

# 第三讲 坐标系与坐标框架

郭金运

E-mail:

Office: J6-453



# 主要内容

- 坐标系与坐标框架
- 天球坐标系
- 地球坐标系
- 大地测量基准
- 卫星坐标系
- 轨道坐标系

- ▶ 熊介. 椭球大地测量学. 北京: 解放军出版社, 1988
- ▶ 朱华统. 常用大地坐标系及其变换. 北京: 解放军出版社, 1990
- ▶ 孔祥元, 梅是义. 控制测量学. 武汉测绘科技大学出版社, 1996
- ▶ 张凤举等. 控制测量学. 北京: 煤炭工业出版社, 1999
- ▶ IERS、IGS、IAU、IAG、IVS、IDS、ILRS

# 坐标系与坐标框架



- **坐标系**：由明确的物理概念和严格的数学模型来定义的。
- **坐标框架**：由一组点的坐标和速度来实现的，是坐标系的详细实现。
- **FK4参照系**是基于纽康姆理论中的黄道、岁差和伍拉德章动来定义的，而**FK4参照架**就是涉及1535颗基本星的**FK4星表**。
- **ICRS参照系**，它是由遥远的河外射电源构成无旋转的准惯性参照系，而这是由**IERS**分析全球**VLBI**观察所得到的一组射电源的坐标来实现，如**RSC (WGRF) 95R01**。



- 为了描述天体在空间的运动，一般用以**太阳系质心为原点的天球参照架**，如ICRF、依巴谷星表、FK5等。
- 描述地面上点的运动一般用以**地球质心为原点的地面参照架**，如ITRF、NWL9D、GRS80等。

在讨论天然卫星如月球，或人造卫星LAGEOS I、II等运动时能够在太阳系质心参照系BRS或地心参照系GRS中讨论，而天球参照架能够有运动学的，也能够有动力学的。



- 伴随国家经济和国防的需要，各国都有自己的大地测量坐标框架，如我国在20世纪70年代建立的天文大地测量网，美国国防部（DMA）在开展DOPPLER观察的基础上建立了NWL9D，法国空间中心的MEDOC观察网，采用了MEDOC地面参照架。



