

ITRF 框架与 CGCS2000 坐标转换的研究

张杰¹, 范玉磊¹, 董海政¹, 卢群²

(1. 解放军 61243 部队, 新疆 乌鲁木齐 830006; 2. 解放军 32022 部队, 湖北 武汉 430074)

摘要: 本文推导计算了 ITRF2005 与 ITRF97 的框架转换参数, 对框架转换和历元归算进行了深入研究。利用国内 4 个 IGS 站的数据, 对先历元后框架和先框架后历元的两种转换方法进行实例验证, 分析了转换结果的精度, 并对坐标转换方法的使用提出了一些建议。

关键词: ITRF 框架; CGCS2000; 框架转换; 历元归算

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2017)06-0079-05

0 引言

2008 年 7 月 1 日起正式启用的 CGCS2000 大地坐标系, 由 2000 国家 GPS 大地网的点坐标和速度场具体实现, 与 ITRF97 框架一致, 参考历元为 2000.0^[1]。随着 CGCS2000 成为我国测绘领域的法定坐标系, 所有大地控制网坐标均需采用 CGCS2000 坐标系, 多数测绘成果也应尽可能归算到 2000 国家大地坐标系。

利用高精度 GNSS 相对定位或精密单点定位进行解算时, 通常以精密星历为基准, 计算结果是特定 ITRF 框架下基于观测当天历元的坐标, 只需通过框架转换和历元归算, 将该坐标转换到 ITRF97 框架、2000.0 历元, 就可以认为转换后的坐标属于 CGCS2000 坐标系^[2]。自 2006 年 10 月以来, IERS 已发布了 ITRF2005、ITRF2008 和 ITRF2014 等参考框架。由于 ITRF 官方网站尚未提供 ITRF2014 参考框架下的站点数据成果, 因

此本文以目前测绘实践中常见的 ITRF2005 和 ITRF2008 与 CGCS2000 的坐标转换为例进行探讨, ITRF2014 和其它框架坐标转换的原理和方法类似。

1 框架转换参数

国际地球参考系统 ITRS 是目前国际上最精确、最稳定的全球性地心坐标系, 国际地球参考框架 ITRF 是一个地心四维坐标参考框架, 是 ITRS 的具体实现, 是基于 VLBI、LLR、SLR、GPS 和 DORIS 等空间技术所建立的现代全球地面参考框架^[3]。ITRF 是通过对其定向、原点、尺度和时间演变基准的明确定义来实现的, 由于观测手段和精度有所不同, 加上时间基准的演变, 使得不同的 ITRF 框架之间存在小的系统性差异, 这些差异可以用 7 个框架转换参数及其速率来表示^[4]。框架转换参数和速率由 IERS 公布, 表 1 示出了常见的 ITRF 框架转换参数及其速率。

表 1 IERS 公布的框架转换参数及速率

转换参数 及速率	T_x/mm $\dot{T}_x/(\text{mm}/\text{y})$	T_y/mm $\dot{T}_y/(\text{mm}/\text{y})$	T_z/mm $\dot{T}_z/(\text{mm}/\text{y})$	D/ppb $\dot{D}/(\text{ppb}/\text{y})$	R_x/mas $\dot{R}_x/(\text{mas}/\text{y})$	R_y/mas $\dot{R}_y/(\text{mas}/\text{y})$	R_z/mas $\dot{R}_z/(\text{mas}/\text{y})$	参考历元
ITRF2008→	4.8	2.6	-33.2	2.92	0.00	0.00	0.06	2000.0
ITRF97	0.1	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02	
ITRF2005→	0.1	-0.8	-5.8	0.40	0.00	0.00	0.00	2000.0
ITRF2000	-0.2	0.1	-1.8	0.08	0.00	0.00	0.00	
ITRF2000→	6.7	6.1	-18.5	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
ITRF97	0.0	-0.6	-1.4	0.01	0.00	0.00	0.02	

