

部分权重信息下地下工程施工安全模糊决策研究

周厚贵^{1,2,3}, 魏道红^{*1,4}, 曹生荣^{3,5}

- (1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;
2. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 中国葛洲坝集团公司, 湖北 宜昌 443002;
4. 华北水利水电学院 电力学院, 河南 郑州 450011;
5. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430071)

摘要: 结合直觉模糊集理论提出了处理地下工程施工安全问题的方法, 其用直觉模糊集描述不同防护措施对于地下工程各种不安全因素的满足和不满足程度. 在属性权重部分已知的情况下, 通过权重可能属性分析, 建立单目标优化模型, 求出目标模型的权重向量, 并由此求出各方案的综合属性. 根据各方案综合属性建立可能度矩阵; 通过对可能度矩阵排序分析, 得到各方案的排序向量; 根据排序向量分量的大小对直觉模糊集进行排序, 求出最佳防护方案. 该方法能更好体现决策者的意愿和要求及被评价对象的真实水平或好坏程度, 可避免人为因素的影响, 为决策者提供有力的理论支持.

关键词: 直觉模糊集; 属性权重部分已知; 施工安全决策; 地下工程

中图分类号: C934 **文献标志码:** A

0 引言

地下工程施工中, 施工人员常面临着作业空间狭小、环境恶劣、生产工序复杂、环境多变的挑战和塌方、掉块、爆破、触电等危险事故的威胁. 预防和解决上述问题一直是建设施工单位面临的难题. 传统的经验型安全管理已不能适应现代化管理的需要, 为更科学、更有效地预防和控制事故, 必须采取安全系统工程来解决实际存在的问题. 本文采用直觉模糊集法对影响隧洞安全的各个因素进行分析, 提出基于部分权重信息的多准则决策问题, 从而找出合理的安全支护措施.

1 理论原理

直觉模糊集合(intuitionistic fuzzy sets, IFS)是模糊集的推广, 自 Atanassov^[1] 提出以来, 在许多领域得到了成功的应用.

1.1 直觉模糊集^[1,2]

令 X 为论域, X 上的一个直觉模糊集 A 定义为

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle \mid x \in X \}$$

式中: $\mu_A: X \rightarrow [0, 1]$, $\nu_A: X \rightarrow [0, 1]$, 且 $0 \leq \mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1$, $\forall x \in X$; $\mu_A(x)$ 表示元素 x 对集合 A 的隶属度, $\nu_A(x)$ 表示元素 x 对集合 A 的非隶属度.

X 上的全体直觉模糊集构成的集合记做 $IFS(X)$. 称 $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x)$ 为 x 在 A 中的直觉指标, 表示 x 属于 A 与否的不确定性程度. 如 $A = (0.2, 0.5)$ 表示对 A 方案赞同者为 20%, 反对者为 50%, 弃权者为 30%.

引入实数集合中可能度的定义.

定义 1^[3,4] $\forall a, b \in \mathbf{R}$, 称函数 p :

$$p(a > b) = \begin{cases} 1; & a > b \\ \frac{1}{2}; & a = b \\ 0; & a < b \end{cases}$$

为 $a > b$ 的可能度。

类似地,给出直觉模糊集 $A \geq B$ 的可能度定义。

定义 2 $\forall A, B \in IFS(X)$, 若函数 $p(A \geq B)$ 满足下列条件:

- (1) $0 \leq p(A \geq B) \leq 1$;
- (2) $p(A \geq B) = 1$ 当且仅当 $1 - \nu_B(x) \leq \mu_A(x)$;
- (3) $p(A \geq B) = 0$ 当且仅当 $1 - \mu_B(x) \leq \nu_A(x)$;
- (4) $p(A \geq B) + p(B \geq A) = 1$, 特别地 $p(A = B) = \frac{1}{2}$;
- (5) $p(A \geq B) \geq \frac{1}{2}$ 当且仅当 $\mu_A(x) - \nu_A(x) \geq \mu_B(x) - \nu_B(x)$;

特别地, $p(A \geq B) = \frac{1}{2}$ 当且仅当 $\mu_A(x) - \nu_A(x) = \mu_B(x) - \nu_B(x)$;

- (6) $\forall C \in IFS(X)$, 若 $p(A \geq B) \geq \frac{1}{2}$, $p(B \geq C) \geq \frac{1}{2}$, 则 $p(A \geq C) \geq \frac{1}{2}$ 。

