

结合欧拉矢量的反演算法构建青藏高原 东北缘地壳运动速度场模型^①

王 帅, 张永志, 姜永涛

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要:探讨地壳运动速度场模型的构建方法,提出结合欧拉矢量的维多样性动态权重粒子群算法构建地壳运动速度场模型。通过模拟算例验证该算法的稳定性和有效性,建立的速度场模型与线性权重粒子群算法和非线性权重粒子群算法的计算结果相比具有较高的精度,且收敛速度较快。利用青藏高原东北缘 1999—2013 年中国地壳运动观测网络观测到的 GPS 水平速率结果,在块体划分和模型辨识的基础上,建立青藏高原东北缘地壳运动速度场模型,并将其与最小二乘配置法的计算结果进行比较,结果表明改进的粒子群算法建立的地壳运动速度场模型具有较高的精度。

关键词:地壳运动;速度场模型;粒子群算法;青藏高原东北缘;反演

中图分类号: P315.72⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0214-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0214

Using an Inversion Algorithm with Euler Vector to Construct a Model of the Crustal Movement Velocity Field in the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau

WANG Shuai, ZHANG Yong-zhi, JIANG Yong-tao

(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Many methods and models have been used to construct crustal movement velocity fields, including Least Squares Collocation, multi-surface functions, spherical harmonics methods, spherical discontinuous deformation analysis, and finite element methods, all of which have certain premise conditions or application scope. Based on the Euler vector, we put forward a new particle swarm optimization (PSO) algorithm from which block motion and strain tensor parameters can be determined by inversion, and then a regional crustal movement velocity field can be constructed. Simulation test results showed that this improved PSO is stable and effective. When the iteration reached 20 times, the improved PSO results were close to their optimal values, while the other two algorithms continued to search. The precision of the velocity field constructed by this method is much higher than that from linear and nonlinear PSOs. A comparison of the effectiveness and lack of bias of the displacement calculated by different methods indicated that the accuracy of the velocity model calculated by the improved PSO was the highest, and the variance and mean value of its residuals were much smaller. Based on GPS observational results from the northeastern margin of the Tibetan Plateau from 1999 to 2013, for which coseismic disturbance has been considered

① 收稿日期: 2014-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(41374028, 40674001); 国土资源大调查项目(1212010914015); 陕西省教育厅自然科学科研项目(12JK0798)

作者简介: 王 帅(1988—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向: 地壳形变与地球动力学. E-mail: wang0814082shuai@163.com.

on the basis of block division and model identification evaluated by unbiased and effectiveness rules, the crustal movement velocity field was determined using the improved PSO. The residual characteristics that closely followed a normal distribution indicated that the velocity field calculated by the improved PSO was reliable and without systematic error. A comparison with the results calculated by Least Squares Collocation was performed, which indicated that the new PSO algorithm effectively and accurately established the crustal movement velocity field. From the constructed velocity field, a significant difference can be seen in how the northeastern margin of the Tibetan Plateau crust moves; the velocity decreases from south to north with clockwise rotation. The NE motion is blocked by the relatively stable Alashan block, which is creating mountain uplift and basin subsidence in the region.

Key words: crustal movement; velocity field model; particle swarm optimization; northeastern margin of the Tibetan Plateau; inversion

0 引言

中国大陆地壳运动持久、强烈、广为发育,是我国高山巍峨、大河东流的缘由,也是地震频繁、灾害沉重的起因^[1]。高精度、大范围和准实时的 GPS 地壳运动观测数据为获取复杂的地壳形变信息,研究构造变形过程中陆地变迁、灾害与环境演化的力源体系提供了必要条件,在地学研究中广为应用^[2-4]。地壳运动与变形直接反映地球内部物质的运移及构造应力场变化^[5],为了获得相对均匀分布的地壳运动速度场模型,国内外学者对 GPS 位移资料的地壳运动速度场模型的建立方法进行了深入的研究。El-Fiky 等^[6]应用最小二乘配置法建立了日本 Tohoku 地区的地壳运动速度场模型。Holt 等^[7]利用双三次样条函数模拟了亚洲局部区域的地壳运动速度场。王泽民等^[8]利用球面非连续变形分析 (DDA) 模型计算了中国大陆地壳运动速度场。蒋志浩等^[9]利用有限元插值法计算了中国大陆 CGCS2000 下的地壳运动速度场模型。刁法启等^[10]利用综合逼近法探讨了地壳运动速度场的构建方法。刘经南等^[11]将多面函数法用于中国大陆速度场模型的建立。石耀霖等^[12]提出了速度场模型建立的球谐函数拟合法。

除此之外,大地测量反演方法在地壳运动速度场模型建立中也得到了应用,Haines 等^[13]研究了利用应变张量反演地壳运动速度场模型的方法;至此, GPS 位移资料、地震矩张量的地壳运动速度场反演理论和方法得到了系统的发展和应用^[14-17],为地壳运动速度场模型的建立提供了一种新的思路。粒子群算法 (PSO) 广泛用于解决地球物理反演中的非线性问题,本文在对粒子群算法深入研究的基础上,基于混沌变异思想,提出了维多样性的动态权重粒子

