



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 大学物理学 第二版

## 下册

*Physics*

毛骏健 顾 牡 主编



“十二五”普通高等教育本科国

# 大学物理学 第二版

## 下册

*Physics*

DAXUE WULIXUE

毛骏健 顾 牡 主编  
鲍鸿吉 参编  
倪忠强 绘图



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，是在第一版的基础上综合整理了这些年来读者在使用过程中的一些体会和建议，并考虑到近年来教育信息化技术在教学中的使用对大学物理教材提出了新的要求编写而成的。

本书秉承了第一版的特色。内容结构清晰、表述精练，继承了国内传统教材的特色；同时在书的内容体例、写作风格、图片和图示设计等方面又借鉴了国外优秀物理教材的特点，理论与实际结合紧密，重物理思想和物理图像，内容通俗易懂且不乏趣味性。本书内容基本涵盖了《理工科类大学物理课程教学基本要求》（2010年版）的核心内容，全书分上、下两册。上册内容为力学、振动与波动以及电磁学；下册内容为热力学、气体动理论、光学和近代物理学，其中在近代物理学中保留了广义相对论和粒子物理简介。

本书可作为普通高等学校包括理科、工科、农科、医科在内的各非物理类专业的大学物理课程教材或参考书，也可供社会读者阅读。

## 图书在版编目(C I P)数据

大学物理学：下册 / 毛骏健，顾牡主编. — 2版. —  
北京：高等教育出版社，2013.12  
ISBN 978-7-04-038575-5

I. ①大… II. ①毛… ②顾… 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(2013)第245113号

策划编辑 高聚平	责任编辑 马天魁	封面设计 姜磊	版式设计 童丹
插图绘制 宗小梅	责任校对 杨雪莲	责任印制 朱学忠	

出版发行 高等教育出版社	网 址 <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
社 址 北京市西城区德外大街4号	<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
邮政编码 100120	网上订购 <a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷 高教社(天津)印务有限公司	<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
开 本 850 mm × 1168 mm 1/16	
印 张 17.75	版 次 2006年1月第1版
字 数 450千字	2013年12月第2版
购书热线 010-58581118	印 次 2013年12月第1次印刷
咨询电话 400-810-0598	定 价 38.60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 38575-00

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

### 短信防伪说明

本图书采用出版物短信防伪系统，用户购书后刮开封底防伪密码涂层，将16位防伪密码发送短信至106695881280，免费查询所购图书真伪。

#### 反盗版短信举报

编辑短信“JB, 图书名称, 出版社, 购买地点”发送至10669588128

#### 短信防伪客服电话

(010) 58582300

### 网络学习平台使用说明

1. 欢迎各位同学登录本课程的网络学习平台，进行答疑、完成作业及师生交流等学习活动。

网址 <http://phy.cncourse.com>

2. 登录方法：首次访问本网站，请先行注册，刮开封底充值卡上的密码涂层，登录网站并进入“个人服务—我的账户”，按照提示进行充值。

#### 3. 注意事项

(1) 本密码可充值 50 点用于网站学习。

(2) 本密码有效使用时间为两年，过期作废。

电子邮箱 [phycourse@hep.com.cn](mailto:phycourse@hep.com.cn)

咨询电话 (010) 58581374



# 目录

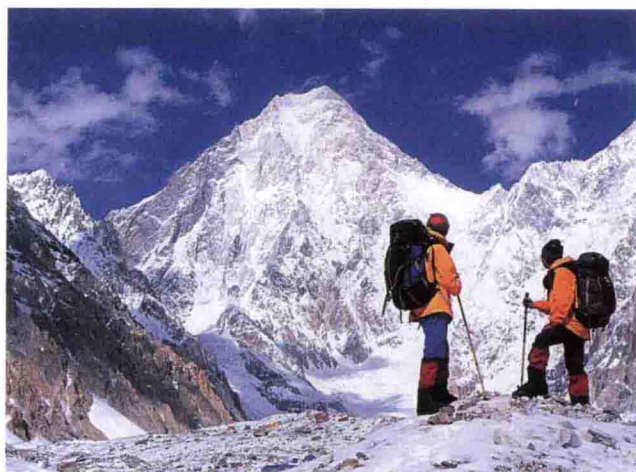


## 第9章 热力学基础 1

9-1 热力学的基本概念 .....	2
9-1-1 热力学系统 .....	2
9-1-2 平衡态 准静态过程 .....	4
9-1-3 理想气体物态方程 .....	5
9-2 热力学第一定律 .....	7
9-2-1 改变系统内能的两条途径 热功当量 .....	7
9-2-2 热力学第一定律的数学描述 .....	8
9-2-3 准静态过程中的热量、功和内能 .....	8
9-3 热力学第一定律的应用 .....	11
9-3-1 热力学的等值过程 .....	11
9-3-2 绝热过程 多方过程 .....	15
9-4 循环过程 .....	19
9-4-1 循环过程 .....	19
9-4-2 热机和制冷机 .....	20
9-4-3 卡诺循环及其效率 .....	21
9-5 热力学第二定律 .....	24
9-5-1 热力学过程的方向性 .....	24
9-5-2 热力学第二定律 .....	25
9-5-3 卡诺定理 .....	26

## 第10章 气体动理论 31

10-1 气体动理论的基本概念 .....	32
-----------------------	----



10-1-1 分子动理论的基本观点 .....	32
10-1-2 分子热运动与统计规律 .....	33
10-2 麦克斯韦速率分布 .....	34
10-2-1 麦克斯韦速率分布函数 .....	34
10-2-2 三个统计速率 .....	36
★ 10-3 玻耳兹曼能量分布 .....	38
10-3-1 玻耳兹曼能量分布 .....	38
10-3-2 重力场中的分子数密度分布 .....	39
10-3-3 大气的垂直温度梯度 .....	40
10-4 理想气体物态方程的微观解释 .....	41
10-4-1 理想气体的微观模型 .....	41
10-4-2 理想气体压强的统计意义 .....	41
10-4-3 温度的微观意义 .....	43
10-4-4 理想气体物态方程的微观解释 .....	44
★ 10-4-5 真实气体的范德瓦耳斯方程 .....	45
10-5 能量按自由度均分定理 .....	48
10-5-1 自由度 .....	48
10-5-2 能量按自由度均分定理 .....	49
10-5-3 理想气体的内能 摩尔热容 .....	50
10-6 气体分子的平均碰撞频率和 平均自由程 .....	52
10-6-1 平均碰撞频率 .....	52
10-6-2 平均自由程 .....	53

