

文章编号: 1000-7598-(2000)01-0036-04

滑坡前兆突变异常识别方法^{*}

秦四清

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

摘要: 将滑坡位移观测值时间序列视为非平稳随机过程, 采用建立系统的同态模型的方法提取短期异常, 并给出了异常识别准则、有序度计算公式; 用一阶差分进行高通滤波的方法提取临滑异常并进行预测; 根据异常时刻组成的灾变日期集用灰色灾变模型进行预测。

关键词: 短期异常, 临滑异常, 异常识别准则, 概率, 灰色灾变

中图分类号: **文献标识码:** A

作者简介: 秦四清, 男, 35岁, 博士后, 研究员, 现从事非线性工程地质学和岩土力学研究。

Identification approach to abrupt abnormality of landslide forerunners

Qin Siqing

(Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The time series of displacement measured *in-situ* of landslide is regarded as the unstable random process in the paper. The short-term abnormalities are extracted by means of the homomorphic model and the identification criterion of abnormalities and computing formula of order degree are given. The critical-sliding abnormalities are extracted with one degree difference equation for high pass filter. The prediction is conducted with the grey catastrophe model through the abrupt date set composed of abnormality times.

Key Words short-term abnormality, critical-sliding abnormality, identification criterion of abnormality, probability, grey catastrophe

1 引言

滑坡时间预报的困难很大程度上在于前兆现象的复杂性、个体差异性、不确定性和模糊性。如野外位移测量在很大程度上受到诸如温度、降雨、地下水、地质状况及观测仪器灵敏度等因素的影响, 使得测值中混淆了所需求的位移值。如何分离环境效应、构造运动, 从强干扰背景中自动识别异常, 就成了亟待解决的问题。

尽管一些研究者应用平滑滤波、傅里叶级数拟合及统计回归等方法排除干扰, 进行时间预报, 但由于缺乏比较客观的定量化研究方法, 往往仍使人怀疑有巧合的可能。为此, 我们应用数理统计、信息论和灰色理论方法, 提出了两种识别异常并根据异常进行预报的有效方法。

2 短期异常的提取与预测

观测值的时间序列, 既有趋势性又有周期性; 既有自相关性又有互相关性; 既有确定性又有偶然性; 一般应视为非平稳随机过程。对这样的时间序列, 直接建立确定性模型比较困难, 但只要观测系统本身(仪器、

环境等)比较稳定, 有足够的观测值时间序列, 就可建立一个与系统同态的数学模型, 该模型能给出和实际系统非常一致的输出。这里, 把变化周期小于1年, 以月为时间单位所提取的异常称为短期异常^[1]。

2.1 建立系统的同态模型

考虑一观测序列 $f(t)$, 如位移时序、应力时序、声发射时序等。 $f(t)$ 一般包含有: (1) 环境因子综合效应; (2) 继承性构造运动; (3) 随机涨落; (4) 至今尚不清楚的某些物理因素的变化。在监测点自然环境和仪器装置稳定的条件下, 环境效应的时间序列具有一定动态规律和统计规律可探寻; 以地质时间尺度量测的继承性构造运动, 在较短观测年份中, 如果不受到强震影响, 其变化也是比较稳定的。即(1), (2)项可认为具有一定规律, 而后两项则基本无规律可寻。我们可把 $f(t)$ 看作是这些序列的集合, 用时序分析和系统识别相结合的方法, 分层次地实现最优化, 以便在机理模糊, 输入信息没有充分了解的条件下, 实现同态模型的最优化。