群算法,在模拟算例分析的基础上,以青藏高原东北缘为例,结合区内各块体满足的块体运动模型,采用 GPS 数据构建一种块体运动和应变参数的反演方法,试图减少模型建立过程中的复杂程序,快速简便地获取可靠的地壳运动速度场模型。

1 维多样性的动态权重粒子群算法

1.1 标准粒子群算法

杨维等^[18]详细论述了粒子群算法的基本原理, D 维粒子位置和速度的迭代过程可表示为

$$v_{next} = \omega \times v_{new} + a \quad (1)$$

$$x_{next} = x_{new} + v_{next} \quad (2)$$

其中: $a = c_1 r_1 (pb_i - x_i) + c_2 r_2 (gb - x_i)$; v_{next} 和 x_{next} 分别为迭代 k 次时粒子 i 第 d 维的速度和位置; pb_i 为粒子 i 在 k 次迭代过程中第 d 维的最优位置; gb 为整个粒子群在 k 次迭代过程中第 d 维的最优位置; ω 为惯性权重因子; c_1 、 c_2 为学习因子,本文取为 2; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数。

1.2 维多样性的动态权重粒子群算法

考虑到标准粒子群算法收敛速度较慢,容易陷入局优,本文通过以下四个步骤对最优解搜索过程中的权重因子进行改进。

(1) 动态权重因子。权重因子可以调整和控制粒子的速度,粒子各维的动态权重可通过 pb_i 和 gb 合成的优势向量与粒子的当前速度来表示^[19]

$$\omega_{ij}^k = [\omega_{max} - k \times (\omega_{max} - \omega_{min}) / M] / (1 + e^{-k/M \times Z_{ij}}) \quad (4)$$

$$Z_{ij} = [c_1 r_1 (pb_{ij} - x_{ij}^k) + c_2 r_2 (gb_j - x_{ij}^k)] / v_{ij}^k \quad (5)$$

其中: M 表示总的迭代次数; k 表示当前迭代次数; ω_{max} 和 ω_{min} 分别为最大和最小惯性权重,本文分别

取为 0.9 和 0.1。

(2) 维多样性的度量指标。迭代初期,粒子在各维上的分布不尽相同,各维粒子随迭代次数的增加趋于聚集,用该维上粒子位置的平均间距表示粒子的聚集程度,依此作为维多样性的度量指标^[20]

$$d(j) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{i,j} - \bar{x}_j)^2 / N} \quad (6)$$

其中: N 为粒子数目; $x_{i,j}$ 为粒子 i 在第 j 维上的值; \bar{x}_j 为所有粒子在第 j 维上的坐标均值。可见, $d(j)$ 越小,粒子的维多样性就越差。

(3) 权重转换策略。考虑到算法迭代到一定次数时粒子的维多样性变差,可能陷入局优。本文设定前 $M/2$ 迭代次数时采用式(4)的权重因子策略,后 $M/2$ 迭代次数时采用线性递减权重策略式(7),以增强算法的搜索能力,避免重复搜索^[21]。

$$\omega_{ij}^k = \omega_{\max} - k \times (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / M \quad (7)$$

(4) 变异条件。后 $M/2$ 迭代过程中,对维多样性小于阈值 $D(j)$ 的粒子,根据 Tent 映射(式(9))对粒子重新初始化。

$$D(j) = \max(\text{abs}(x_{j,\max}), \text{abs}(x_{j,\min})) \quad (8)$$

$$y^{k+1} = \begin{cases} 2y_k & 0 \leq y_k < 0.5 \\ 2(1 - y_k) & 0.5 \leq y_k \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $x_{j,\max}, x_{j,\min}$ 为第 j 维粒子坐标的上下限,abs() 为绝对值函数。

初始化的具体步骤为^[19]:

(I) 混沌变量初始值。由 $(gb_j - a_j) / (b_j - a_j)$ 将 gb_j 转化为混沌变量 zz_{1j} ;

(II) 生成混沌序列。把 zz_{1j} 作为初始值,利用式(9)生成粒子第 j 维的序列 $zz_{2j}, zz_{3j}, \dots, zz_{Nj}$;

(III) 初始化结果。将 zz_{ij} 利用 $a_j + (b_j - a_j) \times zz_{ij}$ 得到 x_{ij} , 其中 $i = 1, 2, \dots, N$; b_j 和 a_j 分别为

粒子搜索过程中设定的第 j 维位置的上、下限。按照式(1)和式(2),对重新初始化后的粒子继续迭代计算,即可求出满足相应迭代条件的粒子最优解。

2 模拟算例

本节模拟数据由李延兴等^[22]的整体旋转与均匀应变弹性方程利用表 1 参数计算给出,并在结果中加入随机噪声(期望为 0,方差为 1)作为观测误差,以此检验算法的抗噪能力。为了检验本文算法的有效性和稳定性,采用以下三种不同定权方式的 PSO 算法反演欧拉和应变张量参数,并对位移进行正演(模拟)计算,计算结果如图 1 所示。

