

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.04.005

改进 BP 神经网络模型在小康水利综合评价中的应用

崔东文,金 波

(文山州水务局,云南 文山 663000)

摘要:分析 BP 神经网络应用于小康水利综合评价中存在的几个关键性问题。利用层次分析法(AHP)从 100 余个水利统计指标中遴选出 30 个具有一定代表性的指标用于构建小康水利综合评价指标体系并给出相应的分级标准;采用 LM 算法弥补标准 BP 神经网络在实际应用中存在收敛速度慢、易陷入局部极值等不足,建立了神经网络小康水利综合评价模型——LM-BP 模型;利用随机内插方法在小康水利综合评价分级标准阈值间生成训练样本和检验样本;提出网络拟合度的概念;选取网络拟合度、平均相对误差等 5 个统计指标用于评价模型性能。在模型达到预期的评价精度和泛化能力后,将其用于文山州小康水利综合评价,并构建传统 BP 模型、RBF 模型作为对比模型。结果表明:(a)无论是训练样本还是检验样本,LM-BP 模型的评价精度均高于传统 BP 神经网络模型、RBF 神经网络模型近一个数量级,表明 LM-BP 模型具有较高的评价精度和泛化能力,可用于文山州小康水利综合评价,模型收敛速度快、稳定性能好。(b)2010 年文山州及各县级行政区小康水利综合评价为 1~2 级,处于起步—基本实现阶段;2020 年预测评价为 3 级,全州基本实现小康水利。

关键词:小康水利综合评价;改进 BP 神经网络模型;LM 算法;层次分析法;文山壮族苗族自治州

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)04-0306-08

Application of improved BP neural network model to comprehensive evaluation of water conservancy in a state of relative prosperity

CUI Dongwen, JIN Bo

(Wenshan Water Conservancy Bureau of Yunnan Province, Wenshan 663000, China)

Abstract: This paper focuses on several key issues of a BP neural network when it is applied to the comprehensive evaluation of water conservancy in a state of relative prosperity. Based on the analytic hierarchy process (AHP), 30 representative indicators were selected out of more than 100 water conservancy indicators, in order to build up a comprehensive evaluation system of water conservancy in a state of relative prosperity and grading standards as well. In practical application, the BP neural network has shortcomings, including the slow convergence and likely occurrence of local extreme values. To overcome these shortcomings, an LM-BP neural network model was established for comprehensive evaluation of water conservancy in a state of relative prosperity. In this case, training and testing samples were generated between standard thresholds using the random interpolation method. A concept of network fitness is proposed as well. The performance of the proposed model was evaluated using the network fitness, the average relative error, and three other statistical indicators. After the evaluation of the model achieved the expected accuracy and generalization ability, it was applied to the comprehensive evaluation of water conservancy in a state of relative prosperity in Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture, and compared with traditional BP and RBF models. The results are as follows: (a) In both the training samples and testing samples, the LM-BP model had higher evaluation accuracy than traditional BP and RBF models by nearly an order of magnitude, indicating that the LM-BP model has high accuracy and generalization capability and is applicable to the comprehensive evaluation of water conservancy in a state of relative prosperity in Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture. In addition, the LM-BP model has the advantages of fast convergence and a high degree of

stability. (b) In the year 2010, water conservancy in a state of relative prosperity in Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture and county-level administrative districts was at level I to II, the initial stages. It will reach level III in the year 2020 according to the prediction, which means that the water conservancy in the whole prefecture will basically achieve a state of relative prosperity.

Key words: comprehensive evaluation of water conservancy in a state of relative prosperity; improved BP neural network model; LM algorithm; analytic hierarchy process; Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture

小康水利是以水利的基础性、安全性、舒适性支撑和保障实现小康社会的水利现代化阶段性目标,是一个动态的发展过程。小康水利综合评价对于指导水利现代化建设和实现小康社会宏伟目标具有重要意义^[1]。小康水利涉及自然、社会、经济、生态环境等多个方面,是一个庞大的系统工程,其评价表现出多指标、高维、非线性等特征,适宜借助人工神经网络(ANN)等智能方法,以处理复杂巨系统的综合评价问题。BP 神经网络具有较强的非线性映射能力、鲁棒性、容错性和自适应、自组织、自学习等许多特性,是 ANN 中应用最广泛的神经网络模型。然而将 BP 神经网络应用于小康水利综合评价中存在着几个关键性问题:一是没有普遍认同的评价指标体系和分级标准;二是如何克服 BP 神经网络在实际应用中存在收敛速度慢、易陷入局部极值等缺点;三是如何有效解决神经网络由于“欠拟合”与“过拟合”所导致的网络泛化能力降低问题;四是如何解决 BP 神经网络训练样本、检验样本、样本容量大小以及输出模式等问题。

