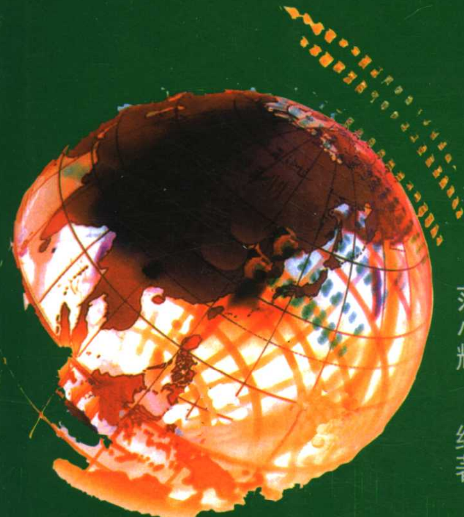
高二年级

总主编　张大同

物理竞赛教程



范小辉　编著

华东师范大学出版社

总 主 编　张大同
本册编著　范小辉

物理竞赛教程

高二年级

（第二版）

华东师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

物理竞赛教程.高二年级/范小辉编著.—上海:华东师范大学出版社,2001.12

ISBN 7-5617-2815-8

Ⅰ.物... Ⅱ.范... 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(2001)第 085968 号

物理竞赛教程

·高二年级·

总 主 编 张大同
本册编著 范小辉
责任编辑 审校部编辑工作组
特约编辑 段劲松
封面设计 高 山
版式设计 蒋 克

出版发行 华东师范大学出版社
市场部 电话 021-62865537
门市(邮购)电话 021-62869887
门市地址 华东师大校内先锋路口
业务电话 上海地区 021-62232873
华东 中南地区 021-62458734
华北 东北地区 021-62571961
西南 西北地区 021-62232893
业务传真 021-62860410 62602316
http://www.ecnupress.com.cn
社 址 上海市中山北路 3663 号
邮编 200062

印 刷 者 华东师范大学印刷厂
开 本 890×1240 32 开
印 张 10.5
字 数 307 千字
版 次 2006 年 1 月第二版
印 次 2006 年 1 月第 8 次
书 号 ISBN 7-5617-2815-8/G·1382
定 价 13.00 元

出 版 人 朱杰人

(如发现本版图书有印订质量问题,请寄回本社市场部调换或电话 021-62865537 联系)

范小辉，华东师大二附中特级教师，曾获得过全国五一劳动奖章。多年从事高中物理的教学工作，物理竞赛的辅导与培训工作。 指导的学生中有13人进入国家集训队，获国际中学生物理奥林匹克金牌3枚。 在各种物理教学杂志上发表论文三十余篇，被多家杂志社聘为编委、特约通讯员。近年出版了多部著作，代表作有《新编奥林匹克物理竞赛辅导》（已出第四版）和《高中物理竞赛考前训练》。

主编的话

物理学是一门基础学科。这里的基础应该有两重含义：一方面，物理知识是学习其他许多现代科学技术的基础；另一方面，学生在学习物理过程中得到训练和提高的思维能力、动手能力和创造能力，也是学习其他应用科学和专业技术所不可缺少的。一个学生要在物理竞赛中取得优异成绩，不但要掌握大量的物理知识，还必须有很强的解决问题能力和很好的心理素质。因此，培养物理尖子学生的工作，实质上是一种典型的素质教育，对提高学生的创新能力也是十分有益的。

自1984年至今，中国物理学会已经举办了22届全国中学生物理竞赛，参加者累计超过200万人。这一活动对全国中学生学习物理，特别是那些对物理学科有浓厚兴趣的学生，起了很好的推动作用。

我从1980年开始从事培养物理尖子学生的工作，经过20余年的探索，摸索出了一套培养优秀学生的行之有效的方法，积累了丰富的第一手资料。在这十年的物理竞赛中，全国各地涌现出许多在辅导学生参加物理竞赛工作中卓有成效的教师，这次我邀请了几位在全国最具影响力的老师，集中大家的智慧，共同编写了这一套最新的物理竞赛辅导书，相信会对我们的同行和广大爱好学习物理的中学生有较大的帮助。

