

文章编号:1671-5942(2013)06-0121-05

基于假设检验的刚性板块台站选取及全球板块运动模型的建立^{* 1}

徐克科^{1,2)} 伍吉仓¹⁾ 吕志鹏¹⁾

(1)同济大学测绘与地理信息学院,上海 200092
(2)河南理工大学测绘与国土信息工程学院,焦作 454000)

摘 要 提出采用正态 μ 假设检验方法,自动探测并剔除板块内异常台站,经统计假设检验和迭代平差,逐步逼近刚性板块稳定台站。运用该方法成功确定了全球九大主要板块稳定台站,建立了高精度 ITRF2005VEL 全球板块背景场及运动模型。结果表明,所建模型与其他模型相比,整体一致,精度明显提高。

关键词 刚性板块;欧拉参数;台站;ITRF2005VEL;板块运动模型

中图分类号:P227

文献标识码:

CHOICE OF OBSERVATION STATIONS FOR RIGID PLATE AND ESTABLISHMENT OF GLOBAL PLATE MOTION MODEL BASED ON HYPOTHESIS TESTING

Xu Keke^{1,2)}, Wu Jicang¹⁾ and Lü Zhipeng¹⁾

(1)College of Surveying and Geo-Information, Tongji University, Shanghai 200092
(2)School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000)

Abstract A new method of normal μ hypothesis testing was proposed, which can detect and remove the abnormal stations automatically. Through statistical testing and iterative adjustment, the stable stations for the rigid plate were confirmed. The rigid stations in global 9 plates were qualified successfully using the method and the global plate motion model based on ITRF2005VEL was constructed. The result shows that the construction model agrees well with other models as a whole and the precision is higher.

Key words: rigid plate; Euler parameter; observation station; ITRF2005VEL; plate motion model

1 引言

地球参考框架由空间大地测量众多台站三维坐标和速度场来维持和实现。由于不可避免地存在观测误差和观测点可能受到的局部干扰或局部变形,位于同一个块体上的观测点有时会表现出不协调的

位移。因此,台站的选取直接影响建立地球参考架和全球板块运动学模型的精度和可靠性^[1,2]。对此,很多学者进行了相关研究,但多数是采用经验方法和先验知识,剔除板块边界地壳变形带和板内地壳形变较大区域的测站。比如,在求解板块运动参数的数据处理中剔除速度残差大于3 mm/年的测站,这种选择

* 收稿日期:2013-05-12

基金项目:中美国际合作项目(2010DFB20190);国家自然科学基金(41074019);河南省教育厅自然科学基金(12A420001);河南理工大学青年基金(Q2012-32A)

作者简介:徐克科,博士,主要研究方向为GPS地壳形变监测. Email:12xkk@tongji.edu.cn

具有很大不确定性和随意性;文献[3-5]利用7参数建立误差模型,通过各台站运动速度残差循环筛选,确定了全球板块稳定台站,但需要模型先验信息;黄立人^[6]提出用QUAD法判别相对稳定点组,得到了华北地区3块体的欧拉参数,旋转角速度、欧拉极经度和极纬度最高精度分别达到 $0.017^\circ/\text{Ma}$ 、 0.9° 和 3.0° ,筛选期间因子取值很难确定。近年来,随着观测台站数量的急剧增加,观测资料的日益丰富,迫切需要一种精确可靠,能够自动探测异常台站的方法。基于此,本文将统计假设检验方法引入到刚性板块台站的选取中,根据选取的台站建立了全球板块运动模型及背景场。分析表明,所建模型与其他模型相比,整体一致,精度明显提高。

2 板块运动误差模型的建立

台站的速度可表示为

$$V = V_h + V_v + V_q \quad (1)$$

式中, V_h 为测站水平速度, V_v 为冰期后地壳回弹等引起的垂向速度, V_q 为局部地壳形变引起的速度。

由于板块运动主要沿水平方向,而ITRF速度场是基于地心空间直角坐标系^[4,5]。所以,通过

$$\begin{bmatrix} V_n \\ V_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\lambda \sin\phi & -\sin\lambda \sin\phi & \cos\phi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

将地心直角坐标系下的速度矢量 V_x 、 V_y 、 V_z 转换为站心地平坐标系下的水平速度分量 V_n 、 V_e 。其中, V_n 、 V_e 为水平面北向和东向速度, λ 、 ϕ 为测站经度和纬度。