收稿日期: 2017-09-07

联系人: 张杰 E-mail: 378971110@qq.com

由 IERS 公布结果可知,ITRF2008 与 ITRF97 在 2000.0 历元可直接转换,ITRF2005 与 ITRF97 之间的框架转换,需经过 ITRF2000 框架进行二次转换且参考历元不统一,计算过程比较繁琐,本文将推导求得 ITRF2005 与 ITRF97 之间的转换参数及速率。

每个具体的 ITRF 框架间转换关系都定义在特定历元,即框架转换参数在不同历元下是不同

的^[5]。依据公式(1)和(2),可计算任一参考历元的框架转换参数及速率,同时表明相同的框架转换在任一历元下的转换参数速率是相同的。式中, $P(t)$ 表示参考历元 t 的框架转换参数,取 t 为 2000,计算 ITRF2000 与 ITRF97 在 2000.0 历元的转换参数及速率,结果如表 2 所示。

$$P(t) = P(t_0) + \dot{P}(t_0)(t - t_0), \quad (1)$$

$$\dot{P}(t_0) = [(P(t) - P(t_0))/(t - t_0)]. \quad (2)$$

表 2 ITRF2000 与 ITRF97 在历元 2000.0 的转换参数及其速率

转换参数 及速率	T_x/mm $\dot{T}_x/(\text{mm}/\text{y})$	T_y/mm $\dot{T}_y/(\text{mm}/\text{y})$	T_z/mm $\dot{T}_z/(\text{mm}/\text{y})$	D/ppb $\dot{D}/(\text{ppb}/\text{y})$	R_x/mas $\dot{R}_x/(\text{mas}/\text{y})$	R_y/mas $\dot{R}_y/(\text{mas}/\text{y})$	R_z/mas $\dot{R}_z/(\text{mas}/\text{y})$	参考历元
ITRF2000→	6.7	4.3	-22.7	1.58	0.00	0.00	0.06	2000.0
ITRF97	0.0	-0.6	-1.4	0.01	0.00	0.00	0.02	

不同框架的坐标可以采用布尔莎七参数模型,通过特定历元下的相似变换进行转换,分别使用 T 、 D 、 R 表示参考框架在特定历元转换时的平移参数向量、尺度参数和旋转参数矩阵,则计算公式如下:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRFxx}} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRFyy}} + T + D \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRFyy}} + R \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRFyy}}, \quad (3)$$

$$\text{式中, } R = \begin{pmatrix} 0 & -R_z & R_y \\ R_z & 0 & -R_x \\ -R_y & R_x & 0 \end{pmatrix}$$

依据公式(3),可得到 ITRF2005→ITRF2000 和 ITRF2000→ITRF97 框架坐标转换的计算公式

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2000} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2005} + T_1 + D_1 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2005} + R_1 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2005}, \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{97} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2000} + T_2 + D_2 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2000} + R_2 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2000}, \quad (5)$$

将公式(4)代入公式(5)中,整理后可得

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{97} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2005} + (T_1 + T_2) + (D_1 + D_2) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2005} + (R_1 + R_2) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2005} + \Delta. \quad (6)$$

$$\text{其中, } \Delta = R_2 T_1 + D_2 T_1 + (D_2 D_1 + R_2 R_1 + D_2 R_1 + R_2 D_1) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2005}.$$

由于 T 、 D 、 R 数值微小,其乘积可忽略不计,上式中的微小项可以省略,因此特定参考历元下 ITRF2005→ITRF97 的转换参数为 ITRF2005→ITRF2000 和 ITRF2000→ITRF97 在同一历元下各相应转换参数之和。

