

# 理论物理 概论

主编 · 赵德先 副主编 · 范新民 郑敏 李涛

LILUN WULI  
GAILUN



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

041

50

2006

# 理论物理概论

主 编 赵德先

副主编 范新民 郑 敏 李 涛

西南交通大学出版社

• 成都 •

-----  
**图书在版编目 (C I P) 数据**

理论物理概论 / 赵德先主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2006.9

ISBN 7-81104-343-2

I. 理... II. 赵... III. 理论物理学—高等学校—教材 IV. 041

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 096924 号  
-----

**理论物理概论**

主编 赵德先

副主编 范新民 郑敏 李涛

|         |                                                                   |
|---------|-------------------------------------------------------------------|
| 责任编辑    | 刘莉东                                                               |
| 封面设计    | 本格设计                                                              |
| 出版发行    | 西南交通大学出版社<br>(成都二环路北一段 111 号)                                     |
| 发行部电话   | 028-87600564 028-87600533                                         |
| 邮 编     | 610031                                                            |
| 网 址     | <a href="http://press.swjtu.edu.cn">http://press.swjtu.edu.cn</a> |
| 印 刷     | 四川森林印务有限责任公司                                                      |
| 成 品 尺 寸 | 170 mm × 230 mm                                                   |
| 印 张     | 22.25                                                             |
| 字 数     | 409 千字                                                            |
| 版 次     | 2006 年 9 月第 1 版                                                   |
| 印 次     | 2006 年 9 月第 1 次印刷                                                 |
| 书 号     | ISBN 7-81104-343-2                                                |
| 定 价     | 29.00 元                                                           |

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

理论物理是物理教育专业学生的专业理论课程,它包括理论力学、电动力学、热力学与统计物理学和量子力学.从过去多年的教学实践看,内容偏多、偏深,学生负担过重,尤其是在目前与新学科有关的新课程的增加,使得学时分配的矛盾更加突出.另一方面,从大多数毕业生将来所从事的工作考虑,“四大力学”内容过多,也并不都是必需的.鉴于此,我们编写这套理论物理概论教材.

依据理论物理的教学大纲和我校物理专业学生的实际情况,我们组织了长期从事理论物理教学工作,并具有丰富教学经验的教师编写了这本面向 21 世纪的教材.在选材上,着眼于理论物理的基本内容,力图能以较少的篇幅,把其中基本的物理思想和概念,基本的理论和规律以及思考问题和数学处理的基本方法阐述清楚;在文字上力求生动活泼、深入浅出;在内容安排上,力求做到条理清楚、层次分明.考虑到西部物理专业学生的实际,编写此书时,在保证全书系统性、完整性和科学性的基础上,尽量以简短的篇幅反映理论物理的主要内容,对重点内容的叙述力求详尽,并配置了较多的例题、习题,习题后附有参考答案,以利于学生学习.

本书的内容包括热力学与统计物理学和电动力学两部分.可作为物理专业的《理论物理概论》课程的教材,同样适应电大、函授等物理专业的读者,也可供中学物理教师及其他专业师生参考.

本书由赵德先教授主编,第一、二、三章由范新民副教授编写,第四、五、六、七章由李涛副教授编写,第八、九、十章由郑敏副教授编写,赵德先教授编写了第十一、十二章,并且负责全书的组织和定稿工作.在编写本书的过程中,得到了青海师范大学教务处及李银轮教授的大力帮助和支持,得到了西南交通大学出版社的大力支持.对此,一并表示诚挚地感谢.

虽然我们按照上述要求尽了最大努力,但由于我们的学识有限,加之时间有限,错误在所难免,恳请使用本书的读者不吝指正.

