

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.06.007

基于最优化温度周期因子的坝体变形监测模型

杨 阳¹ ,王 越²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 ; 2. 长江科学院河流研究所 湖北 武汉 430010)

摘要 : 针对坝体温度场的变化是影响坝体位移的主要因素之一 , 考虑到运行期坝体温度场的年周期是微小变动的 , 而现有的监测模型中谐波因子周期固定为 365 d , 在时间上较难刻画这种温度周期的微动。选用变周期的 2 组谐波因子 , 利用粒子群算法寻求最优周期 , 得到最优温度周期因子的位移监测模型。选用新安江大坝位移监测资料进行建模分析 , 结果表明最优周期温度因子模型能更好地体现温度对坝体变形的影响 , 复相关系数有较大提高。

关键词 : 坝体变形监测 ; 位移监测 ; 温度因子 ; 粒子群算法 ; 温度场

中图分类号 : TV698.1 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-7647(2010)06-0026-04

Dam deformation monitoring model based on optimal temperature cycle factor//YANG Yang¹ , WANG Yue² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ; 2. Changjiang River Scientific Research Institute , Wuhan 430010 , China)

Abstract : The variation of temperature field in dams is one of the main factors to affect their displacement . Considering that the actual variation of temperature field in an annual cycle is small and the cycle of harmonic factor is fixed to be 365 days , it is difficult to temporally depict the tiny variation of the temperature field . For this reason , two groups of harmonic factor with variable cycles were selected . The optimal temperature cycles were found by use of the particle swarm optimization algorithm . A displacement monitoring model based on the optimal temperature cycle was obtained . The monitoring data of displacement of Xin ' anjiang Dam were analyzed by means of the new model . The results show that the proposed model based on the temperature factor with variable cycles can satisfactorily reflect the impact of temperature on the dams , and the multiple correlation coefficients are greatly improved .

Key words : dam deformation detection ; displacement monitoring ; temperature factor ; particle swarm optimization ; temperature field

变形监测是观测大坝运行状态的一种重要手段 , 相对于渗流、应力应变等监测项目具有直观、可靠的特点 , 更能反映坝体的实际状况。一般认为 , 影响坝体位移的主要因素有水压、温度和时效 , 并将坝体变形划分为水压、温度、时效三大分量及残差^[1]。水压分量反映坝体在水荷载作用下的弹性可恢复变形 , 温度分量反映坝体混凝土由于温度场变化产生的热胀冷缩变形 , 时效分量综合反映坝体混凝土和基岩的徐变、塑性变形和裂缝产生的不可逆位移。通过分析坝体变形监测数据 , 建立统计回归模型 , 一般可分离出水压、温度、时效分量及残差 , 然后进行坝体状态的评判^[2]。在这三大因素中 , 温度的影响一般最大 , 但温度因素相对于其他因素较难测量 , 准确地描述温度因素需要全面了解坝体内温度场的变

化 , 相对于坝体内有限的温度测点 , 一般是较难达到的。在现有的坝体运行期监测资料分析中^[3-6] , 对温度因子通常选用以时间为变量的 2 组谐波因子组合 , 能够较好地反映温度的影响 , 相对于其他温度因子的形式而言能较好地拟合实际情况 , 结果较为可靠。但通过大量监测资料分析也发现 , 现有的因子形式对精度一致的同组数据的前半期、后半期分别建立回归模型 , 前后 2 组数据负相关系数 R 有时相差较大 , 温度分量的变化较大。分析其实质 , 是因为谐波因子一般假定温度周期固定为 365 d^[3-6] , 而实际温度周期在长年的序列里是有微动的^[7] , 并不完全等于 365 d , 当某段时间的平均周期偏离 365 d 较大时 , 按照 365 d 得到的拟合效果就会变差。基于此 , 笔者首次采用可变周期的温度谐波因子 , 利用粒

