

改进 GA-BP 神经网络评价算法及其应用

高玉琴¹,张利昕²,吴焕霞³

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利工程质量监督中心站,江苏 南京,210029;
3. 泰州市兴化市水资源管理办公室,江苏 泰州 225700)

摘要:建立了用于水利工程管理现代化评价的改进 GA-BP 神经网络模型。该模型运用遗传算法优化改进 BP 神经网络的初始权重及阈值,具有快速学习和全局搜索能力,有效解决了 BP 神经网络容易陷入局部极小点和训练结果不稳定的问题。模型应用于泰州引江河水利枢纽工程管理现代化水平评价,并与经典 BP 算法应用结果进行比较,结果证明了该方法的可靠性和合理性。

关键词:水利工程;管理现代化;遗传算法;改进 BP 神经网络;评价算法

中图分类号:F407.9

文献标识码:A

文章编号:1003-9511(2012)06-0007-04

目前水利工程管理现代化评价研究还处于初始阶段,要实现对水利工程管理现代化的评价,除有完善的评价指标体系外,系统科学的评价算法十分重要。水利工程管理涉及管理体制、管理制度、管理手段、管理人才,以及水利工程社会经济生态效益等诸多方面,由于系统中各评价因子之间是复杂的非线性关系,传统的评价方法如专家评价法、综合指数评价法等并不能精确的描述^[1-2]。BP 神经网络算法则存在收敛速度较慢且容易陷入局部极小值等缺点。苑希民等^[3]将遗传算法与 BP 神经网络结合,利用遗传算法优化设计神经网络的权重和阈值,在洪水预报及大气质量评价方面都取得了较好的效果。笔者采用遗传算法对改进 BP 神经网络的权重进行优化,并结合水利工程管理特点,建立水利工程管理现代化的改进遗传神经网络评价算法(简称改进 GA-BP 算法)。

1 改进的 GA-BP 算法设计

BP 算法的训练是基于误差梯度下降的权重修改原则,这就不可避免地存在易落入局部极小点的问题;遗传算法善于从全局进行搜索,而对于局部的精确搜索则显得能力不足。将遗传算法和 BP 算法相结合可实现优势互补,有利于更好地解决问题^[4-5]。总体思路是首先利用全部训练样本建立改进 BP 网

络,并对改进 BP 网络的连接权重进行编码,产生初始种群;其次,利用遗传算法优化初始种群,在解空间定出一个较优的搜索空间,其间对改进 BP 网络的权重进行优化;再次,把遗传算法优化后的种群解码作为改进 BP 网络的初始权值,从而建立输入到输出的非线性映射关系;最后,利用训练好的网络评价待评价地区的水利工程管理现代化水平。

1.1 BP 神经网络的改进

1.1.1 学习率自适应调整

BP 算法的收敛特性和收敛速度很大程度上取决于学习率 η ,具有相同初始权重的网络由于 η 不同,相应的误差下降路径也不同。调整 η 的基本思想是:初始选定 η 为某较大值对网络进行训练,如果网络误差处于明显的下降趋势,保持学习率不变;如果网络误差出现增大的趋势,按一定比例减小学习率,继续进行训练,并且这种网络变化趋势的判别每隔一定训练次数进行一次,而不是每步都做误差判别。

1.1.2 动量法

动量法使网络在修改其权值时,不仅考虑误差在梯度上的作用,而且考虑在误差曲面上变化趋势的影响,它的作用相当于一个低通滤波器。根据最速下降反向传播算法的权值公式,当动量滤波器接到参数的改变后,在每个权重调整量上加上一项正比于前一次权重调节量的值,反向传播的动量改进

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2009B08814);河海大学自然科学基金(2009421911);水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金(2011535012)

作者简介:高玉琴(1978—),女,四川成都人,博士后,讲师,研究方向为水利规划与水利经济、灾害经济管理。

公式为

$$\Delta\omega(t+1) = \eta \frac{\partial E}{\partial \omega} + m\Delta\omega(t) \quad (1)$$

