

DOI: 10.7672/sgjs2026070110

复杂地层盾构设备选型的博弈决策模型与 工程应用*

赵亚东

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 针对地铁盾构选型过程中定性因素多、风险量化难以及主客观需求难以兼顾的问题,以南昌轨道交通4号线工程为背景,综合考虑施工单位自有资产状况与购买约束力,提出一种基于CRITIC-AHP组合赋权与博弈论决策分析的盾构选型综合评价模型。首先,从动力特性、空间响应、可靠性与风险防控、渣土改良以及经济与资源保障性5个维度构建了盾构适应性评价体系;其次,利用CRITIC-AHP模型实现了指标权重的耦合计算,有效平衡了专家经验与地质数据的客观强度,识别出可靠性指标在复杂地层中具有最高权重(0.38);随后,通过构建建设方与地质环境的收益博弈矩阵,揭示了风险概率波动下的策略演化规律,确立了当极端地层发生概率 $1-p^*=36%$ 的稳健决策准则。最后,将模型应用于南昌轨道交通4号线盾构机选型实践中。结果表明:该机型综合适应性得分较高,在耦合安全权重后,其针对性设计能显著对冲极端地质损失,验证了选型方案的科学性与稳健性。

[关键词] 地铁;盾构;复合地层;组合赋权;博弈论;适应性评价

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0110-06

Game Theory-based Decision Model for Shield Tunneling Equipment Selection in Complex Strata and Its Engineering Application

ZHAO Yadong

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: In view of the problems of multiple qualitative factors, difficult risk quantification, and difficult balance between subjective and objective needs in the process of subway shield selection, a comprehensive evaluation model of shield selection based on CRITIC-AHP combination weighting and game theory decision analysis is proposed by taking the Nanchang Rail Transit Line 4 Project as the background and comprehensively considering the construction unit's own assets and purchase constraints. Firstly, the shield adaptability evaluation system was constructed from five dimensions: dynamic characteristics, spatial response, reliability and risk prevention and control, muck improvement, and economic and resource supportability. Secondly, the CRITIC-AHP model was used to realize the coupling calculation of index weights, which effectively balances the objective strength of expert experience and geological data, and identifies that the reliability index has the highest weight (0.38) in complex strata. Then, by constructing the income game matrix between the constructor and the geological environment, the strategy evolution law under the fluctuation of risk probability was revealed, and the robust decision criterion of critical equilibrium point $1-p^*=36%$ was established. Finally, the model was applied to the shield machine selection practice of Nanchang Rail Transit Line 4. The results indicate that the comprehensive adaptability score of the model is high. After coupling the safety weight, its targeted design can significantly hedge against extreme geological losses, which verifies the scientific nature and robustness of the selection scheme.

Keywords: subways; shields; composite strata; combined weighting; game theory; adaptability evaluation

* 中铁十八局集团有限公司 2024 年度科研创新项目 (2024-031)

[作者简介] 赵亚东,助理工程师,E-mail: 2322155208@qq.com

[收稿日期] 2025-12-10

0 引言

随着我国城市化进程向纵深发展,地下空间开发与轨道交通网络建设正不断挑战工程技术的极限^[1]。隧道工程日益频繁地穿越深部地层、复合地层及各类敏感构筑物,施工环境呈现出高水压、上软下硬、全断面硬岩等极端复杂性^[2]。基于此,建立一套能够量化地质不确定性、兼顾技术可行性与经济合理性的盾构设备选型决策体系,成为现代隧道工程领域亟待解决的关键问题。

国内外学者在盾构与隧道掘进机选型领域进行了广泛而深入的探索。陈凡等^[3]对不同设备的掘进模式与地层适应性及工作特点进行了论述,强调了合理选取掘进设备的重要性。詹金武等^[4]综合考虑施工工期、成本及技术,最终构建 TBM 选型适应性评价体系。秦佳佳^[5]通过软件模拟,考虑盾构穿越不同地层过程中对地表沉降和围岩形变响应的影响,最终选用合适的盾构姿态。近年来,层次分析法(AHP)^[6]、模糊综合评价法(FCE)^[7]等被广泛应用于选型评估。然而,单一的主观赋权法往往忽略了地质原始数据的内在关联性,而纯客观赋权法(如熵权法)有时会脱离工程实际经验。因此,郝小霞^[8]、王伟等^[9]及 Lin 等^[10]众多学者转向综合运用博弈论、AHP 和熵值法进行组合赋权,有效避免了单一赋权的片面性。另一方面,以机器学习为代表的新技术开始渗透这一领域^[11]。

