



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404408

引用格式:杨静,段鹏鑫,何于秋,等.特殊地质地区桥梁工程施工方案虚拟模糊决策技术研究[J].科学技术与工程,2025,25(10):4292-4299.

Yang Jing, Duan Pengxin, He Yuqiu, et al. Virtual fuzzy decision-making technology of bridge construction scheme[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 4292-4299.

特殊地质地区桥梁工程施工方案虚拟模糊决策技术研究

杨静¹, 段鹏鑫², 何于秋³, 汪辉⁴, 段晓晨^{1*}

(1. 石家庄铁道大学管理学院, 石家庄 050043; 2. 河北经贸大学数学与统计学院, 石家庄 050061;
3. 广州市乐耀实业有限公司, 广州 510000; 4. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司, 杭州 310004)

摘要 特殊地质地区的施工决策极为重要且复杂多变,地质条件的不确定性会直接影响施工方案的选择和实施。为解决西南复杂特殊地质地区桥梁工程施工方案“五控”目标(工期、成本、质量、安全、环保)之间非均衡性难题,将网络计划技术与建筑信息模型(building information modeling, BIM)可视化技术、模糊集理论和灰色关联分析(grey relational analysis, GRA)集成应用到复杂特殊地质地区桥梁工程施工方案优选中,建立基于工期-成本-质量-安全-环保的混合模糊多属性决策模型(hybrid fuzzy multi-attribute decision-making model, HFMD),并运用 Python 与 BIM 技术构建施工过程可视化系统,辅助管理人员进行决策,结果满足“五控”指标综合优化方案,并且工期提前 10 d,成本降低 3.1%,证明了此模型 A 型和方法的实用性和有效性。为复杂特殊地质地区桥梁工程施工方案决策提供了参考。

关键词 模糊集; 施工方案优选; 灰色关联分析; 混合模糊多属性决策; 施工过程可视化

中图分类号 TU470.82; **文献标志码** A

Virtual Fuzzy Decision-Making Technology of Bridge Construction Scheme

YANG Jing¹, DUAN Peng-xin², HE Yu-qiu³, WANG Hui⁴, DUAN Xiao-chen^{1*}

(1. School of Management, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Mathematics and Statistics, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China;
3. Guangzhou Leyao Industrial Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;
4. Huadong Survey and Design Co., Ltd., China Railway Second Institute, Hangzhou 310004, China)

[Abstract] The construction decision of special geological area is very important and complicated. The uncertainty of geological conditions will directly affect the selection and implementation of construction scheme. In order to solve the non-equilibrium problem among the “five control” objectives (time limit, cost, quality, safety and environmental protection) of the bridge construction scheme in the complex special geological area of Southwest China, the network planning technology and BIM (building information modeling) were combined. BIM visualization technology, fuzzy set theory and GRA (grey correlation analysis) were integrated into the optimization of bridge construction schemes in complex special geological areas. HFMD (hybrid fuzzy multi-attribute decision-making model) based on duration-cost-quality-safety-environmental protection was established, and a visualization system of construction process was constructed by using Python and BIM technology. Assisted managers to make decisions, and the result met the “five control” index comprehensive optimization scheme, and the construction period was advanced by 10 days, and the cost was reduced by 3.1%, which proved the practicability and effectiveness of this model A and method. It provides a reference for the decision of bridge construction scheme in complex special geological area.

[Keywords] fuzzy set; optimal construction scheme; grey correlation analysis; hybrid fuzzy multi-attribute decision making; visualization of construction process

施工方案优化度对道路桥梁工程施工环保、安全、质量、进度、造价目标控制起着至关重要的作用,其影响程度可达到 95% 以上^[1]。中国西南地区板块构造活跃,活动断裂密集,地层软弱风化,地震

烈度强烈,自然灾害发育严重等极其特殊的地理、地质水文和气候环境,导致的对施工安全、生态环保、工程质量、造价、工期等极高的风险冲击,对施工方案优化带来新的研究课题和挑战。随着“双

收稿日期: 2024-06-13; 修订日期: 2025-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(72071133); 河北大地园林有限公司开发项目(20220209)