子群算法搜索对应监测时段的最优周期,以提高温度因子对实际温度变化的体现能力,最终建立最优化温度周期因子的坝体位移监测模型。

1 温度因子的选择

混凝土坝体变形统计模型中一般包含 3 类因子^[1]。①水压因子 δ_H 。其形式一般为水头 H 的 2 次或 3 次多项式组合;②时效因子 δ_θ 。时效一般在初期变化急剧,后期渐趋稳定,整个过程从非线性变化逐渐过渡为线性变化,因子形式是时间的线性函数和对数函数组合;③温度因子 δ_T 。温度因子反映整个温度场变化导致坝体内混凝土的热胀冷缩,最后在坝体上产生形变分量,其分量所占比重大,对坝体变形有较大影响。温度因子可以选择所有实测温度的线性组合或温度测点的线性拟合公式作为因子,前者能全面利用所有温度测点,但其因子数量过多,数据处理量大,回归难度大,拟合效果差;后者有效地减少了因子数量并保证了数据精度,但坝体内部温度测点布置较少,难以描述整个温度场的变化,经过常年的水库运行,多数测点失效,因而也难以在实际中应用^[3-6]。实际分析中一般选用谐波因子的组合来描述温度的变化特点。

当混凝土水化热已散发,坝体温度场为准稳定温度场,此时坝体温度仅取决于边界温度变化(图 1),即取决于坝体上游面的水温和下游面的气温。设水温和气温做简谐变化,则混凝土内部的温度也做简谐变化,只是变幅较小,而且有一个相位差。厚度为 L 的无限大平板,表面温度为时间的余弦函数时板内温度由式(1)^[1]反映:

$$T(x,t) = f_1(x)\cos\omega t + f_2(x)\sin\omega t \quad (1)$$

式中: x 为位置坐标; t 为时间; ω 为变化频率。初始条件为 $r=0, 0 \leq x \leq L, T=0$;边界条件为 $x=0, T=A_w\cos\omega t, x=L, T=A_o\cos\omega t$ 。

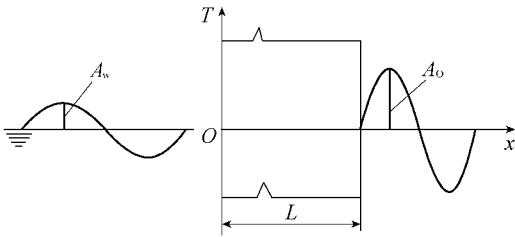


图 1 准稳定温度场计算简图

参照文献[1]坝体混凝土内任一点的温度可以用周期函数表示,同时考虑温度位移与混凝土温度呈线性关系,选用多周期的谐波作为因子,可得

$$\delta_{T_i} = \sum_{i=1}^{m_2} (b_{1i}\sin\omega t + b_{2i}\cos\omega t) \quad (2)$$

其中

$$\omega = \frac{2\pi i}{P}$$

式中: b_{1i}, b_{2i} 为所求因子系数; P 为周期,取 $365 \text{ d}^{[1-3]}$; δ_{T_i} 为温度分量。

谐波因子以时间为自变量,用三角函数来表现温度在一年四季里周期波动这种特点。可形成坝体变形统计模型为

$$\begin{cases} \delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \\ \delta_H = \sum_{i=1}^3 [a_{1i}(H_u^i - H_{u0}^i)] \\ \delta_T = \sum_{i=1}^2 \left[b_{1i} \left(\sin \frac{2\pi it}{P} - \sin \frac{2\pi it_0}{P} \right) + b_{2i} \left(\cos \frac{2\pi it}{P} - \cos \frac{2\pi it_0}{P} \right) \right] \\ \delta_\theta = c_1(\theta - \theta_0) + c_2(\ln\theta - \ln\theta_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\delta_H, \delta_T, \delta_\theta$ 分别为水位分量、温度分量、时效分量; H 为水位; θ 为 t 的函数; t_0 为初始时间。

2 周期不定性及优化计算

2.1 多年周期的不定性

众所周知,地球绕太阳公转导致了太阳对地球辐射的周期性变化,因而产生地球表面一年四季温度的变化,而坝体局部环境的温度变化是受坝体外部宏观环境变化牵动的,式(1)反映了这种周期性的波动。坝体温度的周期应当和太阳对地球辐射的周期性具有一定的同步性。阳光辐射的周期由回归年(tropical year)来描述^[7],它是指从地球上观察,太阳绕天球的黄道 1 周的时间,即太阳中心从春分点到春分点所经历的时间。1 回归年 = $365.242\ 20 \text{ d}$ 。考虑到从宏观的地球表面到坝体周围局部的小环境,这个过程中温度还受到地理位置、地形、纬度、地热、降雨、寒潮、云层厚度等次要的随机因素影响,坝体内部温度的年周期应当接近 365.242 d ,并在其附近随机波动。文献[8]研究了某城市 45 年的温度变化,温度的波动有 6—9 年的,也有 20—30 年的,而现有的监测数据大多数只有几年或 10 几年,较短的监测时段难以从统计学上定义 $P = 365.242 \text{ d}$ 。所以,对应实际某监测时段的温度周期,因时段和年份不同略有变化,应按照不同监测时段计算对应的最优周期。最优周期的寻优算法一般有适应于线性求解的单纯形法、牛顿法、共轭梯度法及非线性的粒子群算法、遗传算法等,这里虽然是对周期做单变量的优化,但考虑到坝体监测数据的统计回归计算过程,时间序列长、数据量大、计算时间长,且温度周期常年的变化具有非线性特点,常规寻优算法花费时间较长。粒子群算法通过集群化的搜索,适应于非线性

