

地壳变形异常的 AF 综合检验方法与 在地震预报中的应用*

牛安福 李旭东 吴 静 柯丽君

(中国武汉 430071 中国地震局地震研究所)

摘要 讨论了地壳变形的非稳态过程模型及 F 异常综合检验的理论, 给出了异常变形的定量参数与异常识别准则, 并对数值模拟序列进行了异常检测. 对多维地形变化的结果也进行了异常综合检测实践, 并讨论了 AF 异常与地震能累积释放之间可能存在的关系. 其检验结果表明, AF 可以对多个含有高频和阶跃型等特征的复杂序列进行异常合成和异常程度的描述. 所识别结果具有一定的可靠性和稳定性.

关键词 非稳态模型 AF 异常检验 地震

引言

利用地壳变形观测进行地震前兆研究和检测在国际上被认为是地震预报最有希望的重要手段之一. 近 20 多年来, 我国学者在这一领域取得了一批有重要价值的研究成果, 同时也提出了面临解决的一系列基本问题. 如现行的两倍中误差法仅体现了极少数点(5%)的异常信息, 其信度是难以保障的, 且即使在正常时段也会出现异常时刻; 因变形测量最终要反映测点及其周围变形或接近破裂时的信息, 测点上的多种观测所含的信息不等于各个观测信息的简单叠加, 现有异常信息合成方法多数是建立在相互独立条件下的, 但事实上, 各观测序列间存在一定的相关性. 而相关性对异常信息合成具有决定性的影响. 因此, 完善信息合成方法, 并提出定量的判据变得尤其重要.

地震孕育过程所表现出的特征被认为是较复杂的. 原因是多方面的, 其中各种方法同时应用所引起的多解也是使异常特征复杂化和低信度的主要原因之一. 而提高异常检测信度是地震预报研究最基本的和最迫切的任务, 其检测信度直接影响着预报的科学性和合理性, 甚至影响着能否利用地壳变形观测进行地震研究和预测这一根本认识上. 因此, 以较合理完善的科学方法对各种观测进行较合理的异常检测, 并在可能的条件下建立与地震的联系, 而不仅是为地震而寻找异常等, 这是解决问题的根本出发点. 异常的形式有多种, 如动态过程中出现高频振荡时是异常, 动态过程中出现相对平静也可作为异常的一种形式, 如大震前地震活动的平静(Sobolev, 1993); 潮汐因子的震前减熵(牛安福, 1991, 1995). 因此, 有必要提出一参数可以对异常特征进行综合描述.

* 地震科学联合基金(197066)和科技重点攻关(95-04-05-03-01; 96-913-01-01-05)资助.
1997-05-26 收到初稿, 1997-11-04 收到修改稿并决定采用.

近些年来,多种物理参数方法在进行地震预报实践中获得了较为广泛的应用,但异常判别准则仍然是值得争论的焦点.如加卸载响应比若以 $0 < Y < 1$ 作为异常准则(宋治平等, 1995),则卸载响应比 $1/Y$ 在所谓的“正常域”内是非稳定的.这样一些事实表明,现行一些方法和判别准则应用于地震意义上的异常检测时,尚存在一定的缺陷.克服这一缺陷的根本出路在于对“变形”与“异常变形”等给出科学的定量描述.

本文是该方向研究的一个尝试. AF 异常综合检测方法是在 F -检验(Fisher 检验)和动态场分析系统(Gitis *et al.*, 1995)研究的基础上完善形成的,它可较广泛地对单点或局部多种变形观测进行综合的异常检测. AF 具有与变形“势”相同的意义,以其作为异常强度的判据是十分合理的;它将各种观测均将确定性变形置为用 $[0, 1]$ 描述的稳态过程,而稳态域外 AF 又具有表征某点变形异常水平的涵义.

