

地倾斜前兆异常的模糊分析^{*}

段 华 琛

(上海地震局)

提要 本文用隶属函数和模糊聚类分析对泰安台和余山台地倾斜矢量形变异常序列和当地地震序列进行统计研究, 计算分析结果对于在统计范围内判别有无地震发生以及估计将会发生的地震震级大小, 得到了预期的结果。

关键词: 震前异常, 地倾斜, 隶属函数, 阈值, 模糊聚类分析

一、前 言

对前兆资料的观测和研究, 由于台站所处的位置、环境地质地理条件及各种干扰影响, 前兆信息的表现无论是从图形还是从数值上都有较大的模糊性^[1]。例如我们所研究的地倾斜资料, 由于仪器灵敏度高易受干扰影响, 各类异常本身变化多种多样。对于在区域应力场增强过程中附加应力场作用所可能产生的记录曲线迴折异常, 我们从余山台短短的四年资料中可以找到和迴折形变异常图象相似的干扰图象, 如果不是从观测记录手册了解当时实际情况(天气、工作、干扰等情况), 难以把这二种图象区别开来。倾斜速率变化很容易受到各种噪声影响, 在干扰背景中很难确定由形变所产生的速率变化异常何时开始、何时结束, 即速率变化所反映的跟应变有关的量更是难以确定。对于地震前反映前兆形变(应变)的各种倾斜异常难以准确地进行定量计算, 也即倾斜异常所反映的前兆形变(应变)实际有多大, 难以准确计算度量, 所以倾斜异常所反映的形变量值就有一定的模糊性。我们用模糊数学方法研究倾斜形变信息和地震的关系, 在用泰安台和余山台倾斜资料及该两地区地震资料的分析计算研究中已得到初步的令人满意的结果。

二、倾斜形变异常变化和地震之间关系的判定

地倾斜观测主要目的是用以检测和监视地震前震源附近地区倾斜资料反映的形变前兆信息。如前所述, 由于倾斜形变异常表现的随机性, 由于地震前倾斜形变信息的模糊性, 我们采用反映倾斜形变异常强度的隶属函数来研究和判断倾斜形变异常和地震的关系。

我们知道在自然界如果有两种事物互相关联, 那么当一种事物出现时, 另一种事物相应出现的机率就高; 如果作为另一种事物预兆的事物多次出现的话, 那么该另一种事物出现的可能性(及强度)也就越大。根据这样的规律性我们可构造隶属函数。据统计地倾斜形变矢量异常共有四种情况, 打结、迴折、方向变化和速率变化。有时在一些形变异常出现以后跟

^{*} 地震科学联合基金资助课题

着有地震发生,有时在形变异常出现之后没有发生地震,也有时地震之前并不出现异常。各类异常和地震相关发生的概率是不同的,实际上这也说明它们各自形变异常前兆强度(跟受干扰程度有关)或者作为地震前兆的权重是不同的,综合考虑这些情况按如下形式建立隶属函数:

$$\mu_{AK} = \frac{\sum \alpha_{ik} A_i}{M + \sum \beta_{ik} A_i} \quad (1)$$

M 为倾斜形变异常类别数, A_i 为第 i 类形变异常的权系数,可由各台站倾斜形变异常序列和当地地震目录进行统计或由经验判定。 α_{ik} 为地震序列第 K 个地震前第 i 类形变异常出现的次数 C (或时段数),而式中

$$\beta_{ik} = \begin{cases} \alpha_{ik} - 1 & (\alpha_{ik} \geq 1) \\ 0 & (\alpha_{ik} = 0) \end{cases}$$

我们对1984、1985年泰安台及1983年以来佘山台倾斜形变异常序列(经对资料的调研和分析已尽可能地排除了其中的干扰)和统计范围内(500公里内7级、300公里内6级、200公里内5级及最大距离一般在五、六十公里范围内的小地震)的地震序列¹⁾作统计计算如下:

泰安地区(震中距 Δ 单位为公里,下同):

- | | | | | | | | | | |
|-------|----|----|-----------------------|---------------|--------|----|----|-----------|---------------|
| ①1984 | 03 | 05 | $M_5=1.5$ | $\Delta=66.2$ | ②1984 | 04 | 25 | $M_5=0.8$ | $\Delta=34.5$ |
| ③1985 | 02 | 24 | $M_5=1.8$ | $\Delta=56.2$ | ④1985 | 06 | 25 | $M_5=3.6$ | $\Delta=77.4$ |
| ⑤1985 | 07 | 11 | $M_5=3.3$ | $\Delta=77.4$ | ⑥1985 | 08 | 21 | $M_5=1.5$ | $\Delta=14.3$ |
| | | | 1.2 | | | | | | |
| ⑦1985 | 11 | 28 | $M_5=\frac{2.6}{2.8}$ | $\Delta=9$ | ⑧1985. | 12 | 09 | $M_5=1.4$ | $\Delta=55.5$ |
| | | | 1.8 | | | | | | |

