美国物理试题与解答

第五卷　热力学与统计物理学

中国科学技术大学物理辅导班　主编

郑久仁　审校

中国科学技术大学出版社

1986·合肥

内 容 提 要

《美国物理试题与解答》丛书按学科范畴分为七卷。该丛书收集了美国加利福尼亚大学伯克利分校、纽约州立大学布法罗分校、芝加哥大学、哥伦比亚大学、麻省理工学院、普林斯顿大学和威斯康星大学的研究生入学试题，以及丁肇中博士招收的高能实验物理博士研究生试题2550道。同时收集1980—1985年中国赴美物理硕士、博士入学资格考试（CUSPEA）物理试题100道，并逐一作了解答。这些试题面广义新，思路灵活，所用的数学工具虽不繁难，但却十分注重物理思想和实际应用，其方法和结论往往较为简单和实用。在一定程度上反映了美国物理教学的精华，对我国的物理教学也有借鉴和启迪作用。

本卷收集热力学与统计物理学试题367道。可供我国大学物理系师生使用，对于准备攻读硕士、博士学位的研究生和留学生，更是一本难得的参考书，对于中学物理教师的进修，也有一定的参考价值。

美国物理试题与解答

第五卷　热力学与统计物理学

中国科学技术大学物理辅导班　主编

郑久仁　审校

责任编辑：江奕有　封面设计：何燕明

*

中国科学技术大学出版社出版

（安徽省合肥市金寨路24号）

中国科学技术大学印刷厂印刷

安徽省新华书店发行　各地新华书店经售

*

开本：787×1092毫米 1/32　印张：$12\frac{3}{16}$　字数：272千

1986年5月第一版　1986年5月第一次印刷

印数：1－5000册

统一书号：13474·5　定价：2.50元

序

这套习题集，是从美国各大学物理系的教学及考试材料中筛选而来的。编辑它的目的是为了给从事物理教学的老师以及学习物理的学生提供一份较完整的美国物理习题素材。所谓完整，有两方面的含义：一是包含基础物理的各门课程的习题；一是较全面地整理了美国物理教学的用题．因此，这套集子可以直接用于教学，也可以用来研究美国的物理教学内容更新的趋势．无疑，这两种功效，都有助于我们的物理教学跟上物理前沿的发展。

在各种科学著作中，习题集的地位可能是“最低”的了．因为，它不是教科书。不是论文集，更不是专著。几乎没有因编习题集而出名的作者。这本习题集的原始材料尽管来自美国，但编辑、整理、作解答等工作仍是十分繁重的．中国科学技术大学许多物理教师为此付出了大量的劳动。这些劳动苦而无“名”，但却是很有价值的。

作习题是学习过程中的一环，对于学习数学、物理来说，更是必不可少的一环。许多科学大师都曾津津乐道于他们早年在习题中的受益。虽然作习题本身不是科学研究，但它对研究能力的养成，却有重要作用。索末菲曾写信给他的学生海森堡，告诫他：

> 要勤奋地去做练习，只有这样，你才会发现，哪些你理解了，哪些你还没有理解。

杨振宁也曾如下回忆他的大学学习：

> 西南联大教学风气是非常认真的，我们那时所念的课，一般老师准备得很好，学生习题做得很多。

的确，“勤奋地去做练习”、“习题做得很多”，往往是达到成功的一个阶梯。正是由于这一点，许多教师愿意将自己的精力和心血用在这似乎是“最低”的工作上。

第一个教师节刚刚过去。我想，对于一题一题地编辑和整理的教师来说，他们所在意的并不是目前的“最低”或“最高”，只要用过这本习题集的学生，以后也有类似于上述那样的回忆，那么，编辑习题的劳动，就算有了最大的慰籍。

方励之

1985年9月18日

前　　言

习题是锻炼思维的体操，而试题又往往是习题中的精粹。解答物理题是物理课程学习中必要而又重要的环节。

这套《美国物理试题与解答》是一部丛书，分七卷。各卷名称及审校人如下：第一卷，力学（强元棨、顾恩普、程稼夫、李泽华、杨德田）；第二卷，电磁学（赵叔平、尤峻汉、朱俊杰）；第三卷，光学（白贵儒、郭光灿）；第四卷，原子物理学、核与粒子物理学（杨保忠、金怀诚）；第五卷，热力学与统计物理学（郑久仁）；第六卷，量子力学（张永德、范洪义、朱栋培）；第七卷，固体物理学与综合题（张家铝、周又元、章世玲）。《丛书》大体上包括了大学物理课程的全部内容。