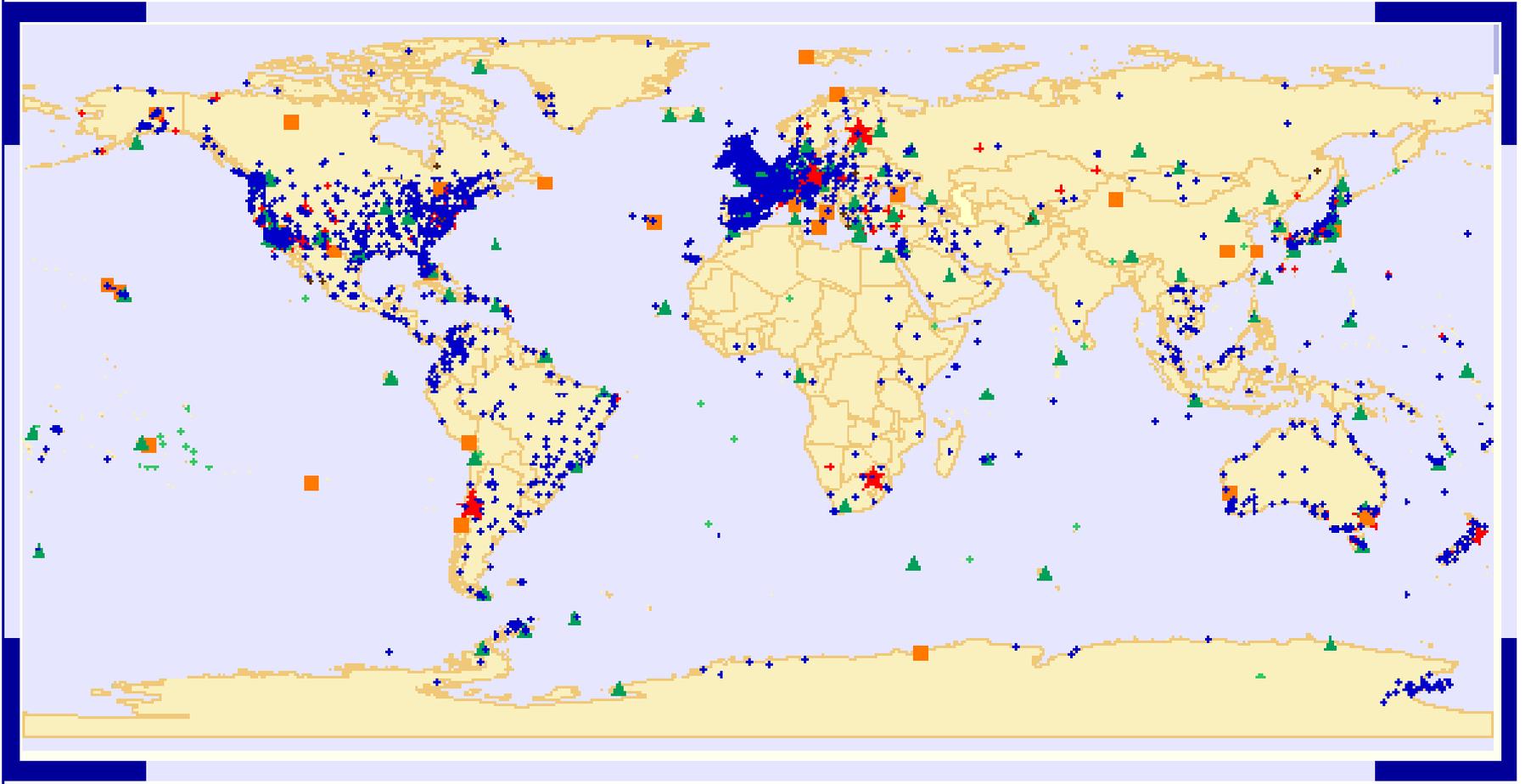


- 为了全球参照架的统一，有GRS80和IERS在1987年建立的BTS87，后来法国地理局根据多种技术给出了涉及全球200个台站的ITRF93、ITRF94等等

系统1	系统2	TX (m)	TY (m)	TZ (m)	D (m)	R1 (m)	R2 (m)	R3 (m)
BTS87	SSC(DMA)7 7D01	0.071	-0.509	-4.666	0.5827	0.0179	-0.0005	-0.8073
NWL9D	WGS72	0.000	0.000	0.000	-0.8300	0.0000	0.0000	0.2600
WGS72	WGS84	0.000	0.000	4.000	0.2198	0.0000	0.0000	0.5540
SSC(DM)77S 01	WGS84	0.000	0.000	4.500	-0.6000	0.0000	0.0000	0.8140
BTS87	WGS84	0.071	-0.509	-0.166	-0.0173	0.0179	-0.0005	0.0067

