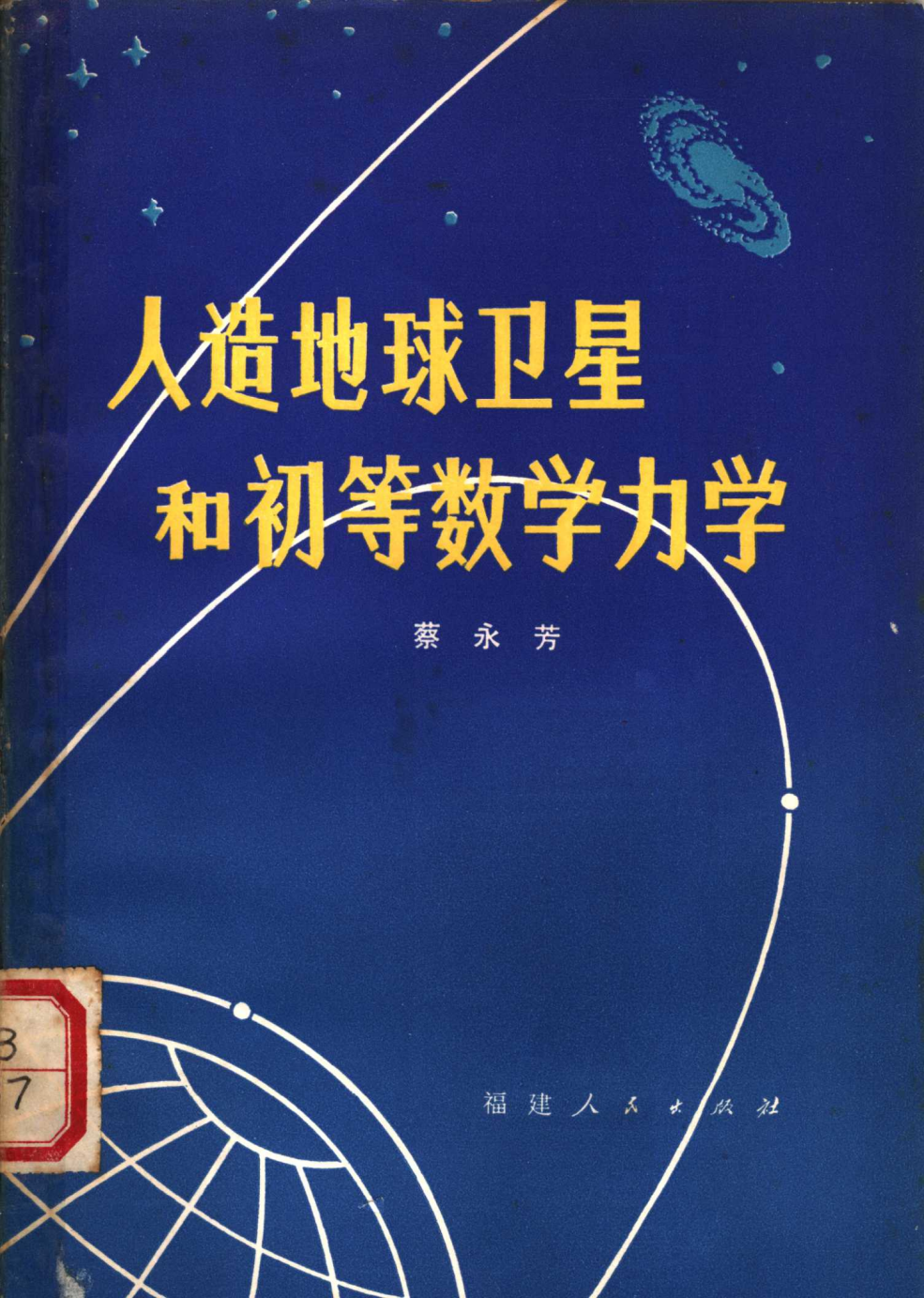




人造地球卫星 和初等数学力学

蔡 永 芳

福 建 人 民 出 版 社

3
7

人造地球卫星
和
初等数学力学

· 蔡永芳

福建人民出版社

人造地球卫星和初等数学力学

蔡永芳

*

福建人民出版社出版

福建省新华书店发行

福建新华印刷厂印刷

787×1092 1/32 2 7/8印 56千字

1978年4月第1版

1978年4月第1次印刷

书号: 13173·3 定价: 0.22元

前 言

宇宙航行，自二十世纪五十年代一开始就是科学技术最突出的一项成就，是整个现代科学技术最高水平的综合体现。自从1957年10月世界上第一颗人造地球卫星上天以来，到目前为止，各国发射成功的人造天体总数已超过两千个，其中约有八百多个今天仍在轨道上运转。根据不同的研究目的，人造天体大致可分成三种类型：

（一）人造地球卫星——如我国发射的七颗卫星。

（二）月球火箭（包括月球卫星）。

（三）行星际火箭。

宇宙航行虽是尖端技术，然而它的基础也还是数学、物理、化学等。在本书中可以看到人造地球卫星与初等数学力学的关系是非常密切的。

本书是编者根据多年来向中学生作的课外讲座和课内补充教材所积累的资料整理而成的。在写法上，力求通俗易懂，每节着重讲述一、二个问题，并且配备相应的插图，每个章节虽各成段落，但仍有连贯性。

与一般通俗读物的惯例不同，本书还穿插许多数学计算，因为我们希望对事物的认识，不仅要知其然，而且还要知其所以然；不通过计算就得到的知识是不牢固的。但本书也不同于专业书籍，它省略了某些繁杂的推导，而代之以模拟、比喻的讲解法。因为这些推导超出了本书内容的范围。

目 录

第一章 绪论.....	(1)
§1.1 人造地球卫星上天的重大意义.....	(1)
§1.2 火箭的来历.....	(3)
第二章 卫星的发射和回收.....	(6)
§2.1 发射卫星的合理航线.....	(6)
§2.2 卫星的回收.....	(9)
第三章 卫星的受力及其速度.....	(13)
§3.1 卫星的环绕速度.....	(13)
