





热 学 基 础

学 习 指 导 书

王锡绂 王志兴编

东 北 师 范 大

# 前 言

热学的物理学的一个重要组成部分。

通常，热学包括三方面内容：热力学原理；统计物理初阶——分子运动论；物性基本常识（气、液、固及相变等）。热学采用两种相辅相成的研究方法——宏观唯象的方法：它是通过大量的实践总结出基本原理，从而研究热学的基本规律；微观统计的方法：它是依据实践建立物质状态模型，再应用数学统计的方法得到宏观规律，在这里宏观量是微观量的统计平均值。后一种方法，即分子运动论是学生在大学基础课程中首次接触到的物理理论。

多年的实践使我们认识到，学生在热学学习中遇到一些困难，这主要表现在：在中学教学中热学基础知识过于零碎；热学中概念较难理解（如温度——反映体系热平衡的一种性质等）；宏观理论——热力学原理抽象；微观统计理论——分子运动论的模型又不易建立、特别是从模型出发通过数学工具得到宏观规律这种处理方法难于掌握；如此等等，为配合《热学基础》学习，我们编写了本学习指导书。目的在于使学生在热学学习中，明确掌握一些重要概念和基本规律，并通过典型例题的分析帮助学生掌握热学的基本知识，从而提高分析问题，解决问题的能力；配以一定数量的思考题（作为习题课或课后讨论），习题，选做题使学生更好的理解与运用热学基本原理和规律。本指导书分成二大部分：

I. 重要概念、基本规律。

II. 习题及选做题解答。

本书还编入了美国研究生统考(哥伦比亚大学)热学试题及解答,可作为学生综合练习之用。在编写过程中,许多教师提出过宝贵意见,这次复印中,指导书又作了部分修改。限于编者水平,书中错误,缺乏之处敬希教师同仁及同学们指正。

王锡斌 王志兴

1982.元旦. 于长春.

## I、重要概念，基本规律。

## II、习题及选作题解答

※ ※ ※ ※ ※

引 论	.....	2
第一章	热力学第一原理	15
第二章	气体分子运动论（平衡态）	42
第三章	气体分子运动论（非平衡态）	64
第四章	热力学第二原理	82
第五章	热运动在技术科学中的应用	113
第六章	实际气体	128
第七章	固 体	144
第八章	液 体	150
第九章	相变与相平衡	164
第十章	绝对温度与热力学第三原理	175
附	美国研究生统考热学试题及解答	177

# 引 论

- 什么是热学，它的研究方法以及它在技术科学中的应用
- 原子和分子
- 热运动与热平衡态
- 温度与温标

※ ※ ※ ※ ※

## 热学及其研究方法

热学是研究热运动规律的科学。

热学有两个相辅相成的研究方法：热力学方法；分子运动论（统计）的方法。

热力学方法是从大量的实践中归纳出几条普遍性的基本规律——所谓热力学原理，再依据热力学原理研究各种各样热过程的规律。

分子运动论是从简化模型出发描述大量分子的混乱运动，它依据统计平均值找出对应的宏观测定值，并把这些实验测定的物理量（如温度、压强等）解释为分子的集体效应。

## 热运动

热运动是物质基本运动形式之一，它是指组成宏观物体的大量微粒（原子、分子等）的混乱运动；就单个微粒而言，其运动状态具有偶然性，但大量微粒的混乱运动却有确定的规律（必然性），这种规律就是统计规律。

体 系  
与  
环 境

在热学中把所研究的物质部分明确称为体系（或系统）；把其余的部分称为外界或环境。物质是由大量微粒（原子、分子等）组成，粒子间存在相互作用，由此构成热运动的宏观规律，这是热学的基本观点。

平 衡 态

在没有外界影响（做功或传热）的条件下，体系的各部分长时间不发生变化的状态称为平衡态。在热学中，体系处于平衡态，构成体系的大量微粒仍处在混乱运动中，因此这种平衡是热动平衡。

