

大坝监测数据的灰色系统动态检验模型

何勇军¹ 沈 秋²

(1.水利部大坝安全管理中心,江苏 南京 210029;2.水利部南京水利水文自动化研究所,江苏 南京 210012)

摘要 通过对大坝安全监测数据粗差产生原因的分析,提出了一种基于灰色系统理论的监测数据伪值检验方法和检验模型,它无需长序列样本,并可随着环境量的变化调整模型参数.该方法计算量小,速度快,对于监测点较多的自动化系统非常适用.
关键词 大坝安全;监测数据;灰色系统;检验模型;伪值判断
中图分类号 :TV64 ;TV698 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2003)03-0272-04

1 问题的提出

随着计算机技术、自动监控技术的发展,越来越多的大坝安全监测自动化系统建成并投入运行,实现了数据监测、通讯、建立数据库的自动化,不仅节省了大量人力,也使工程管理部门的管理现代化水平有了很大提高.由于这些系统按设定的时间进行自动化监测,系统将监测数据自动写入监测数据库,这就带来了系统所监测的数据真实性问题,即真值还是伪值,如果是自动化监测系统的传感器、测控单元、测点编号等引起观测粗差而得到的是伪值,它就不反映大坝或建筑物的真实结构性态,应剔除,以保证进入数据库中的资料是真实可用的.如果应用错误的资料序列进行大坝安全分析与评判,势必会得到错误的结论.所以,研究监测数据真伪的检验方法和处理模型具有重要意义.

从直观上判断监测资料系列中是否存在粗差的伪值是比较困难的,尤其是由自动化系统进行自动处理.目前较为常用的人工方法是:通过绘制监测数据的时间过程线或监测效应量与影响量的相关线,查看离群尖点,然后结合原因量(水位、温度、时效等)的变化情况进行对比分析,根据坝工常识和经验来进行判断^[1].这一方法主要基于经验进行判断,存在较大的主观因素,缺乏严格的、客观的理论基础.还有其它一些定量方法,如统计检验法、混合模型、时间序列模型等,均需较长的样本序列,这对于自动化监测系统来说是较困难的.本文结合灰色系统理论对监测数据中粗差值的检验和分析方法进行探讨.

2 灰色系统模型 GM(n ,h)^[2]

GM(n ,h)表示对 h 个因子用 n 阶微分方程建立的模型.考虑 h 个 N 维监测数据序列

$$\{X_k^{(0)}(i) | k = 1, 2, \dots, h; i = 1, 2, \dots, N\} \tag{1}$$

其 GM(n ,h)模型为

$$\sum_{i=0}^n \alpha_i \frac{d^{n-i} X_1^{(1)}}{dt^{n-i}} = \sum_{i=1}^{h-1} \beta_i X_{i+1}^{(1)} \tag{2}$$

$$X_1^{(0)}(0) = X_1^{(1)}(1) \quad X_{k1}^{(1)}(i) = \sum_{s=1}^i X_{k1}^{(0)}(s) \quad i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, h$$

式中: α_i, β_j ——模型待定参数, $\alpha_0 = 1$; n——微分方程阶数; h——因子数.

对式(2)采用差商表示

$$\sum_{i=0}^n \alpha_i \frac{\Delta^{n-i} X_1^{(1)}}{\Delta t^{n-i}} = \sum_{i=1}^{h-1} \beta_i X_{i+1}^{(1)} \tag{3}$$

大坝监测资料序列均为非负时间序列,所以可令 $\Delta t^{n-i} = t_{i+1} - t_i = 1$,从而有

$$\sum_{i=0}^n \alpha_i \Delta^{n-i} X_i^{(1)} = \sum_{i=1}^{h-1} \beta_i X_{i+1}^{(1)} \tag{4}$$

由于

$$\Delta^{n-i} X_i^{(1)} = a^{(n-i)}(X_i^{(1)}, k)$$

所以

$$\sum_{i=0}^n \alpha_i a^{(n-i)}(X_i^{(1)}, k) = \sum_{i=1}^{h-1} \beta_i X_{i+1}^{(1)}(k) \tag{5}$$

式中 $a^{(j)}(X_k, i)$ 为监测资料序列的 j 阶累差值.

