



全国奥赛领队担纲 著名高级教练主笔

高中物理竞赛 培训教材

高二分册

主 编 舒幼生 钟小平
副主编 葛伯军 王 栩



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

高中各学科竞赛同步辅导培训教材

全国青少年信息学联赛培训教材（初赛篇）

全国青少年信息学联赛培训教材（复赛篇）

高中数学竞赛培训教材（高一分册）

高中数学竞赛培训教材（高二分册）

高中数学竞赛培训教材（高三分册）

高中物理竞赛培训教材（高一分册）

高中物理竞赛培训教材（高二分册）

高中化学竞赛培训教材（高一分册）

高中化学竞赛培训教材（高二分册）

高中生物竞赛培训教材（全一册）

ISBN 978-7-308-04027-3



9 787308 040273 >

定价：20.00 元

高中物理竞赛培训教材

(高二分册)

主 编	舒幼生	钟小平	
副主编	葛伯军	王 栩	
编 委	葛伯军	王 栩	何尧荣
	张小娟	毛朝亮	陈明华
	钟小平		

浙 江 大 学 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

高中物理竞赛培训教材. 高二分册 / 舒幼生, 钟小平
主编. —杭州: 浙江大学出版社, 2005. 1(2007 重印).
ISBN 978-7-308-04027-3

I. 高... II. ①舒... ②钟... III. 物理课—高中—
教学参考资料 IV. G634. 73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 117168 号

出版发行 浙江大学出版社
(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)
(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)
(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 杨晓鸣 姜 悦
排 版 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷 杭州富阳育才印刷有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 16.75
字 数 380 千字
版 次 2005 年 1 月第 1 版 2007 年 9 月第 4 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-04027-3
定 价 20.00 元

编写说明

每年一度的全国中学生物理竞赛愈来愈普及,其目的是激发广大中学生学习物理的兴趣和热情,通过竞赛发现和培养一批物理学苗子。要做到这一点,就必须遵照循序渐进的教学原则和辅导方法。“高中物理竞赛培训教材”(高一、高二共两个分册)就是以此为出发点而编写的一套培训教材。

教材在构思和编写过程中,着重知识的完备性和自我封闭性。教材对中学物理的基本理论和一些典型问题的背景作了系统的介绍,对基本定理、定律则给出了完备的证明。其宗旨是使学生不仅要知其然,还要知其所以然。这对培养学生的思维品格,提升学生的物理学修养是大有裨益的。



在编写过程中,各分册的内容大体与高中教材同步,但在深度上逐步加深,引导学生循序渐进,通过学习使学生达到甚至超过全国竞赛的水平;在广度上,除高中课本规定的知识外,还作了大量的补充,内容涉及 CPHO 和 IPHO 等知识,为学生更进一步的学习提供丰富的素材。各章还设计了一些专题,其内容涉及各个高层次的物理竞赛,不同层次的学生可以灵活取舍。

丛书在材料的选取上,充分体现新理念,既强调物理学思想和方法的传授,又注重解题能力和技巧的培养。这体现在:对经典材料的处理新视角化,对新颖材料的处理多视角化,力戒陈题和人云亦云,充分渗通编者的思想方法,使读者耳目一新。

在每个知识点上精选了一些典型的、新颖的,并有一定难度的例题,通过例题的讲解力求达到举一反三的目的。此外,还配备了适量的课外习题,供学生课外学习和研究。对这些习题只是提供了简单的解题思路,目的是希望学生通过自己的体验独立获取物理知识。

本教材由北京大学教授、全国物理奥林匹克领队教练舒幼生先生和全国著名重点中学学军中学钟小平担任主编,由镇海中学王翔、绍兴鲁迅中学葛伯军担任副主编,参加编写的还有绍兴鲁迅中学何尧荣、绍兴一中张晓



娟、杭州学军中学毛朝亮、杭州高级中学陈明华等。

本教材在编写过程中得到浙江省竞赛委员会副主任周彩莺、浙江省物理学会秘书长赵隆韶、浙江师范大学物理系主任宗丰德等专家教授的大力支持和帮助,学军中学 2003 级物理兴趣小组周迪、徐鼎梁、吴士章、张晟、钟来天、张璐、程进、岑哲、胡天一等同学为本书习题的验算以及校对做了许多工作,在此谨向他们表示衷心的感谢。