★ 10-7 气体的输运现象 ..... 54

10-7-1 黏性现象 ..... 54

10-7-2 热传导现象 ..... 55

10-7-3 扩散现象 ..... 56

10-8 熵与热力学第二定律 ..... 57

10-8-1 热力学第二定律的统计意义 ..... 57

10-8-2 熵与热力学概率 ..... 59

10-8-3 克劳修斯熵 熵增加原理 ..... 59



11-5-1 照相机 ..... 81

11-5-2 眼睛 ..... 82

11-5-3 放大镜 ..... 83

11-5-4 显微镜 ..... 84

11-5-5 望远镜 ..... 85



**第 12 章 波动光学 89**

**第 11 章 几何光学 65**

11-1 几何光学的基本定律 ..... 66

11-1-1 光的直线传播 ..... 66

11-1-2 光的反射 ..... 67

11-1-3 光的折射 ..... 67

11-1-4 全反射 ..... 69

11-2 平面反射和平面折射成像 ..... 70

11-2-1 平面反射成像 ..... 70

11-2-2 平面折射成像 ..... 70

11-3 球面反射和球面折射成像 ..... 71

11-3-1 球面反射的成像公式 ..... 72

11-3-2 球面镜成像的作图法 ..... 73

11-3-3 球面镜的横向放大率 ..... 74

11-3-4 球面折射成像 ..... 75

11-4 薄透镜成像 ..... 77

11-4-1 薄透镜的成像公式 ..... 77

11-4-2 薄透镜的焦点和焦距 ..... 79

11-4-3 薄透镜成像的作图法 ..... 80

12-1 光的本性 ..... 90

12-1-1 微粒说与波动说之争 ..... 90

12-1-2 光的电磁本性 ..... 91

12-2 光的相干性 ..... 91

12-2-1 普通光源的发光机制 ..... 92

12-2-2 杨氏双缝实验 ..... 93

12-2-3 光程 ..... 96

12-3 薄膜干涉 ..... 96

12-3-1 等倾干涉 ..... 97

12-3-2 等厚干涉 ..... 101

12-3-3 迈克耳孙干涉仪 ..... 104

12-4 光的衍射 ..... 105

12-4-1 光的衍射现象 ..... 106

12-4-2 惠更斯-菲涅耳原理 ..... 106

12-4-3 夫琅禾费单缝衍射 ..... 107

★ 12-4-4 单缝衍射的光强分布 ..... 110

12-4-5 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领 ..... 111

12-4-6 平面衍射光栅 ..... 113

12-4-7 光栅衍射光谱的光强分布 ..... 115

12-4-8 X 射线衍射 ..... 117

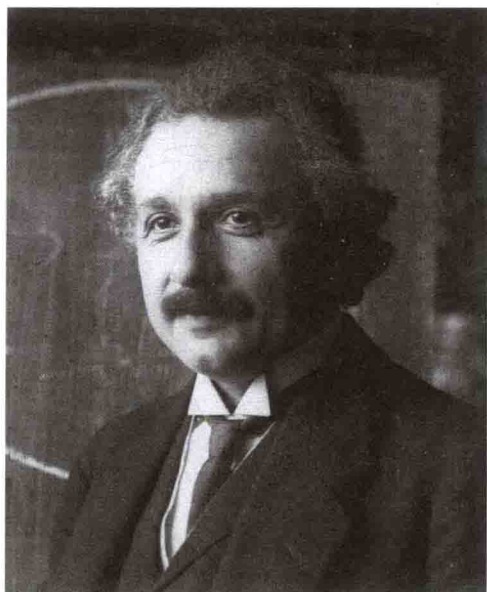
12-5 光的偏振 ..... 119

12-5-1 自然光与偏振光 ..... 119

★ 11-5 光学仪器 ..... 81

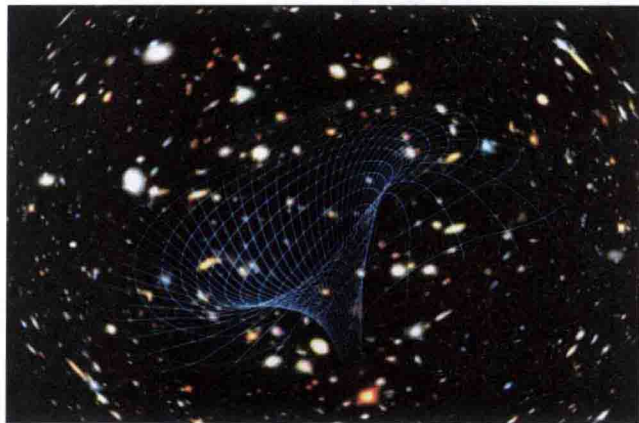


12-5-2 偏振片 马吕斯定律 .....	120	13-6-1 相对论质量与动量 .....	147
12-5-3 反射光和折射光的偏振性 .....	121	13-6-2 相对论动力学的基本方程 .....	148
12-6 光的双折射 .....	123	13-6-3 相对论能量 .....	148
12-6-1 光在晶体中的双折射 .....	123		
★12-6-2 椭圆偏振光和圆偏振光 波片 .....	124		
★12-6-3 偏振光的干涉 .....	126		
★12-6-4 光弹效应与旋光现象 .....	127		



## 第13章 狭义相对论 133

13-1 基于绝对时空的力学理论 .....	134
13-1-1 牛顿的绝对时空观 .....	134
13-1-2 伽利略变换 经典力学相对性原理 .....	134
13-1-3 迈克耳孙-莫雷实验 .....	135
13-2 狭义相对论基本原理与时空的相对性 .....	137
13-2-1 狭义相对论基本原理 .....	137
13-2-2 时空的相对性 .....	137
13-3 洛伦兹变换 .....	141
13-3-1 洛伦兹变换 .....	141
13-3-2 相对论速度变换 .....	143
13-4 光的多普勒效应 .....	144
13-5 相对论与电磁特性 .....	146
13-6 相对论动力学 .....	147

