

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.015

李萌,包腾飞,杨建慧,等.灰色模型改进的大坝变形分形几何监控模型[J].水利水运工程学报,2016(4):104-110.(LI Meng, BAO Teng-fei, YANG Jian-hui, et al. Fractal geometry monitoring model for dam deformation based on improved grey model [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 104-110.)

灰色模型改进的大坝变形分形几何监控模型

李萌^{1,2,3}, 包腾飞^{1,2,3}, 杨建慧⁴, 任杰^{1,2,3}

(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. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏南京 210098; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 4. 大唐环境产业集团股份有限公司, 北京 100097)

摘要: 为了对大坝安全进行准确监控,利用分形几何理论预测大坝变形。针对一般常维分形分布不能很好分析大坝变形数据的问题,对监测数据进行 N 阶累计和变换,对变换后的数据利用分段变维分形模型计算各阶变形维数序列,再选择效果较好分形维数已知序列预测未知分形维数,最后反推大坝变形预测数据。针对传统变维分形预测模型分形维数预测方法的不确定性和所需监测数据量大的缺点,利用灰色模型预测分形维数,建立改进的大坝分形几何监控模型。结合工程实例,对比插值法预测分形参数的传统分形几何预测模型和灰色模型改进后的预测模型之间的预测精度,结果表明,改进分形模型不仅在预测精度上有所提高,而且更具稳定性和抗波动性。

关键词: 大坝变形; 监控模型; 分形理论; 灰色模型; 位移预测

中图分类号: TV698.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)04-0104-07

大坝与基岩有机构成一个复杂的动力系统,其服役状况至关重要,坝体失事对下游人民的生命财产安全和国家经济会带来巨大损失,因此对大坝的服役性态进行监控必不可少。结合大坝监测资料,运用先进的数学方法和坝工理论建立各种效应量监控模型是实现大坝安全监控的重要途径^[1]。目前,国内外常用的数学建模方法主要有统计、时间序列法、灰色系统理论、人工智能及机器学习等^[1-4],有时考虑到单一模型建模的局限性,常将多种模型结合互补^[5-7]以获取较佳建模效果。各种效应量中,大坝位移易于测量,可直观可靠地反映大坝服役性态,故常建立大坝位移监控模型。但大坝位移监测数据常具有混沌与非线性特征,如何较好刻画其有序性与无序性、确定性与随机性等特点是深入分析监测数据,实现大坝安全监控的难题之一。随着对分形理论的深入研究,本文基于现有研究成果^[8-9],借助分形几何学对大坝位移量混沌和非线性特征挖掘和度量的特有优势,建立基于分形几何学的大坝变形监控模型,为克服分形几何学在应用中对监测数据量的过度要求,引入灰色理论拟合及预测分形维数以改进监控模型,成功将其拓展到小样本监测数据的分析领域中,将两种模型的优势相结合,完成灰色模型改进的大坝变形分形几何监控模型的建立。最后,结合工程实例分析,结果表明,改进后的大坝变形监控模型在位移预测的精度和稳定性方面都高于传统大坝变形分形几何监控模型。

收稿日期: 2015-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579086, 51479054, 51379068, 51139001); 江苏省杰出青年基金资助项目(BK20140039); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程)(YS11001)

作者简介: 李萌(1992—),女,江苏南京人,硕士研究生,主要从事水工结构工程安全监控研究。

E-mail: 379404962@qq.com 通信作者: 包腾飞(E-mail: 1049323184@qq.com)

1 大坝变形分形几何监控模型

分形概念最早由 Mandelbrot 提出,用于描述局部和整体在一定意义上具有自相似性的形体^[10]。分形几何理论作为近几年新兴的一种数学方法,可用来定量描述具有不规则结构的复杂系统,故可用来描述大坝变形资料时间序列的非线性和无序性。大坝变形分形几何监控一般分为常维分形监控和变维分形监控模型。

