

# 地倾斜矢量的稳定性和震兆特征的研究

牛安福 吴翼麟

(国家地震局地震研究所)

## 摘 要

本文对地倾斜矢量用于地震异常识别的问题进行了讨论。在研究和讨论了矢量模概念的基础上,将其用于地倾斜矢量变化的稳定性判别和震兆识别的研究。本文利用矢量模研究了青海共和、景泰地震和大同地震前后,有关台站的地倾斜矢量的变化特征。结果表明,矢量的停滞打结可能是稳定的,因而未必是震兆,而剧变则可能是非稳定的,可作为异常的判别标志。

## 一、前 言

利用地倾斜矢量进行震兆分析,其方法简单、直观。在我国已发现多次地震前出现地倾斜矢量的停滞、打结现象。所谓停滞,是指矢量变化缓慢,近于“平静”;打结则指某种意义上量的恢复。停滞未必引起打结,同样打结也并不意味着停滞。所以,在使用矢量进行震兆识别时,传统的分析方法会导致较多的不确定性。另外,人们在分析使用单向地倾斜记录时,有时会遇到两个分量中仅有一个出现异常的现象。考虑到上述情况,本文讨论了利用地倾斜矢量模来分析、判断地倾斜矢量变化的稳定性和进行震兆识别的问题。

## 二、地倾斜矢量的最大模变

对于地表倾斜,一般的台站都可以记录到两个方向的倾斜变化<sup>[1,2]</sup>。若某一时刻其倾斜量分别为  $T_E$ 、 $T_N$ ,如图1所示,设垂直向的下沉或升高位移为  $dz$ ,则

$$T_E = \frac{dz}{OA} ; T_N = \frac{dz}{OB} .$$

其中  $OA/OB = T_N/T_E$ 。OA 与 OB 两条线段构成了一个有限平面 AOB,该面亦可称为地倾斜面。OC 为连接 AB 线的垂直线,由 C 点作平面  $\alpha$  的垂线 CD,连接 OD,则角 COD 表示倾斜面相对于平面  $\alpha$  的倾角,用  $\beta$  表示。

若平面  $\alpha$  的法向矢量<sup>[3]</sup>为  $\{0, 0, 1\}$ ,即  $\alpha$  为水平面。可求得倾斜面的法向矢量为

$\{-T_E, -T_N, 1\}$  (推导从简), 由此得出两平面的夹角  $\beta$ 。

$$\cos\beta = \frac{1}{\sqrt{1+T_E^2+T_N^2}} \quad (1)$$

由于  $\beta, T_E, T_N$  均很小, 所以有:

$$\cos^2\beta = (1 - \frac{\beta^2}{2} + \dots)^2 = 1 - \beta^2 + \dots ;$$

$$\frac{1}{1+T_E^2+T_N^2} = 1 - T_E^2 - T_N^2 + \dots$$

从而可求出  $\beta$ :

$$\beta = \sqrt{T_E^2 + T_N^2} \quad (2)$$

(2) 式表明, 倾斜矢量的模即为地倾斜面的倾角<sup>(4)</sup>。

对于地倾斜观测序列  $\{x_i, i=1,$

$2, \dots, N\}$  和  $\{y_i, i=1, 2, \dots, N\}$ , 令

$$T_E = x_i - x_j ;$$

$$T_N = E_i - y_j \quad (i > j) ,$$

则  $T_E, T_N$  分别表示东西和南北向在  $j$  时刻倾斜的基础上  $i$  时刻倾斜的相对变化量。由此得  $i$  时刻与  $j$  时刻倾斜面的夹角  $\beta_{i,j}$ ,

$$\beta_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} .$$

在分析处理时, 由  $\beta_{i,j}$  描述一个系统的特征尚不够, 但可以用来分析月(或季度)地倾斜的最大变化, 即:

$$M = \max_{i,j=1,N_0} \{\beta_{i,j}\} .$$

式中  $N_0$  表示一个月或季度的样本或数据点数, 所以  $M$  表示地倾斜角的月(或季度)的最大变化量, 简称倾斜矢量的最大模变。

最大模变的计算一般应采用递推式方法, 例如计算  $t$  时刻的最大模变  $M_t$ :

$$M_t = \max_{i,j=1,N_0} \{\beta_{i-i+1,t-j+1}\} .$$

上式的计算看似复杂, 但借助于计算机可以很快地进行, 并绘制出  $M_t-t$  曲线。

### 三、地倾斜最大模变的计算分析

本文以兰州水管倾斜仪及易县金属摆倾斜仪近几年的观测结果为例进行最大模变分析。

图 2a 为兰州台地倾斜的矢量变化曲线, 使用的是东西和南北向地倾斜观测的五日均值, 对不同年份的资料使用自适应光滑器<sup>1)</sup>进行了连接。图 2b 为兰州台地倾斜矢量的最大模变曲线, 递推时间窗为 1 个月, 即  $N_0=6$ 。