编 者

2006 年 7 月

# 目 录

## 第一篇 热力学与统计物理

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一章 热力学的基本规律 .....           | 3  |
| 第一节 热力学的状态描述 .....           | 3  |
| 第二节 温度 .....                 | 7  |
| 第三节 物态方程 .....               | 9  |
| 第四节 准静态过程的功 .....            | 12 |
| 第五节 热力学第一定律 .....            | 15 |
| 第六节 热力学第一定律的应用 .....         | 16 |
| 第七节 热力学第二定律 .....            | 22 |
| 第八节 卡诺定理 热力学温标 .....         | 25 |
| 第九节 热力学第二定律的数学表达式 熵 .....    | 27 |
| 第十节 理想气体的熵函数 熵增加原理 .....     | 33 |
| 习 题 .....                    | 36 |
| 第二章 均匀物质的热力学性质 .....         | 39 |
| 第一节 自由能和吉布斯函数 .....          | 39 |
| 第二节 基本热力学函数和特性函数 .....       | 42 |
| 第三节 麦氏关系及其应用 .....           | 44 |
| 第四节 理想气体的热力学函数 .....         | 49 |
| 第五节 气体的节流过程和绝热膨胀过程 .....     | 50 |
| 第六节 平衡辐射场的热力学性质 .....        | 53 |
| 第七节 热力学第三定律 .....            | 56 |
| 习 题 .....                    | 57 |
| 第三章 相平衡 .....                | 59 |
| 第一节 开系的热力学基本方程 .....         | 59 |
| 第二节 单元系的复相平衡条件 .....         | 62 |
| 第三节 单元两相系的平衡 克拉珀龙方程 相图 ..... | 65 |
| 第四节 气液二相转变 范德瓦尔斯等温线 .....    | 68 |
| 第五节 液滴与蒸气的平衡 核心 .....        | 71 |
| 第六节 二级相变 .....               | 76 |

|     |                         |     |
|-----|-------------------------|-----|
| 第七节 | 多元复相系的平衡条件 相律 .....     | 78  |
| 习 题 | .....                   | 81  |
| 第四章 | 微观运动状态的描述 宏观态与微观态 ..... | 84  |
| 第一节 | 热力学极限 粒子运动状态的经典描述 ..... | 84  |
| 第二节 | 微观粒子运动状态的量子描述 .....     | 88  |
| 第三节 | 量子态与 $\mu$ 空间 .....     | 91  |
| 第四节 | 系统微观运动状态的描述 全同性原理 ..... | 94  |
| 第五节 | 系统的宏观状态与微观状态 .....      | 98  |
| 习 题 | .....                   | 101 |
| 第五章 | 玻尔兹曼统计理论 .....          | 102 |
| 第一节 | 分布与微观状态之间的关系 .....      | 102 |
| 第二节 | 等概率原理 .....             | 105 |
| 第三节 | 玻尔兹曼分布 .....            | 106 |
| 第四节 | 热力学量的统计表达式 .....        | 109 |
| 第五节 | 玻尔兹曼关系 .....            | 112 |
| 第六节 | 经典近似 .....              | 114 |
| 第七节 | 理想气体的热力学函数 .....        | 115 |
| 第八节 | 麦克斯韦速度分布率 .....         | 117 |
| 第九节 | 能量均分定理 .....            | 120 |
| 第十节 | 固体的热容量 .....            | 123 |
| 习 题 | .....                   | 125 |
| 第六章 | 玻色统计和费米统计理论 .....       | 128 |
| 第一节 | 玻色分布和费米分布 .....         | 128 |
| 第二节 | 热力学参量的统计表达式 .....       | 131 |
| 第三节 | 光子气体 .....              | 134 |
| 第四节 | 电子气体 .....              | 137 |
| 第五节 | 声子 .....                | 141 |
| 习 题 | .....                   | 145 |
| 第七章 | 系综理论 .....              | 147 |
| 第一节 | 系综理论的基本概念 .....         | 147 |
| 第二节 | 微正则分布 .....             | 150 |
| 第三节 | 微观状态数与热力学量的关系 .....     | 152 |
| 第四节 | 正则分布 .....              | 155 |
| 第五节 | 正则分布的热力学公式 .....        | 157 |

|     |             |     |
|-----|-------------|-----|
| 第六节 | 巨正则分布       | 159 |
| 第七节 | 巨正则分布的热力学公式 | 161 |
| 习 题 |             | 162 |