盾构选型不仅是纯粹的技术比选,更是施工单位资源调配与财务预算的综合平衡。针对现有研究多属静态评价、缺乏成本与风险动态博弈考量的问题,本文提出一种基于组合权重优化与博弈论的盾构选型适应性评估模型。首先构建评价指标体系,从推力、扭矩、排土方式、渣土改良以及经济与资源 5 个维度抽提指标。其次,融合专家经验的主观偏好与勘察数据的客观规律,通过距离函数优化权重分配,提升评估的科学性。最后,引入博弈论分析选型方案在不确定地质风险下的演化稳定性,寻找最优成本-风险平衡点。

1 基于 CRITIC-AHP 组合赋权的选型评价体系构建

1.1 评价指标体系设计

在复杂地层掘进过程中,盾构机不仅是一个简单的开挖机械,更是一个与周围土体进行能量交换与压力平衡的动态系统。因此,指标的选取必须涵盖动力输出、空间响应与可靠性保障 3 个核心维度。在动力特性维度,盾构机的总推力 F 与刀盘扭矩 T 是克服地层抗剪强度和摩擦阻力的根本保障。考

虑到施工环境的变异性,盾构机最大额定推力 R 、掘进总阻力 S 往往服从正态或对数正态分布,则二者均值分别为 μ_R 和 μ_S , 标准差分别为 σ_R 和 σ_S 。通过定义功能函数 $Z=R-S$,可推导出基于概率统计意义的可靠度指标 β :

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1)$$

该指标可用于衡量动力储备的安全裕度。

1.2 基于 AHP 与 CRITIC 的主客观赋权

在确定指标权重的过程中,如何平衡专家的先验知识与观测数据的客观规律是评估模型的难点所在。层次分析法(AHP)通过将决策者的主观判断离散化为两两比较矩阵,能够有效捕捉工程经验中对于特定风险(如高水压喷涌)的重视程度。设定准则层对目标的判断矩阵为 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,元素为 a_{ij} ,最大特征值为 λ_{\max} 。通过求解特征方程 $A\omega = \lambda_{\max}\omega$ 得到主客观权重向量 W_{sub} 。为了确保专家判断的逻辑一致性,本文引入一致性指标 CI 进行校核。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

然而,主观赋权往往忽略了地质原始数据的内在关联性,为此本文引入 CRITIC 法进行客观修正。该方法不仅通过标准差 σ_j 衡量各指标在选型方案集中的离散程度,即对比强度,更利用相关系数 r_{ij} 衡量指标间的信息冗余和冲突性,从而计算出各指标的信息承载量 C_j 。

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (3)$$

由此得出的客观权重 $W_{\text{obj}} = C_j / \sum_{j=1}^n C_j$,能够敏锐地捕捉到特定地址数据中隐含的变异特征,例如在砂卵石地层中,CRITIC 法会自动调高扭矩与渣土改良指标的权重,因为这些指标在不同方案间的表现差异最具决策参考价值。

1.3 基于博弈论的最优组合权重

为了实现主客观权重的深度融合,本文采用基于博弈论优化思想的组合赋权模型。该模型的核心逻辑是将两种赋权结果看作博弈的两个参与方,寻找一个最优平衡点,使得组合权重向量 W 分别与主客观权重向量 W_{sub} 与客观权重向量 W_{obj} 的偏离度达到最小。假定组合权重向量为线性组合形式,如式(4)所示:

$$W = \sum_{k=1}^2 \alpha_k W_k^T \quad (4)$$

式中: $W_1 = W_{\text{sub}}$; $W_2 = W_{\text{obj}}$ 。

为了求得最优分配系数 α_k , 构建目标函数 K 如式(5)所示:

$$K = \min \sum_{k=1}^2 \alpha_k W_k^T - W_{i2} (i = 1, 2) \quad (5)$$

利用拉格朗日乘子法对上述模型进行对偶优化求解, 可以推导出最优分配系数 α_1^* 与 α_2^* , 并进行归一化处理得到最终组合权重 ω^* :

$$\omega^* = \frac{\alpha_1^*}{\alpha_1^* + \alpha_2^*} W_{\text{sub}} + \frac{\alpha_2^*}{\alpha_1^* + \alpha_2^*} W_{\text{obj}} \quad (6)$$

