

doi: 10.16112/j.cnki.53-1223/n.2020.02.017

多元联系数法在高速公路 PPP 项目 风险评价中的应用

王松江^{1,2}, 陈中奎²

(1. 昆明理工大学 城市学院, 云南 昆明 650051; 2. 昆明理工大学 管理与经济学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 为提升高速公路 PPP 项目风险评估的准确性, 引入集对理论中的多元联系数法, 将所研究风险因素中的确定性和不确定性作为一个整体系统进行处理. 在考虑专家经验, 构建常规层次分析的基础上, 创新结合集对理论中的三元联系数法, 将模糊的区间权重转化为精确的权重值. 在精确赋权基础上, 构建基于集对理论的同异反五元联系数风险评价模型, 在监测评估现有风险态势的同时, 对项目未来风险发生趋势给予合理的预测, 从而实现项目全生命周期风险的动静结合分析. 最后以云南省某高速公路 PPP 项目为例, 通过详细的计算分析, 将所得结果与实地情况进行对比, 验证了该模型在 PPP 项目风险态势及趋势评估中的可行性和有效性.

关键词: PPP 项目; 集对理论; 多元联系数; 风险评价

中图分类号: X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-855X(2020)02-0130-13

Application of Multivariate Connection Number Method in Risk Assessment of Expressway PPP Project

WANG Songjiang^{1,2}, CHEN Zhongkui²

(1. City College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;

2. Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of risk assessment of expressway PPP projects, the multivariate connection number method in set pair theory is introduced, and the certainty and uncertainty of the risk factors studied are treated as a whole system. On the basis of considering the expert experience and constructing the conventional analytic hierarchy, the innovation combines the ternary connection number method in the set theory to convert the fuzzy interval weight into the precise weight value. Based on precise weighting, the risk assessment model of identical, different and inverse five-element connection number based on set pair theory is constructed. While monitoring and evaluating the existing risk situation, reasonable prediction is given to the future risk occurrence trend of the project in order to realize the combination of dynamic and static analysis of the project life cycle risk. Finally, taking a PPP project of a expressway in Yunnan province as an example, the feasibility and effectiveness of the model in the assessment of PPP project risk situation and trend are verified by comparing the obtained results with the actual situation through detailed calculation and analysis.

Key words: PPP project; set pair theory; multiple connection number; risk assessment

收稿日期: 2019-08-29. 基金项目: 国家自然科学基金项目(71964018); 云南省哲学社会科学规划重点项目(ZDZZD201806).

作者简介: 王松江(1960-), 男, 硕士, 教授, 博士生导师. 主要研究方向: 项目管理. E-mail: richard777wang@163.com
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引言

为有效激发民间资本投资活力, 推动国内经济高效快速发展, 各部委陆续出台政策和规范性文件, 支持政府和社会资本合作模式的应用及推广, 目前, PPP 模式广泛应用于各大领域, 如基础设施、交通运输、水利、医疗等。截止 2019 年 4 月 30 日, 根据全国 PPP 综合信息平台项目管理库统计数据, 交通运输领域入库项目 1 270 个, 投资额累计 40 968 亿元, 占 PPP 项目管理库总投资额 30.3%, 且仍处于高速增长阶段^[1]。高速公路作为交通运输领域的主体部分, 其投入资金大、技术要求高、耗费时间长, 随时可能因各种风险因素导致 PPP 项目提前终止, 因此深入开展高速公路 PPP 项目风险评价研究工作, 对于减轻高速公路 PPP 项目合作各方顾虑, 推广 PPP 模式在高速公路的应用具有重大意义。

目前, 国内外对 PPP 项目风险评价研究已经取得一定成果: 张翔利用层次分析法对影响城市轨道交通 PPP 项目指标进行排序, 并利用 DEMATEL 法对指标间相互影响程度进行分析^[2]。赵辉等利用 PCA 和基于 GA 改进的 BP 神经网络对某省 15 条高速公路进行融资风险评价^[3]。Yelin xu 等采用模糊综合评价法对识别出的 17 个关键风险进行排序和评价^[4]。lakshya kumar 等通过构建基于蒙特卡洛模拟下的 NPV 风险分析工具对公路基础设施 PPP 项目的关键财务风险因素进行识别和分析^[5]。Yunna Wu 等运用二维语言变量和云 Choquet 积分算子构建了 WTE 中 PPP 项目的风险评估框架^[6]。以上研究方法在高速公路 PPP 项目风险评价中起到一定作用, 但对于项目风险评价仍然存在一定局限性, 既没有将项目中确定和不确定因素同时进行考虑和处理, 也没有对风险的发展趋势进行有效的预测和分析。

集对理论是对研究对象确定不确定关系的一种系统分析方法, 通过联系度实现对随机、模糊、不确定信息的动态综合评价。目前该方法已经在航空、生态、矿业、教育等领域得以应用^[7-10]。而高速公路 PPP 项目是一个复杂的综合系统, 其涉及政府方、社会资本方、金融机构、民众等, 对复杂系统的风险评价不可避免地会出现评价者的主观随意性, 此主观随意性属于一种不确定范畴, 包含模糊、随机、中介和信息不完全等所导致的不确定性, 而部分研究量亦属于确定性范畴, 故需要采用确定不确定的量加以描述, 此为集对理论之核心。因此, 本文将集对理论引入到高速公路 PPP 项目风险评估中, 将不确定层析分析法与集对分析中的三元联系系数结合确定风险指标权重, 从而构建基于集对理论的同异反五元联系系数的高速公路 PPP 项目风险评估模型, 不仅监测评估项目现有的风险态势, 更对项目风险发生的趋势做出合理的预测, 实现对高速公路 PPP 项目全生命周期风险的静态和动态结合分析。

1 集对理论与联系度

1.1 集对理论与三元联系度

集对理论^[11]是一种处理确定不确定性问题的系统研究方法, 能解决由模糊、中立、随机和信息不完全造成的不确定性问题的有效工具。其核心思想在于将研究对象的确定和不确定性组成一个系统, 利用待评对象现状与理想愿景之间的联系系数来评价该系统。

集对即对研究对象有联系的两个集合所构成的对子, 如 $M = (A, B)$, 假设 M 集对中共有 N 个特性, 其中 A 和 B 集合中具有相同特性数量为 α , 具有相互对立特性数量为 γ , 有 β 个既不相同也不对立的特性数, 可构建如下公式:

$$\mu = \frac{\alpha}{N} + \frac{\beta}{N}i + \frac{\gamma}{N}j$$

式中: 称 μ 为同异反联系度, 简称联系度。若令 $\alpha/N = a$, $\beta/N = b$, $\gamma/N = c$, 可将上式简化如下:

$$\mu = a + bi + cj \quad (1)$$

(1) 式称为三元联系度^[12]。式中: μ 代表两集合 A, B 的联系总程度, 简称联系度, 由表达式可知, 联系度 μ 分别从两集合 (A, B) 的同一、差异和对立三个方面来研究整个系统的确定不确定关系及其相互作用。其中 a, b, c 分别为同一度分量、差异度分量和对立度分量, $a + b + c = 1$, 且 $a, b, c \in [0, 1]$, 规定 i 为差异度标记系数 $i \in [-1, 1]$, j 为对立度标记系数 $j = -1$ 。两集合的同异反关系可以用图 1 表示。

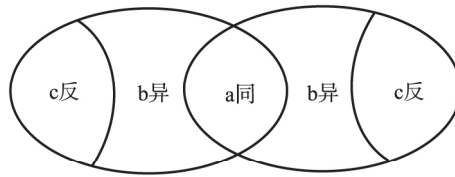


图1 同异反关系图

Fig.1 The relation chart of IDC

1.2 五元和偏联系度

1) 五元联系数

由于三元联系数式(1)中的 b_i 项能同时体现不确定性联系可以在一定条件下确定和一般条件下不能确定的两面性,故将 b_i 项展开,形成多元联系数:

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + \dots + b_n i_n + c_j \quad (2)$$

当 $n = 3$ 时,得到五元联系数^[13]:

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + b_3 i_3 + c_j \quad (3)$$

上式简记为:

$$\mu = a + bi + cj + dk + el \quad (4)$$

其中: $a, b, c, d, e \in [0, 1]$, $a + b + c + d + e = 1$, $i \in [0, 1]$, j 为中性标记, k 属于 $[-1, 0]$, $l = -1$, a, b, c, d, e 具备层次性.在实际应用中,正是因为各联系分量在空间位置中从正到负的优先顺序 $a > b > c > d > e$,“>”为“正于”特性,此优序特性可将五元联系数和高速公路PPP项目风险评价中的风险等级相对应,故上式中的各联系分量可以代表风险评估等级, a, b, c, d, e 可分别刻画低、较低、中、高、较高的风险等级.

