

# 基于 FAHP-BP 神经网络的临近道路深基坑 施工风险研究<sup>\*</sup>

黄仲禹<sup>1</sup>, 刘辉<sup>1</sup>, 邓小钊<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙拓正交通科技有限公司, 湖南 长沙 410118)

**摘要:**以长沙市某临近清风南路的深基坑开挖工程为例,根据工程实际情况,结合专家意见和现有研究成果建立临近道路深基坑施工安全风险评价指标体系,针对传统层次分析法确定权重的精度不能满足实际工程需要的问题,通过改进模糊层次分析法(FAHP)确定评价指标权重,再运用反向传播(BP)神经网络评估深基坑施工安全风险等级,预估该深基坑施工风险等级为高,评估结果与现场实际相符。

**关键词:** 工程管理;深基坑;风险评估;改进模糊层次分析法(FAHP);反向传播(BP)神经网络

**中图分类号:** U415.12

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2023)06-0132-05

近年来市政工程事故频发,其中市政道路深基坑施工中因基坑深度大、地下水位高、施工面狭窄等原因易引起安全事故。由于临近公路,由车辆荷载导致的基坑支护结构内力增大不容忽略,另一方面道路距离基坑支护越近,受到的影响越大,深基坑开挖可能导致临近道路路面发生沉降、开裂等。因此,开展深基坑施工安全风险评估很重要。

层次分析(AHP)法在多目标决策问题处理上占有重要地位<sup>[1]</sup>,但因主、客观的差异,建立的判断矩阵往往难以满足一致性条件<sup>[2-4]</sup>。针对常规AHP法的不足,文献[5]提出通过转换函数构造判断矩阵,避免传统AHP法复杂的矩阵一致性检验;文献[6]将AHP法与反向传播(BP)神经网络相结合筛选最具影响力的因子;文献[7]基于模糊理论对深基坑施工期风险进行评价;文献[8]将专家调查法与AHP法相结合对深基坑施工风险进行识别和评

价。本文采用改进模糊层次分析法(FAHP),结合BP神经网络对深基坑施工安全风险进行评估,并以长沙市某临近清风南路的深基坑工程为例验证其可行性。

## 1 构建安全评价指标体系

根据深基坑项目实际情况,结合专家意见,参考文献[9-15],从人员因素、设备因素、环境因素、管理因素、技术因素方面对深基坑施工安全风险进行分析,构建图1所示临近道路深基坑施工安全风险评价指标体系。

## 2 基于 FAHP-BP 神经网络的施工安全风险评价方法

### 2.1 基于 FAHP 的指标权重设定

(1) 利用AHP法的九标度法对临近清风南路

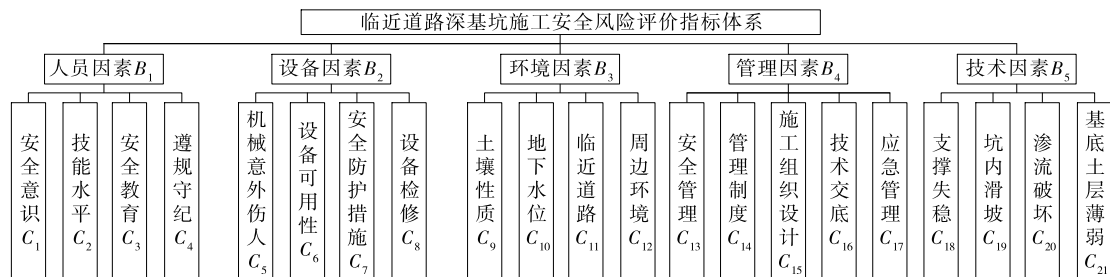


图1 临近道路深基坑施工安全风险评价指标体系

<sup>\*</sup> 基金项目:长沙拓正交通科技有限公司国家高新技术企业研发项目(GQCX202203)

深基坑施工安全风险评价指标进行专家评分,建立初始判断矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 。

