引文格式：丁俊豪. 我国大陆地区ITRF坐标系统转换研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(5): 107-109. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023. 05.026

我国大陆地区ITRF坐标系统转换研究

丁俊豪[1]
（1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司，陕西 西安 710043）

摘　要：在研究ITRF坐标系统转换理论和方法的基础上，提出了一种实际可行的框架、历元转换方法，并应用于实际工程快速获得了CGCS2000坐标。结果表明，不同框架坐标在相同历元下坐标差异较小，ITRF2014与ITRF2008、ITRF2005在2021.00历元下的坐标偏差小于5 mm；不同地区地壳构造程度差异导致坐标历元间差别很大。提出了两套中国大陆地区3°×3°速度格网（CGCS2000和ITRF14），可用于快速获取测站速度和历元坐标转换，精度可达厘米级，能在工程中广泛应用。

关键词：ITRF框架转换；历元；板块运动；CGCS2000
中图分类号：P226⁺.3　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）05-0107-03

Research on ITRF Coordinate System Transformation in Mainland China

DING Junhao[1]
(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: In this paper, we studied the theory and method of ITRF coordinate system transformation at first. And then, we put forward a practical framework and epoch transformation method, and applied it to practical engineering to quickly obtain CGCS2000 coordinates. The results show that the coordinate differences of different frame coordinates are small in the same epoch. Compared with ITRF 2008 and ITRF 2005, the coordinate deviation of ITRF 2014 is less than 5 mm in 2021.00 epoch. The degree of crustal structure in different regions is different, resulting in great differences between coordinate epochs.We put forward two sets of 3°× 3° velocity grid in mainland China(CGCS2000 and ITRF14), which could be used to quickly obtain the velocity value of survey station and transfer coordinates of epoch. The accuracy can reach centimetre-level and it can be widely used in engineering.

Key words: ITRF framework transformation, epoch, plate movement, CGCS2000

国际地球参考框架（ITRF）由一系列具有三维笛卡尔坐标的地面站点构成[1-2]，是国际地球参考系统实现的坐标系。ITRF已发布ITRF89、ITRF90、ITRF91、ITRF92、ITRF93、ITRF94、ITRF96、ITRF97、ITRF2000、ITRF2005、ITRF2008和ITRF2014多个框架[3-4]。我国从2008年开始推广使用2000国家大地坐标系（CGCS2000），这是以ITRF97框架2 000.0历元为参考的地心三维坐标系。随着北斗卫星导航定位系统的组网完成，CGCS2000也开始探索建立全球坐标系统。以ITRF框架为纽带，可在不同坐标系之间进行严密转换，目前应用最广、影响最大的版本是ITRF2008。在基线解算或网平差中经常需要不同坐标框架之间的转换，甚至不同历元下坐标的比对（转换），本文结合多年实际工作经验，从工程实践出发，详细介绍一种切实可行的坐标转换途径。

1　框架转换

相同历元下不同ITRF框架之间的转换具有严密的数学公式，遵循空间三维坐标系之间的七参数转换模型，即平移三参数（T_x、T_y、T_z）、旋转三参数（R_x、R_y、R_z）和缩放参数（D）（图1）。

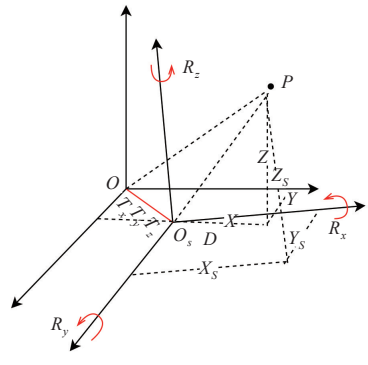


图1　三维空间直角坐标框架转换

收稿日期：2021-08-13；修回日期：2022-03-01。
项目来源：陕西省重点研发计划资助项目（2020GY-068）。
作者简介：丁俊豪（1991—），硕士研究生，工程师，主要研究方向为高速铁路精密测量及GPS框架研究，E-mail：980722564@qq.com。

在历元 t 时刻，三维空间直角坐标框架的转换公式为[5-6]：

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，X、Y、Z 为源ITRF框架下的坐标；X_S、Y_S、Z_S 为目标框架下坐标。

7个转换参数由ITRF官网（https://itrf.ign.fr/trans_para.php）提供。需要注意的是，官方提供的每个转换参数都具有参考历元和速率，因此在任意历元 t 时刻下，转换参数的获取公式为：

$$P(t) = P(\text{EPOCH}) + \dot{P} \times (t - \text{EPOCH}) \tag{2}$$

式中，EPOCH为框架转换参数参考历元，如ITRF2008的参考历元是2 000.00；P、$\dot{P}$ 分别为历元 t 的转换参数和参数速率。

通过将我国4个IGS核心站ITRF2014、2020历元下坐标转换到ITRF2008、2020历元下发现（表1），相同历元下不同框架坐标偏差很小（3 mm以内）。

