

660214

# 普通物理学

## 第二分册：热 学 学 习 指 导 书

★ 刘昌年 胡一飞



★ 高等教育出版社

★ GAODENG JIAOYU CHUBANSHE

《普通物理学(第二分册:热学)》

# 学 习 指 导 书

刘昌年 胡一飞 合编

高等教育出版社

## 内 容 简 介

本书是配合使用师专及中学教师培训教材——梁绍荣等主编的《普通物理学(第二分册:热学)》而编写的。其目的是根据师专、卫星电视教育、函授教育和成人业余自学的特点,指导学员学好本门课程。

本书是按教材结构和教学要求分章编写的。每章包括基本要求、重点难点分析、例题和自我检查题等部分,书末附有自我检查题的答案,可供读者参考。

本书是通过中国教育电视参加中学教师培训的物理专业学员必备的辅助教材,也是函授院校学员和自学者使用本教材时的重要参考书,亦可供师专和教育学院的师生以及其他读者参考。

## 《普通物理学(第二分册:热学)》 学 习 指 导 书

刘昌年 胡一飞 合编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

开本850×1168 1/32 印张5.75 字数140 000

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数0001—18 200

ISBN 7-04-000800-9/O·311

定价 1.30 元

## 前 言

本书编写的宗旨是：根据师专、教育学院和培训初中物理教师的需要，指导读者学习《普通物理学》第二分册《热学》。为此，以原教育部颁《中学物理教师进修高师普通物理学大纲》为依据，配合教材，逐章提出基本要求和重点难点进行分析；介绍学习方法，指导读者剖析思考题和解答习题。此外，每章末尾还有自我检查题，以帮助读者掌握教材重点和检查学习效果。

希望本书能够给使用本教材的读者提供方便，提高学习质量，也希望对自学、函授的读者有所裨益。

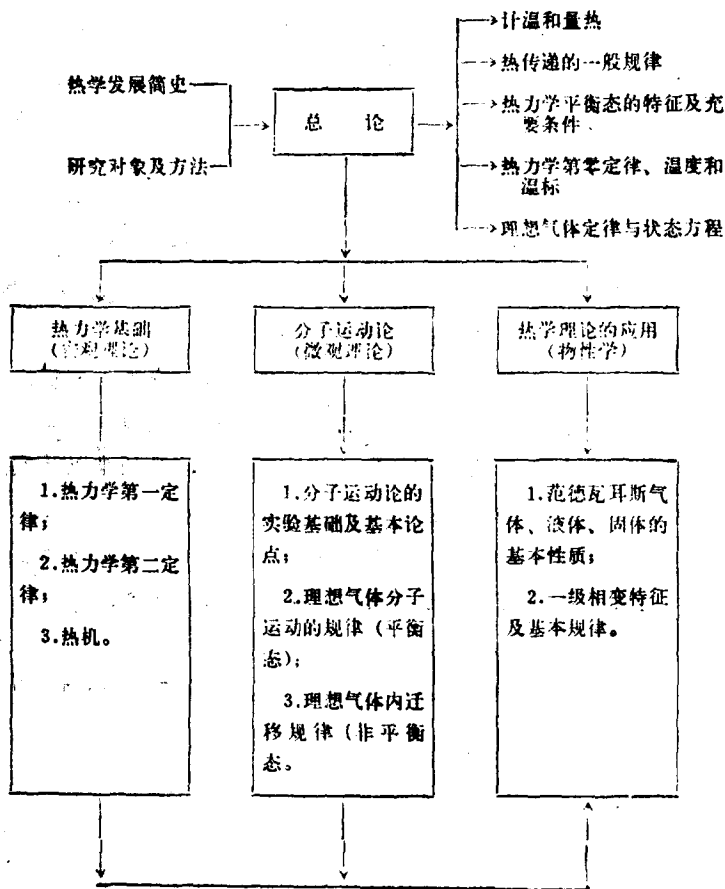
本书第一、八、九、十章的基本要求和重点难点分析，由胡一飞根据刘昌年的初稿整理而成，其余由胡一飞编写。全书由胡一飞统稿。由于编者水平所限，又缺乏经验，恐怕难以达到上述意图。其中疏误，敬请读者和专家批评指教。

