

利用 GPS 资料反演华北块体运动的负位错模型参数

伍吉仓¹ 许才军²

(1 同济大学测量与国土信息工程系, 上海市四平路 1239 号, 200092)

(2 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 利用华北地区(北纬 $36^{\circ} \sim 42^{\circ}$, 东经 $112^{\circ} \sim 120^{\circ}$) 1995~1999 三期 GPS 观测所获得的测站点的速度数据, 通过引入板内块体相对运动模型, 反演了该地区三条主要断裂带的负位错模型参数, 从而区分研究区域各个活动断层运动闭锁强弱, 并且据此推断它们未来发生地震的可能性大小。

关键词: 断层; 位错模型; 反演

中图法分类号: P228.42; P542

活动断层的运动是地壳运动的一种主要表现形式。活动断层运动的力学模型可以表述为断层分割开的两地块的相对刚体运动加上断层面的负位错分布^[1,2]。该模型假设各活动地块在当今构造运动的驱动下, 彼此间存在着长趋势的稳定的相对运动, 这种相对运动在地块的边界处(断层), 有可能受到阻碍, 从而产生应变、应力累积, 当应力累积超过断层的强度时, 断层就会产生错动, 即地震。

如果进一步假设地块边界处的阻碍作用只在地壳上部的脆硬段存在, 而在地壳下部的软塑性段假定能自由滑动, 根据静力弹性位错理论, 地壳上部断面上的阻碍作用可以用断面上的负位错分布来表述^[3]。这样一来, 地块边界处的地壳形变可以表述为地块间的相对刚体运动加上断面上负位错分布所导致的地壳形变。如图 1 所示, 地块 A 和地块 B 间存在着长趋势的稳定的相对运动 V_{AB} 。地块 A 与地块 B 的边界由断层 F 分割开, 在断层面的上部 Σ 的阻碍作用所引起地壳形变可以用负位错分布来表示。从而, 地面上一点的运动 y 为:

$$y = V_{AB} + f_{\Sigma} \quad (1)$$

式中, 左端 y 代表点位移或速度, 可以通过测量得到; 右端为有限个模型参数的函数; f_{Σ} 表示断层面上负位错分布引起地壳形变。对弹性半无限空间中 f_{Σ} 的计算公式, Okada 已经在 1985 年

和 1992 年^[4,5] 详细列出, 它是断层面长度、宽度、埋深、倾角以及断层面上分布的位错量的函数。式(1)中, 如果是两期观测期间监测点的位移, 则 V_{AB} 表示对应于观测期间的地块 A 与地块 B 的相对位移, 表示负位错引起的监测点位移。如果是监测点的平均速度, 则 V_{AB} 表示地块 A 与地块 B 的相对速度, f_{Σ} 表示负位错率^[3] 引起的监测点速度。在实际应用中, 假定地块 A 不动, 则位于地块 A 上的监测点的 V_{AB} 部分等于零。

对应该模型, 定义闭锁区。所谓闭锁区就是断层面上负位错分布不等于零的区域, 闭锁区对地块间的相对运动产生阻碍作用, 而那些对地块相对运动不产生阻碍的断层区域, 负位错分布等于零或几乎等于零, 可以称之为非闭锁区或自由滑动区。负位错量越大, 断层闭锁越强, 未来发生地震的可能性也越大, 负位错的方向与断层实际的相对运动方向相反。

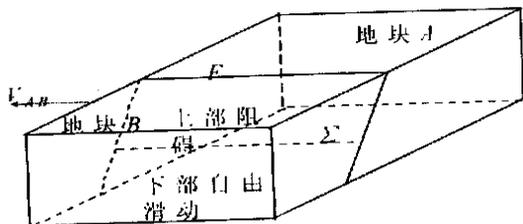


图 1 块体运动模型

Fig. 1 Block Movement Model

根据式(1), 应用多个点上的测量数据, 即位移或速度分量, 结合地震地质提供的相关先验信息, 按贝叶斯反演方法, 可以求得块体刚体运动速度分量及负位错(率)分量, 从而推断研究区域各个活动断层运动闭锁强弱, 据此推断它们未来发生地震的可能性大小。

