第11卷 第4期 空间科学学报 Vol. 11, No. 4
1991年10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 1991

依巴谷卫星资料处理中的参考架*

凌 兆 芬
(南京大学天文系)

摘 要

本文从依巴谷卫星扫描观测原理出发，给出对日参考架、扫描大圆参考架和望远镜参考架的明确定义；指出 FAST 和N DAC 两个卫星资料处理中心之间所用参考架的差异；并选择 50 颗全天均匀分布的恒星进行了模拟计算，讨论了欧洲空间局利用两个资料处理中心的意义.

关键词 空间天体测量，依巴谷卫星

一、概 述

欧洲空间局 (ESA) 在 1989 年 8 月发射了专用于空间天体测量卫星——依巴谷 (HIPPARCOS) 卫星. 计划在两年半时间内观测 12 万颗亮于 13 等的恒星，获得其位置、视差和自行，精度分别为 2mas、2mas 和 2mas/a[1]. 利用多次叠代的方法建立起全天均匀覆盖的恒星坐标网络. 在依巴谷卫星观测和数据处理过程中，涉及到几个重要的参考架 (Reference Frame)，给出这些参考架的明确定义，以及它们之间的关系，对理解空间天体测量的基本原理和掌握依巴谷卫星观测资料的处理方法是有益的.

为了描述依巴谷卫星扫描观测和便于复杂的资料处理，引入了对日参考架、扫描大圆参考架和卫星望远镜参考架.

本文从依巴谷卫星扫描观测原理出发，给出这三个参考架的明确定义. 指出 FAST (The Fundamental Astronomy by Space Techniques, Consortium) 和 NDAC (The Northern Data Analysis Consortium) 两个资料处理中心之间所用参考架的差异，并选择了 50 颗全天均匀分布的恒星模拟计算，获得在这两个参考架下的恒星位置，以及讨论了欧洲空间局采用两个资料处理中心的意义.

二、扫 描 观 测

依巴谷卫星有两架口径为 290mm，光轴垂直于自转轴，交角为 58° 的反射望远镜[2]. 卫星自转轴方向与太阳方向的夹角为 43°. 它均匀地绕太阳方向旋转，转速为 6.4 圈每年. 随着太阳的运动，自转轴方向在天空中按旋轮线方向运动. 两架望远镜同时绕自转轴均匀地旋转，转速为 11.25 圈每天. 这两种运动的组合形成了依巴谷卫星的扫描观测

本文于 1990 年 9 月 14 日收到.
* 国家自然科学基金资助项目.

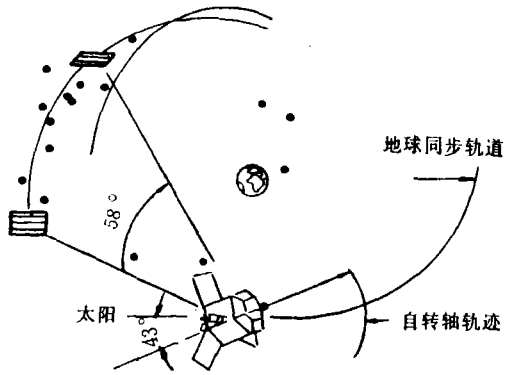

图 1　依巴谷卫星扫描观测示意图

Fig. 1　The Scanning measurement principle of the HIPPARCOS

(参见图 1)．望远镜瞬间扫描天球形成的大圆称之为扫描大圆．在 2.5 年时间内，有 10266 个扫描大圆均匀覆盖全天空．

在扫描观测中，由卫星的光束联合器 (Beam Combiner) 把角距为 58° 的两个视场星象，投影在焦平面的主栅格上(参见图 2)[3]．精确测定投影在主栅格上两个星象的角距，加上基本角 58° 就可以获得这两颗星之间的角距．依巴谷计划观测的 120000 颗星，可获得大约 96×10^5 个角距．利用这些所测量的角距，解恒星的精确位置、自行和视差．

