



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

航天器控制原理



冯冬竹

电话: 13389281325

空间科学与技术学院 导航控制系



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

目录

CONTENTS

01

绪论

02

航天器的轨道与轨道力学

03

航天器的姿态运动学和动力学

04

航天器姿态控制系统的组成与分类

05

航天器的被动姿态控制系统

06

航天器主动姿态稳定系统



航天器的轨道与轨道力学

01

航天器轨道的基本定律

02

二体轨道力学和运动方程

03

航天器轨道的几何特性

04

航天器的轨道描述

05

航天器的轨道摄动

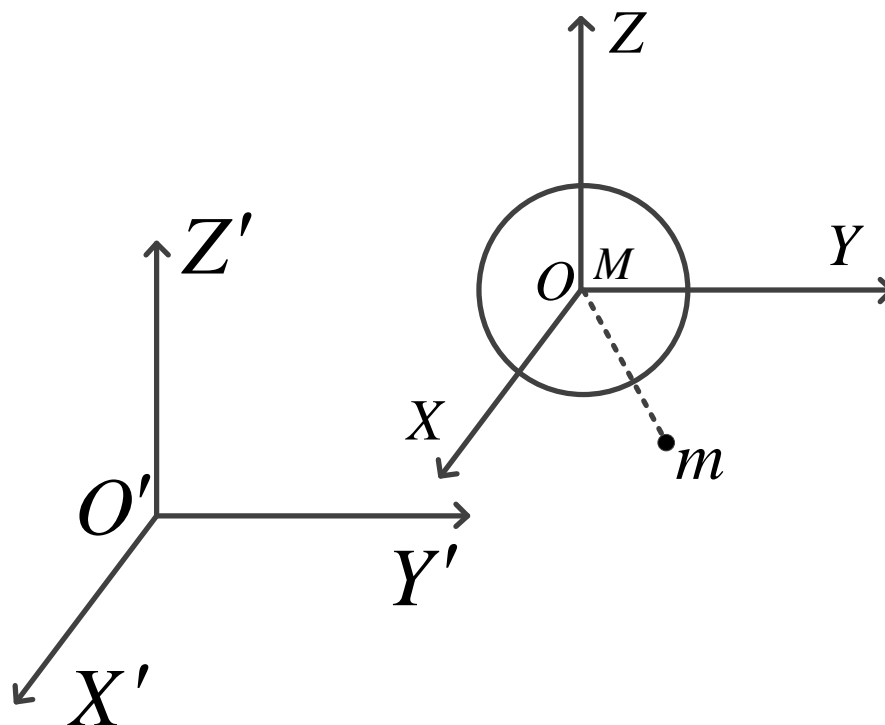


第四讲 · 航天器的轨道描述

- 01 坐标系
- 02 经典轨道要素
- 03 星下点轨迹
- 04 几种典型轨道

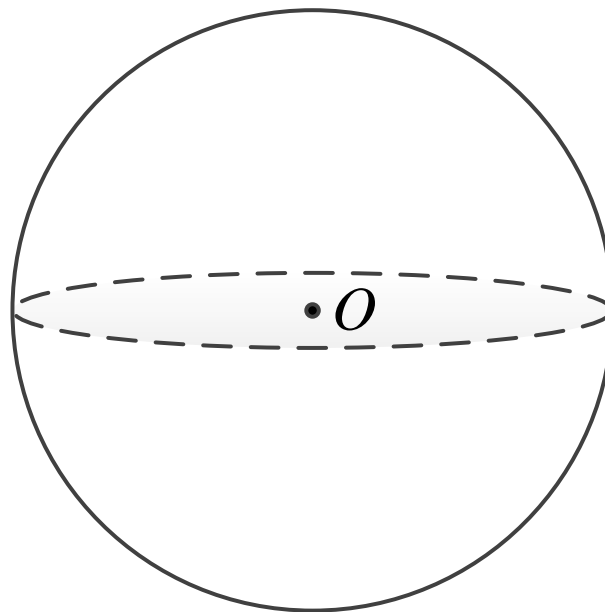


- 需要选择一个不转动的坐标系，描述航天器相对于地球的位置、速度和加速度。
- 选取的坐标系不同，则描述轨道的形式和复杂程度就有所不同，直接影响到轨道参数的直观程度和问题求解的难易。



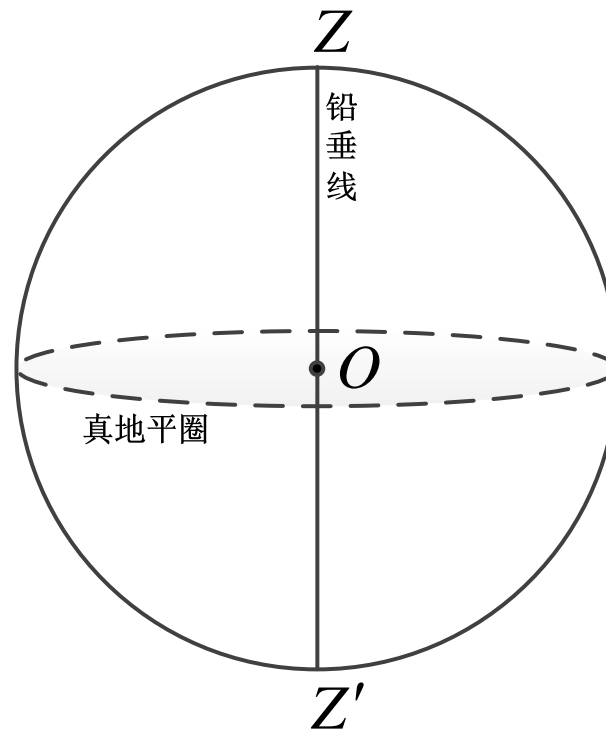


- **天球**：以空间内任意一点为中心，以任意长为半径（把半径看成是数学上的无穷大）的圆球。



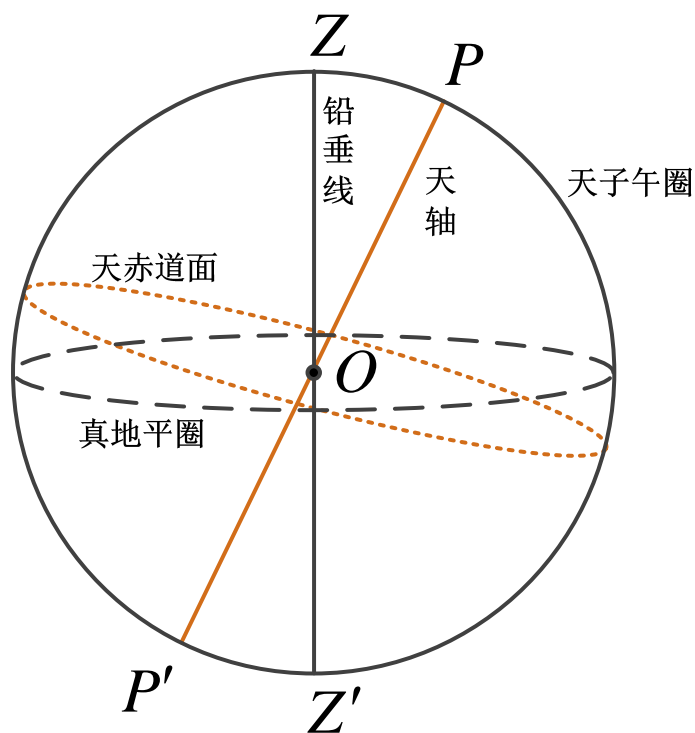


- 通过天球的中心（或观测点）作铅垂线与天球交于两点 Z 和 Z' ，位于观测者头顶的 Z 称为天顶，位于观测者脚下的 Z' 称为天底。过天球的中心作与 ZOZ' 垂直的平面，此平面称为真地平圈。



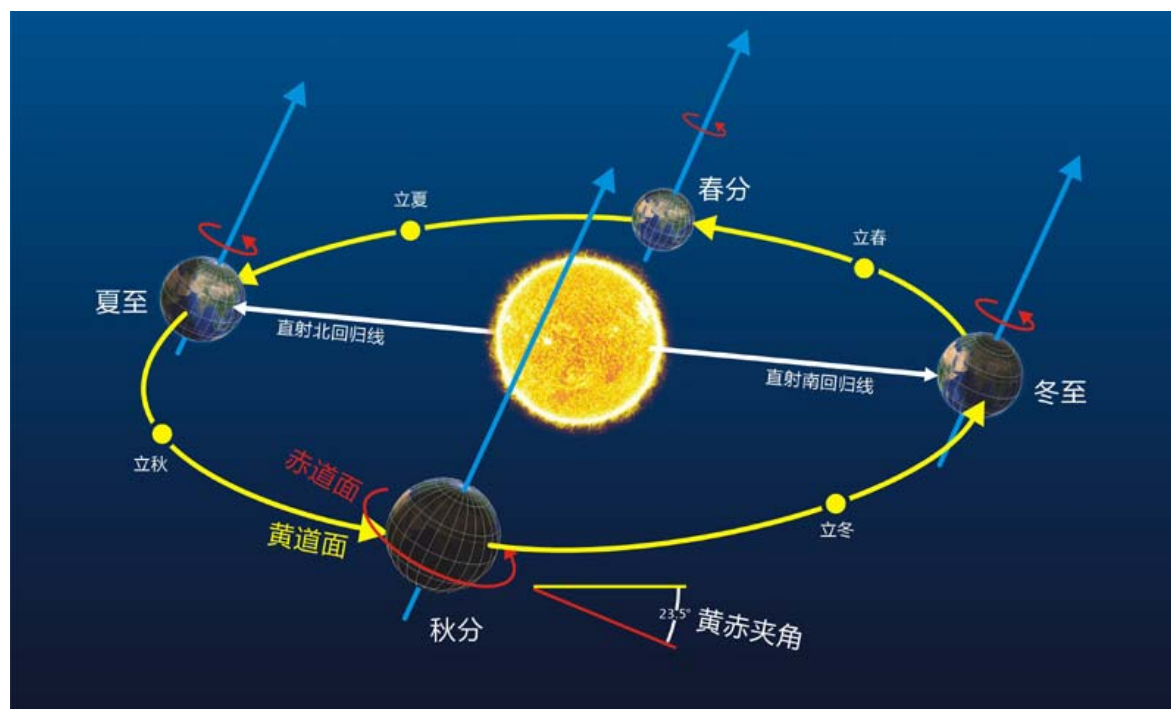


- 过天球的中心，做一条与地球的自转轴平行的直线，这条直线称为**天轴**。天轴与天球的两个交点，分别为**北天极 P** 和**南天极 P'** 。过天球中心与天轴垂直的平面为**天赤道面**。过 $ZPZ'P'$ 的圈称为**天子午圈**。



