

应用型本科院校“十二五”规划教材

# 大学物理基础教程

段志刚 段鹏飞 主编

热学分册



科学出版社

应用型本科院校“十二五”规划教材

# 大学物理基础教程 ——热学分册

主 编：段志刚 段鹏飞

副主编：曾凌云 何永进

王晓艳 李茂材

主 审：李永铸

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是大学物理课程的热学部分,是作者在多年教学经验的基础上编写而成。全书紧密联系实际应用,每章开头由实际应用引导学生探究式学习,每章后附有工程应用,提高学生的应用意识;内容由浅入深,涵盖了热学和统计热力学的基本内容,包括热力学基本概念及物态方程、统计热力学基本概念、热力学基础、热机及热力学第二定律。每章后还配有小结和习题,便于学生巩固所学内容。

本书适合作为普通高等学校大学物理课程的教材,也可作为相关人员的阅读材料。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理基础教程:热学分册/段志刚,段鹏飞主编. —北京:科学出版社, 2014

应用型本科院校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-041299-7

I. ①大… II. ①段… ②段… III. ①物理学-高等学校-教材 ②热学-高等学校-教材 IV. ①O4 ②O551

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 133212 号

责任编辑:胡云志 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:阎磊 / 封面设计:华路天然工作室

**科学出版社 出版**

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**新科印刷有限公司印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 7 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2014 年 7 月第一次印刷 印张:7

字数:138 000

**定价:18.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 教材编写委员会

顾 问 袁希平 钟嘉玉 陈君若 李 华

干晓蓉 李任波 李庶民

主 任 段鹏飞

副主任 樊则宾 段志刚 蔡 群 李茂材

杨留方

委 员 (按姓氏笔画排序)

王玉林 王晓艳 木 繁 田家金

司民真 毕雄伟 吕 玲 朱乔忠

刘涵哲 李 佳 李茂泉 杨春艳

何永进 张 茜 张远弟 陈 丽

邵 平 周 菁 郑文礼 茶国智

顾春霞 董 刚 曾凌云 熊艳娇

主 审 马文淦 伏云昌 樊则宾 李永铸

秘 书 吴锐涛

## 从 书 序

随着经济转型和经济增长方式的转变,国家亟需大量的高素质技术应用型和职业技能型高级专门人才。在此背景下,应用型本科教育迅速发展,招生规模逐年扩大。为切实培养出符合国家需求的人才,结合应用型本科教育的培养目标和办学特点,制定出有效的培养方案,是十分重要的。在培养方案的制定过程中,有针对性的、高质量的教材建设是最基础的工作。

以力学、电磁学、热学、光学及近代物理知识为主要内容的大学物理课程,是理学类、工程类、信息类、机电类、农林类、医学类等专业的重要基础课程。它不仅是学生进行后续专业课程学习的桥梁,也是提高学生逻辑思维能力、理论和实践结合能力以及实际动手能力的一门和实验紧密结合的课程。对应用型本科人才培养而言,上述课程的相关教材中理论知识的深度和广度适中即可,但需要特别突出理论知识和实际应用的结合,让学生学习到“理实结合”的方法和特点,即教材需要具备“理论适度够用、突出实际应用”的特征。为此,昆明理工大学、西南林业大学、云南民族大学、大理学院、玉溪师范学院、红河学院等多所高校联合编写了本套应用型本科院校“十二五”规划教材——大学物理系列。

这套教材的编写目的是开展不同层次、不同类别、不同模式、不同侧重的应用型本科人才培养的教学改革。编者在编写过程中以教育部物理学与天文学教学指导委员会2010年颁布的“理工科大学物理课程教学基本要求”为指导,考虑了应用型本科的培养特点和地方院校学生的实际情况,并结合了历年来参编高校在应用型本科教育的培养经验和参编人员的实际教学经验。在保证理论体系完整的前提下,教材中略去了部分理论难度过大而应用型本科学生又不是迫切需要的章节;适度简化了对部分内容的理论推导;增加了相关知识在实际中应用的内容;并选编了对部分专业的学生后续学习有帮助的章节,可供有需要的专业选讲。本教材配置了难度适中的例题与典型习题,并适当增加了具有实际工程应用背景的习题,便于学生巩固基础知识和提高运用知识解决问题的能力。整体上具备了“理论适度够用、突出实际应用”的特点。