编 者



目 录

第二十一讲 分子运动论、热力学第一定律和第二定律	(1)
赛点知识	(1)
赛题精析	(6)
习题精选	(9)
第二十二讲 理想气体	(11)
赛点知识	(11)
赛题精析	(13)
习题精选	(18)
第二十三讲 物体的性质(固体、液体)	(22)
赛点知识	(22)
赛题精析	(24)
习题精选	(28)
第二十四讲 物态变化	(31)
赛点知识	(31)
赛题精析	(34)
习题精选	(39)
第二十五讲 电场与电场强度	(42)
赛点知识	(42)
赛题精析	(43)
习题精选	(48)
第二十六讲 电势	(51)
赛点知识	(51)
赛题精析	(52)
习题精选	(57)
第二十七讲 电容器	(60)
赛点知识	(60)
赛题精析	(61)
习题精选	(65)
第二十八讲 电场中的导体及电介质的极化	(69)
赛点知识	(69)
赛题精析	(70)
习题精选	(74)
第二十九讲 电流和电流密度	(77)
赛点知识	(77)
赛题精析	(79)
习题精选	(81)
第三十讲 电阻定律、电桥、电表与电路计算	(82)
赛点知识	(82)
赛题精析	(85)
习题精选	(92)

第三十一讲 半导体元件	(95)
赛点知识	(95)
赛题精析	(95)
习题精选	(97)
第三十二讲 磁场对电流与运动电荷的作用	(99)
赛点知识	(99)
赛题精析	(103)
习题精选	(116)
第三十三讲 电磁感应	(120)
赛点知识	(120)
赛题精析	(124)
习题精选	(137)
第三十四讲 交流电与电磁波	(144)
赛点知识	(144)
赛题精析	(155)
习题精选	(162)
第三十五讲 光的反射、折射	(167)
赛点知识	(167)
赛题精析	(168)
习题精选	(172)
第三十六讲 光在球面上的反射与折射	(175)
赛点知识	(175)
赛题精析	(177)
习题精选	(181)
第三十七讲 透镜与光学仪器	(184)
赛点知识	(184)
赛题精析	(188)
习题精选	(192)
第三十八讲 波动光学、光的本性	(196)
赛点知识	(196)
赛题精析	(202)
习题精选	(205)
第三十九讲 原子物理	(209)
赛点知识	(209)
赛题精析	(212)
习题精选	(215)
第四十讲 相对论初步	(219)
赛点知识	(219)
赛题精析	(222)
习题精选	(224)
第四十一讲 物理实验	(227)
赛点知识	(227)
赛题精析	(228)
参考答案	(249)



第二十一讲

分子运动论、热力学第一定律
和第二定律

【赛点知识】

从本讲开始,我们进入热学的讨论.热学是研究物理量随温度变化的规律的学科,其研究方法主要是通过实验得出一系列的概念和定律,从而对物质的各项物理量随温度的变化得出一个较好的描述,这门学科被称为热力学.而从现代的观点来看,热学乃是从对大量的物质单位(如原子、分子)作统计平均,根据一些统计假设得出一些物质的性质.它的研究对象不再一定是经典的系统,而可能是量子的或者甚至是宇观的,这门学科称之为统计力学.虽然如此,统计平均的基本概念和方法在整个热力学中还是适用的,研究的物理量也往往仍然和温度有关.在高中物理和竞赛涉及的问题中,限于物理和数学基础,不能直接用统计力学的方法进行讨论,但要求对于统计的基本概念有一个了解,能应用简单的统计方法作计算,并对热力学的两个定律有一个完整的理解.



原子和分子

原子物理表明,我们身边的大多数物质都是由一定的物质单位组成的.有的物质如金属,由规则排列的金属原子构成,其他的一些物质如水,则由分子构成.在热学中我们有时不太关心是由什么物质单位组成了所要研究的物质,而把它们统称为分子(这也是历史的原因).分子的量级通常由阿伏伽德罗常数 N_A 来表征: $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. N_A 是为了表示分子的个数而引进的常量.1mol 的分子,就是指 6.02×10^{23} 个分子,这样的叙述比较简便,容易操作. N_A 的确定是依据:12g C_{12} 原子所含的 C 原子的个数,称为 1mol.大致说来,可以认为 1g 质子(或者中子)就是 1mol.

由阿伏伽德罗常数,可以对分子的大小和数量级有一个大致的了解.如,水的密度为 1 g/cm^3 ,则可估算其分子直径如下:

如果认为分子的体积就为 d^3 (实际上分子不是正方体,但这不影响数量级),则由水的摩尔质量为 18 (水分子中有 10 个质子,8 个中子),得 18g 体积为 18 cm^3 水的水分子数为 6.02×10^{23} ,故每个水分子的体积为 $18 / (6.02 \times 10^{23}) \text{ cm}^3 = 2.99 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$,从而水分子的大小为

$$d = (2.99 \times 10^{-23})^{\frac{1}{3}} \text{ cm} = 3.1 \times 10^{-8} \text{ cm} = 3.1 \times 10^{-10} \text{ m}$$

这就是说,一般分子直径的数量级为 10^{-10} m ,而一般的物质其所含的分子数约为 10^{23} 个.正

是这个数量级,才使统计理论和方法在宏观的物质系统中有了坚实的基础.

