

# 1. 时间

## 1.1 各种时间的定义

### 1.1.1 恒星时

定义：以春分点的周日视运动为依据建立的时间系统。（看恒星）

时间单位：恒星日—春分点连续两次上中天的时间间隔。

起始点：上中天

恒星时在数值上等于春分点的时角： $S = t_r = \alpha + t$

（这个公式起初很令人费解，需要认识到春分点是会周日视运动的，式中的 $\alpha$ 和 $t$ 都是任意一颗恒星的位置，不是春分点的位置 $t_r$ 才是春分点的时角）

### 1.1.2 真太阳时

定义：以太阳视圆面中心的周日视运动为依据建立的时间系统。（看太阳）

时间单位：真太阳日—真太阳连续两次下中天的时间间隔。

起始点：下中天

以真太阳的时角度量： $m_{\odot} = t_{\odot} + 12^h = t + 12^h$ （加秒来自于下中天和上中天的差）

真太阳日比恒星日每日长约4min： $s \approx m_{\odot} + 3^m 56^s$ （这里与课上讲的不同，时间长度的比较应为时间段而非时间坐标，否则会导致令人困惑的误会）

真太阳时的缺陷：太阳在黄道上的运动不均匀且黄赤交角的存在导致投影在赤道上的太阳时角变化不均匀。

### 1.1.3 平太阳时

平太阳：

第一个辅助点：在黄道上均匀运动，速度等于真太阳的平均速度，并与真太阳同时过近日点和远日点。

第二个辅助点：在赤道上匀速运动，其速度等于真太阳的平均速度，与第一辅助点同时过春分点和秋分点。（即黄赤道交点，实际是很自然的）

第二个辅助点为在赤道上做匀速运动的平太阳。

定义：以平太阳的周日视运动为依据建立的时间系统。

时间单位：平太阳日—平太阳连续两次下中天的时间间隔。

起始点：下中天

以平太阳的时角度量： $m = t_m + 12^h$ （加秒来自于下中天和上中天的差）

恒星时和平太阳时的关系：秋分时相差 $0^h$ ，春分时二者相差 $12^h$ 。（这也来自于起始点的不同）

## 1.1.4 地方时

定义：以本地子午面为起算平面，根据任意量时天体所确定的时间，是按本地经度测定的时刻。

地方时与地方经度的关系：在同一计时系统内，任意两地同一瞬间测得的地方时之差，在数值上等于这两地的地方经度之差。

## 1.1.5 世界时

定义：以本初子午线为标准的地方时为世界时。

东正西负，因为天体自东向西转，在更东边能更早看到星星，则更西边的要比东边的晚点，如东边01:00时看到星星，西边的也该01:00看到，但西边现在还没看到，因为现在西边的时间是00:00，还早着呢！！

## 1.1.6 区时

定义：把全球分成24个时区，每区跨经度15度，各区把中央经线的地方时作为本区统一使用的标准时。平时说的时区就是这个。

## 1.1.7 回归年

定义：平太阳连续两次过春分点的时间间隔。

问：难道太阳不是每天都过春分点吗？

答：不对，太阳是走大圆，走的是黄道，但一年才走一圈，其余的时候不在几个大圆的交点，所以因为自转走的不是大圆，可以和恒星的周日视运动联系起来。

$$1 \text{ 回归年} = 365.2422 \text{ 平太阳日} = 366.2422 \text{ 恒星日}$$

## 1.1.8 儒略日(JD)

儒略日以公元前4713年（公元前1年在天文上记为0年，公元前4713年在天文上记为-4212年）1月1日格林尼治平时12h为起算点，连续不断地计数下去。

简化儒略日(MJD)：它的起算点为1858年11月17日世界时0h，对应的儒略日是2400000.5日，有公式  $MJD = JD - 2400000.5$

一儒略年为365.25日

J2000：标准历元为2000年1月1.5日TDB

## 1.2 时间的换算

### 1.2.1 恒星时与平时（平太阳时）的换算

恒星时与平太阳时的区别：时间单位（一日的长度）不同，起始点不同（上中天，下中天）

时间间隔的换算：

$$1 \text{ 回归年} = 365.2422 \text{ 平太阳日} = 366.2422 \text{ 恒星日}$$

$$\therefore 1 \text{ 恒星日} = \frac{365.2422}{366.2422} \text{ 平太阳日}$$

已知地方平时求地方恒星时：

$$\begin{aligned} s &\equiv S + \lambda \\ &= S_0 + M(1 + \mu) + \lambda \\ &= S_0 + (m - \lambda)(1 + \mu) + \lambda \\ &= S_0 + m + (m - \lambda)\mu \end{aligned}$$