针对 BP 神经网络应用于小康水利综合评价所存在的问题和不足,笔者利用层次分析法(AHP)从100 余个水利统计指标中遴选出 30 个具有一定代表性的指标用于构建小康水利综合评价指标体系,并参考相关文献^[2-10],建立符合丰水地区小康水利综合评价的分级标准。基于 BP 神经网络和 LM 算法原理,提出 LM-BP 神经网络小康水利综合评价模型(简称 LM-BP 模型),并构建传统 BP 神经网络模型(简称 BP 模型)、RBF 神经网络模型(简称 RBF 模型)作为对比模型,以文山州不同规划水平年小康水利评价为例进行验证,为区域小康水利建设和评价提供参考。

1 基于 LM 算法的 BP 模型

1.1 BP 神经网络

BP 神经网络是一种单向传播的多层前馈神经网络,其主要特点是信号前向传播,误差反向传播。在前向传播中,输入信号从输入层经隐含层逐层处理,直至输出层。每一层的神经元状态只影响下一层神经元状态,如果输出层得不到期望输出,则转入反向传播,根据预测误差调整网络权值和阈值,从而使 BP 神经网络预测输出不断逼近期望输出。BP 神经网络具有良好的非线性映射能力,主要应用于函数逼近、模式识别、分类和数据压缩等领域。BP 神经网络的拓扑结构及算法步骤可参阅相关文献^[6,11-12]。

1.2 LM-BP 算法

标准梯度 BP 神经网络算法在实际应用中存在收敛速度较慢、训练可能不稳定以及目标函数易陷入局部极小值等缺点和不足。文献[12]介绍的附加动量法、自适应调整参数法、弹性改进法、共轭梯度法及 LM 算法对标准 BP 神经网络进行了改进,为克服标准梯度 BP 算法在实际应用中的不足提供了途径,限于篇幅本文仅介绍 LM 算法^[12-15]。

标准梯度 BP 神经网络算法的训练性能函数采用均方误差函数 $E(x)$ 表示,即

$$E(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \tag{1}$$

式中: n ——训练样本数; $e_i(x)$ ——误差; $\hat{y}_i$ ——期望输出向量; y_i ——实际输出向量。

设 x_k 为第 k 次迭代的权值和阈值所组成的向量,新的权值和阈值所组成的向量 x_{k+1} 可根据下面的规则求得

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x \tag{2}$$

式中: Δx ——权值及阈值变化量。

由于 LM 算法是从牛顿法修正而来,而牛顿法是通过最小二乘法求解 $E(x)$ 的二阶泰勒公式极值得到,因此 Δx 可表示为

$$\Delta x = - [\nabla^2 E(x)]^{-1} \nabla E(x) \tag{3}$$

式中: $\nabla^2 E(\mathbf{x})$ ——误差函数 $E(\mathbf{x})$ 的 Hessian 矩阵; $\nabla E(\mathbf{x})$ ——梯度。
由于每次迭代计算中不能保证 $\nabla^2 E(\mathbf{x})$ 都可逆, 所以需对 $\nabla^2 E(\mathbf{x})$ 进行近似计算。
可以证明:

$$\nabla E(\mathbf{x}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{x}) \mathbf{e}(\mathbf{x}) \tag{4}$$

$$\nabla^2 E(\mathbf{x}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{x}) \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \mathbf{S}(\mathbf{x}) \tag{5}$$

其中

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial e_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial e_N(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial e_N(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中: $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ ——Jacobian 矩阵。
在靠近极值点时 $\mathbf{S}(\mathbf{x}) \approx 0$, 因此牛顿法可以修正为高斯-牛顿法:

$$\Delta \mathbf{x} = - [\mathbf{J}^T(\mathbf{x}) \mathbf{J}(\mathbf{x})]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{x}) \mathbf{e}(\mathbf{x}) \tag{7}$$

LM 算法是高斯-牛顿法的一种改进形式:

$$\Delta \mathbf{x} = - [\mathbf{J}^T(\mathbf{x}) \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \mu \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{x}) \mathbf{e}(\mathbf{x}) \tag{8}$$

式中: $\mu (\mu > 0)$ ——比例系数; $\mathbf{I}$ ——单位矩阵。
从式(8)可见, 如果 $\mu = 0$ 则为高斯-牛顿法; 如果 μ 取值很大, 则 LM 算法接近梯度下降法, 每迭代成功一步则 μ 值减少一些, 在接近误差目标的时候逐渐与高斯-牛顿法相似。由于 LM 算法利用了近似的二阶导数信息, 因此其算法收敛速度比梯度下降法快得多。

LM 算法步骤可归纳如下: (a) 初始化各训练参数, 包括误差目标 ε 、比例系数 μ 等。(b) 按式(1)计算 $E(x_k)$, 如果 $E(x_k) < \varepsilon$, 转至(f); 否则, 以 x_{k+1} 为新的权值和阈值, 计算 $E(x_{k+1})$ 。(c) 按式(6)计算 $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 。(d) 按式(8)计算 $\Delta \mathbf{x}$ 。(e) 若 $E(x_{k+1}) < E(x_k)$, 转至(b); 否则此次不更新权值和阈值, 转至(d)。(f) 停止。

