

第二章 参考系和卫星轨道描述

马卫华
西北工业大学

内容框架

2.1 天球坐标系

2.2 地球坐标系

2.3 全球大地系统

2.4 时间体系

2.5 卫星轨道描述及位置的计算



第二章 参考系和卫星轨道描述

概述—基本要求

卫星导航过程中常用坐标系定义

坐标系相互转换关系

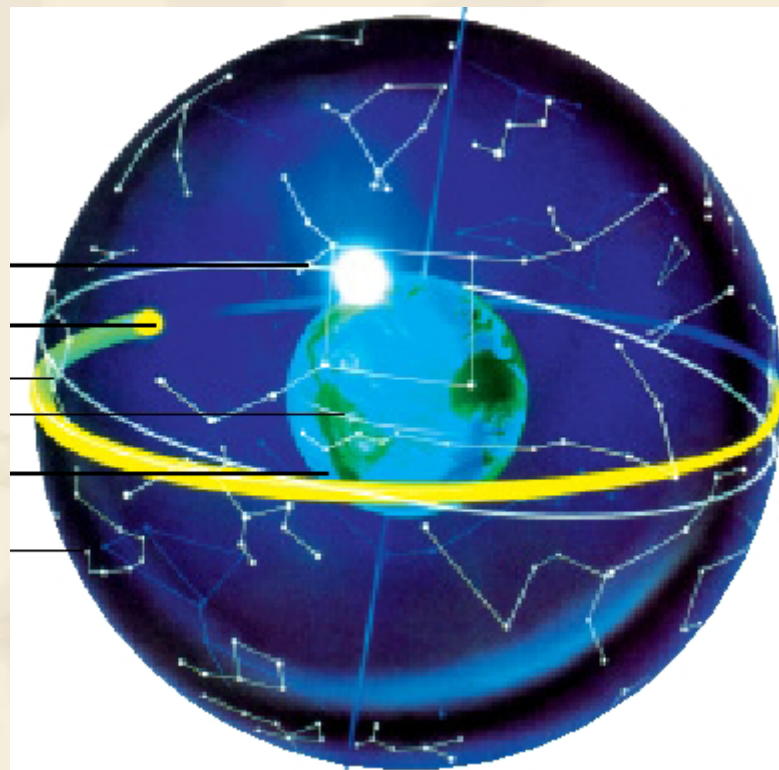
卫星空间位置的描述方法

计算给定坐标系中位置、速度等参数

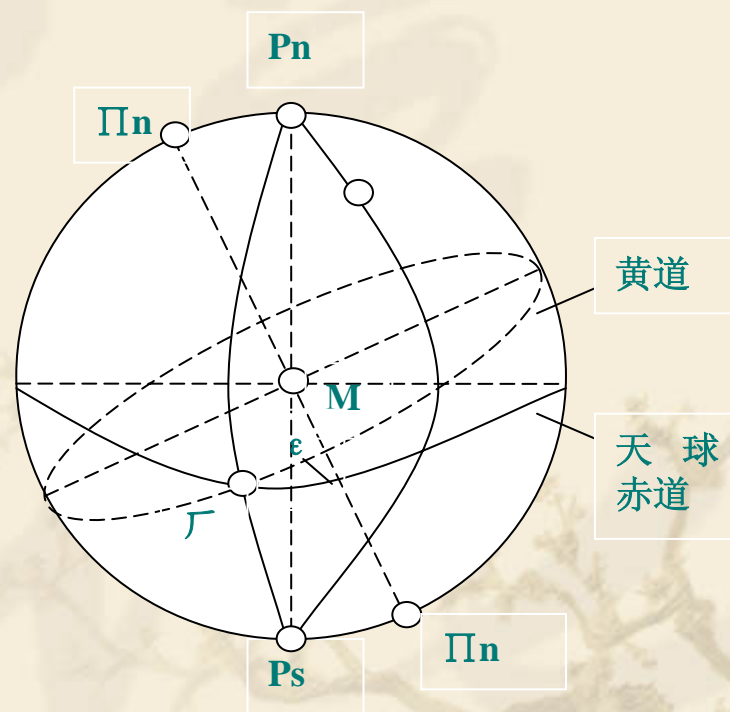
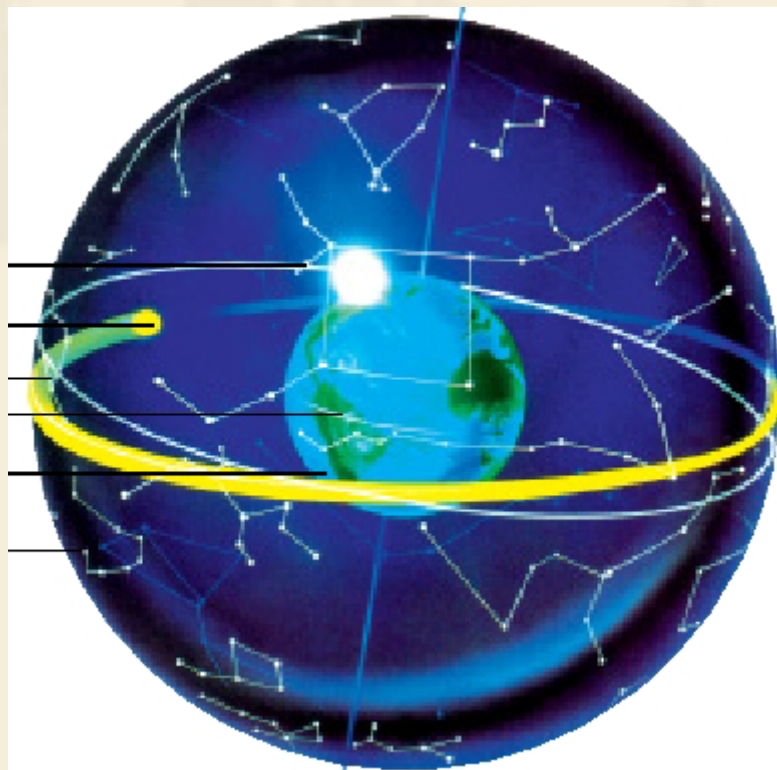
2.1 天球坐标系

2.1.1 天球的基本概念

- ❖ 以地球质心为中心,半径为任意长度的假想球体
- ❖ 天文学中通常均把天体投影到天球球面上,并利用球面坐标系统来表达或研究天体的位置及天体之间的关系



- ❖ 建立球面坐标系统必须确定球面上的一些参考点、线、面和圈
- ❖ 描述卫星的位置将涉及这些概念



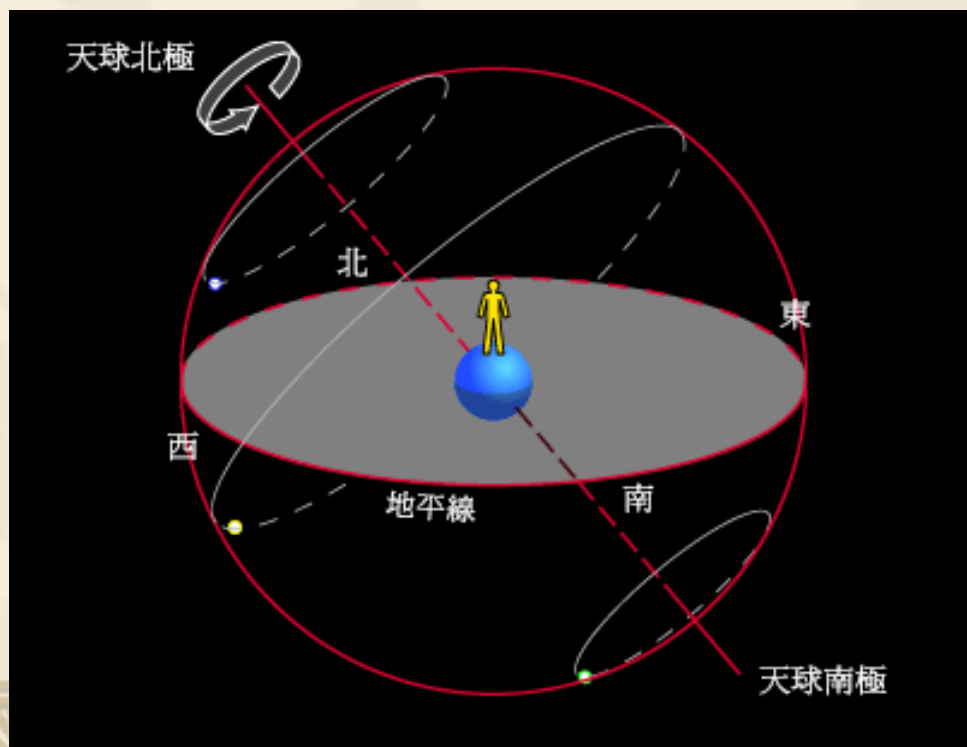
天球的概念

❖ (1) 天轴与天极：

天轴：地球自转轴的延伸直线

天极：天轴与天球的交点和称为天极

北天极+南天极

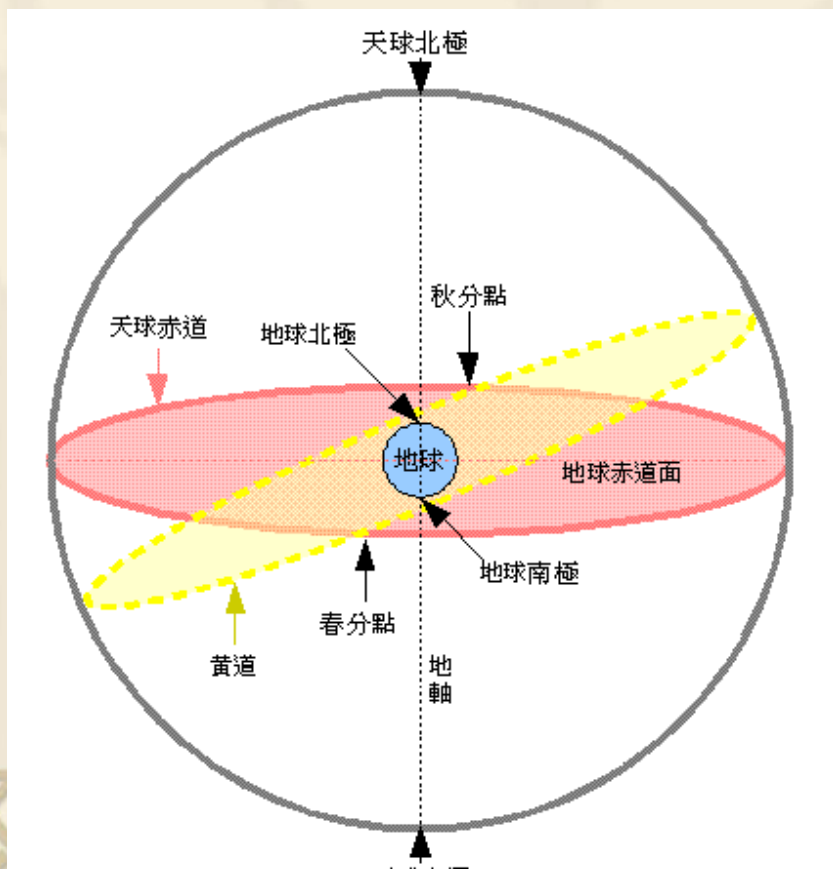


❖ (2)天球赤道面与天球赤道:

天球赤道面：通过地球质心与天轴垂直的平面

天球赤道面与地球赤道面相重

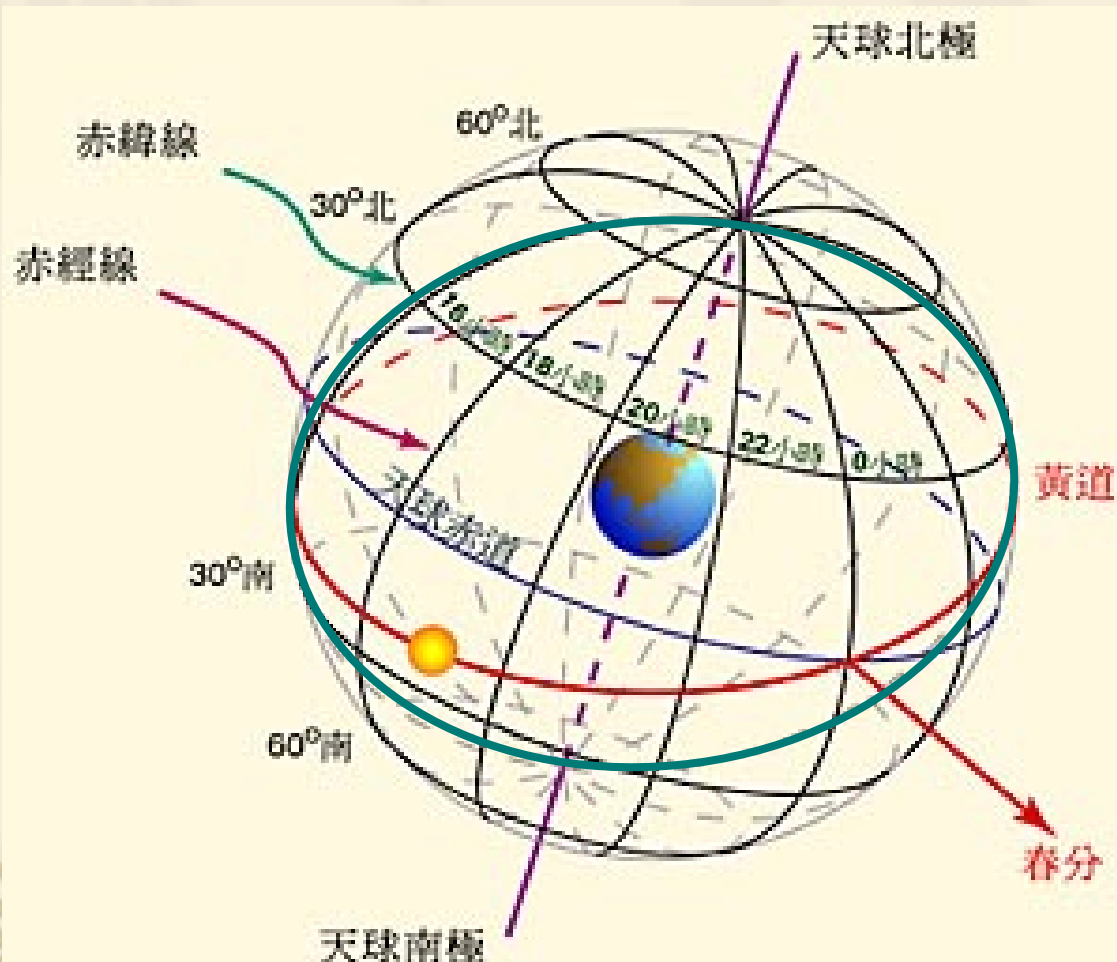
天球赤道：该赤道面与天球相交的大圆



❖ (3)天球子午面与子午圈：

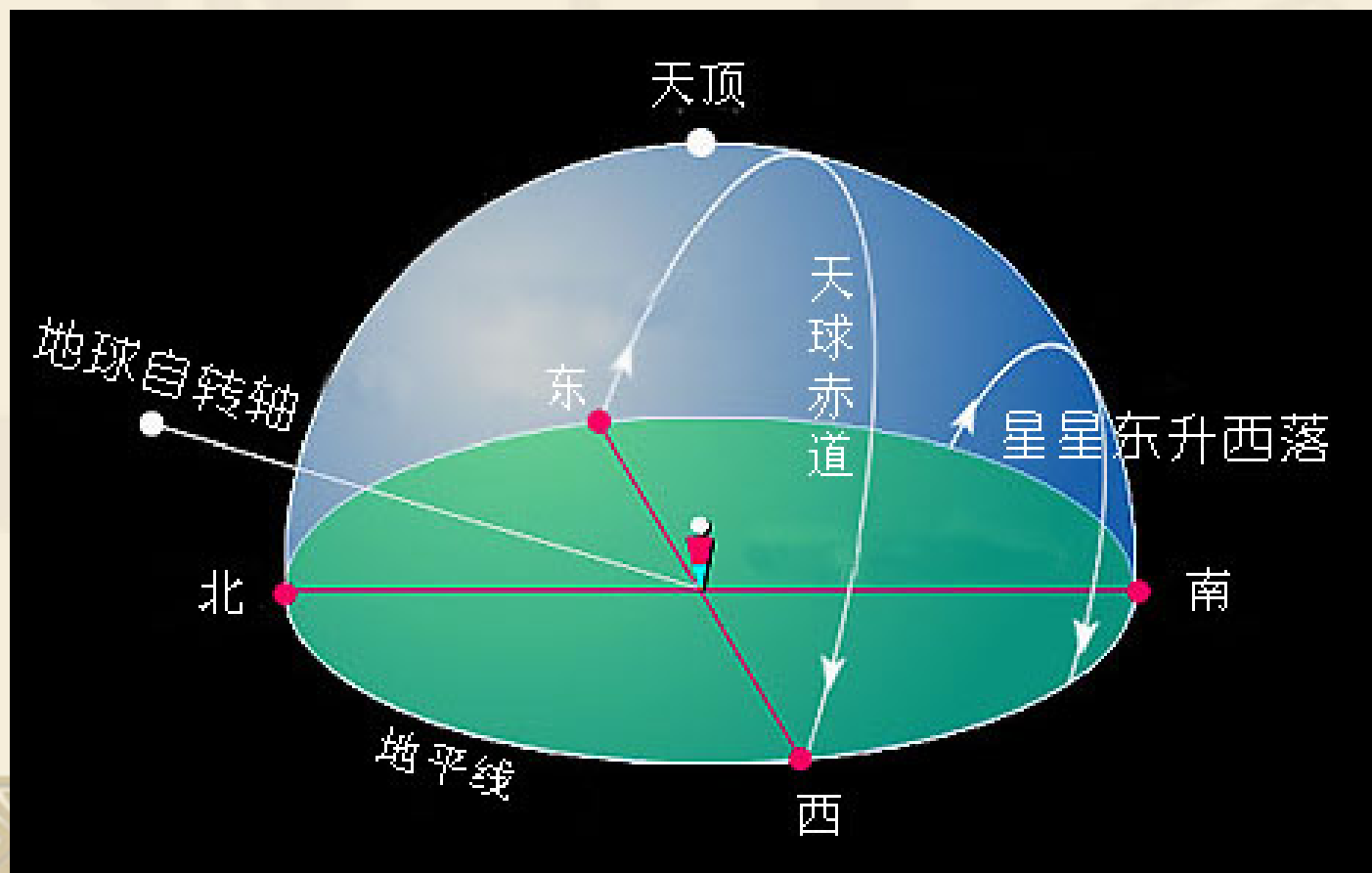
天球子午面：包含天轴并通过天球上任一点的平面

天球子午圈：天球子午面与天球相交的大圆

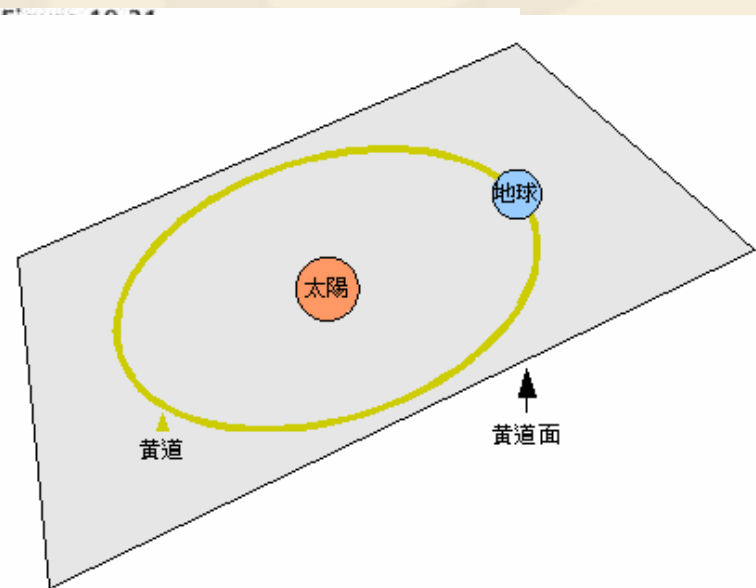
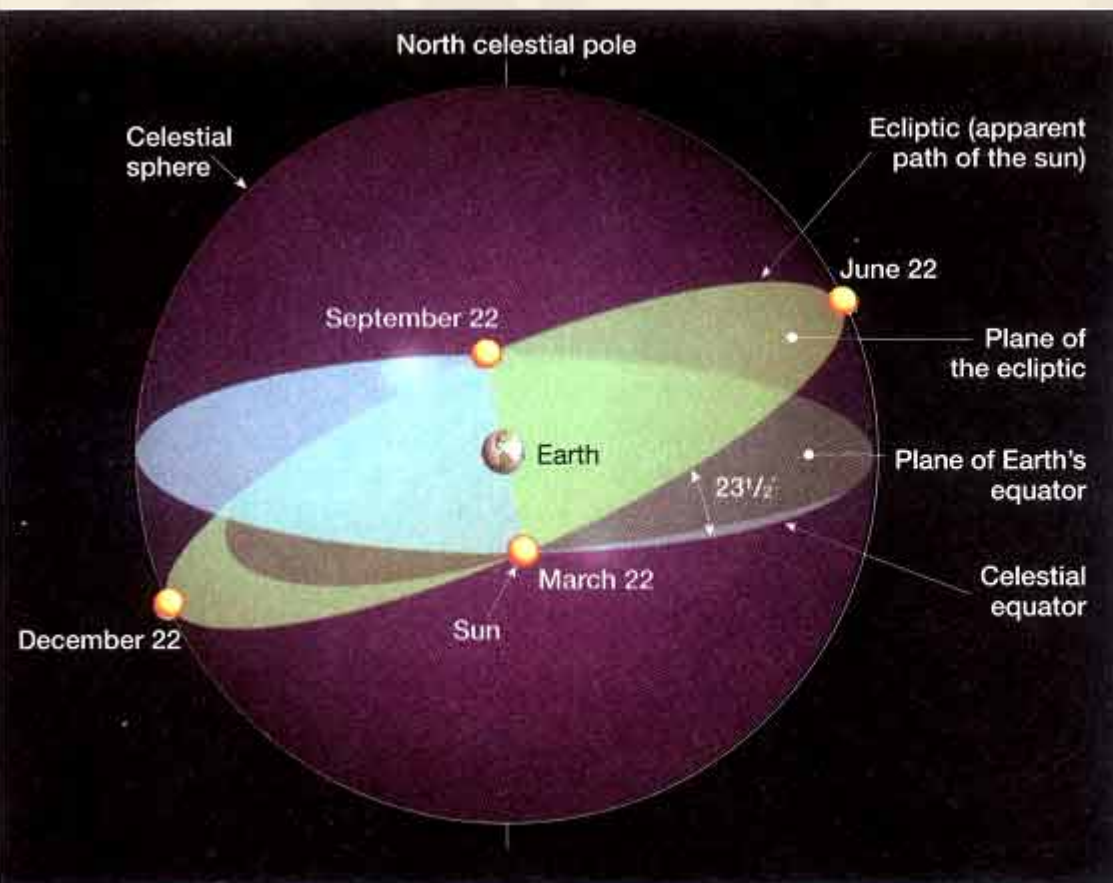


❖ (4)时圈

通过天轴的平面与天球相交的半个大圆



- ❖ (5)黄道：地球公转的轨道面与天球相交大圆,即当地球绕太阳公转时,地球上的观测者所见到的太阳在天球上运动的轨迹。黄道面与赤道面的夹角,称为黄赤交角,约为**23.5度**。



天球
赤道

❖ (6)黄极:

过天球中心且垂直于黄道面的直线与天球交点靠近北、南天极的交点分别为北、南黄极

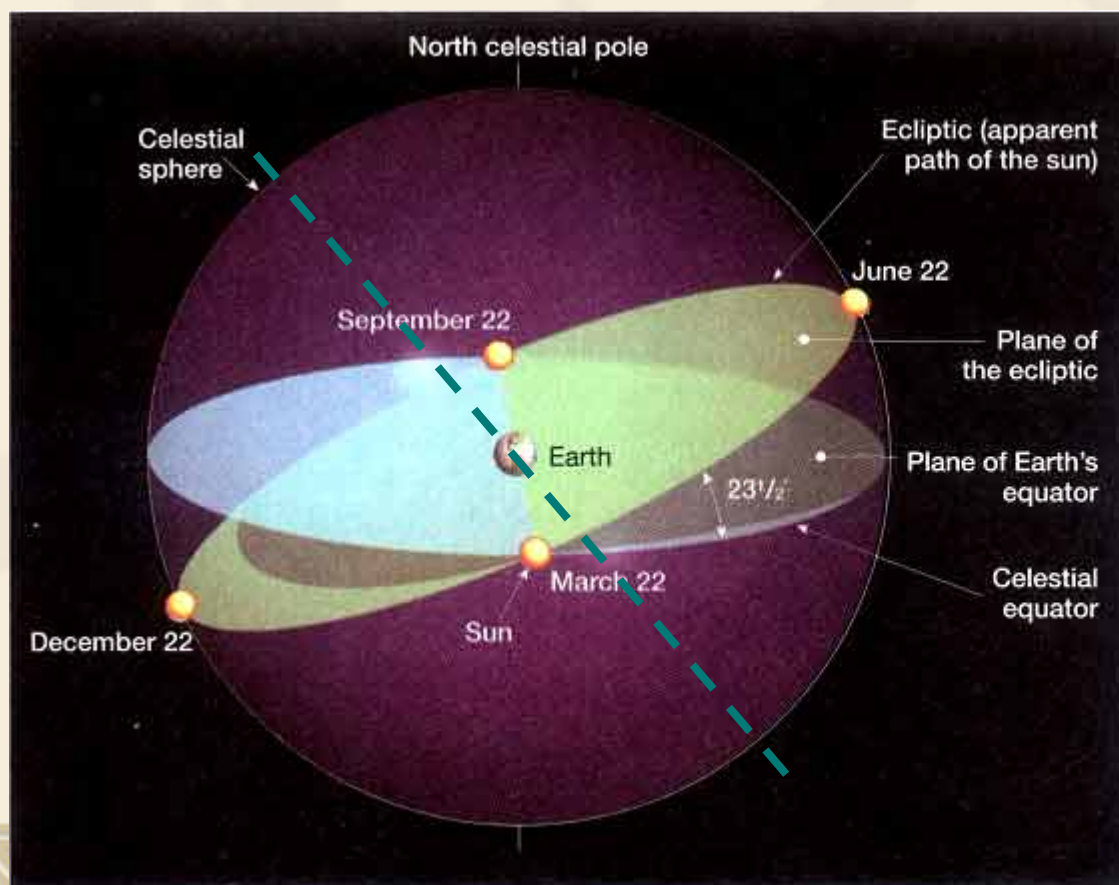
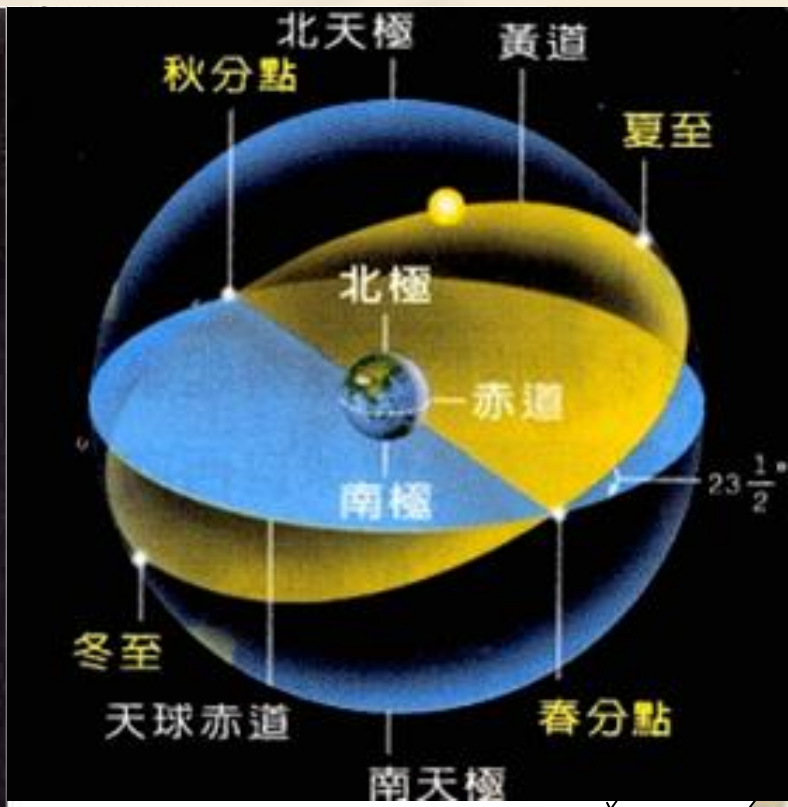
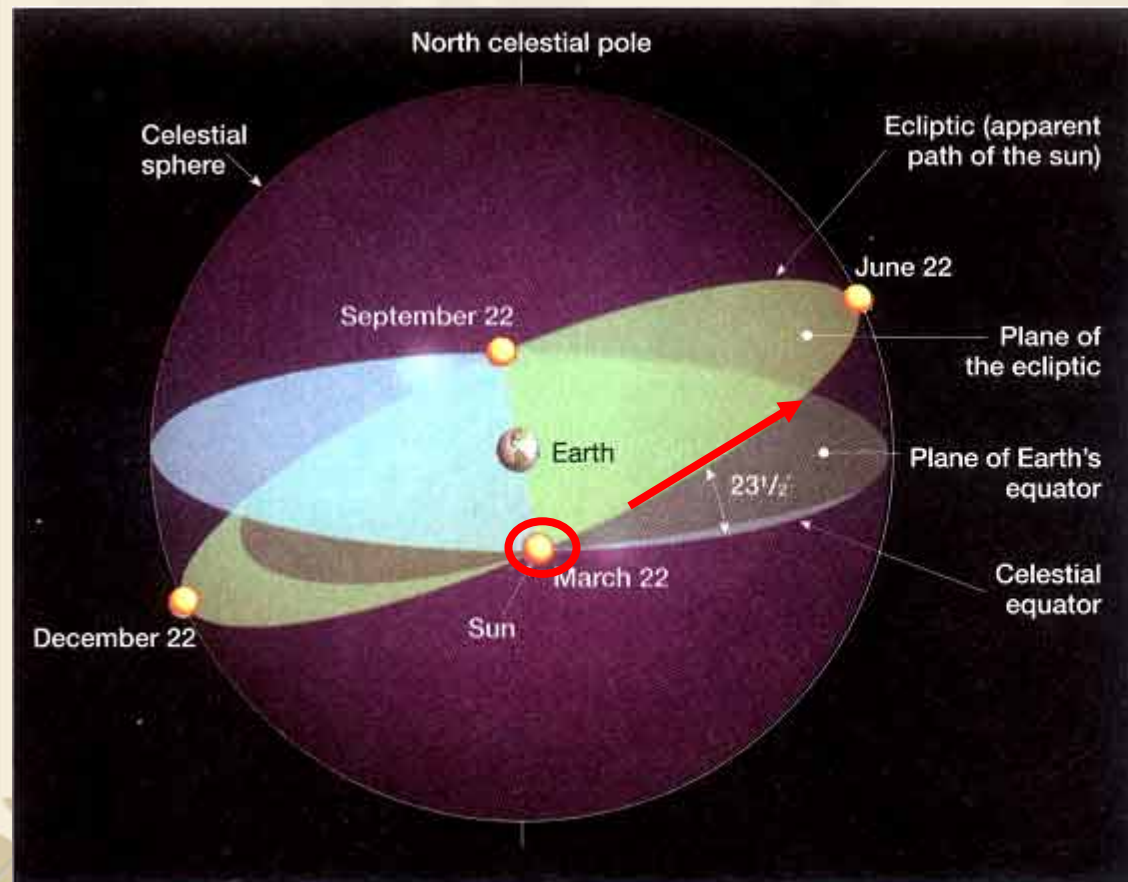


Figure 19.21

The apparent position of the sun plotted on the celestial sphere. The path of the sun (ecliptic) crosses the celestial equator on two occasions each year, March 20–21 and September 22–23. These are known as the equinox positions because the lengths of daylight and darkness on Earth are equal.

❖ (7)春分点：当太阳在黄道上从天球南半球向北半球运动时,黄道与天球赤道的交点。在天文学和卫星大地测量学中,春分点和天球赤道面是建立参考系的重要基准点和基准面。

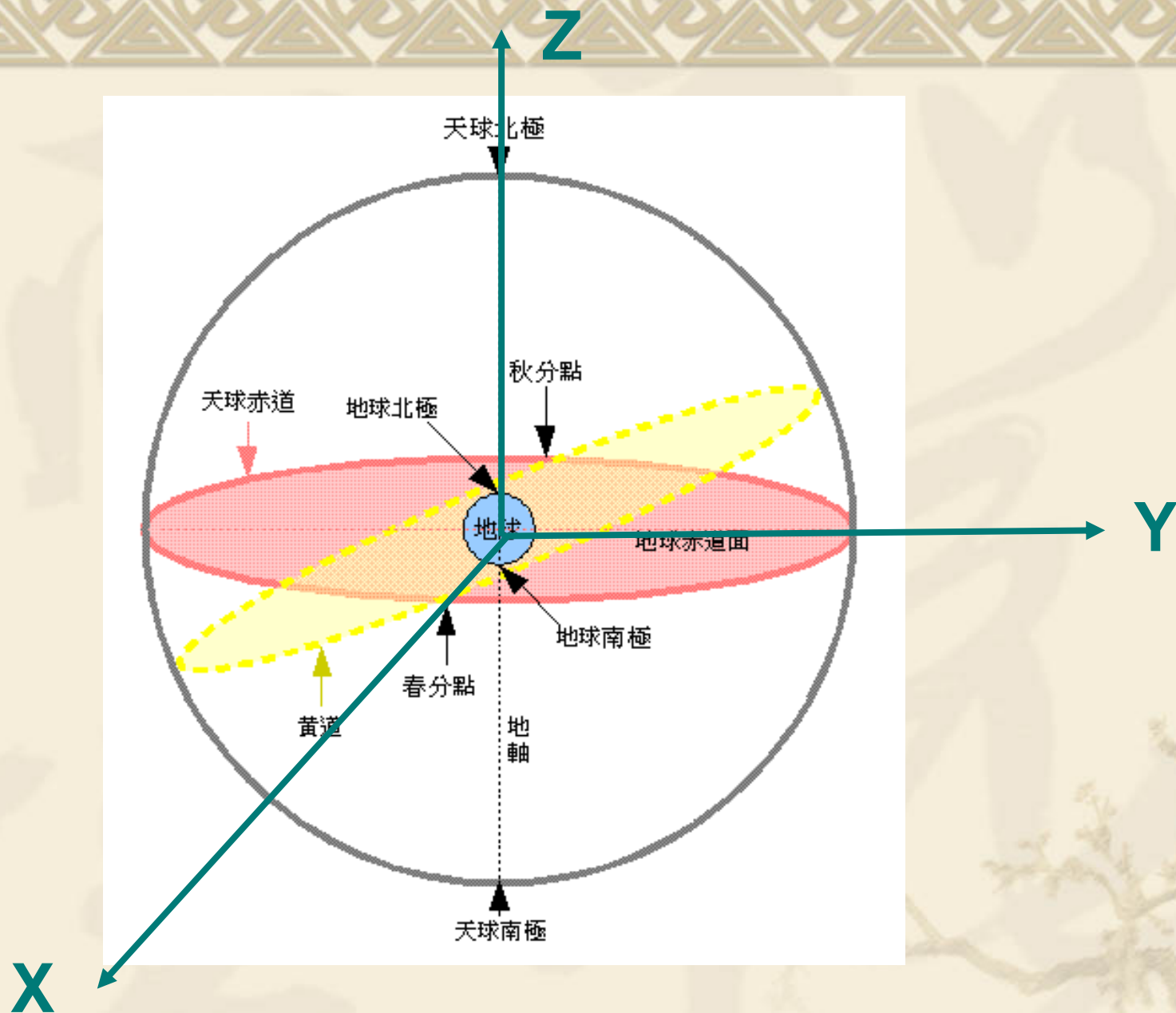


2.1.2 天球坐标系

- ❖ 任一天体的位置,在天球坐标系中可用天球空间直角坐标系和天球球面坐标系两种形式来描述。

天球直角坐标系的定义

- ❖ 原点：地心
- ❖ **XOY**平面：天球赤道面，**OX**轴为地心/春分点连线
- ❖ **OZ**轴：与天球极轴重合，指向地球北极
- ❖ 坐标 (**x y z**)



2.1.2 天球坐标系

- ❖ 任一天体的位置,在天球坐标系中可用天球空间直角坐标系和天球球面坐标系两种形式来描述。

天球球面坐标系的定义

- ❖ 原点：地心；
- ❖ 赤经： $0\text{---}360$ or $-180\text{---}180$
- ❖ 赤纬： $-90\text{---}90$
- ❖ 距离：
- ❖ 对象：空间运动卫星和恒星体

