

大学物理学 应用专题

主 编：杨兵初

副主编：郑采星 周克省 严欣达 苏成悦 李文斌

湖南科学技术出版社



内 容 提 要

本书是根据 1993 年国家教委工科物理课程教学指导委员会(扩大)会议精神而组织编写的。全书共选大学物理应用专题 16 个,内容涉及经典物理各部分的应用,物理学前沿的新理论、新技术等。全书内容广泛,应用性强,通俗易懂,可作为工科各专业的大学物理课程的教材或教学参考书,也可供工程技术人员参考。

前 言

作为研究物质运动最基本最普遍规律的物理学在形成以现代科学技术为标志的现代文明中发挥了举足轻重的作用。同时,科学技术的进步又极大地推动了物理学的不断向前发展。

大学物理是工科大学生的一门重要基础课。然而多年来大学物理只注重物理规律的学习和掌握,在其应用方面却没有明确要求,在许多大学生眼里,大学物理成了一门脱离实际、深奥抽象的理论课程,学好它也不知道有什么用。这样不仅影响学生的学习积极性,而且不利于知识的融会贯通及能力的培养。教学改革呼唤大学物理教学要理论联系实际,新近出版的一些大学物理教材在解决这个问题上作过一些有益的尝试,如在教材中编写一些应用方面的阅读材料,选取源于生产、生活实际的习题等,但终因篇幅等的限制,未能在这方面取得较大的突破。为此,国家教委工科物理课程教学指导委员会于1993年9月在中南工业大学召开扩大会议,对现行的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》进行了修订,在广泛听取各方面意见后,决定在基本要求中增加大学物理应用专题部分。这是大学物理教学改革的重要举措。本书就是根据这一精神,由中南工业大学、湖南大学、国防科技大学、中南工学院、长沙铁道学院、湘潭矿业学院等6所工科院校联合编写的。

本书共选大学物理应用专题 16 个,内容涉及力、热、电、声、光以及近代物理等大学物理各部分。对于每个专题力争在讲清基本原理的前提下,突出应用这一主题。在教学中,教师可根据各自专业特点选取其中与本专业联系较为紧密的专题进行讲授(或讲座),其他专题可由读者自学。因此本书可作为工科本、专科学生的教材和教学参考书。各专题分别由上述 6 所院校的 14 位作者撰写(分工见目录)。最后由杨兵初统编定稿。由于编者水平的限制,加上时间仓促,错误在所难免,恳请各位读者批评指正。

编 者

1994 年 6 月于长沙

目 录

专题一 变质量问题与运载火箭	杨兵初(1)
§ 1-1 关于宇宙速度	(1)
§ 1-2 火箭动力学基础	(6)
§ 1-3 火箭发动机	(9)
§ 1-4 火箭的制导	(12)
专题二 制冷与低温	李文斌(16)
§ 2-1 获得低温的方法	(16)
§ 2-2 制冷与冷藏	(19)
§ 2-3 低温真空技术	(23)
§ 2-4 低温粉碎	(25)
§ 2-5 低温技术在电子学中的应用	(27)
§ 2-6 低温技术的发展和展望	(30)
专题三 声学在建筑中的应用	谭昊(34)
§ 3-1 声学基本知识	(34)
§ 3-2 封闭空间的声学现象	(44)
§ 3-3 室内音质设计	(48)
专题四 静电的应用	杨兵初(59)
§ 4-1 静电放电现象	(59)
§ 4-2 静电除尘	(62)
§ 4-3 静电防腐蚀	(64)
§ 4-4 静电水处理技术	(67)