式中: m 为动量项系数,通常设定为 $0 < m < 0.9$; η 为学习率; ω 为动量值。

引入动量项后,使得权重的调整向着底部的平均方向变化,即动量项起到缓冲与平滑的作用,有利于改善网络收敛过程中的稳定性,调节网络的收敛速度^[6]。

1.2 遗传算法优化 BP 网络的初始权重

1.2.1 染色体的编码和初始种群的生成

初始权重种群中的每一条染色体均按神经网络生成初始权重的常规方法来生成,考虑水利工程管理现代化评价指标数量及特点,权值和阈值染色体采用实数编码,由 $[-1, 1]$ 区域内随机均匀产生的实数构成;种群规模 $P=200$ 。实数编码是连续参数优化问题直接的自然描述,即染色体在解空间内以实数向量的形式直接生成,这样一来遗传空间即为问题空间,染色体直接反映了问题的规律和特性,编码更灵活、方便,不存在编码和解码的过程,能够表达较大的区域,精度较高^[7-8]。

1.2.2 适应度函数

用于建立水利工程管理现代化评价的改进 GA-BP 神经网络的设计和学习实质上是一个带约束条件的多目标优化问题,可以描述为:

$$\begin{aligned} \min E(x) &= f\{x_1, x_2, \dots, x_s\} = \\ & f\{w_1, w_2, \dots, w_M, \theta_1, \dots, \theta_K\} \\ E(x) &= \sum_{i=1}^q (y_i - c_i)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

即搜索所有进化代中使网络的误差平方和 $E(x)$ 最小的网络权重。由于进化中的网络误差是非零的正数,故可以将目标函数的倒数作为适应度函数。适应度函数的形式为:

$$F(x) = \frac{M}{E(x)} = \frac{M}{\sum_{i=1}^q (y_i - c_i)^2} \quad (3)$$

式中: y_i 和 c_i 分别为样本的实测值和网络输出值; x_i ($i=1, 2, \dots, s$)表示一组染色体,即为对应的一个权重; s 为染色体长度,等于全部权重值和阈值之和。水利工程管理现代化评价指标体系共有 34 个二级指标(见表 2、表 3),各指标含义见文献 7,隐含层神经元节点个数根据试算确定,总权重个数等于公式 $np+pq$ 的计算结果和加上偏置值的个数; w_i 为网络的第 i 个连接权值($0 \leq w_i \leq 1, 1 \leq w_i \leq M$); θ_j 为第 j 个神经元的偏置值(阈值)($0 \leq \theta_j \leq 1$),神经网络训练中的连接权重包括输入层与隐含层节点间的连接

权值 w_{ij} ,隐含层与输出层节点间的连接权值 w_{jt} ,隐含层神经元的阈值 θ_j ,输出层神经元的阈值 θ_t ,其中 w_{ij} 和 w_{jt} 为二维向量。而利用遗传算法对上述优化问题求解时,必须把全部连接权重转化为一维连续向量 $\{x\}$,对其重新统一编号。同样,经过遗传算法优化后的连接权重也必须转化成形式为二维向量的连接权值 w_{ij} 和 w_{jt} ,以及一维向量 θ_j, θ_t 。利用式(4)实现相互间的转化:

$$\begin{cases} x_{n(j-1)+i} = w_{ij} \\ x_{p(t-1)+j+np} = w_{jt} \\ x_{(n+q)p+j} = \theta_j \\ x_{(n+q+1)p+t} = \theta_t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p; t=1, 2, \dots, q$ 。 n, p, q 分别为输入层、隐含层和输出层的节点数。

1.3 遗传算子设计

选择算子在设计时采用最优保留策略和随机联赛选择两种选择算子,最优保留策略即当前群体中适应度较高的个体不参加交叉和变异运算;交叉运算采用算术交叉。变异算子采用均匀变异,变异操作是保持种群多样性的有效手段。

