

世界时和 Guinot 非旋转原点

须同祺 李正心

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文对现在采用的世界时表达式存在的缺点和问题, Guinot非旋转原点概念, 由此得到的新世界时定义和有关非旋转原点问题的讨论情况作了论述。

一、前 言

自人类在本世纪五十年代后期进入空间时代以来, 天体测量学的理论和技术正经历着一个革命性的变革。特别在近十年来, 天体测量新技术系统的建成和普遍投入实际使用, 大量高精度测量结果的取得, 使长期以来形成的一些理论和概念受到了很大的冲击。就地球自转的研究而言, 甚长基线射电干涉测量(VLBI)和激光人卫测距(SLR)等新技术, 已把地球自转参数(ERP)测量提高了两个数量级, 达到了 $0''.001$ 或甚至 $0''.0001$ 这样的高精度^[1]。在这样一种新情况下, 原有的有关ERP在概念上的不精确性, 就开始暴露出来, 对它们的研究也就受到人们的重视。Capitaine最近评述了有关地极和世界时这两个概念的不精确性^[2,3], 就是一个实际的例子

世界时, 即格林尼治平太阳时, 传统上是根据纽康的定义, 假设一个平太阳在赤道上具有均匀恒星运动, 并使其赤经尽可能接近太阳的平黄经而取得的。由于在世界时表达式中含有岁差量, 因此这个定义不能明确表示世界时和地球自转的关系。如何使世界时的定义明确地表示地球自转, 并为精确测定地球在空间的指向、研究某些地球动力学问题等所应用, 同时也为今后摆脱因修订岁差常数等带来的麻烦而提到人们的面前。

尽管为对付岁差常数的修订和星表春分点改正的引入而引起的世界时在1984年初的不连续, Aoki等^[4]提出了新的世界时表达式, 但问题并未得到根本解决。Williams和Melbourne^[5], 以及朱圣源和Mueller^[6]等对由于上述变动在不同观测技术所得世界时UT1及地面参考系上带来的影响作了讨论, 反过来又促使人们研究更合适的世界时定义。

1979年Guinot^[7]已经注意到问题的存在, 提出非旋转原点的概念。之后, Guinot^[8]和Capitaine^[9]等又对此作了进一步论述, 受到天文界的注意。

本文就近年来在这方面的研究情况, 作一简要综述。

二、关于新世界时的表达式

纽康曾根据他的太阳平黄经新表示式, 和为建立他的基本星表而修正的岁差常数, 对原先他所给出的平太阳赤经作了更改。现在随着新岁差和春分点改正的引入, 为了和这些变动相适应, 同样也涉及到世界时表达式的变更问题。这个变更可以由两种方式进行, 根据新岁差和春分点改正修正现在的世界时表达式, 如纽康采用的那样, 并保持新、老系统的连续性, 这是第一种。Aoki等^[4]采用的就是这一方式。另一种是重新从概念上进行考虑, 再设法将新、老系统连接起来。Guinot^[7]采用的则是这后一种方式。

Aoki等采用的新世界时表达式为

$$(\text{GMST})_{0^h \text{ UT1}} = 6^h 41^m 50^s . 54841 + 8640184^s . 8128666T + 0^s . 093104T^2 - 6^s . 2 \times 10^{-6}T^3 \quad (1)$$

式中 $(\text{GMST})_{0^h \text{ UT1}}$ 为世界时 UT1^h 的格林尼治平恒星时, $T = du/36525$, du 为自2000年1月1日 12^h UT1 起的世界时日数。

该式是针对以FK5为参考的经典光学观测, 用新岁差常数和春分点改正值修订纽康原来定义的系数, 所以(1)式不是一个概念上的重新定义^{[2], [10]}。由于式中含有春分点赤经岁差量, 岁差的时间变量是力学时, 而(1)式中的时间变量是世界时和力学时的混合使用, 只是认为地球自转速率的相对变化为 10^{-8} 量级, 这样忽略了两种时间在尺度上的微小差别, 使时间变量概念显得含糊不清。随着观测技术精度的提高, 根据对近200年月掩星资料的分析^[11], 得到FK5春分点相对动力春分点有一个 $-0'' . 228 \pm 0'' . 028$ /百年的运动。如果这个结果是可靠的话, 那么由于岁差值和春分点改正的修正, 世界时表达式将要再次更改; 更主要的是(1)式和纽康世界时表达式一样, 并没有明确显示世界时和地球自转角间的关系。也就是说, 纽康定义中所具有的缺点, 在新世界时表达式中都仍然存在。所以(1)式只能是在新世界时定义没有统一前的暂时性的协调式而已。

