

震后桥梁应急加固方案优选的区间优势决策算法研究

王 飞¹ 李东璐²

¹(南阳理工学院建筑与城市规划学院 河南 南阳 473004)

²(南阳师范学院土木建筑工程学院 河南 南阳 473061)

摘 要 结合桥梁结构震害程度及破坏特征,从结构安全性、经济合理性、应急适应性与施工风险性等层面构建震后桥梁应急加固决策系统。针对系统中各加固方案指标属性的复杂性、区间性与不确定性等特征,借鉴粗糙集理论和博弈决策理论的 Minimax 决策算法优化思路,考虑应急加固方案与理想方案之间的优势度及其属性的概率测度与各方案属性值之间存在一定的等价关系,利用属性优势关系来确定指标权重度量值,并与离差最大化算法和推论 2 对应急加固方案进行反演对比。实例仿真表明:优选方案可为震后桥梁应急加固优选提供切实有效的借鉴思路。

关键词 桥梁结构 优势决策 应急加固 方案优选 属性权重

中图分类号 TP3 U445.7 文献标志码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.12.012

INTERVAL DOMINANCE DECISION ALGORITHM FOR EMERGENCY REINFORCEMENT SCHEMES OF POST-EARTHQUAKE BRIDGE STRUCTURE

Wang Fei¹ Li Dongjun²

¹(College of Architecture and Urban Planning, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, Henan, China)

²(School of Civil Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, Henan, China)

Abstract Considering the earthquake damage degree and damage characteristics of bridge structures, a decision-making system for emergency reinforcement of bridges after earthquakes is constructed from four aspects: structural safety, economic rationality, emergency adaptability and construction risk. In view of the complexity, interval and uncertainty of the index attributes of decision-making system, the optimization idea of Minimax design algorithm based on rough set theory and game decision theory was used for reference. It considered the dominance degree and probability measure of attributes between reinforcement schemes and ideal schemes, as well as certain equivalence relationship with the attribute values of each schemes. The attribute dominance relation was used to solve the index weight measure, and the inverse comparison was made with the deviation maximization algorithm and inference 2 for emergency reinforcement schemes. The simulation results show that the proposed algorithm can provide a practical and effective reference for the optimum selection of emergency reinforcement of bridges after the earthquake.

Keywords Bridge structure Superiority decision Emergency strengthening Scheme optimization Attribute weight

0 引言

桥梁作为城市重要的生命线系统枢纽,一旦在特

大地震灾害发生过程中受到损坏,不仅会造成巨大的经济损失和人员伤亡,还会严重影响到震后应急救援工作的有效实施。通过对 2008 年汶川 8.0 级大地震灾害中的 450 座桥梁的实地调研和统计分析,发现多

处桥梁出现了移位、开裂和落梁等不同程度损坏,其中桥梁的破坏部位主要集中在梁体破坏、支座破坏、桥墩破坏、桥台破坏、基础滑移失效和伸缩缝破坏等。由此,桥梁的大面积损坏导致道路运行系统发生中断并延误了应急救援工作,从而造成难以估量的间接损失和负面影响,这也突显出采取有效措施提升梁体的抗震性能、优化选线设计及加固维护桥梁的重要性^[1-2]。

因此,要保证应急救援管理工作的有效实施和及时开展,受灾区内的桥梁结构需要采取及时有效的加固措施。目前主要的桥梁结构加固方法有:(1) 上部结构加固法^[3],例如锚喷混凝土加固法、桥面补强层加固法、粘贴纤维复合材料加固法与改变结构受力体系加固法等;(2) 下部结构加固法,例如增大截面法、绕丝加固法、外包钢法与缠绕纤维复合材料加固法等。而如何集成震区各种受损桥梁结构影响因素,进而选择经济合理和科学有效的加固方案是震后救灾管理工作亟待解决的关键问题。

当前,许多专家学者对此项研究工作进行了诸多研究。张鹏^[4]利用层次分析法对震后桥梁结构方案进行优选比较分析,该方法虽然快速便捷,但主观影响比较大。杨永清等^[5]从结构功能可靠性、技术可靠性、经济合理性和施工过程可靠性等四个方面建立了桥梁加固方案指标体系,并采取不确定性层次分析法来对其进行综合评判。姜禹等^[6]根据多目标决策理论与方法,建立了桥梁应急加固综合评价指标系统,利用赋权关联方法确定决策方案的关联度,并通过实例验证了其合理性与科学性。针对国内外多属性决策理论在桥梁改造与加固中的研究现状与存在问题,黄建^[7]利用 MyEclipse 开发工具与 J2EE 平台仿真实现了桥梁应急加固方案优选的智能决策系统(DSS)的有效开发。宋帅^[8]基于模糊多属性决策理论与思路,在 TSMB1.0 软件基础上实现桥梁加固方案的电算化,并结合专家评选决策结果将其保存于 Access 数据库里,以厦漳海湾大桥加固比选实例验证了决策模型和软件的实用性。为了科学有效地优选最佳桥梁加固方案,赵丹^[9]建立了桥梁加固优选的组合赋权-TOPSIS 评价模型,为震后桥梁加固方案优选决策提供一种新思路。

