

基于分形插值理论的水库泥沙淤积量模型构建

高洪波¹, 段文超²

(1. 江苏城市职业学院, 江苏 南通 226006; 2. 长江水利委员会水文局, 武汉 430014)

摘要: 水库泥沙淤积量的科学预测对于水库的合理调度、综合效益的发挥有着重要的意义。为了准确预测水库泥沙淤积量, 首先, 基于分形理论, 探讨了基于分形插值的、具有外推功能的预测模型构建方法; 其次, 通过实例验证了水库泥沙淤积量变化具有较好的分形特征; 最后, 利用分形插值预测模型对未来时间点水库泥沙淤积量进行了预测。实证分析表明: 采用这种方法构建的水库泥沙淤积量模型具有较高的可靠性, 且便于编程, 因此是一种实用性较强的水库泥沙淤积量模型建构方法。

关键词: 分形插值; 自相似性, 水库泥沙淤积量; 预测模型构建

中图分类号: TV 213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2014) 02-0034-03

Development of Reservoir Sedimentation Model Based on Fractal Interpolation Theory

GAO Hong bo¹, DUAN Wen chao²

(1. Jiangsu City Vocational College, Nantong 226006, China;

2. The Yangtze River Water Resources Commission, The Hydrological Bureau, Wuhan 430014, China)

Abstract: Scientific prediction of reservoir sedimentation volume is of great significance for the reasonable regulation and development of comprehensive benefit of the reservoir. In order to accurately predict the amount of sediment deposition in the reservoir, firstly this paper discussed the method of prediction model construction with extrapolation function based on the theory of fractal interpolation; secondly, the variation of reservoir sedimentation volume was verified with good fractal characteristics; finally, the amount of sediment deposition in the reservoir in future was predicted using the fractal interpolation model. The empirical results showed that the model constructed in this paper has the advantages of high reliability and convenient programming; therefore it is an effective model construction method for reservoir sedimentation.

Key words: fractal interpolation; self similarity; reservoir sedimentation volume; establishment of prediction model

分形理论创立于 20 世纪 70 年代, 它同混沌理论一起成为继相对论和量子力学问世以来对人类知识体系的又一次巨大贡献。分形理论借助自相似性原理, 深入观察和分析混沌现象中的内在细致结构, 较好地适用于自然界、社会活动中广泛存在的看似繁杂无序、但其实存在着某种规律的复杂系统研究, 为人们从局部认识整体、从有限认识无限提供了较为科学的定量描述手段^[1-4]。

水库泥沙淤积量的预测, 对水库合理调度, 使其发挥应有的防洪、发电、灌溉、航运、水产养殖等综合效益有着重要的意义。而要使水库真正发挥应有的效益, 泥沙淤积量预测是一个至关重要、不可忽视的问题。泥沙淤积不仅影响水库功能的正常发挥, 甚至会造成水库堤坝漫溢或垮坝。大量实测资料表明: 水库泥沙淤积量因其形成的复杂性呈现出较为明显的分形特征。因此本文拟探讨基于分形插值理论的水

库泥沙淤积量预测模型的构建。

1 基于分形理论的插值方法与预测模型构建

分形插值原理是根据分形几何自相似性原理和迭代函数系统 IFS 理论^[5], 将已知数据插值成具有自相似结构的曲线或曲面, 其中每个局部都与整体自相似或统计自相似。因此, 分形插值可以有效地避免传统插值方法对相邻插值点间局部变化特征的掩盖^[6]。换言之, 分形插值是根据整体与局部相似的原理, 将插值数据点的变化特征映射到了相邻点之间的局部区域, 在相邻的两个信息点之间得到波状起伏的形态, 从而得到两信息点之间局部变化特征, 这与客观实际中在相邻两个信息点之间通常并不是线性变化的或光滑过度的, 而是存在局部变化的特征情形相吻合。因此, 对于具有分形特征的形体, 分形插值方法更符合客观实际。

1.1 分形插值方法

分形插值方法一般步骤如下^[7]。

(1) 对于一组待处理的数据, 首先从图像出发, 建立笛卡儿坐标系, 构造一条分形曲线, 这条分形曲线实际上就是迭代函数系统 $IFS\{R^2: W_1, W_2, \dots, W_N\}$ 的吸引子 G 。