§3.2 三个宇宙速度.....	(16)
§3.3 发射卫星借用的速度.....	(21)
§3.4 卫星的失重.....	(23)
§3.5 卫星的超重.....	(26)
§3.6 提高火箭速度的途径.....	(29)
§3.7 多级火箭.....	(32)
§3.8 卫星速度随其高度而变化.....	(34)
第四章 卫星的轨道.....	(39)
§4.1 人造天体的轨道.....	(39)
§4.2 卫星轨道的面积和面积定律.....	(42)
§4.3 卫星轨道的偏心率.....	(47)
第五章 卫星的可见地区和轨道倾角.....	(51)

§5.1	同时看到卫星的地区·····	(51)
§5.2	卫星的轨道倾角·····	(54)
§5.3	我国与苏联、美国第一颗卫星的比较·····	(57)
第六章	卫星的周期和看到的时间·····	(60)
§6.1	卫星的周期定律·····	(60)
§6.2	卫星的周期公式·····	(62)
§6.3	卫星的最小周期·····	(66)
§6.4	看到卫星飞过的时间·····	(68)
§6.5	预报明天再见卫星的时刻·····	(70)
第七章	卫星应用举例·····	(73)
§7.1	通信卫星·····	(73)
§7.2	导航卫星·····	(77)
附 录	·····	(81)
§1.	本书主要的参考书目·····	(81)
§2.	本书引用的数学公式·····	(81)
§3.	本书引用的力学定律·····	(84)

第一章 绪 论

§1.1 人造地球卫星上天的重大意义

东风劲吹心花放，红色卫星游太空。七十年代第一春，我国成功地发射了第一颗人造地球卫星。雄壮的《东方红》乐曲，响遍了全球，震撼着天宇！

自此以后，我国在征服太空方面捷报频传。1975年11月26日，我国成功发射的第四颗卫星，于12月2日胜利返回地面，在技术上又有了新的重大进展。

人造地球卫星，是指人工制造和发射的绕地球运转的天体。我国卫星上天，在政治上、科技上和军事上都具有重大的意义。中国人民的这一伟大胜利，粉碎了苏修美帝垄断空间技术的迷梦，给世界人民以巨大的鼓舞！