$$\text{其中 } \mu = \frac{1}{365.2422}$$

上式的解读为：

地方恒星时 $\equiv$ 格林尼治恒星时 + 地方经度

$$\begin{aligned} &= \text{世界时(格林尼治平时)0时的恒星时} + \text{格林尼治现在的平时} \times \text{平时转恒} \\ &= \text{世界时(格林尼治平时)0时的恒星时} + (\text{地方平时回到格林尼治平时}) \times \\ &= S_0 + m + (m - \lambda)\mu \end{aligned}$$

单位换算 (基底变换和坐标变换) :

$$365.2422 \times \text{平太阳日} = 366.2422 \times \text{恒星日}$$

现在要从平太阳时的基底变换到恒星时的基底, 单位小了, 时间坐标应该变大, 故  $\times$

用同样的道理可以已知地方恒星时求地方平时:

$$m \equiv M + \lambda = M_0 + s - (s - \lambda)\nu$$

平时时刻与恒星时刻的换算:

因为本质上是时间间隔的不同, 故需找到一个相同的基准点, 走相同的时间差, 计算由于单位造成的数值上的不同。

$$\text{格林尼治 } \lambda = 0 : S = S_0 + M(1 + \mu)$$

$$M = M_0 + S(1 - \nu)$$

$$\text{任意经度 } \lambda \neq 0 : s = S_0 + (m - \lambda)(1 + \mu) + \lambda$$

$$m = M_0 + (s - \lambda)(1 - \nu) + \lambda$$

这其实在上面已经讲得很清楚了。

## 1.3 现代时间服务

### 1.3.1 世界时(Universal Time, UT)

定义:  $\lambda = 0^\circ$  的地方平时 M

$$\text{测定: } UT = t_m + 12^h = (S - \alpha_m) + 12^h$$

式中  $t_m$  为平太阳的时角, 而  $t_m = (S - \alpha_m)$  来源于“恒星时在数值上等于春分点的时角:  $S = t_r = \alpha + t''$ ”

然而地球存在极移与自转不均匀, 导致时间间隔不同, 需要调整

三种UT系统:

- $UT_0$ : 观测恒星时, 恒星时转换平时。天文台直接测量的结果(Now GPS)。
- $UT_1$ : 在  $UT_0$  基础上修正地极移动引起的观测站经度变化。这是我们通常所说的UT。 ( $UT_1 = UT_0 + \Delta\lambda$ )

- $UT_2$ : 在 $UT_1$ 基础上修正地球自转速率季节性变化,  $UT_2$ 是比较均匀的计时系统, 由于地球自转还有长期变化和不规则变化, 所以只是比较均匀。 $UT_2$ 系统不仅含有地球自转的长期变化及不规则变化, 同时还受经验改正 $\Delta T_s$ 不够严格的影响, 它并非是一个均匀的时间计量系统。  
( $UT_2 = UT_1 + \Delta T_s$ )

### 1.3.2 历书时(ET)

定义: 以地球公转为依据, 由力学定律确定的均匀时间。

时间单位: 1回归年 (1900年回归年长度) = 365.2422历书日

起算历元: 1900年1月0日12时 (公历1899.12.31)

历书时的测定: 在UT的某一瞬间, 观测太阳位置, 再对照太阳历表, 找出对应的时间。

$ET = UT_2 + \Delta T'$ 修正了UT的长期与不规则变化

历书时均匀但观测复杂且精度不高。

### 1.3.3 原子时(TAI, AT)

定义: 以原子内部的运动规律为基础建立的时间计量系统。

时间单位: 原子时秒(SI): 铯原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射9192631770个周期的持续时间。(以ET秒长定义)