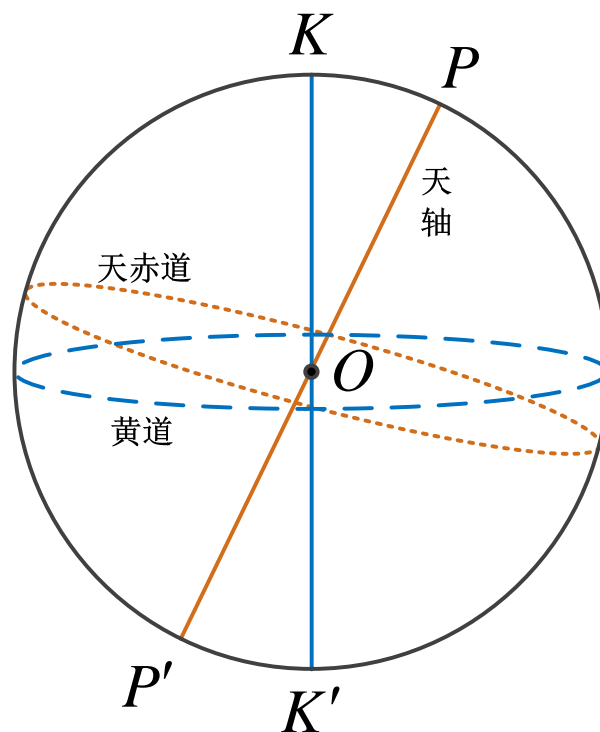


- 地球绕太阳公转的轨道平面称为**黄道面**。黄道面与赤道面不平行，夹角约为23.5度。



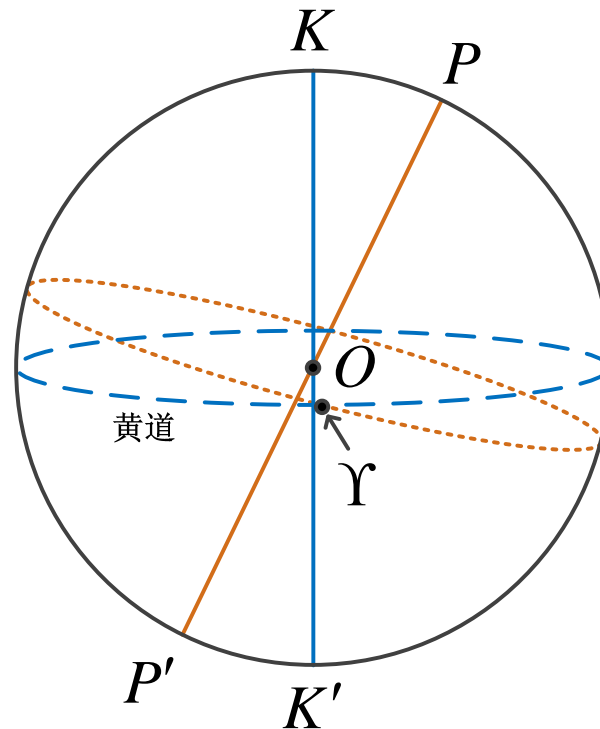


- 黄道面与天球的交线称为**黄道**，过天球的中心作一垂直于黄道面的直线 KOK' ，则 K 和 K' 分别为**北黄极**和**南黄极**。





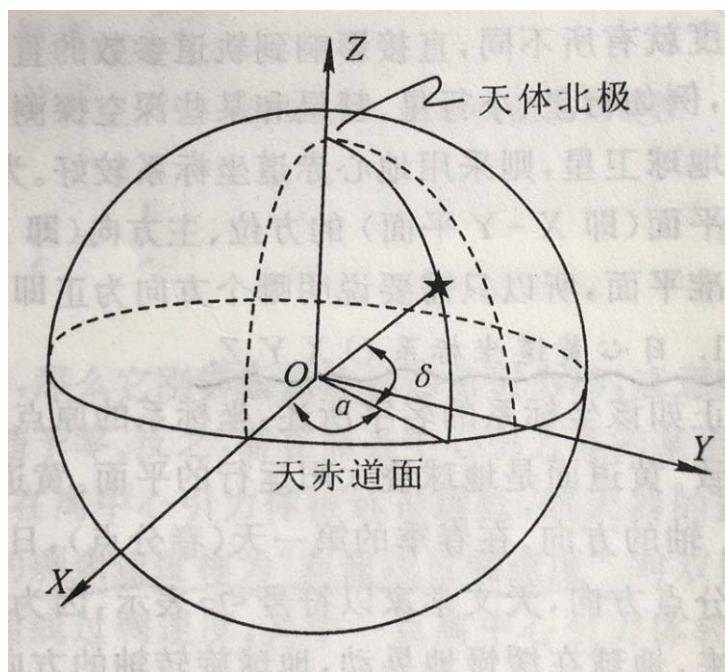
- 太阳由赤道以南穿过赤道所经过的黄道与赤道的交点叫做春分点，它总是指向白羊座方向 Υ 。





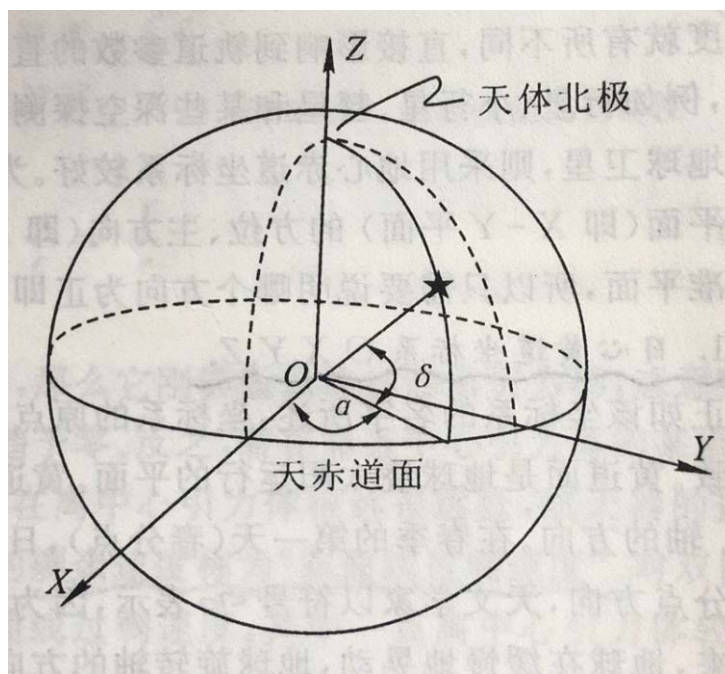
赤经赤纬坐标系

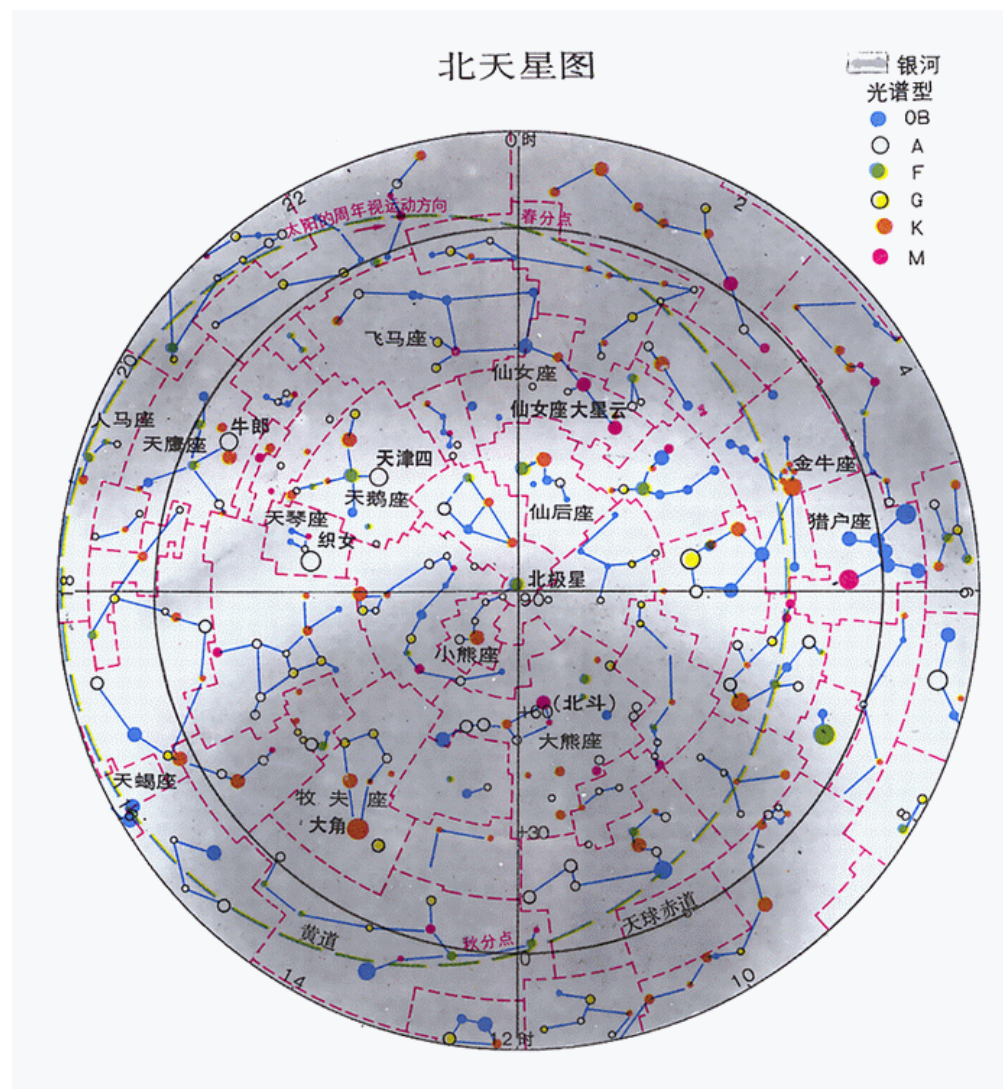
- 原点为天球中心，基准平面为天赤道面
- X 轴指向春分点方向， Z 轴指向北天极方向， Y 轴形成右手坐标系