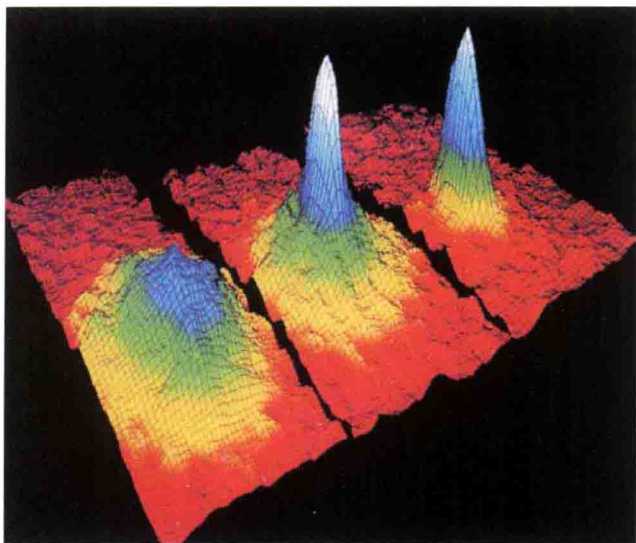


## ★第14章 广义相对论 155

14-1 广义相对论基本原理 .....	156
14-1-1 等效原理与局域惯性系 .....	156
14-1-2 广义相对性原理 .....	157
14-2 弯曲的时空 .....	158
14-2-1 弯曲的时空 .....	158
14-2-2 引力场中的时空特性 .....	158
14-2-3 场方程 .....	160
14-3 广义相对论的实验验证 .....	161
14-3-1 光线在引力场中弯曲 .....	161
14-3-2 水星近日点的进动 .....	162
14-3-3 引力红移 .....	162
14-4 黑洞 .....	163
14-4-1 黑洞 .....	163
14-4-2 探索黑洞 .....	165

## 第15章 量子物理 167

15-1 黑体辐射和普朗克能量量子假设 .....	168
15-1-1 黑体辐射 .....	168
15-1-2 普朗克公式 普朗克量子假设 .....	170
15-2 光电效应 爱因斯坦光量子理论 .....	172
15-2-1 光电效应 .....	172
15-2-2 爱因斯坦光量子理论 .....	174
15-2-3 光的波粒二象性 .....	175



15-9-2	三个量子数 角动量量子化	203
15-9-3	氢原子中电子的概率分布	204
15-10	电子的磁矩 原子的壳层结构	206
15-10-1	电子的轨道磁矩	206
15-10-2	电子的自旋	207
15-10-3	原子的壳层结构	209
15-11	激光	212
15-11-1	光的吸收和辐射	212
15-11-2	粒子数反转	213
15-11-3	光学谐振腔	214
15-11-4	激光的特性	215

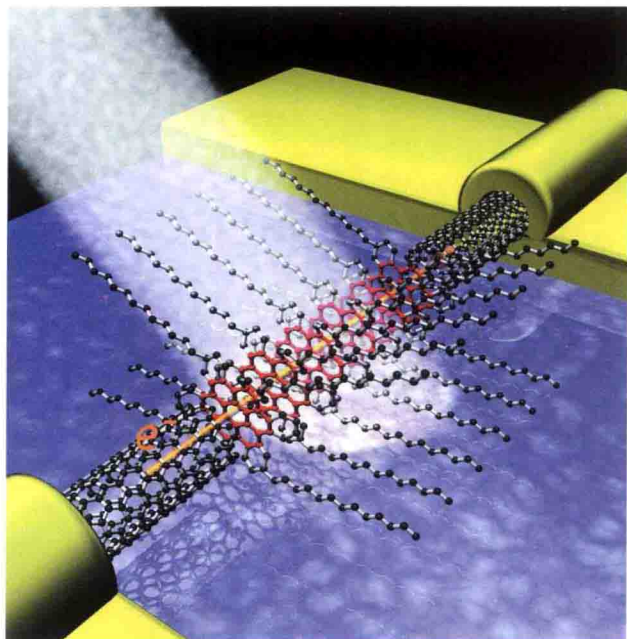
15-3	康普顿效应	177
15-3-1	康普顿效应的实验规律	177
15-3-2	康普顿效应的量子解释	178
15-4	氢原子光谱和玻尔理论	180
15-4-1	氢原子光谱	180
15-4-2	原子的经典模型	181
15-4-3	玻尔的氢原子理论	182
15-5	粒子的波动性	185
15-5-1	德布罗意波	185
15-5-2	物质波实验验证	186
15-6	德布罗意波的统计诠释	
	不确定关系	188
15-6-1	德布罗意波的统计诠释	188
15-6-2	不确定关系	189
15-7	波函数 薛定谔方程	191
15-7-1	波函数	192
15-7-2	薛定谔方程的一般形式	193
15-7-3	一维定态不含时薛定谔方程	195
15-8	一维定态问题	195
15-8-1	一维无限深势阱	196
15-8-2	一维势垒 隧道效应	197
15-8-3	扫描隧道显微镜	200
15-8-4	一维谐振子	200
15-9	氢原子结构	202
15-9-1	氢原子的薛定谔方程	202



## 第 16 章 原子核物理 219

16-1	原子核的基本性质	220
16-1-1	原子核的构成	220
16-1-2	核的自旋和磁矩	221
16-2	原子核的结合能 核力	222
16-2-1	原子核的结合能	222
16-2-2	核力	223
16-3	原子核的稳定性和放射性	225
16-3-1	原子核的稳定性	225
16-3-2	放射性	226
16-3-3	放射性衰变规律 半衰期	228
16-3-4	放射性辐射的生物效应	230
16-4	原子核裂变和聚变	232
16-4-1	原子核裂变	232
16-4-2	原子核聚变	234
16-4-3	热核聚变的几种约束	235