称函数 $p(A \geq B)$ 为 $A \geq B$ 的可能度。据此可得到可能度的计算公式如下:

定理 1 设 $A, B \in IFS(X)^{[2,3]}$,

$$p(A \geq B) = \max \left\{ 1 - \max \left\{ \frac{1 - \nu_B(x) - \mu_A(x)}{\pi_A(x) + \pi_B(x)}, 0 \right\}, 0 \right\}$$

称 $p(A \geq B)$ 为 $A \geq B$ 的可能度。

1.2 直觉模糊集的多准则模糊决策

设有 m 个方案构成的方案集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, 每个方案要考虑 n 个准则, 记准则集为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$. 设 μ_{ij}, ν_{ij} 分别表示方案 A_i 满足和不满足准则 C_j 的程度, 且 $0 \leq \mu_{ij}, \nu_{ij} \leq 1$ 及 $0 \leq \mu_{ij} + \nu_{ij} \leq 1$. 方案 A_i 关于 C_j 的属性值 μ_{ij}, ν_{ij} 往往是根据决策者个人经验和实际情况得出的。为了保证数据的准确性, 一般根据专家系统对属性值进行确定; 同时根据专家在该领域内的权威性不同, 给出不同的专家评分权重 ω_l , 综合求得该属性的直觉指数。该属性值可由下式求得:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \mu_{ij}^l \omega_l, \nu_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \nu_{ij}^l \omega_l$$

其中 μ_{ij}^l 和 ν_{ij}^l 分别表示不同专家给出的方案 A_i 满足和不满足准则 C_j 的程度, k 表示专家人数。

根据直觉模糊集含义知, 方案 A_i 关于准则 C_j 的评价可以由一个直觉模糊集表示, 直觉指数 $\pi_{ij} = 1 - \mu_{ij} - \nu_{ij}$ 越大, 说明方案 A_i 关于准则 C_j 的不确定幅度就越大。因此在决策过程中, 决策者可以通过增加直觉指数的办法来调整其评价, 也就是说决策者的评价实质上依赖于一个闭区间 $[\mu_{ij}, 1 - \nu_{ij}]$. 因此, 方案 A_i 可以用一个直觉模糊集表示为 $A_i = \{\langle C_1, \mu_{i1}, \nu_{i1} \rangle, \langle C_2, \mu_{i2}, \nu_{i2} \rangle, \dots, \langle C_n, \mu_{in}, \nu_{in} \rangle\}$, 其中 $1 \leq i \leq m$.

事实上, 对不同因素, 其权重依赖于一个闭区间 $[\omega_j^l, \omega_j^u] = [\mu_{ij}, 1 - \nu_{ij}]^{[5,6]}$, 其中 $\omega_j^l = \mu_{ij}, \omega_j^u = 1 - \nu_{ij}$. 假设已知的部分可能属性权重的集合为 Φ . 显然, 对于每一个准则 C_j , 有 $0 \leq \omega_j^l \leq \omega_j^u \leq 1$. 此外, 为了得到满足条件 $\omega_j^l \leq \omega_j \leq \omega_j^u$ 和 $\sum_{j=1}^n \omega_j =$

1 的最优权重, 假设 $\sum_{j=1}^n \omega_j^l \leq 1$, 以及 $\sum_{j=1}^n \omega_j^u \geq 1$, 所给出的准则 $C_j, C_k, \dots, C_p$ 的重要度分别为 $\omega_j, \omega_k, \dots, \omega_p$, 其中 $\omega_j^l \leq \omega_j \leq \omega_j^u, \omega_k^l \leq \omega_k \leq \omega_k^u, \dots, \omega_p^l \leq \omega_p \leq \omega_p^u$, 及 $\omega_j + \omega_k + \dots + \omega_p = 1$.

方案 A_i 满足决策者要求程度可用如下定义的加权函数 W 计算^[2]:

$$W(A_i) = \max \{ z([\mu_{ij}^l, \mu_{ij}^u])\omega_j + z([\mu_{ik}^l, \mu_{ik}^u])\omega_k + \dots + z([\mu_{ip}^l, \mu_{ip}^u])\omega_p \}$$

其中 $W(A_i) \in [-1, 1], 1 \leq i \leq m$.