(2) 参考文献[16],将该矩阵代入转换函数[见式(1)]中进行转换,得到模糊互补矩阵。 $1 \leq a_{ij} \leq 9$  时,转换后的标度为  $0 < \gamma_{ij}(a_{ij}) < 1$ ,且  $\gamma_{ij}(a_{ij}) + \gamma_{ji}(a_{ji}) = 1$ 。模糊标度避免了九标度法中矩阵一致性检验的步骤,且所获得的模糊标度与九标度法接近, $\alpha$  和  $\beta$  均为最小值时,转换后模糊标度为(0.000, 0.997),相比传统九标度法能更好地覆盖[0,1]。经式(1)转换后的模糊标度与传统九标度法的比较见表 1。

$$\gamma_{ij}(a_{ij}) = \frac{1}{2} \left[ \log_{\alpha} a_{ij} + \frac{1}{\beta} \left( a_{ij} + \frac{1}{a_{ij}} \right) \right] + 0.5 \quad (1)$$

式中: $\gamma_{ij}(a_{ij})$  为转换后的  $A_i$  相对于  $A_j$  的模糊标度; $\alpha, \beta$  为参数, $\alpha \geq 81, \beta \geq 18$ 。

表 1 转换后的模糊标度与九标度法的比较

九标度法	模糊标度	含义
1	0.500	2 个指标对同一准则同样重要
3	0.699	对同一准则,一个指标比另一个指标稍微重要
5	0.816	对同一准则,一个指标比另一个指标明显重要
7	0.912	对同一准则,一个指标比另一个指标强烈重要
9	0.997	对同一准则,一个指标比另一个指标极端重要
2,4,6,8	0.621,0.762, 0.866,0.955	相邻 2 个标度之间折中时的标度
标度互反	标度互补	模糊指标 $A_i$ 相对于 $A_j$ 的标度为 $a_{ij}$ ,反之为 $1-a_{ij}$ ;九标度指标 $A_i$ 相对于 $A_j$ 的标度为 $a_{ij}$ ,反之为 $1/a_{ij}$

(3) 按式(2)求模糊互补矩阵每行的和  $r_j$ ,再通过式(3)将矩阵元素进行替换,将模糊互补矩阵转换为模糊一致性判断矩阵。

$$r_j = \sum_{i=1}^n \gamma_{ij}(a_{ij}) \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5 \quad (3)$$

(4) 按式(4)确定模糊一致性判断矩阵的权重向量  $W=[w_1, w_2, \dots, w_i]^T$ 。计算得初值权重  $W^{(0)}=[w_1, w_2, \dots, w_i]^T$ 。

$$w_i = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{a} \sum_{k=1}^n r_{ik} + 1 - \frac{n}{2a} \right) \quad (4)$$

式中: $w_i$  为第  $i$  个指标的权重; $a$  为参数,其大小对初值权重向量的权重分配起调节作用, $a$  取值越大,各指标最大权重值越小。

(5) 确定最终权重。利用特征根法中的幂法迭代求解更精确的权重向量。步骤如下:1) 将  $V_0=[v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0n}]^T = W^{(0)}$  作为初值进行迭代,求得  $V_{k+1}$  和  $\|V_{k+1}\|_{\infty}$ ,  $V_{k+1} = EV_k$ ,  $E=(e_{ij})_{n \times n}$ ,  $e_{ij} = r_{ij}/r_{ji}$ 。2) 若  $\|V_{k+1}\|_{\infty} - \|V_k\|_{\infty} \leq \epsilon$  ( $\epsilon$  为精度,取值为 0.000 1),则  $\|V_k\|_{\infty}$  为最大特征值,按式(5)计算最终权重  $W$ 。3) 如果所得结果不满足步骤 2 的精度要求,则将原  $V_k$  作为新的初值代入  $V_{k+1} = EV_k$  进行迭代,重复步骤 1 和步骤 2,直到满足精度要求,得出最终权重向量。

$$W = \left( \frac{v_{k+1,1}}{\sum_{k=1}^n v_{k+1,1}}, \frac{v_{k+1,2}}{\sum_{k=1}^n v_{k+1,2}}, \dots, \frac{v_{k+1,n}}{\sum_{k=1}^n v_{k+1,n}} \right)^T \quad (5)$$

