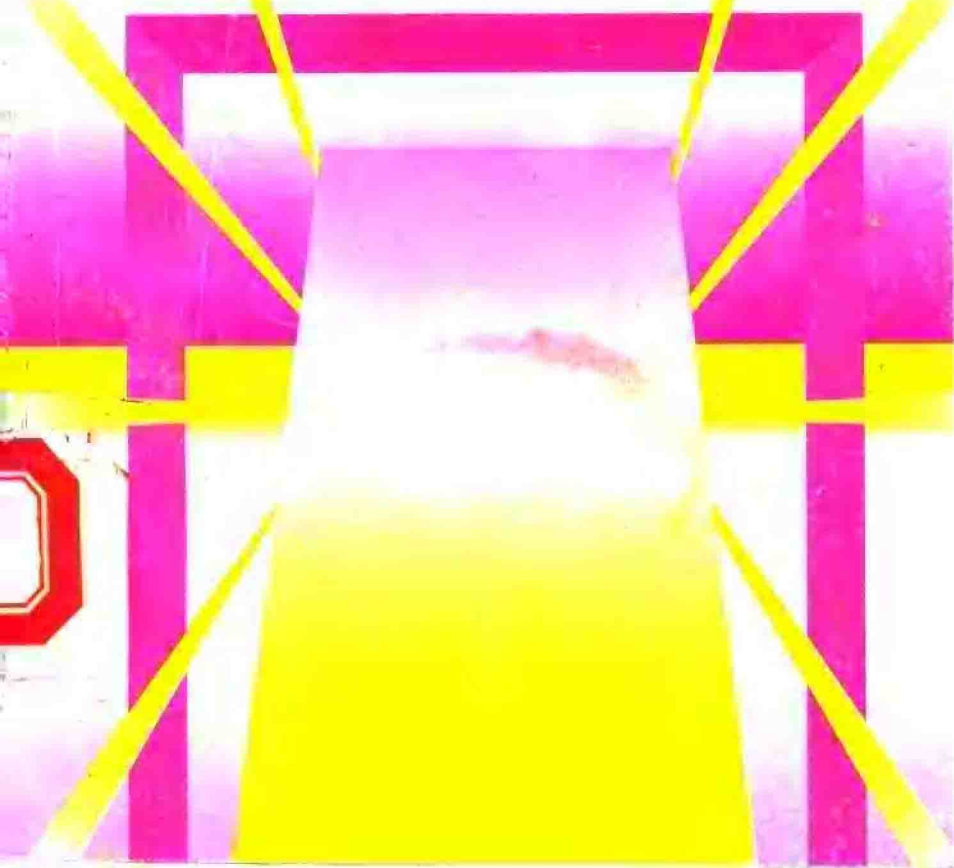


大学物理教程

# 热 学

许崇桂 编著

G F G Y G B S



# 大学物理教程

## 热 学

许崇桂 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程:热学/许崇桂编著. —北京:国防工业出版社, 1997. 3

ISBN 7-118-01618-7

I. 大… II. 许… III. ①物理学-高等学校-教材②热力学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 06807 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/32 印张 8 5/8 186 千字

1997 年 3 月第 1 版 1997 年 3 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:9.20 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 总 序

本书是根据国家教委高等学校物理学教学指导委员会应用物理学教材规划,结合作者多年来的教学实践编写的。按照各学校的实际情况和教材规划的要求,本教程的内容和深度介于物理系普通物理和工科普通物理之间。这一选择是为了使本教程能够适合应用物理专业,以及其他偏理的专业如技术物理、核物理、电子技术物理、材料科学、工程化学、生物科学等的需要。

本书注重对物理基本原理和概念的阐述,在注意严密性的同时,强调了借用现象、图象、比喻和实例来说明问题的本质,使内容更为丰富、更具有吸引力。本书力求能够反映 20 世纪 90 年代物理学的面貌以及人们对物质世界的认识水平。在叙述方法上力求由简到繁、由表及里、富于启发、便于阅读,以利于引导读者积极思考和分析问题。

根据我们的教学经验,全书主要内容可用 180 学时讲完(加 \* 号章节为选学内容)。本书作者曾多次研讨了全书的内容、结构和叙述方法,但为了方便读者,仍以分册出版,包括力学、热学、电磁学、光学和原子物理学五个分册,它们既构成一个整体,又具有相对独立性,可以单独选用。

