

热 学

秦 允 豪 编

南 京 大 学 物 理 系

二 三 年 三 月

内 容 提 要

本书是编者长期在南京大学执教中,经过多次修订而成的.本书1990年版获得国家教委第三次优秀教材奖一等奖,赵凯华教授对它有较高评价.1999年的第一版是面向21世纪课程教材、“九五”国家级重点教材,获2002年国家级优秀教材奖二等奖.本书是第二版.本教材的体系和李椿等编的1978年出版的《热学》基本相同,也不涉及热力学关系和三种统计分布.但是在继承我国物理教学严谨扎实传统的基础上又有很大发展,同时吸取了美国教学灵活、求新、切合实际、注意创新的优点,在“实”的基础上进一步做到“活、新、宽”,注意热学和近代物理及和天、地、生、化、医、气、工等学科的新生长点间的联系,注意物理思维方法的训练.该教材既有适应新世纪人才培养要求的先进性,又有符合我国物理教学国情的教学适用性,加上书中内容丰富多彩的趣味性,受到广大同行、专家、学生的好评.全书共分6章:导论、分子动理学理论的平衡态理论、输运现象与分子动理学理论的非平衡态理论、热力学第一定律、热力学第二定律与熵、物态与相变.

本书可作为高等院校物理类专业的教材,也可供其他专业的读者参考.

序

虽则当代科学发展的前沿未必都能在基础课教科书中得到充分的反映,但是由于学科视野的开拓和技术环境的变迁,必然会导致基础课教科书做出相应的变革,从而体现了新陈代谢的规律.

秦允豪教授在南京大学执教多年,长期承担了普通物理学中“热学”课程的任务,积累了丰富的教学经验和体会.这本经过多次修改和补充的教材就是他多年心血的结晶.一方面他力图保持我国物理教学严谨扎实的传统,另一方面也广泛吸取国外教学灵活求新的优点.这本教材的特色在于对于基本概念的阐述力求透彻清楚,层次分明,突出了规律与现象之间的联系,如书中对分子运动概念的引入,对能量均分定理的说明都可以作为例证,满足了基础课施教的要求.但它也尽可能触及一些学科发展新生长点,诸如包含耗散结构、熵与信息的关系等内容,使教材丰满充实,卓具时代气息,新颖可喜.总之,这是一本优秀的基础物理教材,值得推荐给广大的讲授或学习基础物理课的教师和学生.

冯端

1999年5月28日

编者的话

(第二版)

本书最初是1990年由南京大学出版社出版的《热学》,具有“实、新、宽、活”的特点,得到赵凯华等教授的较高评价(见第一版编者的话),并于1993年获得国家教委第三次优秀教材奖一等奖。1996年又被教育部评为“九五”国家级重点教材,教育部指定在高等教育出版社出修订版,该修订版《普通物理学教程·热学》于1999年10月同时又作为面向21世纪课程教材出版(现称它为第一版),该版于2002年被评为国家级优秀教材奖二等奖。

编者在南京大学讲授的“热学”课程,曾获得1993年江苏省优秀教学奖一等奖,是教育部理科人才培养基地的创名牌课程,该课程把课堂讲授、课堂讨论、课外阅读与科学讲座及学生小论文四者结合起来,而它们均以《热学》教材为依托,取得较好效果,得到学生好评,在2001年教育部对所有创名牌课程的评比中被评为优秀项目。

本书基本按照上世纪80年代初教育部颁布的“热学”课程教学大纲的要求编写,其教材体系与李椿、章立源、钱尚武教授编写的,于1978年出版的《热学》基本一致,其教学内容与后继课“热力学与统计物理”之间的界线比较分明,不涉及热力学关系、三种统计分布等。但又在李椿等编的《热学》基础上,进一步发展了我国物理教学严谨、扎实的传统(请见冯端院士为本书作的序),同时吸取了美国教学灵活、注重实际和创新的优点,注意热学与力、电、光、近代物理以及与天、地、生、化、气、医及工程技术学科等的现象特别是其中的新生长点间的联系,加强与科学前沿的联系,强调物理思维方法的训练,从而在“实”的基础上做到“宽、新、活”,目的是更利于学生的创新意识和创新能力培养。这样,该教材既适应新世纪对人才培养的要求,又切合我国物理教学的实际情况,不仅具有先进性,更有很好的教学适用性。加之书中内容丰富多彩的趣味性,第一版一问世即受到广大同行、专家和学生的的好评,发行量逐年扩大。现在甚至在面广量大的很多地方院校,特别是一些刚从师专升格为本科的师院及师专中使用。使用后反映较好,但也存在一些问题。