根据板块运动的欧拉理论,式(2)改写为

$$\begin{bmatrix} V_n \\ V_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r\sin\lambda & -r\cos\lambda & 0 \\ -r\sin\phi\cos\lambda & -r\sin\lambda\sin\phi & r\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

令

$$L = \begin{bmatrix} V_n \\ V_e \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} r\sin\lambda & -r\cos\lambda & 0 \\ -r\sin\phi\cos\lambda & -r\sin\lambda\sin\phi & r\cos\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$X = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix}$$

则构建板块运动模型误差方程为

$$V = A\hat{X} - L \quad (5)$$

3 统计假设检验选取台站

为尽量避免过多的异常台站带来不必要的干扰,首先对板块内台站进行初选。初选的标准是:台站速度各分量的方差小于 3 mm/a ;台站不能位于板

块边界区或板块内明显的构造形变区;台站在板块内均匀分布。在初选基础上,进行统计假设检验。

由板块运动模型误差方程式(5)可得

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (6)$$

式中,权 P 由台站速度中误差确定。将式(6)代入式(5)得

$$V = (A(A^T P A)^{-1} A^T P - I) L \quad (7)$$

当台站属于刚性板块稳定台站时, V 为正态随机向量,其期望为0,方差为 $\sigma_0^2 Q_{vv}$, $V_i \sim N(0, \sigma_0^2 Q_{vv})$ 。当台站有冰期后地壳回弹或局部地壳形变等引起的速度,设其为 ε ,则

$$\bar{V} = (A(A^T P A)^{-1} A^T P - I)(L + \varepsilon) \quad (8)$$

此时, \bar{V} 不符合正态分布。构造标准正态分布统计量 w_k ,作正态 u 检验

$$w_k = \frac{|v_k|}{\sigma_{vk}} = \frac{|v_k|}{\sigma_0 \sqrt{Q_{v_k v_k}}} \quad (9)$$

选择适当的显著水平 $\alpha = 0.05$,计算 w_k 并比较 w_k 与 $\mu_{\alpha/2}$,若 $w_k > \mu_{\alpha/2}$,则认为第 k 台站不稳定,将其剔除。然后重新平差,再次检验,循环迭代,直到所有 $w_k < \mu_{\alpha/2}$,最终确定刚性板块稳定台站。

利用选定的台站,由式(5)、(6)根据最小二乘求得欧拉矢量 Ω_x 、 Ω_y 、 Ω_z ,利用

$$\omega = \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2 + \Omega_z^2}$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{\Omega_z}{\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}} \quad (10)$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{\Omega_y}{\Omega_z}$$

将 Ω_x 、 Ω_y 、 Ω_z 转换为欧拉极参数 ω 、 ϕ 、 μ ^[4]。再根据中误差传播定律,计算出 ω 、 ϕ 、 μ 的中误差。

4 算例及分析

4.1 欧亚板块

采用ITRF2005框架的位置矢量和速度场数据,对欧亚板块的197个台站进行初选,经9次检验,剔除不通过的台站,最终确定69个站作为欧亚板块的刚性台站。台站剔除前后的残差分布见图1。

由图1,异常台站剔除前N分量残差最大达到60 mm,E分量残差最大达到25 mm。剔除后N分量残差分布在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 之内,E分量残差分布在 $\pm 0.6 \text{ mm}$ 之内。可见,通过假设检验确定的台站内符合较好。检验过程中残差变化情况见图2。

由图2可以看出,随着检验次数的增加与剔除异常台站数量增多,单位权中误差很快收敛,最终N、E分量分别稳定在0.24 mm和0.42 mm(表1)。最终确定的欧亚板块稳定台站分布见图3。

由表1可见,随着9次循环检验,欧拉参数解算

结果逐步逼近一稳定值。中误差越来越小,最终旋转角速度、欧拉极经度和极纬度中误差稳定在 $0.0009^{\circ}/\text{Ma}$ 、 0.35° 和 0.16° 。