三、采用新岁差常数和春分点改正带来的影响

修订岁差常数及春分点改正是为了缩小观测结果中和各种技术的观测结果间的系统误差。在决定(1)式时, 是通过新老岁差及春分点改正, 按纽康定义计算的 UT1 和其速率在1984.0时保持不变而求得的^[12]。但在1984.0之外, 则仍然不是在一个系统中。这样处理的结果是将新系统硬性纳入旧系统中, 从而达到抵消修订岁差和春分点改正的目的。再则在推导(1)式中并未顾及新技术情况, 因此并不能消除新技术和经典光学技术间的差别。通过对岁差和春分点改正引起的, 由新技术和经典光学技术得到的 UT1 及地面参考系的影响的讨论^{[5], [6]}, 完全说明了这点。讨论还表明, 如果格林尼治平恒星时继续参考现在使用的瞬时平春分点, 则随着岁差常数的修订, 将导致新技术所得 UT1 速率和地面参考系统的漂移, 这些都是我们所不希望的。

为了克服这些困难, 提出了多种调整方案。其中的一种是保持地面参考系和 UT1 不变,

而对不同观测技术的惯性参考系采用不同的格林尼治平恒星时计算式。格林尼治平恒星时由两部分组成, 第一部分采用固定格林尼治平恒星时表达式, 第二部分是对给定的惯性参考系的特定改正。这也等效于将格林尼治平恒星时参照赤道上的固定点来计算。

四、Guinot非旋转原点

为明确阐明世界时的定义, 估计到新技术使用后所产生的上述情况, Guinot^[7]在1979年提出了非旋转原点的概念。

设有一个非旋转参考系固定在以河外射电源为参考点的框架上, 由一个大圆上的参考点 Σ 及极 C_0 定义(图1)。固定参考系的轴 OX_0 沿 $O\Sigma$ 方向, OZ_0 由 OC_0 确定。地球自转轴在天球上的交点 P 的运动可由弧 $d=C_0OP$ 及角 $E=\Sigma C_0P$ 随时间的变化来描述。另有一个瞬时坐标系 $Oxyz$, 其 Oz 轴沿 OP 方向, 并给定条件当 P 沿非旋转天球运动时, 瞬时坐标系没有绕 Oz 的转动分量, Ox 和非旋转天球相交于 σ 点, σ 即为非旋转原点。

同样可定义地球参考系, 这个系统由地面点坐标及其变化来定义, 表现为一个大圆上的参考点 $\bar{\omega}_0$ 及极 T_0 。取一固定地球参考系, 轴 Oz_0 由 OT_0 确定, Ox_0 沿 $O\bar{\omega}_0$ 。由于 P 的长期运动很慢, 周期分量又小, P 接近于 T_0 。瞬时参考系的 Oz 沿 OP 方向, 为了消除任何绕 Oz 的转动分量, 用 $\bar{\omega}M=\bar{\omega}_0M$ 来取得在赤道上的参考点 $\bar{\omega}$, M 为赤道在参考面 X_0OY_0 上的升交点, $\bar{\omega}_0$ 即为瞬时地面经度原点。

因而 P 在非旋转天球上的运动可用 E, d 描述, 而在地球上的运动则由通常的极坐标 u, ν 来描述。或者说, 地球自转极的运动包含两部分, 一部分是由岁差和章动运动引起的“可预测”分量, 另一部分是由极运动和地球角速度变化引起的“不可预测”分量^[2]。

瞬时平赤道上的非旋转原点 σ 可由 ΣN 和 $\sigma N - \Sigma N$ 来确定, 其中 N 为瞬时平赤道和以 C_0 为大圆的升交点。 ΣN 和 $\sigma N - \Sigma N$ 仅和与岁差、章动有联系的 E, d 有关。令 $s = \sigma N - \Sigma N$, 或者

$$s = \zeta_A + z_A - (\sigma \text{点总赤经岁差量}) \quad (2)$$

式中 ζ_A, z_A 为岁差量^[14], s 为一小量。也即 σ 点可从瞬时平春分点向东转移 $\zeta_A + z_A - s$ 得到。

角 $\bar{\omega}O\sigma$ 以朝西为正, 称恒星角 θ , 表示地球的恒星自转, 其导数即为在空间的地球角速度。设 0^hUT1 的格林尼治平恒星时为 T , 则世界时 UT1 时的恒星角 θ 为