热 平 衡

我们将主要研究体系的热动平衡态，因为体系处在热平衡态才可以用状态参量（此时它有确定值）来描述，体系由非平衡态向平衡态的过渡（迁移现象）只作少许研究。

如果一个体系的各部分或二个体系乃至几个体系，它们之间相互作用（如传热），最后达到一个共同的平衡态，则称体系的各部分或二个乃至几个体系处在热平衡。

热 力 学  
第 零 原 理

二个体系分别与第三个体系热平衡，则此二体系也必热平衡，这就是热力学第零原理。此原理进一步告诉我们，一切互为热平衡的体系都具有相同的温度，因此热力学第零原理亦是测温原理。

温 度

温度通常所谓冷热程度的反映。温度的本质：从宏观上看，它是体系热平衡的一种性质（一切热平衡的体系温度都相同）；从微观上看，温度是组成体系的大量分子混乱运动激烈程度



温 标

的反映，是由分子平均动能大小决定的物理量。温度的数值表示法称为温标。它可分为：

i) 经验温标——如摄氏温标、华氏温标、列氏温标和理想气体温标等；

ii) 理论温标——即热力学温标，它是以水的三相点定义为  $273.16\text{K}$  作为标准，其单位为开尔文 (K) (即 1 开尔文为水的三相点温度的  $1/273.16$ )；热力学温标是不依赖于测温物质的绝对温标。

iii) 国际实用温标——国际温标是 1927 年采用的，目的是为了克服由气体温度计实现热力学温标的困难以及统一当时存在的国家温标 (各国制定的温度基准)。于 1948 年、1960 年、1968 年、1975 年分别对国际温标作了修正，现在正式采用的是“国际实用温标——1968 (75 年修正版)”，代号为 IPTS-68。它包括三方面内容：

a) 给出各国定点的指定温度值——除水的三相点定义为  $273.16\text{K}$ ，还有 12 个不同物质平衡态的指定温度；

b) 给出各温度范围所使用的标准计温仪器；

c) 规定与标准计温仪器相应的计温插补公式；  
我国宣布于 1971 年 1 月 1 日起正式采用 IPTS-68 计温。

摄氏温标与热力学温标的关系 (1954 年第十届国际计量大会决定) 为：

$$t = T - 273.15$$

各温标的关系

摄氏温度的单位——摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) 与热力学温度的单位——开尔文 (K) 相同，因此在表示温差或温度变化时，摄氏温度与热力学温度具有同样的数值。

华氏温标与摄氏温标的关系为：

$$t_F = 32 + \frac{9}{5} t_C$$

列氏温标与摄氏温标的关系为：

$$t_R = \frac{4}{5} t_C$$

华氏温标与列氏温标的关系为：

$$t_F = 32 + \frac{9}{4} t_R$$

## 引论 《习题解答》

1. (1) 根据方程

$$t_x = \frac{t_{100}}{l_{100} - l_0} \cdot l_x - \frac{t_{100} \cdot l_0}{l_{100} - l_0}$$

$$\begin{aligned} l_x &= \frac{(l_{100} - l_0) \cdot t_x + t_{100} \cdot l_0}{t_{100}} \\ &= \frac{(26 - 1) \times 20}{100} + 1 \text{ cm} = 6 \text{ cm} \end{aligned}$$

(2) 根据题意:

$$t_x = \frac{(l_x - l_0) \cdot t_{100}}{l_{100} - l_0} = \frac{(24 - 1) \times 100}{(26 - 1)} = 92^\circ \text{C}$$