2) 偏联系数

联系数作为一种结构函数,其形象描述研究对象在同异反三大趋势下确定不确定联系的状态.而由联系数推导的伴随函数称为偏联系数,其反应了研究对象在同异反确定不确定联系状态的发展趋势.根据多元联系数的偏联系数定义,得到五元联系数 $\mu = a + bi + cj + dk + el$.

各阶偏联系数:

一阶偏联系数:

$$\partial\mu = \partial a + i\partial b + j\partial c + k\partial d \quad (5)$$

$$\text{式中: } \partial a = \frac{a}{a+b}, \partial b = \frac{b}{b+c}, \partial c = \frac{c}{c+d}, \partial d = \frac{d}{d+e}.$$

二阶偏联系数:

$$\partial^2\mu = \partial(\partial\mu) = \partial^2 a + i\partial^2 b + j\partial^2 c \quad (6)$$

$$\text{式中: } \partial^2 a = \frac{\partial a}{\partial a + \partial b}, \partial^2 b = \frac{\partial b}{\partial b + \partial c}, \partial^2 c = \frac{\partial c}{\partial c + \partial d}.$$

三阶偏联系数:

$$\partial^3\mu = \partial^2(\partial\mu) = \partial^3 a + i\partial^3 b \quad (7)$$

$$\text{式中: } \partial^3 a = \frac{\partial^2 a}{\partial^2 a + \partial^2 b}, \partial^3 b = \frac{\partial^2 b}{\partial^2 b + \partial^2 c}.$$

四阶偏联系数:

$$\partial^4\mu = \partial^3(\partial\mu) = \partial^4 a \quad (8)$$

$$\text{式中: } \partial^4 a = \frac{\partial^3 a}{\partial^3 a + \partial^3 b}.$$

偏联系数可以反映研究对象确定不确定联系的发展趋势,从以上偏联系数的定义可知,偏联系数可以判定高一等级风险和低一级风险之间循环演变的程度,可以刻画风险的潜在发展趋势.当 $\partial^i\mu$ 大于0时,表明

未来风险发展呈降低趋势, 待评对象呈向好发展趋势; 当 $\partial^i \mu$ 小于 0 时, 表明未来风险发展呈上升趋势, 待评对象呈向差发展趋势; 当 $\partial^i \mu$ 等于 0 时, 表明未来风险发展趋势不确定, 待评对象兼有上升、下降或中间过渡趋势.

2 基于五元联系数集对分析的风险评价模型

基于五元联系数集对分析的风险评价可按如下五个步骤.

2.1 构建风险评价体系

为确保信息的真实性, 本文通过实际调研问卷的方法确定风险指标体系, 调查云南省内典型高速公路 PPP 项目点 6 处, 问卷参与者主要包括各项目指挥部、相关政府部门、项目实地建设者和相关单位工作人员等, 在问卷基础上, 结合高速公路 PPP 项目的特点和相关文献 [14 - 18], 对影响高速公路 PPP 项目的因素进行分类和筛选, 对所识别到的风险因素出现频率进行排序, 从而建立了高速公路 PPP 项目风险评价体系, 如表 1 所示.

表 1 高速公路 PPP 项目风险评价体系

Tab.1 Risk assessment system of expressway PPP project

| 目标层 | 准则层 | 指标层 |
|--------------------|------------|---|
| 高速公路 PPP 项目风险状态 | 融资风险 u_1 | 融资能力 u_{11} 、信用担保 u_{12} 、利率变动 u_{13} 、融资结构 u_{14} 、 |
| | 市场风险 u_2 | 原材料价格 u_{21} 、车流量 u_{22} 、新竞争者 u_{23} 、收费标准变动 u_{24} |
| | 政治风险 u_3 | 政策变更 u_{31} 、政策执行不力 u_{32} 、政府信用 u_{33} 、审批延误风险 u_{34} |
| | 建设风险 u_4 | 土地拆迁 u_{41} 、工期延误 u_{42} 、工程质量 u_{43} 、成本超概 u_{44} 、技术难题 u_{45} |
| | 运营风险 u_5 | 财政补贴 u_{51} 、收费标准变动 u_{52} 、运营成本超支 u_{53} 、收益不足 u_{54} 、运营能力 u_{55} |
| | 外部环境 u_6 | 公众反对 u_{61} 、环境安全 u_{62} 、合同完备 u_{63} 、不可抗力 u_{64} |

2.2 确定风险指标等级

依据国家行业标准规定《风险管理风险评估技术》^[19], 可将高速公路 PPP 项目风险指标因素划分为五个等级, 以便相关专家对风险因素进行评价, 现将 [0, 1] 五等份划分并与风险等级相对应形成风险等级标准, 见表 2.

表 2 PPP 项目风险等级

Tab.2 Risk level of PPP project

| 风险等级 | 风险评语 | 评分区间 | 风险说明 |
|------|------|------------|-----------|
| I | 低风险 | [0, 0.2) | 可以忽略 |
| II | 较低风险 | [0.2, 0.4) | 基本可以接受 |
| III | 中等风险 | [0.4, 0.6) | 可接受但需引起重视 |
| IV | 较高风险 | [0.6, 0.8) | 不可接受需采取措施 |
| V | 高风险 | [0.8, 1] | 不可接受需强制改进 |

2.3 计算各级风险指标权重

2.3.1 确定指标权重区间

由于高速公路 PPP 项目投入资金大, 项目历时长, 涉及利益相关群体多的特点, 使得其面临的风险因素繁多, 各风险之间又相互依存、相互作用, 使得风险权重的分配具有一定的随机性和模糊性, 因此选用不确定层次分析法^[20] 来对风险因素的权重区间进行判定.

1) 构造区间数和判断矩阵

假设评价对象某一准则层下的指标层共有 n 个因素, 则可构造集合 $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$. 邀请多位专家运用 1 ~ 9 比例标度法^[21] 对集合 A 中任意两指标相互重要度进行比较, 评价结果用区间 $[a_{ij}, b_{ij}]$ 表示. 以

区间评价为基础构造判断矩阵 A^* ,且 $A_{ij}^{*(k)} = [a_{ij}^{(k)} \ b_{ij}^{(k)}]$,式中 $i, j, \in [1, n]$ 且为 N^+ $k \in [1, s]$ 表示专家序数 a_{ij} 和 b_{ij} 分别为两指标间重要程度的上限和下限.

2) 确定专家权重

考虑到所邀专家职称、工作时间、工作经验和对具体项目了解程度的不同,赋予所邀专家影响程度一定权重,评价体系如表 3.

