

DOI:10.12170/20181031004

刘帅, 盛金保, 王昭升, 等. 基于模糊神经网络的水电施工安全隐患评价 [J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 105-111. (LIU Shuai, SHENG Jinbao, WANG Zhaosheng, et al. Evaluation method for hidden safety dangers of hydropower construction based on fuzzy neural network[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(1): 105-111. (in Chinese))

# 基于模糊神经网络的水电施工安全隐患评价

刘 帅<sup>1</sup>, 盛金保<sup>1,2</sup>, 王昭升<sup>1,2</sup>, 杨德玮<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 水电工程施工过程中存在的安全隐患多且动态变化, 是造成水电工程事故多发的主要原因。为评价水电工程施工的安全隐患程度, 基于模糊综合评价和 BP 神经网络建立了水电工程施工安全隐患评价模型, 构建了一个具有多层次和多指标特性的水电工程施工安全隐患诊断指标体系, 提出了重大、较大、一般、较小以及轻微的 5 个等级划分。结合实例, 对某水电工程施工进行评价, 确定其安全隐患等级, 并对评价结果进行分析。结果表明: 该水电站施工安全隐患等级为 3 级, 符合其实际隐患排查情况。评价提出的模糊神经网络模型可操作性强, 能有效分析水电工程施工安全隐患, 对于水电工程施工过程的安全隐患排查具有一定参考意义。

**关键词:** 水电工程施工; 模糊综合评价; BP 神经网络; 安全隐患

中图分类号: TV513

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)01-0105-07

我国水能资源蕴藏量居世界首位, 全国技术可开发装机容量为 5.42 亿 kW, 经济可开发装机容量为 4.02 亿 kW。如果利用好水能资源, 必将带来巨大的经济效益, 这也符合我国的可持续发展理念。随着水利水电工程的高速发展, 水电工程施工安全事故也时有发生。据 2013 年《中华人民共和国水利部公报》数据显示, 2013 年正式施工的水利建设项目 20 266 个, 在建工程投资总规模 15 346.0 亿元, 较上年增加 12.0%, 全国水利系统从业人员 104 万。水利水电工程行业发生安全事故 22 起, 死亡 36 人, 较大事故发生了 6 起。2014 年, 水利水电工程行业发生安全事故 12 起, 死亡 18 人<sup>[1]</sup>。据国家能源局公开数据统计, 2016 年水电事故发生 8 起, 2017 年水电事故发生 3 起。如何遏制住水利水电工程施工事故多发的苗头, 是重大研究课题<sup>[2]</sup>。水利水电工程施工在工程质量、施工安全、工程建设期和工程建设成本等方面要求高, 具有施工规模大、影响范围广、作业强度大等特点<sup>[3]</sup>, 因此在施工期间就要做好安全隐患评价工作。

本文拟结合实际工程资料, 开展水电工程施工安全隐患评价方法及应用研究, 丰富隐患理论和评价方法的研究, 为相关企业预防施工安全隐患提供理论指导。通过对隐患评价方法的研究, 提出一种更合理、可操作性强、更有实际运用价值的评价方法, 构建符合工程施工的评价体系, 进行整体安全隐患评价, 并能应用于实际工程。

## 1 水电工程施工安全隐患评价指标体系

评价指标体系是对水电工程施工进行安全评价的基础, 而指标体系的合理选择直接关系到整体评价的准确性。由于水电工程施工安全隐患影响因素较多, 并且施工场地复杂, 往往存在着多个工序。影响水电

收稿日期: 2018-10-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC0407100); 国家自然科学基金资助项目 (51909174, 61801169); 南京水利科学研究院基金资助项目 (Gz716002)

作者简介: 刘 帅 (1990—), 男, 四川通江人, 博士研究生, 主要从事水利水电安全应急预案以及安全风险分析方面研究。  
E-mail: 435969504@qq.com 通信作者: 盛金保 (E-mail: jbsheng@nhri.cn)

