

基于混沌神经网络的流域坝系稳定性分析

刘卉芳¹, 曹文洪¹, 王向东¹, 孙中峰²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 水利部 水土保持植物开发管理中心, 北京 100038)

摘要: 坝系相对稳定原理是淤地坝规划的理论基础。依据影响坝系稳定性的 7 个主要因素: 坝控面积、坝数、总库容、可淤库容、坝前水深、防洪能力、淤地面积, 以 Matlab 7.0 为平台, 采用混沌神经网络(COBP)模型对马家沟流域 13 个坝系进行了稳定性分析。结果表明, 13 个坝系中有 7 个坝系处于不稳定状态, 采用坝系稳定系数来校核 COBP 模型的计算结果, 得出的结论一致, 因此, 可以判定采用神经网络方法得出的结果基本可信。此外, 分析了 7 个坝系不稳定的原因, 采用增加坝高和增加淤地坝数量的方法使 7 个不稳定坝系均达到稳定状态。通过对马家沟 13 个小流域淤地坝重新规划, 形成的 13 个坝系全部处于稳定状态, 可见 COBP 方法在确定流域坝系稳定方面具有实用的价值。

关键词: 混沌神经网络; 马家沟流域; 坝系稳定性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0131-05

中图分类号: S157.3⁺ 1

Stability Analysis of Watershed Silt Dams Based on Chaos Optimization and Back-Propagation

LIU Huifang¹, CAO Wenhong¹, WANG Xiangdong¹, SUN Zhongfeng²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. China National Center for Seabuckthorn Development and Administration, Beijing 100038, China)

Abstract: The principle of relative stability of a dam system is the theoretical basis for planning silt-retention dams, therefore, it is of significance to study the relative stability of a dam system in planning silt-retention dams. This paper uses Matlab 7.0-based improved BP algorithm and chaos optimization and back-propagation (COBP) model to assess the stabilities of thirteen dams in Majiagou watershed according to seven major factors affecting the stability of a dam system, i. e. dam control area, dam number, total reservoir storage, silt-retention allowable volume, water depth, anti-flood capacity and silted area. Results show that seven dams out of the thirteen dams are unstable, which is confirmed by the stability coefficient analysis of each dam. The output of the COBP model is thus reliable. This paper further analyzes the reasons for the instabilities of seven dams and makes them stable by increasing dam height and number. All of the thirteen small-watershed dams in Majiagou watershed become stable after they are replanned. This demonstrates that the COBP method has practical values in assessing the stability of a dam system.

Keywords: chaos optimization and back-propagation; Majiagou watershed; stability of silt dams

黄河流域地形破碎、坡陡沟深、土质疏松、植被稀少、暴雨集中, 特殊的地貌条件和气候条件造成该区沟床下切、沟头延伸。长期的水土保持实践经验表明, 淤地坝是黄土高原地区水土流失治理的关键措施, 是一种行之有效的既能拦截泥沙、保持水土, 又能淤地造田、增产粮食的水土保持工程措施。坝系是指以小流域为单元, 为了充分利用水沙资源而建立的以缓洪、拦泥、淤地造田、发展生产为目的的淤地坝工程

体系, 坝系的相对稳定是坝系规划的基础理论。本文基于人工神经网络(ANN)模型分析马家沟流域坝系的稳定性及规划。

1 研究区概况

马家沟流域位于延安市安塞县内, 距安塞县城约 1 km, 是延河的一级支流, 位于延河中下游, 流域面积 77.5 km², 属黄土丘陵沟壑区第二副区, 水土流失

收稿日期: 2010-09-27

修回日期: 2010-11-27

资助项目: “973”国家重点基础研究发展计划“水土流失环境效应评价理论与指标体系”(2007CB407205); 国家自然科学基金创新研究群体基金项目“流域水循环模拟与调控”(50721006); “十一五”国家科技支撑课题“沟壑整治工程优化配置与建造技术”(2006BAD09B02)

作者简介: 刘卉芳(1977—), 女(汉族), 山西省柳林县人, 博士, 中级, 主要从事水土流失治理与生态工程研究。E-mail: lhf623@sohu.com。