## 第二篇 电动力学

|      |                |     |
|------|----------------|-----|
| 第八章  | 场的数学理论         | 167 |
| 第一节  | 矢量代数复习         | 167 |
| 第二节  | 标量场的方向导数 梯度    | 168 |
| 第三节  | 矢量场的散度 高斯定理    | 174 |
| 第四节  | 矢量场的旋度 斯托克斯定理  | 177 |
| 第五节  | 格林定理           | 183 |
| 第六节  | 曲线正交坐标         | 184 |
| 第七节  | 一个矢量场被唯一确定的条件  | 190 |
| 习 题  |                | 191 |
| 第九章  | 电动力学的基本方程      | 194 |
| 第一节  | 库仑定律 静电场的散度和旋度 | 194 |
| 第二节  | 电流和磁场          | 202 |
| 第三节  | 麦克斯韦方程组        | 210 |
| 第四节  | 介质的电磁性质        | 214 |
| 第五节  | 电磁场的边值关系       | 223 |
| 习 题  |                | 228 |
| 第十章  | 静电场            | 231 |
| 第一节  | 静电场的标势及其微分方程   | 231 |
| 第二节  | 分离变量法          | 238 |
| 第三节  | 电象法            | 246 |
| 第四节  | 格林函数法          | 250 |
| 习 题  |                | 257 |
| 第十一章 | 恒定电流及其磁场       | 261 |
| 第一节  | 恒定电流的电场        | 261 |
| 第二节  | 恒定电场的边界条件      | 264 |
| 第三节  | 矢势及其微分方程       | 270 |
| 第四节  | 磁标势            | 278 |
| 第五节  | 超导体的电磁性质       | 283 |
| 习 题  |                | 291 |

|              |                              |     |
|--------------|------------------------------|-----|
| <b>第十二章</b>  | <b>时变电磁场</b> .....           | 295 |
| 第一节          | 电磁场能量与能流 .....               | 295 |
| 第二节          | 平面电磁波 .....                  | 300 |
| 第三节          | 电磁波在介质界面上的反射和折射 .....        | 307 |
| 第四节          | 有导体存在时电磁波的传播 .....           | 313 |
| 第五节          | 谐振腔 .....                    | 319 |
| 第六节          | 波导 .....                     | 324 |
| 第七节          | 电磁场的势 .....                  | 328 |
| 习 题          | .....                        | 338 |
| <b>参考文献</b>  | .....                        | 342 |
| <b>附录 I</b>  | <b>常用积分的计算公式</b> .....       | 343 |
| <b>附录 II</b> | <b>轴对称情形下拉普拉斯方程的通解</b> ..... | 346 |

# 第一篇

## 热力学与统计物理

---

在物理学中,为了研究问题的方便,常把物理现象分为宏观现象和微观现象两大类.宏观现象一般指的是由大量微观粒子组成的系统整体和场在大范围内所表现出来的现象;微观现象指的是微观粒子和场在极其微小的空间范围内所发生的现象.描述宏观现象的物理量称为宏观量,如气体的压强、温度和热容量等,描述微观现象的物理量称为微观量,如分子的质量和分子的速度等.

热现象是一种宏观现象,热力学和统计物理学都是研究热现象规律的学科,但是它们所采用的方法是不同的.

热力学是热现象的宏观理论,它不涉及物质的微观结构,而是从能量转化的观点出发,依据在大量实践中总结出来的几条基本宏观定律,运用严密的逻辑推理而形成一套完整的热现象理论.

热力学的基本定律源于实践,如果某个结论是由热力学定律推出的,而且在推导过程中未曾引入其他假设,那么这个结论必有高度的可靠性.由于在热力学中不涉及物质的微观结构,因此它所得出的结果常具有普遍的意义,可靠性和普遍性是热力学的优点.

但是,由于热力学不涉及物质的微观结构,这就使它产生了下列

重要缺陷:首先,它无法对所得的结论作更本质的探讨;其次,从热力学理论不可能导出具体的物质的具体特性,在实际应用中,往往必须结合具体观测的数据才能得到具体的结果;另外,它把物质看成连续体,用连续函数表达物质的性质,因而无法解释涨落现象。

统计物理学是热现象的微观理论,它从组成物质的微观粒子的混乱运动和相互作用出发,认为虽然每个粒子的运动遵从力学规律,但是物质系统对外所表现的性质,则是整个粒子系统的集体行为,而我们所观测到的宏观量,则是瞬息万变的相应的微观量的统计平均值。它采用统计的方法研究热现象的规律,也就是使用概率分布描述粒子系统的各个状态。这样,统计物理学就从微观状态与宏观状态的联系上建立起了热现象的理论。

统计物理学可以揭示热现象的微观本质,而且把热力学的几个独立的基本定律归结于一个基本的统计原理,它能阐明热力学基本定律的统计意义,解释涨落现象,从而弥补了热力学的不足。可以说,统计物理学是较热力学更为深入一个层次的学科。