第一作者: 杨静(1998—),女,汉族,河北保定人,硕士研究生。研究方向:工程经济与造价管理。E-mail:1499348030@qq.com。

*通信作者: 段晓晨(1962—),男,汉族,山东招远人,博士,教授。研究方向:工程经济与造价管理。E-mail:duanxch888@sohu.com。

碳”目标的贯彻落实以及数字经济的发展,桥梁施工方案的优选也逐渐趋于客观化、智能化、低碳化。王景春等^[2]为增强山区隧道施工场地布置方案决策精度,构建了基于改进灰靶理论的方案优选模型,使得方案优选过程更加科学、准确;刘世昊等^[3]基于多属性决策分析,探讨了隧道施工稳定性指标,强调碳排放因素,构建了隧道低碳施工评价体系,用支持向量机与多效用度函数法的映射模型替代传统评价方法,探索低碳施工方案优选方法;李汝宁等^[4]为优化机场场道施工方案选择问题,建立了工期、质量和成本的改进遗传算法多目标优化模型。使用 Python 和 PyQt5 开发了具有输入、优化和输出功能的软件界面,为施工项目决策提供参考;彭忠伟^[5]将工程质量进行量化处理,建立工期-成本-质量三维优化模型,使用改进遗传算法对该模型进行计算,有效求解了工程多目标优化问题;王海涛等^[6]以碳排放评价作为切入点,开展高速公路桥梁和路基建设方案比选研究,优选方案总碳排放量降低 90%。在项目施工方案优选目标指标方面,多数学者考虑工期-成本优化^[7-9]和少数学者考虑工期-成本-质量优化^[10-11]和极少的工期-成本-质量-安全^[12]或工期-成本-质量-能源-环保^[13]综合优化。在针对模糊问题综合优化评选方法上,应用模糊理论和灰色关联分析(grey relational analysis, GRA)建立评选模型,能够有效解决模糊问题的评价结果偏主观、不准确等问题。刘海江等^[14]针对车辆起步评价主观性过强问题,基于 GRA 和模糊综合评价法建立了车辆起步品质评价体系;高明明^[15]利用三角模糊数和功效系数法评估跨线桥建立评价模型,应用于高湖路跨线桥施工风险评估;尤建新等^[16]建立评价失效模式的模糊数语集,并利用灰色关联度来确定失效模式的风险顺序;Zakeri 等^[17]结合灰色关联分析和三角模糊数建立了供应商选择模型;Tang 等^[18]引入模糊数理论,提出了基于广义三角模糊数的长江武汉段水质综合评价模型。

综上,目前缺少该模型在桥梁施工方案评价方面的研究。因此,现针对西南复杂特殊地质地区桥梁工程施工方案优化存在的个别性、突显性、随机性等机理特点,综合考虑施工工序的工期、质量、成本、安全和环保五大指标,建立基于工期-成本-质量-安全-环保的混合模糊多属性决策模型(hybrid fuzzy multi-attribute decision, HFMD),并应用 Python 和 BIM 施工过程可视化技术进行复杂特殊地质地区桥梁工程的施工方案优选,能够有效避免主观因素对决策结果的影响,有助于解决“五控”指标非均衡性,避免突现性施工难题等问题,对于提高桥梁

工程施工的经济和社会效益,具有非常重要的理论研究和实际应用价值。

1 模型构建思路和研究方法

1.1 构建思路

西南复杂特殊地质地区的水文地质条件特殊以及气候特征具有个别性、突显性等特点,桥梁工程施工在“五控”方面的影响呈现不确定性、非线性、突现性等机理趋势。因此施工方案每个工序的工期、成本、质量、安全性、环境影响性是非线性、不确定的,质量、安全和环保指标需要先用模糊语言进行评价,再运用语言等级转换为三角模糊数,所以使用区间数表示工期和成本,用三角模糊数表示质量、安全和环保指标。考虑到该多属性决策问题的灰色性,将决策方案按灰色关联度的大小进行排序,备选方案的属性指标当作理想方案来作为参考数列。因此应用模糊集理论、灰色理论与施工网络技术的结合,结合应用 Python 与 BIM 技术搭建施工过程可视化平台,对不同施工作业模式下的施工方案进行 3D 动画模拟,特别是对单个重点工序进行虚拟仿真,可以更好地表达施工过程中的不确定性信息,提高决策准确性。

1.2 模型研究方法

1.2.1 模糊集理论

(1) 区间数: 设 \mathbf{R} 是实数集, 对于任意的 $a, b \in \mathbf{R}$, 若 $a \leq b$, 那么闭区间 $A = [a, b]$ 为一个区间数。如果它的隶属函数 $a(x): \mathbf{R} \rightarrow [0, 1]$, 则有

$$a(x) = \begin{cases} 1, & x \in (a, b) \\ 0, & x \in (-\infty, a) \cup (b, \infty) \end{cases} \quad (1)$$

那么全体区间数的集合记为 $I(\mathbf{R})$, 对任意的 $A \in I(\mathbf{R})$, 若 $a = b$, 则 A 为普通实数, 因此, $\mathbf{R} \in I(\mathbf{R})$ 。