本文设定评价向量 $\mathbf{P} = [y_1, y_2, y_3, y_4, y_5]^T$, 其中, $y_1 \sim y_5$ 分别代表动力特性、空间响应、可靠性、渣土改良及经济与资源保障性 5 个准则层的量化分值。为消除原始工程参数量纲的影响, 各指标得分 y_j 均采用隶属度函数或专家评分法映射至 $[0, 100]$ 区间。最终盾构适应性综合评分 G 的计算公式如公式 7 所示, 该分值将作为后续博弈收益函数修正的基准参数, 反映设备硬件配置与客观地质环境的匹配程度。

$$G = \sum_{j=1}^5 \omega_j^* \cdot y_j \quad (7)$$

2 基于博弈论的盾构选型风险决策模型

2.1 博弈要素与收益矩阵构建

设决策者可选的方案集为 $S = \{S_1, S_2\}$, 其中 S_1 是针对复杂地层定制的高配方案; S_2 是常规通用配置方案。地质环境的状态空间为 $G = \{G_1, G_2\}$, 其中 G_1 是代表理想地形; G_2 代表极端复杂地层。对于任意策略组合 (S_i, G_j) , 其收益函数 U 综合考虑了设备成本 C_i , 掘进收益效率 R_{ij} , 以及极端工况下的风险损失 L_{ij} 。收益函数 U 如式(8)所示:

$$U(S_i, G_j) = R_{ij} - C_i - L_{ij} \quad (8)$$

博弈模型中, 设备成本 C_i 受施工单位购买力的直接影响, 定义 $C_i = C_{\text{base}} \cdot \varepsilon$ 。其中, 为设备基准价格, 为资源约束系数。当施工单位拥有现成可改造机型或资金充裕时, $\varepsilon < 1$, 初期压力较小; 当需全额新购且企业现金流偏紧时, $\varepsilon > 1$, 此时施工单位对初期成本的敏感度将远超过对地质风险损失 L_{ij} 的关注。在博弈过程中, 若 S_2 方案遭遇 G_2 地层, 往往会产生巨额的停工维修改造费用 L_{22} ; 若 S_1 方案虽然 C_1 较高, 但其风险损失 L_{12} 显著降低。因此, 选型决策的本质是寻找期望收益 E 的最大化过程, 收益表达式如下:

$$E(S_i) = p \cdot U(S_i, G_1) + (1 - p) \cdot U(S_i, G_2) \quad (9)$$

式中: p 为地层处于理想状态的概率。

2.2 期望收益与纳什均衡求解

假设地层处于理想状态 G_1 的概率为 p , 那么处于极端风险状态 G_2 的概率为 $1 - p$ 。根据设定的成本与风险损失参数, 方案 S_1 与 S_2 的期望收益函数 $E(S_i)$ 分别表达如下。

1) 方案 S_1 (高配针对性方案): 由于该方案在设计阶段已配置了“单管单泵”泡沫系统及强化驱动冗余, 其在风险状态下的损失极小:

$$E(S_1) = p \cdot (Y - C_1) + (1 - p) \cdot (Y - C_1 - L_{12}) \quad (10)$$

2) 方案 S_2 (常规标准方案): 该方案虽初期成本较低, 但在遭遇风险状态时需承担巨额的停工与修复损失:

$$E(S_2) = p \cdot (Y - C_2) + (1 - p) \cdot (Y - C_2 - L_{22}) \quad (11)$$

令 $E(S_1) = E(S_2)$, 即可求得博弈的临界风险概率 P_{cri} , 即 $1 - p^*$ 。

2.3 耦合安全权重的稳健性决策与敏感度分析

在完成基于期望收益的纳什均衡计算后, 需进一步考虑决策者对施工风险的容忍度。在盾构选型综合评价体系中, 可靠性与换刀能力指标 y_3 的权重 ω_3^* 是衡量方案适应性的核心参数。根据前述组合赋权模型, 该权重的得出经历了主客观信息的深度融合计算。对博弈收益函数引入风险厌恶系数 γ , 构建修正后的稳健期望收益模型 E' :

$$E'(S_i) = E(S_i) - \gamma \cdot \omega_3^* \cdot \sigma^2(U_i) \quad (12)$$

式中: $\sigma^2(U_i)$ 代表策略 S_i 在不同地质状态下的收益方差。该模型将对收益波动大(即风险高)的方案施加更大惩罚, 从而使决策向安全稳健的方案倾斜。

