

城市轨道交通 PPP 项目运营期风险评价

王建波^{1,2}, 张娜¹, 王政权¹

(1. 青岛理工大学管理工程学院, 山东 青岛 266520;
2. 山东省高校智慧城市建设管理研究中心(新型智库), 山东 青岛 266520)

摘要:为研究当前城市轨道交通 PPP 项目运营期的经营情况,更加科学有效地对其运营期风险进行评价,从城市轨道交通 PPP 项目的整体性和系统性出发,从政治法律、经济、市场、公私合作和技术 5 个方面构建了风险评价指标体系;采用 C-OWA 算子对评价指标进行科学加权,合理削弱了专家打分时个人主观因素的影响,很好地满足了公平性原则;结合可拓综合评价法建立了风险评估模型,并将模型应用于青岛地铁 1 号线工程项目,以验证所构建模型的适用性和科学性。该模型有助于政府与社会资本全面深入地认识城市轨道交通 PPP 项目运营期存在的风险,并及时采取针对性措施进行控制和防范。

关键词:城市轨道交通 PPP 项目;运营期;风险评价;C-OWA 算子;可拓综合评价法

中图分类号:F283;F572 **文献标志码:**A

随着我国经济发展水平不断提高,私家车的使用日渐增多,严重的交通拥堵使得轨道交通需求量不断增加。为满足居民出行需求,很多城市陆续设立了多条城市轨道交通路线^[1]。与其他交通形式相比,城市轨道交通项目建设周期更长、施工难度更大,在实际建设过程中需要大量资金支持,仅依靠财政资金无法弥补国内城市轨道交通建设资金的巨大缺口,种种因素导致其发展进度缓慢^[2]。将公私合营(Public-Private-Partnership, PPP)模式引入城市轨道交通建设,不仅能稀释政府财政压力,还能将风险分配到每一个参与方。因此,科学有效的城市轨道交通 PPP 项目风险评估对城市整体规划及其社会效益水平提升均具有十分重要的意义。

国内外学者对城市轨道交通 PPP 项目风险进行了研究。Thomas 等^[3]采用故障树模型对风险水平进行评价,并提出了有针对性的风险分担机制;颜红艳等^[4]运用模糊集和物元理论结合的方法对城市轨道交通 PPP 项目的主体行为风险进行了评价;王建波等^[5]结合 PPP 融资模式的特点,总结归纳出城市轨道交通 PPP 融资项目的 8 大风险,并采用 Choquet 模糊积分模型对其进行了风险评估;谢飞等^[6]运用 ISM-ANP-Fuzzy 方法对城市轨道交通 PPP 项目的界面风险进行评价,并提出了具体应对措施;宋博等^[7]构建了基于 OWA 算子与灰色聚类的城市轨道交通 PPP 项目风险评估模型,并用实例进行了验证;张磊等^[8]和付彦霖^[9]在 PPP 项目风险评估方面均采用了层次分析法,为

PPP 项目风险管理提供了参考。

上述文献对于城市轨道交通 PPP 项目全生命周期风险评价的关注度较高,而运营期^[10]作为全生命周期中持续时间最长、公众群体参与度广泛的关键阶段,却未得到足够重视,对其风险进行系统全面的管理,可以推动我国城市轨道交通 PPP 项目规范化运营,对项目的可行性分析具有重要的参考价值。因此,笔者从政治法律、经济、市场、公私合作以及技术的角度出发,构建城市轨道交通 PPP 项目运营期风险指标体系,引入 C - OWA 算子和可拓综合评价模型,对城市轨道交通 PPP 项目运营期的风险因素进行全面考察,并将此模型应用于青岛地铁 1 号线工程的风险评价,对该项目风险等级进行全方位的评估,并提出有针对性的应对策略,希冀为城市轨道交通 PPP 项目运营期风险管理提供新的思路。