第二版主要在下述方面做了修订:

(1)为了使层次不同、生源水平不同、教学总学时不同的高校中的教师在讲授中更利于选择其中的合适内容,《热学》书分为四个层次:①以5号宋体印刷的内容为最基本的,它自成完整体系,各校的热学课中应该都讲,估计一般都能讲完;②以5号楷体印刷的内容也是十分重要的,教师可根据实际情况有选择地讲授。在目录的节或小节的标题前加“※”符号以示区别;③以小5号宋体印刷的内容一般为扩展性的,教师可略讲、不讲,也可蜻蜓点水地提一下,而主要供学生课外阅读用。在目录的节或小节的标题之前以“*”标出;④每章后面的选读材料是供学生课外阅读用的,

也可作为教师课外讲座中的选材.

(2)本版对第一版的某些内容作了节删和补充.例如,把原第六章与第七章合并称为物态和相变,删去了其中固体的大部分内容,增加了等离子态与超密态.删去一些选读材料:热辐射、地球大气结构、液氢超流动性.另外又补充了一些最新科学发现.例如介绍了先后被美国《科学》杂志列为1998年和2003年年度十大科学突破第一位的“暗能量”(也被称为“反引力力”);简单介绍了“克隆技术”等.

(3)为了节省篇幅,每章后面不做小结,而在正文中以加边框的方式把最基本的概念和公式突出出来,希望学生首先把这些内容掌握好.

(4)本书第一版中很多习题选自美英一流大学的研究生试题,新颖而生动活泼,也有一定难度,而一些较简单的习题又偏少,为了能更适于地方院校的使用,在第二版的《热学》中删去一些难题,增加了一些简单习题,对于一些仍可能较难的习题加了三角符号.本书不少思考题适于学生讨论[见第一版编者的话之(五)].与第一版相同,很多习题在书后答案之前加了提示.另外加有提示的思考题的数量增加较多,希望学生尽量独立完成解题.

(5)考虑到新世纪的教材应该以多种手段与形式,全方位地为教师和学生提供服务,使教师能更方便地教,学生学得更好,且更利于个性发展,从而构筑所谓“立体化”教材,第二版在这方面做了初步尝试,以三位一体的方式成套推出热学教材,它们是:①《热学》.②《热学习题思考题解题指导》:主要对书中习题和思考题的解题方法作指导,同时,补充部分更有新意及有一定难度的习题及解答,本书对学生的能力培养及准备研究生考试有一定帮助.③《热学课件》光盘:供教师讲课时使用,其内容与教材紧密配合,通过图像、动画、色彩等使之形象、生动、直观.采用了超级链接,使教师能在课堂上很方便地选用所需的教学内容.上述②、③将在最近几年内全部出齐.

编者希望今后对该教材再做修订,以便在形成以教学能力为目标,以传统纸质教材为基础,以“热学”课程为中心,以多媒体、多形态、多用途、多层次的教学资源和多种教育服务为内容的,结构性配套的教学出版物为集合的“立体化”教材的进程中,再跨出可喜的一步.

本版在编写出版过程中得到高等教育出版社杨祥、陈小平、胡凯飞、庞永江、董洪光等先生、陶铮女士的关心和帮助;众多院校热学教师在使用过程中提出了不少宝贵意见,编者对此表示衷心感谢.

秦允豪
2004年2月

编者的话

(第一版)

本书是在南京大学出版社 1990 年出版的《热学》教材的基础上,根据面向 21 世纪课程教材的要求,重新修订而成的,是编者多年来在南京大学讲授热学、热力学统计物理及为报考中美联合招收物理研究生(简称 CUSPEA)设置的讲座的基础上,学习中外(特别是美国)物理教学、教材改革建设的有益经验编写而成的。它既继承我国传统物理教学严谨扎实的传统,又注意改正传统教学深而窄、不太注重实际和求新的缺点,以力求体现“实、新、宽、活”四个字。《热学》教材出版后受到同行、知名专家及广大学生的好评,荣获 1995 年国家教委第三次优秀教材奖一等奖,并于 1996 年底被评为普通高等教育“九五”国家级重点教材,被教育部批准在高等教育出版社出修订版。本教材的出版也被列入教育部普通高等教育面向 21 世纪教学内容与课程体系改革项目中。