3 工程实例应用与评价结果分析

3.1 工程概况

选取南昌轨道交通 4 号线作为实证研究对象。重点分析七一民区间、上一起区间、与民一火区间 3 个区间。根据地质评估方案及勘测报告, 该区间地层呈现典型的复合性与高风险性。工程区间主要穿越中风化泥质粉砂岩、砾砂层及粉质黏土。其中, 上一起区间存在长达 400m 的全断面粉砂岩段, 具有极高的结泥饼风险; 而七一民区间与民一火区间则富含高压地下水, 砂层透水性强, 极易发生盾构掘进中的“喷涌”灾害。针对上述极端工况, 本工程拟采用具备针对性设计的铁建重工盾构机(方案 S_1) 与市场通用型盾构机(方案 S_2) 进行博弈选型分析。

3.2 工程数据模拟与计算评估

3.2.1 博弈策略空间设定

本工程包含3个区间,主要穿越粉质黏土、砾砂及泥质粉砂岩复合地层。基于此,设定博弈的策略空间如下:①方案 S_1 (高配针对性方案),拟在投入的铁建重工土压平衡盾构机基础上进行优化设计,针对富水砂层喷涌和全断面粉砂岩结泥饼风险,增加高规格渣土改良系统及刀盘主动搅拌棒;②方案 S_2 (常规标准方案),采用未针对本标段地质优化的通用型土压平衡盾构机。

3.2.2 基于工程实测数据的参数提取

结合工程中的参数估算和技术参数表,提取相关博弈计算数据如表1所示。其中常规标准方案设计标准是基于一般工况,因此未提出明确的极端地层占比。此外,方案 S_1 已内置风险防控措施,潜在损失也仅限于效率的轻微降低、耐磨件正常损耗的略微增加以及少量的应急处理费用。然而,基于历史工程案例统计数据、专家经验判断以及对本项目特定风险规模估算, L_{22} 反映了在未做针对性准备的情况下,遭遇极端地层可能引发的灾难性财务后果,可能包含施工长时间停滞,高额的直接处置费用及其他衍生损失。

表1 盾构选型博弈模型基础参数

Table 1 Basic parameters of shield machine selection game model

方案	成本参数 C /万元	额定扭矩/ 最大扭矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	最大 推力/ kN	极端 地层 占比/%	潜在 损失 L_{12} / 万元
方案 S_1 (高配针对性方案)	5 500	5 700/6 300	42 575	15 ~ 36	100
方案 S_2 (常规标准方案)	4 600	5 200/5 800	38 000	—	2 600

3.2.3 收益矩阵数学表达

结合已提取出的工程参数,可得式(13):

$$2500(1 - p^*) = 900 \quad (13)$$

计算结果表明,当本工程断面中极端风险地层的占比或发生概率超过36%时,增加900万元初期投入选择方案 S_1 是纯经济意义上的最优决策。

基于AHP层次分析法,专家组结合南昌轨道交通4号线富水砂层与强风化泥质粉砂岩交替出现的复杂工况,认为开仓换刀与防喷涌可靠性是工程成败的关键,赋予其主观权重 $W_{\text{sub},3} = 0.42$ 。其次,引入CRITIC法提取客观权重,利用标准化后的地质钻孔数据标准差 σ_3 与指标间的相关系数 r_{ij} ,根据

式(14)计算该指标的信息承载量 C_3 :

$$C_3 = \sigma_3 \sum_{i=1}^n (1 - r_{i3}) \quad (14)$$

由于不同选型方案在应对喷涌风险上的性能差异极具对比强度,CRITIC法算得客观权 $W_{\text{sub},3} = 0.34$ 。最后,通过博弈论组合赋权模型,求解分配系数 $\alpha_1 = 0.52$ 和 $\alpha_2 = 0.48$,得到耦合权重 $\omega_3^* \approx 0.38$ 。

