

BP 神经网络在闸坝调度管理能力评价中的应用^①

马 科¹, 刘 建², 孙海胜³

¹(中国科学技术大学 管理学院, 合肥 230026)

²(淮河流域水资源保护局, 蚌埠 230000)

³(中国科学技术大学 计算机科学与技术学院, 合肥 230026)

摘 要: 闸坝调度对于水资源的利用、保护、治理等具有十分重要的作用, 本文以闸坝为基本研究单元, 构建单一闸坝的调度管理能力评估指标体系, 基于 BP 神经网络构建闸坝调度管理能力评估模型. 最后以淮河流域的沙颍河闸坝群为例, 进行实例分析验证了提出模型的可行性.

关键词: 神经网络; 闸坝调度管理; 评价指标体系

引用格式: 马科, 刘建, 孙海胜. BP 神经网络在闸坝调度管理能力评价中的应用. 计算机系统应用, 2017, 26(12): 250-256. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6098.html>

Application of the BP Artificial Neural Network in Dam's Dispatching and Management Ability Assessment

MA Ke¹, LIU Jian², SUN Hai-Sheng³

¹(School of Management, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

²(Huaihe Water Resources Protection Science Research Institute, Bengbu 230000, China)

³(School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The dam's dispatching plays an important role in the utilization, protection and management of water resources. The dam is used as the basic assessment unit to build dispatching and management ability evaluation index system of a single dam, to build the model based on BP artificial neural networks for dam's dispatching and management ability evaluation. Finally, taking main dams on Huaihe river for example, the model is applied to verify samples, and the results show that the dam's dispatching and management ability evaluation model based on BP neural networks is a reasonable and feasible forecasting model.

Key words: artificial neural networks; dam's dispatching and management ability; evaluation index system

由于在天然河道中建立了闸坝, 在很大程度上将会改变河流原本固有的水文情势及水文特性, 尤其对河流水质水量水生态的影响更加的明显. 研究闸坝对河流水质水量水生态的具体影响, 对这种影响进行评估, 进而得出闸坝对河流水质水量水生态影响的大小, 对闸坝的调度管理能力进行评估. 本文利用神经网络原理, 建立闸坝调度管理模糊综合评判模型, 并将该模型应用于闸坝调度管理的综合评判.

近年来, 国内外出现了许多评估闸坝调度管理能力的模型和方法. 其中, 左其亭等初步提出闸坝调控能力识别技术研究框架, 为闸坝调度管理能力的评估提供理论支持^[1]; 喻光晔等构建了淮河流域闸坝联合调度综合评价指标体系^[2]; 王昭亮在其硕士论文中构建了闸坝群水质水量联合调度的数学模型, 并以历史发生的特大污染事件为例, 进行了模拟调度仿真, 验证了模型的可行性^[3]; 张帆等通过分析郑州市河流闸坝, 对城市

① 基金项目: 国家自然科学基金 (71671168); 国家科技重大专项 (2014ZX07204006)

收稿时间: 2017-03-13; 修改时间: 2017-03-31; 采用时间: 2017-04-05

生态水系进行概化,建立郑州市河流闸坝调度模型,并运用 MIKE BASIN 软件进行河道演进及模型求解^[4];陆建红基于改进的 SWAT 模型开展河流闸坝生态调度与生态友好的清污轮灌模式研究^[5]。

目前,国内外基于神经网络对闸坝调度管理评价理论的研究相对较少,与层次分析法、模糊理论分析法等相比,基于神经网络的评价方法,是更接近于人类思维模式的定性和定量相结合的综合评价方法,具有较为显著的优越性^[6]:① 闸坝调度管理的评价综合性强,涉及水质、水量、水生态以及管理情况等各种因素,其因素之间相互影响,存在着复杂的非线性关系。基于神经网络的评价方法具有神经网络自组织、自适应能力,神经网络具有强大的非线性映射能力^[7],避免评价过程中的人为因素及模糊随机性的影响。② 神经网络具有较强的容错能力,能够处理有噪声或不完整的数据,评价结果更科学、准确。③ 神经网络具有较强的自学习能力和泛化能力,通过学习新的样本,利用已经训练好的网络模型进行评价,只需输入基础数据,可免除繁重的计算,实用性较强。④ BP 神经网络是神经网络中应用较为广泛的一种^[8]。因此,采用 BP 神经网络,对闸坝调度管理进行评价研究。