一般常维分形的分布用如下幂指数函数^[11]表示:

$$N = C/r^D \quad (1)$$

式中: r 为特征线度,如长度、时间等; N 为与 r 有关的物理量,如温度、应力、变形等; C 为待定常数; D 为分形维数。在常维分形中, D 为常数。

根据大坝变形监测资料,根据监测日期将 r 编号,取 $r_i = i (i = 1, 2, \dots, n)$, n 为监测数据个数; N_i 是与 r_i 相对应的大坝变形实测值。由于常维分形维数 D 是一个常数,因此若将两个数据 (N_i, r_i) 和 (N_{i+1}, r_{i+1}) 代入式(1)中,可以得到求 D 的公式:

$$D = \ln(N_{i+1}/N_i) / \ln(r_i/r_{i+1}) \quad (2)$$

在双对数坐标系中,式(2)可表示为一条直线, D 值就是该直线斜率的相反数。根据所求得的 D 值,可反推实现大坝变形位移预测。若发现作出的图形不符合一条直线,则表示 D 不是一个定值,而是随 r_i 变化而变化,此时再用常维分形理论就不能正确描述数据的变化,因此引入变维分形的概念。

变维分形维数 D 是与 r 有关的函数,表示为: $D = F(r)$,实际上,严格满足常维分形的函数关系在自然界中很少,但一般的函数关系经过一定数据转换都能用变维分形分布表示,同时, N 也是与 r 有关的函数,可用 $N=f(r)$ 来表示,可以求出:

$$D = \frac{\ln C - \ln f(r)}{\ln r} \quad (3)$$

由于遇到数据较为复杂时,变维分形的函数式(3)就会复杂而庞大难以计算,因此常常将任意函数关系的数据进行一系列变换,使变换之后的数据能够用常维分形分布表示。最常用的数据变换即将数据分别进行1阶、2阶、3阶……累计和^[12]建立各自的分段变维分形模型,然后选择效果最好的变换,并根据该变换确定分形维数 D ,具体应用在大坝变形预测上的步骤如下:

第1步:将大坝变形数据 N_i 排成1个系列,即:

$$\{N_i\} = \{N_1, N_2, \dots, N_n\} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

并将原始数据点 $(N_i, r_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 绘于双对数坐标上,将相邻的两个点用直线连接,则各段直线的斜率相反数即为各段的分形维数 $D_{(i,i+1)}$ 。

第2步:根据基本数据序列构造累计和序列。例如构造1阶累计和序列: $S(1)_1 = N_1, S(1)_2 = N_1 + N_2, S(1)_3 = N_1 + N_2 + N_3$,等。以此类推,分别构造二阶、三阶累计和等,即:

$$\{S(1)_i\} = \{N_1, N_1 + N_2, N_1 + N_2 + N_3, \dots\} \quad (5)$$

$$\{S(2)_i\} = \{S(1)_1, S(1)_1 + S(1)_2, S(1)_1 + S(1)_2 + S(1)_3, \dots\} \quad (6)$$

$$\{S(3)_i\} = \{S(2)_1, S(2)_1 + S(2)_2, S(2)_1 + S(2)_2 + S(2)_3, \dots\} \quad (7)$$

...

$$\{S(I)_i\} = \{S(I-1)_1, S(I-1)_1 + S(I-1)_2, S(I-1)_1 + S(I-1)_2 + S(I-1)_3, \dots\} \quad (8)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$ 。

第3步:建立各阶累计和的变维分形模型。以一阶累计和为例,将数据点 $(S(1)_i, r_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 绘于双对数坐标轴上,并将相邻点用直线连接,则 n 个数据点可作出 $n-1$ 条线段,每条线段的斜率相反数即为该段的变维分形维数,计算式如下:

$$D(1)_{(i,i+1)} = \frac{\ln(S(1)_{i+1}/S(1)_i)}{\ln(r_i/r_{i+1})} \quad (9)$$

则这 $n-1$ 个数构成变维分形维数序列:

$$\{D(1)_{(i,i+1)}\} = \{D(1)_{(1,2)}, D(1)_{(2,3)}, \dots, D(1)_{(n-1,n)}\} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (10)$$