21 世纪对人才培养提出的要求是应具有较强的创新能力与能适应科技、经济飞速发展的应变能力,因而我国大学本科的人才培养模式应从专业越分越细的“专门家”转向培养宽专业口径、宽知识面、强综合知识能力与创新能力的“综合家”。本修订版按照这一指导思想对原版作了较大幅度的修改、补充,使之能在“实”(严谨扎实)的基础上更好地体现“新、宽、活、精”的特点,以便能更有利于学生创新能力与应变能力的提高。

(一)所谓“新”是指在低年级基础课中培养学生的创新意识,为创新能力的培养打下良好基础。为此,不仅要使学生对当今科技的新发现、新成就及其应用前景有所了解,而且要使他们对之产生浓厚兴趣,从中得到思想上的启迪与动力,从而产生时代紧迫感。对科技前沿的介绍,基础课教学与科普讲座不同的是,它必须与教学水平相适应。教师必须对科学前沿及高新技术中相关内容加以精选和提炼,突出其物理思想和物理思考方法,并深入浅出地讲授,使广大低年级学生都能接受。考虑到课堂上只能精讲基本概念和基本方法从而为学习打下扎实基础,所以必须处理好“实”与“新”、“精”与“泛”之间的关系。为此,编者把新教材写得更充实、新颖,对一些非基本的“新”与“宽”的内容打星号或作为选读材料,并用小字编排,在课堂讲授中可较少涉及或略讲,主要由学生课外阅读或进而安排课外讲座来解决,以便实行因材施教。在新编教材中有关科学前沿的内容有非平衡态理论(耗散结构)、宇宙膨胀、超流与稀释制冷机等。有关高新技术的内容有信息科学(熵与信息、激光是耗散结构等)、生物工程(遗传密码与生物高聚物中的信息、生物中的负熵等)。考虑到 21 世纪应力争成为人与自然和谐发展的世纪,所以应对大学生加强环保教育。为此,本书特意编排了如下环境科学的内容:温室效应、臭氧层破坏、南极 Dome A 冰盖的冰样与大气污

染、水是生命之源、树叶水分之散失等。

(二)所谓“宽”,不仅指宽专业口径及宽知识面,更要有较强的综合各学科知识的能力。学问不是单维的,而是立体或多维的。知识面广,解决问题时可资利用的工具就多,思考问题就会左右逢源、思路开阔,会起到触类旁通作用。这说明思维具有广阔性,因而在基础课教学中应适当加强本学科中各分支学科间的联系以及适当加强本学科与其他学科间的横向联系,在联系、比较、综合中培养科学思维方法,从而为创新能力的培养打下宽实的基础。教材中与天文、地质、地理、气象、化学、生物、医学等学科间联系的实例有:太阳表面温度估计、大气温度垂直递减率、地球及大气的圈层结构、大气逃逸、地幔对流、大气环流、台风及云雾的形成、热化学、化学反应动力学、表面活性剂、化学振荡、人的体温调节、冰川滑移运动等。教材中加强热学与力、电、光的联系的实例有:将欧姆定律推广于黏性流体而引入管道流阻概念、推广于热传导过程而引入热阻概念等。在经典物理中开些窗口适当地渗入某些近代物理概念利于学生更全面深入地理解基本概念,也利于今后近代物理课程中新概念的牢固树立,并激发学生的学习兴趣。如在讲授麦克斯韦分布时就讲到,在绝对零度时金属中的传导电子并非静止不动,相反以 10^6 m/s的平均速率在运动,其速度分布为费米球,并存在高达 10^{10} Pa的简并压强。“宽”还反映为本教材加强与生产技术中应用的联系。如教材中介绍了内燃机、燃料电池、冰箱与制冷机、热泵型空调、超速离心技术、多孔及多屏绝热技术、温差发电及制冷等。

“新”和“宽”采用的是“渗透法”,正如杨振宁教授指出的:“中国传统学习是一种‘透彻法’,懂得透彻很重要,但若对不能透彻了解的东西就抗拒,这不好。‘渗透法’学习的好处,一是可吸收更多的知识,二是对整个的动态有所掌握”^①。