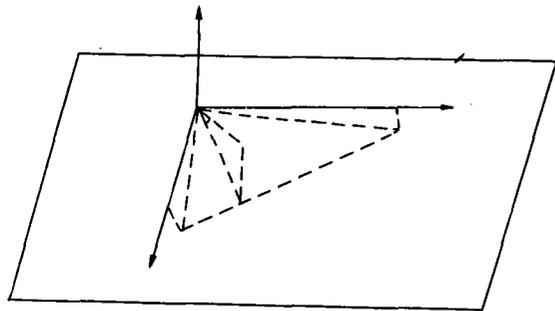


图 1 地倾斜几何图形

Fig. 1 Geometrical diagram of carth tilt

1) 牛安福, 一个自适应数据光滑器, 形变台站通讯, 1990.

图 3a、b 分别给出了易县台地倾斜矢量及其最大模变曲线。所使用的资料情况及其计算方法同上。

由图 2 可以看出，兰州台倾斜矢量在 1988 年底及 1989 年初有一较明显的打结停滞现象，但通过最大模变分析，该时段的变化不很显著。而进入 1990 年后，尽管矢量没有出现打结现象，但其变化极不稳定（图 2b）。

易县台倾斜矢量图的变化尽管没有发生较为显著的打结现象，但 1988 年初其变化速度不稳定。最大模变在 1988 年底及 1989 年上半年呈现趋势性增高并且频繁出现高值（图 3b）。

以上两个台站的矢量图及最大模变变化情况表明，最大模变仅反映了地倾斜面的月最大变化量。

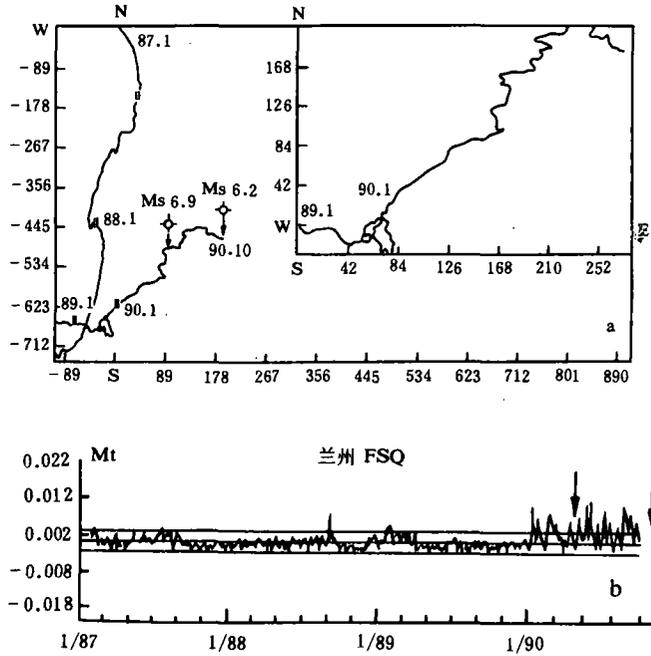


图 2 兰州台地倾斜矢量曲线和最大模变曲线  
Fig. 2 Curves of earth tilt vector and max-modulus-change of vector at Lanzhou station

对于打结现象只要是相对稳定的，其模变亦是较稳定的；反之，打结若是非稳态的，其最大模变可能增值，意味着有异常发生。

#### 四、最大模变的异常特征

##### 1. 最大模变的分布特征

由最大模变的定义可知，最大模变存在极小值，且为零。为更好地认识异常的特征，了解模变的分布是很有意义的。

本文以一个毫秒单位做为区间宽度，并统计出落入每个区间的点数  $N_i$ ，其所占的比例为  $P=N_i/N$ 。图 4 绘出了兰州台最大模变的分布图。实线表示 1987 年至 1990 年 10 月

