ 9.7 热力学第二定律和不可逆过程 卡诺定理 .....	(31)
9.7.1 自然过程的方向性 .....	(31)
9.7.2 热力学第二定律的两种表述 .....	(31)
* 9.7.3 热力学第二定律两种表述的等效性 .....	(32)
9.7.4 可逆和不可逆过程 .....	(33)
* 9.7.5 卡诺定理 .....	(34)
阅读材料(9) 电冰箱 空调 .....	(34)
思考题 9 .....	(36)
习题 9 .....	(37)

第 10 章 气体动理论 .....	(41)
§ 10.1 麦克斯韦速率分布 .....	(41)
10.1.1 麦克斯韦速率分布律 .....	(41)
10.1.2 三个统计速率 .....	(44)
10.1.3 麦克斯韦速率分布律的实验验证 .....	(47)
§ 10.2 玻耳兹曼分布 .....	(47)
10.2.1 玻耳兹曼分布律 .....	(47)
* 10.2.2 重力场中微粒按高度的分布 .....	(49)
* 10.2.3 统计规律性与涨落现象 .....	(49)
§ 10.3 理想气体的压强 .....	(49)
10.3.1 理想气体的微观模型 .....	(49)
10.3.2 平衡状态气体的统计假设(又称分子混沌性假设) .....	(50)
10.3.3 理想气体压强公式及其统计意义 .....	(51)
§ 10.4 温度的微观本质 理想气体状态方程的推证 .....	(52)
10.4.1 温度的微观解释 .....	(52)
* 10.4.2 理想气体状态方程的推证 .....	(53)
§ 10.5 能量均分定理 理想气体的内能 .....	(54)
10.5.1 自由度 .....	(54)
10.5.2 能量均分定理 .....	(56)
10.5.3 理想气体的内能 .....	(57)
10.5.4 理想气体的摩尔热容 .....	(57)
§ 10.6 真实气体 .....	(59)
10.6.1 真实气体的等温线 .....	(59)
10.6.2 范德瓦耳斯方程 .....	(60)
§ 10.7 气体分子的平均自由程和碰撞频率 .....	(62)
* § 10.8 气体内的输运过程 .....	(65)
10.8.1 黏滞现象(内摩擦) .....	(65)
10.8.2 热传导 .....	(67)
10.8.3 扩散现象 .....	(68)
10.8.4 低压下的热传导 .....	(69)
§ 10.9 热力学第二定律的统计意义和熵的概念 .....	(70)
10.9.1 热力学第二定律的统计意义 .....	(70)
10.9.2 熵和熵增加原理 .....	(71)
10.9.3 熵的热力学表示 .....	(73)
阅读材料(10) 熵和信息、生命及其他 .....	(76)
思考题 10 .....	(79)
习题 10 .....	(80)

第 4 篇 振动、波动和波动光学 .....	(83)
第 11 章 振动学基础 .....	(84)
§ 11.1 简谐运动的描述 .....	(84)
11.1.1 弹簧振子 .....	(84)
11.1.2 简谐运动的表达式 .....	(84)
11.1.3 简谐运动的速度和加速度 .....	(85)
11.1.4 振动的相位 .....	(86)
11.1.5 旋转矢量表示法 .....	(87)
§ 11.2 简谐运动的动力学特征 .....	(89)
11.2.1 简谐运动的动力学定义 .....	(89)
11.2.2 简谐运动的实例 .....	(91)
11.2.3 简谐运动的能量 .....	(93)
§ 11.3 简谐运动的合成 .....	(96)
11.3.1 两个同方向同频率简谐运动的合成 .....	(96)
11.3.2 两个同方向不同频率简谐运动的合成 .....	(98)
11.3.3 相互垂直的简谐运动的合成 .....	(99)
§ 11.4 阻尼振动 .....	(102)
§ 11.5 受迫振动 共振 .....	(103)
§ 11.6 电磁振荡 .....	(105)
阅读材料(11) 非线性振动简介 .....	(106)
思考题 11 .....	(110)
习题 11 .....	(111)
第 12 章 波动学基础 .....	(115)
§ 12.1 机械波的产生和传播 .....	(115)
12.1.1 机械波的形成 .....	(115)
12.1.2 描述波动的物理量 .....	(117)
§ 12.2 平面简谐波的波函数 .....	(117)
12.2.1 波函数的建立 .....	(117)
12.2.2 波函数的物理意义 .....	(119)
§ 12.3 波动方程与波速 .....	(123)
12.3.1 物体的弹性形变 .....	(123)
12.3.2 波动方程 .....	(124)
12.3.3 决定波速的因素 .....	(126)
§ 12.4 波的能量 .....	(126)
12.4.1 平面简谐纵波传播时介质元的能量 .....	(127)
12.4.2 波的能量密度和能流密度 .....	(128)
12.4.3 波的吸收 .....	(129)
12.4.4 球面波 .....	(130)