表 1 欧拉和应变张量参数理论值

Table 1 The theoretical value of Euler and strain tensor

$\omega_x (10^{-8})$	$\omega_y (10^{-8})$	$\omega_z (10^{-8})$	$\epsilon_e (10^{-9})$	$\epsilon_{en} (10^{-9})$	$\epsilon_n (10^{-9})$
0.059 8	-0.271 9	-0.074 4	1.27	-9.42	-1.71

方案一:线性权重策略, $\omega = \omega_{\max} - k (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / M$ 。

方案二:非线性权重策略, $\omega = 0.729 \times a \tan(1.0 \times (M - k) / M)$ 。

方案三:多样性的动态权重策略。

通过比较位移模拟值和理论值之间的拟合效果来检验本文算法的稳定性和有效性(不失一般性,本文仅对东向分量进行分析)。从图 1 看出,改进的 PSO 算法收敛速度最快,当迭代次数达到 20 次时反演结果已趋近于理论值,而其他两种 PSO 算法仍在搜索中;随着迭代次数的增加,方案一和方案二的反演结果得到了明显的改善,但结合表 2 可以看出,方案一和方案二的反演结果与理论值仍有较大的差异,迭代到 50 次时,仍未收敛到最优解。整个计算过程中,方案三表现出良好的稳定性,其反演结果与

表 2 欧拉和应变张量迭代结果

Table 2 The iterated results of Euler and strain tensor

计算方案	迭代次数	$\omega_x / (\times 10^{-8})$	$\omega_y / (\times 10^{-8})$	$\omega_z / (\times 10^{-8})$	$\epsilon_e / (\times 10^{-9})$	$\epsilon_{en} / (\times 10^{-9})$	$\epsilon_n / (\times 10^{-9})$
linear PSO	20	0.057 5	-0.254 9	-0.065 8	0.927	-9.580	-3.100
	30	0.086 3	-0.394 3	-0.151 5	1.881	-9.856	-1.426
	40	0.078 6	-0.352 7	-0.123 3	0.334	-9.335	-1.536
	50	0.106 5	-0.474 3	-0.204 3	1.111	-7.118	-1.710
nonlinear PSO	20	0.022 8	-0.109 6	0.027 9	1.087	-10.574	-2.320
	30	0.071 8	-0.324 7	-0.105 2	1.340	-8.497	-1.505
	40	0.044 6	-0.207 6	-0.032 9	1.288	-9.191	-1.532
	50	0.066 4	-0.300 3	-0.092 6	1.273	-9.239	-1.729
improved PSO	20	0.053 8	-0.246 7	-0.0577	1.293	-9.623	-1.678
	30	0.061 9	-0.281 3	-0.080 6	1.273	-9.394	-1.677
	40	0.609	-0.276 5	-0.077 4	1.260	-9.399	-1.715

