

文章编号: 1000-8349(2012)04-411-27

# 2000 年以来国际天文学联合会 (IAU) 关于基本天文学的决议及其应用

刘佳成<sup>1,2</sup>, 朱 紫<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学 天文与空间科学学院, 南京 210093; 2. 教育部天文与天体物理重点实验室, 南京 210093)

**摘要:** 1991 年以来, 在国际天文学联合会 (IAU) 全体大会上, 通过了一系列关于天文参考系、时间尺度和地球自转模型的决议, 其目的是为了适应不断提高的天文观测精度。其中最重要的 3 次, 分别是在 1997 年的京都, 2000 年的曼彻斯特和 2006 年的布拉格通过的 IAU 1997, IAU 2000 和 IAU 2006 决议, 主要的变化包括: 从与历元有关的动力学参考系到与历元无关的运动学参考系, 从参考系的恒星实现到河外射电源实现, 从春分点到无旋转原点, 以及岁差-章动模型的改进。由于这些决议在参考系转换等方面引入了很多新概念和新方法, 对教学、研究和应用都产生了不小的影响, 对它们进行解读, 澄清概念, 规范使用是有必要的。首先介绍 IAU 关于时间尺度和天文参考系的重要决议, 并重点介绍 IAU 2000 和 2006 的每一条决议; 然后详细介绍其应用: 包括时间系统, 国际天球参考系和岁差-章动模型, 并和对应的旧系统进行比较; 最后对这些决议的使用提出建议。

**关键词:** 时间尺度; 参考系; 岁差-章动; 地球自转

**中图分类号:** P126.0      **文献标识码:** A

## 1 引 言

近几十年来, 天体测量的精度不断提高, 尤其是甚长基线干涉技术 (VLBI) 的发展, 以及不久的将来即将发射的第二代天体测量卫星 Gaia<sup>[1-3]</sup>, 将使天体位置的观测精度达到微角秒 ( $10^{-6}$  角秒) 的量级, 与之对应的天文参考系理论、地球自转理论的精度也需要随之改进, 以符合高精度观测的需要。从 1991 年到 2000 年, 国际天文学联合会 (IAU) 为了适应这些需要, 对天文参考系做了改进<sup>[4, 5]</sup>。以前的天文参考系是基于天赤道以及利用黄道定义的春分点<sup>[6]</sup>, 这给理论的发展和应用带来了一些困难。例如, 春分点作为天球上的一个假想点, 对于不同的恒星星表和太阳系历表有不同的实现<sup>[7]</sup>, 而且使用这些基本星表作为参考系的具体

收稿日期: 2012-04-16; 修回日期: 2012-05-09

资助项目: 国家自然科学基金 (10973009, 11173014)

实现,并不能保证参考系是无旋转的。1991年,IAU决议引入了国际天球参考系(ICRS)的概念,并且采用广义相对论作为基本天文学的基础,定义了BCRS,GCRS以及坐标时;1994年的决议又引入了国际天球参考架(ICRF)的概念,采用一组河外射电源的坐标来确定参考系的坐标轴指向,并且成立了关于非刚性地球章动模型的工作组;1997年的决议B2要求从1998年1月1日起采用国际天球参考系(ICRS)。IAU在这方面的决议,为现代的高精度天文观测提供了坚实的理论框架,不仅是天体测量学,其他所有的天文领域也都受益于此。

2000年以后,基本天文学领域有了更大的发展,包括观测定位技术、地球自转理论、参考系转换、时间系统转换等<sup>[8]</sup>。第2章是对IAU 2000和IAU 2006决议的解释;第3章介绍广义相对论框架下的时间系统;第4章是关于国际天球参考系的概述,以及与动力学参考系的比较;第5章介绍了新岁差-章动理论,第6章和第7章分别介绍地球自转理论中的关键概念——无旋转原点,以及天球参考系和地球参考系的转换;最后是总结和关于使用IAU决议的建议。

## 2 IAU 2000, IAU 2006 关于时空参考系和地球自转的决议

### 2.1 IAU 2000 决议

经过长时间的讨论和准备,2000年IAU全体大会(2000年8月,英国曼彻斯特)通过了一系列关于天文参考系和地球自转模型的决议(B1.1–B1.9和B2),采纳它们的原因,是由于天体测量的精度不断提高,需要更精确地定义和转换各种时空参考系。值得注意的是,IAU 2000决议中的一些概念,在1991年和1997年的决议中已经出现过,因此IAU 2000决议可以认为是之前决议的推广和发展。

#### 2.1.1 B1.1–B1.2: 建立和维持天球参考架

国际天球参考架(ICRF)作为国际天球参考系(ICRS)的实现,由一组精确测量的河外射电源的坐标实现其坐标轴的指向,并确定了212颗定义源作为定标的基准和坐标网格<sup>[9,10]</sup>。这些河外射电源非常遥远,因此自行可以忽略<sup>[11]</sup>。尽管如此,射电源的结构不稳定性,仍会导致参考架的不稳定,因此需要长期监测。该决议强调了甚长基线干涉技术(VLBI)对建立和维持参考架的重要作用,所以国际地球自转和参考系服务(IERS)<sup>[12]</sup>,国际VLBI服务(IVS)和国际天文学联合会相关工作组应该密切合作。为了对ICRF进行扩充,并且方便使用,将依巴谷星表(Hipparcos)<sup>[13]</sup>作为ICRS在光学波段的实现,并将其命名为依巴谷天球参考架(HCRF)。HCRF并没有采用星表中的所有星,而是将双星系统排除在外,因为依巴谷卫星观测的时间较短(短于4年),得到的恒星自行只能认为是瞬时自行,而非平均自行,因此无法真实反映双星系统的运动。在光学波段,基于依巴谷星表的天体测量星表还有很多,有些可以作为HCRF的扩充和加密<sup>[14]</sup>。

#### 2.1.2 B1.3–B1.5, B1.9: 质心天球参考系、地心天球参考系、后牛顿引力势以及相对论时间尺度

高精度的天文观测和天体力学理论需要以广义相对论为基础,因此IAU在此框架下定

义了全局的太阳系质心天球参考系 (BCRS) 和局部的地心天球参考系 (GCRS), 并且推荐谐和坐标规范、度规张量以及两个参考系之间的四维转换, 此决议也是 IAU 1991 决议的扩展。GCRS 和 BCRS 之间的空间坐标转换没有旋转, 因此 GCRS 是一个运动学无旋转的参考系<sup>[15]</sup>, 所以天体在 GCRS 中的运动方程 (例如人造卫星) 包含测地岁差的影响<sup>[16]</sup>:

$$p_g = 19.194 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}. \quad (1)$$

IAU 2000 岁差-章动理论也包含测地岁差。决议 B1.4 在广义相对论框架下给出地球在 GCRS 中的后牛顿引力势的展开; B1.5 定义了质心坐标时 TCB 和地心坐标时 TCG, 并明确了它们之间的转换关系<sup>[17]</sup>。

地球时 (TT) 在 IAU 1991 决议中定义, 而且被广泛用于描述地球表面的现象, IAU 2000 决议 B1.9 对 TT 进行了重新定义: TT 是 TCG 的线性函数, 其中的比率和零点都是定义常数。关于时间系统的转换在第 3 章中详细论述。

### 2.1.3 B1.6: IAU 2000 岁差-章动模型

2000 年以前, IAU 采用的岁差-章动模型是 IAU 1976 岁差模型<sup>[18, 19]</sup> 以及 IAU 1980 章动模型<sup>[20, 21]</sup>, 其中章动模型中的转换函数是基于光学天体测量的。然而 VLBI 观测表明 IAU 1976/1980 岁差-章动模型在当前的观测精度下已经不再适用了, 需要采用新的岁差-章动模型。IAU 2000 岁差-章动模型也称为 MHB 模型<sup>[22]</sup>, 它是基于刚性地球模型<sup>[23]</sup>, 用新的转换函数并考虑 VLBI 观测拟合所得地球基本参数 (BEP)。完整的 MHB 章动称为 IAU 2000A 章动序列, 其精度大约为 0.2 mas; 稍低精度 (大约 1 mas) 的章动序列, 称为 IAU 2000B<sup>[24]</sup>。IAU 2000 岁差-章动模型描述天球中间极 (CIP) 在 GCRS 中的运动。岁差-章动模型在第 5 章中详细论述。

### 2.1.4 B1.7-1.8: 天球中间极 (CIP) 和天球历书零点 (CEO) 的定义

一般来说, 描述天球参考系和地球参考系之间的旋转运动, 只需要 3 个欧拉角就可以完成, 但是为了描述地球的瞬时自转轴在天球参考系和地球参考系中的运动, 则需要另外两个参数<sup>[25]</sup>。IAU 2000 决议以前, 这个轴是由天球历书极 (CEP) 来实现的<sup>[26]</sup>; CEP 定义要求在天球和地球参考系中没有准周日运动。但是考虑到目前的观测精度和短于 1 d 的观测分辨率, 发现明显存在高频的章动和极移 (短于 1 d), 这使得 CEP 的定义不再成立。因此重新定义了天球中间极 (CIP), 规定它在天球参考系中的周期运动只包含周期大于 2 d 的项, 而其他的高频项都归于极移运动。

和中间参考系的极一样重要的是它的零点, 即  $X$  轴的指向 (或经度起量点)。IAU 2000 决议以前, 春分点和地球零度经线被作为描述地球自转 (恒星时) 的参考点。但是瞬时春分点 (地球天赤道和黄道的交点) 是一个几何定义, 不仅依赖于地球绕太阳的轨道运动, 还依赖于地球的岁差-章动模型, 因此包含了长期和周期的变化, 这给使用带来了不便。另一方面, 黄道是一个用地球轨道拟合的三维曲线, 可以用多种方式定义, 而且在天球参考系和地球参考系的转换中也用不到。由春分点定义的参考系有明显的缺陷——每当地球的岁差-章动模型、黄道的定义发生改变, 世界时 (UT1) 和格林尼治恒星时 (GST) 之间的关系就要相应改变。

新的参考系零点称为天球历书零点 (CEO), 它不依赖于黄道和当前采用的岁差-章动模型。CIP 赤道上的天球历书零点的定义是根据 Guinot 的无旋转原点概念<sup>[27]</sup>, 是一个运动学的定义。在地球参考系中, 可以类似定义地球历书零点 (TEO), CEO 和 TEO 都没有绕着 CIP 的旋转。CEO 和 TEO 之间的角距离 (沿着 CIP 赤道), 称为地球自转角, 是 UT1 的线性函数。天球参考系和地球参考系的转换由 CIP 在两个参考系中的位置和地球自转角给出。无旋转原点的概念将在第 6 章中详细介绍。

### 2.1.5 B2: 关于协调世界时

引入协调世界时 (UTC) 原因是国际原子时 (TAI) 秒长 (或 SI 秒长) 比世界时秒长 (UT1) 要短, 导致这个差别的原因有二。(1) SI 秒长定义时, 与当时的 UT1 秒长存在误差, 并且随时间累积。1967 年, 原子时秒长定义为 9 192 631 770 铯原子跃迁时长, 这一秒长相当于 1850 年前后的平均 UT1 秒长。如果当初定义数值为 9 192 631 997, 则目前平均 7、8 年才有一次闰秒发生<sup>[28]</sup>。(2) 因为潮汐影响, 地球自转速率长期变慢<sup>[29]</sup>。UTC 的秒长和 TAI 相同, 并通过闰秒使得它和 UT1 保持一致 ( $|\text{UT1} - \text{UTC}| < 0.9 \text{ s}$ )。考虑到闰秒是不可预测的, 而且对现代通信和卫星系统造成了很大的影响, IAU 成立了专门的工作组来研究重新定义 UTC 的可能性。2012 年国际电信联盟 (ITU) 投票是否取消闰秒, 但并没有做出最后的决议, 而是将这一问题推迟到 2015 年继续讨论。中国的意见是保留 UTC 系统和闰秒<sup>[31]</sup>。从 1972 年 7 月开始, 所有闰秒都是正闰秒 (即 +1 s), 至今总共发生 24 次, 上一次闰秒是 2009 年 1 月 1 日 0 时, 而下一次将发生在协调世界时 2012 年 7 月 1 日 0 时<sup>[30]</sup>, 届时 TAI 和 UT1 之差将变为 35 s。从文献 [30] 所列的闰秒记录可以看出, 从 1999 年开始, 闰秒大约 3 年才发生一次, 这表明地球自转变慢的趋势在逐渐变缓。

## 2.2 IAU 2006 决议

IAU 2006 决议在 IAU 第 26 届全体会议上通过 (2006 年 8 月, 捷克布拉格), 是对 IAU 2000 决议的补充和改进, 其中与基本天文学相关的是决议 B1-B3。

