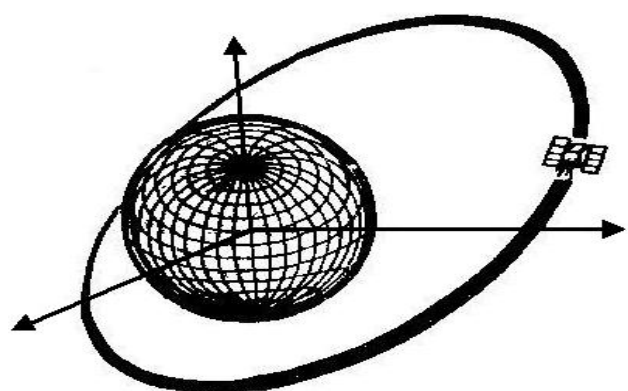




# GPS定位原理与应用

## 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



卫星绕地球运动的轨迹

主讲：余学祥

[xxyu9166@yahoo.com.cn](mailto:xxyu9166@yahoo.com.cn)



## 主要内容

3.1 概述

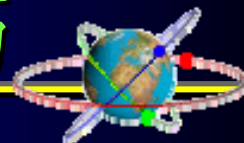
3.2 卫星的无摄运动

3.3 卫星的受摄运动

3.4 卫星的星历

3.5 卫星坐标的计算

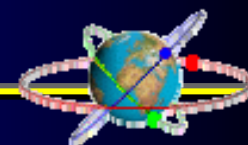
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 思考题

- 1、何为卫星的轨道参数？
- 2、作用在卫星轨道上的力分为哪两类，相应的卫星运动轨道为何？
- 3、研究卫星运行轨道的基本方法分为哪两个步骤？
- 4、何为开普勒三定律？其意义是什么？
- 5、试绘图描述无摄卫星轨道，并阐明各参数的含义。
- 6、写出开普勒方程，并说明其意义。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



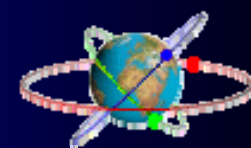
#### 思考题

- 7、卫星运动的摄动力有哪些？主要的摄动力是哪几项？
- 8、卫星星历分为哪两种？广播星历中主要包括哪些参数？
- 9、说明GPS卫星坐标计算的基本过程，并给出计算公式？
- 10、在广播星历中， $t_{0e}$ 与 $t_{0c}$ 有何区别？

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

GPS卫星在空间的已知瞬时位置，是确定用户接收机位置(或观测站坐标)和制订观测计划的依据。本章将在介绍卫星无摄运动和受摄运动等基础知识的基础上，进一步阐述GPS卫星的星历及卫星坐标的计算。

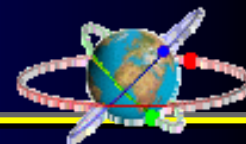
## 3.1 概述



### 一、卫星轨道在GPS定位中的意义

卫星在空间运行的轨迹称为轨道，而描述卫星轨道位置和状态的参数，称为轨道参数。由于在利用GPS进行导航和定位时，GPS卫星是作为位置已知的高空观测目标，所以在进行绝对定位时，卫星轨道的任何误差，都会直接影响所求用户接收机位置的精度，而在相对定位时，尽管卫星轨道误差的影响将会减弱，但当基线较长且精度要求较高时，这种影响也不可忽视。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



卫星轨道误差对所测基线精度的影响可按式估算：

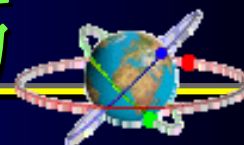
$$\frac{db}{b} = \frac{ds}{\rho}$$

卫星轨道误差对所测基线的影响

相对精度 (ppm)	卫星轨道误差 $ds$ (m)	基线长度 (km)	基线误差 $db$ (cm)
1	20	10	1
		100	10
		1000	100
0.1	2	10	0.1
		100	1
		1000	10

为了制订GPS测量的观测计划和便于捕获卫星发射的信号，需要知道卫星的轨道参数。只是其要求的精度较低，对用户来说，为了理解和运用GPS卫星的轨道信息，就需要了解一下有关卫星的运动规律、轨道的描述和卫星位置的计算等基础知识。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

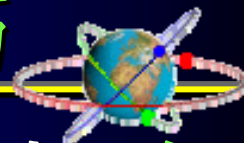


#### 二、影响卫星轨道的因素及其研究方法

人造地球卫星在空中绕地球运行，除了受地球重力场的引力作用外，还将受到太阳、月亮和其它天体引力的影响，以及太阳光压、大气阻力和地球潮汐等因素的影响。卫星实际运行的轨道极其复杂。

在各种作用力对卫星运行轨道的影响中，以地球引力场的影响最为主要，其它作用力的影响要小得多。若假设地球引力场的影响为1，则其它作用力的影响比之均小于 $10^{-5}$ 。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

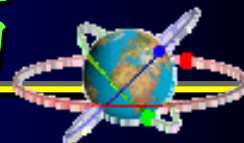


就地球引力场的影响来说，可以首先把地球视为一**匀质球体**，并在相应的理想引力场中，来研究卫星运动的轨道，然后再考虑**引力场异常**的影响。

虽然实际上地球的质量分布并不均匀，其形体也不是对称的球体，这些都将对卫星的运动产生影响，但是这种影响，比之上述理想的匀质球体的影响要小得多。

根据分析，实际地球引力场与上述匀质球体引力场对卫星的影响，相差仅约为 $10^{-8}$ 级。所以，为了研究工作和实际应用的方便，通常均把作用于卫星上的各种力，按其影响的大小分为两类。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

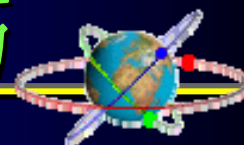


◆一类是假设地球为匀质球体的引力(质量集中于球体的中心), 称为**中心力**。它决定着卫星运动的基本规律和特征, 此时卫星的运动称为**无摄运动**, 由此所决定的卫星轨道可视为理想的轨道, 又称卫星的**无摄运动轨道**。这是我们分析卫星实际轨道的基础。

◆一类是**摄动力**, 也称为**非中心力**, 它包括地球非球形对称的作用力、日月引力、大气阻力、光辐射压力以及地球潮汐力等。摄动力的作用, 是使卫星的运动产生一些小的附加变化而偏离上述的理想轨道, 同时, 这种偏离量的大小也随时间而改变。

在摄动力作用下的卫星的运动称为**受摄运动**, 由此所决定的卫星轨道称为卫星的**受摄运动轨道**。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

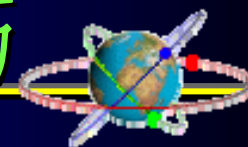


◆研究卫星运行的基本方法：考虑到摄动力的影响相对较小，因此对于卫星运行轨道的分析一般分为两步。

首先，在上述理想的地球引力场中，只考虑地球质心引力的作用，来研究卫星的无摄运动规律，并描述卫星轨道的基本特征；

其次，研究各种摄动力对卫星运动的影响，并对卫星的无摄轨道加以修正，从而确定卫星受摄运动轨道的瞬时特征。

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 3.2 卫星的无摄运动

卫星被发射并升至预定的高度后，便开始围绕地球运行。假设地球为均质球体，在忽略摄动力影响的理想情况下，根据牛顿万有引力定律，其间的引力加速度  $\ddot{\mathbf{r}}$  可表示为

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{G (M + m_s)}{r^3} \mathbf{r} \quad (3-1)$$

式中， $G$ 为引力常数， $M$ 为地球质量， $m_s$ 为卫星质量， $r$ 为卫星的地心向径。

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 3.2 卫星的无摄运动

卫星的质量 $m_s$ 相对地球的质量 $M$ 可以忽略，  
于是有

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^3} \mathbf{r} \quad (3-2)$$

根据上式来研究地球和卫星之间的相对运动问题，在天体力学中称为**两体问题**。引力加速度决定着卫星绕地球运动的基本规律。卫星在上述地球引力场中的无摄运动也称为开普勒运动，其规律可通过开普勒定律来表达。

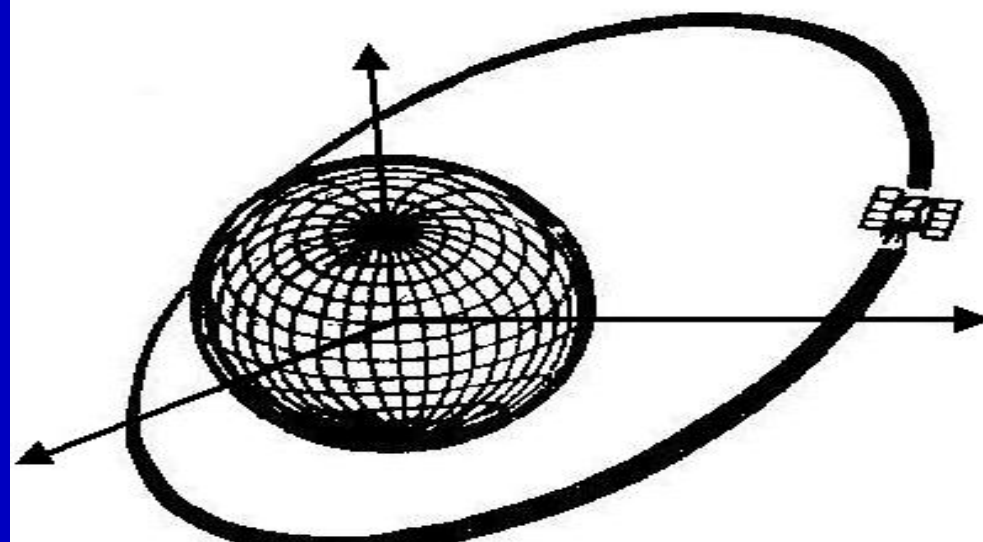
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



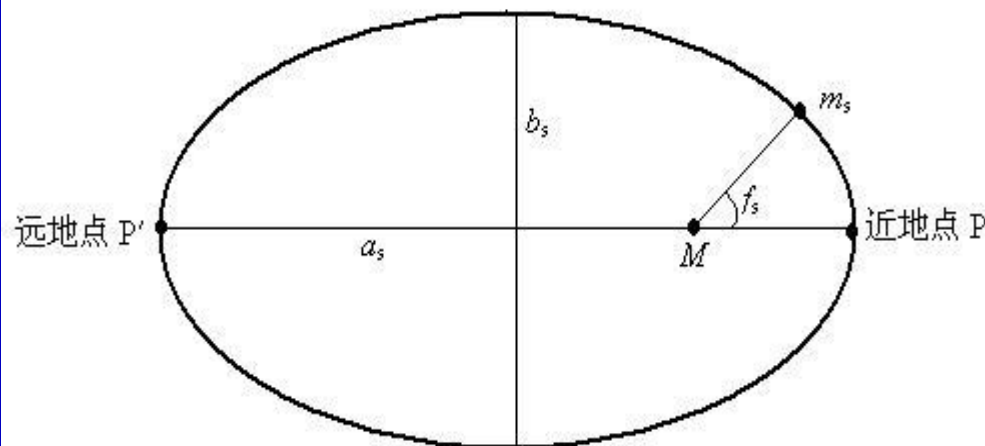
## 一、卫星运动的开普勒定律

### 1、开普勒第一定律

卫星运行的轨道是一个椭圆，而该椭圆的一个焦点与地球的质心相重合。这一定律表明，在中心引力场中，卫星绕地球运行的轨道面，是一个通过地球质心的静止平面。轨道椭圆一般称开普勒椭圆，其形状和大小不变。在椭圆轨道上，卫星离地球质心（简称地心）最远的一点称远地点，而离地心最近的一点称近地点，它们在惯性空间的位置也是固定不变的。



卫星绕地球运动的轨迹



开普勒椭圆

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



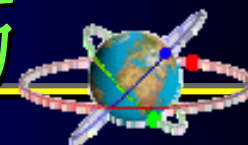
解式（3-2），得卫星绕地球质心运动的轨道方程：

$$r = -\frac{a_s(1-e_s^2)}{1+e_s \cos f_s} r \quad (3-3)$$

式中， $r$ 为卫星的地心距离； $a_s$ 为开普勒椭圆的长半径， $e_s$ 为开普勒椭圆的偏心率； $f_s$ 为真近点角，它描述了任意时刻，卫星在轨道上，相对近地点的位置，是时间的函数，其定义如上图所示。

