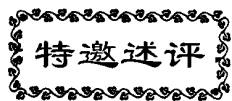


文章编号: 1000-8349(2010)04-321-12



# 国际地球参考框架 (ITRF) 的 原点和无整体旋转

朱文耀, 宋淑丽

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 目前国际地球参考框架 (ITRF) 建立和维持中, 参考架原点和其定向随时间演变的约束上, 并没有遵循协议地球参考系 (CTRS) 的定义。ITRF 的定义和实现不一致的这种特征, 将对毫米级地球参考框架的构建产生重要的影响。分析和讨论了最新的国际地球参考框架 (ITRF2005) 的原点和定向随时间演变的问题, 并提出了目前可能解决的办法。

**关键词:** 国际地球参考框架 (ITRF); ITRF 原点; 地心运动; 无整体旋转

**中图分类号:** P128.1      **文献标识码:** A

## 1 前 言

地球及其周围环境的各种运动和变化的监测与研究, 须由一个固连于地球并同地球一起转动的地球参考系 (TRS) 来描述。作为地球参考系的实现, 地球参考框架 (TRF) 是由一组固连于地球 (地壳) 上的参考点所构成的物理框架。通过一定的数据处理方法, TRF 采用一组有关的模型和常数求得参考点的坐标值和速度场, 来实现和维持所定义的地球参考系。有了 TRF, 才能真正从实践上将地球上任意点的位置及其变化加以定量的描述。由于地球物理上的原因 (构造运动和潮汐等), 这些参考点的位置随时间微小变化, 这种变化的复杂性给地球参考系的建立和维持带来困难。

国际地球参考系 (ITRS) 即协议地球参考系 (CTRS)。国际地球自转服务中心负责定义, 并通过 ITRF 来具体实现和维持国际地球参考系。目前 ITRF 的参考点是选用建立在地壳上的观测站, 因此 ITRF 实际上是建立在地壳上的地球参考架。

CTRS 的定义包含下列四个条件<sup>[1]</sup>:

---

**收稿日期:** 2010-06-03; **修回日期:** 2010-07-06

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金 (10603011); 863 计划 (2009AA12Z307); 上海市科学技术委员会 (05QMX1462); 中国科学院青年知识创新工程资助项目 (5120090304)

- (1) CTRS 的原点定义在整个地球 (包括海洋和大气) 的质量中心;
- (2) CTRS 的尺度定义为引力相对论意义下一局部地球框架内的尺度;
- (3) CTRS 的定向由国际时间局 (BIH) 给出的在历元 1984.0 的地球自转参数确定;
- (4) CTRS 的定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件。

这些定义在理论上是理想、完善的,但要真正实现并不容易。目前 ITRF 作为 ITRS 的具体实现,实际上在原点的定义和其定向随时间演变的约束上,并没有严格遵循 CTRS 的定义。过去由于观测精度的限制,ITRF 的定义和实现不一致的这种特征,对厘米级地球参考框架的建立和维持未带来多大的影响,因此未能引起人们的关注。随着 GPS、VLBI、SLR 等空间技术监测精度的提高,地壳运动和周围环境变化的监测已从厘米级向毫米级发展,毫米级地球参考框架的构建势在必行。ITRF 存在定义和实现的不一致性,将对毫米级地球参考框架的构建产生重要的影响。因此,弄清和解决 ITRF 的不一致性已成为当前地学界的重要研究课题<sup>[2,3]</sup>。本文对最新的国际地球参考框架 ITRF2005 的原点和定向随时间演变的问题,进行分析和讨论,提出了目前可能解决的办法。

## 2 ITRF 的原点

### 2.1 地球参考框架 (TRF) 的原点<sup>[5-9]</sup>

通常地球参考框架 (TRF) 的原点有三种取法。

(1) 整个地球 (包括大气、海洋和陆地水) 的质量中心 (CM)。CM 通常用作卫星动力学和星际动力学的坐标原点,在天球参考架和地球参考架转换中用的也是它,它在 TRF 的坐标可表为:

$$\mathbf{X}_{\text{CM}}(t) = \frac{\int \int \int \mathbf{X}_i(t) dm_i}{\int \int \int dm_i} = \frac{\int \int \int \mathbf{X}_i(t) dm_i}{M}, \quad (1)$$

式中  $M$  为整个地球的总质量,积分是对整个地球。

(2) 固体地球的质量中心 (CE)。它通常在理论地球物理中用于计算固体地球动力学形变,如负荷洛夫数等。它在 TRF 的坐标可表为:

$$\mathbf{X}_{\text{CE}}(t) = \frac{\int \int \int \mathbf{X}_i(t) dm_i}{\int \int \int dm_i} = \frac{\int \int \int \mathbf{X}_i(t) dm_i}{M_E}, \quad (2)$$

式中  $M_E$  为固体地球的质量,积分是对整个固体地球。

(3) 固体地球外壳的形状中心 (CF)。理论上可定义为:相对于 CF,整个固体地球表面的速度场为零,与地球的质量分布无直接的关系。它通常用于地面的大地测量和形变测量,是地球物理学家和大地测量学家所应用的地球参考框架。它在 TRF 的坐标可表为:

$$\mathbf{X}_{\text{CF}}(t) = \frac{\int \int \int \mathbf{X}_i(t) dD_i}{\int \int \int dD_i} = \frac{\int \int \int \mathbf{X}_i(t) dD_i}{D_E}, \quad (3)$$

