

拱坝变形监测中的逐步回归分析应用研究

朱友聪^{1,3}, 张建平², 李红健²

(1. 温州市水利水电工程质量监督站, 浙江 温州 325000; 2. 温州市水利电力勘测设计院, 浙江 温州 325011;
2. 温州市水利管理处, 浙江 温州 325000; 3. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310000)

摘要:拟采用多元逐步回归分析的方法来模拟拱坝变形监测中变形发展趋势, 从而分析评价拱坝变形性态是否符合及正常工作状态, 为拱坝控制运用提供科学决策依据。文中讨论了多元逐步回归分析方法数学模型建立、求解, 并采用工程实例来分析该方法的合理性。通过模型实例分析, 用多元逐步回归分析的方法来模拟拱坝变形监测中变形发展趋势, 所得的回归(拟合)曲线与实际测量所得曲线吻合较好, 能有效的模拟拱坝变形规律, 为拱坝运行管理提供科学依据。

关键词:拱坝; 变形监测; 逐步回归分析

中图分类号:TV642.4

文献标志码:A

文章编号:1008-536X(2009)02-0020-04

Application Research on Stepwise Regression Analytical Technique in Arch Dam Deformation Monitoring

ZHU You-cong^{1,3}, ZHANG Jian-ping², LI Hong-jian²

(1. Wenzhou Quality Supervision Station of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Wenzhou 325000 China;
2. Wenzhou Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Wenzhou 325011 China;
3. Building and Engineering Department of Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The article plans to simulate the trend of deforming development in arch dam deforming monitoring with multiple stepwise regression analytical technique, accordingly, to analyze and evaluate whether the condition of arch dam keeps conformity with proper operation condition, in order to provide the scientific decision-making basis of arch dam control utilization. The building and solving of the mathematic model on multiple stepwise regression analytical technique is discussed in the article, and the rationality of this technique is also analyzed by using instant case. Based on the analysis of instant case model, the trend of deforming development in arch dam deforming monitoring with multiple stepwise regression analytical technique is simulated to find more comprehensive regression curves-fitting curves in fitting condition, resulting in the effective simulation of the deforming regularity of arch dam, which provides the scientific basis to the arch dam operation management.

Key words: arch dam; deforming monitoring; stepwise regression analytical technique

0 引言

大坝安全监测是掌握大坝的运行状态, 保证其安全运用的重要措施, 也是检验设计成果、施工质量和认识大坝的各种物理量变化规律的有效手段^[1]。通过观测所取得的大量原始数据, 为了解大坝状态提供了基础。但是, 原始的观测成果往往只展示了事物的直观表

象, 要深刻地揭示规律和做出判断, 从繁多的观测资料中找出关键问题, 还必须对观测数据进行分辨、解析、提炼和概括, 这就是观测资料分析工作。它为大坝的建设和管理提供有价值的资料, 为确保大坝的安全运行, 并对大坝的安全运行性态做出合理可靠的预报, 定出监控标准, 及时准确的判断与处理。目前, 常用的预测方法主要有多元回归分析方法、时间序列分析方法、频谱分析方法、kalman 滤波法、有限元法、人工神经网络法、小波分析法、系统论方法, 等等。本文拟研究采用多元逐步回归分析的方法来模拟拱坝变形监测中变形发展趋势, 从而分析评价拱坝变形性态是否符合及正常

收稿日期: 2009-03-21

作者简介: 朱友聪(1977-), 男, 工程师, 硕士。主要从事水利水电工程建设质量管理工作的。

工作状态,为拱坝控制运用提供科学决策依据。

1 多元逐步回归模型的建立及求解^[2]

1.1 模型建立

假设 n 个自变量为 $x_j (j = 1, 2, \dots, n)$, 因变量 y . 有 k 个观测点为

$$(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}, y_i), i = 1, 2, \dots, k$$

根据最小二乘原理, y 的估计值为

$$\hat{y} = b_0 + b'_1 x'_1 + b'_2 x'_2 + \dots + b'_l x'_l$$

其中 $l \leq n$, 且各 $x'_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 是从 n 个 x 中按一定显著性水平筛选出的统计检验为显著的因子。