1.3 LM-BP 模型小康水利评价实现步骤

基于 BP 神经网络及 LM 算法的基本原理, LM-BP 模型实现小康水利综合评价步骤可归纳如下: (a) 利用 AHP 法从 100 余个水利统计指标中遴选出 30 个具有一定代表性的指标用于构建小康水利综合评价指标体系, 并建立符合丰水地区小康水利综合评价的分级标准; (b) 采用 LM 算法改进标准 BP 神经网络在实际应用中存在的收敛速度慢、易陷入局部极值等不足, 提出 LM-BP 神经网络小康水利综合评价模型, 并构建传统 BP、RBF 小康水利评价模型作为对比模型; (c) 利用随机内插的方法在小康水利综合评价分级标准阈值间生成训练样本和检验样本, 对样本进行归一化处理, 设计合理的网络输出模式; (d) 选取网络拟合度、平均相对误差、最大相对误差、平均绝对误差和模型运行时间 5 个统计指标用于评价模型性能, 在模型达到预期的评价精度和泛化能力后用于区域小康水利综合评价; (e) 对研究区现状水平年和规划水平年小康水利评价指标及等级阈值进行归一化处理, 利用训练好并满足精度要求的 LM-BP 模型对其进行综合评价及分析。

2 小康水利评价指标体系建立

2.1 小康水利的目标任务

小康水利的目标任务是: 到 2020 年, 基本构建与国民经济发展相适应的防洪抗旱安全保障体系、基本建成满足经济社会发展需求的供水安全保障体系, 山区农村水利供水保障能力进一步加强, 基本建成水源地保护和河湖健康保障体系, 建立较为完善的水利发展保障能力和水管理保障体系^[1]。

2.2 小康水利与水利现代化的关系

水利现代化是以科学发展观为指导, 用现代的治水理念、先进的科学技术、完善的基础设施、科学的管理制度武装和改造传统水利, 有效解决洪涝灾害、干旱缺水、水环境污染和水土流失等问题, 通过水利现代化建设来支撑和保障国家现代化目标的实现。从过程和内容上来讲, 小康水利是一个动态发展的过程, 是水利现代化的一个阶段性目标; 小康水利不但注重水资源的治理、开发和利用, 还注重水资源的节约、保护、配置与管理; 不但注重政府宏观调控作用, 还注重市场机制作用; 不但注重建立与市场经济体制相适应的水利工程投融资体制和水利工程管理体制, 还注重建立流域与区域相结合的水资源统一管理体制; 不但注重推进水利信息化, 还注重以水利信息化带动水利小康化和现代化; 不但注重工程措施, 还注重非工程措施和生态措

施;不但注重水利工程建设满足工程技术要求,还注重尊重自然、顺应生态,实现人与自然的和谐共处^[1]。从评价指标体系和分级标准上来讲,水利现代化评价指标体系是衡量某一时期水利现代化建设水平的尺度,是动态的、相对的、协调发展的评价标准,其评价的指标体系和分级标准随着社会生产力、科学技术的进步不断有新的变化,不同时期、不同地域实现水利现代化的具体内容和客观标准各不相同^[16]。我国 2000 年成立水利现代化研究课题组(如傅春等^[17]、张于喆等^[18])从水利现代化与国家现代化的关系入手提出了水利现代化评价指标体系和分级标准。而目前国内对于小康水利评价的研究尚处于起步阶段,没有一套科学、合理和完善的指标体系和分级标准。

2.3 小康水利评价指标体系的建立

对于小康水利综合评价,首先必须确定一套评价指标^[2],这样才能科学地评判各区域小康水利的建设成果,开展水利现代化建设成果的评比和择优。笔者参考相关文献^[2-10,17-18],借鉴水利现代化评价的理论和指标体系,遵循客观性、系统性、代表性和科学性的指标选取原则^[2],从防洪抗旱减灾、水资源合理配置与高效利用、生态环境状况、水资源管理和水利发展保障 5 个方面搜集了 100 余个指标形成小康水利综合评价指标体系基本集,并利用 AHP 方法^[19]构建新时期小康水利评价基本指标体系,将小康水利评价分为目标层 A、准则层 B 和指标层 C 3 个层次。目标层 A 主要用于综合评价小康水利状况;准则层 B 用于反映小康水利状况的内部协调性,由 5 部分构成,将小康水利的各个方面有机地结合在一起;指标层 C 反映小康水利评价中各个准则层的具体指标,由所搜集的 100 余个评价指标组成,是小康水利综合评价的基础。