(三)所谓“活”是指在教学中特别强调科学思维方法的训练,而它们又是以良好的思维结构——思维的广阔性、思维的深刻性与思维的灵活性为基础的

思维的深刻性即指较高水平的独立思考能力。思维的灵活性是指思维有随机应变、机动灵活的能力,是指不是孤立地、静止地、封闭地观察思考问题,而是能进行多方位、多层次的思考。现行教育中过分强调逻辑思维而忽略形象思维(或称直觉思维),重演绎法而轻归纳法,多数学推演而少联系现象,片面地强调严密性。但是,逻辑的严谨并不一定能导致科技的创新。科学发现和技术创新常首先不是在严密推理中,而首先是在想像力自由发挥中萌发的。想像力的自由发挥在思维科学中称为发散思维,它是指从多种设想出发,不按常规地寻找变异,使信息朝各种可能方向发散,从各方面寻找答案,从而引出更多信息。我国现行

① 参见:青年文摘,1995—11—25。

教育对这种训练不够重视. 本教材中的思考题有助于发展学生的科学想像力. 又如教材中的熵增加原理、玻耳兹曼分布、能量均分定理等, 均是由归纳法得到的, 而分子相对速率分布(§ 3. 6. 3)是从与麦克斯韦速率分布的对比中得到的. 思维的灵活性还反映在严密的推演与以试探性、近似性为主要特征的“模糊”思维方法这二者的灵活应用上. 对于任何实际问题, 精确只是相对的, 近似才是绝对的. 但是学生从小学到中学已形成片面追求精确的思维定势. 要培养学生的创造性思维能力, 就必须让学生学会取近似、用近似及会应用近似证法, 学会把合理的想像与逻辑推理结合起来, 把研究对象主要特征突出出来形成理想模型后再来分析讨论的方法. 从简单的典型实例(或是理想模型)入手进行分析讨论常能解决概念上的困难, 并指出新的计算步骤或近似方法, 这是科学思维和科学研究的重要方法. 书中十分强调物理模型, 多处应用近似证法. 例如均先后用两种不同物理模型来证明气体分子碰壁数及气体压强公式(§ 1. 6. 1 及 § 2. 5. 1), 虽然近似程度不同, 但最后结果相同. 书中多处用 $\overline{v^2} \approx \bar{v}^2$ 的关系来证明一些公式. 其他如数量级估计、量纲分析等物理思考方法的应用, 也能增强学生的物理洞察力(即能迅速而直接地了解有重要意义的那些关系的能力).

(四)所谓“精”是指精选经典教学内容. 对传统教学内容通过精选使之有所加强或有所削弱. 例如对某些较古老的与学科体系建立及当前科技发展及应用不甚密切的内容可不讲或少讲, 减少与中学物理的重复, 适当简化数学推演, 以便突出物理思想. 编者认为在基础物理中加强数学, 应注意加强数学建模能力(例如将实际问题抽象为物理模型, 然后再转化为数学模型去求解的能力)的培养, 而不是单纯地强调数学推演. 书中很多习题选自 CUSPEA 试题及多所一流大学的 Qualfy(美国博士生资格考试)试题, 涉猎面广、生动活泼且联系实际, 其数学运算并不复杂, 但对培养物理思考方法及数学建模能力十分有利. 编者对本书初版内容作了一些删减, 但一时还不敢跨出较大步子, 准备在今后教学实践中不断摸索改进.

(五)思考题与课堂讨论. 书中有很多的思考题是编者多年来教学经验的总结与积累, 它们能使学生针对一个个精心设计的问题进行深入而具体的思考, 有的切中概念的误区及似是而非之处, 目的是引导学生的思维发生发散, 希望学生能针对所产生的分歧进行讨论. 我国传统教学模式是教师讲、学生听, 学生缺乏充分发表个人见解及相互讨论的机会, 不像美英等国的教育放得比较松, “胡思乱想”统统鼓励. 而有些事情是要先经过“胡思乱想”的探索, 然后按部就班地去做的. 氢弹之父, 泰勒就是这样一个典型人物. 杨振宁教授说:“泰勒的物理学有一个特点, 是他有许多直觉的见解. 这些见解不一定是对的, 恐怕 90% 是错的, 不过没有关系, 只需要 10% 是对的就行了. 而他不怕他讲的见解

是错的,这给我很深的印象”^①。讨论也必须在互相帮助、相互信任的气氛中自由地、无拘无束地进行。鉴于上述考虑,编者从1984年开始至今在历届的“热学”课中均开设课堂讨论,每学期3、4次,每次2h,教师再讲评1h,讨论时不设组长,教师巡回于各小组之间启发引导。讨论题全部选自教材中思考题。以赵凯华教授为首的专家组对编者所主持的“热学课程改革与建设”成果所作的鉴定书中指出:“采用启发式、讨论式的教学方法,精心组织各教学环节,启发、引导学生独立思考,发挥学生科学想像力,针对学生长期形成的缺乏相互研讨习惯的弱点,精心设计课堂讨论。由于讨论课能启发学生积极思考,使学生能很快进入‘角色’,在讨论中又重视发挥教师启发引导作用,充分调动学生的主动性与积极性,不少学生写出了小论文。学生普遍反映,课堂讨论效果好、收获大、兴趣浓”。鉴定书中还指出:“热学课有利于学生从单纯的学习接受型向分析研究型的转变。”

