

基于三角白化权函数的水利 PPP 项目全生命周期风险评价方法研究

高子越

(三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 针对水利 PPP 项目具有多层次、多阶段、多种类、覆盖面广的风险, 且评价数据具有主观性、模糊性, 进而提高风险评价难度的问题, 提出基于三角白化权函数的水利 PPP 项目全生命周期风险评价方法。结合算例分析表明, 某水利枢纽 PPP 项目整体风险较低, 但应关注投资控制风险、合同文件风险、融资风险、设计变更风险和地质勘测风险等高风险指标。评价结果验证了模型的合理性, 为项目管理决策提供理论依据, 丰富了水利 PPP 项目全生命周期风险评价方法。图 1 幅, 表 3 个。

关键词: 水利工程; PPP 项目; 三角白化权函数; 全生命周期; 风险评价

0 引 言

水利 PPP 项目集融资、设计、施工、运营为一体, 由于项目周期长、外界环境和内部条件随时产生变化, 从项目发起开始到资产交割结束, 期间不可避免地产生法律、政策、市场、技术、管理等方面的风险, 导致出现利益相关者权责不清、信息沟通效率低下、为了追求细小利益而忽略项目整体价值等问题, 不仅影响项目前期的投资建设, 同时也影响后期项目运营管理。另外, 仅仅研究某一类型或某一阶段风险无法做到统筹全局, 实现项目价值最大化, 因此需要从全生命周期的视角分析评价水利 PPP 项目风险, 对各阶段进行动态变化控制的同时把握项目整体发展趋势, 更加科学有效地进行管理决策。

目前有许多学者对水利 PPP 项目进行风险评价研究。谷立娜等^[1]对水利 PPP 项目融资风险进行评价; 陈佳等^[2]针对水环境综合整治 PPP 项目进行政府信用风险评价研究; 张亚琼等^[3]对生态水利 PPP 项目进行利益相关者管理风险评估; 汪

伦焰等^[4]以某市水生态综合治理 PPP 项目为例进行投资风险评价研究; Akcay 等^[5]对水利 PPP 项目进行投资风险评估。以上文献在对水利 PPP 项目进行研究时集中于前期准备和采购阶段的某一具体项目风险, 对建设运营管理和项目移交阶段风险研究较少, 也缺乏对项目实施全过程的整体风险把握。

本文聚焦于水利 PPP 项目全生命周期风险评价, 通过阅读相关文献和问卷调研建立风险指标体系, 运用层次分析法与熵权法相结合的组合赋权法计算风险指标组合权重, 充分考虑专家经验的同时减少主观评价随意性带来的不确定性, 利用灰色理论中的三角白化权函数进行聚类分析, 解决多指标、小样本和样本与实际存在偏差产生的模糊性、灰色性等问题; 以某水利枢纽 PPP 项目为算例, 验证评价模型的合理性与可行性, 为水利 PPP 项目全生命周期风险评价研究提供新思路。

1 水利 PPP 项目全生命周期风险识别与指标体系构建

1.1 水利 PPP 项目全生命周期风险因素识别

本文立足于社会资本视角, 根据水利部印发的文件以及相关研究文献^[6-8], 将水利 PPP 项目全生命周期划分为准备阶段、采购阶段、建设阶段、

收稿日期: 2023-06-30

作者简介: 高子越 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水利工程管理。E-mail: 1355353754@qq.com

运营阶段和移交阶段等 5 个阶段，在充分考虑水利工程与 PPP 模式的特点，经过文献阅读、问卷调查和专家调研后，对社会资本方在其中可能涉及的风险因素进行识别整理，形成风险清单。

准备阶段：立项风险，项目审批风险，法律风险，政府信用风险，强烈的公众反对风险，土地获取风险，土地价值风险，生态环保风险。

采购阶段：招投标风险，合同文件风险，融资风险，社会资本信用风险，政府信用风险，法律风险。

建设阶段：设计变更风险，地质勘测风险，建设风险，投资控制风险，社会资本信用风险，政府信用风险，社会风险，法律风险，自然风险。

运营阶段：运营风险，组织管理风险，合同风

险，政府信用风险，项目不唯一性风险。

移交阶段：合同风险，移交程序合理性风险，移交不达标风险，移交失败风险，法律风险。

1.2 水利 PPP 项目全生命周期风险评价指标体系的建立

向从事水利行业且有 PPP 项目经历的专家发放调查问卷，对各风险指标重要性进行评价，评价依照李克特 5 级量表进行；经过两轮调研后对收集到的有效问卷进行信度、相关性、均值检验和方差检验等数据分析，分析结果将部分指标淘汰，最终形成关键风险因素清单。基于水利 PPP 项目全生命周期关键风险因素清单，构建风险评价指标体系，其 27 种风险因素及指标含义如表 1 所示。

