引文格式:杨瀚融,厉芳婷,王恒毅,等.中国高精度速度场建立方法及其在框架转换中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(4):706-713.DOI:10.13203/j.whugis20220772

Citation:YANG Hanrong,LI Fangting,WANG Hengyi,et al.A Method of Building High Precision Velocity Model in China and Its Application to Frame Transformation[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(4):706-713.DOI:10.13203/j.whugis20220772

中国高精度速度场建立方法及其在框架转换中的应用

杨瀚融[1] 厉芳婷[2] 王恒毅[1] 魏以宽[2] 陈 华[1] 姜卫平[3]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 湖北省测绘工程院,湖北 武汉,430074

3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

摘 要:高精度全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)定位成果一般在国际地球参考框架(international terrestrial reference frame,ITRF)下表达,但是中国测绘成果要求采用2000国家大地坐标系(China geodetic coordinate system 2000,CGCS2000),高精度速度场模型是实现两者转换的关键。目前大多研究没有考虑不同函数拟合方法在不同速度方向上的表现,也没有深入研究同一方法不同的参数设置对速度场构建的影响。因此,根据中国大陆地壳运动监测网(crustal movement observation network of China,CMONOC)的260多个连续运行基准站和中国境内及周边地区的90个国际GNSS服务站数据,基于张力样条函数法和克里金法,分别采用不同的参数设置构建了覆盖全国的1 mm级高精度速度场模型,确立了在东、北、天3方向精度最高的3种方法,并用这3种方法构建组合速度场模型。将该模型应用于全国范围连续运行基准站的ITRF2014和CGCS2000坐标转换。研究结果表明,所建立的组合速度场整体转换精度为2.261 cm,单一方向分量的转换精度维持在1.3 cm左右,能实现中国境内大范围测绘成果厘米级精度的基准转换。

关键词:CMONOC;速度场;张力样条函数法;克里金法;框架转换

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-01-18

DOI:10.13203/j.whugis20220772 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0706-08

A Method of Building High Precision Velocity Model in China and Its Application to Frame Transformation

YANG Hanrong[1] *LI Fangting*[2] *WANG Hengyi*[1] *WEI Yikuan*[2]
CHEN Hua[1] *JIANG Weiping*[3]

1 School of Geodesy and Geomatics,Wuhan University,Wuhan 430079,China

2 Hubei Institute of Geodesy and Geomatics Engineering,Wuhan 430074,China

3 GNSS Research Center,Wuhan University,Wuhan 430079,China

Abstract: **Objectives**: High precision global navigation satellite system (GNSS) positioning results are generally expressed under the international terrestrial reference frame(ITRF), but China's surveying and mapping results require the use of the China geodetic coordinate system 2000 (CGCS2000). High precision velocity field model is the key to achieve the conversion between ITRF2014 and CGCS2000. At present, most studies use a single method to build the velocity field model, without in-depth study of the impact of different parameter settings on the construction of the velocity field, and without discussion of the performance of different methods in different speed directions. **Methods**: For this reason, based on the data of 260 continuously operating reference stations (CORS) of the crustal movement observation network of China (CMONOC) and 90 International GNSS Service stations within and around China, and based on the

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3005502);湖北省自然资源厅科技资助项目(ZRZY2022KJ29)。

第一作者:杨瀚融,硕士,主要研究方向为GNSS算法。2018302141239@whu.edu.cn

通信作者:陈华,博士,副教授。ttchen@whu.edu.cn

tension spline function method and the Kriging method. We use different parameter settings to build a 1 mm high-precision velocity field model covering the country, establish 3 methods with the highest accuracy in 3 directions of east, north, up, and use these 3 methods to build a combined velocity field field. The model is applied to the coordinate transformation of ITRF2014 and CGCS2000 of CORS nationwide. **Results:** The research results indicate that the overall conversion accuracy of the combined velocity field is about 2.261 cm, and the conversion accuracy of a single directional component is maintained at around 1.3 cm, which can achieve benchmark conversion of centimeter level accuracy for large-scale surveying and mapping results in China. **Conclusions:** Based on experiments, we conclude that constructing the optimal component velocity field and forming a combined velocity field through different methods can effectively improve the accuracy of the overall velocity field model and be further applied in practice.

