Vondrak 滤波法在定点地形变 资料分析中的应用[·]

杨马陵 苏乃秦

(新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐 830011)

郑大伟

(中国科学院上海天文台,上海 200030)

摘要 本文使用天文学数据处理中常用的 Vondrak 平滑滤波法,对库尔勒短水准 和呼图壁断层形变资料进行了高通、低通和带通数字滤波处理。结果表明,处理后的资料 突出了地象前不同周期的地壳形变异常信息,降低了背景噪声和观测误差的影响。该方法 对于识别形变异常有较好的效果。

关键词: Vondrak 平滑滤波法; 数字滤波; 定点地壳形变; 地形变异常

0 前 言

现有的研究表明,地震引起的地壳形变过程大致分为长期的缓慢形变,震前的快速变化,临震 的突变和震后调整四个反映应变能积累、集中、释放和调整的阶段。本文主要讨论震前形变的中短 期异常变化。这种变化一般可持续几年⁽¹⁾,其主要表现形式为形变速率显著增大,通常会出现加速、 反向和突跳等阶段性异常变化。但由于地壳介质的不均匀性,地质构造的复杂性以及各种外界干扰 因素,影响了对震前异常,特别是中短期和临震异常的分析和识别。因此,如何从形变资料中排除干 扰,提取震前异常信息,一直是人们比较关注的问题。本文借助天文资料处理系统中常用的 Vondrak 平滑滤波法,处理和分析形变测量数据,从中提取震前形变的中短期异常信息。

1 数学方法简介

Vondrak 平滑滤波法的主要特点是,在未知拟合函数的情况下,对观测资料进行合理的平 滑⁽²⁾。基本原理如下:

 $Q = F + \lambda^2 S = \min \tag{1}$

其中

$$F = \frac{1}{N-3} \sum_{i=1}^{N} P_i (y_i' - y_i)^2$$
(2)

$$S = \frac{1}{t_{N-1} - t_2} \sum_{i=1}^{N-3} (\Delta^3 y_i')^2$$
(3)

式中 Y₁、Y'₁和 P₁分别是 t₁时刻的观测值、平滑值和观测值权系数; \triangle ³为三阶差分算子;N为观测值总数;F 表示观测值直接计权拟合的要求,称为拟合度;S 表示对平滑值三阶差分平方和的要求,

^{*} 地震科学联合基金会资助项目(90204)

称为平滑度,反映平滑曲线的总体平滑程度; λ^2 为给定的正数,在平滑过程中调整拟合度和平滑度 之间的关系;取 $\epsilon = \frac{1}{\lambda^2}$,称其为平滑因子。由(1)式可知, ϵ 越小,曲线平滑程度越强;反之,曲线平滑 程度则弱。

Vondrak 平滑法实质上具有单边频率滤波器的功能⁽³⁾,在数据处理中可作为数字滤波器使用。 其频率响应函数为⁽⁴⁾

$$F(\varepsilon, f) = (1 + \varepsilon^{-1} (2\pi f)^6)^{-1}$$



图 1 Vondrak 平滑法频率响应曲线 Fig. 1 Frequency response curve by Vondrak smooth filtering method

2 观测资料的处理与分析

库尔勒短水准观测台测线跨越铁门关断裂。 三角形测线北西边与断层斜交,全长190m,高差 9,42m(图 2)。铁门关断裂走向 N290^{--300⁻}W, 断层面倾向南西,倾角 30^{--50⁻},为一右旋压扭 性活动断裂。观测场地附近自然条件不佳。因风 沙及年温差变化等原因,造成日常观测误差较大。 选用该台北西边 1987-1991 年间的观测资料,作 出五日均值图(图 3)。由图可见,曲线波动很大。 自 1987 年以来,在该台附近发生了两次 5.2 级地 震(1988 年 5 月与 1991 年 6 月),震中距分别为 40km 和 100km。

呼图壁断层形变观测台地下观测长廊走向 N330[•]W,与霍尔果斯一吐谷鲁断裂相交,交角 50[•],测线长度 48m(图 2)。霍尔果斯一吐谷鲁断 裂走向 N280[•]W,倾向 186[•],倾角 42[•]-45[•],属 一南盘上冲的逆断层。该台观测条件好,故日均值 曲线相当平滑(图 4)。自 1988 年以来在该台附近 图 1 的频率响应曲线显示了不同平滑因子的 滤波(平滑)特性。F=1和F=0部分所对应 的周期讯号,在滤波过程中分别被全部保留 或全部滤掉。而 0<F<1部分所对应的周期 讯号被不同程度地滤掉。根据以上特性,我们 可以组成高通、低通和带通频率滤波器,实现 观测数据的数字化滤波。