2 算法的实现步骤

步骤 1:采用浮点编码,直接利用改进 BP 人工神经网络的连接权重作为染色体进行编码。对于一个三层的 BP 网络,任一组完整的神经网络权重 W_i 为: $W_i = \{\omega_{1,i}, \omega_{2,i}, b_{1,i}, b_{2,i}\}, i=1, 2, \dots, N$,相当于一个染色体,这样的染色体共有 200 个,即种群规模为 200。

步骤 2:利用小区间生成法随机生成初始种群。

步骤 3:根据适应度函数对个体性能进行评价。适应度函数 $f(x)$ 定义为目标函数的平方,即 $f(x) = (E(x))^2$ 。

步骤 4:对父代种群进行选择、交叉和变异操作生成子代种群。

步骤 5:若达到最大进化代数或是 $E(x) = \sum_{i=1}^q (y_i - c_i)^2$ 满足设定的要求,则将最优个体解码作为 BP 网络的最优初始权值,转入下一步;否则,转入步骤 3。

步骤 6:设定 BP 神经网络的学习速率 η 、动量系数 m 、允许误差 ε 、最大训练次数 N 、置循环步数 $I=1$ 。

步骤 7 将规范化的样本输入网络,进行 BP 网络训练,调整网络权值,并计算网络输出值及总误差 E 。

步骤 8:若 $E \leq \varepsilon$ (ε 为网络训练精度),则训练结束,转入下一步;否则,把此次优化后的连接权值作为下一次训练的初始权值,调整网络权值和偏置

值,转入步骤7。

步骤9:输出满足训练精度要求(即 $E \leq \epsilon$) 的网络连接权值。

步骤10:对被评价对象的水利工程管理现代化水平进行评价,计算出评价结果。

水利工程管理现代化改进 GA-BP 神经网络评价算法的程序流程如图1,用 MATLAB 软件实现^[9]。

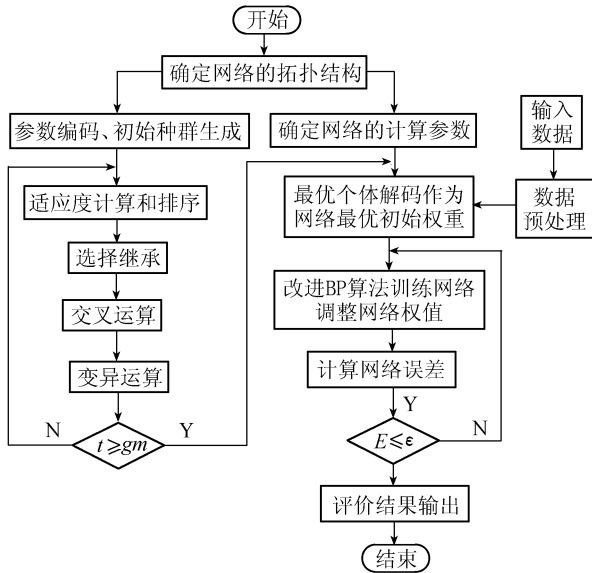


图1 水利工程管理现代化改进 GA-BP 评价算法程序流程

3 实例研究

泰州引江河位于江苏省泰州市与扬州市交界处,南起长江,北与新通扬运河相连,全长 24 km,河底宽 80 m,平均挖深 8 m,是一项以引水为主,灌排航综合利用,效益覆盖苏北地区的公益性水利工程,也是江苏省开发“海上苏东”的战略工程。根据目前国内水利工程管理现状,经多次讨论构建水利工程管理现代化评价指标体系。根据所选指标建立含有 34 个输入层节点,6 个隐含层节点和 1 个输出层节点的水利工程管理评价神经网络模型。