人造卫星在科学技术上有重大的价值。它在通讯联络、电视转播、气象预报、定点导航、高空探测（外层大气、

电离层等）、摄影测绘、天文研究、能源开发（太阳能卫星电

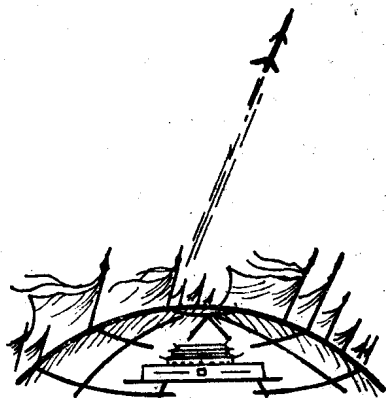


图1

站)等方面都有广泛的用途。1973年5月间,已有人在卫星轨道上建立第一个空间站——“天空实验室”。这是一个巨型卫星,宇航员以此作为中继站,乘火箭往返月球,并利用在站上的真空和失重条件,试验制取一些目前在地球上不能制造的超纯金属和超强硬金属。此外,星际航行还将对一些目前与它联系得较少的学科(如生物物理,地质等)提出新的研究课题,促进它们向新的发展方向。展望未来,人们借助于此类星际航行站,可乘火箭再到金星、火星等其他星球上去。

人造卫星在军事上也有重要的用途。利用它作为洲际通讯的中继站,能不受电离层的干扰,畅通无阻地用无线电进行军事联络;在卫星上装上特制的照相机或电视摄像机,能拍摄地形,侦察军事目标,再把这些情报用无线电传回地面;在卫星上设置红外探测装置,能辨别导弹的发射地点和发射方向,作为空中警戒站;在卫星上装置高灵敏度的 γ 记录仪器,能用来检测高空的核爆炸;在卫星上装置导弹核武器,能打击敌人;此外,还能用卫星来破坏敌人的军用卫星,使之爆炸或失去作用。

卫星航天,几乎应用了现代科技的所有最新成就。例如为了精确地设计卫星的轨道,需要数学、天体力学、计算技术等多种学科的紧密配合。要使卫星上天,在设计、制造、发射、通讯等每一个部门,都需要千万名科技人员、工人、解放军指战员和民兵组成的队伍,这些部门所需要的设备在质上要求最高,在量上也非常多,因此,没有一个成龙配套的工业体系,没有一支由多种学科组成的科技队伍,发射卫星

就不可想象。所以说，卫星上天，标志着我国科技水平达到了一个新的高度。

然而，万丈高楼平地起。卫星航天技术，也是以数学、物理、化学等基础学科所阐述的一般自然规律为理论基础的，是这些理论在空间技术领域中的应用和发展，所以，掌握空间技术，虽不简单，也不神秘。世上无难事，只要肯登攀。

§1.2 火箭的来历

当代世界在宇宙航行上的巨大成就是人类千百年来创造性劳动的结果。我们祖先很早就有遨游太空的美好理想，给后代留下了象嫦娥奔月之类的传奇故事。而为实现飞天愿望开辟出一条道路的也正是我们的祖先。我国是火箭的故乡。它与指南针、造纸、火药和印刷术这四大发明一样，对人类作出了杰出的贡献！中国火箭的发明可追溯到公元969年（宋朝）。公元975年，宋军首次把它用作战争武器，这是火箭的鼻祖。在十三世纪，中国火箭先传入阿拉伯国家，而后又传入欧洲。到了明朝，火箭技术又有不少改进。十六世纪中叶，民族英雄戚继光在沿海一带抗倭寇战斗中，为了提高火箭武器的威力，还制造了能装多支火箭并能进行齐射的“火箭车”。到了十八世纪，英国侵略印度时，印度人曾用火箭武器给予反击，迫使英国人研究火箭，并用它来武装自己。但当时火箭的准确性很差，所以后来被进一步发展的准确性很高的火炮所代替。然而这些火箭的原理，奠定了近代火箭技术的基础。近代火箭技术理论的奠基者是中学教师出身的俄国科学