综上,这些研究工作对震后桥梁加固方案的评价与优选具有重要的工程借鉴意义。但在实际震后桥梁加固方案优选和评价过程中,其优化决策过程往往是决策者分析有限已知方案的指标属性信息的过程。特别是当各决策方案指标属性信息未确知时,呈现出显

著的复杂性、区间性、不确定性与非线性等特征^[9]。由此,可将其归纳为多属性群决策的优选排序问题。目前,多属性群决策理论广泛应用于洪水灾害风险区划^[10]、矿业资源综合开发评价^[11]、工程施工方案优选排序^[12]、水资源管理与风险分析^[13]和电网企业投资决策优选^[14]等领域中。但鲜有研究成果应用和验证于震后桥梁应急加固优选领域。鉴于此,本文在博弈决策论和粗糙集理论基础,借鉴概率优势关系属性和 Minimax 算法优化思路^[15-16],考虑到每个决策对象均期望最大限度地减少与理想对象的偏离。通过对决策信息的集成,使每个决策对象的综合属性值最大化,进而按照综合优势概率测度值进行排序择优。最后,通过工程案例验证了该算法在震后桥梁应急加固方案优选中的科学性和合理性。

1 区间优势决策算法理论实现

1.1 区间可能度表征

若有 $\tilde{a} = [a^L, a^U] = \{x | a^L \leq x \leq a^U; a^L, a^U \in \mathbf{R}\}$, 则可称 \tilde{a} 为区间数,设 $\tilde{a} = [a^L, a^U]$, $\tilde{b} = [b^L, b^U]$, 则 $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ 的可能度^[17]为:

$$p(\tilde{a} \geq \tilde{b}) = \begin{cases} 1 & a^L \geq b^U \\ \frac{a^U - b^L}{l_{\tilde{a}} + l_{\tilde{b}}} & a^U > b^L \wedge a^L < b^U \\ 0 & a^U \leq b^L \end{cases} \quad (1)$$

若 $\tilde{a} = [a^L, a^U]$, $\tilde{b} = [b^L, b^U]$, 则:

$$\|\tilde{a} - \tilde{b}\| = |a^L - b^L| + |a^U - b^U| \quad (2)$$

式中: $d(\tilde{a}, \tilde{b}) = \|\tilde{a} - \tilde{b}\|$ 是 \tilde{a} 与 \tilde{b} 的相离度。可以看出, $d(\tilde{a}, \tilde{b})$ 越大,则两个区间数的相离程度越大。

若存在 $\tilde{x}_j^* = [x_j^{*L}, x_j^{*U}] = [\max(x_{ij}^L), \max(x_{ij}^U)]$, 则 $j(j = 1, 2, \dots, m)$ 是其正理想点,越大越优;反之, $\tilde{x}_j^* = [x_j^{*L}, x_j^{*U}] = [\min(x_{ij}^L), \min(x_{ij}^U)]$, j 是其负理想点,越小越优。由此,由理想点构成的理想特征序列可表征为 $\tilde{x}^* = (\tilde{x}_1^*, \tilde{x}_2^*, \dots, \tilde{x}_m^*)$ 。

1.2 区间序列优势关系推论

假设 $\tilde{a} = [a^L, a^U]$ 与 $\tilde{b} = [b^L, b^U]$ 成立,其理想点为 $\tilde{c}^* = [c^{*L}, c^{*U}]$, 若有式(3)成立,则称 $\tilde{a} > \tilde{b}$ ^[18]。

$$d(\tilde{c}^*, \tilde{a}) < d(\tilde{c}^*, \tilde{b}) \quad (3)$$

推论1 当分别进行正理想方案和负理想方案决策时,则有:

$$\tilde{a} > \tilde{b} \Leftrightarrow p(\tilde{a} \geq \tilde{b}) > \frac{1}{2} \Leftrightarrow a^L + a^U > b^L + b^U \quad (4)$$

$$\tilde{a} > \tilde{b} \Leftrightarrow p(\tilde{a} \leq \tilde{b}) > \frac{1}{2} \Leftrightarrow a^L + a^U < b^L + b^U$$