3.1 改进 GA-BP 算法计算

在各指标数据样本无量纲化后得到表1,设置改进 GA-BP 算法的相关参数如下:

a. BP 神经网络参数:网络节点参数:34-1;动量项系数: $m=0.9$;学习率: $l_r=0.025$;学习率自适应系数: $\eta=0.8$ 。

b. 遗传算法的参数:目标函数:误差平方和最小;种群规模: $P=200$;权重初始化空间 $b=[0,1]$ 选择概率: $P_s=0.05$;交叉率: $P_c=0.1$;变异率: $P_m=0.05$ 。

表1 指标无量纲化后样本数据

样本输入	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_1	0.93	0.95	0.93	0.84	0.75	0.85	0.94	0.85	0.85	0.93
C_2	0.85	0.85	0.95	0.85	0.75	0.86	0.90	0.80	0.88	0.95
C_3	0.94	0.95	0.95	0.94	0.84	0.80	0.91	0.75	0.90	0.92
C_4	0.95	0.95	0.90	0.93	0.85	0.65	0.90	0.65	0.85	0.95
C_5	0.94	0.85	0.85	0.95	0.94	0.95	0.94	0.87	0.90	0.96
C_6	0.85	0.95	0.91	0.92	0.85	0.85	0.90	0.85	0.90	0.94
C_7	0.92	0.95	0.95	0.95	0.92	0.93	0.95	0.80	0.90	0.98
C_8	0.85	0.85	0.95	0.91	0.85	0.80	0.90	0.80	0.90	0.98
C_9	0.93	0.95	0.93	0.95	0.93	0.80	0.90	0.83	0.85	0.98
C_{10}	0.95	0.95	0.95	0.65	0.85	0.65	0.85	0.75	0.75	0.95
C_{11}	0.93	0.95	0.94	0.95	0.95	0.85	0.85	0.80	0.90	0.95
C_{12}	0.95	0.85	0.85	0.93	0.85	0.85	0.85	0.75	0.85	0.92
C_{13}	0.92	0.95	0.85	0.85	0.84	0.75	0.85	0.75	0.90	0.95
C_{14}	0.95	0.95	0.94	0.85	0.85	0.75	0.90	0.85	0.90	0.98
C_{15}	0.94	0.95	0.95	0.88	0.75	0.65	0.88	0.80	0.90	0.95
C_{16}	0.95	0.95	0.93	0.93	0.85	0.77	0.90	0.80	0.89	0.93
C_{17}	0.95	0.85	0.95	0.88	0.85	0.75	0.85	0.87	0.85	0.95
C_{18}	0.93	0.95	0.94	0.75	0.65	0.65	0.75	0.65	0.75	0.94
C_{19}	0.85	0.95	0.90	0.90	0.94	0.85	0.90	0.80	0.90	0.98
C_{20}	0.95	0.95	0.90	0.90	0.85	0.86	0.87	0.85	0.88	0.95
C_{21}	0.92	0.95	0.90	0.90	0.85	0.85	0.90	0.86	0.90	0.96
C_{22}	1.00	0.90	1.00	0.85	0.90	0.90	0.94	0.80	0.85	1.00
C_{23}	1.05	0.95	1.05	1.00	0.93	0.91	0.95	0.84	0.84	0.94
C_{24}	1.00	1.00	1.00	0.90	0.90	1.00	0.90	0.78	0.90	0.95
C_{25}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	1.00	1.00
C_{26}	1.00	1.06	1.00	0.98	0.89	0.92	1.00	0.89	1.00	0.93
C_{27}	1.36	1.19	1.00	0.88	0.75	1.00	1.00	0.88	0.87	0.95
C_{28}	0.94	0.95	0.95	0.90	0.90	0.90	0.94	0.80	0.90	0.98
C_{29}	0.94	0.90	1.00	1.00	0.89	0.95	1.00	1.00	0.84	0.96
C_{30}	2.35	1.00	1.00	0.94	0.89	0.81	1.00	0.63	0.75	0.93
C_{31}	0.33	0.81	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.94	0.95
C_{32}	0.89	0.94	1.00	0.63	0.75	0.75	0.75	0.57	0.90	0.94
C_{33}	0.82	0.96	0.78	0.34	0.98	1.00	0.65	0.10	0.85	0.95
C_{34}	0.93	0.94	0.95	0.94	0.93	0.95	0.95	0.85	0.90	0.98
评价值	0.93	0.94	0.94	0.86	0.87	0.84	0.87	0.75	0.88	0.96