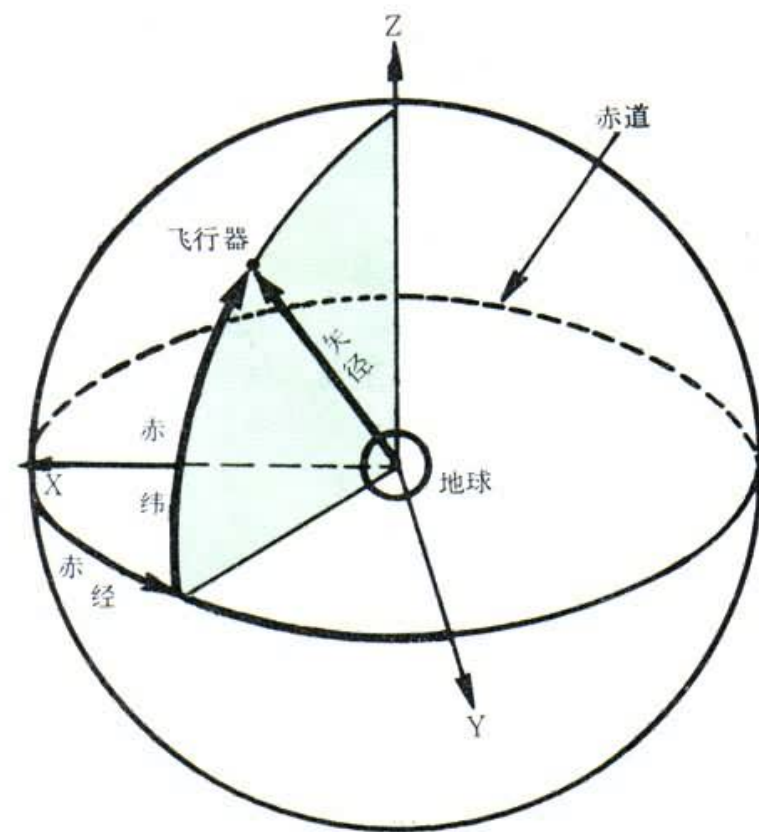
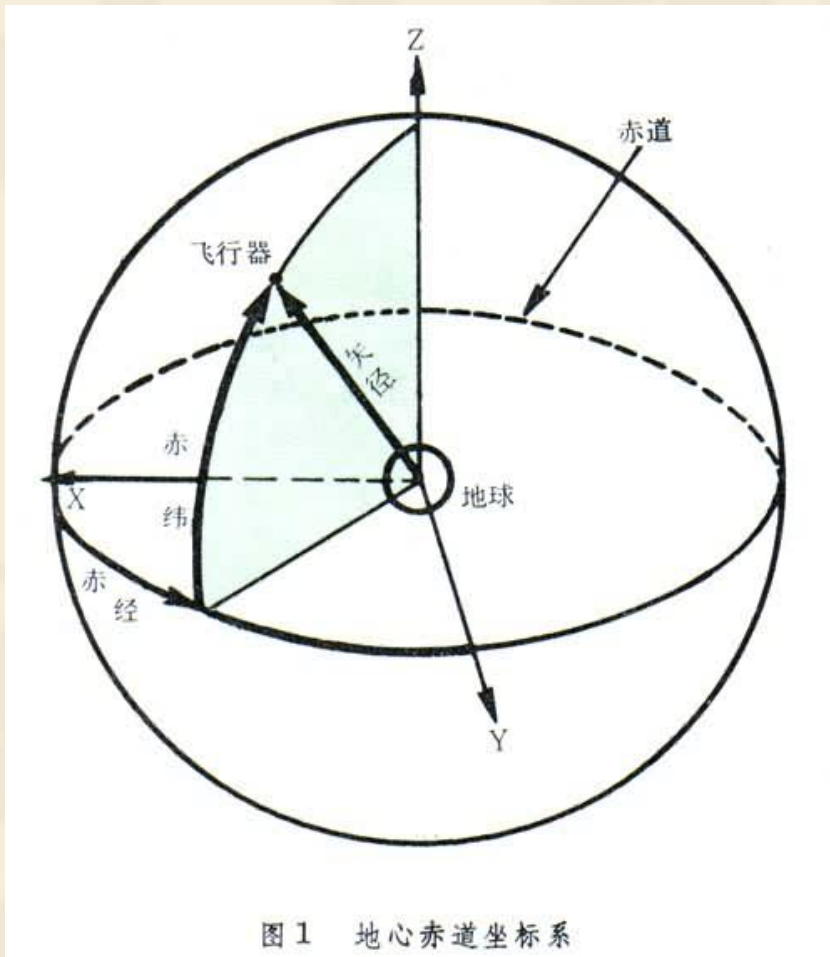