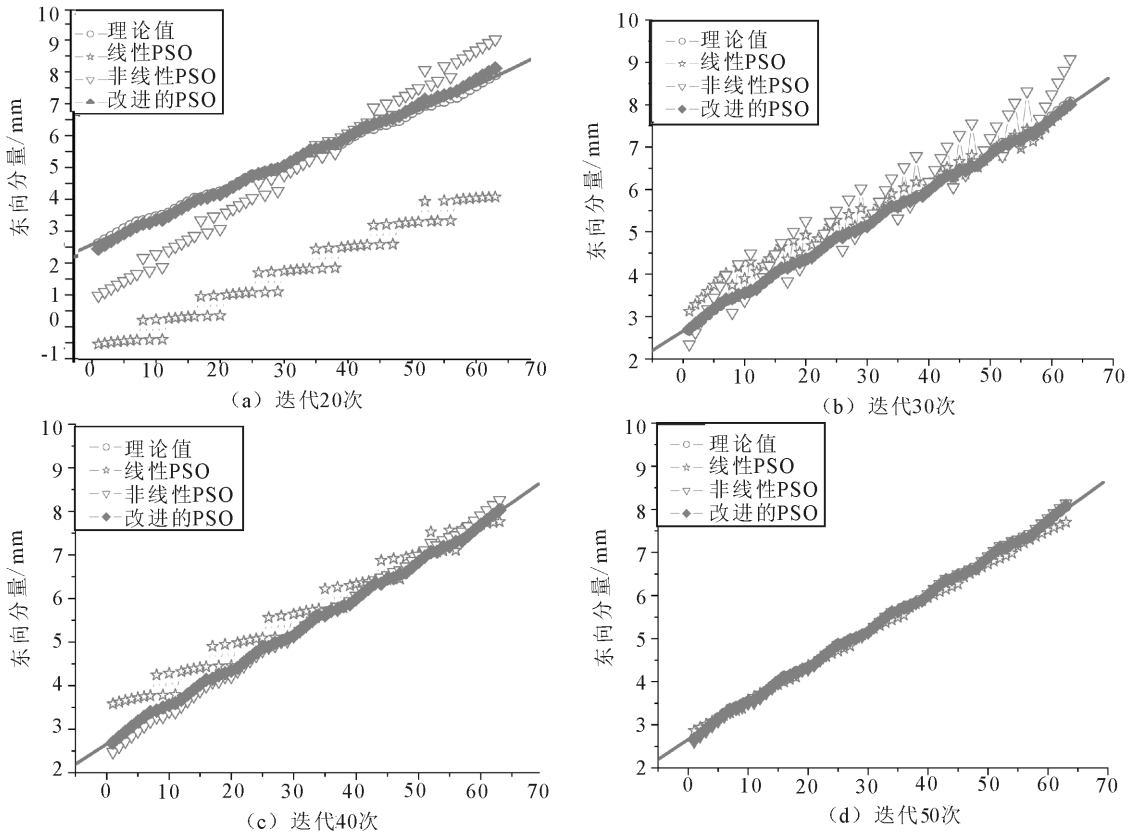


图 1 位移模拟值和理论值(灰色线为理论值拟合曲线)

Fig.1 Simulation and theoretical value of the displacements(Gray line is the fitting curve of theoretical value)

表 3 算法的无偏性和有效性

Table 3 The unbiasedness and effectiveness of each algorithm

迭代次数	线性 PSO 算法		非线性 PSO 算法		改进的 PSO 算法	
	无偏性	有效性	无偏性	有效性	无偏性	有效性
20	2.625	2.443	0.297	0.877	0.030	0.014
30	0.276	0.363	0.351	0.296	0.016	0.002
40	0.327	0.202	0.022	0.078	0.005	0
50	0.093	1.134	1.120	0.160	0.005	0

理论值具有较好的一致性,20 次的迭代结果已接近最优,迭代到 50 次时,两者差异(即反演结果与理论值之差除以理论值,再取绝对值的百分比形式)的最大值(ω_2)仅为 2.6%。比较算法的无偏性和有效性(表 3)可知,改进的 PSO 算法计算出的位移残差均值和方差最小,位移场模型的精度最高。综上所述,多样性的动态权重粒子群算法反演地壳运动和应变张量参数具有较好的稳定性和有效性,且具有一定的抗噪能力,用于构建地壳运动速度场模型是可行、适用的。

3 青藏高原东北缘速度场模型的建立

3.1 GPS 资料和块体运动模型

本文用到的 GPS 资料为青藏高原东北缘

1999—2013 年中国地壳运动观测网络观测到的相对于稳定欧亚板块的水平运动速率结果^[23]。数据处理过程如下:首先,用 GIPSY/OASIS 软件处理 GPS 载波相位数据,计算站坐标和卫星轨道单日松弛解;其次,采用 QOCA 软件平差获得站位置和速度序列;最后,将得到的全球参考框架 ITFF2000 下的测站速度转换成相对于稳定的欧亚板块的速度场(图 2)。数据处理过程中考虑了同震扰动的影响,对同震位移模拟值大于或等于 3 mm 的测站,通过增加同震位移 3 参数^[1]进行约束求解速度场。

在印度板块北东向推挤和区内活动断裂带的共同作用下,青藏高原东北缘各活动块体较完整并有相对统一的运动方式,在块体合理划分的基础上,可用欧拉矢量方程(Model A)、均匀应变模型(Model B)和线性滑动弹塑性模型(Model C)^[22]描述各块体内部的构造运动。本文利用瞿伟等^[24]对青藏高原东北缘活动块体的划分结果(图 2),根据择优的运动模型分别估计各块体的欧拉和应变张量参数。

3.2 改进的粒子群算法建立速度场模型

依据模型的无偏性和有效性^[25]择优标准对各块体运动模型进行辨识。张辉等^[26]通过分析快剪

切波平均偏振方向得出青藏高原东北缘区域应力场呈现局部性的特征;明锋等^[27]指出该区域内部变形需引入二阶应变参数。因此,各块体运动模型辨识时,除阿拉善和鄂尔多斯块体外,其它块体直接进行均匀应变模型(Model B)和线性滑动弹塑性模型(Model C)的辨识,结果如表4所示。然后,根据反演得到的各块体欧拉和应变张量参数(表4和表5),计算了青藏高原东北缘GPS水平运动速率(图2)。

从图2可以看出,模拟值与观测值具有较好的一致性。青藏高原东北缘差异性运动显著,从南到北水平速率不断减小,呈顺时针旋转运动。区内地壳缩短明显,青藏高原东北缘NE向运动受到相对稳定的阿拉善块体的阻挡造就了该区域山体的隆升,盆地的塌陷;鹿化煜等^[28]对该区域代表性的河流阶地——风成堆积序列的研究结果表明,青藏高原东北缘阶段性隆升由来已久,且晚新生代处于加速隆升的阶段。

