

航 天 气 象 学

解放军理工大学气象学院

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航天与航天器	1
1.1.1 航天及其发展简史	1
1.1.2 航天器及其应用	3
1.2 航天气象学的研究对象和内容	14
1.2.1 航天器发射时的气象问题	14
1.2.2 大气环境对航天器飞行的影响	15
1.2.3 空间环境及其对航天器的影响	16
1.2.4 卫星气象	16
1.2.5 航天测控与气象	17
1.2.6 航天医学与气象	17
1.2.7 航天气象保障	17
1.3 航天气象学的过去、现在及未来的发展	17
参考文献	24
第 2 章 地球空间环境及其对航天活动的影响	25
2.1 概述	25
2.2 地球大气环境	25
2.2.1 大气成分	26
2.2.2 大气垂直分层	28
2.3 大气环境对航天发射的影响	34
2.3.1 风载与临界风速	34
2.3.2 爆轰现象	37
2.3.3 气象对瞄准的影响	39
2.3.4 气象对加注的影响	40
2.3.5 雷电和诱发雷电对发射安全的影响	43

2.4 大气环境对火箭飞行的影响	47
2.4.1 对主动段飞行的影响	48
2.4.2 对被动段飞行的影响	53
2.5 近地空间环境对航天活动的影响	56
2.5.1 高层大气环境的影响	58
2.5.2 高能带电粒子的影响	60
参考文献	70
第3章 大气环境与航天无线电测量	71
3.1 无线电跟踪测量系统	71
3.2 对流层对无线电测量的影响	73
3.2.1 对流层大气折射指数及其垂直分布模式	73
3.2.2 对流层大气折射的基本类型	78
3.2.3 对流层大气折射对无线电测距的影响	81
3.2.4 对流层大气折射对无线电测角的影响	84
3.2.5 对流层大气折射对无线电测速的影响	87
3.3 电离层对无线电传播的影响	89
3.3.1 电离层的基本特点	89
3.3.2 电离层对短波传播的影响	91
3.3.3 电离层对超短波传播的影响	95
参考文献	97
第4章 大气环境与航天光学测量	98
4.1 光学跟踪测量系统	98
4.2 大气环境对可见光测量的影响	99
4.2.1 卫星光学观测的条件	99
4.2.2 光学观测的基本方法	101
4.2.3 大气环境对光学测量的影响	102
4.3 大气环境对激光测量的影响	102
4.3.1 大气折射的影响	102
4.3.2 大气折射影响的修正	107
4.3.3 大气吸收衰减的影响	107
4.4 大气湍流的影响	114
参考文献	115

第 5 章 大气环境与航天作战	116
5.1 大气环境对卫星通信的影响	116
5.1.1 大气的吸收	116
5.1.2 水凝物的衰减	117
5.1.3 大气和降雨噪声	120
5.1.4 大气折射对无线电波衰减的影响	121
5.2 大气环境对可见光侦察的影响	124
5.2.1 光学侦察概述	124
5.2.2 云层对可见光侦察的影响	125
5.2.3 晴空大气气溶胶对可见光侦察的影响	127
5.2.4 大气湍流对可见光侦察的影响	132
5.3 大气环境对红外侦察的影响	135
5.3.1 红外侦察原理	135
5.3.2 水汽、二氧化碳和臭氧对红外侦察的影响	138
5.3.3 气溶胶、云雾和降水对红外侦察的影响	139
5.4 大气环境对卫星测高的影响	144
5.4.1 卫星测高原理	145
5.4.2 对流层对测高的影响	146
5.4.3 电离层对测高的影响	148
5.4.4 降雨效应	150
参考文献	153
第 6 章 航天气象保障	154
6.1 概述	154
6.2 航天气象保障的任务和组织原则	154
6.2.1 航天气象保障的任务	154
6.2.2 航天气象保障的组织原则	155
6.3 航天气象保障组织实施方案	156
6.3.1 航天试验任务的气象条件	156
6.3.2 航天试验气象保障任务分工	157
6.4 航天气象保障的组织与实施	159
6.4.1 航天气象保障的三个阶段	159
6.4.2 航天气象保障的指挥协调程序	161