表 1 水利 PPP 项目全生命周期风险评价指标体系

一级指标	二级指标	指标含义解释
准备阶段	立项风险	水利 PPP 项目经验不足导致选用 PPP 模式失误；项目未通过“物有所值”评价和政府财政承受能力论证。
	项目审批风险	政府各部门分工合作不合理、岗位设置冗余或空缺、沟通效率低导致决策过程冗长、项目审批延误。
	法律风险	水利 PPP 项目相关政策或法律发生变更导致项目被出库或清库。
	土地获取风险、土地价值风险	由于征地拆迁等原因导致土地获取成本和时间超过预期甚至获取失败；通货膨胀、发展变化引起的土地价值变化导致获取成本增加。
采购阶段	招投标风险	招标文件内容缺失或表述不明确；投标人弄虚作假；招标程序显失公平；评标过程不规范。
	合同文件风险	合同内容不完整，责任、权利、义务不明确，风险分摊不合理导致合同执行过程中无法履约。
	融资风险	融资结构不合理、筹资困难导致融资失败；市场利率、汇率变动、通货膨胀导致项目成本增加。
	社会资本信用风险	社会资本还款能力不足。
	政府信用风险	政府违反协议；政府部门换届导致违约。
	法律风险	水利 PPP 项目相关法律文件缺失、政策法规变更等导致谈判增加，拖延项目开展。
建设阶段	设计变更风险	设计方案变更导致项目进度拖延、项目成本增加。
	地质勘测风险	对于地形地貌、水文地质条件、岩土力学性质等勘测不到位导致施工方案变更、延误工期、增加成本。
	建设风险	通货膨胀导致建设成本增加；因偷工减料导致返工；水利工程施工工业技术不成熟等导致建设进度拖延。
	投资控制风险	项目资金投放不及时不到位、资金使用不规范不合理导致资金链短缺甚至断裂。
	社会资本信用风险	社会资本因财务状况无法承担履约成本导致违约。
	政府信用风险	因政府换届、负责人变更导致政府违约；政府无法承担履约成本导致违约。
	法律风险	法律法规变更；投融资体制机制变更。
	自然风险	气候条件恶劣、自然灾害等不可抗力导致工期延误。

续表 1 水利 PPP 项目全生命周期风险评价指标体系

一级指标	二级指标	指标含义解释
运营阶段	运营风险	运营收入低于预期; 通货膨胀导致运营成本增加; 维护成本高于预期。
	合同风险	政府违背合同规定提前收回项目; 合同规定的特许经营期过短, 企业无法回收成本。
	政府信用风险	政府资金不足无法承担缺口性补助。
	项目不唯一性风险	政府批准其他类似特许项目的建立。
移交阶段	合同风险	项目协议中关于项目交接的范围、标准和程序等内容不明确, 对权责利划分不清。
	移交程序合理性风险	项目没有遵循规定的交接协议进行交接、交接手续存在纰漏造成移交缺漏、交割不清。
	移交不达标风险	交接时项目质量经过质量评估后未达到移交要求。
	移交失败风险	政府部门资金短缺, 无法回购项目; 合同双方对合同中约定的价格存在争议。
	法律风险	法律法规变更; 行业政策变化。

2 水利 PPP 项目全生命周期风险评价模型

考虑到风险评价中过于依赖专家主观意见和评价随意性产生的不确定性, 以及调查样本数量的有限性和专家主观赋值与实际存在的偏差产生的模糊性, 本文利用组合赋权结合三角白化权函数的方法构建评价模型。该模型通过综合集成赋权构建指标权重优化算法, 结合主客观权重, 充分考虑专家经验的同时减少主观评价的随意性、突出客观权重所占比例, 利用三角白化权函数可将评价指标聚集成若干个可定义类别, 减少复杂计算的同时, 在分析处理模糊类问题也具有一定的优势。

