

文章编号: 0253-3782(2006)06-0596-07

用钻孔应变资料反演同震应力 触发断层活动^{*}

邱泽华^{1,†} 阚宝祥¹ 唐 磊¹ 张超凡² 宋 茅¹

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

2) 中国北京 100049 中国科学院研究生院

摘要 沿着同震应力触发的思路, 提出了利用钻孔应变观测记录的同震应变阶反演同震应力触发断层活动的方法。这种反演是在对当地断层活动有比较清楚的了解的基础上, 依据位错理论进行的。用遗传算法进行这种反演可以在进行全局搜索的同时大大提高计算效率。对算法和程序的有效性检验以及对各影响参数的分析, 可以进一步保证反演结果的可靠性。考虑到实际地质构造的复杂性, 这样的反演结果可能反映的是当地被触发的断层活动的主要影响或综合效果。作为尝试, 对昆仑山口西 $M_{\text{S}}8.1$ 地震触发的北京地区断层活动进行了反演。

关键词 地震应变阶 应力触发 反演 位错 遗传算法 昆仑山口西地震

中图分类号: P315.72⁺7

文献标识码: A

引言

地震触发问题多年以来一直是地震学的研究热点, 至今已经有很多报道(例如 Harris, 1998; 石耀霖, 2001; 万永革等, 2002; 韩竹军等, 2003)。在对远距离地震应力触发问题的研究中, 我们根据对钻孔应变仪观测的一些典型地震的应变阶的分析结果, 提出了大地震可能触发远处的同震断层活动(邱泽华, 石耀霖, 2003, 2004)。我们对中国钻孔应变台网观测到的2001年昆仑山口西 $M_{\text{S}}8.1$ 大地震的应变阶资料进行了分析。结果表明, 众多观测值与理论值不符; 北方地震较活跃地区的很多台站观测到异常大的应变阶, 而南方构造运动较不活跃地区的台站虽然也观测到地震波动, 但是应变阶不明显。我们由此推断, 地震的触发作用对远距离地区的实际地震应变变化具有重要影响。我们还对昌平台3套不同钻孔应变仪观测的1998年和1999年的两次张北地震与1999年的大同地震的资料进行对比分析。结果表明, 断裂带的分布对实际地震应变变化有直接影响。我们进一步推断, 观测到的异常大的地震应变阶可能是地震触发了当地的断层活动的表现。我们还举出了 Fialko等(2002)的 InSAR 观测结果和 Marone(2000)关于地震使地块“松动”的论述作为佐证。

最近, 同震应力触发断层活动已经被完全证实(West *et al*, 2005)。在2004年苏门答腊海啸地震发生过程中, 远在数千公里外的美国阿拉斯加 Wrangell 山的短周期地震仪记录了一系列(14次)微震活动。有趣的是, 它们与宽频带地震仪记录的该海啸地震的比较大

* 国家自然科学基金(40374011)和地震科学联合基金(1040037)资助。

2006-04-03 收到初稿, 2006-08-21 决定采用修改稿。

† 通讯作者。E-mail: qzhhb@163.com

的面波波峰非常吻合, 使人确信是地震波触发的. West 等(2005)认为, 同震应力触发断层活动应该具有普遍性.

既然确实存在同震触发的断层活动, 那么又该如何深入了解这种断层活动? 实践表明, 用台站观测资料反演地震过程是地球物理学研究中普遍使用的方法. 用测震资料可以开展这种研究, 用钻孔应变观测资料也可以开展这种研究. 本文提出了利用钻孔应变仪观测的同震应变阶资料反演这种断层活动的方法. 北京地区钻孔应变台站比较多, 人们对断层活动的调查也比较全面深入. 作为尝试, 我们对 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 $M_s 8.1$ 大地震对该地区同震触发的断层活动进行了反演.

1 反演的理论和算法

1.1 位错理论

当一条断层滑动时, 其周围应变场就会变化. 对于涉及断层的应变场正演或反演问题, 线弹性位错理论提供了有力的工具(Okada, 1985, 1992). 在一些产生了广泛影响的研究中, 例如在解释 InSAR 观测断层形变图象方面(Massonnet *et al*, 1993), 还有在应力转移以及地震应力触发分析方面(Hill *et al*, 1993), 位错理论都是研究人员的首选工具.