假设在参考历元 t_0 时,ITRF2005→ITRF97 的转换参数速率为 \dot{P} ,ITRF2005→ITRF2000 的转换参数速率为 \dot{P}_1 ,ITRF2000→ITRF97 的转换参数速率为 \dot{P}_2 ,根据转换参数速率的定义,可得

$$\dot{P}(t_0) = [(P(t) - P(t_0))/(t - t_0)], \quad (7)$$

$$\dot{P}_1(t_0) = [(P_1(t) - P_1(t_0))/(t - t_0)], \quad (8)$$

$$\dot{P}_2(t_0) = [(P_2(t) - P_2(t_0))/(t - t_0)]. \quad (9)$$

式(8)和式(9)相加后可得式(10)

$$\dot{P}_1(t_0) + \dot{P}_2(t_0) = [(P_1(t) + P_2(t)) - (P_1(t_0) + P_2(t_0))]/(t - t_0). \quad (10)$$

由于上文已证明,同一历元下的转换参数 P

为 P_1 与 P_2 之和,式(10)经整理后可得式(11)

$$\dot{P}_1(t_0) + \dot{P}_2(t_0) = [P(t) - P(t_0)] / (t - t_0). \quad (11)$$

对比式(7)和式(11),可得

$$\dot{P}(t_0) = \dot{P}_1(t_0) + \dot{P}_2(t_0). \quad (12)$$

由式(12)可知,ITRF2005→ITRF97 的转换参数速率为 ITRF2005→ITRF2000 和 ITRF2000→ITRF97 的相应转换参数速率之和。综合以上分析,计算 ITRF2005 与 ITRF97 在历元 2000.0 的转换参数及速率,结果如表 3 所示。

表 3 ITRF2005 与 ITRF97 在历元 2000.0 的转换参数及其速率

转换参数 及速率	T_x (mm)	T_y (mm)	T_z (mm)	D (ppb)	R_x (mas)	R_y (mas)	R_z (mas)	参考历元
	\dot{T}_x (mm/y)	\dot{T}_y (mm/y)	\dot{T}_z (mm/y)	\dot{D} (ppb/y)	\dot{R}_x (mas/y)	\dot{R}_y (mas/y)	\dot{R}_z (mas/y)	
ITRF2005→	6.8	3.5	-28.5	1.98	0.00	0.00	0.06	2000.0
ITRF97	-0.2	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02	

2 坐标转换方法

假设需要将 ITRF_{xx} 框架、 T_1 历元下的坐标 $(X, Y, Z)_{ITRF_{xx}}^{T_1}$ 转换到 ITRF97 框架、2000.0 历元下的坐标 $(X, Y, Z)_{ITRF97}^{2000}$, 已知测站速度为 $(V_x, V_y, V_z)_{ITRF_{xx}}$ 或 $(V_x, V_y, V_z)_{ITRF97}$, 计算过程需要的框架转换参数 P 及其速率 \dot{P} 可由 IERS 公布结果或上文推导得到。坐标转换通常采用两种不同方法,一种是先进行历元归算,再进行框架转换,即先历元后框架;另一种是先进行框架转换,再进行历元归算,即先框架后历元。从理论上讲,两种方法得到的结果应该是一致的^[6]。

2.1 先历元后框架

1) 对同一框架的不同历元进行归算,即 $(X, Y, Z)_{ITRF_{xx}}^{T_1} \rightarrow (X, Y, Z)_{ITRF_{xx}}^{2000}$ 。

已知测站速度值 $(V_x, V_y, V_z)_{ITRF_{xx}}$ 时,利用式(13)求得 ITRF_{xx} 框架、2000.0 历元下的坐标。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF_{xx}}^{2000} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF_{xx}}^{T_1} + (2000 - T_1) \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}_{ITRF_{xx}}. \quad (13)$$

2) 对同一历元的不同框架进行转换,即 $(X, Y, Z)_{ITRF_{xx}}^{2000} \rightarrow (X, Y, Z)_{ITRF97}^{2000}$ 。

根据公式(1)计算出参考历元 2000.0 时的框架转换参数 $P(2000)$, 利用布尔莎七参数模型按公式(3)对 $(X, Y, Z)_{ITRF_{xx}}^{2000}$ 进行框架转换得到