2.1 组合赋权

层次分析法通过比较各指标的相对重要性获得两两指标间的相对权重, 根据 Saaty1—9 标度法对各级指标进行评价, 运用几何平均法计算指标主观权重 $W_j^{[9]}$ 。

熵值法利用指标本身熵值的大小确定其权重, 运用极值法对数据进行归一化处理, 然后计算出指标熵值和熵权 S_j , 降低层次分析法具有的主观性^[10]。

通过层次分析法和熵权法分别得到指标主观权重和客观权重, 为了主、客观信息在决策过程中充分体现, 以主、客观加权属性值一致为目标构建组合赋权模型, 使得主、客观加权属性值的偏差最

小^[11]; 具体公式如下:

$$\begin{cases} C_j = \alpha W_j + \beta S_j \\ \alpha, \beta > 0 \text{ 且 } \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_j 为指标组合权重; α 为主观权重系数; β 为客观权重系数。

$$d_i = \sum_{j=1}^m (x_{ij}\alpha W_j - x_{ij}\beta S_j)^2 \quad (2)$$

式中, d_i 为主、客观数据的偏离程度; $x_{ij}\alpha W_j$ 为主观加权属性值; $x_{ij}\beta S_j$ 为客观加权属性值。

当 d_i 越小时, 专家 i 的主、客观加权信息趋于一致, 为此构造优化模型:

$$D = \min (d_1, d_2, \dots, d_m) \quad (3)$$

式中, D 为 i 个专家中主、客观数据偏离程度的最小值。

针对多指标决策问题中各评价对象之间相互独立, 不存在偏好关系, 因此, 构造与式 (3) 等价的目标函数及其约束条件:

$$\begin{cases} \min Z = \sum_{i=1}^m d_i = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (x_{ij}\alpha W_j - x_{ij}\beta S_j)^2 \\ s. t. \alpha + \beta = 1 (\alpha, \beta \geq 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\min Z$ 为 α 、 β 所有取值方案中主、客观数据偏离程度的最小值。

由式 (4) 迭代得到主、客观权重系数 α 、 β , 由此计算各指标组合权重 C_j 。

2.2 三角白化权函数

三角白化权函数是灰色聚类分析中根据指标观测值判断其隶属灰类区间的一种评价模型。刘思峰将已有的基于端点的三角白化权函数改进为基于中

心点的三角白化权函数^[12]，改进后的三角白化权函数在不同灰类下单一评价指标计算出的聚类系数之和为 1，结果更加规范，更符合实际。

将评价对象划分为 s 个灰类，同时将评价指标取值范围也划分为相应的 s 个灰类。确定灰类 k ($k=1, 2, \dots, s$) 的中心点 λ_k ， λ_k 应为最能代表该灰类的数值。由此可将灰类 k 的取值范围确定为 $[\lambda_{k-1}, \lambda_{k+1}]$ ，即灰类 k 的上下限分别为灰类 $k+1$ 和灰类 $k-1$ 的中心点 λ_{k+1} 和 λ_{k-1} 。对于灰类 1 的下限 λ_0 和灰类 s 的上限 λ_{s+1} ，可将评价指标取值范围分别向左向右延拓而得。

构造中心点三角白化权函数 $f_{j(x)}^k$ ，设中心点 λ_k 的函数值 $f_{j(x)}^k$ 为 1，在坐标轴中将 $(\lambda_k, 1)$ 与 $(\lambda_{k-1}, 0)$ 和 $(\lambda_{k+1}, 0)$ 连接，构成函数 $f_{j(x)}^k$ 的图像，详见图 1。

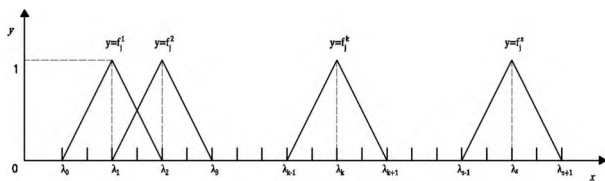


图 1 中心点三角白化权函数示意图

根据函数 $f_{j(x)}^k$ 计算指标 j 的观测值 x_j 在第 k 灰类下的隶属度 $f_{j(x_j)}^k$ ：

$$f_{j(x_j)}^k = \begin{cases} 0, & x \notin [\lambda_{k-1}, \lambda_{k+1}] \\ \frac{x-\lambda_{k-1}}{\lambda_k-\lambda_{k-1}}, & x \in [\lambda_{k-1}, \lambda_k] \\ \frac{\lambda_{k+1}-x}{\lambda_{k+1}-\lambda_k}, & x \in [\lambda_k, \lambda_{k+1}] \end{cases} \quad (5)$$