故要使上式取得最大值, 只需考虑如何选择权重 $\omega_j, \omega_k, \dots, \omega_p$, 选择出的权重称之为最优权重, 可通过线性规划模型计算得到^[2]:

$$\begin{cases} \max \tilde{z}(\omega) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\mu_{ij}^l + \nu_{ij}^u - 1)\omega_j \\ \text{s. t. } \omega \in \Phi \end{cases}$$

设由上式得到的最优解为 ω , 则方案 A_i 的综合属性值为直觉模糊集 $\tilde{z}_i(\omega) = (\mu_{z_i(\omega)}, \nu_{z_i(\omega)})$.

其中 $\mu_{z_i(\omega)} = \sum_{j=1}^n \mu_{ij} \omega_j, \nu_{z_i(\omega)} = 1 - \sum_{j=1}^n (1 - \nu_{ij}) \omega_j$.

对于给定的一组方案 $A_i, i \in \mathbf{N}$, 将其两两进行比较, 利用可能度公式, 求得相应的可能度 $p(A_i \geq A_j)$, 简记为 $P_{ij}, i, j \in \mathbf{N}$, 并建立一个可能度矩阵 $\mathbf{P}$, 该矩阵包含了所有方案相互比较的

全部可能度信息. 因此对直觉模糊集进行排序的问题就转化为求解可能度矩阵的排序向量问题. 由可能度定义可知, 矩阵 $\boldsymbol{P}$ 是一个模糊互补判断矩阵, 有关模糊互补判断矩阵的排序理论已有较为成熟的结果^[3,4], 文献[4] 给出一个简洁的排序公式

$$\varphi_i = \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^m p_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right)$$

得到可能度矩阵 $\boldsymbol{P}$ 的排序向量 $\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1 \ \varphi_2 \ \cdots \ \varphi_n)$ (其中 n 代表直觉模糊集 A_i 的数量), 并根据排序向量 $\boldsymbol{\varphi}$ 的分量 φ_i 的大小对直觉

模糊集 $A_i (i \in \mathbf{N})$ 进行排序.

2 工程实例

在地下工程施工中, 以最常见的隧洞施工为例, 根据以往施工经验和教训, 总结出在隧洞施工中容易发生的事故主要有 C_1 塌方、 C_2 物体打击、 C_3 电气事故、 C_4 爆破事故、 C_5 车辆运输事故. 对此采取的有关措施有 A_1 加强监测、 A_2 更新施工设备、 A_3 提供劳动保护、 A_4 更新施工技术. 根据统计方法得到方案 A_i 对准则 C_j 的满足度 μ_{ij} 和不满足度 ν_{ij} 如表 1 所示.

表 1 特征信息表
Tab. 1 Characteristic information table

方案	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
A_1	[0.33, 0.52]	[0.62, 0.31]	[0.43, 0.56]	[0.23, 0.68]	[0.51, 0.32]
A_2	[0.62, 0.21]	[0.48, 0.32]	[0.27, 0.48]	[0.30, 0.62]	[0.42, 0.52]
A_3	[0.43, 0.28]	[0.41, 0.49]	[0.21, 0.55]	[0.27, 0.60]	[0.32, 0.62]
A_4	[0.12, 0.48]	[0.32, 0.42]	[0.47, 0.35]	[0.53, 0.34]	[0.52, 0.39]

用同样的方法可得到准则 C_j 对于模糊集“重要”的隶属度 μ_{ij} 和非隶属度 ν_{ij} , 即

$$\begin{aligned}\omega_1 &= (0.13, 0.63); \omega_2 = (0.21, 0.75); \\ \omega_3 &= (0.18, 0.76); \omega_4 = (0.17, 0.81); \\ \omega_5 &= (0.16, 0.82)\end{aligned}$$

2.1 权重可能属性集合

由部分属性权重信息得到可能属性权重的集合

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Phi} = \{ \boldsymbol{\omega} = (\omega_1 \ \omega_2 \ \cdots \ \omega_5) \mid & 0.13 \leq \omega_1 \leq \\ & 0.37, 0.21 \leq \omega_2 \leq 0.25, 0.18 \leq \omega_3 \leq \\ & 0.24, 0.17 \leq \omega_4 \leq 0.19, 0.16 \leq \omega_5 \leq \\ & 0.18, \sum_{j=1}^5 \omega_j = 1 \}\end{aligned}$$