表 3 专家权重体系
Tab.3 Expert weight indexes

| 指标 | 分指标(职称) | | | | |
|-----------------|---------|-------|--------|---------|-------|
| | 其他 | 初级 | 中级 | 副教授 | 教授或高工 |
| 从事高速公路 PPP 项目时间 | < 2 | 2 ~ 5 | 5 ~ 10 | 10 ~ 15 | > 15 |
| 对风险评价及相关理论的认识 | 不大了解 | 了解一点 | 比较了解 | 较熟悉 | 非常熟悉 |
| 对具体项目的了解程度 | 不大了解 | 了解一点 | 比较了解 | 较熟悉 | 非常熟悉 |
| 分指标分值 | 1 | 3 | 6 | 8 | 10 |
| 分指标归一化权重 | 0.036 | 0.107 | 0.214 | 0.286 | 0.357 |

基于以上专家权重体系,给予各专家判断矩阵如下赋权:

$$\beta_i^* = (\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_s) \quad i \in [1, s] \text{ 且为 } N^+ \tag{9}$$

3) 构建区间和一致性判断矩阵

在各专家权重 $\beta_i^* = (\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_s)$ 基础上,整合各专家 $A_{ij}^{*(k)}$ 判断矩阵,得到合并后满足互反性的不确定区间判断矩阵 $M = M_{ij} = (m_{ij})_{n \times n}$ $m_{ij} = (x_{ij} \ y_{ij})$.

其中:

$$M = \sum_{k=1}^s \beta_k \cdot A_{ij}^{*(k)}$$

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^s \beta_k^* \cdot a_{ij}^k \quad y_{ij} = \sum_{k=1}^s \beta_k^* \cdot b_{ij}^k \tag{10}$$

具体如下:

$$M = \begin{bmatrix} [1, 1] & [x_{12}, y_{12}] & \dots & [x_{1n}, y_{1n}] \\ [\frac{1}{y_{12}}, \frac{1}{x_{12}}] & [1, 1] & \dots & [x_{2n}, y_{2n}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [\frac{1}{y_{1n}}, \frac{1}{x_{1n}}] & [\frac{1}{y_{2n}}, \frac{1}{x_{2n}}] & \dots & [1, 1] \end{bmatrix} \tag{11}$$

针对区间判断矩阵 M ,为了得到其权重向量,取:

$$Z = (z_{ij})_{n \times n} = \sqrt[2n]{\prod_{k=1}^n \frac{x_{ik} \cdot y_{ik}}{x_{jk} \cdot y_{jk}}} \tag{12}$$

$$W_j = \frac{\sqrt[2n]{\prod_{k=1}^n x_{jk} \cdot y_{jk}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[2n]{\prod_{k=1}^n x_{ik} \cdot y_{ik}}} \tag{13}$$

则称 Z 为满足互反性的一致性确定判断矩阵,称 W_j 为一致性确定判断矩阵 Z 的权重向量,式中: $i, j = 1, 2, \dots, n$.

4) 修正指标权重

考虑到不确定区间判断矩阵 M 演变到一致性确定判断矩阵 Z 存在一定误差,进而得出的权重向量 W_j 存在处理误差,故由 (3) 中的区间判断矩阵 M 和一致性确定判断矩阵 Z 可求得极差矩阵 $\Delta_k Z_j$,对权重向量 W_j 进行修正:

$$\begin{aligned} \Delta_1 Z_{ij} &= z_{ij} - a_{ij} \\ \Delta_2 Z_{ij} &= b_{ij} - z_{ij} \end{aligned} \quad (14)$$

进而可求极差矩阵 $\Delta_k Z_{ij}$ 的权重 $\Delta_k W_j$:

$$\Delta_k W_j = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n z_{ij}\right)^{-4} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta_k z_{ij})^2} \quad \text{其中 } k = 1, 2 \quad (15)$$

故由式(14)(15)可以得到修正的评价指标集 A 的权重区间 \bar{W}_j :

$$\bar{W}_j = ([w_1^-, \mu w_1^+], [w_2^-, \mu w_2^+], \dots, [w_n^-, \mu w_n^+]) \quad (16)$$

式中: $w_j^- = w_j - \Delta_1 w_j$, $\mu w_j^+ = w_j + \Delta_2 w_j$, $j \in [1, n]$ 且 N^+ .

2.3.2 利用三元联系数求精确权重值

因不确定层次分析法只能求得评价指标模糊的权重区间值,得不到精确权重,故可利用三元联系数来从同一、差异、对立三个角度描述其区间值,综合考虑确定不确定两方面来计算评价指标精确权重值.由于 w_j^- 中的 $w_i^-, \mu w_i^+ \in [0, 1]$,故考虑建立权重区间 w_j^- 与区间 $[0, 1]$ 两者的集对:

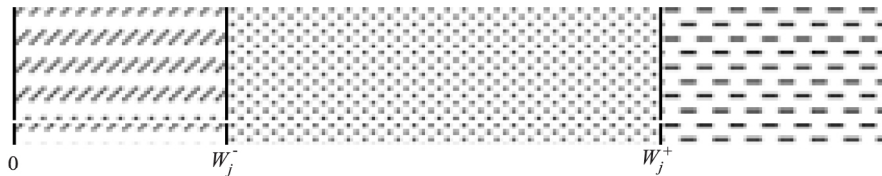


图2 权重区间集对图
Fig.2 Set pair graph of weight range

组成集对后的三元联系数表达式为:

$$\mu = a_j + b_j i + c_j = w_j^- + (w_j^+ - w_j^-) i + (1 - w_j^+) j \quad (17)$$

式中: $a_j = w_j^-$ 表示同一性度量指标,表示所评价的权重区间确定可以达到的程度; $b_j = w_j^+ - w_j^-$ 表示差异性度量指标,表示所评价权重区间不可以确定是否能达到的程度; $c_j = 1 - w_j^+$ 表对立性度量指标,表示所评价权重区间确定不可以达到的程度.

因此可以用确定性和不确定性两个部分来计算评价指标的权重^[22],对于确定性部分,可以用 $1 + a_j - c_j$ 来反映所评价对象确定性区间的相对权重,并进行归一化处理得到 p_j ;对于不确定性部分,由于 b_j 越大,评价对象权重的不确定区间越大,对最终权重的贡献度越小,因此可以用 $1 - b_j$ 来评价对象不确定区间的相对权重,并进行归一化处理得到 q_j :

$$p_j = \frac{1 + a_j - c_j}{\sum_{k=1}^n 1 + a_k - c_k} \quad q_j = \frac{1 - b_j}{\sum_{k=1}^n (1 - b_k)} \quad (18)$$

将确定性区间与不确定区间相对权重组合,以如下综合权重公式计算评估指标权重精确值 w_j^* :

$$w_j^* = \frac{p_j \cdot q_j}{\sum_{k=1}^n p_k \cdot q_k} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

2.4 构建同异反风险评价模型

假设某一风险集 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$,邀请 k 位相关专家对每一风险因素 $\mu_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 按照“低风险、较低风险、中等风险、较高风险、高风险”评语进行风险等级评价,利用公式 $r_{ij} = \frac{N_{ij}}{N}$ (其中 N 为专家总人数, N_{ij} 为将风险因素 μ_i 归为风险等级 j 的专家人数)得到风险评价矩阵 R ,同时结合风险集 μ 的精确权重矩阵 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 和风险系数矩阵 $E = (1, i, j, k, l)$,得到五元联系数同异反风险评价模型:

$$\mu = W \cdot R \cdot E^4$$

$$\begin{aligned}
&= (w_1, w_2, \dots, w_n) \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} & r_{n5} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ j \\ k \\ l \end{pmatrix} \\
&= \sum_{k=1}^n w_k \cdot r_{k1} + \sum_{k=1}^n w_k \cdot r_{k2} \cdot i + \sum_{k=1}^n w_k \cdot r_{k3} \cdot j + \sum_{k=1}^n w_k \cdot r_{k4} \cdot k + \sum_{k=1}^n w_k \cdot r_{k5} \cdot l \quad (20)
\end{aligned}$$