起始点: 为1958年1月1日 $UT_0^h$ , 即规定此瞬间原子时AT与世界时UT重合。(事后发现当初取的这一瞬间并非重合, 而是相差了 $-0^s.0039$ , 并一直保留下来。)

$UT = AT - 0^s.0039$

$ET = AT + 32^s.84$

**原子时秒长=历书时秒长**, 原子时与历书时之间的差值是个常数。(因为原子时秒长是用历书时秒长来度量铯原子钟频率的结果, 而且不仅相等, 而且都是均匀的)

原子时和世界时之差差距将随时间愈来愈大, 原因: 世界时有长期变慢的趋势(地球自转长期变慢)

### 1.3.4 协调世界时(UTC)

定义：引入UTC系统，其时间单位用SI秒，其时刻与UT1的偏离保持在0.9秒内，保持方法为跳秒。

时间单位：原子时秒 (SI)

跳秒：UTC频繁跳秒给民用也带来了不便，国际上在争论是否取消跳秒的问题。

### 1.3.5 GPS时间

GPS时间属于原子时，其时间单位（尺度）与原子时相同，但时间的起算原点与国际原子时并不相同。GPS时间与协调时在1980年1月6日0时相一致，随年月累积，到1995相差已有10秒。

### 1.3.6 坐标时（动力学时）

根据相对论原理任何坐标系都有自己的时间系统，以及每个坐标系都有自己的坐标时。

- 地球动力学时(TDT, TT) -> 地心坐标系
- 质心动力学时(TDB) -> 日心坐标系（太阳系质心）

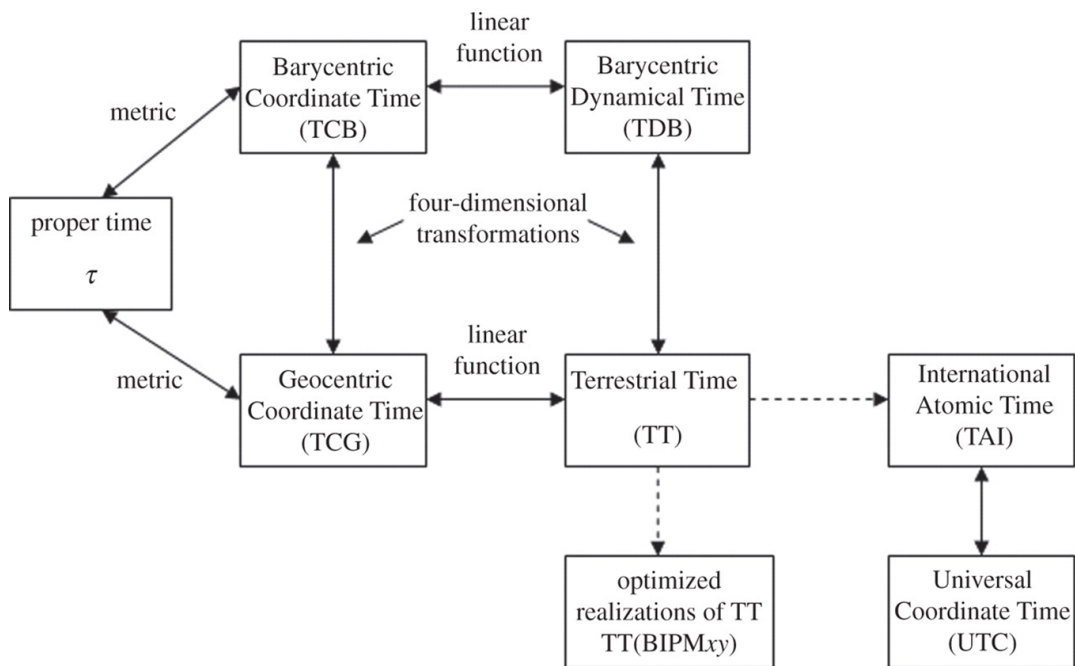
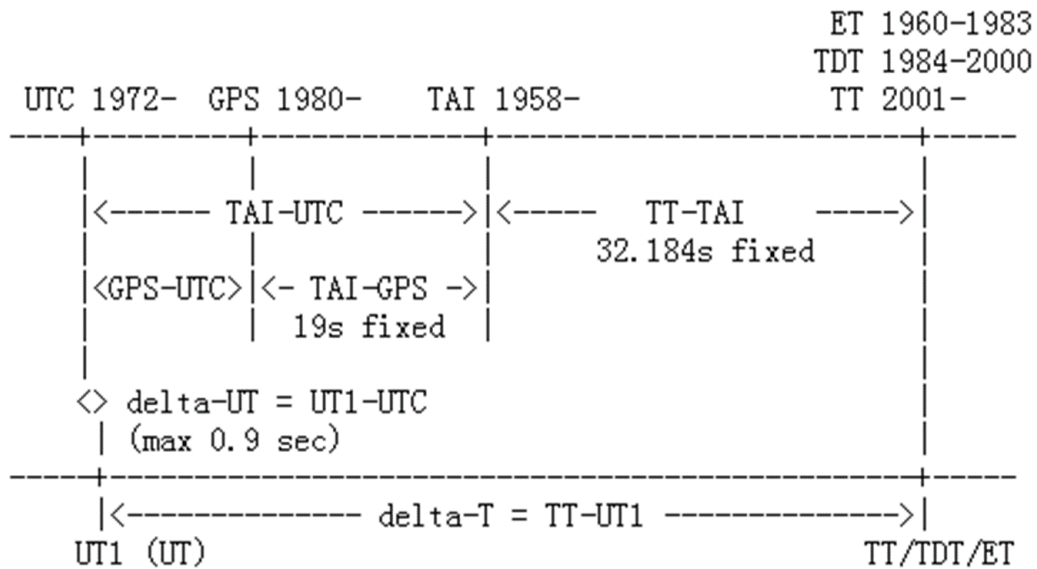
$$TDT = TAI + 32^s.184$$