本套丛书共有5册，从八年级到高三每学年一册。八年级分册由北大附中的张继达老师主编，九年级分册由华东师大二附中的陈檬老师主编，高一分册由长沙一中的彭大斌老师编写，高二分册由华东师大二附中的范小辉老师编写，高三分册由本人编写。根据现行的全国物理竞赛规程，同学们在使用这套书时，应该有适当的超前，

例如高中阶段应该在高二年级就读完高三分册，这样才能参加当年的物理竞赛。

教育在不断地发展，物理竞赛也在不断地前进，任何一套书都会或多或少地存在着遗憾和不足。热切地期望广大读者对新版提出宝贵的意见和建议，以供本书重印时改进。

张大同

目　　录

第一讲 气体的性质

一、知识要点和基本方法

1. 气体实验定律

(1) 玻意耳定律 一定质量的理想气体在温度不变时，它的压强与体积的乘积是一个常数，即

$$pV = C。 \tag{1-1}$$

(2) 查理定律 当一定质量的气体体积保持不变，温度每升高(或降低)1 ℃，增加(或减少)的压强等于它在 0 ℃时压强的 1/273。即

$$p_t = p_0\left(1+\frac{t}{273}\right)。 \tag{1-2}$$

或者表示为：一定质量的某种气体在保持体积不变的情况下，它的压强与热力学温度成正比，即

$$\frac{p}{T} = C。 \tag{1-3}$$

(3) 盖-吕萨克定律 一定质量的气体压强保持不变时，温度每升高(或降低)1 ℃，增加(或减少)的体积等于它在 0 ℃时体积的 1/273，即

$$V_t = V_0\left(1+\frac{t}{273}\right)。 \tag{1-4}$$

或者表示为：一定质量的某种气体在保持压强不变的情况下，它的体积与热力学温度成正比，即

$$\frac{V}{T} = C。\tag{1-5}$$

(4) 绝热变化过程　一定质量的气体若对外绝热,其初态、末态状态参量间的关系满足:

$$pV^{\gamma} = C,\tag{1-6}$$

$$TV^{\gamma-1} = C,\tag{1-7}$$

$$\frac{T^{\gamma}}{p^{\gamma-1}} = C。\tag{1-8}$$

式中的 γ 为比热容比,值为 $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$, C_p、C_V 即为第三讲中提到的定压摩尔热容和定容摩尔热容。不过,到目前为止,即使在全国物理竞赛的决赛中,如需用到绝热方程,题述条件中也会特别给出的。

2. 理想气体状态方程

(1) 理想气体

在任何温度和压强下都遵守实验定律的气体。它是一种理想化的物理模型,从微观角度来看,有如下三个特点:

①分子是大小可以不计的小球;②分子除碰撞外,无相互作用力,不存在分子间的势能;③分子可看作完全弹性的小球,分子之间以及分子与器壁之间的碰撞均为弹性碰撞。

(2) 理想气体状态方程　一定质量的理想气体的压强 p、体积 V、温度 T 三者之间满足关系

$$\frac{pV}{T} = C。\tag{1-9}$$

如用 $V = \frac{m}{\rho}$ 代入上式可得理想气体状态方程的密度表示形式为

$$\frac{p}{\rho T} = C'。\tag{1-10}$$

上式对气体质量发生变化的情况也适用。

3. 克拉珀龙方程　任意质量的理想气体的状态方程叫做克拉珀龙方程,其形式为

$$pV = \frac{m}{M}RT。 \tag{1-11}$$

式中 m 为气体质量，M 为气体的摩尔质量，R 为普适气体恒量，值为 $R = 8.31$ J/(mol·K)。

4. 道尔顿分压定律　混合气体的压强等于各组分的分压强之和，这条实验定律也只适用于理想气体，即

$$p = \sum p_i, \tag{1-12}$$

其中每一组分的气态方程为

$$p_i V = \frac{m_i}{M_i}RT。 \tag{1-13}$$

二、例题精讲

例 1　两端封闭的绝热圆筒，被一无摩擦且导热的活塞分成 A 和 B 两部分，各封有同类的气体，如图 1-1 所示。起初活塞置于圆筒中间，两边的气体压强、温度和体积分别为 2 atm、200 K、1 L 和 1 atm、300 K、1 L。则当此系统最后达到平衡状态时，气体温度为______，气体的压强为______，气室 A 和气室 B 的体积比值为______。（活塞的影响可忽略不计）

