

总主编 张大同

物理竞赛教程

· 高二年级 ·

本册主编 范小辉

MBA235/16

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/范小辉主编. —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

策划组稿 倪明 郑国雄

本册主编 范小辉

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

传真 021-62860410

<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 8.25

字数 230 千字

版次 2001 年 12 月第一版

印次 2002 年 3 月第二次

印数 11 001 - 27 000

书号 ISBN 7 - 5617 - 2815 - 8 / G · 1382

定价 9.00 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)

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18届全国中学生物理竞赛，参加者累计超过100万人。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，从初二到高三每学年一册。初二分册由北大附中的张继达老师主编，初三分册由华东师大二附中的陈豫老师主编，高一分册由长沙一中的彭大斌老师编写，高二分册由启东中学的范小辉老师编写，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提出宝贵的意见和建议,以供本书再版时改进。

主编 张大同

华东师大版

竞赛系列图书

《奥数教程》 总主编 单增、熊斌

三年级	单增 主编
四年级	江兴代 编著
五年级	胡大同 主编
六年级	杭顺清 主编
初一年级	单增 主编
初二年级	赵雄辉 主编
初三年级	葛军 编著
高一年级	熊斌、冯志刚 编著
高二年级	刘诗雄 主编
高三年级	余红兵 编著

《中学应用数学竞赛题萃》

上海市中学生数学应用知识竞赛组委会组编

《物理竞赛教程》 总主编 张大同

初二年级	张继达 主编
初三年级	陈襟 主编
高一年级	彭大斌 编著
高二年级	范小辉 编著
高三年级	张大同 编著

《化学竞赛教程》 总主编 王祖浩

高一年级	叶佩玉、施华 编著
高二年级	邓立新 主编
高三年级	王祖浩、张永久、胡列扬 编著



范小辉，1964年出生，特级教师，先后获得过全国五一劳动奖章、江苏省有突出贡献的中青年专家、江苏省十大杰出青年等荣誉称号。多年从事高中物理的教学工作，并兼带物理竞赛的辅导与培训，教学方法灵活多样，教学效果显著。指导的学生中有6人进入国家集训队，1人获国际物理奥赛金牌。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。近年出版专著三部，主编或参与编写的教辅读物有十余种，其中《新编奥林匹克物理竞赛辅导》1996年版、1999年修订版至今已重印20多次，被评为“全国优秀教育畅销图书”；主编的《高中物理总复习教程》每年修订一次，深受广大读者喜爱。

目 录

第一讲	气体的性质	1
第二讲	分子动理论	18
第三讲	热力学第一定律	35
第四讲	固体和液体的性质	54
第五讲	物态变化	72
第六讲	库仑定律和电场强度	89
第七讲	电势和电势差	105
第八讲	电场中的导体和电介质	120
第九讲	电容器	135
第十讲	电路的等效变换	153
第十一讲	含源电路的欧姆定律	171
第十二讲	电表改装、惠斯通电桥及补偿电路	192
第十三讲	物质的导电性	208
习题解答		225

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

$$pV = C_0 \quad (1-1)$$

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

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

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

$$\frac{p}{T} = C_0 \quad (1-3)$$

(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°C ,增加(或减少)的体积等于它在 0°C 时体积的 $1/273$,即

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

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

$$\frac{V}{T} = C。 \quad (1-5)$$

(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:

$$pV^\gamma = C, \quad (1-6)$$

$$TV^{\gamma-1} = C, \quad (1-7)$$

$$\frac{T^\gamma}{p^{\gamma-1}} = C。 \quad (1-8)$$

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,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

$$\frac{pV}{T} = C。 \quad (1-9)$$

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

$$\frac{p}{\rho T} = C'。 \quad (1-10)$$

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

$$pV = \frac{m}{M}RT. \quad (1-11)$$

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 $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

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

$$p = \sum p_i, \quad (1-12)$$

其中每一组分的气态方程为

$$p_i V = \frac{m_i}{M_i} RT. \quad (1-13)$$

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)

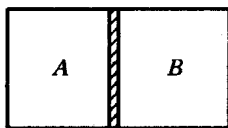


图 1-1

解 设 A 、 B 两部分气体分别有 $n_A \text{ mol}$ 和 $n_B \text{ mol}$, 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

$$n_A CT_A + n_B CT_B = (n_A + n_B)CT,$$

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 图 1-2 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？