分子运动论

物质中的分子在不停地作无规则运动,这是几经研究、争论,在上世纪初才基本“定案”的结论.各分子无规则运动的速度大小、方向都各不相同(一般来讲满足一定分布律),而且对每一个分子,它的运动状态也不断地改变,所以物质并不因此而宏观运动效应,但在宏观上表现为热,因此这种运动称为热运动.温度就是表征热运动剧烈程度的物理量.

热运动主要的证据有布朗运动.布朗运动是较大的显微镜下可见的微粒(如花粉粒)在分子无规则的碰撞下,所作的无规则的运动.1905年,爱因斯坦解释了布朗运动的原因,通过统计理论,将布朗运动应该满足的统计规律揭示出来,并通过定量的实验得到了验证,从而使分子运动论得到了实验上的支持.

分子力

物质凝聚成一定形态,其分子之间的作用力起着关键的作用.分子力主要是量子效应的结果.两个分子相距较远时,由于使它们靠近(共价键或者静电力导致)将使能量降低,故分子之间有吸引力.而相距较近时,由于电子云的相互排斥,以及核力等,又产生迅速增大的斥力.理论和实验的研究表明,把分子力看成是引力和斥力的叠加,描述起来更加方便.引力和斥力与分子的距离 r 的关系如图 21-1 所示(其中 r_0 数量级为 10^{-10}m).

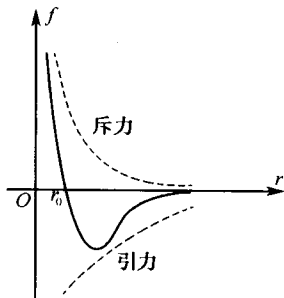


图 21-1

热力学温标

热学的起初发展,尤其是定量研究的展开与温标的发展有很大的关系.人们在日常生活中都有直观的“热”和“冷”的观念,但是怎样把这种观念量化加以研究呢?由于人的感觉既有其客观的对应,如能判断物体的冷热;又有一些不严格的地方,如不能严格区分两个物体的冷热(很多实验都是展示这个现象的).所以需要客观物体随冷热变化的性质来确定物体的冷热程度并加以量化.

温度概念的引入有赖于热平衡定律.由于该定律的重要性,并因它是在热力学第一定律之后才确定,但在逻辑上却应放在第一定律之前,故称之为热力学第零定律:物体 A 和物体 B 分别各自与处在同一状态的物体 C 达到热平衡,若令 A 与 B 进行热接触,它们也处在热平衡.这就是说,如果两个物体各自与第三个物体达到热平衡,它们彼此也必处在热平衡.这个事实称为热平衡定律,也称为热力学第零定律.第零定律是人类实践的结果,是生活经验告诉我们的,达到热平衡的物体温度相同.

(1)摄氏温标:瑞典天文学家摄尔修斯于 1742 年建立,规定水在一个大气压下的冰点为 0 度,沸点为 100 度.中间的温度以水银的体积膨胀为准,单位为 $^{\circ}\text{C}$.

(2)华氏温标:德国人华伦海特建立.水的冰点为 32 度,水的沸点为 212 度,单位为 $^{\circ}\text{F}$.这两个温标之间的换算容易推得为: $t(^{\circ}\text{C}) = \frac{t(^{\circ}\text{F}) - 32}{180} \times 100$.

(3)热力学温标:这是根据热力学定律得出的与测温物质性质无关的温标,单位为 K,其大小 $1\text{K} = 1^{\circ}\text{C}$.在此温标下水的冰点为 273.16K.0K 成为绝对零度,是无法通过有限次步骤达到的低温.



(4)理想气体温标:利用理想气体的性质.

查理定律:一定体积的理想气体压强与热力学温度成正比.由此标定的温标为理想气体温标,在理想气体存在的范围内,它和热力学温标一致.

理想气体温标和理想气体分子热运动

理解温度是分子平均动能的标志需要从理想气体入手.理想气体的宏观参量我们比较熟悉的是压强,理想气体的压强是由分子对容器壁的撞击产生,由温度及气体分子的密度决定.由于理想气体分子间除了碰撞无相互作用力,所以理想气体分子运动特征是匀速运动加频繁的碰撞,可以用简单的统计思想和碰撞模型来把理想气体的压强和分子运动联系起来:

设一边长为 L 的立方容器内贮有某种理想气体,其分子质量为 m ,分子总数为 N ,且 N 极大,这些分子做无规则运动,自然会与器壁发生碰撞,而且由于气体分子沿各个方向运动机会均等,所以它们对各种取向的器壁的碰撞情况都是相同的.这样我们就可以只研究气体分子与某一特定取向的器壁的碰撞情况,例如图 21-2 中 A_1 面.