从依巴谷卫星扫描观测可以看出，它是一种相对观测[4]．由依巴谷卫星观测得到的空间参考架，相对于传统的动力学参考架和河外参考架有一个未知的整体旋转．

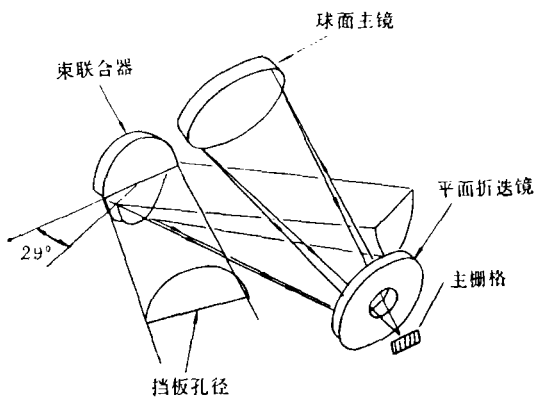

图 2　望远镜光学系统示意图

Fig. 2　The optical system of the telescope

三、对日参考架

由于在扫描观测中，依巴谷卫星的自转轴绕太阳方向运动，因此，利用对日 (Heliotropic Frame) 参考架[5]，把卫星观测资料转换到黄道参考架是方便的．设该参考架的三元组为 $\boldsymbol{H} = [\boldsymbol{S},\boldsymbol{t},\boldsymbol{K}]$，其中 $\boldsymbol{S}$ 为太阳方向的单位矢量，有

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{L}\cos\lambda_s + \boldsymbol{j}\sin\lambda_s. \tag{3.1}$$

其中 $\boldsymbol{L}$ 和 $\boldsymbol{j}$ 是黄道参考架 $\mathscr{K} = [\boldsymbol{L},\boldsymbol{j},\boldsymbol{K}]$ 中的单位矢量．$\boldsymbol{L}$ 是在标准历元 J 2000.0，平春分点方向的单位矢量，λ_s 是标称太阳黄经 (Nominal Sun Longitude)，它由下列方

程给出:

$$\begin{cases}\lambda_s = L + 2e\sin g + \dfrac{5}{4}e^2\sin 2g,\\ L = -1.38691 + 0.0172021240d,\\ g = -0.04114 + 0.0172019696d,\\ e = 0.016714,\\ d = (t - T_{NSL})/(1\text{平太阳日}) + \Delta d(t).\end{cases} \tag{3.2}$$

其中 L 和 g 是太阳平黄经和平近点角，T_{NSL} 是扫描观测的参考历元；确定在1988年1月1日，$12^h00^m00^s$UTC($11^h59^m03^s.816$ TDT)；t 是TDT时以SI为单位[6]。$\Delta d(t)$ 是卫星载钟的累积漂移。从方程(3.2)式的最后一式可以看出，d 的观测日数是从参考历元起算的，单位为平太阳日。

在对日参考架 $\boldsymbol{H} = [\boldsymbol{S}, \boldsymbol{t}, \boldsymbol{K}]$ 中，$\boldsymbol{K}$ 是黄道三元组中的北黄极。而 $\boldsymbol{t} = \boldsymbol{K} \times \boldsymbol{S}$。