一、城市轨道交通 PPP 项目运营期风险评价指标体系的构建

1. 运营期风险因素的识别

风险识别的准确程度往往决定评估结果的科学性,准确识别城市轨道交通 PPP 项目运营期风险是最为关键的基础性工作,国内

外很多专家学者对城市轨道交通 PPP 项目的总体风险进行了识别。王雅华^[11]运用群组决策特征根法以及 MATLAB 软件,结合西安地铁 9 号线 PPP 项目的实际情况,识别出 23 个关键风险指标;盛立^[12]运用核对表法,对 PPP 模式下我国城市轨道交通的风险因素进行分析整理,建立了哈尔滨地铁 2 号线项目风险指标体系;顾曼等^[13]利用层次分析法分别识别出社会资本评价指标体系和政府评价指标体系中的关键风险;袁明霞^[14]以 PPP 融资模式与传统融资模式的区别为切入点展开研究,识别了 PPP 融资模式在我国轨道交通中的风险并进行了说明;聂凌毅等^[15]按照项目风险水平程度将城市轨道交通 PPP 项目风险划分为宏观、中观和微观 3 个等级,再采用德尔菲法和核对表法,对城市轨道交通中采用 PPP 模式融资的 77 个风险因素进行了识别。笔者在大量检索阅读并整理总结相关文献的基础上,通过咨询从事轨道交通 PPP 项目的资深专家以及高校专门从事 PPP 项目研究的专家学者的意见,从风险因素类别角度入手,从政治法律、经济、市场、公私合作以及技术 5 个方面,对城市轨道交通 PPP 项目运营阶段中可能造成风险损失的因素进行了识别(见表 1)。

表 1 城市轨道交通 PPP 项目运营阶段的风险因素

风险类型	风险因素
政治法律风险	法律法规不完善、政策变更、利率过高、汇率变动、税收变更、通货膨胀、政治不可抗力、政府价格规制强度变化、官僚腐败、影响自然环境、影响人居环境
经济风险	定价不合理、运营成本变动、原材料价格变化、运营财务、银行信用
市场风险	客流量、竞争因素、市场需求未达到预期、服务不到位导致市场需求减少、发生事故导致市场需求减少、政府投资新同质项目竞争
公私合作风险	政府部门违约、私人部门违约、多主体运营管理体制设置不当、运营商管理方式不当、政府管理越位、合同文件冲突、政府补贴额度变化、特许经营合同约定的风险分担机制不合理、项目与公司的目标一致性、股权变动、运营期故障处理
技术风险	运营技术、设施设备维护保养技术、运营条件、配套设施欠缺、人员管理不当、服务质量不达标、运营效率低下

2. 运营期风险评价指标体系的构建

笔者根据表 1 中的风险因素设计调查问卷,采用电子邮件和现场问卷两种方式进行城市轨道交通 PPP 项目运营期主要风险因素调查,运用 liket 五分式量表,由被调查者根据各项风险因素的影响程度打出相应的分数(数字 1,2,3,4,5 分别代表风险因素程度

的可忽略、轻微、中度、较严重、非常严重),问卷主体包括表 1 中的 40 个风险因素。问卷发放的对象包括从事城市轨道交通 PPP 项目的企业工作人员、政府部门有关人员以及相关学者与研究人员。共发放 50 份问卷,回收问卷 48 份,其中,有效问卷 47 份,经过整理与分析,最终形成了由 5 个一级指标、18