由图 3 可知,选定的台站主要集中在西欧。可见,欧亚板块存在局部形变。

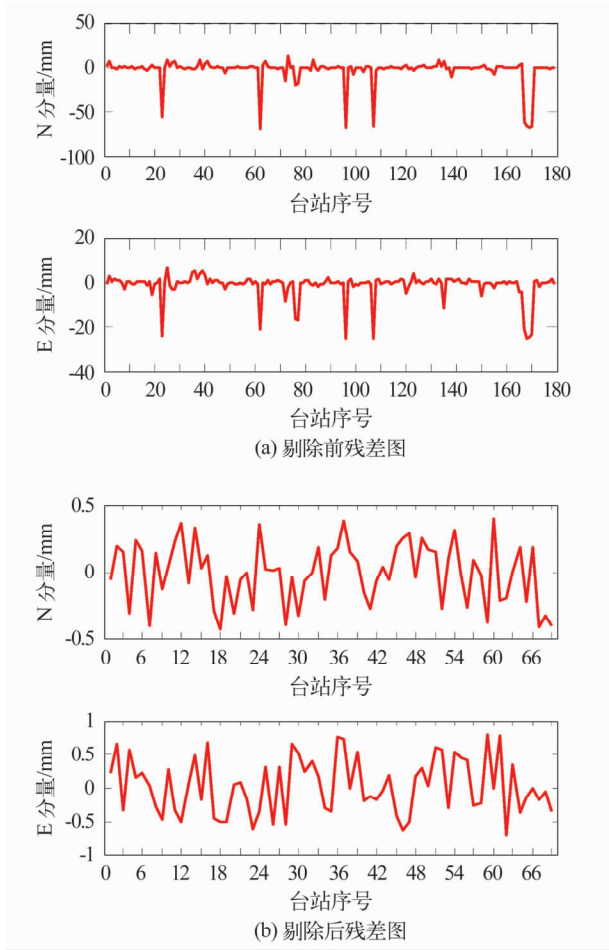


图 1 台站剔除前后的残差分布
Fig. 1 Residuals distribution before and after choosing stations

4.2 全球板块运动模型的建立

采用 ITRF2005 框架的位置矢量和速度场数据,根据全球九大主要板块的划分,通过假设检验的方法选取九大板块的刚性台站,利用选取的台站建立 ITRF2005VEL 全球板块运动模型,并与其他学者建立的模型^[4,5,9]进行对比(表 2)。

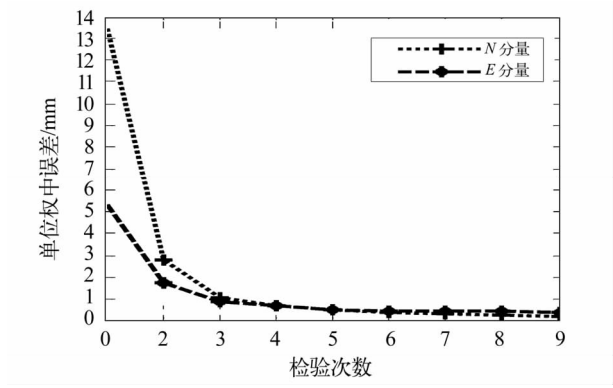


图 2 检验过程中残差的变化
Fig. 2 Changes of residual in the statistical testing

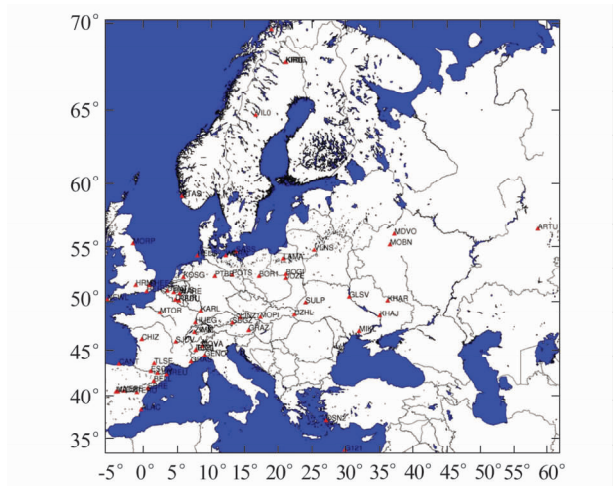


图 3 欧亚板块选定台站的分布
Fig. 3 Chosen stations distribution of Eurasian plate

表 1 检验过程中欧拉参数及精度的变化

Tab. 1 Changes of Euler parameters and precision in the statistical testing

检验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\omega(^{\circ}/\text{Ma})$	0.306 1	0.263 2	0.264 1	0.257 2	0.256 1	0.256 6	0.256 1	0.256 3	0.256 5
$\omega^{\circ}-\text{RMSE}$	0.011 2	0.002 8	0.001 4	0.001 1	0.001 0	0.001 0	0.001 0	0.001 0	0.000 9
$\phi(^{\circ})$	-71.945	-96.832	-95.565	-97.646	-97.952	-98.511	-98.602	-98.395	-98.227
$\phi\text{-RMSE}$	4.184	0.922	0.486	0.397	0.375	0.350	0.353	0.358	0.349
$\mu(^{\circ})$	65.627	55.913	56.328	55.328	55.185	55.170	55.155	55.200	55.238
$\mu\text{-RMSE}^{\circ}$	1.636	0.502	0.251	0.200	0.183	0.165	0.164	0.1635	0.158
站数	179	164	143	126	105	90	82	75	69