承北京师院聂宜如副教授详细地审阅初稿，提出许多宝贵意见，为提高本书质量作出了贡献，谨致衷心的感谢。

编者

一九八七年十月

# 热学内容图析



# 目 录

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 前言 .....              | 1   |
| 热学内容图析 .....          | 2   |
| 第一章 热学总论 .....        | 1   |
| 一 基本要求 .....          | 1   |
| 二 重点和难点分析 .....       | 3   |
| 三 自我检查题 .....         | 23  |
| 第二章 热力学第一定律 .....     | 26  |
| 一 基本要求 .....          | 26  |
| 二 重点和难点分析 .....       | 27  |
| 三 自我检查题 .....         | 52  |
| 第三章 热力学第二定律 .....     | 56  |
| 一 基本要求 .....          | 56  |
| 二 重点和难点分析 .....       | 57  |
| 三 自我检查题 .....         | 71  |
| 第四章 热机 .....          | 74  |
| 一 基本要求 .....          | 74  |
| 二 重点和难点分析 .....       | 74  |
| 第五章 分子运动论基础 .....     | 79  |
| 一 基本要求 .....          | 79  |
| 二 重点和难点分析 .....       | 80  |
| 三 自我检查题 .....         | 94  |
| 第六章 气体分子的统计分布规律 ..... | 96  |
| 一 基本要求 .....          | 96  |
| 二 重点和难点分析 .....       | 97  |
| 三 自我检查题 .....         | 114 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| <b>第七章 气体内的迁移现象</b> ..... | 117 |
| 一 基本要求 .....              | 117 |
| 二 重点和难点分析 .....           | 118 |
| 三 自我检查题 .....             | 120 |
| <b>第八章 实际气体</b> .....     | 122 |
| 一 基本要求 .....              | 122 |
| 二 重点和难点分析 .....           | 123 |
| 三 自我检查题 .....             | 134 |
| <b>第九章 固体和液体的性质</b> ..... | 136 |
| 一 基本要求 .....              | 136 |
| 二 重点和难点分析 .....           | 137 |
| 三 自我检查题 .....             | 151 |
| <b>第十章 相变</b> .....       | 153 |
| 一 基本要求 .....              | 153 |
| 二 重点和难点分析 .....           | 154 |
| 三 自我检查题 .....             | 163 |
| 自我检查题参考答案 .....           | 165 |

# 第一章 热学总论

本章教材内容是在中学物理的基础上加以拓宽和深化。它不仅与中学教学密切联系，而且是今后学习的重要基础。它还充分体现了普通物理学是实验物理学的特点：通过观察和实验的数据，归纳成物理定律，并以此指导实践，进一步修正理论，因而是研究物理学的重要方法。因此，要求读者在学习过程中，重视热学的实验基础，注意实验技能的训练，结合经验事实认识热学中的经验定律的适用范围，同时学会测量物理量的方法，以及热学中常用仪器的使用方法。

总论写得详细通俗，读者通过阅读是容易掌握的。本章内容不少，授课时数不多，阅读时注意把握住要点，现分述如后。

## 一 基本要求

本章内容可分为五个部份：第一部份是热学发展简史，以及热学的研究对象与方法；第二部份是温度的测量，包括经验温标的制订；第三部份是热量的测定与热传递的一般规律；测定热量是热学实验的基础，热传递规律是在测定热量的基础上，归纳日常所见的热现象而获得的重要规律之一；第四部份是阐明热力学系统处于热力学平衡态的特征和充要条件，包括了热力学第零定律和温度的科学定义；第五部份研究简单的热力学系统——理想气体的性质。学习要求分述如下。

1. 明确热学的研究对象，及其所用的两种不同的观点和方法（宏观与微观），了解热运动与机械运动的本质区别和联系；初步了解热学发展简史，明确科学实验在科学发展中的巨大作用。

2. 了解热传递的三种方式及其规律，要求能够熟练地列出热平衡方程，掌握正确的解题方法（这种方法对以后各章的解题都

是有益的)。

3. 了解各种系统 (如孤立系统、封闭系统、开放系统等) 的基本特征, 能正确区分系统和外界; 牢固掌握封闭系统处于热力学平衡态的充要条件。

4. 掌握热力学第零定律的实质和温度的科学涵义, 正确理解温度是决定系统之间处于热平衡的唯一性质, 以及系统处在非平衡态时温度的意义。

5. 熟悉经验温标和理想气体温标的制订方法; 了解定容气体温度计和理想气体温标的关系; 能够熟练地进行华氏温标、摄氏温标和理想气体温标之间的换算, 正确区分温度和温差 (温度间隔), 明白温度单位开尔文 (简称开、代号 K) 的规定方法。