小康水利评价指标体系构建的步骤如下:(a)从防洪抗旱减灾等 5 个方面搜集了 100 余个指标,形成小康水利评价指标体系基本集;(b)根据专家经验和辨识能力,从 100 余个指标基本集中遴选出 45 个指标形成小康水利评价指标体系集;(c)利用 AHP 法^[19]对所遴选出的 45 个评价指标进行权重计算;(d)依次选取评价指标权重大的指标若干,使其权重之和大于 0.8,这样能够表征目标层 A 评价的目标,各指标层 C 所遴选出来的指标最终构成小康水利评价指标体系终集(见表 1)。小康水利各评价指标表征及公式见文献^[2-10]。

表 1 小康水利评价指标体系终集

Table 1 Final settings of comprehensive evaluation index system for water conservancy in a state of relative prosperity		
目标层 A	准则层 B	指标层 C
小康水利综合评价	防洪抗旱减灾	{ 水旱灾害损失率(x_1)、流域防洪达标率(x_2)、干旱受灾面积率(x_3) }
	水资源合理配置	{ 农村自来水普及率(x_4)、有效灌溉率(x_5)、农村饮水安全人口达标率(x_6) }
	与高效利用	{ 缺水率(x_7)、10 年用水变化均衡率(x_8)、用水结构系数(x_9) }
		{ 工业用水重利用率(x_{10})、管网漏损率(x_{11})、供水保证率(x_{12})、人均供水量(x_{13}) }
		{ 用水弹性系数(x_{14})、万元工业增加值用水量(x_{15})、灌溉水利用系数(x_{16}) }
	生态环境状况	{ 水功能区水质达标率(x_{17})、水土流失治理率(x_{18})、河道生态基流用水保障率(x_{19}) }
指标体系评价		{ GDP 废水排放量(x_{20})、区域污径比(x_{21})、污水处理率(x_{22}) }
	水资源管理	{ 用水总量控制执行力度(x_{23})、用水效率控制执行力度(x_{24}) }
		{ 水功能区限制纳污控制执行力度(x_{25})、水利工程设施完好率(x_{26})、节灌率(x_{27}) }
	水利发展保障	{ 水利科技信息化水平(x_{28})、人才结构达标率(x_{29})、水利投资比例(x_{30}) }

2.4 指标体系等级的建立

按照上述所构建的小康水利评价指标体系终集,参考相关文献^[2-10],构建符合相对丰水地区小康水利评价指标分级标准和尺度,并将小康水利评价分为 1 级(起步)、2 级(初步实现)、3 级(基本实现)、4 级(全面实现)4 个阶段^[20],分别用 1~4 级表示,见表 2。

3 网络训练与性能评价

3.1 指标数据标准化处理

为消除表 1、表 2 中各评价指标不同量纲对评价结果的影响,需对评价指标数据进行归一化处理,处理方法见文献^[5-10]。

3.2 训练及检验样本设计

解决网络训练样本及样本容量是神经网络应用于实际的关键性问题之一。样本容量过大则增加网络的

表2 小康水利评价指标分级标准

Table 2 Grading standards of evaluation indices for water conservancy in a state of relative prosperity										
评价等级	$x_1/\%$	$x_2/\%$	$x_3/\%$	$x_4/\%$	$x_5/\%$	$x_6/\%$	$x_7/\%$	$x_8/\%$	x_9	$x_{10}/\%$
1级	≥ 5	<75	≥ 30	<60	<30	<70	≥ 20	$\geq \pm 40$	≥ 0.6	<40
2级	$[3,5)$	$[75,85)$	$[15,30)$	$[60,80)$	$[30,40)$	$[70,80)$	$[10,20)$	$[\pm 30,\pm 40)$	$[0.4,0.6)$	$[40,60)$
3级	$[1,3)$	$[85,95)$	$[5,15)$	$[80,90)$	$[40,50)$	$[80,90)$	$[1,10)$	$[\pm 20,\pm 30)$	$[0.2,0.4)$	$[60,80)$
4级	<1	≥ 95	<5	≥ 90	≥ 50	≥ 90	<1	$<\pm 20$	<0.2	≥ 80
评价等级	$x_{11}/\%$	$x_{12}/\%$	x_{13}/m^3	x_{14}	x_{15}/m^3	x_{16}	$x_{17}/\%$	$x_{18}/\%$	$x_{19}/\%$	x_{20}/m^3
1级	≥ 30	<75	<300	≥ 0.6	≥ 80	<0.4	<40	<70	<85	≥ 30
2级	$[20,30)$	$[75,85)$	$[300,400)$	$[0.4,0.6)$	$[60,80)$	$[0.4,0.5)$	$[40,60)$	$[70,80)$	$[85,90)$	$[20,30)$
3级	$[10,20)$	$[85,95)$	$[400,500)$	$[0.2,0.4)$	$[40,60)$	$[0.5,0.6)$	$[60,80)$	$[80,90)$	$[90,95)$	$[10,20)$
4级	<10	≥ 95	≥ 500	<0.2	<40	≥ 0.6	≥ 80	≥ 90	≥ 95	<10
评价等级	x_{21}	$x_{22}/\%$	$x_{23}/\%$	$x_{24}/\%$	$x_{25}/\%$	$x_{26}/\%$	$x_{27}/\%$	$x_{28}/\%$	$x_{29}/\%$	$x_{30}/\%$
1级	≥ 10	<20	<75	<75	<75	<70	<30	<40	<40	<1
2级	$[5,10)$	$[20,50)$	$[75,85)$	$[75,85)$	$[75,85)$	$[70,80)$	$[30,50)$	$[40,60)$	$[40,60)$	$[1,3)$
3级	$[1,5)$	$[50,80)$	$[85,95)$	$[85,95)$	$[85,95)$	$[80,90)$	$[50,70)$	$[60,80)$	$[60,80)$	$[3,5)$
4级	<1	≥ 80	≥ 95	≥ 95	≥ 95	≥ 90	≥ 70	≥ 80	≥ 80	≥ 5