用如下加法模型求出 $f(t)$ 的最佳估值 $\hat{f}(t)$, 即

$$\hat{f}(t) = P(t) + Q(t) + S(t) \quad (1)$$

收稿日期: 1999-04-01。

^{*} 中国科学院“百人计划”基金资助项目。

式中 $P(t)$ 是趋势成分 $P(t)$ 的拟合推估值; $Q(t)$ 是周期成分 $Q(t)$ 的估值; $S(t)$ 是随机涨落序列的自回归函数。

(1) 趋势成分 $P(t)$

用五点三次平滑低通滤波器求出 $P(t)$ 的时间序列 $P(t)$, 计算公式参见文献[2]。 $P(t)$ 为 $P(t)$ 的拟合值, 一般形式为

$$P(t) = a + bt + ct^2 + \dots \tag{2}$$

式中 $a, b, c, \dots$ 为待求常数。

(2) 周期成分 $Q(t)$

周期成分的时间序列 $Q(t)$ 可表达为

$$Q(t) = f(t) - P(t) \tag{3}$$

其拟合推估值可用傅里叶级数表示, 即

$$Q(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} [a_m \cos(mt) + b_m \sin(mt)] \tag{4}$$

式中 a_0, a_m, b_m, m 常数可由傅里叶变换及最小二乘法求得。

(3) 随机涨落序列的自回归函数 $S(t)$

$f(t)$ 一般是非平稳随机过程, 经下述变换得到新的随机涨落序列 $S(t)$, 即

$$S(t) = f(t) - P(t) - Q(t) \tag{5}$$

对 $S(t)$ 可建立自回归预测模型

$$S(t+1) = b_1t + b_2(t-1) + \dots + b_l(t-l+1) \tag{6}$$

当 $E\{[S(t) - S(t)][S(t) - S(t)]\}$ 为最小时, 按下式求解回归系数 $b_1, b_2, \dots, b_l$ 。

$$\begin{bmatrix} R(0) & R(1) & R(2) & \dots & R(l-1) \\ R(1) & R(0) & R(1) & \dots & R(l-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R(l-1) & R(l-2) & R(l-3) & \dots & R(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(1) \\ R(2) \\ \vdots \\ R(l) \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中 $R(0), R(1), \dots, R(l)$ 是自相关系数, 且

$$R(j) = \frac{E[S(t)S(t-j)]}{E[S(t)S(t)]} \tag{8}$$

式中 $j = 0, 1, \dots, (l-1)$, E 为数学期望符号。

2.2 异常识别准则

系统的输出误差为

$$V(t) = f(t) - [P(t) + Q(t) + S(t)] \tag{9}$$

模型拟合系统的标准差为

$$S = \sqrt{E[V(t)V(t)]} \tag{10}$$

式中 $V(t)$ 的概率置信区间为 $[-qS, qS]$, q 一般取 2, 2.5 或 3.0, 相应于置信度为 95%, 99% 或 99.5%。

我们用 $f(t)$ 拟合并推估了观测系统的正常变化, 在正常情况下, $V(t)$ 值的变化均应落在置信区范围内。若实际观测序列 $f(t)$ 超出经验理论序列 $f(t)$ 的置信区间, 就认为在一定的概率意义上出现了异常。当然这样检测出的异常不一定是滑坡前兆, 反之, $V(t)$ 在此范围内的波动, 即使真是滑坡前兆, 也无能力无理由识别。因此可把 S 视为一个代表异常信息分辨能力的重要指标。这里想指出一点, 在上述分析中, 把 $V(t)$ 超出置信区间下限的情况也视为异常, 是有依据的。据牛志仁^[3] 的研究, 在剧滑前, 滑速有降低的现象。

2.3 有序度计算

把研究的时段划分为 N 个等间距的时间单元, 计算每一时间单元的异常概率 $P(i)$, $P(i)$ 可按式近似计算

$$P(i) = C(i) / \sum_{i=1}^N C(i) \tag{11}$$

式中 $C(i)$ 为第 i 个时间单元的异常事件个数。

在各物理量统一的抽象为信息的前提下, 由信息论^[4] 知, 系统异常场在研究的时段内, 时空结构的熵 H 为

$$H = - \sum_{i=1}^N P(i) \log P(i) \tag{12}$$

在等概率分布 $P(i) = 1/N$ 时, 最大熵为

$$H_{\max} = \log N \tag{13}$$

有序度定义^[5] 为

$$R = 1 - H / H_{\max} \tag{14}$$

有序度是系统序参量的一种映射。当 $H = H_{\max}$ 时, $R = 0$, 系统处于无序状态; 当 $H < H_{\max}$ 时, $R > 0$, 出现了减熵过程, 意味着系统走向有序。系统科学理论及岩石试验均表明: 岩石的变形过程是一降维、减熵、有序过程。有序度的增加应具有前兆指标意义。