1 评估指标体系的构建

1.1 指标体系构建

闸坝调度是防止流域突发性水污染事故、改善流域生态与环境的有效途径之一。同时闸坝调度也存在各种各样的方式,单个闸坝的开度不同及多个闸门的不同开启方式会形成闸坝调度的多种组合方式及调度方案,因此,闸坝调度管理能力会受到河流的水质、水量、水生态等众多因素的影响,因此在选取评价指标时会存在一定的困难。

本文是在遵循客观性、保序性、协调性等原则的基础上,从水量、水生态、管理相关三个方面,通过项目会议头脑风暴法,以及专家打分和实地调研,最终确定 7 个评价指标,如表 1 所示。

(1) 闸坝前生态可调水量

在某一瞬间,闸坝前蓄水量是一定的,考虑到闸坝同时承担其他的供水任务,可得到闸坝用于调度的水位下限,结合闸坝的库容曲线,可根据闸前蓄水量和可调度水位下限求得此时闸前可用于调度的水量,单位

万立方米。以最高和最低划分 5 个梯度,分别赋分 5/4/3/2/1 分。

表 1 闸坝调度管理能力评估指标体系

目标层	分解层	指标层	序号
闸坝调度管理能力评估指标体系	水量	闸坝生态可调水量	1
		调水传播时间	2
	水生态	闸坝上下游取用情况	3
		闸坝前可调水环境余量	4
	管理相关	闸坝管理情况	5
		闸坝建筑物现状工况	6
		闸坝应急处置能力	7

(2) 调水传播时间

闸门开启后,调水到达控制断面需要经过一定的传播时间,传播时间的长短对调度也是有很大影响的,传播时间越短,说明闸坝的调控能力越大。可以用河段长度 L 比上河段流速 v 得到闸坝调水后到达下一级闸坝所需的时间 t 。由于 v 不好测定,故用 L 来模糊表达。计算的 L 取每个闸坝到生态控制断面的距离(此次对沙颍河闸坝评价,生态控制断面为颍上)。以最短和最长划分 5 个梯度,分别赋分 5/4/3/2/1 分。

(3) 闸坝下游河段取用水情况

沿河道取用水直接决定了所需水量能否有效到达需水河段。没有具体信息我们可以根据沿途经过的城镇给他一个假定。取用水程度越高,评分越低,满分 5 分。

(4) 闸坝前可调水环境余量

闸坝前可调水能够容纳污染物的能力。以目标水质对应的污染物浓度与当前污染物浓度的差值确定。以最大和最小划分 5 个梯度,分别赋分 5/4/3/2/1 分。

$$R = 100W_1(C_0 - C_1) + 0.0864q\Delta t(C_0 - C_1)$$

其中, R 为闸坝环境余量,单位是 t ; W_1 为闸坝前可调水量,单位万立方米; q 为上游来水流量,单位是立方米每秒;在这里取为各闸坝河段年均径流量; Δt 为闸坝调度时间,单位是天(d),在这里计算取 2 天; C_0 、 C_1 、 C_2 分别为目标水质(所要达到的水质)、闸前蓄水水质(闸坝平均水质,实时评价取实时的水质情况)、上游来水水质对应的污染物质浓度,单位是 mg/L ; 100 和 0.0864 为单位换算系数。

由于 $q\Delta t$ 相对于 W_1 很小,故后一项可以忽略不计。评价中公式可简化为: $R = 100W_1(C_0 - C_1)$

(5) 闸坝管理情况

根据闸坝主管部门及管理单位内部情况对调令下

达到执行经过的部门节点数对闸坝管理情况进行评分, 满分为5分。

(6) 闸坝建筑物现状工况

闸坝建设时间, 建设时的功能和设计参数, 维修情况及现状运行状态等影响闸坝的调度运行能力。比如闸坝/水库的设计流量, 还有比如闸坝在建设时有无考虑流量观测站和生态放水洞。综合考虑进行评分, 满分5分。