工程施工安全的因素有很多,而对这些因素进行归纳以及划分时都应遵循系统性、科学性、可行性、全面性等原则<sup>[4-5]</sup>。

### 1.1 评价指标体系建立

根据水利水电工程相关法律法规以及行业标准《水利水电工程施工通用安全技术规程》,并结合相关的隐患资料综合分析,初步建立了一套水电工程施工安全隐患评价指标体系。随后,通过与专家交流与实地考察,经过数次修改,最终建立了水电工程施工安全隐患评价指标体系。该指标体系分为3层结构,4个准则层,21个评价指标,详情见表1。

表1 水电工程施工安全评价指标体系  
Tab. 1 Safety evaluation index system for hydropower construction

目标层	指标层	二级指标层
水电工程施工 安全评价	人的因素 $B_1$	施工人员的安全文化素质( $B_{11}$ )
		职业危害预防( $B_{12}$ )
		个人安全防护用品( $B_{13}$ )
		施工操作规程( $B_{14}$ ) 安全教育及培训( $B_{15}$ )
	设备设施 $B_2$	脚手架工程( $B_{21}$ )
		施工机械设备及特种设备( $B_{22}$ )
		施工供电及安全标志( $B_{23}$ )
		安全防护设备设施( $B_{24}$ ) 设备的状态及养护( $B_{25}$ )
	管理因素 $B_3$	现场专业安全指导( $B_{31}$ )
		安全检查( $B_{32}$ )
		安全管理机构及岗位设置( $B_{33}$ )
		现场应急救援及安全措施( $B_{34}$ ) 安全法规及行业标准执行( $B_{35}$ )
	环境因素 $B_4$	施工作业环境( $B_{41}$ )
		气候条件( $B_{42}$ )
		施工通道( $B_{43}$ )
		施工现场扬尘及噪声( $B_{44}$ )
		高空落物( $B_{45}$ )
		地质条件( $B_{46}$ )

### 1.2 评级指标权重的确定

整个安全评价中,权重是影响结果可靠度的重要因素。指标权重的计算有多种方法,主要包括:统计试验、专家评分、德尔菲法以及层次分析(AHP)法等。本文采取层次分析法(AHP)<sup>[6-7]</sup>来确定权重,该法能很好地构建出整体结构图,且对于指标数量多时更加方便灵活。运用AHP法中,比较矩阵的建立以及一致性检验十分重要。比较矩阵需要专家按照Saaty提出的1~9判断矩阵标度原则(见表2)对因素层和子因素层间各元素的相对重要性给出判断,统计综合即可得到判断矩阵。

接下来采用方根法计算每个比较矩阵的最大特征根及对应特征向量,并计算矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ ,对矩阵进行一致性检验, $CR=CI/RI$ ,其中: $CI$ 为一致性指标; $CR$ 为一致性比率; $RI$ 的数值为随机构造500个成对比较的矩阵计算其特征值,最后取平均值得 $RI$ 。1~9阶矩阵的平均随机一致性指标 $RI$ 分别为:0, 0.058, 0.089, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41和1.45。当 $CR<0.1$ 时,则判断矩阵满足一致性,说明所建判断矩阵合理可

表2 1~9标度含义

Tab. 2 1~9 Scaling meanings

标度	含义
1	两个因素同等重要
3	两个因素相比,前者更重要
5	两个因素相比,前者明显重要
7	两个因素相比,前者强烈重要
9	两个因素相比,前者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 $i$ 与元素 $j$ 的重要性之比为 $a$ ,那么元素 $j$ 与元素 $i$ 重要性之比为 $1/a$

行。当  $CR>0.1$  时,则不一致,需要调整判断矩阵中的属性权重,使其满足一致性。

## 2 水电工程施工安全隐患评价模型建立

BP 神经网络与模糊综合评价相结合建立的模型就是模糊神经网络模型<sup>[8-10]</sup>。这种模型的好处是能同时具备模糊综合评价处理模糊信息的能力以及人工神经网络的自适应自我学习的能力。利用模糊综合评价法对样本进行模糊信息的处理,网络经过处理样本的训练得到稳定的网络模型,进而用于解决实际问题。