(2) 确定其中参数 $a_n, c_n, e_n, f_n (n= 1, 2, \dots, N)$, 并选取相应的垂直比例因子 d_n , 作为分形自由参量, 用于调整分形插值函数的形状, 以满足不同分形的要求。 d_n 越小, 曲线越平滑, 一般选择 $0 \leq |d_n| \leq 1$ 。

(3) 构造吸引子 $G = \bigcup_{n=1}^N W_n(G)$ 。 首先任意选择一个数据集 $A_0 \in F(x)$, 然后依据构造吸引子的递归关系, 独立地取每个数据顺序使用每个仿射变换, 构造一个序列 $\{W_n, n= 0, 1, 2, \dots, N\}$, 计算此序列的极限集 A , 则 A 就是迭代函数系统 IFS 的吸引子, 从而由分形插值得到的分形曲线。

1.2 基于分形插值理论预测模型的构建

分形插值理论预测模型通常运用分形拼贴原理进行构建^[8], 有的是依据经验给分形插值中的参数赋予相应权重, 由此迭代函数系统 IFS 通过初始点启动迭代得到吸引子来对待定值进行预测^[9-10]; 有的是采取先设定预测点的横、纵坐标, 构建新的迭代函数系统 IFS, 以一定的步长计算新 IFS 系统与原 IFS 系统均方误差的接近程度来得出预测值的逐步外推法^[11-12]等。 采用上述逐步外推算法具有较好的精度和可操作性, 可以有效克服依据经验选取各个参数权重而带来的偏差和不确定性, 其基本依据是历史数据本身具有分形特性, 因此可以基于历史数据建立区间内的 IFS 迭代系统。 逐步外推算法具体步骤如下。

(1) 选取相应的历史数据时间序列样本 $\{ (x(n), y(n)), n= 1, \dots, N \}$ 。

(2) 将该样本数据进行规格标准化, 即

$Y_n = (y(n) - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min}) \quad (n= 1, \dots, N)$

(3) 选取适当的仿射变换垂直尺度因子 d_i 。

(4) 按分形插值相关公式计算仿射变换中的相关参数 $a_n, c_n, e_n, f_n (n= 1, 2, \dots, N)$, 获得该样本集的迭代函数系统 IFS。

(5) 设预测点的横坐标 X_B , 为该预测点设定一个较为恰当的初值作为纵坐标 Y_B , 将该点代入历史数据样本集中, 求出新的迭代函数系统 IFS。

(6) 分别求出原 IFS 迭代系统和新的 IFS 迭代系统均方误差, 然后进行比对。 当两者接近且均方误差最小时, 则设定的值就是给定误差许可下最符合条件的标准化预测值。 然后根据规格标准化公式还原计算, 即可得到最后的预测值。

(7) 若步骤(6) 所求出的新的 IFS 迭代系统均方误差不能满足要求, 可用一定的步长逐渐改变 Y_n 的大小, 依步骤(5) 重新判断待定值, 直到满足要求为止。

2 基于分形插值理论的水库泥沙淤积量预测模型构建

有关水库泥沙淤积量的预测, 过去曾经有过不少经验公式, 代表性的有拉普善可夫方法, 及我国著名水利专家韩其为根据不平衡输沙理论推出的计算公式等 9 个公式^[14-16], 但均存在运算量大、较繁琐且公式中有关系数的确定带有经验性等问题。

大量研究资料表明, 水库泥沙淤积量的变化呈现出了较为典型的分形特性。 因此可以运用分形插值理论和方法来研究泥沙淤积量动态分形规律, 建立水库泥沙淤积量预测模型。 下面以某水库实测得到的泥沙淤积量和年数的数据为例, 探讨构建水库泥沙淤积量与年数间关系模型。 某水库实测数据见表 1。

表 1 某水库泥沙淤积量 年数实测数据
Table 1 The measured data of reservoir sedimentation with number of years of a reservoir