§ 12.5 惠更斯原理 .....	(131)
12.5.1 惠更斯原理 .....	(131)
12.5.2 惠更斯原理的应用 .....	(132)
§ 12.6 波的叠加原理 波的干涉 .....	(133)
12.6.1 波的叠加原理 .....	(133)
12.6.2 波的干涉 .....	(134)
§ 12.7 驻波 .....	(136)
12.7.1 驻波的形成 .....	(136)
12.7.2 驻波的波函数 .....	(138)
12.7.3 半波损失 .....	(139)
12.7.4 弦线振动的简正模式 .....	(140)
§ 12.8 多普勒效应 .....	(140)
* § 12.9 声波 .....	(143)
12.9.1 声压 .....	(143)
12.9.2 声强和声强级 .....	(143)
§ 12.10 电磁波 .....	(145)
12.10.1 电磁波及其性质 .....	(145)
12.10.2 电磁波的能量 .....	(146)
12.10.3 电磁波的产生与传播 .....	(147)
12.10.4 电磁波谱 .....	(149)
阅读材料(12) 超声波应用简介 .....	(150)
思考题 12 .....	(152)
习题 12 .....	(154)
<b>第 13 章 光学</b> .....	(157)
§ 13.1 几何光学的基本原理 .....	(157)
13.1.1 几何光学的基本定律 .....	(157)
13.1.2 全反射 .....	(159)
13.1.3 费马原理 .....	(159)
§ 13.2 几何光学成像的基本概念和薄透镜成像规律 .....	(161)
13.2.1 同心光束 物和像 .....	(161)
13.2.2 光在平面上的反射 .....	(162)
13.2.3 光在球面上的折射和反射 .....	(163)
13.2.4 薄透镜 .....	(167)
§ 13.3 光学仪器 .....	(171)
13.3.1 照相机 .....	(171)
13.3.2 显微镜 .....	(172)
13.3.3 望远镜 .....	(174)
§ 13.4 光的相干性 .....	(175)

13.4.1	光源	(175)
13.4.2	光的干涉现象	(176)
13.4.3	光程	(178)
§ 13.5	双缝干涉	(179)
13.5.1	杨氏双缝干涉	(179)
13.5.2	菲涅耳双镜	(180)
13.5.3	劳埃德镜	(181)
§ 13.6	薄膜干涉	(182)
13.6.1	薄膜的等倾干涉	(182)
13.6.2	薄膜的等厚干涉	(186)
13.6.3	迈克耳逊干涉仪	(189)
13.6.4	多层薄膜系统	(191)
§ 13.7	单缝衍射	(193)
13.7.1	惠更斯-菲涅耳原理	(193)
13.7.2	单缝衍射	(194)
§ 13.8	光栅衍射	(198)
13.8.1	衍射光栅	(198)
13.8.2	光栅衍射的光强分布	(199)
§ 13.9	光学仪器的分辨本领	(202)
§ 13.10	X射线衍射	(204)
§ 13.11	偏振光与自然光	(206)
13.11.1	偏振光	(206)
13.11.2	自然光	(207)
§ 13.12	马吕斯定律	(208)
13.12.1	偏振片	(208)
13.12.2	马吕斯定律	(209)
§ 13.13	反射和折射时光的偏振	(211)
§ 13.14	双折射现象	(212)
13.14.1	双折射的寻常光和非常光	(212)
13.14.2	光轴和主平面	(212)
13.14.3	双折射现象的解释	(213)
13.14.4	偏振棱镜	(215)
§ 13.15	椭圆偏振光和圆偏振光 波片	(217)
13.15.1	椭圆偏振光和圆偏振光	(217)
13.15.2	波片	(218)
13.15.3	偏振光的检验	(219)
§ 13.16	偏振光的干涉 人为双折射现象 旋光现象	(220)
13.16.1	偏振光的干涉	(220)