### 2.1 模糊神经网络样本数据处理

神经网络用于判断前,首先需要通过训练来获得数据的内部信息,进而获得预判能力。这里采取专家打分的形式来获取样本数据,首先假设专家影响因子相同,分值为平均值。由于网络训练时数据范围必须为  $[0, 1]$ ,故一般需对打分表进行数值处理。运用模糊评价方法将每一个因素的模糊集合定义为<sup>[1]</sup> $[1, 5]$  区间内的整数,通过建立专家组针对某一因素对整体的影响程度进行打分,分值越高隐患越大。具体隐患等级划分为:重大,较大,一般,较小和轻微,其评分值对应为 5, 4, 3, 2 和 1。

隐患等级评分分值可根据专家经验而变化,当分值确定后需要对其进行数据的归一化处理,以此作为神经网络的输入数据<sup>[1]</sup>。根据模糊综合评价评语集的评价等级,总共划分为 5 个等级。对应于相关输出层,分别为重大隐患,较大隐患,一般隐患,较小隐患以及轻微隐患。神经网络中的输出层对应于不同的 5 个等级,具体输出值为  $[1\ 0\ 0\ 0\ 0]$ ,  $[0\ 1\ 0\ 0\ 0]$ ,  $[0\ 0\ 1\ 0\ 0]$ ,  $[0\ 0\ 0\ 1\ 0]$  和  $[0\ 0\ 0\ 0\ 1]$ 。

将处理后的样本数据分成训练以及检测两类,经样本确定后,进行网络训练与检测。通过将近 1 个月的数据收集以及向企业管理人、施工人员以及安全专家的咨询,总共收集到 10 组样本数据。将 10 组样本划分为两组,前 8 条样本作为训练样本,通过这 8 条样本的训练获得比较稳定的神经网络模型,后 2 条样本用于测试训练后的网络,通过比较网络的输出值与期望值来判断网络是否合适。将满足设定精度的网络参数保存,以便以后直接输入数据进行评价结果的识别。经过模糊处理,最终模糊神经网络的输入样本数据见表 3。

对 10 组数据通过模糊综合评价计算可得出数据的期望值见表 4。

表 3 样本数据  
Tab. 3 Sample data of neural network input

序号	各组数据									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B_{11}$	0.76	0.76	0.72	0.68	0.64	0.72	0.64	0.72	0.84	0.72
$B_{12}$	0.64	0.80	0.80	0.84	0.80	0.60	0.68	0.72	0.52	0.56
$B_{13}$	0.68	0.80	0.84	0.80	0.76	0.60	0.64	0.68	0.72	0.76
$B_{14}$	0.72	0.68	0.72	0.88	0.72	0.68	0.60	0.60	0.68	0.60
$B_{15}$	0.88	0.88	0.76	0.72	0.80	0.52	0.80	0.48	0.52	0.64
$B_{21}$	0.88	0.88	0.88	0.80	0.76	0.68	0.52	0.48	0.76	0.76
$B_{22}$	0.72	0.72	0.80	0.64	0.88	0.72	0.64	0.76	0.76	0.76
$B_{23}$	0.80	0.92	0.80	0.72	0.68	0.52	0.56	0.64	0.64	0.68
$B_{24}$	0.88	0.84	0.76	0.68	0.72	0.68	0.56	0.64	0.56	0.84
$B_{25}$	0.84	0.72	0.80	0.76	0.68	0.72	0.76	0.80	0.80	0.68
$B_{31}$	0.60	0.80	0.88	0.72	0.60	0.48	0.44	0.60	0.48	0.56
$B_{32}$	0.80	0.88	0.76	0.84	0.80	0.68	0.64	0.68	0.68	0.76
$B_{33}$	0.80	0.84	0.72	0.88	0.72	0.64	0.56	0.72	0.80	0.64
$B_{34}$	0.72	0.80	0.84	0.76	0.76	0.60	0.64	0.72	0.64	0.76
$B_{35}$	0.88	0.76	0.80	0.68	0.52	0.60	0.56	0.52	0.56	0.60
$B_{41}$	0.84	0.88	0.76	0.76	0.84	0.80	0.76	0.72	0.76	0.88
$B_{42}$	0.72	0.88	0.80	0.88	0.76	0.72	0.64	0.80	0.76	0.80
$B_{43}$	0.80	0.72	0.76	0.68	0.76	0.88	0.72	0.64	0.80	0.76
$B_{44}$	0.76	0.76	0.72	0.76	0.60	0.60	0.76	0.60	0.60	0.64
$B_{45}$	0.88	0.88	0.80	0.76	0.72	0.72	0.80	0.68	0.76	0.68
$B_{46}$	0.80	0.84	0.76	0.88	0.84	0.80	0.64	0.88	0.72	0.84