式中  $D_E$  为固体地球的表面积,积分是对整个固体地球的表面。

为了实现和维持将 TRF 的原点取为 CM、CE 或 CF,则须满足  $\mathbf{X}_{\text{CM}}(t)$ ,  $\mathbf{X}_{\text{CE}}(t)$  或  $\mathbf{X}_{\text{CF}}(t) = (0, 0, 0)^T$ 。对 CM、CE 要用式 (1)、(2) 来实现是非常困难的,这不仅与质量有关,

而且涉及的是整个地球 (从里到外)。好在对 CM 可通过卫星动力学的方法来实现, CM 也是地球卫星绕其旋转的动力学中心。SLR 等卫星测量技术的数据处理方法通常是一种动力测地方法, 在卫星轨道确定中用的地球引力场模型的 3 个一阶系数为零 ( $C_{10} = C_{11} = S_{11} = 0$ ), 这样就从理论概念上把 SLR 解的原点定义到了质心。

而对 CF 用式 (3) 来实现就要简单得多。如果在固体地球表面能均匀地布设足够多的测站, 由这些测站组成的多面体就能较好地代表固体地球表面, 多面体的形状中心就能较好地代表固体地球表面的形状中心, 严格地讲目前 ITRF 网的中心 (CN) 与 CF 有一定的差别, 根据 Wu 等人 2002 年的研究<sup>[6]</sup>, 全球 SLR 网的中心 CN 与 CF 间的运动仅 1 mm 量级, 而对在全球较密集的 IGS 网而言, CN 与 CF 间的运动要小得多。因此在目前的观测精度下, 可把 ITRF 网的 CN 近似看成是 CF。式 (3) 的积分就可近似用求和代替。

$$\mathbf{X}_{\text{CF}}(t) = \frac{\int \int \int \mathbf{X}_i(t) dD_i}{D_E} \cong \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{X}_i(t)}{N}, \quad (4)$$

式中求和中的  $\mathbf{X}_i(t)$  即为测站的坐标,  $N$  为站数。

## 2.2 两种地球参考框架

地球参考框架作为地球参考系的具体实现, 有两种主要类型。

第一种称为动力学地球参考框架, 是采用绕地球轨道运动的卫星位置作为参考点来描述的地球参考架, 通常使用于卫星导航系统或卫星雷达测高等。这种地球参考架的原点应该定义在整个地球 (包括固体和流体系统) 的质量中心 (CM)。对 CM 框架, 基准站的位置可表为:

$$\mathbf{X}^{\text{CM}}(t) = \mathbf{X}^{\text{CM}}(t_0) + \mathbf{V}^{\text{CM}}(t - t_0) + \sum_R \Delta \mathbf{X}_R^{\text{CM}}(t), \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{X}^{\text{CM}}(t_0)$  为在历元  $t_0$  ( $t_0 = 2000.0$ ) 的坐标,  $\mathbf{V}^{\text{CM}}$  为线性速度,  $\sum_R \Delta \mathbf{X}_R^{\text{CM}}(t)$  为基准站位置的各种非线性运动, 包括: 固体潮、海潮、极潮, 大气、海洋非潮汐、地表水等质量负载, 冰期后的地壳回弹, 地震等。

第二种称为运动学地球参考框架, 是采用固定在地壳上的基准站的位置作为参考点来描述的地球参考架, 也称为建立在地壳上的地球参考架 (Crust-based TRF), 通常用于地面的大地测量和形变测量。这种方法主要是由跟踪仪或者大地测量标志仪来测定。从概念上讲, 这种地球参考架的原点应该是固态地球表面 (地壳) 的形状中心 (CF)。CF 可理解为: 相对于它, 整个固体地球表面的速度场为零。对 CF 框架, 基准站的位置可表为:

$$\mathbf{X}^{\text{CF}}(t) = \mathbf{X}^{\text{CF}}(t_0) + \mathbf{V}^{\text{CF}}(t - t_0) + \sum_R \Delta \mathbf{X}_R^{\text{CF}}(t), \quad (6)$$

上式  $\mathbf{X}^{\text{CF}}(t_0)$  等量均在 CF 框架中定义。

目前的 ITRF 采用的是后者<sup>[1]</sup>。根据 IERS Convention (2003), ITRF 应考虑为 CF 的地球参考框架, 且有  $\mathbf{X}^{\text{CM}}(t) = \mathbf{X}^{\text{CF}}(t) + \mathbf{X}^{\text{G}}(t)$ ,  $\mathbf{X}^{\text{G}}(t)$  为地心的运动 (geocenter motion)。而 ITRF 作为 ITRS 的具体实现, 理应将其原点定义为地球的质心。这就形成了 ITRF 原点的定义和实现的不一致。

### 2.3 ITRF2005 原点既不是 CF，也不是 CM

为了减小 ITRF 原点上述定义和实现不一致所带来的影响，在构建 ITRF 时总是将原始 ITRF 的解靠到 SLR 解上（早先是靠到 SLR、GPS 和 DORIS 解的加权平均上）。如最新的 ITRF2005 的构建中，其原点定义为：在历元 2000.0 时刻 ITRF2005 与国际 SLR 服务 (ILRS) 的 SLR 解的平移参数及其速率为零<sup>[2,3]</sup>，由此保证 ITRF2005 的原点在历元 2000.0 与地球质心 (由 ILRS 解得) 重合，而且其原点的线性速度与 ILRS 保持一致。由于 SLR 解的原点是 CM，ITRF2005 的原点似乎也就是 CM，实际上却并非如此。下面分析 ITRF2005 原点的性质<sup>[2,4]</sup>。