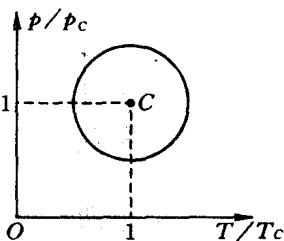


图 1-2

解 由理想气体状态方程 $\frac{pV}{T} = C$ 得到

$$p = \frac{C}{V}T, \quad \text{①}$$

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

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{V_A}{V_B}, \quad (2)$$

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
$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_B T_A}{p_A T_B}. \quad (3)$$

③式可改写成
$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\left(\frac{p_B}{p_C}\right)\left(\frac{T_A}{T_C}\right)}{\left(\frac{T_B}{T_C}\right)\left(\frac{p_A}{p_C}\right)} = \tan^2 \beta, \quad (4)$$

角 β 的意义如图 1-3 所示,从图中可以看出 $\alpha + \beta = \pi/4$, 故④式可改写成

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

由图 1-3 中可以看出 $\tan \alpha = \frac{CB}{OB}$,

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

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1 - r\sqrt{2 - r^2}}{1 + r\sqrt{2 - r^2}}. \quad (6)$$

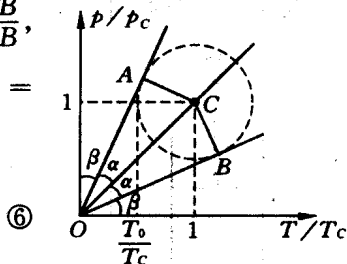


图 1-3

由图 1-3 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

$$r = 1 - \frac{T_0}{T_C}, \quad (7)$$

以⑦代入⑥式,就得到

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

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 3 有一圆柱形容器被由弹簧悬挂着的活塞密封,如图 1-4 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 1-5 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

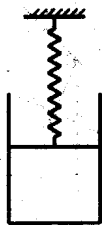


图 1-4

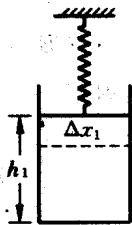


图 1-5

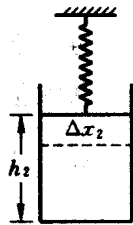


图 1-6

时活塞与缸底的距离为 h_2 , 如图 1-6 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

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2},$$

且 $T_2 = 2T_1,$

即 $2\Delta x_1 h_1 = \Delta x_2 h_2.$

由题图可清楚地得到

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

式中 $\Delta h = h_2 - h_1$, 将上式两边乘 S^2 , 则

$$2\Delta V V_1 = (\Delta V_1 + \Delta V)(V_1 + \Delta V).$$

根据假设, 如果满足 $\Delta V = \Delta V_1$ 关系, 则

$$2\Delta V_1 V_1 = 2\Delta V_1 (V_1 + \Delta V).$$

因此 $\Delta V = 0$, 这是不可能的。

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

例 4 图 1-7 是“浮沉子”的示意图。大玻璃筒高 $H = 30 \text{ cm}$, 横截面积 10 cm^2 , 上端用橡皮膜密封, 筒内水深 $h = 25 \text{ cm}$, 小试管长度 $l = 4 \text{ cm}$, 质量 2 g , 容积 4 cm^3 , 管壁材料密度 $2.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。在试管中装适量的水后向下插入筒中, 露出水面的体积很小, 小试管会下沉, 放手后又会上浮。如果橡皮膜下压后筒内水面上方气体体积减少量不超过 2 cm^3 , 为了使小试管在压膜时能下沉, 在沉到筒底后, 在压力消失后又能上浮, 小试管中装水量应满足什么条件? (筒内水面上方气体压强 $p_0 = 1.00 \times 10^5 \text{ Pa}$, g 取 10 m/s^2)

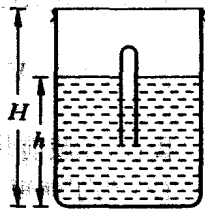


图 1-7

解 (1) 要使短试管能够下沉, 则短试管及短试管中所装水的总重应大于短试管完全淹没水中时受到的水的浮力。设这时管中水的体积为 x' , 则应有

$$mg + \rho_0 x' g > \rho_0 (V + V_0) g, \quad \textcircled{1}$$

式中 m 为短试管质量, V 为短试管自身体积, V_0 为短试管容积, ρ_0 为水的密度, 故

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{2 \times 10^{-3}}{2 \times 10^3} \text{ m}^3 = 1 \text{ cm}^3。$$