表 4 样本期望值  
Tab. 4 Expectation values for sample data

序号	期望值	类型	序号	期望值	类型
训练样本1	(01000)	较大	训练样本6	(00010)	较小
训练样本2	(10000)	重大	训练样本7	(00100)	一般
训练样本3	(00100)	一般	训练样本8	(10000)	重大
训练样本4	(10000)	重大	检测样本1	(00100)	一般
训练样本5	(01000)	较大	检测样本2	(00100)	一般

## 2.2 模糊神经网络的建立

经过以上分析可以建立水电工程施工安全隐患评价的模糊神经网络模型,具体情况如下:

(1) 网络层数确定。经过前面的分析可知,一般 1 个 3 层的 BP 神经网络就能满足大部分需要,而且增加隐含层数会使网络模型更加复杂不利于使用,因此采用基本的 3 层模糊神经网络。

(2) 输入层节点数确定。由于建立的水电工程施工安全隐患评价指标体系有 21 项指标,因此输入节点数为 21。

(3) 输出层节点数确定。前文将安全评价划分为 5 个等级,分别为重大、较大、一般、较小、轻微,所以此处的节点数设置为 5。

(4) 隐含层节点数确定。由于隐含层节点数没有明确规定,通常采取公式计算或不断训练来求得最佳节点数<sup>[12]</sup>。本文采用以下经验公式  $l = \sqrt{(m+n)} + a$ , 其中:  $l$  为隐含层节点数;  $n$  为输入层节点数,  $m$  为输出层节点数,  $a$  为 0 到 10 之间的任意常数。计算得本文中  $l=10$ 。

(5) 学习速率。BP 神经网络的学习速率取值范围为 0.01 ~ 0.80, 学习速率的取值不能过大也不能过小。学习速率过大,网络对权值的修正量就会加大,并且在权值修正过程中可能产生震荡现象,进而使学习不能收敛;过小时则学习时间就会加长,网络学习速度变慢,但是能保证收敛于某个极小值。因此,为了使网络收敛,通常取小值,此处取 0.01。

根据上述研究,综合比较分析后得出,建立 1 个 3 层的水电工程施工安全隐患评价的模糊神经网络模型。该模型有 21 个输入节点数, 10 个隐含层节点数, 5 个输出节点数。隐含层与输出层各层的激活函数<sup>[13-14]</sup>分别为 tansig 和 purelin, 训练函数采用 trainlm。网络最大训练次数为 500 次, 学习速率设定为 0.01, 期望误差为 0.001。

通过 MATLAB 软件实现神经网络模型的训练以及模拟, 得到训练误差变化曲线如图 1 所示。由图 1 可知, 当训练到第 7 步长时, 网络训练结束, 达到了事先设定的训练精度, 因此网络基本已经训练成熟。