将地心运动分解成：

$$\mathbf{X}^G(t) = \mathbf{X}^G(t_0) + \mathbf{V}^G(t - t_0) + \sum_R \Delta \mathbf{X}_R^G, \quad (7)$$

式中， $\mathbf{X}^G(t_0)$  为在历元  $t_0$  时刻 CF 相对于 CM 的坐标， $\mathbf{V}^G$  为地心运动的线性速度项 (即长期项)， $\sum_R \Delta \mathbf{X}_R^G(t)$  为地心的季节性等高频变化。由此可得：

$$\begin{cases} \mathbf{X}^{\text{CM}}(t_0) = \mathbf{X}^{\text{CF}}(t_0) + \mathbf{X}^G(t_0) \\ \mathbf{V}^{\text{CM}} = \mathbf{V}^{\text{CF}} + \mathbf{V}^G \\ \sum_R \Delta \mathbf{X}_R^{\text{CM}}(t) = \sum_R \Delta \mathbf{X}_R^{\text{CF}}(t) + \sum_R \Delta \mathbf{X}_R^G(t) \end{cases} \quad (8)$$

ITRF2005 的原点定义为：在历元 2000.0 时刻 ITRF2005 与 ILRS 的 SLR 时间序列间的平移参数及其速率为零。这意味着 ITRF2005 解，经过相对于 ILRS 解的一个 14 参数的 Helmert 转换后<sup>[1]</sup>，应有： $\mathbf{X}^{\text{ITRF2005}}(t_0) = \mathbf{X}^{\text{CM}}(t_0)$ ， $\mathbf{V}^{\text{ITRF2005}} = \mathbf{V}^{\text{CM}}$ 。这表明 ITRF2005 的原点在历元 2000.0 为地球的质心，而且包含了地心运动线性项，但并不包含地心运动的非线性运动。因此，ITRF2005 的原点既不是 CM，也不是 CF。ITRF2005 原点、CF 和 CM 之间的关系可从图 1 看出。图 1 给出的是在 CM、CF 和 ITRF2005 框架中测站的站坐标序列的示意图。其中 CF 与 CM 之间的差就是地心运动，CF 与 ITRF2005 之间的差是地心运动视长期变化，ITRF2005 与 CM 之间的差是地心运动中的季节性等高频变化。ITRF2005 可作为 CM 框架，用来研究地球的各种长期形变，而不能用来研究季节性等高频变化。

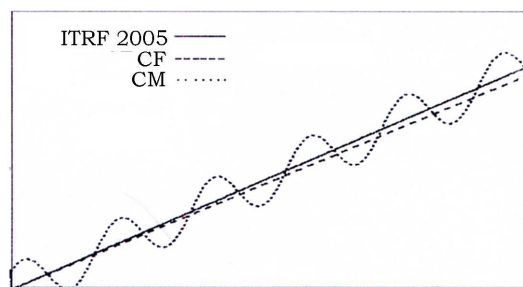


图 1 在 CM、CF 和 ITRF2005 框架中测站的站坐标序列示意图

目前在建立 ITRF 综合解时，对站坐标时间序列采用 14 参数的转换，即对坐标矢量和速度矢量的两个 H 氏 7 参数转换。实际上仅仅解决了式 (8) 中前两式，而没有解决式

(8) 的第三式, 而  $\sum_R \Delta \mathbf{X}_R^G(t)$  正是地心运动的主项 (见下节)。因此目前 ITRF 工作组建立 ITRF 综合解的方法, 并没有真正解决 CF 框架到 CM 框架的转换问题。这也是 ILRS 解的原点 (地球的质心) 相对于 ITRF2005 原点的变化序列出现以周年运动为主的高频变化的原因 (见图 2)。

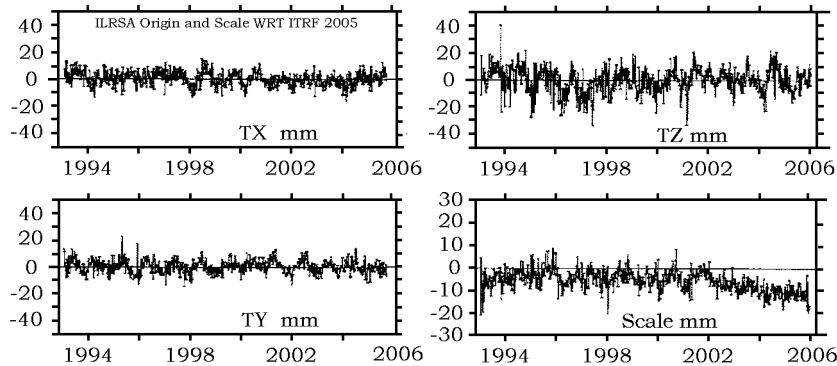


图 2 ILRS 解的原点 (即地球质心) 和尺度相对于 ITRF2005 的变化 [4]

如要求 ITRF2005 的原点严格定义在 CM 上, 则需要在 ITRF2005 加上  $\sum_R \Delta \mathbf{X}_R^G(t)$  这一项, 这时测站的站坐标可表为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}^{\text{ITRF 2005}}(t_0) + \mathbf{V}^{\text{ITRF 2005}}(t - t_0) + \sum_R \Delta \mathbf{X}_R^{\text{ITRF 2005}}(t) + \sum_R \Delta \mathbf{X}_R^G(t), \quad (9)$$