## 2.2 基于 BP 神经网络的风险评价模型

运用 FAHP 法确定各指标的权重,结合专家打分,与指标初始数据相乘,并进行归一化处理。将归一化处理后的数据作为 BP 神经网络的初始值计算深基坑施工安全风险评价,参考文献[17]对深基坑施工安全等级进行划分(见表 2),确定临近道路深基坑施工安全风险等级。

表 2 深基坑施工安全风险等级

风险等级	测度	风险等级	测度
极高	[1.0,0.8)	一般	[0.4,0.2)
高	[0.8,0.6)	低	[0.2,0.0]
较高	[0.6,0.4)		

## 3 临近清风南路的深基坑施工安全风险评估

### 3.1 工程概况

长沙市潭州大道与清风南路交叉口处的深基坑沿潭州大道由西南向东北敷设,东北象限地块为公共管理与公共服务用地,现状为空地;东南象限地块为商业用地,现状为在建的湘江欢乐城;西南与西北

象限地块为商业及住宅用地,现状为荒地。周边道路为潭州大道和清风南路。采用明挖法施工,围护结构采用 800 mm 地下连续墙+内支撑。运用上述 FAHP-BP 神经网络模型对临近清风南路的深基坑施工安全风险进行评价。

### 3.2 计算指标权重

(1) 以一级指标环境因素为例,应用 AHP 的九标度法评价原则,结合专家打分和相关文献,得到初始判断矩阵:

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 4 & 1/2 \\ 1/4 & 1/4 & 1 & 1/6 \\ 3 & 2 & 6 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 将初始判断矩阵代入式(1)得到模糊互补矩阵:

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0.500 & 0 & 0.620 & 5 & 0.761 & 9 & 0.300 & 9 \\ 0.379 & 5 & 0.500 & 0 & 0.761 & 9 & 0.379 & 5 \\ 0.238 & 1 & 0.238 & 1 & 0.500 & 0 & 0.134 & 1 \\ 0.699 & 1 & 0.620 & 5 & 0.865 & 9 & 0.500 & 0 \end{bmatrix}$$

(3) 按式(2)计算模糊互补矩阵的行和,然后按式(3)将模糊互补矩阵转换为模糊一致性判断矩阵:

$$U_3 = \begin{bmatrix} 0.500 & 0 & 0.520 & 3 & 0.634 & 1 & 0.437 & 2 \\ 0.479 & 7 & 0.500 & 0 & 0.613 & 8 & 0.416 & 9 \\ 0.365 & 9 & 0.386 & 2 & 0.500 & 0 & 0.303 & 1 \\ 0.562 & 8 & 0.583 & 1 & 0.696 & 9 & 0.500 & 0 \end{bmatrix}$$

(4) 分别取  $a=1$ 、 $a=2$ 、 $a=3$ ,按式(4)计算模糊一致性判断矩阵的权重,得:

$$w_1 = [0.272 \ 9 \quad 0.252 \ 6 \quad 0.138 \ 8 \quad 0.335 \ 7]^T$$

$$w_2 = [0.261 \ 5 \quad 0.251 \ 3 \quad 0.194 \ 4 \quad 0.292 \ 8]^T$$

$$w_3 = [0.257 \ 6 \quad 0.250 \ 9 \quad 0.212 \ 9 \quad 0.278 \ 6]^T$$

(5) 分别将  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  权重向量作为特征根法的迭代初值进行迭代,直到精度满足要求,得到最终权重向量:

$$W_3^{(k)} = [0.263 \ 8, 0.242 \ 7, 0.151 \ 2, 0.342 \ 2]^T$$

(6) 重复以上步骤,分别求出一级指标、二级指标的权重(见表 3)。

### 3.3 收集和整理 BP 神经网络训练样本

邀请项目经理、副经理、安全总监、安全部部长和高校教师等专家对临近清风南路的深基坑施工安全风险采用百分制进行打分,将所得结果作为 BP 神经网络的训练样本。限于篇幅,仅列出部分样本数据(见表 4)。