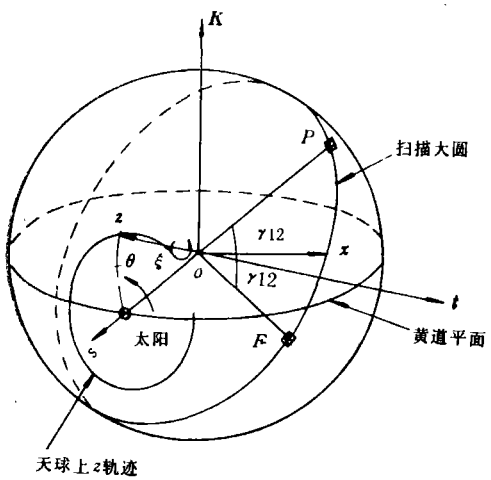

图3 对日参考架示意图

Fig. 3 The Heliotropic Frame

四、大圆参考架

处理依巴谷卫星的观测资料是一项非常艰巨的任务。资料包括恒星的天体测量参数、卫星扫描运动参数和仪器参数。卫星获取资料率为24000bit/s，总计资料为10^{12}bit。把这些资料一起放进计算机，解出120000颗星的位置、自行和视差，几乎是不可能的。在资料处理中，借助于2053个参考大圆，由观测首先获得相对于参考大圆的位置，然后解出这些参考大圆上原点的相对位置，从而获得整个天球上的120000恒星的相对位置。于是，某一瞬间，某一个参考大圆构成了一个大圆参考架。

为了比较、相互校验，以致最后获得可靠的观测结果。ESA组织二个资料处理中心，它们是空间技术基础天文资料处理中心（FAST）和北方资料处理中心（NDAC）。这两个资料处理中心有不同的大圆参考架，为清晰起见，分别陈述如下。

FAST采用 $\boldsymbol{R}_F = [\boldsymbol{P}_F, , \boldsymbol{q}_F, \boldsymbol{r}]$ 三元组，如图4(a)。其中 $\boldsymbol{r}$ 为指向某个参考大圆的极的单位矢量，$\boldsymbol{P}_F = \boldsymbol{K} \times \boldsymbol{r}$ 方向的单位矢量，$\boldsymbol{q}_F$ 是 $\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{P}_F$ 方向的单位矢量。在这个三元组中，描述一颗恒星的“横坐标” v_F，是从黄道的升交点起量的。

任意单位矢量 $\boldsymbol{U}$，在FAST大圆参考架中，可以表示成列矩阵:

$$\boldsymbol{R}_F'\boldsymbol{U} = (\boldsymbol{P}_F'\boldsymbol{U}, \boldsymbol{q}_F'\boldsymbol{U}, \boldsymbol{r}'\boldsymbol{U}). \tag{4.1}$$

而矢量 $\boldsymbol{U}$ 在黄道参考架上，可以表示成列矩阵:

$$\mathscr{K}'\boldsymbol{U} = (\boldsymbol{i}'\boldsymbol{U}, \boldsymbol{j}'\boldsymbol{U}, \boldsymbol{k}'\boldsymbol{U}). \tag{4.2}$$

则FAST大圆参考架与黄道参考架的转换为

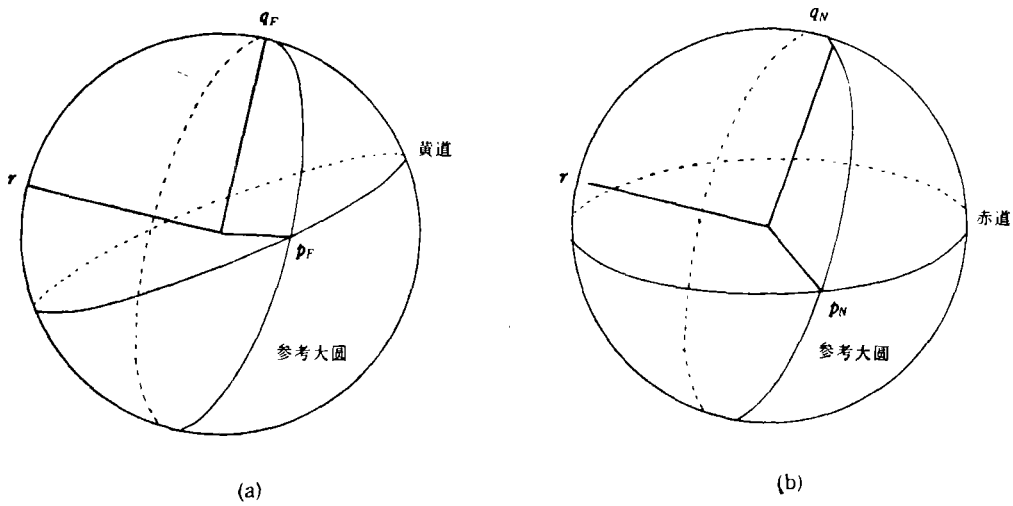

图 4　(a) FAST 和 (b) NDAC 用矢量三元组定义的大圆参考架

Fig. 4　Vector triads defining the great circle reference frame according to (a) FAST and (b) NDAC