性的计算 ,搜索速度快 ,因而笔者用粒子群算法进行迭代计算 ,以期快速找到最优周期。

2.2 粒子群的优化和计算流程

粒子群算法^[9](particle swarm optimization ,PSO)最早由 Eberhart 和 Kennedy 于 1995 年提出 ,算法模拟鸟群的寻食行为来求解优化问题。在 PSO 中 ,每个优化问题的潜在解都可以想象成 d 维搜索空间上的 1 个点 ,称之为“ 粒子 ”,所有的粒子都有由目标函数决定的适应值 ,每个粒子还有一个速度决定其飞翔的方向和距离 ,粒子追随当前的最优粒子在解空间中搜索最优解。算法的核心是粒子速度的确定 ,速度一般以粒子上一迭代步的速度、距粒子群历史最优位置向量、距自己历史最优位置向量并附加权重得到。粒子群算法的主要步骤为 :① 初始化粒子位置、粒子速度 ;② 计算粒子的适应度 ,记录每个粒子历史最优位置 ,粒子群最优位置 ,满足条件时退出 ;③ 根据计算的每个粒子适应度、自己的最优位置、群体的最优位置计算每个粒子的下一步速度 ,转向步骤②。

回归计算结果中 , R 表示回归平方和占总离差平方和的大小 , S 表示实测值和回归值的接近程度 ,两者都表示回归效果的好坏。以 $\max(R)$ 为迭代目标 ,建立基于 PSO 的迭代优化计算流程(图 2) ,寻求温度的最优周期。选取 n 个粒子 ,为了方便计算 ,初始化粒子参数(周期)为 365 d ,对粒子的初始速度随机选取 ,即从 $P = 365$ d 开始并附加随机初始速度 ,进而获得粒子的初始随机分布进行搜索计算。随机选取对应 n 个粒子的初始化速度 ,惯性因子的递减选取凹函数的递减策略。回归分析以计算值 R 作为适应度 ,进行逐步回归计算。PSO 迭代计算收

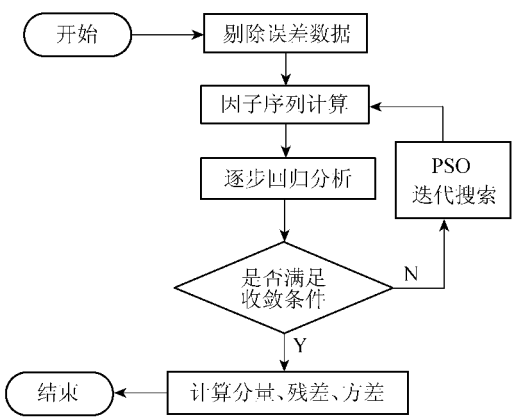


图 2 计算流程

敛条件为 $|R_i - R_{i+1}| \leq 0.5\% R_i$ 。第 1 步迭代计算可得到 $P = 365$ d 的模型参数、 R 和 S ,便于进行对比。当迭代达到收敛后可得到最优化的 P 、模型参数、 R 和 S 。

3 实例分析

3.1 简介

依照计算流程 ,应用 Matlab 编写基于粒子群算法优化的位移监测模型 ,选取 17 组新安江垂线人工监测数据 ,剔除缺测时段和误差。比较选用最优化周期和 $P = 365$ d 的 2 种温度因子模型计算得到的复相关系 R 、剩余标准差 S 及拟合曲线 ,进行实例分析。

3.2 多测点计算结果

17 组数据计算得到对应的 R 和 S (表 1)。选取最优周期计算时 ,整体测点 R 都有所提高 ,回归效果较好 , S 也有所降低。同一时段不同测点的最优周期都在 365.2 d 附近波动 ,这正是由于坝体部位、