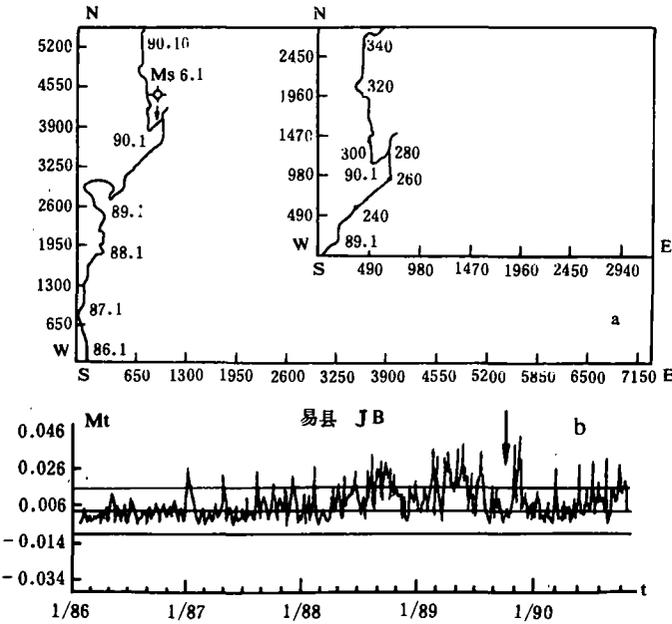


图 3 易县台地倾斜矢量曲线及最大模变曲线  
Fig. 3 Curves of earth tilt vector and max-modulus-change of vector at Yixian Station

最大模变的分布，虚线表示 1987 年至 1988 年正常时段内最大模变的分布。

由图 4 看出，在矢量正常变化情况下，最大模变的概率分布是“截尾”的；而异常出现后，其分布是“拖尾”的。正常情况下，最大模变均在零附近（右边）分布。

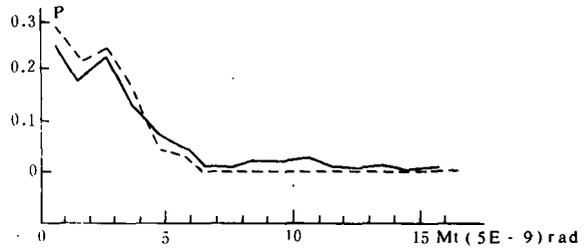


图 4 最大模变分布概率图

Fig. 4 Probable diagram of the max-modulus-change distribution

### 2. 异常特征的判别

由于正常情况下最大模变的分布是“截尾”的，这就意味着，存在着一个阈值  $M_0$ ，使得

$$M_i \leq \bar{M}_0$$

在正常动态域内成立。 $\bar{M}_0$  的选取可依据概率法获得。令

$$\bar{M}_0 = M_0 + 2S_0,$$

其中  $M_0$  和  $S_0$  分别表示正常变化条件下最大模变的均值及均方差，在正常条件下， $M_i$  超过  $M_0$  的点数在 5% 以内。

由此得最大模变的异常判别条件为：

$$|M_i - M_0| > 2S_0.$$

图 2b 及图 3b 中所绘的两条直线为异常判别限，由以上的分析亦可看出，异常主要是以超过上限为依据的。这是由于最大模变越小，则倾斜状态愈显正常、稳定。

单点超限不能作为震兆的判别标志。只有当群体点超限时，才有可能作为震兆的特征。

### 3. 最大模变异常与单向地倾斜异常之间的关系

对于单向地倾斜而言，若其变化不超过一定的阈值，则其最大模变亦不超过某一阈值。

即当：

$$\begin{aligned} \max\{|x_{t-i+1} - x_{t-j+1}|\} &\leq 2M_x; \\ \max\{|y_{t-i+1} - y_{t-j+1}|\} &\leq 2M_y, \end{aligned}$$

对于任意的  $t$  和  $i, j=1, 2, \dots, N_0$  成立。

则

$$M_i \leq 2\sqrt{M_x^2 + M_y^2}.$$

上式表明，若单向地倾斜变化正常，则其矢量的最大模变亦是正常的。同理，若两个方向地倾斜速率均出现异常，则其最大模变亦表现为异常。当仅有一个方向倾斜出现异常时，则只能根据其最大模变的情况进行计算分析。

## 五、最大模变方法在震兆分析中的应用

1. 1990 年 4 月 26 日青海共和  $M_s 6.9$  地震和 10 月 20 日景泰  $M_s 6.2$  地震距兰州台分别为 300km 和 100km，两次地震均发生在兰州台的监视范围内。由图 2a 可以看出，倾斜矢量在 1987 至 1988 年上半年的变化表现出一定的规律性，且呈西南向倾斜 1988 年下