2.2 方案的综合属性

利用算法的优化模型建立如下的单目标优化模型:

$$\begin{cases} \max & \tilde{z}(\boldsymbol{\omega}) = 1.01\omega_1 + 0.63\omega_2 + \\ & 0.68\omega_3 + 0.43\omega_4 + 0.38\omega_5 \\ \text{s. t.} & \boldsymbol{\omega} \in \boldsymbol{\Phi} \end{cases}$$

用单纯形法求得权重向量为

$$\boldsymbol{\omega} = (0.28 \ 0.21 \ 0.18 \ 0.17 \ 0.16)$$

由此求出方案 A_i 的综合属性为

$$\begin{aligned}\tilde{z}_1(\boldsymbol{\omega}) &= (0.421, 0.478) \\ \tilde{z}_2(\boldsymbol{\omega}) &= (0.441, 0.401) \\ \tilde{z}_3(\boldsymbol{\omega}) &= (0.341, 0.482) \\ \tilde{z}_4(\boldsymbol{\omega}) &= (0.559, 0.312)\end{aligned}$$

2.3 可能度矩阵

各方案综合属性值的可能度矩阵为

$$\boldsymbol{P} = \begin{pmatrix} 0.500 & 0.311 & 0.648 & 0.254 \\ 0.689 & 0.500 & 0.769 & 0 \\ 0.352 & 0.231 & 0.500 & 0.578 \\ 0.746 & 1 & 0.432 & 0.500 \end{pmatrix}$$

2.4 方案的排序向量

由可能度矩阵 $\boldsymbol{P}$ 得到各方案的排序向量为 $\boldsymbol{\varphi} = (0.227 \ 0.246 \ 0.221 \ 0.306)$, 由排序向量知方案 A_4 为最优方案, 方案的最优评定顺序为 $A_4 \succ A_2 \succ A_1 \succ A_3$, 即更新施工技术在隧洞安全施工中起主要作用.

3 结 语

本文将直觉模糊集用于解决地下工程施工中不安全因素防护措施的选择, 提出了一种基于直觉模糊集处理模糊决策问题的方法. 通过分析, 得出在地下工程施工中, 更新施工技术为解决地下

工程施工安全的主要因素.同时可结合其他地下工程实际施工条件,用此方法确定合理的安全防护措施.该方法对地下工程施工安全防护具有一定的指导作用,可为决策者做出最优决策提供一个方便有效的决策方法.

参考文献：

[1] ATANASSOV K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, **20**(1):87-96

[2] 林琳,袁学海,夏尊铨. 基于直觉模糊集的多准则模糊决策问题[J]. 数学的实践与认识, 2007, **37**(5):78-82

[3] CHEN S M, TAN J M. Handling multicriteria fuzzy decision-making problems based on vague set[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, **67**(2):163-172

[4] HONG D H, CHOI Chang-hwan. Multicriteria fuzzy decision-making problems based on vague set theory[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, **114**(1): 103-113

[5] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京：清华大学出版社, 2004

[6] 林琳. 直觉模糊集在近似推理与决策中的应用[D]. 大连:大连理工大学, 2006

Research on fuzzy decision-making for understructure work construction safety as partial weight information known

ZHOU Hou-gui^{1,2,3}, WEI Dao-hong^{*1,4}, CAO Sheng-rong^{3,5}

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. China Gezhouba (Group) Corporation, Yichang 443002, China;
4. Institute of Electric Power, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;
5. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430071, China)

Abstract: Combining intuitionistic fuzzy sets, a new method for solving understructure work safety problems is presented. The proposed method describes the degrees of satisfiability and non-satisfiability of each understructure work construction protective measure to any unsafe factors by intuitionistic fuzzy sets. As attribute weight part known, through possible attribute analysis of weight, the single-objective optimization model is established, and the weight vector of the objective model is found, then the comprehensive attributes of various programs are obtained. According to various programs’ comprehensive attributes, the possibility matrix is established. Through the sorting analysis of possibility matrix, the ordering vectors of various programs are obtained. According to the size of ordering vector component to the intuitionistic fuzzy sets, the best protection plan is got. This method can well manifest policy-maker’s wish and request, and the appraised object’s real level or quality. It can also avoid the impact of human factors and provide the powerful theory support for the policy-maker.

Key words: intuitionistic fuzzy sets; attribute weight part known; construction security decision-making; understructure work