将表中样本进行网络训练,经过 64 步学习,达到精度要求,误差分析见图2。

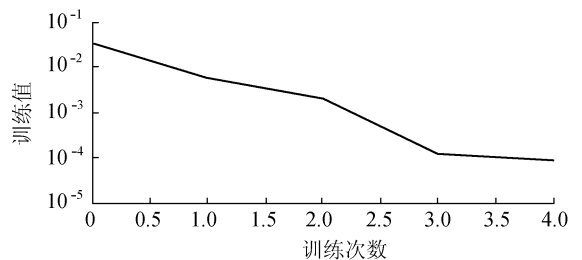


图2 泰州引江河水利工程管理现代化评价改进 GA-BP 算法的误差分析图

请 10 位专家对泰州引江河的工程管理现代化评价指标体系的各个定性指标进行评分。按优秀、良好、中等、合格、不合格 5 个等级评分;相应分值: (0.9 ~ 1.0), (0.8 ~ 0.9), (0.7 ~ 0.8), (0.6 ~ 0.7), (0.4 ~ 0.59)。按照常规处理方法对专家赋

分处理结果见表2。定量指标按照赋分原则进行赋分见表3。

表2 泰州引江河水利工程管理现代化评价指标体系定性指标值

准则层	指标层	指标值
水利工程管理体制合理性与先进性水平 G_1	水管单位分类定性准确合理性指数 C_1	0.95
	管养分离方案先进性及实施程度指数 C_2	0.85
	管理人员基本支出、维护经费落实到程度指数 C_3	0.95
	管理机制先进性指数(内部绩效挂钩) C_4	0.95
水利工程管理规范化程度 G_2	水利工程检查、监测工作制度完备和执行规范化指数 C_5	0.85
	水利工程维修养护项目管理制度完备和执行规范化指数 C_6	0.95
	水利工程控制运用方案和操作制度执行指数 C_7	0.95
	水利工程各类预案完善指数 C_8	0.85
	单位行政管理各项规章制度和岗位责任制完善指数 C_9	0.95
	人才培养机制及科技创新激励机制完善指数 C_{10}	0.95
	水利工程管理信息化指数 C_{11}	0.95
	水利工程安全监测自动化系统先进性指数 C_{12}	0.85
	闸站工程自动化监控系统先进性指数 C_{13}	0.95
	水情预报和水利工程运行调度系统先进性指数 C_{14}	0.95
水利工程管理法治环境良性化水平 G_4	管理范围确权划界完成指数 C_{15}	0.95
	依法管理完善程度指数(涉河建设项目审批情况、建设项目管理程度) C_{16}	0.95
	水政监察人员素质建设力度指数 C_{17}	0.85
	水利工程管理公众参与程度指数 C_{18}	0.95
水利工程安全管理运行水平 G_5	水利工程反事故预案完善指数 C_{19}	0.95
	报告制度 C_{20}	0.95
	责任制落实(建立安全员网络) C_{21}	0.95

表3 泰州引江河水利工程管理现代化评价指标体系定量指标值

准则层	指标层	目标值	现状值	实现值
水利工程设施完好和功能达标程度 G_6	工程设施完好率(含观测设施) C_{22}	100	90	0.90
	维修养护率 C_{23}	95	90	0.95
	工程设计能力达标率 C_{24}	100	100	1.00
水利工程水生态环境保护水平 G_7	保洁率 C_{25}	100	100	1.00
	绿化覆盖率 C_{26}	90	95	1.00
	水土流失治理率 C_{27}	80	95	1.19
	水域功能区水质达标率 C_{28}	100	100	1.06
	工程运行效率 C_{29}	100	95	0.95
水管单位经营绩效管理和发展能力 G_8	合理水费及其他规费征收率 C_{30}	100	90	0.90
	可开发土地资源利用率 C_{31}	95	95	1.00
	水管单位盈亏率 C_{32}	8	6.5	0.81
人力资源科技水平和结构性合理程度 G_9	在岗人员业务技术素质、结构、人数与职能要求适应率 C_{33}	90	85	0.94
	大专以上文化程度人员比例 C_{34}	50	48	0.96