- 天体在天球上的投影用赤经和赤纬两个角来描述
- 赤经是从天赤道面内由春分点开始向东量度，赤纬是从天赤道面向北量至视线



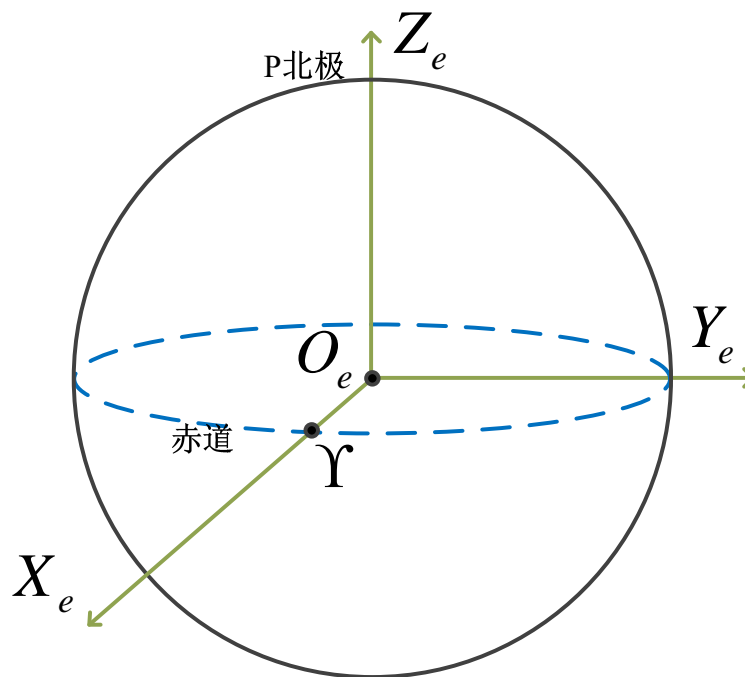






地心赤道坐标系

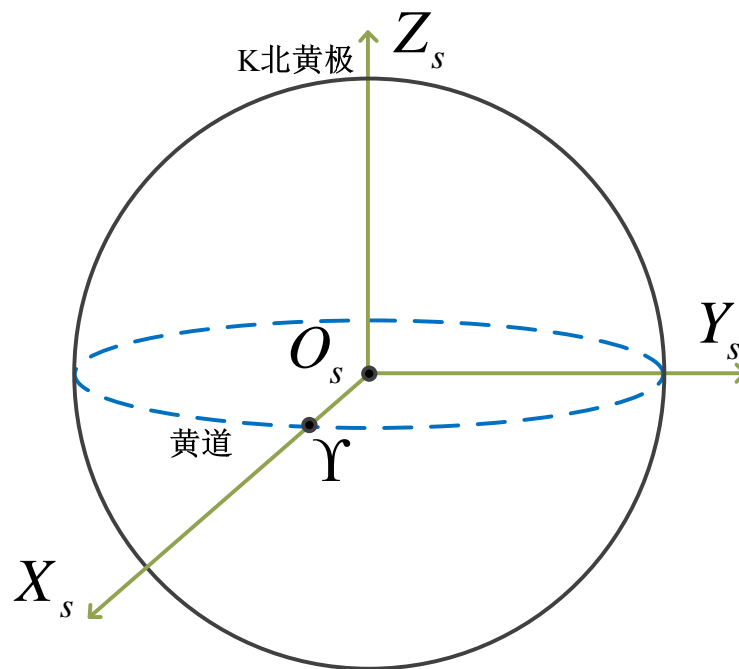
- 原点为地心，基准平面为赤道平面
- X_e 轴指向春分点， Z_e 轴指向北极， Y_e 轴形成右手坐标系。坐标系不跟随地球转动





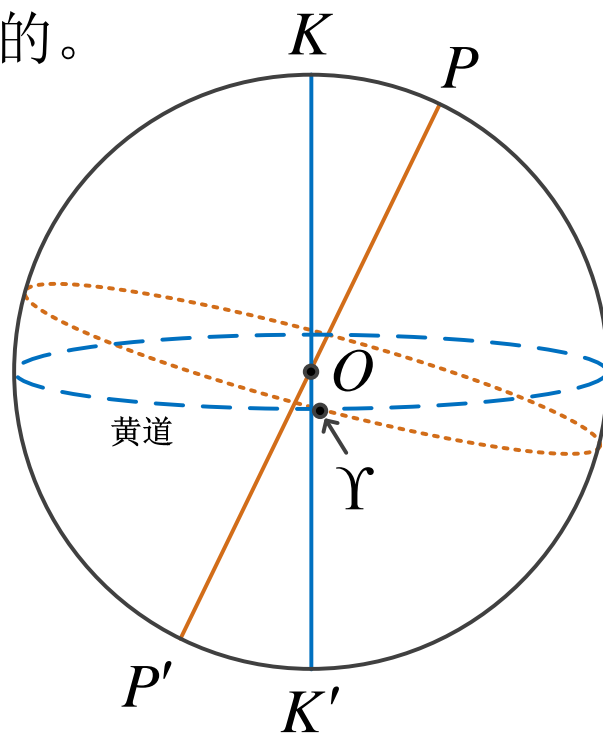
日心黄道坐标系

- 原点为日心，基准平面为黄道面
- X_s 轴指向春分点， Z_s 轴指向北黄极方向， Y_s 轴形成右手坐标系。





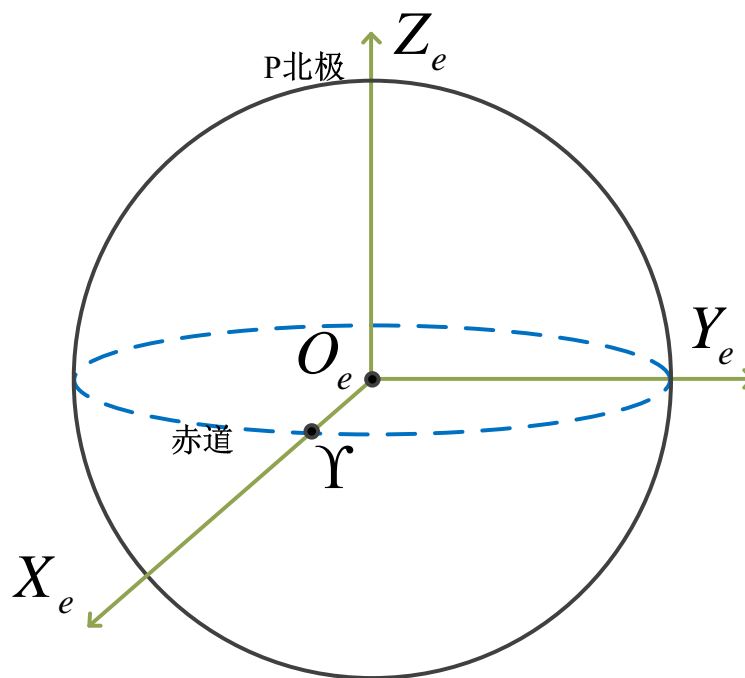
- 由于地球在缓慢地晃动，地球旋转轴的方向也有缓慢的漂移，导致地球赤道平面和黄道平面交线也会缓慢漂移。
- 因此，日心黄道坐标系和地心赤道坐标系实际上并不是一个惯性坐标系。如果需要特别精确时，就需要注明所用的坐标系是根据哪一特定时刻的春分点方向建立的。





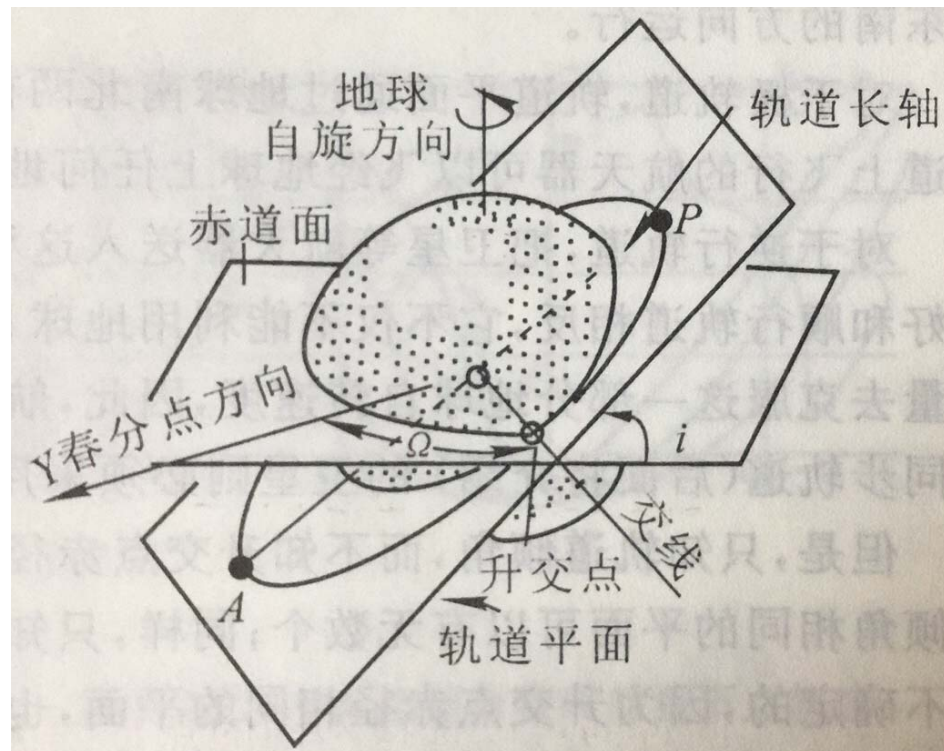
J2000.0地心惯性坐标系

- 原点为地球质心，基准平面为J2000.0（2000年1月1日12h质心动力学时）地球平赤道， X 轴指向J2000.0平春分点。





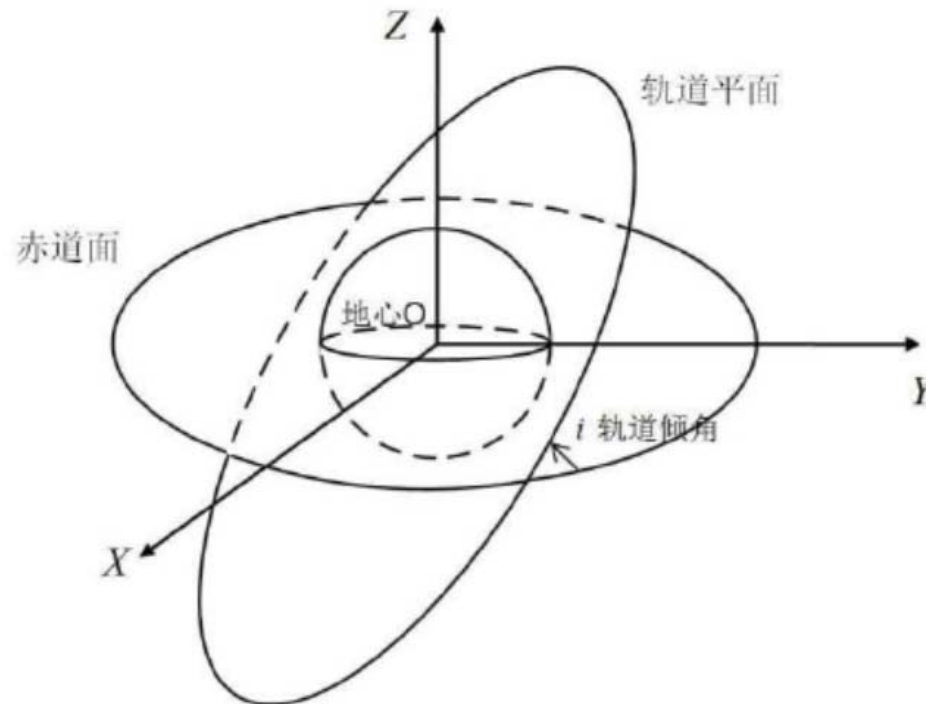
- 基于以上定义的坐标系就可以描述航天器的轨道。
- 航天器运行轨道的形状和航天器在空间中的位置，可以通过6个参量来表示，简称**轨道要素**或**轨道根数**。