将检测样本 1 与 2 进行神经网络模型的检测对比, 判断结果见表 5。

通过预测, 对照两组数据的评价结果, 期望值为一般隐患, 而网络模型的预测也符合期望, 表明所建模型可用于解决水电工程施工安全隐患评价问题。

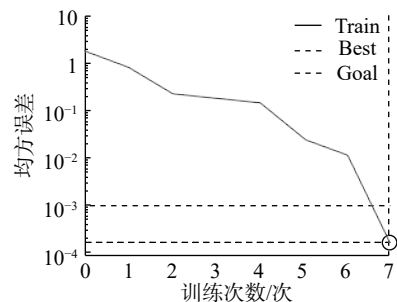


图 1 误差变化曲线

Fig. 1 Curve of error variation

表 5 检测数据对比

Tab. 5 Comparison of testing data

序号	重大	较大	一般	较小	轻微	期望值	类型
1	0.008 8	0.001 2	0.760 0	0.193 2	0	(00100)	一般
2	0	0.000 4	0.980 6	0.080 2	0	(00100)	一般

### 3 工程实例应用

大渡河某水电站施工,电站采用堤坝式开发,枢纽建筑物主要由拦河坝、两岸泄洪及放空建筑物、右岸地下引水发电系统等组成。选取该水电站左岸的深孔泄洪洞工程施工进行安全隐患评价,并通过模糊综合评价对所建模型的评价结果进行验证,并将评价结果与实际安全生产隐患情况季报表进行对比分析,证明评价模型的实用性。对该工程 2013 年的情况进行了安全隐患统计,共发现 85 项隐患,按照隐患等级判别为一般隐患,未发现重大隐患,将隐患情况按照本文划分的 4 个主要因素归类,其具体次数统计见表 6。

根据对水电工程施工特点的分析,建立水电工程施工安全隐患的评价指标体系,构成了单因素指标集。邀请了 16 名泄洪工程施工专家,结合水电工程施工特点,让他们通过投票方式表达各自的评价,最终构成整个因素集的模糊评判集合如表 7 所示。

由专家对 21 项指标的投票结果经过分值归一化后,其结果见表 8。

将上述数据代入建立的模糊神经网络模型,最终期望输出见表 9。

通过模糊神经网络模型对该工程进行预测,可知其安全隐患评价等级为一般隐患,而根据 2013 年的隐患季报表情况可知,该工程当年总共发现了 85 项隐患,但都不是重大隐患。无论从隐患发生的次数以及隐患类型都说明整个施工过程的安全隐患情况与模型的预测相符,进一步验证了所建评价模型的实际可行性。

表 6 安全生产隐患统计

Tab. 6 Statistics of hidden dangers in safety production 次

年(季度)	人的因素	环境因素	管理因素	设备设施因素
2013(1)	4	1	4	6
2013(2)	6	2	7	4
2013(3)	9	4	10	5
2013(4)	7	3	8	5
合计	26	10	29	20

表 7 模糊评判标准

Tab. 7 Fuzzy evaluation criteria

指标体系	评分标准值				
	重大	较大	一般	较小	轻微
施工人员安全文化素质 $B_{11}$	2	0	6	4	4
职业危害预防 $B_{12}$	0	1	8	5	2
个人安全防护用品 $B_{13}$	0	4	7	3	2
施工操作规程 $B_{14}$	0	0	6	6	4
安全教育及培训 $B_{15}$	0	0	8	4	4
脚手架工程 $B_{21}$	1	0	10	3	2
施工机械设备及特种设备 $B_{22}$	1	3	7	5	0
施工供电及安全标志 $B_{23}$	0	4	7	5	0
安全防护设备设施 $B_{24}$	2	4	8	2	0
设备的状态及养护 $B_{25}$	1	3	7	5	0
现场的专业安全指导 $B_{31}$	1	3	6	4	2
安全检查 $B_{32}$	0	2	9	5	0
安全管理机构及岗位设置 $B_{33}$	0	0	4	10	2
现场应急救援及安全措施 $B_{34}$	0	0	3	8	5
安全法规及行业标准执行 $B_{35}$	0	0	8	6	2
施工作业环境 $B_{41}$	1	1	7	4	3
气候条件 $B_{42}$	0	0	4	8	4
施工通道 $B_{43}$	0	2	5	5	4
施工现场扬尘及噪声 $B_{44}$	0	3	6	5	2
物体打击 $B_{45}$	2	2	6	6	0
地质条件 $B_{46}$	1	2	7	4	2