计算指标 j 在第 k 灰类下的综合聚类系数 σ_j^k ：

$$\sigma_j^k = \sum_{j=1}^n f_{j(x_j)}^k C_j \quad (6)$$

由指标 j 下最大的综合聚类系数 σ_{jmax}^k 可判断指标所属灰类。

3 算例分析

通过问卷调查形式收集某水利枢纽 PPP 项目全生命周期各级风险指标的相对权重、重要性评分。根据专家打分数据对各指标主、客观权重及组合权重进行计算，结果如表 2 所示。

表 2 各级评价指标权重

一级指标	二级指标	主观权重	客观权重	组合权重	一级指标组合权重
准备阶段	立项风险	0.034 9	0.039 7	0.037 8	0.159 2
	项目审批风险	0.038 5	0.037 9	0.038 1	
	法律风险	0.054 3	0.036 6	0.043 3	
	土地获取风险、土地价值风险	0.045 4	0.036 5	0.039 9	
采购阶段	招标投标风险	0.019 6	0.033 5	0.028 2	0.227 3
	合同文件风险	0.066 5	0.033 9	0.046 3	
	融资风险	0.068 2	0.033 6	0.046 7	
	社会资本信用风险	0.039 2	0.035 7	0.037 1	
	政府信用风险	0.031 2	0.039 2	0.036 1	
	法律风险	0.024 9	0.037 8	0.032 9	
建设阶段	设计变更风险	0.058 0	0.034 6	0.043 5	0.319 1
	地质勘测风险	0.064 1	0.031 7	0.044 0	
	建设风险	0.047 5	0.036 2	0.040 5	
	投资控制风险	0.080 8	0.026 8	0.047 3	
	社会资本信用风险	0.047 4	0.034 7	0.039 6	
	政府信用风险	0.048 8	0.037 4	0.041 7	
运营阶段	法律风险	0.013 5	0.040 0	0.029 9	0.122 8
	自然风险	0.021 5	0.039 3	0.032 6	
	运营风险	0.027 1	0.040 0	0.035 1	
	合同风险	0.011 3	0.038 0	0.027 8	
	政府信用风险	0.024 7	0.039 7	0.034 0	
	项目不唯一性风险	0.003 3	0.039 6	0.025 8	
移交阶段	合同风险	0.017 6	0.040 0	0.031 5	0.171 6
	移交程序合理性风险	0.012 4	0.041 8	0.030 7	
	移交不达标风险	0.032 3	0.037 4	0.035 5	
	移交失败风险	0.044 6	0.036 8	0.039 8	
	法律风险	0.022 3	0.041 5	0.034 2	

采用 11 分制对某水利枢纽 PPP 项目全生命周期风险进行风险等级评价，将风险等级划分为“低、较低、中等、较高、高”5 个灰类，取值范围分别为 $[0, 2]$ 、 $[2, 4]$ 、 $[4, 6]$ 、 $[6, 8]$ 、 $[8, 10]$ 。根据打分制度和专家打分情况将 5 个灰类的中心点分别设为 1、3、5、7、9，将第 0 灰类

和第 6 灰类中心点分别设置为 0 和 10, 由此构成本算例的三角白化权函数。

$$f_{j(x_j)}^1 = \begin{cases} 0 & x \notin [0, 3] \\ x & x \in [0, 1) \\ \frac{3-x}{2} & x \in [1, 3] \end{cases} \quad f_{j(x_j)}^2 = \begin{cases} 0 & x \notin [1, 5] \\ \frac{x-1}{2} & x \in [1, 3] \\ \frac{5-x}{2} & x \in [3, 5] \end{cases}$$

$$f_{j(x_j)}^3 = \begin{cases} 0 & x \notin [3, 7] \\ \frac{x-3}{2} & x \in [3, 5] \\ \frac{7-x}{2} & x \in [5, 7] \end{cases} \quad f_{j(x_j)}^4 = \begin{cases} 0 & x \notin [5, 9] \\ \frac{x-5}{2} & x \in [5, 7] \\ \frac{9-x}{2} & x \in [7, 9] \end{cases}$$

$$f_{j(x_j)}^5 = \begin{cases} 0 & x \notin [7, 10] \\ \frac{x-7}{2} & x \in [7, 9] \\ 10-x & x \in [9, 10] \end{cases}$$