Key words: CMONOC; velocity field; tension spline function method; Kriging method; frame transformation

坐标框架是描述地理空间信息的基础[1]。中国的法定坐标系是2008年启用的2000国家大地坐标系(China geodetic coordinate system 2000, CGCS2000),它是以2000.0历元的国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)ITRF97为参考构建的静态参考框架,可以看作是ITRF97在中国大陆的加密与扩展。国内测绘成果和历史成果均要求统一至该坐标系下[2]。但是,由于ITRF是国际公认的应用最为广泛、精度最高的地球参考框架[3],所以国际全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)服务(International GNSS Service, IGS)发布的精密轨道框架采用的是ITRF2014,且大多GNSS的高精度坐标成果均在ITRF2014框架下。因此,要将当前的多数GNSS坐标成果应用至中国测绘工作中,就需要完成ITRF框架与CGCS2000之间的转换,关键问题在于建立地壳运动速度场模型。

常见的速度场构建方法主要有欧拉矢量法和函数拟合法[4]。欧拉矢量法将ITRF框架与板块运动模型联系起来,依此构建的模型具有实际的地学意义,但缺点在于块体难以划分且会使计算复杂化,而不细分大陆块体会导致精度较低[5]。函数拟合法对地壳刚弹性没有要求,可以避免块体划分产生的不确定性,并且计算上较为简单[6],但其缺点在于外推精度较差,没有实际的地学意义。目前对其他速度场构建方法的研究也比较多,文献[7]提出了基于局部无缝Delaunay三角网反距离加权法拟合任意点速度的方法,克服了三角网法构建速度场在边缘地区三角网跨度过大和二级块体边缘处三角网不连续的缺点。文献[8]在研究大规模GNSS网数据的各方面精度后,采用克里金法构建了速度场模型,并通过国内IGS站点精确数据确认了该模型精度。文献[9]在将中国大陆块体划分为5块的基础上,采用最小二乘配置法、最小二乘配置拟合推估法和克里金法构建速度场,并对3种方法进行了比较。文献[10]采用反距离加权、最邻近、格网内插等多种插值方法,进一步提高了求解未知点速度的精度。目前,多数对速度场的研究着重评估不同方法构建的速度场精度,未将速度场模型应用至实际。而在应用速度场模型的研究中,一般仅采用一种精度较高的方法构建整体速度场用以研究,未考虑不同方法对不同分量下速度场构建的差异性,也未给出对应各分量的最优速度场模型,从而导致构建的速度场精度较低。此外,目前的研究基本上没有涉及函数拟合法参数设置的研究,但不同的参数设置产生的亚毫米级差异,经过20多年的积累也会达到数毫米。

针对这些问题,本文根据260多个中国大陆地壳运动监测网(crustal movement observation network of China, CMONOC)站点数据和90个国内外IGS站点数据,采用5种不同相关函数的克里金法和7个不同张量因子的张力样条函数法构建了多组速度场模型,并根据未参与模型构建的IGS站点速度数据评估了各组速度场在东(east, E)、北(north, N)、天(up, U)3个方向的精度,筛选出各方向精度最高的分量速度场,用以构建组合速度场模型。将该模型应用至中国7个省份的连续运行基准站(continuously operating reference stations, CORS)数据,实现大范围的ITRF2014与CGCS2000坐标转换。

1　数据来源

基准站的选取直接影响速度场构建的精

度[11],其数量不足、空间分布不均匀时会降低速度场模型的精度。2006年,中国实施了CMONOC工程,于2012年3月建成了由260多个CORS和2 000个不定期观测站点构成的、覆盖中国大陆的高精度、高时空分辨率的基准站观测网络,适用于速度场的构建[12]。本文选取该工程的260多个连续观测站数据构建速度场模型,并用中国及邻近区域共计80个IGS站点数据加以约束。用于速度场构建的CMONOC和IGS站点分布如图1所示,其中红点表示CMONOC站点分布,蓝点表示IGS站点分布。