表 1 垂线测点回归计算结果

序号	测点位置	建模时段	最优周期结果			固定周期结果		
			周期/d	R	S	周期/d	R	S
1	3 号坝段 61 m 上下游方向	1966-01—2008-06	364.4	0.837	0.798	365	0.718	1.045
2	3 号坝段 61 m 左右岸方向	1966-01—2008-06	366.3	0.953	0.303	365	0.948	0.317
3	3 号坝段 85 m 上下游方向	1976-01—2008-01	364.9	0.865	0.470	365	0.756	0.596
4	3 号坝段 85 m 左右岸方向	1976-01—2008-01	365.4	0.915	0.261	365	0.909	0.269
5	4 号坝段(新) 61 m 上下游方向	1978-04—2008-06	365.1	0.867	0.681	365	0.865	0.680
6	4 号坝段 85 m 上下游方向	1978-04—2008-06	365.4	0.823	0.584	365	0.719	3.651
7	4 号坝段 85 m 左右岸方向	1978-04—2008-06	368.3	0.900	0.226	365	0.724	0.828
8	6 号坝段 61 m 上下游方向	1984-08—2008-06	365.9	0.886	0.614	365	0.881	0.625
9	6 号坝段 38 m 上下游方向	1997-01—2008-06	363.3	0.905	0.734	365	0.692	6.161
10	6 号坝段 38 m 左右岸方向	1997-01—2008-06	363.6	0.735	0.171	365	0.708	12.191
11	13 号坝段 85 m 上下游方向 A	1965-01—1997-12	365.8	0.975	0.310	365	0.696	8.404
12	13 号坝段 85 m 上下游方向 B	1997-12—2000-06	365.4	0.981	0.221	365	0.979	0.228
13	13 号坝段 85 m 左右岸方向	1965-01—1997-03	365.8	0.839	0.165	365	0.706	0.346
14	13 号坝段(新) 61 m 上下游方向	1980-01—1996-11	365.6	0.916	0.254	365	0.751	0.867
15	19 号坝段 61 m 上下游方向 A	1964-01—1980-03	366.0	0.915	0.810	365	0.912	0.825
16	19 号坝段 61 m 上下游方向 B	1980-10—2008-06	365.4	0.929	0.702	365	0.927	0.707
17	19 号坝段 85 m 上下游方向	1976-01—2004-12	366.9	0.776	0.978	365	0.707	14.449

环境波动等因素影响导致的周期微动效果。进一步分析,计算结果分为3类:①最优周期计算得到的 R 提高较大,相应的测点有1,3,6,7,9,11,13,14;②2种方法计算的测点 R 都较高,相应的测点有2,4,5,8,12,15,16,这时最优周期接近于固定周期365 d;③2种方法计算的测点 R 都较小,在0.70~0.77之间,相应的测点有10,17。第1类和第2类计算结果说明最优化温度周期因子更好地反映了温度周期在长时间监测序列里不固定的特征,因而有更好的拟合性能。第3类测点较少,经分析可能是人工监测数据的精度问题,或者其他未知因素导致 R 较低、 S 较大,有待于进一步分析。

3.3 单测点计算结果

对14号测点进一步分析,图3显示在不同周期下回归计算得到的 R 和 S 值,回归计算得到的不同周期的 R 和 S 实际上是非线性的。在 $P = 365.6$ d时, R 得到最大值0.916, S 为0.254,此时的 R 和 S 结果相对较差。

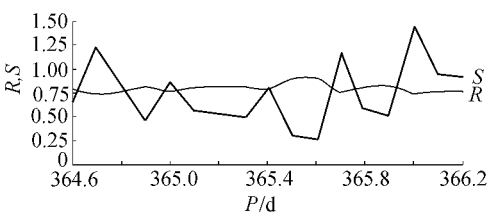
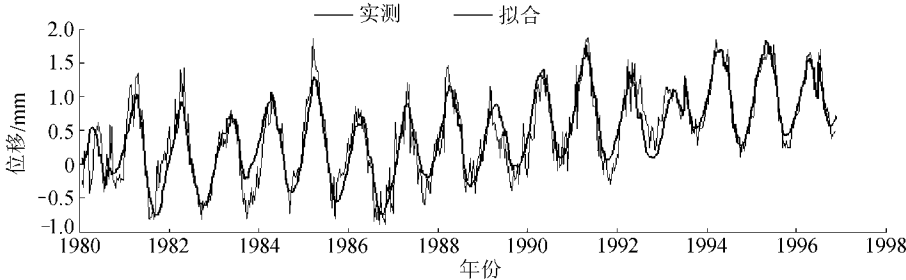