对多元线形回归进行因子筛选,最后给出一定显著性水平下各因子均为显著的回归方程中的诸回归系数。

1.2 求解过程

(1) 作出 $(n+1) \times (n+1)$ 阶规范化的系数初始相关矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} & r_{1y} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} & r_{2y} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} & r_{ny} \\ r_{y1} & r_{y2} & \dots & r_{yn} & r_{yy} \end{bmatrix}$$

式中: $r_{ij} = d_{ij} / \sqrt{d_i d_j}$, $i, j = 1, 2, \dots, n, n+1$ 对应

$$y; d_{ij} = \sum_{t=1}^k (x_{ti} - \bar{x}_i)(x_{tj} - \bar{x}_j), d_i = \sum_{t=1}^k (x_{ti} - \bar{x}_i)^2, d_j = \sum_{t=1}^k (x_{tj} - \bar{x}_j)^2, \bar{x}_i = \sum_{t=1}^k x_{ti} / k, i = 1, 2, \dots, n, n+1$$

(2) 计算偏回归平方和

$$V_i = r_{iy} r_{yi} / r_{ii}, i = 1, 2, \dots, n$$

(3) 若 $V_i < 0$, 则对应的 x_i 是已被选入回归方程的因子。从所有 $V_i < 0$ 的 V_i 中选出 $V_{\min} = \min\{|V_i|\}$, 其对应的因子为 x_{\min} , 且检验因子 x_{\min} 的显著性; 若 $\varphi V_{\min} / r_{yy} < F_2$, 则剔除因子 x_{\min} , 并对系数相关矩阵 R 进行该因子的消元变换, 转(2)。

(4) 若 $V_i > 0$, 则对应的 x_i 为尚待选入的因子。从所有 $V_i > 0$ 的 V_i 中选出 $V_{\max} = \max\{|V_i|\}$, 其对应的因子为 x_{\max} , 且检验因子的显著性; 若 $(\varphi - 1) V_{\max} / (r_{yy} - V_{\max}) \geq F_1$, 则因子 x_{\max} 应入选, 并对系数相关矩阵 R 进行该因子的消元变换, 转(2)。

上述过程一直进行到无因子可剔可选为止。在上述步骤中, φ 为相应的残差平方和之自由度; F_1 及 F_2

均是 F-Y 分布值。当筛选结束时, 就可得出规格化的回归方程的各回归系数 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ 。

2 工程实例

2.1 工程概况

某水电站位于浙江省南部飞云江流域, 水库大坝坝址控制流域面积 32.6 km^2 。水库正常蓄水位 792 m , 设计采用 50 年一遇洪水设计, 设计洪水位 793.78 m ; 500 年一遇洪水校核, 校核洪水位 794.64 m , 水库总库容 1778 万 m^3 。大坝为变厚的抛物线混凝土双曲拱坝, 坝顶高程 795.2 m , 坝底高程 732 m , 最大坝高 63.2 m , 拱顶宽 3.5 m , 坝顶弧长 220 m , 横缝间距 15 m , 分成 15 个坝段, 坝底厚 17.0 m 。拱坝厚高比 0.269 。

水库大坝于 1995 年 1 月建成, 由于多种原因, 大坝各种监测设备使用不正常, 观测数据不完整, 本次分析数据序列为 2003 年 7 月 7 日 ~ 2008 年 9 月 28 日之间的倒垂观测数据序列。倒垂线布置于拱冠梁剖面, 观测点分别分布在高程 790 m 、 771 m 、 753 m 。

2.2 砼拱坝变形回归模型及因子选择

砼坝体变形是坝体及其地基在各种作用因素影响下所产生的物理力学效应的综合表现。根据坝工理论分析及经验可知, 影响砼坝变形的主要因素有自重、库水压力、温度和时效等, 坝体竣工后自重产生的位移基本稳定, 所以分析运行期的观测资料时只需考虑水压、温度和时效三类因子就可以了。