家齐奥尔科夫斯基（1857—1935），是他首先提出了使用液体推进剂和多级火箭以获得高速度的设想；是他研究了使用燃气舵来控制火箭的方向……。还有美国的哥达德，他在1910年开始进行这方面的工作，并在后来创造出了几种供气象研究用的液体火箭。到了第二次世界大战末期，在法西斯德国出现了近代火箭 V—2，它相当于一架无人驾驶的有去无回的轰炸机。

但 V—2 并未能挽回希特勒注定了的失败。

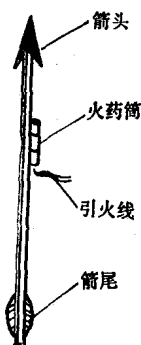


图2 我国古代的火箭

我国古代的火箭（图2）是在箭上扎一竹管或坚固的纸筒，一端封闭，一端开有小孔，其中装有黑色火药，在点燃火药以后，用弓将火箭射出，烟气从小孔喷出而产生的反冲力，使火箭加速飞向目标，烧毁敌阵。到了三百年前的明代，出现了“出水火龙”



图3 出水火龙

兵器（图3）。它是用竹筒作成龙身，龙嘴内放几支火箭，作战时，先点燃龙身下的几支火箭，使竹筒在水面飞行，待火药快燃完

时，便点着龙嘴内的火箭，使之射向远处的敌人。这实际上已是现代二级火箭的雏形。

我国古代的火箭武器，实际上与用来发射卫星的火箭的原理是一样的，只不过大小和速度不同罢了。火箭点火后，

立即燃烧，产生的大量气体急速地向后喷出，于是产生一股反冲力，使得火箭腾空而起。现代的火箭，本身携带燃料和氧化剂，所以在没有空气的高空，也能飞行。由于它受到巨大反冲力的推动，足以克服地球引力和空气阻力，因此仍能高速前进。当末级火箭把卫星射入轨道后，卫星就依靠所得到的速度，在地球引力作用下，绕地球运转。

第二章 卫星的发射和回收

§2.1 发射卫星的合理航线

飞机从跑道起飞，按照预定航线飞往目的地；卫星也要求沿着设计的航线，射入预定的轨道。

发射卫星的场面是很雄伟壮观的：随着一声震动大地的轰鸣，一股熊熊气焰从火箭尾部喷出，顿时“巨龙”腾空升起。呼啸着的火箭越飞越快，一刹那间，便消失在万里长空之中，只留下长长的一缕白色烟带。整个发射过程只有几分钟至十几分钟的时间。

卫星从地面起飞到入轨的航线，可根据卫星的任务和火箭性能来选定。但较常用的是下面这样一种航线，因为它在满足轨道高度要求的前提下，较省燃料。

卫星是安置在火箭顶端的前舱里，由运载它的多级火箭逐步加速入轨的。为了减少空气的巨大阻力，同时也不致因摩擦过久把火箭烧坏，火箭要尽快地通过地球周围的大气层，因此火箭外表要做得细长光滑，而且最好要与地面垂直起飞。但垂直起飞要遭受最大的重力损失，因为它正好跟地球引力方向相反，地球引力对它的作用最大，使得