### 2.2.1 B1: P03 岁差理论和黄道的定义

IAU 2000 岁差理论 (MHB 理论<sup>[22]</sup> 的一部分) 通过拟合 VLBI 数据, 只考虑了对 IAU 1976 岁差<sup>[18]</sup> 的黄经和交角岁差速率的改正, 因此并没有考虑动力学模型。IAU 2000 决议 B1.6 就已经指出, 需要一个新的岁差理论来弥补这个不足。IAU 2006 决议采用了 Capitaine 等人发展的 P03 岁差理论<sup>[32, 33]</sup>, 将其命名为 IAU 2006 岁差理论<sup>[34]</sup>, 并代替了 IAU 2000 的岁差部分。随着理论和观测的发展, 认识到太阳系行星对地球赤道面的运动也有影响, 所以“日月岁差”和“行星岁差”的说法已经不适用了, 决定分别用“赤道岁差”和“黄道岁差”替代。关于黄道, IAU 1976 岁差理论使用的是 Newcomb 定义的黄道<sup>[35]</sup>, 可以认为是地月系质心的几何路径, 而决议 B1 对“黄道”做了明确的定义 (惯性黄道): 在 BCRS 中, 黄极由广义相对论框架中的地月系平均轨道角动量矢量定义<sup>[36]</sup>。

### 2.2.2 B2: 参考系的极和零点以及 BCRS 和 GCRS 的空间指向

考虑 IAU “基本天文学术语”工作组的推荐 (见 2.3 节), 天球中间参考系的极和零点分别命名为“天球中间极 (CIP)”、“天球中间零点 (CIO)”和“地球中间零点 (TIO)”, 从而不再

使用“天球历书原点 (CEO)”和“地球历书原点 (TEO)”。CIO 原来是表示与极移有关的“国际习用零点”, 在引入新的定义之后, 原来的缩写不再继续使用。

在 BCRS 和 GCRS 的定义中, 规定 GCRS 与 BCRS 保持运动学无旋转, 但未明确其空间指向。根据 IAU “天体测量和天体力学中的相对论”工作组的推荐, 决议 B2 还规定了 BCRS 和 GCRS 的空间指向: 如果没有特殊说明, BCRS 和 ICRS 的指向相同, 而 GCRS 的指向从 BCRS 得到。

### 2.2.3 B3: 质心力学时 (TDB) 的重新定义

早在 1979 年, IAU 就定义了质心力学时 (TDB) 和地心力学时 (TDT), 规定 TDB 和 TDT 之差只有周期项, 后者在 1991 年的决议 (A4) 中重新命名为地球时 TT。而 1991 年定义 TCB 时, 注意到了 TDB 是 TCB 的线性函数, 但没有固定的比率和零点, 于是导致了 TDB 的实现不唯一, 而且在太阳系历表中需要统一时间变量的使用。IAU 2006 决议 B3 重新定义了 TDB: 它是 TCB 的线性函数, 比率  $L_B$  和零点  $TDB_0$  都是定义常数。

## 2.3 IAU 2006 基本天文学名词

2007 年 IAU 第一分部“基本天文学”的基本天文学术语工作组发表了 IAU 2006 决议的基本天文学术语表<sup>[37]</sup>, 最主要的部分是在天文参考系和地球自转模型的描述方面。根据 IAU 工作组和中国天文学名词的推荐<sup>[38]</sup>, 在使用中文术语方面有以下几点需要注意:

- (1) “原点”是指坐标系  $O-XYZ$  的坐标原点  $O$ ; 而“零点”是球面坐标计量起始点, 即经度的起量点, 在直角坐标系中, 指  $X$  轴的方向。
- (2) 对于“无旋转原点”一词, 确切的应该称为“无旋转零点”, 但是在各种中文参考文献中沿用已久, 故保留。此为一特例。
- (3) 在相对论中, 参考系通常表示四维时空, 因此如 BCRS, 通常写成“质心天球参考系”, 实际更准确的是“质心时空参考系”, 但是沿用已久, 仍然保留原来的说法。
- (4) 曾经出现但不再使用的名词包括: 天球历书原点 (CEO)、地球历书原点 (TEO)、国际协议原点、习用地球参考系 (CTRS)、恒星角 (被地球自转角替代)、日月岁差和行星岁差 (被赤道岁差和黄道岁差替代)。
- (5) 经典岁差-章动理论中的“二分差”, 原来是指黄经章动在赤道上的投影分量, 并且是真恒星时 (GST) 和平恒星时 (GMST) 之差, 但是在高精度模型中, GST 和 GMST 的差应该是“赤经章动” (EE), 传统的“二分差”只是其中的一部分。

在研究和教学工作中, 应该尽量地遵守 IAU 工作组推荐的术语及其内涵, 以达到统一、不混淆的目的。

## 2.4 IAU 2009 天文常数系统

长期以来, 天文工作中使用的是 IAU 1976 天文常数系统, 而自 1976 年起, 与天文常数有关的领域发展很快, 主要有: (1) 天体测量新技术的发展, 甚长基线射电干涉测量 (VLBI)、激光测月 (LLR)、激光测卫 (SLR) 等几乎完全取代了经典的仪器, 使观测精度有了数量级上的提高; (2) 美国喷气推进实验室 (JPL) 的 DE 系列历表由 DE118/LE62、DE200/LE200 发展到 DE421; (3) 国际地球自转和参考系服务 (IERS) 使用的标准参考系统从 MERIT 标



准、IERS 1989、1992、1996、2003 规范发展到 IERS 2010 规范；(4) 空间大地测量技术的迅速发展，如全球卫星定位系统、卫星测高技术、综合口径雷达干涉等的使用；(5) 地球模型和岁差章动理论的发展 (IAU 2000 决议 B1.6-1.8, IAU 2006 决议 B1)；(6) 天体测量和天体力学中广义相对论的引入 (IAU 2000 决议 B1.3-1.5、B1.9, IAU 2006 决议 B3)；(7) 获得了新的更精确的天文常数测定值，如用 VLBI 技术得到岁差常数改正值，利用太阳系行星飞船的观测资料给出 4 个小行星 (Eros、Ceres、Pallas 和 Vesta) 质量和太阳质量之比。显然 IAU 1976 天文常数系统已大大落后于时代的步伐，不能适应更高精度要求的天文工作。2009 年第 27 届国际天文学联合会大会通过了 IAU 2009 天文常数系统<sup>[39]</sup>，并从 2010 年开始使用。新的 IAU 2009 天文常数系统对于常数的分类有所改变，以更好地反映其结构，其中包括：

- (1) 1 个自然定义常数——光速；
- (2) 6 个辅助定义常数——高斯引力常数、地球时 (TT) 与地心坐标时 (TCG) 的转换参数、质心力学时 (TDB) 与质心坐标时 (TCB) 的转换参数、TDB – TCB 的初始值、J2000.0 时的地球自转角和它的速率；
- (3) 1 个自然测量常数——引力常数；
- (4) 2 个导出常数——天文单位 (au)、地心坐标时 (TCG) 与质心坐标时 (TCB) 的转换参数；
- (5) 7 个天体常数——月地质量比、地球赤道半径、地球力学形状因子及其长期项、地心引力常数、大地水准面的重力位、地球平均角速度；
- (6) 1 个常数组——大行星质量和 4 个小行星质量；
- (7) 1 个初始值——J2000.0 时的黄赤交角。

有一个常数已经从 IAU 1976 的常数系统中去掉，即总岁差速率  $p$ 。

天文单位 au 近年来颇受基本天文学领域的专家关注，在 2012 年已经形成新的决议<sup>[40, 41]</sup>，将天文单位与长度单位“米”直接联系起来，不再沿用过去的相对定义方法。而定义数值就是 IAU 2009 常数系统中的值：

$$1 \text{ au} = 1.495\,978\,707\,000 \times 10^{11} \text{ m} \quad , \quad (2)$$

这样，天文单位与厘米、毫米等单位就是等价的，可以应用于各种相对论坐标系统。重新定义之后，高斯引力常数  $k$  将从 IAU 常数系统中删除。

### 3 时间尺度

1991 年以来，IAU 就没有重新定义过新的时间尺度，而是对已有的时间尺度做出了澄清和重新定义。简单来说时间尺度主要分为两种：基于原子物理的原子时系统 (SI 秒) 和基于地球自转的世界时系统。原子时系统包括了实际应用需要的国际原子时 (TAI)、地球时 (TT)，以及理论研究需要的坐标时 TCB 和 TCG。其中 TCB 和 TCG 分别是四维时空参考系 BCRS 和 GCRS 中的坐标时。质心力学时 (TDB) 以及历表时 ( $T_{\text{eph}}$ ) 与 TCB 紧密相关，

用于太阳系历表。基于地球自转的时间尺度包括了真恒星时 (GST)、平恒星时 (GMST) 以及世界时 (UT1)。由于地球自转的不均匀性, 以及潮汐的影响, 以地球自转为基础的时间尺度长期变慢, 滞后于 SI 时间。为了和原子时系统保持同步, 并兼顾地球自转变慢的效应, 引入协调世界时 UTC 和闰秒。

### 3.1 以 SI 秒长为基础的时间尺度

国际度量衡局 (BIPM) 在 2006 年对于 SI 秒长的定义<sup>[42]</sup> 是一种对特定的原子 (铯原子 133) 辐射周期的计数, 并没有给出实现的地点或当地的引力场, 仅仅是一种原时的实现方案。SI 秒可以在任何地方实现, 比如地球表面、人造卫星上、火星上以及太阳系质心等, 对于所有的观测者, 实现 SI 秒的方法都是一样的。

为了实际使用, 国际原子时 TAI (一种坐标时) 的秒长与旋转的地球平均海平面上实现的 SI 秒长相同。TAI 是一种均匀连续的时间尺度, 使用 50 多个国家实验室里按照 SI 秒定义制作的约 300 个原子钟的资料综合得到。上面已经提到, TCB 和 TCG 是 IAU 定义的相对论四维时空 BCRS (全局参考系) 和 GCRS (局部参考系) 中的坐标时<sup>[17]</sup>, 相对于地球表面实现的 SI 秒长, TCB 的速率快  $1.55 \times 10^{-8}$ , TCG 的速率快  $6.79 \times 10^{-10}$ 。另外两个经常使用的时间尺度, 地球时 TT 和质心力学时 TDB, 也是坐标时 (都不能直接测量, 只能从可测量的原时转换得到), 它们分别是 TCG 和 TCB 的线性函数, 或者可以认为是改变了尺度的 TCG 和 TCB。TT 和 TDB 的定义仅仅是为了方便: TDB 与 TCB 转换关系中的系数使得在地心处的 TDB 与 TT 尽量接近, 而 TT 的选择则保证它的速率与旋转地球表面上的观测者得到的原时速率相等<sup>[40, 43]</sup>。具体的坐标时的转换公式在第 3.3 节中给出。

另一个与 TDB 十分类似的时间尺度, 称作历表时  $T_{\text{eph}}$ , 也是 TCB 的线性函数。不同的是, TDB 与 TCB 的关系是通过定义常数  $L_B$  确定; 而  $T_{\text{eph}}$  与 TCB 的关系, 对不同的历表有不同的尺度因子, 在建立历表的过程中, 隐含在  $T_{\text{eph}}$  和 TT 的转换关系中。例如美国 JPL 的 DE 系列历表, 其中的时间尺度  $T_{\text{eph}}$  与 TDB 的含义相同, 因此从 JPL 历表得到的太阳系质心和日心的数据通常都以 TDB 作为时间引数。

### 3.2 以地球自转为基础的时间尺度

以地球自转为基础的时间尺度在确定望远镜指向、观测者地面位置以及观测卫星时有重要的应用。格林尼治恒星时是在格林尼治的春分点的时角, 恒星时分为真恒星时 GST 和平恒星时 GMST, 取决于参考点是真春分点 (受岁差和章动的影响) 还是平春分点 (只受岁差影响)。真恒星时和平恒星时之差称为赤经章动 (EE), 是一个周期函数, 最大振幅大约是 1 s。实际的高精度观测与真恒星时相关。世界时系统 UT, 在天文和航天中也经常使用, 目前通常是指 UT1。IAU 2000 决议以前, UT1 通常由格林尼治平恒星时得到, 如文献 [44] 中的公式:

$$\begin{aligned} \text{GMST1 of 0h UT1} = & 24\,110.548\,41\text{s} + 8\,640\,184.812\,866\text{s } T_U - \\ & 0.093\,104\text{s } T_U^2 - 6.210 \times 10^{-6}\text{s } T_U^3, \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $T_U$  是从 J2000.0 起算的儒略世纪数。当前天体测量和参考系使用的标准历元 J2000.0 是地心处的 TT 瞬间: 2000 年 1 月 1 日 12 时 TT, 或者 JD 2 451 545.0 TT。在 2000 年, IAU 重新定义了 UT1, 它是地球自转角 ERA (中间赤道上, CIO 和 TIO 相对于地心的角距离) 的线