若式(5)为其正理想方案,考虑到 \tilde{c}^* 为理想区间数,则式(6)亦可成立。

$$d(\tilde{c}^*, \tilde{a}) = |c^{*L} - a^L| + |c^{*U} - a^U| \quad (5)$$

$$d(\tilde{c}^*, \tilde{b}) = |c^{*L} - b^L| + |c^{*U} - b^U|$$

$$c^{*L} \geq \max\{a^L, b^L\} \quad c^{*U} \geq \max\{a^U, b^U\} \quad (6)$$

若 $p(\tilde{a} \geq \tilde{b}) = (a^U - b^L) / ((a^U - a^L) + (b^U - b^L)) > 1/2$,则存在 $a^L + a^U > b^L + b^U$ 。由此证明可得:决策方案属性值的概率测度与其优势度之间存在一种等价关系^[15]。

若存在区间数序列 $A = \{\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_m\}$ 与 $B = \{\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \dots, \tilde{b}_m\}$ 均为 \tilde{a} 和 \tilde{b} 所构成的备选序列, $U = \{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_m\}$ 为理想点所构成的理想序列,且三者满足 $\tilde{a}_i = [a_i^L, a_i^U]$ 、 $\tilde{b}_i = [b_i^L, b_i^U]$ 和 $\tilde{u}_i = [u_i^L, u_i^U]$,若式(7)成立,可记为 $A > B$,表明 A 比 B 占优。

$$\sum_{i=1}^m d(\tilde{a}_i, \tilde{u}_i^*) < \sum_{i=1}^m d(\tilde{b}_i, \tilde{u}_i^*) \quad (7)$$

推论2 当分别进行正理想方案和负理想方案决策时,则有:

$$A > B \Leftrightarrow \sum_{i=1}^m (a_i^L + a_i^U) > \sum_{i=1}^m (b_i^L + b_i^U) \quad (8)$$

$$A > B \Leftrightarrow \sum_{i=1}^m (a_i^L + a_i^U) < \sum_{i=1}^m (b_i^L + b_i^U)$$

若 $U^* = \{\tilde{u}_1^*, \tilde{u}_2^*, \dots, \tilde{u}_m^*\}$ 为其正理想点的理想序列,则存在:

$$u_i^{*U} \geq \max_{1 \leq i \leq m} \{a_i^U, b_i^U\} \quad u_i^{*L} \geq \max_{1 \leq i \leq m} \{a_i^L, b_i^L\} \quad (9)$$

由此:

$$\sum_{i=1}^m d(\tilde{a}_i, \tilde{u}_i^*) = \sum_{i=1}^m (|a_i^L - u_i^{*L}| + |a_i^U - u_i^{*U}|) = \sum_{i=1}^m ((u_i^{*L} + u_i^{*U}) - (a_i^L + a_i^U)) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m d(\tilde{b}_i, \tilde{u}_i^*) = \sum_{i=1}^m (|b_i^L - u_i^{*L}| + |b_i^U - u_i^{*U}|) = \sum_{i=1}^m ((u_i^{*L} + u_i^{*U}) - (b_i^L + b_i^U))$$

鉴于 $\sum_{i=1}^m d(\tilde{a}_i, \tilde{u}_i^*) < \sum_{i=1}^m d(\tilde{b}_i, \tilde{u}_i^*)$,表明方案决策优选过程时,可根据方案属性值的大小对决策方案或对象进行优劣排序。

1.3 基于属性优势关系求解指标权重度量值

在算法仿真决策过程中,为客观合理确定指标权重度量值,可用下式将决策矩阵 \tilde{A} 转化为规范化的模糊矩阵 $\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{n \times m}$,其中: \tilde{r}_{ij} 为规范化后的区间数。

对于决策方案的效益型指标,则有:

$$r_{ij}^L = \frac{a_{ij}^L - a_{j*}^L}{a_j^{*L} - a_{j*}^L} \quad r_{ij}^U = \frac{a_{ij}^U - a_{j*}^U}{a_j^{*U} - a_{j*}^U} \quad (11)$$

对于决策方案的成本型指标,则有:

$$r_{ij}^L = \frac{a_j^{*L} - a_{ij}^L}{a_j^{*L} - a_{j*}^L} \quad r_{ij}^U = \frac{a_j^{*U} - a_{ij}^U}{a_j^{*U} - a_{j*}^U} \quad (12)$$

式中: $a_j^{*L} = \max_{1 \leq i \leq n} \{a_{ij}^L\}$, $a_j^{*U} = \min_{1 \leq i \leq n} \{a_{ij}^U\}$, $j = \{1, 2, \dots, m\}$ 。

