

文章编号:1001-5485(2009)12-0033-03

# 基于改进变维分形理论的拱坝温度监测数据预测模型

王英华, 秦 鹏, 陈 斌

(浙江水利水电专科学校 水利系, 杭州 310018)

**摘要:**目前用于温度监测数据预测的模型,对数据的长度有较强的依赖性,监测数据量较少时,预测效果不理想,在分形理论的基础上,尝试建立改进的变维分形预测模型,并以白莲崖拱坝温度监测数据为例进行分析、预测。结果证明,这种模型发挥分形理论有相似性的特点,克服了其他模型对数据长度的依赖性和噪声干扰对预测效果的影响,能较好应用于小数据量监测数据的预测,精度较高,有着良好的抗噪性。

**关键词:**改进变维分形;拱坝温度数据预测;小数据量

**中图分类号:**TV698.1

**文献标识码:**A

对于通仓碾压浇筑、全断面连续上升的碾压混凝土拱坝而言,混凝土散热能力差,水化热积蓄在坝体内部<sup>[1]</sup>。大坝在内外约束的作用下,可能在坝体内部产生较大的温度应力从而导致温度裂缝的产生,直接影响工程进度和大坝的安全。因此,对拱坝进行温度实时监控预测具有重要意义。目前灰色系统分析模型、模糊数学及人工神经网络模型等均被应用于大坝监控数据的分析及预测中,并取得了一定成果<sup>[2]</sup>,但是这些方法对数据的长度有较强的依赖性,监测数据量较少以及数据中白噪的干扰都会对预测精度造成较大影响,预测效果并不理想。文献[3]利用分形学中的重标度极差分析的时间序列法,对大坝进行了分形特征分析,发现大坝可以看做一个具有自相似性的复杂非线性体系,分形维数可以从整体上描述大坝的动态变化特征。因此,本文尝试引入改进的变维分形方法建立大坝温度监控数据分形动力模型,对小数据量的拱坝温度监测数据进行预测。

## 1 改进的变维分形模型的建立

分形理论是 Mandelbort 于 20 世纪 70 年代中期创立的,它基于部分与整体的自相似性,直接从非线性复杂系统本身入手,分析研究对象的自身性质和规律<sup>[4]</sup>。分形理论的提出,为揭示隐藏于混乱复杂现象中的精细结构和定量地描述系统提供了理论基础,已被广泛应用于地质学、经济学、计算机仿真学等众多领域<sup>[5-7]</sup>。常用的分形模型主要有常维分形

和变维分形 2 种。

### 1.1 常维分形与变维分形<sup>[4,8]</sup>

#### 1.1.1 常维分形

目前应用的常维分形可用如下幂指数分布定义,即

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

式中:  $C$  为待定常数;  $D$  为分维数;  $r$  为特征线度,如时间、长度等;  $N$  为与  $r$  有关的数量,如温度、应力、价格等。

当  $D$  为常数时,这种分形称为常维分形,它在双对数坐标上是一条直线,可以通过变化求出分维数,即

$$D = \frac{\ln(N_i/N_j)}{\ln(r_j/r_i)}。 \quad (2)$$

由于负数不能进行对数运算,所以在序列中含有负数时,应当将全系列加上一个常数,通过这种平移可以消除负值带来的影响。

#### 1.1.2 变维分形

对于双对数坐标上的非直线函数关系,常维分形无法处理。为了解决这一问题,文献中引入了变维分形的概念,其分维数  $D$  不再是常数,而是特征线度  $r$  的函数:

$$D = F(r)。 \quad (3)$$

对  $N$  与  $r$  之间的任意函数关系  $N=f(r)$  均可转化为变维分形的形式,即  $f(r) = C/r^D$ , 求出

$$D = \frac{\ln C - \ln f(r)}{\ln r}。 \quad (4)$$

### 1.2 改进的变维分形方法

由于自然界中严格意义上满足常维分形的现象

收稿日期:2008-12-16; 修回日期:2009-01-26

基金资助:浙江省自然科学基金项目(Y5080022); 浙江省水利厅科研项目(RC0837;RB0822)

作者简介:王英华(1957-),男,河北沧州人,教授,主要从事水工结构的教学科研工作,(电话)13819489906(电子信箱)wangyh@zjwhc.com。

是不存在的,所以大量数值模型需要用变维分形的方法进行计算。但当数据复杂时,特征线度  $r$  的函数式又往往庞大而难于计算。研究证明,对于任意函数关系  $N=f(r)$  都可以转换成常维分形  $N=C/r^D$  的形式,即将数据进行一系列的变换,使变换后的数据能用常维分形处理,即通过构造 1 阶、2 阶、3 阶……累积和的分段变维分形模型,然后选择效果最好的变换并确定相应的分形参数<sup>[9]</sup>。基于此思想,本文建立改进变维分形模型,对大坝温度监测时间序列进行预测。该方法的具体步骤如下:

(1) 将原始数据点  $(N_i, r_i) (i=1, 2, \cdots, n)$  绘于双对数坐标上,将  $N_i$  排成一个基本序列,即

$\{N_i\} = \{N_1, N_2, N_3, \cdots\} \quad (i=1, 2, \cdots, n) \quad (5)$

(2) 根据基本序列构造其他序列。例如构造一节累计和序列  $S1$ , 其中  $S1_1 = N_1, S1_2 = N_1 + N_2, S1_3 = N_1 + N_2 + N_3, \cdots$ , 同样可以构造二阶、三阶累计和等,即

$\{S1_i\} = \{N_1, N_1 + N_2, N_1 + N_2 + N_3, \cdots\}; \quad (6)$

$\{S2_i\} = \{S1_1, S1_1 + S1_2, S1_1 + S1_2 + S1_3, \cdots\}; \quad (7)$

$\{S3_i\} = \{S2_1, S2_1 + S2_2, S2_1 + S2_2 + S2_3, \cdots\}; \quad (8)$

……

$\{SI_i\} = \{S(I-1)_1, S(I-1)_1 + S(I-1)_2, S(I-1)_1 + S(I-1)_2 + S(I-1)_3, \cdots\}; \quad (9)$

其中,  $i=1, 2, \cdots, n_0$ 。

(3) 建立各阶累计和的变维分形模型。以一阶累计和为例,利用式(2)计算数据点  $(S1_i, r_i)$  和  $(S1_{i+1}, r_{i+1})$  在双对数坐标中斜率的相反数  $D1_{i,i+1}$ , 即一阶累计和的分段变维分形的分维数,根据  $n$  个数据对,可以得到的是  $n-1$  段分段变维分形的维数,称之为分维数序列。用  $DN_{i,i+1}$  表示  $N$  阶累计和的分段变维分形的分维数序列,  $N=1, 2, \cdots; (i=1, 2, \cdots, n-1)$ 。

(4) 选择最好的变换并确定相应的分形维数。比较各阶分段变维模型,并选择效果最好的变换,按照上述步骤确定分形维数。同时选择一条效果最好的分维数序列曲线,拟合计算出分形参数。

(5) 根据选定的分形维数代入改进变维分形模型,对大坝温度监测数据时间序列趋势项进行预测。

2 工程实例

为验证上节提出的改进变维分形模型预测的有效性,这里以白莲崖拱坝的温度监测资料为例进行分析。

白莲崖大坝位于安徽省霍山县境内,为碾压混

凝土双曲拱坝(RCC 拱坝),坝高104.6 m,坝顶弧长422.9 m,碾压混凝土方量59.1万 m<sup>3</sup>,其坝高、弧长、混凝土浇注量位居国内同类坝前列,库区地质条件复杂,施工难度远高于重力拱坝,大坝自 2004 年开工建设以来,工程的稳定性一直受到各方面的关注。

本文选取 188-K91-01 测点,2008-03-01 至 2008-05-30 的 30 个施工期实时温度监测数据作为样本,建立监测数据的时间序列,采用本文提出的改进变维分形模型对位移监测数据进行尝试性研究。模型选取前 20 个监测数据作为计算数据,后 10 个数据用以检验,为方便计算,以监测数据的时间先后进行编号,  $r=1, 2, \cdots$ 。

首先,对温度监测数据进行 1~4 阶累积和序列的构造,分别求出 188-K91-01 测点监测值的各阶分维值,如表 1 所示。

表1 白莲崖拱坝 188-K91-01 测点温度监测数据  
变维分形维数计算结果

Table 1 Calculated results of Bailianya Arch Dam temperature's n-order variable-dimensional fractal sequences at 188-K91-01 monitoring point					
序列 $r$	观测值/℃	一阶分形维数 $D_1$	二阶分形维数 $D_2$	三阶分形维数 $D_3$	四阶分形维数 $D_4$
1	25.15	-1.027	-1.603	-2.014	-2.333
2	26.10	-1.017	-1.726	-2.274	-2.722
3	26.15	-1.012	-1.789	-2.423	-2.958
4	26.15	-1.016	-1.831	-2.521	-3.119
5	26.35	-1.013	-1.859	-2.591	-3.237
6	26.35	-1.020	-1.881	-2.644	-3.327
7	26.60	-1.017	-1.897	-2.685	-3.398
8	26.60	-1.017	-1.910	-2.718	-3.456
9	26.65	-1.022	-1.921	-2.745	-3.504
10	26.85	-1.022	-1.930	-2.768	-3.545
11	26.90	-1.031	-1.939	-2.788	-3.579
12	27.20	-1.037	-1.948	-2.805	-3.610
13	27.45	-1.042	-1.956	-2.821	-3.636
14	27.65	-1.041	-1.962	-2.834	-3.660
15	27.70	-1.045	-1.968	-2.847	-3.681
16	27.90	-1.044	-1.973	-2.858	-3.700
17	27.95	-1.043	-1.978	-2.868	-3.717
18	28.00	-1.044	-1.982	-2.877	-3.732
19	28.10	-1.047	-1.986	-2.885	-3.747
20	28.25	-1.045	-1.989	-2.892	-3.760

