

天球和地球历书原点

夏一飞¹ 金文敬^{2,3} 唐正宏^{2,3}

(1. 南京大学天文系 南京 210093)

(2. 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(3. 中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要

国际天球参考系的使用、观测精度的提高和方法的改善要求采用与地球轨道运动无关的运动赤道上的起算点, Guinot 提出的非旋转原点可作为这样一种选择。非旋转原点依赖于天球参考极。IAU 决定从 2003 年起采用天球中间极作为天球参考极。非旋转原点在地球参考系的使用, 可给出在天球中间极赤道上的天球历书原点, 非旋转原点在地球参考系的使用, 可给出在天球中间极赤道上的地球历书原点。回顾了非旋转原点的概念、以历书原点为参考的天球参考系和地球参考系的坐标变换, 给出了在微角秒精度下天球参考极的坐标和历书原点的位置, 讨论了采用历书原点对测定 UT1 的影响, 指出当岁差章动模型、天极补偿、分点改正得到改善时, 基于历书原点的 UT1 定义不需要更改, 从而保证了 UT1 的连续。

关键词 非旋转原点 — 参考系 — 历书原点 — 世界时

分类号 P129

1 引 言

天球参考系 (CRS) 和地球参考系 (TRS) 的坐标变换及地球定向参数的测定, 经典的方法通常参照于春分点和格林尼治零子午点。1998 年起 IAU 采用以河外射电源位置为基准实现的国际天球参考系, 它是基于运动学的概念^[1]; 地球自转的精确描述要求与地球轨道运动没有任何联系; 描述地球自转在空间的定向, 最直观的选择是 CRS 和 TRS 间的三个欧拉角; 利用 Guinot^[2] 提出的非旋转原点 (NRO) 作为赤道上的参考点能同时满足这些要求^[3,4]。Aoki、Capitaine 等人对 NRO 作了很详细的论述和讨论^[5~7]。由于观测精度的提高和岁差章动模型的改善, 需要更精确实现 NRO, 同时也需要精确估计因岁差章动模型等的改善对实现 NRO 和测定 UT1 的影响。

IAU 决议 2003 年起将采用天球中间极 (Celestial Intermediate Pole, 简称 CIP) 代替天

国家自然科学基金“九五”重点项目 (19833010) 资助课题

特约稿 2000-10-30 收到

球历书极 (CEP)^[8], CIP 的运动用 Tisserand 极在 CRS 中位置的变化描述, CIP 在 J2000.0 时的方向与 CRS 极的方向有补偿。CIP 在 CRS 中的运动用岁差和周期大于 2d 的受迫章动的 IAU 2000A 模型加上由 IERS 通过天文测地观测提供的改正来实现, 周期小于 2 d 的受迫章动被包含在 CIP 在 TRS 中的运动模型中, CIP 在 TRS 中的运动则由 IERS 通过天文测地观测及包含高频变化的模型提供。NRO 与 CIP 相联系, 在 CRS 的使用可给出在 CIP 赤道上的天球历书原点, 简称 CEO; 在 TRS 的使用可给出在 CIP 赤道上的地球历书原点, 简称 TEO。CEO 和 TEO 间的恒星角可直接反映地球的自转。为精确计算天球参考极的坐标和历书原点的位置, 给出了基于 IERS 1996 规范在 μas 精度下它们的数值展开式, 一旦 IERS 2000 规范被采用, 这些展开式很容易更改。

2 非旋转原点概念

设地心 CRS 相对宇宙背景整体无旋转, TRS 相对平均地表整体无旋转和平移。在实现 CRS 和 TRS 时, 通常采用协议的方法。若天球参考极 (CEP 或 CIP) 相对 CRS 的球面坐标的经角和余纬角用 (E, d) 表示, 方向余弦用 (X, Y, Z) 表示; 天球参考极相对 TRS 的球面坐标用 (F, g) 表示, 方向余弦用 (u, v, w) 表示; 则有:

$$\begin{aligned} X &= \sin d \cos E & u &= \sin g \cos F \\ Y &= \sin d \sin E & v &= \sin g \sin F \\ Z &= \cos d & w &= \cos g \end{aligned} \quad (1)$$