性函数。可以认为 TIO 随着地球一起旋转, 而 CIO 则固定在天球参考系中, 于是 ERA 是地球自转运动的一种直接测量:  $dERA/dt = \omega$ , 其中  $\omega$  是地球的平均自转角速度。需要提到的是, 上面的两种 UT1 定义实际是等价的, 通过 GMST 的定义仍然有广泛的使用, 但是通过地球自转角的定义在高精度的工作中更加适用。UT1 的秒长和地球平均自转角速度  $\omega$  并不是一个常数, 所以地球自转角和世界时都受到地球自转速率变化 (即日长) 的影响, 这个变化不能通过理论模型预测, 必须通过天文观测得到, 例如 VLBI 对河外射电源和地球自转变化的长期监测。

### 3.3 坐标时的转换

根据 IAU 决议给出的表达式, 本节的坐标时转换都是针对地面观测 (大地水准面附近的观测) 而言的。IAU 2000 的决议 B1.3 和 B1.4 在后牛顿框架下给出了完整的 BCRS 和 GCRS 的度规, 同时决议 B1.9 重新定义了地球时 TT, TT 与 TCG 速率之差为:  $dTT/dTCG = 1 - L_G$ , 其中  $L_G$  是一个定义常数。TCG 与 TT 之差为:

$$TCG - TT = \left( \frac{L_G}{1 - L_G} \right) \times (JD_{TT} - T_0) \times 86\,400 \text{ s}, \quad (4)$$

其中  $JD_{TT}$  是 TT 儒略日,  $T_0 = 2\,443\,144.500\,372\,5$  是 1977 年 1 月 1 日 00:00:00, 在这个时刻, TT、TCG 和 TCB 的读数都是 1977 年 1 月 1 日 00:00:32.184。上式可以近似写为:

$$TCG - TT = L_G \times (MJD - 43\,144.0) \times 86\,400 \text{ s}, \quad (5)$$

其中 MJD 是简化儒略日。TAI 是 TT 的具体实现, 两者之间仅仅有一个固定的差别:

$$TT = TAI + 32.184 \text{ s}, \quad (6)$$

质心力学时 TDB 原用于太阳系历表和运动方程, IAU 1976 定义中, 规定 TDB 和 TT 之差只有周期项, 但这个条件是无法严格满足的, 两者之差仅仅包含周期项这个假设, 只能在短时间和低精度的数值近似下才能保证。因此 IAU 2006 决议 B3 对 TDB 重新进行定义如下:

$$TDB = TCB - L_B \times (JD_{TCB} - T_0) \times 86\,400 \text{ s} + TDB_0, \quad (7)$$

其中  $L_B = 1 - dTDB/dTCB = 1.550\,519\,768 \times 10^{-8}$ ,  $TDB_0 = -6.55 \times 10^{-5} \text{ s}$  都是定义常数。BCRS 和 GCRS 的坐标时 TCB 和 TCG 的转换, 涉及到相对论的四维时空转换, 因此要复杂得多。TCB 和 TCG 的严格关系在 IAU 2000 决议 B1.5 中给出。对于给定的在质心参考系下的事件 (TCB,  $\mathbf{x}$ ), 有

$$TCB - TCG = c^{-2} \left\{ \int_{t_0}^t [v_e^2/2 + U_{\text{ext}}(\mathbf{x}_e)] dt + \mathbf{v}_e \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_e) \right\} + O(c^{-4}), \quad (8)$$

其中  $\mathbf{x}_e$  和  $\mathbf{v}_e$  是地心相对于太阳系质心的位置和速度,  $U_{\text{ext}}$  是太阳系所有天体 (除地球本身以外) 地心处的牛顿引力势, 式 (8) 中省略的项在时间速率上小于  $10^{-16}$ <sup>[45]</sup>。上式也可以表达为

$$TCB - TCG = \frac{L_C \times (TT - T_0) + P(TT - P(T_0))}{1 - L_B} + c^{-2} \mathbf{v}_e \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_e), \quad (9)$$



其中  $L_C = 1.480\ 826\ 867\ 41 \times 10^{-8}$  为定义常数, 也是  $1 - dTCG/dTCB$  的平均值, 非线性项  $P(TT)$  最大振幅约为 1.6 ms。

对于时间尺度 TAI、TCG、TT、TCB、TDB, 可以如下过程进行转换: 从协调世界时 UTC 开始, 加上整数秒得到国际原子时 TAI, 可以认为 TAI 是地球表面平均海平面上的原时, 继续加上固定的差 32.184 s (见式 (6)), 得到地球时 TT, 然后利用式 (4)、(8)、(7), 可以分别得到 TCG、TCB 和 TDB。TDB 和 TT 的差别不会超过 0.002 s, 在很多应用中可以忽略。图 1 是上述各种时间尺度的转换关系示意图。IAU 基本天文学标准程序库 SOFA<sup>[46]</sup> 中提供了这些时间尺度的转换程序, 在实际工作中可以直接调用其中的子程序来计算。

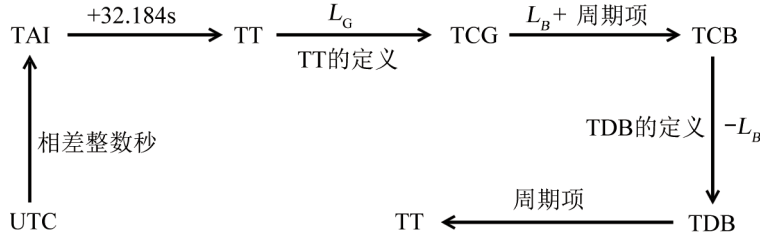


图 1 基于原子时系统的时间尺度的转换关系

### 3.4 世界时、恒星时和地球自转角的转换

从协调世界时 UTC 开始, 世界时 UT1 可以写为:

$$UT1 = UTC + dUT1, \tag{10}$$

其中 dUT1 是 IRES 公报中  $UT1 - UTC$  的近似值。而 TT 可以通过下面的公式得到:

$$TT = 32.184s + \Delta AT + UTC, \tag{11}$$

其中  $\Delta AT = TAI - UTC$  是整数 (适用于 1972 年以后, 之前  $\Delta AT$  并非整数), 随着闰秒的引入而改变。

地球自转角 ERA 的表达式为<sup>[45, 47]</sup>:

$$ERA(T_u) = 2\pi(0.779\ 057\ 273\ 2640 + 1.002\ 737\ 811\ 911\ 354\ 48 T_u), \tag{12}$$

其中  $T_u = JD_{UT1} - 2\ 451\ 545.0$ 。式 (12) 对地球的岁差-章动模型并不敏感, 因此, 即使岁差-章动模型有所改进, 地球自转角的表达式也不必进行修正。与地球自转角不同, 格林尼治真恒星时 GST 是从真春分点起量的, 它与 ERA 的关系可以写为:

$$GST = ERA(UT1) - EO, \tag{13}$$

其中 EO 称为零点差, 与岁差-章动在中间赤道上的分量有关。根据 IAU 2006/2000A 岁差-章动模型, 零点差的表达式 (包含在 1975-2025 年之间, 所有大于  $0.5 \mu\text{as}$  的项) 为:

$$EO = -0''.014\ 506 - 4612''.156\ 534 t - 1''.391\ 581\ 7 t^2 + 0''.000\ 000\ 44 t^3 - \Delta\psi \cos \epsilon_A + \sum_k C'_k \sin \alpha_k, \tag{14}$$

其中  $t$  是从 J2000.0 起算的儒略世纪数, 参数  $\alpha_k$  和振幅  $C'_k$  可以从 IERS 规范 2010<sup>[45]</sup> 的表格 5.2e 中得到。公式 (14) 中的  $\Delta\psi \cos \epsilon_A$  是经典的赤经章动, 即二分差; 而  $\sum_k C'_k \sin \alpha_k$  称为赤经章动的补充项 (EECT)<sup>[48]</sup>, 主要包含了岁差和章动的交叉项, 使得 GST 达到微角秒的精度。GST 中的多项式部分, 即是与 IAU 2006 岁差理论相符的格林尼治平恒星时 (GMST) 的表达式:

$$\begin{aligned} \text{GMST} = & \text{ERA}(\text{UT1}) + 0''.014\,506 + 4\,612''.156\,534\,t + 1''.391\,581\,7\,t^2 - \\ & 0''.000\,000\,44\,t^3 - 0''.000\,029\,956\,t^4 - 0''.000\,000\,036\,8\,t^5. \end{aligned} \quad (15)$$

在上面的表达式中“格林尼治”的确切含义应该是指包含地心、地球中间极 CIP 以及地球中间零点 TIO 的平面<sup>[49]</sup>。CIP 可以认为是地球自转轴 (等价于真天极), 其位置由岁差-章动模型决定; 而 TIO 可以认为是在中间赤道上, 固定于经度为 0 度的点。严格地说, TIO 的位置与极移有关, 而经度  $\lambda$  应该是从 TIO 起量, 然后再利用  $\lambda$  计算当地的真恒星时 (LST) 和平恒星时 (LMST):

$$\text{LST} = \text{GST} + \lambda/15, \quad \text{LMST} = \text{GMST} + \lambda/15, \quad (16)$$

经度  $\lambda$  以角秒为单位, 可以表达为

$$\lambda = \lambda_G + (x_p \sin \lambda_G + y_p \cos \lambda_G) \cdot \tan \phi_G, \quad (17)$$

其中的  $\lambda_G$  和  $\phi_G$  是当地的地理经度和纬度,  $x_p$  和  $y_p$  是 CIP 在地球参考系 (ITRS) 中的坐标, 即极移的两个分量。

## 4 基本参考系

当前的观测数据, 例如天体测量星表、太阳系行星历表都是在国际天球参考系 (ICRS) 中描述的。ICRS 的坐标原点在太阳系质心<sup>[50]</sup>, 其坐标轴的指向由一组精确观测的河外射电源的坐标实现, 称作国际天球参考架 (ICRF)。第一个 ICRF 星表 (此后写为 ICRF1)<sup>[9, 51]</sup> 共包含 608 颗河外射电源, 其中 212 颗位置和结构稳定, 被选为定义源。ICRF1 中源的位置精度大约为 0.25 mas, 而参考系轴的稳定性大约为 20  $\mu\text{as}$ 。当前最新的国际天球参考架是 ICRF2<sup>[52]</sup>, 总共包含 3414 颗射电源, 其中 295 颗是定义源。与 ICRF1 相比, ICRF2 包含的射电源数量大约为 ICRF 的 5 倍, 定义源位置精度大约为 40  $\mu\text{as}$ , 轴的稳定性大约 10  $\mu\text{as}$ , 都比 ICRF1 改进了许多, 而且 ICRF2 中的定义源比 ICRF1 中的分布更均匀。

河外射电源与银河系中的恒星不同, 它们和太阳的距离十分遥远 (百万秒差距), 因此认为没有自行, 至少在目前的精度下观测不到<sup>[11]</sup>。根据这个假设, 利用这些遥远的河外射电源的坐标, 就可以建立一个与历元无关的运动学无旋转的准惯性参考系 (或者称为“空固参考系”)。太阳绕银河系旋转的非线性运动引起的长期光行差<sup>[53, 54]</sup>, 会使河外射电源产生与距离无关的视自行效应, 导致参考架的基准点不再是静止的 (运动速率幅值大约为 5  $\mu\text{as} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 从而对 ICRS 的惯性有系统影响。对于这个新问题, 近年来已经有一些研究, 例如通过 VLBI

观测拟合射电源的自行, 进而估计长期光行差效应<sup>[55]</sup>, 直接利用 VLBI 资料估计太阳的加速度<sup>[56]</sup>对地球自转参数的影响<sup>[57]</sup>, 理论估计长期光行差漂移造成的 ICRS 的整体旋转<sup>[58]</sup>等。建立惯性参考系一直是天体测量和基本天文学的最根本任务, 在迈向微角秒精度天体测量的过程中, 必然还有很多问题要讨论。

#### 4.1 ICRS 的光学波段和动力学实现

由于 ICRF (包括 ICRF1 和 ICRF2) 是在射电波段建立的, 而基准射电源在光学波段非常暗 (大约 20 mag), 对于光学观测很不方便, 所以 IAU 2000 决议 B1.2 推荐使用依巴谷星表 (Hipparcos Catalogue) 作为 ICRS 在光学波段的主要实现<sup>[59]</sup>, 并命名为依巴谷天球参考架 (HCRF)。依巴谷卫星计划 (1989–1993) 建立了一部与地球大气和地球自转参数无关的天体测量星表<sup>[13, 60]</sup>, 包含覆盖全天的 117 955 颗恒星, 其中亮于 9 mag 的恒星的位置、视差及自行精度大约为 1 mas 和  $1 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[61]</sup>。依巴谷星表比之前的任何光学天体测量星表都精确, 而且没有明显的星等差和区域差。与河外射电源相比, 恒星的重大区别在于有很明显的自行, 所以依巴谷星的位置精度依赖于时间: 随着时间偏离其平均观测历元 J1991.25, 依巴谷参考架的精度也随之降低。因为依巴谷观测的时间较短, 恒星的自行只能认为是瞬时值, 所以 HCRF 排除了自行观测不准确的双星和多星系统, 最后大约 85% 的依巴谷星被用作实现光学参考架。

