

# 人造地球卫星

RENZAODIQUIWEIXING

天津科学技术出版社

# 人 造 地 球 卫 星

潘维济 区镜添

天津科学技术出版社

# 人造地球卫星

潘维济 区镜添

\*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷一厂印刷

天津市新华书店发行

\*

开本 787×1092毫米 1/32 印张 3 1/2 字数 69,000

一九七九年十二月第一版

一九七九年十二月第一次印刷

印数: 1-9,000

统一书号: 15212·3 定价: 0.31元

## 前 言

伟大领袖毛主席指示我们：“我们也要搞人造卫星。”在这一伟大号召指引下，1970年4月24日，我国成功地发射了第一颗人造地球卫星，这标志着我国在科研工作方面，工业生产水平方面，达到了新的水平。人造地球卫星的成功发射是人类在二十世纪六十年代末的一门最新的科学技术。它牵涉的面极广，包括高能燃料的研制，特殊合金的冶炼，精密的轨道计算，灵敏的航天遥感，误差极小的制导技能，等等，是一门综合性的学科，卫星的发射带动了其他科学领域和科学技术的高速发展。

人造卫星在地面上空围绕地球运行，主要是在地球的有心引力场中运动，它的运动是有规律的。了解和掌握这些规律是一个数学和物理上的基本理论问题，是很重要的，掌握这些规律有利于我们更进一步地去利用自然，改造自然，利用人造卫星来更好地为人类服务。例如，我们希望卫星的运行轨道是圆形还是椭圆形，是高空轨道还是低空轨道，是极地轨道还是低倾角轨道，是太阳同步轨道还是地球同步轨道，这是根据我们的实际需要提出来的。怎样达到我们的预期目的，首先就得了解规律和掌握规律。

人造卫星已经上了天，情况就大不一样了，它脱离了地

球的部分束缚和大气对人类的“蒙蔽”，可以对自然界作更仔细、更全面的观测，了解到更多地面上看不到的现象，获得了地面上得不到的观测条件。人造卫星远离地球，可以对地球作更全面的测量和研究。这样，人造卫星对天文、地理、气象、海洋、地质、水文、空间物理和地球物理都提供了难能可贵的数据和资料，为所有这些学科的发展开辟了新的道路。总而言之，人造地球卫星使人类“广开眼界，别开生面”。

当前，我们正在为二十世纪内实现四个现代化的宏伟目标而努力奋斗。四个现代化科学技术现代化是关键，并且在现代各个科学领域中，空间科学，空间技术，空间物理学占着首要地位。我们一定要加强这一方面的研究工作，使人造地球卫星在实现我国四个现代化中，做出更大的贡献。

潘维济 区镜添

一九七八年四月

# 目 次

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| 第一章 人造地球卫星的运动规律及其理论基础 ..... | ( 1 )  |
| §·1·1 卫星运动规律的数学物理问题 .....   | ( 1 )  |
| §·1·2 卫星的轨道为一平面曲线 .....     | ( 7 )  |
| §·1·3 面积定理 .....            | ( 10 ) |
| §·1·4 轨道方程 .....            | ( 12 ) |
| §·1·5 椭圆轨道 .....            | ( 13 ) |
| §·1·6 轨道平面的进动 .....         | ( 19 ) |
| §·1·7 宇宙飞船 .....            | ( 22 ) |
| 第二章 人造地球卫星的发射与回收 .....      | ( 26 ) |
| §·2·1 多级火箭的必要性 .....        | ( 26 ) |
| §·2·2 控制轨道各个参数的一些问题 .....   | ( 31 ) |
| §·2·3 地球自转和公转的影响 .....      | ( 33 ) |
| §·2·4 地理纬度对发射的影响 .....      | ( 37 ) |
| §·2·5 有关回收卫星的一些问题 .....     | ( 38 ) |
| 第三章 人造地球卫星的应用 .....         | ( 43 ) |
| §·3·1 用卫星预测地震 .....         | ( 44 ) |
| §·3·2 卫星的军事应用 .....         | ( 51 ) |
| §·3·3 卫星和大地测量学 .....        | ( 56 ) |
| §·3·4 卫星的出现使天体物理学突飞猛进 ..... | ( 64 ) |
| §·3·5 用卫星实行全球通信 .....       | ( 70 ) |
| §·3·6 用卫星作大范围的自然资源普查 .....  | ( 74 ) |

|       |                        |        |
|-------|------------------------|--------|
| §·3·7 | 气象卫星和海洋卫星 .....        | ( 79 ) |
| §·3·8 | 人造卫星导致空间物理学的高速发展 ..... | ( 81 ) |
| 第四章   | 展望未来 .....             | ( 89 ) |
| §·4·1 | 把空间太阳能输送到地面上来利用 .....  | ( 89 ) |
| §·4·2 | 未来的“空间工厂”、“空间农场” ..... | ( 94 ) |
| §·4·3 | 到太阳系以外的恒星上去 .....      | ( 97 ) |
| §·4·4 | 人类在宇宙中获得更大的自由 .....    | ( 98 ) |
| 结束语   | .....                  | (103)  |
| 附录一   | .....                  | (104)  |
| 附录二   | .....                  | (104)  |