该模型的具体表达式为^[3]

$$\delta = \delta_i + \delta_H + \delta_T$$

式中: δ 为测点观测值的估计值; δ_i 、 δ_H 、 δ_T 分别为时效、水压、温度引起的测点变形分量。

(1) 水压分量 δ_H

不考虑库水位的滞后影响, 取观测当日的水压作为因子, 共取如下 3 个因子: h 、 h^2 、 h^3 , 其中, $h = (H - H_0) / 10$; H 为库水位, m ; H_0 为水库死水位高程值。

(2) 温度分量 δ_T

坝体位移的温度分量取决于整个坝体的温度场及其变化, 与坝体所有各点的温度有关, 作定量分析时可取坝体多个具有代表性温度测点的实测值作为因子, 因大坝已正常蓄水, 坝体温度已达到稳定, 坝体内各点的温度变化主要取决于周围介质温度即气温与水温的变化, 本次分析根据观测记录只取观测时的气温 T 。

(3) 时效分量 δ_i

除了水压和温度外,影响坝体位移的还有时效因子,它反映了坝体和基岩的软弱构造在水重作用下产生的压缩和塑性变形等.这类变形一般类似于混凝土的徐变,即初期变化急剧,而后渐渐趋向稳定,故可取如下 2 个因子:

$$\frac{t}{t+1}, \ln(t+1)$$

式中: t 从观测基准时间 2003 年 7 月 7 日起算,每增加一天, t 增加 0.01.

(4) 垂线位移回归统计模型的建立

选定了影响拱坝变形的各分量的因子后,就得到一个相应的拱坝变形的统计模型为:

$$\delta = \delta_t + \delta_H + \delta_T = b_0 + b_1 \frac{t}{t+1} + b_2 \ln(t+1) +$$

$$b_3 h + b_4 h^2 + b_5 h^3 + b_6 T$$

式中: b_0 为待定常数项; $b_i (i = 1, 2, 3, \dots, 6)$ 为各因子待定回归系数.

2.3 位移回归分析

径向和切向位移采用逐步回归分析计算时,引入和剔除因子的置信度取 $\alpha = 0.05$ 即 95%,经计算后得到各测点的最优回归方程、复相关系数 R 、剩余标准差 S 、显著性检验 F 及用最优回归方程算出的拟合值和残差.回归成果见表 1,以 771 m 高程径向位移为例分别绘出倒垂线实测位移回归分析拟合图、实测位移回归分析残差图、实测位移回归分析分量图,见图 1、图 2、图 3.

表 3.1 某水电站拱坝倒垂线水平位移回归成果表

位移			790 m 高程		771 m 高程		753 m 高程	
			x 向位移	y 向位移	x 向位移	y 向位移	x 向位移	y 向位移
回归因子	常数项	b_0	0.848	8.565	3.065	3.270	1.584	0.229
	时效因子	$t/(t+1)$	b_1	0	2.328	28.723	2.046	35.553
		$\ln(t+1)$	b_2	0	10.282	-41.188	8.765	-50.094
	水压因子	h	b_3	-0.563	3.294	0	2.565	-0.225
		h^2	b_4	0	0	-0.125	0	0
		h^3	b_5	0	0	0	0	0
	温度因子	T	b_6	-0.034	-0.624	0	-0.342	0
复相关系数 R			0.780 1	0.841 6	0.870 8	0.848 8	0.856 3	0.828 0
显著性检验 F			65.84	93.47	74.16	97.64	67.72	57.14
剩余标准差 S			8.736	60.827	9.744	37.709	10.237	17.558