(7) 闸坝应急处置能力

突发水污染事故应急响应时效、有无应急预案等。也是根据综合考虑进行评分, 满分5分。

1.2 指标体系权重确定

确定权重值的方法有很多, 比如专家打分法、调查统计法、主成分分析法、数理统计分析法、模糊逆方程法及层次分析法。由于闸坝调度管理能力评价指标中某些数据很难直接获取, 故, 本文中采用专家打分-层次分析法确定指标权重, 层次分析法是用定性分析与定量分析相结合的方式对一些复杂问题提供决策依据^[9]。

层次分析法确定闸坝调度管理评价指标权重的步骤如下:

第一步. 判断矩阵构造。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

第二步. 求解特征向量即权数分配。

$$M_i = a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{in} \quad (2)$$

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (3)$$

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad (4)$$

第三步. 进行一致性检验。

① 计算特征值

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (5)$$

其中, $AW = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$

② 计算 CR

$$CR = CI/RI \quad (6)$$

其中, $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$ (根据资料, 查找一致性指

标 RI 得 $n=3\sim 8$ 时, RI 分别为 0.58, 0.89, 1.12, 1.26, 1.36, 1.41) 当 $CR < 0.10$ 时说明判断矩阵满足一致性检验即权数分配合理^[10]。

表 2 闸坝各评价指标的判断矩阵及相应的权重

	1	2	3	4	5	6	7	w_n
1	1	1	2	1/2	2	1	2	0.1747
2	1	1	2	1	2	1	2	0.1929
3	1/2	1/2	1	1	1	1/2	1/2	0.0965
4	2	1	1	1	2	1/2	1	0.1582
5	1/2	1/2	1	1/2	1	1/2	1	0.0965
6	1	1	2	2	2	1	2	0.1747
7	1/2	1/2	2	1	1	1/2	1	0.1065

根据专家打分意见, 判断矩阵构造表 2。采用层次单排序根据公式 (1)(2)(3) 计算得 $W=(0.1747, 0.1929, 0.0965, 0.1582, 0.0965, 0.1747, 0.1065)^T$, 根据公式 (5)(6) $\lambda_{\max}=7.1074$ 、 $CI=0.0179$ 、 $RI=1.36$ 、 $CR=0.0132 < 0.10$, 说明通过一致性检验, 得到闸坝评价指标的权数且分配合理, 见表 2。

2 改进 BP 神经网络

2.1 模型构建

神经网络 (Artificial neural network) 是在人工智能飞速发展背景下诞生的一种机器学习方法, 它模拟了人脑神经元的基本结构, 反映了人脑的某些基本特征和工作机理^[11]。神经网络正是人类在其大脑神经网络认识理解的基础上人工构造的能够实现某种功能的神经网络^[12]。

采用拓扑结构如图 1 所示含输入层、隐含层、输出层三层 BP 神经网络^[13]建立闸坝调度管理评价模型。

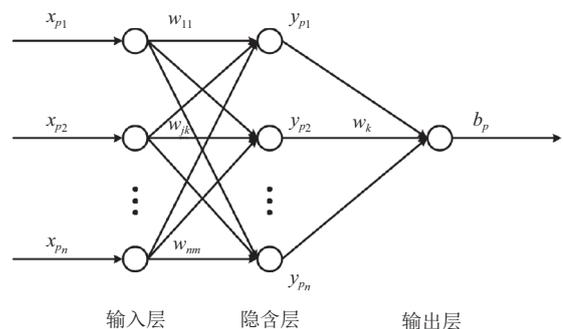


图 1 三层 BP 神经网络拓扑结构

(1) 图 1 中, x_p 为第 p 个样本的评价指标向量, 记为 $x_p = \{x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pn}\}$; n 表示输入节点数, 即评价指标数; m 表示隐含层节点数目; $w_{kj} (j=1, 2, \dots, n;$

$k = 1, 2, \dots, m$)为输入层第 j 节点到隐含层第 k 节点的连接权值; $y_{pk}(k = 1, 2, \dots, m)$ 为样本 p 的隐含层第 k 节点的输出; $w_k(k = 1, 2, \dots, m)$ 为隐含层第 k 节点到输出层的连接权值; b_p 为样本 p 的输出。