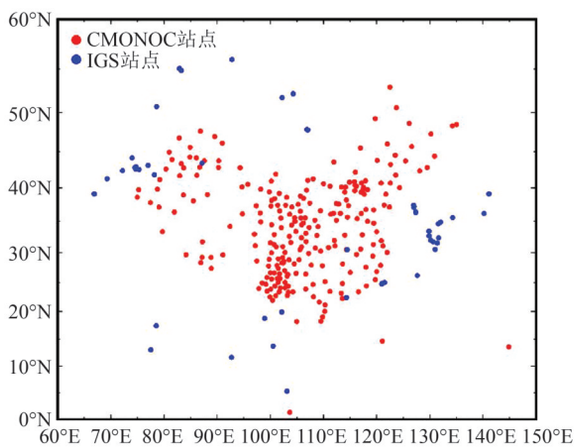


图1 用于构建速度场的CMONOC及IGS站点分布

Fig. 1 CMONOC and IGS Stations Distribution for Constructing Velocity Field

从整体来看,CMONOC站点均匀分布在中国各个地区。从区域来看,CMONOC站点在四川、云南等板块运动较为活跃的地段分布较集中。该分布规律有助于提高速度场精度,使得基于CMONOC数据构建的速度场模型更加适用于中国板块运动状况。用于建模的IGS站点除了满足均匀分布的要求外,也剔除了日本地区由于地震影响导致速度偏大的点。

各站点的速度是通过分离GNSS坐标时间序列中的非线性变化因素得到的,观测时间越长、解算精度越高的站点通过时间序列分析得到的速度信息精度越高[13]。因此,在速度场模型建立完成后,在ITRF网站的ITRF2014框架下GNSS台站位置/速度表中选取了8个未参与模型构建的IGS站点,即BJFS、CHAN、KUNM、LHAS、SHAO、BJNM、URUM、WUHN。从站点位置分布来看,这几个站点较为均匀地分布在全国各地,可以有效地对速度场整体进行评估,其分布如图2所示。从速度信息获取精度来看,这些IGS站点除去BJNM外均在IGS第3次后处理活动(repro 3)中处于第2优先级(BJNM为第4级),说明这些站点的坐标时间序列噪声少、可靠性高,获取的速度信息精度高,可作为标准对速度场整体进行精度检核[14]。

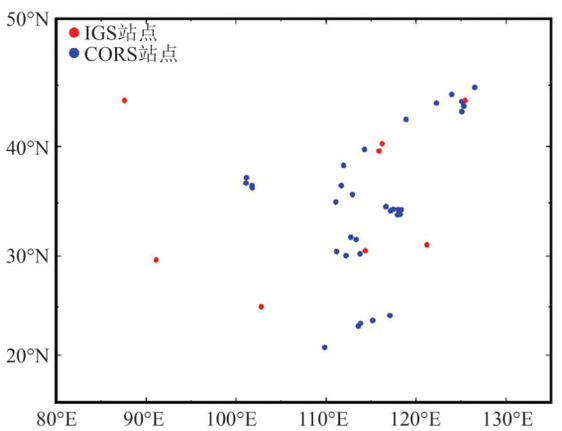


图2 用于检核的IGS与CORS站点分布

Fig. 2 Distribution of IGS and CORS Stations for Verification

根据检验结果筛选出各个分量速度场最优构建方法后,结合这8个站点与上一步构建速度场采用的数据共同构建最优组合速度场,并通过国内多省份CORS站的CGCS2000坐标及其在ITRF2014框架下的精密单点定位结果,验证该组合速度场应用于框架转换实例中的精度。用于检核的CORS站点较为分散,有助于验证速度场在全国范围内的框架转换精度。用于第一步速度场精度核验的IGS站点和第二步计算框架转换精度的CORS站点分布如图2所示,其中红点表示IGS站点分布,蓝点表示CORS站点分布。

2 速度场模型构建方法

用于速度场构建的函数拟合的方法有克里金法、多项式拟合法、双三次样条函数拟合法等[15]。不同的拟合方法适用于不同分布特征的样本数据,如反距离加权需要采样点分布均匀,样条函数适用于变化平缓的曲面构建,局部多项式插值适用于小范围分析,克里金法要求采样点数量较多等。根据不同插值方法的适用范围,本文选择采用克里金法和张力样条函数法构建速度场模型。由于各分量速度场存在差异,构建速度场模型时的最优函数模型也会有所不同。因此,本文对E、N、U 3个方向采用多种方法构建分量速度场,用以探究各方向的最优解。