《丛书》从美国七所大学近十年来研究生入学试题（包括 Qualifying Eant）以及其它几类试题共3100道中，筛选了2550道，除个别题外我们均给了解答。试题来源及其代号是：哥伦比亚大学（Col）；加利福尼亚大学伯克利分校(Ber)；麻省理工学院（MIT）；威斯康星大学（Wis）；芝加哥大学（Chi）；普林斯顿大学（Pri）；纽约州立大学布法罗分校（Buf）；中美联合招收赴美攻读物理博士生考试试题（CUSPEA）；丁肇中招收实验高能物理博士生试题（CCT）。

一般地说，美国的物理试题，涉及的数学并不繁难，但却或多或少具有以下三方面的特色：内容新颖，富于“当代

感”；思路灵活，涉及面宽阔；方法和结论往往简单而实用。一些题分别涉及了不少新兴课题和边沿交叉区域；有不少题是拟题者直接从科研工作中摘取的；再有不少题本身似乎显得粗糙但却抓住了物理本质，显得“物理味”很足。纵观这些，我们深切地感到，这些题目的集合在一定程度上体现了美国科学文化的个性及其思维方式上的特色。

维其如此，我们认为，不惮繁重，集近百人的努力，将它们收集后一一解答是值得的。它们也许会对我国大学和研究生物理学科的教学和赴美考试起到一定的参考作用，对推动我国大学物理教学更新起到一点促进作用。

参加这套丛书解题的人数很多，其中主要的共 70 余人，参加各卷审校的共 19 名。为向读者负责，每道题后均注明了解题人的姓名。

编审中，我们仅删去了部份很常见、很平淡的题以及一些没有什么意义的题（后者比如，纽约年平均气温是多少等等）。同时，为了节省篇幅，不得不放弃了英文原题。

由于丛书篇幅大、涉及面广、参加解答和审校的人多、工作时间短，加之我们水平有限，因此，错误或不当之处在所难免，请读者批评指正。

本卷收集试题 367道，其中第一篇 159道（含部份热学试题），第二篇 208 道（含部份气体分子运动论试题）。按试题内容及解题所用的物理思想与方法，每篇各分五节。

本卷所收的试题，就其内容深度而言，包含于我国大学热力学与统计物理通用教材之内；但就其广度、灵活性而言，已超出我们所常见。特别是它引进、吸收了部份当代科研成果，因而这将不仅有利于学习已经成熟的理论和知识，而且能开阔思路、活跃学术气氛，有利于促进教学与科研相

结合。

承担本卷解题任务的有冯平、王海达、张正平、姚德~~明~~凡及贾云发等同志。本卷审校工作得到了我校多位教师的热忱帮助，谨致谢意。

编审者谨识

1985年12月20日

目　录

第一篇　热力学

§1　热力学状态与第一定律(1001—1030)

1001 (Wis, 1971)

简述下列各仪器测量温度的基本原理，并用一句话说出每种仪器的特点：等容气体温度计；温差电偶温度计；热敏电阻温度计。

解：等容气体温度计：根据当气体体积保持不变时压强随温度变化的原理制成的.可用于逼近理想气体温度计.**温差电偶温度计**：根据热电动势随温度的变化规律制成的.热电动势与温度的关系为 $\varepsilon=a+bt+ct^2+dt^3$。其中 ε 为电动势，t 为温差，a,b,c，及 d 为常数。温差电偶温度计的测量范围较宽，它能测量 −200℃ 至 1600℃ 的温度，并在 630.74℃ 到 1064.43℃范围作为实用的标准温度计。**热敏电阻温度计**：通过测量金属丝的电阻来测量温度。用纯铂丝作成的电阻温度计，其精度很高，且量温范围广，经常在 13.81K至903.89K范围作为标准温度计。　　　　(王海达)