(2) 调整和训练计算权值时, 标准 BP 算法常因为只按 k 时刻误差的梯度下降方向调整, 不考虑 k 时刻以前的梯度方向, 使训练过程发生振荡, 收敛速度缓慢。为使训练速度提高并得到更准确的权值, 改进的神经网络在权值调整公式中引入动量项, 其相当于阻尼项, 减小学习过程的振荡趋势, 改善收敛性^[14]。 $\Delta w(k+1) = \Delta w(k) + \eta[(1-\alpha)D(k) + \alpha D(k-1)]$, 其中 $D(k) = -\partial E / \partial w(k)$ 为 k 时刻负梯度, η 学习效率 $\eta > 0$, α 动量因子 $0 \leq \alpha < 1$ 。

(3) 用 Sigmoid 函数描述每个节点的输出与输入之间的非线性关系, 即 $f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$ 。

(4) 隐含层样本 p 的输出计算如下, 其中 θ 表示隐含层节点 k 的偏置值:

$$y_{pk} = f\left(\sum_{j=1}^n w_{jk} x_{pj} - \theta_k\right), \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

(5) 输出层样本 p 的输出计算如下, 其中 θ 表示输出层输出节点的偏置值:

$$b'_p = f\left(\sum_{k=1}^m w_k x_{pk} - \theta\right) \quad (8)$$

(6) BP 网络的学习训练是一个误差反向传播与修正的过程, 定义 h 个样本的实际输出 b'_p 与期望输出 b_p 的总误差函数为

$$E = \sum_{p=1}^h (b'_p - b_p)^2 / 2 \quad (9)$$

BP 神经网络对样本的学习过程, 就是选取适当的训练函数使 E 极小化的过程。从输入层向输出层计算, 输入已知的学习样本, 可按上面的公式计算每一层神经元的输出; 若输出层结果的误差不满足精度要求, 则再从输出层向输入层计算, 修改连接权值和偏置值^[6]。

(7) 从输入层像输出层, 再从输出层向输入层, 两过程反复循环, 直到满足相应的精度要求。

2.2 模型训练

通过专家打分-层次分析法, 获取不同专家对各指标重要性评判的信息并根据重要性由大到小分别取 5 分、4 分、3 分、2 分、1 分进行打分, 根据各评价指

标重要性的得分, 通过层次分析法计算出权重系数^[15], 从而得到不同专家对闸坝调度管理评价指标体系各指标权重的判断。最终计算得七个指标 (闸坝前可调水量、闸坝前可调水环境余量、闸坝管理情况、闸坝建筑物现状工况、调水传播时间、闸坝应急处置能力、闸坝上下游取用情况) 的权重分别为 0.1747, 0.1929, 0.0965, 0.1582, 0.0965, 0.1747, 0.1065。

用 Matlab 的函数 `round(rand(1, 7)*5)`, 随机生成 30 组项目的评价指标评价, 任意指标的评价值取 5、4、3、2 和 1 分别代表优秀、良好、一般、及格和不及格。依据专家对指标权重的判断, 计算出项目的专家评价, 得到此项目的综合评价, 最终 30 组数据及综合评价见表 3。

表 3 网络训练样本数据表

a	1	2	3	4	5	6	7	评价值
1	4	5	1	5	3	0	1	2.9468
2	3	5	5	1	5	5	2	3.6983
3	4	1	2	5	4	5	3	3.4547
4	0	4	5	3	4	4	2	3.0265
5	4	5	1	5	3	0	1	2.9468
6	3	5	5	1	5	5	2	3.6983
7	4	1	2	5	4	5	3	3.4547
8	0	4	5	3	4	4	2	3.0265
9	3	1	4	0	1	0	0	1.1995
10	4	3	2	5	0	2	2	2.8239
11	4	4	1	2	2	3	4	3.0264
12	4	1	3	3	1	1	2	2.1400
13	5	2	3	1	4	1	3	2.5872
14	3	4	5	3	1	1	1	2.6305
15	4	1	4	1	5	2	1	2.3743
16	1	3	2	2	4	3	3	2.4924
17	5	1	4	4	2	3	0	2.8023
18	0	3	4	5	1	3	2	2.5893
19	0	2	1	4	2	3	1	1.9387
20	3	1	3	3	4	2	0	2.2165
21	1	5	1	4	3	5	0	3.0315
22	2	1	5	0	4	4	4	2.5356
23	0	2	1	4	2	5	1	2.2881
24	1	1	1	4	3	3	1	2.0170
25	2	1	1	5	2	1	3	2.1170
26	3	1	4	5	3	4	1	2.9888
27	3	3	2	3	3	3	3	2.9035
28	5	1	4	1	1	3	2	2.4442
29	2	3	4	2	3	2	4	2.6954
30	5	1	4	1	1	0	3	2.0266