可简化为五元联系数:

$$\mu = a + bi + cj + dk + el \quad (21)$$

式中: μ 代表综合联系数, 按照集对理论和数据实际意义可知: $a = \sum_{k=1}^n w_k \cdot r_{k1}$ 为同一度分量, 代表所测风险因素处于“低风险”的程度; $b = \sum_{k=1}^n w_k \cdot r_{k2}$ 为差异度偏同分量, 代表所测风险因素处于“较低风险”的程度; $c = \sum_{k=1}^n w_k \cdot r_{k3}$ 为差异度居中分量, 代表所测风险因素处于“中等风险”的程度; $d = \sum_{k=1}^n w_k \cdot r_{k4}$ 为差异度偏反分量, 代表所测风险因素处于“较高风险”的程度; $e = \sum_{k=1}^n w_k \cdot r_{k5}$ 为对立分量, 代表所测风险因素处于“高风险”的程度. 其中 a, e 为确定项, b, c, d 均为不确定项.

2.5 风险态势及趋势分析

依据五元联系数 $\mu = a + bi + cj + dk + el$ 中各系数大小关系, 可利用五元联系数集对势对风险因素现有态势分析. 利用五元偏系数的集对势对风险因素未来发展趋势给予分析评价, 以风险“低”为理想集作为参照, 由实际意义知 a 代表风险“低”的数值, 则同一度 a 和对立度 e 的比值可以表示所研究对象在现状和理想状态的同异反趋势情况, 定义为集对势, 记 $shi(\mu) = a/e$.

依据集对势原理可将系统风险化为同势、均势和反势. 当 $shi(\mu) > 1$ 时, 称为同势, 表示系统现有风险与理想状态具备同一趋势, 表明系统现有风险态势处于“低”等级, 此时可重点关注偏联系数中处于反势的风险因素; 当 $shi(\mu) = 1$, 称为均势, 表明系统现有风险与理想状态处于“势均力敌”状态, 表示系统现有风险态势处于“中”等级, 此时应重视该风险因素, 并依据其偏系数的态势做出选择; 当 $shi(\mu) < 1$ 时, 成为反势, 表示系统现有风险与理想状态差距较大, 处于反面对立态势, 表明系统现有风险态势处于“高风险”等级, 此时应重点关注处于反势区的风险因素, 并采取措施使其向同势区转化.

3 实例分析

以云南省 S 市某高速公路 PPP 项目为例, 进行实例分析. 由财政部政府和社会资本合作中心公开资料 and 实际走访得知, 该项目于 2015 年 1 月发起, 总投资 194.4 亿元, 占地约 11 000 余亩, 路线全长 158.765 km, 设计时速 80 km/h, 属于国家和省级示范项目. 基于五元系数的同异反风险评价模型对该项目的进行分析与评价, 将得到的评价结果与实地调研情况进行比对, 以此来验证该模型的有效性.

以一级准则层指标“建设风险”为例, 说明方法具体过程.

3.1 确定风险指标权重

1) 构造区间数和判断矩阵

针对我国高速公路 PPP 项目风险评价, 邀请政府方 A_1 、社会资本 A_2 、项目公司 A_3 、建设部 A_4 、运营部 A_5 各领域相关专家一名, 相互独立的对风险指标间的相互重要程度进行比较打分, 运用 1 ~ 9 比例标度法对指标层建设风险因素 u_k “土地拆迁” “工期延误” “工程质量” “成本超概” “技术难题” 两两比较, 形成区间数和判断矩阵 $A^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3, 4, 5$) 如下所示:

$$\begin{aligned}
 A^{(1)} &= \begin{bmatrix} [1, 1] & [6, 8] & [2, 4] & [5, 7] & [3, 5] \\ [1/8, 1/6] & [1, 1] & [1/4, 1/2] & [1/4, 1/3] & [1/4, 1/2] \\ [1/4, 1/2] & [2, 4] & [1, 1] & [5, 7] & [7, 9] \\ [1/7, 1/5] & [3, 4] & [1/7, 1/5] & [1, 1] & [3, 5] \\ [1/5, 1/3] & [2, 4] & [1/9, 1/7] & [1/5, 1/3] & [1, 1] \end{bmatrix} \\
 A^{(2)} &= \begin{bmatrix} [1, 1] & [7, 9] & [3, 5] & [5, 6] & [4, 5] \\ [1/9, 1/7] & [1, 1] & [1/4, 1/2] & [1/3, 1/2] & [1/2, 1] \\ [1/5, 1/3] & [2, 4] & [1, 1] & [6, 8] & [7, 8] \\ [1/6, 1/5] & [2, 3] & [1/8, 1/6] & [1, 1] & [3, 4] \\ [1/5, 1/4] & [1, 2] & [1/8, 1/7] & [1/4, 1/3] & [1, 1] \end{bmatrix} \\
 A^{(3)} &= \begin{bmatrix} [1, 1] & [7, 9] & [2, 4] & [5, 6] & [3, 5] \\ [1/9, 1/7] & [1, 1] & [1/2, 1] & [1/5, 1/3] & [1/6, 1/4] \\ [1/4, 1/2] & [1, 2] & [1, 1] & [5, 7] & [6, 8] \\ [1/6, 1/5] & [3, 5] & [1/7, 1/5] & [1, 1] & [3, 5] \\ [1/5, 1/3] & [4, 6] & [1/8, 1/6] & [1/5, 1/3] & [1, 1] \end{bmatrix} \\
 A^{(4)} &= \begin{bmatrix} [1, 1] & [7, 9] & [3, 5] & [4, 6] & [5, 6] \\ [1/9, 1/7] & [1, 1] & [1/8, 1/6] & [1/5, 1/3] & [1/2, 1] \\ [1/5, 1/3] & [6, 8] & [1, 1] & [3, 5] & [6, 8] \\ [1/6, 1/4] & [3, 5] & [1/5, 1/3] & [1, 1] & [5, 6] \\ [1/6, 1/5] & [1, 2] & [1/8, 1/6] & [1/6, 1/5] & [1, 1] \end{bmatrix} \\
 A^{(5)} &= \begin{bmatrix} [1, 1] & [6, 8] & [3, 5] & [5, 7] & [3, 5] \\ [1/8, 1/6] & [1, 1] & [1/2, 1] & [1/6, 1/4] & [1/5, 1/3] \\ [1/5, 1/3] & [1, 2] & [1, 1] & [5, 7] & [7, 9] \\ [1/7, 1/5] & [4, 6] & [1/7, 1/5] & [1, 1] & [3, 5] \\ [1/5, 1/3] & [3, 5] & [1/9, 1/7] & [1/5, 1/3] & [1, 1] \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

2) 确定专家权重

在构建判断矩阵的基础上, 考虑到各评估专家的工作时间、经验程度、职称及对本项目了解程度, 确定各位专家影响程度权重值并进行归一化处理, 依据表 3 评价体系得到每位专家评估结果实际权重 $\alpha_k = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5] = [0.20 \ 0.22 \ 0.26 \ 0.18 \ 0.14]$.