(2) 三角模糊数: $\tilde{a} = (a^L, a^M, a^U)$ 被称为三角模糊数, 它的隶属函数 $a(x): \mathbf{R} \rightarrow [0, 1]$, 则有

$$a(x) = \begin{cases} \frac{x - a^L}{a^M - a^L}, & x \in (a^L, a^M) \\ \frac{x - a^L}{a^M - a^U}, & x \in (a^M, a^U) \\ 1, & x = a^M \\ 0, & x \in (-\infty, a^L) \cup (a^U, \infty) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $x \in \mathbf{R}$ 作为三角模糊数中的实数; $a(x)$ 表示 x 属于模糊集合 \tilde{a} 的程度, 即隶属函数; a^M 表示隶属度最高。对 $a^L < a^M < a^U$ 来说, a^U 、 a^L 分别为模糊数的上届和下界, 他们之间的差越大表示模糊程度越强^[19]。

(3)语言等级转换:一般情况下用非常重要、重要、一般、不重要、非常不重要来表示五级模糊语言,去除量纲规范化后如表1所示。

表1 五级模糊语言指标及其规范化(三角模糊数)

Table 1 Five-level fuzzy language index and its normalization (triangular fuzzy number)

模糊等级语言	三角模糊数	语言指标	规范化模糊数
A	(6,6,8)	非常好	(0.75,1,1)
B	(4,6,8)	好	(0.5,0.75,1)
C	(2,4,6)	一般	(0.25,0.5,1)
D	(0,2,4)	差	(0,0.25,0.5)
E	(0,0,2)	非常差	(0,0,0.25)

1.2.2 灰色关联分析

灰色关联分析主要是对时间序列曲线中的各类几何图形进行解析,用变化的速度和方向的接近程度比较时间序列曲线之间的关联性,一般用关联度量因素之间关联度大小随着时间变化的尺度。两比较序列一起变化的程度高,说明二者比较序列关联程度高;否则,比较序列关联程度低。便于理解,子序列和母序列被备选方案和理想方案替代来表示传统灰色关联分析^[20]。传统灰色关联分析的步骤如下。

(1)对原始数据的预处理。

(2)确定理想方案 X^* 和各备选方案 X_j 。

$$\begin{cases} X^* = (X_1^*, X_2^*, \dots, X_i^*) \\ X_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ii}) \end{cases} \quad (3)$$

当评价指标是越大越优型时,有

$$X_j^* = \max_i y_{ij}, \quad j \in T_1 \quad (4)$$

当评价指标是越小越优型时,有

$$X_j^* = \min_i y_{ij}, \quad j \in T_2 \quad (5)$$

(3)计算各指标 j 上各备选方案与理想方案关联系数。

$$r(X_j^*, X_{ij}) = \frac{\min_{i \in m} \min_{j \in n} |X_j^* - X_{ij}| + \varepsilon \max_{i \in m} \max_{j \in n} |X_j^* - X_{ij}|}{|X_j^* - X_{ij}| + \varepsilon \max_{i \in m} \max_{j \in n} |X_j^* - X_{ij}|} \quad (6)$$

式(6)中: $r(X_j^*, X_{ij})$ 为关联系数,反映比较序列 X_{ij} 与参考序列 X_j^* 之间的关联程度; ε 为分辨系数,取值在(0,1),用于调整关联系数差异程度,一般取0.5,数值越小,关联系数间差异越大。

(4)计算关联系数的平均值,确定灰色关联度。

$$r_i^* = r(x^*, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r(x_j^*, x_{ij}) \quad (7)$$

式(7)中: r_i^* 为第 i 个比较序列与参考序列的综合关联度; x^* 为参考序列,是整个分析的基准序列; x_i

为第 i 个比较序列,是与参考序列进行对比分析的对象序列; x_j^* 为参考序列中的第 j 个元素; x_{ij} 为第 i 个比较序列中的第 j 个元素。

1.2.3 BIM 3D 虚拟可视化技术

建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 是一种集成数字化技术和建筑工程管理的方法,它的3D虚拟可视化技术是BIM的一个关键组成部分。BIM 3D 虚拟可视化技术利用数字建模和计算机图形学技术,以三维形式呈现建筑和基础设施项目的各个方面,以提高设计、建设和运营的效率。项目3D虚拟可视化场景一般包括模型信息的实时交互查询、施工工艺过程的仿真演示和施工组织设计方案的比选^[21]。

1.2.4 Python 智能计算技术

Python 语言兼容性强,变量类型可在运行时自主确定,信息搜索功能强大,可以和其他语言进行整合,将两个系统链接自动进行下一步。Python 的强大生态系统和社区支持使其成为开发各种智能计算技术的理想选择。无论是进行数据分析、机器学习、计算机视觉还是自然语言处理,Python 都提供了广泛的工具和资源,方便开发者进行研究和应用。

2 模型实施步骤

本文研究的混合模糊多属性决策模型由三大部分构成,分别是数据混合模糊预处理、灰色关联度计算、基于 Python 与 BIM 的施工过程信息可视化。模型具体实施步骤如下。