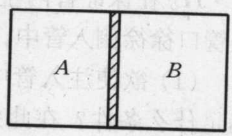


图 1-1

解　设 A、B 两部分气体分别有 n_A mol 和 n_B mol，则由克拉珀龙方程得：

$$p_A V_A = n_A R T_A, \quad ①$$

$$p_B V_B = n_B R T_B; \quad ②$$

由$\frac{①}{②}$得：

$$\frac{n_A}{n_B} = \frac{p_A V_A T_B}{p_B V_B T_A} = \frac{3}{1}。$$

因圆筒对外绝热，设气体的摩尔热容为 C，达热平衡以后温度为 T，则

$$n_A C T_A + n_B C T_B = (n_A + n_B) C T,$$

代入数据得

$$T = 225\ \text{K}。$$

再对 A、B 两部分气体据克拉珀龙方程得

$$pV'_A = n_A RT,$$

$$pV'_B = n_B RT。$$

而 $$V'_A + V'_B = V_A + V_B,$$

故可得 $$p = 1.5\ \text{atm}, \frac{V'_A}{V'_B} = \frac{3}{1}。$$

说明 A、B 两部分气体属典型的关联气体，它们的压强、体积、温度之间有一定的联系，善于找到这些联系点，可为解题确定相关的隐含条件。

例 2 如图 1-2 所示，将一端封闭的均匀细管弯成 L 形，放在大气中。管的竖直部分的长度为 b_1 cm，水平部分的长度为 $(b-b_1)$ cm，大气压强为 H cmHg，已知 $b>H$。在保证管内空气不泄出的条件下将水银从管口徐徐倒入管中，直至水银面达到管口。

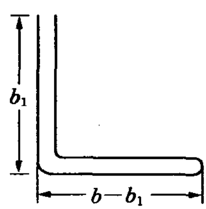


图 1-2

(1) 欲使注入管中的水银质量为最大，b_1 应满足什么条件？在此条件下，封入管内的空气柱长度为多少？

(2) 若在保证水银柱的上表面与管口相平的条件下，使注入管内的水银质量为最大质量的一半，则 b_1 应为多少？

析 由于 b、b_1、H 的具体数值都未确定，故应分别讨论注入的水银都在竖直管中或已有一部分进入水平管中这两种可能的情况。

解 (1) 设注入细管的水银柱长度为 x cm，当 $x \leqslant b_1$ 时，水银对封闭在管内的空气柱的压强为 x cmHg；当 $x > b_1$ 时，水银对管内气体的压强为 b_1 cmHg。根据玻意耳定律，当 $x \leqslant b_1$ 时

$$Hb = (H+x)(b-x)。 \quad ①$$

当 $x > b_1$ 时

$$Hb = (H + b_1)(b - x)。 \quad ②$$

由①式得 $x = b - H$。又由 $x \leqslant b_1$ 得 $b_1 \geqslant b - H$。

结论 1：当 $b_1 \geqslant b - H$ 时，注入管内的水银柱的长度 $x = b - H$ 与 b_1 无关。

由②式得 $x = \dfrac{bb_1}{b_1 + H}$。又由 $x > b_1$ 得 $b_1 < b - H$，即当 $b_1 < b - H$ 时，注入管内的水银柱的长度 x 与 b_1 有关，但

$$x = \frac{bb_1}{b_1 + H} = \frac{b}{1 + \dfrac{H}{b_1}} < \frac{b}{1 + \dfrac{H}{b - H}}。$$