定义一个右旋的瞬时直角坐标系 $O-xyz$, 它的 z 轴指向天球参考极, x 轴指向对应赤道上的 σ 点。 σ 点的选取应满足如下条件: 当天球参考极在天球上运动时, 瞬时坐标系相对 CRS 在 Oz 方向上没有旋转分量, σ 称为在该赤道上的非旋转原点。

在图 1 中, Σ_0 为 CRS 赤道上的零点, ω_0 为 TRS 赤道上的零点, 天球参考极对应赤道上的 σ 和 σ' 分别为天球和地球上的 NRO, 有 $\Sigma_0 N = \Sigma' N = 90^\circ + E$, $\sigma N = \Sigma_0 N + S = 90^\circ + E + S$, $M\omega_0 = M\omega'_0 = 90^\circ - F$, $M\sigma' = M\omega_0 - S' = 90^\circ - F - S'$ 。若天球参考极选用 CIP, 则 σ 即为 CEO, σ' 即为 TEO。

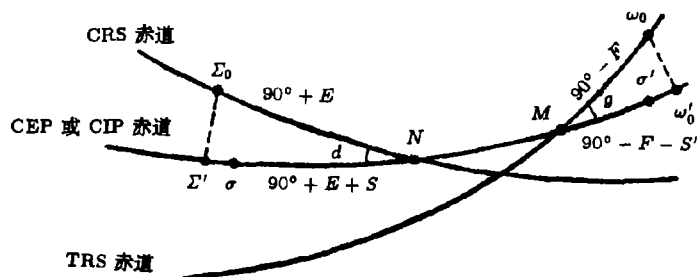


图 1 天球和地球上的 NRO

根据 NRO 的定义, 在历元 t_0 到 t 期间 σ 和 σ' 的运动可分别由 S 和 S' 计算得到^[7]:

$$S = - \int_{t_0}^t \frac{X\dot{Y} - Y\dot{X}}{1+Z} dt = \int_{t_0}^t (\cos d - 1) \dot{E} dt \quad (2)$$

$$S' = - \int_{t_0}^t \frac{u\dot{v} - v\dot{u}}{1+w} dt = \int_{t_0}^t (\cos g - 1) \dot{F} dt \quad (3)$$

θ 为从 σ' 起算的 σ 的时角, 称为恒星角。NRO 的定义确保 $\dot{\theta}$ 严格等于地球绕天球参考轴的瞬时角速度 ω , 因此 θ 表示地球绕这个轴的恒星自转。若希望 UT1 的时间导数正比于 ω , 则 UT1 的定义可取下述简单的形式^[9]:

$$UT1 - UT1_0 = k\theta \quad (4)$$

其中 k 为所选择的常数, 使在 12^hUT1 时太阳经过本初子午线。

3 TRS 和 CRS 间的坐标转换

在历元 t 参照历书原点, 从 TRS 到 CRS 的坐标转换可表示为^[10]:

$$[CRS] = PN(t) \cdot R(t) \cdot W(t)[TRS] \quad (5)$$

其中 $PN(t)$ 、 $R(t)$ 、 $W(t)$ 分别为由天球参考轴在 CRS 中的运动、地球绕着天球参考轴的自转、天球参考轴在 TRS 中的运动引起的旋转矩阵:

$$\begin{aligned} PN(t) &= R_Z(-E)R_Y(-d)R_Z(E)R_Z(S) \\ R(t) &= R_Z(-\theta) \\ W(t) &= R_Z(-S')R_Z(-F)R_Y(g)R_Z(F) \end{aligned} \quad (6)$$

将 (1) 式代入 (6) 式第一式可得 $PN(t)$ 的另一种形式:

$$PN(t) = \begin{pmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{pmatrix} R_Z(S) \quad (7)$$