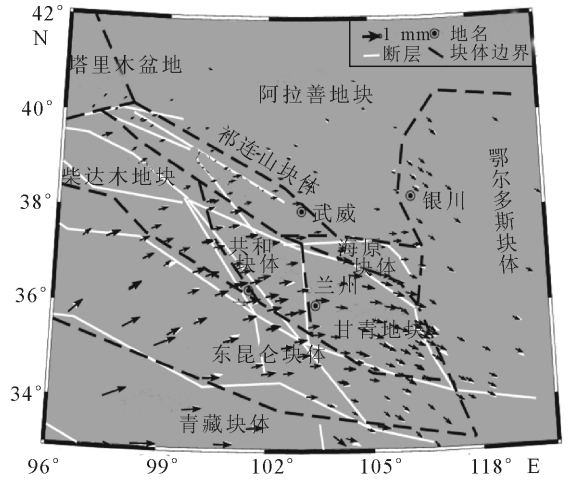


图2 青藏高原东北缘1999—2013年GPS水平运动速率(白色为实测值,黑色为模拟值,单位:mm/a)

Fig.2 Horizontal motion rates of GPS in the northeastern margin of the Tibetan Plateau from 1999 to 2013 (White arrow denotes observation value, black arrow represents simulation value. unit:mm/a)

表4 青藏高原东北缘各块体运动模型辨识结果及相应的欧拉矢量参数(单位:rad/a)

Table 4 Identification results of each block motion model and its Euler parameters in the northeastern margin of the Tibetan Plateau(unit:rad/a)

块体名称	$\omega_x / (\times 10^{-8})$	$\omega_y / (\times 10^{-8})$	$\omega_z / (\times 10^{-8})$	无偏性			有效性		
				Model A	Model B	Model C	Model A	Model B	Model C
塔里木	0.053	-0.175	-0.125		0.194 9	0.035 7		0.587 8	0.285 5
阿拉善	-0.016	-0.030	0.021	0.669 9	0.028 3	0.476 6	2.424 6	1.159 6	2.375 7
鄂尔多斯	-0.109	0.193	0.249	0.055 6	0.066 8	0.121 8	1.770 1	1.798 4	1.184 8
祁连山	0.019	-0.001	0.035		0.941 4	0.043 2		2.073 6	0.285 7
海原	0.025	-0.090	0.026		0.542 9	0.398 5		2.272 4	1.248 1
甘青	0.012	-0.210	0.012		0.259 2	0.262 2		4.199 3	1.827 1
共和	0.028	-0.025	0.156		0.492 8	0.058 3		2.721 9	1.152 8
柴达木	0.059	-0.169	-0.004		0.393 1	0.310 3		4.031 0	3.148 0
东昆仑	0.210	-0.833	-0.433		0.337 7	0.238 4		8.056 2	2.124 9
青藏	-0.009	0.171	0.372		0.232 5	0.407 9		37.356 6	2.645 1

表5 各块体应变张量结果

Table 5 Strain tensor results of each block

块体名称	$A_0 / (\times 10^{-11})$	$B_0 / (\times 10^{-11})$	$C_0 / (\times 10^{-11})$	$\xi_1 / (\times 10^{-11})$	$\xi_2 / (\times 10^{-11})$	$\xi_3 / (\times 10^{-11})$	$\xi_1 / (\times 10^{-11})$	$\xi_2 / (\times 10^{-11})$	$\xi_3 / (\times 10^{-11})$
塔里木	1.192	-3.168	-1.473	0.073	0.057	0.010	-0.042	0.091	0.025
阿拉善	-0.308	0.141	-0.066						
祁连山	-0.138	-0.229	-0.423	0.476	1.168	0.749	-0.079	-0.179	-0.120
海原	-0.248	0.530	0.461	0.184	1.005	0.415	0.007	-1.330	-0.114
甘青	-0.636	0.145	0.002	-0.042	-0.183	0.016	0.110	0.089	0.142
共和	1.954	2.603	0.809	-0.312	0.041	-0.009	0.212	0.072	0.142
柴达木	16.519	-10.677	-12.594	-0.020	0.101	-0.018	0.040	0.155	0.094
东昆仑	182.304	3.145	8.227	0.023	-0.027	0.074	0.023	-0.033	0.044
青藏	0.570	-1.291	0.863	0.014	-0.315	0.214	-0.026	-0.315	0.072

图3给出了改进的PSO算法计算出的位移残差分布,可以看出,残差统计分布基本满足正态分布

特性,说明构建的速度场模型中不含系统误差。整体上北向分量略优于东向分量,可能与本区域东向

分量的复杂性有关。与最小二乘配置方法(协方差函数取为高斯函数)计算出的位移残差变化曲线(图 4)比较,可以看出,结合欧拉矢量的改进粒子群算法构建的速度场模型具有较高的精度,再次验证了本方法建立的速度场模型的可靠性。