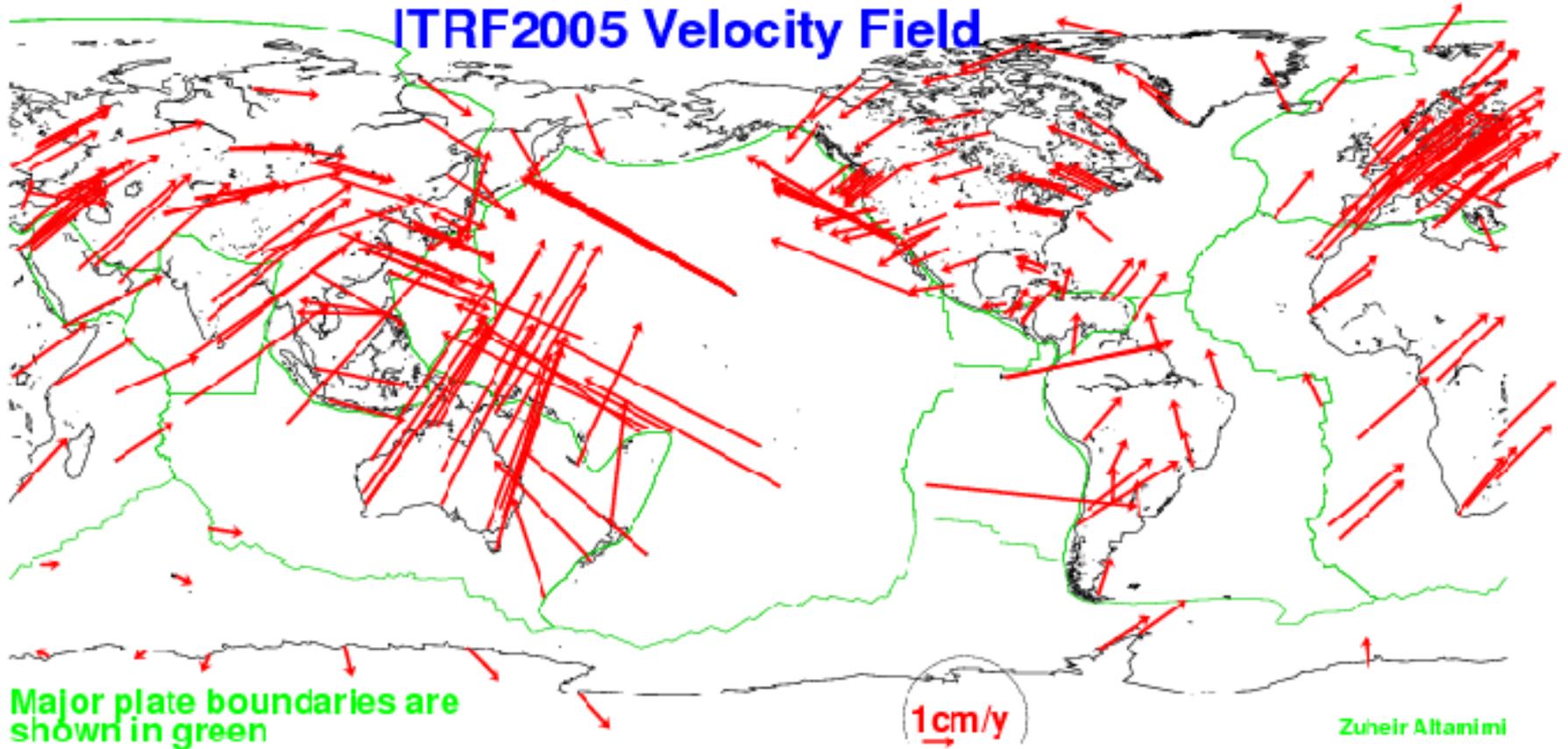
# ITRF

吉祥如



吉祥如

# ITRF2005 Velocity Field



Major plate boundaries are shown in green

1cm/y

Zuheir Altanimi



- 在地面上观察到物体或天体的坐标是以**观察者**为中心的点和面构成的直角坐标或球面坐标。
- 在研究银河系构造和运动，那么银道坐标更为优越，其点和面分别为**北银极和银道面**。
- 在岁差和章动的研究中经常使用**黄道坐标**，其点和面分别为北黄极和黄道



- 物体和天体运动的描述必须在质心坐标架和地心坐标架中进行，所以观察到的坐标归算至地心和质心，需考虑光行差和视差的影响。
- 把地心坐标归算至质心坐标架，需要自转矩阵和极移；
- 要从观察历元的质心坐标化算至历元B1950或J2003，就要考虑岁差和章动。

吉祥

# 天球坐标系



- **天球坐标系** 是用以描述自然天体和人造天体在空间的位置或者方向的一种坐标系。根据所选用的坐标原点的不同可分为站心天球坐标系、地心天球坐标系和太阳系质心天球坐标系等。