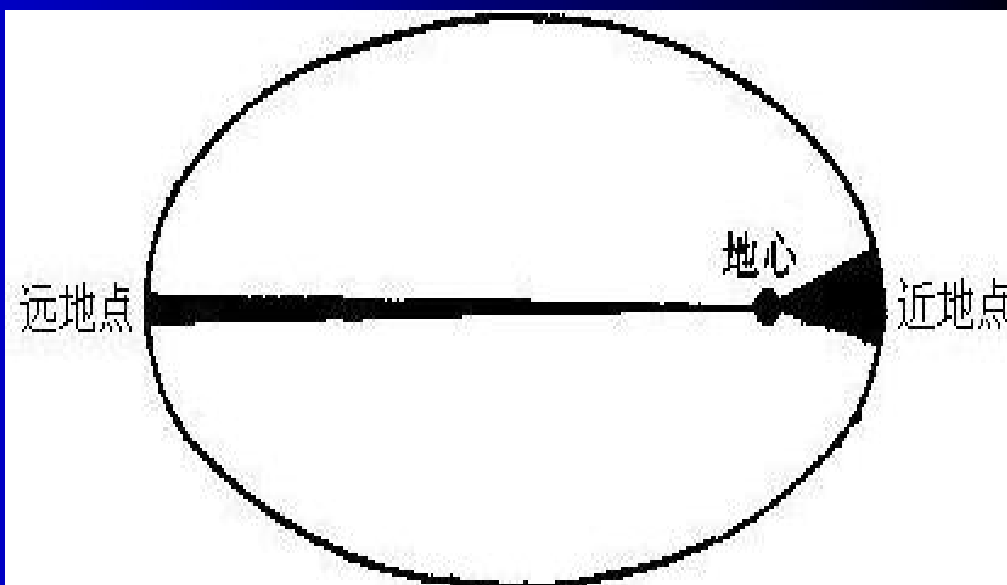
这一定律阐明了卫星运行轨道的基本形态及其与地心的关系。

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 2、开普勒第二定律

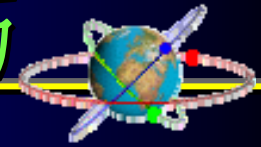
卫星的地心向径，即地球质心与卫星质心间的距离向量，在相同的时间内所扫过的面积相等。



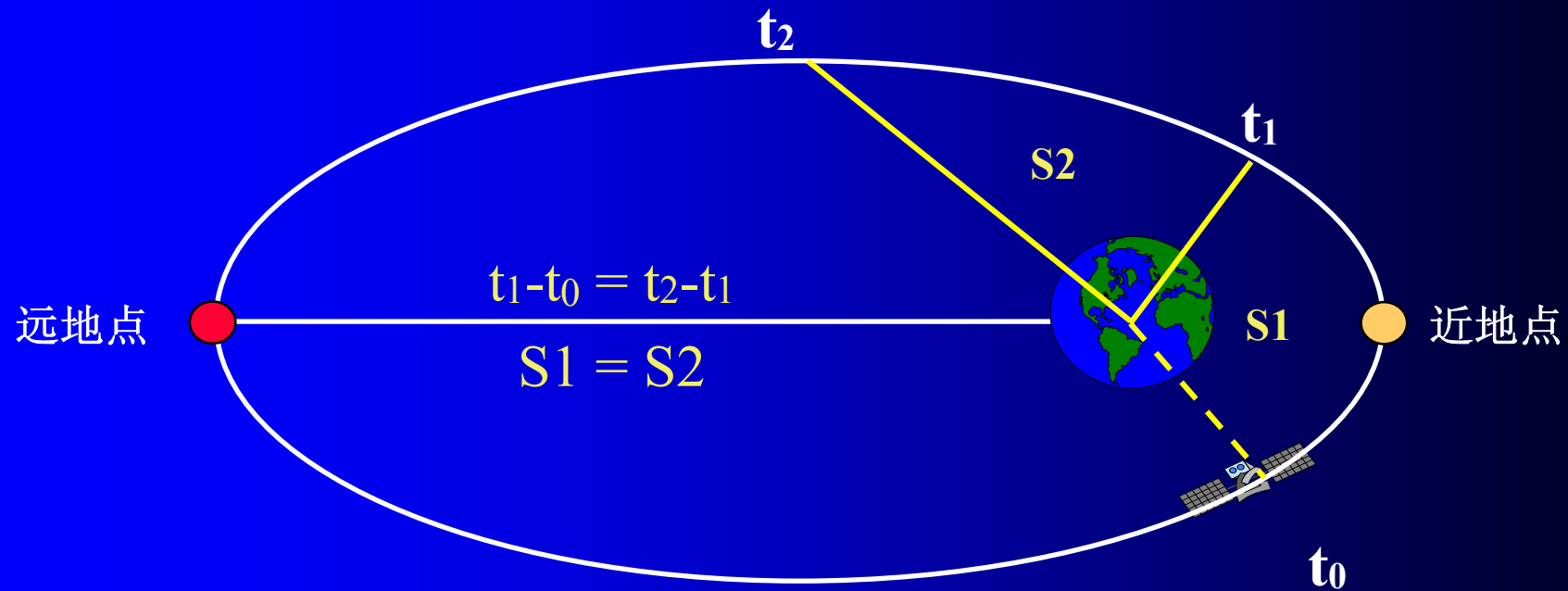
卫星地心向径在相同时间扫过的面积示意图

这一定律可根据(3-1)式的能量积分而导出。与任何其它的运动物体一样，在轨道上运行的卫星也具有两种能量，即位能(或势能)和动能。

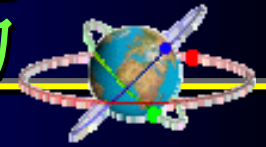
### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



开普勒第二定律所包含的内容是：卫星在椭圆轨道上的运行速度是不断变化的，在近地点处速度为最大，而在远地点时速度为最小。



# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 3、开普勒第三定律

卫星运动周期的平方与轨道椭圆长半径的立方之比为  
一常量，而该常量等于地球引力常数 $GM$ 的倒数。开普勒第  
三定律的数学形式为

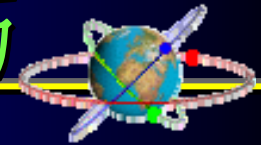
$$\frac{T_s^2}{a_s^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \quad (3-4)$$

其中， $T_s$ —卫星运行周期； $GM = (3986005 \pm 0.6) \times 10^8 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$

若假设卫星运动的平均角速度为 $n$ ，则有

$$n = \frac{2\pi}{T_s} \quad (\text{rad/s}) \quad (3-5)$$

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 3、开普勒第三定律

则开普勒第三定律可写为

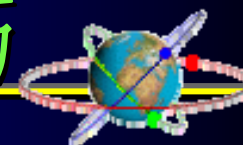
$$n^2 a_s^3 = GM \quad (3-6)$$

表示为常用形式

$$n = \sqrt{\frac{GM}{a_s^3}} \quad (3-7)$$

很明显，当开普勒椭圆的长半径确定后，卫星运行的平均角速度便随之确定，且保持不变。(3-7)式在卫星位置的计算中具有重要意义。

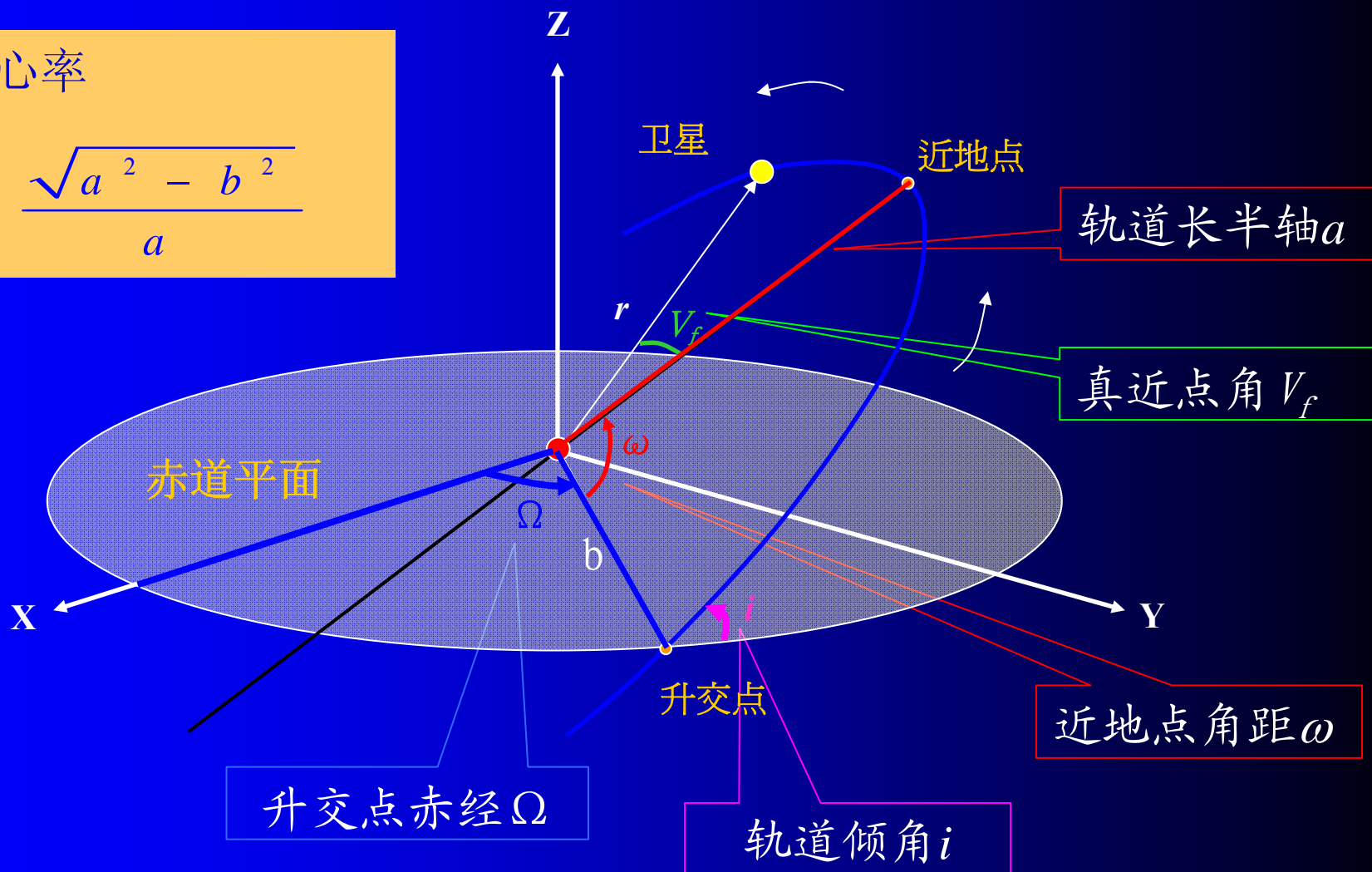
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



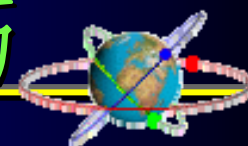
## 二、无摄卫星轨道的描述

轨道偏心率

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

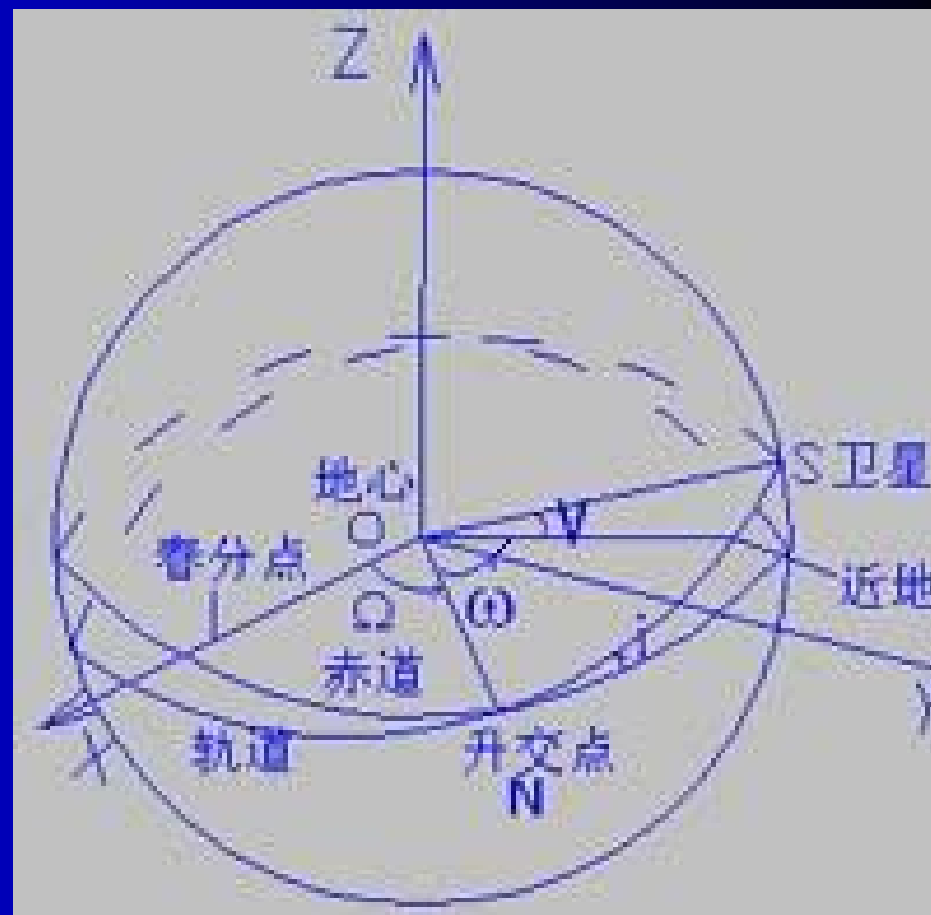


# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 二、无摄卫星轨道的描述

由开普勒定律可知，卫星运动的轨道，是通过地心平面上的椭圆，且椭圆的一个焦点与地心相重合。而确定椭圆的形状和大小至少需要两个参数，即椭圆的长半径 $a_s$ 及其偏心率 $e_s$  (或椭圆的短半径 $b_s$ )。另外，为确定任意时刻卫星在轨道上的位置，需要一个参数，一般取为真近点角 $V$ 。