§ 4-5 静电对生物体的作用	(69)
专题五 磁效应及其应用	郭光华(73)
§ 5-1 几种磁效应	(74)
§ 5-2 磁性传感器	(78)
§ 5-3 磁存储与磁记录	(81)
§ 5-4 磁力选矿与磁法勘探	(84)
专题六 激 光	邓国扬(88)
§ 6-1 激光的特性	(88)
§ 6-2 如何获得激光	(90)
§ 6-3 激光技术发展现状	(97)
§ 6-4 激光的典型应用	(101)
专题七 微 波	罗益民(110)
§ 7-1 微波及其特点	(110)
§ 7-2 微波通信	(113)
§ 7-3 微波遥感	(115)
§ 7-4 微波加热	(119)
§ 7-5 微波测湿	(124)
§ 7-6 微波的生物学效应与防护	(125)
专题八 光纤通信	严欣达(129)
§ 8-1 均匀光纤中的射线传播	(130)
§ 8-2 非均匀光纤中的射线传播	(132)
§ 8-3 自聚焦光纤和自聚焦透镜	(134)
§ 8-4 光纤中传播模的概念	(136)
§ 8-5 光纤通信	(143)
专题九 无损检测	石环英(146)
§ 9-1 X 射线检测	(147)

§ 9-2	超声波检测	(158)
§ 9-3	利用电磁性质的无损检测	(164)
§ 9-4	渗透检测	(167)
§ 9-5	利用热现象的无损检测	(168)
§ 9-6	激光全息摄影无损检测	(168)
专题十	原子核及核技术	周克省(170)
§ 10-1	原子核的基本性质与结构	(170)
§ 10-2	原子核放射性衰变	(175)
§ 10-3	射线同物质的相互作用	(177)
§ 10-4	原子能	(179)
§ 10-5	放射性应用	(181)
§ 10-6	几种核分析技术简介	(185)
专题十一	固体能带与半导体	黄述熙(191)
§ 11-1	固体的基本性质	(191)
§ 11-2	晶体中的电子状态 能带论	(194)
§ 11-3	绝缘体、半导体及导体的能带结构	(197)
§ 11-4	半导体及其应用	(198)
专题十二	传感器技术	严欣达(212)
§ 12-1	振弦式谐振传感器	(213)
§ 12-2	电容式传感器	(217)
§ 12-3	半导体霍尔传感器	(220)
§ 12-4	光纤电流传感器	(222)
§ 12-5	光纤陀螺	(224)
专题十三	等离子体及其应用	何维杰(230)
§ 13-1	等离子体的基本性质及其主要特征量	(238)
§ 13-2	等离子体的导电性和介电性	(236)

§ 13-3 等离子体内的磁场及磁场对等离子体的作用	(238)
§ 13-4 等离子体的主要应用及前景	(242)
专题十四 超导电性	蔡建国 (248)
§ 14-1 超导电性基本现象	(249)
§ 14-2 超导电性的微观理论简述	(252)
§ 14-3 约瑟夫逊效应	(257)
§ 14-4 超导体的应用	(259)
专题十五 混沌	苏成悦 (267)
§ 15-1 蝴蝶效应	(268)
§ 15-2 非线性问题	(270)
§ 15-3 野生种群的数学模型	(274)
§ 15-4 分形和分维	(278)
§ 15-5 普适性	(280)
§ 15-6 混沌现象的图形描述和其他	(283)
专题十六 计算机在物理学中的应用	郑采星 (287)
§ 16-1 一维牛顿第二定律	(287)
§ 16-2 二维牛顿第二定律	(291)
§ 16-3 功的计算	(294)
§ 16-4 刚体的定轴转动	(298)
§ 16-5 电场	(301)
§ 16-6 电势	(304)
§ 16-7 磁场	(308)

专题一 变质量问题与运载火箭

远古古代，人类就抱着摆脱地球吸引力，到太空去遨游的美好幻想。自牛顿以后，遨游太空的幻想变成了科学的理论，并逐步得以完善。1957年，苏联第一次发射人造地球卫星成功；1965年3月18日，苏联宇宙飞船“上升二号”上天，第一位宇航员探身于太空；1969年7月12日，美国宇宙飞船“阿波罗十一号”在月球上安全着陆，两名字航员旅行了嫦娥的行宫。现在，地球的周围空间飞行着几百颗各种用途的人造地球卫星，航天飞机已经可以用于很多实际目的，人类正在计划探索更远的星球。