1、轨道倾角

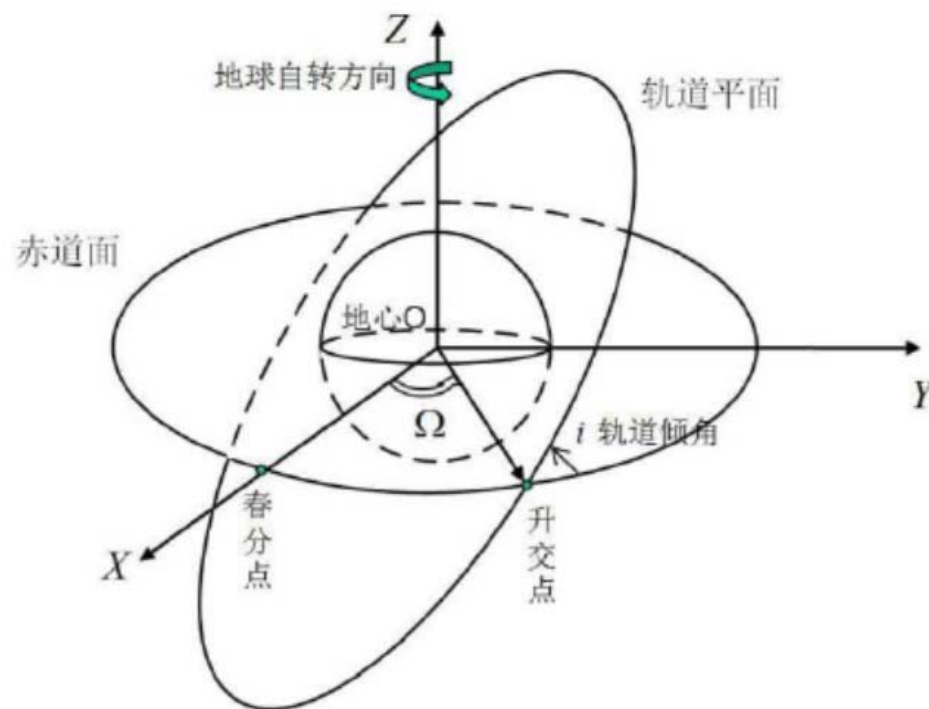
- 航天器运行轨道所在的平面叫轨道面，这个平面通过地心，它与地球赤道平面的夹角称为轨道倾角。





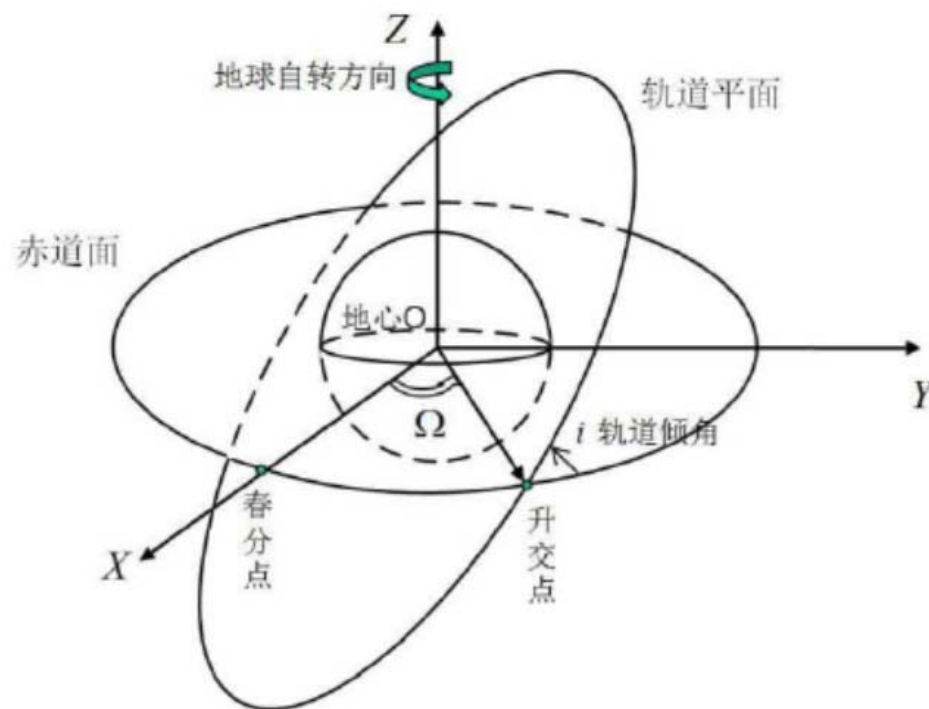
2、升交点赤经

- 轨道平面与赤道平面的交线在天球上有两个交点。对应于航天器由南半球向北半球上升段经过的那一点叫升交点；航天器由北半球向南半球运动时下降段经过的那一点叫降交点。





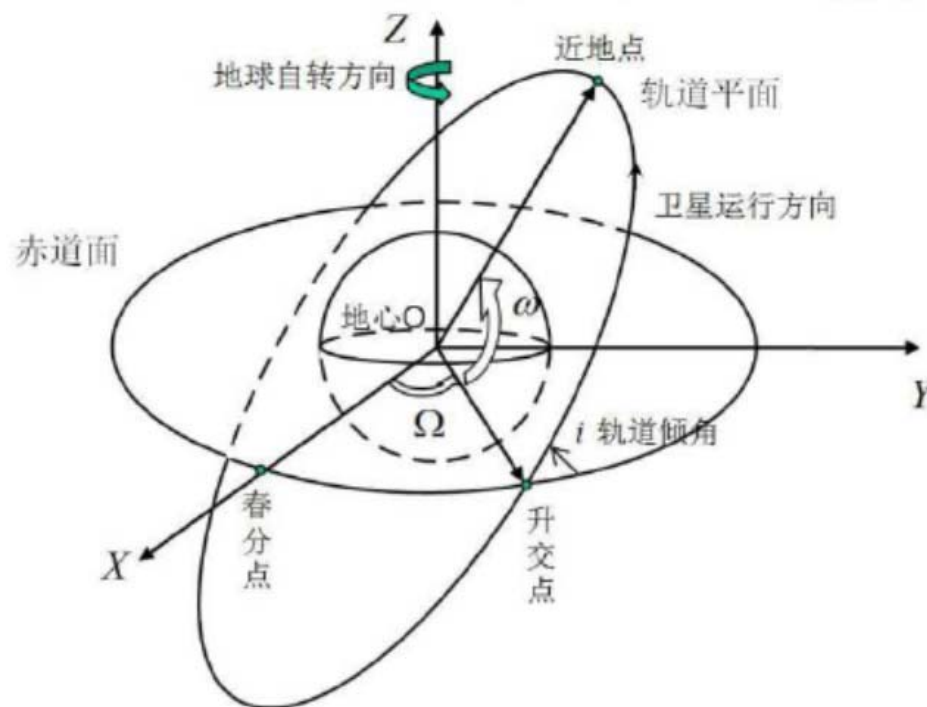
- 从春分点方向轴量起的升交点的经度称为升交点赤经，顺地球自转方向为正。 $0 \leq \Omega \leq 2\pi$