**第 17 章 粒子物理简介 237**

17-1 基本粒子 ..... 238

17-1-1 基本粒子——一个历史的概念 ..... 238

17-1-2 粒子的相互作用 ..... 239

17-1-3 粒子的分类 ..... 240

17-2 守恒定律 ..... 241

17-2-1 重子数和轻子数 ..... 242

17-2-2 同位旋  $I$  和同位旋分量  $I_z$  ..... 242

17-2-3 奇异数 ..... 242

17-2-4 正反共轭和宇称 ..... 243

17-3 夸克 标准模型 ..... 244

17-3-1 夸克模型 ..... 245

17-3-2 标准模型 ..... 246

**第 18 章 固体物理简介 249**

18-1 晶体的结构 ..... 250

18-1-1 晶体 ..... 250

18-1-2 几种常见的晶体结构 ..... 250

18-2 晶体的结合类型与能带 ..... 251

18-2-1 结合力与晶体分类 ..... 251

18-2-2 能带 ..... 252

18-3 金属的自由电子模型 ..... 254

18-3-1 电子的态密度 ..... 254

18-3-2 费米-狄拉克分布 ..... 255

18-4 半导体 ..... 257

18-4-1 半导体的结构与特性 ..... 257

18-4-2 pn 结 ..... 258

18-4-3 半导体器件 ..... 259

**附录 263**

附录 1 基本物理常量 ..... 263

附录 2 国际单位制 ..... 264

附录 3 地球和太阳的一些常用数据 ..... 266

**习题答案 267**

**参考文献 271**



在汽车长时间的高速运动中,车轮的温度会升高,从而引起轮胎中的气体膨胀.这往往会导致车胎爆裂,引发交通事故.这就是一种热现象.

## 第 9 章

# 热力学基础

# 热

学(heat)是物理学的一个重要组成部分,是专门研究热现象的规律及其应用的一门学科,它起源于人类对冷热现象的探索.不言而喻,人类生存在四季交替、气候变幻的自然界中,冷热现象是人们最早观察和认识的自然现象之一.

生活经验告诉我们,当温度达到  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上时,水将发生汽化,当温度降低到  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下时,水将凝结成冰块;登山运动员在高山上烧煮食物必须使用高压锅,否则得到的必然是一锅“夹生饭”;夏日,当我们驾驶着汽车在高速公路上奔驰时,切记车胎中的气体不能充得太足,以免在行驶过程中由于温度升高而发生车胎爆裂.诸如此类的现象,都与物体的冷热程度有关,我们把它们称为**热现象**(thermal phenomenon).

对于热现象及其规律的研究可以有两种截然不同的方法,一是**热力学**(thermodynamics),二是**统计物理学**(statistical physics).热力学是一门宏观理论,它是根据观察和实验,总结出宏观热现象所遵循的基本规律,然后运用严密的逻辑推理方法,来研究宏观物体的热性质的.统计物理学则是一门微观理论,它是从物质内部的微观结构出发,即从组成物质的大量分子、原子的运动以及它们之间的相互作用出发,运用统计的方法来探讨宏观物体的热性质.由于热力学理论以观察和实验为基础,因此它具有较高的准确性和可靠性,可以用来验证微观理论的正确性.但是它没有涉及热现象的本质,对于所得的结果往往是知其然而不知其所以然.统计物理学则能深入热现象的本质,从分子热运动出发找出宏观观测量的微观决定因素,从而弥补了热力学的缺陷.热力学和统计物理学在对热现象的研究上是相辅相成的,正如美国物理学家托尔曼所说:“用较为抽象的统计力学对热力学作出了完满的解释,这是物理学的最大成就之一.”本章我们将从热力学理论出发,来探讨宏观热现象.



## 9-1 热力学的基本概念

### 9-1-1 热力学系统



图 9-1 读出氧气瓶上的压力表读数,再根据瓶上标注的氧气瓶容积以及当时的温度,可以估算出氧气的用量

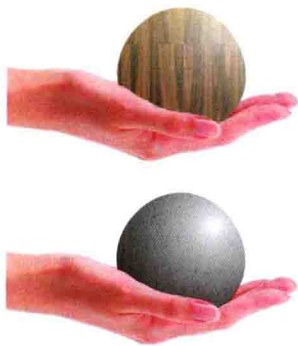


图 9-2 用手托一个铁球与托一个木球,感觉到铁球比木球冷,实际上铁球和木球具有相同的温度

热力学研究一切与热现象有关的问题,其对象可以是固体、液体和气体,本章仅就气体的热力学性质进行讨论.这些由大量分子、原子组成的宏观物质,在热力学中称为**热力学系统**(thermodynamic system),简称**系统**.与系统发生相互作用的外部环境物质称为**外界**(surroundings).如果一个热力学系统与外界不发生任何能量和物质的交换,则被称为**孤立系统**(isolated system);与外界只有能量交换而没有物质交换的系统称为**封闭系统**(closed system);与外界同时发生能量交换和物质交换的系统称为**开放系统**(open system).

描述热力学系统状态的物理量称为**状态参量**(state parameter).在力学中为了描述质点的运动状态,我们曾引入了位置矢量、速度等物理量,但是现在我们所要描述的是由大量气体分子构成的宏观热力学系统,从本质上讲,系统的一切宏观热现象与构成系统的大量分子作杂乱无章的运动有关,因此这种大量分子无序的运动称为**分子热运动**(thermal motion).参与热运动的分子数量巨大,我们不可能去追踪每一个分子的运动状态.每个分子所具有的质量、速度、动量以及能量等物理量都是**微观量**(microscopic quantity).在热力学实验中,我们通常不可能对微观量进行直接观察和测量.宏观实验中所能获得的只是气体的**体积**(volume)、**压强**(pressure)和**温度**(temperature)等状态参量,这些都称为**宏观量**(macroscopic quantity).比如,医用氧气钢瓶上往往贴有表示钢瓶容积的标签,并在出口处装有压力表,如图 9-1 所示.压力表上的读数、钢瓶的容积以及当时氧气的温度,反映了氧气的某一个状态.在使用氧气以后,氧气的状态参量要发生变化,根据这一变化,可以估算出氧气的用量.