1002 (Wis, 1976)

简述三种精确测温仪器，它们的温度适用范围及每种仪

器的一大优点。至少须包括一种能测量温度低至1K的仪器。

解：1. 磁温度计：磁温度计的原理是基于磁化率与温度的关系（居里定律）$\chi=\frac{C}{T}$，其中，χ为磁化率，C为常数。它的优点是能测1K以下的温度。**2.光测高温计**：其原理是根据测得的高温物体所辐射的热量，再应用辐射公式推算出高温物体的温度。原则上，它能测任意高的温度。测量时，不直接与所测物体接触，因而多用于测量星体的温度。**3. 蒸气压温度计**：蒸气压温度计是一种测低温的温度计。它的原理是根据这样的事实，即一个化学纯的物体的饱和蒸气压与它的沸点有一定关系。假如这个关系已先知，就可用量气压的办法来确定温度。它可测至14K的低温，它是测量低温的较为常用的温度计。 （王海达）

1003（Wis, 1976）

总厚度为x的一双金属片(图1.1)，在温度T时是直的，当加热至$T+\Delta T$时，此双金属片的曲率半径R是多少？已知此两金属的线膨胀系数分别为α_1与α_2($\alpha_2>\alpha_1$)，可假设两金属片的厚度都是$x/2$，$x\ll R$。

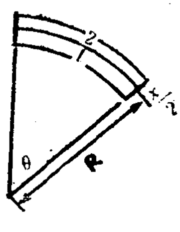


图1.1

解：设原长度为l_0，则加温后两金属片的中心线的长度分别为

$$l_1=l_0(1+\alpha_1\Delta T), \qquad (1)$$

$$l_2=l_0(1+\alpha_2\Delta T). \qquad (2)$$

设曲率半径为R，金属片的张角为θ，忽略厚度的变化，则有

$$l_2=\left(R+\frac{x}{4}\right)\theta,\quad l_1=\left(R-\frac{x}{4}\right)\theta,$$

$$l_2-l_1=\frac{x}{2}\theta=\frac{x}{2}\,\frac{l_1+l_2}{2R}=\frac{xl_0}{4R}\,[2+(\alpha_1+\alpha_2)\Delta T].\tag{3}$$

由（1），（2）两式得

$$l_2-l_1=l_0\Delta T(\alpha_2-\alpha_1),\tag{4}$$

由(3)，(4)即得

$$R=\frac{x}{4}\,\frac{[2+(\alpha_1+\alpha_2)\Delta T]}{(\alpha_2-\alpha_1)\Delta T}.$$

（王海达）

1004（Wis，1970）

一理想气体起初被限制在体积为 V_1+V_2 的绝热容器的 V_1 部分，容器的剩余部分是空的(图 1.2).当隔板抽掉后，气体膨胀而充满整个容器。如果气体的初始温度为 T，求它的终了温度。

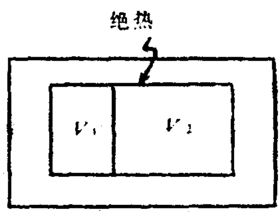


图1.2

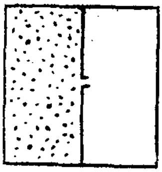
解：这是一个理想气体的绝热自由膨胀过程，内能不变，因而温度不变，即终了温度仍为T。

（王海达）

1005（Col，1981）

有一个孤立的容器，被分成左右两半(图 1.3)。起初左半部装有温度为 T_0 的理想气体，右半部是空的。如果在隔

板上开一个小孔，求达到平衡时的温度。



解：开孔以后，气体将不断地泻入右半部，最后达到平衡，由于内能不变，而理想气体的内能只决定于温度，故平衡时温度不变，仍为 T_0。　　　　（姚德民）

图1.3

1006（Ber，1977）

定义热容量 C_v，并从热力学第一定律给出一个铜币的比热。对所要用的参量，尽可能估计其准确值。

解：$C_v=\left(\dfrac{dQ}{dT}\right)_v$，铜的原子量是 64，一个铜币估计为 32克，即 0.5mol，于是 $c_v=0.5\times3R=13(\mathrm{J/K})$.（冯　平）