依巴谷观测恒星的极限星等大约为 12 mag, 无法观测到 ICRF 中的定义源, 从而依巴谷参考系和 ICRS 的连接只能通过间接的方法进行: 例如地球自转参数比较以及 VLBI 和 VLA 对少数依巴谷射电星的观测。最精确的是用 VLBI 观测的 12 颗射电星, 用来直接与 ICRF 连接<sup>[62]</sup>。通过对所有方法得到的结果进行综合, 得到依巴谷参考系和 ICRS 指向偏差和相对旋转分别为 0.6 mas 和  $0.25 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[63]</sup>。

由于极限星等的限制, 依巴谷星表观测的恒星数依然比较少, 通常使用第谷星表 (Tycho-2)<sup>[64]</sup>作为更实用的光学参考架的扩充。第谷星表结合了依巴谷卫星的巡天和 144 个地面望远镜观测的星表, 包含了 2 539 913 颗恒星, 获取自行的历元跨度大约一个世纪, 精度为  $1 \sim 3 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ 。极限星等更暗的现代天体测量星表有光学波段的 UCAC 星表<sup>[65, 66]</sup>, PPMX 星表<sup>[67]</sup>, PPMXL 星表<sup>[68]</sup>, XPM 星表<sup>[69]</sup>等; 近红外波段的 2MASS 星表<sup>[70]</sup>; 射电波段的 NVSS 和 FIRST 星表<sup>[14]</sup>, 以及具有射电和光学辐射的类星体星表 LQRF<sup>[71]</sup>和 LQAC<sup>[72, 73]</sup>。关于天体测量星表的综述, 可以参考文献 [14]。

太阳系大行星和月历表可以作为 ICRS 的动力学实现, 例如美国喷气推进实验室 (JPL) 的 DE405/406<sup>[74]</sup>和最新的 DE421 历表<sup>[75]</sup>, 或者法国天体力学和历表计算所 (IMCCE) 的 INPOP10a 数值历表<sup>[76]</sup>。这些历表包含了太阳系大行星和月球在 ICRS 中的位置和速度, 为太阳系中的天体运动提供参考系。

#### 4.2 FK5 参考系和 ICRS 的联系

引入 ICRS 和河外射电源实现参考架之前, 基本天文参考系是 FK5 动力学参考系 (严格地说是由动力学定义, 并考虑了恒星运动学改正的参考系), 基于对亮星的观测和 IAU 1976 天文常数系统, 参考系的基本平面是 J2000.0 的平赤道面, X 轴的方向为 J2000.0 平春分点。

最新的动力学参考系的实现是 FK5 星表<sup>[77]</sup>，很明显，这样定义的动力学参考系是与历元相关的。主要的困难在于，参考系的运动和地球的岁差-章动理论联系在一起，当更多的恒星在其他历元被观测，然后利用岁差常数转换到基本历元（例如 J2000.0）时，由于岁差常数的误差就会引入恒星位置和自行的系统差，从而导致参考系的旋转。由河外射电源实现的 ICRS，坐标轴相对于空间固定，所以与太阳系动力学和地球的岁差-章动无关，也脱离了传统意义上的赤道、黄道和春分点，因此更接近惯性参考系。

考虑到参考系的延续性，ICRS 的坐标轴与 FK5 参考系在 J2000.0 历元需尽量地保持接近。ICRS 的基本平面由 VLBI 观测确定，它的极与动力学参考系的极之间的偏差大约为 20 mas，导致这个偏差的原因（20 年 VLBI 观测和数据拟合）比较复杂。ICRS 的参考系零点的选择也是任意的，为了实现 ICRS 和 FK5 的连接，选择了 23 颗射电源的平均赤经零点来作为 ICRS 的零点<sup>[78]</sup>，并且令射电源 3C 273B 在 FK5 系统中的赤经为 12h 29m 6.6997s<sup>[79]</sup>。参考图 2，ICRS 和 FK5 参考系的关系由三个参数决定，分别是天极的偏差  $\xi_0$  和  $\eta_0$ ，以及经度零点差  $d\alpha_0$ ，它们的值分别为<sup>[80, 81]</sup>：

$$\begin{cases} \xi_0 = -16.617 \pm 0.010 \text{ mas} \\ \eta_0 = -6.819 \pm 0.010 \text{ mas} \\ d\alpha_0 = -14.6 \pm 0.5 \text{ mas} \end{cases}, \quad (18)$$

于是 ICRS 和 J2000.0 平赤道参考系的关系可以写为：

$$\mathbf{r}_{\text{J2000}} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{r}_{\text{ICRS}}, \quad (19)$$

其中常数矩阵  $\mathbf{B} = \mathbf{R}_1(-\eta_0) \cdot \mathbf{R}_2(\xi_0) \cdot \mathbf{R}_3(d\alpha_0)$  称为参考架偏差矩阵，由三个小角度旋转组成； $\mathbf{r}_{\text{J2000.0}}$  和  $\mathbf{r}_{\text{ICRS}}$  是同一个单位矢量在不同参考系中的表示。

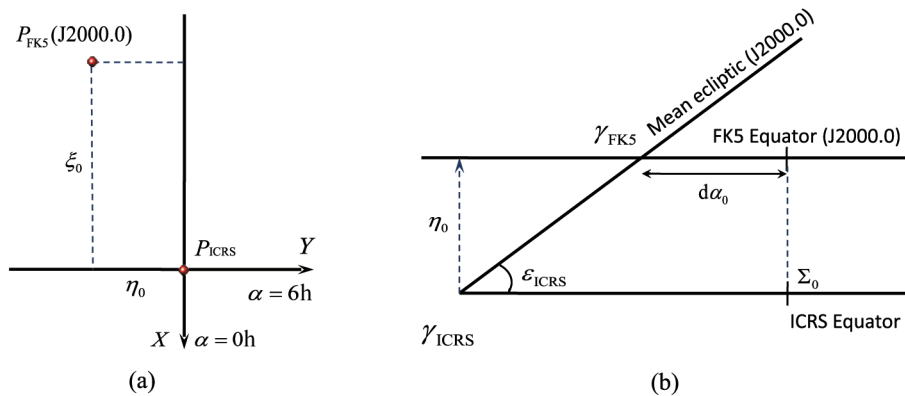


图 2 ICRS 和 FK5 (J2000.0 平赤道) 参考系的转换<sup>[80]</sup>  
(a) 坐标原点是 ICRS 的 Z 轴；(b)  $\Sigma_0$  是 ICRS 的零点。

## 5 IAU 岁差-章动理论

IAU 分两次决议采纳了高精度岁差-章动模型, 以准确描述 CIP 在 GCRS 中的位置。第一步是 IAU 2000 岁差-章动模型<sup>[22]</sup>, 并且被 IERS 2003 规范采纳<sup>[24]</sup>; 第二步是用 P03 岁差模型<sup>[32]</sup> 取代了 IAU 2000 中的岁差部分, 并对黄经章动和交角章动进行了相应的改正, 新的模型称为 IAU 2006 岁差模型<sup>[41, 82]</sup>, 被 IERS 2010 规范采纳<sup>[45]</sup>: 从 2009 年开始, 应该使用 IAU 2006/2000 岁差-章动模型。

### 5.1 IAU 2000 岁差-章动理论

IAU 2000 半分析章动模型包含了 678 个日月项和 687 个行星项, 这些章动项的振幅从  $17.2''$  到  $0.1 \mu\text{as}$ , 周期从  $3 \text{ d} \sim 1.01 \times 10^4 \text{ a}$ 。这个章动序列是基于刚性地球的 REN-2000 模型<sup>[23]</sup>。MHB2000<sup>[22]</sup> 使用“转换函数”, 利用 VLBI 拟合得到的地球基本参数, 并且求解 SOS 方程<sup>[83]</sup>, 得到非刚性地球章动序列, 即 IAU 2000A 章动模型。和 IAU 1980 章动相比, IAU 2000 章动模型考虑了地幔粘滞、海洋潮汐、地球各层之间的电磁耦合效应以及非线性项。地球物理效应造成的不可以预测的自由核章动 (FCN) 没有包含在 IAU 模型中, 这也是造成理论和实测偏差 (大约  $0.2 \text{ mas}$ ) 的最主要原因。测地章动也包含在 IAU 2000 章动模型中, 对于周年、准周年章动项和章动主项 (周期  $18.6 \text{ a}$ ) 的贡献为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta\psi_g = -153 \sin l' - 2 \sin 2l' + 3 \sin \Omega \\ \Delta\epsilon_g = +1 \cos \Omega \end{cases}, \quad (20)$$

其中  $l'$  是太阳的平近点角,  $\Omega$  是月球轨道升交点的经度。根据观测, IAU 2000 岁差只对 IAU 1976 的岁差速率进行了改正:  $d\psi_A = -2.9965 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $d\omega_A = -0.2524 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ , 并没有重新考虑太阳系和地球的动力学因素。

### 5.2 IAU 2006 岁差理论

IAU 2006 岁差理论 (P03<sup>[32, 84]</sup>) 改进了 IAU 2000 的岁差部分, 给出的赤道和黄道岁差量的表达式精确到时间  $t^5$ 。在通过拟合高精度历表得到基本黄道岁差参数  $P_A$  和  $Q_A$  之后, 基本赤道岁差量  $\psi_A$  和  $\omega_A$  是通过求解赤道极绕黄道运动的动力学微分方程得到的:

$$\begin{cases} \sin \omega_A d\psi_A/dt = (r_\psi \sin \epsilon_A) \cos \chi_A - r_\epsilon \sin \chi_A \\ d\omega_A/dt = r_\epsilon \cos \chi_A + (r_\psi \sin \epsilon_A) \sin \chi_A \end{cases}, \quad (21)$$

其中  $r_\psi$  和  $r_\epsilon$  是相对于瞬时黄道的黄经和交角岁差的速率。在解算过程中, 为了和 IAU 2000 保持一致, 对区别岁差和章动的准则、参考架偏差的处理、积分常数的选择以及扰动项的改正都进行了仔细的考虑。所以 IAU 2006 岁差模型是与 IAU 2000 一致的, 并且符合动力学的理论。

IAU 2006 理论采用了 IAU 2000 的黄经岁差速率和新的黄赤交角的值  $\epsilon_0 = 84381''.406$  (IAU 2000 理论中的值为  $84381''.448$ ), 还考虑了地球动力形状因子  $J_2$  速率的影响 ( $\dot{J}_2 = -3 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ )<sup>[85]</sup>, 主要影响黄经岁差参数中的  $t^2$  项 (大约为  $-0.0014 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-2}$ ), 这在以



前的 IAU 岁差理论中是没有考虑的。IAU 2006 岁差理论的最主要的误差来自于对岁差速率观测的不确定性 (大约  $0.01 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 以及由于  $J_2$  变化率的不准确对黄经岁差速率的影响<sup>[86]</sup>。IAU 2006 理论中测地岁差值为<sup>[87]</sup>:

$$p_g = 19.19883 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}, \quad (22)$$

保证了 GCRS 与 BCRS 之间运动学无旋转。关于岁差参数的具体值, 可以参考文献 [34]。用 CIP 的直角坐标表示, IAU 2006 和 IAU 2000 岁差部分的差别为 (单位:  $\mu\text{as}$ ):

$$\begin{cases} X_{\text{IAU2006}} - X_{\text{IAU2000}} = +155t - 2564t^2 + 2t^3 + 54t^4 \\ Y_{\text{IAU2006}} - Y_{\text{IAU2000}} = -514t - 24t^2 + 58t^3 - 1t^4 - 1t^5 \end{cases}. \quad (23)$$

除了主要的岁差部分的改进, IAU 2000 章动序列的幅值也因为黄赤交角  $\epsilon_0$  的改变和  $\dot{J}_2$  的引入有所调整。

- (1) 因为引入  $J_2$  的变化率, 在章动序列中加入了一些泊松项, 其大小正比于  $\dot{J}_2/J_2$ , 100 a 后, 在 CIP 的  $X, Y$  坐标中产生几十个微角秒的影响:

$$\begin{cases} d\psi_{J_2} = +47.8t \sin \Omega + 3.7t \sin 2(F - D + \Omega) + 0.6t \sin 2(F + \Omega) - 0.6t \sin 2\Omega \\ d\epsilon_{J_2} = -25.6t \cos \Omega - 1.6t \cos 2(F - D + \Omega) \end{cases}. \quad (24)$$