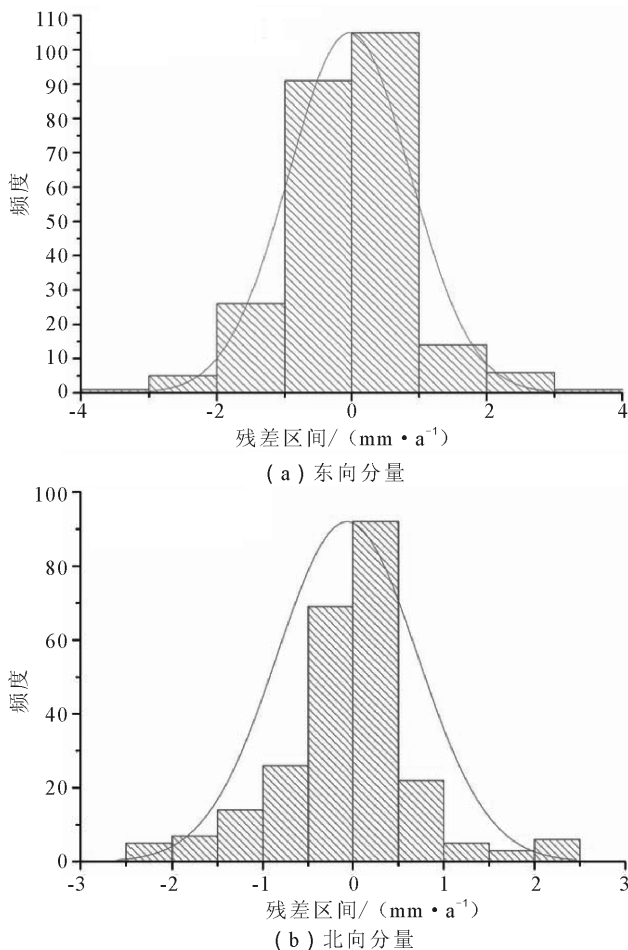


图 3 改进的 PSO 计算出的位移残差分布

Fig.3 Residual error distribution of displacement calculated by improved PSO

4 结论

目前常用的地壳运动速度场模型的建立方法主要有欧拉矢量法和位移拟合法两种,不同的建立方法都有一定的前提条件或适用范围。欧拉矢量法建立的速度场模型具有地学意义,是在块体满足刚性条件下建立的;位移拟合常用的方法有多面函数法和最小二乘配置法等,多面函数法中结点、核函数的选择具有很大的不确定性,协方差函数决定着最小二乘配置拟合推估的精度,是以随机信号满足各态历经性平稳为前提确定的。本文提出利用结合欧拉矢量的维多样性动态权重粒子群算法构建区域速度

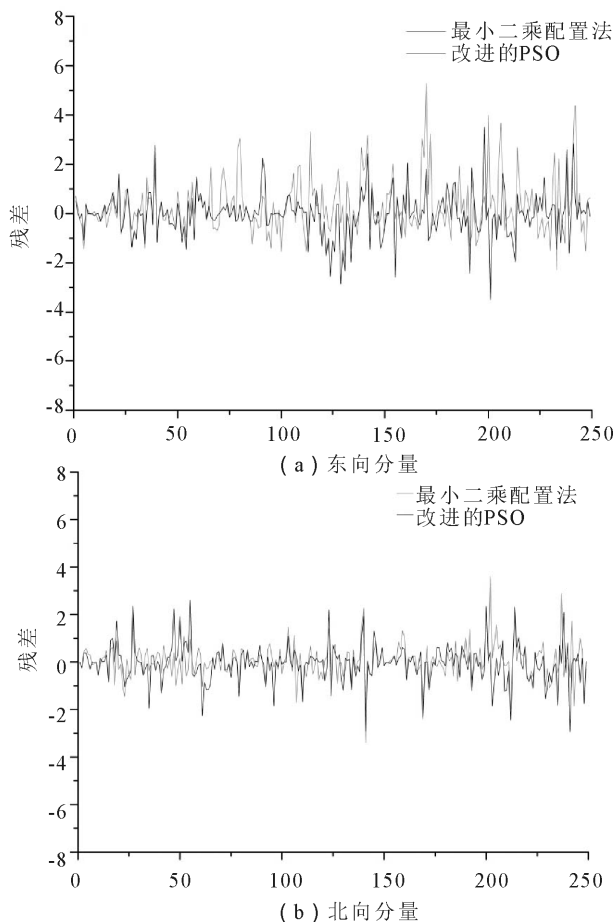


图 4 改进的 PSO 与最小二乘配置法计算出的位移残差比较

Fig.4 Comparison of residual errors of displacement calculated by improved PSO and LSC

场模型,一定程度上克服了速度场模型求解过程中的复杂程序,可以快速地获取区域地壳运动速度场模型,且其精度不低于最小二乘配置法的计算结果,但仍有不足之处,如对块体划分结果要求较高,若块体划分不合理,建立的速度场模型可能会失真,不能反映出真实的地壳形变信息。块体运动和应变张量参数反演求解时,利用已有成果对解的搜索范围加以约束效果会更好。