6.4.3	发射试验任务气象系统准备情况检查评审	166
6.4.4	发射试验任务气象系统完成气象保障 任务质量评估总结	166
6.5	航天气象预报	167
6.5.1	航天发射的气象限制条件	167
6.5.2	航天气象预报概述	169
6.5.3	预报方法及依据	170
6.6	航天气象情报	172
6.7	雷电监测预警系统	174
6.7.1	各子系统的构成与功能	174
6.7.2	预警流程	177
6.8	气象保障典型实例	178
6.8.1	“澳星 B3”通信卫星发射任务的气象保障	178
6.8.2	“亚太一号 A”卫星发射任务的气象保障	183
6.8.3	“马部海”通信卫星发射任务的气象保障	187
6.8.4	“亚太二号 R”卫星发射任务的气象保障	191
6.8.5	“鑫诺一号”通信卫星发射任务的气象保障	194

第1章 绪 论

1.1 航天与航天器

1.1.1 航天及其发展简史

载人或不载人的航天器在太空的航行活动称为航天,又称空间飞行或宇宙航行。航天的主要目的是探索、开发和利用太空以及地球以外的天体。航天包括环绕地球的运行,飞往月球或其他行星的航行、行星际空间的航行和飞出太阳系的航行。有人把太阳系内的航行活动称为航天,太阳系外的航行活动称为航宇。航天有时也泛指航天工程或航天技术。

航天的关键在于航天器应达到足够的速度,克服或摆脱地球引力,飞出太阳系的航行还要摆脱太阳引力。从地球表面发射航天器,航天器环绕地球、脱离地球和飞出太阳系所需要的最小速度,分别称为第一、第二、第三宇宙速度。第一宇宙速度约为 7.9km/s ,航天器在获得这一水平方向的速度以后,不需要再加动力就可以环绕地球运动。第二宇宙速度为 11.2km/s ,航天器获得这一速度后,即能沿一条抛物线轨道脱离地球。第三宇宙速度为 16.6km/s ,从地面上发射的航天器在充分利用地球公转速度情况下,再获得这一速度后可沿双曲线轨道飞离地球,当它到达距地心 $93 \times 10^4\text{km}$ 处,便被认为已经脱离地球引力,以后就在太阳引力作用下运动,其相对太阳的轨道是一条抛物线,最后会脱离太阳引力场飞出太阳系。

航天活动的发展可追溯到 20 世纪 40、50 年代,那时发展起来的弹道式导弹为航天技术的诞生奠定了基础。1957 年 10 月 4 日,苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星。1961 年 4 月 12 日,

苏联宇航员 Ю.А. 加加林乘“东方”1 号飞船进入太空,人类实现了遨游太空的理想。1969 年 7 月 20 日~21 日,美国 N.A. 阿姆斯特朗和 E.E. 奥尔德林乘“阿波罗”11 号飞航登月成功,创造了人类涉足地球以外另一个天体的记录。1971 年 4 月 19 日,苏联发射了世界上第一个空间站“礼炮”1 号。1981 年 4 月 12 日,第一架航天飞机“哥伦比亚”号试飞成功,这标志着航天运载器由一次使用的运载火箭转向重复使用的航天运载器的新阶段的到来。

中国的航天事业是在 20 世纪 50 年代中期开始的,1956 年,中国制定了十二年科学发展远景规划,把火箭和喷气技术列为重点发展项目,同年建立了第一个导弹、火箭研究机构。1958 年把发射人造地球卫星列入国家科学规划,组建机构开展空间物理学研究和探空火箭研制工作。1960 年 2 月发射成功第一枚探空试验火箭,同年 11 月又发射成功第一枚自制的运载火箭。1970 年 4 月 24 日,中国第一颗人造地球卫星“东方红”1 号发射成功,使中国成为继苏联、美国、法国、日本之后世界上第五个用自制运载火箭成功发射卫星的国家。1975 年 11 月 26 日首次发射成功返回型人造地球卫星,中国成了继美国、苏联之后世界上第三个掌握卫星返回技术的国家。