这样, 由①式求得

$$x' > V + V_0 - \frac{m}{\rho_0} = 5 \times 10^{-6} - \frac{2 \times 10^{-3}}{1 \times 10^3} = 3 \text{ cm}^3。$$

这表明, 试管下沉时, 管内气柱体积

$$V_2 < V_0 - x' = 1 \text{ cm}^3。$$

因为试管是在圆筒口橡皮膜被压后才下沉, 压橡皮膜使筒内水面气体体积减小、压强增大, 因而把水压入试管内才使试管下沉的, 则在未压膜前如果管中气柱体积为 V_1 , 则据玻意耳定律有:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad \textcircled{2}$$

式中 $p_1 = p_0 = 1.00 \times 10^5 \text{ Pa}$, p_2 为压膜后的压强, 可由玻意耳定律求得

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{(H-h)S}{(H-h)S - \Delta V} = p_1 \cdot \frac{(30-25) \times 10}{(30-25) \times 10 - 2} = \frac{25}{24} p_1。$$

将 p_2 值代入②式可求得

$$V_1 = \frac{p_2 V_2}{p_1} = \frac{25}{24} V_2 < 1.04 \text{ cm}^3。$$

因此, 压膜前装水量 $x > 2.96 \text{ cm}^3$ 。

(2) 为了使短试管沉到水底后, 在压力取消后又能上浮, 则由与①式相反情况可知, 试管在水底时应有 $x'' < 3 \text{ cm}^3$, 即在撤去压力后

管中气柱体积应有 $V'_2 > 1 \text{ cm}^3$ ，但试管沉入水底时，管中空气柱到水面高度 h' 约为 0.2 m ，则这时管中气体压强

$$p'_2 = p'_0 + \rho_0 g h' = 1.02 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

由玻意耳定律可得

$$V'_1 = \frac{p'_2}{p_1} V'_2 = 1.02 V'_2 > 1.02 \text{ cm}^3.$$

因此，压膜前装水量 $x < 2.98 \text{ cm}^3$ 。

综上所述，保证符合题目要求，短试管浮在水面上时，装水量应满足 $2.96 \text{ cm}^3 < x < 2.98 \text{ cm}^3$ 。

说明 若试管原来漂浮在水面上，可以证明，这种平衡为稳定平衡，外界气压的微小变化会使试管露出水面的体积有所变化，但仍能维持漂浮状态。而如果试管在液体内处于悬浮状态，可以证明，这种平衡为不稳定平衡状态，故外界气体压强增大以后，短试管会进一步沉入水管。另外，在本题的解题过程中要特别注意短试管这一条件，否则短试管底部刚露出液面时，橡皮膜下气体的压强与短试管内气体的压强就不会相等，考虑这一点会给解题带来很大的麻烦。

例 5 图 1-8(a) 表示竖直放置的左端封闭、右端足够长且开口的 U 形均匀玻璃管中以水银柱封闭一段长 $l_0 = 15 \text{ cm}$ 的空气柱，两边管中水银柱长度分别为 $h_1 = 22.5 \text{ cm}$ 和 $h_2 = 27.5 \text{ cm}$ ，管弯曲部分的长度可忽略不计，大气压 $p_0 = 75 \text{ cmHg}$ ，今将管缓慢倒转使其呈竖直开口向下，管内空气柱达到新的平衡，如图 1-8(b) 所示，试求：

(1) 新平衡状态下空气柱的长度。

(2) 讨论新平衡状态是稳定平衡还是不稳定平衡；如为不稳定平衡，则需进一步分析该状态被扰动破坏后的情况。

解 (1) 试管的截面积为 S ，倒转后封闭在管中仍有水银，但空

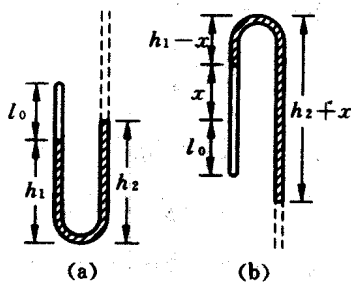


图 1-8