3) 构建区间和一致性判断矩阵

在初始区间矩阵和专家权重的基础上, 依据式(10), 其中 $\alpha_k = (0.20 \ 0.22 \ 0.26 \ 0.18 \ 0.14)$, 进而得到不确定区间判断矩阵 A^* :

$$A^* = \begin{bmatrix} [1.000, 1.000] & [6.660, 8.660] & [2.540, 4.540] & [4.820, 6.340] & [3.580, 5.180] \\ [0.116, 0.151] & [1.000, 1.000] & [0.328, 0.640] & [0.235, 0.358] & [0.321, 0.612] \\ [0.223, 0.410] & [2.320, 3.920] & [1.000, 1.000] & [4.860, 6.860] & [6.560, 8.340] \\ [0.159, 0.209] & [2.920, 4.500] & [0.149, 0.217] & [1.000, 1.000] & [3.360, 4.960] \\ [0.194, 0.291] & [2.260, 3.860] & [0.120, 0.153] & [0.205, 0.309] & [1.000, 1.000] \end{bmatrix}$$

在不确定区间判断矩阵 A^* 的基础上, 根据式(12)和(13), 可以得到一致性判断矩阵 Z_{ij} 和其权重向量 W_j :

$$Z_{ij} = \begin{pmatrix} 1.00 & 9.52 & 1.73 & 4.17 & 7.60 \\ 0.11 & 1.00 & 0.18 & 0.44 & 0.80 \\ 0.58 & 5.50 & 1.00 & 2.40 & 4.40 \\ 0.24 & 2.28 & 0.42 & 1.00 & 1.83 \\ 0.13 & 1.25 & 0.23 & 0.55 & 1.00 \end{pmatrix}$$

$$w_j = (0.49 \ 0.05 \ 0.28 \ 0.12 \ 0.06)$$

为了验证专家打分的效度,以防出现“甲比乙重要,乙比丙重要,丙又比甲重要”的违背一致性的情况,需要对判断矩阵 Z_{ij} 进行一致性检验.

由于 n 阶正反判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max} \geq n$,且当 $\lambda_{\max} = n$ 时判断矩阵是一致的,因此可以用 $\lambda_{\max} - n$ 来衡量判断矩阵的不一致程度.一致性比率 $CR = CI/RI$,其中 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ 称为判断矩阵的一致性指标, RI 是为了确定矩阵不一致程度的允许范围而引入的随机一致性指标,可通过查表获得(当 $n = 5$ 时 $RI = 1.12$).当 $CR = 0$ 时认为判断矩阵具有完全一致性;当 $CR < 0.1$ 认为判断矩阵具有满意的一致性,不一致的程度是可以接受的;当 $CR \geq 0.1$ 认为判断矩阵不具有满意的一致性,需要重新构建判断矩阵.

$$\frac{5.0118 - 5}{5 - 1}$$

计算出判断矩阵 Z_{ij} 的最大特征根 $\lambda_{\max} = 5.0118$,则 $CR = \frac{5 - 1}{1.12} = 0.0026 < 0.1$,认为判断矩阵

Z_{ij} 具有满意的一致性,专家打分结果具有可靠的效度.同理,其他指标层风险因素的判断矩阵均通过一致性检验.

4) 确定指标权重区间

根据式(14)~(16)计算,可以得到指标层建设风险因素“土地拆迁”“工期延误”“工程质量”“成本超概”“技术难题”的权重区间:

$$W_4 = ([0.399 \ 0.543], [0.040 \ 0.061], [0.212 \ 0.506], [0.082 \ 0.185], [0.044 \ 0.087])$$

5) 确定指标权重精确值

通过三元联系度中的同一性、差异性和对立性将指标权重区间转化为指标权重精确值,具体做法将 W 指标权重区间与 $[0, 1]$ 区间组成集对,然后根据式(17)将指标权重区间转化为三元联系度表达式:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 0.399 + 0.144i + 0.457j, \mu_2 = 0.040 + 0.022i + 0.939j \\ \mu_3 &= 0.212 + 0.294i + 0.494j, \mu_4 = 0.082 + 0.103i + 0.815j \\ \mu_5 &= 0.044 + 0.043i + 0.913j \end{aligned}$$

通过式(18)可以得出待评价因素的确定性区间 P_i 和不确定性区间 q_i 的相对权重值,并进一步做归一化处理:

$$\begin{aligned} p_i &= [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5] = [0.436 \ 0.047 \ 0.333 \ 0.124 \ 0.061] \\ q_i &= [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5] = [0.195 \ 0.223 \ 0.161 \ 0.204 \ 0.218] \end{aligned}$$

最后根据式(19)得到指标层建设风险因素“土地拆迁”“工期延误”“工程质量”“成本超概”“技术难题”的权重精确值 W_4^* :

$$W_4^* = [0.454 \ 0.056 \ 0.284 \ 0.135 \ 0.071]$$

同理,依据各评估专家对高速公路风险评价体系中其他指标因素的风险区间评价,参照以上步骤,设 W_1^* 、 W_2^* 、 W_3^* 、 W_5^* 、 W_6^* 分别表示融资风险 u_1 、市场风险 u_2 、政治风险 u_3 、运营风险 u_4 、外部环境 u_5 的风险因素权重,则可以得到准则层 W^* 和各指标层 W_i^* 的权重值:

$$\begin{aligned} W^* &= [0.247 \ 0.316 \ 0.027 \ 0.143 \ 0.187 \ 0.080] \\ W_1^* &= [0.472 \ 0.169 \ 0.216 \ 0.143] \\ W_2^* &= [0.207 \ 0.394 \ 0.281 \ 0.118] \\ W_3^* &= [0.274 \ 0.191 \ 0.359 \ 0.176] \\ W_5^* &= [0.165 \ 0.197 \ 0.209 \ 0.387 \ 0.042] \\ W_6^* &= [0.423 \ 0.185 \ 0.294 \ 0.098] \end{aligned}$$

3.2 构建同异反评价模型

针对 S 高速公路实际运行情况,邀请 20 位相关专家对高速公路风险因素准则层和指标层进行风险等

级评判, 依据表 2 中 PPP 项目风险等级划分形成风险评价矩阵 R 。

本研究共发放问卷 20 份, 回收 20 份, 说明专家参与本次研究的积极性较高。由于任何专家都不可能对所有问题都是权威, 本研究从专家作出评判的依据和对高速公路风险因素的熟悉程度两方面判断专家的权威程度, 对其赋权量化取平均值后最终得到专家的权威系数为 0.86, 说明专家的评判是建立在丰富的实践经验和理论基础上的, 具有较高的可信度。将各风险等级由低到高分别赋值 1 ~ 5, 通过肯德尔协同系数计算专家的协调系数为 0.716, 卡方值为 357.98, P 值小于 0.001, 表示专家意见相当协调, 评价结果可取。

基于评价矩阵 R 和各级风险因素权重基础上, 通过式 (20) (21) 得到基于五元联系数的同异反风险评判模型, 同时基于式 (5) ~ (8) 和风险趋势评判准则, 利用 Matlab 计算出各阶的发展趋势联系数, 结果见表 4 和表 5。