1 非稳态过程模型与 F 检验

任一自然过程时常与平稳和非平稳、线性和非线性、异常和正常、确定和随机等特征相联系.为便于描述,可将变形动态过程 X_t 分解为确定性 D_t 和随机性 S_t 两部分

$$X_t = D_t + S_t \quad (1)$$

$$D_t = A_t + V_t + NL_t \quad (2)$$

$$S_t = B_t + H_t + R_t \quad (3)$$

式中, A_t , B_t 为平稳或稳定的, V_t 为线性项, NL_t 为低阶非线性项(阶数在 0 和 2 之间), H_t 为高阶非线性项, R_t 为高频随机振荡.确定性部分 D_t 通常被接受为正常动态,异常则包含在随机中.由于在 D_t 和 S_t 中都含有非稳态项,为检测异常信息 H_t 和 R_t ,利用差分可将 D_t 化为线性或平稳,而 H_t 和 R_t 仍保持原有特性.以下 X_t 为 d 维差分序列向量.选择过程的基准时段 $N_1 - N_2$, $n_1 = N_2 - N_1 + 1$;该时段内的均值为向量 X_0 和协方差阵 C_0 .

$$X_0 = \Sigma X_i / n_1$$

$$C_0 = \Sigma (X_i - X_0)^T \cdot (X_i - X_0)$$

现时段 $L_1 - L_2$, $n_2 = L_2 - L_1 + 1$, 均值向量 X_1 和协方差阵 C_1

$$X_1 = \Sigma X_i / n_2$$

$$C_1 = \Sigma (X_i - X_1)^T \cdot (X_i - X_1)$$

并以此构造协方差阵

$$C = (C_0 + C_1) / (n_1 + n_2 - 2) \quad (4)$$

定义 Makhalanobis 距离

$$D^2 = (X_1 - X_0)^T \cdot C^{-1} \cdot (X_1 - X_0)$$

对 D 标准化后得到

$$F = (n_2 - n_1 - d - 1) \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot D^2 / d \cdot (n_1 + n_2 - 2) \cdot (n_1 + n_2) \quad (5)$$

统计量 F 服从 Fisher 分布 $F(d, n_2 + n_1 - d - 1)$ (Gitis, 1995). 若给定一信度 $p = 95\%$, 可得到一置信阈值为 F_p : 若 $F > F_p$ 时, 接受为非稳态异常; 反之, 为正常. 由统计学可导出 F 分布的一般特征, 当 $N \rightarrow \infty (N > 120)$, $F_p(d, N) \rightarrow F_p(d)$; 且 d 越大, $F_p(d)$ 越小; $F_p(d)$ 反映了系统稳定状态的极限值.

定义

$$AF = F / F_p(d) \quad (6)$$

并由此可导出

$$AF = a \cdot (X_1 - X_0)^T \cdot C^{-1} \cdot (X_1 - X_0) \quad (7)$$

由于 C 是半正定或正定矩阵, 其广义逆阵是存在的, 且仍是半正定或正定型, C^{-1} 可进一步分解为 $C^{-1} = A^T A$, 代入

$$AF = a[AX_1 - AX_0]^T \cdot [AX_1 - AX_0] \quad (8)$$

它表示独立化后的相关序列, 偏离稳定态的“势”(被理论值标准化). 由于定义稳定态 $0 < AF < 1$, 所以 AF 又表示了异常强度大小.

2 AF 用于数值模拟异常检测

由于实际观测序列可由 Chebyshev 多项式进行模拟, 使用 Chebyshev 多项式可生成 4 个含高频振荡(I)、平静和阶跃(II)和加强干扰(III)类型的序列. 序列的基本部分由两阶 Chebyshev 多项式和一不同幅度的长周期脉动构成, 虚框外各曲线均为同一函数(如图 1). 由序列 1, 1 和 2, 1 至 3 和 1 至 4 可计算出 4 个 AF 序列(图 2a~d).

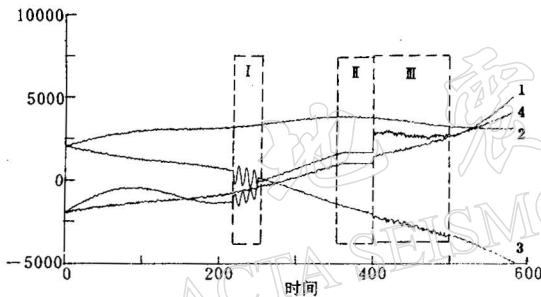


图 1 模拟序列. I 为高频扰动; II 为平静和阶跃; III 为降低信噪比

检测结果表明, 在基准时段内, AF 值在 $0 \sim 1$ 内是稳定的; 在扰动 I~II 间均较为接近于 0, 且极为稳定; 在 III 之后, 由于随时间非线性的增强, AF 值出现不稳定, 且伴随有 $AF > 1$. 在扰动段 I 和 II 内, 较显著的异常通过 AF 值显示出来. 相比较而言, 信噪比的影响要小得多. 由 AF 异常的幅度可知, 合成的维数愈高, 异常特征愈稳定.