2. 由于  $t_A$  和  $t_B$  的关系由方程  $t_A = l + mt_B + nt_B^2$

根据已知所给的条件可得两方程

$$\begin{cases} 2500n + 50m = 51 \\ 10000n + 100m = 100 \end{cases}$$

解得

$$n = -\frac{1}{2500}, \quad m = \frac{26}{25}, \quad l = 0$$

把解得  $m$ , 和  $n$  代入方程可得

$$t_A = 25.75^\circ \text{C}$$

3. (1) 气体的温度与压强的线性关系

$$t = a + bp$$

冰点时:  $0 = a + bp_i$

汽点时:  $100 = a + bp_s$

解得  $a = -\frac{100P_i}{P_s - P_i}$ ,  $b = \frac{100}{P_s - P_i}$

把已知数代入可得  $a = -\frac{10^5}{366}$ ,  $b = \frac{100}{366}$

所以  $t = -\frac{10^5}{366} + \frac{10^2}{366} P$

或  $t = 273 \left( \frac{P}{1000} - 1 \right)$

(2) 当  $P = 1074 \text{ mmHg}$  时

$t = 20.22^\circ\text{C}$

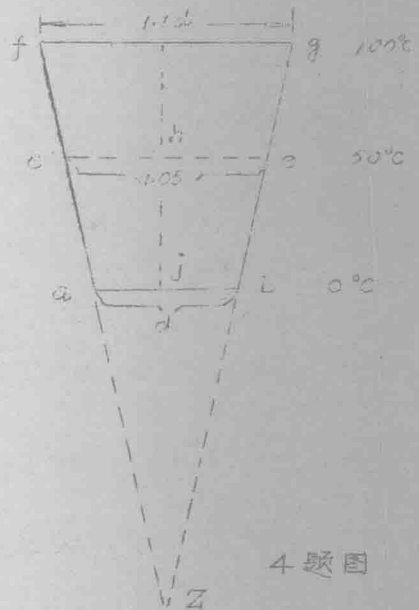
4. 圆锥形温度计如 4 题图所示,

$f_a$  与  $g_b$  相交于  $Z$ , 因此

$$\frac{Zj}{jb} = \frac{Zh}{he}$$

则  $\frac{Zj}{0.5d} = \frac{Zj + 50^\circ\text{C}}{0.525d}$

所以  $Zj = 2000^\circ\text{C}$



$$\frac{V_{aceb}}{V_{afgb}} = \frac{VZ_{ce} - VZ_{ab}}{VZ_{fg} - VZ_{ab}}$$

$$= \frac{\sqrt{3}\pi(0.525d)^2 \times (2000 + 50) - \sqrt{3}\pi(0.5d)^2 \times 2000}{\sqrt{3}\pi(0.55d)^2 \times (2000 + 100) - \sqrt{3}\pi(0.5d)^2 \times 2000}$$

$$= \frac{0.525^2 \times 2050 - 0.5^2 \times 2000}{0.55^2 \times 2100 - 0.5^2 \times 2000} = 0.48$$

对于直管温度计, 由  $V_{aceb}$  与  $V_{afgb}$  之比可知, 在圆

• 8 •

直管温度计是  $50^{\circ}\text{C}$  时，水银的体积是总体积的百分之 48，故对直管温度计而言，指示为  $48^{\circ}\text{C}$ 。