1 华北地区 1995 年 ~1999 年三期 GPS 测量得到的站点速度及活动块体的划分

1995 年 ~1996 年和 1999 年 3 期 GPS 监测网, 共有 63 个共同点。利用 GAMIT 软件将 1995 年、1996 年及 1999 年 3 期观测数据同全球 IGS 跟踪站资料进行统一的 GPS 数据处理。最后通过网平差求出各个 GPS 站点相对于 ITRF97 坐

标框架下的水平速度^[6], 其结果见表 1。

从表 1 列出的数据来看, 华北地区(北纬 36° ~42°, 东经 112° ~120°)有明显的东偏南方向的运动, 这种运动受到北面一条东西向断层带和东、西各一条的北东向断层带的控制, 结合该地区的地质情况和断层活动分布图^[7], 把该地区划分为 4 个板内块体(如图 2), 分别由三条大的断层分割开。这三条断层对应的是: F_1 张家口-北票断裂; F_2 太行山山前断裂; F_3 唐山-宁河及沧东断裂。其中, 块体 I 为内蒙地轴地震构造区; 块体 II 为太行山隆起地震构造区; 块体 III 为太行山前及河北平原地震构造区; 块体 IV 为埕宁隆起地震构造区。为了反演这三条活动断层面上的负位错分布, 假定块体 I 不动, 所有点的速度减去位于块体 I 上的 H058-GPS 点的速度, 即可得到所有点相对块体 I 的速度。图 2 中的矢量箭头, 表示每一个站

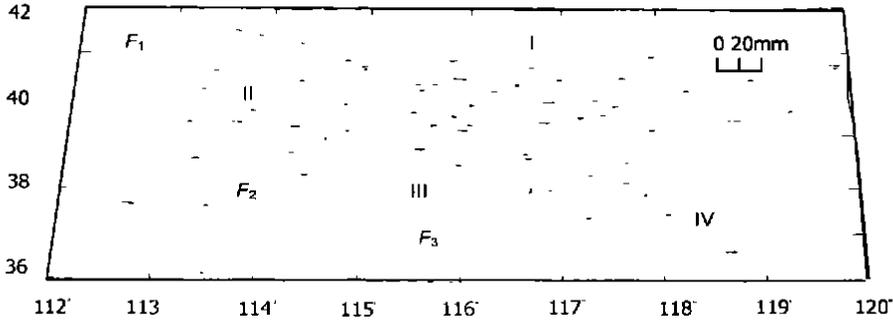


图 2 站点相对运动速度及断层分布图(块体 I 固定不动)

Fig. 2 Fault Distribution and Stations Relative Velocities

点相对水平速度大小和方向。

2 块体模型和断层负位错分量的反演

根据负位错模型^[1,3], 式(1)中, f_{Σ} 为每一条断层长度、宽度、深度、倾角、负位错分量的函数。假定把式(1)右端所有待求的未知数记为 x , 则有:

$$y + \epsilon_y = f(x) \quad (2)$$

式中, x 为 $m \times 1$ 阶待求未知数向量, 包括每个块体相对运动速度及每个断层的几何参数和负位错分量; y 为 $n \times 1$ 阶观测数据向量, 它由所有观测点上的相对运动速度分量构成(相对于块体 I 不动); ϵ_y 为 $n \times 1$ 阶观测误差向量。直接由式(2)求解 x 是一个非线性反演问题, 其解不确定。本文采用一种迭代的线性贝叶斯反演方法^[7], 通过结合断层参数的先验信息, 来求出反演问题的最佳解。

假设 x_0 表示模型参数的先验信息, 即

$$x_0 + \epsilon_x = x \quad (3)$$

式中, ϵ_x 是 m 维随机误差向量。

为了计算上的方便, 通常假定随机向量 ϵ_y 、 ϵ_x 均服从高斯分布, 且它们的期望为零, 方差阵分别为 Σ_y 、 Σ_x 。

迭代求解过程可以表述为:

$$x_{k+1} = x_k + b_k M_k^{-1} r_k \quad (4)$$

这里, $M_k = A_k^T \Sigma_y^{-1} A_k + \Sigma_x^{-1} \quad (5)$

$$r_k = A_k^T \Sigma_y^{-1} [y - f(x_k)] + \Sigma_x^{-1} (x_0 - x_k) \quad (6)$$

其中, A_k 的元素按下式计算:

$$A_{ij} = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right]_{x=x_k} \quad (7)$$