可知其属性优势关系可表征为属性 $c_j > c_k$ 的概率测度,其属性优势关系比较和构成的矩阵如下:

$$p(c_j > c_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p(\tilde{r}_{iej} > \tilde{r}_{ick}) \quad (13)$$

$$P_{m \times n} = p(c_j > c_k)_{m \times m} \quad (14)$$

式中:矩阵 $P_{m \times n}$ 为属性 c_j 在方案决策中的综合概率优势度,亦可称为权重度量值。因此,在区间属性指标数据处理过程中,需要从其概率论和优势关系的视角出发,对其赋权并确定相应的权重度量值。

$$\omega_{ej} = \sum_{j \neq k}^m p(c_j > c_k) / \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq k}^m p(c_j > c_k) \quad (15)$$

2 区间优势决策算法实现步骤

Step1 对原始矩阵无量纲化处理,用式(11)与

式(12)将其转化成规范化矩阵 $\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{n \times m}$, \tilde{r}_{ij} 为规范化后的区间数。

Step2 采用式(13)与式(14)对规范化后的矩阵

\tilde{R} 进行求解,进而得到概率优势度 $p(c_j > c_k)$ 和概率优势矩阵 $P_{m \times n}$,然后采用式(15)求出权重度量值 ω_{ej} 。

Step3 基于Step1得到的 $\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{n \times m}$ 和Step2求解的 ω_{ej} 构造加权规范化矩阵及其综合属性值 $\tilde{z}_i(\omega)$:

$$\tilde{z}_i(\omega) = \sum_{j=1}^m \tilde{r}_{ij} \omega_j \quad (16)$$

则决策对象的优势度 x_j 优于 x_k 的概率测度为:

$$p(c_j > c_k) = p\left(\sum_{i=1}^m \tilde{r}_{ix_j} \omega_j \geq \sum_{i=1}^m \tilde{r}_{ix_k} \omega_j\right) \quad (17)$$

式(17)可表达如下:

$$P_{m \times n} = p(x_j \geq x_k)_{m \times m} \quad (18)$$

Step4 根据式(18)求解 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的优势概率测度值,进而排序择优。

3 工程案例仿真与计算

为了阐述与验证所提算法的实用性及有效性,现以“5·12 汶川地震”中某桥梁应急加固为例进行仿真计算分析。经震害调查和实地勘查发现^[19]:位于都江堰与映秀之间的某 4 跨 100 米连续箱型梁桥发生中等破坏(见图 1)。该桥梁梁体在强震作用下出现轻微横向移位,挡块根部受到猛烈撞击并出现较大裂缝,桥墩顶部主要是在水平地震力作用下出现倾斜现象,桥梁横梁剪裂。桥梁地震整体震害中等,可以通过采取“局部加固+整体修复”抗震加固策略后继续正常使用,在桥梁结构加固过程中,除了需要对部分破坏桥梁挡块进行应急加固处理与及时更换部分破坏的桥梁支座以外,主要考虑应对受损桥墩进行抗震有效加固。

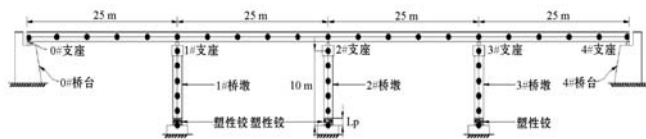


图 1 连续箱型梁桥截面尺寸

鉴于此,为了保证震后应急救灾管理工作的有效实施与开展,在工程初步设计阶段邀请了 6 位专家和技术人员,在经过对该受损 4 跨连续箱型梁桥实地勘察和安全鉴定后,从经济合理性 U_1 (工程造价与结构利用率等)、结构安全性 U_2 (桥梁强度、刚度、抗震性能与耐久性等)、应急适应性 U_3 (材料供应、施工养护与使用功能等)及施工风险性 U_4 (施工工艺难度与震后制约程度等)四个层面出发^[9],初步拟定增大截面法加固(S_1)、粘钢法加固(S_2)、缠绕碳纤维加固(S_3)、绕丝喷射混凝土加固(S_4)、锚喷混凝土加固(S_5)和外包钢法加固(S_6)六种震后桥梁结构应急加固方案。具体各方案决策指标属性数据如表 1 所示。

表 1 桥梁应急加固方案及各指标决策属性

方案	U_1	U_2	U_3	U_4
S_1	[620 0, 650 0]	[0.20, 0.25]	[0.20, 0.25]	[0.12, 0.22]
S_2	[540 0, 570 0]	[0.19, 0.24]	[0.25, 0.30]	[0.14, 0.24]
S_3	[630 0, 650 0]	[0.22, 0.27]	[0.17, 0.22]	[0.16, 0.26]
S_4	[700 0, 730 0]	[0.25, 0.30]	[0.21, 0.26]	[0.15, 0.25]
S_5	[670 0, 700 0]	[0.18, 0.23]	[0.18, 0.23]	[0.14, 0.24]
S_6	[560 0, 590 0]	[0.16, 0.21]	[0.22, 0.27]	[0.12, 0.22]