$$\boldsymbol{R}_F'\boldsymbol{U} = (\boldsymbol{R}_F'\boldsymbol{K})\boldsymbol{K}'\boldsymbol{U}. \tag{4.3}$$

转换张量为

$$\boldsymbol{R}_F'\boldsymbol{K} = \begin{pmatrix} -\sin\lambda_r & \cos\lambda_r & 0 \\ -\sin\beta_r\cos\lambda_r & -\sin\beta_r\sin\lambda_r & \cos\beta_r \\ \cos\beta_r\cos\lambda_r & \cos\beta_r\sin\lambda_r & \sin\beta_r \end{pmatrix}. \tag{4.4}$$

其中 λ_r 和 β_r 是某个参考大圆极的黄道坐标.

类似地，NDAC 采用 $\boldsymbol{R}_N = [\boldsymbol{P}_N, \boldsymbol{q}_N, \boldsymbol{r}]$，大圆参考架如图 4(b). $\boldsymbol{P}_N$ 是 $\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{r}$ 方向的单位矢量，$\boldsymbol{q}_N$ 是 $\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{P}_N$ 方向的单位矢量. 其中 $\boldsymbol{n}$ 是赤道参考架 $\boldsymbol{N} = [\boldsymbol{l}, \boldsymbol{m}, \boldsymbol{n}]$ 中的北天极方向的单位矢量. 显然，在 $\boldsymbol{R}_N$ 三元组中，“横坐标” V_N 是从赤道升交点起量的.

任意矢量 $\boldsymbol{U}$，在 NDAC 大圆参考架上，可以表示为

$$\boldsymbol{R}_N'\boldsymbol{U} = (\boldsymbol{P}_N'\boldsymbol{U}, \boldsymbol{q}_N'\boldsymbol{U}, \boldsymbol{r}'\boldsymbol{U}). \tag{4.5}$$

而 NDAC 大圆参考架与赤道参考架的转换为

$$\boldsymbol{R}_N'\boldsymbol{U} = (\boldsymbol{R}_N'\boldsymbol{N})\boldsymbol{N}'\boldsymbol{U}. \tag{4.6}$$

其中转换张量为

$$\boldsymbol{R}_N'\boldsymbol{N} = \begin{pmatrix} -\sin\alpha_r & \cos\alpha_r & 0 \\ -\sin\delta_r\cos\alpha_r & -\sin\delta_r\cos\alpha_r & \cos\delta_r \\ \cos\delta_r\cos\alpha_r & \cos\delta_r\sin\alpha_r & \sin\delta_r \end{pmatrix}. \tag{4.7}$$

五、望远镜参考架

依巴谷卫星最原始的观测资料是在望远镜参考架中获取的，这个参考架固定在卫星上. 它相对于天球惯性参考架，作连续地和均匀地扫描运动. 望远镜的姿态角确定了望

远镜参考架与上面提及的参考架之间的瞬时转换关系.

望远镜参考架是由三元组 $\boldsymbol{Z}=[\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\boldsymbol{z}]$ 来表示的(见图 3 或图 5). 在扫描运动中,两架望远镜指向天球的单位矢量为 $\boldsymbol{f}_{+1}$(前导视场)和 $\boldsymbol{f}_{-1}$(后随视场),这两个矢量组成一个"视场平面",在这个视平面上,其本角 $\gamma(58°)$平分线方向的单位矢量定义为 $\boldsymbol{x}$ 轴,而垂直于视平面,在 $\boldsymbol{f}_{+1}\times\boldsymbol{f}_{-1}$ 方向的单位矢量定义为 $\boldsymbol{z}$ 轴,而 $\boldsymbol{y}=\boldsymbol{z}\times\boldsymbol{x}$.

