

柴康, 刘鑫. 基于模糊聚类分析的综合管廊多灾种耦合预测模型[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 206–209. [CHAI Kang and LIU Xin. Multi Disaster Coupling Prediction Model of Comprehensive Pipe Gallery Based on Fuzzy Cluster Analysis[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 206–209. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.038.]

基于模糊聚类分析的综合管廊多灾种耦合预测模型^{*}

柴康¹, 刘鑫²

(1. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安, 710055; 2. 北京师范大学 政府管理学院, 北京 100875)

摘要: 当下综合管廊灾害防护相关的研究十分匮乏, 为此, 该文设计基于模糊聚类分析的综合管廊多灾种耦合预测模型, 先采用基于可变模糊聚类的综合管廊灾种样本聚类方法, 将综合管廊中多个类型的灾种样本实施聚类; 然后基于聚类后的灾种样本, 通过基于模糊数学的多灾种耦合度模型, 获取多个灾种之间的耦合关系; 最后采用多灾耦合致灾风险预测方法实现综合管廊多灾种耦合预测。

关键词: 模糊聚类分析; 综合管廊; 多灾种; 耦合预测; 耦合度; 危险性指数

中图分类号: X43; TU375.4; X915.5; X45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)04-0206-04
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.038

当下土地资源属于非常珍稀的资源之一, 城市地下综合管廊资源整合性较好, 检修十分便利, 也因此变成城市市政建设的核心部分^[1]。在国家的全力推动中, 很多地区开始构建地下综合管廊, 由此逐渐出现一系列潜在弊端, 比如设计经验欠缺、设计规范不足等^[2]。分析管廊结构构造设计相关的研究资料后可知, 管廊中管线类型选取和灾害风险防范方面的研究还较为稀少^[3]。且我国在管道构建运营时, 具有电缆损坏、管道异常出现中毒、火灾等灾害风险, 同时引起灾害的元素存在多样性, 灾害间相关水平很大, 若只对其中一种灾种实施评价, 结果存在一定误差^[4]。所以, 综合管廊的多灾种灾害预测十分必要。为此, 本文构建一种基于模糊聚类分析的综合管廊多灾种耦合预测模型。

1 基于模糊聚类分析的综合管廊多灾种耦合预测模型

1.1 基于可变模糊聚类的综合管廊灾种样本聚类

假定需聚类的 m 个综合管廊灾种样本可构成灾种样本集合, n 描述灾种样本指标数目, 能够通过 $n \times m$ 阶指标特征值矩阵将灾种样本集实施聚类, 将综合管廊灾种样本集描述成:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix} (y_{ji})。 \quad (1)$$

式中: y_{ji} 描述综合管廊灾种聚类样本 i 指标的特征值, $j=1, 2, \dots, n$; $i=1, 2, \dots, m$ 。

因为 n 个综合管廊灾害预测指标的量纲与数目级存在差异, 需要将综合管廊原始灾种数据实施规格化处理, 让规格化数处于 $[0, 1]$ 之间^[5]。因

为综合管廊灾害预测指标中包含了正相关指标 Y_1 (则指标值较大, 能力较优)、负相关指标 Y_2 (即指标值较小, 能力较差) 以及中间型指标 Y_3 (指标值基于某范围中, 能力较大的指标), 依次将这三个指标种类的灾种数据规格化:

$$Y_1 = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}; \quad (2)$$

$$Y_2 = \frac{y_{\max} - y}{y_{\max} - y_{\min}}; \quad (3)$$

$$Y_3 = 1 - \frac{|y - \bar{y}|}{\max |y - \bar{y}|}。 \quad (4)$$

式中: y 为实际值; y_{\max} 、 y_{\min} 为实际值里的极大值和极小值; 为中间最佳值。

将需聚类的综合管廊灾种样本矩阵 S 的指标种类通过上述归一化方法实施规格化, 矩阵 S 通过规格化后变成综合管廊灾害预测指标特征值规格化矩阵:

$$S_{\bar{j}} = s_{ji} \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nm} \end{bmatrix}。 \quad (5)$$