$$\text{火箭速度} = \text{火箭原有速度} - gt,$$

式中 gt 是自由落体经过运动时间 t 时的速度。而与地面平行发射的火箭所受的速度损失最小（地球引力只改变速度的方

向而不改变速度的大小)，可是水平起飞的火箭受空气阻碍的作用最大！因为它通过大气层的路程最长，如图4。如果是垂直起飞，则到了AB=100公里的高空，空气阻力已小到

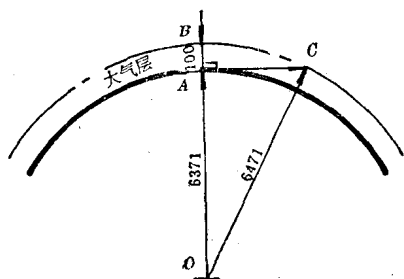


图4 垂直与水平发射火箭
过大气层的航程比较

可以忽略不计的程度；但水平起飞要作路程比AB长得多的
 $AC = \sqrt{6471^2 - 6371^2} = 1131$ 公里的飞行。

这是个矛盾。为使这两种损失都减小到最低限度，就采用这样的航线：开始，火箭是垂直于地面起飞，但因受地球自转的作用，火箭实际上变成近乎垂直上升，当第一级火箭燃料烧完，紧接着第二级火箭发动机点火，在火箭继续加速的同时，改变喷气方向，使推力改向，火箭逐渐向斜上方飞行，当飞出大气层的稠密部分后（离地面约100公里的高空），第二级火箭的燃料也烧完了，这时火箭继续远走高飞而方向逐渐转向水平，以便减少重力对火箭速度的损耗，又能到达预定的卫星轨道。在第一、二级火箭发动机发动阶段，火箭是在推力作用下加速飞行的，叫做加速段。为了减少能量的消耗，我们希望绝大部分推进剂在低空就都燃烧，使火箭尽量加速，这样，火箭的燃气就留在势能较低的地方；不然，火箭就要多运载供以后飞行所需的尚未燃烧的推进剂，这样就要多消耗能量；火箭发动机的熄火点越高，消

耗能量也就越多。紧接着第二级火箭熄火后的是自由飞行段,这时火箭不再受推力的作用,而是利用火箭已有的能量,在地球引力作用下,沿椭圆弧①路线作惯性飞行,一直飞到与预定轨道相切的位置C(图5),第三级火箭才点火,最后加速一小段,使卫星自火箭舱内沿水平方向射出时,达到每秒7.9公里左右的速度入轨。如果没有这一小段的加速,卫星就会在重力作用下掉落,这正如洲际弹道导弹一样,落到地球的另一面。所以能发射卫星的火箭,稍作修改也就能发射洲际导弹,只要把卫星换上弹头即可。由于自由飞行段(椭圆弧)是火箭继续上升的航线,所以它与卫星轨道相切的那一点C是自由飞行段的远地点。由于卫星水平入轨的速度通常比入轨点的环绕速度②大,所以入轨点D往往是卫星轨道的近地点。

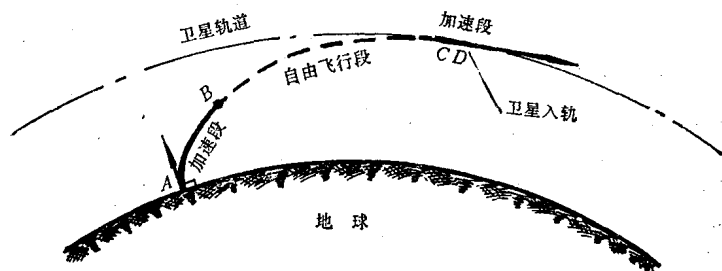


图5 发射卫星的合理航线

为了使花费的燃料最省,更有效地增加速度,必须使火箭推力尽可能与其前进方向一致。火箭的航线就在由推力和地

①火箭在自由飞行段与卫星在轨道上一样,都是只在地球引力作用下作惯性飞行,因此自由飞行段与卫星轨道一样,都是椭圆(参阅§4.1)。

②环绕地球作圆周运动所必需的速度,叫做环绕速度。

球引力所确定的过地心的平面内。

当然，这三段轨道（加速段AB—自由飞行段BC—加速段CD）不是唯一可能的上天航线，例如可以不采用自由飞行段这一较长的轨道，以使航线不超出国土或自己控制的地区；从地面开始到入轨的航线也可以不在同一平面内，例如发射静止卫星就是这样（参看§7.1），但这都要多消耗能量。实际上，我们常根据需求和可能来选择消耗能量最小的航线。倘若单纯从消耗能量最省这一点考虑，好的航线总是在两个主动段之间加一段比较长的自由飞行段。

§ 2.2 卫星的回收

1975年11月26日，我国成功地发射了第四颗卫星，并在经过一周的运转后，按照预定计划返回地面，这标志着我国空间技术达到了一个新的水平。

人造卫星的发射是一个加速过程，由运载火箭将它由静止状态逐渐加速到第一宇宙速度。而卫星的返回则是一个减速过程，从轨道上的宇宙速度逐渐减速到接近地面时的每秒几米的速度，然后安全着陆（或溅落海上或用飞机在空中回收）。