致谢:感谢中国地震局地震预测研究所武艳强老师在最小二乘配置方面给予的指导。

参考文献(References)

- [1] 李强,游新兆,杨少敏,等.中国大陆构造变形高精度大密度 GPS 监测——现今速度场[J].中国科学: D 辑, 2012, 42(5): 629-632.
- LI Qiang, YOU Xin-zhao, YANG Shao-min, et al. A Precise Velocity Field of Tectonic Deformation in China as Inferred

- From Intensive GPS Observations[J].Science China: D Series, 2012, 42(5): 629-632. (in Chinese)
- [2] 陈光保. GPS 技术监测地壳运动的新进展[J]. 西北地震学报, 2009, 31(3): 302-307.
- CHEN Guang-bao. Recent Progress in Research on Monitoring Crustal Movement and Deformation Using GPS[J]. Northwest-ern Seismological Journal, 2009, 31(3): 302-307. (in Chinese)
- [3] 贾鹏, 张希, 张晓亮, 等. 汶川地震前后川滇及其邻区 GPS 水平运动演化特征[J]. 西北地震学报, 2012, 34(3): 264-267.
- JIA Peng, ZHANG Xi, ZHANG Xiao-liang, et al. Evolution Features of Crustal Horizontal Movement from GPS Observation in Sichuan—Yunnan Region and Its Adjacent Area Before and After the Wenchuan Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3): 264-267. (in Chinese)
- [4] 王双绪, 蒋锋云, 李宁, 等. 岷县漳县 6.6 级地震前区域地壳运动变形背景与断层形变异常特征[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 503-512.
- WANG Shuang-xu, JIANG Feng-yun, LI Ning, et al. Regional Crustal Movement Background and Cross-fault Deformation Anomaly Characteristics Prior to the Minxian—Zhangxian Ms6.6 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 503-512. (in Chinese)
- [5] 任金卫, 马宗晋. 东亚地区现代地壳运动特征与构造变形[J]. 地学前缘, 2003, 10(增刊): 58-65.
- REN Jin-wei, MA Zong-jin. Crustal Movement and Tectonic Deformation of Eastern Asia[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(Supp): 58-65. (in Chinese)
- [6] El-Fiky G S, Kato T. Continuous Distribution of the Horizontal Strain in the Tohoku District, Japan, Predicted by Least-Squares Collocation[J]. Journal of Geodynamics, 1998, 27(2): 213-236.
- [7] Holt W E, Chamot-Rooke N, Le Pichon X, et al. Velocity Field in Asia Inferred from Quaternary Fault Slip Rates and Global Positioning System Observations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978—2012), 2000, 105(B8): 19185-19209.
- [8] 王泽民, 伍岳, 刘经南, 等. 利用 GPS 资料采用非连续变形分析模型确定中国大陆地壳运动速度场[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2002, 27(3): 241-245.
- WANG Ze-min, WU Yue, LIU Jing-nan, et al. The Establishment of Crust Motion Velocity Field of China by GPS Observations and Spherical DDA Model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(3): 241-245. (in Chinese)
- [9] 蒋志浩, 张鹏, 秘金钟, 等. 基于 CGCS2000 的中国地壳水平运动速度场模型研究[J]. 测绘学报, 2009, 38(6): 471-476.
- JIANG Zhi-hao, ZHANG Peng, BI Jin-zhong, et al. The Model of Crustal Horizontal Movement Based on CGCS 2000 Frame [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(6): 471-476. (in Chinese)
- [10] 刁法启, 熊熊. 地壳运动速度场插值方法研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(6): 627-630.
- DIAO Fa-qi, XIONG Xiong. Interpolation Approach for Velocity Field of Crustal Movement[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(6): 627-630. (in Chinese)
- [11] 刘经南, 施闯, 姚宜斌, 等. 多面函数拟合法及其在建立中国地壳平面运动速度场模型中的应用研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26(6): 500-508.
- LIU Jing-nan, SHI Chuang, YAO Yi-bin, et al. Hardy Function Interpolation and its Applications to the Establishment of Crustal Movement Speed Field[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(6): 500-508. (in Chinese)
- [12] 石耀霖, 朱守彪. 用 GPS 位移资料计算应变方法的讨论[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(1): 1-8.
- SHI Yao-lin, ZHU Shou-biao. Discussion on Method of Calculating Strain with GPS Displacement Data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26(1): 1-8. (in Chinese)
- [13] Haines A J, Holt W E. A Procedure for Obtaining the Complete Horizontal Motions within Zones of Distributed Deformation from the Inversion of Strain Rate Data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978—2012), 1993, 98(B7): 12057-12082.
- [14] 吴云, 孙建中, 周硕愚. 利用地震矩张量反演地壳运动水平速度场的理论和方法[J]. 大地测量与地球动力学, 1996, 16(3): 1-7.
- WU Yun, SUN Jian-zhong, ZHOU Shuo-yu. Theory and Method of Inverting Horizontal Velocity Field of Crustal Movement by Seismic Moment Tensor[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 1996, 16(3): 1-7. (in Chinese)
- [15] 吴云, 帅平, 施顺英. GPS 观测量与地震矩张量联合反演地壳水平运动速度场的方法[J]. 大地测量与地球动力学, 1997, 17(4): 11-16.
- WU Yun, SHUAI Ping, SHI Shun-ying. A Method of Joint Inversion of GPS Observations and Seismic Moment Tensors for Determining Crustal Horizontal Velocity Field[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 1997, 17(4): 11-16. (in Chinese)
- [16] ZHOU Shuo-yu, SHUAI Ping, GUO Feng-ying, et al. A Quantitative Research for Present-time Crustal Motion in Fujian Province, China and its Marginal Sea[J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, 13(1): 75-83.
- [17] XU Cai-jun, DING Kai-hua, CAI Jian-qing, et al. Methods of Determining Weight Scaling Factors for Geodetic-geophysical Joint Inversion[J]. Journal of Geodynamics, 2009, 47(1): 39-46.
- [18] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 87-94.
- YANG Wei, LI Qi-qiang. Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Engineering Science, 2004, 6(5): 87-94. (in Chinese)
- [19] 王洪涛, 任燕. 基于改进惯性权重的粒子群优化算法[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(10): 271-274.