式中: $S_{\bar{j}}$ 为综合管廊灾害预测指标特征值规格化数, 那么灾种样本 i 的 n 个指标特征值向量。

假定灾种样本集一共 d 类, 种类 f 的模糊聚类中心向量设成 $z = (z_{1f}, z_{2f}, \dots, z_{df})$, 其中, $f=1, 2, \dots, g$ 。

灾种样本 i 与种类 f 之间的不同, 能够通过广义距离表示:

$$e_{fi}^0 = \left| \sum_{j=1}^n (s_{ji} - z_{jf})^q \right|^{\frac{1}{q}}。 \quad (6)$$

式中: q 为距离参数, q 的值为 1 时代表海明距离,

* 收稿日期: 2020-01-20

修回日期: 2020-05-06

基金项目: 西部绿色建筑国家重点实验室开放基金项目(LSKF202019)

第一作者简介: 柴康(1995-), 男, 汉族, 陕西米脂人, 硕士研究生, 主要从事建筑经济与管理研究。

E-mail: kangchai_xuaut@163.com

q 的值为 2 时代表欧氏距离。

因为权重的存在, 差异指标对模糊聚类的干扰程度存在差异, 这属于可变模糊聚类迭代模型里的核心可变参数, 所以把指标权向量导入广义距离公式^[6-7]。那么广义权聚类是:

$$e_{fi} = \left| \sum_{j=1}^n \tilde{\omega}_j (s_{ji} - z_{jf})^q \right|^{\frac{1}{q}} \quad (7)$$

式中: $\tilde{\omega}$ 代表权重。此式描述了分析指标权重矩阵后, 灾种样本 i 和种类 f 间的不同^[8]。

假定指标权向量 $\tilde{\omega} = (\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_n)$, 同时 $\sum_{j=1}^n \tilde{\omega}_j = 1$, 则:

$$E_{fi} = v_{fi} e_{fi} = v_{fi} \left\{ \sum_{j=1}^n [\tilde{\omega}_j (s_{ji} - z_{jf})]^q \right\}^{\frac{1}{q}} \quad (8)$$

式中: E_{fi} 为灾种样本 i 和种类 f 间的加权广义权聚类, E_{fi} 不单分析了综合管廊灾害预测指标权重, 还基于灾种样本 i 所属种类 f 的相对隶属度 v_{fi} 之上设定权重^[9]。其中:

$$v_{fi} = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^d [\tilde{\omega}_j (s_{ji} - z_{jf})]^q}{\sum_{j=1}^n [\tilde{\omega}_j (s_{ji} - z_{jf})]^q} \right\}^{-1}; \quad (9)$$

$$z_{jf} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{2}{v_{fi}^{q-1}}}{\sum_{i=1}^m \frac{2}{v_{fi}^{q-1}}}; \quad \frac{\sum_{i=1}^m \frac{2}{v_{fi}^{q-1}}}{q} = 1 \quad (10)$$

为了获取最佳模糊聚类矩阵和最佳模糊聚类中心矩阵, 导入拉格朗日乘子 ε 建立拉格朗日函数并获取可变模糊聚类迭代模型:

$$R(v_{fi}, z_{jf}) = \varepsilon \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^d v_{fi}^2 [\tilde{\omega}_j (s_{ji} - z_{jf})]^q \quad (11)$$

式中: v_{fi} 描述灾种样本 i 属于种类 f 的相对隶属度, 属于都非静态稳定求解, 通过上述过程实现综合管廊多灾种聚类。

1.2 基于模糊数学的多灾种耦合度模型

基于 1.1 小节获取综合管廊多灾种聚类结果, 该节将通过对该结果进行关联运算, 得到综合管廊多灾种聚类后的耦合度。设 a_{ji} 属于预测指标 G_j 相应的耦合度指标 G_{ji} 的原始数值, 则:

$$G_j = \begin{bmatrix} a_{j1} & 1 & 1 & 0 \\ 1 & a_{j2} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 0 & a_{jm} \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