基于 BP 人工神经网络的闸坝调度管理评价模型的算法实现过程为:

(1) 确定 BP 网络结构参数, 即各层神经元节点数。采用图 1 所示 3 层 BP 网络结构, 根据建立的评价指标

体系,利用跟水质、水生态及管理情况相关的的7个影响因子的级别标准作为训练学习样本,由于输入层有7个神经元,输出层有一个神经元,隐含层的神经元数目可以在此基础上逐步确定.根据经验优化关系及文献,计算隐含层节点数 $L=(qn)/2$ (L 表示隐含层节点数, n 表示输入层节点数, q 表示输出层节点数)^[16],确定隐含层节点数为4.输出层只有一个神经元,是一个代数值,取值范围是[1, 5],表示对闸坝调度管理综合评价的结果.分值越高,表示该项目闸坝调度管理的水平越高.

(2) 以 Matlab 为工具^[17],建立一个输入层、隐含层、输出层神经元节点数分别为7、4、1的人工神经网络,选用 `trainscg` 训练函数、初始化网络的权值和阈值,设置网络学习精度为 10^{-6} .

(3) 将表3中前24组数据,以及 X_1 、 X_2 这2组边界限定样本数据(表4)作为学习样本,输入网络,启动网络进行学习训练.通过不断执行迭代过程,至满足学习精度为止,得到较为准确表示内部的神经网络,即合适的输入与输出之间的非线性映射关系.经学习训练后的网络输出结果见表5.神经网络学习训练曲线图(图2)中的 a 训练曲线可以看出运用 `trainscg` 函数对网络进行训练,经 Matlab 函数训练,网络收敛,达到预定学习精度 10^{-6} .

表4 边界限定样本数据

项目	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	评价
X_1	1	1	1	1	1	1	1	1
X_2	5	5	5	5	5	5	5	5

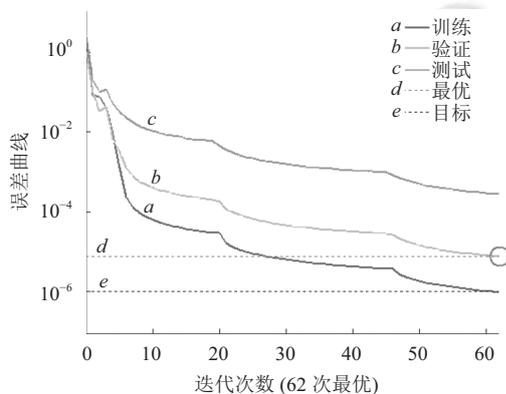


图2 网络训练曲线

(4) 将表3中后6组数据作为校验数据输入训练好的神经网络,得到综合评价结果(表5).可见,由神经

网络得到的输出值与期望值(项目综合评定值)之间的最大误差为0.0517%,最大误差绝对值为0.1678%,平均误差为-0.0525%.综合评价结果与专家评价结果基本一致,说明得到的神经网络所反映的输入与输出之间的关系是正确的,可以有效地应用于闸坝调度管理的评价.

(5) 将训练好的神经网络在 Matlab 存入文件,当遇到闸坝调度管理的评价问题时,只需输入待评价项目的指标得分矩阵,启动网络,即可得到评价结果.