因此,  $\sum_R \Delta \mathbf{X}_R^G(t)$  就成为解决 ITRF 原点定义和实现不一致的关键问题。

#### 2.4 地心运动的地球物理机制和量级

地心运动 (geocenter motion) 的地球物理机制是: 当整个地球 (包括固体和流体) 不受外力作用下, CM 的位置将在空间保持固定。由于地球流体质量的位移, 导致流体地球质量中心运动。为使整个地球质量中心的位置保持固定, 根据线性动量守恒的原理, 须通过固体地球质量中心 CE 相对于 CM 的反向运动来补偿。显然固定在固体地球表面的测站将受这个反向运动的支配, 由这些测站组成的大地测量网 (即地球参考框架) 相对于 CM 也将产生相应的平移。这就是地心运动 (CF 相对于 CM) 的基本原理。地心运动作为一个地球质量平衡关系的产物的同时, 附在固体地球表面的大地测量网由于流体负荷的再分布也将产生形变。因此地球表面质量的再分布的同一过程, 以两个完全不同的方式在大地测量网中表达出来: 一是与质量平衡有关的地心的位移, 二是由于负荷引起的固体地球的形变。如果固体地球完全是一个刚体, 则固体地球表面不发生形变, CF 与 CE 重合; 当固体地球是个弹性体, 作为对流体质量负荷的响应, 固体地球表面将产生形变, 其一阶形变导致 CF 相对于 CE 的运动。设  $\mathbf{X}_{\text{CM}}^{(\text{CE}, \text{CF})}(t)$  为  $t$  时 CE 和 CF 相对于 CM 的位置矢量, 计算公式为 [9]:

$$\mathbf{X}_{\text{CM}}^{(\text{CE}, \text{CF})}(t) = -\left(1 + k_1^{(\text{CE}, \text{CF})}\right) \frac{\rho_s}{\rho_E} \begin{pmatrix} T_{11}^C \\ T_{11}^S \\ T_{10}^C \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中  $k_1^{CE} = 0$ ,  $k_1^{CF} = -(h_1^{CE} + 2l_1^{CE})$ ,  $h_1^{CE}$ ,  $l_1^{CE}$  为在 CE 框架中的一阶质量负荷洛夫数,  $\rho_s$  为海水的密度,  $\rho_E$  为地球的平均密度;  $(T_{11}^C, T_{11}^S, T_{10}^C)^T$  为地表负载密度的一阶球谐系数<sup>[9]</sup>。式(10)中将  $h_1^{CE}$ ,  $l_1^{CE}$  的值代入  $k_1^{CF}$ , 可得  $k_1^{CF} \approx 0.021$ 。由此可看到 CF 相对于 CE 的运动是非常小的, 仅为相对于 CM 的 2%, 目前尚难监测。然而必须注意, 它对地面一个点位的形变要大得多。从地球物理机制看, 地心的运动出现长期运动是不大可能的; 但从十年到几十年的时间尺度, 由冰期后地壳回弹、覆盖地球表面的冰雪融化、海平面的变化、地幔对流等引起的长周期变化, 将呈现长期变化的趋势, 目前对这些地心运动视长期变化的监测和估计仍是不确定的。根据 Argus 等人<sup>[18]</sup>估计, 这些因素综合影响的长期变化的速度不超过 0.3 mm/a, Greff-Lefftz<sup>[19]</sup>估计为 0.2~0.5 mm/a。地心运动的短周期变化包括: (1) 固体潮、海潮和极潮引起的周日和半日周期变化, 振幅约为 2 mm 量级, 已精确模型化; (2) 大气、陆地水和海洋非潮汐等质量负载引起的季节性变化, 主要周期是年和半年, 周年振幅约为 2~4 mm 量级, 半年振幅约 1 mm 量级(见表 1)。可见地心运动的主项应是周年运动。

表 1 各类地球物理因素引起地心运动

地球物理机制	特性	量级	模型化	目前处理方法
固体潮、海潮和极潮	周日和半日周期	振幅约为 2 mm	已精确模型化	模型的精度与观测精度相当
质量负载的季节性变化 (非潮汐、非长期)	年和半年周期	年振幅 2~4 mm 半年振幅 1 mm	正在进行中	被长期运动平滑掉
冰期后地壳回弹、冰雪融化、海平面的变化等	长周期或长期	<0.5 mm/a	尚难模制	包含在站坐标的线性变化中

## 2.5 地心运动的空间技术监测和地球物理模制

目前地心运动监测主要有下面三种方法。

(1) 网移动方法 (network shift approach), 也称为几何方法。它是将以 CM 为原点的 SLR、GPS、DORIS 动力测地的站坐标时间序列与以 CF 为原点的 ITRF 站坐标时间序列, 通过 7 参数的 Helmert 坐标转换, 直接得到 CF 相对于 CM 坐标框架间的 3 个平移参数的时间序列<sup>[5,7,9,14,15]</sup>。这个时间序列就是地心运动的时间序列。实际上图 2 中 ILRS 原点相对于 ITRF2005 原点应是当前 SLR 等技术监测地心周期运动精度最高、跨度最长的时间序列。对该时间序列进行精细的频谱分析, 有望获得更可靠的地心周期运动特征。近几年发展起来的星载 GPS 低轨道卫星 (LEO) GRACE 的定轨结果也被用来监测和研究地心的运动。星载 GPS 观测动力学定轨和几何法定轨给出的卫星轨道分别相对于 CM 框架和 CF 框架, 通过 7 参数坐标转换, 取得了地心运动的时间序列<sup>[17]</sup>。