式(4)中, b_k 是一个控制迭代步长的正数, 且 $0 \leq b_k \leq 1$; x_0 是初始迭代向量, 也就是先验值。取一个小的 γ 作为迭代阈值, 控制迭代终止。迭代问题的解可以定义为:

表1 各GPS点的水平速度分量

Tab.1 Horizontal Velocities of GPS Stations

站名	经度		纬度		Y/mm·a ⁻¹ 均方差/mm·a ⁻¹		X/mm·a ⁻¹ 均方差/mm·a ⁻¹	
G172	112	39	37	42	33.9	2.7	-15.5	1.9
G174	113	22	37	4	34.6	2.6	-17.5	1.8
G178	114	21	38	2	31.5	2.9	-12.3	2.1
G180	116	7	37	22	34.6	2.6	-11.5	1.9
H010	113	1	39	30	29.9	2.4	-12.9	1.9
H011	113	10	41	6	27.9	2.3	-13.3	1.8
H012	113	15	38	42	33.0	2.7	-13.2	2.0
H013	113	18	40	13	29.1	2.4	-12.4	2.0
H014	113	24	40	38	28.7	2.5	-10.6	2.0
H015	113	39	39	3	33.4	2.6	-14.6	2.1
H016	113	46	39	46	33.0	2.4	-13.8	2.0
H017	113	59	41	6	29.0	2.6	-12.2	2.2
H018	114	10	38	50	34.3	2.3	-14.1	1.8
H019	114	13	39	25	33.4	2.4	-13.4	2.0
H020	114	17	40	25	29.6	2.6	-11.7	2.2
H021	114	38	40	12	31.4	2.1	-12.2	1.7
H022	114	43	39	54	32.4	2.4	-13.2	2.0
H023	114	44	39	20	32.0	2.7	-15.6	2.0
H024	114	45	40	52	29.1	2.2	-10.5	1.7
H025	114	55	40	40	30.1	2.5	-11.5	2.1
H026	115	3	38	54	32.1	2.6	-12.5	2.0
H027	115	24	39	43	31.7	2.4	-14.4	1.7
H029	115	31	40	12	29.3	2.5	-12.5	1.9
H030	115	36	39	28	32.4	2.5	-16.1	1.9
H031	115	40	40	21	27.2	2.5	-14.1	1.9
H032	115	49	39	39	30.9	2.6	-14.4	2.0
H034	115	50	40	52	29.3	2.3	-11.6	1.7
H035	115	52	38	35	32.1	2.6	-16.6	2.0
H036	115	56	39	2	31.6	2.3	-13.3	1.8
H037	115	56	40	28	30.4	2.4	-13.6	1.9
H038	115	57	39	27	34.4	2.7	-13.5	2.1
H040	116	2	39	47	29.1	2.5	-12.4	2.0
H041	116	7	39	36	27.0	3.0	-13.1	2.3
H042	116	9	39	51	29.5	2.5	-12.6	1.9
H043	116	14	40	11	31.0	2.5	-14.0	2.0
H044	116	28	39	8	32.0	2.5	-14.7	2.0
H045	116	35	38	41	30.8	2.5	-11.0	1.9
H046	116	37	40	43	30.2	2.2	-14.6	1.5
H047	116	39	39	31	42.4	2.5	-14.7	2.0
H048	116	56	40	26	28.8	2.6	-12.3	2.0
H049	116	47	39	56	33.7	2.5	-10.4	2.0
H052	117	19	39	40	34.0	2.5	-15.0	1.9
H054	117	33	40	28	30.2	2.7	-11.4	2.1
H057	117	51	39	21	31.2	2.3	-15.4	1.8
H058	117	54	40	57	28.3	2.6	-13.4	1.8
H062	118	14	40	11	29.5	2.6	-12.6	2.0
H066	118	42	39	32	33.2	2.5	-14.3	1.7
H068	118	54	40	25	30.0	2.5	-12.3	1.9
H069	119	19	39	41	24.9	2.9	-7.6	2.4
H071	119	46	40	45	32.3	2.6	-15.2	2.1
H072	119	49	40	4	27.5	2.7	-13.2	2.2
TIAN	117	16	39	6	30.3	1.6	-14.8	0.9