根据训练好的网络,输入泰州引江河各评价指

标无量纲化后的指标值,即可得出评价结果。模型实际输出值为 0.934,按照水利工程管理现代化评价标准,泰州引江河工程管理基本实现现代化。

3.2 与经典 BP 算法的训练及输出结果的比较

将以上样本输入参数相同的 BP 网络中进行计算,经过 104 步学习,达到精度要求,见图 3。根据训练好的网络,输入泰州引江河各评价指标无量纲化后的指标值,即可得出评价结果,模型实际输出值为 0.941,按照水利工程管理现代化评价标准,泰州引江河工程管理基本实现现代化。

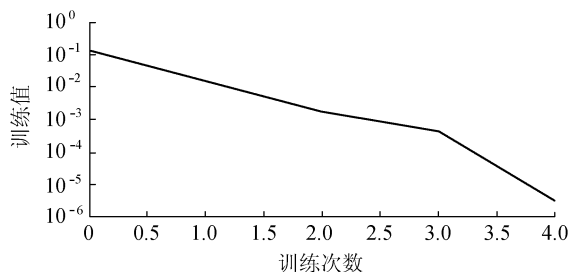


图3 泰州引江河水利工程管理现代化评价误差分析图

从改进 GA-BP 神经网络和 BP 神经网络训练过程看,改进 GA-BP 神经网络收敛过程更稳定,而且训练次数少,而 BP 神经网络的训练过程相对不太稳定,而且收敛速度慢。从最终评价结果看,两种方法的结果基本一致。

4 结语

改进 GA-BP 神经网络水利工程管理现代化评价方法,具有全局寻优,收敛速度快及评价结果客观、准确等优点,遗传算法很好地解决了 BP 算法随机给定初始值和阈值,训练结果不稳定的问题,使网络陷入局部极小点的可能性大大减小。水利工程管理现代化评价涉及管理体制、管理机制、管理人才、管理手段,以及水利工程社会经济生态效益等方面,涉及指标众多,是典型的非线性映射问题。改进 GA-BP 神经网络算法用于水利工程管理现代化评价,能以具体的输出结果清楚地给出评价价值,为管理者提供很好的决策支持,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 高玉琴,方国华,韩春晖,等. 水利工程管理现代化内涵、建设目标及内容分析[J]. 三峡大学学报,2009(4): 45-48.
- [2] 高玉琴,方国华,黄显峰. 基于粗糙集的水利工程管理现代化评价权重确定方法[J]. 水电能源科学,2011(2): 111-114.
- [3] 苑希民. 神经网络和遗传算法在水科学领域的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.

(下转第 25 页)

持。③提高水价增加的水费收入主要用于农民不同收入层次的支付补贴,现有灌区的维修和养护所需的投资主要由财政来承担,以切实保障农村水利现代化目标的实现和城乡统筹的协调发展。④农业水价政策的改革与完善,要有利于农业供水市场机制的培育,有利于农业产业化的全面推进,有利于促进生态农业建设。