我期待这套教材在经过试用并修订完善之后,能够为应用型本科大学物理课程的教学质量和教学效果的提高、为学生的科学素养和理实结合能力的提高做出积极的贡献。

中国科学技术大学

蒋 一

2014年6月26日

# 前 言

为满足应用型本科高校人才培养方案的要求,考虑到地方高校学生的实际情况,在昆明理工大学等多所应用型高校共同努力下,编写了本套大学物理系列教材。本套教材是为应用型本科学生量身打造的,教材以应用型本科学生“理论适度够用,突出实际应用”的培养特点为编写依据。

教材内容围绕“框架、概念、思路、方法、应用”展开,在讲述物理现象、物理概念的同时,注意引导学生对物理过程进行分析,并将实际问题抽象为物理图象的能力。让学生在对整个物理框架有所认识的同时,学会处理一般物理问题的方法和技巧。全书注意培养学生独立获取知识的能力、分析问题解决问题的能力、科学观察和理实结合的能力。在保证理论体系完整的前提下,编者对部分内容的理论推导进行了适当简化,略去了部分理论难度过大而应用型本科学生又不是迫切需要的内容,同时选编了一些工程应用的实例和对部分专业的学生后续学习有帮助的章节,可供需要的专业选讲,彰显了应用型本科大学物理教材的特色。每章的开篇都有根据生活中的实例图片提出的问题,作为该章的引例,以引导学生进行思考和学习。部分章节选编了工程应用实例,帮助学生掌握本章知识的实际应用。每章的最后单独有一节本章提要,方便学生学完一章后对所学内容进行梳理。每一章都配置了难度适中的例题与典型习题,并适当增加了具有实际工程应用背景的习题。习题形式多样,包括思考题、选择题、填空题、计算题。题目从对有关的基本概念和规律的分析讨论,到处理问题的一般思路、方法,再到具体问题的求解和应用,按层次依次展开,形成了一个完整的引导学习的框架结构。

本套教材共有力学、电磁学、热学、光学和量子物理四个分册。本书为热学分册,本分册采取把热现象的宏观描述同微观描述分开阐述的方式,从实际应用出发详细介绍了温标及温度计的来源,全书以温度与热量为主线分别引出对应知识,反应了热学理论是从现象和应用中归纳总结得来的学科特色。

热学分册由段志刚、段鹏飞主编,全书的编写与分工如下:西南林业大学的段志刚编写了第一章、第三章,西南林业大学的曾凌云编写了第二章、第四章,西南林业大学的王晓艳、玉溪师范学院的何永进编写了全书的习题,全书由昆明理工大

学的段鹏飞负责校对，由段志刚、段鹏飞负责统稿。

西南林业大学的李永铸教授仔细阅读了本分册，并提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免会出现缺点和错误，恳请读者提出宝贵意见。

编 者

2014 年 7 月

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第一章 热力学基本概念及物态方程 .....         | 2  |
| § 1.1 平衡态 状态参量 .....           | 2  |
| § 1.2 热力学第零定律与温度 .....         | 3  |
| § 1.3 温标、实用温度计 .....           | 5  |
| § 1.4 气体的状态方程 .....            | 7  |
| 工程应用 .....                     | 12 |
| 本章提要 .....                     | 15 |
| 习题 .....                       | 17 |
| 第二章 统计热力学基本概念 .....            | 22 |
| § 2.1 气体的压强和温度的统计解释 .....      | 22 |
| § 2.2 能量按自由度均分原理 理想气体的内能 ..... | 27 |
| § 2.3 麦克斯韦速率分布律 .....          | 33 |
| § 2.4 分子的平均自由程和平均碰撞次数 .....    | 37 |
| 工程应用 .....                     | 42 |
| 本章提要 .....                     | 43 |
| 习题 .....                       | 45 |
| 第三章 热力学基础 .....                | 50 |
| § 3.1 热力学基本概念 .....            | 50 |
| § 3.2 热力学第一定律 .....            | 53 |
| § 3.3 理想气体热学参量等值变化 .....       | 55 |
| 工程应用 .....                     | 62 |
| 本章提要 .....                     | 64 |
| 习题 .....                       | 66 |
| 第四章 热机及热力学第二定律 .....           | 70 |
| § 4.1 循环过程 .....               | 70 |