表 3 临近道路深基坑施工安全风险评价指标的组合权重

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	组合权重
人员因素 $B_1$	0.211 4	安全意识 $C_1$	0.396 6	0.083 841
		技能水平 $C_2$	0.259 6	0.054 878
		安全教育 $C_3$	0.182 4	0.038 558
		遵规守纪 $C_4$	0.161 4	0.034 119
设备因素 $B_2$	0.165 9	机械意外伤人 $C_5$	0.329 8	0.054 714
		设备可用性 $C_6$	0.242 8	0.040 295
		安全防护措施 $C_7$	0.196 4	0.032 583
		设备检修 $C_8$	0.231 0	0.038 323
环境因素 $B_3$	0.204 4	土壤性质 $C_9$	0.263 8	0.053 920
		地下水位 $C_{10}$	0.242 7	0.049 608
		临近道路 $C_{11}$	0.151 2	0.030 905
		周边建筑 $C_{12}$	0.342 3	0.069 945
管理因素 $B_4$	0.174 1	安全管理 $C_{13}$	0.156 2	0.027 193
		管理制度 $C_{14}$	0.134 2	0.023 364
		施工组织设计 $C_{15}$	0.341 4	0.059 438
		技术交底 $C_{16}$	0.216 1	0.037 623
技术因素 $B_5$	0.244 2	应急管理 $C_{17}$	0.152 1	0.026 496
		支撑失稳 $C_{18}$	0.237 0	0.057 875
		坑内滑坡 $C_{19}$	0.232 6	0.056 801
		渗流破坏 $C_{20}$	0.367 7	0.089 791
		基底土层薄弱 $C_{21}$	0.162 7	0.039 730

表 4 部分样本数据

评价指标	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6
安全意识	78	78	81	81	81	74
技能水平	81	82	82	82	81	81
安全教育	81	81	82	88	91	92
遵规守纪	91	92	91	81	79	85
机械意外伤人	91	81	91	93	91	93
设备可用性	91	89	91	89	81	91
安全防护措施	91	93	84	89	81	93
设备检修	89	91	93	81	91	84
土壤性质	77	81	74	77	74	75
地下水位	93	81	81	82	81	91
临近道路	93	81	82	81	77	75
周边环境	74	84	77	75	75	84

续表 4

评价指标	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6
安全管理	93	92	93	91	93	84
管理制度	82	81	75	84	84	93
施工组织设计	82	82	81	75	81	77
技术交底	93	81	81	82	69	91
应急管理	80	82	83	84	91	89
支撑失稳	91	93	77	92	81	82
坑内滑坡	71	81	82	77	74	77
渗流破坏	82	81	82	81	68	68
基底土层薄弱	75	74	81	78	86	77

按式(6)对初始样本数据进行归一化处理:

$$\bar{x} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{6}$$

式中: $x_i$  为样本值; $x_{\max}$  为样本最大值; $x_{\min}$  为样本最小值。

3.4 FAHP-BP 神经网络的训练与测试

参考文献[18],通过多次模型运行对比,选取隐含层节点数为 9 个,采用 21-4-5-1 的网络结构

进行训练和测试。经过 11 015 次训练迭代后,3 组数据趋于收敛,达到预设误差精度(见图 2)。

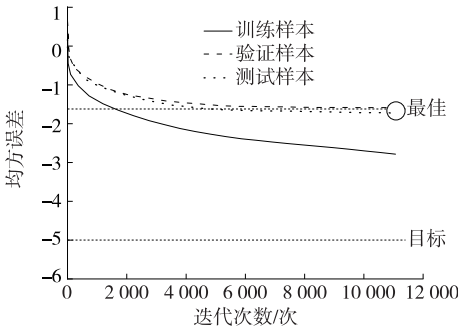


图 2 BP 神经网络训练均方误差曲线

图 3 为神经网络训练样本回归曲线,输出结果见表 5。训练样本系数  $R=1$  时,神经网络输出值与目标值相同。由图 3、表 5 可知:期望输出值与 BP 神经网络实际输出值的误差满足要求,基于 FAHP-BP 神经网络的深基坑施工安全风险评价方法的精度满足要求。根据表 2,深基坑施工安全等级为高,符合实际预期。样本数据 10 的安全风险等级为高,与深基坑安全风险等级相符,期望输出值与实际输出值相近,安全风险评价方法可行。

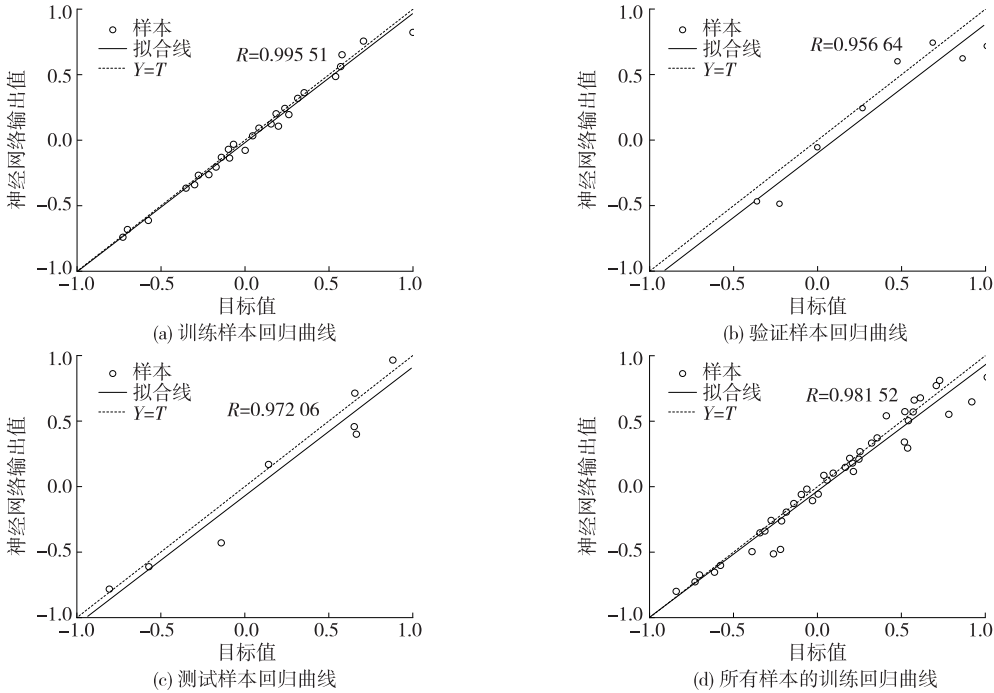


图 3 BP 神经网络训练样本回归曲线

表 5 FAHP-BP 神经网络的输出结果

样本号	期望输出值	实际输出值	风险等级	绝对误差	样本号	期望输出值	实际输出值	风险等级	绝对误差
7	0.676 5	0.674 1	高	0.002 4	9	0.680 3	0.679 6	高	0.000 7
8	0.666 8	0.666 5	高	0.000 3	10(验证)	0.657 3	0.656 6	高	0.000 7