复杂性和运行时间;样本容量过小则易出现神经网络因得不到充分训练而降低网络泛化能力的问题。目前尚没有选择“合适样本容量”的指导性原则,样本容量主要凭经验选取。笔者经反复验证,认为 LM-BP 模型具有良好泛化能力和收敛速度的样本容量条件如下:各评价等级阈值间随机内插生成 300 组样本,随机选取 200 组样本作为训练样本,100 组作为检验样本,共随机生成 1 200 组样本,其中 800 组作为训练样本,400 组作为检验样本。并规定以各评价指标上限的 2 倍和下限的 50% 作为限值对各指标进行处理。对于实际应用中超出上、下限的指标值,规定以上、下限值计。小康水利评价样本及期望输出设计如下:评价等级 1 ~ 4 级的样本,期望输出相应地为 1 ~ 4,对应的训练/检验样本数分别为 1 ~ 300 组、301 ~ 600 组、601 ~ 900 组、901 ~ 1 200 组。

3.3 性能评价统计指标

神经网络在训练过程中常出现欠拟合和过拟合两种状态,二者均会使网络的泛化能力下降^[5]。目前,理论上尚无较好解决网络训练过程中由于欠拟合和过拟合导致泛化能力降低的方法^[20-21]。笔者经过验证,提出以“网络拟合度”指标作为判定网络欠拟合与过拟合的依据。网络拟合度的含意如下:在预测样本平均相对误差足够小,且满足预测样本不少于样本总数的 1/3 条件下,拟合样本和预测样本平均相对误差绝对值之差的绝对值与之和的百分比小于 40% 时,认为网络处于较理想状态;小于 20% 时网络处于理想状态;大于 40% 时认为网络处于过拟合或欠拟合状态,即不理想状态。因此,本文选用的模型性能评价指标有平均相对误差、最大相对误差、平均绝对误差及运行时间 4 个统计指标和本文提出的网络拟合度,各评价指标越小则表明模型的性能越好。

3.4 网络训练及性能评价比较

利用上述训练样本、检验样本和期望输出对传统 BP 模型、LM-BP 模型和 RBF 模型相关参数进行率定。经反复调试,各评价模型在下述参数设置条件下具有较好的评价精度和泛化能力。

传统 BP 模型:基于 Matlab 神经网络工具箱,创建及训练基于梯度下降算法的传统 BP 模型。参考相关文献^[5-6],最终确定传统 BP 模型训练次数为 5 000,期望误差为 0.000 1,模型结构为 30-42-1,隐含层和输出层传递函数分别采用 tansig 和 purelin,学习速率为 0.01。

LM-BP 模型:做法及模型设定条件同传统 BP 模型,仅将传统 BP 模型的梯度下降算法改为 LM 算法。

RBF 模型:参考相关文献^[10-11],确定 RBF 神经网络的 SPREAD 和期望误差分别为 2.5 和 0.001。

由于训练样本和检验样本是采用随机内插生成,因此模型每次运行结果均不一样,本文利用某随机连续运行 10 次的平均相对误差等 5 个统计指标的平均值作为传统 BP 模型、LM-BP 模型和 RBF 模型的对比实验结果(表 3),并以此来评价网络性能的优劣。

分析表 3 可以得出以下结论:(a)从平均相对误差等 4 个统计指标均值可以看出,LM-BP 模型具有较高的评价精度、泛化能力和较快的收敛速度;(b)从平均相对误差等 3 个统计指标值变化范围来看,LM-BP 模