十分严重。地貌由峁、梁、坡、沟组成,以梁为主。流域沟道呈“Y”字形,主沟道长 17.5 km,沟道平均比降 6.5%,沟道底平均宽度 13 m。流域属暖温带半干旱大陆性季风气候,具有春季干旱多风沙,夏季温热多雷雨,秋季晴朗降雨快,冬季干冷雨雪少的特点。多年平均气温 8.8℃,≥10℃的年积温为 3 703℃,无霜期为 157 d,多年平均降水量为 522.2 mm。

2 研究方法

2.1 COBP 网络优化模型结构

人工神经网络(ANN)模型,具有较强的自学习能力和处理非线性问题能力,近年来已在有关工程领域得到广泛应用^[1-5]。混沌是存在于非线性系统中的一种较为普遍的现象,混沌的研究已成为动力系统的中心内容之一,但对于混沌确切的定义目前尚未统一。一般认为,混沌就是指在确定性系统中出现的一种貌似无规则的,类似随机的现象^[6]。混沌优化(Chaos Optimization,简称 CO)就是利用混沌运动的遍历性特点而建立的一种新型全局优化搜索算法^[7-9]。论文基于神经网络和混沌优化二者搜索特性的互补性,采用组合式混沌优化 BP 神经网络优化模型预测坝系稳定性(简称 COBP)。

这里选用典型的三层 BP 网络结构,各层单元的激发函数用 S 型函数。影响淤地坝布设的因素很多,选取坝控面积、坝数、总库容、可淤库容、坝前水深、防洪能力、淤地面积等 7 个指标进行坝系稳定的分析。因此, BP 网络的输入层节点数为 7;输出层节点数取 1,取值区间为 [0, 1], 0 表示不稳定, 1 表示稳定;隐层节点数 21。以 17 个坝系作为总体样本,其中学习样本 8 个,用以训练网络模型;测试样本 9 个,用以检验所建立 COBP 预测模型的有效性,通过实际调查进行验证。

坝系安全系数采用下式计算^[10]:

$$I_p = \frac{W_p}{A(h+h_c)} \quad (1)$$

式中: I_p ——坝系安全系数; W_p ——频率为 p 的洪水总量 (10^4 m^3); A ——坝地实有面积 (hm^2); h ——坝地允许淹水深度平均值 (m); h_c ——洪水所含泥沙淤积平均厚度 (m)。

$$W_p = KM_{治} F_c \quad (2)$$

式中: K ——小面积洪水折减系数,一般取值 0.8~1; $M_{治}$ ——治理流域洪量模数 ($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$); F_c ——坝控流域面积 (km^2)。

2.2 淤地坝的加载

整个流域布设有 64 座坝,其中 11 座骨干坝, 33

座中型坝和 20 座小型坝。运用 GPS 定位流域内所有坝,并把所有淤地坝加载于流域的数字地形图上。

3 基于 COBP 模型的马家沟流域坝系稳定性分析

3.1 坝系稳定性因子确定

坝系相对稳定的目标是在小流域内将淤地坝单坝达到相对稳定,坝系稳定较单坝稳定在时间和空间上予以扩大和重新分配,使坝系作为一个整体,充分发挥坝系的综合效益。衡量坝系是否稳定,一般需满足以下几个条件: (1) 坝地面积与坝控面积的比值,即坝系稳定系数达到一定范围; (2) 要有一定数量的骨干坝和淤地坝,坝系整体布局与结构要达到合理,使暴雨洪水达到均衡分配。结合对马家沟流域淤地坝的实际观测数值,对照相关的规范和设计要求,本文采用混沌神经网络(COBP)模型对马家沟坝系进行了稳定性分析。

3.2 小流域的划分

马家沟流域共有 13 个子流域,以 13 个小流域坝系配置现状为基础数据,进行坝系相对稳定性的定性分析。

3.3 流域坝系稳定性分析

表 1 为马家沟流域坝系稳定预测样本。为实现模型的训练和仿真需要,按以下方法对数据进行标准化和归一化预处理。采用公式(3)~(5)对马家沟流域淤地坝稳定预测样本表进行了标准化处理,采用公式(6)对马家沟流域淤地坝稳定预测样本表进行了归一化处理。马家沟流域坝系神经网络样本数据经标准化、归一化处理结果见表 2。