其中 $a = 1/(1 + \cos d)$ 。将 (1) 式代入 (6) 式第三式可得 $W(t)$ 的另一种形式:

$$W(t) = R_Z(-S')R_X(y)R_Y(x) \quad (8)$$

其中 $x = u$, $y = -v$ 为天球参考极在 TRS 中的地极坐标。

4 天球参考极坐标和历书原点位置

Capitaine 已给出了与 IAU 1980 章动序列相一致的 CEP 在 CRS 中的天球坐标 X 、 Y 的时间函数展开式。为预报和实际工作需要, IERS 1996 规范^[10] 提供了一套用 VLBI 和

$$\begin{aligned}
Y = & -0.005202'' - 0.0219421''t - 22.4072863''t^2 + 0.0018416''t^3 - 0.0000037''t^4 \\
& + 0.0000019''t^5 + \sum_i [(b_{c,0})_i \cos(arg) + (b_{s,0})_i \sin(arg)] \\
& + \sum_i [(b_{c,1})_i t \cos(arg) + (b_{s,1})_i t \sin(arg)] + \sum [(b_{c,2})_i t^2 \cos(arg) \\
& + (b_{s,2})_i t^2 \sin(arg)]
\end{aligned} \quad (15)$$

其中 $(a_{s,j})_i$ 、 $(a_{c,j})_i$ 、 $(b_{c,j})_i$ 、 $(b_{s,j})_i$ ($j=0, 1, 2$) 为振幅, arg 为对应 IERS 1996 章动序列列表中的自变量的组合。显然 (14) 和 (15) 式中除包含岁差项和章动项外, 还存在章动交叉项及章动和岁差的交叉项。(14) 和 (15) 式是与 IERS 1996 岁差章动模型相一致的 CEP 在 CRS 中的天球坐标的展开式。

S 和 S' 的计算可确定 CEP 赤道上的历书原点位置。(2) 式可改写成:

$$S(t) = -\frac{1}{2}[X(t)Y(t) - X(t_0)Y(t_0)] + \int_{t_0}^t \dot{X}(t)Y(t)dt - \int_{t_0}^t (2a-1) \frac{X\dot{Y} - Y\dot{X}}{2} dt \quad (16)$$

将 (14) 和 (15) 式代入, 在 μas 量级精度下得:

$$\begin{aligned}
S(t) = & -XY/2 + 0.002184'' + 0.003810''t - 0.000106''t^2 - 0.072573''t^3 + 0.000028''t^4 \\
& + 0.000013''t^5 + 0.000002''t \sin \Omega + 0.000004''t \cos 2\Omega + 0.000744''t^2 \sin \Omega \\
& + 0.000057''t^2 \sin 2L_s + 0.000010''t^2 \sin 2L_m - 0.000009t^2 \sin 2\Omega \\
& - 0.000023''t^3 \cos \Omega - 0.000001''t^3 \cos 2L_s + \sum_{i=1}^{13} C_i \sin \alpha_i + \sum_{k=1}^9 D_k t^2 \sin \alpha_k
\end{aligned} \quad (17)$$

(3) 式可改写成

$$S'(t) = 0.0015(a_c^2/1.2 + a_a^2)t \quad (18)$$

其中 a_c 和 a_a 分别为极移的钱德勒运动 (1.2 年) 和周年运动的振幅。IERS 给出的 a_c 和 a_a 值, S' 的数值小于 $1\mu\text{as}$ 。由 S' 可得恒星角 θ 的长期变化速率约为 $-50\mu\text{as}/\text{cen}$ 。

根据恒星角 θ 和格林尼治平恒星时 ($GMST$) 的关系及 $GMST$ 表达式, 可得^[15]:

$$\theta = GMST - q - (\Delta q)_s \quad (19)$$

其中 q 为天球历书原点的平赤经, $(\Delta q)_s$ 为平春分点真赤经的长期部分, 在 μas 量级精度下得:

$$\theta = 2\pi(0.7790572732640 + 1.00273781191135448t \times 36525) \quad (20)$$

其中 t 为从 J2000.0 起算的 UT1 儒略世纪数。

与 IAU 岁差章动理论相一致的 S 的数值展开式在一世纪后其不确定性为 0.05mas ^[7], 而与 IERS 1996 规范相一致的 (17) 式在一世纪后其不确定性小于 $1\mu\text{as}$ ^[13]。