该权重值高达0.38,充分体现了本项目对“可靠性”维度的高度敏感。基于此权重,已知方案 S_2 在极端状态 G_2 下可能面临 $L_{22} = 2\,600$ 万元的巨额损失,其收益波动幅度巨大。即便在上文计算中 $E(S_2)$ 略高于 $E(S_1)$,但由于常规方案 S_2 的可靠性评分较低,在耦合了0.38的权重系数后,其风险惩罚项 $\gamma\omega_3^* \sigma^2$ 将显著抵消其初始成本优势。

进一步通过敏感度分析可知(见图1),随着地质风险概率 $(1 - p)$ 的波动,具备高可靠性权重的方案 S_1 其收益曲线表现出更强的稳健性。当可靠性权重 ω_3^* 超过0.35时,博弈均衡点 $(1 - p)$ 会迅速左移。这意味着在这种高敏感性的地铁工程中,决策系统会优先推荐适应性得分更高、风险方差更小的针对性选型方案 S_1 。这一结论不仅满足了数学期望的最大化,更符合工程实践中对于“安全第一、兼顾效益”的风险防范逻辑。

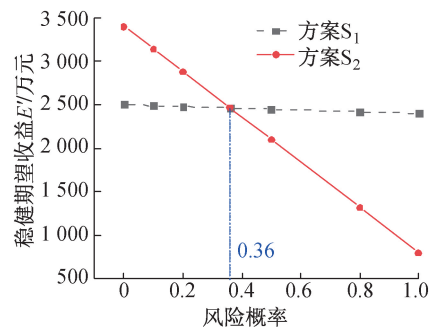


图1 敏感度分析

Fig. 1 Sensitivity analysis

假定项目掘进的总理论收益为 Y ,根据初步勘察及经验估计,设定理想状态下的掘进纯收益 Y 为8000万元。根据实际工程中对不利地质条件的分析,如上一区段的全断面砾砂层及强风化岩层,地质状态分为理想状态 G_1 和风险状态 G_2 。收益函数 $U(S_i, G_j)$ 定义为掘进收益扣除设备成本及风险损失后的净值。构建收益矩阵为:①策略组合 (S_1, G_j) ,无论地层是否复杂,高配方案由于具备针对性耐磨网格及5个刀盘喷口等冗余设计,能有效规避喷涌风险,损失 L_{11}, L_{12} 极低;②策略组合 (S_2, G_2) ,常规方案在穿越富水砂层时,若无单管单泵的泡沫

喷口支持,极易发生喷涌及刀具严重磨损,导致 L_{22} 剧增。

3.3 评价指标量化得分核算

1) 动力特性得分 y_1

动力特性的评价核心在于扭矩冗余度 λ 。根据已有工程参数对泥质粉砂岩掘进阻力的计算,已知 T_{rated} 为 5 691kN·m 所需脱困扭矩为 4 950kN·m。

$$\lambda = \frac{T_{\text{rated}}}{T_{\text{required}}} \approx 1.15 \quad (15)$$

由于 $\lambda > 1.1$,且最大推力 42 575kN 远超地层阻力,动力储备充足,故根据式(16)核算得分 $y_1 = 88.6$ 。

$$y_1 = 100 \times [1 - e^{-k(\lambda-1)}] \quad (16)$$

式中: k 为调节系数。

2) 空间响应得分 y_2

空间响应主要考察刀盘开口率 η 对渣土排泄的适应性。针对粉砂岩易黏结的特性,实际工程中要求 $\eta \geq 40\%$ 。铁建重工土压平衡盾构机设计开口率为 43%,匹配度极高,根据式(17),计算评分 $y_2 = 85.0$ 分。

$$y_2 = 100 \times \exp\left(-k_2 \left| \frac{\eta_{\text{act}} - \eta_{\text{opt}}}{\eta_{\text{opt}}} \right|\right) \quad (17)$$

式中: k_2 为灵敏度系数,根据行业经验设定,用于将偏差映射到百分制空间,此处选用 2.2; η_{act} 为盾构机实际开口率,取 43%; η_{opt} 是地质要求的最佳开口率,取 40%。