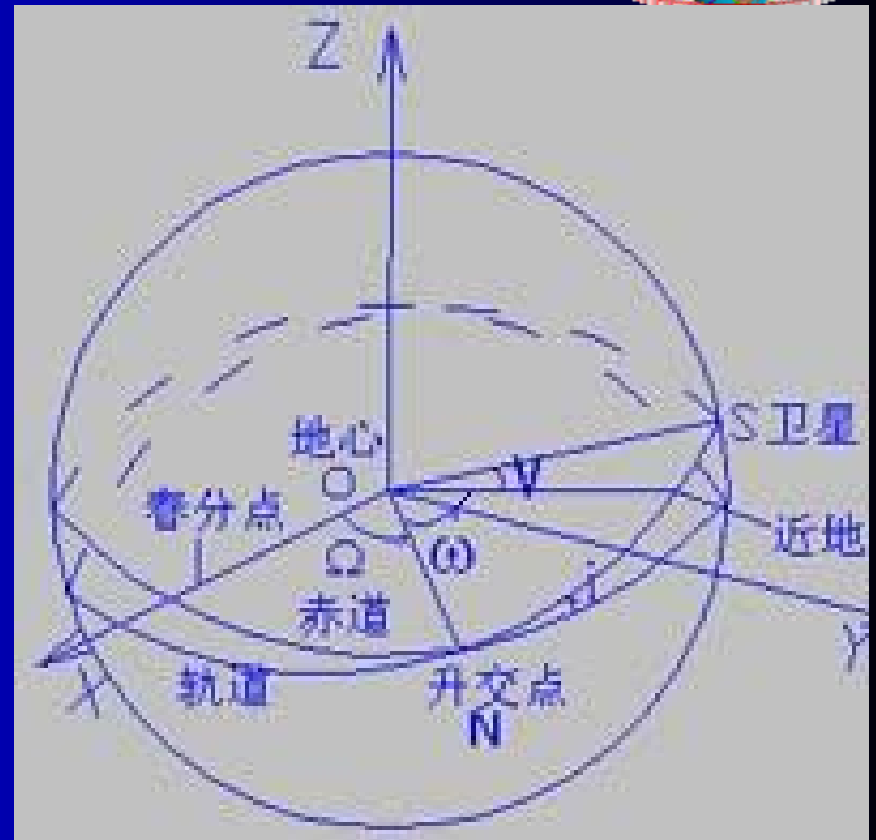
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



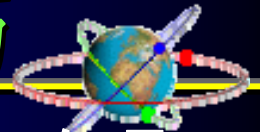
## 二、无摄卫星轨道的描述

参数 $a_s$ 、 $e_s$ 和 $V$ 唯一地确定了卫星轨道的形状、大小以及卫星在轨道上的瞬时位置。但是，这时卫星轨道平面与地球体的相对位置和方向还无法确定。容易理解，确定卫星轨道与地球体之间的相互关系，可以表达为确定开普勒椭圆在天球坐标系中的位置和方向。

因为根据开普勒第一定律，轨道椭圆的一个焦点与地球的质心相重合，所以为了确定该椭圆在上述坐标系中的方向，尚需三个参数。



### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



卫星的无摄运动，一般可通过一组适宜的参数来描述，但是，这组参数的选择并不是唯一的：其中一组应用广泛的参数，称为**开普勒轨道参数**，或称**轨道根数**。

$a_s$ ——轨道椭圆的长半轴；

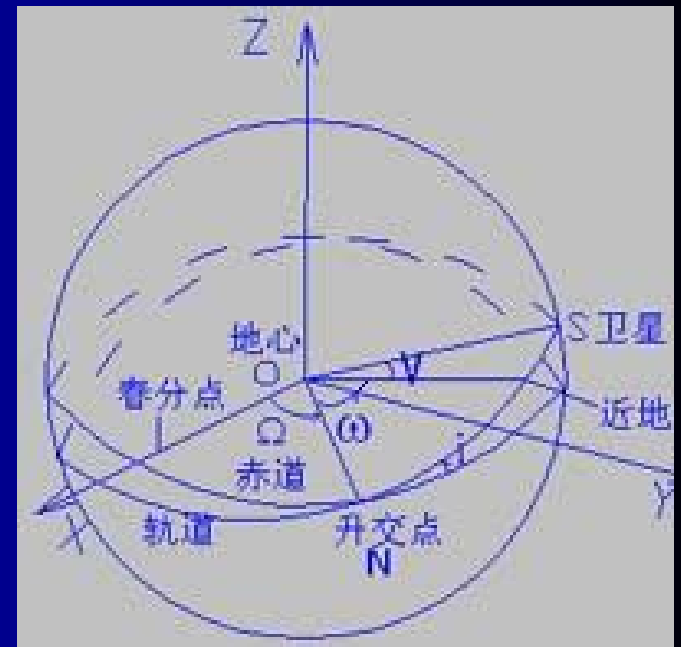
$e_s$ ——轨道椭圆的偏心率；

**以上两个参数确定了开普勒椭圆的形状和大小。**

$\Omega$ ——升交点的赤经，即在地球赤道平面上，升交点与春分点之间的地心夹角；升交点即当卫星由南向北运行时，其轨道与地球赤道面的一个交点。

$i$ ——轨道面的倾角，即卫星轨道平面与地球赤道面之间的夹角。

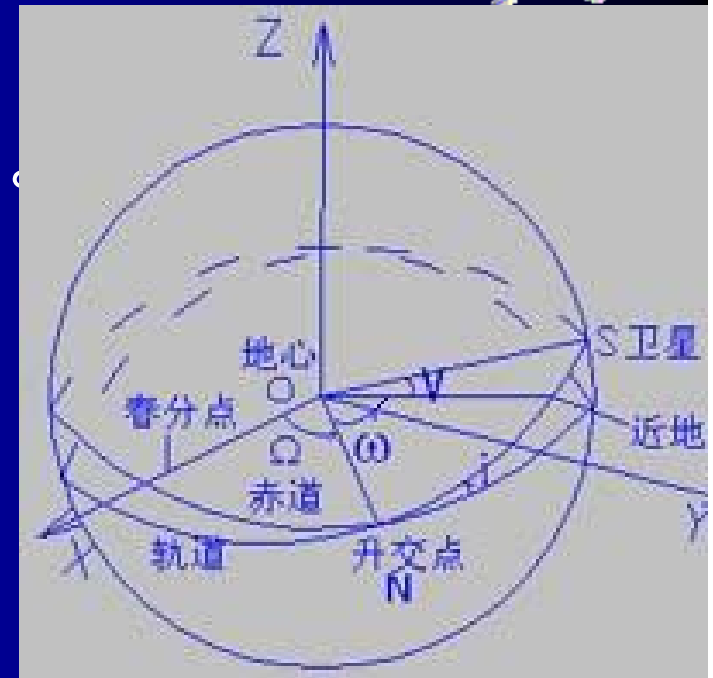
**$\Omega$ 和 $i$ 这两个参数，唯一地确定了卫星轨道平面与地球体之间的相对定向。**



### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



$\omega$ ——近地点角距，即在轨道平面上升交点与近地点之间的地心夹角。这一参数表达了开普勒椭圆在轨道平面上的定向。



$V$ ——卫星的真近点角，即在轨道平面上，卫星与近地点之间的地心角角距。该参数为时间的函数，它确定了卫星在轨道上的瞬时位置。

以上6个参数 $a_s$ 、 $e_s$ 、 $\Omega$ 、 $i$ 、 $\omega$ 、和 $V$ 所构成的坐标系统，通常称为轨道坐标系统，它广泛地用于描述卫星的运动。在该系统中，当6个轨道参数一经确定，卫星在任一瞬间相对于地球体的空间位置及其速度便可唯一确定。

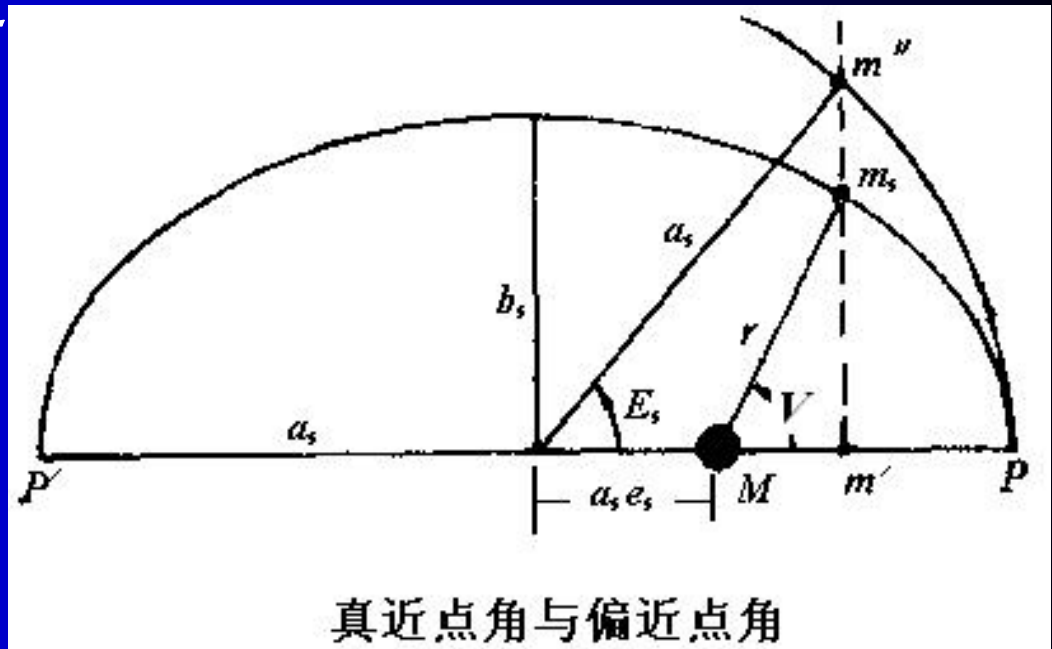
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 三、真近点角的计算

计算卫星瞬时位置的关键，在于计算参数 $V$ ，并由此确定卫星的空间位置与时间的关系。为此，需要引进有关计算真近点角的两个辅助参数 $E_s$ 和 $M_s$ 。

$E_s$ ——偏近点角。假设过卫星质心 $m_s$ 作平行于椭圆短半轴的直线，则 $m'$ 为该直线与近地点至椭圆中心连线的交点， $m''$ 为该直线与以椭圆中心为原点并以 $a_s$ 为半径的大圆的交点，于是 $E_s$ 就是在椭圆平面上，近地点 $P$ 至 $m''$ 点的圆弧所对应的圆心角。



真近点角与偏近点角

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



$M_s$ ——平近点角。它是一个假设量，如果卫星在轨道平面上运动的平均速度为 $n$ ，则平近点角由下式定义：

$$M_s = n(t - t_0) \quad (3-8)$$

式中： $t_0$ 为卫星过近地点的时刻， $t$ 为观测卫星的时刻。由(3-8)式可见，平近点角仅为卫星平均速度与时间的线性函数。因为，对于任一确定的卫星而言，其平均速度是一个常数(见(3-7)式)，所以，卫星于任意观测时刻 $t$ 的平近点角，便可由(3-8)式唯一地确定。

$$n = \sqrt{\frac{GM}{a_s^3}} \quad (3-7)$$

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



平近点角 $M_s$ 与偏近点角 $E_s$ 之间有以下重要关系:

$$M_s = E_s - e_s \sin E_s \quad (3-9)$$

或

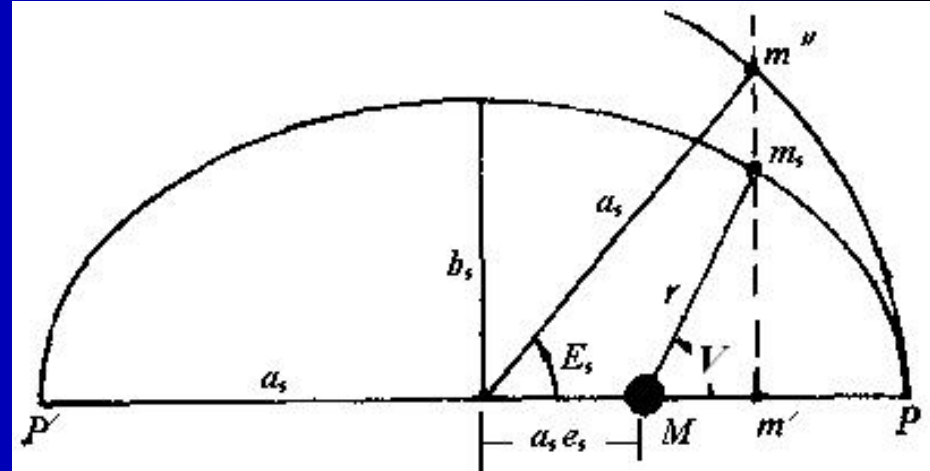
$$E_s = M_s + e_s \sin E_s \quad (3-10)$$