5. 已知下列数据

$P_3$	100	200	300	400	500	600
$P_x$	175.2	351.0	527.4	704.1	882.0	1060.2

$$\text{由 } T_x = 273.16 \text{ K } \frac{P_x}{P_3} < V\text{-定} >$$

$$T_1 = 273.16 \text{ K } \frac{175.2}{100} = 478.6 \text{ K}$$

$$T_2 = 273.16 \text{ K } \frac{351.0}{200} = 479.4 \text{ K}$$

$$T_3 = 273.16 \text{ K } \frac{527.4}{300} = 480.2 \text{ K}$$

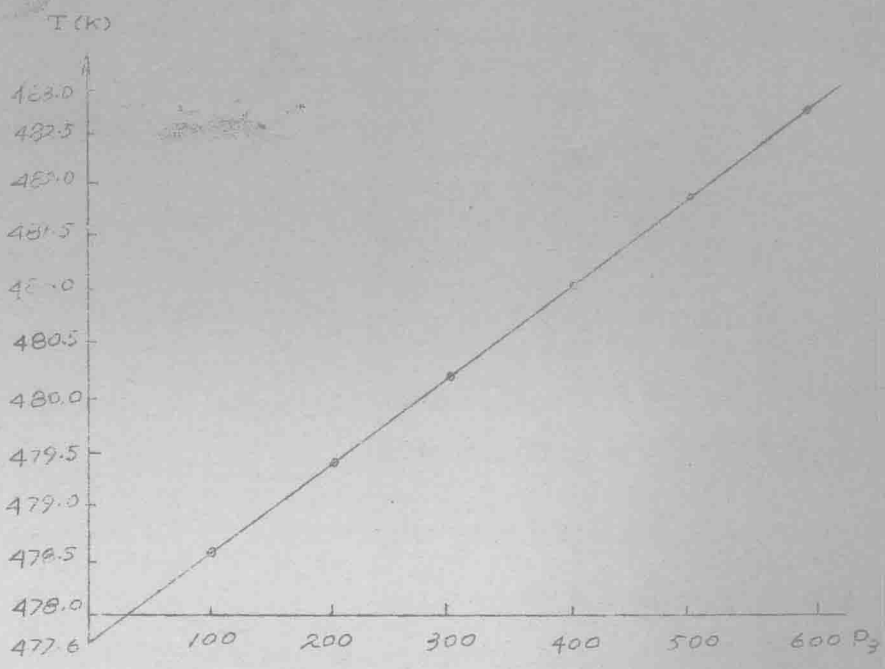
$$T_4 = 273.16 \text{ K } \frac{704.4}{400} = 481.0 \text{ K}$$

$$T_5 = 273.16 \text{ K } \frac{882.0}{500} = 481.9 \text{ K}$$

$$T_6 = 273.16 \text{ K } \frac{1060.2}{600} = 482.7 \text{ K}$$

将各  $T$  值及对应的  $P_3$  画一图，如 5 题图所示。

由 5 题图可知，当  $P_3 \rightarrow 0$  时，得到温度  $T = 477.6 \text{ K}$ 。



5 题图

由 5 题图可知，当  $P_3 \rightarrow 0$  时，得到温度  $T = 477.6 \text{ K}$

6. 根据题意  $P_3 = 4.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ ,  $t = 100^\circ\text{C}$

$$P_{100} = 5.4 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$T = 273.16 \text{ K} \frac{P}{P_3} = 273.16 \frac{5.4 \times 10^4}{4.0 \times 10^4} \text{ K} = 368.77 \text{ K}$$