该滤波器具有截断频率效应小,能同时 用于等间距和非等间距数据处理等优点。但 缺点是两端效应较为严重。对此,可采用增加 或预测资料两端外数据的方法,达到削弱和 限制其端部效应影响的目的。





先后发生了三次 5.2 级地震(即 1990 年 10 月两次, 1991 年 6 月一次), 震中距分别为 210km 和 160km。

(4)

我们先后选取不同的平滑因子,对上述两组测量资料分别进行了高通、低通和带通滤波处理。



图 3 库尔勒短水准(北西边)五日均值曲线 Fig. 3 Five-day mean values for short levelling at Korla station (northwest edge)

2.1 低通滤波(平滑)

由于呼图壁台资料随机误差小(图 4),无需滤波分析就可清楚地看出,其年变幅度自 1990 年 4 -5 月起开始减小,出现了长趋势变化速率偏离正常变化速率等异常现象。据分析,认为是扩张量 加大,挤压量变小,属于 1990 年至 1991 年发生的三次 M5.2 地震的中短期异常。

对库勒台资料取 ε=10⁻⁸(即 65 天以下的信号全部滤除,240 天以上信号全部保留)进行低通 滤波处理,得到图 5 所示曲线。由图可见,在1991 年 6 月 5.2 级地震前,即从 1990 年 5-6 月起,年 变幅开始增大,出现和趋势变化速率不正常等异常现象。下半年北点上升较快(视西点不动),比正 常年份约大 0.2mm,偏离了正常的长趋势变化速率。考虑到同期内呼图壁形变水平扩张量增大(南 盘上升),且 1990 年测得流动重力测量值有 60-70 微伽的下降,其低值区正是 1991 年 6 月地震的



图 4 呼图壁形变仪日均值曲线(1988 年1月-1991年7月)



图 5 库尔勒台短水准低通滤波曲线 Fig. 5 Low-pass filtering curve of short levelling at Korla station (northwest edge)

Fig. 4 Dayly mean values of fault deformation meter at Hutubi station (Jan. 1988-July. 1991)

震中区。因此,震前出现的中期形变异常是震中区地壳上升的结果。特别要说明的是短期异常的变化。图 5 中正常年变为较规则的正弦变化,最低点在 7-9 月之间出现。1991 年 4-9 月间年尔变形态发生畸变,4 月中旬达最低点,而后反向上升,至最高点附近发震。震后下降,9 月以后恢复正常。 很明显,这一地壳异常形变变化过程是受震前地壳应力急剧加速及震后应力调整的控制所致。至于 1988 年 5 月 5.2 级地震前该曲线未有异常显示,对此我们将在后面讨论。

2.2 高通滤波

对呼图壁的资料取 ε=10⁻²(7 天以上的信号全部保留,40 天以上信号全部滤去)进行高通滤 波,其变化幅度一般在±0.02mm 范围内(图 6),但仍有三次幅度较大的突跳。其中 1990 年 10 月 20 日向下突跳 5 天后,在该台以西 210km 处发生了两次 5.2 级地震,此异常属临震突跳异常;1991 年 6 月 9 日发生的向上突跳为核爆破影响所致。至于 1989 年 7 月 19 日发生的突跳,目前原因尚不 清楚,估计是人为干扰。









对库尔勒的资料取ε=10-*(60天以下的信号全部保留,240天以上信号全部滤去)进行高通滤 波,结果表明其变化幅度比图6要大得多(图7),约在±0.43mm之间。取2.5倍的标准差为异常判 别指标,发现有三次超出异常指标的突跳变化。其中1988年4月26日和1991年4月1日两次向 下的突跳,可能是1988年5月26日和1991年6月6日两次5.2级地震前的短临异常,而1991年 6月9日的正向突跳也是核爆破所致。

2.3 带通滤波

对上述两个台的资料分别作保留 120-240 天信号的带通滤波处理,结果见图 8 和图 9。



图 8 呼图壁水平形变仪带遥滤波曲线 Fig. 8 Band-pass filtering curve of deformation meter at Hutubi station