- (2) 为了补偿黄赤交角的变化 (大约 42 mas), 在黄经章动项上乘以  $\sin \epsilon_{\text{IAU2000}}/\sin \epsilon_{\text{IAU2006}}$ , 其中主项 (周期 18.6 a) 变化最大, 大约 10  $\mu\text{as}$ :

$$d_\epsilon \psi = -8.1 \sin \Omega - 0.6 \sin 2(F - D + \Omega). \quad (25)$$

上式中系数的单位是  $\mu\text{as}$ ,  $F, D, \Omega$ , 是章动序列中的基本参数 (参考文献 [45] 中的第五章 5.43 式), 都是时间  $t$  的多项式函数。这样, 和 IAU 2006 岁差章动理论相符的章动序列可以写为 IAU 2000A<sub>R06</sub>, 与 IAU 2000A 章动序列的关系为:

$$\begin{cases} \Delta\psi_{\text{IAU2000A}_{\text{R06}}} = \Delta\psi_{\text{IAU2000A}} + d\psi_{J_2} + d_\epsilon \psi \\ \Delta\epsilon_{\text{IAU2000A}_{\text{R06}}} = \Delta\epsilon_{\text{IAU2000A}} + d\epsilon_{J_2} \end{cases}. \quad (26)$$

这个关系可以更严格的写为:

$$\begin{cases} \Delta\psi_{\text{IAU2000A}_{\text{R06}}} = \Delta\psi_{\text{IAU2000A}} + (e + f) \Delta\psi_{\text{IAU2000A}} \\ \Delta\epsilon_{\text{IAU2000A}_{\text{R06}}} = \Delta\epsilon_{\text{IAU2000A}} + f \Delta\epsilon_{\text{IAU2000A}} \end{cases}, \quad (27)$$

其中,  $e = \sin \epsilon_{\text{IAU2000}}/\sin \epsilon_{\text{IAU2006}} - 1 = 0.4697 \times 10^{-6}$ ,  $f = (\dot{J}_2/J_2)t = -2.7774 \times 10^{-6}t$ 。

此后章节中提及的 IAU 2006/2000 岁差章动模型, 都是指 IAU 2006/2000A<sub>R06</sub> 模型。最后, 岁差-章动模型的选择不是唯一的, 还有一些其他的动力学岁差模型, 例如 F03 岁差<sup>[88]</sup> (拟合数值历表改进黄道岁差, 拟合 VLBI 观测改进赤道岁差), B03 岁差<sup>[89]</sup> (用 SMART97 理论推导赤道岁差, 用 VSOP 数值方法和 IERS 行星质量推导黄道岁差)。它们与 IAU 岁差理论比较表明, 100 a 后, 相互差别小于 10 mas<sup>[82, 90]</sup>。

### 5.3 IAU 2006/2000 岁差-章动模型与 VLBI 观测的比较

从 1979 年开始使用的 VLBI 观测, 对基本天文学, 包括地球岁差-章动模型的发展产生了深远的影响<sup>[91]</sup>。通过 VLBI 观测和理论比较发现, IAU 2006/2000 岁差-章动模型并不是完美的, 最主要的原因是上面已经提到的自由核章动 (FCN), 观测得到的 CIP 的位置与理论估计值之差称为“天极偏差” ( $dX$  和  $dY$ )。图 3 是 1990 年到 2012 年天极偏差序列, (a) 中的 Z 字形特征即是自由核章动效应, (b) 是利用经验模型<sup>[92]</sup> 将自由核章动去掉之后的序列, 可以看出存在长期的曲率变化。通过经验函数拟合 (例如二次函数或一次函数加 18.6 a 章动), 可以对 IAU 2006/2000 模型加以改进<sup>[82]</sup>。

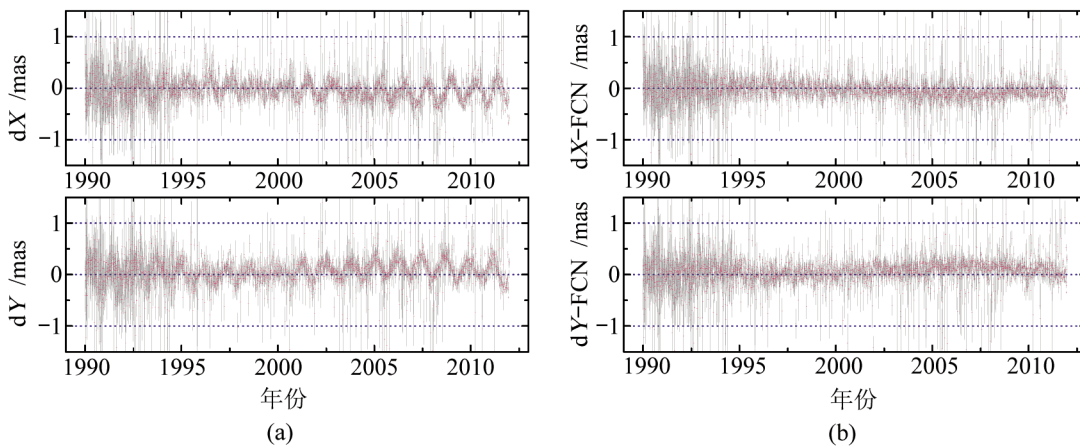


图 3 (a) 1990 年至 2012 年的 VLBI 天极偏差序列, 参考模型为 IAU 2006/2000; (b) 是扣除自由核章动的天极偏差<sup>[93]</sup>。

如果需要高精度的 CIP 位置, 可以在 IAU 模型估计值的基础上加上 IERS 公报中的天极偏差:

$$\begin{cases} X = X_{\text{IAU2006/2000}} + dX \\ Y = Y_{\text{IAU2006/2000}} + dY \end{cases} \quad (28)$$

IAU 2000 决议以前, 天极偏差是以黄经和交角章动偏差  $d\psi$  和  $d\epsilon$  来表示的, 参考 IAU 1976/1980 模型, 这些章动偏差包含模型的不足以及观测的误差。为了使用 IAU 2000 以前的观测资料, 需要将  $d\psi$  和  $d\epsilon$  (参考模型 IAU 1976/1980) 转换为  $dX$  和  $dY$  (参考模型 IAU 2006/2000)。严格的转换方法如下<sup>[94]</sup>。首先估计相对于 IAU 1980 章动的观测值:

$$\begin{cases} \Delta\psi_{\text{obs}} = \Delta\psi_{\text{IAU1980}} + d\psi \\ \Delta\epsilon_{\text{obs}} = \Delta\epsilon_{\text{IAU1980}} + d\epsilon \end{cases}, \quad (29)$$

连同  $t$  时刻的黄赤交角  $\epsilon_A$ , 可以计算与观测相符的章动矩阵  $\mathbf{N}$ 。利用 IAU 1976 岁差估计岁差矩阵  $\mathbf{P}$ , 这样岁差-章动矩阵  $\mathbf{N} \cdot \mathbf{P}$  的第三行前两个元素就是观测得到的 CIP 的坐标  $X_{\text{obs}}$  和  $Y_{\text{obs}}$ 。最后, 转换得到的天极偏差为观测值减去新的模型估计值:

$$\begin{cases} dX_{\text{IAU2006/2000}} = X_{\text{obs}} - X_{\text{IAU2006/2000}} \\ dY_{\text{IAU2006/2000}} = Y_{\text{obs}} - Y_{\text{IAU2006/2000}} \end{cases} \quad (30)$$

## 6 无旋转原点

IAU 2000 决议 1.8 引入新的中间参考系零点, 即无旋转原点, 使得地球自转的描述比使用传统的春分点更加简洁清晰。

### 6.1 春分点的缺陷

在计算天体相对于 ITRS 的位置 (等价于天球参考系和地球参考系的转换) 的过程中, 通常用格林尼治恒星时描述地球绕轴的自转运动。格林尼治恒星时的起量点是春分点, 计算它需要用到地球的自转, 还需要用到地球的岁差-章动理论。因为恒星时定义为春分点的时角<sup>[6]</sup>, 所以春分点的赤经岁差运动必然要记入恒星时的表达式, 这也是恒星日比地球的自转周期要短 0.008 s 的原因。这样在计算天体的时角时, 岁差-章动被计算了两次, 一次是计算格林尼治恒星时, 另一次是计算天体的真赤经。

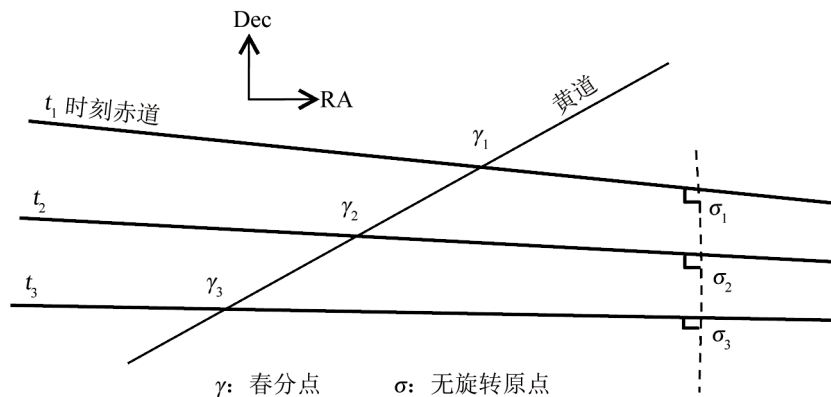


图 4 移动赤道、黄道与无旋转原点示意图<sup>[49]</sup>

注意到春分点是一个几何定义, 它是移动的天赤道 (按赤道岁差运动) 和黄道 (按黄道岁差) 的交点之一, 所以它本身在天空中也是运动的 (沿着 CIP 赤道的西退)。使用春分点带来的困难还在于, 春分点不能将地球的绕轴运动和轴的运动分开, 每当地球的岁差章动理论发生改变 (例如从 FK4 系统到 FK5 系统<sup>[44]</sup>), 恒星时的表达式也要随之改变。另外, 当前用来测量地球自转的 VLBI 技术对黄道和春分点不敏感, 无法精确测量它们的位置<sup>[49]</sup>。

### 6.2 无旋转原点的概念

为了克服春分点的缺陷, 需要寻找新的赤经起量点, 使得它的时角可以代表地球纯粹的绕 CIP 的运动, 而与地球的指向变化, 即岁差-章动无关。当 CIP 运动时, 这个假想点在 CIP 赤道上运动, 通过它测量的地球自转角不受 CIP 本身运动的影响。“无旋转原点 (NRO)” 的

引入可以满足这些条件, NRO 最早由 Guinot<sup>[27]</sup> 提出, 之后由 Capitaine 等人发展并应用到 IAU 决议中<sup>[25, 47, 95-97]</sup>。与春分点不同, 无旋转原点是一个运动学定义: 当赤道运动时, 无旋转原点的运动方向总是垂直于赤道 (或指向赤道的极), 即没有绕极旋转的运动分量。在赤道上的任意一点都可以选作为无旋转原点, 只要它的运动满足上述的运动学定义, 所以选取方法不是唯一的。图 4 是天文参考系中无旋转原点和春分点的示意图, 随着时间的推移, 天赤道在天空中运动 (为简单起见, 假设黄道不运动), 几何定义的春分点沿着赤道西退, 但运动学定义的原点没有“西退”运动。在天球参考系 GCRS (根据 IAU 2006 决议 B2, 可以认为是地心为原点的 ICRS) 中, CIP 赤道上的无旋转原点称为天球中间零点 (CIO); 而在地球参考系 ITRS 中, 相应地称为地球无旋转原点 (TIO)。如果用无旋转原点代替春分点, 则它的时角就可以描述地球以 ICRS 为背景的绕 CIP 的纯自转运动, 从而将地球的绕轴运动和空间指向运动清楚地分开, CIO 和 TIO 之间的角距离就是第三章中定义的地球自转角 (ERA, 见式 (12))。

### 6.3 无旋转原点位置的表示方法

CIP 赤道上无旋转原点 CIO (用  $\sigma$  表示) 在  $t$  时刻的位置取决于它  $t_0$  时刻的位置和在  $t_0$  到  $t$  时间内 CIP 的运动。在图 5 中,  $\sigma_0$  和  $\sigma$  分别是  $t_0$  和  $t$  时刻的无旋转原点,  $N$  和  $N_0$  分别是两个时刻 CIP 赤道和 GCRS 赤道的交点, 而  $\Sigma_0$  是 GCRS 的零点 (见图 5(a))。在时刻  $t$ ,  $[\Sigma_0 N]$  可以从 CIP 的位置得到, 于是可以选择用弧段差来表示  $\sigma$  在 CIP 赤道上的位置:

$$s = ([\sigma N] - [\Sigma_0 N]) - ([\sigma_0 N_0] - [\Sigma_0 N_0]), \quad (31)$$

其中  $[\sigma_0 N_0]$  的选择是任意的,  $s$  称为 CIO 定位角, 可以通过它的运动学定义得到。在图 5 (b) 中, 由于岁差-章动, CIP 和  $\sigma$  定义的参考系 ( $O-xyz$ , 其中 CIP 和  $z$  轴重合) 在固定的 GCRS ( $O-XYZ$ ) 中运动。用  $\mathbf{n}_0$ ,  $\mathbf{n}$  和  $\mathbf{l}$  分别表示沿着  $OZ$ ,  $Oz$  和  $ON$  的单位矢量, 于是在 GCRS 中, 由于 CIP 的运动造成的  $O-xyz$  的旋转量为:

$$\boldsymbol{\Omega} = \dot{E} \mathbf{n}_0 - (\dot{E} + \dot{s}) \mathbf{n} + \dot{d} \mathbf{l}, \quad (32)$$