式中: G_j 为第 j 个预测指标的初始向量; m 为预测指标里存在的指标数目。

1.2.1 耦合度指标综合指数

为去除量纲对向量的干扰, 将矩阵实施规格化操作, 获取每个预测指标的标准矩阵。

假定是综合管廊多灾种耦合预测指标 G_{ji} 的最佳值, 那么:

$$b_{ji}^{\max} = (b_{j1}^{\max}, b_{j2}^{\max}, \dots, b_{jm}^{\max})^T \quad (13)$$

式中: 将 b_{ji}^{\max} 描述被对比向量, 将 b_{ji}^{\max} 设成参考向量, 那么综合管廊多灾种耦合预测指标与最佳指标之间的关联水平是:

$$\beta_{ji} = \frac{\min |b_{jh} - b_{jh}^{\max}| + \delta |b_{jh} - b_{jh}^{\max}|}{|b_{jh} - b_{jh}^{\max}| + \delta \max |b_{jh} - b_{jh}^{\max}|} \quad (14)$$

式中: β_{ji} 为耦合度指标 G_{ji} 的真实值和最佳值的关联性; h 为耦合度指标的序数, $h = 1, 2, \dots, m$;

δ 为分辨系数, δ 的值是 0.5; \min 、 \max 为最小函数与最大函数。

综合管廊多灾种耦合预测指标的耦合度评估矩阵是:

$$Q_j = (\delta_{j1}, \delta_{j2}, \dots, \delta_{jm})^T \quad (15)$$

综合管廊多灾种耦合预测指标 G_{ji} 的最佳值是 10 分, 之后将综合管廊多灾种耦合预测指标实施赋值, 运算关联度。

运算耦合度指标的综合指数是:

$$Y_j = V^T Q_j \quad (16)$$

式中: Y_j 为预测指标的综合指数; V 为特征向量。

1.2.2 建立功效函数

假定变量 v_{ji} 属于综合管廊中灾害系统的有序残留, 但 v_{ji} 是第 j 个序参量的第 i 个指标, 它的值是 Y_{ji} 。 β_{ji} 、 α_{ji} 依次描述系统未出现异常时第 j 个序参量的第 i 个指标上下极值。

针对综合管廊多灾耦合系统而言, 它的耦合度指标的功效函数是:

$$v_{ji} = \begin{cases} \frac{Y_{ji} - \alpha_{ji}}{\beta_{ji} - \alpha_{ji}}, & Y_{ji} \text{ 存在正功效;} \\ \frac{\beta_{ji} - Y_{ji}}{\beta_{ji} - \alpha_{ji}}, & Y_{ji} \text{ 存在负功效。} \end{cases} \quad (17)$$

式中: v_{ji} 为指标对系统的有序度功效, 则指标对灾害系统功能实现的贡献水平, $v_{ji} \in [0, 1]$ 。

如果 v_{ji} 的值是 0, 则综合管廊中灾害系统间异质性非常不好, 灾害系统每个指标不符合系统要求。如果 v_{ji} 的值是 1, 一致性最佳, 每个指标均符合系统要求; 如果 $0 < v_{ji} < 1$, 伴随值得变大, 指标便越易于实现目标。反之, 指标难以完成目标^[10]。

使用物理学领域的容量耦合理论, 与耦合系数模型, 能够依次设置两种灾害系统和多种灾害系统耦合过程里的耦合度运算模型。

随机两个灾害系统耦合度公式是:

$$D_{ji} = \left[\frac{V_j V_i}{(V_j + V_i)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

多种灾害系统耦合度公式:

$$D = n \sqrt{\frac{V_1 V_2 \dots V_n}{\prod_{i=1}^n [\prod_{j \neq i}^n j = 1 (V_j + V_i)]}} \quad (19)$$