常,估计可能与该震距观测点近,且与 1991 年 5.2 级地 震不在同一构造带上有关。有震例表明[1],震前定点形变 观测到的异常通常发生在震中外围地区,而震中区却相 对呈稳定状态。这也许可以解释低通、带通曲线在1988 年 5.2 级地震前无异常出现的现象。

讨论 3

分析结果表明,地震前地壳确实存在着由于地应力 变化而造成的不同周期的形变异常。采用不同的平滑因 子对观测资测料进行 Vondrak 数字滤波,可以从中提取 不同周期的地壳形变异常信息。通过低通滤波处理能消 除和削弱随机噪声和观测误差,突出中短期异常,通常该 Fig. 9 Band-pass filtering curve of short levelling 异常出现在震前 2-6 个月之间;经高通滤波处理后的曲

呼图 壁台带通滤波曲线年变明显。通常,正常年 份在 4-8 月趋于下降,8 月下旬降至年最低点。但 1990年6月情况则相反,先是反向上升,8月下旬达到 峰值,随后又下降,抵达最低点10多天后发生了10月 25日的两次 5.2级地震,震后恢复正常变化。1991年 初,曲线又出现异于正常年变的异常形态,出现幅度减 小及形态畸变等变化。持续至5月上旬达最低点,略有 回升后发生了6月6日的5.2级地震。

库尔勒台带通曲线自 1990 年 12 月开始出现异 常。与低通滤波结果相同,主要表现为变化幅度增大。 异常在 1991 年 5 月中旬结束之后, 对应了 1991 年 5. 2级地震。1988年5.2级地震前,带通曲线也未见异



图 9 库尔勒台短水准带通滤波曲线 (北西边)

线,除了观测误差和地壳变化的随机噪声外,也包含有一些震前形变的临震信息,但识别它们较为 复杂。一般在确认了中短期异常的前提下,排除各种干扰因素后,仍出现的且大大超出日常误差范 围的突跳,可视为异常。该异常出现时间一般在震前数天至2个月;而带通滤波通过保留某一周期 内的信息,可达到突出中短期异常,特别是短期异常的目的。尤其是对那些比较平滑不易辨别出异 常的曲线(图 4),效果更为好一些。

与处理形变资料常用的其它滤波方法一样,Vondrak 滤波起到了削弱和消除随机误差、排除干 扰、突出异常信息的作用,为识别震前的中短期和短临异常提供了一定的依据。作为一种无拟合函

at Korla station (northwest edge)

第1期

数形式的数字滤波法,同时适用于等间距和非等间距的数据。因而在地震前兆数据处理中有其独特的优点。但不足之处是,当计算中数据个数较少、平滑因子过小时,端部效应对处理结果影响很大, 滤波曲线会严重畸变。另外,端部效应不利于该方法对短临异常的分析。 感谢吴琳同志在收集资料过程中的大力帮助。

(本文1992年10月13日收到)

参考文献

1 国家地震局科技监测司. 地震监测与预报方法清理成果汇编——大地形变分册. 北京: 地震出版社, 1990. 1-26.

2 Vondrak, J. Problem of smoothing observational data, I. Bull Astron., Inst. Czeah, 1977, 28(2): 84.

3 丁月蓉,郑大伟.天文测量数据的处理方法.南京:南京大学出版社,1990.59-65.

4 黄坤仪,周雄. Whittaker-Vondrak 法滤波本质和数值滤波的方差和相关性估计. 天文学报,1981,22(2):120.

APPLICATION OF VONDRAK FILTERING FOR ANALYSIS ON DATA OF FIXED POINT CRUSTAL DEFORMATION

Yang Maling and Su Naiqin

(Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi) Zheng Dawei (Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The common Vondrak smoothing filtering method, used in astronomy data handling, was adopted here to deal with the two groups of fixed point horizontal and vertical crust deformation data by means of high-pass, low-pass and band-pass digital filterings, respectively. The results showed that after handling the data, the abnormal informations of crustal deformation for different periods prior to the shocks were obviously and the effects of background noise and observing error were reduced as well. It also indicated that the method is of a better capability for recognized the abnormal of preearthquake deformation.

Key Words: Vondrak smoothing method; Fixed point crustal deformation; Digital signal filtering; Abnormal of crustal deformation