个二级指标构成的城市轨道交通 PPP 项目运营阶段风险评价指标体系 (见图 1)。

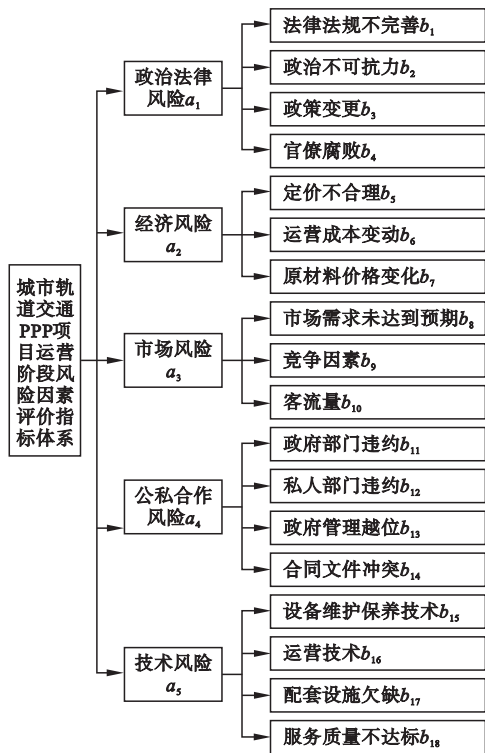


图 1 城市轨道交通 PPP 项目运营阶段风险评价指标体系

二、城市轨道交通 PPP 项目运营期风险评估模型的构建

1. 风险评价指标体系各层指标权重的确定

国内外很多专家学者对 PPP 项目风险评估进行了深入研究,常用的定性研究方法有问卷调查法、德尔菲法等,定量方法有层次分析法、贝叶斯决策方法等,但各种单一的评价方法都存在无法避免的缺陷。因此,笔者将 C-OWA 算子与可拓综合评价法相结合,更加科学系统地对城市轨道交通 PPP 项目风险因素进行评价。

有序加权平均算子 (Ordered Weighted Averaging, OWA) 由 Yager^[16] 教授提出,经过不断改进形成了众多不同类型的算子,其中包括 C-OWA 算子。将 C-OWA 算子引入 PPP 模式下的城市轨道交通项目风险评价指标权重的确定过程,将极大与极小决策数据分别分配到影响较小的位置,可以有效

避免层次分析法或熵权法进行评价指标赋权时出现的问题,合理削弱专家打分时个人主观因素对数据带来的不利影响,使评价指标赋权更加科学有序^[17],其赋权步骤如下。

(1) 决策数据获取和排序

邀请 5 位相关专家,包括 3 位具有项目相关资质的城市轨道交通建设负责人及 2 位从事轨道交通和 PPP 融资模式研究的大学教授。专家根据同一级指标的影响程度对上述指标进行打分,构成风险指标原始集合 $X = (x_1, x_2, \dots, x_5)$,将初始打分数据从大到小进行排序 (从 0 开始编号),得到新的数据集合 $Y = (y_0, y_1, \dots, y_4)$ 。

(2) 集合 Y 中各数据的权重计算式为

$$\psi_{n+1} = \frac{C_{m-1}^n}{\sum_{k=0}^{m-1} C_{m-1}^k} = \frac{C_{m-1}^n}{2^{m-1}}, n = 0, 1, \dots, m-1 \quad (1)$$

式中: $\sum_{n=0}^{m-1} \psi_{n+1} = 1$; m 为专家数; $n = 0, 1, 2, 3, 4$ 。

(3) 用加权向量 ψ_{n+1} 进行数据加权,得到数据集合 Y 的绝对权重

$$w_i = \sum_{n=0}^{m-1} \psi_{n+1} y_n, i = 1, 2, \dots, z \quad (2)$$

式中: i 为评价指标个数。

(4) 将评价指标的绝对权重进行归一化处理,得到相对权重

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^z w_i}, i = 1, 2, \dots, z \quad (3)$$

2. 风险评价模型的建立

可拓综合评价法由我国学者蔡文^[18]于 1983 年创立,以可拓集合为基础,把事物的性与量相结合,从定性与定量两个角度去研究事物并解决其中的矛盾。笔者根据已经确定的权重,计算得到各风险因素与评价目标的关联度,最后根据最大隶属原则得出评价等级。对于轨道交通 PPP 项目而言,风险评价的结果要综合考虑定性与定量数据,因此,可拓综合评价法的实用性较强,为上述关键风险指标体系建立了可拓综合评价模型^[19]。

可拓学的逻辑细胞是物元,它由三元有序向量组 $R = (N, C, V)$ 表示,扩展到 m 个具备相同特征的待评物元的情况 $R_1 = (N_1, C, V_1), R_2 = (N_2, C, V_2), \dots, R_m = (N_m, C, V_m)$, 则可表示为

$$R = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ c_1 & v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1m} \\ c_2 & v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_n & v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: N 为待评物元的整体集合; N_j 为各个待评物元, $j = 1, 2, \dots, m$; v_{ij} 为第 j 个待评物元的第 i 个特性的量化数值, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$ 。