Step1 首先对原始矩阵无量纲化处理,用式(11)、式(12)将决策矩阵 \tilde{A} 转化为规范化矩阵 $\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{n \times m}$,其决策信息如表 2 所示。

表 2 规范化后决策信息表

方案	U_1	U_2	U_3	U_4
S_1	[0.421 1, 0.578 9]	[0.357 1, 0.714 3]	[0.230 8, 0.615 4]	[0.285 7, 1.000 0]
S_2	[0.000 0, 0.157 9]	[0.428 6, 0.785 7]	[0.615 4, 1.000 0]	[0.142 9, 0.857 1]
S_3	[0.473 7, 0.578 9]	[0.214 3, 0.571 4]	[0.000 0, 0.384 6]	[0.000 0, 0.714 3]
S_4	[0.842 1, 1.000 0]	[0.000 0, 0.357 1]	[0.307 7, 0.692 3]	[0.071 4, 0.785 7]
S_5	[0.684 2, 0.842 1]	[0.500 0, 0.857 1]	[0.076 9, 0.461 5]	[0.142 9, 0.857 1]
S_6	[0.105 3, 0.263 2]	[0.642 9, 1.000 0]	[0.384 6, 0.769 2]	[0.285 7, 1.000 0]

Step2 利用式(13) - 式(14)可求概率优势矩阵为:

$$P_{m \times n} = p(x_j \geq x_k)_{m \times m} = \begin{bmatrix} 0.500 0 & 0.501 7 & 0.287 5 & 0.425 4 \\ 0.498 3 & 0.500 0 & 0.426 8 & 0.511 9 \\ 0.712 5 & 0.573 2 & 0.500 0 & 0.558 7 \\ 0.574 6 & 0.488 1 & 0.441 3 & 0.500 0 \end{bmatrix}$$

且其权重度量值为:

$$\omega_j = \frac{\sum_{j \neq k} p(c_j > c_k)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq k} p(c_j > c_k)} = (0.260 7, 0.272 2, 0.209 3, 0.257 8)$$

Step3 利用式(15)构造加权优势决策信息表,如表 3 所示。

表 3 加权优势决策信息表

方案	U_1	U_2	U_3	U_4
S_1	[0.109 8,0.151 0]	[0.097 2,0.194 4]	[0.048 3,0.128 8]	[0.073 7,0.257 8]
S_2	[0.000 0,0.041 2]	[0.116 6,0.213 8]	[0.128 8,0.209 3]	[0.036 8,0.221 0]
S_3	[0.123 5,0.151 0]	[0.058 3,0.155 5]	[0.000 0,0.080 5]	[0.000 0,0.184 1]
S_4	[0.219 6,0.260 7]	[0.000 0,0.097 2]	[0.064 4,0.144 9]	[0.018 4,0.202 5]
S_5	[0.178 4,0.219 6]	[0.136 1,0.233 3]	[0.016 1,0.096 6]	[0.036 8,0.221 0]
S_6	[0.027 4,0.068 6]	[0.175 0,0.272 2]	[0.080 5,0.161 0]	[0.073 7,0.257 8]

加权综合属性值如下:

$$\tilde{z}_i(\omega) = \sum_{j=1}^m \tilde{r}_{ij}\omega_j = ([0.328\ 9,0.731\ 9], [0.282\ 3, 0.685\ 3], [0.181\ 8,0.571\ 1], [0.302\ 4,0.705\ 4], \dots, [0.367\ 4, 0.770\ 4], [0.356\ 6,0.759\ 6])$$

然后求得加固方案优势矩阵如下:

$$P_{m \times n} = \begin{bmatrix} 0.500\ 0 & 0.557\ 9 & 0.694\ 3 & 0.532\ 9 & 0.452\ 3 & 0.465\ 7 \\ 0.442\ 1 & 0.500\ 0 & 0.635\ 4 & 0.475\ 0 & 0.394\ 4 & 0.407\ 8 \\ 0.305\ 7 & 0.364\ 6 & 0.500\ 0 & 0.339\ 2 & 0.257\ 1 & 0.270\ 8 \\ 0.467\ 1 & 0.525\ 0 & 0.660\ 8 & 0.500\ 0 & 0.419\ 3 & 0.432\ 8 \\ 0.547\ 7 & 0.605\ 6 & 0.742\ 9 & 0.580\ 7 & 0.500\ 0 & 0.513\ 5 \\ 0.534\ 3 & 0.592\ 2 & 0.729\ 2 & 0.567\ 2 & 0.486\ 5 & 0.500\ 0 \end{bmatrix}$$