■ 在经典的天文学中，因为观察者至天体之间的距离无法精确测定，只能精确测定其方向，因而总是将天体投影到天球上，然后再用一种球面坐标系来描述该天体在天球上的位置及其运动情况。这种球面坐标系中，总是选用一种大圆作为**基圈**，该基圈的极点称为**基点**。过基圈的两个极点的大圆皆与基圈垂直。选用其中一种圆作为**主圈**，其他的大圆为**副圈**。主圈和基圈的交点称为**主点**。

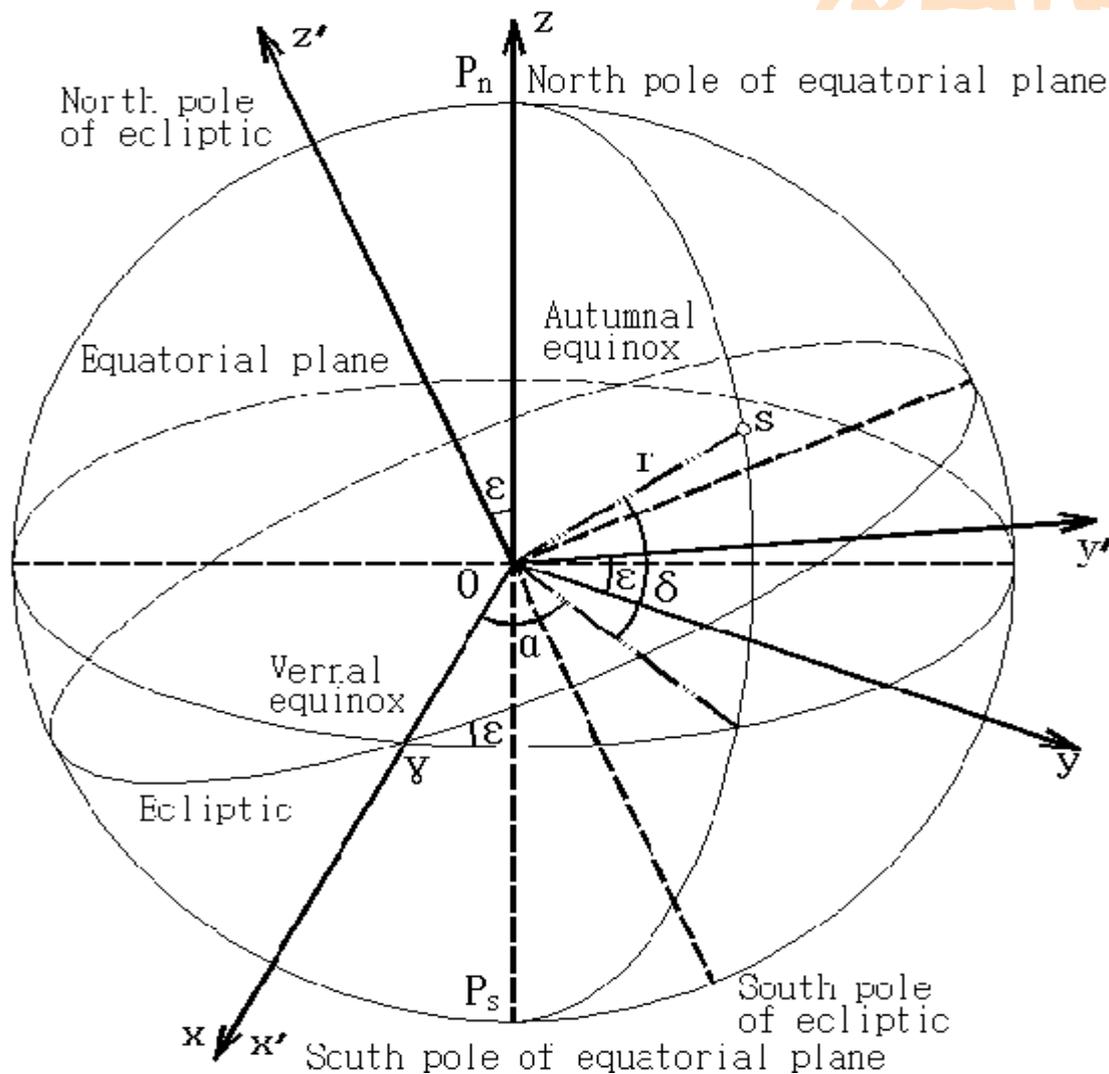
■ 过任一天体S的副圈平面与主圈平面之间的夹角称为**经度**，从球心至天体的连线与基圈平面之间的夹角称为**纬度**。纬度和经度就表达了天体位置的球面坐标的两个参数