3、近地点角距

- 投影在天球上的椭圆轨道近地点与升交点对地心所张的角度，从升交点顺航天器运行方向量到近地点。

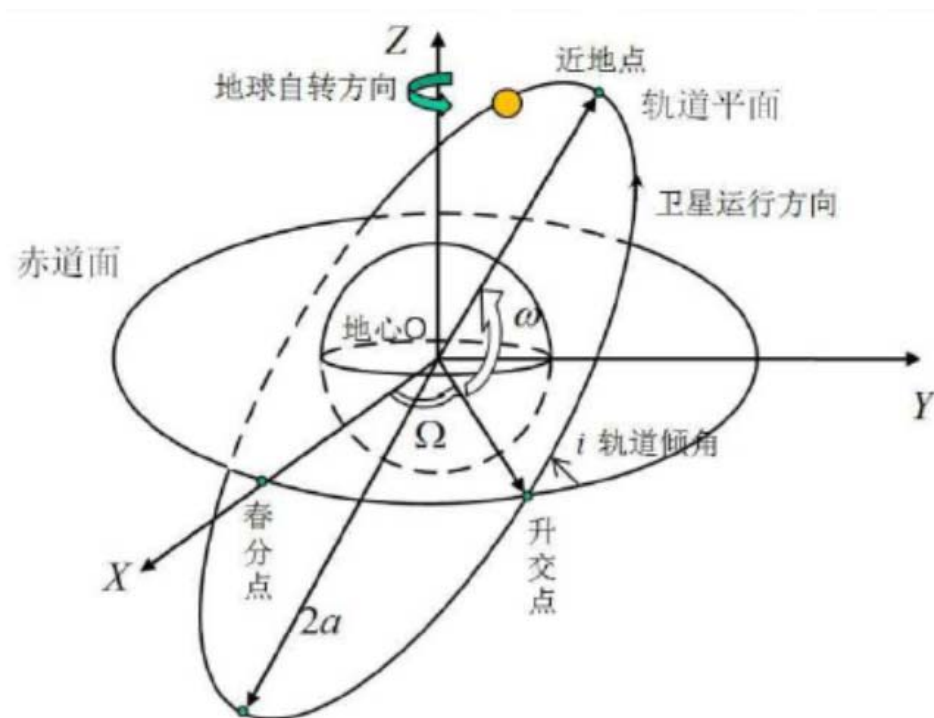




4、椭圆轨道的长半轴 a

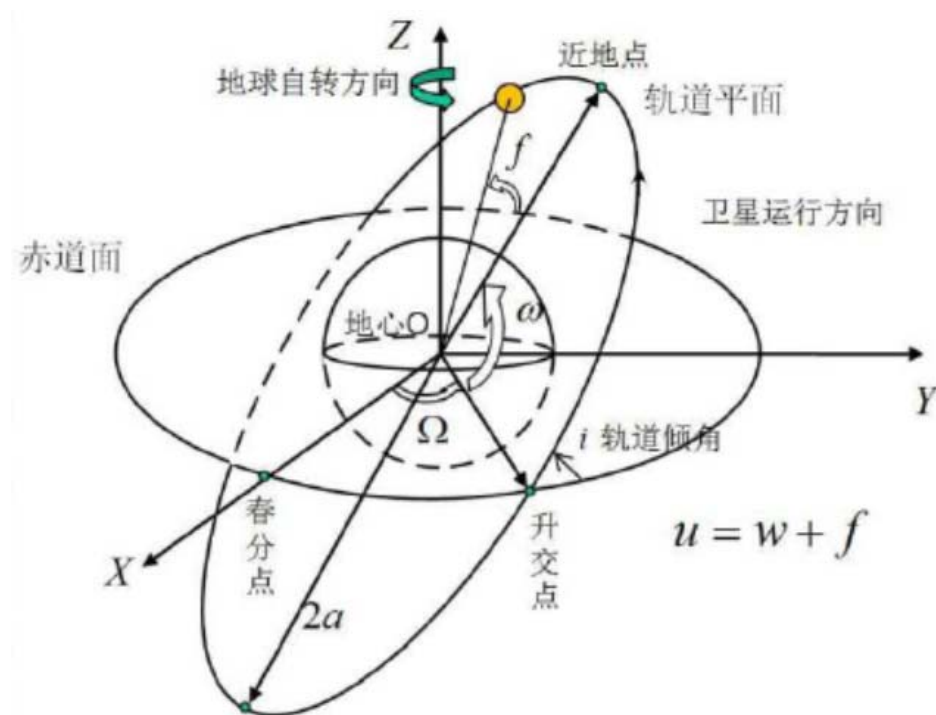
5、椭圆偏心率 $e = \sqrt{a^2 - b^2} / a$

6、航天器过近地点的时刻 t_p



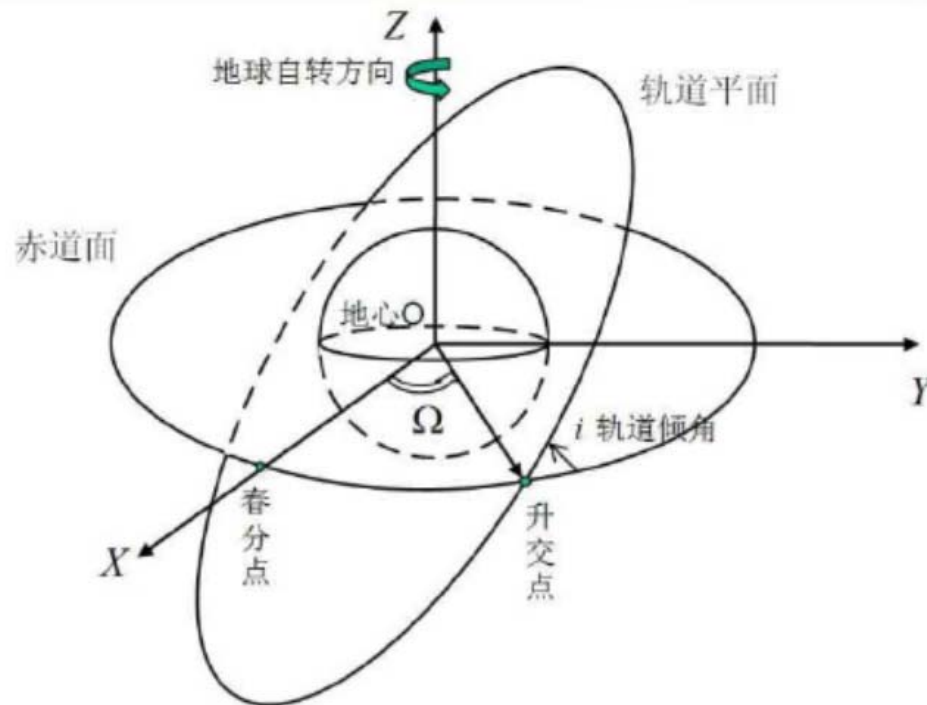


- 常用的轨道要素还有真近点角 f ：卫星位置矢量与近地点矢量的夹角。纬度幅角 u ：轨道升交点的方向与卫星位置矢量之间的夹角。





- 确定航天器轨道平面在空间的方位：由轨道倾角和升交点赤经确定





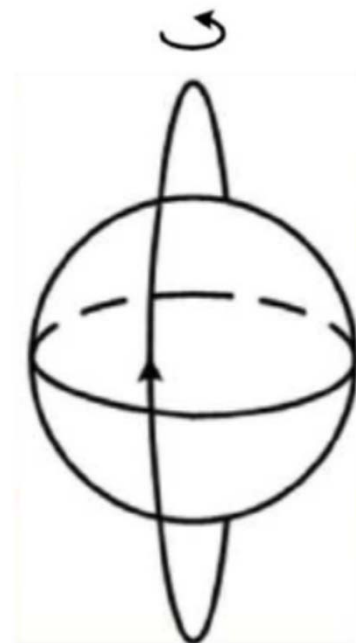
- 若只知轨道倾角，而不知升交点赤径，轨道平面在空间的方位仍然不确定，因为轨道倾角相同的平面可以有无数个；若只知升交点赤径，而不知轨道倾角，轨道平面的方位也是不确定的，因为升交点赤径相同的平面，也可以有无数个。
- 只有同时给定轨道倾角和升交点赤径两个参数，才能够确定一个轨道平面。



- 轨道倾角 $i = 0^\circ$ 时，称为赤道轨道；
- 轨道倾角 $i = 90^\circ$ 时，称为极轨道。



赤道轨道



极轨道



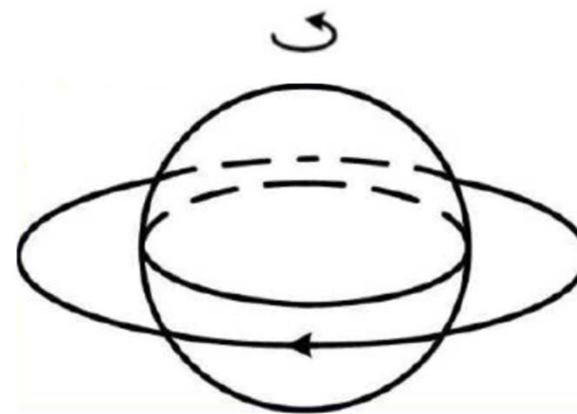
- 轨道倾角 $0^\circ < i < 90^\circ$ 时，航天器运行方向与地球自转方向相同，称为**顺行轨道**；
- 轨道倾角 $90^\circ < i < 180^\circ$ 时，航天器运行方向与地球自转方向相反，称为**逆行轨道**；
- 轨道倾角 $i = 180^\circ$ 时，航天器成为与地球自转方向相反的**赤道航天器**。



顺行轨道



逆行轨道



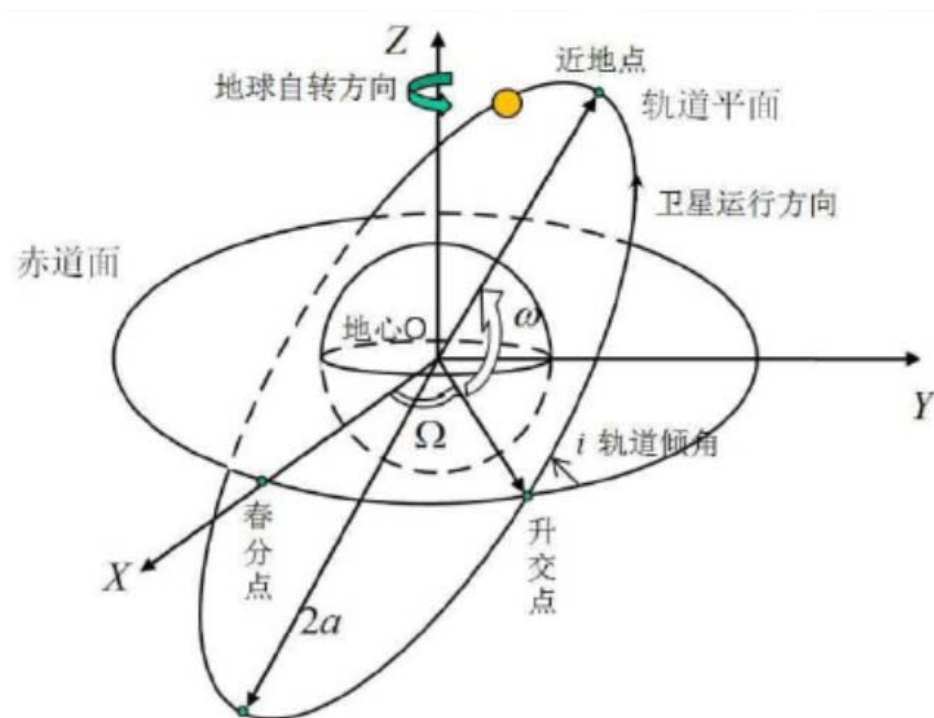
逆赤道轨道



- 对于顺行轨道，把卫星等航天器送入这种轨道，运载火箭需要朝偏东方向发射。优势在于可以利用地球自西向东自转的一部分速度，以节约运载火箭的能量。
- 对于极轨道，轨道平面通过地球南北两极的轨道叫做极轨道。优势在于极轨道上飞行的航天器可以飞经地球上任何地区的上空。
- 对于逆行轨道，把卫星等航天器送入这种轨道，运载火箭需要朝偏西方向发射。它不仅不能利用地球自转速度来节约运载火箭能量，反而要付出额外的能量去克服这一部分地球自转速度。因此，航天器一般都不用这样的轨道。但是太阳同步轨道卫星则必须采用逆行轨道；