基于上述优势度矩阵 $P_{m \times n}$ 对应急加固方案进行优选排序, 可得各方案综合概率优势度: (0.540 6, 0.471 0, 0.307 5, 0.501 0, 0.598 1, 0.581 9), 根据其综合概率优势度数值大小, 可得 $S_5 > S_6 > S_1 > S_4 > S_2 > S_3$, 即方案 S_5 (锚喷混凝土加固) 为最优应急加固方案。

依据推论 2 中结论与综合属性值, 可求得:

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^4 x_{1\omega'_{cl}}^L + x_{1\omega'_{cl}}^U &= 1.060\ 9 \\ \sum_{l=1}^4 x_{2\omega'_{cl}}^L + x_{2\omega'_{cl}}^U &= 0.967\ 5 \\ \sum_{l=1}^4 x_{3\omega'_{cl}}^L + x_{3\omega'_{cl}}^U &= 0.752\ 9 \end{aligned}$$

表 4 加权离差决策信息表

方案	U_1	U_2	U_3	U_4
S_1	[0.154 6,0.212 6]	[0.091 0,0.181 9]	[0.057 8,0.154 3]	[0.036 4,0.127 4]
S_2	[0.000 0,0.058 0]	[0.109 2,0.200 1]	[0.154 3,0.250 7]	[0.018 2,0.109 2]
S_3	[0.174 0,0.212 6]	[0.054 6,0.145 5]	[0.000 0,0.096 4]	[0.000 0,0.091 0]
S_4	[0.309 3,0.367 3]	[0.000 0,0.091 0]	[0.077 1,0.173 5]	[0.009 1,0.100 1]
S_5	[0.251 3,0.309 3]	[0.127 4,0.218 3]	[0.019 3,0.115 7]	[0.018 2,0.109 2]
S_6	[0.038 7,0.096 7]	[0.163 7,0.254 7]	[0.096 4,0.192 8]	[0.036 4,0.127 4]

然后对表 2 中的决策数据进行加权, 求得其加权

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^4 x_{4\omega'_{cl}}^L + x_{4\omega'_{cl}}^U &= 1.007\ 8 \\ \sum_{l=1}^4 x_{5\omega'_{cl}}^L + x_{5\omega'_{cl}}^U &= 1.137\ 8 \\ \sum_{l=1}^4 x_{6\omega'_{cl}}^L + x_{6\omega'_{cl}}^U &= 1.116\ 1 \end{aligned}$$

依据推论 2 综合属性值大小对上述应急加固方案排序如下:

$$S_5 > S_6 > S_1 > S_4 > S_2 > S_3$$

可见, 上述桥梁应急加固最优方案为 S_5 (锚喷混凝土加固)。为了对基于区间优势关系的多属性决策算法进行验证对比分析, 本文采用应用较为广泛的离差最大赋权法对桥梁应急加固方案属性指标赋权求解^[20-21], 首先对应急加固方案的原始数据进行规范化处理, 选择式 (19) 对其赋权:

$$\omega'_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{r}_{kj})}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{r}_{kj})} \quad j \in M \quad (19)$$

基于上述公式可求得其权重度量值分别为: $\omega'_{c_1} = 0.367\ 3, \omega'_{c_2} = 0.254\ 7, \omega'_{c_3} = 0.250\ 7, \omega'_{c_4} = 0.127\ 4$ 。

然后求得加权离差决策信息表, 如表 4 所示。并依据综合属性值大小进行方案排序择优。

综合属性值如下:

$$\tilde{z}_i(\omega) = \sum_{j=1}^m \tilde{r}_{ij}\omega_j = ([0.339\ 8, 0.676\ 2], [0.281\ 6, 0.617\ 9], [0.228\ 6, 0.545\ 6], [0.395\ 5, 0.731\ 8], \dots, [0.416\ 1, 0.752\ 5], [0.335\ 2, 0.671\ 5])$$

基于离差最大算法的多属性决策步骤^[16],利用对加权综合属性值进行两两比较的可能度矩阵,该矩阵如下:

$$P_{m \times n} = \begin{bmatrix} 0.500\ 0 & 0.586\ 6 & 0.685\ 1 & 0.417\ 2 & 0.386\ 6 & 0.506\ 9 \\ 0.413\ 4 & 0.500\ 0 & 0.596\ 0 & 0.330\ 7 & 0.300\ 0 & 0.420\ 3 \\ 0.314\ 9 & 0.404\ 0 & 0.500\ 0 & 0.229\ 7 & 0.198\ 1 & 0.322\ 0 \\ 0.582\ 8 & 0.669\ 3 & 0.770\ 3 & 0.500\ 0 & 0.469\ 3 & 0.589\ 7 \\ 0.613\ 4 & 0.700\ 0 & 0.801\ 9 & 0.530\ 7 & 0.500\ 0 & 0.620\ 3 \\ 0.493\ 1 & 0.579\ 7 & 0.678\ 0 & 0.410\ 3 & 0.379\ 7 & 0.500\ 0 \end{bmatrix}$$