气体的体积一般用  $V$  表示,它是指气体分子运动时所能够到达的空间.而容器的容积则是气体分子的活动空间与分子本身占有的体积之和,两者不能混为一谈.一般在压强不太高、温度不太低的情况下,可以近似用容积来代表体积.在国际单位制中,体积的单位为**立方米**( $\text{m}^3$ ),其他常用单位有升(L),换算关系为  $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$ .

气体的压强一般用  $p$  表示,其宏观定义是:气体作用在容器壁单位面积上指向器壁的垂直作用力.在国际单位制中,压强的单位为**帕斯卡**,简称**帕**(Pa), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ .过去还常用**标准大气压**(atm)、**约定毫米汞柱**(mmHg)作压强的单位,其换算关系如下:

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mmHg}$$



温度是热力学中的一个非常重要和特殊的状态参量,它最初的概念基于人们对冷热程度的感觉,但是这种感觉往往是不准确的.例如,在冬天里,用手触摸一个铁球或一个木球,如图 9-2 所示,我们会明显感觉到铁球要比木球冷;反之,在夏日里则会感觉到铁球比木球热.但实际上它们具有相同的温度.其中的原因在于两种物质的导热本领不同,铁的散热效果优于木头.由此看来不能仅仅凭借人们对冷热的主观感觉来定义温度.以下我们将对温度给出科学的定义.

人们都有这样的经验,如果将一杯热咖啡放在一盆冷水中,不久杯中的咖啡将逐渐变冷,与此同时盆中的水将逐渐变热,最终两者的冷热程度趋于一致.不难发现,如果两者与外界没有热量交换,则它们的冷热程度将不会再发生变化.这时,我们称咖啡与水达到了**热平衡**(thermal equilibrium).

现在再来做一个实验,将系统 A 和系统 B 分别与热源 C 接触,经过足够长的时间后, A 和 B 分别与 C 达到了热平衡,如图 9-3(a)所示.然后再将 A 和 B 接触,这时我们观察不到 A 和 B 的状态发生任何变化,如图 9-3(b)所示,这表明 A 与 B 也已处于热平衡.这一实验规律称为**热力学第零定律**,表述为**如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡,则这两个系统彼此也必处于热平衡**.热力学第零定律表明:处在同一热平衡状态的所有热力学系统都具有一个共同的宏观特征,描述这一宏观特征的状态参量被定义为**温度**.因此**温度是表征系统热平衡时宏观状态的物理量**.

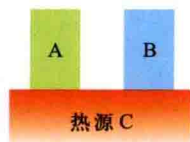
热力学第零定律的重要性不仅在于它给出了温度的定义,而且在于它指出了温度的测量方法.但是要定量地描述温度,还必须给出温度的数值表示法——**温标**(thermometric scale).同一温度在不同的温标中具有不同的数值.在日常生活中常用的一种温标是**摄氏温标**,用  $t$  表示,其单位为**摄氏度**( $^{\circ}\text{C}$ ),人们将水的冰点定义为摄氏温标的  $0^{\circ}\text{C}$ ,水的沸点定义为摄氏温标的  $100^{\circ}\text{C}$ ,并将冰点温度和沸点温度之差的 1% 规定为  $1^{\circ}\text{C}$ .在科学技术领域中,常用的是另一种温标,称为**热力学温标**<sup>①</sup>(thermodynamic scale of temperature),也叫**开尔文温标**,用  $T$  表示,它在国际单位制中的名称为**开尔文**,简称**开**(K).

热力学温标的刻度单位与摄氏温标相同,它们之间的换算关系为

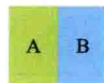
$$T/\text{K} = 273.15 + t/^{\circ}\text{C} \quad (9-1)$$

温度没有上限,却有下限.温度的下限是热力学温标的绝对零度.温度可以无限接近于  $0\text{K}$ ,但永远不能达到  $0\text{K}$ .目前实验室能够达到的最低温度为  $2.4 \times 10^{-11}\text{K}$ .表 9-1 列出了一些典型的温度值.

① 比较常用的另一种温标是理想气体温标.理想气体温标基于一个实验事实,即通常情况下一定量的气体在体积不变的条件下,压强与温度成正比.在实验中,我们可以测出理想气体的压强-温度线,如图 9-4 所示.该直线与温度坐标轴交于一点,交点的温度值为  $-273.15^{\circ}\text{C}$ ,我们以  $-273.15^{\circ}\text{C}$  作为理想气体温标的零点(后也被定为热力学温标的零点).定义摄氏温标时用了两个参考点,水的冰点( $0^{\circ}\text{C}$ )和水的沸点( $100^{\circ}\text{C}$ );而定义热力学温标时只需要一个参考点.在第 13 届国际计量大会上,将水的三相点(气态、液态、固态共存时的状态)温度定义为  $273.16\text{K}$ (在摄氏温标中对应的温度是  $0.01^{\circ}\text{C}$ ),作为热力学温标的参考点,如图 9-5 所示.



(a) 系统 A 和系统 B 分别与热源 C 接触,且分别与 C 达到热平衡



(b) 分别与热源 C 达到热平衡的两个热力学系统 A 和 B 相互之间也必处于热平衡

图 9-3

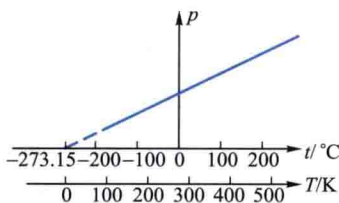


图 9-4 热力学温标与摄氏温标之间的换算关系

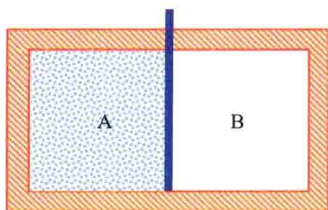


图 9-5 水的三相点,即冰、水、水蒸气同时存在且达到平衡状态时的热力学温度定义为  $273.16\text{K}$

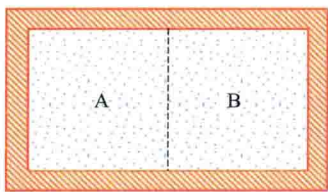
表 9-1 一些典型温度值

大爆炸后的宇宙温度	$10^{39}$ K
实验室能够达到的最高温度	$10^8$ K
太阳中心的温度	$1.5 \times 10^7$ K
太阳表面的温度*	6 000 K
地球中心的温度	4 000 K
水的三相点的温度	273.16 K
微波背景辐射温度	2.5 K
实验室能够达到的最低温度(激光制冷)	$2.4 \times 10^{-11}$ K