2.1　克里金法

克里金法优先考虑空间位置对属性的影响,并利用选定范围内的数据计算出待求位置处最佳线性无偏估计,得到的格网精度高,被广泛使用。克里金法的估值公式为:

$$\hat{y}(x)=\boldsymbol{f}(x)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\beta}^{*}+\boldsymbol{r}(x)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma}^{*} \tag{1}$$

式中,$\hat{y}(x)$为某一点处的估值;$\boldsymbol{f}(x)$为回归模型的基函数向量;$\boldsymbol{r}(x)$是相关函数向量;$\boldsymbol{f}(x)$、$\boldsymbol{r}(x)$、$\boldsymbol{\beta}^{*}$、$\boldsymbol{\gamma}^{*}$的表达式为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{f}(x)=\left[f_1(x)\ f_2(x)\ \cdots\ f_m(x)\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{r}(x)=\left[R(\theta,s_1,x)\ R(\theta,s_2,x)\ \cdots\ R(\theta,s_n,x)\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\beta}^{*}=(F^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{-1}F)^{-1}F^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{-1}Y\\ \boldsymbol{\gamma}^{*}=\boldsymbol{R}^{-1}(Y-F\boldsymbol{\beta}^{*})\\ F=\left[\boldsymbol{f}(s_1)\,\boldsymbol{f}(s_2)\cdots\boldsymbol{f}(s_n)\right]^{\mathrm{T}}\\ R_{ij}=\mathcal{R}(\theta,s_i,s_j)\end{cases} \tag{2}$$

式中,$f_i(x)$是未知点x的第i个基函数;$R(\theta,s_i,x)$是相关函数,表示已知点s_i与未知点x的相关性;$\boldsymbol{R}$为已知点s_i之间的相关矩阵,由向量$\boldsymbol{r}(s_i)$组成;F为已知点的基函数矩阵,由向量$\boldsymbol{f}(s_i)$组成;Y为数据点的目标值。

结合式(1)和式(2),只要给定了回归模型基函数和相关函数,就可以通过克里金法计算出一定范围内任一点的估值。其中,回归模型基函数可以采用0阶、1阶、2阶多项式,相关函数可以采用指数函数、高斯函数、线性函数、球面函数等。选取不同的基函数核相关函数会对目标估值产生一定的影响。因此,在数据精度较为接近的情况下,确定合适的回归模型和相关函数是使用克里金法构建速度场的关键。

2.2　张力样条函数法

薄板样条函数法是构建一个通过所有已知点且曲率最小的光滑曲面,并估计该曲面内任一点的取值。张力样条函数法在薄板样条函数法的基础上引入一个二阶的表面抗扰项,即便数据的变化程度较大,通过调高该项可以使拟合结果更贴近实际值。张力样条函数的公式为:

$$(1-t)\nabla^{2}(z)+t\nabla(z)=0 \tag{3}$$

式中,t为张量因子;∇为拉普拉斯算子。张量t越小,构建出的速度场模型曲面越光滑,当$t=0$时,张力样条函数等同于薄板样条函数。张量t取不同值时,构建的速度场模型精度在3个方向上都会产生一定的变化。

3　最佳组合速度场模型的建立

3.1　不同速度场精度分析

通过8个未参与速度场构建的IGS站数据对构建的速度场模型进行精度评估。对于本文使用的克里金法,将线性函数、高斯函数、球面函数、样条函数、指数函数5种函数作为相关函数,取不同相关函数的同时分别使用0阶、1阶、2阶3种回归模型。对于本文采用的张力样条函数插值法,分别设置张量t为0、0.10、0.25、0.35、0.45、0.60、0.99。两种方法共计构建22组速度场模型,以8个IGS站点速度为真值,代入各站点坐标计算其在速度场内的速度,用以探究在不同参数设置下的模型精度。对误差进行统计分析,结果如表1和表2所示。

表1　基于不同相关函数克里金法构建速度场的各方向误差统计表/(mm·a^{-1})

Table 1　Statistics of Errors in Each Direction of Velocity Field Based on Different Correlation Functions Kriging Method/(mm·a^{-1})