为了便于直观的分析 and 选取,将表 1 数据绘制于图 1,可以看到  $D_1$  和  $D_2$  系列值拟合效果都比较理想,特别是  $D_1$  曲线在后半段十分平顺。因此,本文分别选取  $D_1$ 、 $D_2$  曲线作为预测模型的分形参数曲线,对曲线的分段分形维数进行拟合、反推,得到模型的温度预测序列如表 2 所示。

从总体来看,预测结果比较理想,特别是分维数  $D_1$  的温度预测误差在 2% 以内,证明本文建立的拱坝温度监测数据改进变维分形模型是可行的,预测值能够较好地拟合施工期坝体混凝土的温升变化趋势,与  $D_1$  预测结果相比,由于二维累计和分段变维

分形的分维曲线整体上不平顺,造成 $D_2$ 的预测结果比实际温度偏高,但误差也能保持在 4% 以内,达到较高的精度。

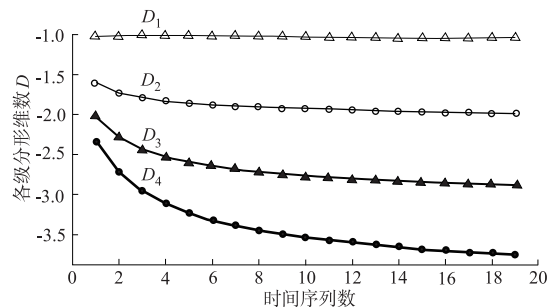


图 1 白莲崖拱坝 188-K91-01 测点  
各级变维分形维数

Fig. 1 Bailianya Arch Dam’s  $n$ -order variable-dimensional fractal sequences at 188-K91-01 monitoring point

表 2 改进的变维分形模型预测结果

Table 2 Forecasted results of improved variable dimension fractal model

序列	观测值/℃	分形维数 $D_1$ 预测值/℃	相对误差/%	分形维数 $D_2$ 预测值/℃	相对误差/%
21	28.25	28.302	0.18	28.739	1.73
22	28.45	28.548	0.34	29.108	2.31
23	28.70	28.670	-0.10	29.263	1.96
24	28.80	28.793	-0.03	29.513	2.48
25	28.95	28.914	-0.12	29.769	2.83
26	29.30	29.036	-0.90	30.031	2.49
27	29.60	29.158	-1.49	30.298	2.36
28	29.80	29.279	-1.75	30.570	2.58
29	30.00	29.400	-2.00	30.847	2.82
30	30.10	29.521	-1.92	31.129	3.42

3 结 论

在分形理论的基础上建立了改进变维分形预测模型,对白莲崖拱坝 188-K91-01 测点的温度数据进行预测,模型发挥分形理论自相似性的特点,充分挖

掘监测数据本身的非线性动态信息,克服了其他预测模型对数据长度的依赖性和噪声干扰对预测效果的影响。该模型适用于小数据量监测资料,且具有良好的抗噪性,能够达到较高的预测精度。本文的进一步工作是通过更多监测数据的实际计算,证明预测模型的通用性,另外,增加预测时间、进一步提高预测精度也是模型需要探讨和改进的地方。

致谢:本文特别感谢国网电力科学研究院南京南瑞集团公司张黎明工程师提供的现场数据资料。

参考文献:

[1] 朱友聪,张建平,李红建. 拱坝变形监测中的逐步回归分析应用研究[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2009,21(2):20 - 23.

[2] 黄声享,尹晖,蒋 征. 变形监测数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003:118 - 123.

[3] 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(1):100 - 104.

[4] MANDELBROT B B. Les objets fractals: forme, hasard et dimension [M]. In: Flammarion. Paris. 1975.

[5] 秦 鹏,秦植海. 基于分形理论的岩质高边坡监测资料分析[J]. 水利水运工程学报, 2008,9(3):92 - 97.

[6] 厉大业,阮 炯. 分形 Hurst 指数在彩虹期权定价中的应用[J]. 复旦学报(自然科学版),2007,46(2):156 - 167.

[7] 宋春林,冯 端,刘富强,等. 变步长和变阈值的分形小波图像压缩算法[J]. 计算机工程,2007,(14):174 - 176.

[8] MANDELBROT B B. How long is the coast of the Britain? Statistical self - similarity and fractional dimension [J]. Science,1967,156(375):636 - 638.

[9] 付昱华. 变换形成的分形与海洋环境数据分析预测[J]. 海洋通报,2000,19(1):79 - 88.

(编辑:曾小汉)

Forecasting Model of Monitored Data of Arch Dam’s Temperature  
Based on Improved Variable Dimension Fractal Theory

WANG Ying-hua, QIN Peng, CHEN Bin  
(Department of Hydraulic Power, Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College,  
Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** At present, the forecasting model of temperature is mainly dependent on the number of monitored data, the prediction effect is not good as the monitored data are less. The paper attempts to set up and improve variable dimension fractal of forecasting model based on fractal theory, and analyzes the monitored data of Bailianya Arch Dam’s temperature. The forecasted result shows that the improved model takes advantage of the feature of fractal theory self-similarity, and decreases the dependence on the data quantity and the noise influence on prediction effect. The model is of high precision, and has vast noise immunity.

**Key words:** improved variable dimension fractal; arch dam temperature forecast; insufficient data