统计物理学也不是十全十美的,因为若从粒子的属性去计算系统的宏观性质,常常会遇到极大的困难,所以统计物理学不得不借助一些简化模型或者采用适合于各种具体问题的近似方法,这就使得它所得到的一些结果与实际不能完全符合,因而统计物理学不能取代热力学。

总之,热力学与统计物理学之间存在着相辅相成的密切关系,高度可靠的热力学为统计物理学作严格的检验,统计物理学使热力学理论获得更深刻的意义。在学习本课时要正确而全面地看待热力学和统计物理学,充分注意到它们在对热现象的研究上各有所长的特点。只有如此,才能从两个侧面完整而深刻地了解热现象的规律以及热现象与其他宏观现象之间转化和联系的规律。

# 第一章 热力学的基本规律

热力学是研究热现象的宏观理论,在实验可达到的温度范围内( $10^{-4} \sim 10^6$  K),热力学相当准确地解释了各种物质系统的宏观行为.热力学建立在由大量实验事实概括而得到的三个基本定律的基础上.本章将详细讨论这些定律的内容,重点是对平衡态与非平衡态都极为重要的热力学第二定律,这些叙述起来很简单但却具有重大意义的热力学定律,为我们提供了研究平衡态热力学系统的性质以及某些情况下研究非平衡态热力学系统性质的重要工具.

热力学并不研究热现象的微观本质,它只使用一些实验可以观测的宏观物理量(如压强、温度等)来描写宏观系统的性质.同时,为了描写处于各种宏观条件下热力学系统的性质,热力学还采用了诸如内能、熵、自由能等一些新的物理量.我们将介绍这些物理量的含义以及它们之间的关系.尽管热力学所研究的物理量多少总带有抽象性,并不像微观理论那样给我们一些直观的物理图像,但是热力学理论的简洁性和内在的完美性,往往使我们能够从普遍原理更清楚地去洞察问题的物理本质,这也是热力学方法的一大优点.

## 第一节 热力学的状态描述

为了以后叙述上的方便,我们先介绍一些热力学的基本概念和术语,这里给出的所有定义并非都是严格的,若有必要,将在以后给出更严格的定义.

### 一、热力学系统

凡是作为热力学研究对象的任何宏观物质客体都叫做热力学系统.这种系统总是由大量粒子(如分子、原子、电子等)组成的,数目很少的粒子组成的系统

不是热力学的研究对象. 一个系统总是一定范围内的有限量物质, 因而总有一个真实或假想的界面把它与周围物质分隔开来, 界面以内是系统本身, 界面以外就是它的外界, 也叫做环境. 系统与外界间的相互影响, 如传热、做功、物质交换等, 都是通过界面进行的.

按照周围环境对系统的不同影响, 可以把系统分为以下几种类型:

**孤立系统** 是指与外界完全没有相互作用的独立系统, 简称为孤立系.

**封闭系统** 是指与外界可以有能量交换但没有物质交换的系统, 简称为闭系.

**开放系统** 是指与外界既有能量交换又有物质交换的系统, 简称为开系.

热力学系统之间的相互作用, 可以按其性质来区分, 当系统间以机械力或电磁力做功时称为力学相互作用; 如果系统间以热量传递(传导、对流、辐射等)的形式相互作用, 则称为热相互作用. 能够隔绝热相互作用的界面叫绝热壁, 反之则叫导热壁. 系统间能够发生物质交换的相互作用叫物质相互作用, 而有选择的允许某种物质通过的半透膜就叫做半透壁. 开系是由半透壁或假想界面包围的系统, 而闭系则是被导热壁所包围的系统. 至于孤立系, 由于不能与外界有能量和物质交换, 包围它的应是绝热壁, 又由于不能与外界有力学相互作用, 所以这个壁还应是刚性的并且有时还应具有电磁屏蔽性质. 唯一无法排除的是万有引力(如重力)的影响, 通常只有在引力影响可以忽略或问题与引力无关时, 才可以不予考虑.

## 二、平衡态

实验表明, 一个没有外界影响的系统, 不管其初始状态怎样复杂, 经过一段时间(常叫弛豫时间)后, 最终将达到一个性质稳定且不再随时间变化的宏观状态, 这个最终状态称为平衡态. 系统一旦达到平衡态, 除非有来自外界的影响, 其一切宏观性质将不再变化. 热力学主要研究的就是系统处于平衡态时的性质.