13.16.2	人为双折射现象	(221)
13.16.3	物质的旋光性	(223)
	阅读材料(13) 全息照相	(223)
	思考题 13	(225)
	习题 13	(227)
<b>第 5 篇</b>	<b>近代物理基础</b>	(231)
<b>第 14 章</b>	<b>量子物理</b>	(232)
§ 14.1	黑体辐射和普朗克量子假设	(232)
14.1.1	黑体辐射	(233)
14.1.2	普朗克量子假设和普朗克公式	(235)
§ 14.2	光电效应和爱因斯坦光子理论	(237)
14.2.1	光电效应	(237)
14.2.2	爱因斯坦光子理论	(239)
14.2.3	光的波粒二象性	(240)
§ 14.3	康普顿效应(康普顿散射)	(241)
§ 14.4	氢原子光谱和玻尔理论	(244)
14.4.1	经典原子模型	(244)
14.4.2	氢原子光谱	(245)
14.4.3	玻尔氢原子理论	(246)
§ 14.5	德布罗意假设与电子衍射实验	(250)
14.5.1	德布罗意假设	(250)
14.5.2	电子衍射实验	(252)
§ 14.6	波函数的统计解释	(255)
14.6.1	关于粒子和波的分析	(255)
14.6.2	波函数的统计解释	(256)
*	14.6.3 态叠加原理	(258)
§ 14.7	不确定关系	(259)
§ 14.8	薛定谔方程	(261)
14.8.1	薛定谔方程的引入	(261)
14.8.2	定态,不含时间的薛定谔方程	(263)
§ 14.9	一维定态	(264)
14.9.1	一维无限深方势阱	(264)
14.9.2	隧道效应	(267)
14.9.3	一维线性谐振子 宇称	(269)
§ 14.10	原子中的电子 原子的壳层结构	(272)
14.10.1	氢原子中电子的波函数及其概率分布	(272)
14.10.2	电子的自旋 施特恩-盖拉赫实验	(275)
14.10.3	泡利原理 多电子原子的壳层结构	(276)

14.10.4 元素周期表	(278)
阅读材料(14) 激光及其原理	(280)
思考题 14	(284)
习题 14	(284)
<b>*第 15 章 原子核物理和粒子物理简介</b>	(287)
§ 15.1 原子核的基本性质	(287)
15.1.1 原子核的组成	(287)
15.1.2 核素图	(288)
15.1.3 原子核的大小和形状	(288)
15.1.4 核的自旋和磁矩	(290)
§ 15.2 原子核的结合能	(290)
§ 15.3 核力	(292)
15.3.1 核力的一般性质	(292)
15.3.2 核力的介子理论	(292)
§ 15.4 原子核的放射性	(293)
15.4.1 放射性的一般现象	(293)
15.4.2 衰变规律	(294)
15.4.3 放射性强度与辐射剂量	(295)
§ 15.5 核反应	(296)
15.5.1 核反应	(296)
15.5.2 Q 方程	(297)
15.5.3 反应截面	(298)
15.5.4 核反应机制	(299)
§ 15.6 原子核的裂变和聚变	(299)
15.6.1 重核裂变	(299)
15.6.2 裂变机制	(299)
15.6.3 裂变能的利用	(300)
15.6.4 轻核聚变	(301)
§ 15.7 粒子物理的基本特点	(304)
§ 15.8 粒子的分类	(304)
15.8.1 粒子的分类	(304)
15.8.2 共振态	(305)
§ 15.9 守恒定律	(305)
15.9.1 轻子数和重子数	(308)
15.9.2 同位旋 $I$ 和同位旋 $z$ 分量 $I_z$	(308)
15.9.3 奇异数	(308)
15.9.4 电荷共轭	(309)
15.9.5 宇称	(309)

§ 15.10 夸克(层子)模型	(310)
§ 15.11 相互作用及其统一性探索	(312)
15.11.1 相互作用	(312)
15.11.2 统一性探索	(312)
思考题 15	(314)
习题 15	(315)
<b>第 16 章 分子与固体</b>	<b>(316)</b>
§ 16.1 化学键	(316)
16.1.1 离子键	(317)
16.1.2 共价键	(317)
16.1.3 金属键	(319)
16.1.4 分子间的作用力	(320)
§ 16.2 晶体结构	(321)
16.2.1 晶格的周期性	(322)
16.2.2 晶体分类	(323)
§ 16.3 能带理论	(326)
§ 16.4 导体、绝缘体、半导体	(327)
16.4.1 导体、半导体和绝缘体的能带差异	(327)
16.4.2 半导体的导电机理	(328)
16.4.3 n 型半导体、p 型半导体	(328)
16.4.4 p-n 结	(329)
思考题 16	(329)
<b>第 17 章 天体物理与宇宙学</b>	<b>(331)</b>
§ 17.1 广义相对论印证	(332)
17.1.1 广义相对论的等效原理	(332)
17.1.2 光线引力偏折和弯曲时空	(332)
17.1.3 引力辐射	(333)
17.1.4 引力红移	(334)
§ 17.2 白矮星 中子星 黑洞	(334)
17.2.1 白矮星	(334)
17.2.2 中子星	(335)
17.2.3 黑洞	(335)
§ 17.3 宇宙论	(336)
17.3.1 哈勃定律与膨胀宇宙	(336)
17.3.2 大爆炸宇宙学说	(337)
17.3.3 暴胀宇宙学问世	(339)
思考题 17	(339)