同理将其余各阶累计和的数据点绘于双对数坐标轴上,以直线相连,并计算各阶的变维分形维数序列。

第4步:选择效果最好的变换,确定相应变维分形维数。在各阶变维分形维数绘出的图形中,选择一条与直线最为相符的折线,计算得出分形维数序列,并求出需要预测的大坝变形数据对应的分形维数。

一般来说,求需要预测数据对应的分形维数的方法有图形拟合法、最小二乘法、插值法等。本文建立基于分形维数的灰微分方程,利用灰色模型对分形维数 D 拟合预测,并且与插值法预测结果进行精度对比,说明灰色模型改进后的大坝变形分形预测模型的优势。

2 灰色模型对分形维数的预测

2.1 分形维数灰色模型的建立

将选出效果最好的分形维数序列 $\{D^{(0)}\}$ 建立灰色模型,白化方程为:

$$dD^{(1)}/dt + aD^{(1)} = u \quad (11)$$

式中: a, u 为待定参数; $D^{(1)}$ 为分形维数 $D^{(0)}$ 的一阶 AGO 序列; t 为独立变量; a 为发展系数; u 为灰作用量。灰色模型的具体过程可参考文献[13]。最终得到的预测公式为:

$$\hat{D}^{(1)}(k+1) = \left(D^{(1)}(1) - \frac{u}{a} \right) \exp(-ak) + \frac{u}{a} \quad (12)$$

$$\hat{D}^{(0)}(k+1) = \hat{D}^{(1)}(k+1) - \hat{D}^{(1)}(k) \quad (13)$$

式中: $k = 1, 2, \dots, n$ 。

2.2 反推预测大坝变形 N_{i+1}

通过式(9)对大坝变形进行反推,可得:

$$S(I)_{i+1} = S(I)_i (r_i/r_{i+1})^{D^{(1)}_{(i,i+1)}} \quad (14)$$

式中: $S(I)_{i+1}$ 为下一时刻 I 阶累计和序列; r_i 为监测时间序列; $D(I)_{(i,i+1)}$ 为灰色模型预测得到的下一时刻分形维数。最终得到在下一时刻 $i+1$ 的大坝变形预测值:

$$N_{i+1} = S(I)_{i+1} - (N_i + N_{i-1} + \dots + N_2 + N_1) \quad (15)$$

式中: N_{i+1} 为下一时刻大坝变形预测值; N_i 为监测得到的大坝变形数据的原始序列值。

3 实例研究

为验证灰色模型改进的大坝分形几何变形监控系统的预测有效性,选取位于雅砻江流域的某水电站大坝变形监测资料为例进行分析。该坝主要水工建筑物由混凝土双曲拱坝、坝后水垫塘及二道坝、右岸泄洪洞及右岸中部地下厂房等组成。水电站工程规模巨大,技术复杂、施工难度很大,许多技术指标已超过了现行规范要求,为了对工程安全进行有效监控,在大坝、基础、两岸边坡、水垫塘及二道坝埋设了大量监测仪器,对变形、渗流、应力应变等进行全面监测。

坝体水平位移采用正倒垂线进行监测,符号规定:径向位移向下游为正,切向位移向左岸为正。为提高代表性和可比性,选取位于同一高程的 PL13-2, PL16-2, PL19-2 共 3 个测点的径向位移时间序列进行分形分析,3 个测点分别位于 13 号、16 号和 19 号坝段。每隔 5 d 选取一组数据,自 2013 年 6 月 22 日到 2013 年 8 月 31 日选取 15 组数据进行拟合,自 2013 年 9 月 5 日到 2013 年 10 月 20 日选取 10 组数据进行预测。