应当注意, 所谓没有外界影响, 是指系统与外界之间不存在相互作用, 而不能简单地说是系统处于外界条件不变的状态. 另外, 也不能简单地把平衡态说成是不随时间改变的状态. 例如, 一个两端各与一恒温热源接触的金属杆, 可以达到一种不随时间改变的恒稳状态, 但由于存在热传导, 因而尽管外界条件不变却不能说没有外界影响, 所以恒稳状态就不一定是平衡态.

## 三、状态参量

热力学中用来描写系统性质的物理量, 都是可以观测的宏观量. 当系统处于

平衡态时,一切宏观量不再随时间变化而具有确定的数值,因而可以用来完全描写系统的热力学状态,这些量就叫做热力学变量或态变量.一般来说,用来描写系统平衡态的态变量有许多,但只有少数几个是独立的,这几个独立变量完全可以确定系统的平衡态,常称为状态参量,其余的态变量则可看成是它们的函数,所以也称为态函数.例如,描写一定质量气体的态变量常用压强  $p$ 、体积  $V$  及温度  $T$ ,它们之间由物态方程所联系,任意确定其中两个后,第三个量也随之确定.这就是说,气体的态变量中只有两个是独立的,其余的则是它们的函数.实际问题中,人们往往选择那些容易观测的量作为独立变量,借助于热力学理论就可以得到其他态变量的值.独立变量的数目,叫做系统的自由度,通常是由实验决定的.对于系统任一给定的平衡态来说,态变量都具有确定的数值,完全与系统达到该状态所经历的过程无关,也就是说,态变量是系统状态的单值函数.显然,态函数也可作为确定系统状态的状态参量,至于到底选择哪些量作为状态参量,主要视问题的性质和讨论的方便而定.

热力学中所需用的状态参量,按其性质可以分成不同的类别,这就是几何参量(如体积)、力学参量(如压强)、电磁参量(如电场强度)和化学参量(如各种化学成分的数量)等,这四类量都不是热力学中所特有的,它们的测量分别属于力学、电磁学及化学范围的,但是用它们来描写系统平衡态的方法却是热力学中所特有的.为了描写热现象的性质,还需要引入另外一类物理量,例如温度、内能、熵等.不过我们将会看到,这类新物理量都可以表示成上述四类参量的函数.如果在所研究的问题中,不考虑电磁性质,就不必引入电磁参量;不考虑与化学成分有关的性质,就不必引入化学参量.这时,往往只需要两个参量(如温度和压强)就可以完全描写系统的状态,这种只有两个独立参量的系统常叫做简单系统.

有时还根据系统的性质及它与外界的关系,把状态参量分为外参量和内参量.外参量完全由外界环境所决定,用来表征外界加给系统的条件而与系统本身的性质无关,如气体的体积完全由容器壁的位置所决定.内参量则与系统内部大量粒子的特征及运动状况有关,由系统内部粒子的运动状态所决定,如气体的温度和压强完全取决于气体分子热运动的剧烈程度和分子间的相互作用.

根据热力学量对热力学系统所起的作用,可以把它们划分为强度量和广延量两大类.所谓强度量,是指其大小与系统总质量的大小无关的状态参量,如温度、压强、电场强度,等等.一个处于平衡态的系统,在保持其状态不变的情况下分隔为若干宏观部分,则每一部分的强度量值仍与未分隔前相同.所谓广延量,是指其大小与系统的总质量成正比的状态参量.任一系统的广延量之值就等于其各部分的该量值的总和,如体积、内能、熵、电量等等.一般来说,强度量是引起

系统状态变化的主动因素,如果系统某一强度量(如温度)与外界有差异,其状态就可能发生变化,至于广延量,则是系统状态变化的被动因素.另外,任何广延量与系统的质量之比都是强度量,这类量常称为比广延量,如单位质量的体积叫比体积,单位质量的内能叫比内能,等等.

必须指出,对态变量进行分类的目的,是为了能更好地认清这些量的性质,至于对确定系统的状态来说,一切态变量都具有同等的地位.

如果系统不处于平衡态,要描写它就比较复杂.由于系统各部分的性质不同,通常的做法是把系统划分为许多小部分,设想这些宏观上足够小的部分都可近似地看成是局部平衡的,因而可以用前述的态变来描写.如考虑到各部分可能处于变化之中,则这些态变量还将随时间而改变.最后,可以通过适当的数学方法,利用这些局部变量近似地给出描写整个系统的有关变量.