2.4 异常概率合成

如有多时序观测资料, 可通过多信息时空域内的合成, 从整体上提高信噪比与清晰度, 设观测数据集为

$$X = \{X(i, j)\} \tag{15}$$

$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$

式中 n 是序列数; m 是序列内的数据个数。对 X 做标准化处理

$$Y(i, j) = [X(i, j) - X(i, j)] / S(i) \tag{16}$$

式中 $X(i, j)$ 是系统正常输出的模拟值; $S(i)$ 是第

i 个序列的模型标准差。假定 X 服从 $N(\mu, \sigma)$ 分布, 则标准化处理后的无量纲新数据集服从 $N(0, 1)$ 分布。在 $j = c, c \in m$ 时, $Y(1, c), Y(2, c), \dots, Y(n, c)$ 中有 k 个异常事件的概率可按二项分布律^[5] 计算

$$P_A[k(j)] = C_n^{k(j)} P^{k(j)} [1 - P(j)]^{n - k(j)} \quad (17)$$

式中 $P(j)$ 是 $Y(i, c)$ 的异常概率。利用上式, 有助于较

清晰地发现整体协同性异常。

2.5 实例分析

甘肃东乡洒勒山新滑坡发生于 1986 年 3 月 25 日。滑前的原始位移观测曲线为随机振荡型, 从曲线形式上较难判断有无异常事件。其位移-时间监测数据见表 1。

表 1 洒勒山新滑坡位移监测值^[6]
Table 1 Measured displacements of saleshan's new landslide

年 份	1984							1985												1986	
月 份	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
位移/cm	4	10	0	1.5	2.5	5.5	7.2	5.2	5.2	4.8	2.5	4.8	7	12	15	17	27	30	41	50	75

依据上述理论, 在置信度为 95% 的水平下, 在第 22 个月和第 26 个月时, 发现了两个异常点(图 1、图 2): 第一个异常点表明在 1985 年 10 月, 该斜坡已处于临界状态; 第二个异常点表明剧滑即将来临。其标准差 $S = 2.06$ cm, 有序度 $R = 0.77$ 。有序度接近于 1, 也表明滑坡的发生已不可避免, 在下个月有失稳的可能, 这与实际情况一致。