\* 太阳由于辐射而不断地耗失能量,可是其状态变化甚慢,可以认为处于热平衡状态。



(a) A 室充满某种气体并处在平衡态, B 室为真空



(b) 抽取隔板后, A 室气体向 B 室扩散, 最后达到新的平衡态

图 9-6

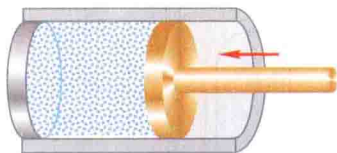


图 9-7 当活塞沿缸壁非常缓慢地移动时, 气缸内的气体系统的变化过程为准静态过程

## 9-1-2 平衡态 准静态过程

体积、压强和温度是描述气体宏观性质的三个状态参量. 对于一个孤立系统而言, 如果其宏观性质在经过充分长的时间后保持不变, 也就是系统的状态参量不再随时间改变, 则此时系统所处的状态称为平衡态 (equilibrium state), 人们通常用  $p-V$  图上的一个点来具体地表示一个平衡态. 而不满足上述条件的系统状态称为非平衡态 (nonequilibrium state). 比如, 有一密闭孤立容器, 中间用一隔板隔开, 将其分成 A、B 两室, 其中 A 室充满某种气体, B 室为真空; 如图 9-6(a) 所示. 最初 A 室气体处在平衡态, 其宏观性质不随时间变化, 然后将隔板抽去, A 室气体向 B 室扩散. 由于气体在扩散过程中, 其状态参量没有确定的值, 因此过程中的每一中间态都是非平衡态. 随着时间的推移, 气体充满了整个容器, 扩散停止. 此时系统的宏观性质不再随时间变化, 系统达到了新的平衡态, 如图 9-6(b) 所示.

注意: 如果系统与外界有能量交换, 即使系统的宏观性质不随时间变化, 也不能断定系统是否处于平衡态. 比如, 将铁棒的一端与高温热源相接触, 另一端与低温热源相接触, 在经过足够长的时间后, 铁棒上每一点的宏观性质不会随时间变化, 但由于铁棒不是孤立系统, 因此这不是平衡态.

平衡态是一个理想概念, 因为任何一个系统不可能不受到外界的影响, 所以状态参量严格地不随时间变化是不可能的.

当热力学系统受到外界的影响而发生能量或物质的交换时, 其状态会发生变化. 例如, 我们对自行车轮胎充气时, 通过外界做功把空气压入车胎. 如果把车胎中的气体作为一个热力学系统, 此过程中既有能量的交换, 又有质量的交换, 气体的压强将增加, 温度会升高, 体积也会增大, 系统的状态参量发生了变化. 我们把系统状态发生变化的整个历程称为热力学过程, 简称过程. 在系统状态发生变化的过程中, 其每一个中间状态不可能再是平衡态. 但是, 如果过程进行得无限缓慢, 过程中的每个中间状态都无限接近于平衡态, 这样的过程被称为准静态过程 (quasi-static process). 准静态过程可以在  $p-V$  图上用一条曲线表示, 曲线上的每一点具有确定的  $p, V$  值, 对应于过程中的一个平衡态. 如果系统状态变化的过程非常快, 中间的每一个状态无法趋于平衡, 这样的过程则被称为非静态过程. 非静态过程无法在  $p-V$  图上用曲线表示, 因为每一个中间态没有确定的状态参量值. 如图 9-7 所示, 气缸内充有一定量的气体. 当活塞缓慢地移动时, 气体在过程中的每一个中间态都可以近似为平衡态, 所以可以把它近似为一个准静态过程. 反之, 如果我们快速地移动活塞, 使系统的体积迅速变小, 则气缸中气体分子分布不均匀, 靠近活塞部分的分子数密度较大, 压强也较大, 远离活塞部分的分子数密度较小, 压强也较小, 因此无法用状态参量描述整个系统的状态, 这样, 过程中的状态为非平衡态, 过程为非静态过程. 事实上, 除了一些极快的过程 (如爆炸) 外, 大多数情况下都可以把实际过程近似为准静态过程来处理.



### 9-1-3 理想气体物态方程

当质量一定的气体处于平衡态时,其三个状态参量  $p$ 、 $V$ 、 $T$  并不相互独立,而是存在一定的关系,其表达式称为气体的物态方程(equation of state),一般可表示为

$$f(p, V, T) = 0 \quad (9-2)$$

对于比较复杂的系统,状态参量之间的关系虽然找不到相应的简单表达形式,但常可以根据实验数据,用曲线或图表加以描述.

在中学物理中,我们已经知道,一定量的气体在温度不太低、压强不太大的条件下,一般遵守玻意耳(R. Boyle, 1627—1691)定律、盖吕萨克(L. J. Gay-Lussac, 1778—1850)定律和查理(J. A. C. Charles, 1746—1823)定律. 我们把同时严格服从这三个定律的气体称为理想气体,这是理想气体的宏观定义,其微观定义将在下一章介绍. 综合上述三个实验定律,可以得到描述理想气体的状态参量  $p$ 、 $V$ 、 $T$  三者之间关系的物态方程:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (9-3)$$

上式主要用来描述一定量的理想气体在封闭系统内两个不同状态之间的关系. 使用时,要注意温度的单位必须用 K,并统一压强和体积的单位.