6. 理想气体的宏观性质, 由理想气体状态方程和道尔顿分压定律等给出, 读者必须了解气体定律和状态方程的实验基础, 以及对实际气体的适用范围。

7. 能够正确理解理想气体状态方程和统一的气体定律的物理意义, 并能够熟练地解答理想气体的一般习题。

### 说明

(1) 观察和实验是热学的出发点, 无论是宏观理论, 还是微观理论, 都是在众多的实验事实的基础上, 抽象归纳而成的。因此, 在学习中必须从实验事实出发。由于理论教学和实验教学的分工, 以及考核中的种种原因, 往往使读者忽视实验在学习中的重要作用, 出现物理学理论玄乎、难学的局面。所以, 希望读者在学习中, 务必遵循从实践中来, 回到实践中去的原则, 才能获得良好的学习效果。

(2) 本章内容和头绪都较多, 大体上划分为五部分, 但是重点内容是热力学系统的平衡态性质 (包括热力学第零定律和温标的建立) 和理想气体的性质。

(3) 热力学系统的平衡态, 简称平衡态, 是一个十分

重要的概念，是热学的基础。本教材内容，基本上是阐述平衡态理论，热力学第零定律和温度概念，都是在研究平衡态性质的基础上形成的。弄清这些内容，对今后学习是很有帮助的。

(4) 理想气体温标是一种特殊的经验温标，也是实用温标，在热学中有着特殊的作用，本书特意详加阐述，希望读者能把它作为重点内容学习。

(5) 理想气体是一种理想化模型，在自然界是找不到真正的理想气体的。那么，为什么还要把它作为研究的重点呢？在通常情况下，为什么可以把实际气体看成是理想气体呢？这涉及到如何建立一种物理模型，以及物理模型在物理学中的作用，既是研究方法，也是学习方法，本书中也作了进一步的阐述，希望读者从开始学习时，就注意建立和运用各种物理模型。

## 二 重点和难点分析

温度和热量是热学中特有的两个物理量，测量这两个量就构成热学实验的基础，因此，用温度计测定温度和用量热器测定热量，读者应当予以足够的重视。

任何热现象都是一种物质热运动的表现，选定气体作为热学最初的研究对象是十分合适的，一则是气体内部结构简单，二则是它的热现象非常显著。在瞬息万变的物质世界中，从哪种状态开始研究呢？无疑是平衡状态最简单，易于认识，所以首先要了解平衡态的特征，以及建立与维持平衡态的条件。

综上所述，本章的学习重点应该是温度和热量的测定，理想气体的性质；热力学第零定律以及热力学平衡态与温度的概念。前二项着重实践，后三项着重分析、归纳和理解。通常对理论的认识是比较困难的。

### (一) 热量的测定

《热学》中所讨论的问题，往往都涉及温度和热量。通常由于

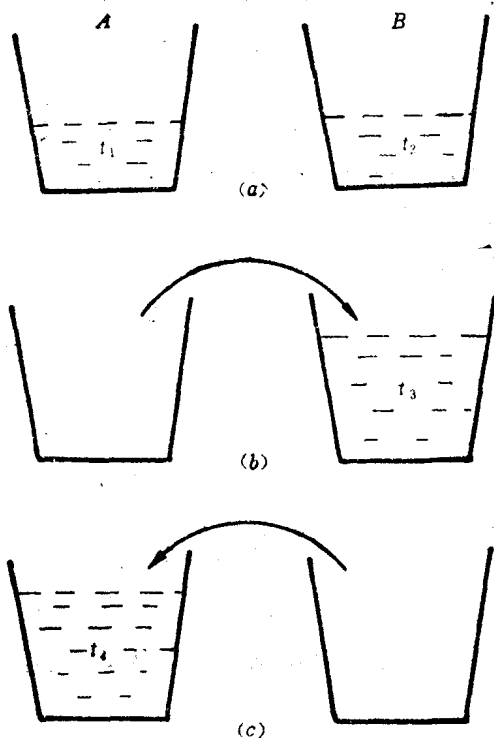


图 2-1-1

测温手续简便，测温工具既简单可靠，又很直观，人们都能测定简单的物质系统的温度，就象会测量长度、质量和时间一样容易。但是，测量热量却比较麻烦，不经过训练是难以获得这种技能的，尽管教科书中常遇到热量、热传递、热容等知识，对于测量热量的要求却很少提及，作为物理教师，训练这种实验技能是十分必要的，应当会正确使用量热器，用混合量热法测定物质的比热容、汽化热和溶解热等。

例 1 两个完全相同的玻璃杯 A 与 B，它们贮有等量的水，

A 中水温  $t_1=15.4^{\circ}\text{C}$ , B 中水温  $t_2=50^{\circ}\text{C}$ , 如图 2-1-1(a).