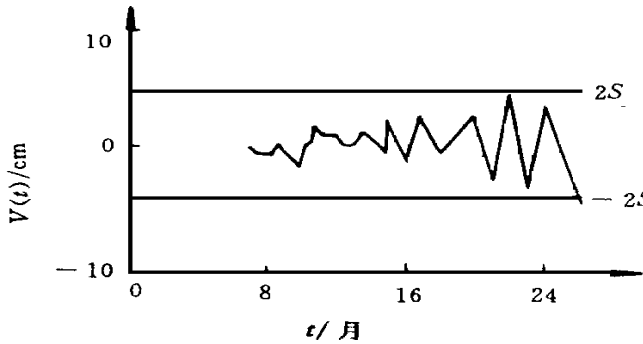


图 1 动态拟合与异常识别

Fig. 1 Dynamic fitting and abnormality identification

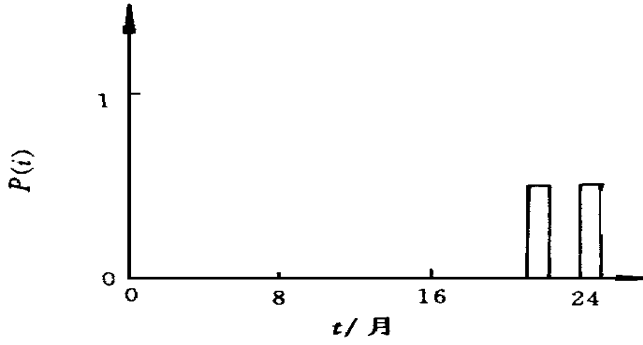


图 2 异常概率图

Fig. 2 Abnormality probability

3 临滑异常识别及预测

把变化周期小于 5 天, 以天为时间单位所提取的异常称临滑异常。设某时序监测值为 $g(t)$, 用一价差分进行高通滤波

$$F(t) = g(t + 1) - g(t) \quad (18)$$

在 $F(t)$ 序列中滤去了各种较长周期和趋势成分, 仅保留了逐日突变成分。按下式计算标准差

$$S = \sqrt{E[F(t)F(t)]} \quad (19)$$

按式(10)检测异常。

Markov 过程是研究事物的状态及其转移的理论。它是通过对不同状态的初始概率置信状态之间的转移概率的研究, 来确定状态的变化规律, 从而达到对未来进行预测的目的。下面用 Markov 链状预测方法估价边坡变形发展趋势。

3.1 计算初始概率 P_i

在置信区间范围内为正常事件、对应稳定状态; 反之为异常事件, 对应不稳定状态。假定事件有 E_i 个状态($i = 1$ 表示稳定, $i = 2$ 表示不稳定), 状态 E_i 出现的次数为 M_i , 用状态出现的频率近似地估计状态出现的概率, 即

$$P_i = M_i / \sum_{i=1}^2 M_i \quad (20)$$

3.2 计算状态的一重转移概率 $P_{i,j}$

假定由状态 E_i 转入状态 E_j 的个数为 M_{ij} , 那么

$$P_{ij} = M_{ij} / M_i \quad (21)$$

写成矩阵形式为

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(22)为一重转移概率矩阵, 它完整地描述了两个状态相互转移的概率分布。

3.3 预 测

(1) 一步预测

如果目前预测对象处在状态 E_i , 若 $P_{i1} > P_{i2}$ 成立, 且 P_{i1} 显著大于 P_{i2} , 那么下一步状态处在 E_1 的可能性最大。如两者相差不大, 则需进一步分析。同理, 在判明系统所处状态的条件下, 比较转移概率值大小, 可进行类似分析。

(2) 多步预测

由Uhapman-Kolmogorov 方程^[7]知,第 n 步的转移概率矩阵 $P^{(n)}$ 中各元素 $P_{ij}^{(n)}$ 可表示为

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_{k=1}^2 P_{ik} P_{kj}^{(n-1)} \tag{23}$$

由转移概率的遍历性判定转移概率达到稳定时所需的步数,并根据系统所处的状态和比较转移概率值的

大小判断状态性质。

3.4 实例分析

卧龙寺新滑坡是一个塬边黄土滑坡,1971 年发现裂缝后,于 3 月 11 日开始打桩观测,5 月 5 日凌晨 3 时 15 分产生剧滑破坏。现以 5[#]裂缝位移-时间监测数据^[8](表 2)为例,用上述理论进行分析。

表 2 卧龙寺新滑坡位移监测值
Table 2 Measured displacements of Wlongsi's new landslide

时 间	月 日	3 月																	
		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
位移/mm		1.0	1.5	1.7	2.5	3.2	4.0	4.4	5.1	5.9	6.3	7.0	7.3	7.8	8.2	8.4	8.7	9.0	
时 间	月 日	4 月																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
位移/mm		9.2	9.4	10.0	10.1	10.3	10.4	10.5	10.8	11.1	12.0	13.0	13.6	14.0	15.0	16.1	16.4	17.2	
时 间	月 日	4 月																	
		18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	5 月				
位移/mm		17.0	18.0	19.0	19.0	20.0	23.0	24.0	25.2	26.0	27.0	28.2	30.0	31.0	32.0	33.0	42.0	47.0	61.0