$$\theta = T - (\zeta_A + z_A - s) + \text{UT1} \quad (3)$$

又令 0^hUT1 的恒星角为 θ_0 , 忽略 θ 中的高次小项, 则它随时线性增加, 因而有

$$\text{UT1} = K'(\theta - \theta_0) \quad (4)$$

或者有

$$\theta = K(\text{UT1} - \text{UT10}^h) \quad (5)$$

式(4)、(5)中常数 K', θ_0 或 $K, \text{UT10}^h$ 由世界时 UT1 一天的长度接近平太阳日的长度, 并使 UT1 和它的现行定义相适应来选取。如果地球自转是均匀的, 则 UT1 严格地是时间的线性函数^[3], 为了和在1976 IAU天文常数系及FK5基本星表系统下的格林尼治平恒星时及 UT1 间的习用关系一致, θ 的数值取为

$$\theta = 0.779057273264 + 1.002737811354(\text{UT1} - 2000\text{Jan. } 1.12^h\text{UT1}) \quad (6)$$

其中 UT1 以日数表示。

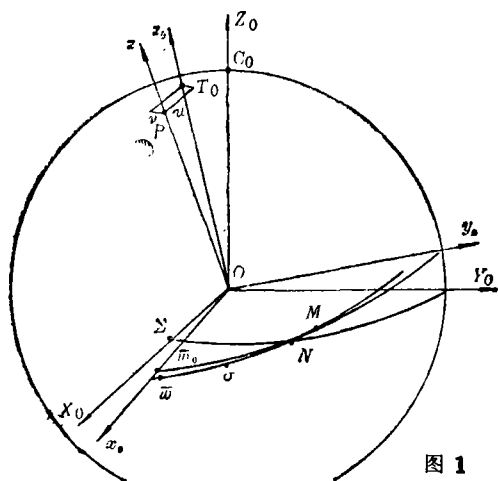


图 1

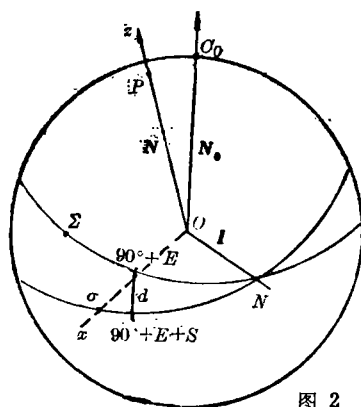


图 2

式(4)或(5)、(6)明确地显示世界时和地球自转角间的关系。因而 Guinot 给出如下世界时定义：^[7,8]“世界时是地球的恒星自转成比例的一角度，比例系数的选择是要使在长期内 UT112^h与格林尼治正午同位相”。为了和习用关系相适应，唯一的条件是(1)在某历元上，UT1 12^h和格林尼治平正午接近相符；(2)UT1的一天在长时期内同平太阳日在位相上保持接近^[15]。

s 量的计算。为确定 σ 点的位置，须求得 s 值。图2中设 \mathbf{n} 、 \mathbf{n}_0 及 \mathbf{l} 分别为沿 OP 、 OC_0 和 ON 的单位矢量。图2中符号意义同图1。 P 在天球参考系(CRS)中，由于岁差和地球自转运动，瞬时参考系 $Oxyz$ 和CRS间的瞬时转动矢量 Ω 为

$$\Omega = \dot{E} \mathbf{n}_0 - (\dot{E} + \dot{s}) \mathbf{n} + \dot{d} \mathbf{l} \quad (7)$$

其中 \dot{E} 、 \dot{d} 和 \dot{s} 是 E 、 d 和 s 的时间导数。由定义得 $\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{n} = \cos d$ ， $\mathbf{l} \cdot \mathbf{n} = 0$ ，则得瞬时转动矢量 Ω 沿 Oz 的分量为

$$\Omega \cdot \mathbf{n} = \dot{E} \cos d - \dot{E} - \dot{s} = \dot{E} (\cos d - 1) - \dot{s} \quad (8)$$