线弹性位错理论用半无限空间均匀介质中的矩形位错平面来模拟断层, 可以根据位错来求解应变场的变化. 在反演问题中, 已知的是地面应变变化, 待求的是断层情况. 如果该断层的各种几何参数已知, 那么我们就可以用对应变场的观测资料反演断层的滑动(位错). 更一般地, 如果对地面应变变化有足够精确的观测资料, 那么还可以将断层的各种几何参数一起反演出来. 当断层不只一条时, 由于问题是线性的, 同样可以进行反演.

在本文的具体问题中, 已知条件是地面一些观测点的应变变化, 还有断层的大体产状、性质以及分布范围, 待求的是断层的滑动. 除本地断层活动的贡献外, 应变变化还受到激发地震断层活动的影响. 因为激发地震发生在很远的地方, 所以其影响可以用一个均匀分布的背景应变变化来代表. 我们用各观测点观测值与理论值之差的平方和作为目标函数, 反演结果就是使之最小的结果.

1.2 遗传算法

复杂的地球物理的反演问题通常是通过搜索来找到解的. 传统的搜索方法包括极值法、枚举法和随机(蒙特卡罗)法. 3 种方法各自的缺点是: 极值法要求高; 枚举法计算量大; 随机法无序可寻. 我们采用的近年来发展起来的遗传算法(石耀霖, 1992; 石耀霖, 金文, 1995), 是基于进化论和遗传学的一种搜索方法. 与传统搜索方法相比, 其优点是, 仅利用目标函数而不需要其导数, 搜索范围具有全局性、有序可寻、效率比较高.

遗传算法把问题的解表示成“染色体”(二进制编码的串). 在执行遗传算法之前, 给出一群“染色体”, 即假设解. 按适者生存的原则, 从中选择出较适应环境的“染色体”进行复制, 再通过交配、变异产生更适应环境的新一代“染色体”群. 这样, 一代一代地进化, 最后会收敛到最适应环境的一个“染色体”, 它就是问题的最优解.

遗传算法中的基本概念有种群大小、目标函数、繁殖、交配和变异等. 目标函数用来判别上一代解的优劣, 根据目标函数选择并繁殖下一代, 对于选中繁殖下一代的个体, 随机地进行交配与变异以使搜索具有全局性. 种群大小与交配、变异的概率都会对算法产生影响. 根据有关文献和我们的经验, 在本计算中, 种群大小取为 64, 交配概率为 0.85, 变

异概率取为 0.15. 在遗传算法中, 将各搜索区域分为 2^n 段, n 称为分段系数. 反演一轮进行 2 000 步搜索, 搜索个体总数为 $2\ 000 \times 64$.

2 实例反演模型

2.1 观测资料

北京及其附近地区有相对比较密集的钻孔应变观测台网. 根据我们收集到的资料, 共有怀来、昌平、东三旗、大兴、宝坻、北大分校和涞水等 7 个数字化钻孔体应变台站, 记录到可靠的 2001 年昆仑山口西 $M_{\text{S}}8.1$ 大地震的同震变化. 其中, 2 个台站(怀来台和昌平台)使用的是 TJ 型体应变仪(苏恺之等, 1987), 数据由邱泽华和石耀霖(2004)给出; 其余 5 个台站使用的是 Sacks-Evertson 型体应变仪(Sacks *et al*, 1971), 数据由张凌空(2005)给出. 根据邱泽华和石耀霖(2003, 2004)的研究结果, 这些观测同震应变变化, 在幅度和符号上, 都无法用昆仑山口西 $M_{\text{S}}8.1$ 大地震的发震断层错动产生的应变场变化来解释.