表1 ITRF2008与ITRF2014框架转换

测站	坐标框架	X	Y	Z	X 偏差	Y 偏差	Z 偏差
WUHN	ITRF2014	−2 *** **9.918	5 *** **4.149	3 *** **0.553	−0.001	−0.002	−0.003
	框架转换	−2 *** **9.917	5 *** **4.153	3 *** **0.555			
URUM	ITRF2014	1** **0.148	4 *** **1.279	4 *** **1.550	−0.002	−0.003	−0.002
	框架转换	1** **0.150	4 *** **1.282	4 *** **1.553			
LHAZ	ITRF2014	−1** **2.140	5 *** **9.765	3 *** **5.216	−0.002	−0.002	−0.002
	框架转换	−1** **2.138	5 *** **9.768	3 *** **5.218			
SHAO	ITRF2014	−2 *** **3.970	4 *** **5.762	3 *** **9.249	−0.002	−0.002	−0.001
	框架转换	−2 *** **3.969	4 *** **5.765	3 *** **9.252			

2 历元转换

同一坐标框架下不同历元的坐标差异较大，是由地壳板块运动导致的。速度场是对某一特定区域板块运动的数学建模，是坐标参考框架维护、坐标转换甚至地壳动力学、地震学研究的重要基础数据，属于严格保密数据。地球表面的测定不是固定不动的，而是随着地球板块的构造运动缓慢移动，一般数量级为cm/a。高精度坐标框架由一系列固连在地表的点位坐标和速度实现并维护（最新的ITRF2014还加入了震后变形PSD）。坐标系统转换，除上述框架转换以外，还要考虑速度场的影响。

相同框架下（地心地固坐标系），记某点不同时刻 t_1 和 t_2 的坐标分别为 (X_{t1}, Y_{t1}, Z_{t1}) 和 (X_{t2}, Y_{t2}, Z_{t2})，该点的速度为 V_x、V_y、V_z，则相同框架下两个时刻的坐标转换公式为：

$$\begin{cases} X_{t2} = X_{t1} + (t_2 - t_1)V_x \\ Y_{t2} = Y_{t1} + (t_2 - t_1)V_y \\ Z_{t2} = Z_{t1} + (t_2 - t_1)V_z \end{cases} \tag{3}$$

由于站点速度值（或块体运动模型）V_x、V_y、V_z 很难测量，需连续观测数年，为获得站点速度，已有大量研究文献进行了深入研究，常用方法包括全域欧拉矢量法、局域欧拉矢量法、格网平均值法和块体欧拉矢量法等。其中，获得速度值精度最高和最低的分别是局域欧拉矢量法和全域欧拉矢量法。本文采用格网平均法，原因在于，其获得的速度精度仅次于局域欧拉矢量法，且获取速度非常快，操作简单。

值得注意的是，站点速度也是有参考框架的，不同框架之间可能存在缩放和旋转，混淆速度的框架问题，对坐标转换结果闭合差的影响最大可达厘米级。不同框架之间的速度转换公式为：

$$V_s = V + T' + (D' + R')X \tag{4}$$

式中，V_s 为目标框架下速度；V 为原框架下速度；T'、D'、R' 分别为平移、缩放和旋转参数的速度；ITRF不同参数的速度均能在官网查询。

参考文献[7]的附录中给出中国大陆3°×3°格网速度平均值，速度值框架为CGCS2000。参考文献[8]利用GAMIT/GLOBK软件进行数据处理，得到1998—2014年全国“陆态网络”站点在ITRF2008框架下的坐标，再利用时间序列分析方法得到基站速度，最后采用三次样条拟合方法对其中粗差进行探测和剔除；但其给出的数据是以欧亚板块为参考背景的，为得到站点的绝对速度，需将原始数据加上欧亚板块速度。本文采用欧亚板块的旋转矢量取ITRF2008板块运动模型[9]，计算生成的速度场数据为绝对速度，并已转换至ITRF2014参考框架。两个文献公布的数据相互验证，且互补缺失地区的数据。

由GMT绘制的中国大陆137个3°×3°的平面速度格网[7]可知，平面速度需将三维速度场XYZ转成ENU，再按照“经度，纬度，东向分量，北向分量，误差椭圆

长半轴，误差椭圆短半轴，椭圆的长轴相对于水平方向逆时针旋转的角度”制作速度场文件。将ITRF2014框架历元2020.00转换到历元2016.00，结果见表2，对比三分量坐标偏差发现，精度在1 cm以内。