第一次实验: 将 A 杯中的水倒入 B 杯, 搅匀后迅速测定温度  $t_3=35.0^{\circ}\text{C}$ , 如图 2-1-1 中(b).

第二次实验: 将 B 杯中的水倒入 A 杯, 搅匀后迅速测定温度  $t_4=30.2^{\circ}\text{C}$ , 如图 2-1-1 中(c).

问: (1) 仅由同量的水混合后的温度应为多少?

(2) 为什么两次实验结果不同?

解 (1) 同量的水混合后的温度, 即忽略容器的热容, 则

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2} = 32.7(^{\circ}\text{C})$$

(2) 实际操作过程中, 只考虑到水与容器的热传递, 忽略其它热量损失; 当冷水倒入热水时, 热水和 B 杯同时向冷水传热, 所以温度  $t_3$  为  $35.0^{\circ}\text{C}$ , 略高于不计杯传热时的温度  $t$ . 同理, 热水倒入冷水, 同时向 A 杯和冷水传热使其升温, 故  $t_4$  略低于  $t$ .

假设每杯水为 100 g, 可以算出, 第一次实验 B 杯向水传热约 0.46 k cal, 第二次则 A 杯从水中吸热约 0.5 k cal.

## (二) 关于理想气体

理想气体性质是本章重点内容之一, 教材中已作了详细阐述, 这里强调以下几点, 以帮助读者进一步理解教材.

### 1. 理想气体与实际气体

理想气体是一个理想化的物理模型, 它集中反映了各种实际气体在通常状态下的共同性质, 但又不能真实代表某种实际气体.

建立理想化模型是物理学中经常采用的方法. 在研究客观事物时, 为了能突出地考察其主要因素, 往往需要排除次要因素, 这样, 就要把研究对象的主要性质, 从实际对象中抽象出来, 被抽象出来的对象, 已不再是原来的实际研究对象, 但是, 它可以表现出实际对象中的最主要、最令人感兴趣的性质和变化规律.

理想气体模型的主要作用是：

(1) 能够突出各种实际气体的主要特性，并使所考虑的问题简化，便于进行逻辑推理；

(2) 当实验要求精度不很高时，可以把对理想气体的研究成果，直接用到实际中去。例如，把压强低于两个大气压的实际气体，当作理想气体处理，引起的误差不超过百分之几。

(3) 研究理想气体模型之后，可以将实际对象与它相比，便于更好地了解实际气体的性质。例如用将理想气体与实际气体对比的方法，研究实际气体（参见第八、第十两章），所有实际气体都与理想气体性质相近似，但是，在不同状态下，又都有不同程度的偏离。参阅教材表 2-1-4 至表 2-1-8。

必须认识到，理想气体模型是受实验的检验和制约的。在低压和高温技术都有了新发展之后，随着实验条件的不同，人们对各种气体个性的认识逐步深化，由最简单地区分常见的气体 and 蒸气，进而认识到气体的临界状态等等。认识到在低温及高压条件下，理想气体状态方程不能反映各种实际气体的性质，而且各种气体偏离气体定律的程度也不同。

极度稀薄的任何实际气体，不论其温度高低如何，都十分接近理想气体，也就是说，理想气体是实际气体在压强趋于零时的极限。

## 2. 理想气体的定义

理想气体的定义是，严格遵守  $pV = \nu RT$  的气体。

关于这个定义，说明如下：

(1) 理想气体遵守统一的气体定律

$$\frac{pV}{T} = \text{常数} \quad (2.1.1)$$

或

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3} = \dots \quad (2.1.2)$$

(2.1.1)式可由玻意耳-马略特定律、查理定律、盖·吕萨克定律①中的任意两个定律导出,但是,得到 $pV = \nu RT$ 还必须用到阿伏伽德罗定律,因此,(2.1.1)式或(2.1.2)式不能定义理想气体。