如图 21-2 所示,设容器中某个分子的速度为 v_i ,且在 x 轴方向的分量为 v_{ix} .气体分子间的碰撞以及气体分子与器壁的碰撞均可视为弹性碰撞,故它与器壁 A_1 发生碰撞之后沿 x 方向的动量分量为 $mv'_{ix} = -mv_{ix}$; y 、 z 轴方向的运动状态不因碰撞而发生变化.分子动量的变化为 $-2mv_{ix}$,而这一动量的变化是由于器壁 A_1 对分子的作用所致.根据牛顿第三定律,分子每一次撞击器壁 A_1 的冲量等于 $2mv_{ix}$.

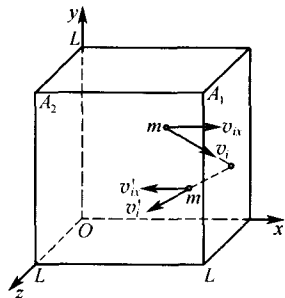


图 21-2



这个分子在器壁 A_1 和 A_2 之间往返运动,如果在运动过程中不与其他分子碰撞,则它相继碰撞 A_1 和 A_2 时,往返一次的时间就是接连两次与 A_1 碰撞的时间间隔 $\Delta t = \frac{2L}{v_{ix}}$.因此单位时间内该分子碰撞 A_1 的次数为 $\frac{v_{ix}}{2L}$,它在单位时间内作用于 A_1 的冲量,即施于 A_1 的平均冲力 F_{ix}

$$\text{为 } 2mv_{ix} \cdot \frac{v_{ix}}{2L} = \frac{mv_{ix}^2}{L}.$$

容器中所有分子以不同速度与 A_1 碰撞, N 个分子施加于 A_1 的平均冲力为

$$F = \frac{mv_{1x}^2}{L} + \frac{mv_{2x}^2}{L} + \cdots + \frac{mv_{ix}^2}{L} + \cdots + \frac{mv_{Nx}^2}{L} = \frac{m}{L} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2$$

式中 v_{ix}^2 的数值随分子的不同(i 取值不同)而有大有小,它们的平均值为

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N v_{ix}^2}{N}$$

利用平均值,上式可写为 $F = \frac{m}{L} N \overline{v_x^2}$

气体对器壁 A_1 的压强 p 就是器壁单位面积上所受的作用力,即

$$p = \frac{F}{L^2} = \frac{N}{L^3} m \overline{v_x^2} = nm \overline{v_x^2}$$



式中 n 为容器中单位体积内的气体分子数,也叫分子数密度.

当然,每个分子在往返于 A_1 和 A_2 之间时,不可能不与另外的分子相碰撞.但由动量守恒定律可知,两个质量相同的刚性小球,在正碰情况下,碰撞后两球速度交换;在斜碰情况下,朝任何方向的总动量都保持不变.我们所讨论的分子就可以视为这样的刚性小球,而且可以忽略它的大小.于是,在讨论分子对器壁的碰撞问题时,一个分子带着一定的动量趋向一壁,不论在中途与其他分子碰撞多少次,总会在相同的时间把这个动量作用给器壁,只不过不再是原来的那个分子,而是由另外的分子“接力式”地传递罢了.所以,我们可以不考虑分子在碰撞器壁前的相互碰撞.因而,由假设分子在运动过程中不与其他分子碰撞所得出的计算结果是符合实际的.

考虑到平衡态时,气体内分子沿各个方向的运动机会均等,则容器内分子运动速度的三个分量的平方的平均值应该相等,即 $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$

因为

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

故有

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

和

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

于是有

$$p = \frac{1}{3} n m \overline{v^2}$$

注意到分子的动能 $E_k = \frac{1}{2} m v^2$ 的平均值 $\overline{E_k} = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$,我们称它为分子的平均平动动能,则

有

$$p = \frac{2}{3} n \overline{\epsilon_k}$$

上式通常称为理想气体的压强公式.它把气体系统的宏观量压强 p 与微观量分子的平均平动动能 $\overline{\epsilon_k}$ 联系起来,并且定量地表明理想气体的压强取决于分子数密度和分子的平均平动动能.综上所述,我们可以得到热力学温度 T 就是气体分子平均动能的标志.若是结合克拉珀龙方程:

$$pV = \mu RT$$

(式中 μ 为理想气体的物质的量, R 为普适气体恒量,可由标态下 1mol 理想气体体积为 22.4 升求得为 $8.31 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot (\text{k} \cdot \text{mol})^{-1}$ 或 $0.082 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot (\text{k} \cdot \text{mol})^{-1}$) 可以得到气体分子平均平动动能和温

度的关系: $\overline{\epsilon_k} = \frac{3}{2} kT$, 其中 $k = \frac{R}{N_A}$ 称为玻尔兹曼常量, $k = R/N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

内能、做功和热量传递

分子运动,则有动能,分子由于相互之间作用,又有与其位置关系相关的势能.由于统计平均的关系,在物质中这些能量都有一个分布,这个分布与单个分子的运动无关,和物质的体积、温度、压强等参量有关.分子的总动能和势能可以认为是将分子从相距无穷远的静止状态到集合在一起的状态所需做功的量.这个量由于只和物质的宏观参量有关,所以可以定义为内能 U , 是宏观参量的函数.

