

DOI:10.16825/j.cnki.cn13-1400/tb.2023.02.010

基于灰色理论 -BP 神经网络耦合的 城市地下空间多灾种综合评价模型研究

赵巍平

(唐山工业职业技术学院, 河北 唐山 063299)

摘 要: 针对城市地下空间灾害种类繁多多样、动态性、随机不确定性和复杂性, 灾害间相互衍生的特殊性, 使得灾害呈现灰色特征, 并且存在着错综复杂的非线性关系, 提出基于灰色理论 -BP 神经网络耦合的城市地下空间多灾种综合评价模型。首先结合城市地下空间灾害的特点和灰色特征, 采用灰色理论构建城市地下空间多灾种评价指标体系, 然后运用灰色关联分析原理确定各灾种的权重, 大大提升综合评价模型的准确性, 最后通过构建 BP 神经网络模型、对样本指标进行量化处理、模型的测试进而建立 BP 神经网络多灾种综合评价模型。结果表明, 该模型能够形成处理海量灾害动态数据、具备较强的自我学习能力和非线性数据处理能力, 可以实现准确性高、稳定性强的数据预警。

关键词: 灰色关联分析; BP 神经网络; 耦合; 多灾种; 综合评价

中图分类号: TU9

文献标志码: B

文章编号: 1674-943X(2023)02-0021-04

Study on Comprehensive Evaluation Model of Multiple Disasters in Urban Underground Space Based on Grey Theory and BP Neural Network Coupling ZHAO Weiping

(Tangshan Polytechnic College, Tangshan 063299, China)

Abstract: In view of the variety, dynamics, random uncertainty and complexity of urban underground space disasters, and the particularity of mutual derivation between disasters, which present gray characteristics and intricate nonlinear relationships, a comprehensive evaluation model for urban underground space disasters based on the coupling of grey theory and BP neural network is proposed. Firstly, based on the characteristics and gray characteristics of urban underground space disasters, the gray theory was used to construct a multi-disaster evaluation index system for urban underground space. Then the gray correlation analysis principle was used to determine the weight of each disaster, greatly improving the accuracy of the comprehensive evaluation model. Finally, the BP neural network multi-disaster comprehensive evaluation model was established by building a BP neural network model, quantifying the sample indicators, and testing the model. The results show that the model can form and process massive disaster dynamic data, has strong self-learning ability and nonlinear data processing ability, and can realize data early warning with high accuracy and stability.

Key words: grey-relation analysis; BP neural network; coupling; multi-disasters; comprehensive evaluation

世界范围内, 城市地下空间灾害发生次数不断增加, 且呈现出灾害发生次数与人口增长的相似趋势, 21 世纪以来, 世界已发生超过 30 多次重大冲突和大约 2 500 场灾难。城市地下空间种类繁多多样, 结合城市地下空间相对封闭等自身特点, 一旦发生灾害, 对本地区造成的损失将无法比拟。因此如何实现多灾种耦合情况下的有效预警, 最大限度地降低地下空间灾害导致的人员伤亡、财产损失, 更好地保障人民的生命安全和财产安全, 显得十分重要。如何将城市地下空间灾害间相互衍生的特殊性和错综复杂的非线性关系处理好, 选择科学合理评价指标和评价模型十分关键。

为了提高城市地下空间多灾种评价精度, 通过对国内外城市地下空间灾害发生现状及特征分析, 结合灰色理论处理海量灾害动态数据和 BP 神经网络

较强的自我学习能力和非线性数据处理能力的优势, 本文首次提出基于灰色理论 -BP 神经网络耦合的城市地下空间多灾种综合评价模型, 从而实现准确性高、稳定性强的数据预警。

1 城市地下空间多灾种的评价指标体系

城市地下空间多灾种评价体系是城市地下空间多灾种综合评价模型的研究基础和关键, 为确保评价模型结果的准确性与科学性, 要根据实际情况客观全面地选择指标和指标标准。结合城市地下空间灾害种类繁多多样、动态性、随机不确定性和复杂性等特点, 灾害间相互衍生的特殊性使得灾害呈现灰色特征, 因此本文采用灰色理论科学合理地构建城市地下空间多灾种评价指标体系^[1-3]。

根据国内外城市地下空间灾害发生现状及特征

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 2022—2023 年度唐山工业职业技术学院院级课题“基于灰色理论 -BP 神经网络耦合的城市地下空间多灾种综合评价模型研究”(项目编号: YJKT202211), 主持人赵巍平。

作者简介: 赵巍平 (1986-), 男, 河北邯郸人, 硕士, 讲师, 主研方向为建筑工程信息化与智慧防灾。

分析^[4], 结合系统性、客观性、全面性、定量与定性相结合等原则, 选择有代表性、可操作性强的指标, 构建城市地下空间多灾种的评价指标体系^[5-6], 如图 1 所示。