随着世界新技术革命的到来,航天技术必将出现更大的飞跃,进入大规模开发和利用近地空间的新阶段。直接为国民经济和人民生活服务的各种应用卫星正向高性能、多用途的方向发展,以获取更大的经济和社会效益。随着航天飞机和其他新型空间运输系统的使用、空间组装和检修技术的成熟,人类将有可能去太空建造各种大型空间系统。利用永久性空间站进行长期的科学研究和实验,可促使天文学、地学、生物学、物理学和化学等产生新的突破。从太空将获取信息、材料和资源,直接造福于人类。航天活动将为解决人类面临的能源、生态、环境和人口等问题开辟多种新途径。各种空间探测器可能飞遍太阳系的“天涯海角”,为揭开太阳系的形成和生命起源之谜提供资料。另一方面,未来航天的军事应用将会进一步强化,航天作战技术将会得到更大的发展,太空武器有

可能进入实用阶段。太空武器研制成功后,将会部署在航天器上,它们与进攻型战略导弹结合起来可能构成新的威慑力量。

1.1.2 航天器及其应用

在地球大气层以外的宇宙空间,基本上按照天体力学的规律运行的各类飞行器统称为航天器,又称空间飞行器。

1.1.2.1 航天器的分类

航天器分为无人航天器和载人航天器两大类。无人航天器按是否环绕地球运行又可分为人造地球卫星和空间探测器两类。它们又可进一步按用途分类,如图 1-1 所示。

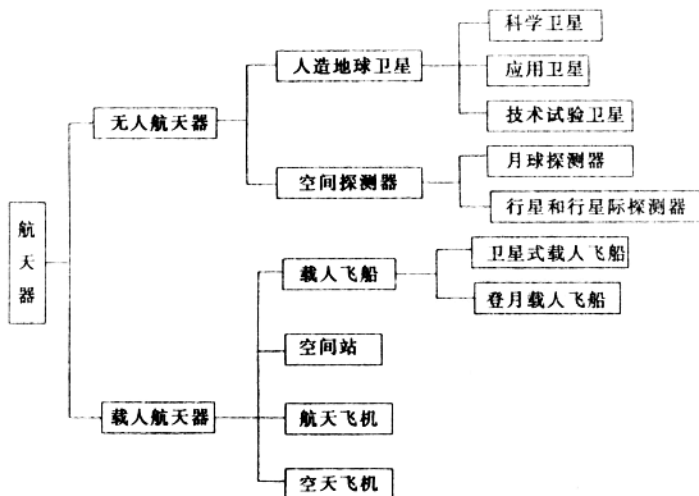


图 1-1 航天器的分类

1) 人造地球卫星

人造地球卫星简称人造卫星,是数量最多的航天器,约占已发射的航天器总数的 90% 以上。按用途可分科学卫星、应用卫星和技术试验卫星。科学卫星用于科学探测和研究,主要包括空间物理探测卫星和天文卫星等。应用卫星是直接为国民经济和军事服

务的人造卫星。应用卫星按用途分为通信卫星、气象卫星、侦察卫星、导航卫星、测地卫星、地球资源卫星等。技术实验卫星是指进行新技术试验或为应用卫星进行试验的卫星。这类卫星数量较少,但试验内容相当广泛。

2) 空间探测器

空间探测器又称深空探测器,按探测目标分为月球探测器、行星和行星际探测器。各种行星和行星际探测器分别用于探测金星、火星、水星、木星、土星和行星际空间。

3) 载人航天器

按飞行和工作方式分为载人飞船、空间站和航天飞机。载人飞船包括卫星式载人飞船和登月载人飞船。

目前正在研制的新一代航天器就是空天飞机。空天飞机是能在普通跑道上水平起降,并在大气层内和空间轨道上飞行的完全可重复使用的航天器。美国已集中了科学界、工业界和军方的优秀人才,实施国家空天飞机(NASP)计划。如果空天飞机一旦研制成功,它不但能执行航天飞机所完成的各项使命,而且可作为一种强大的战略武器装备使用。