$$\hat{x} = x_{k+1}, \|\gamma_k\| < \gamma \quad (8)$$

$$C_{k+1} = (A_{k+1}^T \Sigma_y^{-1} A_{k+1} + \Sigma_x^{-1})^{-1} \quad (9)$$

其渐近协方差阵可以用来表达解的精度:

利用该地区 63 个 GPS 点的相对运动速度分量观

测值构成式(2)中的 y , 其均方差可按下式计算:

$$\sigma_{Ei} = \sqrt{\sigma_{VEi}^2 + \sigma_{VE-H058}^2},$$

$$\sigma_{VE-H058}^2 = 2.6\text{mm/a}, i = 1, 63 \quad (10)$$

$$\sigma_{Ni} = \sqrt{\sigma_{VNi}^2 + \sigma_{VN-H058}^2},$$

$$\sigma_{VN-H058}^2 = 1.8\text{mm/a}, i = 1, 63 \quad (11)$$

式中, σ_{Ei} 为第 i 个点相对速度东分量的均方差; σ_{Ni} 为第 i 个点相对速度北分量的均方差; σ_{VEi} 为第 i 个点在 ITRF 坐标框架中速度东分量的标准差; σ_{VNi} 为第 i 个点在 ITRF 坐标框架中速度北分量的标准差。 σ_{VEi} , σ_{VNi} 的值已知, 如表 1 所示。

参照文献[7], 给出三个断层的几何参数的先验值见表 2, 给出各块体相对刚体运动的先验值

见表 3。由于笔者缺少跨断层测量数据, 不妨假定各断层负位错分量的先验值均为零, 先验方差均为 3mm。按照上述的迭代贝叶斯反演方法, 对断层位置等几何量的大小, 赋予较大的权, 集中反演各个断层面上负位错分布和各块体间的相对运动速度。表 4 列出了负位错的先验值和反演后的值以及相应的均方差。各块体相对运动后验值和均方差见表 3。另外, 反演得到的后验模型对应的数据残差平方和是先验模型对应的数据残差平方和的 1/10, 并且反演后得到的数据残差的绝对值大部分在 2mm 以内, 如图 3、图 4 所示, 与 GPS 测量的精度相一致。表明反演得到的结果与 GPS 测量数据比较吻合。

表 2 假定断层的几何参数(根据“首都圈地震构造分区图^[7]”量得)

Tab. 2 Geometrical Parameters of Hypothesis Faults

断层名	断层位置			半长/km	宽/km	深/km	倾角/(°)
	a/km	b/km	(°)				
F1	4474.33	432.08	120.00	310.00	30.0	0.0	90
F2	4352.96	370.60	40.00	137.00	50.0	0.0	90
F3	4240.92	526.24	45.00	157.00	30.0	0.0	90

表 3 块体运动的先验值和反演后值/ $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$

Tab. 3 The Prior and Posterior Values of Block Movements

块体编号		运动分量	
		X	X
I	固定	0.0	0.0
	先验值	-0.001±0.001	0.001±0.001
II	反演后值	0.000±0.001	0.003±0.001
	先验值	-0.005±0.001	0.010±0.001
III	反演后值	-0.002±0.001	0.006±0.001
	先验值	-0.005±0.001	0.015±0.001
IV	反演后值	0.000±0.001	0.004±0.001