4 农业水价改革方向与政策建议

a. 财政对农业供水工程运行成本和投资成本的补贴不计入定价成本。①对农业供水工程运行成本补贴,不计入定价成本。采取按照人员编制定额或者按照水利工程维修养护定额补贴的方式;②水利工程延期折旧或者免提折旧,更新改造资金不足由财政补贴;③对财政拨款进行灌区节水改造以及末级渠系奖补资金不记入定价成本。

b. 以工业用水补偿农业用水的方法降低农业用水定价成本。工业无偿投资节水设施,置换水权,因为节水降低的成本应该体现在定价中。如果社会单位直接用货币购买水权,价款应该在降低农业定价成本中得到体现,不能作为水利单位奖金和福利发放。同时供应工业、农业用水的水利工程,可以通过供水保证率法分摊成本,体现“以工补农”的政策方向。

c. 财政转移支付方式兼顾直接补贴农民。参照农业生产资料补贴方法,与农业水价调整挂钩,对定额内用水量提价部分进行明补,定额外不补,同时与现行的农业直补政策相协调。

d. 根据灌区节水条件和水价分担规模,对灌区进行合理分类。分类依据除兼顾灌区节水条件这个因素外,还可选择与水价分担关系最密切的因素作为标准,按照不同的水价分担形式进行综合分类。首先选择分类的单项指标,用这些单项指标区分不同灌区的社会贡献、节水潜力、价格现状、农民和政府对于水价的分担能力,然后综合单项分类指标进行综合分类。

e. 从政策激励的角度明确农民对水利投资投劳的权益。明确农民用水协会可以自主决定对农村水利投资投劳并取得收益。发达地区农业用水提价的重点工作是末渠系成本核算。农业用水价格管理改革的重点也是末级渠系价格管理,为了把提价和价格分担结合起来,关键环节是吸引农民对于末级渠系养护投入^[8]。一方面可以采用农民投资投劳降低水价成本,另一方面可以巩固农民用水协会的经济基础,建立民主管理制度。

f. 从提高水资源效率的角度实行城乡水务一体化管理。按照《中华人民共和国水法》规定,实行城乡水资源统一管理和监督。农业供水单位需要确定能用于转移的总水量,并制定供水运行调节规则,阐明用水可靠性等细则,明确规定向终端用户提供的水量,取代用行政手段来处理供水问题的传统办法,为“工农互补”提供条件。

参考文献:

- [1] 姜文来. 农业水价合理分担研究[J]. 中国水市场, 2012(16):45-51.
- [2] 水利部发展研究中心. 农业水价综合改革研究报告(2009-2011)[R]. 北京:水利部发展研究中心, 2012.
- [3] 贾琚. 国外的节水农业[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2006:129-135.
- [4] 吴伟华. 南通市农业水价调研报告[R]. 南通:南通市水利局, 2011.
- [5] 国家发展和改革委员会, 水利部. 关于加强农业末级渠系水价管理的通知(发改价格[2005]2769号)[EB/OL]. [2006-05-22]. <http://www.xjdr.gov.cn/content.jsp?urltype=news.NewsContentUrl&wbtreeid=10508&wbnewsid=16949>.
- [6] 崔延松. 区域供水系统与区域水价研究[J]. 中国水利, 2006(16):34-35.
- [7] 周春应, 章仁俊. 水价对农业用水需求的影响分析[J]. 中国水利, 2005(15):27-30.
- [8] 崔延松. 水利经济管理[M]. 南京:河海大学出版社, 2000:134-141.

(收稿日期:2012-08-20 编辑:张志琴)

(上接第10页)

- [4] 蒯圣龙, 张红珍, 李云辉. 基于遗传神经网络的环境质量评价[J]. 沈阳大学学报, 2006(2):43-45.
- [5] 韩力群. 神经网络理论、设计及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.
- [6] 张代远. 神经网络新理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [7] FANG G H, GAO Y Q, TAN W X, et al. Study and construction on evaluation index system of the modernization of water conservancy project management[C]// International Conference on Engineering Management and Service Sciences, Nanjing:2009.
- [8] 金菊良. 遗传算法及其在水科学中的应用[D]. 南京:河海大学, 1998.
- [9] 周开利. 康遥红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.

(收稿日期:2012-06-05 编辑:陈玉国)