国家教委高等学校物理学教学指导委员会应用物理学教材建设组对本书进行了初审和复审,提出了极为宝贵的意见和建议。国防工业出版社的同志对本书的出版给予了热情的

支持和帮助,作者在此一并向他们表示衷心的感谢。

浙江大学李文铸教授主编了本教程,清华大学、北京工业大学、北京科技大学的几位教授担负了具体的编写工作。第一册《力学》由许崇桂、李铨编写,第二册《热学》由许崇桂编写,第三册《电磁学》由李铨编写,第四册《光学》由蔡峰怡编写,第五册《原子物理学》由史斌星编写。

在编写本书各册时,都参考了若干已有的教材和其他书籍,从中得到启发与教益。这些书籍无论在内容选择和安排,或对问题的分析、讨论,以及在插图、例题、习题等许多方面,都有各自的优点,其中有些方面无疑是值得借鉴和吸收的。这里难于一一指出,在此一并致谢。

作 者

# 前 言

本书是《大学物理教程》热学分册。

热学是物理学的一个分支,研究热现象的规律及应用。

热现象所涉及的范围极为广泛。例如物体的热胀冷缩,物质的气态、液态、固态之间的转变,某些物质在温度降低到一定数值时出现超导电性,铁磁物质在温度升高到一定数值时转变为顺磁物质,等等。这些与物体温度有关的现象,都属于热现象。

从微观上看,物体由大量分子构成。例如 1mol 物质(32g 的氧,18g 的水,64g 的铜等)所包含的分子数约为  $6 \times 10^{23}$ 。这大量的分子都在永不停息地作不规则运动。这种运动叫做热运动。热现象是物质中大量分子热运动的集体表现。热学的任务就是研究物质中大量分子热运动的规律以及它对物质性质的影响。

由于研究方法的不同,热学可分为热力学和统计物理学。热力学由观察和实验总结出热现象的基本定律,并以这些定律为基础研究各种物质系统的热现象。它不考虑物质的分子结构,是热现象的宏观理论。统计物理学则从物质的微观结构出发,应用力学规律和统计方法研究热现象的本质,给物质性质以微观解释,是热现象的微观理论。

本书作为大学物理的热学部分,对热力学只介绍一些最基本的概念和规律,对统计物理学只介绍其中的分子运动论

(又叫分子物理学)。在本书的讨论中,我们尽可能把宏观观点与微观观点结合起来,以便对热现象获得比较深入的理解。同时,为了适应科技发展的要求,我们加强了对熵和统计分布这两个基本概念的讨论,并尝试介绍了超流动性、超导电性、从无序到有序的转变、耗散结构、混沌等内容。

高等工业学校应用物理教材委员会的专家们审阅了本书初稿,特别是陈纲、刘书声和赵松林三位教授详细审阅了本书的全部手稿,提出了许多宝贵意见和建议,谨此向他们表示衷心感谢。

许崇桂

## 常用物理常数

|          |                                               |
|----------|-----------------------------------------------|
| 真空中光速    | $c=2.998\times 10^8\text{m/s}$                |
| 普朗克常数    | $h=6.626\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ |
| 玻耳兹曼常数   | $k=1.38\times 10^{-23}\text{J/K}$             |
| 阿佛加德罗常数  | $N_A=6.023\times 10^{23}/\text{mol}$          |
| 气体常数     | $R=8.314\text{J/mol}\cdot\text{K}$            |
| 1 卡的定义   | $1\text{cal}=4.1855\text{J}$                  |
| 1 标准大气压  | $1\text{atm}=1.013\times 10^5\text{Pa}$       |
| 电子静质量    | $m_e=9.109\times 10^{-31}\text{kg}$           |
| 质子静质量    | $m_p=1.673\times 10^{-27}\text{kg}$           |
| 1 电子伏特能量 | $1\text{eV}=1.602\times 10^{-19}\text{J}$     |

## 内 容 简 介

本书是《大学物理教程》第二册,介绍热力学第一定律、热力学第二定律和气体分子运动论。在阐述中尽可能把宏观观点和微观观点结合起来,以便对热现象获得比较深入的理解。同时为了适应科技发展的要求,加强了对统计分布和熵这两个基本概念的讨论,并尝试介绍了超流动性,超导电性、从无序到有序的转变、耗散结构、混沌等新内容。