2.1 数据混合模糊预处理

2.1.1 规范化

决策指标规范化的过程就是指剔除属性的量纲差异、单位差异、数量差异和类型差异的过程。属性指标有多种类型,如效益型、成本型和区间型等类型。效益型属于数值越高越好的类型,成本型属于数值越低越好的类型,因此,质量、安全、环保指标属于效益型指标,工期和成本属于成本型指标。工期和成本采用前文介绍的区间数表示,质量、安全和环保采用三角模糊数的形式来表示。

设 $R = [r_{ij}]_{m \times n}$, r_{ij} 为对第 i 个方案相对于第 j 个属性指标的初始评价值,规范化后的决策矩阵为: $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ 。模糊属性指标 r_{ij} 一般表示为区间数 $[r_{ij}^L, r_{ij}^U]$, 三角模糊数 $[r_{ij}^L, r_{ij}^M, r_{ij}^U]$ 。

2.1.2 正理想解和负理想解的计算

根据规范化后的矩阵 X ,求得正理想解 V_j^+ 和负理想解 V_j^- 。

若 x_{ij} 为区间数,则

$$\begin{cases} V_j^+ = [\max_i(x_{ij}^L), \max_i(x_{ij}^U)] \\ V_j^- = [\min_i(x_{ij}^L), \min_i(x_{ij}^U)] \end{cases} \quad (8)$$

若 x_{ij} 为三角模糊数,则

$$\begin{cases} V_j^+ = [\max_i(x_{ij}^L), \max_i(x_{ij}^M), \max_i(x_{ij}^U)] \\ V_j^- = [\min_i(x_{ij}^L), \min_i(x_{ij}^M), \min_i(x_{ij}^U)] \end{cases} \quad (9)$$

若 x_{ij} 为语言变量,首先转化为三角模糊数,再利用式(8)求正负理想解。

2.2 灰色关联度计算模块

2.2.1 构建灰色关联系数矩阵

灰色关联系数 ξ_{ij}^+, ξ_{ij}^- 分别表示第 i 个方案与正、负理想方案第 j 个指标的相似度。

$$\begin{cases} \xi_{ij}^+ = \frac{N^+ + \rho M^+}{d_{ij}^+ + \rho M^+} \\ \xi_{ij}^- = \frac{N^- + \rho M^-}{d_{ij}^- + \rho M^-} \\ \rho \in (0, 1) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: $d_{ij}^+ = d(x_{ij}, V_j^+)$ 和 $d_{ij}^- = d(x_{ij}, V_j^-)$ 为 x_{ij} 与 V_j^+, V_j^- 之间的距离; $N^+ = \min_i \min_j d_{ij}^+$, 为两级最小差; $M^+ = \max_i \max_j d_{ij}^+$, 为两级最大差; N^-, M^- 同理; ρ 为分辨系数,一般取值为 0.5。

正、负理想方案与各个方案的灰色关联系数矩阵分别为

$$\xi^+ = \begin{bmatrix} \xi_{11}^+ & \xi_{12}^+ & \cdots & \xi_{1n}^+ \\ \xi_{21}^+ & \xi_{22}^+ & \cdots & \xi_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \xi_{m1}^+ & \xi_{m2}^+ & \cdots & \xi_{mn}^+ \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\xi^- = \begin{bmatrix} \xi_{11}^- & \xi_{12}^- & \cdots & \xi_{1n}^- \\ \xi_{21}^- & \xi_{22}^- & \cdots & \xi_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \xi_{m1}^- & \xi_{m2}^- & \cdots & \xi_{mn}^- \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: ξ^+ 为指由各个指标在所有方案中所能取到的最优值组成的正理想矩阵; ξ^- 为指由各个指标在所有方案中所能取到的最差值组成的负理想矩阵。

2.2.2 确定指标权重

指标值的不可公度性可以通过规范化的方法解决,但不能表示目标的重要性,而是用权来衡量目标的重要性。最优理想方案与各个方案比较之后的综合关联偏差之和为

$$d_i(w_j) = \sum_{j=1}^n (1 - \xi_{ij}^+) w_j, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

式(13)中: $d_i(w_j)$ 为第 i 个方案与正理想方案的距离; w_j 为各指标的权重,综合考虑各个指标权重后用于衡量每个方案与理想状态(正理想方案)的偏离程度。

因为各个方案之间没有区别对待,而是平等竞争,所以可以将上述模型等权集结为单目标最优化模型,即

$$\min f(w_j) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(1 - \xi_{ij}^+) w_j]^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\xi_{ij}^- w_j)^2 \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^m w_j = 1, \quad w > 0 \quad (15)$$

求解得到

$$W_j = \left\{ \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^m (1 - \xi_{ij}^+)^2 + \sum_{i=1}^m (\xi_{ij}^-)^2 \right]^{-1} \right\}^{-1} \times \left[\sum_{i=1}^m (1 - \xi_{ij}^+)^2 + \sum_{i=1}^m (\xi_{ij}^-)^2 \right]^{-1} \quad (16)$$