表 8 预测数据

Tab. 8 Forecast data

因素	归一化后	因素	归一化后	因素	归一化后
$B_{11}$	0.500 0	$B_{23}$	0.587 5	$B_{35}$	0.475 0
$B_{12}$	0.500 0	$B_{24}$	0.675 0	$B_{41}$	0.512 5
$B_{13}$	0.562 5	$B_{25}$	0.600 0	$B_{42}$	0.400 0
$B_{14}$	0.375 0	$B_{31}$	0.562 5	$B_{43}$	0.462 5
$B_{15}$	0.450 0	$B_{32}$	0.562 5	$B_{44}$	0.525 0
$B_{21}$	0.537 5	$B_{33}$	0.425 0	$B_{45}$	0.600 0
$B_{22}$	0.600 0	$B_{34}$	0.375 0	$B_{46}$	0.550 0

表 9 模型预测输出

Tab. 9 Model predictive output

序号	重大	较大	一般	较小	轻微	期望值	类型
1	0.001 8	0.005 0	0.999 4	0.000 6	0	(0 0 1 0 0)	一般

## 4 结 语

水电工程施工是一项具有工期长、施工范围大、涉及人员较多、受自然条件制约等特点的复杂工作。施工过程中易发生安全事故,因此,做好施工安全隐患评价十分重要,经过分析,得出以下主要结论:

(1) 根据水电工程施工特点,采用结合模糊综合评价和BP神经网络而建立的模糊神经网络评价方法对水电工程施工安全隐患做出评价,将定量分析与定性分析结合,弥补了两者的不足。

(2) 以实际工程应用为例,验证了模糊神经网络模型的实际意义及可行性。也证明了该方法具有可学习性,当模型得到大量数据学习后,其预测会更加准确,从而为水电工程施工的安全评价提供更科学的依据。