注: ω 、 φ 、 μ 为欧拉旋转速率、旋转极经度和旋转极纬度

表 2 全球板块运动模型欧拉矢量比较

Tab.2 Comparison of Euler parameters of global plate motion models

板块	模型	$\omega(^{\circ}/\text{Ma})$	$\omega\text{-RMSE}$	$\varphi(^{\circ})$	$\varphi\text{-RMSE}$	$\mu(^{\circ})$	$\mu\text{-RMSE}$	测站数
AFRIC	1	0.275	0.003	-84.8	1.44	51.3	0.54	12
	2	0.274	0.002	-86.1	1.00	53.0	0.42	13
	3	0.272	0.002	-86.4	1.10	50.3	0.51	2
	4	0.272	—	-83.2	—	50.0	—	52
	5	0.267	0.001	-80.8	0.51	49.6	0.21	16
EURA	1	0.262	0.003	-98.3	1.00	59.6	0.34	74
	2	0.263	0.002	-97.6	0.68	59.3	0.28	87
	3	0.258	0.001	-99.7	0.31	57.5	0.18	23
	4	0.257	—	-98.9	—	53.9	—	227
	5	0.257	0.0009	-98.2	0.33	55.2	0.16	69
ARAB	1	0.580	—	-2.4	—	45.8	—	—
	2	0.670	0.068	16.3	11.00	47.0	6.00	2
	3	0.611	0.051	7.44	7.00	46.5	4.40	2
	4	0.480	—	-15.3	—	51.2	—	4
	5	0.535	0.035	2.89	4.81	50.72	3.82	13
CARIB	1	0.216	—	-94.3	—	30.3	—	—
	2	0.310	0.140	-85.1	17.5	34.0	19.4	4
	3	0.226	0.120	-92.8	9.40	27.8	8.60	5
	4	0.145	—	-154.0	—	38.6	—	5
	5	0.251	0.014	-105.4	2.13	31.5	2.23	15
INDIA	1	0.558	—	3.85	—	47.2	—	—
	2	0.550	—	2.93	—	47.1	—	—
	3	0.557	—	3.9	—	53.6	—	—
	4	0.997	—	-68.7	—	23.2	—	3
	5	0.536	0.005	7.094	3.25	51.8	0.60	7
PCFC	1	0.700	0.003	91.8	0.62	-62.4	0.26	27
	2	0.670	0.002	94.5	0.59	-64.0	0.22	25
	3	0.635	0.002	120.3	0.48	-63.3	0.20	9
	4	0.682	—	108.4	—	-62.7	—	28
	5	0.680	0.001	110.8	0.41	-62.3	0.11	19
SOAM	1	0.105	0.017	-133.6	9.40	-10.2	5.30	5
	2	0.096	0.007	-139.4	4.80	-21.7	2.50	6
	3	0.109	0.006	-133.2	2.60	-19.3	1.60	6
	4	0.131	—	-136.9	—	-2.9	—	17
	5	0.126	0.004	-135.7	2.13	-19.2	0.99	6
NOAM	1	0.200	0.002	-84.4	0.35	-4.4	0.57	44
	2	0.186	0.002	-81.9	0.26	-9.1	0.46	62
	3	0.197	0.001	-83.5	0.17	-7.3	0.25	31
	4	0.159	—	-85.7	—	-22.0	—	130
	5	0.191	0.001	-88.5	0.12	-5.1	0.24	31

注:1-ITRF96VEL; 2-ITRF97VEL; 3-ITRF2000^[4];4-ITRF2005VEL^[5];5-ITRF2005VEL(本文)

从表 2 可以看出,本文所建模型与其他模型结果相比,精度较高。分析认为:刚性板块台站的精确选取是决定模型建立精度高的关键因素。从整体上看各模型具有很强的一致性,但各模型之间也有差异。各模型欧拉极和纬度结果较一致,而经度差异