型随机 10 次运行各统计指标值波动不大,表明该模型算法稳定,具有较好的稳健性能。

表 3 传统 BP 模型、LM-BP 模型和 RBF 模型性能评价结果

Table 3 Evaluation results of performance of LM-BP model and traditional BP and RBF models									
评价模型	样本	平均相对误差/%		最大相对误差/%		平均绝对误差/%		网络 拟合度/%	运行 时间/s
		10 次均值	变化范围	10 次均值	变化范围	10 次均值	变化范围		
传统 BP 模型	训练样本	2.057 4	1.800 0 ~ 2.367 3	15.578 8	13.140 8 ~ 18.004 1	0.037 4	0.033 2 ~ 0.043 8	3.736 1	75.548 4
	检验样本	2.217 1	2.084 0 ~ 2.391 7	14.967 4	12.299 6 ~ 19.957 1	0.041 6	0.039 8 ~ 0.045 9		
LM-BP 模型	训练样本	0.085 5	0.060 5 ~ 0.144 3	0.578 3	0.302 5 ~ 1.209 8	0.001 7	0.000 6 ~ 0.002 2	5.368 0	10.170 8
	检验样本	0.095 2	0.069 9 ~ 0.168 0	0.808 4	0.337 1 ~ 1.593 5	0.001 9	0.001 2 ~ 0.002 6		
RBF 模型	训练样本	1.247 3	1.222 2 ~ 1.273 6	9.645 1	6.974 0 ~ 16.376 4	0.023 7	0.023 2 ~ 0.024 1	16.807 8	48.192 2
	检验样本	1.751 3	1.694 8 ~ 1.805 4	10.037 9	7.653 4 ~ 14.794 8	0.038 3	0.036 6 ~ 0.040 6		

注:网络拟合度及运行时间皆为 10 次的均值。

4 应用实例

4.1 研究区概况

云南省文山壮族苗族自治州(以下简称文山州)位于云南省东南部,属亚热带低纬度高原季风气候区,全州总面积 31 456 km²,辖文山、砚山、西畴、麻栗坡、马关、丘北、广南、富宁 7 县 1 市。境内河流分属珠江流域和红河流域,多年平均径流深 501 mm,水资源总量 157.7 亿 m³。2010 年底,全州共建成水库 230 座,小坝塘 653 座。水利工程年设计供水能力 11.17 亿 m³,实际供水能力 8.75 亿 m³,水利建设取得了成效。2013 年,随着云南省水利现代化建设的进一步推进和小康水利概念的提出,如何科学合理地评价小康水利对于文山州水利现代化建设和水利规划具有重要意义^[22]。文山州 2010 年小康水利评价指标数据见表 4,限于篇幅,2020 年小康水利评价指标数据略去。

表 4 2010 年文山州小康水利评价指标数据

Table 4 Evaluation indices of water conservancy in a state of relative prosperity for Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture in 2010															
评价区域	x_1 /%	x_2	x_3 /%	x_4 /%	x_5 /%	x_6 /%	x_7 /%	x_8 /%	x_9	x_{10} /%	x_{11} /%	x_{12} /%	x_{13} /m ³	x_{14}	x_{15} /m ³
文山州	2.08	40	18.8	61.1	22.8	88	15.6	71.5	0.6	46	24.3	85	341	0.34	85
文山市	2.08	65	11.7	84.5	27.5	86	30.4	81.4	0.8	70	19.6	85	390	0.29	75
砚山县	2.08	60	15.0	76.2	24.3	87	16.7	88.1	0.6	50	22.0	85	456	0.33	78
西畴县	2.08	50	15.8	39.8	37.9	85	24.4	68.4	0.6	33	19.0	85	245	0.54	90
麻栗坡县	2.08	55	20.0	75.6	27.2	89	9.9	38.2	0.4	35	28.0	85	269	0.39	91
马关县	2.08	40	13.6	83.9	17.8	88	24.4	45.3	0.6	43	19.0	85	355	0.20	92
丘北县	2.08	55	18.2	50.8	23.9	86	0.0	76.9	0.6	33	25.0	85	292	0.38	88
广南县	2.08	30	20.9	32.1	20.9	85	44.3	69.4	0.5	37	20.0	85	294	0.38	93
富宁县	2.08	35	50.4	58.4	16.2	87	0.0	88.0	0.6	35	12.6	85	395	0.48	94
评价区域	x_{16}	x_{17} /%	x_{18} /%	x_{19} /%	x_{20} /m ³	x_{21}	x_{22} /%	x_{23} /%	x_{24} /%	x_{25} /%	x_{26} /%	x_{27} /%	x_{28} /%	x_{29} /%	x_{30} /%
文山州	0.50	88	22.9	90	18.7	0.35	41	30	30	30	90	51.4	50	46	11.6
文山市	0.52	93	22.9	90	17.1	1.27	65	30	30	30	90	52.6	50	48	1.4
砚山县	0.51	75	24.7	90	19.6	0.71	55	30	30	30	90	54.3	50	47	2.7
西畴县	0.47	100	28.1	90	21.3	0.29	30	30	30	30	90	54.6	50	45	5.6
麻栗坡县	0.48	90	31.0	90	17.1	0.25	30	30	30	30	90	37.7	50	44	3.4
马关县	0.48	83	20.8	90	16.5	0.25	30	30	30	30	90	54.5	50	42	2.6
丘北县	0.58	88	31.8	90	24.4	0.25	30	30	30	30	90	65.0	50	47	5.8
广南县	0.46	90	17.8	90	24.2	0.24	30	30	30	30	90	47.4	50	51	43.7
富宁县	0.46	100	15.7	90	15.1	0.18	30	30	30	30	90	33.5	50	46	44.5