本书适合大学低年级学生,大中学教师及自学者阅读参考。

# 目 录

|       |                      |    |
|-------|----------------------|----|
| 第一章   | 温度 .....             | 1  |
| § 1.1 | 宏观描述与微观描述 .....      | 1  |
| § 1.2 | 平衡态 状态方程 .....       | 3  |
| § 1.3 | 热力学第零定律 温度 .....     | 8  |
| § 1.4 | 理想气体温标 .....         | 11 |
| § 1.5 | 热膨胀 热应力 .....        | 18 |
| 习题    | .....                | 21 |
| 第二章   | 热力学第一定律 .....        | 25 |
| § 2.1 | 功与热量 .....           | 25 |
| § 2.2 | 热力学第一定律 内能 .....     | 28 |
| § 2.3 | 准静态过程 功的表示式 .....    | 31 |
| § 2.4 | 热容量 .....            | 38 |
| § 2.5 | 气体的内能 焦耳-汤姆逊实验 ..... | 41 |
| § 2.6 | 理想气体热容量和内能表示式 .....  | 45 |
| § 2.7 | 理想气体的绝热过程 .....      | 52 |
| § 2.8 | 循环过程 卡诺循环 .....      | 56 |
| § 2.9 | 致冷机和热泵 .....         | 65 |
| 习题    | .....                | 68 |
| 第三章   | 分子运动论 .....          | 78 |
| § 3.1 | 分子运动论的基本概念 .....     | 78 |
| § 3.2 | 理想气体的压强 .....        | 83 |
| § 3.3 | 温度的微观解释 .....        | 88 |

|                                 |                         |     |
|---------------------------------|-------------------------|-----|
| § 3.4                           | 能量均分定理 .....            | 92  |
| § 3.5                           | 实际气体的等温线 .....          | 99  |
| § 3.6                           | 范德瓦尔斯方程 .....           | 103 |
| § 3.7                           | 相变 过饱和蒸汽 过热液体 .....     | 110 |
| § 3.8                           | 平均碰撞频率和平均自由程 .....      | 114 |
| § 3.9                           | 气体内的输运过程 .....          | 119 |
| 习题 .....                        |                         | 129 |
| <b>第四章 统计分布</b> .....           |                         | 134 |
| § 4.1                           | 统计规律性的基本概念 .....        | 134 |
| § 4.2                           | 气体分子的速率分布概念 .....       | 139 |
| § 4.3                           | 麦克斯韦速率分布律 .....         | 143 |
| § 4.4                           | 麦克斯韦速度分布律 .....         | 151 |
| § 4.5                           | 重力场中气体分子按高度的分布 .....    | 156 |
| * § 4.6                         | 蒸发 热电子发射 .....          | 159 |
| * § 4.7                         | 玻耳兹曼分布 .....            | 163 |
| 本章附录 .....                      |                         | 166 |
| 习题 .....                        |                         | 167 |
| <b>第五章 热力学第二定律 熵</b> .....      |                         | 172 |
| § 5.1                           | 热力学第二定律 .....           | 172 |
| § 5.2                           | 过程的方向性 .....            | 177 |
| § 5.3                           | 可逆过程与不可逆过程 .....        | 181 |
| § 5.4                           | 熵 .....                 | 184 |
| § 5.5                           | 熵增加原理 .....             | 193 |
| § 5.6                           | 温熵图 .....               | 198 |
| § 5.7                           | 熵与无序性 .....             | 202 |
| * § 5.8                         | 无序到有序 耗散结构 自组织 .....    | 209 |
| * § 5.9                         | 卡诺定理 热力学温标 克劳修斯公式 ..... | 216 |
| 习题 .....                        |                         | 225 |
| <b>第六章 低温物理现象 热力学第三定律</b> ..... |                         | 229 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| § 6.1 低温的获得 .....   | 229 |
| § 6.2 超流动性 .....    | 238 |
| § 6.3 超导电性 .....    | 246 |
| § 6.4 热力学第三定律 ..... | 255 |
| 习题答案 .....          | 259 |
| 常用物理常数 .....        | 264 |

# 第一章 温 度

我们知道,为了描述力学现象,可以用长度、时间和质量三个基本物理量,力学中其他所有物理量都可用这三个基本量来表示。然而研究表明,为了描述热现象,除了这三个量之外,还需要增添第四个基本物理量,这就是温度。作为研究热现象的开始,本章讨论如何描述热学系统的平衡态,讨论温度的概念和测量。