年数/a	淤积量/万 t	年数/a	淤积量/万 t	年数/a	淤积量/万 t	年数/a	淤积量/万 t
0.670 0	1.848 8	3.022 3	4.640 4	5.230 5	5.480 5	11.722 5	8.263 4
0.742 2	2.327 1	3.082 3	4.944 9	5.337 6	5.787 0	11.808 3	8.607 4
0.820 0	2.695 9	3.217 9	4.906 4	5.456 1	5.911 1	11.873 4	9.012 9
0.896 1	2.429 5	3.494 3	4.631 0	5.864 7	5.720 4	11.937 2	8.712 5
0.967 6	2.524 6	3.559 9	4.807 3	6.260 7	6.285 5	11.994 4	8.843 6
1.297 6	2.519 5	3.837 7	4.885 3	6.670 4	6.487 5	12.270 2	8.870 1
1.370 7	2.716 8	3.888 1	5.205 6	6.956 2	6.814 5	12.330 7	9.183 7
1.546 9	2.624 7	3.954 3	5.173 5	7.858 5	6.879 6	12.448 0	9.209 7
1.722 5	2.789 5	4.002 0	5.188 4	9.021 6	6.993 1	12.762 9	9.209 9
1.830 3	3.159 7	4.074 0	5.148 9	9.428 9	7.188 9	13.150 2	9.584 4
1.908 7	3.530 0	4.306 3	5.283 0	10.682 1	7.885 7	13.433 9	9.998 9
1.979 8	3.637 3	4.359 6	5.327 0	10.761 4	7.991 5	13.676 9	10.106 6
2.282 9	3.639 7	4.520 9	5.272 0	10.861 6	8.013 8	14.770 1	10.123 1
2.470 2	3.814 9	4.648 7	5.313 0	10.933 2	8.120 9	15.454 2	10.379 3
2.575 4	4.318 8	4.736 5	5.950 4	11.055 0	8.429 4		
2.847 7	4.489 6	4.807 6	5.933 9	11.360 5	8.391 9		
2.940 4	4.497 2	4.894 1	5.581 8	11.450 0	8.208 8		

2.1 水库泥沙淤积量分形性的定性分析

图 1 为水库泥沙淤积量与年数曲线,可以看出曲线整体上呈现出大“S”型的特征,而在某个较小的时间段内,曲线形态又呈现出了小“S”型特征。这种“S”型结构,从直观上反映了水库泥沙淤积量与年数关系曲线的统计学意义自相似性的分形性特征。

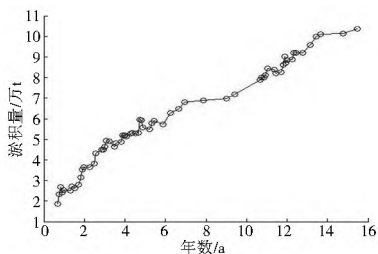


图 1 水库泥沙淤积量与年数曲线

Fig. 1 Reservoir sedimentation with number of years

2.2 水库泥沙淤积量分形插值拟合与分析

利用 MATLAB 编制相应的程序,对该水库泥沙淤积量与年数间关系进行分形插值拟合。此处选取的分形插值迭代函数系统 IFS 的纵向压缩比 $d_i = 0.1$,迭代次数为 2。将分形插值拟合点与关原始数据通过绘制图形相互比较,图形见图 2。

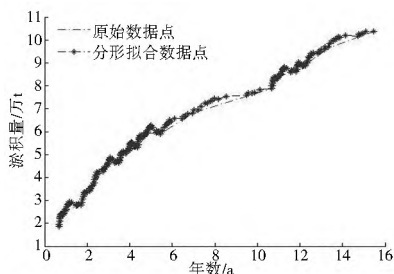


图 2 分形插值拟合数据点与原始数据点的比较

Fig. 2 Comparison of fractal interpolation fitting data and original data

从图 2 中可以看出,用分形插值方法得到的水库泥沙淤积量拟合值与原始实测的值非常接近,有极高的相似度和吻合度。比较原始实测数据与分形插值拟合数据的均值,分别为 6.037 8 和 6.160 8,两者相对误差的值为 0.02。说明分形插值法对于水库淤积量具有较高的拟合精度,因此基于分形插值构建水库泥沙淤积量预测模型是可行的。