(2) 在理想气体的定义式中, $T$ 应该是热力学温度。但是在得到定义式时,只用到了理想气体温标。因此,在定义式中是理想气体温标 $T$ 时,还得说明这种气体要遵守焦耳定律, $U = U(T)$ 。

在第三章中将证明理想气体温标与热力学温标是一致的。

(3) 理想气体定义式中的 $R$ ,是对任何气体都适用的普适恒量,其值可由阿伏伽德罗定律得到。

**例 2** 有人说:既然发现了任何实际气体都或多或少地偏离玻意耳定律,那么玻意耳定律还有效吗?你怎样认识这一问题?

**解** 从教材中表 2-1-4 列举空气在常温常压时要求三位有效数字,玻意耳定律完全有效。再从教材表 2-1-5 可见在 300 atm 以下,误差在 5% 以内,对于氧气和氮气,玻意耳定律仍然有效。在更大压强下,玻意耳定律与实验结果偏离就大了。

再看比较容易液化的气体二氧化碳(它的临界温度是 $31.1^{\circ}\text{C}$ ,即在 $31.1^{\circ}\text{C}$ 以上无论加多大压强也不会液化)。

| $p(\text{atm})$               | 20   | 40   | 60   | 80    | 100   |
|-------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| $V(1)$                        | 5.15 | 2.35 | 1.05 | 0.588 | 0.330 |
| $pV(\text{atm}\cdot\text{l})$ | 103  | 94   | 63   | 47    | 33    |

① 教材中把玻意耳-马略特定律、查理定律、盖·吕萨克定律都作为气体的实验定律对待,这与历史上的认识是一致的。摄氏温标创建于 1742 年,热力学温标迟至 1848 年才由开尔文提出,一百年后才为国际计量大会所采纳。查理定律和盖·吕萨克定律分别于 1787 年和 1802 年按摄氏温标总结出来,所以,在相当长的时期内,历史上将这两个定律作为独立定律。现在,由于普遍采取了热力学温标,并已证明理想气体温标在其适用的温度范围内,与热力学温标一致,可以认为查理定律与盖·吕萨克定律所表述的内容,是热力学温标的必然结果,而不必再视为独立的定律。参阅本书 p. 19 的理想气体温标。

当温度保持  $40^{\circ}\text{C}$  不变时, 对于二氧化碳, 即使压强只是几十个大气压, 玻意耳定律也完全不能应用了。

理想气体是有重要意义的物理模型, 以其性质简单和具有反映任何气体在稀薄状态下的共性而特别重要。玻意耳定律是理想气体的“严格”定律, 是实际气体的近似规律。

### 3. 理想气体状态方程

理想气体的定义式, 又称为理想气体状态方程。当气体质量为  $M$ 、摩尔质量为  $\mu$  时, 则有

$$pV = \frac{M}{\mu} RT \quad (2.1.3)$$

对于一定质量的气体, 状态方程给出了  $p$ 、 $V$ 、 $T$  三个状态参量之间的关系, 如果系统内气体质量、种类发生变化时, 在给定的状态, 都有确定的  $M$  和  $\mu$ , 通过 (2.1.3) 式可以列出方程, 知道其中的四个量, 可以求得第五个量。

将 (2.1.3) 式稍作变化, 还可以用于求气体密度  $\rho$  或比容  $v$  ( $=\frac{1}{\rho}$ ), 即

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{p\mu}{RT} \quad (2.1.4)$$

(2.1.4) 式给出了密度与压强及温度之间的关系, 与气体体积无关, 这在讨论气体质量、密度与压强关系时, 十分方便。

如果整个系统由几个子系统组成, 统一的气体定律 (2.1.1) 式可以写成如下形式:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} + \frac{p_3 V_3}{T_3} + \dots = \text{常数} \quad (2.1.5)$$

用来讨论多个子系统组成的系统, 有时也很方便。请参阅下面例 3、例 4。常将 (2.1.5) 式称为统一的气体定律的分态式。

例 3 容积为  $50\text{ l}$  的氧气瓶中贮存了压强为  $100\text{ atm}$  的氧气, 温度为  $30^{\circ}\text{C}$ , 由于用掉了其中的一部分, 最后瓶中氧气温度为

为  $20^{\circ}\text{C}$ 、压强为  $40\text{ atm}$ ，求

(1) 用掉氧气的质量；

(2) 用掉的氧气在  $1.0\text{ atm}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$  时所占的体积。