# 第一章 人造地球卫星的运动规律 及其理论基础

人造地球卫星从地面上用多级火箭运载工具发射出去，运载工具把卫星带到预定的高度，最后一级火箭使卫星有一个预定大小和方向的速度，卫星就可以按预定的轨道，围绕地球而运动。为什么卫星既不掉回地面，又不飞离地球，而是围绕地球运动？为什么有时离地球近，有时离地球远？为什么有时走得快，有时走得慢？……，所有这些现象都说明卫星围绕地球的运动是有规律的，有它一定的内在缘故的。具体在什么情况下，它将掉回地面；什么情况下，它将飞离地球；什么情况下走得快；什么情况下走得慢……，也是有一定道理的。假如在某一时刻已经知道卫星相对于地球的位置和速度，并且知道卫星的受力情况，那么是否可以算出卫星应该走什么样的轨道，描写轨道的方程是什么式子，这些都是数学、物理上的问题。本章中我们打算讨论一下有关人造地球卫星的运动规律及其理论基础。

## § 1.1 卫星运动规律的数学物理问题

我们先从物理和数学上来研究人造地球卫星在轨道上的



运行规律问题。

设卫星的质量为 $m$ ，在脱离运载火箭进入轨道正常运行后，卫星受到以下几个力的作用：

(1) 地球对卫星的引力 $F_{地}$ ，

(2) 月球对卫星的引力 $F_{月}$ ，

(3) 太阳对卫星的引力 $F_{太}$ ，

(4) 大气阻力 $F_{阻}$ ，

(5) 各大行星对卫星的引力 $F_{行}$ 。

为讨论方便起见，我们选取地球质量中心作为坐标原点。假定在 $t$ 时刻，卫星位于 $\mathbf{r}(t)$ 处（ $\mathbf{r}$ 表示从地球质量中心指向卫星质量中心的位置矢量，叫向径），由动力学第二定律， $\mathbf{r}(t)$ 应满足下列方程：

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = \frac{d^2\mathbf{r}(t)}{dt^2}, \quad (1.1)$$

$$\text{其中 } \mathbf{F} = \mathbf{F}_{地} + \mathbf{F}_{月} + \mathbf{F}_{太} + \mathbf{F}_{阻} + \mathbf{F}_{行} \quad (1.2)$$

是作用在卫星上的合力。 $\mathbf{a}(t)$ 是卫星在 $t$ 时刻的加速度。理论上为了确定卫星的运动方程 $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ ，还应该给定 $t = 0$ 时刻的初始位置和速度，即

$$\mathbf{r}|_{t=0} = \mathbf{r}_0; \quad (1.3)$$

$$\mathbf{v}|_{t=0} = \mathbf{v}_0. \quad (1.4)$$

式中“ $t = 0$ ”可以是卫星刚进入轨道的时刻，但也可以用别的在轨道上的任一时刻来代替。对于发射卫星的国家，一般都以后级火箭刚停火的时刻作为 $t = 0$ ，那时的初始位置 $\mathbf{r}_0$ 叫做入轨点，初始速度 $\mathbf{v}_0$ 叫做入轨速度。对于其他国家，

可以任选此卫星在轨道上运行的任一时刻作为  $t = 0$ ，由地面上的观测站准确地测出此  $t = 0$  时的卫星的  $\mathbf{r}_0$  及  $\mathbf{v}_0$ ，作为初始位置和初始速度（见图1）。如

果作用在卫星的力  $\mathbf{F}_{\text{地}}$ 、 $\mathbf{F}_{\text{月}}$ 、 $\mathbf{F}_{\text{太}}$ 、 $\mathbf{F}_{\text{阻}}$ 、 $\mathbf{F}_{\text{行}}$  都足够精确地知道， $t = 0$  的时刻已经确定， $\mathbf{r}_0$  及  $\mathbf{v}_0$  已经测出，则卫星的运动方程  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$  即位置  $\mathbf{r}$  随时间  $t$  的变化关系，可以将（1.1），