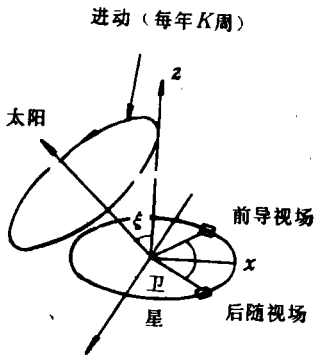

图 5 望远镜参考架

Fig. 5 The telescope reference frame

在望远镜参考架上,前导视场和后随视场的方向可写成

$$\boldsymbol{f}_f=\boldsymbol{x}\cos\frac{\gamma}{2}+\boldsymbol{y}f\sin\frac{\gamma}{2}. \tag{5.1}$$

其中 $f=\pm1$ (前导视场为+,后随视场为−).

图 6 给出望远镜参考架与 FAST 大圆参考架的关系. 其中 RGC 是参考大圆, V_p 是视场平面. 在 FAST 中,望远镜姿态用三个欧拉角 ψ,θ,ϕ 表示,其中 $\psi=\psi_a+\phi_a$,即包括从参考大圆的原点(P_F)到升交点 Ω 的 ψ_a 角和沿视平面到望远镜参考架的 $\boldsymbol{x}$ 轴的角 ϕ_a. $-\theta$ 是 $\boldsymbol{x}$ 轴相对于参考大圆的"高度"(右手螺旋为正,反之为负),ϕ 是 $\boldsymbol{y}$ 轴相对于参考大圆的"高度".

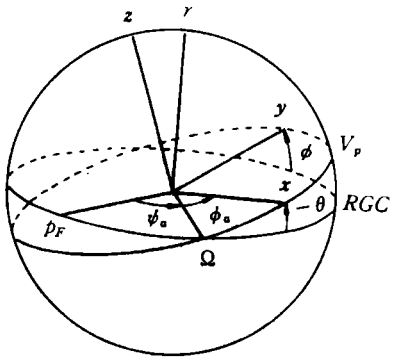

图 6 FAST 姿态角 ψ,θ,ϕ 的定义

Fig. 6 Definition of FAST attitude angles ψ,θ,ϕ

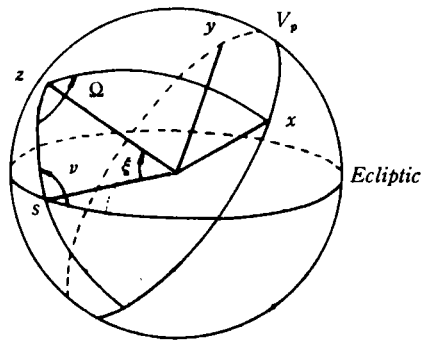

图 7 NDAC 姿态角 ν,ξ,Ω 的定义

Fig.7 Definition of NDAC attitude angles ν,ξ,Ω

图 7 给出某一瞬间,望远镜参考架与对日参考架的关系. 其中 ν,ξ,Ω[7]是 NDAC 选取的姿态角. ξ 是 $\boldsymbol{z}$ 轴和 $\boldsymbol{S}$ 方向夹角,为 $43°\pm0.''5$. ν 是 $\boldsymbol{z}$ 轴绕 $\boldsymbol{S}$ 方向旋转的进动角,其表示式为

$$\nu=\bar{\nu}+a_1\cos(\bar{\nu})+a_2\sin(2\bar{\nu})+a_3\cos(3\bar{\nu})+a_4\sin(4\bar{\nu}), \tag{5.2}$$

其中

$$\bar{\nu}=\bar{\nu}_0+6.4\lambda_s. \tag{5.3}$$

$$\begin{cases}a_1=-0.16378459,\\ a_2=-0.01307777,\\ a_3=+0.00123243,\\ a_4=+0.00012341.\end{cases} \tag{5.4}$$