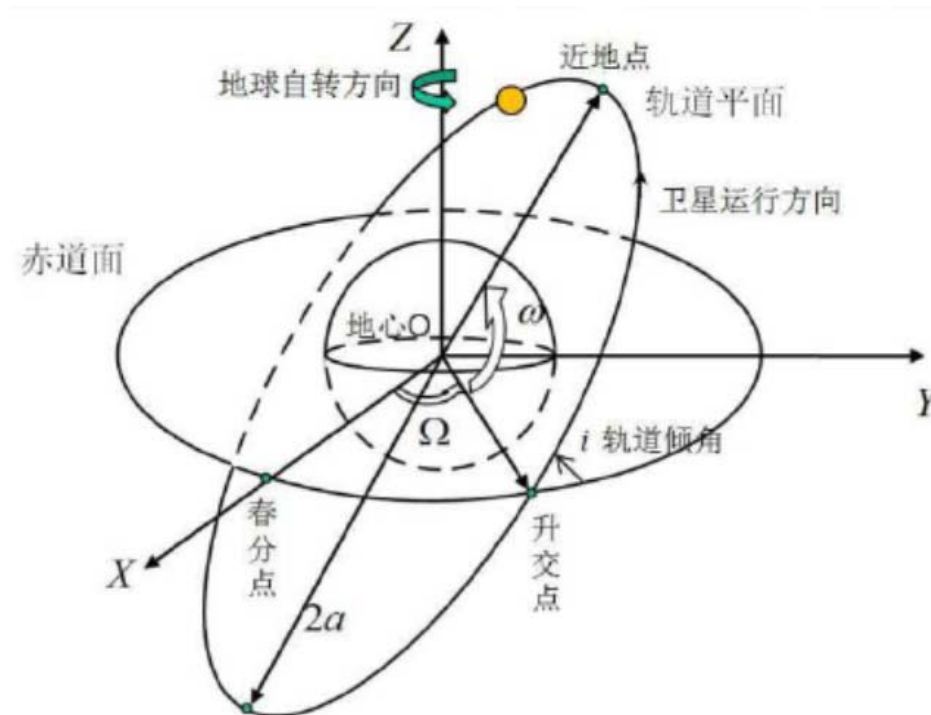


- 确定椭圆长轴在轨道平面上的指向：由近地点角距确定



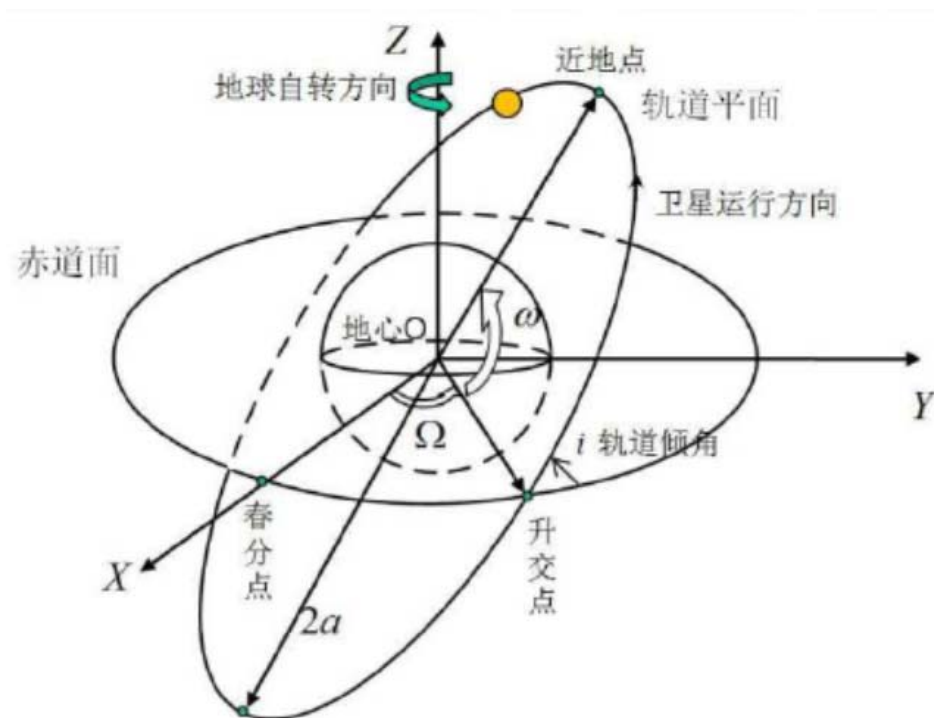


- 确定椭圆轨道的形状和大小：由长半轴和偏心率确定



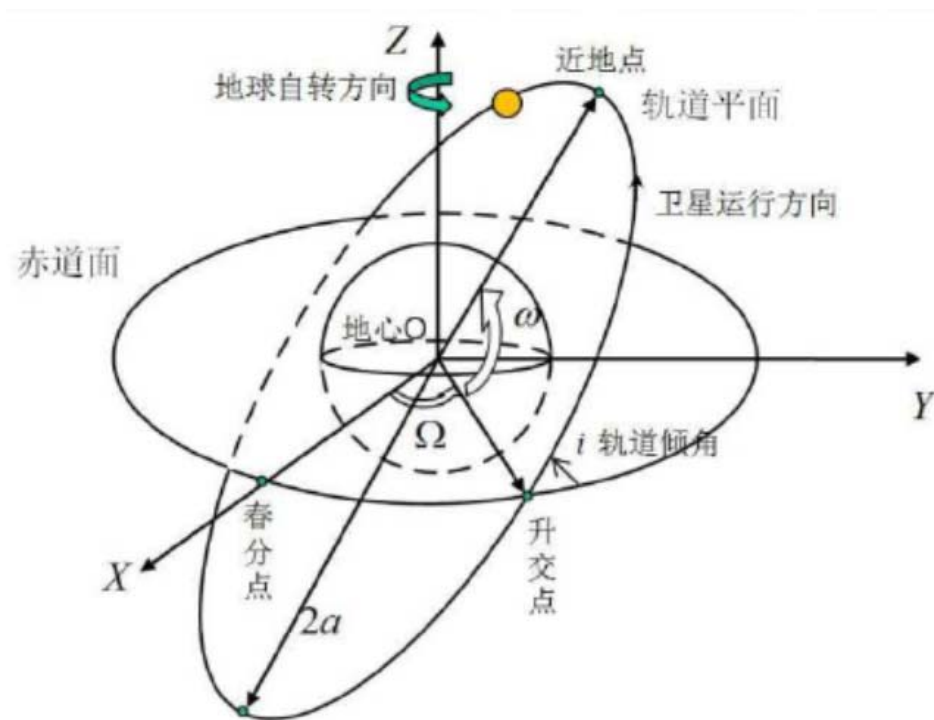


- 只要有五个独立的轨道要素就足以确定轨道的大小、形状和方位，但为了精确地指出航天器沿着轨道在某特定时刻的位置，还需要第六个要素



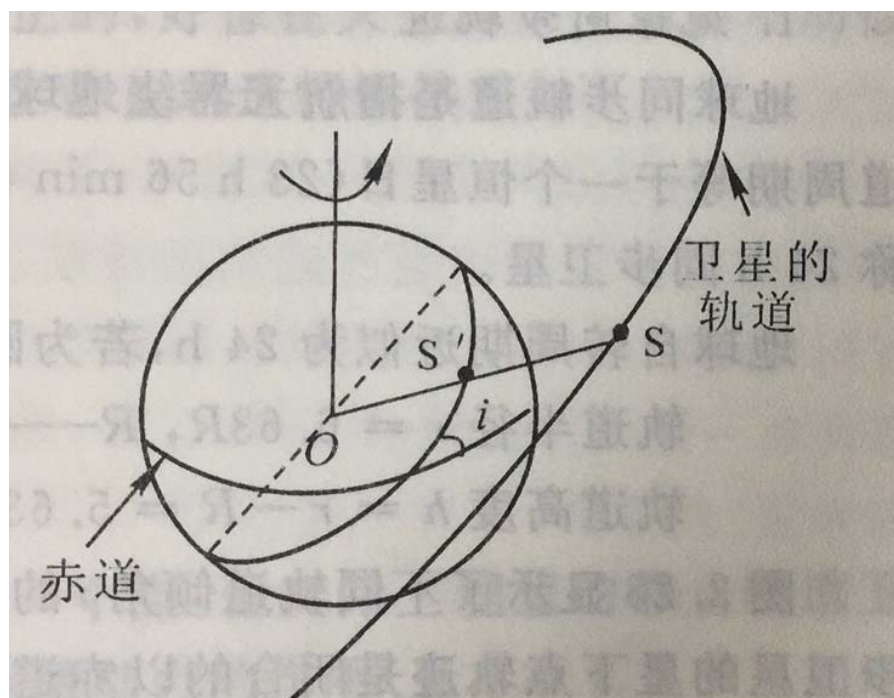


- 确定航天器在轨道上的位置：由航天器过近地点时刻把时间和空间（航天器在轨道上的位置）联系起来
- 当已知航天器的上述一组轨道参数后，就可确定在任一时刻时航天器的位置和速度，从而对航天器在惯性坐标系内的运动进行观测和预报