在此基础上,可拓综合评价方法包括如下 7 个步骤。

(1) 确定经典域物元

假设有 m 个评价物元 N_1, N_2, \dots, N_m , 在此阶段可视为评价类型,表示各个评价物元中各个特征的取值范围,即 $[a_{ij}, b_{ij}]$,则同征物元为

$$R_0 = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ c_1 & [a_{11}, b_{11}] & [a_{12}, b_{12}] & \cdots & [a_{1m}, b_{1m}] \\ c_2 & [a_{21}, b_{21}] & [a_{22}, b_{22}] & \cdots & [a_{2m}, b_{2m}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_n & [a_{n1}, b_{n1}] & [a_{n2}, b_{n2}] & \cdots & [a_{nm}, b_{nm}] \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: N_j 为第 j 个评价物元, $j = 1, 2, \dots, m$; c_i 为第 i 个评价指标, $i = 1, 2, \dots, n$; $h_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}]$ 为经典域,表示在 N_j 的类别中 c_i 的取值范围。

(2) 确定节域物元

节域是各特征值的最大取值范围,即

$$R_p = (P, C, V_p) = \begin{bmatrix} P & c_1 & [a_{1p}, b_{1p}] \\ & c_2 & [a_{2p}, b_{2p}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{np}, b_{np}] \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: P 为全部的评价类型; $h_{ip} = [a_{ip}, b_{ip}]$ 为评价类型 P 关于评价指标 c_i 的量值范围。

(3) 确定待评物元

$$R_d = \begin{bmatrix} c_1 & v_1 \\ P & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: R_d 为待评物元, v_i 为待评物元 R_d 在特征 c_i 上的取值。

(4) 确定评价指标的权重

前文已经采用 C-OWA 算子进行指标赋权,在此不再重复说明。需要注意的是,运用可拓综合评价法需要评价指标权重同时满足以下两个前提,即 $W_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n)$, $\sum_{i=1}^n W_i = 1$ 。

(5) 计算点距

点 v_i 与区间 h_{ij} 的距离即为点距,由 $D(v_i, h_{ij})$ 表示,假设有两个区间 h_{ij} 和 h_{ip} ,则点 v_i 与两个区间的点距分别为

$$D(v_i, h_{ij}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij}) \quad (8)$$

$$D(v_i, h_{ip}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{ip} + b_{ip}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ip} - a_{ip}) \quad (9)$$

(6) 确定关联函数与关联度

待评指标 c_i 与评价类别 j 的归属关系函数为

$$K_j(v_i) = \begin{cases} \frac{D(v_i, h_{ij})}{D(v_i, h_{ip}) - D(v_i, h_{ij})} & v_i \notin h_{ij} \\ \frac{-D(v_i, h_{ij})}{|h_{ij}|} & v_i \in h_{ij} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $|h_{ij}| = |b_{ij} - a_{ij}|$ 为区间长度。

将指标权重与关联度函数有机结合,计算待评目标的各个特征值 v_i 与评价物元类别 j 的复合关联度

$$K_j(p) = \sum_{i=1}^n W_i K_j(v_i) \quad (11)$$

(7) 确定评价等级

对于某一待评目标,要计算其与各个评价类型的复合关联度中最大者,即为该待评目标的所属类型

$$K_j = \max K_j(P) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

则判定待评物元 P 属于类型 j 。

三、案例分析

青岛地铁 1 号线是青岛市轨道交通在建的一条地铁线路,该线是连接黄岛区和城阳区的南北方向骨干线路。全线南至黄岛峨眉山路站,北至兴国路站,连接黄岛区、市南区、市北区、李沧区、城阳区等众多核心区,途经青岛北站、青岛火车站、黄岛汽车站等重要交通枢纽,线路总长 42.7 km,总投资 372.93 亿元,预计开通时间为 2020 年底。笔者按风险评价步骤,从项目开通运营期的风险角度出发,对青岛地铁 1 号线进行详细的分析评价。