解 已知瓶中氧气的初态参量为  $V=50\text{ l}$ ， $p=100\text{ atm}$ ， $T=(273+30)\text{ K}$ ；终态参量为  $V_1=50\text{ l}$ ， $p_1=40\text{ atm}$ ， $T_1=(273+20)\text{ K}$ 。这里还有隐含条件：氧气摩尔质量  $\mu=32\times 10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

所要求的是用掉氧气的质量，但是不能把它作为研究对象，必须仍然将瓶中氧气作为研究对象，求出初、终两态瓶内氧气的质量，其差值即为所求。

(1) 由于密度与压强的关系由 (2.1.4) 式给出，所以

$$\begin{aligned}\Delta M &= M - M_1 = (\rho - \rho_1)V = \left( \frac{p\mu}{RT} - \frac{p_1\mu}{RT_1} \right)V \\ &= \left( \frac{p}{T} - \frac{p_1}{T_1} \right) \frac{\mu V}{R} = \left( \frac{100}{303} - \frac{40}{293} \right) \frac{32 \times 10^{-3} \times 50}{8.2 \times 10^{-2}} \\ &= 3.78 \text{ (kg)}\end{aligned}$$

(2) 这些气体在  $p_0=1.0\text{ atm}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$  时所占体积  $V_0$  由 (2.1.3) 式可求

$$\begin{aligned}V_0 &= \frac{\Delta M}{\mu} \frac{RT_1}{p_0} = \frac{3.78 \times 8.2 \times 10^{-2} \times 293}{32 \times 10^{-3} \times 1} \\ &= 2.84 \times 10^3 \text{ (l)}\end{aligned}$$

即  $2.84\text{ m}^3$ 。

此题解法不是唯一的，下面再举一种解法。

假设气体贮在一个可以改变体积的容器内，气体质量一定，由状态 I ( $p, V, T$ ) 变化到状态 II ( $p_1, V_1, T_1$ )，用掉氧气的质量显然是

$$\begin{aligned}\Delta M &= \Delta V \rho_1 = (V_1 - V) \rho_1 \\ &= \left( \frac{pV}{T} \cdot \frac{T_1}{p_1} - V \right) \frac{p_1 \mu}{RT_1}\end{aligned}$$

$$= \left( \frac{p}{T} - \frac{p_1}{T_1} \right) \frac{\mu V}{R}$$

由图 2-1-2 表明,这部分气体,从状态 II'( $p_1, \Delta V, T_1$ ) 变化到状态 III( $p_0, V_0, T_1$ ),由气体定律可得

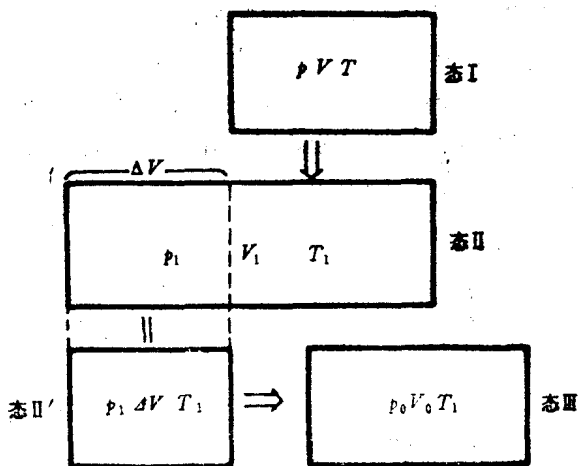


图 2-1-2

$$V_0 = \frac{p_1 \Delta V}{p_0} = \frac{V}{p_0} \left( \frac{p T_1}{T} - p_1 \right)$$

此法巧妙地运用了统一的气体定律(2.1.1)式,得到相同的结果,运算也较为简便。

### 说明

(1) 公式(2.1.3)、(2.1.1)都只是对一定质量的气体适用的,所不同的是状态方程中各量都是对同一状态的描述,当具体运用统一的气体定律(2.1.1)式时,等式两端的参量( $p, V, T$ ),则分别对应着两个平衡态,内涵着一个变化过程; (2.1.3) 式明显地含有气体的量( $M$ 与 $\mu$ )的常数,而(2.1.1)式却是隐含着这两个常数。

(2) 正确解题的关键在于:① 选好研究对象,明确系统和外界的关系;② 明确系统状态变化的特征;③ 根据研究对象的各个