根据定义有 $\Omega \cdot \mathbf{n} = 0$ ，所以

$$\dot{s} = \dot{E} (\cos d - 1) \quad (9)$$

$$s = \int_{t_0}^t (\cos d - 1) \dot{E} dt \quad (10)$$

又利用矢量三重积有

$$\begin{aligned} (\mathbf{n} \times \dot{\mathbf{n}}) \cdot \mathbf{n}_0 &= \begin{vmatrix} \sin d \cos E & \sin d \sin E & \cos d \\ (\cos d \cos E \cdot \dot{d} - \sin d \sin E \cdot \dot{E}) & (\cos d \sin E \cdot \dot{d} + \sin d \cos E \cdot \dot{E}) & -\sin d \cdot \dot{d} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\ &= \sin^2 d \cdot \dot{E} \end{aligned} \quad (11)$$

而

$$\frac{(\mathbf{n} \times \dot{\mathbf{n}}) \cdot \mathbf{n}_0}{1 + \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_0} = \frac{\sin^2 d \cdot \dot{E}}{1 + \cos d} = (1 - \cos d) \cdot \dot{E} \quad (12)$$

所以 s 又可写为

$$s = - \int_{t_0}^t \frac{(\mathbf{n} \times \dot{\mathbf{n}}) \cdot \mathbf{n}_0}{1 + \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_0} dt \quad (13)$$

五、关于非旋转原点问题的讨论

Aoki和Kinoshita^[13], Aoki^[16]等对Guinot的观点进行了讨论, 他们的意见主要有以下几点:

1. 根据纽康定义, 平太阳赤经 R_0 可写为

$$R_0 = \tau_0 + \mu T_2 + A_1 T_2 + A_2 T_2^2 \quad (14)$$

其中 τ_0 、 μ 分别为平太阳在赤道上均匀运动的某一起点和其速度, A_1 、 A_2 为赤经岁差, T_2 为世界时的儒略世纪数。(14)式中最后两项为X点即Guinot非旋转原点的赤经。这个X点是通过观测恒星实现的。河外源在原理上可作为惯性参考系,但在实用上则必须联系到恒星系统。河外源的星等都很暗,因此在联系过程中的一个主要困难是星等差问题。

2. 通常恒星位置用赤经和赤纬来表示。设恒星和非旋转原点间在赤道上的角距称瞬时赤经,根据第四节定义和有关关系式有

$$\text{恒星赤经} = \text{瞬时赤经} + \text{赤经岁差}。$$

如春分点存在误差,则恒星赤经和瞬时赤经将受到同样的影响。尽管岁差值正确,其起算点可以任意定,但春分点改正的影响仍然存在,特别是其长期变化会表现为相同的恒星自行。或者说,春分点改正会表现为实际的恒星参考系对理想的惯性参考系的一个偏离,而非旋转原点则应联系到这样一个惯性参考系上去,但是当前恒星参考系和河外源的惯性参考系间的联系精度,和春分点改正的精度是同样数量级的,所以采用这样的非旋转原点并不见得比原来的春分点优越多少。

3. 岁差对赤经、赤纬的影响为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= (m + n \sin \alpha \tan \delta) \Delta T \\ \Delta\delta &= n \cos \alpha \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中 m 、 n 为岁差量。其中第一式的第一部分 m ,对地球上所有点的影响是相同的,因此可用瞬时赤经联系到非旋转原点来消除岁差不确定的影响。但第一式中的第二部分对不同位置的恒星是不同的,也即瞬时赤经仍会受到岁差的不确定的影响。换句话说,非旋转原点还是受岁差不确定的影响。

4. 现在的章动理论参照的极是天球历书极(CEP),因而在定义非旋转原点时是参照瞬时自转极,还是参照天球历书极? Aoki在考虑刚体地球时认为,如非旋转原点是在天球历书极的赤道上时,由刚体地球运动方程得到的恒星自转角和由运动学或几何考虑定义的非旋转原点所得结果是一致的,即对天球历书极非旋转原点的“动力学”定义和“运动学”定义是等效的。但对瞬时自转极,则两者的定义是不等效的。