#### 四、改变系统状态的不同方式

当系统处于热平衡时,自己不能改变自己的状态,需要外界对系统施加作用与影响.系统与外界之间的作用是相互的,这种相互作用会改变系统的状态,同时也会改变外界环境的状态.系统与外界之间的相互作用可分为三类:第一类是力学的或机械相互作用,表现为系统对外界、或外界对系统以机械力或电磁力做宏观功,通过宏观功来改变系统的能量从而达到改变系统状态的效果.第二类是系统与外界在没有宏观功的情况下,通过热的相互作用以达到改变系统状态的效果.例如,一块灼热的铁放进一桶水中,经过一段时间以后,可观察到我们所研究的系统(即这块铁)及其外界(即这桶水)的状态都发生了变化,但水与铁之间并没有明显的宏观功发生,由于通过水与铁的直接接触,二者之间一定传递了或交换了某种会导致二者的状态都发生变化的东西.因此,我们把在系统与外界间不做宏观功的情况下,靠系统与外界的直接相互接触以改变系统的状态的方式称为热接触或热交换,而在交换中彼此之间传递了某种会导致系统与外界状态发生变化的东西,我们称之为被传递的热量或简称热量.至于热量的本质,在热学发展的早期曾被人们误认为是物质内部存在的某种“热质”之量,现在已经清楚(见下面热力学第一定律的讨论),热量乃是不凭借做宏观功而是通过系统与外界之间的热接触传递的能量.第三类是系统与外界之间发生物质的交换,称为物质转移的相互作用.例如杯中的水蒸发为水汽,冰溶解为水,等,对于封闭系统只有前两类相互作用,对于开放系统三类相互作用均存在.本章主要以封闭系统为讨论对象,所得结果不难推广到开放系统.

## 第二节 温 度

温度是热力学中特有的一个物理量,就通俗的意义讲,温度表示物体的冷热程度,但是温度的科学概念的建立以及温度的测定,都是以热平衡为基础的.

经验事实告诉人们,两个物体接触之后,经过足够长的时间,它们会达到热力学平衡状态.倘若把它们分开,或者进而再把它们合在一起,它们的状态都不再发生变化.人们还进一步认识到,热力学平衡有一个重要性质,就是若 A、C 两物体达到热平衡, B 和 C 物体也达到热平衡的话,则 A 和 B 必定也是热平衡的.这一事实通常称为热平衡定律,或者叫做热力学第零定律.它告诉人们,互为平衡的物体必定有一个共同的物理性质,它是物体之间达到热平衡的标志.我们把标志物体达到平衡时的这一共同物理性质叫做温度.

很自然,以上引出温度概念的同时,也从原则上给出了温度的测量方法.假定 A、B、C 三个物体都是单元的简单系统,它们的状态仅由各自的压强  $p$  和体积  $V$  来描述.若使 A 和 C 接触,在达到平衡时,则  $p_A, V_A, V_C$ , 就不再是独立的了.如果它们之间的关系用下式表示的话

$$f_{AC}(p_A, V_A; p_C, V_C) = 0 \quad (1.2.1)$$

则热平衡定律可表述为,若

$$\left. \begin{aligned} f_{AC}(p_A, V_A; p_C, V_C) &= 0 \\ f_{BC}(p_B, V_B; p_C, V_C) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2.2)$$

$$\text{则} \quad f_{AB}(p_A, V_A; p_B, V_B) = 0 \quad (1.2.3)$$

由(1.2.2)式可得

$$p_C = F_{AC}(p_A, V_A; V_C)$$

$$\text{和} \quad p_C = F_{BC}(p_B, V_B; V_C)$$

这一结果导致  $p_C$  取同一数值时有

$$F_{AC}(p_A, V_A; V_C) = F_{BC}(p_B, V_B; V_C) \quad (1.2.4)$$

因为 C 物体已给定,上式对  $V_C$  的依赖就不必考虑了.于是(1.2.4)式所表示的平衡关系式可写成

$$g_A(p_A, V_A) = g_B(p_B, V_B) \quad (1.2.5)$$

式(1.2.5)表明系统热平衡时,存在一个彼此相等的状态函数  $g(p, V)$ ——温度.温度也可以是系统的独立变量,即状态参量,它表明系统的冷热程度,或者说

它表征系统微观粒子热运动的程度. 如果两个系统相接触, 它们之间可以发生热交换, 但若没有发生热交换, 那么这两个系统的热程度相等, 也就是说两个系统的温度相等.