## 参 考 文 献:

- [1] 郑丽娟. 水利水电工程施工安全评价与管理研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015. (ZHENG Lijuan. Water resources and hydropower engineering construction safety evaluation and management system[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei Province, 2015. (in Chinese))
- [2] 邓淑珍. 中国水利发展回顾过去成绩斐然 展望未来任重道远—访国务院研究室农村司司长黄守宏[J]. 中国水利, 2005(24): 1-3. (DENG Shuzhen. Review of great achievements made in the past and foresee heavy tasks in the future-Huang Shouhong, director-general of Rural Department of Research Office of the State Council[J]. China Water Resources, 2005(24): 1-3. (in Chinese))
- [3] 王东青, 王立军. 水利水电工程施工安全分析与对策[J]. 中国科技纵横, 2014(4): 161. (WANG Dongqing, WANG Lijun. Safety analysis and countermeasures for construction of water conservancy and hydropower projects[J]. China Science & Technology Overview, 2014(4): 161. (in Chinese))
- [4] 谷庆红. 冶金行业安全管理模式探讨[J]. 工业安全与环保, 2003, 29(7): 35-39. (GU Qinghong. A discussion on safety management model of metallurgical trade[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2003, 29(7): 35-39. (in Chinese))
- [5] 卢岚, 杨静, 秦嵩. 建筑施工现场安全综合评价研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(9): 46-50, 82. (LU Lan, YANG Jing, QIN Song. A study on the safety assessment on building sites[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(9): 46-50, 82. (in Chinese))
- [6] KEELEY A R, MATSUMOTO K. Relative significance of determinants of foreign direct investment in wind and solar energy in developing countries-AHP analysis[J]. Energy Policy, 2018, 123: 337-348.
- [7] 李岱远, 高而坤, 吴永祥, 等. 基于网络层次分析法的节水型社会综合评价[J]. 水利水运工程学报, 2017(2): 29-37. (LI Daiyuan, GAO Erkun, WU Yongxiang, et al. Comprehensive evaluation of water-saving society based on analytic network process[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(2): 29-37. (in Chinese))
- [8] 宋占智, 蒋尚明, 金菊良, 等. 蚌埠市农业旱灾脆弱性综合评价[J]. 水利水运工程学报, 2017(3): 56-63. (SONG Zhanzhi, JIANG Shangming, JIN Juliang, et al. Comprehensive assessment of agricultural drought vulnerability based on improved cloud similarity: a case study of Bengbu city[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(3): 56-63. (in Chinese))
- [9] 徐镇凯, 温勇兵, 魏博文, 等. 基于组合赋权模糊云理论的高边坡稳定性评价[J]. 水利水运工程学报, 2017(1): 10-17. (XU Zhenkai, WEN Yongbing, WEI Bowen, et al. Stability evaluation method for high slope based on fuzzy cloud theory combined with weights[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(1): 10-17. (in Chinese))
- [10] 岳强, 刘福胜, 刘仲秋. 基于模糊层次分析法的平原水库健康综合评价[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 62-68. (YUE Qiang, LIU Fusheng, LIU Zhongqiu. Comprehensive assessment of plain reservoir health based on fuzzy and hierarchy analyses[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 62-68. (in Chinese))
- [11] 林琳. 基于BP神经网络的水利工程风险管理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2015. (LIN Lin. Research on risk management

of water conservancy project based on BP neural network[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015. (in Chinese))

- [12] 苗姜龙, 陈曦, 吕彦楠, 等. 基于BP神经网络的冻土路基变形预测与可靠度分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 81-87. (MIAO Jianglong, CHEN Xi, LV Yannan, et al. Prediction on deformation and reliability of subgrade of Qinghai-Tibet Railway based on BP neural network method[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(4): 81-87. (in Chinese))
- [13] KORDANULI B, BARJAKTAROVIĆ L, JEREMIĆ L, et al. Appraisal of artificial neural network for forecasting of economic parameters[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, 465: 515-519.
- [14] HAFIZ F, ABDENNOUR A. An adaptive neuro-fuzzy inertia controller for variable-speed wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2016, 92: 136-146.

## Evaluation method for hidden safety dangers of hydropower construction based on fuzzy neural network

LIU Shuai<sup>1</sup>, SHENG Jinbao<sup>1,2</sup>, WANG Zhaosheng<sup>1,2</sup>, YANG Dewei<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Dam Safety and Management Center of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** There are many hidden safety dangers and dynamic changes in the construction process of hydropower projects, which is the main reason for the frequent accidents during the construction of hydropower projects. In order to evaluate the degree of the potential safety dangers in the period of construction, an evaluation model for the hidden safety dangers of the hydropower construction is established based on fuzzy comprehensive evaluation and BP neural network. A multi-level with multi-index system for the diagnosis of the hidden dangers during the construction is developed, and five levels, namely major, large, general, small and slight levels, are proposed. Using the example, the hydropower construction is evaluated, the safety hazard level is determined, and the evaluation results are analyzed. The evaluation results of the potential safety dangers show that the hidden safety danger level of the example station is the third level, which conforms to the actual situation of hidden danger investigation. The fuzzy neural network model proposed in this paper has strong operability and can effectively analyze the potential hidden safety dangers during the construction. It has a certain reference value for the investigation of the potential hidden safety dangers in the construction process of hydropower projects.

**Key words:** hydropower project construction; fuzzy comprehensive evaluation; BP neural network; hidden safety danger