$\bar{\nu}_0$ 为初始进动角，为 221°，它的值依赖于依巴谷卫星的发射时间．如果进动角符合(5.2)式，望远镜自转轴 $\boldsymbol{z}$ 在天球上投影点的速度 V_z 近似为常数．

姿态角 Ω 为

$$\Omega(d) = \Omega_0 + 2\pi R(d - d_0) - \nu\cos\xi + (b_1\bar{\nu} + b_2\cos\bar{\nu} + b_3\sin(2\bar{\nu}))\frac{\sin\xi}{K}, \tag{5.5}$$

其中　　$b_1 = +0.08215269$，$b_2 = +0.99006117$，$b_3 = +0.04045213$　　(5.6)

Ω_0 和 d_0 分别为姿态角 Ω 和观测日期的初始值．$R = 11.25$ 圈/天，$K = 6.400 \pm 0.002$ 圈/年．

六、FAST 和 NDAC 参考架的零点差

在资料处理过程中，FAST 和 NDAC 选取的参考架是不同的．二个处理中心都采取共同的扫描大圆的极，但 FAST 三元组的第一元单位矢量为 $\boldsymbol{P}_F(\boldsymbol{K}\times\boldsymbol{r}$ 方向)．比较(4.1)和(4.5)式，可以发现：对于同一矢量 $\boldsymbol{U}$，在两个大圆参考架中，有相同的"纵坐标"和不同的"横坐标"(参见图 8)，即 $r_N = r_P$ 而 $V_F \neq V_N$．

设参考大圆的极在赤道参考系中的坐标为 α_r, δ_r，而在黄道参考系中的坐标为 λ_r, β_r．在球面三角形 $P_F\Upsilon P_N$ 中，$\Upsilon P_F = 90° - \lambda_r$，$\Upsilon P_N = 90° - \alpha_r$，球面角 $P_F\Upsilon P_N = \varepsilon$．由余弦定律得

$$\cos(V_N - V_F) = \sin\lambda_r\sin\alpha_r + \cos\lambda_r\cos\alpha_r\cos\varepsilon, \tag{6.1}$$

由正弦定律得

$$\frac{\sin(V_N - V_F)}{\sin\varepsilon} = \frac{\cos\alpha_r}{\angle\Upsilon P_F P_N}. \tag{6.2}$$

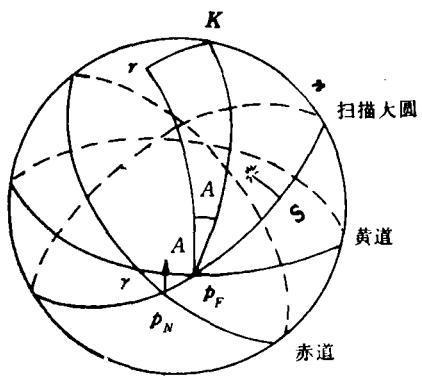

图 8　FAST 和 NDAC 参考架的关系

Fig. 8　The relation between FAST and NDAC reference frame

在球面三角形 KrP_F 中，球面角 $\angle KrP_F = 90°$，大圆弧 $KP_F = 90°$，大圆弧 $Kr = 90° - \beta_r$，令球面角 $\angle KP_Fr = A$．由正弦定律：

$$\sin A = \cos\beta_r. \tag{6.3}$$

由于 $\boldsymbol{K}$ 是黄道的极，$\boldsymbol{r}$ 是参考大圆的极，则有：

$$\sin(\angle\gamma P_F P_N) = \sin A = \cos\beta_r. \tag{6.4}$$

结合(6.1)和(6.2)式有

$$\mathrm{tg}(V_N - V_F) = \sin\varepsilon\cos\alpha_r / \cos\beta_r(\sin\lambda_r\sin\alpha_r + \cos\lambda_r\cos\alpha_r\cos\varepsilon). \tag{6.5}$$