全书共七章,其基本内容以大字排版,涉及“新”和“宽”的非基本内容打星号或安排在每章后面作为选读材料,均以小字排版。一般来说,按每周3学时安排讲解本书的基本内容,时间是够的。非基本内容主要供学生自学及课外阅读用,讲课教师也可选择部分内容在课内详讲、略讲或一带而过,也可作课外讲座用。考虑到物性学是物理学中将物理规律联系科技与生产实际的重要组成部分,而在普通物理中讲解物性无论是风格上还是内容上与固体物理的侧重点都不同,故编者在第六章中做了更多的充实(在课内时间不允许讲时,可供学生课外阅读之用)。辐射传热是物理教学中“三不管”的内容,但它却十分有用,而为了讲解辐射传热,必须介绍热辐射。编者在选读材料2-2中利用平均值、卡诺定理、气体分子碰壁数等概念,粗略地导出了斯特藩-玻耳兹曼定律,并引入基尔霍夫定律。

全书内容丰富,知识性、趣味性很强,初读者可仔细翻阅一下目录及书末之索引,它有助于您找到您所感兴趣的内容。全书精选了160道思考题、近200道习题及45道例题,书后除给出答案外,对部分思考题及较难的习题还有提示,希望学生只是在解题确实十分困难的情况下才去查看提示,这样才有助于您解题水平的提高。书中有较详实的各种数据表,在书后附录中有这些数据表的索引。附录中还列出了一些物理常量及有关太阳系、银河系、宇宙的数据。

编者在本书初版与修订版编写出版过程中始终得到中国物理学会前理事长冯端院士与中国物理学会副理事长兼教学委员会主任赵凯华教授的指导、关怀与支持。他们在编者的改革尝试——1986年编写的讲义——出台后立即给予首肯,使编者有足够的勇气将教材日趋完善,并顺利出版。冯端院士在百忙之际

① 参见:杨振宁.读书教学四十年.高能物理,1985—2—2.

还为本书撰写了序言。编者对两位德高望重的老师、前辈的感激之情难于言表。北京大学包科达教授、西安交通大学吴寿煌教授、复旦大学李洪芳教授、武汉大学陈端刚教授、华东理工大学卢民强教授、石油大学(华东)丁有瑚教授及南京大学龚昌德、徐龙道、柯善哲教授等审阅了修订版的书稿,提出了十分宝贵的意见。在初版、修订版出版过程中又得到了北京大学高崇寿,复旦大学贾起民,北京师范大学漆安慎,中山大学罗蔚茵,四川大学吴瑞贤,兰州大学高崇伊,高等教育出版社钟金城、杨祥、陈小平,南京大学蒋树声、冯致光、许敖敖、欧阳容百、李曾沛、朱劲松、金国钧及南开大学常树人等诸位教授或编审的关心与支持,他们提出了不少宝贵意见。编者对上述同志表示衷心的感谢。由于编者水平有限,编写及成书时间十分匆促,书中定有不少错误、不当、遗漏之处,敬请读者批评指正。

编者

1999年6月于南京大学

编者的话

(1990年版)

本书是编者多年来在南京大学讲授热学、热力学与统计物理及在为报考中美联合招收物理学研究生(CUSPEA)设置的讲座的基础上,参阅不少国外优秀教材、有关专著及大量研究生试题(主要是美国博士生资格考试 Qualify 试题)以及 CUSPEA 试题,学习了兄弟院校教材建设经验后编写而成的。

编者认为,与国外(主要是美、英)大学物理教学特点相比较,我国基础物理教学严谨扎实,深而窄,但不太注重实际和求新。为此,编者在本书编写中作了改革尝试,力求体现实、新、宽、活四个字。

“实”是指进行扎实而系统的基础训练。如本书对一些难点(分子动理论中某些内容及热力学第二定律的微观意义等)做了更深入细致的处理。“新”是指将科技新发展与教学水平相适应的内容,深入浅出地、有机地结合到教材中。