ITRF97 框架、2000.0 历元下的坐标。

2.2 先框架后历元

1) 对同一历元的不同框架进行转换,即 $(X, Y, Z)_{ITRF_{xx}}^{T_1} \rightarrow (X, Y, Z)_{ITRF97}^{T_1}$ 。

根据式(1)计算出参考历元为 T_1 时的框架转换参数 $P(T_1)$, 利用布尔莎七参数模型按公式(3)对 $(X, Y, Z)_{ITRF_{xx}}^{T_1}$ 进行框架转换得到 $(X, Y, Z)_{ITRF97}^{T_1}$ 。

2) 对同一框架的不同历元进行归算,即 $(X, Y, Z)_{ITRF97}^{T_1} \rightarrow (X, Y, Z)_{ITRF97}^{2000}$ 。

已知测站速度值 $(V_x, V_y, V_z)_{ITRF97}$ 时,利用式(14)求得 ITRF97 框架、2000.0 历元下的坐标。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF97}^{2000} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF97}^{T_1} + (2000 - T_1) \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}_{ITRF97}. \quad (14)$$

3 算例分析

以中国大陆四个 IGS 站点 WUHN、SHAO、LHAS 和 XIAN 为例,利用 Matlab 编写程序对其进行坐标转换,数据来源于 ITRF 官方网站。选择四个站点在 ITRF2008 框架、历元 2014.0 和 ITRF2005 框架、历元 2008.0 的坐标与速度,按两种不同方法转换至 CGCS2000 坐标即 ITRF97 框架、历元 2000.0 坐标,转换后的坐标与 ITRF 官方提供坐标的差值如表 4 和表 5 所示。

表 4 先历元后框架的坐标转换结果

IGS 站	ITRF2005 框架坐标转换差值			ITRF2008 框架坐标转换差值		
	$\Delta X / m$	$\Delta Y / m$	$\Delta Z / m$	$\Delta X / m$	$\Delta Y / m$	$\Delta Z / m$
WUHN	0.013	-0.007	-0.003	0.010	0.000	0.007
SHAO	0.010	0.002	-0.002	0.007	0.008	0.006
LHAS	0.004	-0.015	-0.012	0.003	-0.003	-0.006
XIAN	-0.007	0.025	0.011	-0.004	0.036	0.024

表 5 先框架后历元的坐标转换结果

IGS 站	ITRF2005 坐标转换差值			ITRF2008 坐标转换差值		
	$\Delta X / m$	$\Delta Y / m$	$\Delta Z / m$	$\Delta X / m$	$\Delta Y / m$	$\Delta Z / m$
WUHN	0.025	-0.029	-0.007	0.010	0.000	0.007
SHAO	0.020	-0.005	-0.017	0.007	0.009	0.006
LHAS	0.007	-0.023	-0.019	0.002	-0.004	-0.007
XIAN	-0.021	0.005	-0.022	-0.004	0.036	0.025

从数据处理结果来看,两种方法的坐标转换精度基本在 1~2 cm 左右。XIAN 站坐标转换精度稍差,Y、Z 分量一般在 2~3 cm 左右,原因应该是 ITRF 提供的站坐标和速度精度较低。国际上 GPS 永久跟踪站网提供的站坐标和速度场参数,总是框架越晚、年代越近越精确,利用早期框架参数和速度场顺推某一历元的测站坐标精度不高^[6],而较低精度的速度场经过框架转换后误差进一步增加,因此表 4、5 中 ITRF2005 框架下两种方法的精度差异较为明显。

实例验证表明,本文推导计算的框架转换参数准确可靠,两种转换方法均可满足一般坐标转换精度要求,同时可以分析得出以下几点结论:

1) 通过推导 ITRF2005 和 ITRF97 的框架转换参数及速率,计算过程避免经过 ITRF2000 进行分步转换的步骤,与直接提供转换参数的框架间转换类似,方法简便、精度可靠。