3 地壳变形异常的 AF 检测

由于地壳变形观测仪器均安置在地壳的浅部, 为监测地壳深部或与区域的构造运动, 对各种变形观测最终都应归于各测点的变形信息. AF 在物理“势”的意义下, 不依赖观测种类和方向, 具备了反映观测点及其附近异常特征的能力.

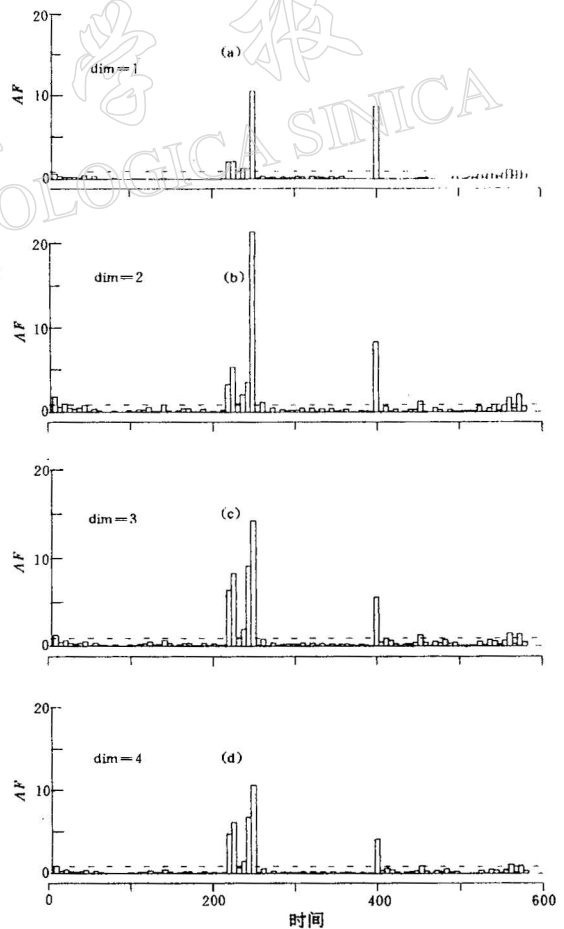


图 2 AF 异常综合检测结果(基准时段 1~219, 滑动窗长度 6)

异常检测的任务是力求捕捉与地震相关的信息或前兆. 由于观测是在自然条件下进行的, 各方面的影响均将影响着观测和检验结果. 尽管可以通过滤波方法将其滤除, 但何种条件下滤波、滤波的意义以及与地震的联系等, 特别是在多种观测出现相异的诊断结果时, 如何对该点的变形作出异常判定等, 这些都是引起问题多解和复杂化的原因. 因此, 值得说明的是, 通过自然观测在一点检测出“异常”是难免的, 尽管有时含有与地震有关的信息, 但不能将其等同于地震前兆. “异常”与“地震前兆”在内涵和外延上可能存在颇大的差别.

本文所提的“异常”是基于原始观测基础上的, 未经滤波等预处理, 其发生原因可能是多方面的, 它仅给出了各点的异常变形状态.

泰安地变形基准台历年来潮汐观测精度都很高, 在 1983 年菏泽地震中有较显著的异常出现(吴翼麟, 李旭东, 1991). 近些年, 非潮汐观测时时有不稳定, 也难以寻找其原因. 这里, 应用 AF 综合检验方法对异常进行了定量分析.