克里金法	回归	平均绝对误差			均方根		
相关函数	模型	E	N	U	E	N	U
样条函数	0	1.526	1.365	1.000	2.234	1.718	1.248
	1	1.485	1.641	0.904	2.181	2.019	1.141
	2	1.518	1.539	0.877	2.217	1.903	1.115
球面函数	0	1.762	1.303	2.244	2.535	1.598	4.220
	1	1.760	1.218	2.181	2.534	1.540	4.184
	2	1.550	1.217	2.166	2.324	1.539	4.173
高斯函数	0	1.786	1.500	1.713	2.633	1.890	2.213
	1	1.803	1.622	1.783	2.642	2.168	2.285
	2	1.800	1.642	1.788	2.658	2.202	2.287
线性函数	0	1.582	1.278	2.098	2.265	1.559	3.756
	1	1.583	1.123	2.011	2.266	1.419	3.687
	2	1.593	1.121	1.992	2.270	1.416	3.665
指数函数	0	1.648	1.304	1.957	2.459	1.610	3.878
	1	1.648	1.304	1.957	2.459	1.610	3.878
	2	1.655	1.263	1.898	2.465	1.582	3.833

由表1和表2可以发现,克里金法构建的速度场在3个方向的精度均较高,水平精度基本维持在1.5 mm/a左右,高程精度在0.8~2.0 mm/a范围内浮动;而张力样条函数法的水平方向精度优于克里金法,基本在1.3 mm/a左右,高程方向精度明显低于克里金法,达到3 mm/a以上,说明中国高程方向变化程度较大,张力样条函数法无法较好地构建高程方向分量速度场。

表2 不同张量因子的张力样条函数法构建速度场的各方向误差统计表/(mm·a^{-1})

Table 2 Statistics of Errors in Various Directions of Velocity Field Construction Using Tension Spline Function Method with Different Tensor Factors/(mm·a^{-1})

张量t	平均绝对误差			均方根		
	E	N	U	E	N	U
0.00	1.311	1.340	3.964	2.240	1.730	7.392
0.10	1.289	1.331	3.770	2.231	1.718	6.947
0.25	1.268	1.316	3.489	2.222	1.700	6.310
0.35	1.287	1.307	3.305	2.217	1.688	5.897
0.45	1.306	1.299	3.121	2.214	1.677	5.489
0.60	1.339	1.288	2.841	2.213	1.664	4.877
0.99	1.482	1.298	2.018	2.280	1.692	3.146

根据表1中的平均绝对误差,可以采用张量因子为0.25的张力样条函数构建E方向速度场,采用2阶回归模型和线性函数的克里金法构建N方向速度场,采用2阶回归模型和样条函数的克里金法构建U方向的速度场。用这3种方法构建的组合速度场模型在E、N、U3个方向的误差绝对平均值分别为1.268 mm/a、1.121 mm/a、0.877 mm/a,各方向精度较高,整体精度约在1 mm/a,满足测绘领域相关要求。

3.2 组合速度场模型构建

为了提高速度场精度,将之前用于检核速度场精度的IGS站点纳入构建速度场的步骤中。采用已确定的最优方法构建3个0.5°×0.5°的分量速度场,并组合出最优速度场模型。图3是为了便于展示而经过系统抽样的中国大陆地区2°×2°的速度场模型。

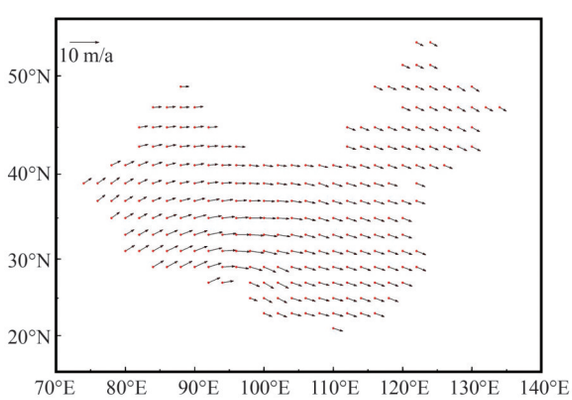


图3 中国大陆地区水平速度场示意图

Fig. 3 Diagram of Chinese Mainland Horizontal Velocity Field

根据图3可以看出地面点位移的速度呈现区域性分布,水平速度沿纬线方向存在较为明显的差异。从整体来看,水平方向上中国大陆地区地壳均有向东运动的趋势,并且中国地壳运动在水平方向的速度大小约为3 cm/a。从区域来看,中国西部主要往东北运动,东部主要往东南运动。相邻格网点间水平运动速度大小和方向变化较平缓,南方地壳水平运动的速度普遍大于北方的速度。