## § 1.1 宏观描述与微观描述

在研究物理现象时,我们通常把注意力集中于物质的某一部分,并设想将这一部分物质和它周围的物质隔离开来。人们通常把这一部分物质叫做系统。在系统之外,与系统的行为直接有关的一切物质叫做外界或环境。例如,对于图 1.1.1 中气缸内的气体,为了研究它的压强、体积和温度的变化,就可以选这气体为系统,而将与气体的行为直接有关的活塞、气缸壁和大气视为外界。

在选定系统之后,就要选用适当的物理量来描述系统的行为以及它与外界的相互作用。例如对于气缸内的气体,如果推动活塞或给气体加热,则气体的压强  $p$ 、体积  $V$  和温度  $T$  将发生变化。因此,可以用  $p$ 、 $V$ 、 $T$  这三个物理量来描述气体的行为。又例如,对于图 1.1.2 中拉紧的钢丝,增加拉力  $F$  可以

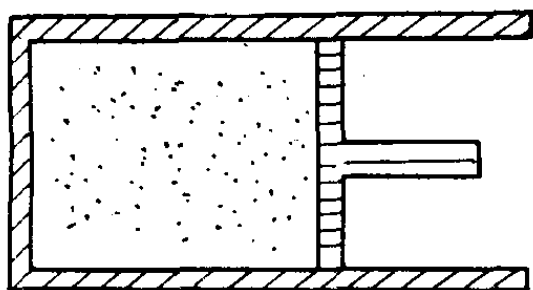


图 1.1.1

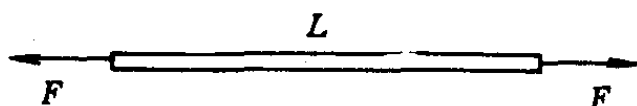


图 1.1.2

使钢丝长度  $L$  发生变化,给钢丝加热可以升高它的温度,从而使钢丝变长。因此,可以用  $F$ 、 $L$ 、 $T$  三个物理量来描述钢丝的行为。从这些例子我们看到,可以选用某些可观测的物理量来描述系统的行为。这些物理量能反映系统的整体性质,并且可以由实验操作来测定。这类物理量称为宏观量,用宏观量描述系统行为的方法叫做宏观描述。

前已指出,热学系统是由大量粒子构成的。从微观上看,即从原子、分子尺度看,宏观描述是不够完整的。例如在气体的压强、体积、温度确定之后,气体分子的行为仍然没有完全被确定,气体中任一分子的位置和速度仍然可以发生变化。为了描述系统中粒子的行为,通常选用粒子的某些物理量,例如粒子的坐标、动量和能量等。这些量称为微观量。用微观量描述系统中所有粒子行为的方法叫做微观描述。

宏观描述与微观描述都可用于描述同一热学系统,两者之间应当有某种联系。研究表明:宏观量是相应微观量的统计平均值。这种联系使我们有可能从微观上理解诸如压强、温度、比热等宏观量。例如,气体作用于容器壁的压强,就是大量气体分子撞击器壁的平均效果。这个问题可以这样来理解:无规则运动的气体分子不断地与器壁相撞,就某一个分子来说,它对器壁的碰撞是断续的。但是对大量分子的集体来说,每一瞬时都有许多分子与器壁相撞,产生对器壁的压力。由于气体

分子很多,各瞬时撞击器壁的效果几乎相同,所以在实验测量上就表现为一个恒定的、持续的压力。这和雨滴打在雨伞上的情形很相似。虽然一个个雨滴打在雨伞上是断续的,大量密集的雨滴打在雨伞上就使我们感受到一个持续向下的压力。

## § 1.2 平衡态 状态方程

热力学的基本问题之一是研究系统处于平衡态的性质。那末,在热力学中什么是平衡态?如何描述它?本节讨论这些问题。

### (一)平衡态

不受外界作用的系统,叫做孤立系统。经验表明,孤立系统经过足够长的时间后总会达到这样一种状态,在其中系统的一切宏观量不再随时间发生变化。这种状态叫做平衡态。例如,对于图 1.1.1 中气缸内的气体,令活塞保持不动,外界不对它做功,也不以别的形式给它传递能量,在这种条件下,气缸内的气体,无论其各部分的初始温度和压强如何,由于分子热运动和相互碰撞,经过足够长的时间后终将达到密度均匀、压强均匀和温度均匀的状态,此即平衡态。此后,它的所有宏观量,包括压强、温度和体积等,将不随时间变化。