---

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| § 4.2 卡诺循环 .....         | 72  |
| § 4.3 热力学第二定律的两种表述 ..... | 76  |
| § 4.4 热现象过程的不可逆性 .....   | 78  |
| § 4.5 卡诺定理 .....         | 81  |
| § 4.6 熵 .....            | 83  |
| 工程应用 .....               | 90  |
| 本章提要 .....               | 93  |
| 习题 .....                 | 95  |
| 附录 .....                 | 100 |

# 绪 言

热物理学是整个物理学理论的四大柱石之一，他的发展经过了漫长的演化，古代人类早就学会了取火和用火，但是后来才注意探究热、冷现象本身，直到 17 世纪末还不能正确区分温度和热量这两个基本概念的本质。18 世纪上半叶，华氏温标和摄氏温标的建立，才使测温有了公认的标准。随后又发展了量热技术，为科学地观测热现象提供了测试手段，使热学走上了近代实验科学的道路。

热学的基本内容大体可以分成两大部分，统计热力学与热力学。统计热力学从粒子的微观性质及结构数据出发，以粒子遵循的牛顿力学定律为理论基础，用统计的方法推求大量粒子运动的统计平均结果，以解释平衡系统各种宏观热现象。热力学是热学理论的另一个重要组成部分，它是通过总结物质的宏观热现象而得到的热学理论。热力学主要是从宏观角度出发按能量转化的观点来研究物质的热性质、热现象和热现象所服从的规律。热力学不涉及物质的微观结构和微观粒子的相互作用，是一种唯象的宏观理论，具有高度的可靠性和普遍性，热力学三定律是热力学的基本理论。

统计热力学与热力学的协调发展最终形成了热力学三定律，对两类永动机的不可能实现做出了科学的结论。同时，也形成了工程热力学这门技术科学，它成为研究热机工作原理的理论基础，使内燃机、汽轮机、燃气轮机和喷气推进机相继取得迅速进展。

# 第一章 热力学基本概念及物态方程



以前，在高山上工作的地质勘探人员和登山运动员常常碰到这样的事，尽管火烧得很旺，饭锅里的水沸腾了，但锅里还是生米。不管水烧得怎么开，还是做不成熟饭。后来，人们发明了高压锅，用了高压锅之后，生米也就能做成熟饭了。

为什么在高山上用普通的锅煮饭怎么都煮不好，而用了高压锅之后就能把饭煮熟呢？

本章将告诉你答案。

热力学是热学的一个重要分支，它是一门宏观理论，根据观察和实验，总结出宏观热现象所遵循的基本规律，运用严密的逻辑推理方法，来研究宏观物体的热性质。虽然它没有涉及热现象的本质，对于所得的结果知其然而不知其所以然，但它是以观察和实验为基础的，故而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，并且其总结的基本规律在生产和生活中都有着广泛的应用。本章我们就从热力学理论出发来探讨宏观热现象。

## § 1.1 平衡态 状态参量

### 一、热力学系统与平衡态

热力学的研究对象是热力学系统，简称系统，它是大量微观粒子（分子、原子等）组成的宏观物体，可以是固态、液态和气态（本章着重以气态物体为对象进行讨论）。根据系统与外界交换的特点，通常把系统分为三类：