5 采用历书原点对 UT1 测定的影响

UT1 的测定依赖于恒星角 θ , 因此只要考虑对 θ 的影响。若 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 存在误差 $\Delta X(t)$ 、 $\Delta Y(t)$, 则可求得对 $\Delta\theta(t)$ 的影响为:^[6]

$$\Delta\theta(t) = \Delta S + [X(t)\Delta Y(t) - Y(t)\Delta X(t)]/2 - [X(t_0)\Delta Y(t_0) - Y(t_0)\Delta X(t_0)]/2 \quad (21)$$

利用 (14) 和 (15) 式, 可得:

$$\begin{aligned} \Delta\theta(t) = & -[Y_2 t^2 + \sum_i b_i \cos(\omega_i t + \alpha_i)]\xi_0 + [X_1 t + \sum_i a_i \sin(\omega_i t + \alpha_i)]\eta_0 \\ & + \frac{1}{2} X_1^2 t^2 d\alpha_0 + \frac{1}{2} X_1 \Delta Y_1 t^2 - t \sum_i b_i \cos(\omega_i t + \alpha_i) \Delta X_1 \\ & + \frac{1}{2} t \sum_i \omega_i (a_i \Delta b_i + b_i \Delta a_i) + X_1 \sum_i \frac{1}{\omega_i} \sin(\omega_i t + \alpha_i) \Delta b_i - \Delta\theta(t_0) \end{aligned} \quad (22)$$

其中:

$$X_1 = 2004.193319''/\text{cen.}, Y_1 = -0.021942''/\text{cen.}, Y_2 = -22.407286''/(\text{cen.})^2 \quad (23)$$

$a_i, b_i, \omega_i, \alpha_i$ 为章动的振幅、角频率和位相, $a_i = (a_{s,0})_i, b_i = (b_{c,0})_i$, 符号 Δm 表示量 m 的两种模型的差值。

当由 IAU 岁差章动模型改变成 IERS 1996 岁差章动模型时, 则 Δm 表示为 IERS 模型减 IAU 模型。利用 IERS 规范可给出 ΔX_1 、 ΔY_1 、 ΔY_2 的值, 在 μas 量级精度下得:

$$\begin{aligned} \Delta\theta = & 0.000001'' - 0.000045''t - 0.000113''t^2 + 0.000001'' \cos(\omega_1 t + \alpha_1) \\ & - 0.000001'' \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + 0.000005''t \cos(\omega_1 t + \alpha_1) \\ & - 0.000001''t \cos(\omega_3 t + \alpha_3) \end{aligned} \quad (24)$$

其中 ω_1, α_1 为 18.6yr 周期的章动角频率和位相, ω_3, α_3 为 13.67d 周期的章动角频率和位相。最大的项 (t 的平方项) 主要来自黄经岁差和交角长期项间的交叉, 在一世纪后, 它引起 $dUT1/dt$ 的变化为 5.0×10^{-15} 。第二项是 t 的线性项, 它引起 $dUT1/dt$ 的变化为 1.0×10^{-15} 。

当天球参考极改变时, 如从瞬时自转极改为 CEP 时, 只要考虑 (22) 式中章动振幅的变化 Δa_i 和 Δb_i , 它们即是所谓的章动奥波策项。在 μas 量级精度下得

$$\Delta\theta = -0.000073''t \quad (25)$$

对 θ 的不确定性主要来自于交角长期项的不确定性, 它在 2100 年可能达到 $5\mu\text{as}$, 其对应的 $UT1$ 相对频率的不确定性为 1.0×10^{-16} 。

$UT1$ 测定也依赖通过历书原点计算的地极坐标 u, v 的误差, 按目前钱德勒极移的振幅估算, 其对误差的贡献不大于 $1\mu\text{as}$ 。

上述给出的数值和讨论是基于 IERS 1996 规范, 若采用 IERS 2000 规范中的 IAU 2000A 岁差章动模型、有关的岁差量改正和天极补偿, 则很容易更改, 从而得到与 CIP、CEO、TEO 相一致的 X 、 Y 、 S 的数值展开式。