2.2.3 计算灰色关联度

假设 n 个指标的权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 那么第 i 个方案与正、负理想方案的灰色关联度分别为

$$\begin{cases} Y_i^+ = \sum_{j=1}^n w_j \xi_{ij}^+, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ Y_i^- = \sum_{j=1}^n w_j \xi_{ij}^-, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (17)$$

Y_i^+ 越大,说明第 i 方案越靠近最优方案,即 i 方案越好;相反, Y_i^- 越小,表示决策方案 i 越好。

2.2.4 计算优属度

当决策方案与负理想方案关联度最小的时候与理想方案的关联度是最大的,故若 x_i 从属于理想方案 V^+ 时是凭借优属度 u_i 接近的,则 x_i 从属于负理想方案 V^- 凭借优属度 $1 - u_i$ 靠近。因此建立目标函数为

$$\max F(u_i) = \sum_{i=1}^m [(1 - u_i) Y_i^-]^2 + \sum_{i=1}^m (u_i Y_i^+)^2 \quad (18)$$

求得最优解为

$$u_i = \frac{1}{1 + \left[\frac{Y_i^-}{Y_i^+} \right]^2} \quad (19)$$

按照 u_i 的大小综合排序各个评价方案, u_i 越大,方案越优;反之,方案越差。

2.3 基于 Python 与 BIM 的施工过程信息可视化管理系统

2.3.1 Python 施工方案智能优化决策软件系统

运用 Python 强大的兼容性和信息搜索功能对多目标评价模块、灰色关联度计算模块等各类计算机语言软件进行一体化计算兼容和联接,开发以上计算系统的桥梁工程施工智能优化决策系统,总体

实现输入目标案例的主要影响因素赋值或人机对话,就能自动输出估算结果。

2.3.2 施工方案可视化展现系统

运用 BIM 技术对桥梁工程施工方案进行动画建模,建立施工方案动态三维可视化模拟系统,根据网络计划和施工工艺流程,在系统中定义工程工艺关系、预设顺序等数据,获得桥梁施工过程中各工序的施工进展情况、质量和安全状况、资源利用程度、各时刻的施工强度等重要信息参数,特别是在重难点工序上信息的获取,清楚直观的展示不同施工工艺流程在时间、空间和逻辑上的联系。施工方案可视化优选流程图如图 1 所示。

3 案例实证

3.1 工程概况

该桥梁位于西南地区四川巴中地区,全线钻孔灌注桩数量较多,地下水深一般为 0.6 ~ 3.2 m,地质情况为淤泥质黏土、黏土、亚黏土和强、弱、微风化岩层的 V、VI 围岩为主,地下水丰富,地震断裂破碎带,自然灾害频发的特殊地质地区。桥墩最高 40 m,全桥需多个桩孔同时施工,预制构件需制定供应计划,高桥墩情况下需保证施工安全。施工周边多为农田果园,应尽可能减少废水排放和噪声污染。本文案例中邀请施工单位和上级主管部门、咨询单位的技术管理人员、高校教授等共 21 人参与项目共 17 道工序不同作业模式下各指标作业参数的

确定。特大桥施工项目网络计划的作业参数如表 2 所示,因篇幅有限,表 2 中仅列出部分工序。

3.2 模型实施

根据前文介绍的模型实施步骤,将数值进行混合模糊预处理结果如表 3 ~ 表 6 所示。

灰色关联度计算结果如表 7 和表 8 所示。

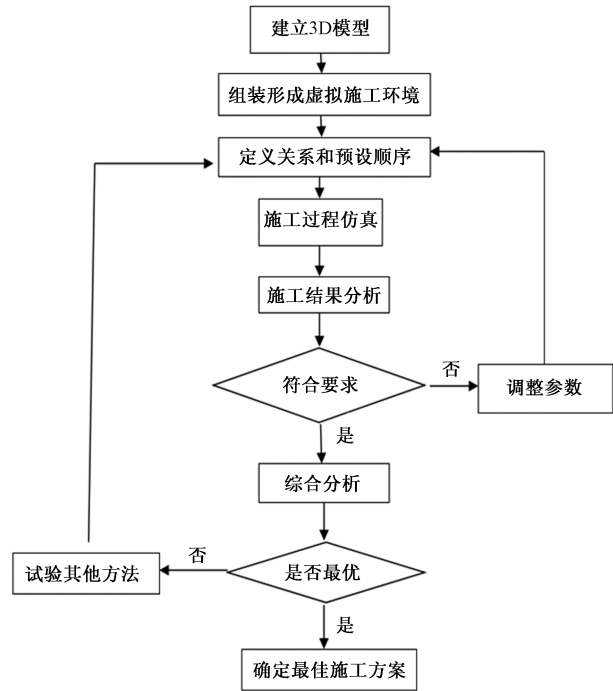


图 1 施工方案可视化优选流程图

Fig. 1 Visual optimization flow chart of construction process

表 2 特大桥施工项目网络计划的作业参数

Table 2 Operation parameters of network plan for construction project of super large bridge