外界可以通过外力使得物质系统的宏观参量发生变化.在这个过程中,宏观力对体系做功.外界与体系之间也可以有热量的传递.宏观力的做功,原则上是和力学中的做功是一样的,都可以定义为 $\Delta W = F \Delta s$, 在只有体积变化的情况下,也可以写为 $\Delta W = - p \Delta V$.

热量传递有三种形式:传导、对流、辐射.



辐射是电磁波传播造成的能量流动.

在热辐射中,有一类物体在任何温度下能够全部吸收任何波长的辐射而无反射,把这类物体称为黑体,黑体单位表面积的辐射功率 P 与其绝对温度的四次方成正比,即: $P = \sigma T^4$, 式中 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{T}^4$, 称斯忒藩常数.

对非黑体,单位表面积的辐射功率 P 与温度 T 的关系可写成 $P = q\sigma T^4$, 式中 q 称为表面辐射系数,对灰体 $0 < q < 1$, 它由物体的表面性质决定,与波长无关.

传导是由于温度分布不均匀导致的能量转移.

热传导是指物体的相邻部分间的温度差所引起的能量迁移.热传导是固体中传热的主要形式,气体、液体中常与对流同时发生.

实验表明,在热传导中所传递的热量与传热介质的截面积、传热介质中单位距离的温度差及传热时间成正比.若有一块横截面积为 S , 厚度为 Δd 的板,板两面的温度差为 ΔT , 则在时间 Δt 内垂直于板的两面流过的热量 ΔQ 满足 $\Delta Q \propto S \cdot \Delta t \cdot \frac{\Delta T}{\Delta d}$.

若设单位时间内传递的热量为 H (称为热量迁移率), 则 $H = -k_s \frac{\Delta T}{\Delta d}$, k 称材料的导热系数,它由材料决定,表征物质的导热能力. k 大的材料称热的良导体. 式中负号表示热传导总是由高温处向低温处进行.

对流是在流体中,由于密度和温度的反相关的关系,导致宏观的对流运动,而发生的较快的能量转移:在流体下部加热,由于下部受热后密度变小,向上流动而形成一个稳定的对流,不断地把温度较低的流体送到下部受热,使得传热速度加快.

热力学第一定律

能量守恒定律是在热力学发展的过程中总结出来并加以推广的,历史上能量守恒是在推翻“热质说”的过程中提出的,因此,热力学第一定律不能简单看成是能量守恒定律的特例.

热力学第一定律:任何一个热力学过程中物质体系内能的变化等于吸收的热量和外界对物质体系做功的和.

如果只有体积发生变化,那么热力学第一定律可以写为: $\Delta U = \Delta Q - p\Delta V$.

热力学第二定律

在热力学过程中,除了能量守恒外,可以发现还有某种程度的关于时间的不对称现象,如冷水不会自动烧开而使周围温度下降,热量传递不能从冷的物体到热的物体等.热力学第二定律就是针对这种不对称提出的.1850年,克劳修斯提出了热力学第二定律的一种表述:

热力学第二定律的克劳修斯表述:不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化.翌年开尔文又提出了另一种表述,即热力学第二定律的开尔文表述:不可能从单一热源吸取热量,使之完全变为有用的功而不产生其他影响.

这两种表达可以证明是等价的.由热力学第二定律出发结合第一定律,可以导出系统的一个只和状态有关的函数熵 S . 在孤立的热力学系统中,可逆热力学变化过程系统的熵值不变,而不可逆的热力学变化过程系统的熵值增加.熵增加原理是热力学第二定律的数学表述.玻尔兹曼得出: $S = k \ln \Omega$, 其中 Ω 是系统所含微观量子态的数目.由此可见,熵函数表征的是系统的无序程



度,也即系统无序程度越高,熵就越大.



【赛题精析】

例1 已知铜的密度为 $8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 摩尔质量为 64 g/mol , 试估算铜的自由电子的数密度.

【分析】 可以假设每个铜原子可提供的自由电子是两个, 那么每摩尔铜的自由电子数和体积都可以确定, 则可以估算自由电子的数密度.