该式称为**开普勒方程**，它在卫星轨道计算中具有重要意义。为了根据平近点角 $M_s$ 计算偏近点角 $E_s$ ，通常普通采用迭代法：

迭代法的初始值可近似取 $E_{s0} = M_s$ ，然后依次按下式迭代计算

$$E_{s(k+1)} = M_s + e_s \sin E_{s(k)} \quad (3-11)$$

当前后两次迭代之差小于预定精度时，即获得了偏近点角 $E_s$ 。如果采用直接解法，可应用下式计算偏近点角：



真近点角与偏近点角

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

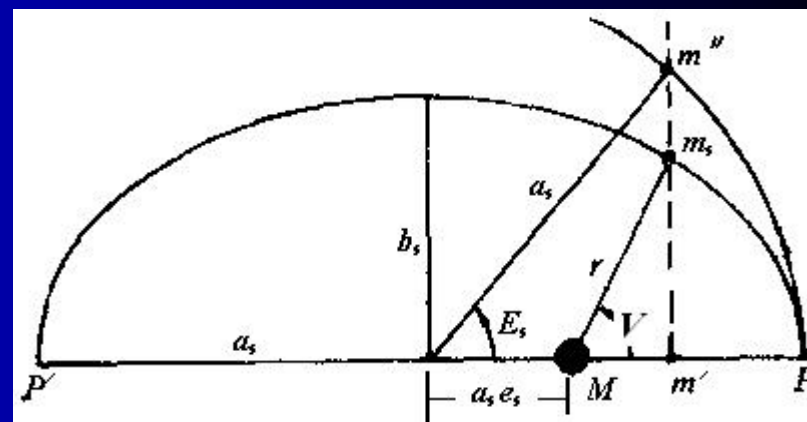


$$\begin{aligned}
 E_s = & M_s + \left( e_s - \frac{1}{8}e_s^2 + \frac{1}{192}e_s^5 - \frac{1}{9216}e_s^7 \right) \sin M_s \\
 & + \left( \frac{1}{2}e_s^2 - \frac{1}{6}e_s^4 + \frac{1}{98}e_s^6 \right) \sin 2M_s \\
 & + \left( \frac{3}{8}e_s^3 - \frac{1}{128}e_s^5 + \frac{243}{5120}e_s^7 \right) \sin 3M_s \\
 & + \left( \frac{1}{3}e_s^4 - \frac{4}{15}e_s^6 \right) \sin 4M_s + \left( \frac{125}{384}e_s^5 - \frac{3125}{9216}e_s^7 \right) \sin 5M_s \\
 & + \frac{27}{80}e_s^6 \sin 6M_s + \frac{16807}{46080}e_s^7 \sin 7M_s
 \end{aligned} \tag{3-12}$$

对GPS卫星，该式的模型误差将小于  
 $3.4'' \times 10^{-8}$ 。

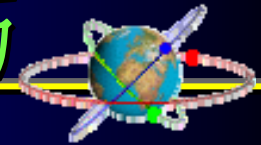
偏近点角与真近点角之间的关系。  
 按右图容易写出，

$$a_s \cos E_s = r \cos V + a_s e_s \tag{3-13}$$



真近点角与偏近点角

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



于是

$$\cos V = \frac{a_s}{r} (\cos E_s - e_s) \quad (3-14)$$

将该式代入开普勒椭圆方程式 (3-3) 得

$$r = a_s (1 - e_s \cos E_s) \quad (3-15)$$

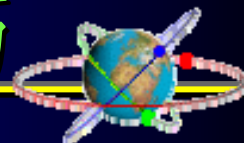
进一步整理可得真近点角和偏近点角的关系为

$$\left. \begin{aligned} \cos V &= \frac{\cos E_s - e_s}{1 - e_s \cos E_s} \\ \sin V &= \frac{\sqrt{1 - e_s^2} \sin E_s}{1 - e_s \cos E_s} \end{aligned} \right\} \quad (3-16)$$

这样一来，我们就可以根据卫星的平近角 $M_s$ ，确定相应的偏近点角 $E_s$ ，计算相应的真近点角 $V$ 。

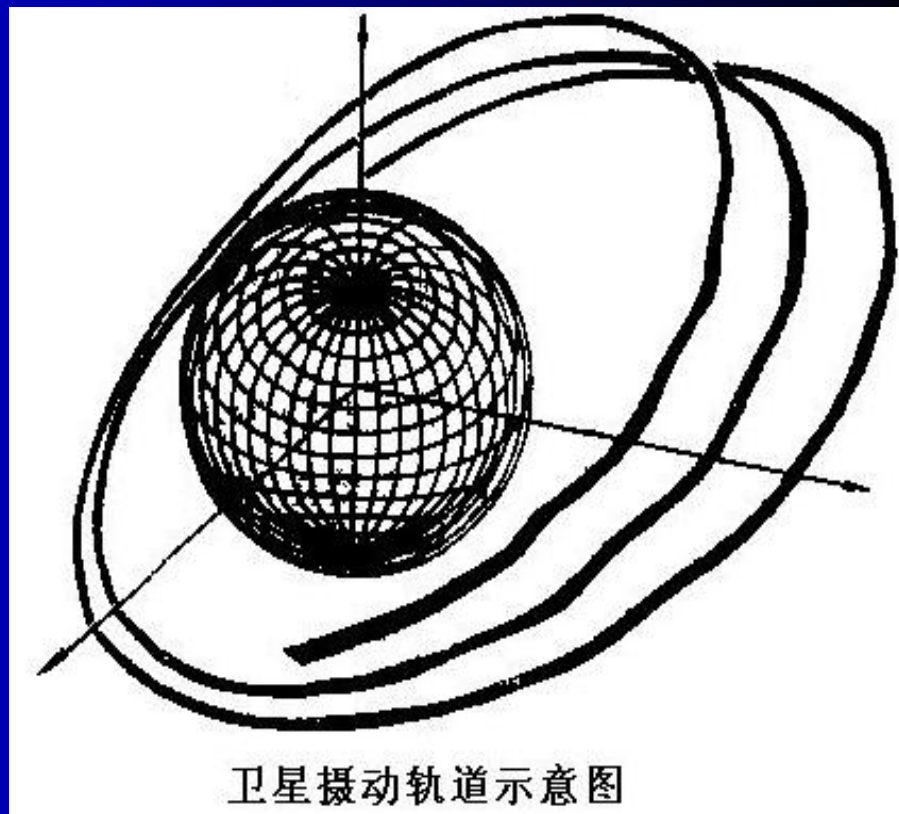
$$r = -\frac{a_s (1 - e_s^2)}{1 + e_s \cos f_s} r \quad (3-3)$$

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



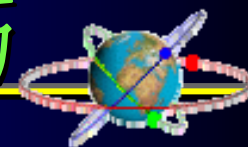
## 3.3 卫星的受摄运动

卫星的实际运行轨道，由于受多种非地球中心引力的影响，而使其偏离开普勒轨道。对于GPS卫星来说，仅地球的非球性影响，在3小时的弧段上就可能使卫星的位置偏差达2km，而在两日弧段上达14km。显然，这种偏差对于任何用途的导航定位工作，都是不容忽视的。



为此，必须建立各种摄动力模型，对卫星轨道加以修正，以满足精密定轨的要求。

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 3.3 卫星的受摄运动

### 一、卫星运动的摄动力

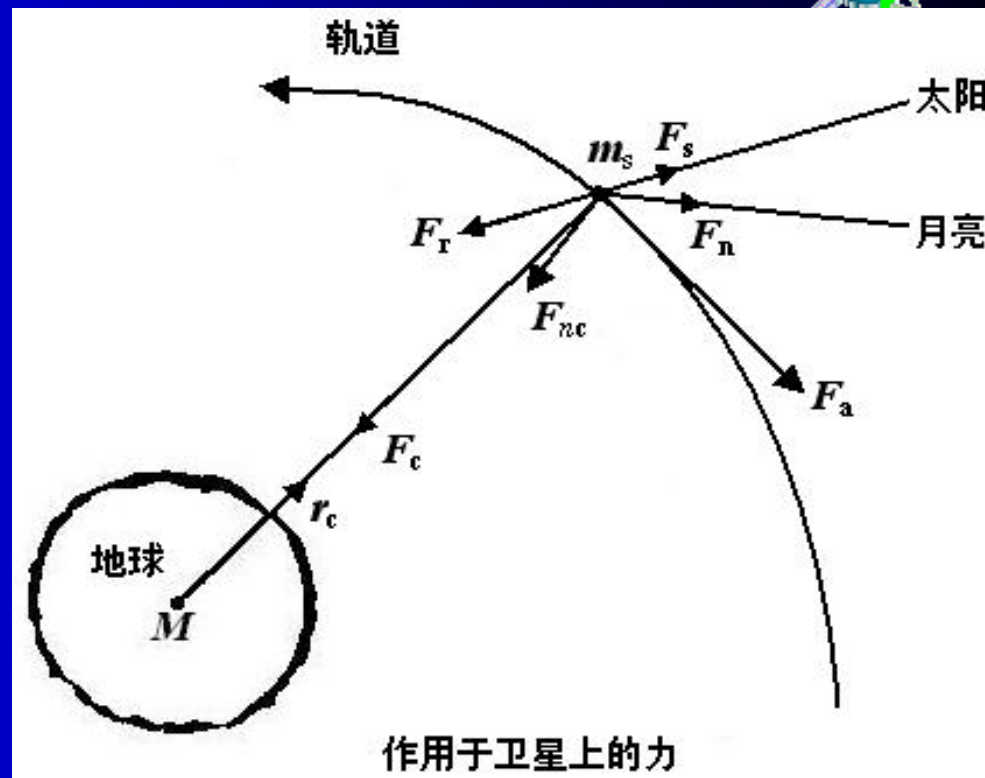
卫星在运行中，除了要受到地球中心引力 $F_c$ 的作用外，还将受到以下各种摄动力的影响，从而引起轨道的摄动：

- ①地球体的非球形及其质量分布不均匀而引起的作用力，即地球的非中心引 $F_{nc}$ ；
- ②太阳的引力 $F_s$ 和月球的引力 $F_n$
- ③太阳的直接与间接辐射压力 $F_r$ ；
- ④大气的阻力 $F_a$
- ⑤地球潮汐的作用力；
- ⑥磁力等。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

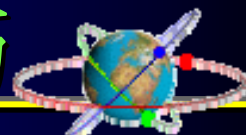


GPS卫星运动时所受的主要作用力如图所示。在摄动力加速度的影响下，卫星运行的开普勒轨道参数不再保持常数而变为时间的函数。



根据分析，在数小时和数日内，GPS卫星运行的轨道，因各种摄动力加速度影响，而产生的偏差大致下表所列。此外，为使相对定位精度达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ ，要求轨道的精度为20m~2m，因此，研究各种摄动力模型以满足精密定轨的要求，具有重要意义。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



在上述各种摄动力中，大气阻力的影响主要取决于大气的密度、卫星的断面与质量之比以及卫星的速度。由于GPS卫星所处的高空，大气密度甚微，以致其对卫星的阻力影响一般可以忽略。

摄动力对GPS卫星的影响

摄动源	加速度 ( $\text{m/s}^2$ )	轨道摄动	
		3小时弧段	2日弧段
1、地球的非对称性			
(a) $\bar{C}_{20}$	$5 \times 10^{-5}$	$\approx 2\text{km}$	$\approx 14\text{km}$
(b) 其他调和项	$3 \times 10^{-7}$	5~80	100~1500
2、日月影响	$5 \times 10^{-6}$	5~150	1000~3000
3、地球潮汐位			
(a) 固体潮	$1 \times 10^{-9}$	-	0.5~1.0
(b) 海洋潮汐	$1 \times 10^{-9}$	-	0.0~2.0
4、太阳辐射压	$1 \times 10^{-7}$	5~10	100~800
5、反照压	$1 \times 10^{-8}$	-	1.0~1.5

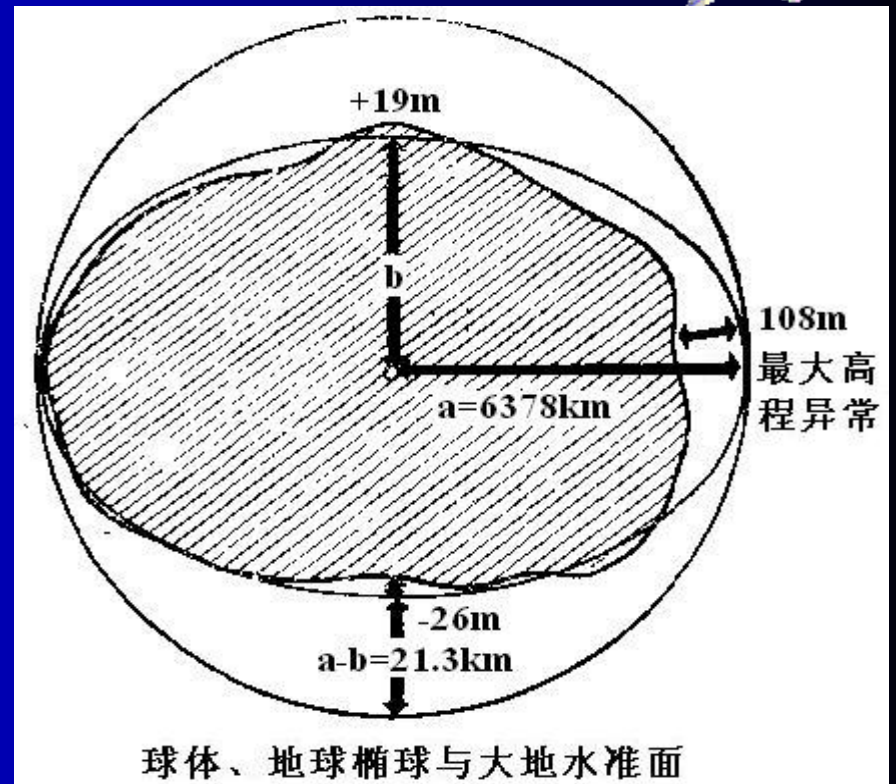
地球受日月引力的影响产生潮汐现象，而地球的潮汐又将对卫星的运动产生影响，所以地球潮汐的影响，可以认为是日月引力对卫星运动的一种间接影响。理论分析表明，对GPS卫星来说，这种影响也不明显。因此下面主要简要介绍一下其他一些摄动力对GPS卫星轨道的影响。