根据温标定义  $\Delta T = \Delta t$

所以当  $t = 0^\circ\text{C}$  时,  $T = 268.77 \text{ K}$

当  $T = 0$  时,  $t = -268.77^\circ\text{C}$

绝对温度在摄氏温标上表示为  $-268.77^\circ\text{C}$

7. 设  $G$  为放大率,  $T_c$  为温度, 放大率和温度的关系

$$G = \alpha + \beta T_c$$

根据已知条件  $G_1, G_2, T_c$  可以解出

$$\alpha = 25.5^\circ\text{C}^{-1} \quad \beta = 0.18^\circ\text{C}^{-1}$$

因此当  $T_c = 30^\circ\text{C}$  时,  $G = 30.9$  则放大率为 30.9

8. 设一种温标读数为  $y$ , 另一种温标读数为  $x$

$$y = a + bx$$

(1) 先推列氏温标与摄氏温标的关系

$y_F$  为华氏温度  $x_C$  为摄氏温度

当水在冰点时,  $y_F = 32^\circ\text{F}$ ,  $x_C = 0^\circ\text{C}$

汽点时,  $y_F = 212^\circ\text{F}$ ,  $x_C = 100^\circ\text{C}$

根据以上条件可解得  $a = 32$ ,  $b = \frac{9}{5}$

华氏温标与摄氏温标的关系

$$y_F = 32 + \frac{9}{5} x_C$$

(2) 列氏温标与摄氏温标

当水在冰点时  $y_R = 0^\circ\text{R}$ ,  $x_C = 0^\circ\text{C}$

汽点时  $y_R = 80^\circ\text{R}$ ,  $x_C = 100^\circ\text{C}$

根据以上条件可解得  $a = 0$ ,  $b = \frac{4}{5}$

列氏温标与摄氏温标的关系

$$y_R = \frac{4}{5} x_C$$

(3) 华氏温标与列氏温标

从以上两关系式中, 可得出

$$x_C = \frac{5}{4} y_R$$

$$y_F = 32 + \frac{9}{5} x_C$$

把  $x_C = \frac{5}{4} y_R$  代入  $y_F$  得出

$$y_F = 32 + \frac{9}{4} y_R$$

(4) 当  $y_R = 1^\circ\text{R}$  时,  $x_C = \frac{5}{4} = 1.25^\circ\text{C}$

$$Y_F = 32 + \frac{9}{4} = 34.25^\circ\text{F}$$

9. (1) 已知  $Y_F$  与  $Y_R$  之间、 $Y_F$  与  $X_C$  之间的关系为：

$$Y_F = 32 + \frac{9}{4} Y_R$$

$$Y_F = 32 + \frac{9}{5} X_C$$

当  $Y_F = 60^\circ\text{F}$  时，

$$Y_R = 12.4^\circ\text{R}, \quad X_C = 15.5^\circ\text{C}$$

(2)  $Y_F = 32 + \frac{9}{5} X_C,$

$$Y_R = \frac{4}{5} X_C.$$

当  $X_C = 50^\circ\text{C}$  时，

$$Y_F = 122^\circ\text{F} \quad Y_R = 40^\circ\text{R}.$$

(3)  $Y_R = \frac{4}{5} X_C,$

$$Y_F = 32 + \frac{9}{5} Y_R.$$

当  $Y_R = -30^\circ\text{R}$  时  $X_C = -37.5^\circ\text{C}, Y_F = -35.5^\circ\text{F}.$

10. 根据已知条件  $B_t = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2)$

又设铂电阻与其所示温度的线性关系为：

$$R_t = R_0 (1 + a \theta_R).$$

则有  $1 + a \theta_R = 1 + \alpha t + \beta t^2$

当  $t = 0^\circ\text{C}, \theta_R = 0^\circ\text{C}; t = 100^\circ\text{C}, \theta_R = 100^\circ\text{C}.$

代入上式可求得

$$a = 0.0032^\circ\text{C}^{-1}$$

故当  $t = 70^\circ\text{C}$  时，



$$\theta_R = \frac{\alpha t + \beta t^2}{a}$$

$$= \frac{3.5 \times 10^{-3} \times 70 - 3.0 \times 10^{-6} \times 70^2}{0.0032} \text{ } ^\circ\text{C} = 72^\circ\text{C}$$

### 《 选 作 题 解 》

1. 由题设，当定压温度计的温标  $\theta$  与物质体积具有线性关系时，可有

$$\theta = \frac{V - V_0}{V_{\text{汽}} - V_0} (\theta_{100} - \theta_0)$$

将该物质的物态方程代入上式，则得

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{V_0 (1 + at + bt^2) - V_0}{V_0 (1 + at_{\text{汽}} + bt_{\text{汽}}^2) - V_0} (\theta_{100} - \theta_0) \\ &= \frac{at + bt^2}{at_{\text{汽}} + bt_{\text{汽}}^2} \times 100 \\ &= \frac{at + bt^2}{a + 100b^2} \end{aligned}$$

2 (1) 由题可知

$$PV - bp = C$$

其中  $C$  只是温度的函数，且尚未定标，故可令其温度为  $\theta$ ，

则有

$$PV - bp = \theta$$

对冰点和汽点有

$$\begin{cases} P_{\text{汽}} V_{\text{汽}} - bP_{\text{汽}} = \theta_{\text{汽}} \\ P_{\text{冰}} V_{\text{冰}} - bP_{\text{冰}} = \theta_{\text{冰}} \end{cases}$$

在定容的情况下，由线性关系可有

$$\theta = \frac{\theta - \theta_{\text{冰}}}{\theta_{\text{汽}} - \theta_{\text{冰}}} \times 100$$