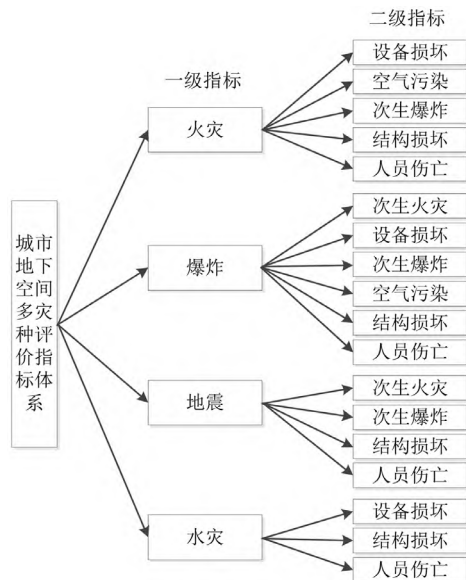


图 1 城市地下空间多灾种评价指标体系

从图 1 可以得到, 城市地下空间多灾种的评价指标主要包括 4 个一级指标: 火灾、爆炸、地震、水灾。每个一级指标根据灾种特征和原理, 可划分为设备损坏、空气污染、次生爆炸、结构损坏、人员伤亡、次生火灾、空气污染等若干个二级指标, 分别用 x_1, x_2, \dots, x_{18} 来表示, 分别为设备损坏 x_1 , 空气污染 x_2 , 以此类推。

2 城市地下空间多灾种的灰色关联分析

2.1 灰色关联分析原理

城市地下空间多灾种综合评价模型受到火灾、爆炸、地震和水灾等多因素影响, 但是在一个特定区域内的城市地下空间多灾种的发生具有一定的几率, 即权重^[7-10]。本文拟采用灰色关联分析原理得到各灾种的权重, 可大大提升综合评价模型的准确性。

灰色关联分析是灰色系统分析方法中十分活跃的一个分支, 其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断不同序列之间的联系是否紧密^[11-12]。运用灰色理论计算各指标与城市地下空间多灾种综合评价等级权重的关联度, 进而得到其主要影响因素^[13-14]。灰色关联分析选取多灾种权重的步骤如下。

1) 指标体系特征向量。假设城市地下空间多灾种综合评价指标体系共包括 m ($m=4$) 一级灾害类别指标, n ($n=18$) 个二级次生灾害类别指标, 对于不同的灾害种类, 它们对城市地下空间多灾种

的综合评价结果影响程度也不一样, 因此通过灰色关联分析法确定评价指标与城市地下空间多灾种评价结果的关联度, 根据关联度选择相应的重要指标进行城市地下空间多灾种评价建模。

通过对 n ($n=18$) 个二级次生灾害类别指标和 m ($m=4$) 一级灾害类别指标进行分析, 共同构成城市地下空间多灾种综合评价指标体系的指标体系特征向量。

$$[X] = \begin{Bmatrix} x_{10} & x_{11} & L & x_{1m+1} \\ x_{20} & x_{21} & L & x_{2m+1} \\ M & M & M & M \\ x_{n0} & x_{n1} & L & x_{nm+1} \end{Bmatrix}_{18 \times (4+1)} \quad (1)$$

2) 统一量纲。采用平均法对原始数据进行量纲处理, 消除量纲影响。平均变化情况公式如下:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} \sum_{i=1}^n x_{ij}}{n} \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m+1$ 。

3) 计算绝对矩阵及最值。计算绝对差值矩阵如下:

$$[\Delta] = |x'_{ij} - x'_{i0}|_{n \times (m+1)} \quad (3)$$

4) 求解关联系数矩阵。关联系数矩阵计算公式如下:

$$[K] = \left| \frac{\Delta_{\min} + \alpha \Delta_{\max}}{|x'_{ij} - x'_{i0}| + \alpha \Delta_{\max}} \right|_{n \times (m+1)} \quad (4)$$

式中: α 为分辨系数。

5) 计算关联度。为分析一级指标和各二级指标的关联性, 需要计算关联度计算公式如下:

$$\rho_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{\min} + \alpha \Delta_{\max}}{|x'_{ij} - x'_{i0}| + \alpha \Delta_{\max}} \quad (5)$$