- **地平坐标系**：地平圈作为基圈，以天顶作为基点，子午圈作为主圈，以南点（北点）作为主点，用高度角或者天顶距以及天文方位角表达天体的方位。
- **黄道坐标系**：黄道作为基圈，以黄极作为基点，过春分点的黄经圈作为主圈，以春分点作为主点，用黄经、黄纬来描述天体在空间的方位。
- **赤道坐标系**：天球赤道作为基圈，以北天极作为基点，过春分点的子午圈作为主圈，以春分点为主点。用赤经、赤纬描述天体的方位。

- 为了以便，有时还需要采用**空间直角坐标系**来表达天体在空间的位置，采用空间直角坐标系以便于坐标系之间的转换。当空间直角坐标系的坐标原点位于天球球心，Z轴指向天球坐标系的基点，X轴指向天球坐标系的主点，并构成右手坐标系，空间直角坐标（X，Y，Z）和天球极坐标之间的关系为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta \\ \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \varphi \end{bmatrix}$$

- 天球坐标系与地球自转和地球围绕太阳的公转有关，所以可分为**天球赤道坐标系**和**天球黄道坐标系**。



设有一天体  $s$ ，在天球赤道坐标系和天球黄道坐标系中的坐标分别为  $\mathbf{r} = [x \ y \ z]^T$  和

$\mathbf{r}' = [x' \ y' \ z']^T$ 。由于赤道面和黄道面之间的夹角就是黄赤交角  $\varepsilon$ ， $\varepsilon = 23^\circ 26' 21.448''$ ，以  $x$  轴

为旋转轴，逆时针旋转  $\varepsilon$  角，天球赤道坐标系就变为天球黄道坐标系，因此  $\mathbf{r}$  和  $\mathbf{r}'$  之间的关系为

$$\mathbf{r}' = \mathbf{R}_x(\varepsilon)\mathbf{r} \quad (2.2.1)$$

式中， $\mathbf{R}_x(\varepsilon)$  为绕  $x$  轴的旋转矩阵， $\mathbf{R}_x(\varepsilon) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ 0 & \sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{bmatrix}$ 。



- 任一天体的位置，在天球坐标系中，即可用天球空间直角坐标系表达，也可用天球球面坐标系描述。上面定义的天球赤道坐标系和天球黄道坐标系属于天球空间直角坐标系。

设有一天体  $s$ ，其天球球面坐标为  $[r \ \delta \ \alpha]$ 。那么，天球球面坐标系的定义为：原点为地球

质心  $O$ ，赤经  $\alpha$  为过天轴  $P_n P_s$  和春分点  $\gamma$  的天球子午面与过天体  $s$  和天轴  $P_n P_s$  的天球子午面之间的夹角，赤纬  $\delta$  为地球质心  $O$  至天体  $s$  的连线与天球赤道面之间的夹角，向径  $r$  为原点  $O$  至天体  $s$  的距离，



天体  $s$  的天球直角坐标  $\mathbf{r}$  与天球球面坐标  $[r \ \delta \ \alpha]$  之间的关系为

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} r \\ \alpha \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \arctan \frac{y}{x} \\ \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{bmatrix}$$

可得  $\mathbf{r}'$  与  $[r' \ \alpha' \ \delta']$  之间的关系为

$$\mathbf{r}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = r' \mathbf{R}_x(\varepsilon) \begin{bmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} r' \\ \alpha' \\ \delta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x')^2 + (y')^2 + (z')^2} \\ \arctan \frac{y' \cos \varepsilon - z' \sin \varepsilon}{x'} \\ \arctan \frac{y' \sin \varepsilon + z' \cos \varepsilon}{\sqrt{(x')^2 + (y' \cos \varepsilon - z' \sin \varepsilon)^2}} \end{bmatrix}$$