为了直观地分析,将 3 个测点常维分形维数 D ,一阶变维分形维数 $D(1)$,二阶变维分形维数 $D(2)$ 与时间序列的对应关系绘于图 1 中,可见 3 个测点的 $D(1)$ 和 $D(2)$ 曲线拟合效果都比较理想,因此 3 个测点都选择 $D(1)$ 曲线对分形维数进行灰色模型和插值法的拟合预测。

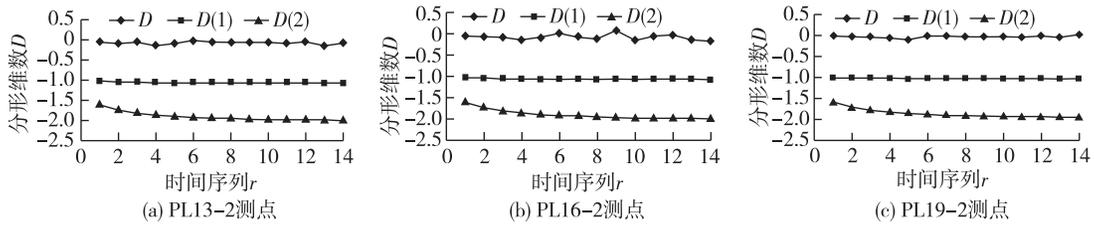


图1 测点各阶分段分形维数

Fig. 1 N-order fractal dimension sequences of points

选取 2013 年 6 月 22 日至 8 月 31 日的 15 组监测数据分别计算分形维数序列 $\{D(1)_{(i,i+1)}\} = \{D(1)_{(1,2)}, D(1)_{(2,3)}, \dots, D(1)_{(14,15)}\}$, 分别利用灰色模型和插值法预测 $D(1)_{(15,16)} \sim D(1)_{(24,25)}$ 这 10 个分形参数。灰色模型预测具体方法见前文所述, 下面简单介绍插值法预测。从 $D(1)_{(1,2)}$ 到 $D(1)_{(14,15)}$ 的总增量为 β , 相邻分段分维参数增加量的平均值为 $\bar{\beta}$, 则

$$\beta = D(1)_{(14,15)} - D(1)_{(1,2)} \tag{16}$$

$$\bar{\beta} = \beta/14 \tag{17}$$

由式(17)计算后面 10 个分形参数:

$$D(1)_{(i,i+1)} = D(1)_{(14,15)} + (i - 14)\bar{\beta} \quad (i = 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24) \tag{18}$$

3 个测点分形维数的灰色模型法预测和插值法预测的结果见表 1。前 15 组大坝位移实测值(该实测值采用正倒垂线测量得到)和计算得到的前 14 个分形维数见表 2。

表 1 分形维数预测结果

Tab. 1 Predicted results of predictive fractal dimension

预测值	PL13-2		PL16-2		PL19-2	
	灰色模型	插值法	灰色模型	插值法	灰色模型	插值法
$D(1)_{(15,16)}$	-1.072 03	-1.074 29	-1.071 86	-1.077 93	-1.029 62	-1.025 10
$D(1)_{(16,17)}$	-1.073 21	-1.077 38	-1.073 14	-1.081 28	-1.030 11	-1.026 27
$D(1)_{(17,18)}$	-1.074 39	-1.080 47	-1.074 43	-1.084 63	-1.030 74	-1.027 44
$D(1)_{(18,19)}$	-1.075 58	-1.083 55	-1.075 72	-1.087 98	-1.031 23	-1.028 61
$D(1)_{(19,20)}$	-1.076 76	-1.086 64	-1.077 01	-1.091 33	-1.031 70	-1.029 77
$D(1)_{(20,21)}$	-1.077 95	-1.089 73	-1.078 31	-1.094 68	-1.032 21	-1.030 94
$D(1)_{(21,22)}$	-1.079 12	-1.092 82	-1.079 60	-1.098 03	-1.032 72	-1.032 11
$D(1)_{(22,23)}$	-1.080 32	-1.095 91	-1.080 90	-1.101 39	-1.033 24	-1.033 27
$D(1)_{(23,24)}$	-1.081 51	-1.098 99	-1.082 20	-1.104 74	-1.033 76	-1.034 44
$D(1)_{(24,25)}$	-1.082 70	-1.102 08	-1.083 50	-1.108 09	-1.034 27	-1.035 61