6 结 论

(1) 地球自转的参考点取为天球历书原点和地球历书原点, 它与瞬时赤道在天球上的运动严格地分离开来, 这样将不依赖黄道的位置。

(2) 天球历书原点依赖于天球参考极在 CRS 中的运动, 天球参考极在 CRS 中的坐标的时间函数展开避免了岁差和章动的人为分离, 实际的天极运动正是岁差和章动同时作用的结果。

(3) NRO 概念应用到 TRS 中给出瞬时经度零点的确切定义, 这是目前 UT1 精度所需要的。

(4) IERS 2000 规范将提供基于 CIP 的岁差章动模型、天极补偿等数据, 利用上述基于 IERS 1996 规范的数值和讨论可很容易计算 CIP 的坐标和 CEO、TEO 的位置。

(5) 今后岁差章动模型、天极补偿、分点改正得到改善时, 基于 CEO 和 TEO 的 UT1 定义并不需要更改, 从而保证 UT1 的连续。

(6) 若地球在空间的定向用三个欧拉角来描述, 则 CEO 和 TEO 的概念是需要的, 以便从新的地球定向参数导出这些量。

参 考 文 献

- 1 Aries E F, Charlot P, Feissel M et al. *Astron. Astrophys.*, 1995, 303: 604
- 2 Guinot B. In: McCarthy D D, Pikington J D eds. *Time and Earth's Rotation*, Dordrecht: Reidel, 1979: 7
- 3 Kovalevsky J, McCarthy D D. *Highlight of Astronomy*, 1998, 11: 182
- 4 Mathews P M. In: Capitaine N ed. *Proceeding of the Journees 1998 System de Reference Spatio-Tempores*, Paris: Observatoire de Paris, 1998.161
- 5 Aoki S, Kinoshita H. *Celest. Mech.* 1983, 29: 335
- 6 Capitaine N. *Celest. Mech.*, 1986, 39: 283
- 7 Capitaine N. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1990, 48: 127
- 8 IAU Information Bulletin, 2001, 88: 38
- 9 Guinot B. In: Gaposchkin E M, Kolaczek B eds. *Reference Coordinate System for Earth Dynamics*, Dordrecht: Reidel, 1981: 125
- 10 McCarthy D D. *IERS Convention (1996)*, IERS Technical Note 21, Paris: observatoire de Paris, 1996: 34
- 11 Herring T A. *Highlight of Astronomy*, 1995, 10: 222
- 12 Lieske J H, Lederle T, Fricke W et al. *Astron. Astrophys.*, 1977, 58: 1
- 13 Capitaine N, Guinot B, McCarthy D D. *Astron. Astrophys.*, 2000, 355: 398
- 14 IERS Annual Report 1997, Paris: Observatoire de Paris, 1998: II-39
- 15 夏一飞, 萧耐园. *天文学进展*, 1990, 8(3): 215

Celestial and Terrestrial Ephemeris Origins

Xia Yifei¹ Jin Wenjing^{2,3} Tang Zhenghong^{2,3}

(1. *Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093*)

(2. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(3. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

Abstract

The adoption of the International Celestial Reference System and the changes of observational strategy call for the use of departure point on the moving equator independently from

Earth's orbital motion. A Nonrotating Origin (NRO), proposed by Guinot, is selected. It depends on the celestial reference pole. IAU will adopt the Celestial Intermediate Pole (CIP) as the celestial reference pole from 1 January 2003. The use of NRO in the Celestial Reference System (CRS) is designated as the Celestial Ephemeris Origin (CEO). The use of NRO in the Terrestrial Reference System (TRS) is designated as the Terrestrial Ephemeris Origin (TEO). In this paper, the concept of the NRO, the coordinate transformation between the CRS and the TRS are reviewed, the coordinates of the celestial reference pole and the positions of the ephemeris origins at a microarcsecond accuracy are provided, the influence on the determination of UT1 of errors in the precession-nutation model, when the ephemeris origins are used, is discussed. The results show the definition of UT1 based on the ephemeris origins does not require modifications in order to maintain the continuity of UT1 when the models for precession-nutation, pole offset and equinox correction are improved.

Key words nonrotating origin—reference system—ephemeris origin—universal time