图1 地心赤道坐标系

2.1.2 天球坐标系

❖ 空间直角坐标系和球面坐标系的转化



2.1.3 岁差和章动

- ❖ 产生原因

- ❖ 实际因素：

 - 地球椭球体

 - 日月引力

 - 其他星体引力

- ❖ 后 果：

 - 春分点变化

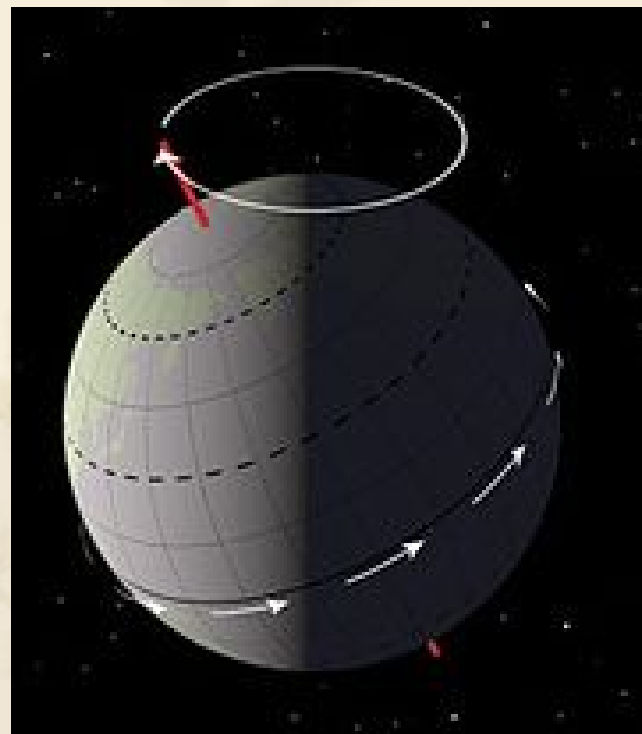
 - 理想天球坐标系不存在！

岁差的说法

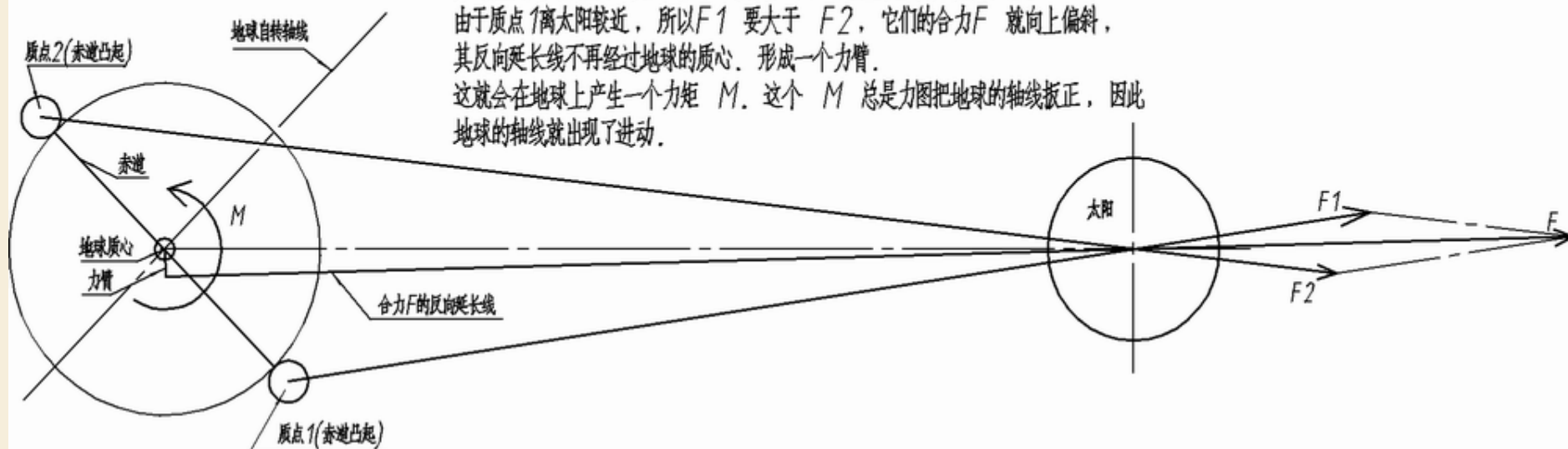
- ❖ 岁差：地球自转轴方向在绕日公转时不再保持不变
春分点沿黄道西移现象

岁差成因观点

- ❖ 日月其它天体引力学说
- ❖ 地月引力
- ❖ 地幔弦动/地球构造说

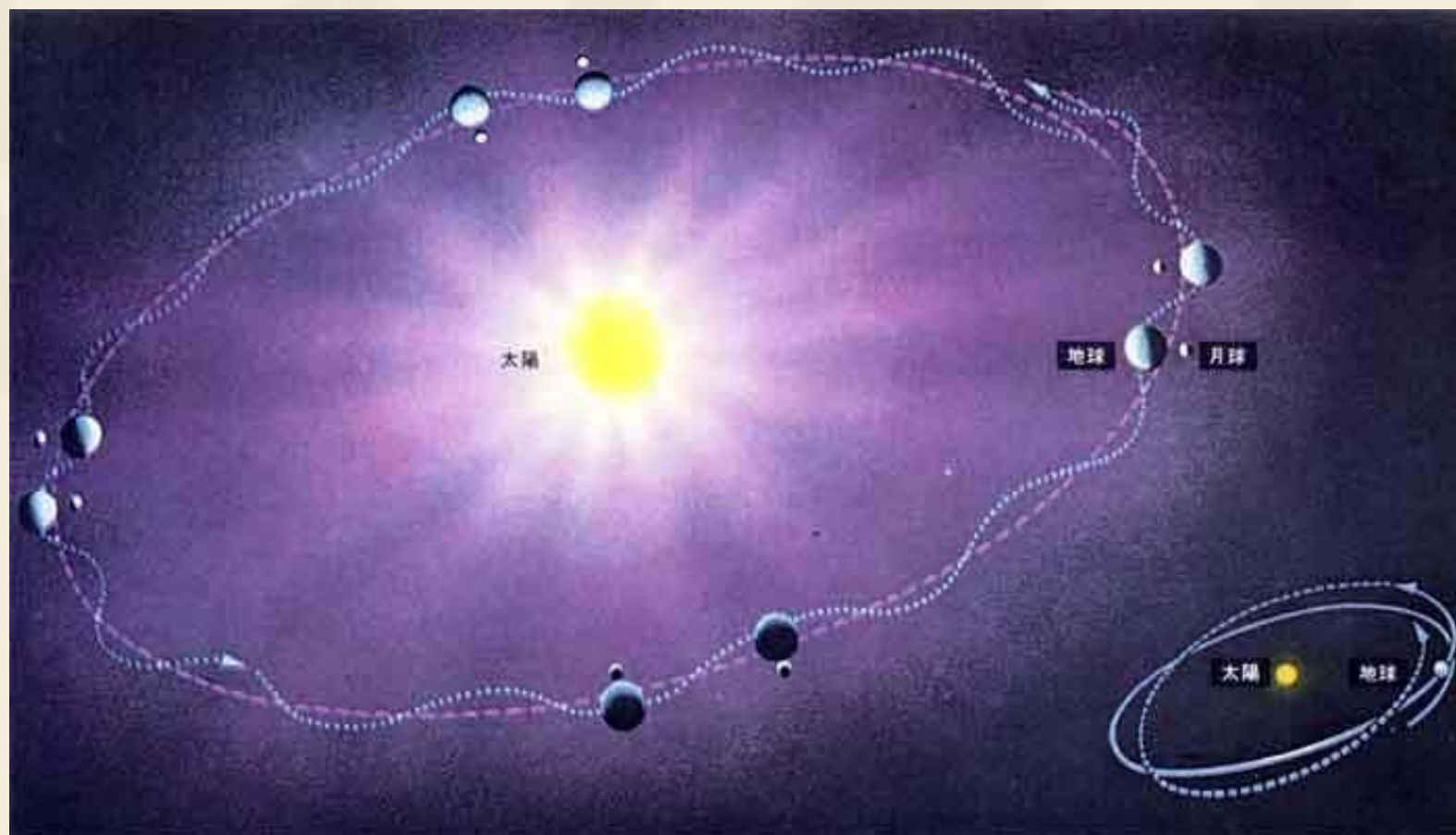


岁差的来源

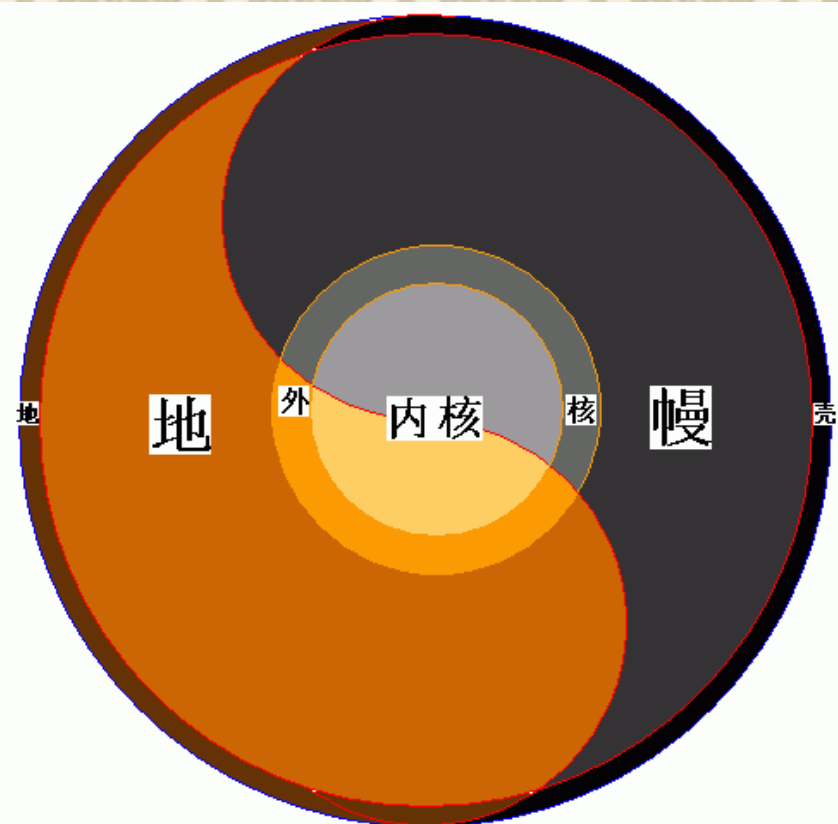
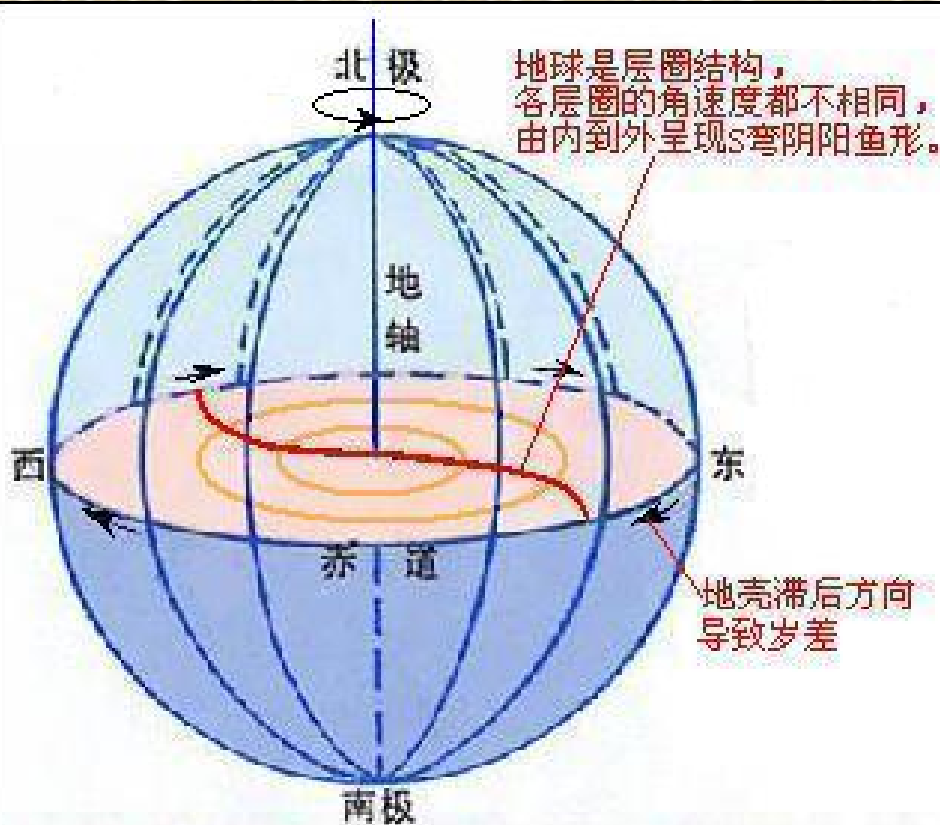


月球引力及轨道不变，忽略其它行星引

日月引力

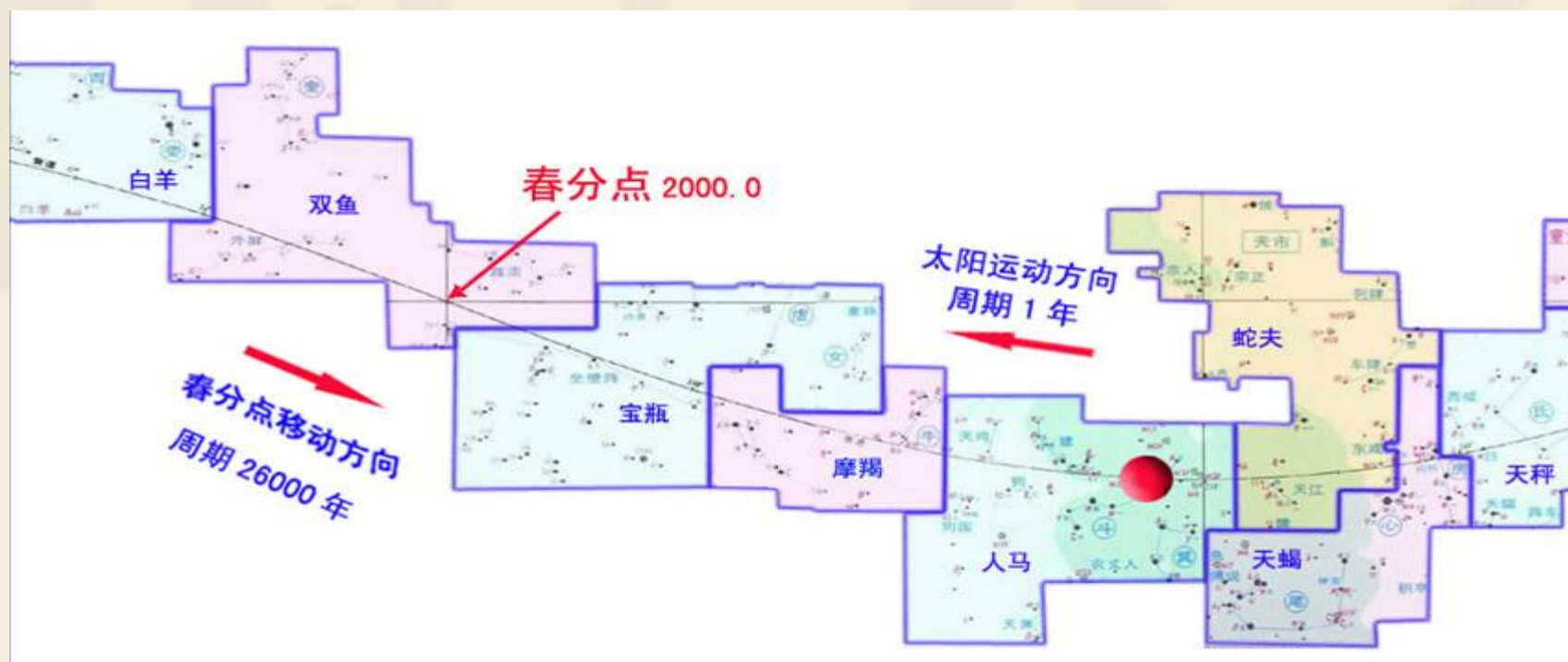


地月引力

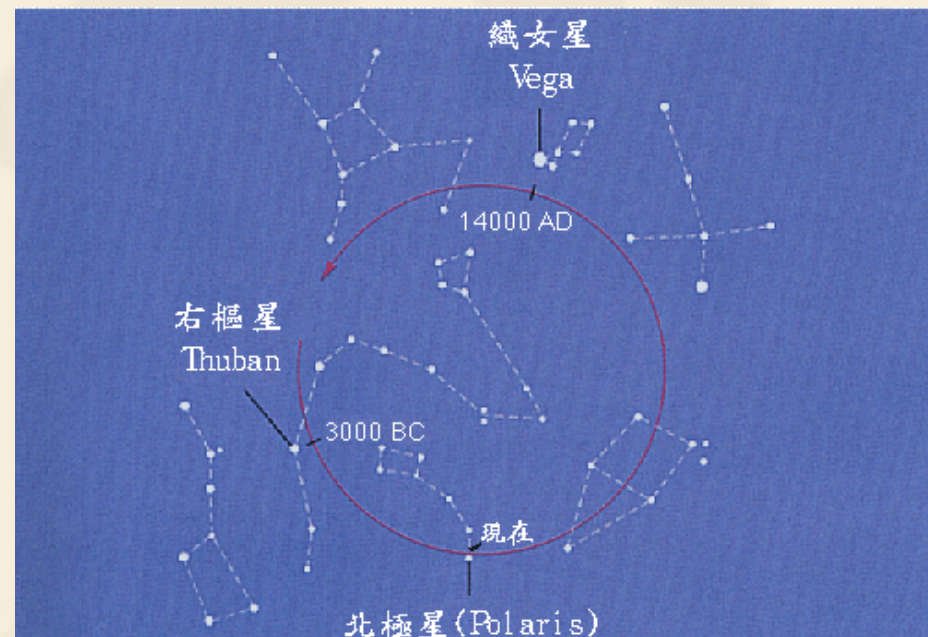
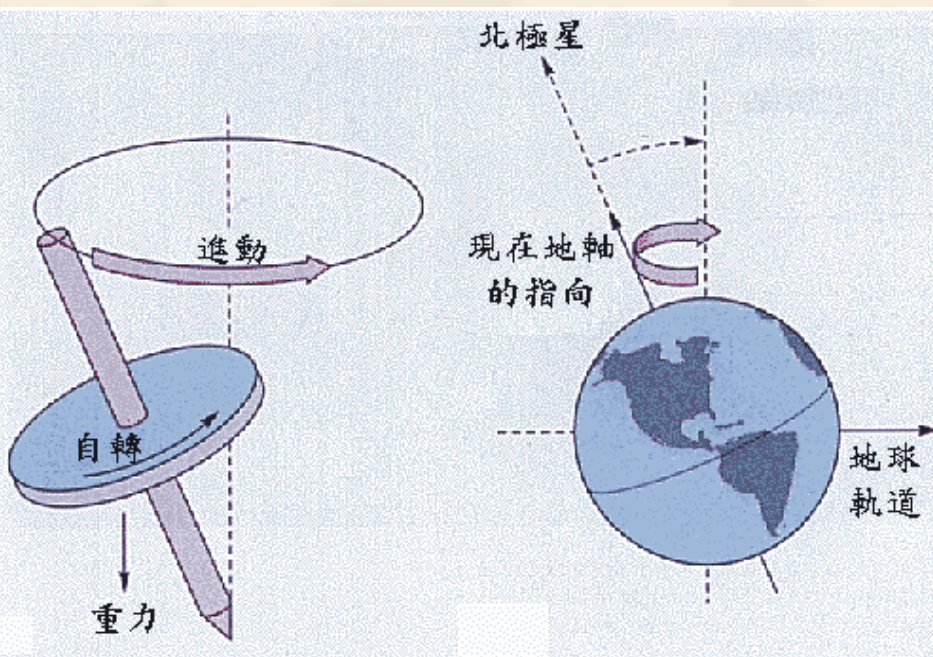