第一类是孤立系统，它不受外界影响的系统，与外界既无能量交换又无物质交换，是一种理想系统。第二类是封闭系统，它是与外界只有能量交换，而无物质交换的系统。第三类是开放系统，它是与外界既有能量交换又有物质交换的系统。

我们所研究的热力学系统都会处于一定的状态下，按其所处状态不同，可以分为平衡态和非平衡态，平衡态是热力学中的一个重要概念。

系统在不受外界影响的条件下，宏观性质不随时间变化的状态叫平衡态。当系统处于平衡态时，系统内部任一体元均处于力学平衡：热平衡（温度处处相同）、相平衡（没有物态变化）和化学平衡（无单方向化学反应）之中。说明：这里说的没有外界影响，是指外界对系统既不做功又不传热且没有物质交换。如果系统通过做功或热传递的方式与外界交换能量，则它就不可能达到并保持在平衡态。例如把一根金属棒置于两个恒定热源之间（一端置于沸水中，另一端置于冰水中），经过长时间后，金属棒上各处也达到一个宏观性质不随时间变化的状态，但金属棒所处的这个状态不是平衡态，而是叫定态。因此系统处于平衡态时，必须同时满足两个条件：①系统与外界在宏观上无能量和物质的交换；②系统的宏观性质不随时间变化。

平衡态中系统的宏观性质不随时间变化，从微观方面看，在平衡态下组成系统的分子仍在不停地运动着，只不过分子运动的平均效果不随时间改变，而这种平衡效果的不变在宏观上就表现为系统达到平衡态。因此，热力学中的平衡态是动态平衡，通常把这种平衡叫做热动平衡。

很显然，我们可以看到平衡态只是一个理想的概念，在实际中并不存在完全不受外界影响，而且宏观性质绝对保持不变的系统。系统的平衡态是在一定条件下对实际情况的概括和抽象，在许多实际问题中，可以把实际状态近似地当做平衡态来处理。

## 二、状态参量

对于一个系统的平衡状态该如何描述呢？当系统处在平衡态时，具有各种不同的确定的宏观属性，如几何的（体积）、力学的（压强）、热学的（温度）、电磁的（电场强度、磁感应强度）和化学的（物质的量）。热力学中用一些可以直接测量的物理量来表征系统的宏观属性，这些物理量叫宏观量。实验表明，当系统在某一平衡态下，这些宏观量各有确定的值且不随时间变化。我们从这些宏观量中选出一组相互独立的量来描述系统的平衡态，这组确定物质系统状态的宏观量叫做状态参量。

常用的状态参量有四类：几何参量、力学参量、电磁参量和化学参量。

### § 1.2 热力学第零定律与温度

在生活中，我们经常接触到系统热学方面的宏观性质，但上节提到的四类参量

都不能直接表征热学系统方面的宏观属性，因此需要引入一个新的物理量——温度。温度最初的概念来源于人们对冷热程度的主观感觉。如果把温度定义为物理的冷热程度，那是很有问题的。因为冷热是人们对物质世界的一种直接主观感觉，单凭人的感觉认为热的系统温度高、冷的系统温度低，不但不能定量表示出系统的温度，有时甚至会得出错误的结论。例如对同样一盆温水，当你把手从放有冰块冷水盆中拿出放入温水盆中，你会感觉温水盆中的水是热的；但当你把手从一盆烫水中拿出放入温水盆中，你会感觉温水盆中的水是冷的。因此，不能仅凭人们对冷热的主观感觉来定义温度，必须给温度一个严格而科学的定义。

## 一、热力学第零定律

温度概念的建立是以热平衡及由此引出的热力学第零定律为基础的。彼此之间能够发生热交换的两个热力学系统的接触叫做热接触。一般说来，热接触后两个系统的状态都将发生变化，但经过一段时间后，两个系统的状态不再变化，最后两个系统达到一个共同的平衡态。这种平衡态是两个系统在发生传热的条件下达到的，所以叫做热平衡。

