

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20212299

基于 2σ -chauenet 准则的 POT 模型的 膨胀土渠坡位移监控指标拟定

周聪聪¹, 沈振中¹, 马福恒²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024; 2. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 在深挖方膨胀土渠坡的长期服役过程中, 借助位移监控指标实时辨识渠坡服役性态是确保渠坡安全运行的重要手段, 因此拟定合理的监控指标对于保障渠坡工程的安全具有重要意义。在 POT 模型的基础上, 引入 2σ 准则和 chauenet 准则, 建立了阈值与监控指标之间的对应关系, 通过求解满足该对应关系下的最佳阈值, 建立了膨胀土渠坡位移监控指标拟定的改进 POT 模型, 并应用于南水北调中线工程陶岔段的深挖方膨胀土渠坡工程中。结果表明, 相较传统 POT 模型, 基于 2σ -chauenet 准则的改进 POT 模型可有效避免主观性与随机误差, 具有更高的计算精度, 拟定的位移监控指标更偏向安全, 对防范渠坡风险、确保渠坡安全长效运行具有更强的指导意义。

关键词: 深挖方渠坡; 膨胀土; 监控指标; POT 模型; 2σ -chauenet 准则

中图分类号: TV698

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0195-04

1 引言

在渠坡工程的各种效应量中, 位移量是直观反映工程安全与否的关键性指标, 且具有容易测量、准确度高的优点, 因此实际工程中常利用位移监控指标来评估渠坡工程的工作性态。渠坡位移监测效应量作为一种反映渠坡工作性态的时间序列, 宜采用 POT 模型拟定其监控指标, 监控指标的拟定重点考虑极端事件, 由于 POT 模型重点研究测值样本的较大值, 因此相较其他方法更能准确地描述监测序列分布的尾部特征^[1]。POT 模型中, 阈值确定方法以图像法为主, 如超出量均值函数图法、Hill 图法等^[2], 需根据图像中的拐点信息, 结合自身经验判断并选取阈值, 随意性较大且精度不高。因此, 本文在现有 POT 模型的基础上, 引入 2σ 准则和 chauenet 准则, 提出一种确定最佳阈值的新方法, 并建立了渠坡位移监控指标拟定的改进 POT 模型, 应用于南水北调中线工程陶岔段膨胀性深挖渠坡工程中; 通过与传统 POT 模型拟定的监控指标进行对比, 验证了

改进模型的合理性。

2 渠坡位移监控指标拟定的改进 POT 模型

2.1 POT 模型的原理

设 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为独立同分布的随机测值序列, 分布函数为 $F(x)$, 设固定阈值 $T (T < x_{\max})$, 取测值序列中 $x_j > T$ 的值, 令 $y_i = x_j - T$, 构成测值样本的超出量序列 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\} (N_T < n)$, 其中 N_T 为阈值 T 下超出量序列的样本容量。

设 $F_T(y)$ 为超出量序列的条件分布函数:

$$F_T(y) = P(x - T \leq y | x > T) \quad y \geq 0 \quad (1)$$

利用条件概率公式对式(1)进行转化, 得到 $F(x)$ 关于 $F_T(y)$ 的表达式:

$$F_T(y) = \frac{F(T+y) - F(T)}{1 - F(T)} = \frac{F(x) - F(T)}{1 - F(T)} \quad (2)$$

$$F(x) = F_T(y) [1 - F(T)] + F(T) \quad (3)$$

由式(3)可知显著性水平 α 下的监控指标 x_α 为:

收稿日期: 2021-10-25, **修回日期:** 2021-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779155); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y720002, Y721009)

作者简介: 周聪聪(1997-), 男, 博士研究生, 研究方向为大坝安全监控与健康诊断, E-mail: 289062923@qq.com

通讯作者: 马福恒(1969-), 男, 博导、正高级工程师, 研究方向为水电工程安全评价、监控与管理, E-mail: fhma@nhri.cn

$$x_a = F^{-1}(x, \alpha) \quad (4)$$

因此,只要求得超出量序列 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 的条件分布函数 $F_T(y)$,就可求出测值序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的总体分布函数 $F(x)$,从而得到 x_a 。

极值理论研究表明,若 $F(x)$ 属于广义极值分布的最大吸引域,当阈值 T 取值足够大时,超出量 y_j 的条件分布函数 $F_T(y)$ 收敛于广义 Pareto 分布^[3]。即:

$$F_T(y) \rightarrow G(y, \xi_T, \sigma_T) = \begin{cases} 1 - (1 + \xi_T \frac{y}{\sigma_T})^{-1/\xi_T} & \xi_T \neq 0, y \geq 0, 1 + \xi_T \frac{y}{\sigma_T} > 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{y}{\sigma_T}\right) & \xi_T = 0, y \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, ξ_T 为形状参数; σ_T 为尺度参数。