“宽”是指使学生有较宽的知识面,较强的综合知识能力。为此加强基本规律与天文、化学、生物、地质、气象及工程技术中物理现象的联系。在联系、比较、综合中培养学生的科学思维方法。“活”是指培养学生具有较高的独立思考和创造性思维的能力。例如强调利用物理模型来分析讨论问题,是培养学生物理思考方法的十分重要的手段,这对普通物理的学习尤为重要。书中有些内容看来与热力学统计物理有些重复,但本书从更为简化的物理模型出发进行分析,显得数学处理简单,物理图像清晰,它更利于概念的理解掌握及物理思考方法的培养。又如取近似、近似证法、数量级估计、量纲分析方法等,是把逻辑推理与合理想像结合起来,把研究对象主要特征突出来形成理想模型,去计算、证明的一些十分有用的方法。书中有不少这方面的实例介绍及有关习题。编者从国外优秀教材、CUSPEA 试题、Qualify 试题中精选后在书中安排了 200 多个习题,组织了近 200 个思考题。这些题目比较生动活泼,富有启发性。

全书分 7 篇、31 章。有些篇相当于传统教材中的章,有些章相当于传统教材中的节,非基本内容的各章、节均打上星号,这样既保持结构紧凑,又能适应不同需要,为教师的教与学生的学提供较大的灵活性。由于编者水平有限,加之在改革尝试中经验不足,书中定有许多错误不当之处,敬请读者批评指正。

本书在编写和出版过程中得到了北京大学赵凯华、章立源,南京大学冯端、龚昌德、冯致光、欧阳容百等诸位教授,高等教育出版社钟金城、杨祥以及金国钧、张文渊等诸同志的帮助和支持。本书责任编辑李曾沛同志对全书作了多次全面仔细的审阅、订正,作了大量的编辑工作。编者对上述同志表示衷心的感谢。

编者

1990年8月于南京大学

目 录

第一章 导论	1
§ 1.1 宏观描述方法与微观描述方法	1
§ 1.1.1 热学的研究对象及其特点	1
§ 1.1.2 宏观描述方法与微观描述方法	1
§ 1.2 热力学系统的平衡态	3
§ 1.2.1 热力学系统	3
§ 1.2.2 平衡态与非平衡态	4
§ 1.2.3 热力学平衡	5
* § 1.2.4 非平衡态的宏观描述	6
§ 1.3 物态方程	6
§ 1.3.1 物态方程	6
§ 1.3.2 体膨胀系数、压缩系数、压强系数 热膨胀现象	7
§ 1.3.3 理想气体物态方程	10
§ 1.3.4 混合理想气体物态方程	11
§ 1.4 温度与温度计	12
§ 1.4.1 温度	12
§ 1.4.2 热力学第零定律	12
§ 1.4.3 温标	13
* § 1.4.4 实用温度计简介	18
§ 1.5 物质的微观模型	21
§ 1.5.1 物质由大数分子组成	21
§ 1.5.2 分子热运动的例证——扩散、布朗运动与涨落现象	22
§ 1.5.3 分子间的吸引力与排斥力	26
§ 1.6 理想气体微观描述的初级理论	28
§ 1.6.1 理想气体微观模型	28
§ 1.6.2 单位时间内碰在单位面积器壁上平均分子数 $\Gamma \approx n \bar{v}/6$	30
§ 1.6.3 理想气体压强公式 压强的单位换算	31
§ 1.6.4 温度的微观意义	33
§ 1.7 分子间作用力势能与真实气体状态方程	35
§ 1.7.1 分子间互作用势能曲线	36
§ 1.7.2 分子碰撞有效直径、固体分子热振动、固体热膨胀	37
§ 1.7.3 范德瓦耳斯方程	40
* § 1.7.4 昂内斯方程	43