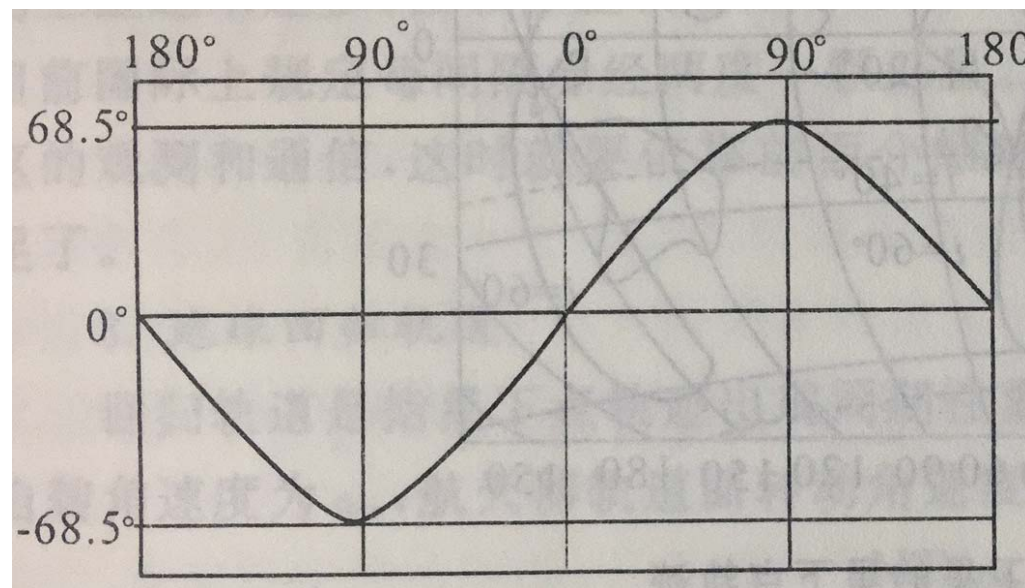
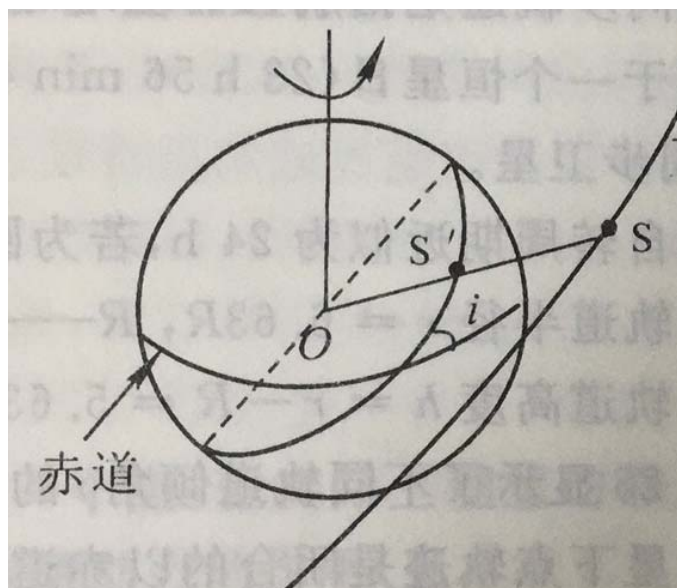


- 星下点：轨道上的卫星(S)与地心的连线(径向直线)在地面上有一交点(S')，这是卫星在地面的投影点，称为星下点。
- 星下点轨迹：随着卫星的运行，星下点也在地面上连点成线，这条线称为卫星的星下点轨迹，它反映了卫星相对于地球表面的运动情况。





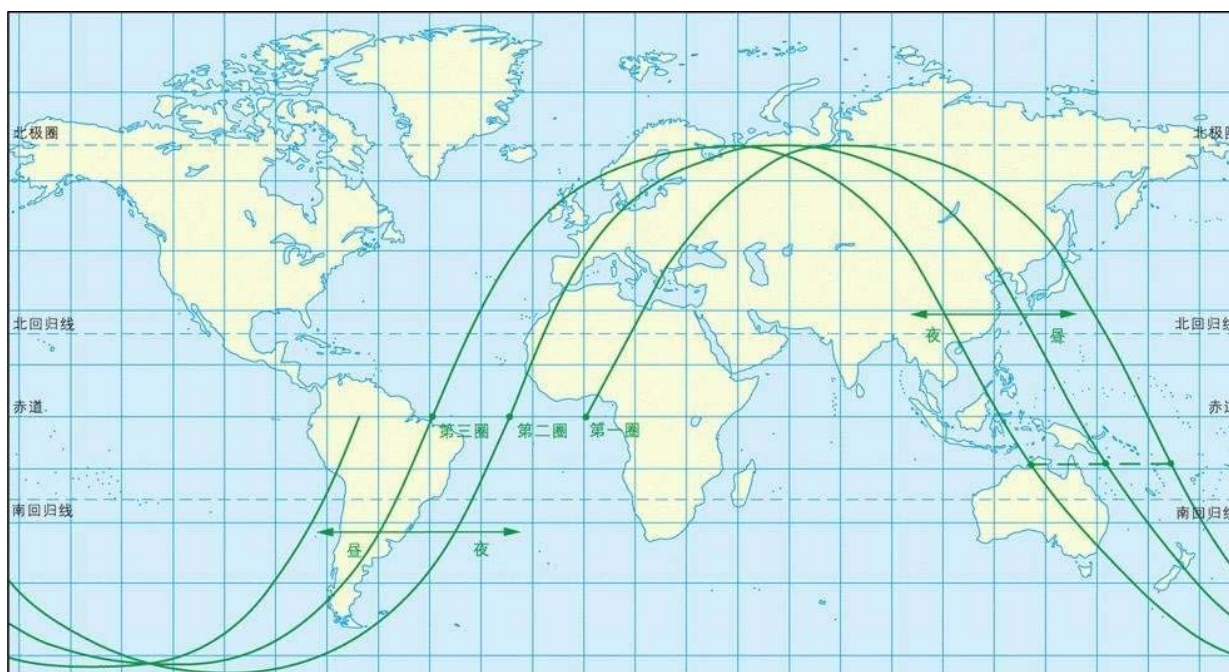
不考虑地球自转





考虑地球自转

- 星下点轨迹是地球自转和轨道面定向性两者的综合结果。





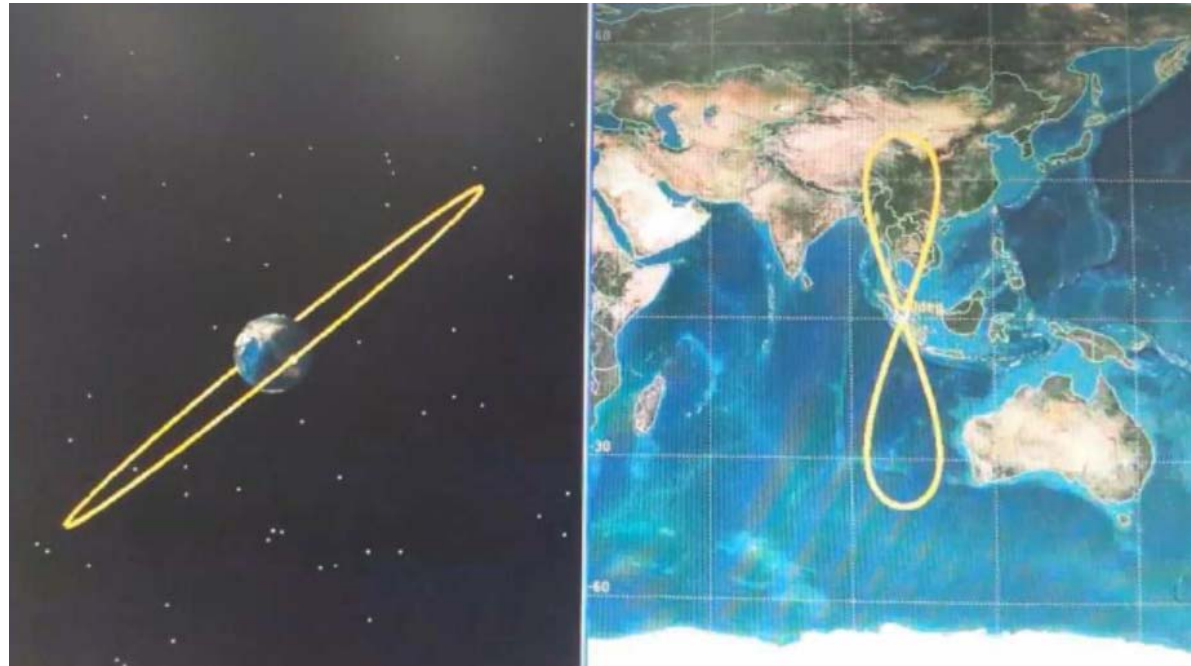
- 轨道要素完全决定着航天器轨道的形状、方位、大小以及星下点轨迹。
- 航天器的运行轨道是按照航天器所要完成的任务来设计的。
- 需要了解和搜集地球不同高度的空间环境条件和科学数据时，一般要求卫星选用椭圆轨道。
- 凡是作为基准站和中继站的卫星，都要求圆轨道。
- 要对地面某一地区进行观测或侦察时，必须选择星下点轨迹通过该地区的轨道，同时还要求轨道高度适当。
- 对于执行地球照相任务的地球资源卫星和军事侦察卫星，不能把轨道高度提得太高，否则会影响照相的分辨力。



- 地球同步轨道：地球同步轨道是指航天器环绕地球运行的周期与地球自转周期相同的轨道，即航天器的轨道周期等于一个恒星日(23h 56min 4.1s)。
- 采用地球同步轨道的卫星，称为地球同步卫星，也称24h同步卫星。
- 若为圆轨道，则：
- 轨道半径： $r=6.63R$ R ：地球半径
- 轨道高度： $h=r-R=5.63R=35810km$