地球构造和岁差：地壳在25786年中
比地幔少转一圈，这就是岁差
地壳的自转慢于内部

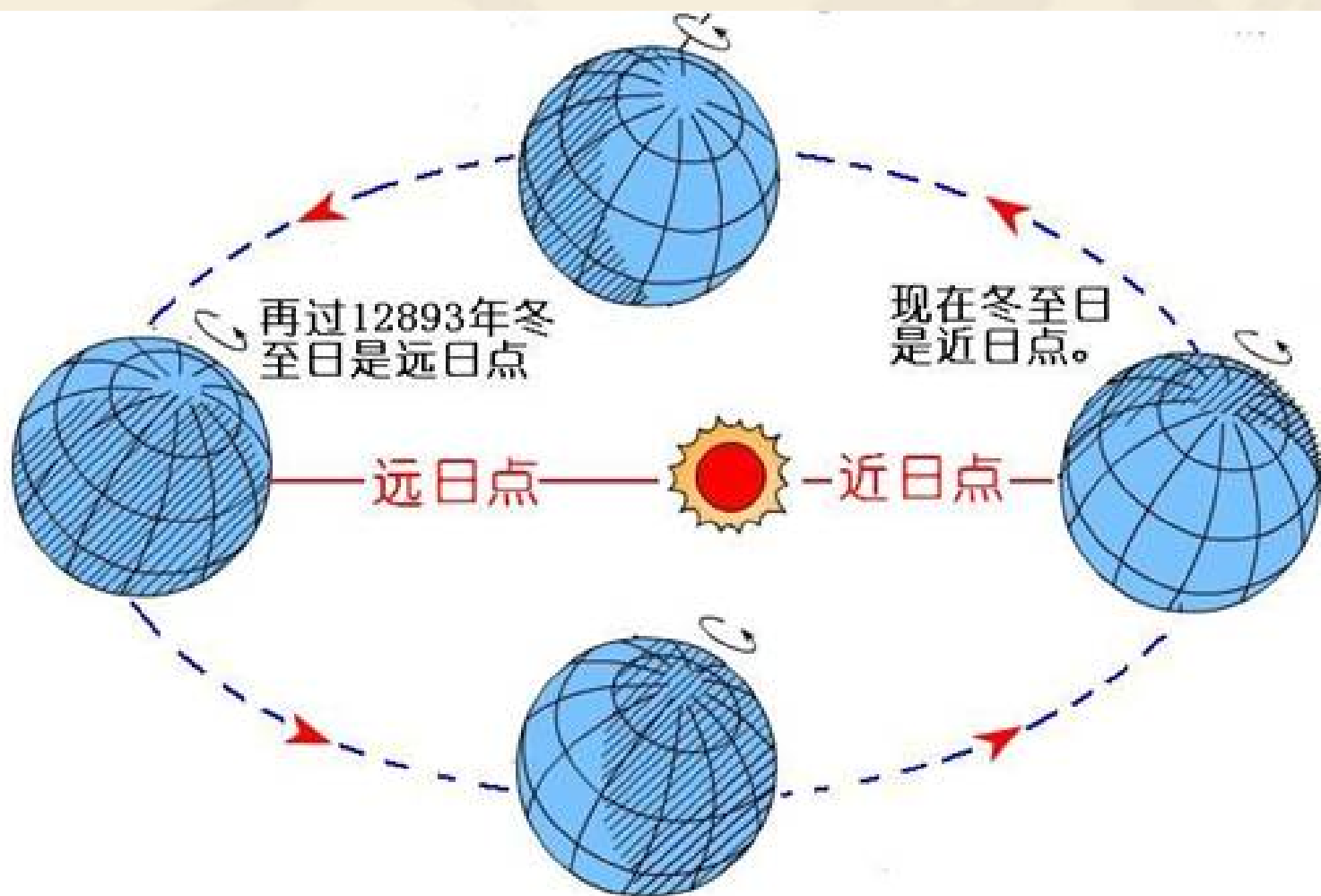
地幔弦动/地球构造说



岁差对春分点的影响



岁差对北极星的影



岁差对冬至变

2.1.3 岁差和章动

❖ 岁差：春分点沿黄道西移现象

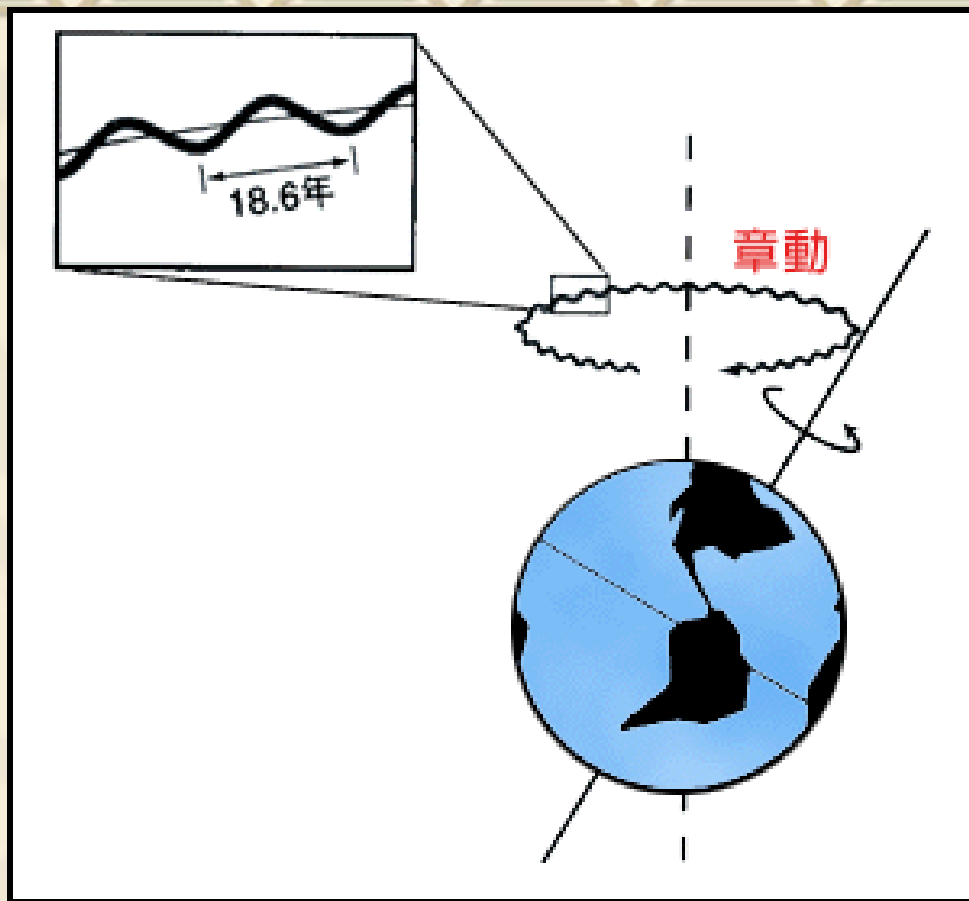
对应的北天极为瞬时平北天极（平北天极）

对应的春分点为瞬时平春分点（平春分点）

对应的天球赤道为瞬时天球平赤道

❖ 章动：瞬时北天极绕瞬时平北天极运动

月球引力及轨道变化：考虑其它行星引



岁差：平北天极绕北黄极的运动

章动：瞬时北天极绕平北天极的运动

天球北天极的实际运动=岁差+章动

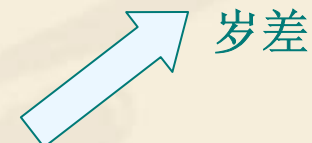
2.1.4 协议天球坐标系（协议惯性坐标系） **CIS**

- ❖ 目的：章动岁差导致瞬时天球系非惯性
建立和惯性坐标系相近的坐标系
- ❖ 定义：标准历元（某时刻）消除岁差和章动后的天球
坐标系指向
- ❖ 关键点：时间标识、空间标识
- ❖ 目前坐标系：**J2000，2000年1月15日标准历元**

2.1.4 协议天球坐标系

❖ 获取方法：坐标变换

❖ 协议天球坐标系-〉 瞬时平天球坐标系



岁差

❖ 瞬时平天球坐标系-〉 瞬时天球坐标系

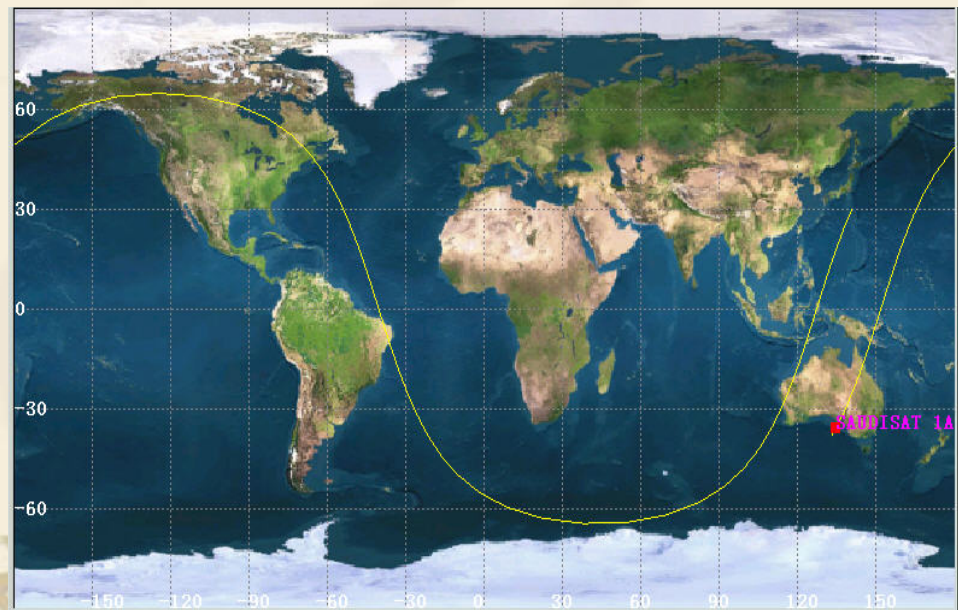


章动

2.2 地球坐标系

在地球表面或附近运动，给出相对地球的位置
(基本定位参数)