相对明显,而且欧拉旋转极经度的解算精度普遍较旋转极纬度解算精度差。从 JPL 公布的 GPS 台站速度场可知,各台站位置矢量和速度矢量解算方差,东西向较南北向大,可能是由此所致。一些测站数目较多、观测时间较长、分布较好的板块,如 EURA、

NOAM、AFRC、PCFC 板块,各模型一致性较明显,且欧拉参数解算精度较高:欧拉极旋转速率 ω 中误差最大不超过 $0.001^{\circ}/\text{Ma}$,旋转极经度 φ 中误差最大不超过 0.51° ,旋转极纬度 μ 中误差最大不超过 0.24° 。而测站数目较少,分布不均匀的板块,如 ARAB、CRAB、INDIA、SOAM 板块,各模型一致性较差,且欧拉参数解算精度较差。尤其 ARAB 板块表现最为突出,本文方法解算的欧拉极旋转速率 ω 中误差达 $0.035^{\circ}/\text{Ma}$,旋转极经度 φ 中误差达 4.81° ,旋转极纬度 μ 中误差达 3.82° 。分析认为,是因为 ARAB 板块台站数目较少,尤其是分布不均,几何分布较差,台站相关性较强所致。

5 结论

采用统计假设检验方法确定刚性板块稳定台站,选取结果 N、E 方向残差分布较小,欧拉参数解算精度较高。根据本方法精确探测的台站和得到的高精度欧拉参数,可以用来探测其他台站是否异常,可用于亚板块的划分和块体边界的确定。在后续的工作中会进一步研究。在利用此方法进行台站选取时要注意两种情况:第一,如果异常台站过多使正常台站不占主导时,进行统计检验有时会产生“伪通过”。即虽通过了检验,但残差很大,待估参数精度很低,如 INDIA 板块,这时需要根据残差分布重新进行台站预筛选。第二,如果台站分布不均匀,几何关系较差时,解算结果虽残差很小,但所求参数精度很低,如 ARAB 板块,这时可根据其协因数阵来确定相关性强的台站并避免。因此,进行板块内台站预筛选很重要,要充分考虑到台站的观测精度、稳定性和几何分布,避免过多、过大异常台站或台站几何分布不好带来不必要的干扰。

参 考 文 献

1 伍吉仓. 地壳形变数据反演[J]. 测绘学报,2000, 29(4):

369. (Wu Jicang. Inverse analysis of crust deformation measurements [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000,29(4):369)

2 伍吉仓,邓康伟,陈永奇. 用边长变化结果计算地应变及块体划分[J]. 大地测量与地球动力学,2002,(4):35 – 38. (Wu Jicang, Conrad Tang and Chen Yongqi. Strain calculation based on baseline length changes and division of tectonic blocks [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics. 2002,(4):35 – 38)

3 Li Jinling, et al. A statistical selection of on-plate sites based on a VLBI global solution [J]. Earth Planets Space, 2001, 53:1 111 – 1 119.

4 金双根,朱文耀. 确定板块运动学模型的台站选取[J]. 大地测量与地球动力学,2003,(3):56 – 60. (Jin Shuanggen and Zhu Wen Yao. Choice of stations for kinematic plate model [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003,(3):56 – 60)

5 柴洪洲,等. 全球板块运动背景场及 ITRF2005VEL 的建立[J]. 测绘科学技术学报,2009,26(02):79 – 81 + 85. (Chai Hongzhou, et al. Establishing of background field of global plate motion and ITRF2005VEL [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2009,26(2):79 – 81,85)

6 黄立人. 用于相对稳定点组判别的 QUAD 法[J]. 大地测量与地球动力学, 2002,(2):10 – 15. (Huang Liren. QUAD method used for identifying relatively stable stations [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002,(2):10 – 15)

7 Li Jean Xiaojing. Global crustal movement and tectonic plate boundary deformation constrained by the ITRF2008 [J]. Geodesy and Geodynamics, 2012,(3):40 – 45.

8 Charles DeMets, et al. Geologically current plate motions [J]. Geophysical Journal International, 2010,181(1):1 – 80.

9 朱文耀,宋淑丽. 国际地球参考框架 (ITRF) 的原点和无整体旋转 [J]. 天文学进展, 2010,28(4):321 – 332. (Zhu Wen Yao and Song Shuli. Origin and no net rotation of the International Terrestrial Reference Frame [J]. Progress In astronomy, 2010,28(4):321 – 332)