以上资料主要来源于《文山州水资源综合规划》、《文山州“十二五”水利发展规划》等;由于 x_1 、 x_{12} 两个指标难于获取,笔者以全州平均值作为各评价区域值; x_{23} 、 x_{24} 、 x_{25} 、 x_{26} 和 x_{28} 属于定性指标,笔者依据不同规划水平年各指标实现程度给予量化。

4.2 评价结果及分析

利用训练好的 LM-BP 模型对文山州现状年及 2020 年小康水利进行综合评价,将表 2 中小康水利评价

等级标准阈值进行模拟计算,将输出结果作为划分小康水利等级的依据,得出文山州不同规划水平年小康水利分级1~4级的临界值模拟结果(随机10次的平均结果)分别为 ≤ 1.9328 、 $(1.9328, 2.1471]$ 、 $(2.1471, 3.0725]$ 、 > 3.0725 。评价结果见表5。

分析表5可以得出以下结论:
(a) LM-BP模型对文山州及各县级行政区不同规划水平年小康水利评价结果为1~3级,处于起步—基本实现阶段,基本反映了文山州及各县级行政

区在不同规划时期的水利发展状况,表明LM-BP模型用于该区域小康水利综合评价是合理可行的,模型具有较好的评价精度和泛化能力,评价结果可为水利发展等规划提供参考。
(b) 现状水平年文山州及各县级行政区小康水利综合评价基本处于起步—初步实现阶段,文山市、砚山县、马关县和富宁县小康水利程度相对较高;随着水利现代化建设的进一步推进,2020年全州基本建成与经济社会发展相适应的防洪抗旱安全保障体系、供水安全保障体系、水源地保护和河湖健康保障体系、水利发展保障能力和水管理保障体系,文山州及各县级行政区小康水利评价处于3级,全州基本实现小康水利。

5 结 语

分析了BP神经网络应用于小康水利综合评价中存在的几个关键性问题,提出了解决问题的方法:利用AHP法构建小康水利评价指标体系和分级标准;采用LM算法改进传统BP神经网络在实际应用中存在的收敛速度慢、易陷入局部极值等不足,以解决BP神经网络在实际应用中的固有缺陷;采用随机内插的方法在分级标准阈值间生成训练样本和检验样本,以解决BP神经网络在实际应用中训练样本难以获取的不足以及样本容量大小对模型的影响问题;提出网络拟合度的概念,采用网络拟合度、平均相对误差、最大相对误差、平均绝对误差和模型运行时间5个统计指标评价模型性能,使评价模型评价精度和泛化能力达到理想状态,以解决网络训练过程中由于过拟合与欠拟合降低网络精度和泛化能力的问题。从验证实例上看,研究区获得了较理想的评价效果。

参考文献:

[1] 云南省水利厅. 云南省小康水利建设规划工作大纲[R]. 昆明:云南省水利厅,2013.

[2] 耿雷华,卞锦华,徐澎波,等. 水资源合理配置评价指标体系研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,2008.

[3] 许新宜,王红瑞,刘海军,等. 中国水资源利用效率评估报告[M]. 北京:北京师范大学出版社,2010.

[4] 张先起. 相对丰水区域水资源可持续利用评价[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[5] 崔东文. 基于极限学习机的长江流域水资源开发利用综合评价[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2):14-19. (CUI Dongwen. Comprehensive evaluation of water resources development and utilization in Yangtze River Basin based on extremelearning machine[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(2):14-19. (in Chinese))

[6] 崔东文. 基于BP神经网络的文山州水资源承载力评价分析[J]. 长江科学院院报,2012,29(5):9-15. (CUI Dongwen. Evaluation and analysis of water resources carrying capacity in Wenshan Prefecture based on BP neural network[J]. Yangtze River Scientific Research Institute,2012,29(5):9-15. (in Chinese))

[7] 崔东文,郭荣. 基于概率神经网络的文山州水资源配置合理性评价分析[J]. 长江科学院院报,2012,29(10):63-67. (CUI Dongwen, GUO Rong. Evaluation of rational water allocation based on probabilistic neural network: case study of Wenshan Prefecture[J]. Yangtze River Scientific Research Institute,2012,29(10):63-67. (in Chinese))