2.2 断层参数

我们对北京地区的活断层活动研究现状进行了全面的调研(焦青, 邱泽华, 2006). 本地区第四纪活动断层与第四纪凹陷的展布密切相关, 主要以北东和北西走向为主, 包括较大规模的断层 11 条, 其中北东走向 8 条, 北西走向 3 条. 目前, 较有普遍性的看法是, 全新世仍然活动的断层主要是黄庄—高丽营断层(北东段)和南口—孙河断层. 其中, 南口—孙河断层分为北西和南东两段: 北西段向北东倾, 南东段向南西倾. 本研究就是要尝试反演在昆仑山口西地震过程中这两条断层的同震触发活动. 反演模型所用参数见表 1.

表 1 中的参数分为两类: 第一类是比较确定的, 包括中点位置(经、纬度)和走向, 在反演中不变; 第二类是误差可能比较大的, 包括倾角、滑移角、长度和深度, 在反演中将以表 1 中的值为参考给定一个变化范围, 搜索最优值.

表 1 北京地区全新世主要活断层参数

断层名称	中点经度/(°)	中点纬度/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑移角/(°)	长度/km	深度/km
黄庄—高丽营断层(北东段)	116.40	40.10	40	70	-90	132	15
南口—孙河断层北西段	116.30	40.20	130	70	-90	26	15
南口—孙河断层南东段	116.66	39.96	310	70	-90	54	15

2.3 反演程序的检验

在对实际问题进行反演之前, 我们用假想的情况检验了反演程序的正确性. 检验方法是先任意给定断层的所有参数和位错, 计算其应变场, 然后根据实际 7 个台站应该观测到的应变变化反演其中一部分参数(倾角、滑移角、长度、深度)和位错, 与给定的值进行比较. 分别检验了有一条断层、两条断层和 3 条断层的情况. 表 2 给出了当存在 3 条断层时的反演检验结果. 除个别数据外, 反演得到的倾角、滑移角、长度、深度以及位错与给定值符合得很好, 说明算法和程序都正确无误. 表 3 列出了给定断层位错计算的台站理论应变观测值与由反演结果得到的应变值的对比情况.

3 实例反演结果

我们利用表 1 的数据, 根据位错理论并结合遗传算法, 对 2001 年昆仑山口西 $M_{\text{S}}8.1$

表2 当存在3条断层时的反演程序检验结果

断层名称	参数	给定值	搜索范围	分段系数(n)	反演结果	相对偏差
黄庄—高丽营断层	倾角/(°)	70	60~80	10	62.6	-10.5%
	滑移角/(°)	80	70~90	10	78.2	-2.3%
	长度/km	150	140~160	10	145.0	-3.3%
	深度/km	30	20~40	10	30.0	0.0%
	位错量/cm	1.0	0~1.0	10	0.91	-8.5%
南口—孙河断层西北段	倾角/(°)	60	50~70	10	64.5	7.6%
	滑移角/(°)	70	60~80	10	77.3	10.4%
	长度/km	50	40~60	10	50.7	1.5%
	深度/km	20	10~30	10	18.9	-5.3%
	位错量/cm	0.8	0~1.0	10	0.72	-9.7%
南口—孙河断层东南段	倾角/(°)	80	70~90	10	84.7	5.9%
	滑移角/(°)	80	70~90	10	75.9	-5.1%
	长度/km	20	10~30	10	17.8	-11.0%
	深度/km	10	0~20	10	13.6	35.7%
	位错量/cm	0.5	0~1.0	10	0.63	26.3%

表3 台站理论面应变观测值与反演结果对比

单位: 10^{-9}

台站	怀来	昌平	东三旗	大兴	宝坻	北大分校	涞水
理论值	2.3	2.0	12.6	46.1	-8.2	29.4	-6.4
反演值	1.0	-0.3	14.9	44.3	-7.0	30.5	-6.9