(2) 动力学方法。它是通过估计地球引力场一阶球谐系数的方法来确定地心的运动<sup>[11,12,15,16]</sup>。它们之间的关系如下:

$$\mathbf{X}^G(t) = (x^G(t), y^G(t), z^G(t))^T, \quad (11)$$

$$\begin{cases} x^G(t) = RC_{11}(t) = \frac{R}{M} \int \Delta\sigma(\varphi, \lambda, t) \cos\varphi \cos\lambda ds \\ y^G(t) = RS_{11}(t) = \frac{R}{M} \int \Delta\sigma(\varphi, \lambda, t) \cos\varphi \sin\lambda ds \\ z^G(t) = RC_{10}(t) = \frac{R}{M} \int \Delta\sigma(\varphi, \lambda, t) \sin\varphi ds \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $x^G(t)$ ,  $y^G(t)$ ,  $z^G(t)$  为  $\mathbf{X}^G(t)$  的 3 个分量,  $M$ 、 $R$  为地球质量和赤道半径,  $(C_{10}, C_{11}, S_{11})$  为地球引力场一阶球谐系数,  $ds$  为地球表面的面积元,  $\Delta\sigma(\varphi, \lambda, t)$  为地球表面质量负载的变化, 主要包括大气负载、非潮汐海洋负载、积雪和土壤湿度负载。其中大气负载的计算可取美国国家环境预报中心 (NCEP) 或欧洲中尺度气象预报中心 (ECMWF) 所提供的采样率为 6 h 的格网地表气压资料 (网址分别为: <http://dss.ucar.edu/datasets> 和 <http://www.ecmwf.int>); 积雪和土壤湿度质量负载取自 NCEP/DOE AMIP-II (<http://www.ncep.noaa.gov>); 非潮汐海洋质量负载取自美国空间研究中心 (CSR) 的海平面模型 (<http://www.csr.utexas.edu/sst>)。

(3) 一阶形变的方法 (degree-1 deformation)。它等价于由质量负载引起的固体地球形变而产生的地心运动。计算公式为式 (10)。

地心运动的空间技术监测结果与地球物理模型预报结果的比对: 与地球物理模型预报结果相比, SLR 解在周年运动的振幅和相位符合得较好; 而 GPS 和 DORIS 解由于观测误差的复杂性, 符合程度较差。总之, 离精确模制尚有较大差距 (见表 2)。

表 2 空间技术监测和地球物理模型预报的质心运动的周年分量

数据来源	X		Y		Z	
	振幅 /mm	相位 /(°)	振幅 /mm	相位 /(°)	振幅 /mm	相位 /(°)
LAGEOS 1&2 <sup>[14]</sup>	2.2	211	3.2	331	2.8	225
LAGEOS 1&2 <sup>[15]</sup>	2.1±0.5	223	2.0±0.5	308	3.5±1.5	228
DORIS <sup>[15]</sup>	1.8	205	5.0	349	3.0	298
GPS/OBP <sup>[7]</sup>	1.7	274	3.8	285	4.5	249
GPS <sup>[9]</sup>	3.3±0.3	184	4.8±0.3	285	11±0.2	214
GPS <sup>[5]</sup>	4.8±0.4	220±5	3.6±0.4	320±7	9.4±0.5	105±3
GPS GRACE-A <sup>[17]</sup>	3.3±0.2	244±14	2.4±0.2	286±14	4.2±0.3	344±16
GPS GRACE-B <sup>[17]</sup>	2.7±0.2	232±14	2.3±0.2	277±14	3.7±0.3	349±16
GPS CHAMP <sup>[16]</sup>	2.1		3.2		3.1	
predicted <sup>[12]</sup>	4.2	224	3.2	339	3.5	235
predicted <sup>[11]</sup>	2.4	244	2.0	270	4.1	228
predicted <sup>[15]</sup>	1.6	236	1.8	239	3.1	254

## 2.6 几点注意

目前地心的运动已被空间技术监测, 并能与地球物理模型的预报结果进行定量比较。当越来越多的科学家开始研究季节性和短尺度地球动力学形变时, 这些时间尺度的 ITRF 的稳定性就成为必须考虑的问题。而且这些研究都需要作出空间大地测量解与地球物理模制解之间的比较, ITRF 的原点与其他有关参考架的原点之间的关系就必须被考虑。而目前 ITRF 原点的双重特征容易产生混淆, 使地心运动的精确监测和模制越来越受到地学界的关注。下

面给出在地球环境的监测和研究中, 一些有关参考架原点必须注意的问题。

(1) 目前利用 LEO 卫星 GRACE 给出的地球引力场球谐系数 ( $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$ ) 变化序列, 广泛应用于地球环境的监测和研究, 如冰雪融化引起的海平面变化、地表流体质量负载变化等。地球表面质量负载变化  $\Delta\sigma(\varphi, \lambda, t)$  和大地水准高度的变化  $\Delta N(\varphi, \lambda, t)$  可表为:

$$\begin{cases} \Delta\sigma(\varphi, \lambda, t) = \frac{R\rho_E}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} P_{nm}(\sin\varphi) [\Delta C_{nm}(t) \cos m\lambda + \Delta S_{nm}(t) \sin m\lambda] \\ \Delta N(\varphi, \lambda, t) = R \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin\varphi) [\Delta C_{nm}(t) \cos m\lambda + \Delta S_{nm}(t) \sin m\lambda] \end{cases} \quad (13)$$

须注意的是, GRACE 给出的  $\Delta C_{nm}(t)$ ,  $\Delta S_{nm}(t)$  总是相对于 CM 的变化, 由此得到的  $\Delta\sigma$  和  $\Delta N$  均是在 CM 框架内的变化。而人们监测和研究的地球环境变化, 如海平面变化、质量负载引起的地形变等, 显然是相对于固体地球表面的变化, 即在 CF 框架内的变化。因此对 GRACE 的监测结果必须进行地心运动的改正。