牵涉到地球坐标系



2.2.1 地球坐标系的定义

❖ 地球坐标系（**ECEF**, Earth-Centered-Earth-Fixed Frame）
随地球旋转而旋转的坐标系统。

❖ 两种表达形式：

地球固联直角坐标系

大地坐标系

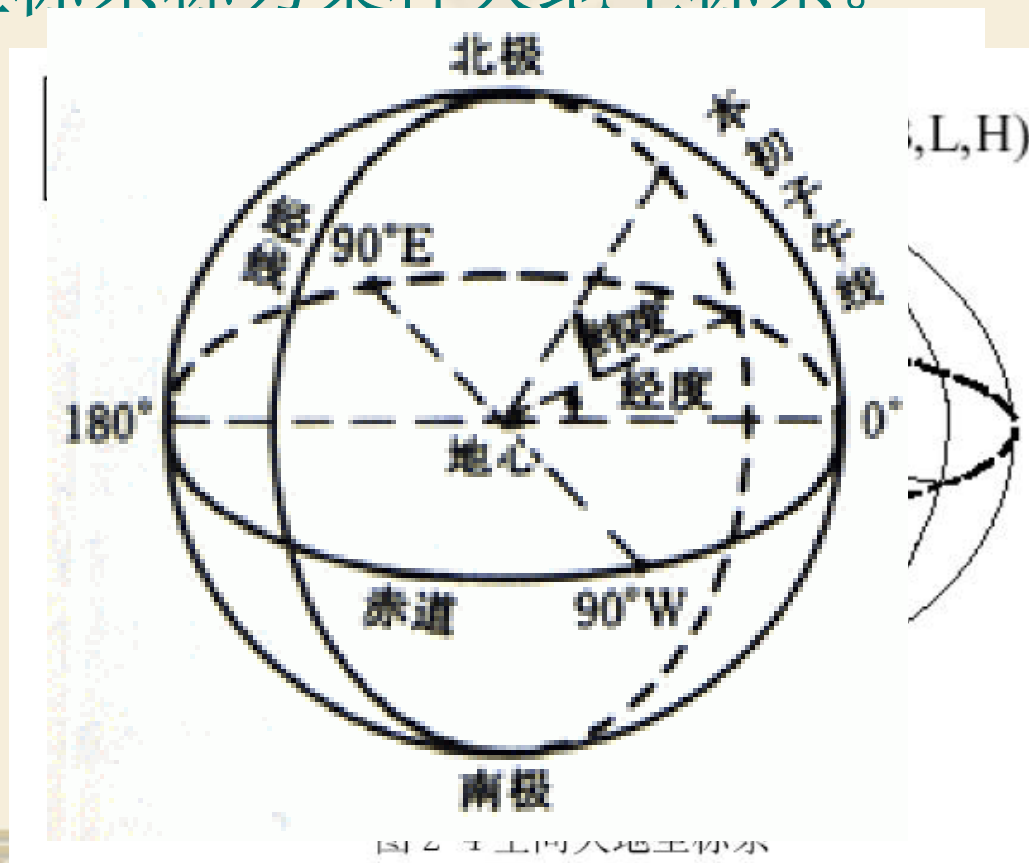
地球固连直角坐标系

- ❖ 原点：地心；
- ❖ **XOY**平面与地球赤道重合，**OX**轴穿过格林威治子午线和赤道的交点
- ❖ **OZ**轴与地球极轴重合，指向地球北极

大地坐标系

通常将所选用的参考椭球以及相对地球有某种确定位置的空间直角坐标系称为某种大地坐标系。

- ❖ 原点：椭球中心/地心
- ❖ 椭球短轴=地球自转轴
- ❖ 经度、纬度和高度
- ❖ 依托椭球模型确定



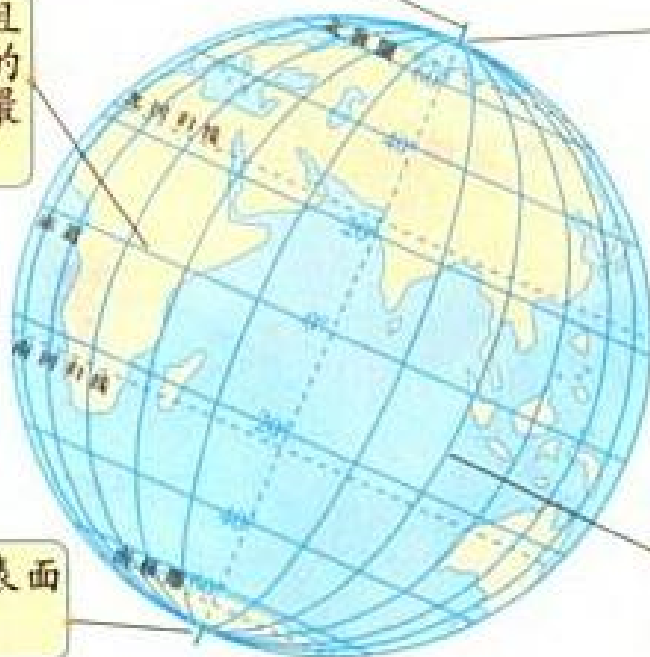
地轴 地球自转轴。

纬线 与地轴垂直并且环绕地球一周的圆圈。赤道是最大的纬线圈。

北极 地轴北段与地球表面的交点。

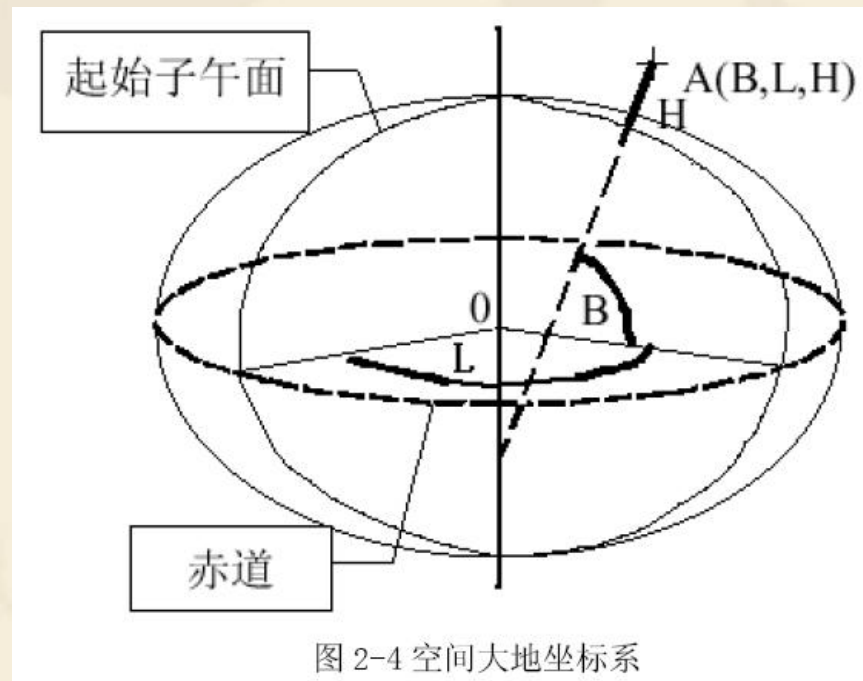
南极 地轴南段与地球表面的交点。

经线 连接南北两极并且与纬线垂直相交的半圆。



2.2.2 空间直角坐标与地理坐标间的关系

$$\left. \begin{aligned} X &= (R_N + H) \cos B \cos L \\ Y &= (R_N + H) \cos B \sin L \\ Z &= [R_N(1 - e^2) + H] \sin B \end{aligned} \right\}$$



式中： R_N ----参考椭球的卯酉圈曲率半径；
 e ----参考椭球的偏心率；
 H ----地理高度。

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

2.2.3 常用参考椭球参数

名称	长半轴a (m)	1/f	使用地区
克拉克 (1866)	6378206	294.98	北美地区
克拉索夫斯基 (1940)	6378245	298.3	前苏联、 中国
国际椭球 (1975)	6378140	298.257	中国 (1980 年采用)
WGS-84	6378137	298.257223 563	全球

2.2.4 协议地球坐标系和极移

❖ 极移：地球自转轴相对地球移动
地极点在地球表面上运动

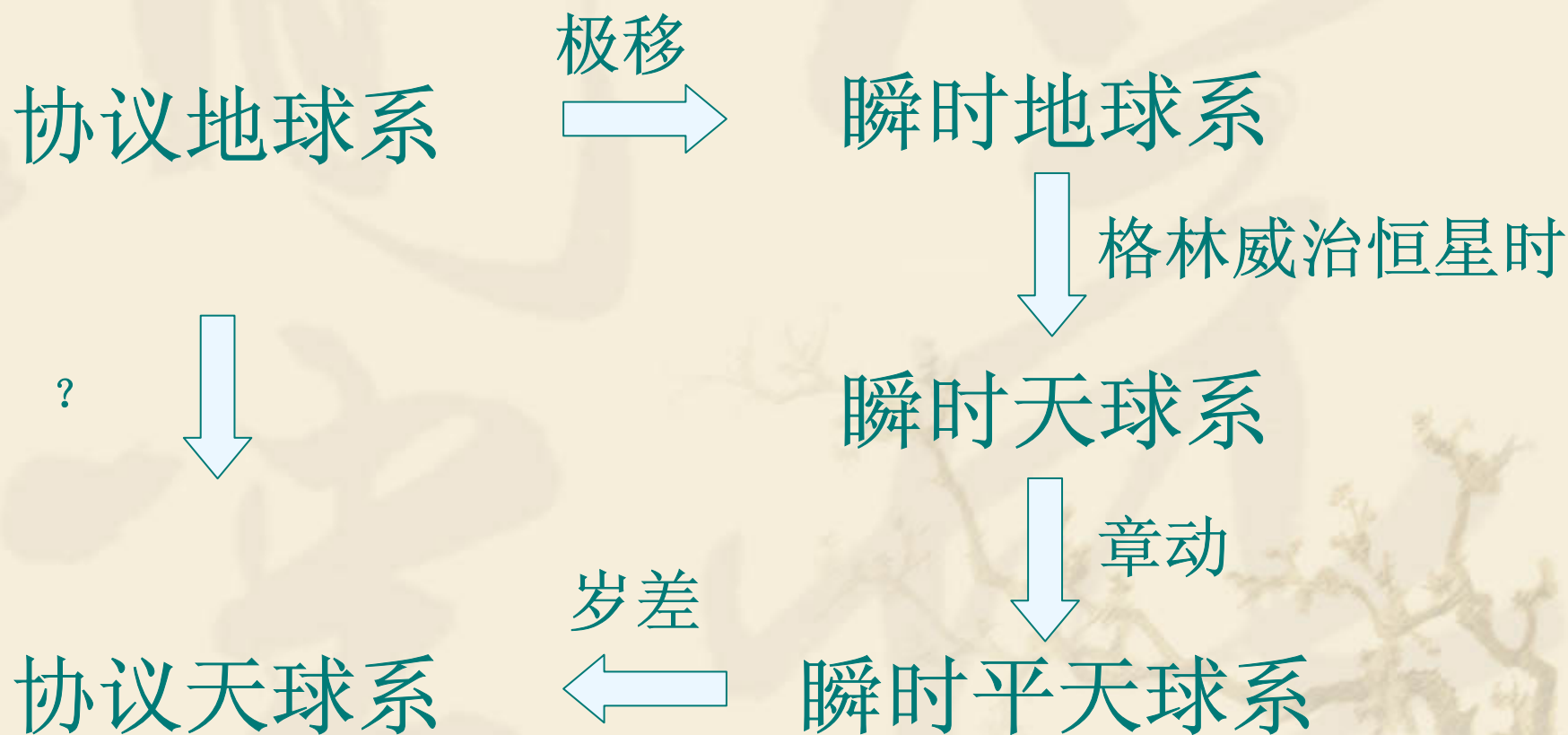
❖ 瞬时轴、瞬时极

❖ 平极：平均地极位置

❖ **CIO**：国际协议原点

瞬时地球系 $\xrightarrow{\text{极移}}$ 协议地球系

2.2.5 协议地球坐标系、协议天球系



2.3 全球大地系统

- ❖ **GPS**定位是建立在“全球大地系统”(WGS-World Geodetic system)的基础上,它是一种以地球质心为原点与地球固连的(地心地固**ECEF**)坐标系,协议地球坐标系
- ❖ 精度受技术水平的限制,也由相应的任务精度要求而定
地球引力模型(**EGM**)和水准面

WGS60->WGS66->WGS72->WGS84

WGS72 为子午仪系统导航而设

1984年推出**WGS84**, 被**GPS**采用定位测量基础

❖ 2.3.1 WGS84参考椭球

$$a = 6378137 \text{ m}$$

$$f = \frac{a-b}{a} = \frac{1}{298.257223563}$$

$$\omega = 7292115.1467 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

$$GM = 3986005 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{s}^2$$

2.3.2 局部大地系统

- ❖ 根据本地区地表情况按椭球面与本地区大地水准面最吻合的原则建立的大地系统，供本国或本地区使用
- ❖ 椭球参数不同，局部大地系统系统不同
- ❖ 我国目前使用的大地坐标系统主要是
1954年北京坐标系(简称BJ-54系)
1980年国家大地坐标系。

1、BJ-54坐标系

采用前苏联克拉索夫斯基椭球，通过与前苏联1942年坐标系联测建立，是该坐标系延伸，大地原点为普尔科沃天文台圆柱大厅中心。

- ❖ BJ-54系存在的主要问题是：
- ❖ (1) 椭球参数只有两个几何参数，且长半轴与现代参数相比误差较大
- ❖ (2) 坐标轴指向与当前国际、国内采用方向不一致

2、1980年国家大地坐标系

大地原点设在陕西泾阳县永乐镇

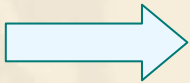
椭球参数选用**IUGG—75**参考椭球参数

$$f = \frac{1}{298.257}$$

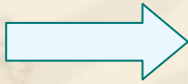
$$\omega = 7292155 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

$$GM = 3986005 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$$

2.3.3 地理坐标系

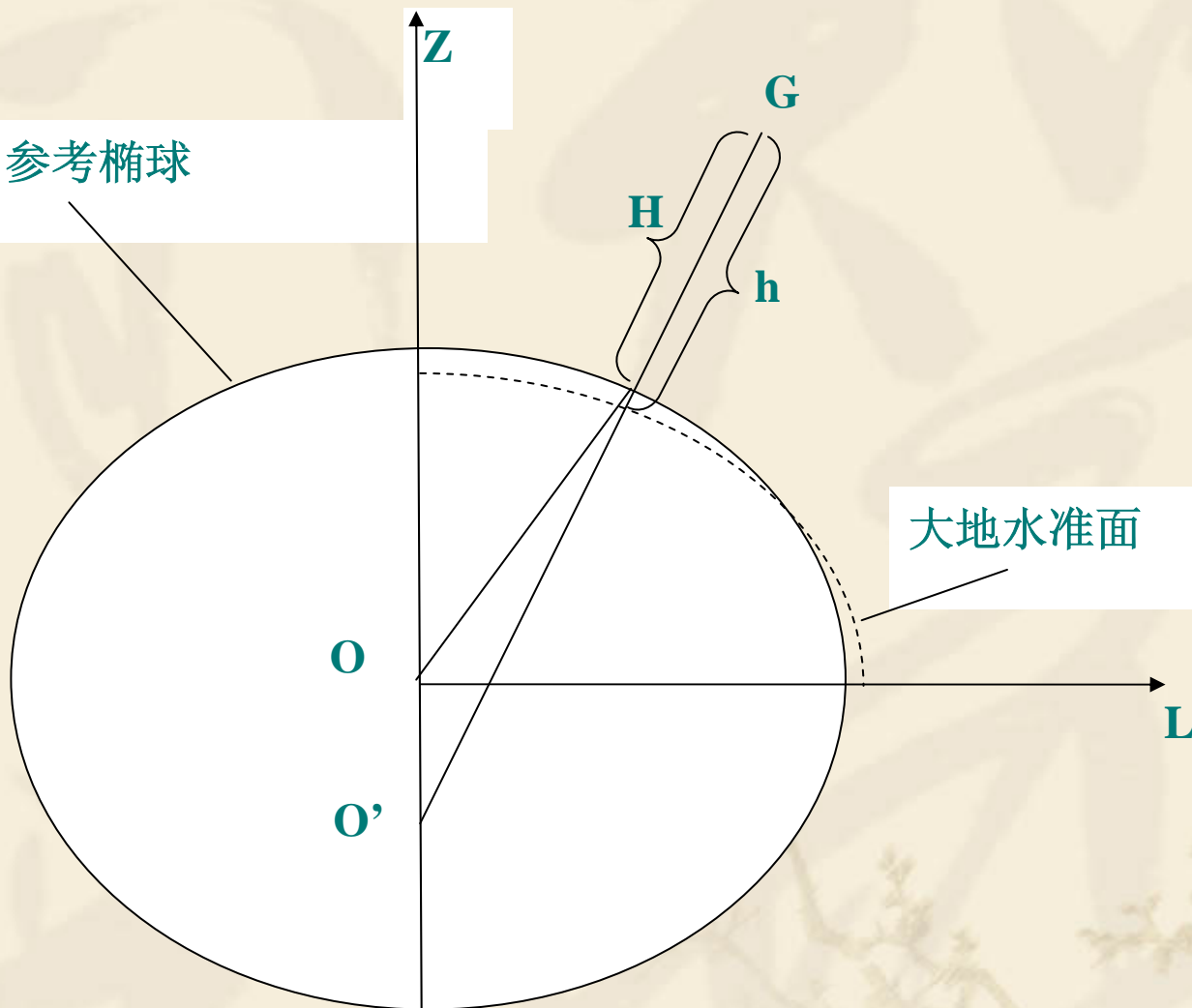
真实地球  大地水准球体



参考椭球体  地理坐标

星下点轨迹

参考椭球



大地水准面

地球上空一点 G 的高度

2.4 时间体系

❖ GPS:

以测定无线电信号传播延迟为基础
对时间精度要求高

❖ 时间精度重要性

❖ 时间尺度

2.4.1 世界时(UT-Universal Time)

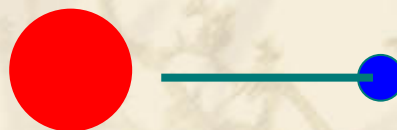
- ❖ 尺度：地球自转周期为基准,1960年以前作为时间测量基准
利用地球自转,太阳周期性地经过某地点上空的现象

平太阳日：太阳连续两次经过某条子午线的平均时间间隔

平太阳时：以平太阳日为基准的时间

世界时：英国格林威治从午夜起算的平太阳时

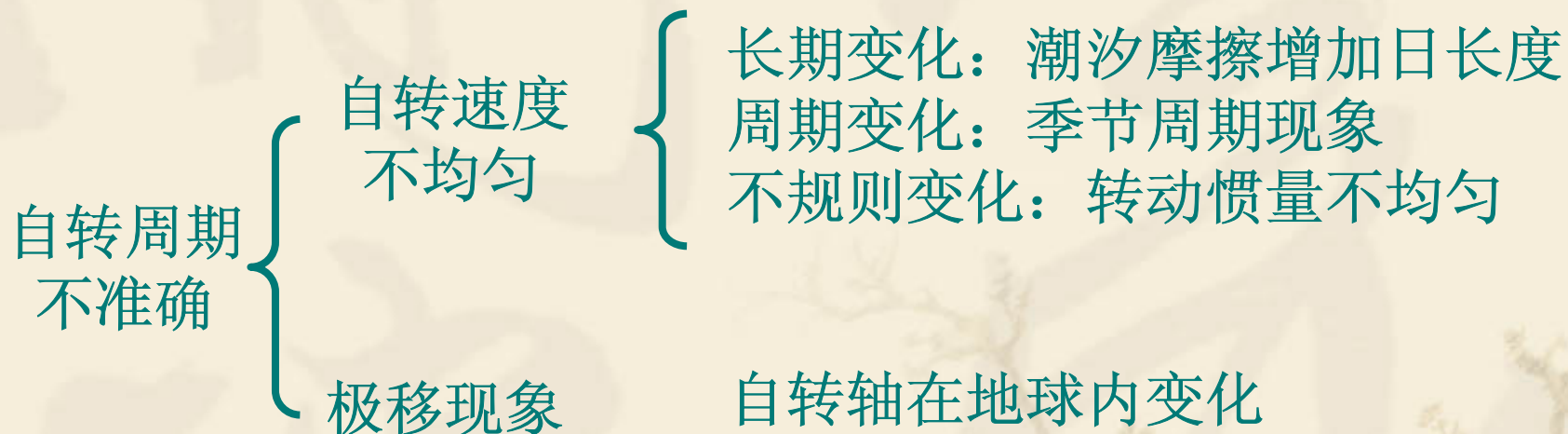
世界时秒：一个平太阳日的 **$1/86400$**



2.4.1 世界时(UT-Universal Time)

❖ 影响因素:

自转周期为基准，周期不准确导致其存在误差



❖ 修正模型:

$$UT = UT_0 + \Delta\lambda + \Delta Ts$$

平均平太阳时

极移修正

自转
季节性变化
修正

2.4.2 历书时(ET -Ephemeris Time)

- ❖ 尺度：以地球绕太阳公转周期为基准
- ❖ 优点：理论上是运动均匀
不受地球极移和转速变化影响
比世界时更精确。

历书时秒=回归年/31556925.9747

历书时日= 86400历书时秒

=回归年/365.24219878125

- ❖ 不足：观测太阳比较困难,只能通过观测月亮和恒星换算,其实际精度比理论分析的低得多,历书时只正式使用了7年。

2.4.3 原子时(AT-Atomic Time)

❖ 尺度：海平面铯原子**133**原子基态两个超精细结构能级跃迁辐射的电磁波振荡周期

一原子时秒=**9192631770**个铯束频标周期

一原子时日=**86400**个原子时秒

❖ 启用：**1958年1月1日**世界时零时启用。

2.4.3 原子时(AT-Atomic Time)

- ❖ 优点：原子内部能级跃迁发射或吸收的电磁波频率极为稳定
比以地球转动为基础的计时系统更为均匀
- ❖ 不足：原子时比以往任何一种时间尺度都精确
仍含有一些不稳定因素,需要修正
- ❖ 特点：以多个原子钟的读数为基础的平均时间尺度
目前约**100**台原子钟以不同权值参加国际原子时计算
分布在欧洲、澳大利亚、美洲和日本等地
每天通过罗兰-C和电视脉冲信号相互对比
不定期地用搬运钟进行对比

2.4.4 协调时(UTC-Universal Time Coordinated)

❖ 尺度：原子时秒

原子时秒长+世界时时刻。

❖ 优点：时间间隔均匀

← 相对

满足以地球自转为基础的准确世界时时刻要求

← 绝对

整数调秒：使协调时与世界时之差保持在**0.9s**之内。

协调时= 秒表+ 无秒时钟

2.4.5 GPS时(GPST-GPS Time)

❖ 尺度:

GPS星载原子钟+地面监控站原子钟
与国际原子时保持有**19s**的常数差

❖ 启用: **1980年1月6日零时**与**UTC**保持一致。

❖ 表现形式:

周+秒

周: 当前时间距**1980年1月6日零时**的整周数

秒: 当前时间距本周日子时的秒数, **0~604800s**

2.5 卫星轨道描述

❖ 为什么计算卫星轨道？

$$\tilde{\rho}_i = \left[(x_{si} - X)^2 + (y_{si} - Y)^2 + (z_{si} - Z)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - cV_{T_b}$$

❖ 何处获得卫星位置信息？

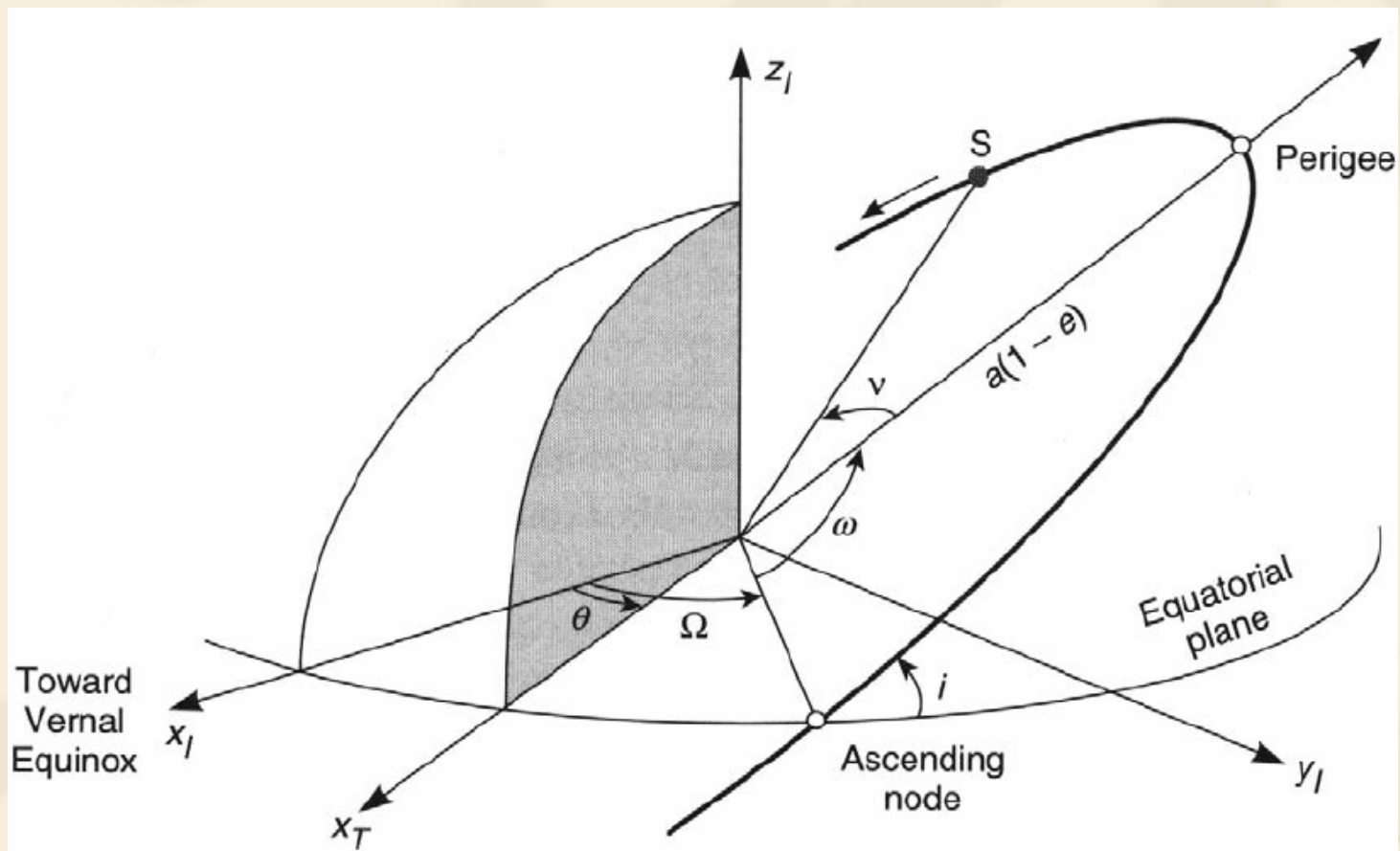
2.5 卫星轨道描述

❖ 何处获得卫星位置信息？

位置信息根据轨道信息计算，接收机完成

轨道信息来自星历，卫星播发

星历文件来自地面，地面测控站上传



卫星轨道的描述

2.6 卫星位置和速度的计算

- ❖ 利用**GPS**进行导航和定位的基本导航方程是

$$\sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} + cT = R_i$$

- ❖ 式中**X,Y,Z**—在地球坐标系中待求的用户位置坐标;
- ❖ **X_i,Y_i,Z_i**—在地球坐标系中的卫星位置坐标;
- ❖ **c**—光速;
- ❖ **T**—接收机误差;
- ❖ **R_i**—用户到卫星*i*的伪距。
- ❖ 因此，首先要知道卫星的位置，才能求解上面的方程。从导航电文所提供的参数，就可计算卫星在**WGS84**坐标系中的位置。

卫星位置的计算

- ❖ 首先按卫星质点在地球质心引力作用下的运动方程（亦称二体问题的运动方程）计算轨道参数；
- ❖ 然后，根据导航电文给出的轨道摄动参数，进行摄动修正，计算修正后的轨道参数；
- ❖ 继而计算卫星在轨道坐标系的坐标；
- ❖ 最后，仅考虑地球自转的影响，将轨道坐标系转换为**WGS84**坐标系。

2.6.2 轨道摄动