根据三角白化权函数表达式, 将风险等级评价表中的数值带入每一灰类的表达式, 得到各个指标在每一灰类下的函数值; 再将组合权重与三角白化权函数值相结合计算得到各风险、各阶段和项目整体的综合聚类系数。部分评价结果如表 3 所示。

表 3 评价指标综合聚类系数

指标	第一灰类	第二灰类	第三灰类	第四灰类	第五灰类
准备阶段	0.000 0	0.335 1	0.528 8	0.136 1	0.000 0
采购阶段	0.026 9	0.401 7	0.162 2	0.368 3	0.040 9
建设阶段	0.068 1	0.127 7	0.345 1	0.356 4	0.102 7
运营阶段	0.387 4	0.526 8	0.085 8	0.000 0	0.000 0
移交阶段	0.257 1	0.472 1	0.270 7	0.000 0	0.000 0
项目整体	0.119 5	0.331 1	0.288 2	0.219 1	0.042 1

根据最大综合聚类系数所属的灰类可知某一指标所处的风险等级, 结果显示: 该水利枢纽 PPP 项目整体风险较低; 一级指标中, 建设阶段风险等级较高, 准备阶段风险等级为中等, 采购、运营和移交阶段处于较低风险; 二级指标中, 建设阶段的投资控制风险处于高风险等级, 采购阶段的合同文件风险、融资风险和建设阶段的设计变更风险、地质勘测风险风险等级较高。

4 结 论

本文提出了基于组合赋权结合中心点三角白化

权函数的水利 PPP 项目全生命周期风险评价方法, 通过收集文献资料和专家调研后建立风险评价指标体系, 运用主客观加权属性值一致的层次分析—熵权组合赋权法获得指标权重, 结合灰色评价的中心点三角白化权函数计算聚类系数, 对某水利枢纽 PPP 项目进行风险评价。评价结果表明: 在水利 PPP 项目的全生命周期管理中, 社会资本方应对资金的投放管理和使用规范等问题引起足够重视, 对项目权责利的划分以及投资成本大小进行慎重考量, 在地质条件复杂的水利工程中应仔细做好勘测和规划设计工作。评价结果证实了基于组合赋权结合三角白化权函数评价方法的有效性, 为社会资本管理决策提供了理论依据, 为水利 PPP 项目全生命周期风险评价研究提供了一种思路。

参考文献:

- [1] 谷立娜, 张春玲, 吴涛. 基于云模型的重大水利 PPP 项目融资风险评价[J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 116-21.
- [2] 陈佳, 王大明. 基于 IVHFSs-IFAHP 的水环境综合整治 PPP 项目政府信用风险评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2018, 427(5): 84-88, 94.
- [3] 张亚琼, 何楠, 陈毅洋, 等. 基于云模型的生态水利 PPP 项目利益相关者管理风险评价[J]. 中国农村水利水电, 2020, 458(12): 148-52, 63.
- [4] 汪伦焰, 赵延超, 李慧敏, 等. 水生态综合治理 PPP 项目投资风险评价研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(3): 54-8.
- [5] Akcay E. An analytic network process based risk assessment model for PPP hydropower investments[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021(27): 268-77.
- [6] 财政部. 关于印发政府和社会资本合作模式操作指南(试行)的通知[Z]. 2014.
- [7] 吴雨晴. 基于 ANP 的 PPP 模式下水利工程项目承包商风险分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- [8] 刘凯. 基于模糊理论的水利工程 PPP 项目风险评价研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- [9] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [10] 王晓天, 张英华, 秦挺鑫, 等. 基于熵值法改进层次分析法马拉松急救能力评价模型的构建[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(9): 169-74.
- [11] 董慧芬, 金晨阳, 史志波. IF-ANP 组合赋权的灰聚类飞机电能质量评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(7): 49-55.
- [12] 刘思峰, 谢乃明. 基于改进三角白化权函数的灰评估新方法[J]. 系统工程学报, 2011, 26(2): 244-50.

责任编辑 吴昊

• 19 •