* § 1.7.5 几种典型的分子作用力势能曲线	44
选读材料 1.1 b 是分子固有体积的 4 倍的证明	45
选读材料 1.2 摩擦力也来源于分子力	46
思考题	46
习题	48
第二章 分子动理学理论的平衡态理论	52
* § 2.1 分子动理学理论与统计物理学	52
§ 2.2 概率论的基本知识	53
§ 2.2.1 伽尔顿板实验	53
§ 2.2.2 等概率性与概率的基本性质	54
§ 2.2.3 平均值及其运算法则	56
§ 2.2.4 均方偏差	57
§ 2.2.5 概率分布函数	58
§ 2.3 麦克斯韦速率分布	60
* § 2.3.1 分子射线束实验	60
§ 2.3.2 麦克斯韦速率分布	62
§ 2.4 麦克斯韦速度分布	66
§ 2.4.1 速度空间	66
§ 2.4.2 麦克斯韦速度分布	68
* § 2.4.3 相对于 v_p 的(麦克斯韦)速度分量分布与速率分布·误差函数	70
* § 2.4.4 从麦克斯韦速度分布导出速率分布	71
* § 2.4.5 $T=0$ K 时金属中自由电子的速度分布与速率分布(费米球)	72
* § 2.5 气体分子碰壁数及其应用	73
§ 2.5.1 由麦克斯韦速度分布导出气体分子碰壁数及气体压强公式·* 筒并压强	74
* § 2.5.2 泻流及其应用(热分子压差、分子束技术及其速率分布、同位素分离、 热电子发射、大气逃逸、行星大气、太阳风)	77
§ 2.6 外力场中自由粒子的分布·玻耳兹曼分布	81
§ 2.6.1 等温大气压强公式·* 悬浮微粒按高度分布	81
* § 2.6.2 旋转体中粒子径向分布·* 超速离心技术·台风、飓风、龙卷风	83
* § 2.6.3 玻耳兹曼分布	85
§ 2.7 能量均分定理	86
§ 2.7.1 理想气体热容	86
§ 2.7.2 自由度与自由度数目	87
§ 2.7.3 能量均分定理	90

* § 2.7.4	能量按自由度均分的物理原因	92
* § 2.7.5	能量均分定理用于布朗粒子	93
* § 2.7.6	能量均分定理的局限 · * 自由度的冻结	93
* § 2.7.7	固体的热容 · 杜隆-珀蒂定律	95
附录 2.1	一些定积分公式	97
选读材料 2.1	子系温度与负温度	98
思考题	99
习题	101
第三章	输运现象与分子动理学理论的非平衡态理论	106
§ 3.1	黏性现象的宏观规律	106
§ 3.1.1	牛顿黏性定律 层流 * 湍流与混沌	106
§ 3.1.2	泊肃叶定律 · * 管道流阻	111
§ 3.1.3	斯托克斯定律 · * 云、雾中的水滴	113
§ 3.2	扩散现象的宏观规律	114
§ 3.2.1	菲克定律 · * 自扩散与互扩散	114
* § 3.2.2	看作布朗粒子运动的扩散公式 · $\overline{x^2} = 2Dt$	118
§ 3.3	热传导现象的宏观规律	118
§ 3.3.1	傅里叶定律 · * 线性输运与非线性输运	119
* § 3.3.2	热欧姆定律	121
* § 3.3.3	多孔绝热技术	122
* § 3.4	辐射传热	123
§ 3.4.1	热辐射 · 辐射传热	123
§ 3.4.2	温室防辐射传热	124
§ 3.4.3	空腔辐射传热 · 人体辐射热损失	124
* § 3.5	对流传热	126
§ 3.5.1	自然对流 · * 大气环流 · * 人的体温调节	126
* § 3.5.2	牛顿冷却定律 · * 集成电路的散热	128
* § 3.5.3	两相对流传热 · 热管	129
§ 3.6	气体分子平均自由程	130
§ 3.6.1	碰撞(散射)截面	130
§ 3.6.2	分子间平均碰撞频率	131
* § 3.6.3	气体分子间相对运动速率分布	133
§ 3.6.4	气体分子平均自由程	134
* § 3.6.5	化学反应动力学 · 催化剂与酶	135
* § 3.7	气体分子碰撞的概率分布	137

§ 3.7.1 气体分子的自由程分布	138
* § 3.7.2 气体分子碰撞时间的概率分布	139
§ 3.8 气体输运系数的导出	140
§ 3.8.1 气体黏性系数导出	140
§ 3.8.2 气体热传导系数与扩散系数	143
§ 3.8.3 与实验结果比较	145
§ 3.9 稀薄气体中的输运过程	147
* § 3.9.1 稀薄气体的特征	147
§ 3.9.2 稀薄气体中的热传导现象及*黏性现象、*扩散现象	148
选读材料 3.1 量纲分析法简介	152
选读材料 3.2 耗散结构	154
选 3.2.1 贝纳尔对流·地幔对流	154
选 3.2.2 化学振荡	156
选 3.2.3 自组织现象	157
选 3.2.4 失稳、涨落、结构的出现	157
选 3.2.5 耗散结构与填平热力学与生物学间的鸿沟	158
选 3.2.6 激光与耗散结构	159
选 3.2.7 协同论	160
思考题	160
习题	161
第四章 热力学第一定律	165
§ 4.1 可逆与不可逆过程	165
§ 4.1.1 准静态过程	165
* § 4.1.2 弛豫时间	167
§ 4.1.3 可逆与不可逆过程	168
§ 4.2 功和热量	170
§ 4.2.1 功是力学相互作用下的能量转移	170
§ 4.2.2 体积膨胀功	171
§ 4.2.3 其他形式的功	173
§ 4.2.4 热量与热质说	175
§ 4.3 热力学第一定律	177
§ 4.3.1 能量守恒与转换定律	177
§ 4.3.2 内能定理	178
§ 4.4 热容与焓	180
§ 4.4.1 定体热容与内能	180