我国自1970年4月24日成功地发射第一颗人造地球卫星以来，共发射了四十多颗不同型号、不同用途的卫星。我国目前具有将各种卫星送入轨道的能力，可以承接国际卫星用户的发射业务。在火箭技术方面，我国已成为世界强国之一。

§ 1-1 关于宇宙速度

发射人造卫星、飞船等空间飞行器的关键是速度。宇宙航行史实际上是一部人类为创造高速度而斗争的历史。空间飞行器能否入轨，完全取决于火箭在大气层外运送卫星、飞船的速度大小和方向。如果这两者都未能达到预定的要求，则不管

卫星、飞船离地球多高、多远，都会掉回地面上来。而且卫星、飞船能否准确进入预定轨道，完全取决于对入轨速度大小和方向控制的精确程度。

第一宇宙速度

根据牛顿力学，只要卫星的速度足够大，使它作曲线运动的离心力等于地球对这一卫星的引力，那么卫星就不会掉回地球，而成为一颗绕地球不断运转的人造天体。根据这一原理，可以简单地计算出这个速度的量值。

$$mg_r = \frac{mv_0^2}{r} = \frac{mv_0^2}{R_0 + h} \quad (1-1)$$

等式左边是卫星飞行在半径为 r 的圆周上时所受的地球引力（重力），等式右边是卫星作圆周运动的向心力。 m 为卫星质量； v_0 是它的速度， R_0 为地球半径， h 为卫星离地面的高度， g_r 为半径为 r 的圆周上的重力加速度。因为

$$g_r = g_0 \frac{R_0^2}{r^2}$$

其中 g_0 为地球表面的重力加速度。所以

$$v_0 = \sqrt{rg_r} = \sqrt{\frac{g_0 R_0^2}{R_0 + h}} \quad (1-2)$$

从上述公式中不难看出， r 越大 v_0 越小。亦即卫星离地面的距离越远，则地球对卫星的引力就越小，所以卫星所需要的轨道速度 v_0 也就越小。第一宇宙速度是指卫星运转半径等于地球半径时的速度。从上述公式中，已知 $R_0 = 6371 \times 10^3$ 米， $g_0 = 9.82$ 米/秒²， $h = 0$ ，所以可以求得第一宇宙速度的量值 $v_1 = 7909$ 米/秒。当卫星的轨道为 $h = 200$ 公里的圆轨道时，轨道速度就降至 7789 米/秒。

如果卫星的速度比 v_1 大，则它绕地球飞行的轨道将是一个

椭圆。卫星速度越大，椭圆就变得越扁。当速度增大到某一数值时，卫星就会挣脱地球对它的束缚而进入太阳系。这一数值所表示的速度就是第二宇宙速度。

第二宇宙速度

第二宇宙速度是指从地球表面发射一颗能脱离地球引力场的卫星所需要的速度。以这一速度循着抛物线逃离地球的卫星，永远不会再返回地球，所以第二宇宙速度也叫“逃逸速度”。这一速度可按下列式计算。

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = mg_0R_0 \quad (1-3)$$

等式左边是质量为 m 的卫星发射时所具有的动能，等号右边是卫星从地球表面逃离地球引力场时所要做的功。

因为第一宇宙速度为

$$v_1 = \sqrt{g_0R_0}$$

所以可以得出

$$v_2 = \sqrt{2g_0R_0} = \sqrt{2}v_1 = \sqrt{2} \times 7.91 = 11.18 \text{ 公里/秒} \quad (1-4)$$

从上式中可以看到，第二宇宙速度的数值恰好是第一宇宙速度的 $\sqrt{2}$ 倍。

如果是在与地球中心相距 r 处离开地球的，那么所需要的逃逸速度是

$$v = \sqrt{2g_0r} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{g_0R_0^2}{r}} = \sqrt{2}v_0$$