工序	分部分项工程	紧前工序	作业模式	模糊工期	模糊成本	模糊质量	模糊安全	模糊环保
1	施工临时设施		1	[29,32]	[60.31,62.47]	高	高	较高
			2	[27,30]	[61.52,63.23]	较低	一般	最高
			3	[25,28]	[62.45,64.58]	低	较低	较低
∴								
17	右线桥面系及附属工程施工		1	[88,95]	[827.33,832.46]	最高	较高	最高
			2	[85,92]	[830.53,834.72]	较高	最高	一般
			3	[81,89]	[833.72,838.41]	较低	一般	低

表 3 决策矩阵 R

Table 3 Decision matrix R

工序	作业模式	模糊工期	模糊成本	质量指标	安全指标	环保指标
1	1	[29,32]	[60.31,62.47]	(0.7,0.9,1)	(0.7,0.9,1)	(0.6,0.8,1)
	2	[27,30]	[61.52,63.23]	(0,0.2,0.4)	(0.3,0.5,0.7)	(0.8,1,1)
	3	[25,28]	[62.45,64.58]	(0,0.1,0.3)	(0,0.2,0.4)	(0,0.2,0.4)
2	1	[59,62]	[20.01,21.38]	(0.6,0.8,1)	(0.6,0.8,1)	(0.7,0.9,1)
	2	[57,61]	[21.39,22.08]	(0.6,0.8,1)	(0.7,0.9,1)	(0.3,0.5,0.7)
	3	[55,58]	[21.43,22.17]	(0,0.2,0.4)	(0,0.1,0.3)	(0,0.1,0.3)
∴						
17	1	[88,95]	[827.33,832.46]	(0.8,1,1)	(0.6,0.8,1)	(0.8,1,1)
	2	[85,92]	[830.53,834.72]	(0.6,0.8,1)	(0.8,1,1)	(0.3,0.5,0.7)
	3	[81,89]	[833.72,838.41]	(0,0.2,0.4)	(0.3,0.5,0.7)	(0,0.1,0.3)

表4 规范化决策矩阵 X
Table 4 Normalized decision matrix X

Table with 6 columns: 工序作业模式, 工期, 成本, 质量, 安全, 环保. Rows include 1, 2, 3, 17 and their sub-modes.

表5 正理想解
Table 5 Positive ideal solution

Table with 6 columns: 正理想解, 工期, 成本, 质量, 安全, 环保. Rows include V1+, V2+, ..., V17+.

表6 负理想解
Table 6 Negative ideal solution

Table with 6 columns: 负理想解, 工期, 成本, 质量, 安全, 环保. Rows include V1-, V2-, ..., V17-.

表7 灰色关联系数矩阵
Table 7 Grey correlation coefficient matrix

Table with 12 columns: 工序及作业模式, 工期 (+, -), 成本 (+, -), 质量 (+, -), 安全 (+, -), 环保 (+, -). Rows include 1, 2, 17 and their sub-modes.

表8 关联度和优属度
Table 8 Correlation degree and dominance degree

Table with 5 columns: 工序, 作业模式, Y1+, Yi-, ui. Rows include 1, 2, 17 and their sub-modes.

各个指标的权重值: w1 = 0.25, w2 = 0.21, w3 = 0.23, w4 = 0.15, w5 = 0.16。

各方案与正理想解和负理想解的关联度和优属度:

最终得到工序1~工序17最优作业模式的施工方案,根据工序排列的作业模式组合依次为:(1, 3, 1, 3, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 3, 1, 1, 2, 1, 1)。

在桥梁工程项目编制施工方案时,在满足资源条件和工程目标的前提下,通过改进网络计划,来进行网络计划优化,得出满意的结果,进而取得最

优的施工方案。

最后将不同施工方案运用到基于 BIM 的施工
方案优化可视化展现系统,效果如图 2~图 4 所示。

通过对杨家沟特大桥施工过程的 3D 动画演
示,图纸上二维抽象的施工组织安排通过 BIM 技术
的演示使得桥梁建筑的工程施工环境、方案动态过
程立体直观一目了然。施工方案决策者可以更深
入地了解杨家沟特大桥的施工工程环境和施工方
案的虚拟实施动态过程,通过虚拟仿真预测的进度
信息来获取各时刻的施工资料,实现施工全过程的
可视化。