式中: D 为全局灾害系统的耦合度, 灾害系统间的耦合度取值区间是 $D \in [0, 1]$ 。

1.3 多灾耦合致灾风险预测

多灾耦合致灾的危险性指数是:

$$G_m = \max G_j + \Delta G \quad (20)$$

式中: ΔG 为述耦合灾害干扰系数。 G_j 为单个灾害系统的危险性指数。其中 $\Delta G_{12} = (G_1 + G_2) D_{12}$ 。

2 实例检验及分析

本文将包头市新都中心区综合管廊工程设成分析目标, 此工程建设区域地下水种类是潜水。包头市抗震设防烈度是 VIII 度, 设定基本地震加速度值是 0.21 g。

按照此工程场地条件和入廊管线规划设定它的多灾耦合预测指标(表 1)。每个灾种中三级指标关联度计算结果见表 2。经本文模型计算的每个灾种耦合的综合指数如表 3 所示。计算每个灾种的效用值, 结果见表 4。

表 1 综合管廊多灾耦合致灾指标设计

二级	地震 A	非平衡沉降 B	爆炸 C	火灾 D	中毒 E
三级	断裂结构 A1	灾害点密度 B1	气体泄漏程度 C1	浓烟尘 D1	气体浓度 E1
	结构埋深 A2	标准段长度 B2	热辐射 C2	热辐射 D2	毒性度 E2
	地层变动 A3	土地压缩性 B3	冲击波 C3	气体泄漏值 D3	接触耗时 E3
	地震加速度 A4	地下水深度 B4	碎片值 C4	燃烧耗时 D4	窒息 E4

表 2 每个灾种中三级指标关联度计算结果

指标序号	原始数值	关联度
A1	8.11	1.00
A2	6.81	0.75
A3	7.81	0.94
A4	6.31	0.69
B1	6.91	1.00
B2	6.51	0.94
B3	6.81	0.99
B4	5.91	0.85
C1	6.91	0.82
C2	7.81	1.00
C3	7.61	0.96
C4	6.91	0.82
D1	6.81	0.84
D2	6.11	0.74
D3	7.71	1.00
D4	6.71	0.82
E1	5.91	0.81
E2	6.61	0.92
E3	6.31	0.87
E4	7.11	1.00

表 3 每个灾种耦合度的综合指数

灾害类型	综合指数
A	0.91
B	0.97
C	0.90
D	0.84
E	0.87

表 4 每个灾种效用值

灾害类型	综合指数
A	0.91
B	0.97
C	0.90
D	0.84
E	0.87

综合管廊由于爆炸、火灾、气体泄漏、中毒和结构非平衡沉降或者地震的影响下出现损害，若 D 的值是 0.09，则 5 类灾害一起出现的可能性不大，依次运算每个灾种两两之间的耦合水平，并实施排序对比，结果如表 5 所示。表 5 中，灾

种间两两耦合后耦合度差异不大，当中非平衡沉降、火灾的耦合水平较小，地震、爆炸的耦合度较大。

表 5 灾害耦合度

耦合灾害	耦合度	耦合度/103
AC	0.499998	4.999792
CE	0.499924	499.9241
DE	0.499924	499.9237
AE	0.499820	499.8189
AB	0.499744	499.7439
AD	0.499693	499.6928
BC	0.499572	499.5720
AD	0.499507	499.5067
BE	0.499133	499.1327
BD	0.498339	499.3392

在仿真环境中设定包头市新都中心区综合管廊工程中，出现爆炸与地震的耦合，采用本文模型进行危险性预测，其中爆炸的危险性指数 $G_1 = 4.31$ ，地震的危险性指数 $G_2 = 4.27$ ，爆炸地震的耦合度 $D_{12} = 0.499$ ，那么耦合灾害影响系数是 $\Delta G_{12} = (G_1 + G_2) D_{12} = (4.31 + 4.27) \times 0.499 = 4.28$ ，爆炸与地震灾害耦合的危险性指数是 $4.31 + 4.27 = 8.58$ ，危险指数较高，不适宜人工作业，必须全部疏散。

为了进一步测试本文模型的预测性能，基于表 5 的耦合灾种设定，采用本文模型对包头市新都中心区综合管廊工程预测后，测试包头市新都中心区综合管廊工程的事故率，结果如图 1 所示。由图 1 可知，不同灾种耦合下，本文模型预测前，包头市新都中心区综合管廊工程事故率高达 25.69%，本文模型预测后，事故率最大值仅有 5.36%。其中，本文模型预测下，包头市新都中心区综合管廊工程事故率降幅高达 20.68%。则本文模型的使用性能较优。