1. 指标权重的确定

邀请 5 位专家对项目风险指标权重进行打分,1~5 分别为{可忽略、轻微、中度、较严重、非常严重},运用 C-OWA 算子确定指标体系权重。以一级指标 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 的权重计算为例,其评分情况如表 2 所示。

表 2 一级指标专家打分值					
指标	评分				
	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
a_1	2	1	2	1	1
a_2	1	3	2	3	3
a_3	3	2	2	3	4
a_4	3	3	3	2	1
a_5	1	2	2	1	1

以指标 a_1 的权重值计算为例,先对评分值进行排序: $Y = (2, 2, 1, 1, 1)$, $m = 5$, 由式(1)可得各数据的权重 $\Psi = (0.062\ 5, 0.250\ 0, 0.375\ 0, 0.250\ 0, 0.062\ 5)$, 由式(2)得评价指标的绝对权重 $w_1 = 1.312\ 5$, 同理可得: $w_2 = 2.625\ 0, w_3 = 2.750\ 0, w_4 = 2.625\ 0, w_5 = 1.312\ 5$ 。

由式(3)可得一级指标的相对权重 $W = (0.123, 0.247, 0.259, 0.247, 0.123)$ 。

同理可得:各二级指标的权重 $W_1 = (0.367, 0.133, 0.233, 0.267)$, $W_2 = (0.400, 0.320, 0.280)$, $W_3 = (0.356, 0.327, 0.317)$, $W_4 = (0.237, 0.144, 0.305, 0.314)$, $W_5 = (0.198, 0.259, 0.210, 0.333)$ 。

2. 风险评价模型的确定

(1) 一级风险指标的评价过程

采用 C-OWA 算子与可拓综合评价方

法对青岛地铁 1 号线进行风险评价,流程如下。

①建立物元模型。根据各风险因素的严重程度,将其归类为 5 个等级, $N_j = \{\text{可忽略、轻微、中度、较严重、非常严重}\}$, 由式(4)得物元模型

$$R = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_5 \\ c_1 & v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{15} \\ c_2 & v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{18} & v_{18,1} & v_{18,2} & \cdots & v_{18,5} \end{bmatrix}$$

式中: $i = 1, 2, \cdots, 18; j = 1, 2, \cdots, 5$ 。

②确定经典域物元。根据相关文献及专家意见,明确各风险一级指标的经典域。采用区间量化法确定 5 个风险等级 N_j , 分别对应 h_{ij} 为 $(0, 1], (1, 2], (2, 3], (3, 4], (4, 5]$, 由式(5)可得

$$R_0 = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_5 \\ c_1 & [0, 1] & [1, 2] & \cdots & [4, 5] \\ c_2 & [0, 1] & [1, 2] & \cdots & [4, 5] \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{18} & [0, 1] & [1, 2] & \cdots & [4, 5] \end{bmatrix}$$

③确定节域物元。由式(6)可得

$$R_p = (P, C, V_p) = \begin{bmatrix} & c_1 & (0, 5] \\ P & c_2 & (0, 5] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{18} & (0, 5] \end{bmatrix}$$

④确定待评物元。在城市轨道交通 PPP 项目中,待评价的一级风险共有政治法律、经济、市场、公私合作以及技术 5 个,通过专家打分值计算各关键风险因素得分平均值,此处采用物元 R_{di} 表示:

$$R_{d1} = \begin{bmatrix} & c_1 & 2.8 \\ P & c_2 & 1.0 \\ & c_3 & 1.8 \\ & c_4 & 2.0 \end{bmatrix}; R_{d2} = \begin{bmatrix} & c_1 & 3.8 \\ P & c_2 & 3.0 \\ & c_3 & 2.4 \end{bmatrix};$$
$$R_{d3} = \begin{bmatrix} & c_1 & 2.2 \\ P & c_2 & 2.2 \\ & c_3 & 2.0 \end{bmatrix}; R_{d4} = \begin{bmatrix} & c_1 & 1.8 \\ P & c_2 & 1.2 \\ & c_3 & 2.2 \\ & c_4 & 2.4 \end{bmatrix};$$

$$R_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} c_1 & 1.0 \\ P & c_2 & 1.4 \\ & c_3 & 1.2 \\ & c_4 & 1.6 \end{bmatrix}$$