(2) 目前越来越多的科学家致力于地壳非线性运动的研究, 对地面网基准站站坐标的地壳非线性运动特征, 进行了各种空间大地测量解与地球物理模制解之间的比较, 但却没有仔细考虑 ITRF 的原点与其他有关参考架的原点之间的关系。应指出 ITRF、VLBI 解和地球物理模制解基本属于 CF 框架, 而 SLR、DORIS 和 GPS 的解均属于 CM 框架。两者的比较, 必须进行地心运动的改正。

ITRF 原点的定义和实现的不一致, 以及它既不是 CF 也不是 CM 的性质, 使广大 ITRF 用户容易产生混淆。弄清和解决 ITRF 的原点问题, 是当前构建毫米级地球参考框架不容忽视的关键问题。按地球参考框架的功能之一, 即作为监测和描述地球及其周围环境的各种运动和变化的参考框架, 显然采用 CF 框架较方便。因为人们监测和研究的地球环境变化, 总是参照于固体地球表面的变化。而按地球参考框架的另一功能——它代表整个地球, 研究地球的整体平移(地球的轨道运动)和转动(地球的定向运动), 应该采用 CM 框架; 另外与卫星动力学定轨有关的工作, 也应采用 CM 框架。

### 3 ITRF 的无整体旋转

#### 3.1 ITRF 无整体旋转的理论概念

提出 CTRS 定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的这个约束条件, 起因于地球参考系的理论概念, 即理想的地球参考系应是这样一种固连于地球的地固系统: 相对于它, 地球只存在形变, 无整体的旋转; 而相对于惯性参考系, 它只包括地球的整体旋转运动, 即地球的定向运动 (EOP)。也就是采用所谓 Tisserand 条件来定义一个理想的地球参考系, 其主要特征是: 相对于它, 整个地球的角动量为零<sup>[20,21]</sup>。由于目前建立的地球参考架, 是用固定在地壳上的参考点(测站)来描述的参考架, 实现地球参考架相对于地壳无整体旋转的约束条件, 数学上可表为:

$$\mathbf{L} = \int_{(s)} \mathbf{r} \times \mathbf{v} ds = 0, \quad (14)$$

式中,  $\mathbf{L}$  是整个地壳角动量和,  $ds$  是地壳面元,  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{r}$  是该地壳面元在地固系中的速度和



位置矢量,  $(s)$  代表整个地壳积分。

### 3.2 利用板块运动模型 NNR-NUVEL1A 实现 ITRF 的无整体旋转

早先的 ITRF 序列, 其实测的速度场精度较差, 测站的速度取自最近数百万年的地质资料建立的全球板块运动模型, 如 NUVEL1、NUVEL1A。这时测站的速度可表为<sup>[23]</sup>:

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}, \quad (15)$$

式中,  $\boldsymbol{\Omega}$  是测站所在板块的欧拉矢量。假定地球为球形, 地壳质量均匀分布,  $\mathbf{r}$  可近似取作单位矢量。整个地壳由 14 个主要板块组成, 则整个地壳的角动量  $\mathbf{L}$  可表为:

$$\mathbf{L} = \int_c \mathbf{r} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) dm = \sum_{I=1}^{14} \int_{S_I} \mathbf{r} \times (\boldsymbol{\Omega}_I \times \mathbf{r}) dA_I = \sum_{I=1}^{14} \mathbf{Q}_I \boldsymbol{\Omega}_I, \quad (16)$$

式中,  $\mathbf{Q}_I$  是第  $I$  个板块的转动惯量矩阵, 其各元素  $(Q_{ij})_I$  可由下式计算<sup>[24]</sup>。

$$(\mathbf{Q}_{ij})_I = \int_{S_I} (\delta_{ij} - x_i x_j) dA = \int_{S_I} (\delta_{ij} - x_i x_j) \sin \varphi d\varphi d\lambda, \quad (17)$$

其中,  $x_k (k=1, 2, 3)$  是沿  $I$  板块边界的笛卡尔坐标,  $\delta_{ij}$  是 Kronecker 符号。 $\mathbf{Q}_I$  仅取决于  $I$  板块在地壳上的几何构形  $S_I$ , 是个常数矩阵<sup>[22]</sup>。

为了实现“无整体旋转”的约定,  $\mathbf{L}$  应满足:

$$\mathbf{L} = \sum_{i=1}^{14} \mathbf{Q}_i \cdot \boldsymbol{\Omega}_i = \mathbf{0}. \quad (18)$$