从这个公式可以看到，离地心 r 处的卫星其逃逸速度 v 是同半径圆形轨道的卫星速度的 $\sqrt{2}$ 倍。可见，绕地球运行的卫星、飞船要想在原有的轨道上逃离地球，成为太阳的一颗人造天体，其

逃离地球所需的速度还可以低于第二宇宙速度。

第三宇宙速度

如果卫星的速度比第二宇宙速度还大，其轨道将会发生什么变化呢？当速度达到 16.63 公里/秒时，连太阳的引力也吸引不住这颗卫星了，它将循双曲线轨道飞出太阳系，这个速度叫做第三宇宙速度。

第三宇宙速度是指卫星脱离太阳系引力场所需的最小速度。必须注意着重点是指脱离太阳系的最小速度这一概念。体现这个概念有两个前提：第一要充分利用地球绕太阳公转的速度，使运载火箭相对于太阳飞行的方向要与地球公转运动的方向一致，偏离这个方向，都会导致增大逃离太阳系所需的速度；第二是使火箭一开始就把卫星加速到第三宇宙速度，而不是先只加速到第二宇宙速度 v_2 ，等卫星脱离地球引力场后，再启动火箭把卫星加速使之能脱离太阳系。如果那样做，分两段对卫星加速，所加的速度就不是脱离太阳系的最小速度。根据上述的两个前提，就可以按下式计算出第三宇宙速度的大小。

$$\frac{1}{2}mv_3^2 = \frac{1}{2}m(v_{\text{太}} - v_{\text{地}})^2 + mg_0R_0 \quad (1-5)$$

等式左边是质量为 m 的卫星从地球表面发射脱离太阳系所具有的动能，等式右边的第二项是卫星从地球表面起飞，克服地球引力场所做的功，第一项是充分利用地球公转速度 $v_{\text{地}}$ ，使质量为 m 的卫星脱离太阳系引力场，必须增加的动能， $v_{\text{太}}$ 是卫星脱离太阳系引力场所需的速度； $v_{\text{地}}$ 是地球绕太阳公转的速度，其大小为 $v_{\text{地}} = 0.46\text{km/s}$ 。

利用这个公式，经过变换、简化和计算，就可得到第三宇宙速度 v_3 为

$$v_3 = \sqrt{(v_{\text{太}} - v_{\text{地}})^2 + 2g_0 R_0} = 16.63 \text{ 公里/秒} \quad (1-6)$$

图 1-1 给出了卫星的飞行轨道随速度而变化的情况。与火

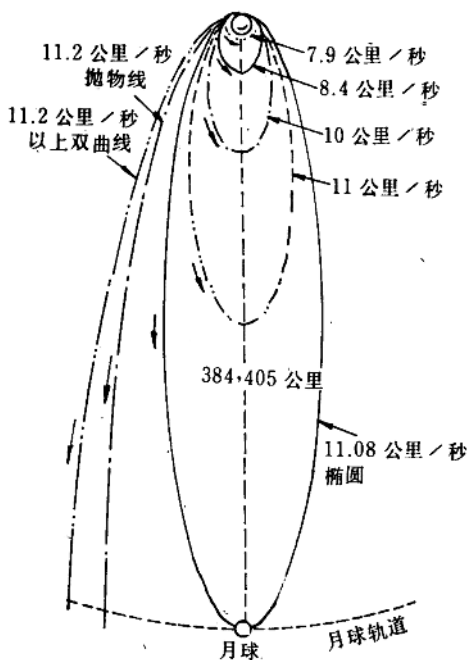


图 1-1 由于初始速度不同引起的轨道变化

箭分离时，卫星的初始速度等于第一宇宙速度时，其运动轨道为一个圆；当卫星的初始速度大于第一宇宙速度但小于第二宇宙速度时，卫星的运行轨道为椭圆，地球中心是椭圆的一个焦点。假如使卫星加速到 11.08 公里/秒的速度，卫星就可以飞向月球；当卫星速度达到第二宇宙速度时，其轨道变成抛物线。当初始速度超过第二宇宙速度时，其轨道就又变为双曲线。不管是圆、椭圆、抛物线还是双曲线，轨