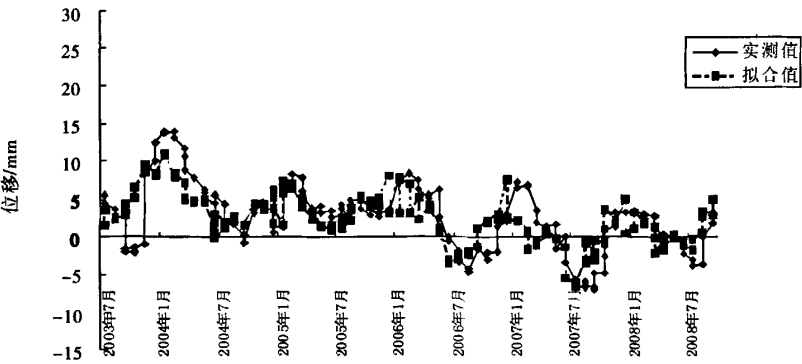


图 1 倒垂线 771 m 高程测点实测位移回归分析拟合图

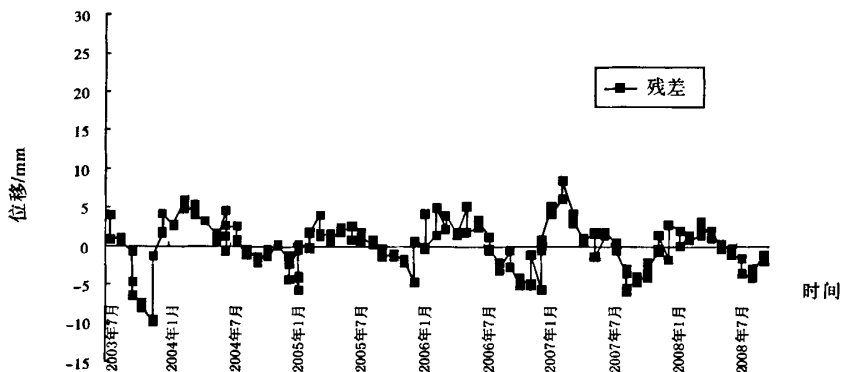


图2 倒垂线 771 m 高程测点位移回归分析残差图

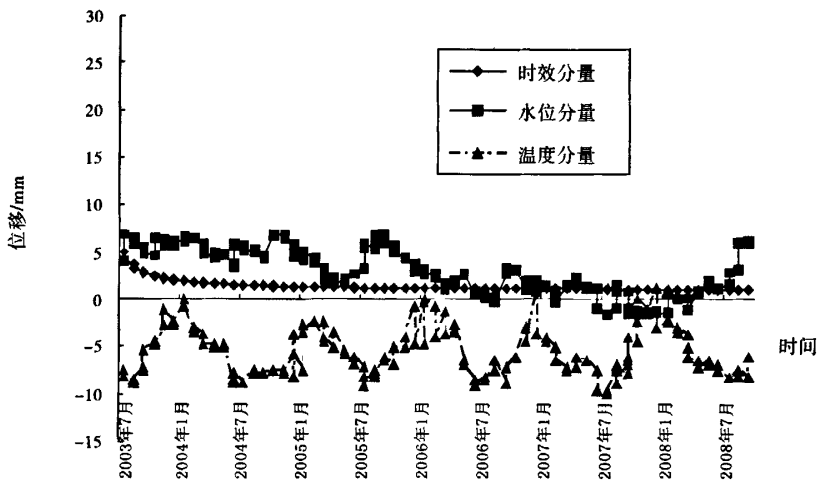


图3 倒垂线 771 m 高程测点实测位移回归分析分量图

(1) 拟合过程线与实测过程线比较

径向位移回归分析复相关系数大于 0.8, 拟合结果表明选择的回归因子是合适的. 径向位移中, 入选的水位因子分量过程线的变化表明: 水位上升时, 坝体产生趋向下流的变位, 水位下降时, 坝体产生趋向上流的变位; 入选的温度因子分量过程线的变化表明: 温度上升时, 坝体产生趋向上流的变位, 温度下降时, 坝体产生趋向下流的变位. 表明坝体在水压因子和温度因子的影响下, 大坝变形符合正常变化规律, 反映了大坝结构性态良好, 坝体处于正常工作状态.

切向位移的复相关系数均为 0.8 左右, 拟合结果表明选择的回归因子是合适的. 切向位移中, 入选的水位因子分量过程线的变化表明: 水位上升时, 坝体产生

微趋向左岸的变位, 水位下降时, 坝体产生微趋向右岸的变位; 入选的温度因子分量过程线的变化表明: 温度升降对水平位移影响不大, 主要是大坝左右岸地质地形条件较对称, 坝肩约束对大坝呈对称布置. 切向位移变位符合坝体变形的正常规律.