1.1.2.2 航天器的轨道

航天器在天体引力场作用下,基本上按天体力学的规律在空间运动。它的运动方式主要有两种:环绕地球运行和飞离地球在行星际空间航行。环绕地球运行轨道是以地球为焦点之一的椭圆轨道或以地心为圆心的圆轨道,行星际空间航行轨道大多是以太阳为焦点之一的椭圆轨道的一部分。下面以人造地球卫星(简称人造卫星)为例来说明航天器的轨道。

1) 人造卫星的发射、运行及返回轨道

人造卫星的轨道包括发射轨道(或运载火箭的弹道)、运行轨道和返回轨道。

(1) 发射轨道。人造卫星是靠运载火箭发射的,运载火箭从地面起飞到某一飞行高度把航天器送入运行轨道,这段飞行轨迹称为发射弹道或称上升段弹道。运载火箭的发射轨道可分为三个

基本类型:直接入轨、滑行人轨和过渡入轨。

① 直接入轨。运载火箭从地面起飞以后,各级火箭发动机按预定程序逐级连续工作,发动机工作结束时刻,即达到航天器的入轨点,如图 1-2 所示。这种发射轨道适用于发射低轨道航天器。

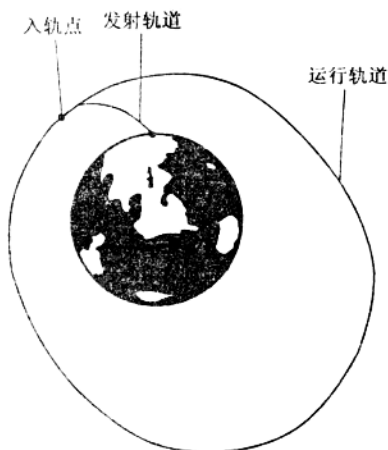


图 1-2 直接入轨

② 滑行人轨。运载火箭的飞行程序分为三段:在一个主动段(火箭发动机工作的动力飞行段)之后,加上一个自由飞行段(火箭发动机不工作的无动力飞行段),最后再加上一个主动段(或称加速段)。火箭从地面起飞时在第一个主动段就加足了它飞行时所需要的大部分能量,然后关闭发动机,这时火箭依靠其所获得的动能,在地球引力作用下进行自由飞行,一直到与所要达到的轨道相切的位置,这时发动机再一次点火,最后加速到使火箭达到入轨要求的速度,将航天器送入轨道。滑行人轨时运载火箭的飞行弹道如图 1-3 所示。

③ 过渡入轨。过渡入轨运载火箭的整个弹道分为加速段、停泊段、再加速段、过渡段及最后加速入轨段共五段。其中包括三个加速段。运载火箭的弹道如图 1-4 所示。

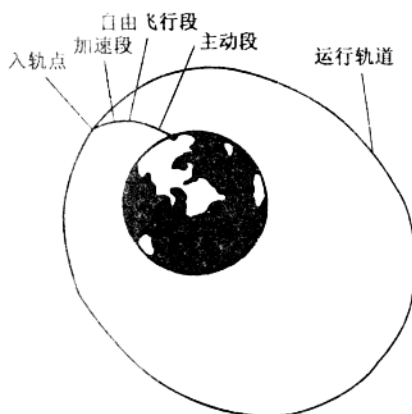


图 1-3 滑行人轨

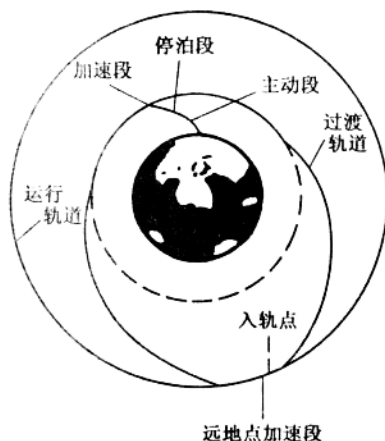


图 1-4 过渡入轨

由第一个加速段到停泊段,可以像直接入轨那样经过一个加速段进入围绕地球的圆形轨道;也可以像滑行人轨那样经过两个加速段进入圆形停泊轨道。航天器在停泊轨道上运行时可根据对入轨点的要求,选择发动机点火位置使航天器加速脱离停泊轨道,这一椭圆轨道称为过渡轨道,当达到椭圆的远地点时(此点为航天