1007（Col，1975）

选择最佳数值。花岗岩的比热为 0.002，0.2，20，2000 cal/(g·K)。

解：花崗岩主要成份是 $CaCo_3$，其分子量为100。这样，花崗岩的比热 $c\approx3R/100\approx0.25\mathrm{cal/(g\cdot K)}$。因而最佳数值应选0.2cal/(g·K)。　　　　（姚德民）

1008（Ber，1975）

图 1.4 是用 Clement 和 Desormes 的方法测量比热比 c_p/c_v 的装置.有一合适容积（如几升)的瓶子 G,装有阀门H 和压力计 M。从读数 h 可知瓶内外的压力差。瓶内充满待测量的气体，其压力略高于环境压力，使阀门关闭，静置瓶子

使瓶内气体与环境达到热平衡，这时压力计读数为h_i。然后短暂地开启一下阀门，使瓶内压力达到环境压力即可（即$h=0$），关闭阀门，等气体重新与环境达到热平衡时，压力计读数为h_f。从h_i和h_f便可求得c_p/c_v。(a)由上述实验得到的h_i和h_f值，求c_p/c_v；(b)假设讨论的是氧气，在$t=20$℃时，c_p/c_v的理论值是多少？

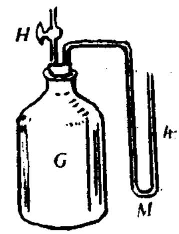


图1.4

解：(a)理想气体状态方程$pV=nkT$，瓶内气体的初、终态的T、V相同，故$p_f/p_i=n_f/n_i$，而$n_f/n_i=V/V'$，其中V'为初态瓶内气体绝热膨胀到压力为p_0时的体积，因而有

$$\frac{V}{V'}=\left(\frac{p_0}{p_i}\right)^{\frac{1}{\gamma}},\qquad \frac{p_f}{p_i}=\left(\frac{p_0}{p_i}\right)^{\frac{1}{\gamma}},$$

$$\gamma=\frac{\ln\frac{p_i}{p_0}}{\ln\frac{p_i}{p_f}}=\frac{\ln\left(1+\frac{h_i}{h_0}\right)}{\ln\left(1+\frac{h_i}{h_0}\right)-\ln\left(1+\frac{h_f}{h_0}\right)}$$

由于$\frac{h_i}{h_0}\ll1$，　$\frac{h_f}{h_0}\ll1$，故　$\gamma=\frac{h_i}{h_i-h_f}$。

(b) 氧气是双原子分子，$t=20$℃时，只有平动和转动对比热有贡献，故$c_v=\frac{2}{5}R$，　$c_p=\frac{7}{2}R$，　$\gamma=\frac{7}{5}$。（冯平）

1009 (Buf, 1983)

(a)以热力学第一定律和c_p、c_v的定义为出发点，证

明：$c_p-c_v=\left[p+\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T\right]\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$，其中，$c_p$ 和 c_v 分别为每摩尔物质的定压比热和定容比热，u 和 V 是每摩尔物质的能量和体积。(b) 利用上面的结果和表达式 $p+\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T=T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$，求 Van der Waals 气体 $\left(p+\frac{a}{V^2}\right)(V-b)=RT$ 的比热差 c_p-c_v。用所得结果证明，在定压 p 下，当 $V\to\infty$ 时，得到理想气体的比热差。

解：(a) 由 $H=U+pV$，得

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p=\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_p+p\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$$

取 $U=U[T,V(T,p)]$，则上式可写为

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p=\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v+\left[p+\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T\right]\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$$

因而有，$c_p-c_v=\left[p+\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T\right]\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$。

(b) 对范氏气体：$(\partial p/\partial T)_V=R/(V-b)$，

$$(\partial V/\partial T)_p=R\Big/\left[\frac{RT}{V-b}-\frac{2a(V-b)}{V^3}\right],$$

因而有 $c_p-c_v=\dfrac{R}{1-2a(1-b/V)^2\Big/VRT}$，

当 $V\to\infty$，则 $c_p-c_v\to R$。这正是理想气体的结果。

（张正平）

1010 (Wis, 1972)