## 4 结论

(1) 采用 FAHP 方法得到的权重比传统 AHP 法所得权重更精准,通过迭代得出权重向量,能减少由主观因素引起的误差。

(2) 车辆荷载、基坑与道路的距离是影响深基坑施工较突出的因素,车流量过大或基坑距离道路过近时,须加强基坑支护,避免因基坑施工导致路面产生裂缝和沉降。

(3) FAHP-BP 神经网络模型的预测精度满足深基坑施工安全风险评价的要求。施工过程中将发生变化的工况带入该模型,即可实现施工安全风险评价。将 FAHP-BP 神经网络模型与监测体系相结合,在基坑开挖阶段实时对路面沉降、开裂、支护结构墙体位移进行监控,可实现施工风险控制。必要时停止土方开挖,采取回填反压、增设锚杆等措施,保障深基坑施工安全、顺利进行。

## 参考文献:

- [1] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148—153.
- [2] 李永,胡向红,乔箭.改进的模糊层次分析法[J].西北大学学报(自然科学版),2005,35(1):11—12+16.
- [3] 吕跃进.基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法的排序[J].模糊系统与数学,2002,16(2):79—85.
- [4] 郑重,赵云胜,张卫中,等.改进的模糊层次分析法在采动滑坡稳定性影响因素评价中的应用[J].安全与环境工程,2016,23(5):109—112.
- [5] 应国柱,汪鹏程,朱大勇,等.模糊层次分析法的改进及其在地铁施工风险评估中的应用[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(10):1244—1248.
- [6] 李晓峰.基于 AHP 的人工神经网络模型的建立[J].四川大学学报(工程科学版),2003,35(1):101—103.
- [7] 兰守奇,张庆贺.基于模糊理论的深基坑施工工期风险评估[J].岩土工程学报,2009,31(4):648—652.
- [8] 郭健,钱劲斗,陈健,等.地铁车站深基坑施工风险识别与评价[J].土木工程与管理学报,2017,34(5):32—38.
- [9] 梁吉.基于模糊评判方法的铁路隧道施工风险评价研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [10] 宋博.DEA-BP 神经网络下地铁车站深基坑施工安全评价[J].中国安全科学学报,2019,29(5):91—96.
- [11] 王路杰.浅埋暗挖地铁车站施工风险评价研究[D].青岛:山东科技大学,2017.
- [12] 张艺,刘辉,刘昶,等.石潭湘江特大桥水下施工安全风险预估及管控[J].公路与汽运,2020(6):161—165.
- [13] 唐鹏.紧邻既有地铁高架桥梁深基坑施工开挖方案研究[J].公路与汽运,2020(2):136—140+166.
- [14] 刘艳,汪彤,丁辉,等.地铁车站拥挤踩踏事故风险评价 DEA 模型研究[J].中国安全科学学报,2013,23(10):100—104.
- [15] 吴贤国,丁保军,张立茂,等.基于贝叶斯网络的地铁施工风险管理研究[J].中国安全科学学报,2014,24(1):84—89.
- [16] 周侃东,沈银斌,胡众,等.FAHP 的改进及其在地铁风险评估中的应用[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(11):1557—1562.
- [17] 张胜昔,陈为公,王会会,等.基于 G-FAHP 的深基坑施工风险评价[J].土木工程与管理学报,2016,33(5):104—109.
- [18] 沈花玉,王兆霞,高成耀,等.BP 神经网络隐含层单元数的确定[J].天津理工大学学报,2008,24(5):13—15.

收稿日期:2022—11—01

(上接第 72 页)

- [14] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [15] 潘磊,王玉婷,王成双,等.热固性环氧树脂改性沥青黏结剂的性能研究[J].热固性树脂,2011,26(4):33—37.
- [16] 亢阳.高性能环氧树脂改性沥青材料的制备与性能表征[D].南京:东南大学,2006.
- [17] 晏英,肖新颜,刘武,等.有机蒙脱土/环氧树脂复合改性沥青的性能[J].高分子材料科学与工程,2015,31(4):52—56.
- [18] 杨飞,张晓平,李传宪,等.含芳香基团的梳状聚合物型降凝剂与沥青质协同改善合成蜡油的流变性[J].高等学校化学学报,2019,40(12):2606—2614.
- [19] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [20] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

收稿日期:2022—10—26