由此可得 $x < b - H$。

结论 2：当 $b_1 < b - H$ 时，注入的水银柱长度小于 $b - H$。由此得出当 $b_1 \geqslant b - H$ 时，注入管内的水银柱长度为最大值 x_m，即

$$x_m = b - H。$$

在此条件下，封闭在管内的气体柱长度

$$y = b - x_m = b - (b - H) = H。$$

(2) 由于在 $b_1 \geqslant b - H$ 时，注入管内的水银柱长度为 x_m，由此可知，只有在 $b_1 < b - H$ 时，管内水银面的高度才可能小于 x_m。故有 $x = \dfrac{bb_1}{b_1 + H} = \dfrac{1}{2}x_m = \dfrac{1}{2}(b - H)$，解得

$$b_1 = \frac{H}{b + H}(b - H)。$$

说明 本题的关键是要论证只有在 $b_1 \geqslant b - H$ 的条件下，灌入水银的质量才能最大；只有在 $b_1 < b - H$ 的条件下，灌入的水银长度才有可能小于 x_m。

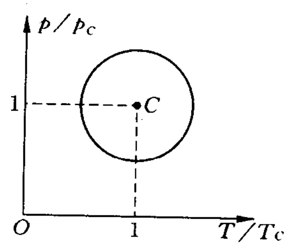


图 1-3

例 3 图 1-3 中所示是一定量理想气体状态变化所经历的 p-T 图线，该 p-T

图线是以 C 点为圆心的圆，p 轴是以 p_C 为单位，T 轴以 T_C 为单位。p_C、T_C 分别是 C 点压强和热力学温度。若已知在此过程中气体所经历的最低温度为 T_0，则在此过程中，气体密度的最大值 ρ_1 和最小值 ρ_2 的比值 ρ_1/ρ_2 应等于多少？

解 由理想气体状态方程 $\frac{pV}{T}=C$ 得到

$$p=\frac{C}{V}T, \tag{①}$$

对于一定量的气体，C 是一个常数。

由①式可知在 p-T 图上，一定量理想气体的等容过程是由一条过原点 O 的直线来表示，而且该气体的体积愈大，表示等容过程的直线的斜率愈小，因此判断在题图给出的圆过程中何点气体密度最小、何点密度最大时，可由原点 O 对该圆作一系列相交的直线，其中斜率最大的直线为与圆上方相切的切线 OA，斜率最小的直线为与圆下方相切的切线 OB，由此可知该一定量气体在经历如图所示的变化过程中，在切点 A，该气体的体积最大，在切点 B，该气体的体积最小，对一定量气体来说，其密度与体积成反比，即

$$\frac{\rho_1}{\rho_2}=\frac{V_A}{V_B}, \tag{②}$$

其中，V_A、V_B 分别是该气体在 A、B 点的体积，设以 p_A 和 T_A、p_B 和 T_B 分别表示该气体在 A、B 点的压强和温度，则由理想气体状态方程得到

$$\frac{p_A V_A}{T_A}=\frac{p_B V_B}{T_B},$$

代入②式得到

$$\frac{\rho_1}{\rho_2}=\frac{p_B T_A}{p_A T_B}。 \tag{③}$$

③式可改写成

$$\frac{\rho_1}{\rho_2}=\frac{\left(\frac{p_B}{p_C}\right)\left(\frac{T_A}{T_C}\right)}{\left(\frac{T_B}{T_C}\right)\left(\frac{p_A}{p_C}\right)}=\tan^2\beta, \tag{④}$$

角 β 的意义如图 1-4 所示，从图中可以看出 $\alpha+\beta=\pi/4$，故④式可改写成

$$\frac{\rho_1}{\rho_2}=\tan^2\left(\frac{\pi}{4}-\alpha\right)=\left(\frac{1-\tan\alpha}{1+\tan\alpha}\right)^2。\qquad ⑤$$