器的入轨点),发动机再次点火加速,使其达到入轨所要求的速度,航天器入轨,按预定的轨道运行。

(2) 运行轨道。运行轨道是指人造卫星入轨以后的运行轨道。如果不再进行变轨机动飞行,那么,它们将在各自所处环境的引力场中作无动力的惯性飞行。卫星轨道有圆轨道和椭圆轨道两种,圆轨道是椭圆轨道的特殊情况。

① 圆轨道。卫星以所在高度的环绕速度飞行,其轨道为圆轨道。圆轨道的运行速度为

$$v = \sqrt{g_0 R^2 / r} \quad (1-1)$$

式中 g_0 ——地球表面上物体重力加速度;

R ——地球半径;

r ——卫星至地球中心的距离, $r = R + h$, h 为卫星离地面的高度。

显然,高度越高,运行的速度越小。这是因为离地球越远,地球对卫星的引力越小,环绕速度就越小。由于 g_0 和 R 为常数,所以环绕速度仅是轨道半径的函数。

圆轨道上卫星的运行周期,可以简单地以轨道的圆周长除以速度来计算这一周期,即

$$T = 2\pi r / v \quad (1-2)$$

将式(1-1)代入式(1-2)

$$T = 2\pi \frac{r}{R} \sqrt{\frac{r}{g_0}} \quad (1-3)$$

式(1-3)说明:按圆轨道运行的卫星其周期仅仅是轨道半径函数。这是由于随半径的增大周长增大,其次由于轨道半径增大,环绕速度减小,所以周期随半径的 $3/2$ 次方增大。

当飞行器在地球表面附近以第一宇宙速度运行时周期为

$$T_1 = 2\pi \sqrt{R/g_0} = 2\pi \sqrt{g_0 R} / g_0 = 84.5 \text{ min} \quad (1-4)$$

其余高度处对应的环绕速度和周期如表 1-1 所列。

表 1-1 航天器的环绕速度和周期

轨道高度 /km	环绕速度 /(km/s)	周 期		
		h	min	s
0	7.912	1	24	25
200	7.791	1	28	25
300	7.732	1	30	27
400	7.675	1	32	29
500	7.619	1	34	32
1000	7.356	1	45	2
2000	6.903	2	7	9
3000	6.525	2	30	31
4000	6.203	2	55	17
5000	5.924	3	21	12
6000	5.679	3	48	18
6378	5.595	3	58	47
7000	5.463	4	16	31
35810	3.076	23	56	4
380000	1.02	27.322d		

② 椭圆轨道。卫星的椭圆轨道以地球中心为一个焦点，椭圆上离地心最近点称为近地点，最远点称远地点。

椭圆轨道上卫星的速度是变化的，近地点速度最大，远地点速度最小。轨道上任意点的速度为

$$v = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} \quad (1-5)$$

式中 $\mu = gR_0^2$;

r ——向径;

a ——椭圆的长半轴。

椭圆轨道上卫星的运行周期，根据有心力场运动的开普勒第三定律有

$$T^3/a^3 = 4\pi^2/\mu \quad (1-6)$$

式中， T 为运行周期。

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g_0}}\left(\frac{r_a + r_k}{2R}\right)^{3/2} \quad (1-7)$$

若用 h_a 、 h_p 分别表示远地点与近地点离地面的高度,则

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g_0}}\left(1 + \frac{h_a + h_p}{2R}\right)^{3/2} = 84.5\left(1 + \frac{h_a + h_p}{2R}\right)^{3/2} \quad (1-8)$$

由上式可见,周期 T 只是长半轴的函数,而长半轴 a 只与入轨点 r_k 、 v_k 有关。

$$a = \frac{r_a + h_p}{2} = \frac{p}{1 - e^2} = \frac{r_k}{2 - \frac{v_k^2 r_k}{g_0 R^2}} \quad (1-9)$$

所以周期 T 同样也只与入轨点的 r_k 及 v_k 有关,这就意味着长半轴相同的椭圆轨道运动,其周期 T 也是相同的。因而,如果运载火箭发射弹道,对入轨点的高度及速度大小控制得很准确,而速度方向稍有偏差,将不会改变卫星的运行周期。