黄道参考架 $\boldsymbol{N}$ 和赤道参考架 $\boldsymbol{K}$ 的转换关系为

$$\boldsymbol{N}'\boldsymbol{r} = (\boldsymbol{N}'\boldsymbol{K})\boldsymbol{K}'\boldsymbol{r}, \tag{6.6}$$

其中

$$\boldsymbol{N'K}=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\varepsilon & -\sin\varepsilon\\ 0 & \sin\varepsilon & \cos\varepsilon\end{pmatrix}. \tag{6.7}$$

则(6.5)式可写成

$$\operatorname{tg}(V_N-V_F)=\sin\varepsilon\cos\alpha_r/(\cos\varepsilon\cos\delta_r+\sin\varepsilon\sin\alpha_r\sin\delta_r), \tag{6.8}$$

或者

$$\operatorname{tg}(V_N-V_F)=\sin\varepsilon\cos\lambda_r/(\cos\varepsilon\cos\beta_r-\sin\varepsilon\sin\lambda_r\sin\beta_r). \tag{6.9}$$

上两式是获得 FAST 和 NDAC 大圆参考架零点差的公式.

七、模 拟 计 算

为了比较 FAST 和 NDAC 资料处理中心选取不同大圆参考架的作用和意义,选取了 50 颗全天均匀分布的恒星,计算了在这两个大圆参考架下恒星位置,实际的数值模拟计算是以下列步骤进行的:

1. 选取任意观测时间 t,假定卫星载钟的漂移 $\Delta d(t)=0$,则由(3.2)式,可以获得观测时刻的标称太阳黄经 λ_s.

2. 设在该观测时刻,NDAC 和 FAST 的望远镜参考架和大圆参考架重合,即望远镜的自转轴 z 轴与大圆参考架的 $\boldsymbol{r}$ 轴重合. 利用(5.2)式和(5.6)式计算出观测时刻的卫星姿态角 ν、$\xi(43^\circ)$ 和 Ω,其中选定 $\Omega_0=0$,$d_0=0$.

3. 利用下面两个关系式,计算 NDAC 大圆参考架的轴 $\boldsymbol{r}$ 的位置[8]:

$$\begin{cases}\beta_r=\arcsin(\sin\xi\sin\nu)\\ \lambda_r=\lambda_s+\operatorname{arc\,tg}(\cos\nu\operatorname{tg}\xi)\end{cases} \tag{7.1}$$

利用(6.6)式的转换关系,可以获得轴在赤道参考系中的位置 α_r 和 δ_r.

4. 选择 50 颗全天均匀分布的恒星,位置为 (α_i,δ_i) 或 (λ_i,β_i),$i=1,2,\cdots\cdots,50$.

5. 为了直观起见,把(4.3)式和(4.6)式改写成

$$\begin{pmatrix}\cos r_F\cos V_F\\ \cos r_F\sin V_F\\ \sin r_F\end{pmatrix}=(\boldsymbol{R}_F'\boldsymbol{K})\begin{pmatrix}\cos\beta\cos\lambda\\ \cos\beta\sin\lambda\\ \sin\beta\end{pmatrix}; \tag{7.2}$$

$$\begin{pmatrix}\cos r_N\cos V_N\\ \cos r_N\sin V_N\\ \sin r_N\end{pmatrix}=(\boldsymbol{R}_N'\boldsymbol{N})\begin{pmatrix}\cos\delta\cos\alpha\\ \cos\delta\sin\alpha\\ \sin\delta\end{pmatrix}. \tag{7.3}$$

其中张量 $\boldsymbol{R}_F'\boldsymbol{K}$ 和 $\boldsymbol{R}_N'\boldsymbol{N}$ 由(4.4)式和(4.7)式给出. 从(7.2)式和(7.3)式可以分别计算出 50 颗恒星,在 FAST 和 NDAC 大圆参考架下的位置 (r_F^i,V_F^i) 和 (r_N^i,V_N^i).