其中  $E$  和  $d$  是 CIP 在 GCRS 中的角坐标。  $\boldsymbol{\Omega}$  沿着  $Oz$  轴的旋转量为:

$$\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{n} = \dot{E}(\cos d - 1) - \dot{s}. \quad (33)$$

无旋转原点的运动学定义要求:  $\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{n} = 0$ , 于是

$$\dot{s} = \dot{E}(\cos d - 1). \quad (34)$$

如果用 CIP 的直角坐标表示  $d$  和  $E$ :

$$X = \sin d \cos E, \quad Y = \sin d \sin E, \quad Z = \cos d, \quad (35)$$

$s$  可以写为:

$$s(t) = \int_{t_0}^t \frac{X(t)\dot{Y}(t) - Y(t)\dot{X}(t)}{1 + Z(t)} dt - ([\sigma_0 N_0] - [\Sigma_0 N_0]), \quad (36)$$

在  $1 \mu\text{as}$  的精度下, 上式通过分步积分可以等价于:

$$s(t) = -\frac{1}{2} [X(t)Y(t) - X(t_0)Y(t_0)] + \int_{t_0}^t \dot{X}(t)Y(t)dt - ([\sigma_0 N_0] - [\Sigma_0 N_0]). \quad (37)$$

上式中  $s_0 = [\sigma_0 N_0] - [\Sigma_0 N_0]$  是任意积分常数, 最开始选择为 0, 后来为了使 CIO 转换和传统的春分点转换方法在 2003 年首保持一致, 将其选择为  $s_0 = +94 \mu\text{as}$ . 根据无旋转原点的运动学性质, CIO 在 GCRS 中的运动在距离 J2000.0 的短期内是稳定的, 方向大致向南, 几乎没有赤经方向的运动, 到 2100 年, 它在 GCRS 中的赤经也只有  $0''.08$ . 考虑到 CIP 绕着北黄极的长周期岁差运动 (周期大约 26 000 a), 容易理解, CIO 也会有长期运动现象<sup>[98]</sup>, 值得大家注意. 地球参考系中的无旋转原点 TIO 可以和 CIO 类似地定义, CIO 和 TIO 被用于天球参考系和地球参考系的转换 (见第 7 章).

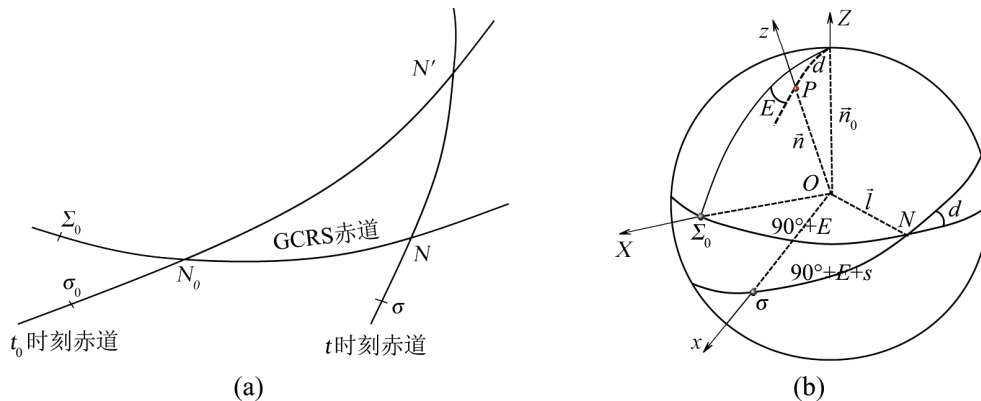


图 5 (a)  $t_0$  和  $t$  时刻 CIP 赤道和无旋转原点; (b) 无旋转原点的运动和定位,  $O-XYZ$  是空固参考系 GCRS,  $\Sigma_0$  是 GCRS 的零点;  $O-xyz$  是运动参考系, 无旋转原点  $\sigma$  在运动的赤道上<sup>[25]</sup>.

#### 6.4 无旋转原点性质的小结

关于无旋转原点, 以下性质是重要的:

- (1) 天球中间零点 (CIO) 和地球中间零点 (TIO) 是无旋转原点, 它和春分点一样都位于移动的 CIP 赤道 (传统说法中的真赤道) 上, 但是与春分点没有任何联系;
- (2) CIO 是由运动学定义的, 任意瞬间的运动都垂直于赤道, 选择不唯一;
- (3) CIO 定位角  $s$  由一段时间内 CIP 运动的积分表达, 而不是某一个时刻 CIP 的位置;
- (4) 使用无旋转原点作为经度起量点可以将地球的岁差-章动和自转清楚地分开;
- (5) 目前, CIO 非常接近 GCRS (或 ICRS) 的零点,  $\alpha_{\text{ICRS}} \simeq 0$ .

## 7 地心天球参考系和国际地球参考系的转换

在  $t$  时刻, GCRS 和 ITRS 的转换是两个三维直角坐标系的转换, 可以写为<sup>[45, 99]</sup>:

$$[\text{ITRS}] = \mathbf{W}(t) \cdot \mathbf{R}(t) \cdot \mathbf{M}(t) \cdot [\text{GCRS}], \quad (38)$$



其中  $\mathbf{M}(t)$ ,  $\mathbf{R}(t)$  和  $\mathbf{W}(t)$  分别是由于 CIP 在天球参考系中的运动 (岁差-章动)、地球的自转以及 CIP 在地球参考系中的运动 (极移) 引起的旋转矩阵。式 (38) 和下面各公式中时间变量  $t$  的定义是:

$$t = (\text{TT} - 2000 \text{ January } 1\text{d } 12\text{h TT}) / 36\,525, \quad (39)$$

即从历元 J2000.0 起算的儒略世纪数 (TT)。

根据 IAU 2006 决议和术语工作组推荐, GCRS 和 ITRS 的转换可以通过两种等价的方法完成, 分别是传统的基于春分点的转换方式以及基于天球中间零点的转换方式。两种方法中,  $\mathbf{M}(t)$  和  $\mathbf{R}(t)$  矩阵因为经度起量点的不同, 有各自的表达式, 而极移矩阵  $\mathbf{W}(t)$  对于两种方法是相同的。基于 CIO 的转换方法用到了 GCRS 和 ITRS 中的“无旋转原点”的概念, 是与 IAU 2000 决议 B1.8 相符的, 这也是 IAU 和 IERS 推荐使用 CIO 转换方法的原因。

在本章参考系转换中, 需要用到 3 个中间参考系:

- (1) 天球中间参考系 (CIRS),  $Z$  轴是 CIP,  $X$  轴是 CIO;
- (2) 地球中间参考系 (TIRS),  $Z$  轴是 CIP,  $X$  轴是 TIO;
- (3) 真赤道参考系,  $Z$  轴是 CIP,  $X$  轴是  $t$  时刻的真春分点。

显然, 这些中间参考系的互相转换仅仅是绕着 CIP 的旋转。

### 7.1 极移矩阵

极移矩阵完成 TIRS 到 ITRS 的转换:

$$\mathbf{W}(t) = \mathbf{R}_1(-y_p) \cdot \mathbf{R}_2(-x_p) \cdot \mathbf{R}_3(s'), \quad (40)$$

其中  $x_p$  和  $y_p$  是 CIP 在 ITRS 中极移的两个分量,  $s'$  称为 TIO 定位角, 可以与 CIO 定位角  $s$  类似定义 (参考第 5 章)。 $s'$  提供 TIO 在 CIP 赤道上的位置, 是  $x_p$  和  $y_p$  的函数:

$$s'(t) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^t (x_p \dot{y}_p - \dot{x}_p y_p) dt. \quad (41)$$

$s'$  是一个很小的量, 到 22 世纪, 不会大于 0.4 mas。利用目前测量的地球的钱德拉摆动,  $s'$  的近似值为<sup>[101]</sup>:

$$s' = -47 t \mu\text{as}. \quad (42)$$

### 7.2 地球自转矩阵

基于 CIO 的转换中, 地球自转矩阵为:

$$\mathbf{R}_{\text{CIO}}(t) = \mathbf{R}_3(\text{ERA}(\text{UT1})), \quad (43)$$

其中地球自转角 (ERA) 是 CIO 和 TIO 之间的角距离, 反映地球纯粹的绕轴自转 (表达式见式 (12))。 $\mathbf{R}_{\text{CIO}}(t)$  是从 CIRS 到 TIRS 的转换矩阵。

基于春分点的转换中, 地球自转矩阵为:

$$\mathbf{R}_{\text{eqx}}(t) = \mathbf{R}_3(\text{GST}), \quad (44)$$

其中 GST 是格林尼治真恒星时 (真春分点和 TIO 之间的角距离), 这个矩阵完成的是真赤道参考系到 TIRS 的转换。GST 和 ERA 的关系可以写为<sup>[102, 103]</sup>:

$$\text{GST} = dT_0 + \text{ERA}(\text{UT1}) + \int_{t_0}^t (\dot{\psi}_A + \Delta\dot{\psi}_1) \cos(\omega_A + \Delta\epsilon_1) dt - \chi_A + \Delta\psi \cos \epsilon_A + \Delta\psi_1 \cos \omega_A, \quad (45)$$

其中的岁差量都可以在图 6 (a) 中找到对应的几何关系,  $dT_0$  的选择是为了在岁差-章动理论改变时, 保证恒星时的连续性。定义零点差 (即 CIO 和春分点在 CIP 赤道上的距离) 为

$$\text{EO} = \text{ERA}(\text{UT1}) - \text{GST}. \quad (46)$$

根据 IAU 2006/2000 岁差-章动, EO 的表达式见式 (14), 几何关系参考图 7。

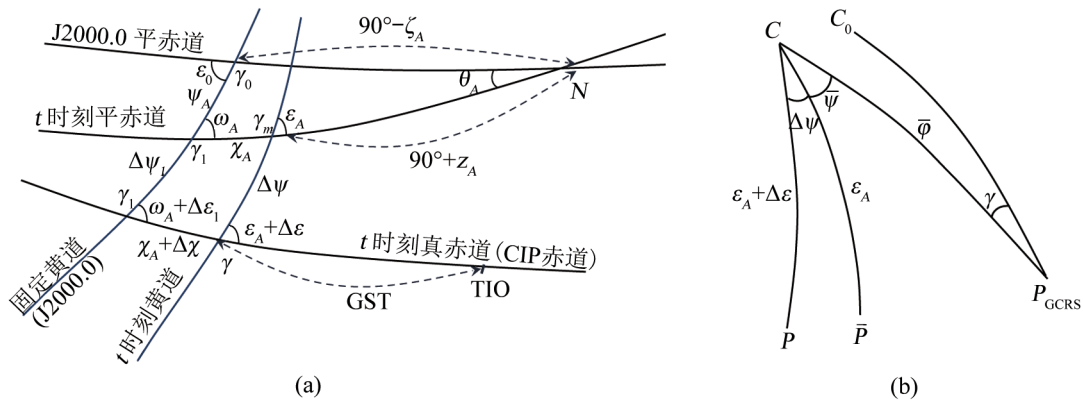


图 6 (a): 基于春分点的赤道 - 黄道岁差图<sup>[100]</sup>; (b): Fukushima-Williams 岁差参数示意图<sup>[88]</sup>。

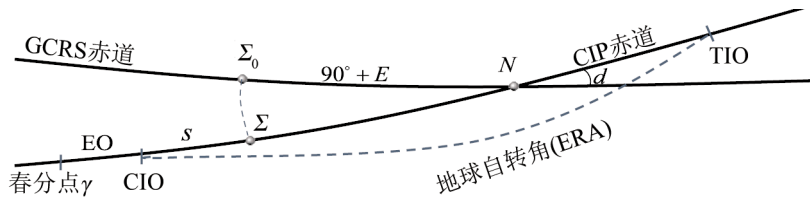


图 7 基于 CIO 的参考系转换示意图<sup>[100]</sup>。  $\Sigma_0$  是 GCRS 的零点,  $[N\Sigma] = [N\Sigma_0]$ ,  $E$ ,  $d$  是 CIP 在 GCRS 中的角坐标。

### 7.3 岁差-章动矩阵

#### 7.3.1 CIO 转换

基于 CIO 的转换中, 岁差-章动矩阵为:

$$M_{\text{CIO}} = R_3(-s) \cdot M_{\Sigma}, \quad (47)$$

$\Sigma$  是在 CIP 赤道上的点, 并且满足  $[N\Sigma] = [N\Sigma_0]$ ,  $\Sigma_0$  是 GCRS 的零点,  $N$  是 CIP 赤道和 GCRS 赤道的交点 (参考图 7)。用 CIP 的直角坐标  $X$  和  $Y$ , 矩阵  $M_\Sigma$  可以写为:

$$M_\Sigma = R_3(-E) \cdot R_2(d) \cdot R_3(E) = \begin{pmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & -X \\ -aXY & 1 - aY^2 & -Y \\ X & Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{pmatrix}, \quad (48)$$