由图 1-4 中可以看出 $\tan\alpha=\dfrac{CB}{OB}$，$CB$ 是圆的半径 r，$OC=\sqrt{2}$，$OB=\sqrt{2-r^2}$，代入⑤式并化简，可得到

$$\frac{\rho_1}{\rho_2}=\frac{1-r\sqrt{2-r^2}}{1+r\sqrt{2-r^2}}。\qquad ⑥$$

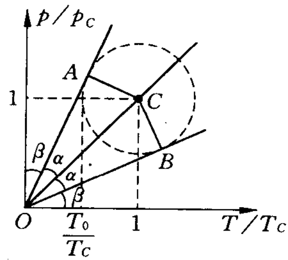


图 1-4

由图 1-4 可以看出，圆的半径 r 与在变化过程中气体所经历的最低温度 T_0 的关系是

$$r=1-\frac{T_0}{T_C},\qquad ⑦$$

以⑦代入⑥式，就得到

$$\frac{\rho_1}{\rho_2}=\frac{1-\left(1-\dfrac{T_0}{T_C}\right)\sqrt{1+2\dfrac{T_1}{T_C}-\left(\dfrac{T_0}{T_C}\right)^2}}{1+\left(1-\dfrac{T_0}{T_C}\right)\sqrt{1+2\dfrac{T_1}{T_C}-\left(\dfrac{T_0}{T_C}\right)^2}}。\qquad ⑧$$

说明 在 p-V 图中，pV 乘积最大处对应温度最高，而在 p-T 图中 p/T 值最大处密度最大。

例 4 U 形管的两支管 A、B 和水平管 C 都是由内径均匀的细玻璃管做成的，它们的内径与管长相比都可忽略不计。已知三部分的截面积分别为 $S_A=1.0\times10^{-2}\ \mathrm{cm}^2$，$S_B=3.0\times10^{-2}\ \mathrm{cm}^2$，$S_C=2.0\times10^{-2}\ \mathrm{cm}^2$。在 C 管中有一段空气柱，两侧被水银封闭。当温度为 $t_1=27\ ℃$ 时，空气柱长为 $l=30\ \mathrm{cm}$（图 1-5），C 中气柱两侧的水银柱长分别为 $a=2.0\ \mathrm{cm}$，$b=3.0\ \mathrm{cm}$，A、B 两支管都很长，其中的水银柱高均为 $h=12\ \mathrm{cm}$。大气压强保持为 $p_0=$

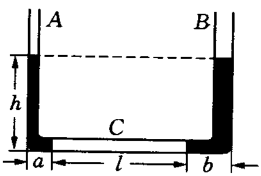


图 1-5

101 325 Pa (合 76 cmHg 柱)不变。不考虑温度变化时管和水银的热膨胀。试求气柱中空气温度缓慢升高到 $t = 97$ ℃ 时空气的体积.