表2　ITRF2014框架下2020.00历元转换至2016.00历元

测站	历元	*X*	*Y*	*Z*	*X* 偏差	*Y* 偏差	*Z* 偏差
WUHN	2016.00	−2 *** **9.773	5 *** **4.204	3 *** **0.586	0.002	−0.003	0.007
	历元转换	−2 *** **9.776	5 *** **4.206	3 *** **0.578			
URUM	2016.00	1** **0.288	4 *** **1.296	4 *** **1.539	0.004	−0.003	−0.011
	历元转换	1** **0.283	4 *** **1.299	4 *** **1.551			
LHAZ	2016.00	−1** **1.952	5 *** **9.800	3 *** **5.163	0.010	−0.007	0.001
	历元转换	−1** **1.961	5 *** **9.806	3 *** **5.162			
SHAO	2016.00	−2 *** **3.844	4 *** **5.827	3 *** **9.304	0.005	0.004	0.002
	历元转换	−2 *** **3.852	4 *** **5.824	3 *** **9.304			

3　任意坐标转换

不同坐标系统之间任意转换的操作流程为：先将A框架转换到ITRF97或ITRF2014下，再利用格网速度模型快速获得速度值进行历元转换，最后经过框架转换到B框架（图2）。

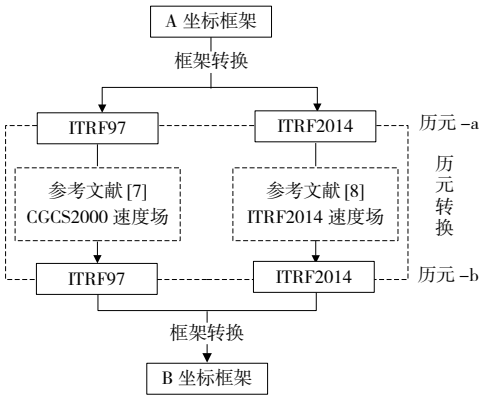


图2　任意坐标转换操作流程图

在实际工程项目中，通常需获取测区CGCS2000坐标[10–11]，在测区周边找不到已知国家控制点时，可采用GNSS静态观测2 h，联合IGS站数据解算获得测点ITRF2014框架、2021历元坐标，再将坐标转换到ITRF97框架、2000.00历元即获得CGCS2000坐标。为了测试本文方法的可靠性，收集国家B级控制点，按照该方法进行坐标计算并转换。结果表明（表3），本文方法精度较高，可达厘米级精度。

表3　ITRF2014坐标转换为CGCS2000坐标/m

坐标	控制点	本文方法	较差
X	−2 *** **6.045	−2 *** **6.056	0.010
Y	4 *** **5.510	4 *** **5.499	−0.011
Z	3 *** **0.124	3 *** **0.133	0.009

4　结　语

本文深入研究了ITRF坐标转换理论与方法，结合参考文献[7]、[8]给出的中国大陆地区速度场模型文件，提出了一种工程上方便可行的框架和历元转换方法。在实际工程项目中进行验证，能快速获得CGCS2000坐标。结果显示，坐标框架之间的差异很小，历元不同是坐标差异的主要原因。利用本文方法进行坐标转换，精度可达厘米级，能广泛应用于工程项目中。

参考文献

[1] 程鹏飞,成英燕,王晓明,等. 中国动态大地坐标框架最优实现的方法与应用[J]. Engineering,2020,6(8):879-917

[2] 王智,陈鹏,孙晓丽,等. ITRF2014至CGCS2000坐标转换方法研究及精度分析[J]. 城市勘测,2020(2):119-122

[3] 魏子卿,吴富梅,刘光明. 北斗坐标系[J]. 测绘学报,2019,48(7):805-809

[4] 成英燕,王虎,许长辉,等. 基于多技术全球参考框架的维持及应用分析[J]. 测绘科学,2019,44(6):37-46

[5] 程鹏飞,文汉江,刘焕玲,等. 卫星大地测量学的研究现状及发展趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(1):48-54

[6] 周海平. 陆态网络基准网数据处理策略分析[J]. 地理空间信息,2018,16(9):120-122

[7] 魏子卿,刘光明,吴富梅. 2000中国大地坐标系:中国大陆速度场[J]. 测绘学报,2011,40(4):403-410

[8] ZHAO B,HUANG Y,ZHANG C H, et al. Crustal Deformation on the Chinese Mainland During 1998-2004 Based on GPS Data[J]. Geodesy and Geodynamics,2015,6(1):7-15

[9] Altamimi Z, Métivier L, Collilieux X. ITRF2008 Plate Motion Model[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth,2012,117(B7):235-247

[10] 吴富梅,刘光明,魏子卿. 利用局域欧拉矢量法建立CGCS2000速度场模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2012,37(4):432-435

[11] 吕志平,魏子卿,李军,等. CGCS2000高精度坐标转换格网模型的建立[J]. 测绘学报,2013,42(6):791-797