(3) 返回轨道。航天器从离开运行轨道开始至降落在地球表面过程中的质心运动轨迹。航天器一般靠制动火箭发动机的推力离开运行轨道而转入返回轨道。在地球大气层内靠大气阻力减速的运动阶段称为再入段。再入段是返回轨道的重要阶段,它有三种再入类型:一是弹道式再入,航天器进入大气层后不控制其升力,沿单调下降的路线返回地面;二是滑翔式再入(又称升力式再入),航天器进入大气层后可以控制其升力,从而控制其下降速度,以求降低再入过载,同时可以提高着陆点精度;三是跳跃式再入(图 1-5),航天器进入大气层后,依靠其升力再次冲出大气层,降低了速度,然后再进入大气层。对于从月球返回的航天器应用此法可以降低过载并调整着陆点。

2) 人造卫星轨道的种类

轨道所在的平面称为轨道面,轨道面和赤道平面的夹角称为轨道倾角。按照轨道平面倾角的大小,可以把卫星轨道分为四种类型:顺行轨道,极轨道,逆行轨道,赤道轨道(图 1-6)。

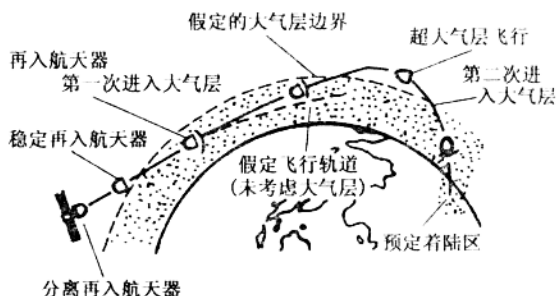


图 1-5 跳跃式再入过程示意图

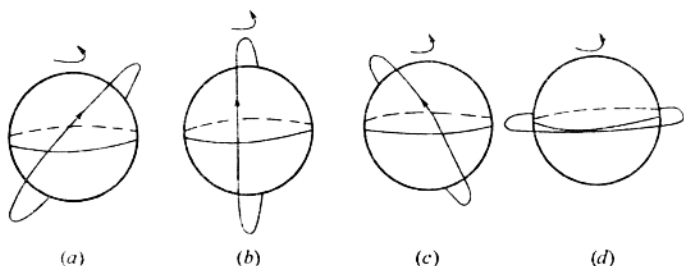


图 1-6 轨道类型

(a)顺行轨道；(b)极轨道；(c)逆行轨道；(d)赤道轨道。

实际使用的轨道主要是上述轨道中的近地轨道、地球同步轨道和太阳同步轨道、极轨道、回归轨道等。

(1) 近地轨道。能保持卫星等航天器在空间围绕地球自由飞行的最低轨道高度(约为 110km~120km)称为临界轨道高度。大致可将从临界轨道高度至 1000km 的空间轨道称为近地轨道。近地轨道对于军事航天活动有特殊重要意义,因为利用部署在离地面很近的近地轨道上的军用航天器很容易掌握敌方在地面上的活动情况,从而及时采取相应对策。例如,侦察卫星一般部署在 200km 至数百千米的近地轨道上,可获得地面高分辨率的照片和图像。此外,资源卫星、气象卫星等也采用近地轨道(常为太阳同

步轨道), 航天飞机、空间站同样在近地轨道上飞行。

(2) 地球同步轨道。运行周期与地球自转周期(23h56min4s)相同的人造地球卫星轨道。卫星几乎每天在相同时刻经过相同地方的上空。星下点(人造地球卫星在地面的投影点)轨迹近似为一条封闭曲线。对地面观测者来说, 每天相同时刻卫星大致出现在相同方位。有人把运行周期的整数倍等于地球自转周期的卫星轨道亦称为地球同步轨道。如苏联“闪电”号通信卫星就选用周期约为 12h 的轨道。这种卫星也是每天在相同时刻出现在相同的方位。