4 组合速度场模型的应用及其精度评估

4.1 速度场模型的应用

中国各省都建立了基准站网,这些基准站具有CGCS2000坐标,同时也可以通过精密单点定位获得其ITRF2014坐标。利用这些数据,采用框架转换算法就可通过转换得到的坐标与原有CGCS2000坐标比较,评估速度场模型精度。当前基于速度场的框架转换方法可分为先框架后历元或先历元后框架两种,研究表明这两种方法精度处于同一量级[16]。本文采用的是先历元后框架的转换方法。

历元转换是先根据速度场模型内插出待求点的速度V_X、V_Y、V_Z,再通过该速度归算不同历元下的坐标(X,Y,Z),计算公式为:

$$\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}_{2000.0}=\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}_T-(T-2000)\begin{bmatrix}V_X\\V_Y\\V_Z\end{bmatrix} \tag{4}$$

根据式(4)可以通过速度将任意历元T时刻的坐标转换到2000.0历元上。框架转换遵循7参数转换模型,可以从ITRF网站上获取IERS在技术说明和年度报告中发布的由ITRF2014至ITRF97的7个转换参数,如表3所示。表3中,T_x、T_y、T_z是3个平移参数,R_x、R_y、R_z是3个旋转参数,D是比例参数,对其他历元的转换参数需要结合参数年变化率进行解算。

在进行框架转换的过程中,需根据表3的转换参数及参数的年变化率求出当前历元下的实际转换参数。可使用7参数转换模型对框架进行转换:

$$\begin{bmatrix}X_S\\Y_S\\Z_S\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}T_x\\T_y\\T_z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}D&-R_z&R_y\\R_z&D&-R_x\\-R_y&R_x&D\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中,(X_S,Y_S,Z_S)是框架转换后的坐标;(X,Y,Z)是框架转换前的坐标。

根据上述方法,先根据点位速度将t历元的数据归算至2000.0历元,再通过2000.0历元的转

表 3　ITRF2014 至 ITRF97 转换参数及年变化率表

Table 3　Conversion Parameters and Annual Change Rates from ITRF2014 to ITRF97

参数	T_x	T_y	T_z	D	R_x	R_y	R_z	参考历元
转换参数	7.4 mm	−0.5 mm	−62.8 mm	3.80×10^{-9}	0.00×0.001″	0.00×0.001″	0.26×0.001″	2010.0
年变化率	0.1 mm/a	−0.5 mm/a	−3.3 mm/a	0.12×10^{-9}/a	0.00×0.001″/a	0.00×0.001″/a	0.02×0.001″/a	

换参数进行框架转换即可获取点位在CGCS2000的坐标。

4.2　精度分析

以对应点位已知的CGCS2000坐标为真值,将其与转换获得的2000坐标系坐标作差,生成如图4所示的曲线图,并对作差结果进行统计分析,结果如表4所示。根据图4可以发现,点位差值在各方向上呈现出一定的线段状分布规律,因此将差值按省份进行统计分析,结果如表5所示。

表 4　转换误差统计表/cm

Table 4　Transformation Error Statistics/cm

误差	E	N	U
误差绝对值的最大值	2.200	3.710	4.430
误差绝对值的最小值	0.090	0.010	0.100
平均绝对误差	0.891	1.074	1.411
标准差	0.916	1.285	1.796
均方根	1.067	1.356	1.795
单一方向分量平均中误差		1.305	
平均点位中误差		2.261	

表 5　各省份误差统计表/cm

Table 5　Errors Statistics of Each Province/cm

误差	方向	江苏	青海	湖北	山西	吉林	广东
平均绝对误差	E	0.773	0.570	1.768	0.752	0.330	1.128
	N	0.671	1.425	1.636	0.972	0.422	1.450
	U	0.875	0.490	1.332	1.154	2.486	2.203
标准差	E	0.500	0.559	0.312	0.835	0.251	0.479
	N	0.737	1.616	1.374	0.595	0.116	0.381
	U	0.878	0.640	1.516	0.942	0.909	1.746