上海地区:

- | | | | | | | | | | |
|-------|----|----|-----------|----------------|-------|----|----|-----------|---------------|
| ①1983 | 03 | 06 | $M_s=0.9$ | $\Delta=6$ | ②1983 | 08 | 04 | $M_s=0.6$ | $\Delta=41$ |
| ③1983 | 12 | 13 | $M_s=1.2$ | $\Delta=58$ | ④1983 | 12 | 08 | $M_s=1.1$ | $\Delta=58.0$ |
| ⑤1984 | 05 | 21 | $M_s=6.2$ | $\Delta=162.6$ | ⑥1984 | 10 | 10 | $M_s=0.8$ | $\Delta=49.3$ |
| ⑦1984 | 12 | 09 | $M_s=1.9$ | $\Delta=40.0$ | ⑧1985 | 01 | 06 | $M_s=2.4$ | $\Delta=64.1$ |
| ⑨1985 | 11 | 08 | $M_s=1.1$ | $\Delta=29.4$ | ⑩1986 | 02 | 06 | $M_s=1.8$ | $\Delta=58.4$ |
| ⑪1986 | 05 | 23 | $M_s=4.7$ | $\Delta=147.1$ | ⑫1986 | 06 | 11 | $M_s=2.4$ | $\Delta=65$ |

对泰安台、余山台倾斜资料所得到的形变异常序列进行统计, 各类形变异常权系数,

泰安台为: $A_1=0.333$, $A_2=0.700$, $A_3=0.364$, $A_4=0.470$

余山台为: $A_1=0.800$, $A_2=0.875$, $A_3=0.643$, $A_4=0.692$

按上述公式计算得到各次地震前倾斜形变异常的隶属函数,

泰安台为: $\mu_1=0.292$, $\mu_2=0.376$, $\mu_3=0.384$, $\mu_4=0.560$, $\mu_5=0.292$, $\mu_7=0.384$

余山台为: $\mu_1=0.752, \mu_2=0.552, \mu_3=0.552, \mu_4=0.552, \mu_5=0.856, \mu_7=0.334,$
 $\mu_8=0.552, \mu_{10}=0.552, \mu_{11}=0.814, \mu_{12}=0.334,$

其中个别地震的形变异常隶属函数为 0，据分析这可能跟应力场及台站和震中相对地理位置（及震级）有关。而对于余山台的情况（岩石节理发育，整体性差）似乎又显现存在震级偏小而震中距又偏远这一情况，但其隶属函数值却并不相应减小，较灵敏地反映形变异常

1) 段华保, 地倾斜形变异常和地震关系评定

信息。从计算的隶属函数值对应的情况看，一般当震级、震中距相差较大时，其从属函数值也相应地有明显的差别，这说明了隶属函数计算模型的合理性。

从异常序列中统计的无地震而有异常的异常事件（时段）计算得到的隶属函数最大值，泰安台为0.384，余山台为0.534，显然，对泰安台和余山台分别设置阈值 $\lambda=0.39$ 及 $\lambda=0.54$ ，则可以判断台站倾斜资料异常事件（时段）隶属函数值分别大于各自的阈值时，在其统计范围内会有地震发生（内检概率100%）。这样，对台站地倾斜形变异常的情况可按上述隶属函数公式计算函数值，按预先设置的阈值检校判断，如果函数值大于本台站的阈值，那我们就能以高概率预期统计范围内有地震发生。

三、倾斜形变异常的聚类分析

当倾斜记录出现形变异常，用已建立的隶属函数的数学模型计算出其函数值大于某阈值 λ ，判断未来统计范围内很可能发生地震之后，是否能估计所要发生的地震的量级呢？对震情监视预报而言，防止破坏性地震是有实际意义的工作，那么我们是否能把已经出现的形变异常情况可能对应于附近小震或者是中等以上地震的类别后分离开呢？从我们工作所得到的结论，一种有希望的有效途径是用模糊聚类分析方法。