2) 采用先框架后历元的转换方法,无论是直接利用早期的 ITRF97 框架速度场,或是对较晚框架的速度场进行框架间转换,得到的速度场精度一般相对较低。因此使用较新的 ITRF2008 坐标和速度,利用先历元后框架的方法进行转换,结果精度稍有一定提高。

3) 计算过程表明,历元归算对坐标分量的影响很大,速度场参数的误差越大,经过长时间的历元跨度,导致的误差积累也越大。目前的速度场参

数一般以线性模型计算得到,而 IGS 站的位置时间序列中除包含线性运动的长期趋势外,还包含复杂的非线性运动特征^[7]。以速度计算精度 1 mm/y 来推算,反映在点位上的误差,10 年就是 1 cm,且逐年增大,因此坐标转换精度与测站的速度场精度密切相关。

4 结束语

本文对 ITRF 框架转换参数的推导计算及坐标转换的两种方法展开研究,利用国内 4 个 IGS 站的数据进行实例分析,结果表明参数推导准确可靠,两种坐标转换方法及精度满足生产要求,在实际工程中优先选择先历元后框架的转换方法。

坐标转换的计算过程表明,速度场的获取是 ITRF 框架与 CGCS2000 坐标转换的关键因素,直接影响到转换结果的精度。目前国内不少单位和学者,利用大量历史观测资料计算得到的速度场,从运动趋势看大体一致,但运动矢量的大小和方向有明显差异,对计算结果影响较大。因此,如何获得有效的、高精度的速度场,是 ITRF 框架与 CGCS2000 实现高精度转换的瓶颈,还需进一步深入研究。

参考文献

- [1] 于强,易长荣,占惠. ITRF2000 转换到 CGCS2000 框架的分析[J]. 全球定位系统,2009,34(5):49-51.

- [2] 熊四明. 2000 国家大地坐标系下点位坐标转换方法浅析[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(5): 155-158.
- [3] 苗龙. ITRF2008 与 CGCS2000 坐标系的转换[J]. 地理空间信息, 2011, 9(6): 144-145.
- [4] 刘立, 成英燕. ITRF 框架的相互转化[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 141-143, 147.
- [5] 高乐, 成英燕, 郑作亚, 等. 局部区域数据纳入 ITRF 的新方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(7): 839-842, 852.
- [6] 姚宜斌. 高精度 GPS 测量中坐标基准的统一方法研究[J]. 地矿测绘, 2001(2): 3-5.
- [7] 范玉磊, 王贺, 黄声享, 等. 利用小波分析 IGS 跟踪站的非线性运动特征[J]. 测绘工程, 2014, 23(9): 5-8.

作者简介

张杰 (1985—), 男, 测绘高级技师, 主要研究方向为 GNSS 数据处理理论与方法。

范玉磊 (1986—), 男, 硕士, 主要研究方向为 GNSS 时间序列分析理论和方法。

董海政 (1980—), 男, 工程师, 主要从事测绘工程技术设计和数据处理等相关工作。

卢群 (1985—), 男, 硕士, 主要研究方向为 GNSS 精密数据处理及应用研究。

Research on Coordinate Transformation Between ITRF Frame and CGCS2000

ZHANG Jie¹, FAN Yulei¹, DONG Haizheng¹, LU Qun²

(1. 61243 PLA troops, Urumqi 830006, China; 2. 32022 PLA Troops, Wuhan 430074, China)

Abstract: The parameters of frame transformation from ITRF2005 to ITRF97 are deduced for calculation in this paper, and the frame transformation and epoch reduction are researched deeply. With the data from the four IGS stations in China, the two transformation methods of frame-before-epoch and epoch-before-frame are validated by examples. Finally this paper analyses the accuracy of conversion results and gives some suggestions for the use of coordinate transformation methods.

Key words: ITRF frame; CGCS2000; frame transformation; epoch reduction