写成矩阵形式, 为

$$Y_N = A \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_{n-1} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \alpha_n \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{h-1} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$Y_N = [a^{(n)}(X_1^{(1)}, 2), a^{(n)}(X_1^{(1)}, 3), \dots, a^{(n)}(X_1^{(1)}, N)]^T$$
$$A = \begin{bmatrix} a^{(n-1)}(X_1^{(1)}, 2) & a^{(n-2)}(X_1^{(1)}, 2) & \dots & a^{(1)}(X_1^{(1)}, 2) \\ a^{(n-1)}(X_1^{(1)}, 3) & a^{(n-2)}(X_1^{(1)}, 3) & \dots & a^{(1)}(X_1^{(1)}, 3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a^{(n-1)}(X_1^{(1)}, N) & a^{(n-2)}(X_1^{(1)}, N) & \dots & a^{(1)}(X_1^{(1)}, N) \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} -a^{(0)}(X_1^{(1)}, 2) & X_2^{(1)}(2) & \dots & X_h^{(1)}(2) \\ -a^{(0)}(X_1^{(1)}, 3) & X_2^{(1)}(3) & \dots & X_h^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a^{(n-1)}(X_1^{(1)}, N) & X_2^{(1)}(N) & \dots & X_h^{(1)}(N) \end{bmatrix}$$

进一步可写成分块矩阵形式, 即

$$Y_N = (A \parallel B) \hat{\alpha} \tag{7}$$

$$\hat{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n \parallel \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{h-1})^T$$

为估计 $\hat{\alpha}$, 应用最小二乘法求解, 即使

$$\varepsilon^T \varepsilon \longrightarrow \min \tag{8}$$

$$\varepsilon = Y_N - (A \parallel B) \hat{\alpha}$$

得到

$$\hat{\alpha} = [(A \parallel B)(A \parallel B)^T]^{-1} (A \parallel B)^T Y_N \tag{9}$$

一般地, 以两点滑动平均代替矩阵 B 中的 $a^{(0)}(X_1^{(1)}, k)$ ($k = 2, 3, \dots, N$), 即

$$a^{(0)}(X_1^{(1)}, k) = \frac{1}{2} [X_1^{(1)}(k) + X_1^{(1)}(k-1)]$$

则矩阵 B 变为

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X_1^{(1)}(2) + X_1^{(1)}(1)) & X_2^{(1)}(2) & \dots & X_h^{(1)}(2) \\ -\frac{1}{2}(X_1^{(1)}(3) + X_1^{(1)}(2)) & X_2^{(1)}(3) & \dots & X_h^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(X_1^{(1)}(N) + X_1^{(1)}(N-1)) & X_2^{(1)}(N) & \dots & X_h^{(1)}(N) \end{bmatrix}$$

这样, 求出 $\hat{\alpha}$ 后, 可得出式 (2) 的具体微分方程, 求解这一方程, 即可得式 (2) 的响应函数.

3 监测数据的动态检验模型

尽管大坝原型监测资料真实地反映了大坝各观测物理量的实际情况, 但由于信息的不完全确知, 因子与效应量之间的关系是极为复杂的, 往往很难用物理力学方法来建立确定的数学关系, 它们之间存在着不确定

的因素,是一种灰关系.灰色系统理论提供了一套处理这种信息不完全确知系统的分析和建模方法.

在进行监测数据检验和剔除时,做了如下假设 (a)测点数值所反映的大坝安全状态在时间、空间上是连续的 (b)正常情况下,各测点数据的变化都是由渐变到突变的过程,如果测点数据在渐变情况下超过了监控指标,说明大坝结构发生了变化 (c)各临近或相关测点之间的变化趋势是一致的,如果相关测点的数据均发生了突变,说明大坝结构发生了变化,如果发生了不一致的突变,则说明有粗差存在.

以某水库大坝 1963 m 高程的水平位移监测资料来说明灰色系统动态检验模型的建立和伪值检验方法.

3.1 模型因子选择

大坝的位移主要受水压力、温度和时效等因素影响^[3].由于所建立的数学模型是为了检验最新监测数据的合理性和伪值,所以只考虑监测时刻近期的数据序列,时效因素可以不考虑,温度因素采用混凝土的温度.所以在建模时,其因子选择为监测点的水平位移、库水头、混凝土温度.

由于在式(9)的推导过程中,做了 $\Delta t^{n-i} = 1$ 的假定,故选取等时段的监测数据序列.

3.2 模型建立

设 $n = 1, h = 3$,建立 GM(1,3)动态检验模型.

因各监测资料序列数据悬殊太大,为避免求逆矩阵时的病态或奇异性,需对数据序列进行标准化处理,采用归一化法,即

$$X_k^{(0)}(i) = \frac{X_k^{(0)}(i) - X_{kmin}^{(0)}(i)}{X_{kmax}^{(0)}(i) - X_{kmin}^{(0)}(i)} \quad k = 1, 2, \dots, h \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{10}$$

式中: $X_{kmin}^{(0)}(i)$ ——数据序列的最小值; $X_{kmax}^{(0)}(i)$ ——数据序列的最大值.

选 6 号坝段的监测资料进行计算,得到模型的微分方程为

$$\frac{d\hat{\delta}^{(1)}}{dt} + \alpha\hat{\delta}^{(1)} = \beta_1 H^{(1)} + \beta_2 T^{(1)} \tag{11}$$

式中: α, β_1, β_2 ——模型参数; $\hat{\delta}^{(1)}$ ——水平位移的 1-AGO 序列; $\hat{H}^{(1)}$ ——水头差的 1-AGO 序列; $\hat{T}^{(1)}$ ——混凝土温度的 1-AGO 序列.