【解答】 假设每个铜原子提供的自由电子个数为 $n=2$, 则每摩尔铜中自由电子数为:

$$N = nN_A$$

而每摩尔铜体积为:

$$V = M/\rho$$

则铜的自由电子数密度为:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{nN_A\rho}{M} = \frac{2 \times 6.02 \times 10^{23} \times 8.9 \times 10^3}{0.064} \text{ m}^{-3} = 1.7 \times 10^{29} \text{ m}^{-3}$$

【点评】 上述计算是一种估计, 但该值的数量级是可信的. 摩尔数和阿伏伽德罗常数是联系微观和宏观的量, 合理地使用可以使我们从宏观尺度的物理量来推算微观中原子和分子相关的量. 从这类计算可以理解宏观系统中微观粒子的数量, 这也是运用统计思想的一个重要基础. 事实上, 相对力学系统, 热学所研究的系统更为复杂, 所以考量问题的方式需作出一定改变.

例2 在一个容积为 $V=1\text{L}$ 的正立方体容器内盛了 $m=0.01\text{g}$ 的氦气, 其温度为 300K . 我们考察一下其中一个分子, 在 $t=1\text{min}$ 的时间内这个分子与上侧器壁碰撞了多少次?

【分析】 容器内气体分子视为理想气体分子模型, 从一个体积元飞向上、下、左、右、前、后的分子数各为 $\frac{1}{6}$, 分子速度在各个方向上的分量的各种平均值相等.

【解答】 如果题中给定的时间足够长, 那么所有分子同器壁的碰撞机会都相同, 每个分子与器壁的碰撞次数为 $m = \frac{m_0}{N}$, 式中 m_0 为与器壁碰撞的总次数, N 为容器中分子总数. 气体的分子

浓度(单位体积内的分子数)为

$$n = \frac{N}{V}$$

上侧器壁面积为

$$S = (\sqrt[3]{V})^2 = V^{\frac{2}{3}}$$

在时间 t 内所有与上侧器壁碰撞的分子数都位于离上壁 $v_z t$ 的距离内(其中 v_z 为 z 方向的方均根速率), 此速率由以下三式决定:

$$v_z = \sqrt{\overline{v_z^2}}, \quad \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}, \quad \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

解得

$$v_z = \sqrt{\frac{RT}{\mu}}$$

其中 μ 为氦的摩尔质量, 数值为 $4 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$. 时间 t 内与上侧器壁的碰撞分子数为

$$m_0 = \frac{1}{2} n v_z t S.$$



一个分子在 1min 内与上侧器壁碰撞次数为

$$m = \frac{nv_2 t S}{2N} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{RT}{\mu}} t V^{\frac{2}{3}} = \frac{1}{2 \sqrt[3]{V}} \sqrt{\frac{RT}{\mu}} t = \frac{1}{2 \sqrt[3]{10^{-3}}} \sqrt{\frac{8.3 \times 300}{4 \times 10^{-3}}} \times 60 \approx 2.4 \times 10^5.$$

【点评】 气体压强由分子对容器壁的频繁撞击引起,和气体分子的动量及分子和器壁撞击的频繁程度有关.气体温度越高则分子平均的动量及碰撞的频繁程度越高,压强越大,所以从宏观量温度和压强出发结合统计思想可以分析分子对容器壁的碰撞情况.通过对热运动情况简单的理想气体的分析,可以深刻理解物质的宏观热学量的物理意义.

例 3 设有一块由不同厚度 L_1 和 L_2 以及不同热导率 k_1 和 k_2 的两层物质构成的复合板,接触表面面积为 S . 假定它两个外表面的温度为 T_2 与 T_1 . 如图 21-3 所示,试求在热流达到稳定状态时,通过这一复合板的热量的迁移率.

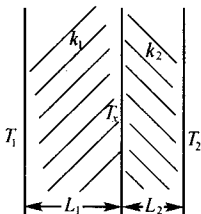


图 21-3

【分析】 稳定时,各层物质中的热迁移率相同,只要求出某层中的热迁移率.而中间层的温度是解答的关键.

【解答】 设两物质分界面处的温度为 T_r ,则两物质界面处的热量迁移率 H_1, H_2 满足 $H_1 = k_1 S \frac{T_r - T_1}{L_1}, H_2 = k_2 S \frac{T_2 - T_r}{L_2}$, S 为两物质接触截面积.

$$\text{热流达稳定时, } H_1 = H_2, \text{ 得 } k_1 S \frac{T_r - T_1}{L_1} = k_2 S \frac{T_2 - T_r}{L_2}$$

$$\text{解得 } T_r = \frac{L_1 k_2 T_2 + L_2 k_1 T_1}{L_1 k_2 + L_2 k_1}$$

$$\text{所以通过复合板的热量迁移率 } H = \frac{k_2 S}{L_2} \left(T_2 - \frac{L_1 k_2 T_2 + L_2 k_1 T_1}{L_1 k_2 + L_2 k_1} \right) = \frac{S(T_2 - T_1) k_1 k_2}{L_1 k_2 + L_2 k_1}$$