其运行周期与地球自转周期(23h56min4s)相等、倾角为 0° 、圆形的地球同步轨道, 称为地球静止轨道。其星下点轨迹为赤道上的一个点。卫星距离地面高度为 35786km。在地面上的人看来, 卫星始终不动, 故称静止卫星。其实这种卫星并非“挂”在天上不动, 其运行速度为 3.07km/s, 由于它绕地轴的角速度与地球自转角速度大小相等、方向相同, 于是卫星相对于地面是静止的。理论上静止轨道只有一条, 在这条轨道上已有许多卫星在运行, 它们分布在不同地球经度的赤道上空。每颗卫星静止的位置是它进入静止轨道那一瞬间卫星所处地理经度。静止轨道的精度要求很高, 稍有偏差, 卫星就会漂移。轨道不圆时, 卫星在经度方向每天摆动一次, 摆动的幅度若用弧度单位计量约为轨道偏心率的 2 倍。轨道倾角不为 0° 时, 轨道平面不与赤道平面重合, 这时卫星每天在纬度方向摆一次, 星下点轨迹呈南北向的“8”字形。轨道周期小于地球自转周期时, 卫星均匀向东漂移。轨道周期大于地球自转周期时向西漂移。另一方面, 已经进入静止轨道的卫星, 由于各种摄动作用的存在, 运行中轨道也会偏离理论值, 卫星也会发生漂移。这样就要求卫星具备修正轨道误差和位置保持的能力。一颗静止卫星可以覆盖大约地球表面 40% 的区域。三颗等间距配置在赤道上空的静止卫星, 可以覆盖除两级地区外的全球区域。卫星相对地面不动, 地球站天线极易跟踪。一般情况下, 通信卫星、广播卫星和气象卫星选用这种轨道较为有利。

(3) 太阳同步轨道。太阳同步轨道是逆行倾斜轨道,倾角在 $90^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 之间,轨道高度在 $500\text{km} \sim 1000\text{km}$ 之间,是一种近极地轨道。它的轨道平面绕地轴的旋转方向和周期与地球绕太阳的公转方向和周期相同。这种轨道的特点是太阳光和轨道平面的夹角保持不变。沿太阳同步轨道运行的卫星,每次从同一纬度地面目标上空经过,都保持同一地方时、同一运行方向,具有相同的光照条件,因此可在同样条件下重复观测地球。比如卫星第一次飞过某一地面目标上空是当地时间上午 10 点钟,那么下一次仍将是上午 10 点钟从该目标上空飞过。这种轨道对于从天上拍照地面景物有着突出的优点,在不同时期拍照同一目标就可看到目标的动态变化。由于卫星轨道平面和太阳光间保持同一角度,当采用太阳能电池卫星供电时,只要卫星开始工作时让太阳能电池帆板正对太阳,以后就可经常对着太阳,从而获得最大的供电效果。轨道设计时,往往选择兼有回归轨道、极轨道特点的太阳同步轨道。气象卫星、地球资源卫星常选用这种轨道。

(4) 极轨道。极轨道是倾角为 90° 的人造卫星轨道。只有在极轨道上运行的卫星才能每圈都经过地球两极上空。在轨道设计中,选用这种轨道往往是为了达到覆盖整个地球的目的。在工程上常把倾角偏离 90° ,但仍能经过两极地区的轨道(例如太阳同步轨道)也称为极轨道。在极轨道上运行的气象卫星、照相侦察卫星、地球资源卫星,可以俯瞰包括两极在内的整个地球表面。

(5) 回归轨道。星下点轨迹周期性重复的人造卫星轨道称为回归轨道。重复的时间间隔称为回归周期。回归轨道主要取决于卫星运行轨道的周期。相同回归周期的轨道有很多条,例如回归周期为一天的回归轨道,它的运行周期可以为 24h 、 12h 、 8h ……在回归轨道上运行的卫星,每经过一个回归周期,卫星重新依次经过各地上空。这样可以对覆盖区域进行动态监视,借以发现这段时间内目标的变化。以获取地面图像为目的的卫星,如侦察卫星、气象卫星、地球资源卫星等,多选择太阳同步型的回归轨道,它兼有太阳同步轨道和回归轨道的优点,可以多次获取同一地区的图