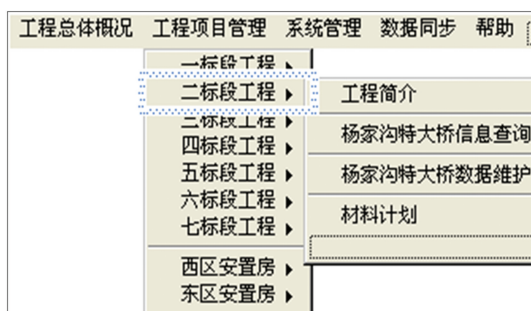


图 2 系统主菜单

Fig. 2 Main menu of the system



图 3 特大桥地质情况

Fig. 3 Geological condition of special bridge

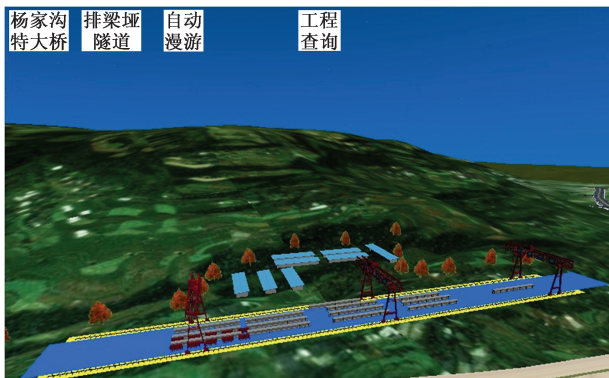


图 4 T 梁预制动画

Fig. 4 Concrete placement animation

优化方案实施效果:确定的最优施工方案已在
杨家沟特大桥工程施工中应用,实施整体效果显
示:工程质量、安全、环保均实现预期优化目标,
工期提前 10 d,成本降低 3.1%,有效提升了施工企
业桥梁工程经济和社会效益,充分验证了模型的有
效性和可行性。

本文构建的 Python 施工方案智能优化计算机
软件系统,专业计算机人员正在开发过程中,因此
不在文中展现。

4 研究结论

通过以上模型构建和实施,得出以下研究结论。

(1)在西南地质复杂、软弱风化的 V、VI 围岩、
地下水丰富、极具特殊性、个别性、差异性的工程施
工环境下,在综合考虑桥梁建设施工方案五控目标
的随机性、突现性等特点的基础上,以专家丰富经
验为基础,将模糊集理论和灰色理论相结合,基于
桥梁施工网络计划图建立 HFMD 来进行桥梁施工
方案的多目标决策。

(2)以工期、质量、成本、安全和环保为指标
的多目标桥梁施工方案决策系统,简单实用,适应性
强,系统的权重值、模糊评价指标、模糊算子的选
取,都可以根据实际工程特点调整参数值来满足不
同条件下的需要。

(3)构建了 BIM、Python 施工方案可视化和智
能计算系统。智能计算系统可以实现从数值输入、
自动一体计算、自动输出所需结果。可视化系统可
以实现施工仿真参数的多方案优选和三维、立体、
直观、可视化展现优化过程及施工环境,使复杂的
施工方案优化过程更加有利于工程技术和管理人员
更好理解和提出相关不足改进建议。

参 考 文 献

- [1] 陆家肃, 卢红. 市政工程造价管控现状及完善对策[J]. 中国招标, 2023(4): 166-167.
Lu Jiasu, Lu Hong. Current situation and countermeasures of municipal engineering cost control [J]. China Bidding, 2023 (4): 166-167.
- [2] 王景春, 王屹, 李永昊, 等. 基于改进灰靶的山区隧道施工场地布置方案优选[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(12): 5185-5193.
Wang Jingchun, Wang Yi, Li Yonghao, et al. Optimization of mountain tunnel construction site layout based on improved grey target [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24 (12): 5185-5193.
- [3] 刘世昊, 宋战平, 徐磊磊, 等. 基于 SVM-MAUT 的隧道低碳施工方案优选[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(6): 68-79.
Liu Shihao, Song Zhanping, Xu Leilei, et al. Optimization of low carbon tunnel construction scheme based on SVM-MAUT [J]. Mod-