用一价差分模型对上述数据进行高通滤波,结果见图 3。标准差 $S = 2.26\text{ mm}$,置信度为 95%,初始概率为 $P_1 = 0.94$, $P_2 = 0.06$,转移概率矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 0.9787 & 0.0213 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{24}$$

由图 3 知,最后一个数据点处于不稳定状态,且下一步向不稳定态转移的概率值 1 远远大于向稳定态转移的概率值 0,故理论分析结果与实际滑坡发生时间(5 月 6 日)一致。

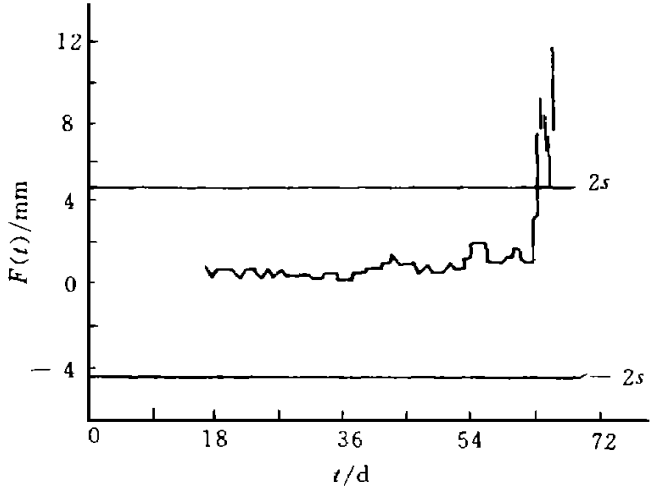


图 3 卧龙寺新滑坡位移观测值高通滤波结果与异常识别
Fig. 3 High pass filtering results and abnormality identification of measured displacements of Wolong's new landslide

4 灰色灾变预测

按上述两种方法检测出异常后,异常值所对应的时间可组成一个灾变日期集,记为

$$T^{(0)}(i) = \{T^{(0)}(1), T^{(0)}(2), \dots, T^{(0)}(n)\} \tag{25}$$

式中 n 为异常点个数。灰色灾变预测是按灾变日期集,建立 GM(1,1)预测模型进行的。对 $T^{(0)}(i)$ 作一次累加生成,得

$$T^{(1)}(k) = \{T^{(1)}(1), T^{(1)}(2), \dots, T^{(1)}(n)\} \tag{26}$$

式中 $T^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k T^{(0)}(i)$ 。由 GM(1,1)模型的时间响应函数

$$T^{(0)}(k+1) = (-a)[T^{(0)}(1) - u/a]e^{-ak} \tag{27}$$

可预测未来异常值出现时间。式中 a 和 u 为待定常数。

对卧龙寺新滑坡(图 3),用灰色灾变方法预测出的下一个异常值出现时间为 5 月 6 日 7 时,与实际滑坡时间基本符合。

参 考 文 献

1 秦四清,张倬元著. 非线性工程地质学导引[M]. 成都:西南交通大学出版社,1993.
2 张巨洪. BASIC 语言程序库[M]. 北京:清华大学出版社,1983.
3 牛志仁. 斜坡失稳的动力学分析[J]. 灾害学,1991,6(1): 1~6.
4 钱学森,宋健. 工程控制论[M]. 北京:科学出版社,1983.
5 周硕愚. 系统科学导引[M]. 北京:地震出版社,1988.
6 黄润秋,张倬元. 黄河拉西瓦水电站高边坡稳定性的系统工程地质研究[M]. 成都:成都科技大学出版社,1991.
7 王安云. 随机过程[M]. 沈阳:东北工学院出版社,1988.
8 岳启伦. 关于滑坡剧滑时间计算方法的探讨[A]. 滑坡论文集[C]. 成都:四川科学技术出版社,1989.