式中: ρ 为子因素 x_i 对母因素 x_0 的关联度。

2.2 影响因素选取

本文根据一级指标和二级指标的灾种特征和发生原理, 对城市地下空间多灾种综合评价指标体系和权重分配如表 1 所示。

2.3 影响因素关联度分析

依据以上步骤, 计算得到影响城市地下空间多灾种综合评价等级的关联权重系数, 如表 2 所示。

由表 2 分析得出, 火灾、爆炸和水灾对城市地下空间多灾种综合评价的影响权重较大。

表 2 城市地下空间多灾种综合评价权重的关联系数

综合评价等级	火灾	爆炸	地震	水灾
关联权重系数	0.289	0.293	0.163	0.255

3 BP 神经网络多灾种综合评价模型

BP 神经网络算法是一种信息处理体系, 利用

神经网络能够进行复杂的逻辑运算,实现多因子相互作用的非线性关系。BP神经网络由输入层、隐含层和输出层3部分组成。

3.1 BP神经网络模型构建

3.1.1 输入层单元数确定

本文采用的指标体系特征向量为城市地下空间的灾害种类及次生灾害种类,提取相应的特征向量作为输入层单元数,通过表1可以得到 n 个一级指标和每个一级指标对应着 m 个二级指标,为了保证综合评价模型的科学合理,通过灰色关联分析得到城市地下空间多灾种指标的权重系数。

3.1.2 隐含层的设计

隐含层神经元数目的确定是一个极其复杂的过程,与城市地下空间多灾种综合评价等级、对评价结果的要求及输入层单元数等都有密切联系,不能随意主观确定。一般可参考如下公式确定隐含层神经元数目:

$$\sum_{i=0}^{\alpha} d_{\alpha i}^i > H \quad (6)$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha + \beta} + b \quad (7)$$

$$\alpha_1 = \log_2 \alpha \quad (8)$$

式中: H 为样本数, α_1 为隐单元数, α 为输入单元数,若 $i > \alpha_1, d_{\alpha i}^i = 0$, α 和 β 为输入、输出神经元, b 为 $[1,10]$ 常数。

通过上述公式对城市地下空间多灾种进行分析,最终确定综合评价模型含有28个隐含层单元数。

3.1.3 输出层单元数的确定

本文对城市地下空间多灾种进行综合评价过程

中,根据指标权重大小对城市地下空间多灾种进行评价,通过监测城市地下空间多灾种得到样本数据,对其进行训练和检测,将评价等级分为1到4个风险等级,代表城市地下空间在多种灾害共同作用下的四种风险等级状态如表3所示。

表3 BP神经网络的输出含义

风险等级	输出向量
一级	(1,0,0,0)
二级	(0,1,0,0)
三级	(0,0,1,0)
四级	(0,0,0,1)

根据表3可以看到4个输出结果,通过上述确定的输入层和隐含层,最终得到BP神经网络模型结构为 $18 \times 28 \times 4$,将模型得到的输出值与表对比,选择出最接近1的输出值,那么对应的相应风险等级就是城市地下空间多灾种综合评价的风险等级。

3.2 样本选择及处理

将评价等级分为一级、二级、三级、四级属于定性评价,为了满足BP神经网络对输入向量的要求,需要对各指标进行量化处理,处理范围为0~1。

设定第 i 个城市地下空间项目风险评价指标的域为 A :

$$A_i = (A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}, A_{i4}) \quad i=1,2,3,4 \quad (9)$$

公式中的 $A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}, A_{i4}$,分别对应着风险等级:一级、二级、三级、四级。

隶属度向量为:

$$r_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}) \quad (10)$$

表1 城市地下空间多灾种综合评价指标体系和权重分配

目标层	一级指标	权重	二级指标	权重
城市地下空间多灾种综合评价模型	火灾	0.289	设备损坏	0.264
			空气污染	0.156
			次生爆炸	0.067
			结构损坏	0.276
			人员伤亡	0.247
	爆炸	0.293	次生火灾	0.148
			设备损坏	0.189
			次生爆炸	0.116
			空气污染	0.168
			结构损坏	0.165
			人员伤亡	0.214
	地震	0.163	次生火灾	0.239
			次生爆炸	0.195
			结构损坏	0.295
			人员伤亡	0.271
	水灾	0.255	设备损坏	0.335
			结构损坏	0.412
			人员伤亡	0.253

假设对 n 个城市地下空间项目风险进行评价, 可以得到各个样本对第 i 个评价指标进行评价得出的单因素隶属度矩阵:

$$r = \begin{bmatrix} r_{1i1} & r_{1i2} & r_{1i3} & r_{1i4} \\ r_{2i1} & r_{2i2} & r_{2i3} & r_{2i4} \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ r_{ni1} & r_{ni2} & r_{ni3} & r_{ni4} \end{bmatrix} \quad (11)$$

设 $A_i = (A_1, A_2, A_3, L, A_n)^T$ 表示第 i 个风险评价指标相对应的尺度。将变量的隶属度向量通过尺度集综合成为一个向量 $R = r_{ia}$, 即可得到定性指标在尺度 A 下的量化值。

由此得到各样本风险评价指标对应的单因素评价矩阵:

$$r = \begin{bmatrix} r_{1ia} \\ r_{2ia} \\ \text{M} \\ r_{nia} \end{bmatrix} \quad (12)$$