温度表征了系统的能量状态, 温度是一个内参量.

热平衡定律不仅给出了温度的概念, 而且指明了比较温度的方法. 由于互为热平衡的物体有相同的温度, 我们在比较两个物体的温度时, 不需要令两物体直接进行热接触, 只需取一个标准的物体分别与这两个物体进行热接触就行了. 这个作为标准的物体就是温度计.

为了确定温度的量值, 必须对物体的冷热程度给出数值表示法, 即确定温标. 一般地说, 任何物质的任一特性, 只要它随冷热状态单值变化, 都可以作为计量温度的标志. 不过在实用上, 总是选择一种随冷热程度变化显著的特性来计量温度. 这种以测温物质的测温特性随冷热程度的变化为依据而确定的温标, 称为经验温标. 例如, 定容气体温度计用气体的压强、定压气体温度计用气体的体积来确定温标, 它们都是经验温标. 由于经验温标既与测温物质有关, 又与选用的测温特性有关, 因此选择不同物质的不同特性而确定的经验温标, 并不严格一致. 在热力学第二定律的基础上, 引入了一种不依赖于任何物质特性的温标, 称为热力学温标. 国际上规定, 一切温度测量最终都应以热力学温标为准. 不过热力学温标只是一种理想温标, 以后将证明, 在理想气体温标可以使用的温度范围内, 理想气体温标与热力学温标是一致的.

下面对理想气体温标作一简单介绍. 以气体作为测温物质的温度计有两种, 一是定容气体温度计, 二是定压气体温度计. 定容气体温度计保持气体的体积不变, 以气体的压强作为测温标志. 按照国际规定, 将纯水三相点(冰、水、水蒸气三相平衡共存)的温度规定为  $273.16\text{K}$ . 若  $p_1$  为纯水三相点下温度计中气体的压强, 当压强变为  $p$  时, 按照线性关系规定此时的温度为

$$T_v = \frac{p}{p_1} \times 273.16\text{K}$$

实验表明, 在压强趋于零的极限下, 各种气体的  $T_v$  都趋于一个共同的极限温标  $T$ , 这个极限温标就叫做理想气体温标, 其单位为  $\text{K}$ (开尔文). 常用的摄氏温标计量的温度值用  $t$  表示, 规定为

$$t = T - 273.15$$

单位为  $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度).

### 第三节 物态方程

物态方程是描写系统平衡性质的状态参量之间的函数关系式,也叫状态方程.我们知道,温度的改变必然引起其他状态参量的改变,因此作为状态参量的温度也一定是其他状态参量的函数.物态方程通常总是把温度  $T$  和其他状态参量联系起来,它包含了大量有关系统热力学性质的知识.对于固定质量的某种气体、液体或各向同性的固体等均匀系统,在没有外力场的情况下,只需两个独立参量就能完全确定这种均匀系统的平衡状态,此时,其他宏观物理性质则是状态的函数.如状态由压强  $p$  与体积  $V$  二参量来确定,则温度便是状态的函数,可表示为

$$T = T(p, V) \quad (1.3.1)$$

或表示为隐函数的形式

$$f(p, V, T) = 0 \quad (1.3.2)$$

(1.3.1) 式和 (1.3.2) 式便称为均匀系统的物态方程.

在热力学中,只能知道压强  $p$ 、体积  $V$ 、温度  $T$  之间应有一定的函数关系,而不能给出具体的函数形式.要获得物态方程的具体形式或者是总结实验事实,得出经验规律,或者由统计物理根据物质结构模型应用统计方法从理论上推导出来.下面给出一些经验的物态方程.

#### 一、理想气体

人们最熟悉的是理想气体物态方程

$$pV = nRT \quad (1.3.3)$$

式中,  $n$  是物质的量(其数值即为摩尔数),单位为  $\text{mol}$ ;  $T$  是温度;  $p$  是压强;  $V$  是体积;  $R$  是普适气体常量,其值为  $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . 对于分子间相互作用可以忽略的稀薄气体,理想气体物态方程是它们一个很好的近似.

若系统中有  $k$  种气体,则物态方程为

$$pV = \sum_{i=1}^k n_i RT \quad (1.3.4)$$

式中,  $n_i$  是第  $i$  种气体的摩尔数.