表 4 风险联系数及计算表

Tab.4 Risk connection number and calculation table

| 目标层 | 准则层 | 权重 | 现状五元联系数 | | | | | 态势 | 发展趋势联系数 | | |
|---------------|--------|-------|--|----|----|----|---|----|--------------------------------|----|----|
| | | | 低 | 较低 | 中等 | 较高 | 高 | | 四元趋势联系数 | 趋势 | |
| 融资风险 0.247 | 融资能力 | 0.472 | $0.10 + 0.05i + 0.10j + 0.35k + 0.40l$ | | | | | 反势 | $0.67 + 0.33i + 0.22j + 0.47k$ | | 同势 |
| | 信用担保 | 0.169 | $0.40 + 0.25i + 0.15j + 0.10k + 0.10l$ | | | | | 同势 | $0.62 + 0.63i + 0.60j + 0.50k$ | | 同势 |
| | 利率变动 | 0.216 | $0.35 + 0.30i + 0.20j + 0.05k + 0.10l$ | | | | | 同势 | $0.54 + 0.60i + 0.80j + 0.33k$ | | 同势 |
| | 融资结构 | 0.143 | $0.50 + 0.25i + 0.15j + 0.10k + 0.00l$ | | | | | 同势 | $0.67 + 0.63i + 0.60j + 1.00k$ | | 反势 |
| | 合计 | 1.000 | $0.26 + 0.17i + 0.14j + 0.21k + 0.23l$ | | | | | 同势 | $0.63 + 0.48i + 0.46j + 0.52k$ | | 同势 |
| 市场风险 0.316 | 原材料价格 | 0.207 | $0.30 + 0.30i + 0.30j + 0.05k + 0.05l$ | | | | | 同势 | $0.50 + 0.50i + 0.86j + 0.50k$ | | 反势 |
| | 车流量 | 0.394 | $0.20 + 0.10i + 0.10j + 0.30k + 0.30l$ | | | | | 反势 | $0.67 + 0.50i + 0.25j + 0.50k$ | | 同势 |
| | 新竞争者 | 0.281 | $0.30 + 0.25i + 0.20j + 0.20k + 0.05l$ | | | | | 同势 | $0.56 + 0.56i + 0.50j + 0.80k$ | | 反势 |
| | 收费标准变动 | 0.118 | $0.25 + 0.30i + 0.25j + 0.20k + 0.00l$ | | | | | 同势 | $0.45 + 0.55i + 0.56j + 1.00k$ | | 反势 |
| | 合计 | 1.000 | $0.25 + 0.21i + 0.19j + 0.21k + 0.14l$ | | | | | 同势 | $0.57 + 0.52i + 0.48j + 0.64k$ | | 反势 |
| 政治风险 0.027 | 政策变更 | 0.274 | $0.30 + 0.25i + 0.20j + 0.15k + 0.10l$ | | | | | 同势 | $0.55 + 0.56i + 0.57j + 0.60k$ | | 反势 |
| | 政策执行不力 | 0.191 | $0.40 + 0.30i + 0.20j + 0.05k + 0.05l$ | | | | | 同势 | $0.57 + 0.60i + 0.80j + 0.50k$ | | 同势 |
| | 政府信用 | 0.359 | $0.40 + 0.20i + 0.20j + 0.10k + 0.10l$ | | | | | 同势 | $0.67 + 0.50i + 0.67j + 0.50k$ | | 同势 |
| | 审批延误风险 | 0.176 | $0.50 + 0.20i + 0.20j + 0.10k + 0.00l$ | | | | | 同势 | $0.71 + 0.50i + 0.67j + 1.00k$ | | 反势 |
| | 合计 | 1.000 | $0.39 + 0.23i + 0.20j + 0.10k + 0.07l$ | | | | | 同势 | $0.62 + 0.63i + 0.67j + 0.62k$ | | 均势 |
| 建设风险 0.143 | 土地拆迁 | 0.454 | $0.05 + 0.15i + 0.10j + 0.30k + 0.40l$ | | | | | 反势 | $0.25 + 0.60i + 0.25j + 0.43k$ | | 反势 |
| | 工期延误 | 0.056 | $0.25 + 0.25i + 0.35j + 0.05k + 0.10l$ | | | | | 同势 | $0.50 + 0.42i + 0.88j + 0.33k$ | | 同势 |
| | 工程质量 | 0.284 | $0.10 + 0.10i + 0.20j + 0.30k + 0.30l$ | | | | | 反势 | $0.50 + 0.33i + 0.40j + 0.50k$ | | 均势 |
| | 成本超概 | 0.135 | $0.00 + 0.10i + 0.10j + 0.50k + 0.30l$ | | | | | 反势 | $0.00 + 0.50i + 0.17j + 0.63k$ | | 反势 |
| | 技术难题 | 0.071 | $0.40 + 0.20i + 0.30j + 0.05k + 0.05l$ | | | | | 同势 | $0.67 + 0.40i + 0.86j + 0.50k$ | | 同势 |
| 运营风险 0.187 | 合计 | 1.000 | $0.09 + 0.14i + 0.16j + 0.30k + 0.32l$ | | | | | 反势 | $0.33 + 0.49i + 0.36j + 0.48k$ | | 反势 |
| | 财政补贴 | 0.165 | $0.40 + 0.20i + 0.20j + 0.10k + 0.10l$ | | | | | 同势 | $0.67 + 0.50i + 0.67j + 0.50k$ | | 同势 |
| | 收费标准变动 | 0.197 | $0.35 + 0.30i + 0.20j + 0.10k + 0.05l$ | | | | | 同势 | $0.58 + 0.56i + 0.67j + 0.50k$ | | 同势 |
| | 运营成本超支 | 0.209 | $0.25 + 0.30i + 0.20j + 0.10k + 0.15l$ | | | | | 同势 | $0.45 + 0.60i + 0.67j + 0.40k$ | | 同势 |
| | 收益不足 | 0.387 | $0.10 + 0.20i + 0.20j + 0.20k + 0.30l$ | | | | | 反势 | $0.33 + 0.50i + 0.50j + 0.40k$ | | 反势 |
| 外部环境 0.080 | 运营能力 | 0.042 | $0.20 + 0.20i + 0.35j + 0.15k + 0.10l$ | | | | | 同势 | $0.50 + 0.36i + 0.70j + 0.60k$ | | 反势 |
| | 合计 | 1.000 | $0.23 + 0.23i + 0.21j + 0.14k + 0.19l$ | | | | | 同势 | $0.47 + 0.53i + 0.60j + 0.44k$ | | 同势 |
| | 公众反对 | 0.423 | $0.10 + 0.20i + 0.10j + 0.30k + 0.30l$ | | | | | 反势 | $0.33 + 0.67i + 0.25j + 0.50k$ | | 反势 |
| | 环境安全 | 0.185 | $0.30 + 0.20i + 0.25j + 0.15k + 0.10l$ | | | | | 同势 | $0.60 + 0.44i + 0.63j + 0.60k$ | | 均势 |
| | 合同完备 | 0.294 | $0.15 + 0.20i + 0.25j + 0.30k + 0.10l$ | | | | | 同势 | $0.43 + 0.44i + 0.45j + 0.75k$ | | 反势 |
| 风险总合计 | 不可抗力 | 0.098 | $0.15 + 0.15i + 0.20j + 0.30k + 0.20l$ | | | | | 反势 | $0.50 + 0.43i + 0.40j + 0.60k$ | | 反势 |
| | 合计 | 1.000 | $0.16 + 0.20i + 0.18j + 0.27k + 0.19l$ | | | | | 反势 | $0.43 + 0.54i + 0.39j + 0.60k$ | | 反势 |
| 风险总合计 | | 1.000 | $0.23 + 0.19i + 0.17j + 0.21k + 0.20l$ | | | | | 同势 | $0.52 + 0.51i + 0.48j + 0.55k$ | | 反势 |