图3 R, S 与 P 的关系

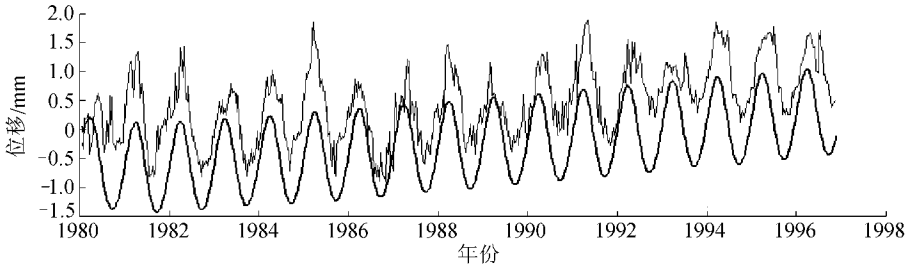
图4显示了当 P 取最优值365.6 d(图4(a))及 P 取固定值365 d(图4(b))时的实测数据和拟合数据。在其他分量基本不变的情况下,前者能较好地拟合真实数据,在一些细节上有更好的逼近,获得的残差也较小(图5);后者有较明显的欠拟合现象,残差相对较大(图5)。

4 结 语

温度变化对坝体变形影响较大,准确描述温度变化对坝体变形产生的影响,需要建立贴合实际温度特征的因子结构。现有的方法中温度因子周期固定,难以描述温度在长年里的周期的微动,因而对实际



(a)最优周期 $P=365.6$ d



(b)固定周期 $P=365$ d

图4 位移过程线

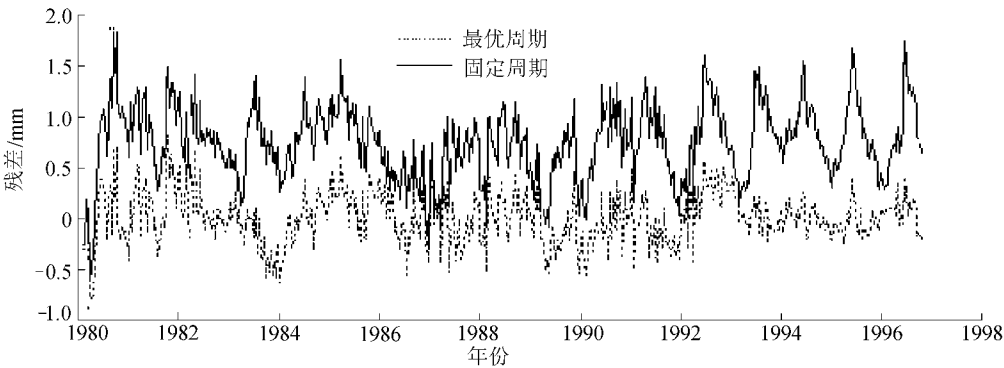


图5 残差过程线

(下转第62页)

得耦合计算过程物理意义清晰明了,更准确地表达了耦合过程的非线性关系。通过工程实例表明笔者建立的基于损伤的渗流-应力耦合模型是正确可行的。

岩石的破坏是从局部开始的,但是当岩石被作为均匀介质时,基于统计方法的损伤力学很难真实地描述岩石损伤的局部化现象。基于拉应变的损伤变量既可以描述压缩状态的岩石试件,又适用于拉伸状态的岩石试件。在材料内部应力集中的区域,应变异常,损伤也相应地发生异常,这就是岩石破坏局部化的原因。但是有限元计算微元体损伤后的力学形态还需要做进一步研究,使之能够准确模拟损伤的局部化扩展。

岩石损伤的最后结果是岩石断裂破坏,基于连续介质力学体系的损伤力学还不能准确地描述岩石的断裂过程以及断裂状态。将损伤和断裂理论相结合来研究岩石的破坏过程将是值得研究的技术方法。在这一点上,损伤因子和断裂指标的结合以及由损伤到断裂的物理机制将是断裂损伤联合研究的重点,也是难点,还有待于深入研究。