【点评】 热传导过程的理解其实可以和导体导电过程相类比,其数学函数的特征完全相同,上述解答可以和两电阻串联类比.热传导和导体导电现象的内在原理虽然不能完全量化地描述,但可以以常量的形式来描述其导热和导电的特性.电阻和热导率这种关于物质属性的定义方式和描述方式事实上是很常见的,如物质的比热、材料的折射率等.要注意的是导热过程的物理意义和导电过程有差异,导热过程不伴随物质的迁移,热流是一种能量流.

例 4 压强为 p_0 、温度为 T_0 (K) 的空气(设气体分子质量为 m , 每个分子热运动的平均动能为 $\frac{5}{2} kT_0$), 以 v_0 速度流过一横截面积为 S 的粗细相同的光滑导管, 导管中有一个对气流的阻力可以忽略的金属丝网, 它被输出功率为 P 的电源加热, 因而气流变热. 达稳定状态后空气在导管末端流出时的速度为 v_1 , 如图 21-4 所示. 试求流出气体的温度 T_1 及空气受到的推力 F .

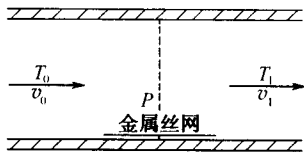


图 21-4

【分析】 气流达稳态,故相同时间内从导管进入和由导管流出的空气分子总数相等.同时,由能量守恒知,单位时间内流进气体的总平均能量(由热运动平均动能和定向机械运动动能



组成)加上电热功率应等于单位时间内流出气体的平均总能量.

【解答】 设导管入口处和出口处空气分子的数密度分别为 n_0, n_1 , 则 $n_0 v_0 = n_1 v_1$. 此时间内, 能量关系为 $n_0 v_0 \Delta t S (\frac{1}{2} m v_0^2 + \frac{5}{2} k T_0) + P \Delta t = n_1 v_1 \Delta t S (\frac{1}{2} m v_1^2 + \frac{5}{2} k T_1)$.

由于金属丝网加热气体, 致使气体气温膨胀, 向外流动的定向运动速度增加, 即流出气体的总动量较流入的增大, 因而由金属丝网加热而施予气体的推力 F 为 $F = \frac{n_0 v_0 \Delta t S m (v_1 - v_0)}{\Delta t}$.

因玻尔兹曼常数为 $k = \frac{R}{N_A}$, 其中 N_A 为阿伏伽德罗常数, 入口处气体压强为 p_0 , 由克拉珀龙方程得 $p_0 = \frac{n N_A}{V} k T = n_0 k T$. 上式中 n 为物质的量, 而 n_0 为分子数密度. 解以上各联立方程得

$$T_1 = \frac{1}{5k} \left[\frac{2PkT_0}{P_0 v_0 S} - m(v_1^2 - v_0^2) \right] + T_0, \quad F = \frac{p_0}{kT_0} v_0 S m (v_1 - v_0)$$

【点评】 守恒思想尤其是能量守恒思想在复杂系统问题解决中往往显得更方便, 但运用能量守恒解决问题时要注意选择的系统、对应的过程和能量传递和转化的流程, 然后写出正确的守恒方程. 该题中总的能量来源是加热源, 转化为气流的动能和内能. 选择的系统是单位时间内流入的气体, 这种选择系统的方法是解决连续流问题的重要方法.

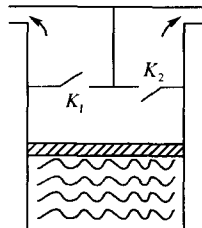


图 21-5

例 5 如图 21-5 所示, 为海浪发电航标灯的气室. 当海水下降时, K_1 关闭 K_2 打开, 每次吸入 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, 7°C 的空气 0.233 m^3 ; 当海水上升时, K_2 关闭, 绝热压缩空气, 压强达到 $\sqrt{32} \times 10^5 \text{ Pa}$ 时 K_1 打开, 活塞推动空气至全部进入工作室, 驱动涡轮机发电. 设 K_1 打开后, 活塞附近的压强近似不变. 若不计活塞的质量和摩擦, 试求海水每一次上升所做的功. 已知空气由 p_1, V_1 绝热变化到 p_2, V_2 , 近似遵守 $p_1/p_2 = (V_2/V_1)^{5/3}$, 1 mol 理想气体升温 1 K 内能改变 $3R/2$.

【分析】 海水作功可分为两个阶段, 第一阶段为对工作室内气体做绝热压缩, 转化为气体的内能, 第二阶段为等压压缩, 推动活塞做功.