表4 实例反演结果

断层名称	参数	搜索范围	分段系数(n)	反演结果
背景场	$e_x/10^{-9}$	-1.0~1.0	8	0.94
	$e_y/10^{-9}$	-1.0~1.0	8	0.99
	$e_{xy}/10^{-9}$	-1.0~1.0	8	-0.003 9
黄庄—高丽营断层	倾角/(°)	60~80	5	70.3
	滑移角/(°)	-70~-110	10	-80.9
	长度/km	30~50	5	49.4
	深度/km	5~25	10	15.3
	位错量/cm	0~0.5	5	0.45
南口—孙河断层西北段	倾角/(°)	60~80	5	62.6
	滑移角/(°)	-70~-110	5	-91.9
	长度/km	16~36	8	31.3
	深度/km	5~25	8	15.0
	位错量/cm	0~0.5	5	0.48
南口—孙河断层东南段	倾角/(°)	60~80	5	60.6
	滑移角/(°)	-70~-110	10	-73.3
	长度/km	44~64	8	54.1
	深度/km	5~25	10	22.5
	位错量/cm	0~0.5	8	0.42

大地震对北京地区主要全新世(Q_4)活断层的同震触发活动进行了反演。结果(表4、表5)表明,此次地震期间,各断层可能出现了不同程度的活动。其中北西走向的南口—孙河断层北西段活动较强,北东走向的黄庄—高丽营断层(北东段)活动次之,而南口—孙河断层

南东段活动较弱. 它们的共同作用决定了该地区整体同震变化应变场的基本特征. 这里将观测值近似当作面应变处理, 以膨胀为正.

表 5 台站面应变观测值与计算值对比

单位: 10^{-9}

台站	怀来	昌平	东三旗	大兴	宝坻	北大分校	涞水
观测值	6.1	-25.6	-7.9	10.8	9.3	-42.7	5.2
计算值	12.0	-23.0	-6.7	34.0	45.0	-55.0	27.0

4 讨论和结语

根据我们以前的研究结果(邱泽华, 石耀霖, 2003, 2004), 表 5 给出的观测同震应变变化, 无论是在幅度上还是在符号上, 都无法用昆仑山口西 $M_s 8.1$ 大地震的发震断层的错动来解释, 而用该地震触发了本地的断层活动来说明则是合理的. 假设这种同震应力触发只对活断层起作用, 我们提出了针对活断层分布建立模型进行反演的方法, 并尝试性地对昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震触发的北京地区断层活动进行了反演.

我们还对泊松比以及各断层倾角、滑移角、长度和深度等参数变化的影响分别进行了分析. 结果表明, 泊松比变化(0.1~0.5)的影响可以忽略; 在搜索范围内, 各断层参数的变化一般只比较显著地影响其附近的观测点, 而对远处观测点的影响不大; 相比之下, 位错量在决定各观测点应变大小方面起了主要作用.

需要指出的是, 地壳中存在大量不同尺度、形状各异、位错不均的断层, 简单的模型无法准确反演其真实情况. 这可以从各台站观测值与反演值的差(表 5)看出来. 可以这样认为, 我们的反演结果可能反映了所有被触发的断层活动的主要影响或综合效果. 如果昆仑山口西 $M_s 8.1$ 大地震是左旋走滑断层错动造成的, 那么北京地区的面应变变化应该是膨胀的, 与反演预测的背景值符号一致, 并且大小也相当(邱泽华, 石耀霖, 2004). 昆仑山口西 $M_s 8.1$ 大地震发生在本地区西边, 因此, 南口—孙河断层北西段受到比较大的影响, 黄庄—高丽营断层(北东段)次之, 南口—孙河断层南东段受到的影响比较小, 一般说来也是合理的. 因为首先对断层的各种参数人们就无法给出一个可靠的误差, 而理论模型与实际情况的出入就更难以估量, 所以, 在目前条件下, 对这种反演进行误差分析是没有说服力的. 这种困难在地球物理反演(例如震源过程反演)中普遍存在. 至于算法带来的偏差, 由反演程序的检验结果(表 2)可以看出其大致范围.

同样需要指出, 本研究观测台站只有 7 个, 而被反演参数比较多. 因此, 反演结果具有很大的不确定性. 中国目前有数字化钻孔应变观测台站 30 多个, 有分钟值观测资料, 可以用于研究地震同震变化.“十五”期间, 钻孔应变观测台站还将大量增加, 达到 100 个左右. 如果一个地区正常工作的台站密度更高, 并且采样率也进一步提高, 那么我们就有可能更好地通过分析同震应变阶变化来了解当地的同震触发断层活动情况. 这种反演将为断层活动性研究和地震预报研究提供新的手段.