---

---

习题参考答案 .....	(341)
习题 9 .....	(341)
习题 10 .....	(341)
习题 11 .....	(342)
习题 12 .....	(343)
习题 13 .....	(344)
习题 14 .....	(345)
习题 15 .....	(346)
附 录 .....	(347)
附录 1 书中物理量的符号及单位 .....	(347)
附录 2 名词索引 .....	(349)
参考文献 .....	(357)

# 第 3 篇 热 学

热学是研究物质的热性质和热运动的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是截然不同的。热力学是根据由观察和实验总结出来的宏观热现象所遵循的基本定律,用严密的逻辑推理方法,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,由于热力学不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。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,在介绍完热力学以后,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 热力学基础

热力学是热学的宏观理论,它的理论基础是热力学第一定律和热力学第二定律.这两条基本定律是大量实验规律的总结.

热力学第一定律(first law of thermodynamics)指出了热运动是物质运动的一种形式,它是包含热现象在内的能量守恒和转换定律.本章将着重讨论理想气体经历一些典型过程(如等体、等压、等温、绝热以及循环过程)时的功、热量、内能及效率的计算.

热力学第二定律(second law of thermodynamics)是关于自然界一切自发过程都具有不可逆性这样一种规律的经验总结.它指出了热力学过程的进行具有方向性,说明了即使满足能量守恒与转换关系的过程并不一定都能实现.

在介绍热力学基本定律之前,我们先引入几个基本概念.

### § 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,其国际单位为“米<sup>3</sup>”(m<sup>3</sup>).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.压强的国际单位为“帕斯卡”,简称为帕,用Pa表示,即牛顿·米<sup>-2</sup>(N·m<sup>-2</sup>),其实用单位有标准大气压和工程大气压.

$$1 \text{ 标准大气压} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa};$$

$$1 \text{ 工程大气压} = 9.80665 \times 10^4 \text{ Pa}.$$

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作出严格的科学定义.

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,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(zeroth law of thermodynamics).

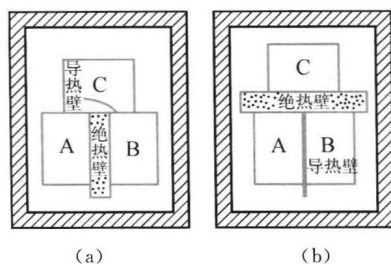


图 9-1 热平衡说明图

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宏观性质, 我们定义表征系统热平衡的宏观性质的物理量为温度, 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).

在热力学第二定律基础上引入的一种温标叫做热力学温标(thermodynamic scale), 它在历史上最先由开尔文引入, 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

$$t = T - 273.15. \quad (9-1)$$

表 9-1 列出了一些典型温度.

表 9-1 典型温度选列

名 称	温度/K
宇宙汤(宇宙大爆炸发生 0.01s 后)	$10^{11}$
中子星中心	$6 \times 10^9$
氢弹爆炸中心	$10^8$
太阳中心和表面	$1.5 \times 10^7, 6 \times 10^3$
等离子体	$10^5$
地球中心和表面	$6 \times 10^3, 288$
钨熔点	$3.6 \times 10^3$
水三相点	273.16
高温超导临界温度( $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ , 1988)	125
最早发现超导 Hg 临界温度(翁纳斯, 1911)	4.15
宇宙背景辐射	2.7

续表

名 称	温度/K
$^4\text{He}$ 超流转变, $^3\text{He}$ 超流转变	2.17, 0.002 7
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)	$5 \times 10^{-8}$

### 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。

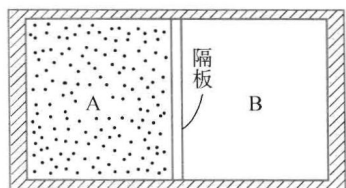


图 9-2 平衡态说明图

设有一封闭容器,用隔板分成 A, B 两部分, A 部贮有气体, 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(即不传热也不做功等),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。

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和能量的交换)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动平衡状态(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,非静态过程不能在状态图上用一条曲线来表示.

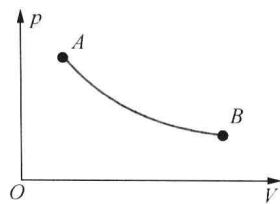


图 9-3 准静态过程

## § 9.2 理想气体的状态方程

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  $m$  或摩尔数  $\frac{m}{M}$  (其中, $M$