现在取三个热力学系统 A、B、C 做实验。将 A 和 C 互相隔绝开，但让它们同时与 B 热接触，经过一段时间后，A 和 B、B 和 C 都将达到热平衡。这时，将 B 移开，再让 A 和 C 热接触，则可发现 A 和 C 的状态都不发生变化，这说明 A 和 C 也是处于热平衡的。由此可得出结论：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，则它们彼此也必定处于热平衡。这个结论通常叫做热力学第零定律。

## 二、温度的宏观定义

热力学第零定律反映出，处于同一热平衡状态的所有热力学系统都具有共同的宏观性质，我们定义这个决定系统热平衡的宏观性质为温度，也就是说：温度是决定一系统是否能与其他系统处于热平衡的宏观性质。它的表征就在于一切处于同一个热平衡态的系统都具有相同的温度。

由于一切处于同一个热平衡态的系统都具有相同的温度，这为我们提供了温度计测量温度的依据，于是我们可以选择适当的系统为标准，用它作温度计，测量温度时使温度计与待测系统接触，只要经过一段时间等它们达到热平衡后，温度计的温度就等于待测系统的温度，而温度计的温度则可以通过它的某一个状态参量标志出来。

### § 1.3 温标、实用温度计

前面我们对温度的定义只是定性的，还不完全，虽然我们有了测温的依据，但是还不能够把温度进行量化；要想将其量化，就需要建立温度的数值表示法，在此，我们把温度的数值表示法叫做温标。下面就对几种常用的温标及相关的温度计进行介绍。

#### 一、经验温标与液体温度计

一般来说，建立一种温标需要三个要素：①选择某种物质（叫做测温物质）的某一随温度变化的属性（叫做测温属性）来表示温度；②对测温属性随温度的变化关系作出规定；③选定固定点并给出其温度值。

生活中常用的液体温度计（如水银温度计、酒精温度计、煤油温度计等）就是利用液体的体积随温度改变的性质制成的，用液体的体积来标志温度。这种温度计一般采用摄尔修斯提出的温标即摄氏温标，其温度的单位为摄氏度，记作 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温标认定液体体积随温度作线性变化，规定冰点（指纯冰和纯水在一个标准大气压下达达到平衡时的温度）为 $0^{\circ}\text{C}$ ，汽点（指纯水和其水蒸气的蒸气压为一个标准大气压下达达到平衡时的温度）为 $100^{\circ}\text{C}$ ，将 $0^{\circ}\text{C}$ 和 $100^{\circ}\text{C}$ 之间的液柱长度按线性关系分成100等分，标记在温度计上作为刻度，液柱长度每改变一个刻度就代表温度变化 $1^{\circ}\text{C}$ 。为提高液体温度计测量的精度，可将每个刻度的液柱长度进行更细化的等分。

虽然摄氏温标是我们生活中常用的温标，但是在物理学上却不能作为标准的温标。因为用不同的测温物质（或者同一测温物质的不同测温属性）所建立的摄氏温标，除冰点和汽点按规定相同外，其他温度并不严格一致。参看图1-1，图1-1给出了几种摄氏温度计在 $0^{\circ}\text{C}$ 和 $100^{\circ}\text{C}$ 之间做实验所得的结果。图中横坐标 $t$ 表示标准温度计的读数，纵坐标 $\Delta t$ 表示不同温度计读数低于横坐标的值。

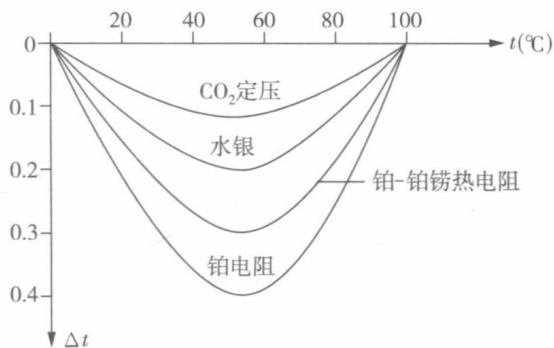


图 1-1 不同物质属性随温度的变化

之所以会发生这种现象，是因为不同物质（或者同一测温物质的不同测温属性）随温度的实际变化关系不同。类似摄氏温标这样在经验上以某一物质属性随温度的变化为依据并用经验公式进行分度的温标，统称为经验温标。在