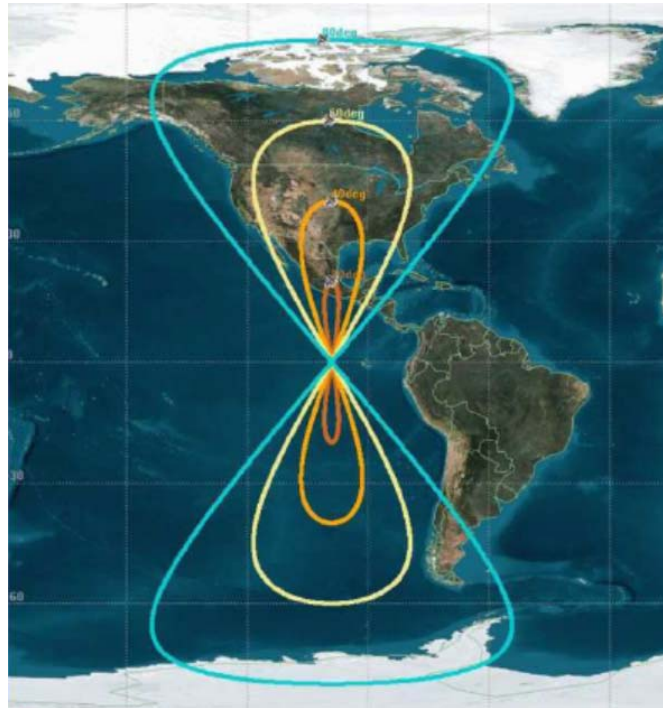


圆形地球同步卫星的星下点轨迹



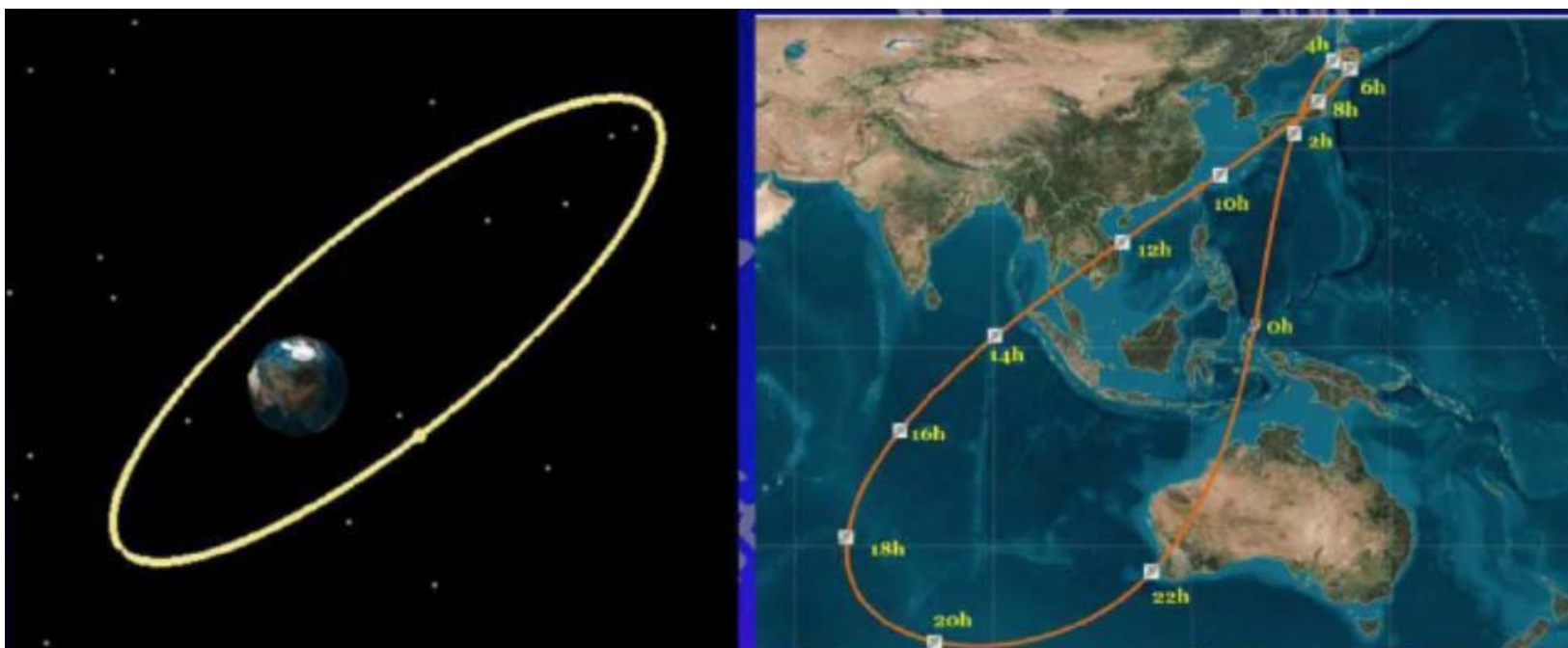


不同轨道倾角的圆轨道地球同步卫星的星下点轨迹





离心率0.3，轨道倾角45度的椭圆同步轨道





- 地球静止轨道：地球静止轨道是指轨道倾角 $i = 0^\circ$ 的地球同步轨道。从地面上看，航天器相对于地球是静止的。
- 采用静止轨道的卫星，称为静止卫星或定点卫星。
 - 轨道倾角 $i = 0^\circ$ 的赤道轨道；
 - 偏心率 $e = 0$ 的圆形轨道；
 - 轨道高度 $h \approx 36000km$ 的高轨道；
 - 周期 $T=23h\ 56min\ 4.1s$ ；
 - 环绕速度 $v = 3.075 km/s$ ；





- 理想静止轨道上的卫星的星下点轨迹只是赤道上的一个点。但实际上理想的静止轨道卫星是不存在的，卫星在轨道上不可避免地会受到各种干扰摄动力的作用；
- 从地球上观察，实际静止卫星并不是固定不动的，而总是在东西方向和南北方向漂移着，其星下点轨迹近似是一个小的“8”字形。
- 地球静止轨道只有一条，即高度约 $36000km$ 的赤道圆轨道。



□ 地球回归轨道：地球回归轨道是指星下点轨迹出现周期性重复的轨道。
重复出现的周期称为回归周期。

- 设地球自转周期为 T_e ，航天器轨道周期为 T ，那么回归轨道就有：

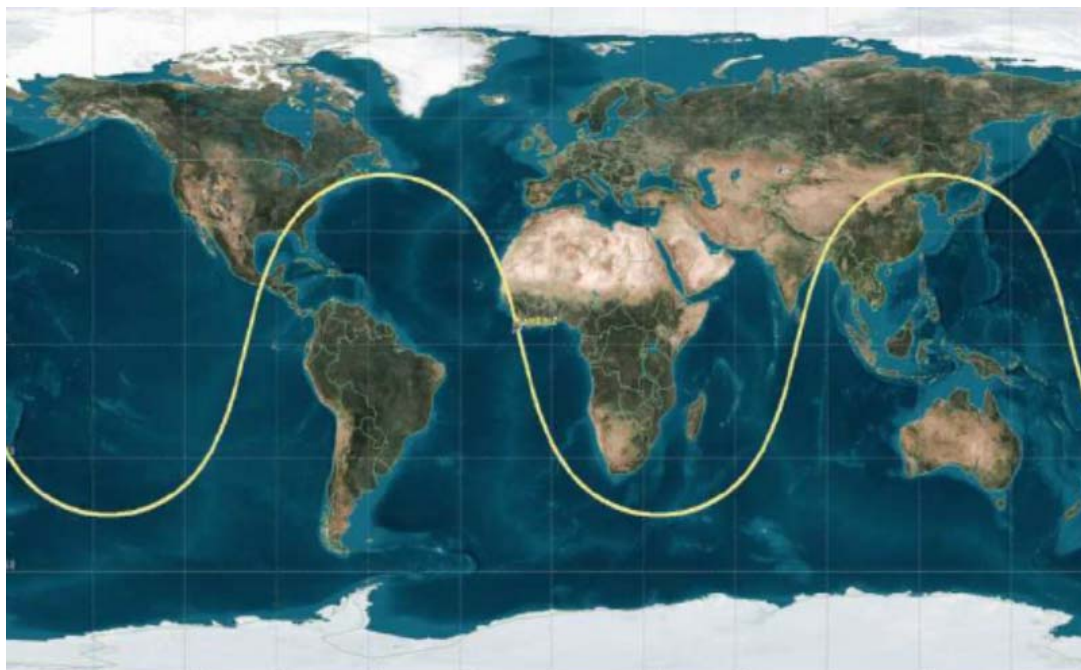
$$TN = T_e K$$

K 和 N 均为正整数且不可简约， NT 称为回归周期， K 称为回归天数。

- 地球同步轨道和静止轨道可视为 $K=1$ ， $N=1$ 的回归轨道。

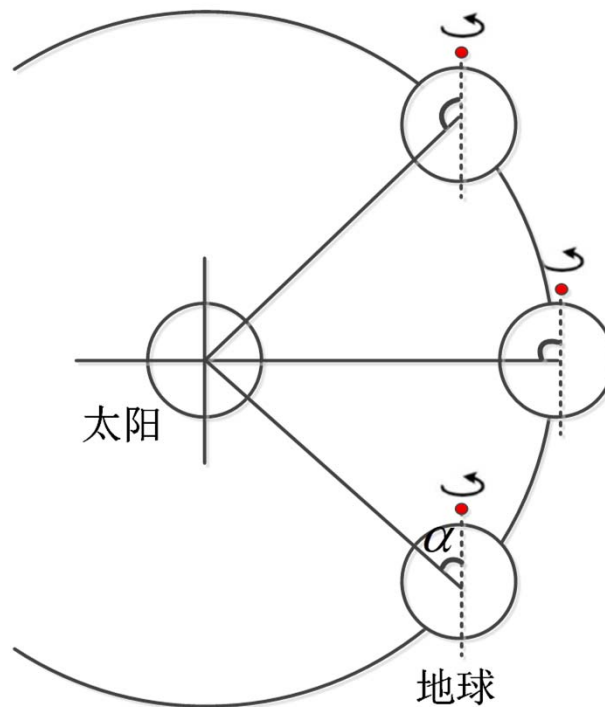


$K=1, N=2$ 的回归轨道的星下点轨迹



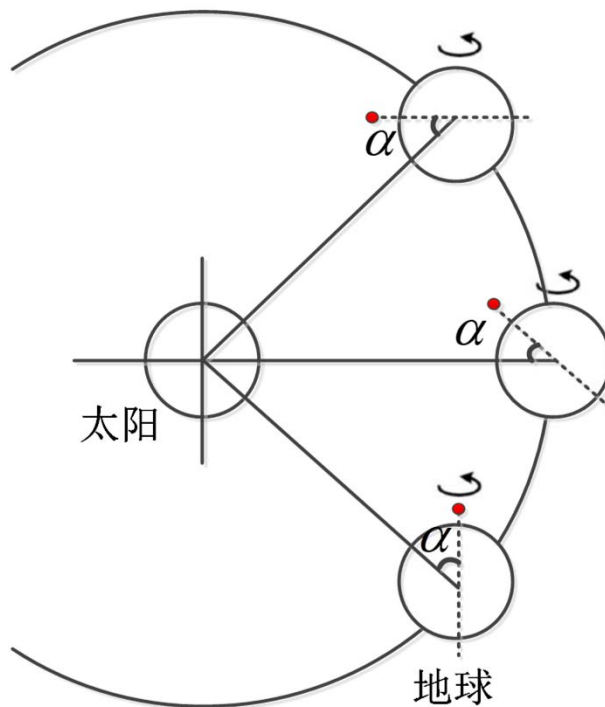


- 太阳同步轨道：太阳同步轨道是指航天器轨道面转动角速度与地球公转角速度相同的轨道，即航天器轨道面转动方向和周期与地球公转的方向和周期相同。
- 采用太阳同步轨道的卫星，称为太阳同步卫星。





- 太阳同步轨道：太阳同步轨道是指航天器轨道面转动角速度与地球公转角速度相同的轨道，即航天器轨道面转动方向和周期与地球公转的方向和周期相同。
- 采用太阳同步轨道的卫星，称为太阳同步卫星。





- 太阳同步轨道：太阳同步轨道是指航天器轨道面转动角速度与地球公转角速度相同的轨道，即航天器轨道面转动方向和周期与地球公转的方向和周期相同。
- 采用太阳同步轨道的卫星，称为太阳同步卫星。
- 太阳同步轨道的数学定义如下：

$$\dot{\Omega} = \frac{d\Omega}{dt} = \frac{2\pi}{Y_\theta}$$

- 太阳同步轨道可以提供一个恒定的太阳方位角，可以使卫星在相同光照条件下，观测同一地区或纬度带。



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY



THANKS



029-81891860