6. 计算:

$$\begin{cases}\Delta r^i=r_F^i-r_N^i,\\ \Delta v^i=V_F^i-V_N^i-\Delta FN.\end{cases} \tag{7.4}$$

其中 ΔFN 为 FAST 和 NDAC 大圆参考架的零点差(6.8 式和 6.9式). 由 FAST 和 NDAC 大圆参考架的定义,应该有 $\Delta r^i=0$,$\Delta v^i=0$,50 颗恒星计算的 Δr^i 和 Δv^i 结

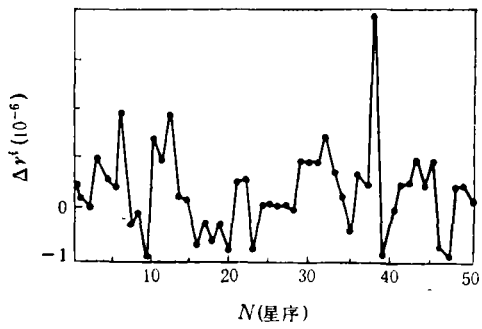

图 9　50 颗星的 Δr^i 值

Fig. 9　Δr^i Value of fifty stars

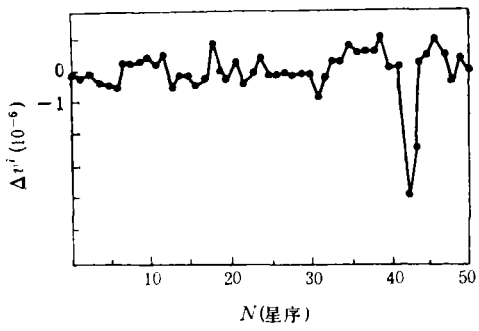

图 10　50 颗星的 Δv^i 值

Fig. 10　Δv^i Value of fifty stars

果如图(9)和图(10).

从图 9 和图 10 中可以看出，Δr^i 和 Δv^i 在零点附近波动，波动是零平均的随机波动．这些波动是由于计算机计算的累积误差引起的．有个别恒星的 Δr 和 Δv 相差较大，是由于这些星位于大圆参考架极的附近，在扫描观测中，不会观测到这些星，所以不作仔细研究．从计算结果中，我们可以看到：利用 FAST 和 NDAC 两个资料处理中心，采用不同的参考架，各自独立处理依巴谷卫星观测资料，可以得到完全一致的结果．这样，可以相互校验，相互补充．面对一种新的观测和计算方法，庞大而繁杂的资料处理任务，ESA 采用两个资料处理中心是必要的，也是非常明智的，这可以确保资料处理结果的准确性和可靠性．

参　考　文　献

[1] Perrymen, M.A.C., ESA SP-1111 I, p. 7, 1989.
[2] Perrymen, M. A. C., ESA BR-24, p. 37, 1985.
[3] Ratier, G. and T. Batut, ESA SP-1111 I, p. 69, 1989.
[4] ESA HIPPARCOS Space Astrometry, Report On the Phase A Study, ESA DOCUMENT SCI, p. 5, 1979.
[5] Lindegren, L. and J. Kovalevsky, ESA SP-1111 III, P. 15, 1989.
[6] 默里，C.A. 著，矢量天体测量(童傅等译)，科学出版社，第 150 页，1990.
[7] 凌兆芬，紫金山天文台台刊，第 7 卷，第 279 页，1988.
[8] 凌兆芬，空间科学学报，第 8 卷，第 20 页，1988.

THE REFERENCE FRAMES IN THE DATA REDUCTION OF HIPPARCOS SATELLITE

Ling Zhao-fen

(Department of Astronomy, Nanjing University)

Abstract

The heliotropic, great-circle and Hipparcos telescope reference frames are explicitly defined in the light of the scanning law of Hipparcos satellite. The differences between the reference frames adopted by the two data reduction consortia, FAST and NDAC, are presented. The abscissas and ordinates of 50 stars in the FAST and NDAC great-circle reference frame are simulated and the reason for using two data reduction consortia in ESA are discussed.

Key words Space astrometry, Hipparcos satellite