某些英语国家的商业和日常生活中,除摄氏温标外还沿用一种经验温标——华氏温标,其温度的单位为华氏度,记作 $^{\circ}\text{F}$ ,华氏温度 $t_{\text{F}}$ 与摄氏温度 $t$ 的数值换算关系为

$$t_{\text{F}} = 32 + \frac{9}{5}t. \quad (1-1)$$

当然,温度改变时,不仅液体的体积会随着变化,物质的其他物理属性,如一定容积气体的压强、金属导体的电阻、两种金属导体组成的热电偶的电动势、电容器的电容……都会发生变化,因此我们可以利用物质的这些性质来标志温度,制作成不同的温度计.

**例 1-1** 水银温度计浸在冰水中时,水银柱的长度为 4.0cm,当该温度计浸在沸水中时,水银柱的长度为 24.0cm.

(1) 在室温  $26.0^{\circ}\text{C}$  时,水银柱的长度为多长?

(2) 温度计浸在某种沸腾的化学溶液中时,水银柱的长度为 20.4cm,试求溶液的温度?

**解** 设水银柱高度  $h$  应当与温度成线性关系,其表示式为

$$t(h) = ah + b.$$

依据条件

$$\begin{cases} 0 = a \times 4.0 + b \\ 100 = a \times 24.0 + b \end{cases}$$

解之得  $a=5$ ,  $b=-20$ , 故  $t(h)=5h-20$ ;

(1) 当  $t=26.0^{\circ}\text{C}$  时,代入上式得水银柱的长度  $h=9.2\text{cm}$ ;

(2) 当  $h=20.4\text{cm}$  时,代入上式得溶液的温度  $t=82.0^{\circ}\text{C}$ .

## 二、热力学温标

能否建立一种温标,它完全不依赖与任何测温物质及其物理属性呢?热力学温标就是一种完全不依赖于任何测温物质及其物理属性的温标,它是由开尔文最先引入的,是在热力学第二定律的基础上引入的,所以有时也称开尔文温标,用这种温标所确定的温度叫热力学温度,用  $T$  表示,它的单位叫“开尔文”,符号为“K”,1K 等于水的三相点的热力学温度的  $1/273.15$ . 热力学温度的理论最低温为  $0\text{K}$ ,也叫绝对零度.

按国际规定,热力学温标是最基本的温标,它是一种理想温标.在经验温标所能确定的温度范围内,经验温标与热力学温标是完全一致的,故而在温度计量工作中,在很大的温度范围内都是用各种经验温标来测量物体的热力学温度的.

1960 年国际计量大会对摄氏温标做了定义,规定它由热力学温标导出,热力学

温度（或理想气体温度） $T$  与摄氏温度  $t$  的数值换算关系为

$$T = 273.15 + t. \quad (1-2)$$

## § 1.4 气体的状态方程

通过前面的知识，我们看到热力学系统的诸多物理属性都与温度有关。在一定的平衡态下，系统的四类参量（几何、力学、化学、电磁参量）都有一定的数值，并且系统具有确定的温度。由此可见，温度与四类参量之间必然存在一定的联系，换言之，温度一定是其他状态参量的函数。下面我们就以气体为对象进行讨论。

### 一、气体状态变化的实验三定律

对一定量的气体，在温度不太低、压强不太大的条件下，人们根据长期实验的结果，总结出了三条基本规律。

(1) **玻意耳定律** 在温度不变的情形下，一定量气体的压强  $p$  和体积  $V$  的乘积为一常数，即

$$pV = C \text{ (常数)}. \quad (1-3)$$

(2) **盖·吕萨克定律** 在压强不变的情形下，一定量气体的体积随摄氏温度  $t$  作线性变化，即

$$V = V_0(1 + \alpha_V t). \quad (1-4)$$

(3) **查理定律** 在体积  $V$  不变的情况下，一定量气体的压强  $p$  随摄氏温度  $t$  作线性变化，即

$$p = p_0(1 + \alpha_p t), \quad (1-5)$$

其中，下标为 0 表示有关物理量取  $0^\circ\text{C}$  时的值， $\alpha_V$  为气体的体膨胀系数， $\alpha_p$  为气体压强系数。