3) 可靠性与风险防控得分 y_3

该指标是本案例的评价核心。由于标段内需进行多次常压换刀作业,方案 S_1 配置了常压换刀刀盘及强化防喷涌系统,而方案 S_2 需在富水砂层进行带压作业,失效概率剧增。根据风险损失模型,在式(18)中,估算 y_3 约为 75.0 分。

$$y_3 = 100 \times \exp(-\lambda_1 \cdot t) \times k_3 \quad (18)$$

式中: λ_1 为失效率,即单位里程内发生喷涌、开仓失败等风险事件的概率,经专家组评估,方案 S_2 在无常压换刀保障下的失效率 $\lambda_{12} = 0.24$,而铁建重工土压平衡盾构机因设备针对性设计,失效率降至 $\lambda_{11} = 0.08$; t 为作业时间或风险暴露长度,在本盾构工程中,指代在特定风险地层(富水砂层)中持续掘进的里程,取 1.2km; k_3 为修正系数,代表“维修难易度”,取 0.82。

4) 渣土改良得分 y_4

y_4 属于功能配置评价指标,由于涉及多个硬件(泡沫、泵、喷口),通常采用线性加权评分模型,计算方法见式(19):

$$y_4 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot s_i \quad (19)$$

式中: a_i 为改良系统内部子因子的权重; s_i 为各项配置的实测得分。

在渣土改良评价过程中,对硬件配置、系统稳定性及工艺匹配度 3 个维度进行综合评估。经过对标验收规范并结合专家组评估,对各指标权重评分,最终渣土改良得分 y_4 如表 2 所示。

表 2 渣土改良评分细则

评估维度	子指标含义	权重 a_i	评分 s_i	加权得分
覆盖能力	5 组独立喷口布置覆盖度	0.4	85	34.0
输送稳定性	单管单泵压力恒定性	0.3	80	24.0
工艺匹配度	针对粉砂岩的搅拌与响应	0.3	80	24.0
y_4	加权求和	1.0	—	82.0

5) 经济与资源保障性得分 y_5

结合南昌轨道交通 4 号线的实际情况,施工单位设备管理部门在选型初期面临自有机型改造与铁建重工定制采购的选择。将拆解为 3 个子指标,根据专家打分及客观资金约束得出最终经济与资源保障性得分 y_5 如表 3 所示。

表 3 经济与资源保障的评分细则

评估维度	评分依据	权重 a_i	评分 s_i	加权得分
资源持有度	单位库内无现成适应此类地层的闲置机型,需向铁建重工新购,但可利用部分旧件循环	0.3	70	21.0
财务承受力	通过厂家提供的“融资租赁”方案,首付压力大幅降低,购买力评价较高	0.4	85	34.0
获取时效性	厂家承诺在标段开工前完成交付,时间匹配度良好	0.3	80	24.0
y_5	加权求和	1.0	—	79.0

3.4 综合评价结果核算

结合通过 CRITIC-AHP 模型算得的组合权重向量 $\omega^* = [0.25, 0.12, 0.30, 0.13, 0.20]$,根据式(7)计算方案 S_1 的综合适应性评分: $G = 0.25 \times 88.6 + 0.12 \times 85.0 + 0.30 \times 75.0 + 0.13 \times 82.0 + 0.20 \times 79.0 = 81.3$ 。因此,方案 S_1 的综合适应性评分为 81.3 分。

3.5 基于博弈论的决策验证分析

为了验证方案 S_1 的综合适应性得分 81.3 分的

经济合理性,引入风险博弈模型进行验证。从期望收益比及对稳健性决策修正两方面进行展开。

1) 期望收益比对

根据勘察数据,本标段复杂地质(风险状态 G_2) 占比约为 15%。代入收益矩阵公式可以求得方案及方案的收益情况:

$$E(S_1) = 0.85 \times (8000 - 5500) + 0.15 \times (8000 - 5500 - 100) = 2485$$

$$E(S_2) = 0.85 \times (8000 - 4600) + 0.15 \times (8000 - 4600 - 2600) = 3010$$

2) 稳健性决策修正

虽然从纯数学期望看 $E(S_2) > E(S_1)$,但由于本项目可靠性权重 $\omega_3^* = 0.38$ 极高,需考虑收益方差。在风险状态 G_2 下,方案 S_2 的收益仅为 800 万元(极易造成亏损),而方案 S_1 收益 2400 万元。由图 1 可见,南昌轨道交通工程属于典型的“高风险厌恶”项目。决策系统在耦合了安全权重后,会偏向于选择适应性得分更高、收益波动更小的 S_1 方案。