可用矩估计法分别计算形状参数 ξ_T 和尺度参数 σ_T 的值:

$$\xi_T = (\bar{Y}_j^2 / S_j^2 - 1) / 2 \quad (6)$$

$$\sigma_T = \bar{Y}_j (\bar{Y}_j^2 / S_j^2 + 1) / 2 \quad (7)$$

式中, \bar{Y}_j, S_j^2 分别为超出量序列 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 的均值、方差。

2.2 阈值 T 的确定方法

通过 Matlab 编程实现阈值 T 的自动化选取。总体思路是根据测值序列,确定阈值上下限 T_{max}, T_{min} ,并给定一个步长 h ,构建阈值递增序列;对于每个阈值 T_i ,求出其对应的超出量样本序列 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$,并估计该序列的形状参数 ξ_T 、尺度参数 σ_T ,从而得到超出量样本序列总体分布函数 $F_T(y)$,并由式(3)求出测值样本的总体分布函数 $F(x)$ 。根据计算结果,寻求一种反映阈值 T 与监控指标 x_a 内在联系的准则,就能在阈值序列中确定出最佳阈值 T_j ,从而拟定监测效应量的监控指标。

2.3 基于 2σ-chauvenet 准则的监控指标拟定原则

监测效应量是对环境变量变化引起工程运行性态变化及观测误差等因素的综合反映。研究表明,监测效应量的数据序列基本服从或近似服从正态分布^[4]。根据统计学理论中的 3σ 准则,测值 x 落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 区间的概率约为 99.73%,测值 x 落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 以外的概率约为 0.3%。其中, μ, σ 为测值序列的均值、标准差。由于样本测值 x 落在 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 以外的概率约为 4.5%,在实际应用中,可将“±2σ”作为效应量监控指标中的一般警戒值 $x_{4.5\%}$,表示渠坡由正常工作状态转变为异常工作状态的临界值。同

时, Chauvenet 准则认为,在 n 次测值中,可能出现次数小于半次者为不正常值^[5]。按正态分布规律,即样本值 x 落在 $(\mu - k\sigma, \mu + k\sigma)$ 区间以外时, x 被视作为一个不应该出现的小概率事件。基于此,将“±kσ”作为效应量监控指标中的严重警戒值 $x_{t\%}$,表示渠坡工程由异常工作状态转变为危险工作状态的临界值。其中, k 为 Chauvenet 准则系数, t 为系数 k 在标准正态分布函数中对应的分布概率。

基于 2σ-chauvenet 准则,有:

$$\begin{cases} x_{4.5\%} = E(x) \pm 2\sigma \\ x_{t\%} = E(x) \pm k\sigma \end{cases} \quad (8)$$

式中, $x_{4.5\%}, x_{t\%}$ 分别为显著性水平为 4.5%、 $t\%$ 时对应的效应量监控指标; $E(x)$ 为监测效应量 x 的数学期望。

根据式(8),理论上存在:

$$|(x_{t\%} - x_{4.5\%}) / (k - 2)| = \sigma \quad (9)$$

对阈值序列 $\{T_1, \dots, T_j, \dots, T_k\}$ 中的每一个阈值 $T_j (1 \leq j \leq k)$,利用式(4)计算显著性水平监控指标 $x_{4.5\%T_j}$ 和 $x_{t\%T_j}$ 的值,并按下式计算 c_j :

$$c_j = ||(x_{t\%T_j} - x_{4.5\%T_j}) / (k - 2) - \sigma| \quad (10)$$

当 $c_j \rightarrow 0$ 时所对应的阈值 T_j 即为最佳阈值,该阈值下显著性水平 $\alpha = 4.5\%$ 时的监控指标 $x_{4.5\%}$ 即为一般警戒值,显著性水平 $\alpha = t\%$ 时的监控指标 $x_{t\%}$ 即为严重警戒值。

3 实例应用

南水北调中线一期工程总干渠陶岔渠首至沙河南段浙川县段是南水北调中线工程的起始段。选取桩号 9+270 的深挖方渠道渠坡 BM02-9270 测点的表面垂直位移监测数据作为样本,选取样本的时段为 2014 年 6 月 22 日到 2021 年 5 月 14 日,剔除粗差后,该测点实测位移过程线见图 1。

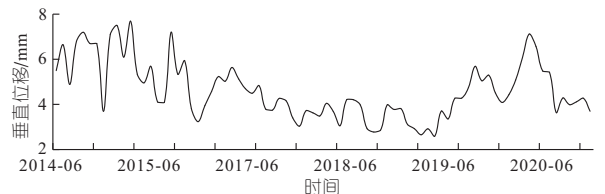


图 1 BM02-9270 测点的实测表面垂直位移过程线
Fig. 1 The measured surface vertical displacement process line at BM02-9270