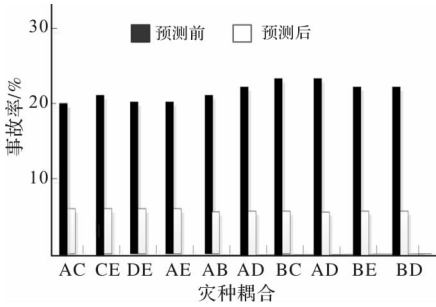


图 1 本文模型预测后包头市新都中心区综合管廊工程事故率变动情况

3 结论

综合管廊属于 21 世纪新型城市市政基础设施建设现代化的核心标志, 构建综合管廊能够防止由于增设、维修管线引起的“马路拉链”状况。而综合管廊的安全问题逐渐变成综合管廊构建与维护的核心问题。本文设计基于模糊聚类分析的综合管廊多灾种耦合预测模型, 并对包头市新都中心区综合管廊工程进行多灾种耦合预测, 预测结果显示, 包头市新都中心区综合管廊工程中爆炸与地震的耦合下, 危险性指数高达 8.58, 危险指数较高, 不适宜人工作业, 必须全部疏散。经本文模型预测后, 包头市新都中心区综合管廊工程事故率降幅高达 20.68%, 本文模型的应用价值显著。

参考文献:

[1] 郭佳奇, 钱源, 王珍珍, 等. 城市地下综合管廊常见运维灾

- 害及对策研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 27-33.
- [2] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340-347.
- [3] 孟陆波, 李天斌, 杜宇本, 等. THM 耦合作用下千枚岩隧道大变形机理[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(5): 66-73.
- [4] 王海宾, 侯国培, 褚翔宇. 唐口煤矿采空区瓦斯与火耦合灾害综合治理技术研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(7): 211-213.
- [5] 任建喜, 李刚, 赵文博. 基于粘弹性边界的综合管廊抗震支墩性能分析[J]. 灾害学, 2019, 34(S1): 14-19.
- [6] 李寿国, 周文珺. 基于 PPP 模式的地下综合管廊项目风险分担机制分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3): 1019-1024.
- [7] 吕振伟, 刘坤. 模糊聚类分析的方法及实例应用[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(6): 288-291.
- [8] 刘步中, 张曦煌. 基于模糊聚类的含风电场发电系统可靠性分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(7): 138-142.
- [9] 李凯, 曹喆. 一种基于神经网络的广义模糊聚类算法[J]. 电子学报, 2016, 44(8): 1881-1886.
- [10] 赵劲帅, 邱晓燕, 马菁曼, 等. 基于模糊聚类分析与模型识别的微电网多目标优化方法[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2316-2323.

Multi Disaster Coupling Prediction Model of Comprehensive Pipe Gallery Based on Fuzzy Cluster Analysis

CHAI Kang¹ and LIU Xin²

- (1. School of Management, Xian University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. School of Government, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: At present, there is a lack of research on the disaster prevention of the comprehensive pipe gallery. Therefore, a multi disaster coupling prediction model based on fuzzy clustering analysis is designed. Firstly, the disaster samples of the comprehensive pipe gallery are clustered by using the variable fuzzy clustering method, and then the disaster samples are clustered by using the multi disaster samples based on fuzzy mathematics. The coupling degree model is used to get the coupling relationship among multiple disasters, and finally the multi disaster coupling risk prediction method is used to realize the multi disaster coupling prediction of the integrated pipe gallery. The experimental results show that the designed model can effectively predict the risk of the comprehensive pipe gallery project in Xindu Central District of Baotou City under the coupling of multiple disasters, and after the application of the model, the accident rate in the comprehensive pipe gallery project can be reduced, which has guiding significance for the disaster prevention and reduction of the urban comprehensive pipe gallery and provides valuable reference for the risk prediction of the urban comprehensive pipe gallery.

Key words: fuzzy cluster analysis; comprehensive pipe gallery; multi disaster species; coupling prediction; coupling degree; risk index