（1.3）和（1.4）联立求解

$$\begin{cases} \mathbf{F} = m\mathbf{a} \\ \mathbf{r}_0 = \mathbf{r} \big|_{t=0} \\ \mathbf{v}_0 = \mathbf{v} \big|_{t=0} \end{cases} \quad (1.5)$$

得到。求出了（1.5）的解  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ ，卫星的运动规律就完全可以确定了。上面所提的就是从数学上去解决卫星运行规律问题的一套办法。

根据已公开发表的资料及利用已有的运算工具，要严格求解初值问题（1.5），有两方面的困难值得一提：

### （一）物理上的困难

最主要的力，地球对卫星的引力  $\mathbf{F}_{\text{地}}$  及大气对卫星运动的阻力  $\mathbf{F}_{\text{阻}}$  知道得不太详细，所以初值问题（1.5）无法列出。“连方程都列不出来”！出发点没有了！这是我们研究卫星在轨道上运行时首先遇到的困难。

有人说，地球对卫星的作用力就是万有引力，利用万有引力公式

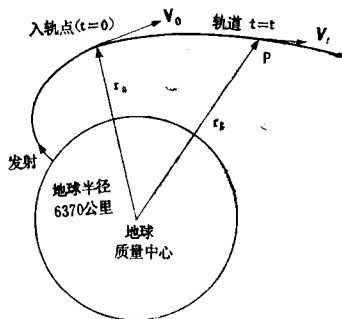


图 1

$$\mathbf{F}_{\text{地}} = -G \frac{Mm}{r^3} \mathbf{r}, \quad (1.6)$$

把地球质量  $M = 6.0 \times 10^{24}$  公斤, 万有引力常数  $G = 6.685 \times 10^{-20} \frac{\text{公里}^3}{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}$  往 (1.6) 式里一代, 不就可以知道  $\mathbf{F}_{\text{地}}$

了吗! 为什么还说知道得不详细呢?

事情并不那么简单, (1.6) 式是两个质点之间的万有引力公式。要 (1.6) 式能很好地成立, 就要求地球质量中心到卫星的距离  $r$  远远大于地球半径  $R$ , 只有这样才能把地球当作一个质点来处理。地球半径  $R$  大约为 6370 公里, 即要求向径  $r \gg 6370$  公里。但对于一般的卫星, 仅在地面上几千公里以内运行, 相当于  $r \sim 10000$  公里左右, 所以不能把地球看成一个质点。另外由于地球外形并不是球形, 表面凹凸不平, 质量分布也不均匀, 知道得也不详细。因此, 即使采用高等数学的积分方法来计算地球对卫星的引力, 也有无从下手之感。

几年前, 有些国家联合起来, 在地球上设置了几十个观测点, 对已发射的卫星进行“联测”, 精确测定卫星的轨道, 并利用这些实际测定的卫星轨道数据反过来推算地球对卫星的引力, 得到了一个相当复杂的地球引力公式。这个公式共有二百多项。在地面上空几百公里到几千公里处, 地球引力有以下的特点:

(1) 主要部分是  $\mathbf{F}_{\text{心}} = -G \frac{Mm}{r^3} \mathbf{r}$ , 其余各项从数量上

说都比  $|\mathbf{F}_{\text{心}}|$  小得多, 并且  $r$  愈大, 其余这些项对卫星的干扰

愈小。

(2) 主要部分 $F_{\text{心}}$ 的方向当然指向地球质量中心，是个“有心力”，其余各项与 $r$ 的方向并不完全相同。今后我们把除了 $F_{\text{心}}$ 以外的所有项统称为地球引力的非有心力部分。

(3) 仔细分析除了有心力 $F_{\text{心}}$ 以外的二百多项，人们发现有六项比其余的项明显地大，但还是比 $|F_{\text{心}}|$ 小得多。若仅考虑 $F_{\text{心}}$ 及这六项，略去其余各项，则地球对卫星的引力与一个质量均匀分布的旋转椭球对一个质点的作用完全类似。

(4) 如果把这二百多项全加以考虑，人们发现，对于同一个 $r$ ，不同地区上空卫星所受到的引力并不相同，有些地区比“正常值”略大，有些略小，出现“重力异常”现象。很明显，这种“重力异常”与地球的质量分布即与地下的矿物资源有关。

归结起来，仔细地研究地球引力及其变化是发射人造地球卫星的一个重要目的；同时也只有掌握了地球引力的详细资料才能更准确地发射及回收卫星，这二者是相辅相成的。

关于大气阻力，通常的实验事实说明，当物体的速度 $v$ 远远小于声速0.3公里/秒的时候，大气阻力与速度成正比；当物体速度比声速大时，大气阻力与速度的四次方成正比。卫星的速度约为声速的20~30倍，且在远离地面的太空运行，以上所说的地面实验结果是否还成立？况且大气阻力应该与卫星的速度有关，与大气密度、卫星的外形，甚至还和卫星表面的光洁度有关，企图从理论上去推出大气阻力的数学表