根据阿伏伽德罗定律,一定量的理想气体在相同温度和压强下,具有相同的体积. 当温度为 273.15 K,压强为  $1.013 \times 10^5$  Pa 时,1 mol 任何理想气体的体积,即摩尔体积均为  $V_m = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ,如图 9-8 所示. 气体处于  $T_0 = 273.15 \text{ K}$ ,  $p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$  时的状态称为标准状态(standard state). 设质量为  $m$ ,摩尔质量为  $M$  的理想气体从状态  $(p, V, T)$  经一系列变化过程到达标准状态  $(p_0, V_0, T_0)$ ,根据式(9-3)有

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

令  $R = p_0 V_m / T_0$ ,则有

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (9-4)$$

式中  $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,称为摩尔气体常量(molar gas constant). 式(9-4)称为理想气体的物态方程.

设某种理想气体的分子质量为  $m_0$ ,分子数为  $N$ ,并以  $N_A$  表示阿伏伽德罗常量( $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ). 则气体质量  $m = Nm_0$ ,气体的摩尔质量  $M = N_A m_0$ ,代入式(9-4)可得

$$p = \frac{m}{M} \frac{RT}{V} = \frac{Nm_0}{N_A m_0} \frac{RT}{V} = \frac{N}{V} \frac{R}{N_A} T$$

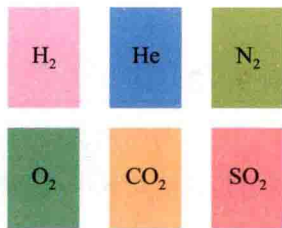


图 9-8 1 mol 任何理想气体在标准状态下的体积均为 22.4 L



令  $k = R/N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ , 称为玻耳兹曼常量 (Boltzmann constant), 并称  $n$  ( $n = N/V$ ) 为分子数密度, 则有

$$p = nkT \quad (9-5)$$

式(9-5)是理想气体物态方程的另一种表示形式. 式(9-5)多用于计算气体的分子数密度, 以及与它相关的其他物理量. 比如, 在标准状态下  $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $T_0 = 273 \text{ K}$ , 将它们代入式(9-5)可以得到标准状态下理想气体的分子数密度为  $2.69 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ . 这个量称为洛施密特常量 (Loschmidt constant).

### 例 9-1

计算喷气发动机推力时, 需要知道每秒从喷口喷出多少气体. 设喷气发动机喷口的截面积  $S = 0.5 \text{ m}^2$ , 高温气流喷射速度  $v = 500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 喷出的气体主要是空气, 空气的摩尔质量  $M = 2.89 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 测出喷口处压强  $p = 1.18 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 温度  $T = 873 \text{ K}$ , 求每秒喷出多少气体.

**解** 每秒喷出气体的体积为  $V' = \frac{V}{t} = Sv$ , 由理想气体物态方程(9-4), 可算得每秒喷出气体的质量

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

$$\begin{aligned} &= \frac{1.18 \times 10^5 \times 0.5 \times 500 \times 2.89 \times 10^{-2}}{8.31 \times 873} \text{ kg} \\ &= 1.18 \times 10^2 \text{ kg} \end{aligned}$$

### 例 9-2

一个封闭的圆筒内部被一个导热而不漏气的可移动活塞隔为两部分, 圆筒的横截面积为  $S$ . 开始时, 活塞位于圆筒的中央, 即此时活塞两侧的圆柱长度  $l_1 = l_2$ , 左右两边分别充有  $p_1 = 10^5 \text{ Pa}$ ,  $T_1 = 680 \text{ K}$  和  $p_2 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $T_2 = 280 \text{ K}$  的相同气体, 问平衡时活塞在什么位置 ( $l'_1/l'_2$  为多少)?

**解** 设初始时刻, 活塞左右两侧的体积分别为  $V_1$  和  $V_2$ , 平衡时左边气体的状态参量为  $p'_1$ 、 $T'_1$ 、 $V'_1$ , 右边气体的状态参量为  $p'_2$ 、 $T'_2$ 、 $V'_2$ ; 左右两部分气体的质量不变, 分别用理想气体物态方程(9-3):

$$\frac{p'_1 V'_1}{T'_1} = \frac{p_1 V_1}{T_1}$$

$$\frac{p'_2 V'_2}{T'_2} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

因为  $V_1 = l_1 S$ ,  $V_2 = l_2 S$ ,  $V'_1 = l'_1 S$ ,  $V'_2 = l'_2 S$ , 可得

$$p'_1 = \frac{p_1 l_1 S T'_1}{T_1 l'_1 S}$$

$$p'_2 = \frac{p_2 l_2 S T'_2}{T_2 l'_2 S}$$

平衡时  $p'_1 = p'_2$ , 即

$$\frac{p_1 l_1 T'_1}{T_1 l'_1} = \frac{p_2 l_2 T'_2}{T_2 l'_2}$$

根据题意有  $l_1 = l_2$ ,  $T'_1 = T'_2$ , 代入上式得

$$\begin{aligned} \frac{l'_1}{l'_2} &= \frac{p_2 T_2}{p_1 T_1} \\ &= \frac{10^5 \times 280}{2 \times 10^5 \times 680} = 0.206 \end{aligned}$$

## 9-2 热力学第一定律

### 9-2-1 改变系统内能的两条途径 热功当量

能量可以有多种形式,力学中有动能、势能,电磁学中有电场能量、磁场能量.就一个热力学系统而言,由于内部大量分子不停息的无序运动以及分子之间的相互作用,因此也具有能量,我们把系统内分子热运动的动能和分子之间的相互作用势能之总和称为系统的内能(internal energy).内能的大小取决于系统的状态,就一般气体而言,其内能是状态参量温度  $T$  和体积  $V$  的函数,可表示为  $E=f(T, V)$ ,这是因为分子热运动的动能宏观上表现为气体具有一定的温度(理论分析将在下一章中讨论);分子的相互作用势能取决于分子之间的距离,显然势能的总和与气体的体积有关.在压强不太高,温度不太低的情况下,一般气体的性质近似于理想气体,气体分子之间的距离较大,分子之间的作用力可以忽略,因此可以不考虑分子的相互作用势能.这就是说,理想气体的内能只与分子热运动的动能有关,是温度的单值函数,可表示为  $E=f(T)$ .