3 案例分析

3.1 研究区概况

淮河是我国水环境治理的重点之一.流域洪涝灾害频繁,修建的闸坝多,发生的多次重大水污染事件,不仅与水污染来源有关,而且与闸坝群以水量为主的传统调度方式有直接联系.淮河位于我国南北方气候交错带,河湖径流季节性变化大,水资源开发利用程度高,由于社会经济发展,河道内生态用水常被挤占,河道最小生态基流遭到破坏以及河湖干涸萎缩的现象时有发生.淮河干流以北大部分地区天然基流缺乏,河流闸坝密集,河湖水生态系统退化严重.如何在“协调防洪、防污矛盾、减少重大水污染事故”的研究基础上,进一步改善河流水生态状况,实现淮河“水质-水量-水生态”联合调度,服务生态文明建设国家战略目标,是淮河“十二五”国家水专项重点关注的目标和关键技术之一.因此,对淮河流域的闸坝调度管理进行相关评估,吸取相关优秀闸坝的经验,有利于为水生态建设提供优化建议.

3.2 案例选取

选取沙颍河河段的周口闸、槐店闸、耿楼闸、阜阳闸、颍上闸(图3)的调度管理能力进行评估并排序.

现对闸坝调度管理的各项评价指标做出评判,由于各评价指标中定性因素较多,因此,采用专家评判方法,对各个指标从优至劣划分优秀、良好、一般、及格和不及格5个等级,分别给以5、4、3、2和1分. $a_1 \sim a_7$ 分别代表闸坝前可调水量、闸坝前可调水环境余量、闸坝管理情况、闸坝建筑物现状工况、调水传播时间、闸坝应急处置能力、闸坝上下游取用情况; $x_1 \sim x_5$ 分别代表周口闸、槐店闸、耿楼闸、阜阳闸、颍上闸.根据专家打分意见,判断矩阵构造见表7.

将表7的数据输入保存的神经网络模型,经网络

计算,得到各闸坝调度管理的综合评价得分,颖上闸的综合评分最高为3.8148,是4个闸坝中水质、水量、水生态调度管理能力最好的.该评价结果经专家和工

程师确认,符合项目的实际情况.证明基于BP神经网络的评价模型可以有效地应用于闸坝调度管理评价的实践.

表5 神经网络训练结果

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
训练	2.9460	3.6982	3.4568	3.0261	2.9460	3.6982	3.4568	3.0261	1.2011	2.8229	3.0328	2.1391
期望	2.9468	3.6983	3.4547	3.0265	2.9468	3.6983	3.4547	3.0265	1.1995	2.8239	3.0264	2.1400
项目	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
训练	2.5875	2.6297	2.3736	2.4935	2.7966	2.5866	1.9388	2.2179	3.0309	2.5346	2.2887	2.0194
期望	2.5872	2.6305	2.3743	2.4924	2.8023	2.5893	1.9387	2.2165	3.0315	2.5356	2.2881	2.0170

表6 网络测试结果

项目	25	26	27	28	29	30
训练结果	2.3202	2.9848	2.9050	2.4436	2.6966	2.0232
期望输出	2.1170	2.9888	2.9035	2.4442	2.6954	2.0266
相对误差(%)	-0.0850	-0.1338	0.0517	-0.0245	0.0445	-0.1678

估的可行性,经实践检验,该模型应用于闸坝调度管理的评价,可以取得较满意的结果.

但作为解决评估问题的一种手段,神经网络也有一些不足存在:首先模型不是十分稳定,建立模型需要一定的技巧,利用神经网络进行评估相关问题分析,不可能穷尽所有解,因此,很难得到最优解,而只能得到满意解^[18];其次受获取资料的局限性,本研究采用专家打分法对相关指标进行评分,其评价标准也存在误差,对评价结果也有一定的影响.如果将各种专家打分评价指标后期进行考虑,保留更多定量数据,采用相关的数据处理,能使结果更加客观、准确地反映闸坝调度管理相关情况.此外,该评价模型在评估闸坝调度管理能力过程中,BP网络隐含层神经元数量的选取方法还有待进一步完善.