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 二、地球引力场摄动力的影响

在卫星无摄运动中，我们曾假设地球是一个匀质的球体，其质量集中于球心。这时地球所形成的引力场称为中心引力场。可是实际上，地球不仅其内部的质量分布并不均匀，而且其形状也很不规则。现代大地测量学已经确定，地球的实际形状，大体上虽然比较接近于一个长短轴相差约21km的椭球，但在北极仍高出椭球面约19m，而在南极却凹下约26m。一般来说，大地水准面与椭球面的高差均不超过100m。由于GPS卫星的轨道较高，而随高度的增加，地球非球形引力的影响将迅速减小。地球引力场摄动位的影响，它对卫星轨道的影响主要表现在以下几个方面：



# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 1、引起轨道平面在空间旋转

这一影响使升交点沿地球赤道产生缓慢的进动，进而使升交点的赤经 $\Omega$ 产生周期性的变化，其变化率可按式计算：

$$\dot{\Omega} = -3K \cos i, \quad K = \frac{nJ_2}{2} \left[ \frac{a}{a_s(1-e_s^2)} \right] \quad (3-17)$$

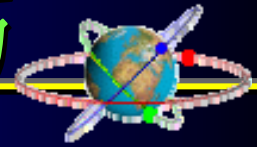
式中： $a$ 为地球椭球长半径， $a_s$ 为卫星轨道长半径。可见，轨道面的旋转速度主要取决于 $a_s$ 和 $i$ 。

对于GPS卫星而言，目前轨道长半径 $a_s$ 约变化于26557~26561km之间，偏心率 $e_s$ 约变化于0.002~0.011之间。若考虑到 $J_2=1.08263 \times 10^{-3}$ ，则升交点赤经的进动速度约为 $-0.03^\circ$  /天(或 $-3.3\text{km}$ /天)。

如果已知某一参考时刻 $t_0$ 的升交点赤经为 $\Omega(t_0)$ ，则对于任一时刻 $t$ 的升交点位置可表示为

$$\Omega(t) = \Omega(t_0) + \dot{\Omega}(t-t_0) \quad (3-18)$$

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 2、引起近地点在轨道平面内旋转

近地点的变化，说明开普勒椭圆在轨道平面内定向的改变，从而引起了卫星轨道近地点角距 $\omega_s$ 的缓慢变化，其变化率可表示为：

$$\dot{\omega}_s = -\frac{3}{2} K (1 - 5 \cos^2 i) \quad (3-19)$$

可见，近地点角距 $\omega_s$ 的变化率仍取决于 $a_s$ 和 $i$ ，且当 $i=63.4^\circ$ 时，其值近为0。类似于式（3-18），则任一时刻 $t$ 的近地点角距可表示为

$$\omega_s(t) = \omega_s(t_0) + \dot{\omega}_s(t - t_0) \quad (3-20)$$

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 3、引起平近点角 $M_s$ 的变化

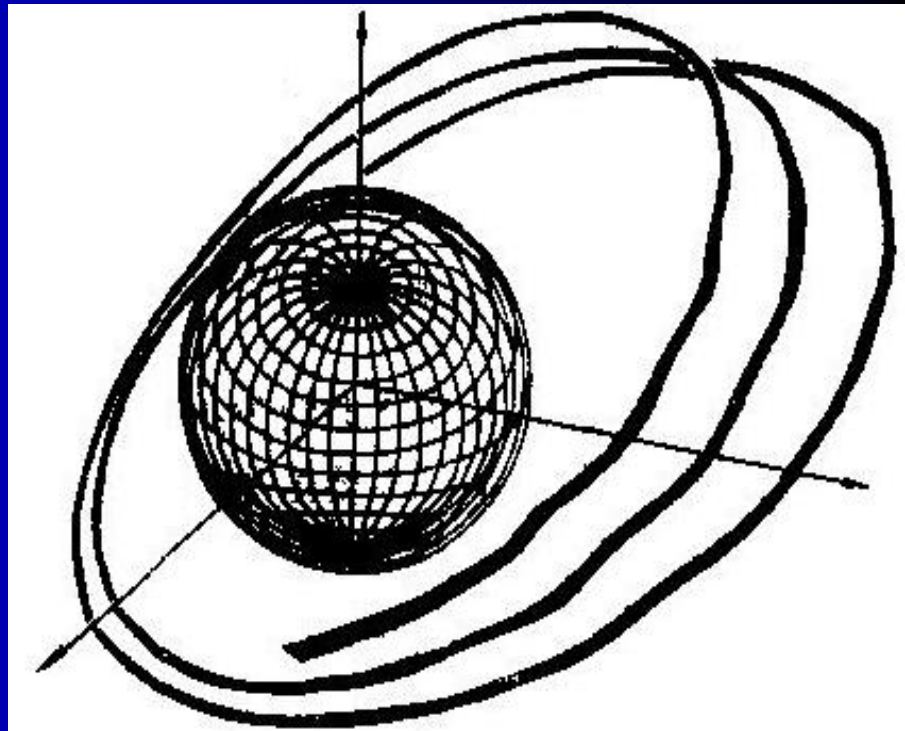
在地球引力场摄动影响下，卫星轨道平近点角  $M_s$  的变率，可按式估算

$$\dot{M}_s = -\frac{3}{2} K (1 - e_s^2)^{\frac{1}{2}} (1 - 3 \cos^2 i) \quad (3-21)$$

于是相应历元 $t$ 的平近点角可表示为

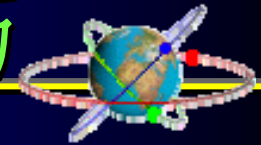
$$M_s(t) = M_s(t_0) + \dot{M}_s(t - t_0) + n(t - t_0) \quad (3-21)$$

由于轨道升交点和近地点的缓慢变化，卫星的实际运行轨道，大体将如右所示。



卫星摄动轨道示意图

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 三、日月引力的影响

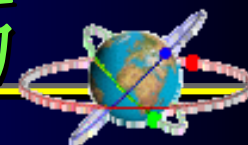
日月引力对卫星轨道的影响，是由太阳和月亮的质量对卫星所产生的引力加速度而产生的。如果取 $m_{\text{日}}$ 、 $m_{\text{月}}$ 分别表示日月的质量， $r_{\text{日}}$ 、 $r_{\text{月}}$ 为日月的地心向径，而 $r$ 为卫星的地心向径，则日月引力对卫星的摄动加速度可表示为

$$\ddot{\mathbf{r}}_{\text{日}} + \ddot{\mathbf{r}}_{\text{月}} = Gm_{\text{日}} \left[ \frac{\mathbf{r}_{\text{日}} - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}_{\text{日}} - \mathbf{r}|^3} - \frac{\mathbf{r}_{\text{日}}}{|\mathbf{r}_{\text{日}}|^3} \right] + Gm_{\text{月}} \left[ \frac{\mathbf{r}_{\text{月}} - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}_{\text{月}} - \mathbf{r}|^3} - \frac{\mathbf{r}_{\text{月}}}{|\mathbf{r}_{\text{月}}|^3} \right] \quad (3-22)$$

由日月引力加速度引起的卫星轨道摄动，主要是长周期的。对GPS卫星产生的摄动加速度约为 $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。如果忽略这项影响，将可能使GPS卫星在3小时的弧段上产生约50~150m的位置误差。

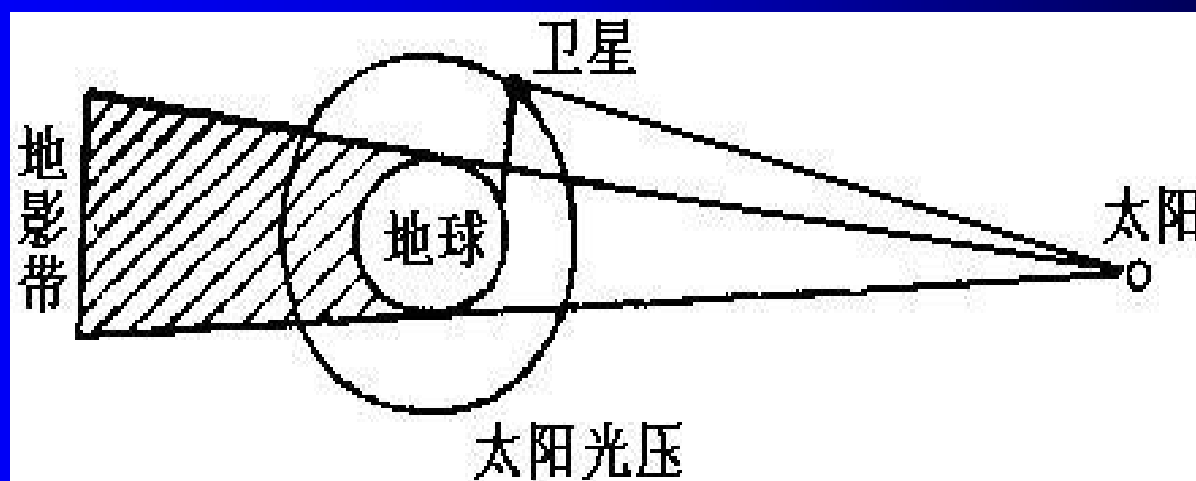
虽然太阳的质量远较月球为大，但其距离太远，所以太阳引力的影响，仅约为月球引力影响的0.46倍。至于太阳系其它行星对GPS卫星的影响，则远较太阳引力的影响为小，一般均可忽略。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



#### 四、太阳光压的影响

卫星在运行中，除直接受到太阳光辐射压力的影响外，还将受到由地球反射的太阳光间接辐射压力的影响。不过间接辐射压，对GPS卫星运动的影响较小，一般只有直接辐射压影响的1~2%。



太阳辐射压对球形卫星所产生的摄动加速度既与卫星、太阳和地球之间的位置有关，也与卫星表面的反射特性、卫星的截面积与质置比有关。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



#### 四、太阳光压的影响

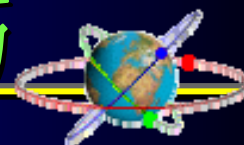
其间关系比较复杂，一般可近似表示如下：

$$\dot{\mathbf{r}}_{\text{光压}} = \gamma P_{\gamma} C_{\gamma} \frac{F}{m_s} \left[ \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{日}}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{日}}|^3} \right] \quad (3-23)$$

其中， $P_{\gamma}$ 为太阳的光压， $C_{\gamma}$ 为卫星表面的反射因子， $F/m_s$ 为卫星的截面积与卫星质量之比， $r_{\text{日}}$ 为太阳的地心向径， $\gamma$ 为表示卫星被地球阴影区掩盖程度的参数，通常称为蚀因子。在阴影区 $\gamma = 0$ ，在阳光直接照射下 $\gamma = 1$ ，一般 $0 < \gamma < 1$ 。

太阳光压对GPS卫星产生的摄动加速度，约为 $10^{-7} \text{ m/s}^2$ 量级，由此将使卫星轨道在3小时的弧段上产生5~10m的偏差。所以，这一轨道偏差对于基线大于50km的精密相对定位，一般也是不能忽略的。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

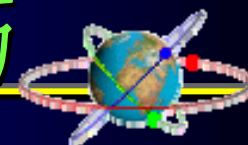


#### 五、地球潮汐的影响

日月引力作用于地球，使之产生形变（固体潮）或质量移动（海潮），从而引起地球质量分布的变化，进一步引起地球引力的变化。可以将这种变化视为在不变的地球引力中附加一小的摄动——潮汐作用力。在5天的弧段中，潮汐作用力对GPS卫星的位置影响可达1m。

总之，随着GPS精密定位技术的发展，对卫星轨道的精度要求将会随之提高。因此，充分考虑到各种摄动力的影响并不断地完善摄动力的模型，始终是卫星精密轨道理论的一个重要课题。

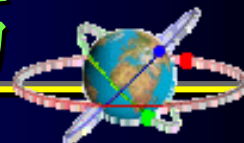
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 3.4 GPS卫星星历

卫星的星历是描述有关卫星运行轨道的信息。利用GPS进行导航和定位，就是根据已知的卫星轨道信息和用户观测资料，通过数据处理来确定接收机的位置及其载体的航行速度。所以，精确的轨道信息是精密导航定位的基础。卫星星历的提供方式，一般有两种：预报星历(广播星历)和后处理星历(精密星历)。