表 5 风险联系系数及计算表
Tab. 5 Risk connection number and calculation table

| 目标层 | 准则层 | 权重 | 三元趋势联系系数 | 趋势 | 二元趋势联系系数 | 趋势 | 一元趋势联系系数 | |
|---------------|--------|-------|------------------------|----|----------------|----|----------|----|
| | | | | | | | 系数 | 趋势 |
| 融资风险 0.247 | 融资能力 | 0.472 | $0.67 + 0.60i + 0.32j$ | 同势 | $0.53 + 0.65i$ | 反势 | 0.45 | 反势 |
| | 信用担保 | 0.169 | $0.50 + 0.51i + 0.55j$ | 反势 | $0.49 + 0.48i$ | 同势 | 0.50 | 均势 |
| | 利率变动 | 0.216 | $0.47 + 0.43i + 0.71j$ | 反势 | $0.52 + 0.38i$ | 同势 | 0.58 | 同势 |
| | 融资结构 | 0.143 | $0.52 + 0.51i + 0.38j$ | 同势 | $0.50 + 0.58i$ | 反势 | 0.47 | 反势 |
| | 合计 | 1.000 | $0.57 + 0.53i + 0.45j$ | 同势 | $0.52 + 0.55i$ | 反势 | 0.49 | 反势 |
| 市场风险 0.316 | 原材料价格 | 0.207 | $0.50 + 0.37i + 0.63j$ | 反势 | $0.58 + 0.37i$ | 同势 | 0.61 | 同势 |
| | 车流量 | 0.394 | $0.57 + 0.67i + 0.33j$ | 同势 | $0.46 + 0.67i$ | 反势 | 0.41 | 反势 |
| | 新竞争者 | 0.281 | $0.50 + 0.53i + 0.38j$ | 同势 | $0.48 + 0.58i$ | 反势 | 0.46 | 反势 |
| | 收费标准变动 | 0.118 | $0.45 + 0.50i + 0.36j$ | 同势 | $0.48 + 0.58i$ | 反势 | 0.45 | 反势 |
| | 合计 | 1.000 | $0.52 + 0.55i + 0.41j$ | 同势 | $0.49 + 0.57i$ | 反势 | 0.47 | 反势 |
| 政治风险 0.027 | 政策变更 | 0.274 | $0.50 + 0.49i + 0.49j$ | 同势 | $0.50 + 0.50i$ | 均势 | 0.50 | 均势 |
| | 政策执行不力 | 0.191 | $0.49 + 0.43i + 0.62j$ | 反势 | $0.53 + 0.41i$ | 同势 | 0.56 | 同势 |
| | 政府信用 | 0.359 | $0.57 + 0.43i + 0.57j$ | 均势 | $0.57 + 0.43i$ | 同势 | 0.57 | 同势 |
| | 审批延误风险 | 0.176 | $0.59 + 0.43i + 0.40j$ | 同势 | $0.58 + 0.52i$ | 同势 | 0.53 | 同势 |
| | 合计 | 1.000 | $0.54 + 0.45i + 0.53j$ | 同势 | $0.55 + 0.46i$ | 同势 | 0.54 | 同势 |
| 建设风险 0.143 | 土地拆迁 | 0.454 | $0.29 + 0.71i + 0.37j$ | 反势 | $0.29 + 0.66i$ | 反势 | 0.31 | 反势 |
| | 工期延误 | 0.056 | $0.55 + 0.32i + 0.72j$ | 反势 | $0.63 + 0.31i$ | 同势 | 0.67 | 同势 |
| | 工程质量 | 0.284 | $0.60 + 0.45i + 0.44j$ | 同势 | $0.57 + 0.51i$ | 同势 | 0.53 | 同势 |
| | 成本超概 | 0.135 | $0.00 + 0.75i + 0.21j$ | 反势 | $0.00 + 0.78i$ | 反势 | 0.00 | 反势 |
| | 技术难题 | 0.071 | $0.63 + 0.32i + 0.63j$ | 均势 | $0.66 + 0.34i$ | 同势 | 0.66 | 同势 |
| 运营风险 0.187 | 合计 | 1.000 | $0.38 + 0.59i + 0.41j$ | 反势 | $0.38 + 0.59i$ | 反势 | 0.38 | 反势 |
| | 财政补贴 | 0.165 | $0.57 + 0.43i + 0.57j$ | 均势 | $0.57 + 0.43i$ | 同势 | 0.57 | 同势 |
| | 收费标准变动 | 0.197 | $0.51 + 0.45i + 0.57j$ | 反势 | $0.53 + 0.44i$ | 同势 | 0.54 | 同势 |
| | 运营成本超支 | 0.209 | $0.43 + 0.47i + 0.63j$ | 反势 | $0.48 + 0.43i$ | 同势 | 0.52 | 同势 |
| | 收益不足 | 0.387 | $0.40 + 0.50i + 0.56j$ | 反势 | $0.44 + 0.47i$ | 反势 | 0.48 | 反势 |
| 外部环境 0.080 | 运营能力 | 0.042 | $0.58 + 0.34i + 0.54j$ | 同势 | $0.63 + 0.39i$ | 同势 | 0.62 | 同势 |
| | 合计 | 1.000 | $0.46 + 0.47i + 0.58j$ | 反势 | $0.50 + 0.45i$ | 同势 | 0.52 | 同势 |
| | 公众反对 | 0.423 | $0.33 + 0.73i + 0.33j$ | 均势 | $0.31 + 0.69i$ | 反势 | 0.31 | 反势 |
| | 环境安全 | 0.185 | $0.57 + 0.42i + 0.51j$ | 同势 | $0.58 + 0.45i$ | 同势 | 0.56 | 同势 |
| | 合同完备 | 0.294 | $0.49 + 0.49i + 0.38j$ | 同势 | $0.50 + 0.57i$ | 反势 | 0.47 | 反势 |
| 风险总合计 | 不可抗力 | 0.098 | $0.54 + 0.52i + 0.40j$ | 同势 | $0.51 + 0.56i$ | 反势 | 0.47 | 反势 |
| | 合计 | 1.000 | $0.44 + 0.58i + 0.39j$ | 同势 | $0.44 + 0.60i$ | 反势 | 0.42 | 反势 |
| | 风险总合计 | 1.000 | $0.50 + 0.53i + 0.45j$ | 同势 | $0.48 + 0.54i$ | 反势 | 0.47 | 反势 |

3.3 风险态势及趋势评价

根据同异反模型中各阶联系系数 a, b, c, d, e 的大小, 参考标准的 181 种风险态势排序表^[23], 得到六大目标层指标和 26 个准则层指标的评估结果如下:

$\mu_1 = 26 + 0.17i + 0.14j + 0.21k + 0.23l$ 式中 $a > e, a > b, b > c, c < d, d < e$ 同势 9 级;

$\mu_2 = 0.25 + 0.21i + 0.19j + 0.21k + 0.14l$ 式中 $a > e, a > b, b > c, c < d, d > e$ 同势 7 级;

$\mu_3 = 0.39 + 0.23i + 0.20j + 0.10k + 0.07l$ 式中 $a > e, a > b, b > c, c < d, d < e$ 同势 9 级;

$\mu_4 = 0.09 + 0.14i + 0.16j + 0.30k + 0.32l$ 式中 $a < e, a < b, b < c, c < d, d < e$ 反势 181 级;

$\mu_5 = 0.23 + 0.23i + 0.21j + 0.14k + 0.19l$ 式中 $a > e, a = b, b > c, c > d, d < e$ 同势 30 级;

$\mu_6 = 0.16 + 0.20i + 0.18j + 0.27k + 0.19l$, 式中 $a < e$, $a < b$, $b > c$, $c < d$, $d > e$, 反势 161 级;

$\mu = 0.23 + 0.19i + 0.17j + 0.21k + 0.20l$, 式中 $a > e$, $a > b$, $b > c$, $c < d$, $d > e$, 同势 7 级