# 瞬时天球赤道坐标系



- 以瞬时北天极作为基点，以瞬时天球赤道作为基圈，以瞬时春分点作为主点，以过瞬时春分点和瞬时北天极的子午圈作为主圈，建立的天球坐标系就是**瞬时天球赤道坐标系**，是以天球极坐标表达天体的位置。
- 坐标原点位于天球中心，Z轴指向瞬时北天极，X轴指向瞬时春分点（真春分点），XYZ构成右手坐标系，是**瞬时天球坐标系的空间直角坐标形式**。
- Z轴指向真北天极，X轴指向真春分点，XY平面是真天球赤道，所以瞬时天球赤道坐标系也称为**真天球坐标系**。



# 平天球赤道坐标系



- **平天球赤道坐标系**是只顾及岁差而不顾及章动所建立的天球坐标系。只考虑岁差而不考虑章动所得的天极是平天极。平天球赤道坐标系中的 $Z$ 轴指向历元平天极， $X$ 轴和 $Y$ 轴则位于与之相应的平天球赤道面上， $X$ 轴指向平春分点，构成右手坐标系。
- 因为章动，平天球坐标系中的三个坐标轴指向依然在变化，所以这种坐标系也不宜用来表达天体的最终位置和方位。



# 协议天球坐标系



- 为了建立一种全球统一的、国际公认的空间固定坐标系，IAU决定：采用J1950.0（JD2433282.5）的平北天极作为协议天球坐标系的基点，以该历元的平天球赤道作为基圈，以J1950.0的平春分点作为主点，以过该历元的平天极和平春分点的子午圈作为主圈，这么建立的J1950.0的平天球赤道坐标系作为**协议天球坐标系**，又称国际天球参照系（International Celestial Reference System, ICRS）。

任一时刻的观察成果需要进行岁差和章动的改正，归算至协议天球坐标系后，才干在一种统一的坐标系中进行比较。

- 伴随时间的推移，IAU又决定从1984年其ICRS改用J2023.0（0）的平天球坐标系作为国际天球参照系，以降低岁差改正时的时间间隔。



# 协议天球坐标系



通常选择某一时刻  $t_0$  作为起始历元，经过岁差和章动改正之后，将历元  $t_0$  的地球自转轴指向作

为  $z$  轴，地球质心至历元  $t_0$  的春分点的方向作为  $x$  轴， $y$  轴垂直于  $t_0$  时的赤道面，构成的右手坐标

系称为协议天球坐标系，这是一个协议惯性坐标系。

- 国际大地测量学协会（IAG）和国际天文学联合会（IAU）决定，从1984年1月1日开始启用的协议天球坐标系，其坐标轴的**指向由原则历元J2023的赤道和春分点所定义**。
- 1991年，IAU决定建立新的国际天球参照系（ICRS），并从1998年开始使用。
- ICRS的原点为太阳系质心，坐标轴是由河外射电源定义，要求ICRS没有整体旋转，原则历元为J2023。ICRS的实现称为国际天球参照框架（ICRF），由国际地球自转服务组织（IERS）和IAU的参照框架工作组负责维持ICRF，主要技术是VLBI和LLR。



协议天球坐标系与瞬时天球坐标系的差别，在于由岁差和章动引起的坐标轴指向不同

在时刻  $t$ ，设协议天球坐标为  $\mathbf{r}_{\text{ICRS}}$ ，瞬时天球坐标为  $\mathbf{r}_t$ ，它们之间的关系为

$$\mathbf{r}_t = \mathbf{N}(t)\mathbf{P}(t)\mathbf{r}_{\text{ICRS}}$$

式中， $\mathbf{P}(t)$ 为岁差变换矩阵； $\mathbf{N}(t)$ 为章动变换矩阵。



协议天球坐标系的标准历元为 J2000，在历元  $t$  的平赤道和平春分点与历元 J2000 的赤道和春分点之间的关系用三个角度  $\zeta$ ， $\vartheta$  和  $\zeta$  表示，即