2.3 基于分形插值理论的水库泥沙淤积量预测

假设排除泄洪排沙等人为因素,依据基于分形理论的预测模型构建方法与步骤,对年数为 17 时水库泥沙淤积量进行预测。计算并比对新旧两个 IFS 系统所对应的均方误差值,通过在 MATLAB 环境中编程演算,当设定的预测值以 0.01 为步长,逐渐改变预测值至 1.21 时,计算得出对应的 IFS 系统的均方误差值为 0.304 1,最接近原始历史数据 IFS 系统的均方误差为 0.304 0,即可得到满足条件的预测点。依据规范标准化公式进行还原计算,得到年数为 17 时的水库泥沙淤积量预测值为 12.170 7 万 t。

3 结语

本文基于分形插值理论,研究了基于分形插值的预测模

型构建方法与步骤,在分析水库泥沙淤积量分形特征的基础上,得出的基于分形插值外推建模法。实证分析表明:采用分形插值无论是在拟合实测数据方面还是在构建水库泥沙淤积量预测模型方面均具有较高的可靠性和可操作性,计算过程清晰,利于编程实现,且不需要事先人为权重赋值,从而避免由于主观因素所导致的计算结果失真等优点,与实际的水库泥沙淤积量变化状况吻合度较高。但同时也要看到水库泥沙淤积量的影响因素非常复杂,基于分形插值外推方法较为适合短期预测,因此,存在着一定的局限性。

参考文献(References):

- [1] 辛厚文. 分形理论及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993. (XIN Hou wen. The Fractal Theory and Its Application [M]. Hefei: University of Science & Technology China Press, 1993. (in Chinese))
- [2] 李后强, 汪富泉. 分形理论及其在分子科学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997. (LI Hou qiang, WANG Fu quan. The Fractal Theory and Its Application in Molecular Science [M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese))
- [3] 吴敏金. 分形信息导论[M]. 上海: 上海科技出版社, 1998. (WU Min jin. Introduction to Fractal Information [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1998. (in Chinese))
- [4] 埃德加. E. 彼得斯. 分形市场分析—将混沌理论应用到投资与经济理论上[M]. 储海林, 殷勤译. 北京: 经济科学出版社, 2002. (Edgar, E. Peters. Fractal Market Analysis: the Application of Chaos Theory to Investment and Economic Theory [M]. Translation: CHU Hai lin, YIN Qin. Beijing: Economic Science Press, 2002. (in Chinese))
- [5] 孙洪泉. 分形几何与分形插值[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (SUN Hong quan. Fractal Geometry and Fractal Interpolation [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [6] 范玉红, 栾元重, 王永, 等. 分形插值与传统插值相结合的方法研究[J]. 测绘科学, 2005, 02: 76-77, 80. (FAN Yu hong, LU-AN Yuan zhong, WANG Yong, et al. The Method Study of Combination of Fractal Interpolation and Linear Interpolation [J]. Science of Surveying and Mapping, 2005, 02: 76-77, 80. (in Chinese))
- [7] 孙洪泉. 分形插值曲面的 MATLAB 程序[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2006, (4): 18-21, 38. (SUN Hong quan. A Practical MATLAB Program of Fractal Interpolated Surface[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou: Engineering and Technology, 2006, (4): 18-21, 38. (in Chinese))
- [8] 张宏伟, 陆仁强, 牛志广. 基于分形理论的城市日用水量预测方法[J]. 天津大学学报, 2009, (1): 56-59. (ZHANG Hong wei, LU Ren qiang, NIU Zhi guang. Prediction Method of Urban Daily Water Consumption Based on Fractional Theory [J]. Journal of Tianjin University, 2009, (1): 56-59. (in Chinese))
- [9] 乐逸祥, 周磊山, 齐向春. 基于分形插值方法的城市轨道交通车站客流拟合与仿真[J]. 铁道学报, 2012, (8): 7-12. (YUE Yi xiang, ZHOU Lei Shan, QI Xiang chun. Using Fractal Interpolation Model to Simulate Passenger Flow Sequence in Urban Rail Transit Station[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, (8): 7-12. (in Chinese))

(下转第 53 页)