5. 在考虑章动后,非旋转原点在空间有一个运动,妨碍它作为参考原点用。

为了对非旋转原点问题作进一步说明,Capitaine、Guinot等^[2,9,15,17]作了进一步论述。

由第四节知道, 确定非旋转原点 σ 的位置, 和确定小量 s 的值是一致的。 s 值是直接和岁差章动有关, 如将岁差 \mathbf{p}_0 和 n 项章动分量 \mathbf{p}_i 之和表示为 $\mathbf{p} = \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i$, 利用(13)式可将 s 量表示为

$$s = -\frac{1}{2} \int_{t_0}^t \sum_{i=0}^n (\mathbf{p}_i \times \dot{\mathbf{p}}_i) \cdot \mathbf{n}_0 dt - \frac{1}{2} \int_{t_0}^t \sum_{i=0}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n (\dot{\mathbf{p}}_i \times \dot{\mathbf{p}}_j) \cdot \mathbf{n}_0 dt. \quad (16)$$

式中 $\dot{\mathbf{p}}_i$ 、 $\dot{\mathbf{p}}_j$ 为 \mathbf{p}_i 、 \mathbf{p}_j 的时间导数。(16)式第一部分为岁差和 n 项章动之和, 第二部分为 $n(n+1)$ 项岁差、章动的交叉项。

对于地球参考系, 设极运动可表为长期项、张德勒项、周年项及各周日章动项之和, 则可类似得到相应量 s' 。

将固定天球参考系定义在以河外源为参考的参考点上以后, 这样一个参考系在空间是没有残余转动的。而对于恒星参考系来说, 由于恒星自行误差的影响, 则会在空间产生这样的转动。非旋转原点本身是观测不到的, 但其位置可由地球自转极在空间的位置而给出。对于春分点其位置不仅依赖于地球自转极, 而且还和黄道有关。

前面已经说过, 定义非旋转原点的基本原则是, 当自转极(或天球历书极)由于岁差章动而对天球参考系作运动时, 不存在瞬时坐标系统对自转极(或天球历书极)本身的转动, 所以非旋转原点必须补偿由于自转极(或天球历书极)的岁差章动移动引起的赤经上的运动误差。因此这个非旋转原点对于天球参考系不可能是固定的。其实非旋转原点是一个术语, 它表示了空间绕一运动着的转动轴的瞬时“非转动”, 而不是绕空间任一固定轴的瞬时非转动。实际上这个非旋转原点改称为“起始点”可能更为合适。根据(16)式计算, 可得到在 s 值中, 即非旋转原点在空间有一个由章动带来的长期项 $0''.00385/\text{百年}$, 以及由岁差和章动引起的混合长期和周期项, 其值都不超过 $5 \times 10^{-6}''$, 比迄今一直使用的春分点在空间的运动值要小得多。但是由于人们对春分点已经习惯, 所以也就不易感到有问题了。

不同的极迹模型会对岁差常数产生不同的影响。如果地球自转极的极迹模型不同, 这时非旋转原点将产生移动, 也即瞬时系统绕 Oz 轴产生一个有限转动 ρ ,

$$\rho = -\frac{1}{2} \int_{t_0}^t [\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_b \times (\dot{\mathbf{p}}_0 + \dot{\mathbf{p}}_b)] \cdot \mathbf{n}_0 dt \quad (17)$$

在此设 \mathbf{p}_0 为自转极的理想位置, \mathbf{p}_b 为有误差模型的位置。 $\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_b$ 即因极迹模型不同而引起的极距离, $\dot{\mathbf{p}}_0$ 、 $\dot{\mathbf{p}}_b$ 为 \mathbf{p}_0 、 \mathbf{p}_b 的导数。现设章动系数的误差为 $0''.01$, 岁差误差为 $0''.1/\text{百年}$, 则其对非旋转原点的影响为:

岁差	$10 \times 10^{-5}''(t - t_0)$
章动(第一项)	$2 \times 10^{-5}''(t - t_0)$
(第九项)	$3 \times 10^{-5}''(t - t_0)$
(第三十一项)	$8 \times 10^{-5}''(t - t_0)$

这样的量级的运动是难以观测到的。因此我们使用非旋转原点以后, 一个主要优点就是将不会因岁差、章动模型的变化带来UT1和 $dUT1/dt$ 的跳跃。

在以上的叙述中, 没有明确极 p 是什么样的自转极。当前国际上采用的1980 IAU章动理

论,其所采用的极是天球历书极(CEP)。按照定义,它对地固或空固坐标系并不存在周日或准周日的运动。所以如取极 P 为CEP极,则同样可避免在地球参考系中涉及周日章动 s' 。因此用CEP极,即和IAU章动理论采用相同的极,计算非旋转原点比较合适。由(17)式可得到绕CEP极和瞬时自转极的恒星角之差是周日章动 s' 的函数,因而非旋转原点的“动力学”和“运动学”定义之间的差异并不真正存在。