参考文献:

[1] 黄秋枫,胡海浪.渗流-应力-损伤耦合研究现状[J].灾害与防治工程,2009,66(5):27-34
[2] 杨天鸿,唐春安,徐涛,等.岩石破裂过程的渗流特性:理论、模型与应用[M].北京:科学出版社,2004:32.
[3] 张文捷,程荣兰,詹美礼,等.岩体渗流的一种改进数学模型[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(1):52-

(上接第29页)

坝体变形的拟合效果较差。通过粒子群算法选取最优温度周期,建立温度谐波因子形成的坝体变形监测模型,不但能表现出温度在1年里的周期性波动,更能模拟温度在多年里周期的微动特点。该模型与现有的一些模型^[3-6]相比,有较好的拟合效果。当然,现有的温度因子结构形式还难以表现1d内温度的变化及春秋季节温度剧烈波动对坝体变形产生的影响,也未考虑到水库水温实际上还与上游来水量有一定关系,这些都需要更进一步的从多个时间尺度去描述温度的不同特点,这将是下一步需要进行的工作。

参考文献:

[1] 吴中如,沈长松,阮焕祥.论混凝土坝变形统计模型的因子选择[J].河海大学学报:自然科学版,1988,16(6):1-8.

57.
[4] 王环玲,徐卫亚,童富国.泄洪雾雨区裂隙岩质边坡饱和-非饱和渗流场与应力场耦合分析[J].岩土力学,2008,29(8):2397-2403.
[5] 宋晓晨,徐卫亚.裂隙岩体渗流模拟的三维离散裂隙网格数值模型(Ⅰ):裂隙网格的随机生成[J].岩石力学与工程学报,2004,23(12):2015-2020.
[6] 卢刚,周志芳.降雨入渗下互层状裂隙岩体非饱和渗流分析[J].岩土工程学报,2008,30(9):1399-1403.
[7] 黄勇,陈静.岩体裂隙介质各向异性耦合模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(2):171-174.
[8] 王俊光,梁冰.渗透水压力作用下裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J].辽宁工程技术大学学报,2009,28(4):178-180.
[9] 陈祖安,伍向阳.岩石渗透率随静水压力变化的关系研究[J].岩石力学与工程学报,1995,14(2):155-159.
[10] ODA M T, TAKEMURA A, AOKI T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of india granite[J]. Mechanics of Materials, 2002, 34: 313-331.
[11] 周维垣,剡公瑞,杨若琼.岩体弹脆性损伤本构模型及工程应用[J].岩土工程学报,1998,20(5):54-57.
[12] PLESHA M E. Constitutive modeling of rock joints with dilation[C]/26th US Symposium on Rock Mechanics. Rapid City, SD(USA):American Rock Mechanics Association,1985:387-392.
[13] 安民,俞茂宏,吴熹,等.广义双剪屈服准则在岩石力学中的应用[J].岩土力学,1991,12(1):17-26.
[14] 魏泽光.三维有限元法中等参数六面体单元的单元分析[J].高等学校计算数学学报,1979,1(1):3-9.
(收稿日期 2009-12-15 编辑 高建群)

[2] 吴中如,顾冲时.综论大坝安全综合评价专家系统[J].水电能源科学,2000,18(2):1-5.
[3] 包腾飞,顾冲时,吴中如,等.三峡大坝施工期应力监测资料建模分析研究[J].水电能源科学,2002,20(4):24-36.
[4] 李子阳,顾冲时.大坝滑坡体变形性状分析模型[J].水电自动化与大坝监测,2006,30(4):59-61.
[5] 郑东健,顾冲时,吴中如.边坡变形的多因素时变预测模型[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):107-110.
[6] 雷鹏,吴中如,顾冲时.大坝安全监测的粗集模型方法[J].武汉大学学报:工学版,2005,38(3):45-49.
[7] 邓可卉.古代中国与古希腊回归年长度测算中若干问题的比较研究[J].内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版,2006,35(1):117-122.
[8] 高晓梅,秦增良,李树军,等.近45年来潍坊市气温的年和年代际变化分析[J].现代农业科技,2008(12):351-359.
[9] 王伟,王连庆.基于粒子群仿生算法的混凝土坝变形预报模型[J].水利水电科技进展,2008,28(4):11-14.
(收稿日期 2010-03-29 编辑 高建群)