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

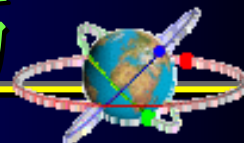


## 3.4 GPS卫星星历

### 一、预报星历

预报星历，是通过卫星发射的含有轨道信息的导航电文传递给用户的，用户接收机接收到这些信号，经过解码便可获得所需要的卫星星历，所以这种星历也叫作**广播星历**。卫星的预报星历，通常均包括相对某一参考历元的开普勒轨道参数和必要的轨道摄动改正项参数。相应参考历元的卫星开普勒轨道参数，也叫**参考星历**，它是根据GPS监测站约一周的观测资料推算的。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



参考星历只代表卫星在参考历元的瞬时轨道参数(也称为密切轨道参数),但是在摄动力的影响下,卫星的实际轨道,随后将偏离其参考轨道。偏离的程度主要决定于观测历元与所选参考历元间的时间差。如果我们用轨道参数的摄动项,来对已知的卫星参考星历加以改正,就可以外推出任意观测历元的卫星星历。由此不难理解,如果观测历元与所选参考历元相差很大,为了保障外推轨道参数具有必要的精度,就必须采用更严密的摄动力模型和考虑更多的摄动因素。这样一来,将会遇到建立更严格的摄动力模型的困难,因而可能降低预报轨道参数的精度。

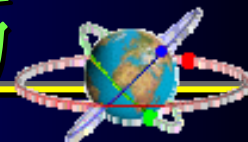
### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



实际上，为了保持卫星预报星历的必要精度，一般采用**限制预报星历外推时间间隔的方法**。为此，GPS跟踪站每天都利用其观测资料，更新用以确定卫星参考星历的数据，以计算每天卫星轨道状态的更新值，并且每天按时将其注入相应的卫星加以储存，以资更新卫星的参考轨道之用。因此，GPS卫星发射的广播星历，每2小时更新一次，以供用户使用。

这样，如果将上述计算参考星历的参考历元 $t_{0e}$ 选在两次更新星历的中央时刻，则外推的时间间隔，最大将不会超过1小时。从而可以在采用同样摄动力模型的情况下，有效地保持外推轨道参数的精度。预报星历的精度，目前一般估计约为20~50m。

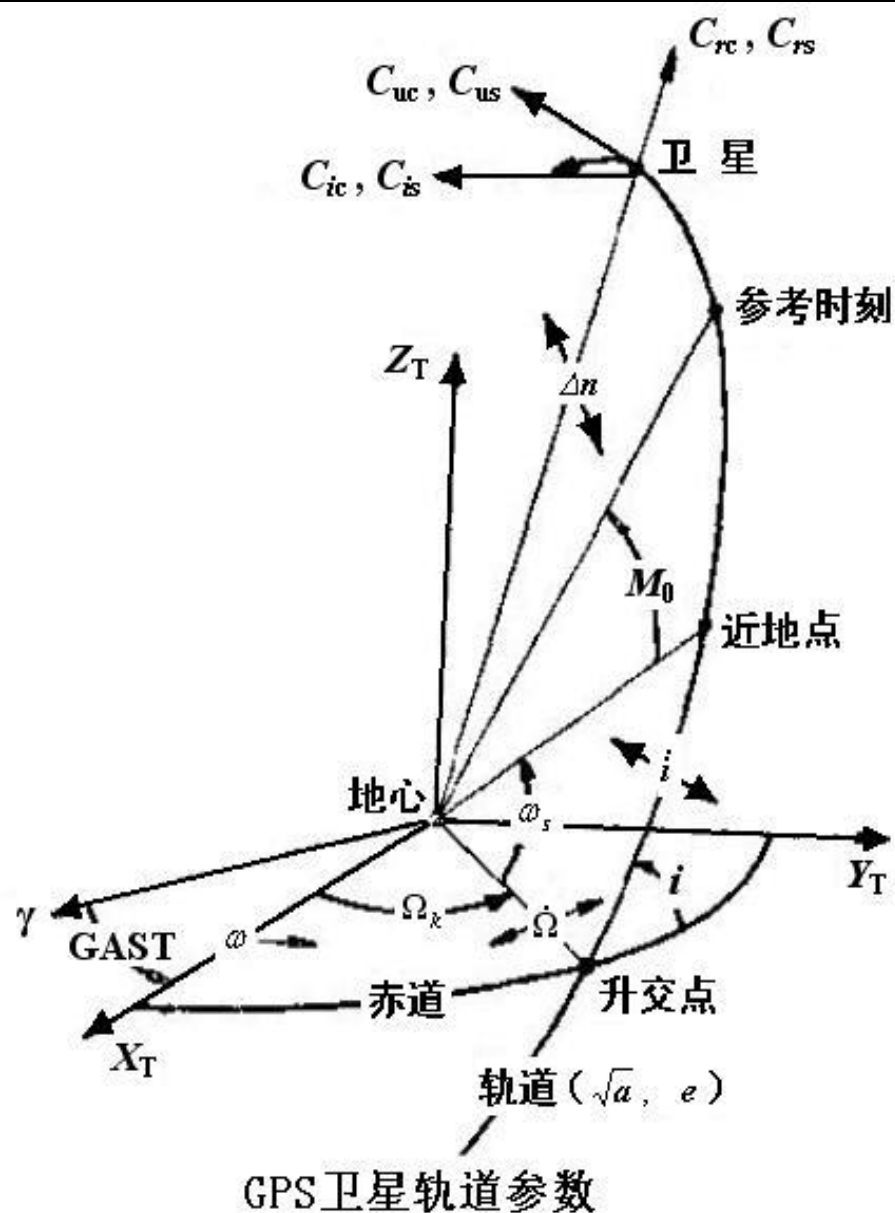
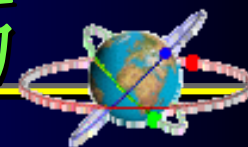
### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



由于预报星历每2小时更新一次，因此，在数据更新前后，各表达式之间将会产生小的跳跃，其值可达数分米。对此，一般可通过适当的拟合技术（例如切比雪夫多项式）予以平滑。

GPS用户通过卫星广播星历，可以获得的有关卫星星历参数共有16个，其中包括1个参考时刻、6个相应参考时刻的开普勒轨道参数和9个反映摄动力影响的参数。这些参数的定义如下表所示。有关卫星实际轨道的描述如下图所示。根据上述数据，便可外推出观测时刻 $t$ 的轨道参数，以计算卫星在不同参考系中的相应坐标。 RINEX格式广播星历

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

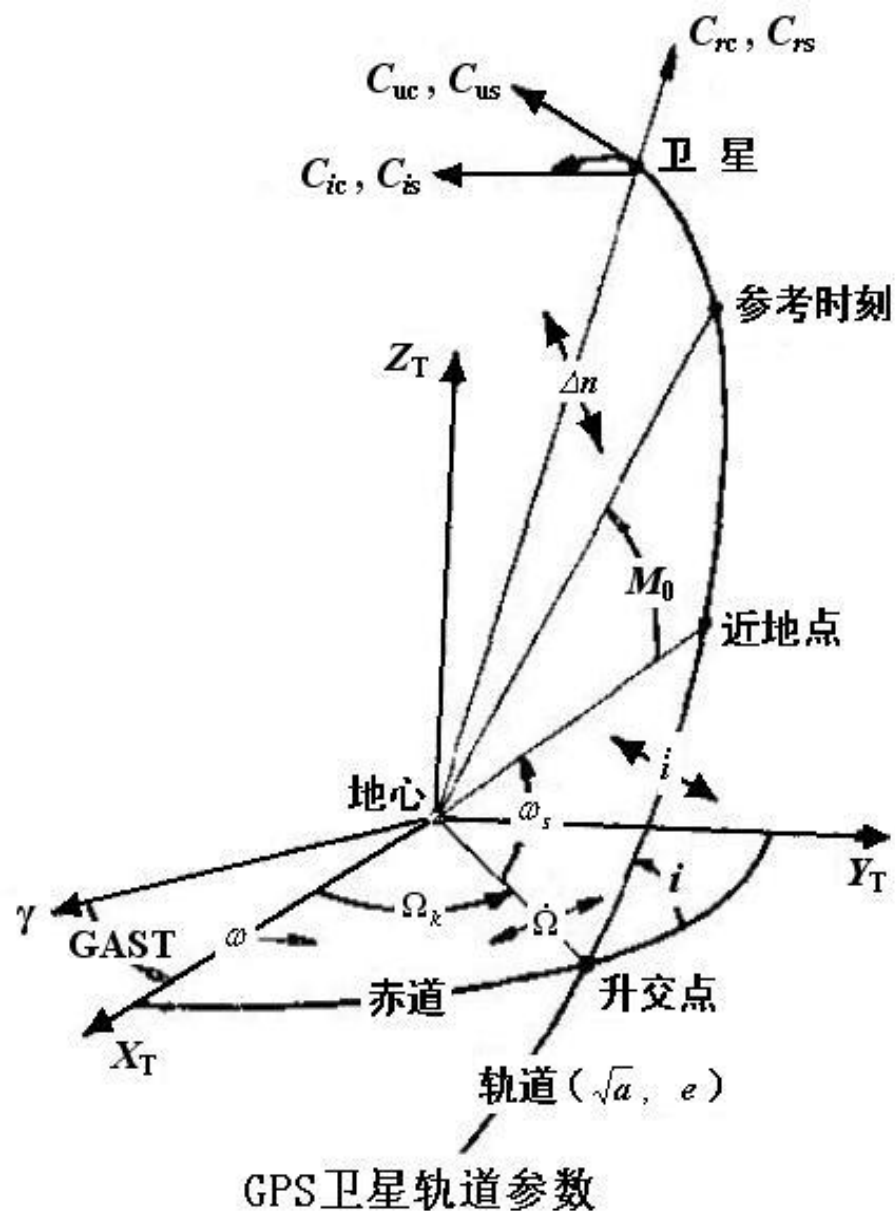
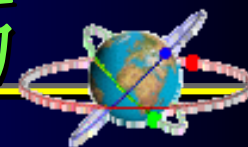


17个卫星星历参数包括以下三类参数组成:

1) 考历元的开普勒轨道参数

卫星轨道长半轴的平方根 $\sqrt{a}$ , 卫星轨道偏心率 $e$ ; 参考时刻 $t_{oe}$ 的轨道倾角 $i_0$ ; 参考时刻 $t_{oe}$ 的升交点赤经 $\Omega_0$ ; 近地点角距 $\omega$ ; 参考时刻 $t_{oe}$ 的平近点角 $M_0$ 。

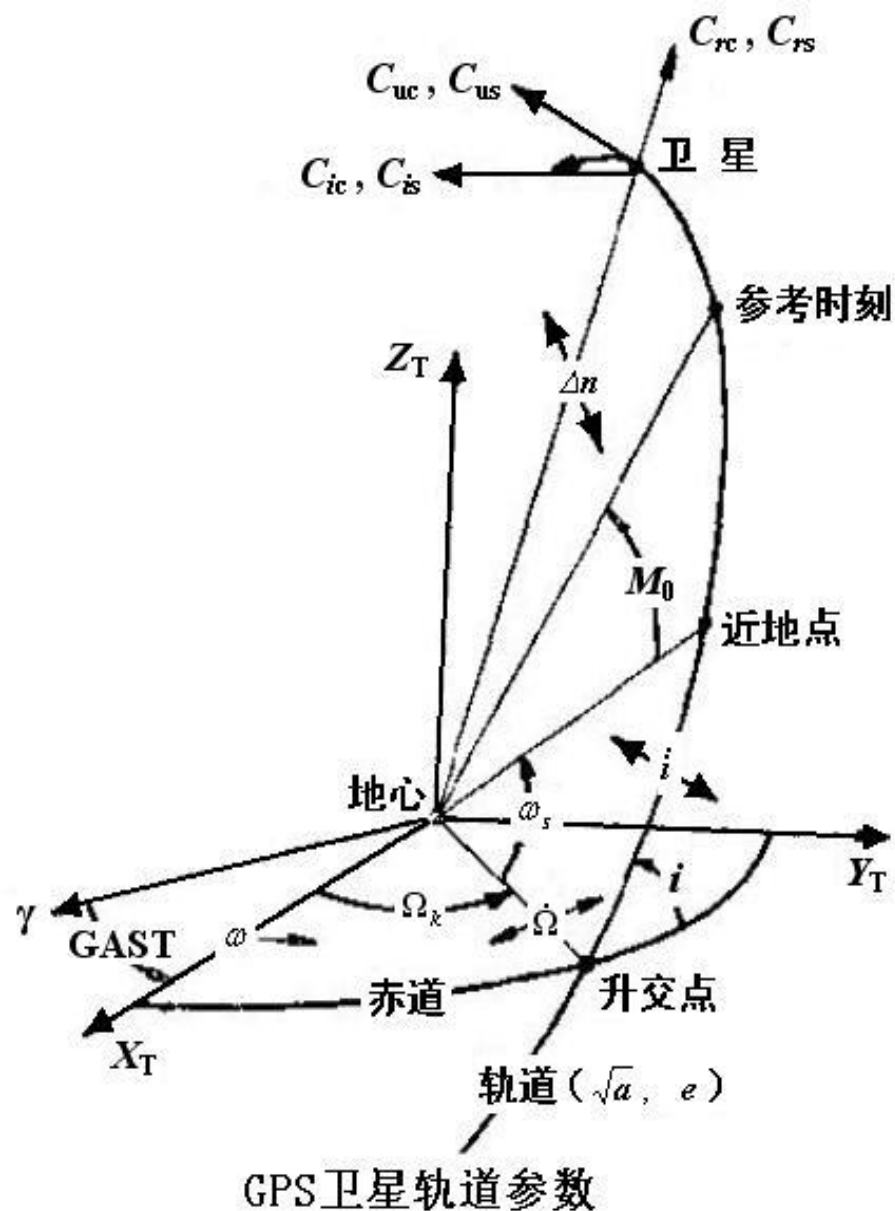
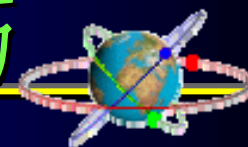
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 2) 轨道摄动九参数