南水北调与水利科技, 2011, 9(3): 24-27. (WANG Ba wei, TIAN Fu qiang, SANG Guo qing. Application of HEG RAS Flood Routing Model in the Three Gorges Reservoir [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(3): 24-27. (in Chinese))

[4] 田景环, 张科磊, 陈猛, 等. HEG-RAS 模型在洪水风险分析评估中的应用研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 23-25. (TIAN Jing huan, ZHANG Ke lei, CHEN Meng. Application of HEG-RAS Model to Analysis and Assessment of Flood Risk[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(4): 23-25. (in Chinese))

[5] Hicks F E, Peacock T. Suitability of HEG-RAS for Flood Forecasting [J]. Canadian Water Resources Journal, 2005, 30(2): 159-174.

[6] Pappenberger F, Beven K, Horritt M, et al. Uncertainty in the Calibration of Effective Roughness Parameters in HEC-RAS using Inundation and Downstream Level Observations[J]. Journal of Hydrology, 2005, 302(1): 46-69.

[7] Leandro J, Chen A S, Djordjevi S, et al. Comparison of 1D/1D and 1D/2D Coupled (Sewer/ Surface) Hydraulic Models for Urban Flood Simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(6): 495-504.

[8] 张行南, 彭顺风. 平原区河段洪水演进模拟系统研究与应用[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 803-809. (ZHANG Xing nan, PENG Shun feng. Combined Simulation System for Propagation of Flood in Plain Rivers and Its Application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 803-809. (in Chinese))

[9] 徐奎, 马超. 福州市主城区洪涝灾害成因分析及对策研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(10): 113-118. (XUE Kun, MA Chao. Causal Analysis on Flood and Water Logging Disaster in Main Urban Area of Fuzhou with Study on Its Countermeasure[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(10): 113-118. (in Chinese))

[10] 谢华, 黄介生. 城市化地区市政排水与区域排涝关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 10-13. (XIE Hua, HUANG Jie sheng. Relationship of Municipal Drainage and Hydrological for Urban Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(5): 10-13. (in Chinese))

[11] 代斌. 城市化对海河天津段放洪排涝影响的研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (DAI Bin. Study on The Influence of City's Development on Flood Prevention and Water-log Draining of the Segment of Haihe River at Tianjin [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))

[12] 范泽华. 天津市降雨趋势分析及设计暴雨研究[D]. 天津: 天津大学, 2011. (FAN Ze hua. Research on Precipitation Trend Analysis and Design Storm of Tianjin City[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese))

(上接第 36 页)

[10] 张巍, 陈恳. 应用分形两种迭代算法作短期负荷预测[J]. 电气技术, 2012, (7): 11-14. (ZHANG Wei, CHEN Ken. Two Fractal Iterative Algorithm in the Application of Short-term Load Forecasting[J]. Electrical Engineering, 2012, (7): 11-14. (in Chinese))

[11] 王秋萍, 马改姣. 分形插值预测模型的构建及应用[J]. 统计与决策, 2012, (1): 24-27. (WANG Qiu ping, MA Gai jiao. Construction and Application of the Model of Fractal Interpolation Prediction[J]. Statistics and Decision Making, 2012, (1): 24-27. (in Chinese))

[12] 刘鑫. 分形插值法在中国证券市场指数分析中的运用[D]. 南京: 南京理工大学, 2009. (LIU Xin. The Use of Fractal Interpolation Method in the Analysis of Index in Chinese Stock Market [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese))

[13] 雒文生. 河流水文学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. (LUO Wen sheng. The River Literature [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese))

[14] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. (The Professional Committee of China Institute of Water Conservancy and Sediment. The Sediment Handbook[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992. (in Chinese))

[15] 韩其为. 河床演变中的几个问题[M]. 北京: 地震出版社, 1995. (HAN Qi wei. A Few of the Problems in the Evolution of River Bed[M]. Beijing: The Seismological Press. 1995. (in Chinese))

[16] 韩其为, 何明民. 泥沙运动起动规律及起动流速[M]. 北京: 科学出版社, 1999. (HAN Qi Wei, HE Ming min. The Starting Pattern and Incipient Velocity of Sediment Movement[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))