$$\zeta = 2306.2181''T + 0.30188''T^2 + 0.017998''T^3$$

$$\vartheta = 2004.3109''T - 0.42665''T^2 - 0.041833''T^3$$

$$\zeta = \zeta + 0.79280''T^2 + 0.000205''T^3$$



■ 式中， $T$ 为从J2000到时刻相应的Julian世纪数；

■ 儒略历是公元前罗马皇帝儒略·凯撒所实

■ 岁差矩阵

$$\mathbf{P} = (P_{..}) = \mathbf{R}(-90^\circ - \epsilon) \mathbf{R}(\vartheta) \mathbf{R}(90^\circ - \epsilon) = \mathbf{R}(-\epsilon) \mathbf{R}(\vartheta) \mathbf{R}(-\epsilon)$$

■ 章动矩阵

$$\mathbf{N} = (N_{..}) = \mathbf{R}(-\epsilon - \Lambda\epsilon) \mathbf{R}(-\Lambda\psi) \mathbf{R}(\epsilon)$$



图 2.3.2 IERS 的 Bulletin B 范例

BULLETIN B 199

1 September 2004

Contents are described in the Explanatory Supplement available at  
<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>

1 - EARTH ORIENTATION PARAMETERS (IERS evaluation).

The values in this section are samplings of section 2 given at five-day intervals.

Date	MJD	x	y	UT1R-UTC	UT1R-TAI	<u>dPsi</u>	<u>dEpsilon</u>
2004		"	"	s	s	0.001"	0.001"
(0h UTC)							

Final Bulletin B values.

JUL	<u>3</u>	<u>53189</u>	-.00175	.51171	-.467829	-32.467829	-57.9	-5.1
JUL	<u>8</u>	<u>53194</u>	.00968	.51175	-.465262	-32.465262	-58.1	-4.5
JUL	<u>13</u>	<u>53199</u>	.02434	.51877	-.462514	-32.462514	-59.6	-4.5
JUL	<u>18</u>	<u>53204</u>	.03597	.52075	-.460287	-32.460287	-59.9	-5.2
JUL	<u>23</u>	<u>53209</u>	.05024	.51941	-.458058	-32.458058	-60.2	-4.6
JUL	<u>28</u>	<u>53214</u>	.06401	.51856	-.456102	-32.456103	-62.0	-4.5
AUG	<u>2</u>	<u>53219</u>	.07551	.51560	-.454321	-32.454321	-61.3	-5.0

# 国际天球参照框架 (International Celestial Reference Frame, ICRF)

- 根据IAU1991年决策：ICRS是由IERS建立的ICRF予以实现。根据坐标原点不同，ICRS可分为BCRS和GCRS。BCRS的坐标原点位于太阳系质心，GCRS的原点位于地球质心。坐标轴的指向是由VLBI所拟定的一组河外射电源在J2000.0的天球赤道坐标来予以定义。该坐标框架的稳定性是根据下列假设的：河外类星体的方位在长时间内保持足够的稳定，无可见的变化。
- FK5星表，依巴谷 (Hipparcos) 星表，Tycho，UCAC

# 站心天球坐标系



- 坐标原点位于测站标石中心或者仪器中心的天球坐标系称为**站心天球坐标系**，也称测站天球坐标系。
- 对天体的观察只能在地面测站或者卫星上进行，无法在地心或者太阳系质心上进行，所以地心天球坐标系或者日心天球坐标系中的天体位置只能经过在测站上进行观察，然后再经过归算才干取得。
- 根据距离的不同，上述归算工作一般可采用两种措施：
  - 对于距离遥远的天体，可采用较为简朴的归心改正措施，即周日视差改正和周年视差改正。
  - 对于卫星等距离地球较近的天体而言，一般采用坐标转换等较为严格的措施进行归算。



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/686113052210010230>