3 反演结果分析及结论

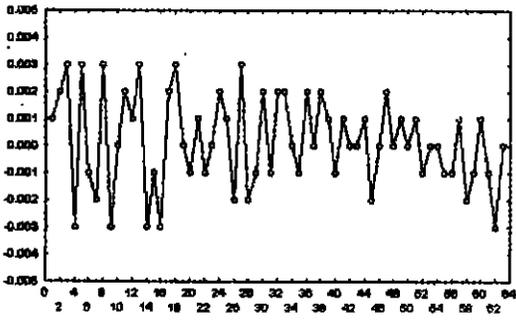
如表 3 所示, 相对块体 I 固定, 块体 II 和 IV 的

反演后运动值大致相同, 都是近正东方向, 大小约 3mm/a; 块体 III 的相对运动东偏南, 大小约 6mm/a, 如图 4 所示。表 3 列出了活动断层反演后的负位错分布, 其中, 唐山-宁河及沧东断裂带的负位错倾滑分量为 -3mm/a, 张裂分量为 -2mm/a, 由于负位错矢量与断层实际运动相反, 表明埕宁隆起区现今仍有上升运动, 同时该断裂带经受微拉张作用; 同理, 由于反演得到的太行山前断裂带负位错走滑分量和倾滑分量均为 2mm/a, 而张裂分量为 -5mm/a, 表明该断裂带现今主要经受着拉张作用; 而位于北面的东西向的张家口-北票断裂的负位错走滑分量为 -4mm/a, 倾滑分量和张裂分量约为零, 表明该断裂带现今主要经受着左旋运动。上述反演得到的板内构造

表 4 断层负位错分布的先验值和反演后值

Tab. 4 Prior and Posterior Values of Negative Dislocation Components

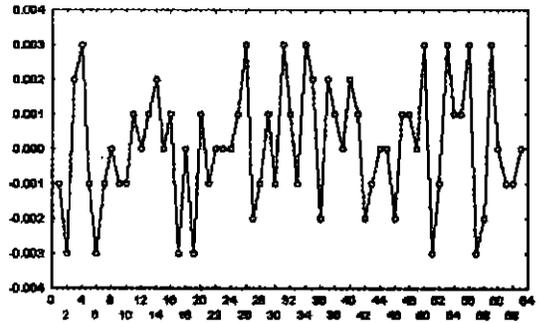
断层名		负位错分量/ $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$		
		走向 U_1	倾向 U_2	张裂 U_3
F1	先验值	0.000±0.003	0.000±0.003	0.000±0.003
	反演后值	-0.004±0.002	0.000±0.002	0.001±0.002
F2	先验值	0.000±0.003	0.000±0.003	0.000±0.003
	反演后值	0.002±0.002	0.002±0.002	-0.005±0.002
F3	先验值	0.000±0.003	0.000±0.003	0.000±0.003
	反演后值	0.001±0.003	-0.003±0.003	-0.002±0.002



横轴表示站点编号, 纵轴表示反演后的数据残差

图 3 相对运动速度东分量残差分布

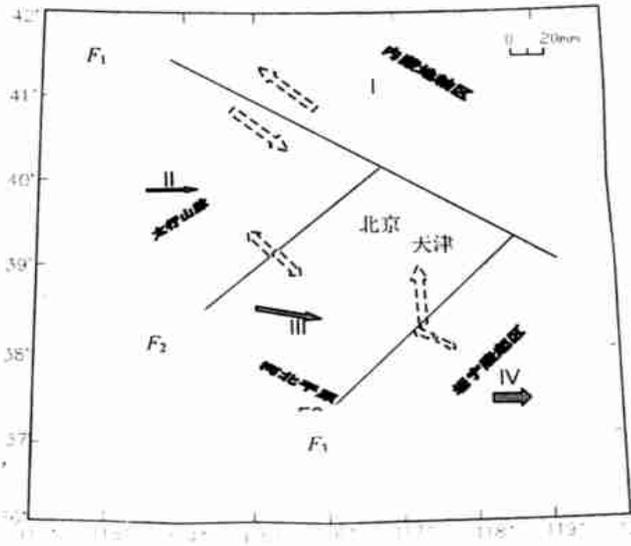
Fig. 3 Data Residual Distribution; East Components



横轴表示站点编号, 纵轴表示反演后的数据残差

图 4 相对运动速度北分量残差分布

Fig. 4 Data Residual Distribution; North Components



宽箭头表示各块体的相对运动速度(相对块体 I 固定); 虚箭头表示断层面上反号负位错分量, 代表断层实际的运动趋势

图 5 板内块体的相对运动和反演后的断层负位错分布

Fig. 5 Relative Movements of the Intraplate Blocks and Fault Negative Dislocation Distributions