3.1 阈值的确定

对渠道渠坡 BM02-9270 测点表面垂直位移测值数据按递增排序,得到排序后的数据序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,样本总数 $n = 80$,样本标准差

$\sigma = 1.27$ 。相关研究表明,阈值的选取应使得尾部样本数不超过样本总规模的 10%^[6],基于此,取 a 为不小于样本总数 n 的 90% 的最小正整数,即 $a = [0.9n] = 72$,下限阈值 $T_{\min} = T_1 = x_a = 6.70$,上限阈值 $T_{\max} = T_N = x_{(n-1)} = x_{(79)} = 7.50$ 。设步长 $h = 0.01$,构造阈值递增序列 $\{T_1, \dots, T_j, \dots, T_N\} = \{6.70, \dots, T_j, \dots, 7.50\}$ 。阈值总数 $N = (T_{\max} - T_{\min})/h + 1 = 81$ 。超出量序列 $Y_j = x_i - T_j (x_i \geq T_j)$,记阈值 T_j 对应的超出量序列样本数为 N_{T_j} ,得到超出量样本序列 $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_{T_j}}\}$ 。

采用矩估计法,根据式(6)、(7)计算各阈值 T_j 对应的广义 Pareto 分布的形状参数 ξ_T 和尺度参数 σ_T 。计算可知样本总数 $n = 80$ 对应的 chauenet 系数 $k = 2.76$,在标准正态分布函数中对应的分布概率 $t = 0.58\%$ 。将形状参数 ξ_T 和尺度参数 σ_T 代入式(4)可计算不同显著性水平下阈值 T_j 对应的警戒值,再由式(10)计算 c_j 的值,取 $c_j \rightarrow 0$ 时所对应的阈值 T_j 为最佳阈值,计算结果见表 1。

表 1 BM02-9270 测点改进 POT 模型计算结果

Tab. 1 BM02-9270 measurement points improved POT model calculation results

指标	取值	指标	取值	指标	取值
σ	1.27	σ_T	1.050	c_j	0.094
T_j/mm	7.34	$x_{4.5\%T_j}$	7.920		
ξ_T	3.10	$x_{0.58\%T_j}$	8.780		

3.2 监控指标的拟定

根据改进 POT 模型的计算结果,由 2σ -chauenet 准则可知,将显著性水平 $\alpha = 4.5\%$ 对应的垂直位移监控指标 $x_{4.5\%} = 7.92 \text{ mm}$ 视作一般警戒值,显著性水平 $\alpha = 0.58\%$ 对应的垂直位移监控指标 $x_{0.58\%} = 8.78 \text{ mm}$ 视作严重警戒值,两者均大于 BM02-9270 测点的最大垂直位移测值 7.69 mm 。可见,该渠坡尚处于正常工作状态,与实际情况相符。因此,采用改进 POT 模型拟定渠坡的位移监控指标可行。

3.3 与传统 POT 模型对比分析

为进一步证明所提方法的合理性,采用两种方法对比分析。利用传统 POT 模型拟定 BM02-9270 测点垂直位移监控指标,阈值确定方法采用超出量均值函数图法,取 $(0, 8) \text{ mm}$ 为阈值区间,以 0.01 mm 为间隔绘制超出量均值函数图,见图 2。

超出量均值函数图法确定阈值需满足两个条件:①阈值 T 应取自测值样本从小到大排列的后 10% 范围内,以 BM02-9270 测点为例,应不小于

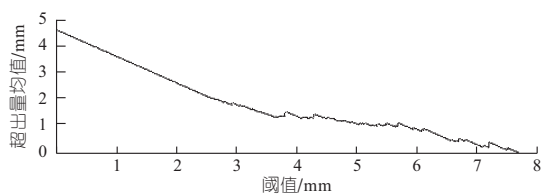


图 2 超出量均值函数

Fig. 2 Mean value function plot of excesses

7.2 mm。②根据超出量均值函数图法的原理,取图像拐点处的数值作为阈值 T ,图 2 中存在多个大于 7.2 mm 的拐点,因此需结合主观经验取舍,这也是超出量均值函数图法的不足所在。由于图 2 中拐点 7.35 mm 更加明显,取 7.35 mm 为最佳阈值,采用文献[6]中的经验方法得到 BM02-9270 测点垂直位移监控指标的一般警戒值 $x_{4.5\%} = 7.92 \text{ mm}$,严重警戒值 $x_{0.3\%} = 9.58 \text{ mm}$ 。

由计算结果可知,超均值函数图法确定的最佳阈值为 7.35 mm ,所提改进 POT 模型确定的最佳阈值为 7.34 mm ,两种方法取得的结果非常接近,证明了本文方法确定阈值的可行性。但超出量均值函数图法的应用完全基于自身经验,主观性较强,阈值选取的精度较低。改进 POT 模型依靠 Matlab 程序实现最佳阈值的自动取值,计算过程客观合理,能有效避免由主观意图造成的偏差,因而精度更高。