(2) 水压分量和温度分量分析

从各高程径向位移和切向位移拟合过程线之间的比较可看出, 790 m 高程测点的位移受温度作用相对明显, 这是因为测点位于坝顶附近, 温度因子的影响大于水压因子的影响. 753 m 高程测点的位移受水压作用明显, 这是因为测点位于坝体下部, 水压因子的影响大于温度因子的影响. 771 m 高程测点受温度与水压

(下转第 31 页)

表3 NE3和NE8控制点校核精度表

点名	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	$\Delta H/m$
NE3	0.021	0.030	0.041
NE8	0.008	0.021	0.033

通过上表可知,其精度满足《浙江省GPS-RTK测量技术规定》对图根点精度的各项要求。

为了保证测量的精度,还应注意:RTK流动站的接收机天线应与换能器在同一垂线上,并保证在RTK固定解的情况下进行施测。

测定测量断面线时,应先将测量船导航至断面位置,在按指定的间距进行测点定位与测深,在测深仪中进行记录,并实时修正船的航向。

5 结 语

在楠溪江河道划界工程水下地形测量过程中,采

用GPS RTK技术、测深仪、导航同步观测软件相结合的测量方法,是目前进行大面积水下地形测量的较为先进的测量方法,并有着高精度、快速、经济的特点。在20 km范围内,GPS-RTK测量可以保持数据链的实时畅通,随着GPS-RTK技术的进一步发展,GPS-RTK技术结合测深仪在海洋、湖泊、河流等的水下地形、航道测量中的应用将会越来越广泛。

参考文献:

- [1] 刘基余,李征航,王跃虎.全球定位系统原理及其应用[M].北京:测绘出版社,1995.
- [2] 刘大杰,施一民,过静君.全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M].上海:同济大学出版社,1997.
- [3] 张兴福,沈云中.GPS高程异常拟合精度的估算方法[J].测绘通报,2003(8):21-22.
- [4] 胡伍生.GPS精密高程测量理论与方法及其应用研究[D].南京:河海大学,2001.

(上接第23页)

因子影响介于790 m和753 m测点之间.该变化规律是符合拱坝位移的正常变化规律的。

(3) 时效的分析

一般来说,时效位移是由于坝体和基岩的徐变以及塑性变形所引起的不可逆变形,初期变化剧烈,而后趋于平稳.从其时效位移分量图和发展趋势来看,切向位移的时效位移随时间的推移渐趋平稳,径向位移的时效位移趋向为一水平线.这是因为该工程建于1995年,坝体砼和基岩的徐变及塑性变形所引起的不可逆变形已基本完成,时效变化的影响逐渐变的平稳,渐趋稳定。

(4) 残差分析

从回归残差过程线可以看出,径向位移与切向位移实测数据拟合较好,残差较小,所含误差较小。

(5) 回归分析结论

通过对该电站拱坝倒垂线位移观测资料的整理分析,回归分析结果总体表明坝体在时效、水压、温度因子的作用下,径向、切向变形符合拱坝的正常变形规

律,坝体结构性态稳定,大坝运行基本正常。

3 结 论

实例计算结果表明,用多元逐步回归分析的方法来模拟拱坝变形监测中变形发展趋势,所得的回归(拟合)曲线与实际测量所得曲线吻合较好,所得复相关系数较大,而残差却较小.同时,它采用的是对多元线形回归进行因子逐步筛选,最后给出一定显著性水平下各因子均为显著的回归方程中的诸回归系数,其结果较一般的最小二乘法所得结果精度高.该模型分析方法能有效的模拟拱坝变形规律,为拱坝运行管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] 徐士良.FORTRAN常用算法程序集[M].第2版.北京:清华大学出版社,1997.
- [2] 覃先峰.工程拱坝设计施工新技术标准实用手册[M].长春:银声音像出版社,2005.
- [3] 赵志仁.大坝安全监测设计[M].郑州:黄河水利出版社,2003.