(1) 标准化处理。设 X 为样本总数,从 X 中取容量为 n 的样本 X_1, X_2, \dots, X_n , 则有公式:

$$X_s = \frac{X_i - X}{S} \quad (3)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X)^2 \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X)^2} \quad (5)$$

式中: X_i ——实际变量值; X ——样本均值; S^2 ——样本方差; S ——样本标准差; X_s ——标准处理后的变量。下同。

(2) 归一化处理。设 X 为样本总体,从 X 中取容量为 n 的样本 X_1, X_2, \dots, X_n , 其中最大值为 X_{\max} , 最小值为 X_{\min} , 则有公式:

$$X_{t-1} = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

式中: X_{t-1} ——标准化处理后的变量。

表 1 马家沟流域坝系稳定预测样本

序号	控制面积/ km ²	坝数/ 个	总库容/ 10 ⁴ m ³	可淤库容/ 10 ⁴ m ³	淤地面积/ hm ²	平均坝前水深/ m	安全系数
1	8.80	5	167.70	81.73	313.10	0.63	0.703 9
2	3.13	3	43.77	24.36	51.53	0.85	0.946 9
3	2.10	2	29.00	16.4	43.40	1.09	0.116 4
4	0.50	1	2.60	1.90	16.00	0.88	0.073 0
5	6.91	11	152.97	39.01	149.23	0.93	0.623 3
6	5.10	5	200.30	95.90	313.83	0.82	0.435 8
7	1.88	2	30.52	16.66	26.50	0.51	0.605 9
8	2.55	6	86.56	32.37	135.23	0.97	1.090 1
9	4.69	11	59.05	33.82	53.20	0.55	0.729 0
10	8.64	8	314.67	192.42	38.95	0.67	1.137 9
11	2.09	2	135.50	90.17	64.77	2.01	1.959 4
12	4.98	2	136.70	80.91	12.20	0.98	1.654 4
13	5.13	6	62.44	28.72	8.38	0.98	1.848 8
合计	56.50	64	1 421.78	734.37	1 226.32	—	—

表 2 马家沟坝系稳定神经网络样本数据归一化结果

序号	控制面积	坝数	总库容	可淤库容	淤地面积	平均坝前水深	安全系数
1	1	0.4	0.529 048	0.419 011	0.997 610	0.080 000	0.019 786
2	0.316 867	0.2	0.131 926	0.117 888	0.141 267	0.226 667	0.027 407
3	0.192 771	0.1	0.084 596	0.076 107	0.114 651	0.386 667	0.001 361
4	0	0	0	0	0.024 947	0.246 667	0
5	0.772 289	1.0	0.481 847	0.194 783	0.461 123	0.280 000	0.017 258
6	0.554 217	0.4	0.633 512	0.493 387	1	0.206 667	0.011 378
7	0.166 265	0.1	0.089 467	0.077 472	0.059 322	0	0.016 712
8	0.246 988	0.5	0.269 042	0.159 931	0.415 289	0.306 667	0.031 898
9	0.504 819	1.0	0.180 889	0.167 541	0.146 734	0.026 667	0.020 573
10	0.980 723	0.7	1	1	0.100 082	0.106 667	0.033 397
11	0.191 566	0.1	0.425 866	0.463 311	0.184 613	1	1
12	0.539 759	0.1	0.429 711	0.414 707	0.012 506	0.313 333	0.049 595
13	0.557 831	0.5	0.191 752	0.140 773	0	0.313 333	0.055 691

表 3 是马家沟流域 13 个小流域坝系稳定预测样本结果表。从表 3 可知, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 11 小流域坝系目前处于不稳定状态, 应对这些坝系进行综合分

析, 明确不稳定的原因, 寻找解决不稳定坝系的办法, 并同时探讨处理这些不稳定坝系的时间安排的可能性。

表 3 马家沟流域 13 个小流域坝系稳定预测样本结果

样号	1	2	3	4	5	6	7
COBP	0.033 48	0.756 70	0.014 22	0.018 72	0.037 56	0.076 09	0.024 35
样号	8	9	10	11	12	13	
COBP	0.874 50	0.894 90	0.880 40	0.196 50	0.770 20	0.748 50	