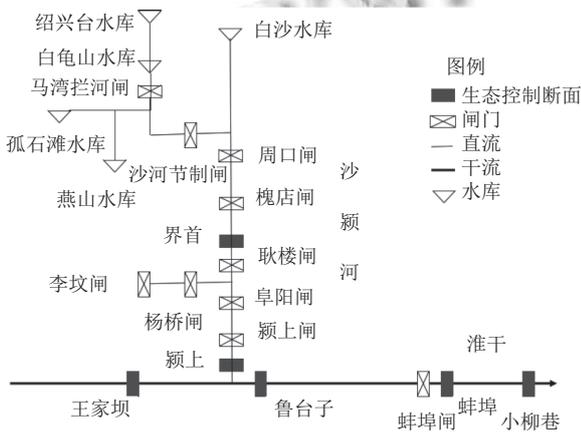


图3 沙颍河流域概化图

表7 闸坝调度管理能力评估指标评分表

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	综合评价
x_1	1	2	3	5	2	3	3	2.6776
x_2	1	3	2	4	2	3	2	2.5108
x_3	4	3	2	2	2	2	2	2.5432
x_4	3	4	1	3	3	2	2	2.7185
x_5	5	5	1	1	5	4	5	3.8148

4 结语

基于BP人工神经网络的闸坝调度管理评价模型,通过神经网络提炼,反映了各个闸坝调度管理评价指标与综合评价结果之间复杂的非线性关系,降低了闸坝调度管理评价过程中的主观因素影响,是解决闸坝调度管理评价问题的有效方法.本文在现行闸坝调度管理能力专家打分评价方法的基础上提出了更客观的评估方法,应用BP神经网络进行闸坝调度管理能力评

参考文献

- 左其亭, 刘子辉, 黎明, 等. 闸坝对河流水质水量影响评估及调控能力识别研究框架. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 18-21, 40.
- 喻光晔, 水艳, 李丽华. 构建淮河流域闸坝联合调度能力综合评价指标体系. 治淮, 2015, (1): 5-7.
- 王昭亮, 高仕春, 张慧云. 闸坝对河流水质调控作用的影响因子. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(5): 571-575.
- 张帆. 基于生态的郑州市闸坝调度模式研究[硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电学院, 2011.
- 陆建红. 基于生态友好的北运河闸坝调度与清污轮灌模式研究[博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- 董爱华, 闵洲源. 基于BP人工神经网络的建筑废料管理评价方法. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 146-150.
- 舒予, 张黎俐. 基于小波分析与人工神经网络的网络舆情预测. 情报科学, 2016, 34(4): 40-42, 47.
- 张学喜. 遗传算法和神经网络在边坡稳定性评价中的

- 应用[硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- 9 屈正庚. 层次分析法在大学生选购手机中的研究. 计算机系统应用, 2015, 24(3): 166-170.
 - 10 屈正庚. 层次分析法在商洛市农家乐评价体系中的研究. 计算机系统应用, 2016, 25(9): 236-240. [doi: [10.15888/j.cnki.csa.005378](https://doi.org/10.15888/j.cnki.csa.005378)]
 - 11 印春生. 神经网络及其它化学计量学方法在化学中的应用研究[博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 1999.
 - 12 吕鲲, 崔灵蕊, 李北伟. 网络信息生态链中信息个体到群体演化过程研究——基于神经网络理论. 情报科学, 2016, 34(10): 147-151.
 - 13 Kabir G, Hasin MAA. Multi-criteria inventory classification through integration of fuzzy analytic hierarchy process and artificial neural network. International Journal of Industrial & Systems Engineering, 2013, 14(1): 74-103.
 - 14 陈均伟, 朱正龙, 李渊, 等. BP神经网络PID的气动位置控制系统的研究. 数字技术与应用, 2009, (12): 54-55.
 - 15 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
 - 16 Beigy H, Meybodi MR. A learning automata-based algorithm for determination of the number of hidden units for three-layer neural networks. International Journal of Systems Science, 2009, 40(1): 101-118. [doi: [10.1080/00207720802145924](https://doi.org/10.1080/00207720802145924)]
 - 17 闵惜琳, 刘国华. 用MATLAB神经网络工具箱开发BP网络应用. 计算机应用, 2001, 21(S1): 163-164.
 - 18 朱红梅, 周子英, 黄纯, 等. BP神经网络在城市土地集约利用评价中的应用——以长沙市为例. 经济地理, 2009, 29(5): 836-839.