以上三条定律近似地适用于所有气体。只要温度不太低，气体愈稀薄，以上三条定律就愈能精确地描述气体状态的变化，且在气体无限稀薄的极限下，所有气体的  $\alpha_V$ 、 $\alpha_p$  趋于共同的极限  $\alpha$ ，其数值约为  $1/273.15$ 。即

$$\lim_{p \rightarrow 0} \alpha_V = \alpha = \frac{1}{273.15}, \quad \lim_{p \rightarrow 0} \alpha_p = \alpha = \frac{1}{273.15}.$$

于是，式 (1-4) 和式 (1-5) 可以写成

$$V = V_0 \left( 1 + \frac{1}{273.15} t \right) = V_0 \left( \frac{273.15 + t}{273.15} \right) = V_0 \frac{T}{T_0},$$

$$p = p_0 \left( 1 + \frac{1}{273.15} t \right) = p_0 \left( \frac{273.15 + t}{273.15} \right) = p_0 \frac{T}{T_0},$$

即

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0} \quad (\text{盖} \cdot \text{吕萨克定律}), \quad (1-6)$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0} \quad (\text{查理定律}). \quad (1-7)$$

## 二、理想气体状态方程

气体实验三定律只涉及两个状态参量之间的关系，下面我们来讨论气体压强、体积和温度之间关系。

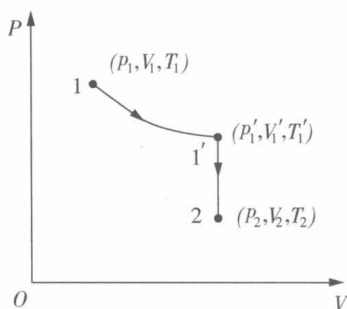


图 1-2 理想气体  $P$ - $V$  图

如图 1-2，设一定量的理想气体，经由如图所示过程： $1 \xrightarrow{T=C} 1' \xrightarrow{V=C} 2$ 。

$1 \rightarrow 1'$  为等温过程，遵从玻意耳定律，即

$$p_1 V_1 = p_1' V_1';$$

$1' \rightarrow 2$  为等容过程，遵从查理定律，即

$$\frac{p_1'}{p_2} = \frac{T_1'}{T_2} \Rightarrow p_1' = \frac{T_1'}{T_2} p_2;$$

$$\because T_1 = T_1', V_1' = V_2,$$

$$\therefore \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (1-8)$$

由于上述讨论的气体所处的平衡态 1 和平衡态 2 是任意的，故我们可以得出结论：一定质量的气体在平衡态下的状态参量  $p$ 、 $V$ 、 $T$  满足关系式

$$\frac{pV}{T} = \text{常量}. \quad (1-9)$$

按照阿伏伽德罗定律，标准状况下，1mol 的任何气体所占的体积都是 22.4L，则  $V_{0,m} = 22.4\text{L/mol}$  为气体此状态下的摩尔体积。我们设气体的摩尔质量为  $M$ ，质量为  $m$ ，则其摩尔数为  $\nu = \frac{m}{M}$ ，设气体处在标准状态，这时它所占的体积为  $V_0 = \nu V_{0,m}$ ，于是，式 (1-9) 可写成

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \nu \frac{p_0 V_{0,m}}{T_0} = \nu R, \quad (1-10)$$

其中， $R = \frac{p_0 V_{0,m}}{T_0}$  是与气体的种类和状态无关的常量，称为普适气体常量。于是式 (1-10) 可写成

$$pV = \nu RT = \frac{m}{M} RT, \quad (1-11)$$