既然在平衡态中系统的宏观量不随时间变化,具有确定的量值,那末,反过来就可以选用这些宏观量来描述平衡态。例如,可以选用压强  $p$ 、体积  $V$  和温度  $T$  来描述气体的平衡态,  $(p, V, T)$  的一组值对应气体的一个平衡态。 $p$ 、 $V$ 、 $T$  叫做状态参量。

对于简单的固体和液体,它们的体积随温度而变,也随压强而变。因此,它们的平衡态也可以用  $(p, V, T)$  描述。由于气

体和简单固体与液体的平衡态都可以用三个宏观量( $p, V, T$ )描述,有些书的作者称它们为  $pVT$  系统。

对于磁介质,当它受到磁场作用时,它的总磁矩  $m$  随磁场强度  $H$  而增大,当温度升高时总磁矩会减小。因此,磁介质的平衡态可以用磁场强度  $H$ 、总磁矩  $m$  和温度  $T$  三个宏观量来描述,  $(H, m, T)$  的一组值对应于磁介质的一个平衡态。当然,磁介质还具有体积  $V$  和压强  $p$ ,但根据实验,在恒压下的磁介质,其体积随温度的变化很小,一般可不予考虑。

总之,像以上这些系统的平衡态可以用三个宏观量  $X, Y, T$  描述,它们是热力学中研究得最多的一类系统,通常称为简单系统。对于这类系统,  $(X, Y, T)$  的一组值确定一个平衡态,其中  $T$  是系统的绝对温度,  $X$  和  $Y$  是什么物理量,视具体系统而定。例如,对于气体,  $X$  和  $Y$  是指体积  $V$  和压强  $p$ 。

## (二)状态方程

实验表明,平衡态的各宏观量并非都可以独立变化,它们之间存在一定的关系。例如对于化学纯的理想气体,其压强  $p$ 、体积  $V$  和绝对温度  $T$  之间存在以下关系

$$pV = \nu RT \quad (1.2.1)$$

式中  $\nu$  为气体的摩尔数,  $R$  为气体常数。此关系式称为理想气体状态方程。各种实际气体在压强趋于零的极限情形下都遵从这个方程,在通常压强下此方程近似成立。

一般来说,对于一个简单系统,描述其平衡态的三个宏观量  $X, Y$  和  $T$  之间也存在一定的关系,即

$$f(x, Y, T) = 0$$

此关系式称为该简单系统的状态方程。对于各种不同的物质系统,状态方程的具体形式不同,在热力学中要根据实验来分析确定。例如,人们曾根据玻义耳定律、查理定律和盖·吕萨

克定律等有关气体的实验规律,分析研究得到理想气体状态方程。

由于存在状态方程,简单系统只剩下两个宏观量可以独立变化,第三个量通过状态方程即可确定。因此,可以适当选择两个宏观量作为独立参量,来确定简单系统的平衡态。例如,对于气体,可以选 $(p, V)$ 或 $(p, T)$ 或 $(V, T)$ 作为独立参量来确定其平衡态。

下面应用理想气体状态方程讨论一个例题,为此,我们先对式(1.2.1)中各量的单位加以说明。在SI制中,气体常数 $R$ 为

$$R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

此外,还可以用其他单位表示为

$$R = 0.082 \text{ atm} \cdot \text{l/mol} \cdot \text{K}$$

体积 $V$ 的单位为 $\text{m}^3$ ,此外还有 $\text{cm}^3$ 、l(升)等,并且

$$1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ l} = 10^6 \text{ cm}^3$$

压强 $p$ 的单位为Pa(帕)。此外还有bar(巴),mbar(毫巴), $\mu\text{bar}$ (微巴),atm(大气压),cmHg和mmHg等。单位间的换算关系为

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 10^3 \text{ mbar} = 10^6 \mu\text{bar} = 10^6 \text{ dyn/cm}^2$$

$$1 \text{ cmHg} = 1.333 \times 10^4 \text{ dyn/cm}^2$$

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

$T$ 为绝对温度,单位为K。它与摄氏温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 的关系为

$$t = T - 273.15 \text{ K}$$

**例** 如图1.2.1所示,两容器A、B由一不导热的细管连接,容积分别为4l和2l。开始时,A内装有某种气体,温度为 $27^{\circ}\text{C}$ ,压强为1atm;细管的活塞不通,B容器内为真空。然后将