卫星平均运动角速度与计算值之差  $\Delta n$ ，或称  $\Delta n$  为平近地点角速度的改正数；升交点赤经的变化率  $\dot{\Omega}$ ；轨道倾角的变化率  $\dot{i}$ ；升交角距的正余弦调和改正项之振幅  $C_{us}$ 、 $C_{uc}$ ；轨道倾角的正余弦调和改正项之振幅  $C_{is}$ 、 $C_{ic}$ ；轨道向径的正余弦调和改正项之振幅  $C_{rs}$ 、 $C_{rc}$ 。

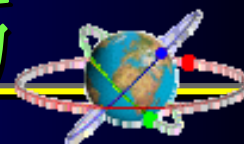
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 3) 2个时间参数

从星期日子夜零点开始度量的星历参考时刻 $t_{oe}$ ；星历表的数据龄期AODE，即预报星历的外报时间间隔。

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## RINEX格式广播星历: WS672420.03N

```
2.10      NAVIGATION DATA      G (GPS)      RINEX VERSION / TYPE
DAT2RINW 3.10 001    LI          30AUG03 22:00:36  PGM / RUN BY / DATE
                                           COMMENT
      .1304D-07    .2235D-07    -.5960D-07    -.1192D-06      ION ALPHA
      .1044D+06    .9830D+05    -.1311D+06    -.3277D+06      ION BETA
      .558793544769D-08    .888178419700D-14    147456      1234 DELTA-UTC: A0, A1, T, W
13                                           LEAP SECONDS
                                           END OF HEADER

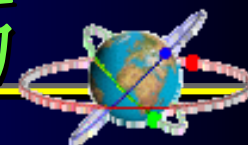
5 03  8 30  4  0  0.0    .510779209435D-04    .147792889038D-11    .000000000000D+00
      .217000000000D+03    -.191562500000D+02    .494842040729D-08    -.443149407706D+00
      -.864267349243D-06    .468358304352D-02    .138115137815D-04    .515367093277D+04
      .532800000000D+06    .521540641785D-07    -.266405454470D+01    .353902578354D-07
      .936102218563D+00    .103156250000D+03    .730321676418D+00    -.824820071352D-08
      .101432796512D-09    .100000000000D+01    .123300000000D+04    .000000000000D+00
      .240000000000D+01    .000000000000D+00    -.419095158577D-08    .217000000000D+03
      .526860000000D+06    .400000000000D+01
5 03  8 30  6  0  0.0    .510881654918D-04    .136424205266D-11    .000000000000D+00
      .218000000000D+03    -.756250000000D+01    .477555606394D-08    .607087863921D+00
```

文件头

内容

三峡宝子滩滑坡体GPS监测: WS67点第一监测时段

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

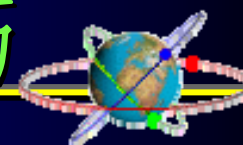


## ◆ RINEX格式文件命名规则：

(WS672420.03N, WS672420.03O)

- 1、测站名（4个字符）： WS67
- 2、年积日（三位数字）： 242
- 3、日时段序号（1个字符）： 0
- 4、年份（两位数）： 03
- 5、文件类型（一个字符）：
  - N——星历文件
  - O——观测值文件

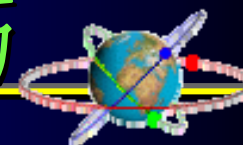
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## ◆RINEX格式广播星历说明：文件头

导航文件字头块说明		
字头名称 (61~80列)	说 明	格 式
RINEX VERSION / TYPE	格式版本 (2) 文件类型 (“N” —— 导航数据)	I6, 14X, A1, 19X
PGM / RUN BY / DATE	文件纲要名称 文件机构名称 文件建立日期	A20 A20 A20
COMMENT	建议	A60
TON ALPHA	电离层参数 A0—A3	2X, 4D12.4
ION BETA	电离层参数 B0—B3	2X, 4D12.4
DELTA-UTC: A0, A1, T, W	计算 UTC 时间的历书参数 A0, A1: 计算时间改正参数 T : UTC 数据的参考时间 W : UTC 参考星期数	3X, 2D19.12 2I9
LEAP SECONDS	由于跳秒硬气的引起的时间变化	I6
END OF HEADER	字头块结束符	60X

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



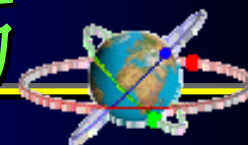
## ◆RINEX格式广播星历说明：内容

### 第一行：

导航文件数据记录块说明		
观测记录	说 明	格 式
PRN /EPOCH / SV CLK	PRN 卫星编号	I2
	历元：TOC——时钟时间	
	年 (两位数字)	5I3
	月	
	日	
	时	
	分	
	秒	F5. 1
	卫星时钟偏差 (s)	3D19.12
	卫星时钟漂移 (s/s)	
	卫星时钟漂移率 (s/s <sup>2</sup> )	

5 03 8 30 4 0 0.0 .510779209435D-04 .147792889038D-11 .000000000000D+00

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



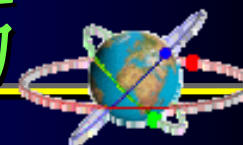
## ◆RINEX格式广播星历说明：内容

### 第二行和第三行：

BROADCAST ORBIT-1	IODE 星历数据有效期 Crs (m) $\Delta n$ (rad/s) $M_0$ (rad)	3X, 4D19.12
BROADCAST ORBIT-2	Cuc (rad) e 扁率 Cus (rad) $\sqrt{A}$ ( $\sqrt{m}$ )	3X, 4D19.12

.217000000000D+03 -.191562500000D+02 .494842040729D-08 -.443149407706D+00  
 -.864267349243D-06 .468358304352D-02 .138115137815D-04 .515367093277D+04

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



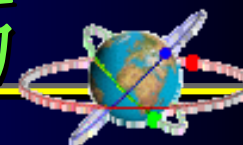
## ◆RINEX格式广播星历说明：内容

### 第四～六行：

BROADCAST ORBIT-3	Toe 星历参考时间 (GPS s) Cic (rad) $\Omega$ (rad) Cis (rad)	3X, 4D19.12
BROADCAST ORBIT-4	I (rad) Crc (m) $\omega$ (rad) $\Omega\dot{\phantom{a}}$ (rad/m)	3X, 4D19.12
BROADCAST ORBIT-5	Idot (rad/s) L2 GPS 星期数 (TOE) L2 P 数据标志	3X, 4D19.12

.532800000000D+06 .521540641785D-07 -.266405454470D+01 .353902578354D-07  
 .936102218563D+00 .103156250000D+03 .730321676418D+00 -.824820071352D-08  
 .101432796512D-09 .100000000000D+01 .123300000000D+04 .000000000000D+00

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



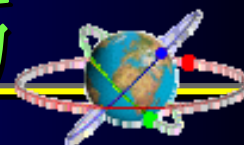
## ◆RINEX格式广播星历说明：内容

### 第七~八行：

BROADCAST ORBIT-6	卫星精度 (m) 卫星健康 (MSB) TGD (ns) IODC 时钟数据有效期	3X, 4D19.12
BROADCAST ORBIT-7	电文发送时间 (GPS 星期秒 - 由字 HOW 的 Z - 计数算起) 空 空 空	3X, 4D19.12

.240000000000D+01 .000000000000D+00 -.419095158577D-08 .217000000000D+03  
.526860000000D+06 .400000000000D+01

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历

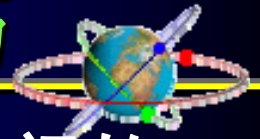


## 二、精密星历

卫星的预报星历，是以跟踪站以往时间的观测资料，推求的参考轨道参数为基础，并加入轨道摄动改正而外推的星历。预报星历，用户在观测时可以通过导航电文实时得到，这对导航或实时定位显然是非常重要的。可是，对于某些进行精密定位工作的用户来说，其精度尚难以满足要求，尤其当GPS卫星的预报星历受到人为干预而降低精度时，就更难于保障精密定位工作的要求。

后处理星历，是一些国家的某些部门，根据各自建立的跟踪站所获得的精密观测资料，应用与确定预报星历相似的方法，而计算的卫星星历。它可以向用户提供在用户观测时间的卫星星历，避免了预报星历外推的误差。美国和其它许多国家的一些民用单位，已建立了全球性或区域性的GPS卫星跟踪系统，以便为大地测量学和地球动力学研究的精密定位工作，提供所需要的星历。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



由于这种星历是在事后向用户提供在其观测时间的卫星精密轨道信息，因此称为后处理星历或精密星历。该星历的精度，目前可达米级，进一步的发展可望达到分米级。

后处理星历不是通过卫星的无线电信号向用户传递的，而是利用磁带或通过电传通讯方式，有偿地为所需要的用户服务。但是，建立和维持一个独立的跟踪系统来精密测定GPS卫星的轨道，其技术比较复杂，投资也较大，所以利用GPS的预报星历进行精密定位工作，仍是目前一个重要的研究和开发领域。

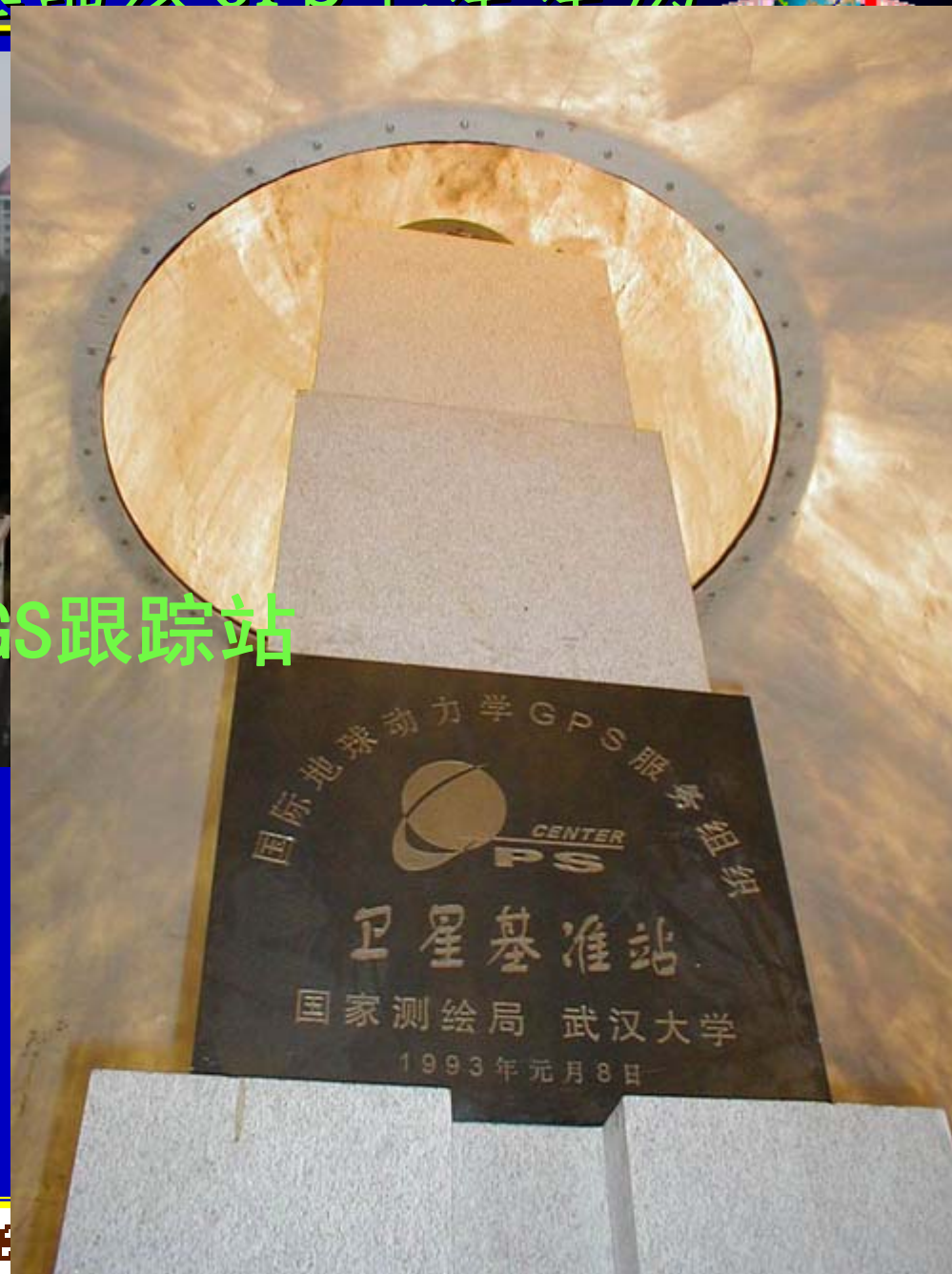
GPS精密星历 <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/>