【解答】 绝热压缩阶段, 海水推动活塞对气体作绝热压缩的功为 $W_1 = \Delta U$

$$\begin{aligned} \text{即} \quad W_1 &= n \left(\frac{3}{2} R \right) (T_2 - T_1) = \frac{3(p_2 V_2 - p_1 V_1)}{2} \\ &= \frac{3}{2} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/5} - 1 \right] = 3.49 \times 10^4 \text{ J} \end{aligned}$$

(注: 由 $pV = nRT$ 得, $T = \frac{pV}{nR}$.)

K_1 打开后, 等压压缩阶段, 海浪推动活塞做的功为

$$W_2 = p \Delta V = p_2 V_2 - p_2 V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{3/5} = 4.66 \times 10^4 \text{ J}$$

海水每上升一次做功为 $W = W_1 + W_2 = 8.15 \times 10^4 \text{ J}$.



【点评】该题目中涉及一些我们目前不熟悉的知识,如绝热过程,但在题目中已经给出相关内容的说明.如何充分阅读题目,获得需要的相关信息并自行推出新的相关规律是一种很重要的能力.如对于理想气体,内能只涉及分子动能,由分子平均平动能和温度的关系,题中 1mol 理想气体每升温 1K 内能增加 $3R/2$ 也是很好理解的.

运用热力学第一定律解决问题,如何分析过程显得很重要.



【习题精选】

1. 一个人呼吸时,若每吐出一口气都在若干时间内(譬如说几年)均匀地混合到全部大气中去,另一个每吸入一口气中有多少个分子是那个人在那口气中吐出的?

2. 气体分子速率测定实验.如图 21-6 所示为测定分子速率的一种实验装置,金属银在小炉 O 中熔化并蒸发,银原子束通过炉上小孔逸出,又通过狭缝 S_1 和 S_2 进入真空区域.圆筒 C 可绕中心轴 A 旋转,转速约为 $200\pi\text{rad/s}$.设圆筒直径为 $D=10\text{cm}$,求撞击点在弯曲玻璃 G 的 B 点左方 $l=12\text{mm}$ 处的分子的原始速率. S_3 、 A 、 B 在同一直线上.

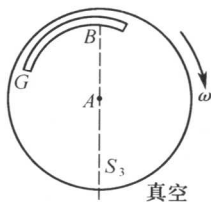


图 21-6

3. 一定量的空气在从外界吸热 2000J 的同时,在 2 个大气压下体积由 10L 增大到 15L .问空气对外做了多少功? 它的内能改变了多少?

4. 如图 21-7 所示, A 和 B 是两个同样的球,球 A 放在水平面上,球 B 以细线悬挂.设两球吸收相同的热量,如忽略各种热量损失,问两球温度增量是否相同? 并说明理由.

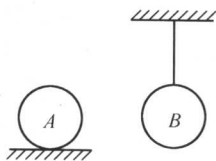


图 21-7

5. 在一个不大的水壶里灌满一壶热水,水的温度为 $t_1=30^\circ\text{C}$,在 5min 内水的温度下降 1°C ,为了保持壶内水温不变,可用龙头给它连续不断地滴入温度为 $t_2=45^\circ\text{C}$ 的热水.假如每一滴热水的质量 $m_k=0.2\text{g}$,每分钟必须滴入多少滴热水,才能保持水温 30°C 不变? 若热水滴入速度增加到 3 倍,在 1min 内水温可以提高多少? 设热水滴入水温立即一致,多余的水从壶嘴流出,水壶体积 $V=0.3\text{L}$,周围空气温度 $t_0=20^\circ\text{C}$.

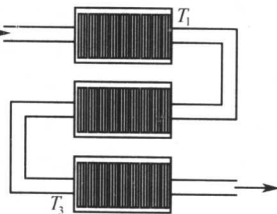
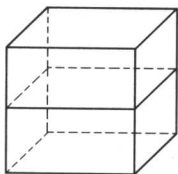


图 21-8

6. 如图 21-8 所示,冬天一个大房间要维护恒定的温度 $T_{\text{室}}=15^\circ\text{C}$,需要集中供热型装置的三只散热器串联起来供热(注入散热器的是热水).同时,第一只散热器的温度 $T_1=80^\circ\text{C}$,第三只的温度 $T_3=30^\circ\text{C}$,试问第二只散热器的温度 T_2 是多少? 假设散热器跟房间之间的热交换和热水与散热器之间的热交换一样,是跟两者的温度差成正比.



7. 如图 21-9 所示,有无穷多个边长依次减半的系列立方体容器,容器壁用理想绝热材料制成.每个容器的中部均有一块面积与该容器

图 21-9



同步发展
思维