依据区间数内涵及推论过程,可知上述可能度矩阵 $P_{m \times n}$ 为模糊互补矩阵,由该矩阵优选排序的中转算法,可求得其排序向量 $v = (v_1, v_2, \dots, v_n), i \in N$, 其中:

$$v_i = \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right) \quad (20)$$

利用式(20)求解出加固方案的 $P_{m \times n}$ 的排序向量为: $v = (0.169\ 4, 0.152\ 0, 0.132\ 3, 0.186\ 0, 0.192\ 2, 0.168\ 0)$

结合排序向量,可得应急加固方案的优选排序为: $S_5 > S_4 > S_1 > S_6 > S_2 > S_3$, 即方案 S_5 (锚喷混凝土加固) 为最优加固方案。综上所述,通过算法仿真计算,可得几种决策算法的加固方案优选排序对比,如表 5 所示。

表 5 几种决策算法方案优选排序对比

方案	离差最大化算法	应急加固方案排序	推论 2 决策综合属性值	应急加固方案排序	区间优势决策算法	应急加固方案排序
S_1	0.169 4	3	1.060 9	3	0.540 6	3
S_2	0.152 0	5	0.967 5	5	0.471 0	5
S_3	0.132 3	6	0.752 9	6	0.307 5	6
S_4	0.186 0	2	1.007 8	4	0.501 0	4
S_5	0.192 2	1	1.137 8	1	0.598 1	1
S_6	0.168 0	4	1.116 1	2	0.581 9	2

基于上述应急加固方案的决策算法仿真对比分析,三种决策算法优选排序结果基本一致,离差最大化算法只有加固方案 S_4 (绕丝喷射混凝土加固) 和 S_6 (外包钢法加固) 不一致,但三种决策算法优选出来的最优加固方案均为 S_5 (锚喷混凝土加固),这说明该方案集成了结构安全性、经济合理性、应急适应性和施工风险性于一体,可以科学有效地对此 4 跨连续箱型梁桥

进行应急抢修和加固维护。另外,在决策算法仿真过程中,离差最大化算法从决策方案角度出发,对其进行赋权求解,但其忽视了属性本身的重要程度,导致仿真排序结果不同于另外两种决策算法,如图 2 所示。本文利用推论 2 的推理结论进行排序反演,反演结果与区间概率优势决策算法相同,这表明基于区间概率优势决策算法的评价结果是可靠的,可以应用于实际震后桥梁应急加固方案优选研究。

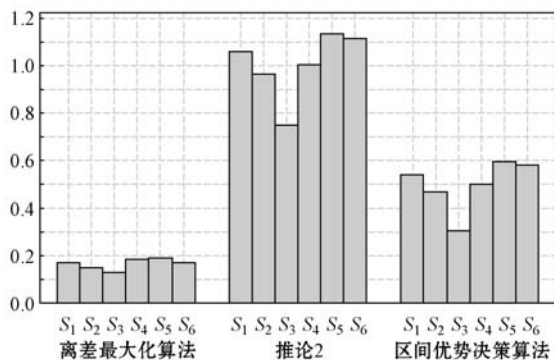


图 2 三种决策算法加固方案优选对比图

4 结 语

震后桥梁结构应急加固和方案择优决策一直是生命线工程系统里的研究热点。本文结合桥梁结构震害程度与破坏特征,从经济合理性、结构安全性、应急适应性、施工风险性等四个层面构建了震后桥梁应急加固决策系统,为其综合决策评价奠定分析基础。在此基础上,借鉴合作博弈理论与概率优势关系粗糙集相关理论,提出基于区间优势关系的震后桥梁应急加固方案优选决策算法,并对其进行理论推导反演。将其成功应用到汶川大地震的 4 跨连续箱型梁桥应急抢修加固优选决策中,结果表明:所提决策算法具有科学性和有效性,可为震后生命线系统加固优选与决策提供切实有效的借鉴思路。

参 考 文 献

- [1] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松. 汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7):1377 - 1387.
- [2] 王东升,郭迅,孙治国等. 汶川大地震公路桥梁震害初步调查[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(3):84 - 94.
- [3] 周长东,赵锋,高日. 震后钢筋混凝土梁式桥快速鉴定方法[J]. 桥梁建设,2011(4):25 - 29.
- [4] 张鹏. 桥梁加固方案的层次分析优选法[J]. 公路交通科技,2006,23(7):92 - 95,119.
- [5] 杨永清,杨灯,余取. 基于不确定 AHP 的桥梁加固方案模糊综合评价[J]. 西南交通大学学报,2019,54(2):219 -