解 在温度为 $T_1 = (27 + 273)$ K = 300 K 时,气柱中的空气的压强和体积分别为

$$p_1 = p_0 + h, \tag{1}$$

$$V_1 = lS_C。 \tag{2}$$

当气柱中空气的温度升高时,气柱两侧的水银将被缓慢压入 A 管和 B 管。设温度升高到 T_2 时,气柱右侧水银刚好全部压到 B 管中,使管中水银高度增加

$$\Delta h = \frac{bS_C}{S_B}。 \tag{3}$$

由此造成气柱中空气体积的增大量为

$$\Delta V' = bS_C。 \tag{4}$$

与此同时,气柱左侧的水银也有一部分进入 A 管,进入 A 管的水银使 A 管中的水银高度也应增加 Δh,使两支管的压强平衡,由此造成气柱空气体积增大量为

$$\Delta V'' = \Delta h S_A, \tag{5}$$

所以,当温度为 T_2 时,空气的体积和压强分别为

$$V_2 = V_1 + \Delta V' + \Delta V'', \tag{6}$$

$$p_2 = p_1 + \Delta h。 \tag{7}$$

由状态方程知

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}。 \tag{8}$$

由以上各式,代入数据可得

$$T_2 = 347.7 \text{ K}。 \tag{9}$$

此值小于题给的最终温度 $T = (273 + t)$ K = 370 K,所以温度将继续升高。从这时起,气柱中的空气作等压变化。当温度到达 T 时,

气柱体积为

$$V=\frac{T}{T_2}V_2, \tag{10}$$

代入数据可得

$$V=0.72\ \mathrm{cm}^3。 \tag{11}$$

说明 本题对解题规范化方面的要求颇高。比如对 b 部分水银先全部转移到竖直管中，升温至 347.7 K 以后，气柱中的空气作等压变化等都需要通过计算进行说明。

例 5 有一圆柱形容器被由弹簧悬挂着的活塞密封，如图 1-6 所示。开始时容器是空的，然后将一定量的气体放入容器并处于一定的温度，现将气体加热使它的温度达到开始温度的两倍，试证明第一次体积的增加不能等于第二次体积的增加，忽略外界大气压的作用和活塞的质量以及活塞和容器之间的摩擦。

解 开始时容器处于静止状态，表明弹簧向上的弹力与活塞的重力及作用在活塞上大气压力的合力相平衡。而将一定量的气体引入容器中后，设活塞上移 Δx_1 的距离，此时活塞与缸底的距离为 h_1，如图 1-7 所示，设容器截面积为 S，弹簧的劲度系数为 k，则引入气体在容器内产生的压强

$$p_1=\frac{k\Delta x_1}{S}。$$

气体温度升高一倍以后，设活塞相对于最初位置上移了 Δx_2，此

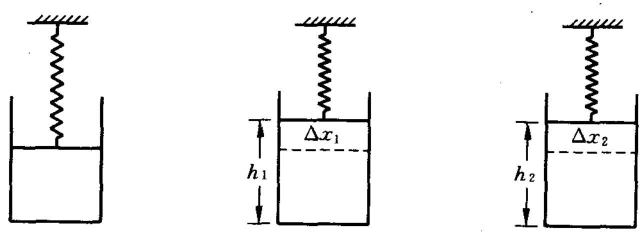


图 1-6　　图 1-7　　图 1-8

时活塞与缸底的距离为 h_2，如图 1-8 所示，这种状态下，气体在容器内产生的压强为

$$p_2=\frac{k\Delta x_2}{S}。$$

对容器内气体,据理想气体状态方程得

$$\frac{p_1V_1}{T_1}=\frac{p_2V_2}{T_2},$$

且 $$T_2=2T_1,$$

即 $$2\Delta x_1h_1=\Delta x_2h_2。$$

由题图可清楚地得到

$$2\Delta x_1h_1=(\Delta x_1+\Delta h)(h_1+\Delta h),$$

式中 $\Delta h=h_2-h_1$,将上式两边乘 S^2,则

$$2\Delta VV_1=(\Delta V_1+\Delta V)(V_1+\Delta V)。$$

根据假设,如果满足 $\Delta V=\Delta V_1$ 关系,则

$$2\Delta V_1V_1=2\Delta V_1(V_1+\Delta V)。$$

因此 $\Delta V=0$,这是不可能的。

说明 对本题如正向证明,不易得出结果。而正难则反,是处理物理问题中的一种常用策略。

例6 如图1-9所示,有一直立的气缸,气缸底到气缸口的距离为 L_0 cm,用一厚度和质量均可忽略不计的刚性活塞 A,把一定质量的空气封在气缸内,活塞与气缸间的摩擦可忽略,平衡时活塞上表面与气缸的距离很小(计算时可忽略不计)周围大气压强为 H_0 cmHg。现把盛有水银的一个瓶子放在活塞上(瓶子的质量可忽略),平衡时活塞到气缸底的距离为 L cm,若不是把这瓶水银放在活塞上,而是把瓶内水银缓缓不断地倒在活塞上方,这时活塞向下移,压缩气体,直到活塞不再下降,求此时活塞在气缸内可能的位置以及与之相对应的条件(即题中给出量之间满足的条件),设气体的温度不变。

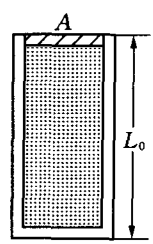


图 1-9

解法1 设整瓶水银放在活塞上后,使气缸内气体增加的压强