本文采用坝系稳定系数来校核 COBP 模型计算结果, 坝系稳定系数的计算公式如下:

$$I = 0.01A / F \quad (7)$$

式中: I ——坝地面积与坝控制流域面积之比; A ——

坝地面积(hm^2); F ——坝控制流域面积(km^2)。

在一定频率的洪水条件下坝地淹水深度为允许深度(d)时的坝地面积与坝控制流域面积之比,称之为相对稳定的临界值 I_c 。

由 $d = \frac{W_p}{dF}$ 可得:

$$I_c = 0.01 \frac{W_p}{dF} \quad (8)$$

式中: W_p ——频率为 P 的洪水总量(10^4 m^3); d ——坝地允许淹水深度(m)。

因此,当 $I \geq I_c$ 时坝系达到相对稳定,当 $I < I_c$ 时坝系未达到相对稳定。目前的基本认识是基于大量典型小流域调查资料的分析,即当坝地面积与坝控制流域面积之比达到 $1/25 \sim 1/20$ 时,坝系基本可以达到相对稳定。

表 4 分析表明 1, 3, 4, 5, 6, 7, 11 小流域坝系处于不稳定状态,与采用神经网络 COBP 分析坝系稳定性得出的结论一致。因此,可以判定采用神经网络方法得出的结果基本可信。

表 4 坝系稳定系数计算结果

流域序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
控制面积/ km^2	16.87	3.13	8.87	4.25	29.85	11.25	15.85	11.76	4.69	13.12	15.85	5.14	5.13
坝地面积/ hm^2	62.62	51.53	43.40	16.00	149.23	52.65	26.50	135.23	53.20	38.95	64.77	12.20	8.38
稳定系数	0.037	0.165	0.049	0.038	0.050	0.047	0.017	0.115	0.113	0.130	0.041	0.240	0.16

4 马家沟流域不稳定的子坝系分析及规划

4.1 不稳定子坝系分析

通过对马家沟流域坝系进行 COBP 稳定性分析,得出如下结论: 1, 3, 4, 5, 6, 7, 11 这 7 个子流域坝系处于不稳定状态。下面就 7 个子流域坝系现状进行分析,分别找出不同子流域坝系不稳定的原因。

1 号子流域,流域面积为 9.25 km^2 ,坝控面积为 8.8 km^2 ,坝系基本上控制了流域内的面积,但中崮 2[#] 坝、下崖窑坝坝体应该加高加固。

3 号子流域,流域面积 9.75 km^2 ,坝控面积为 2.1 km^2 ,小流域内在主沟内布设一座中型坝,在一条小支沟内布设 1 座小型坝,但布坝密度低,规划在上游布设 2 座小型坝,以达到合理控制泥沙淤积。

4 号子流域,流域面积 2.74 km^2 ,坝控面积为 0.5 km^2 ,同 3 号子流域一样,布坝密度过于稀疏,规划增加 1 座小型坝,以达到合理的布坝密度。

5 号子流域,流域面积 6.91 km^2 ,坝控面积为 6.91 km^2 ,布坝密度合理,但由于坝系安全系数低,特别是骨干坝红柳渠坝、张崮 2 座坝防洪标准低,可能对坝系产生危害性,因此应对这 2 个骨干坝进行加高加固,同时对东山坝和曹新庄坝进行加高。

6 号子流域,流域面积 5.1 km^2 ,坝控面积为 5.1 km^2 ,布坝密度合理,但由于坝系安全系数低,特别是骨干坝大狼牙坝防洪标准低,可能对坝系产生危害性影响,因此应对这座坝体进行加高加固。

7 号子流域,流域面积 3.86 km^2 ,坝控面积为 1.88 km^2 ,布坝密度低,在每条毛沟下游增加 1 座小

型坝,以达到淤地目的。

11 号流域,流域面积 2.09 km^2 ,坝控面积为 2.09 km^2 ,布坝密度合理,只是观音庙沟 3[#] 坝和桥则沟 2[#] 坝体防洪标准偏低,应对其进行加高。

经过以上分析,马家沟流域主沟及一级支沟布设骨干坝密度合理,已经形成了流域内相对稳定的主骨架,能够控制住流域内的主要洪水和泥沙,但是由于部分骨干坝防洪标准偏低,影响了坝系作为整体综合功能的充分发挥;对于一些小支沟或毛沟,部分区域布设不合理,这样导致了一些支沟的骨干坝提前淤满,减少了骨干工程防洪年限。