- ern Tunnel Technology, 2023, 60(6): 68-79.
- [4] 李汝宁, 冯兴, 姚仰平, 等. 基于改进遗传算法的机场场道施工方案多目标优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(12): 3720-3729.
Li Runing, Feng Xing, Yao Yangping, et al. Multi-objective optimization of airport runway construction Scheme based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(12): 3720-3728.
- [5] 彭忠伟. 基于改进 GA 算法的建筑工程多目标优化研究[J]. 成都工业学院学报, 2022, 25(1): 55-60.
Peng Zhongwei. Research on multi-objective optimization of building engineering based on improved GA algorithm[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 2022, 25(1): 55-60.
- [6] 王海涛, 栾治军, 黄明利, 等. 基于碳排放评价的桥梁路基建设方案比选优化研究[J]. 公路, 2023, 68(4): 275-281.
Wang Haitao, Luan Zhijun, Huang Mingli, et al. Study on optimization of bridge subgrade construction scheme based on carbon emission evaluation[J]. Journal of Highway, 2023, 68(4): 275-281.
- [7] 王家, 唐敬奇, 周忠宝, 等. 建设项目随机离散型工期-成本优化算法的改进[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(7): 229-238.
Wang Jia, Tang Jingqi, Zhou Zhongbao, et al. Improvement of stochastic discrete time-cost optimization algorithm for construction projects[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2023, 50(7): 229-238.
- [8] 宁敏静, 郑小强, 余晓钟, 等. 随机活动工期下考虑缓冲成本及效用的融资费用最小化项目调度优化研究[J]. 运筹与管理, 2023, 32(5): 29-35.
Ning Minjing, Zheng Xiaoqiang, Yu Xiaozhong, et al. Research on financing cost minimization project scheduling optimization considering buffer cost and utility under random activity duration[J]. Operations Research and Management, 2023, 32(5): 29-35.
- [9] 刘勇, 张静怡, 王朱程, 等. 基于多变量 GERT 的复杂装备制造进度控制方法及应用[J]. 控制与决策, 2024. DOI: 10.13195/j. kzyjc. 2024. 0517.
Liu Yong, Zhang Jingyi, Wang Zhucheng, et al. Progress control method and application of complex equipment development based on multivariable GERT [J]. Control and Decision, 2024. DOI: 10.13195/j. kzyjc. 2024. 0517.
- [10] Nguyen D T, Le-Hoai L, Tarigan P B, et al. Tradeoff time cost quality in repetitive construction project using fuzzy logic approach and symbiotic organism search algorithm [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(2): 1499-1518.
- [11] 何琴琴, 李希胜, 万寅子. 基于 NSGA-II 的老旧小区改造方案优选[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(18): 8030-8036.
He Qinqin, Li Xisheng, Wan Yinzi. Optimization of renovation scheme of old residential area based on NSGA-II [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(18): 8030-8036.
- [12] Parsamehr M, Perera U S, Dodanwala T C, et al. A review of construction management challenges and BIM-based solutions: perspectives from the schedule, cost, quality, and safety management [J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2023, 24(1): 353-389.
- [13] Lotfi R, Yadegari Z, Hosseini S, et al. A robust time-cost-quality-energy-environment trade-off with resource-constrained in project management: a case study for a bridge construction project [J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2022, 18(1). DOI: 10.3934/jimo. 2020158.
- [14] 刘海江, 余子键. 基于灰色关联和模糊理论的双离合变速器车辆起步品质评价[J]. 汽车技术, 2023(5): 34-39.
Liu Haijiang, Yu Zijian. Evaluation of starting quality of dual-clutch transmission vehicle based on grey correlation and fuzzy theory [J]. Automotive Technology, 2023(5): 34-39.
- [15] 高明明. 基于三角模糊数-功效系数法的某跨线桥施工风险评价[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 763-765.
Gao Mingming. Construction risk assessment of a certain line bridge based on triangular fuzzy number and efficiency coefficient method [J]. Industrial Buildings, 2019, 53(S2): 763-765.
- [16] 尤建新, 彭博达, 徐涛. 基于失效模式及影响分析的数字化转型风险分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 160-167.
You Jianxin, Peng Boda, Xu Tao. Risk analysis of digital transformation based on failure mode and impact analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2022, 50(2): 160-167.
- [17] Zakeri S, Konstantas D, Bratvold R B, et al. A supplier selection model using the triangular fuzzy-grey numbers [J]. IEEE Access, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS. 2023. 3320032.
- [18] Tang M, Zeng H, Wang K. Bayesian water quality evaluation model based on generalized triangular fuzzy number and its application [J]. Environmental Processes, 2022, 9(1). DOI: 10.1007/s40710-022-00562-2.
- [19] 田成诗, 袁宏俊, 相瑞兵. 基于联系数投影的三角模糊数组合预测模型及其应用[J]. 运筹与管理, 2024, 33(1): 115-122.
Tian Chengshi, Yuan Hongjun, Xiang Ruibing. Triangular fuzzy number combination prediction model based on relational number projection and its application [J]. Operations Research and Management, 2024, 33(1): 115-122.
- [20] 刘平, 武文凯, 许家铭, 等. 基于 GRA 的国内地铁施工事故统计分析[J]. 工程管理学报, 2023, 37(4). DOI: 10.13991/j. cnki. jem. 2023. 04. 010.
Liu Ping, Wu Wenkai, Xu Jiaming, et al. Statistical analysis of domestic subway construction accidents based on GRA [J]. Journal of Engineering Management, 2023, 37(4). DOI: 10.13991/j. cnki. jem. 2023. 04. 010.
- [21] 段晓晨, 董茹萍, 郝晶晶. 交通建设项目投资方案智能决策方法研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(5): 102-107.
Duan Xiaochen, Dong Ruping, Hao Jingjing. Research on intelligent decision method for investment scheme of transportation construction project [J]. Journal of Railway Engineering, 2022, 39(5): 102-107.