将式 (18) 应用于地质、地球物理板块相对运动模型 NUVEL1A 等, 就可建立无整体旋转 (No Net Rotation) 的板块绝对运动模型——NNR-NUVEL1A<sup>[25]</sup>。ITRS(或 ITRF) 定向随时间的演化, 取决于 ITRF 的速度场, 早先的 ITRF 序列, 测站的速度取自 NNR-NUVEL1A 模型, 由此保证 ITRF (ITRS) 的定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件。随着空间观测技术的发展, ITRF96 以后的 ITRF 序列, 其速度场完全基于空间技术的实测结果, 与地质板块模型无关<sup>[26,27]</sup>, 这样就面临如何利用实测速度场实现无整体旋转条件的问题。空间技术实测速度场反映了近二十多年间地壳的现今运动特征, 而 NNR-NUVEL1A 等模型是由地质和地球物理资料建立的以地质世纪为尺度 (几百万年) 的平均模型, 它反映的是近百万年间地壳的现代平均运动特征, Sillard, Zhang 和 Zhu 等人<sup>[24-27]</sup> 分别利用 ITRF96、ITRF97 和 ITRF2000 的速度场建立了完全基于空间技术实测结果的现今全球板块运动模型, 这些现今模型与 NNR-NUVEL1A 有明显的差别 (10%~15%), 就板块的相对运动而言, ITRF2000 的结果显示了与大地测量模型 NUVEL-1A 很大不同, 并论证了这些 ITRF 序列相对于地壳均存在整体旋转, 即整个地壳的角动量  $\mathbf{L} \neq \mathbf{0}$ 。利用 ITRF2000 的速度场 ITRF2000VEL, 计算的  $\mathbf{L} = 0.35 \times 10^{-2} (\text{sterad/m} \cdot \text{a})$ , 显然不满足无整体旋转的约束条件<sup>[27]</sup>。对这一问题, 即使在 ITRF 工作组内部也未有一致的意见<sup>[28]</sup>。在 ITRF2005 的定向定义中, 仅笼统提在历元 2000.0 与 ITRF2000 的旋转参数及其速率为零, 以此保持 EOP 序列的连续性。再也不提相对于地壳或相对于 NNR-NUVEL1A 无整体旋转的约束条件。ITRF 中关于定向速度基准的问题仍然没有得到解决。

### 3.3 如何实现 ITRF 的无整体旋转

为了严格遵循“CTRS 定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件”的 IERS 规范。可采用构建 NNR-NUVEL1A 的方法, 建立完全基于 ITRF 实测速度场的、无整体旋转的、现今全球板块运动模型。这时就要对原来由空间技术确定的 ITRF 速度场作一个整体的调整。具体的调整的步骤如下<sup>[23,25-27]</sup>。

(1) 由 ITRF 实测的速度场建立现今的全球板块运动模型。利用式 (12), 通过加权最小二乘平差确定各大板块的欧拉矢量  $\Omega_i$ 。计算公式如下:

$$\begin{cases} v_p = v - v_r = v - \frac{(v \cdot r)r}{r^2} \\ V = A \cdot \Omega_i - v_{p,i} \\ \Omega_i = (A^T P A)^{-1} \cdot A^T P v_{p,i} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $v_p, v_r$  分别为测站速度矢量  $v$  的水平分量和垂直分量,  $V$  为误差矢量,  $A$  为  $\Omega_i$  的系数矩阵,  $P$  为权重可由  $v$  的方差确定。为了获得现今可靠的全球板块运动模型结果, 每个主要板块上至少要选取到 3 个测站, 这些测站应满足: 1) 连续观测至少 3 a 以上; 2) 远离板块边界和形变地带; 3) 速度精度 (最新 ITRF 综合解的结果) 高于 1 mm/a。

(2) 利用式 (19) 计算全球板块运动角动量之和  $L$ , 一般情况下  $L \neq 0$ , 为实现相对于地壳无整体旋转的约束条件, 令

$$\Omega_c = \frac{3}{8\pi} \cdot I \cdot L, \quad (20)$$

$$\Omega'_i = \Omega_i - \Omega_c, \quad (21)$$

式中,  $I$  是单位矩阵,  $\Omega'_i$  就是完全基于 ITRF 速度场建立的无整体旋转的现今全球板块运动模型。

(3) 相应的速度场作如下的调整:

$$v' = v - \Omega_c \times r. \quad (22)$$

由 TRF( $r, v'$ ) 定义 ITRF 将严格遵循“CTRS 的定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件”。

值得注意的问题是, 这时的 EOPs 系列也要作由  $\Omega_c$  产生的相应调整, 这将导致 EOP 序列的轻微不连续性。

### 3.4 一点建议

建议 IERS 的新规范中去除“CTRS 的定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件”这一条定向速度基准。相当于以前的 IERS 规范 (IERS Standards 1989, IERS Standards 1992) 中有“CTRS 随时间的演变遵循相对于地球无整体平移”的约束条件, 后发现了地球质心相对于 TRF 的运动, 在新的 IERS 规范 (IERS Conventions 1996, IERS Conventions 2003) 中去除了这个约束条件。

当前 ITRF 的建立和维持完全基于空间技术的实测结果 TRF( $r, v$ ), 而给出的 EOPs 序列也对应于 TRF( $r, v$ ) 框架。对 ITRF 的用户来说, 应用 TRF( $r, v$ ) 和 EOP 完全是一个自洽系

统, 应该没有任何问题; 他们也并不关心 TRF( $r, v$ ) 的定向随时间的演变是否遵循相对于地壳无整体旋转的问题。既然发现当前实测的 TRF( $r, v$ ) 相对于地壳存在整体旋转, 在以后的 IERS 规范中就应该去除“相对于地壳无整体旋转”的约定。事实上, 除了早先的 ITRF, 由于其速度场完全基于 NNR-NUVEL1A, 满足“相对于地壳无整体旋转”的约定外, 以后的 ITRF 均未真正满足这一约定<sup>[28-31]</sup>。它们对地球科学的实测和研究工作也没有带来任何问题。

## 4 结 论

随着 GPS、VLBI、SLR 等空间技术的监测精度的提高, 地壳运动和周围环境变化的监测已从厘米级向毫米级发展, 毫米级地球参考框架的构建势在必行。在 ITRF 的原点和其定向随时间演变的约束上, 存在的定义和实现不一致, 将对毫米级地球参考框架的构建产生重要的影响。