从而得到指标 i 对样本 j 的评价矩阵, 可以把它作为 BP 神经网络模型中的输入矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & L & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & L & r_{2m} \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ r_{n1} & r_{n2} & L & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, K, m; j=1, 2, K, n) \quad (13)$$

3.3 BP 神经网络模型的学习

综合评价的实际值可能与 BP 神经网络模型中的期望值存在误差 E

$$E = \frac{1}{2} (d - f)^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l (d_k - f_k)^2 \quad (14)$$

将上述公式展开代入隐层, 得到如下公式:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^l [d_k - g(\text{net}_k)]^2 \quad (15)$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \left[d_k - g \left(\sum_{j=0}^m z_{jk} y_j \right) \right]^2$$

将上述公式展开代入输入层, 即:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \left\{ d_k - g \left[\sum_{j=0}^m z_{jk} g \left(\sum_{i=0}^n v_{ij} x_i \right) \right] \right\}^2 \quad (16)$$

通过上述公式得到, 每层权值 w_{jk} 、 q_{ij} 的函数就是神经网络模型的误差 E , 因此通过适当调整权值就可以对误差 E 进行合理的调整, 调整方法如下公式。

$$\Delta w_{jk} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} \quad j=0, 1, 2, K, m \quad k=1, 2, K, l \quad (17)$$

$$\Delta q_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial v_{ij}} \quad i=0, 1, 2, K, n \quad j=1, 2, K, m \quad (18)$$

4 结论

结合城市地下空间灾害种类繁多多样、动态性、随机不确定性和复杂性等特点及灰色特征, 采用灰色理论科学合理构建城市地下空间多灾种评价指标体系。

运用灰色理论计算各指标与城市地下空间多灾种综合评价等级权重的关联度, 进而得到其主要影响因素, 分析选取多灾种权重。

通过确定输入层单元数、设计隐含层、确定输出层单元数构建 BP 神经网络模型, 对样本各指标进行量化处理, 测试模型实际值与期望值的误差。

通过研究得到该模型具有处理海量灾害动态数据、具备较强的自我学习能力和非线性数据处理能力, 可以实现准确性高、稳定性强的数据预警。具备处理样本多样性、随机不确定性和复杂性, 较强的自我学习能力和非线性数据分析能力于一体的综合评价模型。

【参考文献】

- [1] 邱智超. 基于灰色关联法和神经网络的大学生慕课教学资源评价 [J]. 教育探索, 2021, 37(5): 142-145.
- [2] 王慧, 李娜. 基于灰色关联分析的矿区生态环境破坏程度评价 [J]. 自动化与仪器仪表, 2021, 263(9): 30-33.
- [3] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰, 等. 灰色系统理论及其应用 (第七版) [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 63-113.
- [4] 温建强, 张岩, 高帅帅, 等. 基于灰色理论-BP 神经网络预测瓦斯含量 [J]. 能源技术与管理, 2020, 45(1): 44-55.
- [5] 赵巍平, 温欣, 徐东强. 基于模糊识别的城市地下空间灾害决策模型 [J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(4): 61-65.
- [6] 张凌浩, 张明, 嵇文路, 等. 基于灰色关联理论和 BP 神经网络的分布式光伏电站运维数据虚拟采集方法 [J]. 电力建设, 2021, 42(1): 125-131.
- [7] 关富儒, 吴发名, 罗志, 等. 基于灰色关联分析及 GA-BP 模型的岩体爆破块度预测 [J]. 爆破器材, 2021, 50(4): 40-53.
- [8] 丁志刚, 唐益新, 包文成, 等. 老木山隧道爆破震动影响因素灰色关联分析 [J]. 湖北工业大学学报, 2021, 36(5): 81-85.
- [9] 明晓东, 徐伟, 刘宝印, 等. 多灾种风险评估研究进展 [J]. 灾害学, 2013, 28(1): 126-145.
- [10] 卢颖, 郭良杰, 侯云玥, 等. 多灾种耦合综合风险评估方法在城市用地规划中的应用 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2015, 49(3): 538-546.
- [11] 王博. 内蒙古锡林郭勒盟牧区雪灾气象因子回溯关联分析与评估模型研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2011: 11-13.
- [12] 王述红, 张泽, 侯文帅, 等. 综合管廊多灾种耦合致灾风险评估方法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2018, 39(6): 902-906.
- [13] 康亚茹, 许慧, 张明亮, 等. 基于 PSR 模型及灰色系统理论的辽河口潮滩湿地生态系统健康评估与预测研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(11): 163-170.
- [14] 袁孟嘉. 基于变量选择与灰色神经网络的深圳市财政收入预测分析 [D]. 济南: 山东大学, 2020: 21-39.