改变系统的内能可以有两种不同的方法.例如在冬天里,当我们的两只手被冻得有点僵硬时,可以搓一下手,如图 9-9 所示,或者把手放在火炉边.两种方法都可以提高手的温度.从能量守恒和转化的角度分析,前者是通过做功的方式将机械能转化为手的内能;后者则是直接通过能量传递的方式使手的内能增加.当两个温度不同的系统相接触时,能量会自发地由高温系统向低温系统传递,致使较热的系统变冷,较冷的系统变热,最后达到热平衡而具有相同的温度.这种系统之间由于热相互作用而传递的能量称为热量(heat),用  $Q$  表示.

应该注意,功和热量都是过程量,而内能是状态量,通过做功或传递热量都可以使系统的内能发生变化,因此就内能的改变而言,对系统做功与向系统传递热量是等效的.

焦耳在他的《论热功当量》一文中,介绍了一个测定热功当量的实验.如图 9-10 所示,在一个绝热的注满水的容器中装上一个带有旋转叶片的搅拌器,用两个下坠的重物带动叶片旋转.如果两重物的质量均为  $m$ ,那么重物下降  $h$ ,对系统所做的机械功为  $2mgh$ .机械功转化为水的内能,使水温升高,相当于水吸收了热量  $Q$ .过去习惯上用卡(cal)来表示热量.焦耳实验给出了功和热量之间单位的换算关系,称为热功当量(mechanical equivalent of heat),用  $J$  表示,  $J=2mgh/Q=4.16\text{ J}\cdot\text{cal}^{-1}$ ,现在公认的当量值为

$$J=4.18\text{ J}\cdot\text{cal}^{-1}$$



图 9-9 搓手的时候,通过克服摩擦力做功,把机械能转化为手的内能,从而使手的温度升高

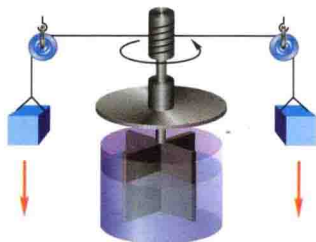


图 9-10 焦耳用于测定热功当量的实验装置



焦耳当时的热功当量实验值与现在的测量值  $4.18 \text{ J} \cdot \text{cal}^{-1}$  相比较只差  $0.02 \text{ J} \cdot \text{cal}^{-1}$ , 误差仅为  $0.5\%$ . 在 19 世纪中叶, 焦耳的实验精度竟有如此之高, 足见他对科学实验工作的严谨态度.

必须指出, 现在已经把热量的国际单位制单位统一用“焦耳”(J)表示.

## 9-2-2 热力学第一定律的数学描述

力学中的功能原理反映了功与机械能之间的关系. 但在热力学中, 我们并不关注系统作为一个整体的宏观机械运动, 而是考虑系统内部由于分子热运动所表现出来的宏观热现象. 包括热现象在内的能量守恒与转化的规律称为热力学第一定律, 其数学表达形式为

$$Q = \Delta E + W \quad (9-6)$$

其中的  $Q$  和  $W$  分别表示在状态变化过程中系统与外界交换的热量以及系统对外界所做的功,  $\Delta E$  表示内能的增量. 式中的三个物理量都有相应的符号规定: 当系统吸热时  $Q$  取正 ( $Q > 0$ ), 系统放热时  $Q$  取负 ( $Q < 0$ ); 系统对外做功时  $W$  取正 ( $W > 0$ ), 外界对系统做功时  $W$  取负 ( $W < 0$ ); 系统的内能增加时  $\Delta E$  取正 ( $\Delta E > 0$ ), 系统的内能减少时  $\Delta E$  取负 ( $\Delta E < 0$ ).

式(9-6)表明, 系统从外界吸收的热量, 一部分用于增加自身的内能, 另一部分用于对外界做功, 在状态变化过程中遵从能量守恒与转化规律. 热力学第一定律不仅适用于气体, 而且适用于液体和固体. 在运用热力学第一定律的公式时, 要注意统一式中各物理量的单位, 一般采用国际单位制单位焦耳(J). 热力学第一定律的适用条件为: 初、末两个状态为平衡态, 定律不仅适用于准静态过程, 而且适用于非静态过程. 对微小过程而言, 可将热力学第一定律的表达式改写成

$$dQ = dE + dW \quad (9-7)$$

使用上式时, 要求系统所经历的过程必须是准静态过程.

历史上, 曾经有人试图制造一种机器, 它可以不需要外界提供能量, 但可以连续不断地对外做功. 这种机器称为**第一类永动机**, 显然这是违反热力学第一定律的. 因此热力学第一定律又可以表述为: **不可能制造出第一类永动机**. 图 9-11 是历史上曾经有过的一架第一类永动机的模型.

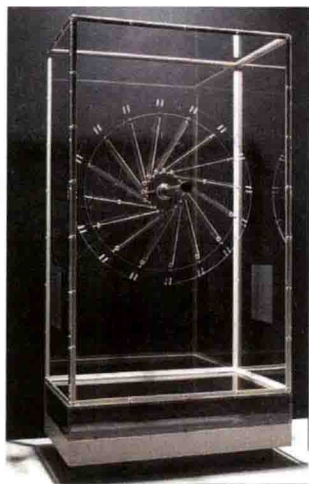


图 9-11 历史上曾经有过的“第一类永动机”模型. 设计者试图利用左右两侧摆锤产生力矩的不平衡使轮子转动, 以达到永动目的. 请读者分析: 系统是否真的能始终处在不平衡状态呢?

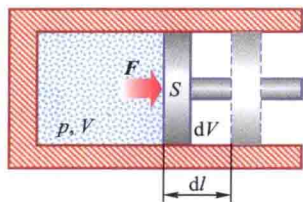


图 9-12 准静态过程中活塞移动微小距离, 系统所做的元功为  $pSdl$

## 9-2-3 准静态过程中的热量、功和内能

### 1. 准静态过程中的功

如图 9-12 所示, 一带有活塞的气缸, 将气缸内的气体作为热力学系统, 并