- 若原子钟移到太阳质心，则有太阳系质心坐标时TCB。
- 若原子钟移到地球质心，则有地心坐标时TCG。

目前DE系列均为TDB时间系统。

总结：太阳系质心参考系：TCB TDB；地心参考系：TCG TT

### 1.3.7 现代时间服务总结



## 2. 参考系

### 2.1 天球参考系

#### 2.1.1 旧惯性参考系 (恒星参考系)

恒星坐标系理论上只有岁差旋转，只要知道岁差的绝对旋转运动，就可以过渡到惯性参考系。

如何实现惯性参考系：

- 根据恒星位置的观测建立天球基本坐标系。（FK4, FK5）

- 根据太阳和行星的观测，测得天球基本坐标系的分点和赤道改正
- 岁差常数的精确测定
- 根据恒星位置的长期观测或相对河外星系的观测，求得恒星自行系统改正值

恒星坐标系：它是以天球上的恒星作为它的实体来建立的，采用的基准点是恒星。（如依巴谷-第谷星表，FK5星表，GAIA）

恒星坐标系不仅包含岁差，还包括太阳和太阳系运动的影响

岁差：一种天文学现象。它是指地球自转轴长期进动，引起春分点沿黄道西移，致使回归年短于恒星年的现象。

## 2.1.2 经典天球参考系-恒星参考系

20世纪，经典天球参考系基本上都是通过一系列所谓的基本星表来实现的，如依巴谷-第谷星表（Tycho-2），FK5星表，GAIA 都属于经典恒星参考系。

## 2.1.3 太阳系质心动力学参考系、架

太阳系历表：

- DE：美国
- EPM：俄罗斯
- INPOP：法国

半解析历表：VSOP

春分点和天赤道：春分点是赤道和黄道的交点，在天空中无任何标志，需要观测太阳系天体确定。天赤道是根据不同历元对大量恒星的观测确定的。

## 2.1.4 新天球参考系

CCRS：恒星参考系来建立惯性参考系，需要假设一个太阳系模型或地球模型来作为依据，同时要确定一套参数，因此被称为**协议的准惯性参考系 CCRS**。

协议的准惯性参考系的实现：

- 天球基本参考系：FK5，依巴谷（运动学方法，以恒星为“基准点”）
- 动力学参考系（太阳系天体）：JPL历表（动力学方法，以天体运动理论为基础，通过计算天体的位置来确定基准点）