[8] 崔东文. 基于改进BP神经网络模型的区域水资源脆弱性综合评价[J]. 长江科学院院报,2013,30(2):1-7. (CUI Dongwen. Comprehensive assessment of the water resources by improved BP neural network model[J]. Yangtze River Scientific

表5 文山州不同规划水平年小康水利评价结果(随机10次平均)
Table 5 Evaluation results of water conservancy in a state of relative prosperity in Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture in different target years (ten times average randomly)

评价区域	2010 年		2020 年	
	模拟结果	评价等级	模拟结果	评价等级
文山州	1.665 1	1 级	2.997 8	3 级
文山市	2.016 1	2 级	3.003 5	3 级
砚山县	1.989 9	2 级	2.999 7	3 级
西畴县	1.499 2	1 级	2.998 3	3 级
麻栗坡县	1.672 2	1 级	2.964 0	3 级
马关县	2.028 1	2 级	2.991 8	3 级
丘北县	1.917 7	1 级	2.958 6	3 级
广南县	1.139 3	1 级	2.941 5	3 级
富宁县	2.023 8	2 级	2.951 8	3 级

Research Institute,2013,30(2):1-7. (in Chinese))

[9] 崔东文,郭荣. 基于 GRNN 模型的区域水资源可持续利用评价:以云南文山州为例[J]. 人民长江,2012,43(5):26-31. (CUI Dongwen, GUO Rong. Evaluation of sustainable utilization of regional water resources based on GRNN neural network model: case of Wenshan Prefecture of Yunnan Province[J]. Yangtze River,2012,43(5):26-31. (in Chinese))

[10] 崔东文. RBF 与 GRNN 神经网络模型在河流健康评价中的应用:以文山州区域中小河流健康评价为例[J]. 中国农村水利水电, 2012(3):56-61. (CUI Dongwen. RBF and GRNN neural network model in the evaluation of river health[J]. China Rural Water and Hydropower,2012(3):56-61. (in Chinese))

[11] 崔东文. 几种神经网络模型在湖库富营养化程度评价中的应用[J]. 水资源保护,2012,28(6):12-18. (CUI Dongwen. Applications of several neural network models to eutrophication evaluation of lakes and reservoirs [J]. Water Resources Protection, 2012,28(6):12-18. (in Chinese))

[12] 张德丰. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[13] 葛玲,贾志成,夏克文,等. 基于 LM 算法的神经网络语音识别[J]. 计算机工程与设计,2006,27(14):2534-2539. (GE Ling,JIA Zhicheng,XIA Kewen,et al. Neural network speech recognition based on LM algorithm[J]. Computer Engineering and Design,2006,27(14):2534-2539. (in Chinese))

[14] 冯今朝,王仲生. 基于 LM 优化算法的神经网络在航空发动机转子故障诊断中的应用[J]. 宇航计测技术,2007,27(2):18-21,49. (FENG Jinzhao,WANG Zhongsheng. Application of neural network based on LM optimization algorithm in fault diagnosis of aircraft engine rotor[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement,2007,27(2):18-21,49. (in Chinese))

[15] 华祖林,钱蔚,顾莉. 改进型 LM-BP 神经网络在水质评价中的应用[J]. 水资源保护,2008,24(4):22-25,30. (HUA Zulin,QIAN Wei,GU Li. Application of improved LM-BP neural network in water quality evaluation [J]. Water Resources Protection, 2008,24(4):22-25,30. (in Chinese))

[16] 杨丽英,许新宜,王红瑞,等. 中国水利现代化发展水平综合评价分析[J]. 资源科学,2011,33(9):1708-1713. (YANG Liying,XU Xinyi,WANG Hongrui,et al. A comprehensive evaluation of the development of water conservation modernization in China[J]. Resources Science,2011,33(9):1708-1713. (in Chinese))

[17] 傅春,杨志峰,刘昌明. 水利现代化的内涵及评价指标体系的建立[J]. 水科学进展,2002,13(4):502-506. (FU Chun,YANG Zhifeng,LIU Changming. Connotation and evaluation index system for water conservancy modernization[J]. Advances in Water Science,2002,13(4):502-506. (in Chinese))

[18] 张于喆,史清琪,张岳. 我国水利现代化的评价指标体系[J]. 人民黄河,2003,25(11):4-6. (ZHANG Yuzhe,SHI Qingqi,ZHANG Yue. Evaluation index system on modernization of China water[J]. Yellow River,2003,25(11):4-6. (in Chinese))

[19] 王莲芬,许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京:中国人民大学出版社,1990.

[20] MATLAB 中文论坛. MATLAB 神经网络 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010.

[21] 白鹏,张喜斌,张斌,等. 支持向量机理论及工程应用实例[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.

[22] 文山州水利电力勘测设计院. 文山壮族苗族自治州水资源综合规划报告[R]. 文山:文山州水利电力勘测设计院, 2009.