- 226,216.
- [6] 姜禹,郝伟. 基于赋权关联度法的桥梁加固方案优选研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(7):1317-1322.
- [7] 黄建. 基于多属性群决策的桥梁加固方案比选研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
- [8] 宋帅. 基于模糊多属性群决策的桥梁建设方案比选应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2009.
- [9] 赵丹. 基于组合赋权-TOPSIS 模型的桥梁加固方案优选[J]. 交通运输研究,2015,1(4):95-100.
- [10] 杨小玲. 多属性决策分析及其在洪灾风险评估中的应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [11] Peng D X, Lai F J. Using partial least squares in operations management research: A practical guideline and summary of past research[J]. *Journal of Operations Management*, 2012, 30(6):467-480.
- [12] Pannirselvam G P, Ferguson L A, Ash R C, et al. Operations management research: An update for the 1990s[J]. *Journal of Operations Management*, 1999, 18(1):95-112.
- [13] Sun M H. Some issues in measuring and reporting solution quality of interactive multiple objective programming procedures[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 162(2):468-483.
- [14] 聂相田,樊怡. 基于多目标智能加权灰靶决策的水库移民安置区优选[J]. 华北水利水电学院学报,2012,33(1):138-140.
- [15] 徐泽水. 基于语言信息的决策理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [16] 徐泽水,达庆利. 区间数排序的可能度法及其应用[J]. 系统工程学报,2003,18(1):67-70.
- [17] Li G D, Yamaguchi D, Nagai M. A grey-based decision-making approach to the supplier selection problem[J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2007, 46(3/4):573-581.
- [18] Zhang J J. Method of grey related analysis to multiple attribute decision making problems with interval numbers[J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2005, 27(6):1030-1033.
- [19] 周长东,白晓彬,张艾荣,等. 震后桥梁结构应急加固方案优选[J]. 工程抗震与加固改造,2011,33(3):82-87.
- [20] 张荣,刘思峰,刘斌. 基于离差最大化客观赋权法的一般性算法[J]. 统计与决策,2007(24):29-31.
- [21] Wei Z S. Probability theory and mathematical statistics tutorial [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. *IEEE*, 2013; 223-228.
- [4] Cai Y L, Baciuc G. Detecting, grouping and structure inference for invariant repetitive patterns in images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(6):2343-2355.
- [5] Cai Y L, Baciuc G. Higher level segmentation: Detecting and grouping of invariant repetitive patterns[C]// 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. *IEEE*, 2012; 694-701.
- [6] Cai Y L, Baciuc G. Detection of repetitive patterns in near regular texture images[C]// 2011 IEEE 10th IVMS Workshop: Perception and Visual Signal Analysis. *IEEE*, 2011; 60-65.
- [7] Schindler G, Krishnamurthy P, Lubliner R, et al. Detecting and matching repeated patterns for automatic geo-tagging in urban environments[C]// 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. *IEEE*, 2008; 1-7.
- [8] Park M, Brocklehurst K, Collins R T, et al. Deformed lattice detection in real-world images using mean-shift belief propagation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(10):1804-1816.
- [9] Liu S Y, Ng T T, Sunkavalli K, et al. PatchMatch-based automatic lattice detection for near-regular textures[C]// 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). *IEEE*, 2015; 181-189.
- [10] Lettry L, Perdoch M, Vanhoey K, et al. Repeated pattern detection using CNN activations[C]// 2017 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). *IEEE*, 2017; 47-55.
- [11] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]// 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. *IEEE*, 2014; 580-587.
- [12] Suh Y, Adamczewski K, Lee K M. Subgraph matching using compactness prior for robust feature correspondence[C]// 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). *IEEE*, 2015; 5070-5078.
- [13] Raguram R, Chum O, Pollefeys M, et al. USAC: A universal framework for random sample consensus[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(8):2022-2038.
- [14] Torii A, Sivic J, Okutomi M, et al. Visual place recognition with repetitive structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(11):2346-2359.
- [15] Muja M, Lowe D G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 2009; 331-340.

~~~~~

(上接第 36 页)

- [ 2 ] Spinello L, Triebel R, Vasquez D, et al. Exploiting repetitive object patterns for model compression and completion[C]// 11th European Conference on Computer Vision. Springer, 2010; 296-309.
- [ 3 ] Cai Y L, Baciuc G. Translation symmetry detection: a repetitive pattern analysis approach[C]// 2013 IEEE Conference