此外,传统 POT 模型拟定的严重警戒值为 9.58 mm ,利用改进 POT 模型拟定的严重警戒值为 8.78 mm ,后者比前者小了 0.8 mm ,可见采用改进 POT 模型拟定的位移监控指标更为安全保守。这是因为根据 chauenet 准则的基本原理, chauenet 系数 k 的大小随样本数量 n 变化而变化,当效应量样本容量较小时, chauenet 准则的置信水平更高,拟定的严重警戒值也更小,安全性也更强。

4 结论

a. 改进 POT 模型中,通过 Matlab 编程实现超限数据序列最佳阈值的自动选取,相比于传统 POT 模型中依靠图像法确定阈值,所提方法更客观合理,减少了主观人为因素带来的不利影响,可有效避免随机误差的产生,实现对渠坡位移监测数据尾部风险的精准度量。

b. 改进 POT 模型中,借助概率理论中的 2σ 准则和 chauenet 准则作为渠道边坡监控指标的拟定依据。与传统 POT 模型中依靠经验拟定监控指标相比, 2σ -chauenet 准则考虑了测值序列

的样本容量对指标拟定的影响,置信水平更高,拟定的监控指标更安全,能更好地规避极端情况下渠坡工程面临的未知风险。

c. 由于本文以超阈值的样本序列为研究对象,因此在实际工程的安全监测资料中,当测值序列变幅很小时,测值序列中的极值(超阈值)的区分度就较低,采用 POT 模型法拟定监控指标就有可能得到畸形(过大或过小)的结果,此时不宜采用本文方法拟定该效应量的监控指标。

参考文献:

[1] 王大洋,王大刚. 气候变化对岩溶区流域极端径流频率分析的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2021

(5):118-124.

[2] 聂兵兵,赵二峰,殷详详,等. 基于极值理论的大坝变形监控指标拟定[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12):101-104.

[3] PICKANDS III J. Statistical inference using extreme order statistics[J]. The annals of statistics, 1975, 3(1):119-131.

[4] 吴中如. 大坝的安全监控理论和试验技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.

[5] 魏德荣. 大坝安全监控指标的制定[J]. 大坝与安全, 2003(6):24-28.

[6] 唐贤琪,杨海云,吴凡,等. 基于改进 POT 模型的混凝土坝监控指标拟定[J]. 水利水电工程学报, 2021(2):117-123.

Development of Monitoring Index of Channel Slope Displacement

Based on 2σ-chauvenet Criterion POT Model

ZHOU Cong-cong¹, SHEN Zhen-zhong¹, MA Fu-heng²

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In the long service process of the deep excavated expansive soil channel slope, the real-time identification of the service behavior of the channel slope by means of displacement monitoring index is an important means to ensure the safe operation of the channel slope. Therefore, it is of great significance to formulate reasonable monitoring indexes for the safety of canal slope engineering. The POT model was presented in this paper. On the basis of introduction of 2 σ criteria and chauvenet principles, the threshold T and the corresponding relation between monitoring index was established. Through the best solution to satisfy the relationship between threshold, a canal slope displacement monitoring index for improved POT model was established to apply to the Taocha section of South-to-North Water Transfer Project of deep excavation expansion earth canal in slope engineering. Compared with the traditional POT model, the results show that the improved POT model based on 2σ-chauvenet criterion can effectively avoid subjectivity and random error, and it has higher calculation accuracy. The proposed displacement monitoring index is more safety, which has stronger guiding significance to prevent the risk of canal slope and ensure the safe long-term operation of canal slope.

Key words: deep carving channel slope; expansive soil; monitoring indicators; Peaks over Threshold model; 2σ-chauvenet criterion



(上接第 201 页)

Study on Polygonal Line Strength Criterion of Cemented Gravel Soil

ZHU Si-yu¹, LI Wen-tao², WANG Xu-guang¹, WANG Chen¹

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610065, China)

Abstract: In view of the difference between the performance of cemented gravel soil under low normal stress and high normal stress, based on the Mohr-Coulomb strength criterion, according to the Mohr-Coulomb strength line of cemented gravel soil before and after yield stress, a polygonal line strength criterion of cemented gravel soil was proposed. The relationship between strength criterion parameters and uniaxial compressive strength and uniaxial tensile strength was deduced. Uniaxial compression test and direct tensile test were carried out to calculate the strength criterion parameters and compare with the strength criterion parameters obtained by triaxial compression test. The results show that the error range between the calculated value and the experimental value is reasonable. The polygonal line strength criterion is suitable for cemented gravel soil.

Key words: cemented gravel soil; strength criterion; shear strength parameters; triaxial compression test