用灰色模型或差值法预测得出后 10 个分形参数后, 由式(14)根据预测得出的 $D_{(15,16)}$ 计算 $S(1)_{16}$, 则

$$N_{16} = S(1)_{16} - S(1)_{15} \tag{19}$$

同理, 计算出其余 9 个大坝水平径向位移的预测值, PL13-2, PL16-2, PL19-2 这 3 个测点的大坝变形预测结果见表 3。为了说明灰色模型改进分形几何监控模型的预测精度更高, 分别计算了 3 个测点预测值的相对误差绝对值(见表 3)。

表 2 大坝位移实测值

Tab. 2 Measured values of dam displacement

日期	PL13-2		PL16-2		PL19-2	
	实测值 N/mm	$D(1)_{(i,i+1)}$	实测值 N/mm	$D(1)_{(i,i+1)}$	实测值 N/mm	$D(1)_{(i,i+1)}$
2013-06-22	28.84		28.159 9		27.469 9	
2013-06-27	29.97	-1.027 99	29.250 0	-1.027 66	27.760 0	-1.007 60
2013-07-02	31.14	-1.048 04	30.129 9	-1.040 48	28.049 9	-1.012 91
2013-07-07	31.69	-1.049 12	30.909 9	-1.051 14	28.290 0	-1.016 55
2013-07-12	32.77	-1.069 02	31.940 0	-1.069 90	28.649 9	-1.024 27
2013-07-17	33.35	-1.072 57	32.470 0	-1.072 22	29.159 9	-1.036 26
2013-07-22	33.46	-1.063 85	32.479 9	-1.060 63	29.190 0	-1.031 44
2013-07-27	33.72	-1.062 45	32.840 0	-1.062 94	29.250 0	-1.029 08
2013-08-01	33.98	-1.062 31	33.340 0	-1.070 18	29.329 9	-1.028 19
2013-08-06	34.24	-1.063 00	33.110 0	-1.055 37	29.420 0	-1.028 12
2013-08-11	34.47	-1.063 38	33.610 0	-1.064 89	29.489 9	-1.027 69
2013-08-16	34.75	-1.065 74	33.799 9	-1.064 61	29.579 9	-1.028 21
2013-08-21	34.89	-1.064 25	33.860 0	-1.060 93	29.590 0	-1.026 22
2013-08-26	35.28	-1.070 58	34.229 9	-1.067 25	29.690 0	-1.027 56
2013-08-31	35.48	-1.071 21	34.639 9	-1.074 57	29.639 9	-1.023 94