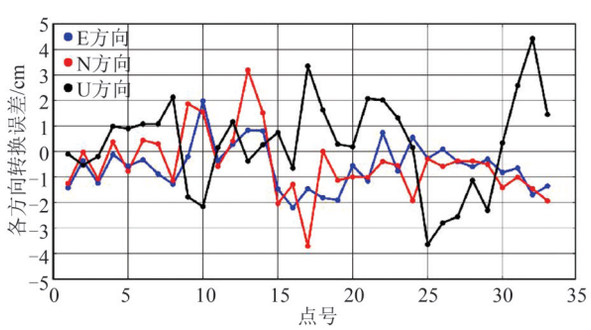


图 4　坐标转换误差曲线图

Fig. 4　Coordinate Conversion Error Curve

统计表4中的单一方向分量平均中误差,计算公式为:

$$m=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\left(\Delta X_i^2+\Delta Y_i^2+\Delta Z_i^2\right)/3}}{n} \tag{6}$$

平均点位中误差的计算公式为:

$$m=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\Delta X_i^2+\Delta Y_i^2+\Delta Z_i^2}}{n} \tag{7}$$

式中,ΔX_i、ΔY_i、ΔZ_i分别表示第i个点X、Y、Z 3个方向的转换误差。

结合图4和表4的平均绝对误差可以看出,组合速度场在框架转换中的应用效果较好,其中E方向转换精度最高,在0.9 cm左右;N方向转换精度次之,在1.1 cm左右;U方向转换精度最差,在1.4 cm左右。通过表5的分省份数据进一步分析可以发现,E方向误差在每个省份均呈现出较强的系统性,其分省份的误差标准差均低于整体标准差;N、U方向误差在多数省份呈现出较强的系统性,推测出现该情况的原因可能和各省基准由不同机构采用不同策略进行维持有关[17]。

综上所述,可以得出以下结论:(1)根据上一实验采用不同方法构建的组合速度场可以应用于框架转换,且平均精度约为2.261 cm。(2)E方向转换精度最高,其误差可控制在毫米级,N方向精度次之,U方向精度最差,单一方向分量的平均精度为1.305 cm。(3)3方向误差分布均存在一定的系统性。

5　结　语

本文评估了由克里金法和张力样条函数插值法构建的速度场精度,研究发现不同参数设置对速度场产生的影响可达亚毫米级甚至毫米级。根据实验结果发现,对于克里金法采用样条函数和线性函数作为相关函数更适用于中国速度场的构建,对于张力样条函数法将张量因子设置为0.25~0.45间更适合构建中国水平速度场。

本文提出了针对各分量的最优速度构建方法,即E方向采用0.25张量的张力样条函数,N方向采用2阶回归模型的线性函数克里金法,U方

向采用2阶回归模型的样条函数克里金法;并由此提出了组合速度场的方法,即通过不同的方法构建分量速度场,从而获取精度更高的组合速度场模型。本文根据各分量精度最高的方法构建的速度场精度约为1 mm/a,其精度有着明显的提升。

此外,检验发现采用该组合速度场进行ITRF2014与CGCS2000的坐标转换精度为2.261 cm,各方向分量的转换精度维持在1.3 cm左右,说明组合速度场的方法完全可以应用于当前的速度场研究和框架转换应用。对转换结果分省份统计后发现,误差在各个省份均存在一定的系统性分布,若对呈现系统性的误差进行研究可以进一步提高转换精度,这有待后续研究。

参 考 文 献

[1] 陈俊勇. IERS地球参考系统、大地测量常数及其实现[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3): 1-6.
CHEN Junyong. Terrestrial Reference System, Geodetic Constants and Their Realization[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2005, 25(3): 1-6.

[2] 蒋志浩, 刘经南, 王凡, 等. 全球CGCS2000坐标框架的构建理论研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(2): 167-174.
JIANG Zhihao, LIU Jingnan, WANG Fan, et al. Research on Construction Theory of Global CGCS2000 Coordinate Frame[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 167-174.

[3] 姜卫平,李昭,刘万科,等. 顾及非线性变化的地球参考框架建立与维持的思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2010,35(6):101-105.
JIANG Weiping, LI Zhao, LIU Wanke, et al. Some Thoughts on Establishment and Maintenance of Terrestrial Reference Frame Considering Non-linear Variation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010,35(6):101-105.