综上所述,本文经过计算分析得出,马家沟流域需新增 4 座小型淤地坝,加高 16 座坝体。

4.2 马家沟流域规划坝系稳定的 COBP 分析结果

通过对 7 个不稳定坝系进行分析规划,对规划后的马家沟 13 个小流域坝系进行重新 COBP 稳定分析,得到结果见表 5。

从表 6 可知,马家沟 13 个小流域经过淤地坝规划后,形成的各坝系全部处于稳定状态,可见 COBP 方法在确定流域坝系稳定方面具有实用的价值。

5 结论

将坝系控制面积、坝数、总库容、可淤库容、与地面积、平均坝前水深、安全系数 7 个因子作为坝系稳定性分析的评价指标是比较全面的、合理的。论文将混沌神经网络(COBP)模型应用于马家沟流域坝系稳定研究,研究表明,通过分析现存坝系不稳定的原因,提出通过适当增加淤地坝数量和加高坝体,可以使马家沟坝系处于稳定状态。可见 COBP 方法在确定流域坝系稳定方面具有实用的价值。

表5 规划后的马家沟流域坝系稳定预测样本

序号	控制面积/ km ²	坝数/ 个	总库容/ 10 ⁴ m ³	可淤库容/ 10 ⁴ m ³	淤地面积/ hm ²	平均坝前 水深/ m	安全 系数
1	8.80	5	176.29	90.32	322.00	0.63	0.7039
2	3.13	3	43.77	24.36	51.53	0.85	0.9469
3	7.08	4	94.00	81.40	119.40	0.96	0.1164
4	1.55	2	24.60	23.90	76.00	0.88	0.0730
5	6.91	11	164.01	50.05	152.97	0.93	0.6233
6	5.10	5	203.68	99.28	315.50	0.82	0.4358
7	2.70	3	41.52	27.66	36.50	0.51	0.6059
8	2.55	6	96.82	42.43	141.60	0.67	0.6497
9	4.69	11	59.05	33.82	53.20	0.55	0.7290
10	8.64	8	314.67	192.42	38.95	0.67	1.0433
11	2.09	2	188.51	143.18	72.00	0.89	0.9432
12	4.98	2	136.70	80.91	12.20	0.98	1.6544
13	5.13	6	62.44	28.72	8.38	0.98	1.8488
合计	63.35	68	1 606.06	918.45	1 400.23		

表6 规划后的马家沟流域13个小流域坝系稳定预测结果对照

样号	1	2	3	4	5	6	7
COBP	0.8247	0.8456	0.7062	0.7743	0.7563	0.9076	0.7024
样号	8	9	10	11	12	13	
COBP	0.7845	0.8463	0.8914	0.7569	0.7043	0.6653	

[参 考 文 献]

- [1] Dawson C W, Wilby R. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modeling[J]. Hydrol. Sci. J., 1998, 43(1): 47-66.
- [2] French M N, Krajewski W F, Cuykendall R R. Rainfall forecasting in space and time using a neural network[J]. J. Hydro l., 1992, 137: 1-37.
- [3] Wen C G, Lee C S. A neural network approach to multiobjective optimization for water quality management in a river basin[J]. Water Resour. Res., 1998, 34(3): 427-436.
- [4] 尚松浩, 毛晓敏, 雷志栋, 等. 冬小麦田间墒情预报的 BP 神经网络模型[J]. 水利学报, 2002, 33(4): 60-63.
- [5] 彭清娥, 刘兴年, 曹叔尤, 等. 流域平均含沙量的人工神经网络模型[J]. 水利学报, 2000, 31(11): 79-83.
- [6] 王东升, 曹磊. 混沌. 分形及其应用[M]. 安徽 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995: 20-30.
- [7] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615.
- [8] Choi C, Lee J. Chaotic local search algorithm[J]. Artificial Life & Robotics, 1998, 2(1): 41-47.
- [9] 谭钦文. 中线法高堆尾矿坝优化理论及其关键力学问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008: 140-150.
- [10] 范瑞瑜. 西黑岱沟流域坝系相对稳定性分析[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 53-61.