GLONASS精密星历

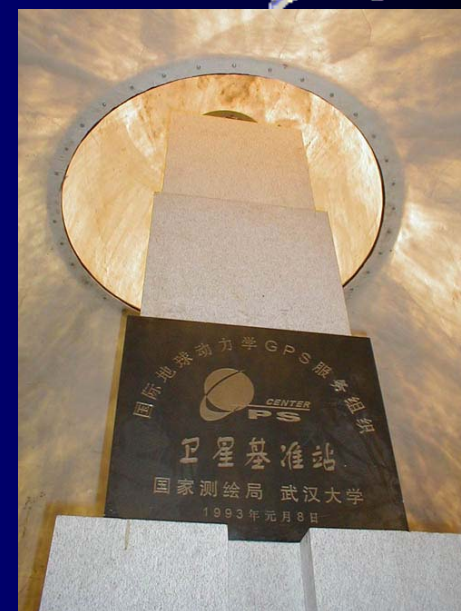
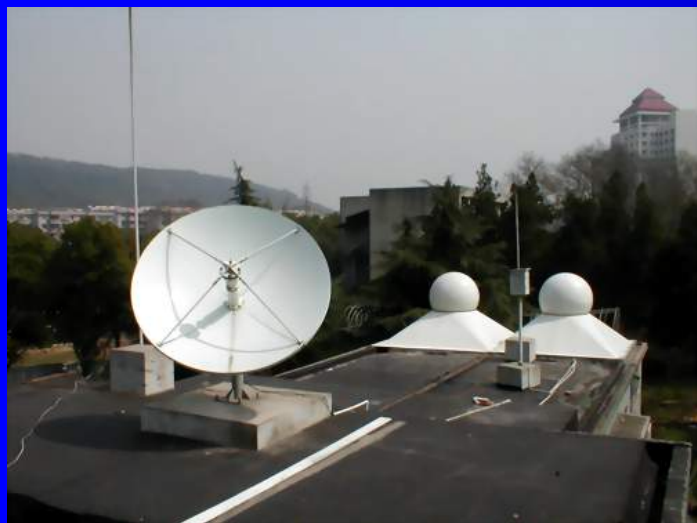
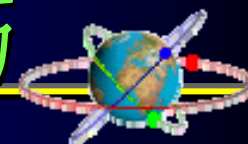
### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



武汉IGS跟踪站



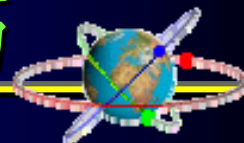
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 武汉IGS跟踪站

全球最早的永久性GPS跟踪站之一，1993年由中美两国合作共建。现为IGS的核心站，是中国地壳运动观测网络的国家基准站。该站装配BenchMark接收机，Agilent 5071A原子钟，VSAT卫星通讯及MT-1综合数字气象自动采集仪等精密仪器。建站10年来，为维护国家动态地心参考系，开展全球地壳运动观测和研究等持续提供基础保障。

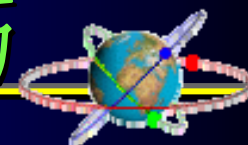
# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 国际GPS服务（IGS）机构（IGS）

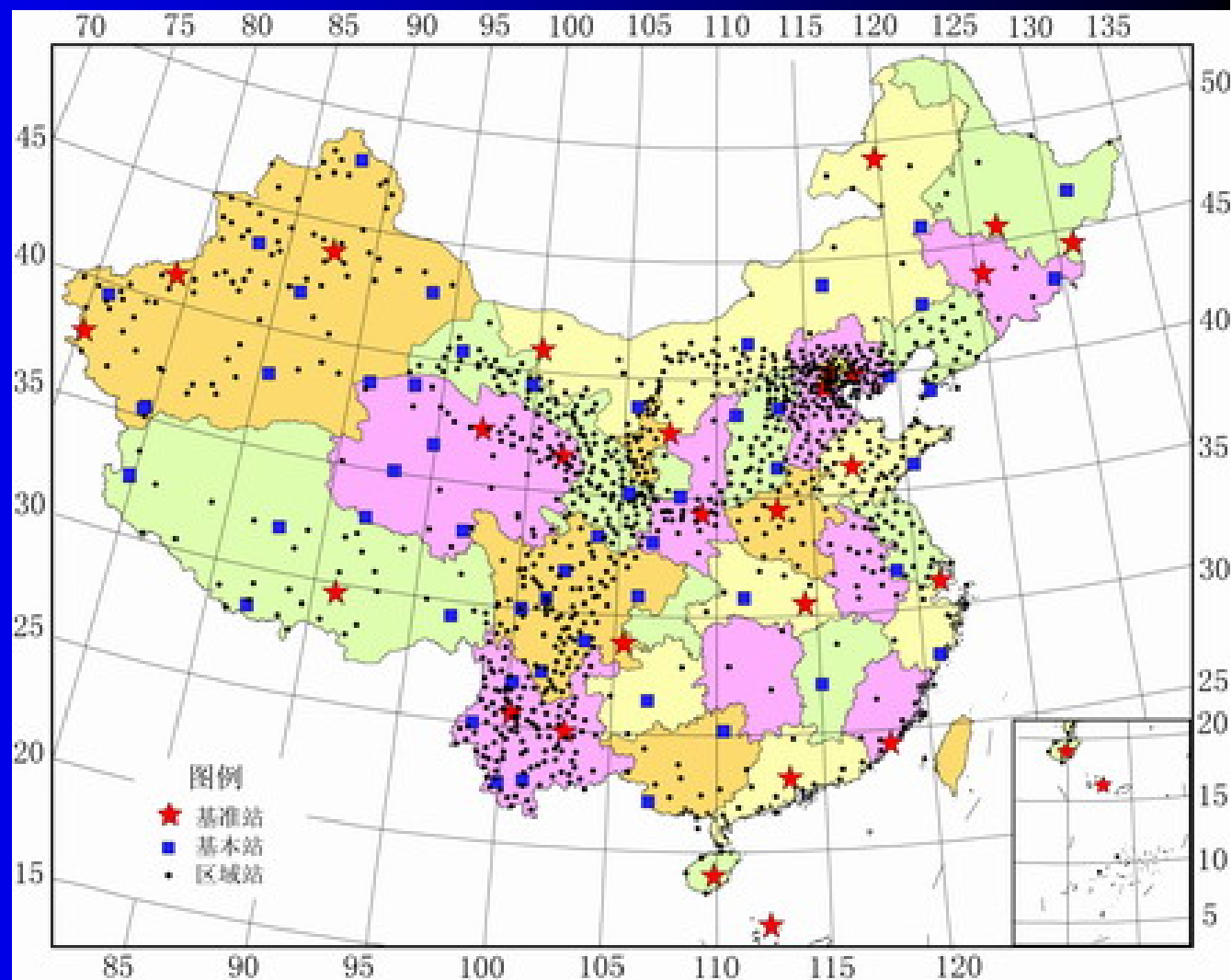
是由国际大地测量协会（IAG）协调的一个永久性GPS服务机构，成立于1992年。成立之初的英文全名为International GPS service for Geodynamics（国际地球动力学服务机构），缩写为IGS。其目的是为全球科研机构及时提供GPS数据和高精度的星历，以支持世界范围内的地球物理学研究。IGS正式运行于1994年1月。随着IGS的服务范围不断拓宽和支持多学科的科学研究与发展的需要，于1999年1月1日将国际GPS地球动力学服务机构更名为国际GPS服务（International GPS Service）机构，删去了原名中的限定词“地球动力学”（Geodynamics）。更名后的英文缩写仍为IGS。IGS的组织机构包括：管理委员会、中央局（含中央局信息系统CBIS）、跟踪网站、数据中心（分别为：运行中心、区域中心和全球中心）、分析中心和分析协调机构6个部分。

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 国际GPS服务（IGS）机构（IGS）

目前，全球260多个IGS跟踪站中，我国占20多个，分布在武汉、拉萨、乌鲁木齐、昆明、上海等地。



# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 3.5 GPS卫星坐标的计算

在用GPS信号进行导航定位以及制定观测计划时，都必须已知GPS卫星在空间的瞬时位置。卫星位置的计算是根据卫星电文所提供的轨道参数按一定的公式计算的。

### 1、计算卫星运行的平均速度 $n$

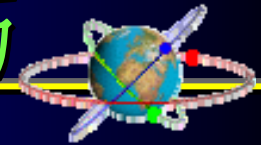
根据开普勒第三定律，卫星运行的平均角速度 $n_0$ 可以用下式计算

$$n_0 = \sqrt{GM / a^3} = \sqrt{u} / (\sqrt{a})^3 \quad (3-24)$$

式中， $u$  为 WGS-84 坐标系中的地球引力常数，且  $u=3.986005 \times 10^{14} \text{m}^3/\text{s}^2$ 。平均角速度 $n_0$ 加上导航电文中给出的摄动改正数 $\Delta n$ ，便得到卫星运行的平均角速度 $n$ 。

$$n = n_0 + \Delta n \quad (3-25)$$

# 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



## 2、计算归化时间 $t_k$

首先对观测时刻 $t$ 作卫星钟差改正

$$t = t' - \Delta t$$

$$\Delta t = a_0 + a_1(t' - t_{oc}) + a_2(t' - t_{oc})^2$$

然后将观测时刻 $t$ 归化到GPS时系

$$t_k = t - t_{0e} \quad (3-26)$$

式中， $t_k$ 称作相对于参考时刻 $t_{0e}$ 的归化时间。

## 3、观测时刻卫星平近点角 $M_k$ 的计算

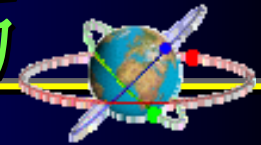
$$M_k = M_0 + nt_k \quad (3-27)$$

式中 $M_0$ 是导航电文给出的参考时刻 $t_{0e}$ 的平近点角。

## 4、采用迭代算法计算偏近点角 $E_k$

$$E_k = M_k + e \sin E_k \quad (3-28)$$

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



#### 5、计算真近点角 $V_k$

$$V_k = \arctan \frac{\sqrt{1-e^2}}{\cos E_k - e} \sin E_k \quad (3-29)$$

#### 6、计算升交距角 $\Phi_k$

$$\Phi_k = V_k + w \quad (3-30)$$

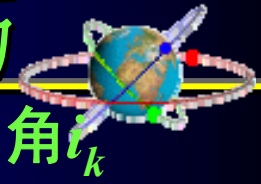
其中， $w$ 为近地点角距，由卫星星历给出。

#### 7、计算摄动改正数 $\delta u$ 、 $\delta r$ 、 $\delta i$

$$\begin{cases} \delta u = C_{uc} \cdot \cos(2\Phi_k) + C_{us} \cdot \sin(2\Phi_k) \\ \delta r = C_{rc} \cdot \cos(2\Phi_k) + C_{rs} \cdot \sin(2\Phi_k) \\ \delta i = C_{ic} \cdot \cos(2\Phi_k) + C_{is} \cdot \sin(2\Phi_k) \end{cases} \quad (3-31)$$

式中， $\delta u$ 、 $\delta r$ 、 $\delta i$ 分别为升交距角 $u$ 的摄动量、卫星矢径 $r$ 的摄动量和轨道倾角 $i$ 的摄动量。 $C_{uc}$ 、 $C_{us}$ 、 $C_{rc}$ 、 $C_{rs}$ 、 $C_{ic}$ 、 $C_{is}$ 由导航电文给出。

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



8、计算经摄动改正后的升交距角 $u_k$ 、卫星矢径 $r_k$ 和轨道倾角 $i_k$

$$\begin{cases} u_k = \Phi_k + \delta u \\ r_k = a(1 - e \cos E_k) + \delta r \\ i_k = i_0 + \delta i + \dot{I} \cdot t_k \end{cases} \quad (3-32)$$

9、计算卫星在轨道平面坐标系中的坐标

$$\begin{cases} x_k = r_k \cos u_k \\ y_k = r_k \sin u_k \end{cases} \quad (3-33)$$

10、计算观测时刻升交点经度 $\Omega_k$

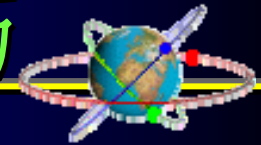
$$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - w_e)t_k - w_e t_{0e} \quad (3-34)$$

$w_e = 7.29211567 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ , 为地球自转的速率, 其它有关参数从电文中得到。

11、计算卫星在地固坐标系中的空间直角坐标

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \cos \Omega_k - y_k \cos i_k \sin \Omega_k \\ x_k \sin \Omega_k + y_k \cos i_k \cos \Omega_k \\ y_k \sin i_k \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

### 第三章 卫星运动基础及GPS卫星星历



#### 12、计算卫星在协议地球坐标系中的空间直角坐标

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CTS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_p \\ 0 & 1 & -Y_p \\ -X_p & Y_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

其中， $X_p$ 、 $Y_p$ 为地极瞬时坐标。

在GPS定位中，轨道平面坐标系的 $x$ 轴指向升交点， $y$ 轴垂直于 $x$ 轴指向地极北方向，原点位于地球质心。（ √ ）

——本章结束