该测点的一次显著异常发生在 1989 年 2~4 月间, 最大异常量为 55 倍. 经查实, 在此期间, 记录仪器反复出格并多次标定, 这是原因之一; 另外, 对该点周围 300 km 内的地震活动进行分析发现, 在异常观测持续期间, 地震活动是极为平静的; 而在其后的一段时间内, 小震群较为活跃, 这可能是原因之二. 不排除原因一是原因二的结果. 另外, 1994 年 4 月出现 $AF > 2.0$ 异常一次, 1995 年 9 月发生苍山地震($M_s = 5.2$), 震中距 $D = 180$ km. 图 3b 中所标震级 M 为当量震级, 它表示在某时间段和有限区域内地震能释放的大小(牛安福等, 1995).

$$\begin{aligned} \text{由} \quad M_s &= 1.13M_L - 1.08 & \lg E &= 1.5M_s + 4.8 & M_L &\geq 5.0 \\ \text{得} \quad M &= M_0 + \lg[10^{1.695(M_i - M_0)}] \end{aligned}$$

永胜台变形测量的结果则较为复杂, 两个方向倾斜的年变化和非平稳性表现尤为突出. 图 4 给出了该台变形 AF 检测结果和该台周围地震序列.

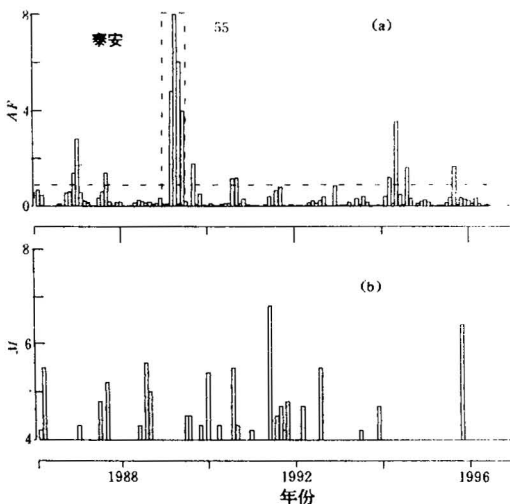


图 3 泰安台变形 AF 异常(a)与周围地震(b)

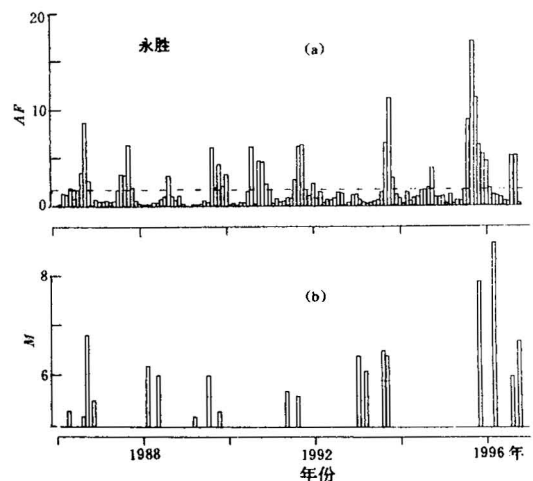


图 4 永胜台变形 AF 异常(a)与周围地震(b)

4 由 *AF* 描述变形异常以及在地震预报中的意义

地震过程是震源体周围或块体应变能(或物理势)积累和释放过程. 在不同的孕震阶段有不同的前兆表现, 如“源兆”和“场兆”. 由于变形是永恒的, 变形积累到一定程度出现地震破裂、慢滑动直至地震发生是短时行为, 所以, 捕捉地震短期(震前 12~3 个月)的“场兆”被认为是地震预报的重要途径. 由于 *AF* 具有与物理势相同的涵义, 其异常自然包括有与地震相关的异常, 即前兆. 它意味着不是所有的异常都为前兆. 限于观测能力和采样间隔, 也不是所有地震震前都能检测出变形前兆. 这应是地震研究的科学认识观. 所以, 我们研究的重点应是如何提高异常的检测信度, 并缩小异常与前兆之间的差距.

表 1 列出了 *AF* 异常量与地震间的数值关系. 为便于分析, 以异常后发生地震震群(以 *S* 表示)的期待时间 $t < 6$ 个月、 $M > 6.0$ 、震中距 $D < 300$ km 为地震的基本参数; 以 $AF > 3.0$ 作为与地震相关的异常, 个别台选择 $AF > 2.0$.