道均是以地心为焦点的，显然圆轨道可以视为椭圆轨道的特殊情况。当卫星的轨道成为抛物线或双曲线时，卫星就能摆脱地球的引力，不再回到开始的入轨点，而是一直飞向遥远的宇宙空间。总之，卫星的轨道形状，有赖于它与火箭分离时的高度和速度。

§ 1-2 火箭动力学基础

火箭的运动是由火箭发动机高速喷出燃气的反作用力而引起的，所以反作用运动定律是火箭运动的力学基础。由于火箭不断地向外喷出燃气，使其推进剂（燃料+助燃剂）质量不断减小，因此，火箭的运动是一种变质量物体的运动。

火箭的运动原理

为简化问题起见，暂且不考虑地球引力和空气阻力对火箭的作用。并设 t_0 时刻，火箭的质量为 m_0 ，火箭向前的运动速度为 v_0 ；在 Δt 时间内，火箭喷出的燃气的质量为 Δm ，燃气相对于火箭的运动速度为 u ，喷气过程中火箭增加的速度为 Δv ，如图 1-2 所示。由于火箭没有受到外力的作用，所以火箭的动量是守恒的。

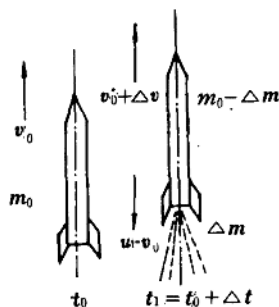


图 1-2 火箭的运动

在喷气前，火箭的动量等于 $m_0 v_0$ ，方向向前。在喷气后，火箭质量变为 $m_0 - \Delta m$ ，向前的速度变为 $v_0 + \Delta v$ 。因此，火箭的动量变为 $(m_0 - \Delta m)(v_0 + \Delta v)$ ，方向向前。喷出的燃气动量为 $\Delta m(u - v_0)$ ，方向向后。喷气后整个系统的总动量为

$$(m_0 - \Delta m)(v_0 + \Delta v) - \Delta m(u - v_0)$$

利用动量守恒定理得到

$$m_0 v_0 = (m_0 - \Delta m)(v_0 + \Delta v) - \Delta m(u - v_0)$$

把上式展开后得

$$(m_0 - \Delta m) \Delta v = \Delta m u \quad (1-7)$$

把 (1-7) 式两边都除以喷气时间 Δt , 可得:

$$(m_0 - \Delta m) \frac{\Delta v}{\Delta t} = u \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

若火箭的喷气是均匀的, 可以令 $m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$, m 表示单位时间内火箭喷出的燃气质量。则 (1-7) 式可写成

$$(m_0 - \Delta m) \frac{\Delta v}{\Delta t} = mu \quad (1-8)$$

方程 (1-8) 的右边, 是在 Δt 过程中火箭所受的推力, 推力用 F 表示, 即

$$F = mu \quad (1-9)$$

u 称为火箭发动机的有效喷气速度, m 是推进剂的质量流量。从方程 (1-9) 可以看出, 火箭的推力与 u 和 m 成正比。

火箭的理想速度

所谓火箭的理想速度, 是在不考虑地球引力和空气阻力的影响下, 即没有外力作用的理想情况下, 所求得的火箭的速度。

当火箭刚从地面起飞时, 设火箭的初始质量为 m_0 , 时间 $t_0 = 0$, 初速度 $v_0 = 0$; 起飞后, 燃气相对于火箭的有效喷气速度为 u , 把方程 (1-8) 写成微分形式, 得到