表 3 位移预测值的相对误差绝对值对比

Tab. 3 Comparison of absolute relative errors of predicted values

测点	日期	实测值/mm	灰色模型		插值法	
			预测值/mm	相对误差绝对值/%	预测值/mm	相对误差绝对值/%
PL13-2	2013-09-05	35.410 0	35.677 3	0.754 87	35.755 3	0.975 10
	2013-09-10	35.560 0	35.878 8	0.896 51	36.028 4	1.317 28
	2013-09-15	35.880 0	36.074 8	0.542 92	36.299 8	1.170 07
	2013-09-20	36.330 0	36.265 7	0.176 99	36.569 8	0.660 05
	2013-09-25	36.730 0	36.451 7	0.757 69	36.838 6	0.295 75
	2013-09-30	36.470 0	36.632 9	0.446 73	37.106 6	1.745 41
	2013-10-05	36.060 0	36.810 2	2.080 39	37.373 8	3.643 28
	2013-10-10	35.330 0	36.985 0	4.684 36	37.640 4	6.539 62
	2013-10-15	34.520 0	37.156 2	7.636 74	37.906 7	9.810 97
	2013-10-20	35.020 0	37.324 6	6.580 78	38.172 8	9.002 86
PL16-2	2013-09-05	34.060 0	34.721 6	1.942 45	34.925 2	2.540 19
	2013-09-10	34.650 0	34.921 2	0.782 68	35.208 5	1.611 88
	2013-09-15	34.849 9	35.115 3	0.761 55	35.490 4	1.837 80
	2013-09-20	35.330 0	35.304 4	0.072 46	35.771 1	1.248 64
	2013-09-25	35.439 9	35.489 2	0.139 11	36.051 0	1.724 26
	2013-09-30	35.479 9	35.670 1	0.536 08	36.330 3	2.396 85
	2013-10-05	35.689 9	35.847 5	0.441 58	36.609 2	2.575 80
	2013-10-10	35.020 0	36.021 7	2.860 37	36.887 7	5.333 24
	2013-10-15	34.520 0	36.193 1	4.846 76	37.166 1	7.665 41
	2013-10-20	35.060 0	36.361 9	3.713 35	37.444 5	6.801 20

(续表)

测点	日期	实测值/mm	灰色模型		插值法	
			预测值/mm	相对误差绝对值/%	预测值/mm	相对误差绝对值/%
PL19-2	2013-09-05	29.809 9	29.857 0	0.158 00	29.722 2	0.294 05
	2013-09-10	29.829 9	29.927 3	0.326 52	29.803 9	0.087 15
	2013-09-15	30.049 9	29.998 3	0.171 71	29.885 0	0.548 82
	2013-09-20	30.170 0	30.064 5	0.349 69	29.965 5	0.677 67
	2013-09-25	30.280 0	30.129 0	0.498 68	30.045 7	0.773 85
	2013-09-30	30.370 0	30.192 0	0.586 10	30.125 4	0.805 32
	2013-10-05	30.500 0	30.253 8	0.807 05	30.204 8	0.967 73
	2013-10-10	30.469 9	30.314 4	0.510 33	30.284 0	0.610 21
	2013-10-15	30.290 0	30.373 8	0.276 59	30.362 8	0.240 48
	2013-10-20	30.469 9	30.432 1	0.124 13	30.441 5	0.093 22

4 结 语

以分形几何预测模型为主体,在常维分形模型无法处理的情况下,利用累计和对大坝位移数据进行变换,建立分段变维分形模型,利用灰色模型预测分形参数,最后反推得出大坝位移的预测数据,通过实例分析,得出如下结论:

(1) 分形几何理论应用于预测大坝位移,其效果良好,结果可靠,可作为一种预测模型。

(2) 插值法预测分形参数的传统分形模型和灰色模型改进后的分形模型的预测效果都较好,预测精度也都达到了要求,但通过两种模型相对误差绝对值的对比,可以看出,经过灰色模型预测分形参数后的分形预测模型,其预测精度更高,预测结果也更具稳定性和抗波动性。

(3) 由于本文选用的位移数据都是等时间间隔的连续序列,因此对于间断和不连续的实测值序列的预测还需再跟进研究,以增加模型的适用性。

参 考 文 献:

- [1] 顾冲时,吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京:河海大学出版社,2006:83-85. (GU Chong-shi, WU Zhong-ru. Safety monitoring theory and method of dam foundations and its application[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2006: 83-85. (in Chinese))
- [2] 王雪红,刘晓青,陶海龙,等. 优化BP神经网络的位移预测模型[J]. 水利水运工程学报,2014(2):38-42. (WANG Xue-hong, LIU Xiao-qing, TAO Hai-long, et al. A displacement prediction model based on improved particle swarm-BP neural network algorithm[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(2): 38-42. (in Chinese))
- [3] SALAZAR F, TOLEDO M A, OÑATE E, et al. An empirical comparison of machine learning techniques for dam behaviour modelling[J]. Structural Safety, 2015, 56: 9-17.
- [4] 钟登华,刘昊元,佟大威,等. 基于ANFIS-GM的心墙堆石坝变形预测[J]. 水利水电技术,2015,46(3):1-6,16. (ZHONG Deng-hua, LIU Hao-yuan, TONG Da-wei, et al. ANFIS-GM based-prediction on deformation of rockfill dam with core wall[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(3): 1-6, 16. (in Chinese))
- [5] AWAN J A, BAE D H. Improving ANFIS based model for long-term dam inflow prediction by incorporating monthly rainfall forecasts[J]. Water Resources Management, 2014, 28: 1185-1199.
- [6] SU Huai-zhi, HU Jiang, WU Zhong-ru. A study of safety evaluation and early-warning method for dam global behavior[J]. Structural Health Monitoring, 2012, 11(3): 269-279.
- [7] REN Fu, WU Xue-ling, ZHANG Kai-xiang, et al. Application of wavelet analysis and a particle swarm-optimized support vector

- machine to predict the displacement of the Shuping landslide in the Three Gorges, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(8): 4791-4804.
- [8] 赖道平, 吴中如, 周红. 分形学在大坝安全监测资料分析中的应用[J]. *水利学报*, 2004(1): 100-104. (LAI Dao-ping, WU Zhong-ru, ZHOU Hong. Application of fractal theory to analyze dam safety monitoring data [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(1): 100-104. (in Chinese))
- [9] 田振华, 孙建会, 朱赵辉. 拱坝结构损伤的多测点 R/S 分析[J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34(1): 65-67. (TIAN Zhen-hua, SUN Jian-hui, ZHU Zhao-hui. Multi-point R/S analysis of arch dam structural damage [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, 34(1): 65-67. (in Chinese))
- [10] MANDELBROT B B. *The fractal geometry of nature*[M]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [11] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 239-243. (XIE He-ping. *Fractals-rock mechanics introduction* [M]. Beijing: Science Press, 1996: 239-243. (in Chinese))
- [12] 秦鹏, 张喆瑜, 秦植海, 等. 滑坡体监测数据的改进变维分形——人工神经网络耦合预测模型[J]. *长江科学院院报*, 2012, 29(3): 29-34. (QIN Peng, ZHANG Zhe-yu, QIN Zhi-hai, et al. IVDF-ANN prediction model for monitoring data of landslide deformation [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(3): 29-34. (in Chinese))
- [13] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003. (DENG Ju-long. *Grey theory* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003. (in Chinese))

Fractal geometry monitoring model for dam deformation based on improved grey model

LI Meng^{1,2,3}, BAO Teng-fei^{1,2,3}, YANG Jian-hui⁴, REN Jie^{1,2,3}

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 4. *Datang Environment Industry Group Co., Ltd., Beijing 100097, China*)

Abstract: In this paper, the fractal geometry theory is used to predict dam deformation, which can help to monitor the dam safety accurately. It is difficult to use a constant dimension fractal model to analyse and forecast the dam deformation data. Therefore, a variable dimension fractal model is applied to analyse dam deformation. Firstly, the monitoring data are taken into a transform of cumulative sum of N order. Then, we calculate fractal dimension sequence of each order and choose the best sequence. Finally, the dam deformation forecasting data are calculated in turn. Considering the problem that the traditional prediction method of the fractal dimension is uncertain and that the amount of required monitoring data is large, the prediction of the fractal dimension is made to establish an improved dam fractal geometry monitoring model by use of a grey model. Analysis results show that, based on practical engineering, by comparing the prediction precision of the traditional fractal geometry monitoring model and the improved model, the prediction accuracy of the improved model is better, and the model has the stability of prediction and the resistance to volatility.

Key words: dam deformation; monitoring model; fractal theory; grey model; displacement prediction