地震是应力和应变积累的结果，这是大家熟悉的事实。地倾斜观测项目记录的是地壳倾斜形变。不言而喻，倾斜形变异常在一定程度上可以从地表反映形变加速阶段应变积累的情况。对倾斜形变异常进行研究，有可能从形变加速阶段的变化情况了解未来可能发生的地震的规模大小等信息。现在问题是要从倾斜形变异常确定能表征应变或者和应变有关的量值。倾斜矢量打结、迴折异常变化的幅度及其过程反映了地表倾斜异常的幅度和过程。显然这和反映前兆的形变情况是直接有关的。它们异常变化的幅度可以从图上直接量取（也可用分量变化值计算出来）。需要注意的是由于热形变的缘故，在正常情况下不同季节不同月份倾斜矢量速率变化值是不同的。为进行统一度量，需要先得到各不同月份速率变化相对于统一尺度比例的多年平均速度变化值的归算系数，再把各不同时期异常事件中打结、迴折的幅度归算到同一比例尺度的幅度值。对于速率和方向的异常变化，由于各种因素干扰和条件限制难以从中直接度量和计算跟应变有关的参数值，对此我们通过统计用准定量方式计算相应的应变有关的量。倾斜形变异常事件（时段）的时间幅度一般来说和形变加速阶段反映应变的形变异常幅度规模是相关的，同样，倾斜形变异常方向变化的频数和形变异常的程度、异常过程的规模一般也是相关的。对各异常事件（时段）的时间幅度及异常方向变化频数作统计，顾及随后所发生的地震震级大小，对该二个指标数值大小相应地给予准定量描述，考虑到该二个指标反映的相近的物理几何含义，又考虑到该二类异常由于随机影响所可能存在的小概率事件，取异常事件中该二类“集合”的“并”来反映（可能发生的）应变积累的情况。这样便可考虑计算形变加速过程中反映应变变量规模的倾斜形变异常参数的数学模型（为简便起见，约定以后把经处理以后的反映应变的形变异常参数直接称为和应变有关的量）：

$$\mu_i = \mu_{KN} + \mu_{WA} + (\mu_D \vee \mu_R) \quad (2)$$

式中 μ_{KN} 和 μ_{WA} 分别为倾斜矢量打结和迴折异常变化幅度， μ_D 和 μ_R 分别为相应于倾斜形变方向异常变化和速率异常变化的反映应变过程和规模的准定量值。

为了组成模糊关系矩阵，用倾斜形变异常事件中各类异常通过上述处理得到的和应变有

关的量 (μ_{ik}) 按绝对减数法^[2]计算矩阵元素, 所用的计算公式如下:

$$\Gamma_{ij} = 1 - \sum_{k=1}^{M_1} \left| \mu_{ik} - \mu_{jk} \right| \quad \left(\begin{matrix} i=1, 2, \dots, N \\ j=1, 2, \dots, N \end{matrix} \right) \quad (3)$$

M_1 为倾斜形变异常的类别数 (在计算中 $M_1 = 3$, N 为异常事件 (时段) 数。显然, 由上述元素组成的模糊关系矩阵满足自反性和对称性。

对模糊关系矩阵进行运算 $R \circ R = R_2$, $R_2 \circ R_2 = R_4$, ..., 直到计算的关系矩阵满足传递性: $R_K \circ R_K = R_{2K}$, $R_K = R_{2K}$, 就得到模糊等价关系矩阵。然后可根据等价关系矩阵计算结果设置 λ 水平集进行分类。

根据上述第二部分中泰安台和余山台统计范围内地震样本对应的异常事件计算得到的相应于应变的统计量, 按 (3) 式计算模糊关系矩阵, 结果如下:

余山台:	1.000	0.950	0.987	0.783	0.985	0.985	
	0.950	1.000	0.963	0.767	0.965	0.965	
	0.987	0.963	1.000	0.796	0.998	0.998	
	0.783	0.767	0.796	1.000	0.798	0.798	
	0.985	0.965	0.998	0.798	1.000	1.000	
	0.985	0.965	0.998	0.798	1.000	1.000	
泰安台:	1.000	0.905	0.995	0.408	0.994	0.988	0.720
	0.905	1.000	0.910	0.503	0.911	0.917	0.711
	0.995	0.910	1.000	0.413	0.999	0.993	0.725
	0.408	0.503	0.413	1.000	0.414	0.420	0.658
	0.994	0.911	0.999	0.414	1.000	0.994	0.726
	0.988	0.917	0.993	0.420	0.994	1.000	0.732
	0.720	0.711	0.725	0.658	0.726	0.732	1.000

进行模糊关系矩阵运算后, 最后得到的等价关系矩阵为:

泰安台:	①	②	③	④	⑤	⑦	
	1.000	0.965	0.990	0.798	0.990	0.990	
	0.965	1.000	0.965	0.798	0.965	0.965	
	0.990	0.965	1.000	0.798	0.998	0.998	
	0.798	0.798	0.798	1.000	0.798	0.798	
	0.990	0.965	0.998	0.798	1.000	1.000	
	0.990	0.965	0.998	0.798	1.000	1.000	
余山台:	①	②	③	⑤	⑧	⑩	⑪
	1.000	0.917	0.995	0.658	0.995	0.994	0.732
	0.917	1.000	0.917	0.658	0.917	0.917	0.732
	0.995	0.917	1.000	0.658	0.999	0.994	0.732
	0.658	0.658	0.658	1.000	0.658	0.658	0.658

0.995	0.917	0.999	0.658	1.000	0.994	0.732
0.994	0.917	0.994	0.658	0.994	1.000	0.732
0.732	0.732	0.732	0.658	0.732	0.732	1.000

上述等价关系矩阵中,对泰安台若设 $\lambda=0.9$,则矩阵元素可分为二类。结合上述地震序列进行分析可知,①,②,③,⑦为第一类,④为第二类,第一类为震级小于3级的小地震,第二类3.6级($\Delta=77.4$),时隔半月,在发生该3.6级地震处又发生编号为⑤的3.3级地震。对余山台设 λ 为0.9、0.8和0.7,矩阵元素可分为三类。结合地震序列进行分析可知,①、②、③、⑧、⑩为第一类,⑪为第二类,⑤为第三类。第一类为序列内小地震,第二类对应4.7级地震($\Delta=147$),第三类则对应6.2级地震($\Delta=162$)。

1987年2月17日离余山台不到260公里的南黄海发生5级地震。地震前余山台倾斜资料也呈现出明显趋势的形变异常。显然,该远场形变可能和应力场及地质构造条件有关。按前面所述的原则变通换算成和应变有关的量后,再加入上述异常序列的模糊关系矩阵组成新的关系矩阵进行运算作外检,计算结果的等价关系矩阵如下:

①	②	③	⑤	⑧	⑩	⑪	⑫
1.000	0.917	0.995	0.658	0.995	0.994	0.788	0.788
0.917	1.000	0.917	0.658	0.917	0.917	0.788	0.788
0.995	0.917	1.000	0.658	0.999	0.994	0.788	0.788
0.658	0.658	0.658	1.000	0.658	0.656	0.658	0.658
0.995	0.917	0.999	0.658	1.000	0.994	0.788	0.788
0.994	0.917	0.994	0.658	0.994	1.000	0.788	0.788
0.788	0.788	0.788	0.658	0.788	0.788	1.000	0.942
0.788	0.788	0.788	0.658	0.788	0.788	0.942	1.000

从该等价关系矩阵可看出其外检效果和原先的计算结果一致,取 λ 为0.9、0.8和0.7,则仍然可将各元素分为三类,第一类为①、②、③、⑧、⑩属于小地震事件,第二类为⑪、⑫,震级分别为4.7($\Delta=147$)和5.0($\Delta=258$)的中等地震,第三类⑤为强震, $M_s=6.2$ ($\Delta=162$)。

因此,用这样的方法不断积累资料开展工作,可以较有效地从台站倾斜形变异常资料判别统计范围内是否有地震发生,并用模糊聚类分析估计预测即将要发生的地震的量级,同时通过综合分析作出预报决策,必须时采取相应的措施。应该指出的是由于资料的缘故,这里所研究的台站、地震震级范围和震中分布等情况都有其局限性。对于不同的倾斜台站,不同地点发生不同震级的地震,由于台站及震中所处的地理位置、地形环境条件、地质构造情况等的不同,所产生的倾斜形变异常情况会有明显差异,这就需要不断积累资料。对不同的台站根据不同的形变异常序列情况及其跟地震的关系综合进行研究,构造隶属函数进行模糊识别,同时从各类形变异常提取换算形变加速阶段中和应变规模有关的量,作模糊聚类分析,争取为震情监视、为前兆综合分析和地震预报决策尽可能提供可靠的信息。

参 考 文 献

- (1) 冯德益等, 模糊数学方法与应用, 地震出版社, 1981.
- (2) 葛苏林, 模糊子集模糊关系模糊映射, 北京师范大学出版社, 1985.

FUZZY ANALYSIS OF GEANTICLINE PRECURSOR ANOMALY

Duan Huachen

(Shanghai Seismological Bureau)

[Abstract] In this paper, the statistical study about the deformation anomaly sequences of tilt vectors in Tajan and Sheshan observatories and their local earthquake sequences is made by submitting function and fuzzy clustering analysis. And the expected results in judging earthquake and estimating earthquake magnitude occur in future are obtained by calculation and analysis.

Key words: Pre-earthquake anomaly, Geanticline, Submitting function, Threshold value, Fuzzy clustering analysis