半年以后出现停滞、转向现象,开始呈北东向倾斜。进入1990年后,北偏东向倾斜速度明显加快。两次地震均发生在北东向倾斜加速的条件下。由图2b可以看出,1987至1989年其最大模变基本稳定。而进入1990年后,最大模变出现较为显著的群体超限及趋势增长现象。对比图2a和图2b可以发现,矢量的打结、转向并不意味着就是震兆。当一个方向的倾斜呈周期性或存在测值恢复现象时,都易于导致矢量的打结。这也表明,打结包括稳定与非稳定两种情况。另一方面,即使是矢量没有出现打结、转向现象,也并不意味着倾斜状态是稳定的。

2. 1989年10月发生的阳高Ms6.1地震,距易县台约180km。图3a为易县台地倾斜矢量的趋势变化曲线。其异常情况由最大模变曲线(图3b)可以很清楚地反映出来。从最大模变超限的频次看,1986年是地倾斜变化较为平稳的一年,从1987年初开始至1989年8月,超限频次一直在不断增加。在6.1级地震之前的近两个月时间内,最大模变亦出现频繁的超限现象。从变化趋势看,1987年初至1989年8月,最大模变呈增长趋势,地震前呈下降趋势。

## 六、小 结

通过以上的计算和分析,作者认为,使用最大模变对地倾斜矢量变化特征进行分析具有以下特点:

(1) 用于研究地倾斜状态的稳定性,例如研究地倾斜矢量打结、转向的稳定性。一般情况下认为,月最大模变愈小,倾斜状态愈稳定。

(2) 对矢量变化(二维)研究定量化(一维),可以使两个倾斜方向异常特征不同步的现象得到统一处理。

(3) 最大模变反映了矢量模的时间段特征,这与目前使用的点特征有明显的不同。

(4) 由最大模变可以对矢量变化状态进行讨论,即当矢量出现停滞、且多次发生转向的情况下,矢量可能是非稳定的;但若两倾斜分量之一出现周期性变化,矢量打结,亦可能是稳定的;若矢量不出现打结,但在矢量变化速度较快的条件下,矢量状态则可能是非稳定的。

(本文1991年2月1日收到)

## 参考文献

- [1] 陈鑫连等,地壳变动连续观测技术,地震出版社,1989.
- [2] 冯锐,地倾斜与地震,地震出版社,1978.
- [3] 南开大学数学系,空间解析几何引论,高等教育出版社,1978.
- [4] 吴翼麟、刘国培,丹江口坝区地倾斜观测预报地震的试验,丹江口水库地震文集,地震出版社,1979.

## A RESEARCH FOR TILT VECTOR STABILITY AND PRECURSOR CHARACTERS IN ACCORDANCE WITH THE MAX—MODULUS

Niu Anfu, Wu Yilin

(*Institute of Seismology, SSB, Wuhan, China*)

### Abstract

In this paper, the problems about direct identification of precursor with the tilt vector are discussed, and the method is also put forward. On the basis of tilt modulus, the max—modulus of vector is researched. The stability of tilt vector and relationship between vector characters (for example: pause, knot, radical change) are studied. The relationships between the stability of vector characters and precursors of Gonghe, Qinghai and Jingtai, Gansu and Datong, Shanxi earthquakes are discussed. The results show that the knots and pauses may be steady, therefore they are uncertainly precursor marks; however, the radical change of vector is possible precursor. The research for stability is more meaningful and effective for precursor analysis than direct method.

---

(上接19页)

## DYNAMIC PHOTOELASTIC ANALYSIS OF COMBINED CRACK PROPAGATION IN A COMPRESSION—SHEAR STRESS FIELD

Qing Xinlin, Song Jinliang

(*Tsinghua University*) (*Tianjin University*)

Feng Deyi, Jiang Chun

(*Seismological Bureau of Tianjin City, China*)

### Abstract

In this paper, dynamic propagations of some typical combined cracks in the physics of earthquake focus are studied by means of dynamic photoelasticity. Dynamic isochromatic fringes of these crack propagations under uniaxial compression are first successfully recorded, and the crack paths are also obtained. Experimental results show that  $K_{I_d} = 0$  at a running crack tip even in a compression—shear stress field. Mode I dynamic stress intensity factors of running crack tips are determined, and a conclusion of crack stable propagation in a compression—shear stress field is obtained.