$$(m_0 - mt) dv = u m dt$$

$$dv = \frac{u m dt}{m_0 - mt} \quad (1-10)$$

对 (1-10) 式两边积分

$$\int_{v_0}^{v_k} dv = u \int_0^{t_k} \frac{m dt}{m_0 - mt}$$

$$v_k = v_0 + u \ln \frac{m_0}{m_0 - m t_k} \quad (1-11)$$

上式中 $m t_k$ 实际是火箭所消耗的推进剂的总质量，而 $m_0 - m t_k$ 为火箭发动机工作结束时，余下来的火箭质量。它包括火箭的结构、各种仪器设备和有效载荷质量等。通常用 m_k 表示， $m_k = m_0 - m t_k$ ，即

$$v_k = v_0 + u \ln \frac{m_0}{m_k} \quad (1-12)$$

速度方程 (1-12) 是齐奥尔科夫斯基首先提出来的，称为“齐氏公式”。由于它是在理想情况下得到的，所以 v_k 称为理想速度。

m_0/m_k 称为火箭的质量比。火箭质量比越大，说明火箭结构重量越轻，火箭就可以得到更大的速度。另外，理想速度与火箭发动机的有效喷气速度 u 成正比，提高 u 值对提高理想速度更为有效，但是，提高 u 值也受到一定条件的限制。

多级火箭

如在第一节中所述，欲发射人造地球卫星，火箭必须达到第一宇宙速度，即 7.91 公里/秒。运载火箭从地面起飞，它要受到地球引力的作用；同时，它要穿越稠密的大气层，又受到空气阻力的作用。这两项外力的作用，都使火箭的速度受到损失。据统计，地球引力和空气阻力对运载火箭所造成的速度损失，大约在 1.5~2.0 公里/秒。也就是说，用齐氏公式来进行估算，运载火箭大约应具有 9.5—10 公里/秒的理想速度，才能把人造地球卫星送入预定轨道。

要达到 9.5 公里/秒以上的速度，火箭的有效喷气速度 u 就要大于 4 公里/秒，同时火箭的质量比 $\frac{m_0}{m_k}$ 也要大于 10，这在目前

是难以实现的。要用单级火箭发射人造卫星，技术上是困难的，因此现在普遍采用的是多级火箭技术。

多级火箭是由几个火箭首尾连接而成，当第一级火箭燃料耗尽后，其壳体自动脱落，第二级接着点火，如此下去，直至最后一级，从而把卫星送入轨道。设 N_1 、 N_2 、 $\dots$ 为各级火箭的质量比，则各级火箭达到的速度应为

$$v_1 = u \ln N_1 \quad (1-13)$$

$$v_2 - v_1 = u \ln N_2 \quad (2-14)$$

$$v_3 - v_2 = u \ln N_3 \quad (1-15)$$

.....

最后达到的速度 $v = \sum u \ln N_i = u \ln (N_1 N_2 N_3 \dots)$ 。由于质量比大于 1，因而当火箭级数增加时，就可获得较高的速度。例如设一个三级火箭的质量比为 $N_1 = N_2 = N_3 = 5$ ， $u = 2000$ 米/秒，则火箭最终可达到速度 $v = u \ln N^3 = 10.6$ 公里/秒。

§ 1-3 火箭发动机

火箭发动机是一种把火箭的能源换成能量的动力装置。它使推进剂在燃烧室燃烧，放出热能，形成高温高压气体加速流动，产生向外喷射的动能，从而推动火箭向前运动。

火箭发动机的特点是，它本身同时带有燃烧剂和氧化剂（合称为推进剂）。它不像航空喷气发动机那样，需要从周围大气中获得氧化剂，所以它不仅可以在大气中工作，而且在没有空气的空间里，火箭发动机的性能更好。这是因为发动机的推力随着周围大气压力的降低而提高。

火箭发动机的主要性能参数