[4] 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.
WEI Ziqong, LIU Guangming, WU Fumei. China Geodetic Coordinate System 2000: Velocity Field in Mainland China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2011,40(4):403-410.

[5] 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.
WU Fumei, LIU Guangming, WEI Ziqing. Velocity Field Model of CGCS2000 Based on Euler Vector of Local Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4): 432-435.

[6] 曾安敏, 秦显平, 刘光明, 等. 中国大陆水平运动速度场的多面函数模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(4): 394-398.
ZENG Anmin, QIN Xianping, LIU Guangming, et al. Hardy Multi-Quadric Fitting Model of Chinese Mainland Horizontal Crustal Movement[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4): 394-398.

[7] 任营营, 王解先, 王虎, 等. 基于局部无缝Delaunay三角网反距离加权法构建中国大陆速度场[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 1071-1080.
REN Yingying, WANG Jiexian, WANG Hu, et al. Construction of Velocity Field in Chinese Mainland Based on Local Seamless Delaunay Triangulation with Inverse Distance Weighting Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 1071-1080.

[8] 王虎, 任营营, 连丽珍, 等. 大规模GNSS网数据处理一体化方案与中国大陆水平格网速度场模型构建研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(9): 881-887.
WANG Hu, REN Yingying, LIAN Lizhen, et al. Research on an Integrational Scheme of Large-Scale GNSS Network Data Processing and Establishment of the Horizontal Grid Velocity Field Model in Chinese Mainland[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(9): 881-887.

[9] 谢方. 基于2000国家大地坐标系的中国大陆速度场模型建立方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
XIE Fang. Research on the Modeling Approach of Velocity Field in China Continent Based on China Geodetic Coordinate System 2000[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.

[10] 王建红,李涌涛,马洪磊. 中国大陆速度场在CGCS2000坐标转换中的应用研究[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(4):398-402.
WANG Jianhong, LI Yongtao, MA Honglei. Research on the Application of Velocity Field in Chinese Mainland in CGCS2000 Coordinate Conversion[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*,2022,42(4):398-402.

[11] 于亮, 朱璇, 陈永祥, 等. 基于CMONOC建立和评估中国大陆地壳运动速度场模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(7): 704-708.
YU Liang, ZHU Xuan, CHEN Yongxiang, et al. The Building and Estimating of Velocity Field in the

Chinse Mainland Based on CMONOC[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(7): 704-708.

[12] 施闯, 魏娜, 李敏, 等. 利用北斗系统建立和维持国家大地坐标参考框架的方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1635-1643.
SHI Chuang, WEI Na, LI Min, et al. Approaches to Realize and Maintain National Terrestrial Reference Frame Based on BDS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1635-1643.

[13] 姜卫平, 王锴华, 李昭, 等. GNSS坐标时间序列分析理论与方法及展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2112-2123.
JIANG Weiping, WANG Kaihua, LI Zhao, et al. Prospect and Theory of GNSS Coordinate Time Series Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2112-2123.

[14] WANG H, REN Y Y, WANG A H, et al. Two-Decade GNSS Observation Processing and Analysis with the New IGS Repro3 Criteria: Implications for the Refinement of Velocity Field and Deformation Field in Continental China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3719.

[15] 任雅齐. 基于GPS数据的中国地壳运动速度场模型的建立[D]. 郑州:信息工程大学,2012.
REN Yaqi. Establishment of Chinese Rustal Movement Velocity Model Based on the GPS Data[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2012.

[16] 张杰, 范玉磊, 董海政, 等. ITRF框架与CGCS2000坐标转换的研究[J]. 全球定位系统, 2017, 42(6): 79-83.
ZHANG Jie, FAN Yulei, DONG Haizheng, et al. Research on Coordinate Transformation Between ITRF Frame and CGCS2000[J]. *GNSS World of China*, 2017, 42(6): 79-83.

[17] 姜卫平, 袁鹏, 田挚, 等. 区域CORS组网中的坐标基准统一方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 566-570.
JIANG Weiping, YUAN Peng, TIAN Zhi, et al. Coordinate Datum Unification for Regional CORS Network Combination[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5): 566-570.