表 1 地壳变形 *AF* 异常与地震

台站	<i>AF</i> 异常时间	幅度	发震时间	震级 (<i>M_L</i>)	震中距 <i>D</i> /km	合成震级 (<i>M</i>)	期待时间 <i>t</i> /月
永胜	1986-07	9.0	1986-08	5.6	80	6.1	1
	1987-09	6.5	1988-01	5.7	50	6.2	4
	1989-09	6.2					
	1991-09	6.8	1992-01	5.7	50	6.4	4
	1993-08	11	1993-08	5.8	140	6.5	0
	1995-07~09	17	1995-10	6.7	190	7.9	1(<i>S</i>)
西昌			1996-02	7.2	80	8.7	5
	1986-05	2.0	1986-08	5.6	120	6.1	3
	1989-06	3.0	1989-06	5.6	140	6.0	0
	1989-11	8.0					
昭通	1993-01~02	9.0	1993-02	5.7	160	6.0	0
			1993-08	5.8	170	6.4	6
弥渡	1987-01	5.0					
	1988-01~03	20	1988-04	5.6	170	6.0	1
	1989-02	4.0	1989-06	5.3	120	6.0	4
	1986-09	5.0	1986-09	5.6	180	6.1	0
泰安	1992-07	3.0	1992-12	5.7	70	6.4	5
	1994-06	3.0					
	1996-06	3.0	1996-07	5.6	110	6.0	1
			1996-09	6.0	160	6.7	3
	1989-02~04	(55)	1989-07	4.1	120	4.9	<i>S</i>
			1989-12	4.8	220	5.7	
安	1994-04	3.2	1995-10	5.2	180	5.2	>6

表 1 给出了滇西地区变形观测对地震的反映能力和 *AF* 作为异常判据的检验结果. *AF* 异常在这里描述了单点变形异常的程度, 它包括了各个方向变形的综合信息, 所反映的异常不依赖人为参数设置. 与地震的联系是单方面的, 这里仅给出了异常条件下, 每个月内地震释放能量间的直接联系. 由于观测网密度和监测能力的局限性, 有时亦发现有震而无

异常的情况,但这不应影响本方法的合理性和稳定性.相反,它将为正确认识地震前兆的时空特征分布和寻找其规律性提供了可能.表1和图3,4表明:首先,在单点上,异常幅度与其后地震能的累积释放是相关的;其二,异常出现后,在设定的地震参数内多数伴有地震发生.异常出现后期待时间为零的台站还应进行短临异常分析.

5 讨论与结论

由 AF 导出过程和数值模拟及对正常变形观测的分析结果,可证实 AF 异常综合检验方法有许多应用的优越性:① 将确定性变形置为用 $[0, 1]$ 描述的稳态过程;② 对异常在物理“势”意义下进行定量化.理论上,当某地区周围地震活动增强时,该区作为地震空区容易形成“势”的积累,从而使 AF 异常表现明显.当某地区地震活跃时,变形“势”得到释放, AF 异常趋于消失或减小.事实上也基本是这样;③ 为利用多种变形观测进行异常综合诊断给出了较为可靠的定量判据.

参 考 文 献

- 牛安福, 1991. 阳高 6.1 级地震前倾斜潮振幅因子瓣的变化. 地壳形变与地震, 11(2): 1~7
- 牛安福, 1993. 长周期形变与地震. 地震学报, 15(Supp): 560~564
- 牛安福, 吴翼麟, 陈德福, 等, 1995. 大同地震及其异常倾斜场. 地震学报, 17(4): 499~504
- 吴翼麟, 李旭东, 1991. 定点形变方法多指标判别地震异常的追踪分析. 地壳形变与地震, 11(1): 1~8
- 宋治平, 陈学中, 尹祥础, 1995. 加卸载响应比时空演变及预测检验. 震情研究, (6): 95~106
- Gitis V, Jurkov E, Osher B, *et al*, 1995. Dynamic fields analysis system. *Collections of Eurocenter of Geodynamics and Seismology*. Luxembourg: Grand-Duchy of Luxembourg. 129~140
- Sobolev G A, 1993. On the earthquake prediction. *Science, Moscow*. 92~156(in Russian)