由同异反模型中的五元联系数对风险发生的态势进行分析,可以看出该 S 高速公路总体风险态势位于同势 7 级,为强同势区,且在 26 个准则层风险因素中,有 8 个风险因素处于反势,18 个风险因素处于同势,位于同势的风险因素远远多于位于反势的风险因素,即同势因素态势处于主导地位,说明项目总体处于低风险水平。其中目标层指标中,“融资风险 μ_1 ”“市场风险 μ_2 ”“政治风险 μ_3 ”均属于同势 7 级或 9 级,“运营风险 μ_5 ”处于同势 30 级,均属于强同势区,故对其相应的准则层因素稍加关注即可,重点监测相应准则层中处于反势的因素:如“融资能力”“车流量”“收益不足”。另外“建设风险 μ_4 ”和“外部环境 μ_6 ”分别属于反势 181 级和反势 161 级,均属于强反势区,说明项目在两个时期面临较大风险因素,重点关注准则层中处于反势的因素:如“土地拆迁”“成本超概”“公众反对”等。

通过各阶偏联系数对风险发生的趋势进行分析,从系统总体风险来看,其在一阶潜在趋势上处于反势,说明该系统风险存在一阶上升趋势,而二阶为同势,说明系统风险在二阶存在向好态势,风险正逐渐减弱,但在三阶和四阶潜在层次上又处于反势,如此循环往复充分体现了风险发生的同异反区间转换特征,不仅同中有均、均中有反,而且存在反中有同,波浪式发展趋势。具体应重点关注多次出现在反势区的准则层因素,如“车流量”“新竞争者”“土地拆迁”“成本超概”“不可抗力”等。

通过以上对 S 高速公路的风险发生态势和趋势分析,可以看出,虽然该项目总体风险处于较低水平,但个别风险因素仍处于较高水平,针对融资、车流量、土地拆迁和收益不足风险,在项目实施前应做好充足的前期论证工作,加大对项目的物有所值和财政承受能力方面的研究工作,做好资金安排,保证资金足额按时到位,对车流量和未来收益做好合理预期。针对成本超概和外部环境风险,在精确预算的情况下,注重项目全生命周期的精细化管理,同时做好相关群体的利益协调工作,统筹协调,积极预防,不断降低高速公路 PPP 项目的风险。

4 结 语

本文将数学领域中的集对理论和不确定层次分析法引入到高速公路 PPP 项目的风险态势及趋势评估中,并选取典型实际案例进行计算和论证,得出如下结论:

1) 实现更加精确化的风险因素赋权。在引入专家经验,构建常规层次分析,形成符合专家思维和项目实际的区间权重基础上,创新结合集对理论中的三元联系数法,考虑确定性和不确定性两个方面,将区间权重后转化为精确权重值,符合常规逻辑思维,使计算结果更加科学准确合理。

2) 构建系统的高速公路 PPP 项目风险的同异反评价模型。构建具体的模型步骤,不仅可以利用模型中的五元联系数对项目风险发生的现有态势进行评估,同时可以利用各阶偏联系数对风险未来发展趋势进行合理预测,在分析静态风险的同时,兼顾动态发生风险,有效克服传统的静态性评价,实现风险评价中的动静结合,使得项目风险的评价更具系统性、科学性和可操作性。

3) 拓展了数学联系数思想在风险评价中的应用。运用相对确定不确定的辩证思想去定量刻画系统风险,不仅符合人类常规的决策心理思维,而且更能增加对事物的科学性和合理性决策,同时有利于将丰富的数学成果推广到同类项目的风险评价与控制中。

通过实例分析,验证了集对理论中的多元联系数法在高速公路 PPP 项目风险评价中的有效性和可操作性,结果表明 S 高速公路当前风险态势为同势 7 级,属于低风险状态,在未来趋势中应注意车流量、土地拆迁、融资能力、成本收益和外部环境的控制,并提出针对性的解决措施。

参考文献:

[1] 财政部 PPP 中心.全国 PPP 综合信息平台项目管理库 2019 年 4 月报[EB/OL].(2019-05-27) [2019-08-20]http://www.cpppc.org/zh/pppjb/8522.jhtml

[2] 张翔.基于 AHP 和 DEMATEL 的 PPP 模式城市轨道交通项目风险评价[D].郑州:华北水利水电大学,2016.

[3] 赵辉,王雪青.基于 PCA 与 GA 改进 BP 神经网络的高速公路项目融资风险评价[J].科技管理研究,2010,30(8):209

- 212.
- [4] Xu Y, Yeung J F Y, Chan A P C, et al. Developing a risk assessment model for PPP projects in China — A fuzzy synthetic evaluation approach [J]. *Automation in Construction*, 2010, 19(7): 929–943.
- [5] Kumar L, Jindal A, Velaga N R. Financial risk assessment and modelling of PPP based Indian highway infrastructure projects [J]. *Transport Policy*, 2018, 62: 2–11.
- [6] Wu Y, Xu C, Li L, et al. A risk assessment framework of PPP waste-to-energy incineration projects in China under 2-dimension linguistic environment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 602–617.
- [7] 施志坚, 王华伟, 王祥. 基于多元联系数集对分析的航空维修风险态势评估 [J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(3): 588–594.
- [8] Tian R, Wu J. Groundwater quality appraisal by improved set pair analysis with game theory weightage and health risk estimation of contaminants for Xuecha drinking water source in a loess area in Northwest China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, 25(1/2): 132–157.
- [9] 郑侨宏, 韩勇. 基于多元联系数的矿工不安全行为风险态势评估 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(2): 186–192.
- [10] 胡信布, 袁治平, 徐渝. 基于集对分析的学习型组织建设成熟度评估研究 [J]. *运筹与管理*, 2013, 22(1): 126–131.
- [11] Garg H, Kumar K. An advanced study on the similarity measures of intuitionistic fuzzy sets based on the set pair analysis theory and their application in decision making [J]. *Soft Computing*, 2018, 22(15): 4959–4970.
- [12] 赵克勤, 黄德才, 陆耀忠. 基于 $a+bi+cj$ 型联系数的网络计划方法初探 [J]. *系统工程与电子技术*, 2000(2): 29–31.
- [13] 周兴慧, 张吉军. 基于五元联系数的风险综合评价方法及其应用 [J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8): 2169–2176.
- [14] Chuanjun Zheng, jingfeng Yuan, lingzhi li, et al. Skibniewski, Flavio Stochino. Process-Based identification of Critical Factors for Residual Value Risk in China's Highway PPP Projects [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- [15] 元霞, 柯永建, 王守清. 基于案例的中国 PPP 项目的主要风险因素分析 [J]. *中国软科学*, 2009(5): 107–113.
- [16] 孟禹彤, 李力. 基于亚投行支撑中国企业投资 GMS 国家高速公路的 PPP 项目风险研究 [J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(1): 122–127.
- [17] Kuznetsova Daria. Risk identification and Assessment for Construction Public-Private Partnership Project of Russia "East-West Highway Diameter" [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [18] 苏海红, 高永林, 蔡菊芳. 基于属性测度的 PPP 项目关键风险评价研究 [J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 43(1): 97–102.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 27921–2011 风险管理风险评估技术 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [20] 程菲, 罗键. 一种改进不确定型 AHP 算法探讨 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2006(2): 186–190.
- [21] 杜方辉, 李兴勇, 沈红祥, 等. 模糊综合评判法在产品配置方案评价中的应用 [J]. *机械制造与自动化*, 2018, 47(1): 73–76.
- [22] 俞素平, 李素梅. 基于集对分析的隧道设计安全风险评估研究 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(4): 38–43.
- [23] 王国平, 杨洁, 王洪光. 五元联系数在地表水环境质量评价中的应用 [J]. *安全与环境学报*, 2006(6): 21–24.