目前 ITRF 实现的原点既不是 CF, 也不是 CM; 采用 14 个转换参数建立的 ITRF 综合解, 并没有解决 CF 框架到 CM 框架的转换。合理解决 ITRF 的原点问题, 是当前构建毫米级地球参考框架不容忽视的关键问题。对于监测和描述地球及其周围环境的各种运动和变化, 采用 CF 框架较方便; 而对研究地球的整体平移(地球的轨道运动)和转动(地球的定向运动: 岁差、章动和地球的自转), 以及对于卫星动力测地, 应采用 CM 框架。关键问题是地心运动的可靠监测和模拟。目前 ILRS 原点相对于 ITRF2005 原点的变化序列, 应是当前 SLR 等技术监测地心周期运动精度最高、跨度最长的时间序列。

目前 ITRF 的定向随时间的演变, 并不遵循“相对于地壳无整体旋转的约束条件”这一条定向速度基准。为了实现 ITRF 的无整体旋转, 目前 ITRF 的速度场应作一个整体的调整, 但这将导致 EOP 序列轻微不连续性。建议 IERS 的新规范中去除“CTRS 的定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件”这一条定向速度基准。

## 参考文献:

- [1] Dennis D, McCarthy D D. IERS Conventions (2003). IERS Technical Note 32, 2004
- [2] 朱文耀, 熊福文, 宋淑丽. 天文学进展, 2008, 26: 1
- [3] 宋淑丽, 朱文耀, 熊福文等. 地球物理学报, 2009, 52: 2704  
Song S L, Zhu W Y, Xiong F W, et al. Chinese J. Geophys., 2009, 52(11): 1190
- [4] [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2005/ITRF2005\\_ts.php](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005_ts.php), 2010
- [5] Dong D, Yunk T, Heflin M. J Geophys Res, 2003, 108: 2200
- [6] Wu X, Argus D, Heflin M, et al. Geophys. Res. Lett., 2003, 29: 2210
- [7] Wu X, Heflin M, Ivins E, et al. J Geophys Res, 2006, 111: B09401
- [8] Lavallee D A, van Dam T, Blewitt G, et al. J Geophys Res, 2006, 111: B05405
- [9] Blewitt G. J Geophys Res Solid Earth, 2003, 108: 2103
- [10] Dong D N, Fang P, Bock Y, et al. JGR, 2002, 107(B4): ETG 9-1
- [11] Chen J L, Wilson C R, Eanes R J, Nerem R S. JGR, 1999, 104(B2): 1029
- [12] Dong D N, Dickey J O, Chao Y, Cheng M K. Geophys. Res. Lett., 1997, 24: 1867
- [13] Kusche J, Schrama E J O. JGR, 2005, 110: B09409
- [14] Eanes R J, Kar S, Bettadapur S V, et al. Trans Am Geophys U, 1997, Suppl: F146

- [15] Bouillé F, Cazenave A, Lemoine J M, et al. *Geophys J Int*, 2000, 143: 71
- [16] Guo J, Han Y, Huang C. *Science in China, Series (D)*, 2008, 38: 1404
- [17] Kang Z, Tapley B, Chen J, et al. *J Geod.* 2009, 83: 895
- [18] Argus D F, Peltier W R, Watkins M M. *JGR*, 1999, 104: 209
- [19] Greff-Lefftz M. *JGR*, 2000, 105: 25
- [20] Kovalevsky J, Mueller I I, Kolaczek B. *Reference Frames in Astronomy and Geophysics*, Ohio: Kluwer Academic Publishers, 1989: 1
- [21] Mueller I I, Rapp R H. *Reference Frames in Astronomy and Geophysics*, Ohio: Kluwer Academic Publishers, 1989: 145
- [22] Solomon S C, Sleep N H. *JGR*, 1974, 79: 2557
- [23] Argus D F, Gordon R G. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, 18: 2039
- [24] Sillard P, Altamimi Z, Boucher C. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25: 3223
- [25] Zhang Qiang, Zhu Wen-yao. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, 26: 2813
- [26] 朱文耀, 韩继龙. *天文学报*, 2000, 41: 312
- [27] Zhu Wen-yao, Fu Yan, Li yan, et al. *Science in China*, 2003, 46 (Supp): 1
- [28] [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2000/ITRF2000.RECOM.php](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2000/ITRF2000.RECOM.php), 2010

## Origin and No Net Rotation of the International Terrestrial Reference Frame

ZHU Wen-yao, SONG Shu-li

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

**Abstract:** According to IERS Convention 2003, the definition of the International Terrestrial reference System (ITRS) on the origin and the time evolution in orientation fulfill following conditions: (1) The origin of the system is the geocenter of the Earth's masses including oceans and atmosphere; (2) The time evolution of the orientation is ensured by a no-net-rotation condition with regards to horizontal tectonic motions over the whole Earth (named NNR condition).

As the realization of the ITRS, the current International Terrestrial Reference Frame (ITRF) to be attached to the deformable Earth is not sufficiently concordant with these definitions of the ITRS. The research results indicate that the origin of the current ITRF is neither the Earth's center of mass (CM) nor the center of figure (CF), and the current ITRF is not an NNR reference frame.

The inconsistency between the definition and realization of the ITRF origin and time evolution in orientation will cause confusion and influence the construction of mm-level terrestrial reference frame.

This paper discusses the nature of the origin of the current ITRF, and the methods of determining geocenter motion using space geodesy and modeled by geophysical factors. The two ways have been put forward to solve the problem of the NNR reference frame.

**Key words:** ITRS and ITRF; origin; geocenter motion; NNR reference frame