示式是不现实的。比较现实的办法是：对于一定外形的卫星，设法测出阻力与飞行速度及大气密度的关系，找到有关的经验公式。当然对于高空运行的卫星，由于大气非常稀薄，阻力 $F_{\text{阻}}$ 基本上可以忽略。

## （二）数学上的困难

即使作用在卫星的各个外力都能精确知道，它们的表达式一定是既多而且复杂，所以解初值问题（1.5）肯定是一个相当困难的工作，即使用先进的高速电子计算机来运算，也是十分不简单的事。

人们认识事物的过程总是一个由初级到高级，由表及里，由粗到细，由浅到深的过程。鉴于以上所述种种困难，所以我们要立即全面地细致地求出（1.5）的解是很不容易的，但是我们可以初步求出它的近似解，先较粗浅地了解卫星的一般运动规律，从中得到一些定性或半定量的结论，然后通过实践，逐步深化已有的认识。为此目的，我们先求出（1.5）式的近似解。在理论上，为了求出初值问题（1.5）的近似解，人们常采用下面的办法：根据问题的特点，粗略地估计一下各个力的大小，抓住主要矛盾，把问题简化，先求出问题的近似解。在此基础上，根据需要，有目的地考虑其他因素的干扰，逐步修正我们的结果。具体到我们的问题，只要卫星不在离地面很近的区域内运行，例如在100公里以外，那么在卫星的运行区域内，大气十分稀薄，因而阻力也非常之小。另外，只要卫星离地面不太远，例如小于一万公里，在此范围内，地球引力还是十分大的，相比之下，月球、太阳及其他行星对卫星的作用力将相当微弱，可以暂不予考

考虑。如上所述，地球对卫星的作用力虽然有二百多项，但在这二百多项中，有心力

$$\mathbf{F}_{\text{心}} = -G \frac{Mm}{r^3} \mathbf{r}$$

是最重要的。作为“零级近似”，可以仅考虑 $\mathbf{F}_{\text{心}}$ 对卫星的作用，而把地球引力中的非有心力部分、 $\mathbf{F}_{\text{月}}$ ， $\mathbf{F}_{\text{太}}$ ， $\mathbf{F}_{\text{阻}}$ 和 $\mathbf{F}_{\text{行}}$ 暂时全部略去，求出初值问题(1.5)的严格解。在此基础上再考虑略去的这些项对卫星运动的干扰，修正我们的结果，使其逐步精确。这种处理问题的方法在物理学的各个领域里都经常采用，天体力学中把这个方法叫做“摄动法”。

## § 1.2 卫星的轨道为一平面曲线

现在我们来计算在仅有有心力 $\mathbf{F}_{\text{心}} = -G \frac{Mm}{r^3} \mathbf{r}$ 作用下，卫星运动的轨道方程，从而讨论它的运行规律。将 $\mathbf{F}_{\text{心}} = -G \frac{Mm}{r^3} \mathbf{r}$ 代入(1.5)得

$$\begin{cases} -G \frac{Mm}{r^3} \mathbf{r} = m\mathbf{a}, \\ \mathbf{r}|_{t=0} = \mathbf{r}_0, \\ \mathbf{v}|_{t=0} = \mathbf{v}_0. \end{cases} \quad (1.7)$$

要解初值问题(1.7)并不复杂，可以用通常的数学方法求出(1.7)的解。但是，为了避免过多的数学运算，也为了使结果的物理意义更为明显，人们常采用下面介绍的简化

处理方法。这个方法的要点是：根据外力 $\mathbf{F}$ 心的特点，设法找出三个独立的不随时间变化的物理量，理论上把这些不随时间变化的物理量叫做守恒量，只要我们能找到三个独立的守恒量，运动方程或轨道方程即可十分简单地得到。

由于 $\mathbf{F}$ 心是有心力，容易证明卫星在运动过程中的角动量（也叫动量矩）

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v} \quad (1.8)$$

不随时间变化。要证明这个论断成立，只要证明角动量向量 $\mathbf{L}$ 对时间 $t$ 的一次导数为零就行，也就是证明

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{r} \times m\mathbf{v}) = 0. \quad (1.9)$$

我们将在附录中证明（1.9）式的成立。由于卫星的角动量 $\mathbf{L}$ 不随时间变化，因此在任一时刻 $t$ 的角动量应与开始时刻 $t=0$ 时的角动量相等，即