- 射电参考系（河外射电源）VLBI: ICRF（非常遥远，视运动远小于其位置精度，几何学方法，假定“基准点”在空间方向是固定不变的）

## 2.1.5 国际天球参考系 ICRS

- 基于赤道坐标系建立
- 以河外射电源为参考源所实现的天球参考系，坐标原点在太阳系质心，轴的指向在太空中是固定的。
- 依巴谷星表是ICRS在光学波段的实现
- ICRS基本平面接近J2000.0平赤道，与J2000.0动力学参考系相差在0.02arcsec以内，二者可以通过一个常矩阵B来相互转换。

当前国际推荐的ICRS以ICRF的形式实现：ICRS的定义是直接由遥远、静止的射电源表来定义的，这个射电源表称为国际天球参考框架（ICRF）

J2000坐标系：常被称为J2000平赤道地心坐标系。其原点在地球质心，x y 平面为J2000时刻的地球平赤道面，x轴指向J2000时刻的平春分点（J2000时刻平赤道面与平黄道面的一个交点）。其实就是在J2000时的赤道坐标系。

上述描述采用“接近”的原因：基于目前采用的岁差章动模型（IAU2000B），人们发现ICRS与上述提及的J2000.0平赤道坐标系存在参架偏差(Frame bias)。

Frame Bias 可以用常数矩阵 B 修正：

$$B = R_1(-\eta_0)R_2(\xi_0)R_3(d\alpha_0)$$

这是三个小角度的旋转

## 2.1.6 BCRS & GCRS

BCRS：太阳系质心天球参考系，描述恒星和行星运动

GCRS：地球质心天球参考系，用于描述地球自转运动、人造卫星轨道以及其它大地测量的量

BCRS和GCRS间不存在旋转运动，但除坐标原点不同外，还采用了不同的坐标时系统。它们之间的时空坐标转换由四维相对论转换决定。

近似地，BCRS和GCRS的变换可以看作是将坐标原点从太阳系质心平移到地球质心，亦即修正周年视差的过程。

## 2.1.7 GAIA-CRF2

首次实现非旋转-光学参考系，仅使用河外来源。

## 2.2 地球参考系

---

### 2.2.1 国际地球参考系 ITRS

- ITRS的原点是地球质心，X轴指向与国际时间局定义的指向一致，亦即现在常说的地固坐标系。
- 默认采用三维笛卡尔坐标，为了与大地测量和传统应用技术服务的历史衔接和便利，也可采用各类球面坐标系表述点位位置（如，WGS84的参考椭球）
- ITRS以国际地球参考架ITRF的形式实现。

### 2.2.2 地固坐标系（地球坐标系）

- 参心地固坐标系：以参考椭球为基准的坐标系，与地球体固连在一起且与地球同步运动，参考椭球的中心为原点的坐标系。
- 地心地固坐标系：以总地球椭球为基准的坐标系，与地球体固连在一起且与地球同步运动，地心为原点的坐标系。

地面上点坐标在地固坐标系中不变，在天球坐标系中是变化的。

### 2.2.3 WGS-84大地坐标系

WGS-84理论上是以地球质心为坐标原点的地固坐标系。

坐标参数为测地经纬度 $L$ ， $B$ 和大地高 $H$ 。

地心纬度：球上的点与地心连线和赤道的夹角。

测地纬度：参考椭球在球上一点的法线和赤道的夹角。

天文纬度：通过台站的铅垂线和赤道的夹角。

### 2.2.4 从WGS-84到地固系的转换

$$x = (N + H) \cos B \cos L$$

$$y = (N + H) \cos B \sin L$$

$$z = [N(1 - f^2) + H] \sin B$$

其中  $N = \frac{a}{\sqrt{1 - f^2 \sin^2 B}}$ ,  $f$  为椭球扁率.