解出其响应函数为

$$\hat{\delta}^{(1)}(t+1) = \left[\hat{\delta}^{(1)}(0) - \frac{\beta_1}{\alpha} H^{(1)}(t+1) - \frac{\beta_2}{\alpha} T^{(1)}(t+1) \right] e^{-\alpha t} + \frac{\beta_1}{\alpha} H^{(1)}(t+1) + \frac{\beta_2}{\alpha} T^{(1)}(t+1) \tag{12}$$

计算时,采用观测时刻前 10 个时段的实测值对模型参数进行率定,用以检验现时刻监测值,即用 1~10 时段检验第 11 时段的观测值.表 1 给出了实例所计算的模型参数、复相关系数、剩余标准差和计算误差值,可以看出,模型的计算精度是令人满意的.

3.3 检验区间的确定

为了检验最新测值 δ_{new} 是否为伪值(粗大误差值),必须给定一个检验区间 $[\delta^-, \delta^+]$,当 $\delta_{new} \in [\delta^-, \delta^+]$ 时,判断该值为真,否则,有理由认为该值为伪值,应剔除.

取置信水平 $P = 95\%$,置信带宽 $\Delta = \pm 1.96S$,即

$$[\delta^-, \delta^+] = [\delta - 1.96S, \delta + 1.96S] \tag{13}$$

式中 S 为剩余标准差.计算结果表明,各实测值均在检验区间内,该测点监测资料的观测精度较好.

表 1 计算成果

Table 1 Calculated results

计算时段	α	β_1	β_2	复相关系数 R	剩余标准差 S	最新实测值 /mm	模型计算值 /mm	误差值 /mm
1~10	0.4987	0.6110	-0.0873	0.915	0.231	2.59	2.43	-0.16
2~11	0.1532	0.0577	0.2114	0.873	0.247	2.56	2.36	-0.20
3~12	0.1703	0.1405	0.1447	0.912	0.238	2.50	2.33	-0.17
4~13	0.2320	0.9210	-0.5768	0.871	0.129	2.56	2.76	0.20
5~14	0.3574	0.6658	-0.3602	0.941	0.084	2.65	2.80	0.15
6~15	0.6059	0.7893	-0.1950	0.906	0.046	2.86	2.79	-0.07
7~16	0.9042	0.9177	-0.1991	0.890	0.064	3.01	2.92	-0.09
8~17	0.5668	0.7358	-0.1359	0.891	0.114	3.13	3.14	0.01
9~18	0.2297	0.5062	-0.1095	0.899	0.192	3.22	3.30	0.08

4 结 语

- a. 应用灰色系统理论建立的监测数据动态检验模型 , 有效地解决了自动化监测系统对监测数据的合理性、真实性判别问题 , 它无需长序列样本 , 并可随着环境量的变化调整模型参数 . 实际应用结果说明了其有效性 .
- b. 该方法计算量小 , 计算速度快 . 对于监测点较多的大坝是非常实用的 , 实现了大坝监测数据采集、预处理、建立数据库的自动化 .
- c. 由于监测数据序列中伪值检验的复杂性和对大坝安全评价的重要性 , 在检验过程中 , 应将临近测点的测值和变化趋势结合起来考虑 , 才能做到既不出现误判 , 又不丢失对大坝安全评价有价值的监测信息 .

参考文献 :

[1] 郑晓红 , 何金平 . 大坝安全监测中离群测值的检验分析方法 [J]. 大坝与安全 2001 (3) 35—37 .
[2] 傅立 . 灰色系统理论及应用 [M]. 北京 : 科学技术文献出版社 , 1992 . 56—71 .
[3] 吴中如 , 沈长松 , 阮焕祥 . 水工建筑物安全监控理论及其应用 [M]. 南京 : 河海大学出版社 , 1990 . 36—50 .

Grey system-based dynamic detecting model for dam safety monitoring data

HE Yong-jun¹ , SHEN Qiu²

(1. Dam Safety Management Center , Ministry of Water Resources , Nanjing 210029 , China ;
2. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy & Hydrology , Ministry of Water Resource , Nanjing 210012 , China)

Abstract : A false data detecting method is proposed and a detecting model is developed for examining dam safety monitoring data based on the grey system theory by analysis of the causes of deviation of dam monitoring data. In the model , no long data series is needed , and the parameters of the model can be adjusted with the variation of environmental parameters. With a small amount and high rate of calculation , the method is fit for the automatic system with many monitoring points .

Key words : dam safety ; monitoring data ; grey system ; detecting model ; judgement of false data