感谢石耀霖院士和马瑾院士对本项目研究的关心和指导, 感谢审稿人对本文提出的宝贵的修改意见.

参 考 文 献

- 韩竹军, 谢富仁, 万永革. 2003. 断层间相互作用与地震触发机制的研究进展[J]. 中国地震, **19**(1): 67~76
- 焦青, 邱泽华. 2006. 北京平原地区主要活动断裂带研究进展[A]. 见: 中国地震局地壳应力研究所编. 地壳构造与地壳应力文集(18)[C]. 北京: 地震出版社, 72~84
- 邱泽华, 石耀霖. 2003. 地震造成远距离应力阶变的观测实例[J]. 中国科学(D辑), **33**(增刊): 60~64
- 邱泽华, 石耀霖. 2004. 观测应变阶在地震应力触发研究中的应用[J]. 地震学报, **26**(5): 481~488
- 石耀霖. 1992. 遗传算法在地球物理中的应用[J]. 地球物理学报, **35**(增刊): 367~371
- 石耀霖, 金文. 1995. 面波频散反演地球内部构造的遗传算法[J]. 地球物理学报, **38**(2): 189~198
- 石耀霖. 2001. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考[J]. 地震, **21**(3): 1~7
- 苏恺之, 刘瑞民, 裴玉珍, 等. 1987. 液位型和液压型体积式应变仪[A]. 见: 国家地震局地壳应力研究编. 地壳构造与地壳应力文集(1)[C]. 北京: 地震出版社, 131~135
- 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 2002. 地震应力触发研究[J]. 地震学报, **24**(5): 533~551
- 张凌空. 2005. 首都圈体应变观测余震能力观测报告[R]. 见: 张宝红主编. 钻孔应变台站变化观测报告文集[C]. 北京: 地震出版社, 1~34
- Fialko Y, Sandwell D, Agnew D, et al. 2002. Deformation on nearby faults induced by the 1999 Hector Mine earthquake [J]. *Science*, **297**: 1 858~1 862
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard [J]. *J Geophys Res*, **103**(B10): 24 347~24 358
- Hill D P, Reasonberg P A, Michael A, et al. 1993. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake[J]. *Science*, **260**: 1 617~1 623
- Marone C. 2000. Earthquake science: Shaking faults loose[J]. *Nature*, **408**: 533~535
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. *Nature*, **364**: 138~142
- West M, Sánchez J J, McNutt S R. 2005. Periodically triggered seismicity at Mount Wrangell, Alaska, after the Sumatra earthquake[J]. *Science*, **308**: 1 144~1 146
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **75**: 1 135~1 154
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **82**: 1 018~1 040
- Sacks I S, Suyehiro S, Evertson D W, et al. 1971. Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps[J]. *Proc Met Geophys*, **22**: 195~207

INVERSION OF COSEISMIC STRESS-TRIGGERED FAULT SLIPS USING BOREHOLE STRAINMETER OBSERVATIONS

Qiu Zehua¹⁾ Kan Baoxiang¹⁾ Tang Lei¹⁾ Zhang Chaofan²⁾ Song Mo¹⁾

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Following the idea of coseismic stress-triggering, coseismic strain steps recorded by borehole strainmeters are used to study coseismic stress-triggered fault slips. The inversion is carried out based on the theory of dislocation and a well understanding about the local faults. Genetic Algorithm is applied to raise the efficiency of searching a best solution among all possibilities in this kind of inversion. A testifying check of the program and analyses of each parameter's influence further enhances the reliability of inversion results. Taking complexity of geological structure into account, the inversion results should be regarded as the predominant property or a comprehensive effect of triggered local faults' activities. As an attempt, we inverse the assumingly active faults' slips triggered by the $M_{\text{S}} 8.1$ Kunlun Mountain earthquake over Beijing area.

Key words: seismic strain step; stress triggering; inversion; dislocation; genetic algorithm (GA); the Kunlun Mountain earthquake