§ 4.4.2	定压热容与焓	181
* § 4.4.3	化学反应中的反应热、生成焓及赫斯定律	182
§ 4.5	第一定律对气体的应用	184
§ 4.5.1	理想气体内能·焦耳实验	184
§ 4.5.2	理想气体的等体、等压、等温过程	186
§ 4.5.3	绝热过程	187
* § 4.5.4	大气温度绝热递减率	192
* § 4.5.5	气体声速公式	195
§ 4.5.6	多方过程	196
§ 4.6	热机	201
§ 4.6.1	热机·* 蒸汽机	201
§ 4.6.2	卡诺热机	203
* § 4.6.3	内燃机循环	205
§ 4.7	焦耳-汤姆孙效应与制冷机	209
§ 4.7.1	制冷循环与制冷系数	209
§ 4.7.2	焦耳-汤姆孙效应	210
§ 4.7.3	气体压缩式制冷机	213
* § 4.7.4	热泵型空调器	214
选读材料 4.1	宇宙大爆炸与宇宙膨胀	215
选 4.1.1	宇宙是有限的还是无限的?	215
选 4.1.2	爱因斯坦的静态宇宙模型	215
选 4.1.3	宇宙膨胀、哈勃定律和宇宙大爆炸	216
选 4.1.4	宇宙是“开放的”还是“关闭的”?	217
选 4.1.5	暗能量——名列 2003 年 10 大科学突破榜首	217
选 4.1.6	宇宙年龄	218
选 4.1.7	热宇宙模型	218
思考题		220
习题		222
第五章	热力学第二定律与熵	227
§ 5.1	热力学第二定律的表述及其实质	227
§ 5.1.1	热力学第二定律的两种表述及其等效性	227
* § 5.1.2	利用两种表述判别可逆、不可逆	229
§ 5.1.3	利用四种不可逆因素判别可逆、不可逆	231
§ 5.1.4	热力学第二定律的实质·热力学第二定律与热力学第一定律、热力学 第零定律的比较·可用能·* 超流体	232

§ 5.2 卡诺定理	234
§ 5.2.1 卡诺定理 · * 不可能性与基本定律	234
* § 5.2.2 卡诺定理的应用	237
* § 5.2.3 热力学温标	239
§ 5.3 熵与熵增加原理	240
§ 5.3.1 克劳修斯等式	240
§ 5.3.2 熵和熵的计算	242
§ 5.3.3 温-熵图	245
§ 5.3.4 熵增加原理	247
* § 5.3.5 热寂说	250
* § 5.3.6 “熵恒增”与“能贬值”·“最大功”与“最小功”	251
§ 5.3.7 热力学第二定律的数学表达式	252
* § 5.3.8 熵的微观意义 · 玻耳兹曼关系	253
选读材料 5.1 热力学第二定律的统计解释	257
选 5.1.1 宏观状态与微观状态	257
选 5.1.2 热力学第二定律的微观解释	259
选读材料 5.2 熵与信息	261
选 5.2.1 信息与信息量	261
选 5.2.2 信息熵	262
选 5.2.3 麦克斯韦妖	263
选 5.2.4 信息处理消耗能量的下限	264
选读材料 5.3 生命“赖负熵为生”	264
选 5.3.1 遗传密码 · 生物高聚物中的信息 · 克隆技术	264
选 5.3.2 生物中的负熵(流)	266
思考题	267
习题	269
第六章 物态与相变	272
§ 6.1 物质的五种物态	272
§ 6.1.1 引言	272
* § 6.1.2 固态	272
* § 6.1.3 超密态物质(白矮星、中子星、黑洞)	276
* § 6.1.4 等离子态	277
* § 6.2 液体	278
§ 6.2.1 液体的微观结构	278
§ 6.2.2 液体的彻体性质	281