卫星的返回，首先要使它脱离原来的运行轨道，转入一条新的、能进入大气层的过渡轨道。假定卫星在轨道上某点A的速度为 v_1 （图6），由卫星携带的小制动火箭的推力沿着与当地水平面成角 θ 的方向作用很短的一段时间（大约几秒），使卫星在 θ 角的方向获得每秒约几百米的速度 Δv ，从而卫星就以 v_1 和 Δv 的合成速度 v_2 进入一条新的椭圆形的

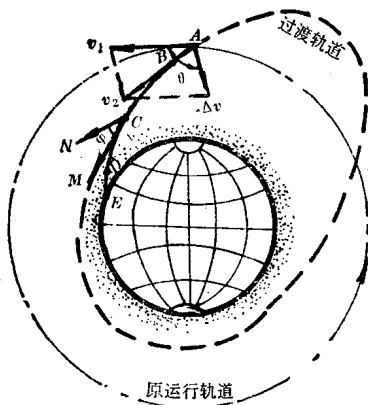


图 6 返回轨道示意图

过渡轨道，这就是卫星的制动飞行段(AB段)。制动火箭推力的大小和方向要十分精确，不然卫星将沿着新的轨道继续绕地球运转。1959年8月13日，美国“发现者5号”卫星返回时，在制动火箭点火后不知去向，杳无音信，后来查明，原来在调整返回姿

态时，把方向调错了，结果制动火箭变成了一个加速火箭，把卫星推到了更高的轨道。同时，还要精确选取制动火箭点火的位置，以便卫星能落在预定的回收地区。因此能否将卫星的姿态和位置调整到制动火箭点火时推力所需的方向和位置，是卫星能否正常返回的关键问题之一。

其次，卫星离开原来的轨道后，在重力的作用下，沿着过渡轨道自由下降，这就是大气层外自由下降段(BC段)。

再次，是再入大气层段(CD段)，卫星在100公里左右的高度开始进入大气层，卫星在进入大气层时的速度方向CM与当地水平线CN的夹角 $\angle MCN = \varphi$ ，叫做再入角。 φ 不能太小，不然卫星可能只在大气层的边缘擦过而进不了大气层； φ 也不能太大，不然卫星在大气层里受空气阻力而减速的负加速度(制动加速度)太大使摩擦加热过于严重。一个物体在空气中运动，作用在其上的空气阻力是与空气密度、

物体的横截面积和速度的平方成正比的，由于卫星再入大气层时的速度很大，同时在设计它的外形时，不要搞成流线形，使它的阻力系数高一些，这样作用在卫星上的空气阻力很大，最大可以达到它本身重量的几倍到十几倍，卫星也就以几倍到十几倍于重力加速度 g 的制动加速度进行减速。再入角太大，意味着减速得太快，但是载人卫星所允许的最大制动加速度不得超过航天员身体所能忍受的程度，在正常情况下不得超过 $10g$ ，所以卫星只能较平地进入大气层，不能太陡，再入角在 $1^\circ \sim 3^\circ$ 的范围；对于不载人的卫星，减速的制动加速度可达 $10g \sim 20g$ ，再入角不超过 10° 。在空气阻力的作用下，卫星速度急剧地降低到十几公里高度时的每秒 200 米左右。

最后，是着陆阶段（DE段），在 15 公里以下的高度，由降落伞将卫星的速度进一步减低到安全着陆的速度。

在轨道上运转的卫星拥有相当大的能量，包括动能（来自卫星的速度）和势能（来自卫星相对于地面的高度）两部分，卫星进入大气层后，由于与空气剧烈摩擦，卫星巨大能量的绝大部分都转化为热能，虽然热量大都扩散在周围的空间里，但若不采取防热措施，剩余的那一小部分热量尚足以把它烧熔（温度可高达摄氏几千度至上万度），就象流星陨落那样焚毁。因此卫星能否耐热，也是它能否返回地面的关键。常用的防热方法有三种：

1. 热沉法：在卫星表面装设一层较厚、热容量较大的蒙皮（由比热大、导热性好、熔点高的金属材料，如铍、铜合金制成），它将热量吸收，并贮存在内。但此法防热能力