六、结 束 语

非旋转原点的引入,导致了新世界时定义的产生。纽康的定义, Aoki等的世界时表达式,以及Guinot的世界时定义相比,新世界时定义明确地表达了世界时和地球自转角间的关系,而前两者因包含岁差差在内,使其含意模糊不清。在新的世界时定义中,还避免了岁差章动修订带来的麻烦,以及在时间概念上的含糊。同时由于非旋转原点的引入,也削弱了春分点的重要性。但是由于非旋转原点和长期以来习用的概念不一样,有关问题还未最后取得一致,所以需要作更进一步研究讨论。例如这个概念是和以河外源为参考的天球参考系联系在一起的,因而如何能有效地将恒星参考系和河外源参考系联系起来,就是一个值得研究的问题。当然随着空间技术的发展和地面观测精度的进一步提高,可能在不久的将来就能解决这个问题。根据Tautenburg和Kiev天文台的河外源照相观测计划,使用Tautenburg施密特望远镜(134/200/400)对10个天区119颗河外源的观测得到Hipparcos系统和河外源系统的联系精度^[18,19]为 $0''.14/\text{百年}$;而用Kiev长焦距望远镜(40/550)对93个天区339颗河外源得到的精度为 $0''.07/\text{百年}$ 。另外,由于非旋转原点是不能直接观测到的,如何精确地由地球自转极在空间的位置来推算出其位置,以及由此带来的误差影响等问题,都需要进一步深入研究和讨论。

参 考 文 献

- [1] King, R. W., *Reviews of Geophysics*, 25, (1987), n'5, 371.
 [2] Capitaine, N., *Astron. Astrophys.*, 162, (1986), 323.
 [3] Capitaine, N., IAU Colloquium No. 100, *Fundamentals of Astrometry*, Belgrade, Sept. 1987.
 [4] Aoki, S., Guinot, B., Kaplan, G. H., Kinoshita, H., McCarthy, D. D., Seidelmann, P. K., *Astron. Astrophys.*, 105, (1982), 395.
 [5] Williams, J. G., Melbourne, W. G., IAU Colloquium No. 63, (1981).
 [6] 朱圣源, Mueller, I. I., *Bull. Geod.*, 57 (1983), 29.
 [7] Guinot, B., IAU Symposium No. 82, *Time and Earth's Rotation*, p.7, (1979).
 [8] Gaposchkin, E. M., Kotaczek, B. (eds.), *Reference Coordinate Systems for Earth Dynamics*, p. 125, (1981).
 [9] Capitaine, N., Guinot, B., Souchay, J., *Celes. Mech.*, 39 (1986), 283.
 [10] 许邦信, 朱圣源, 张辉, *中国科学*, 4 (1985), 363.
 [11] Jordi, C., Rossello, G., *Monthly Notes R. A. S.*, 225 (1987), 723.
 [12] Aoki, S., Soma, M., Kinoshita, H., Inoue, K., *Astron. Astrophys.*, 128 (1983), 263.
 [13] Aoki, S., Kinoshita, H., *Celes. Mech.*, 29 (1983), 335.
 [14] Lieske, J. H., Lederle, T., Fricke, W., Morando, B., *Astron. Astrophys.*, 58 (1977), 1.
 [15] Capitaine, N., Guinot, B., (私人通信, 对Aoki[16]的回答) 1988.
 [16] Aoki, S., (Submitted to *Celest. Mech.*) 1987.
 [17] Guinot, B., in *Astrometric Techniques*, ed. by H. K. Eichhorn., R. J. Leacock, pl, (1987).
 [18] Dick, W. R., Ruben, G., Schilbach, E., Scholz, R. -D., *Astron. Nachr.*, 308 (1987), 211.
 [19] Yatsenko, A. I., Rybka, S. P., Scholz, R. -D., *Astron. Nachr.*, 308 (1987), 319.

(责任编辑 潘容士)

Universal Time and Guinot's Non-Rotation Origin

Xu Tongqi Li Zhengxin

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper the defects and the problems which exist in the expression of the present definition of universal time; the conception of Guinot's non-rotation origin as well as the new definition of universal time arising from this conception and the discussions for the problems of the non-rotation origin are reviewed.