其中,  $a = 1/(1 + \cos d) \simeq 1/2 + (X^2 + Y^2)/8$ 。IAU 2006/2000 岁差-章动模型中,  $X$  和  $Y$  的表达式为:

$$\begin{cases} X(t) = -0''.016\,617 + 2004''.191\,898\,t - 0''.429\,782\,9\,t^2 - \\ \quad 0''.198\,618\,34\,t^3 + 0''.000\,007\,5\,t^4 + 0''.000\,005\,928\,5\,t^5 + \\ \quad \sum_i [(a_{s,0})_i \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,0})_i \sin(\text{ARGUMENT})] + \\ \quad \sum_{k,i} [(a_{s,k})_i \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,k})_i \sin(\text{ARGUMENT})] t^k \\ Y(t) = -0''.006\,951 - 0''.025\,896\,t - 22''.407\,274\,7\,t^2 + \\ \quad 0''.001\,900\,59\,t^3 + 0''.001\,112\,526\,t^4 + 0''.000\,000\,135\,8\,t^5 + \\ \quad \sum_i [(b_{s,0})_i \sin(\text{ARGUMENT}) + (b_{c,0})_i \sin(\text{ARGUMENT})] + \\ \quad \sum_{k,i} [(b_{s,k})_i \sin(\text{ARGUMENT}) + (b_{c,k})_i \sin(\text{ARGUMENT})] t^k, \end{cases} \quad (49)$$

$X$  和  $Y$  包含了参考架偏差、岁差和章动的影响, 并直接给出了 CIP 在 GCRS 中的位置。CIO 的位置为 (单位为  $\mu\text{as}$ ):

$$s(t) + XY/2 = 94.0 + 3\,808.65\,t - 122.68\,t^2 - 72\,574.11\,t^3 + 27.98\,t^4 + \\ 15.62\,t^5 + \sum_i [(c_{s,0})_i \sin(\text{ARGUMENT}) + (c_{c,0})_i \sin(\text{ARGUMENT})] + \\ \sum_{k,i} [(c_{s,k})_i \sin(\text{ARGUMENT}) + (c_{c,k})_i \sin(\text{ARGUMENT})] t^k. \quad (50)$$

公式 (49) 和 (50) 中的 ARGUMENT 是章动的基本变量 (日月项和行星项) 的线性组合, 具体表达式可以参阅 IERS 规范 2010<sup>[45]</sup>。

考虑天极偏差  $dX$  和  $dY$  的贡献, 可以得到与观测符合的高精度岁差-章动矩阵:

$$M_{\text{obs}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -dX \\ 0 & 1 & -dY \\ dX & dY & 1 \end{pmatrix} \cdot M_{\text{IAU}}. \quad (51)$$

$M_{\text{IAU}}$  是 IAU 2006/2000 岁差-章动矩阵。而最简化的 CIO 转换矩阵可以写为:

$$M_{\text{CIO}} \simeq \begin{pmatrix} 1 & 0 & -X \\ 0 & 1 & -Y \\ X & Y & 1 \end{pmatrix}, \quad (52)$$

$X$  和  $Y$  可以由下列近似公式计算:

$$\begin{cases} X = +2.6603 \times 10^{-7} \tau - 33.2 \times 10^{-6} \sin \Omega \\ Y = -8.14 \times 10^{-14} \tau + 44.6 \times 10^{-6} \cos \Omega \end{cases}, \quad (53)$$

其中  $\tau$  是从 J2000.0 起算的天数,

$$\Omega = 2.182 - 9.242 \times 10^{-4} \tau \text{ (radians)}. \quad (54)$$

这个近似公式在 21 世纪内, 与精确公式估计 CIP 位置的差别不超过  $0''.9$ , 对于那些参考系转换精度要求不高的工作仍是适用的。

### 7.3.2 春分点转换

基于春分点的转换方法中, 岁差-章动矩阵可以写为:

$$\mathbf{M}_{\text{eqx}} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{B}, \quad (55)$$

其中  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{B}$  分别为章动、岁差和参考架偏差矩阵。利用 IAU 2006/2000 岁差-章动理论中的参数 (基本赤道岁差参数  $\psi_A$  和  $\omega_A$ , 黄道岁差的导出量  $\chi_A$ , 以及瞬时黄赤交角  $\epsilon_A$ ), 这些矩阵可以写为:

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \mathbf{R}_1(-\eta_0) \cdot \mathbf{R}_2(\xi_0) \cdot \mathbf{R}_3(d\alpha_0) \\ \mathbf{P} = \mathbf{R}_3(\chi_A) \cdot \mathbf{R}_1(-\omega_A) \cdot \mathbf{R}_3(-\psi_A) \cdot \mathbf{R}_1(\epsilon_0) \\ \mathbf{N} = \mathbf{R}_1(-[\epsilon_A + \Delta\epsilon]) \cdot \mathbf{R}_3(-\Delta\psi) \cdot \mathbf{R}_1(\epsilon_A) \end{cases}, \quad (56)$$

其中黄经和交角章动是与 IAU 2006 岁差相符的公式 (26) 或 (27)。上式中各岁差参数的意义可参考图 6 (a)。这个四次旋转的岁差矩阵  $\mathbf{P}$  将赤道岁差 (源于日月和行星对非球形地球的力矩) 和黄道岁差 (源于行星对黄道面的摄动) 清楚地分开, 即黄道岁差和赤道岁差都是相对于 J2000.0 的固定黄道来计算的, 未来岁差理论的进一步发展也将利用这个公式中的参数<sup>[94]</sup>。

长期以来使用的传统赤道岁差参数转换方法<sup>[19]</sup> 利用了 J2000.0 平赤道参考系和  $t$  时刻平赤道参考系转换的欧拉角  $\zeta_A$ 、 $\theta_A$  和  $z_A$ , 即三次旋转方法 (几何关系见图 6 (a)):

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}_3(-z_A) \cdot \mathbf{R}_2(\theta_A) \cdot \mathbf{R}_3(-\zeta_A). \quad (57)$$

这个三次旋转的岁差矩阵被广泛使用, 但是其中的赤道岁差角都是从基本参数和球面三角关系得到的导出量, 不利于直接从理论上修改岁差速率。考虑到现在参考系转换的起点是 GCRS 而非 J2000.0 平赤道参考系,  $z_A$  和  $\zeta_A$  在接近 J2000.0 的时候, 对参考架偏差矩阵  $\mathbf{B}$  非常敏感, 从而导致它们不能用多项式表达, 精度大大降低, 所以应该尽量避免使用这传统的岁差转换方法<sup>[32, 88]</sup>。

IAU 岁差与黄道工作组推荐了另一种四次旋转的岁差矩阵, 即 Fukushima-Williams 方法<sup>[88]</sup>, 见图 6 (b):  $P_{\text{GCRS}}$ ,  $\bar{P}$ ,  $P$  分别是 GCRS 的极、 $t$  时刻平赤道的极、 $t$  时刻 CIP 赤道 (真赤道) 的极;  $C_0$  和  $C$  分别是 J2000.0 和  $t$  时刻的北黄极。这个方法可以直接将参考架偏差和章动加到岁差参数中; 另外, 它利用的是相对于  $t$  时刻黄道的黄经和交角岁差, 因此可以很

方便地加上 IAU 2000 的章动角。相对于 GCRS (即将参考架偏差  $\xi_0$ ,  $\eta_0$  和  $d\alpha_0$  的影响考虑在内), Fukushima-Williams 岁差角为:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\gamma} &= \gamma_{J2000.0} + d\gamma_0 \\ &= -0''.052\,928 + 10''.556\,378 t + 0''.493\,204\,4 t^2 - \\ &\quad 0''.003\,123\,8 t^3 - 0''.000\,002\,788 t^4 + 0''.000\,000\,026\,0 t^5 \\ \bar{\phi} &= \phi_{J2000.0} + \eta_0 \\ &= 84\,381''.412\,819 - 46''.811\,016 t + 0''.511\,268 t^2 + \\ &\quad 0''.000\,532\,89 t^3 - 0''.000\,000\,440 t^4 - 0''.000\,000\,014\,8 t^5 \\ \bar{\psi} &= \psi_{J2000.0} + \xi_0 / \sin \epsilon_0 \\ &= -0''.041\,775 + 5038''.481\,484 t + 1''.558\,417\,4 t^2 - \\ &\quad 0''.000\,185\,22 t^3 - 0''.000\,026\,452 t^4 - 0''.000\,000\,014\,8 t^5 \\ \epsilon_A &= +84\,381''.406 - 46''.836\,769 t - 0''.000\,183\,1 t^2 + \\ &\quad 0''.002\,003\,40 t^3 - 0''.000\,000\,576 t^4 - 0''.000\,000\,043\,4 t^5, \end{aligned} \right. \quad (58)$$

其中  $d\gamma_0 = -0''.052\,928$  是 J2000.0 黄道对 GCRS 赤道升交点的赤经 (图 2 (b) 中  $\gamma_{FK5}$  与  $\Sigma_0$  的距离)。利用  $\bar{\gamma}$ ,  $\bar{\phi}$ ,  $\bar{\psi}$ ,  $\epsilon_A$  可以构造参考架偏差和岁差矩阵  $PB$ :

$$PB^{F-W} = R_1(-\epsilon_A) \cdot R_3(-\bar{\psi}) \cdot R_1(\bar{\phi}) \cdot R_3(\bar{\gamma}), \quad (59)$$

在  $\psi$  和  $\epsilon$  的基础上加上和 IAU 2006 相符的章动角 (见式 (27)),

$$\left\{ \begin{aligned} \psi &= \bar{\psi} + \Delta\psi_{IAU2000A_{R06}} \\ \epsilon &= \epsilon_A + \Delta\epsilon_{IAU2000A_{R06}} \end{aligned} \right., \quad (60)$$

就可以得到  $NPB$  矩阵:

$$M_{eqx}^{F-W} = R_1(-\epsilon) \cdot R_3(-\psi) \cdot R_1(\bar{\phi}) \cdot R_3(\bar{\gamma}). \quad (61)$$

这个矩阵的第三行前两个元素就是 CIP 的坐标  $X$  和  $Y$ :

$$\left\{ \begin{aligned} X &= \sin \epsilon \sin \psi \cos \bar{\gamma} - (\sin \epsilon \cos \psi \cos \bar{\phi} - \cos \epsilon \sin \bar{\phi}) \sin \bar{\gamma} \\ Y &= \sin \epsilon \sin \psi \sin \bar{\gamma} + (\sin \epsilon \cos \psi \cos \bar{\phi} - \cos \epsilon \sin \bar{\phi}) \cos \bar{\gamma} \end{aligned} \right., \quad (62)$$

这样, 通过上述的 CIO 或者传统的春分点转换方法, 完成了公式 (38) 中的天球参考系和地球参考系的转换, 其中 Fukushima-Williams 是比较简洁的方法, 并能有效地将传统和新方法联系起来。需要指出的是, 无论用哪一组参数, 只要使用相同的岁差章动-模型, 所得到的矩阵都应该是相同的。IAU 推荐使用 CIO 转换方法, 但是岁差参数的选择是留给使用者自行决定的<sup>[34]</sup>。CIO 转换矩阵和春分点转换矩阵通过零点差 (EO) 联系起来:

$$M_{CIO} = R_3(-EO) \cdot M_{eqx}. \quad (63)$$



## 8 总结和建议

IAU 在基本天文学方面的决议对于天文参考系、时间尺度、地球自转的影响是深远的。应该注意到新的术语、概念和方法比传统的更加清晰简洁,常数和模型的精度也更高。21 世纪以来,IAU 决议最重要的推荐可以总结如下:

- (1) 基本参考系方面,用运动学无旋转的 ICRS 取代动力学参考系 FK5,实现方法用遥远的河外射电源(射电波段 VLBI 观测)取代亮星(光学波段),精度提高了约 100 倍;
- (2) 用完整的广义相对论理论来描述参考系和时间系统,而不再将相对论作为经典理论的“改正”或“扰动”;
- (3) 新的中间参考系的零点用无旋转原点来实现,从而将地球的自转和岁差-章动完全分开,地球自转角 ERA (替代格林尼治恒星时)是世界时 UT1 的线性函数;
- (4) 当前 IAU 推荐的岁差-章动模型是与太阳系和地球动力学吻合的 IAU 2006/2000A<sub>R06</sub> (P03 + MHB2000) 模型。

另外,以下值得注意:

- (1) 岁差-章动描述的是地球的极(而不是黄极)在天空中的运动,所以在描述地球自转时,黄道和春分点是完全不必要的;但是从理论上发展岁差-章动理论,需要用黄道作为参考平面。
- (2) 在涉及参考系和天体测量问题时,应该尽量在 ICRS 框架下,而不要继续使用 FK5 系统(包括历元平赤道、瞬时真赤道等参考系)。由于 ICRS 是空固参考系,并与历元无关,所以应该避免诸如“J2000.0 的 ICRS”,“历元 ICRS”等说法。只有在讨论恒星自行时,才有必要涉及历元。
- (3) 相关的计算可以使用 IERS 和 IAU SOFA 等标准程序。
- (4) 建议将新的理论和方法引入未来的教科书,以便和国际标准保持一致。

### 致谢

作者感谢巴黎天文台 Nicole Capitaine 教授对诸多问题的回答,并感谢上海天文台金文敬研究员和南京大学黄天衣教授对文章提出的宝贵意见。

### 参考文献:

- [1] Perryman C A M, et al. *A&A*, 2001, 369: 339
- [2] 金文敬,李东明,夏一飞,等. *天文学进展*, 2006, 24: 100
- [3] 金文敬. *天文学进展*, 2011, 29: 191
- [4] IAU Proceedings of the twenty-first General Assembly, Buenos Aires, Argentina, 1992: 41
- [5] IAU Proceedings of the twenty-third General Assembly, Kyoto, Kansai, Japan, 1998: 40
- [6] 夏一飞,黄天衣. *球面天文学*. 南京: 南京大学出版社, 1995: 7

- [7] Fricke W. *Celest. Mech.*, 1985, 36: 207
- [8] 夏一飞, 金文敬. *天文学进展*, 2004, 22: 200
- [9] Ma C, Arias E F, Eubanks T M, et al. *AJ*, 1998, 116: 516
- [10] 乔书波, 李金岭, 孙付平, 等. *天文学进展*, 2007, 25: 147
- [11] Feissel M, Mignard F. *A&A*, 1998, 331: 31
- [12] 金文敬, 唐正宏, 黄乘利, 等. *天文学进展*, 2003, 21: 26
- [13] Perryman M A C, et al. *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, 1997, Vol. 1 (ESA SP-1200; Noordwijk: ESA)
- [14] 金文敬. *天文学进展*, 2009, 27: 247
- [15] Klioner S A, Soffel M. *A&A*, 1998, 334: 1123
- [16] Fukushima T. *A&A*, 1991, 244: L11
- [17] Soffel M, Klioner S A, Petit G, et al. *AJ*, 2003, 126: 2687
- [18] Lieske J H, Lederle T, Fricke W, et al. *A&A*, 1977, 58: 1
- [19] Lieske J H. *A&A*, 1979, 73: 282
- [20] Seidelmann P K. *Celest. Mech.* 1982, 27: 79
- [21] Wahr J H. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1981, 64: 705
- [22] Mathews P M, Herring T A, Buffett B A. *J. Geophys. Res.* 2002, 107: B4
- [23] Souchay J, Loysel B, Kinoshita, H, et al. *A&AS*, 1999, 135: 111
- [24] McCarthy D D, Luzum B J. *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, 2003, 85: 37
- [25] Capitaine N. *A&A*, 1986, 162: 323
- [26] Capitaine N, Williams J G, Seidelmann P K. *A&A*, 1985, 146: 381
- [27] Guinot B. *Proceedings Time and the Earth's Rotation*, McCarthy D D, Pilkington J D, eds. San Fernando, Spain, 1979: 125
- [28] Liu C. *A&A*, 2001, 369: L26
- [29] McCarthy D D, Hackman C, Nelson R A. *AJ*, 2008, 136: 2906
- [30] IERS Bulletin C, <http://hpiers.obspm.fr/eoppc/bul/bulc/UTC-TAI.history>
- [31] 国家授时中心, [http://www.ntsc.ac.cn/xwzx/kjdt/201202/t20120209\\_3438256.html](http://www.ntsc.ac.cn/xwzx/kjdt/201202/t20120209_3438256.html), 2012
- [32] Capitaine N, Wallace P T, Chapront J. *A&A*, 2003, 412: 567
- [33] Capitaine N, Wallace P T, Chapront J. *A&A*, 2005, 432: 355
- [34] Hilton J L, Capitane N, Charpont J, et al. *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, 2006, 94: 367
- [35] Newcomb S. *Astron. Papers Am. Ephemeris*, 1894, 5: 301
- [36] Tao J-H, Huang T-Y. *A&A*, 1998, 333: 374
- [37] Capitaine N, Andrei A H, CalaBretta M, et al. <http://syrtte.obspm.fr/iau/iauWGnfa/>, 2007
- [38] 黄天衣, 刘佳成. *IAU 基本天文学术语中文翻译*, 2011
- [39] Luzum B, Capitaine N, Fienga A, et al. *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, 2011, 110: 293
- [40] Klioner S A. *A&A*, 2008, 478: 951
- [41] Capitaine N. *Proceedings Journées 2010, Système de Référence spatio-temporels*, Capitaine N, ed. Paris: Observatoire de Paris, 2011: 20
- [42] Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), *The International System of Units (SI)*, 8th edition, <http://www.bipm.org/en/si/>, 2006
- [43] Klioner S, Capitaine N, Folkner W, et al. *Proceedings IAU Symposium*, Klioner S A, Seidelmann P K, Soffel M H, eds. Virginia Beach, USA, 2010, 261: 79
- [44] Aoki S, Guinot B, Kaplan G H, et al. *A&A*, 1982, 105: 359
- [45] Petit G, Luzum B. *IERS Technical Note*, 2010, 36
- [46] IAU SOFA Board, *IAU SOFA Software Collection*, Issue 2010-12-01, <http://www.iausofa.org>, 2010
- [47] Capitaine N, Guinot B, McCarthy D D. *A&A*, 2000, 355: 389
- [48] Capitaine N, Wallace P T, McCarthy D D. *A&A*, 2003, 406: 1135
- [49] Kaplan H G. *USNO Circular*, 2005, 179: 51
- [50] Arias E F, Charlot P, Feissel M, et al. *A&A*, 1995, 303: 604

- [51] Ma C, Feissel M. IERS Technical Note, 1997, 23
- [52] Fey A, Gordon D, Jacobos C. IERS Technical Note, 2009, 35
- [53] Kovalevsky J. A&A, 2003, 404: 743
- [54] Kopeikin S A, Makarov V V. AJ, 2006, 1031: 1471
- [55] Titov O, Lambert S B, Gontier A M. A&A, 2011, 529: A91
- [56] Xu M H, Wang G L, Zhao M. Sci. China-Phys. Mech. Astron. 2012, 55: 329
- [57] Malkin Z M. Astronomy Reports, 2011, 55: 810
- [58] Liu J-C, Capitaine N, Lambert S B, et al. in preparation, 2012
- [59] Urban S E, Corbin T E, Wycoff G L, et al. Proceedings IAU Colloquium, Johnston K J, McCarthy D D, Luzum B J, eds. Washington, DC: U.S. Naval Observatory, 2000, 180: 97
- [60] van Leeuwen F. A&A, 2007, 474: 653
- [61] Mignard F. Proceedings ESA Symposium, Europe Space Agency pub. 1997, SP-402: 5
- [62] Lindegren L, Kovalevsky J. A&A, 1995, 304: 189
- [63] Kovalevsky J, Lindegren L, Perryman M A C, et al. A&A, 1997, 323: 620
- [64] Høg E, Fabricius C, Makarov V V, et al. A&A, 2000, 355: L27
- [65] Zacharias N, Urban S E, Zacharias M I, et al. AJ, 2004, 127: 3043
- [66] Zacharias N, Finch C, Girard T, et al. AJ, 2010, 139: 2148
- [67] Röser S, Schilbach E, Schwan H, et al. A&A, 2008, 488: 401
- [68] Roeser S, Demleitner M, Schilbach E, et al. AJ, 2010, 139: 2440
- [69] Fedorov P N, Myznikov A A, Akhmetov V S. MNRAS, 2009, 393: 133
- [70] Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. AJ, 2006, 131: 1163
- [71] Andrei A H, Souchay J, Zacharias N, et al. A&A, 2009, 505: 385
- [72] Souchay J, Andrei A H, Barache C, et al. A&A, 2009, 494: 799
- [73] Souchay J, Andrei A H, Barache C, et al. A&A, 2012, 537: 99
- [74] Standish E M, Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum, 1998, IOM 312:F-98-048
- [75] Folkner W M, Williams J G, Boggs D H. IPN Progress Report, 2009: 42
- [76] Fienga A, Manche H, Laskar J, et al. <http://arxiv.org/pdf/1011.4419v1.pdf>, astro-ph.EP/1011.4419, 2010
- [77] Fricke W, Schwan H, Lederle T, et al. Ver öffentlichungen Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg, 1988, 32
- [78] Arias E F, Lestrade J-F, Feissel M. A&A, 1988, 199: 357
- [79] Kaplan G H, Josties F J, Angerhofer P E, et al. AJ, 1982, 87: 570
- [80] Hilton J L, Hohenkerk C Y. A&A, 2004, 413: 765
- [81] McCarthy D D, Petit G. IERS Technical Note, 2003, 32
- [82] Capitaine N, Mathews P M, Dehant V. Celest. Mech. Dyn. Astr., 2009, 103: 179
- [83] Sasao T, Okubo S, Saito M. Proceedings IAU Symposium, Raynor L, ed. Dordrecht, Holland, 1980, 78: 165
- [84] 金文敬. 天文学进展, 2008, 26: 156
- [85] Williams J G. AJ, 1994, 108: 711
- [86] Bourda G, Capitaine N. A&A, 2004, 428: 691
- [87] Brumberg V A, Bretagnon P, Froncou G. Proceedings Journées 1991, Système de Référence spatio-temporels, Capitaine N, ed. Paris: Observatoire de Paris, 1992: 141
- [88] Fukushima T. AJ, 2003, 126: 494
- [89] Bretagnon P, Fienga A, Simon J L. A&A, 2003, 400: 785
- [90] Capitaine N, Wallace P T, Chapront J. A&A, 2004, 421: 365
- [91] Capitaine N, Wallace P T. Proceedings IVS General Meeting, Nancy R V, Karen D B, eds. Ottawa, Canada, 2004: 336
- [92] Lambert S B. Empirical Modeling of the Retrograde Free Core Nutation, <ftp://hpiers.obspm.fr/eop-pc/models/fcn/notice.pdf>, 2007,
- [93] Lambert S B. <http://syrtte.obspm.fr/lambert/ivsopa/earth/geo/index.php>, 2012

- [94] Capitaine N, Wallace P T. *A&A*, 2006, 450: 855
- [95] Capitaine N. *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, 1990, 48: 127
- [96] Capitaine N, Chollet F. *Proceedings IAU Colloq.* Hughes J A, Smith C A, and Kaplan G H, eds. Washington, DC: U.S. Naval Observatory, 1991, 127: 224
- [97] Capitaine N. *Proceedings IAU Colloq.* Johnston K J, McCarthy D D, Luzum B J, et al. eds. Washington, DC: U.S. Naval Observatory, 2000, 180: 153
- [98] Fukushima T. *AJ*, 2001, 122: 482
- [99] Wallace P T, Capitaine N. *A&A*, 2006, 459: 981
- [100] Capitaine N, McCarthy D D. <http://syrtel.obspm.fr/iau/iauWGnfa/AAS04NCDM.pdf>, AAS meeting, 2004
- [101] Lambert S B, Bizouard C. *A&A*, 2002, 394: 371
- [102] Aoki S, Kinoshita H. *Celest. Mech.*, 1983, 29: 335
- [103] Capitaine N, Gontier A-M. *A&A*, 1993, 275: 645

## Explanation and Implementation of the IAU 2000/2006 Resolutions on Fundamental Astronomy

LIU Jia-cheng<sup>1,2</sup>, ZHU Zi<sup>1,2</sup>

(1. School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics (Nanjing University), Ministry of Education, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** With the rapid increasing accuracy of the observations and development of theoretical models, the International Astronomical Union (IAU) adopted in 2000 and 2006 a series of resolutions which modified the astronomical reference systems and the Earth rotation model. These resolutions introduce new concepts and definitions in astronomical references: the main changes are from bright stars to extragalactic reference sources, from a reference frame moving with time (FK5) to a fixed reference frame (ICRS) independent of time, and from a precessing equinox to a more stable fiducial point (the non-rotating origin). At the same time, the IAU 2000/2006 resolutions recommend new paradigms and high accuracy models in the transformation between the terrestrial and celestial reference systems. This paper reviews the consequences of these resolutions on the fundamental reference systems, time scales in the framework of general relativity, current IAU precession-nutation models, and comparisons of them with traditional ones. Recommendations are given concerning the concepts, nomenclature, models and conventions that are suitable for modern and future realizations of the reference systems.

**Key words:** Time; Reference systems; Precession-nutation; Earth's rotation