块体的运动趋势, 与文献[7]中根据地质调查得到的更新世以来的地壳构造形变和根据历史地震活动性分析得到的结论基本一致。整体上来看, 内蒙古地轴区南面现今经受着拉张作用为主的地壳运动, 表现为近东方向的水平运动和埕宁隆起区现今上升运动。而现今地壳运动在太行山前断裂有每年近 5mm 的张裂方向的闭锁。由此推断现今太行山前断裂带孕育中强地震的可能性较大, 应加强对太行山前断裂带的形变监测。另外, 本文的反演数据仅有 4 年间的 GPS 数据, 其结果具有一定的不确定性, 仅供参考。

参 考 文 献

1 伍吉仓, 陈永奇. 顾及先验信息的模型参数反演——

澜沧-耿马地震位错模型参数的求定. 地壳形变与地震, 1997, 17(2): 27~32

2 Wu J C. Inverse Analysis of Crust Deformation Measurements [Ph. D Thesis]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 1999

3 Matsu R M, Jackson D D, Cheng A. Dislocation Model for Aseismic Crustal Deformation at Hollister, California. J. Geophys. Res., 1986, 91: 12 661 ~ 12 674

4 Okada Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space. Bull. Seismol. Soc. Am., 1985, 75: 1 135 ~ 1 154

5 Okada Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Fault in Half-space. Bull. Seismol. Soc. Am., 1992, 82: 1 018 ~ 1 040

6 许才军, 董立祥, 施 闯, 等. 华北地区 GPS 地壳应变能密度变化率场及其构造运动分析. 地球物理学报,

2002, 45(4): 497 ~ 506

591

7 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 1989

8 Jackson D D, Matsu' ura M. A Bayesian Approach to Nonlinear Inversion. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90: 581 ~

作者简介: 伍吉仓, 副教授, 博士。研究方向为地球动力学。主要研究成果: 大地测量数据反演理论与方法。

E-mail: jcwu@mail.tongji.edu.cn.

Negative Dislocation Model Parameters Inverted from GPS Data in North China

WU Jicang¹ XU Caijun²

(1 Department of Land Surveying and Geo-Infomatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai, China, 200092)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: In this paper, the data obtained by three GPS campaigns in 1995, 1996, and 1999 in North China have been used to study the intraplate tectonic block movement model in this area. By Bayesian inversion method, negative dislocation distribution on three main fault zones and individual relative movement between four intraplate tectonic blocks has been obtained based on the GPS data. Accordingly, the intensity of fault lock has been distinguished and the fault with biggest possibility of potential earthquake has been pointed out. The obtained negative dislocation values on the Front Taihang Mountain Fault are (-5 ± 2) mm/a in tensile component and (2 ± 2) mm/a in both strike and dip component, which indicate that this fault suffers the pull apart tectonic movement. On the Tangshan-Ninghe Fault, the obtained negative dislocation values are (-3 ± 3) mm/a in dip, (-2 ± 2) mm/a in tensile and (-1 ± 3) mm/a in strike, which indicates that the east part of this fault still have upward movement. On the Zhangjiako-Beipiao Fault, the obtained negative dislocation values are (-4 ± 2) mm/a in strike, (0 ± 2) mm/a in dip, and (1 ± 2) mm/a in tensile, which indicate that this fault has sinistral strike movement. According to the inversion results, the southern part of the Zhangjiako-Beipiao Fault suffers the pull tectonic movements caused by the recent upward movement at the east part. The pull tectonic movements are almost totally blocked on the Front Taihang Mountain Fault. So the Front Taihang Mountain Fault is a potential earthquake source, more crustal deformation monitoring work should be applied in this area.

Key words: fault; dislocation model; inversion

About the author: WU Jicang, associate professor, Ph D. His research fields include geodesy and geodynamics. His typical achievements are theories and methodology of inverse analysis of geodetic data.

E-mail: jcwu@mail.tongji.edu.cn