4 结语

本文针对南昌轨道交通 4 号线复杂复合地层条件下的盾构选型难题,引入组合赋权模型与博弈论决策分析方法,开展了从指标评价到决策优化的全过程研究,得出以下主要结论。

1) 构建多维度耦合的盾构适应性评价体系。针对南昌地区泥质粉砂岩结泥饼与富水砂层喷涌问题,从动力特性、空间响应、可靠性与风险防控、渣土改良以及经济与资源 5 个准则实现定性经验选型向定量科学评估的转化。

2) 提出 CRITIC-AHP 组合赋权模型,识别选型核心要素。研究表明在复合地层中可靠性指标权重达 0.38,验证了该模型在平衡专家经验与数据客观性方面的优势。

3) 基于博弈论揭示盾构选型稳健决策机制,通过构建建设方与地质环境的博弈收益矩阵,得出临界风险概率为 36%,证明高配方案在耦合安全权重与风险损失后,其期望收益更优。

4) 盾构选型是技术性能与施工资源博弈的结果。通过成本敏感分析验证铁建重工土压平衡盾构机在南昌轨道交通 4 号线的适用性,其综合适应性得分达 81.3 分,有效解决泥饼与排土难题,为类似地层提供选型参考。

参考文献:

[1] HU Y, LEI H Y, ZHENG G, et al. Assessing the deformation response of double-track overlapped tunnels using numerical

simulation and field monitoring [J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2022, 14(2): 436-447.

[2] XU W, SU F M, LIU J, et al. Intelligent control and optimization of shield tunneling machines in tunnel construction: insights from excavation parameter data analysis and interpretable machine learning [J]. Advanced engineering informatics, 2026, 71: 104270.

[3] 陈凡,何川,黄钟晖,等. 地铁区间隧道多模式掘进设备选型适应性研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 53-62.

CHEN F, HE C, HUANG Z H, et al. Study on the adaptability and selection of multi-mode tunnelling equipment for subway tunnels [J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(3): 53-62.

[4] 詹金武,李涛,李超. 基于人工智能的 TBM 选型适应性评价决策支持系统[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3258-3271.

ZHAN J W, LI T, LI C. Decision support system of adaptability evaluation for TBM selection based on artificial intelligence [J]. Journal of China coal society, 2019, 44(10): 3258-3271.

[5] 秦佳佳. 合肥地区复合地层盾构掘进参数控制研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(3): 435-443.

QIN J J. Study on parameters control of shield tunneling in composite strata in Hefei area [J]. Tunnel construction, 2020, 40(3): 435-443.

[6] 罗飞飞,徐刚. 基于模糊层次分析法的地铁隧道施工风险评价模型及其应用[J]. 建筑科技, 2025, 9(11): 20-23, 32.

LUO F F, XU G. Research on a risk assessment model for subway tunnel construction based on fuzzy analytic hierarchy process and its application [J]. Building technology, 2025, 9(11): 20-23, 32.

[7] 何继平,郭宏,刘世成. 基于模糊层次分析法的盾构隧道裂缝评估探究[J]. 建材发展导向, 2025, 23(17): 79-81.

HE J P, GUO H, LIU S C. Study on crack evaluation of shield tunnel based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Development guide to building materials, 2025, 23(17): 79-81.

[8] 郝小霞. 基于 AHP+熵权法的隧道围岩稳定性评价及支护方案优化[J]. 铁道建筑技术, 2025(12): 164-167, 173.

HAO X X. Evaluation and supporting scheme optimization of tunnel surrounding rock stability based on AHP+Entropy weight method [J]. Railway construction technology, 2025(12): 164-167, 173.

[9] 王伟,王兴,刘丹娜,等. 基于博弈论与可拓云的盾构掘进安全稳定性评价[J]. 公路交通科技, 2024, 41(2): 148-157.

WANG W, WANG X, LIU D N, et al. Safety stability assessment on shield tunneling based on game theory and extension cloud [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2024, 41(2): 148-157.

[10] LIN L K, XIA Y M, WU D. A hybrid fuzzy multiple criteria decision-making approach for comprehensive performance evaluation of tunnel boring machine disc cutter [J]. Computers & industrial engineering, 2020, 149: 106793.

[11] XIE J C, FU J Y, WANG H Y, et al. Intelligent shield machine selection for subway tunnel using machine learning [J]. Automation in construction, 2025, 180: 106492.