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v} = \mathbf{r}_0 \times m\mathbf{v}_0 = \text{常向量}. \quad (1.10)$$

（1.10）式是一个非常有用的结果。 $\mathbf{L} = \text{常向量}$ 就是 $\mathbf{L}$ 的方向不变，大小也不变。 $\mathbf{L}$ 的方向就是 $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{v}$ 所决定的平面的法线方向，现在 $\mathbf{L}$ 的方向不变，因此 $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{v}$ 所决定的平面在空间的取向也不能变。由于卫星只能在这个平面上运动，所以卫星的轨道必然是一条平面曲线，这个平面就是初始位置 $\mathbf{r}_0$ 和初始速度 $\mathbf{v}_0$ 所决定的平面，今后我们把这个平面叫做轨道平面。显然，轨道平面应该通过地球质量中心。为了描述轨道平面相对于地球的取向，人们引进描写轨道平面的两个参数——“轨道倾角”和“升交点”。所谓轨道倾角是指轨道平面和地球赤道平面的夹角。当轨道倾角小于90度时，卫

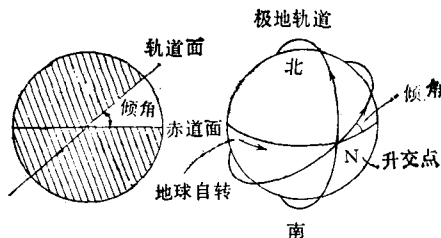


图2 轨道平面的倾角和升交点

星运动的方向从地面上看来总是由西向东，是和地球自转方向一致的，我们叫这种小于90度倾角的轨道为顺行轨道，卫星运行的方向总是从西南到东北（从图2中的纸面上的地面看）或是从西北到东南（从图2中处于纸背面的地面上看）。反之，倾角大于90度的轨道，卫星运动方向是由东到西，和地球自转方向相反，叫逆行轨道，卫星的运动总是从东南到西北或是从东北到西南。倾角为90度时的轨道通过南北极，叫极地轨道。

当卫星由南到北运行时，我们称之为轨道的升段。在升段过程中，卫星轨道的星下轨迹（轨道平面与地球表面的交线）和赤道的交点N（见图2）的赤经称为轨道平面的升交点。很明显，由于角动量守恒，轨道平面具有定向性，所以它不随着地球自转。若卫星的周期（即绕行地球一周所需用的时间）为两小时，当卫星从N点开始绕地球运动一周，再次从南向北经过赤道上空时，在这两小时内，地球已经自西向东转了30度（地球自转角速度为 $360/24\text{度/小时} = 15\text{度/小时}$ ），于是升交点也向西移动了30度。以后每个周期都是如此。仔细地测量卫星的轨道倾角和升交点，即可把实测结果和



我们的计算结果加以比较,用以修正计算结果。实际的结果如下:对于离地面一万公里上空运行的卫星,观测结果与计算结果符合很好,偏差极小。这说明当卫星在远离地球的高空运行时,把地球对卫星的引力看成是有心力是一个极好的近似。但是当卫星与地球质量中心的距离 $r$ 不太大时,观测结果指出:轨道倾角还是大体上不变,但升交点和理论计算值慢慢地越偏越大,向更西的方向漂移, $r$ 越小,漂移速度越大。要解释这一现象,就得考虑其他因素的干扰了。

### § 1.3 面积定理

由于作用在卫星上的力是有心力,卫星的轨道是一条平面曲线,因此取平面极坐标较为方便。令地球质量中心为极点,在轨道平面上任选一方向为极轴,则 $[r(t), \theta(t)]$ 便表示卫星在任一时刻 $t$ 的位置。

上面已经说过,卫星的角动量 $L$ ,在任意时刻都是常量,即 $L = mrv \sin(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ 不随时间而变,故有

$$mrv \sin(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = mr_0 v_0 \sin \alpha, \quad (1.11)$$

(1.11) 式中的 $(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ 表示在时刻 $t$ ,向径 $\mathbf{r}$ 与速度 $\mathbf{v}$ 之间的夹角。 $\alpha$ 为初始向径 $\mathbf{r}_0$ 和初始速度 $\mathbf{v}_0$ 之间的夹角(图3)。注意到, $v \sin(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ 是速度 $\mathbf{v}$ 在和 $\mathbf{r}$ 垂直方向上的投影 $v_{\perp}$ ,它

应等于 $r$ 乘以卫星运动的角速度 $\frac{d\theta}{dt}$ ,

$$\text{即 } v \sin(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = v_{\perp} = r \frac{d\theta}{dt},$$