- WANG Hong-tao, REN Yan. Particle Swarm Optimization Algorithm based on Modified Inertia Weight[J]. Computer Applications and Software, 2011, 28(10): 271-274. (in Chinese)
- [20] 梁晋明,董淑华,龙文,等.动态惯性权重向量和维变异的粒子群优化算法[J].计算机工程与应用,2011,47(5):29-31.
LIANG Xi-ming, DONG Shu-hua, LONG Wen, et al. PSO Algorithm with Dynamical Inertial Weight Vector and Dimension Mutation[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(5): 29-31. (in Chinese)
- [21] 骆晨钟,邵惠鹤.采用混沌变异的进化算法[J].控制与决策, 2000, 15(5): 557-560.
LUO Chen-zhong, SHAO Hui-he. Evolutionary Algorithms with Chaotic Mutations[J]. Control and Decision, 2000, 15(5): 557-560. (in Chinese)
- [22] 李延兴,张静华,何建坤,等.由空间大地测量得到的太平洋板块现今构造运动与板内形变应变场[J].地球物理学报, 2007, 50(2): 437-447.
LI Yan-xing, ZHANG Jing-hua, HE Jian-kun, et al. Current-day Tectonic Motion and Intraplate Deformation-strain Field Obtained from Space Geodesy in the Pacific Plate[J]. Chin J Geophys, 2007, 50(2): 437-447. (in Chinese)
- [23] LIANG Shi-ming, GAN Wei-jun, SHEN Chuan-zheng, et al. Three-dimensional Velocity Field of Present-day Crustal Motion of the Tibetan Plateau Derived from GPS Measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(10): 5722-5732.
- [24] 瞿伟,张勤,张冬菊,等.基于 GPS 速度场采用 RELSM 模型分析青藏块体东北缘的形变-应变特征[J].地球物理学进展, 2009, 24(1): 67-74.
QU Wei, ZHANG Qin, ZHANG Dong-ju, et al. Analysis of Deformation-strain Characteristics of the Northeast Margin of Qinghai-Tibet Block Using the RELSM Model based on the GPS Velocity Field[J]. Progress in Geophys, 2009, 24(1): 67-74. (in Chinese)
- [25] 许才军,温扬茂.活动地块运动和应变模型辨识[J].大地测量与地球动力学, 2003, 23(3): 50-55.
XU Cai-jun, WEN Yang-mao. Identification of Models for Crustal Movement and Strain of Blocks[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(3): 50-55. (in Chinese)
- [26] 张辉,高原,石玉涛,等.基于地壳介质各向异性分析青藏高原东北缘构造应力特征[J].地球物理学报, 2012, 55(1): 95-104.
ZHANG Hui, GAO Yuan, SHI Yu-tao, et al. Tectonic Stress Analysis based on the Crustal Seismic Anisotropy in the Northeastern Margin of Tibetan Plateau[J]. Chin J Geophys, 2012, 55(1): 95-104. (in Chinese)
- [27] 明锋,柴洪洲.由 GPS 资料讨论中国大陆块体运动与应变模型的建立及检验[J].地球物理学报, 2009, 52(8): 1993-2000.
MING Feng, CHAI Hong-zhou. The Foundation of China Mainland Blocks Movement and Strain Model and its Test based on the GPS Data[J]. Chin. J. Geophys, 2009, 52(8): 1993-2000. (in Chinese)
- [28] 鹿化煜,安芷生,王晓勇,等.最近 14 Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据[J].中国科学: D 辑, 2004, 34(9): 855-864.
LU Hua-yu, AN Zhi-sheng, WANG Xiao-yong, et al. Geomorphologic Evidence of Phased up Lift of the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau since 14 Million Years Ago[J]. Science in China: Series D, 2004, 34(9): 855-864. (in Chinese)