一摩尔服从范德瓦尔斯状态方程的气体，如果它的内能

由式 $u=cT-\frac{a}{V}$（V 为摩尔体积，a 是状态方程的常数之一，c 为常数）给出，计算摩尔热容量 C_v和C_p。

解：$C_v=\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v=C$，

$$C_p=\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p+p\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p=\left(\frac{\partial u}{\partial V}\right)_V+\left[\left(\frac{\partial u}{\partial V}\right)_T\right.$$

$$\left.+p\right]\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p=C+\left(\frac{a}{V^2}+p\right)\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p,$$

由范德瓦尔斯方程

$$\left(p+\frac{a}{V^2}\right)(V-b)=RT,$$

求得

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p=R\Big/\left(p-\frac{a}{V^2}+\frac{2ab}{V^3}\right).$$

因此

$$C_p=C+\frac{R\left(p+\frac{a}{V^2}\right)}{p-\frac{a}{V^2}+\frac{2ab}{V^3}}=C+\frac{R}{1-\frac{2a(V-b)^2}{RTV^3}}.$$

（王海达）

1011（Wis，1981）

一固体的密度为ρ，质量为M，线膨胀系数为α，证明在压强 p 时热容量 C_p与C_v之间有如下关系：

$$C_p-C_v=3\alpha\frac{M}{\rho}p.$$

证：由热力学第一定律 $dQ=dU+pdV$ 及对于固体 $\left(\frac{dU}{dT}\right)_p \approx \left(\frac{dU}{dT}\right)_v$，得

$$C_p-C_v=\left(\frac{dQ}{dT}\right)_p-\left(\frac{dU}{dT}\right)_v=p\frac{dV}{dT}. \qquad (*)$$

由线膨胀系数的定义 $\alpha=\alpha_{体}/3=\frac{1}{3V}\frac{dV}{dT}$，得

$$\frac{dV}{dT}=3\alpha V=3\alpha\frac{M}{\rho}.$$

将此式代入(*)式，最后得

$$C_p-C_v=3\alpha\frac{M}{\rho}p.$$

（王海达）

1012（Wis，1972）

一摩尔单原子分子理想气体：(*a*)在等温下，(*b*)在等压下，从初始温度 T_0 及体积 V_0 膨胀到体积 $2V_0$。对每种情况计算此膨胀过程中对外作的功及所吸收热量。

解：(*a*)等温情况，对外所做的功为

$$W=\int_A^B pdV=RT_0\int_{V_0}^{2V_0}\frac{dV}{V}=RT_0\ln 2.$$

内能的变化为零，因此体系从外界吸收的热量为

$$Q=W=RT_0\ln 2.$$

(*b*) 等压情况，对外所做的功为

$$W=\int_{V_0}^{2V_0}pdV=pV_0=RT_0.$$

内能增加 $\Delta U=C_v\Delta T=\frac{3}{2}R\Delta T=\frac{3}{2}p\Delta V=\frac{3}{2}pV_0=\frac{3}{2}RT_0$.

因此从外界吸收的热量为

$$Q=\Delta U+W=\frac{5}{2}RT_0. \qquad \text{（王海达）}$$

1013（Wis，1974）

对一个室温下的双原子分子理想气体，在等压膨胀及等温膨胀情况下，分别计算出系统对外所作的功与从外界吸收的热量之比。

解：对于等压过程：

设压强为P，体积从V_1增至V_2，温度从T_1变为T_2，则

$$\begin{cases} pV_1=nRT_1, \\ pV_2=nRT_2, \end{cases} \qquad \text{或} \begin{cases} T_1=\dfrac{pV_1}{nR}, \\ T_2=\dfrac{pV_2}{nR}. \end{cases}$$

在此过程中，体系对外作功$W=p(V_2-V_1)$。体系内能的增加为

$$\Delta U=C_v\Delta T=\frac{C_v p}{nR}(V_2-V_1),$$

因此

$$\frac{W}{Q}=\frac{W}{\Delta U+W}=\frac{nR}{C_v+nR}=\frac{2}{7}.$$

对于等温过程：内能不变，因此

$$\frac{W}{Q}=1. \qquad \text{（王海达）}$$

1014（Wis，1971）

一个为压缩氦气而设计的压缩机用来压缩空气时出现了