⑤明确评价指标的权重。采用 C - OWA 算子进行指标赋权。

⑥计算点距和关联函数值。由式(8) ~ 式(10) 计算政治法律风险物元 R_{d1} 的指标 $c_1、c_2、c_3、c_4$ 的值: $v_1 = 2.8, v_2 = 1.0, v_3 = 1.8, v_4 = 2.0$ 。关于 5 个评价等级的关联函数值结果如表 3 所示。

表 3 各指标值 v_i 关于评价等级的关联函数值

关联函数值	v_1	v_2	v_3	v_4
K_1	-0.450	0.000	-0.308	-0.333
K_2	-0.267	0.000	0.200	0.000
K_3	0.200	-0.500	-0.100	0.000
K_4	-0.083	-0.667	-0.400	-0.333
K_5	-0.353	-0.750	-1.100	-0.500

⑦确定关联度。结合指标权重与关联度函数,由式(11) 计算政治法律风险物元 R_{d1} 关于各个风险类别 N_j 的关联度 $K_j(R_{d1}) = \sum_{i=1}^4 W_i K_j(v_i) = (-0.325\ 8, -0.051\ 4, -0.016\ 4, -0.301\ 3, -0.619\ 1)$ 。

⑧确定各一级风险指标的风险等级。以政治法律风险物元 R_{d1} 为例,由于 $K_3(R_{d1})$ 最大,因此认为政治法律风险属于第 3 个风险种类,即中度风险。经济、市场、公私合作以及技术一级风险物元 $R_{d2}、R_{d3}、R_{d4}、R_{d5}$ 的风险类别判定重复步骤⑥ ~ 步骤⑧,得到的结果如表 4、表 5 所示。

表 4 各指标值 v_i 关于风险类别 N_j 的关联函数值

关联函数值	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
$K_i(v_5)$	-0.700	-0.600	-0.400	0.200	-0.140
$K_j(v_6)$	-0.500	-0.330	0.000	0.000	-0.330
$K_i(v_7)$	-0.368	0.143	0.400	-0.200	-0.400
$K_i(v_8)$	-0.353	-0.083	0.200	-0.267	-0.450
$K_j(v_9)$	-0.353	-0.083	0.200	-0.267	-0.450
$K_i(v_{10})$	-0.333	0.000	0.000	-0.333	-0.500
$K_i(v_{11})$	-0.308	0.200	-0.100	-0.400	-1.100
$K_j(v_{12})$	-0.143	0.200	-0.400	-0.600	-0.700
$K_i(v_{13})$	-0.353	-0.083	0.200	-0.267	-0.450
$K_i(v_{14})$	-0.368	-0.143	0.400	-0.200	-0.400
$K_j(v_{15})$	0.000	0.000	-0.500	-0.667	-0.750
$K_i(v_{16})$	-0.220	0.400	-0.300	-0.533	-0.650
$K_j(v_{17})$	-0.143	0.200	-0.400	-0.600	-0.700
$K_i(v_{18})$	-0.270	0.400	-0.200	-0.467	-0.600

表 5 各一级风险物元 R_{di} 关于风险类别 N_j 的关联度

关联度	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
$K_j(R_{d1})$	-0.325 8	-0.051 4	-0.016 4	-0.301 3	-0.619 1
$K_j(R_{d2})$	-0.543 0	-0.385 6	-0.048 0	0.024 0	-0.273 6
$K_j(R_{d3})$	-0.346 7	-0.056 7	0.136 6	-0.287 9	-0.465 9
$K_j(R_{d4})$	-0.316 8	0.006 0	0.105 3	-0.325 4	-0.624 4
$K_j(R_{d5})$	-0.176 9	0.278 8	-0.327 3	-0.551 6	-0.663 7

选择各风险物元与各风险类别关联度最大者,判定该风险物元风险类型。对经济风险物元而言, $K_4(R_{d2})$ 最大,由此判别经济风险属于第四个风险类型,即较严重风险。同理可得,市场风险属于中度风险;公私合作风险属于中度风险;技术风险属于轻微风险。

(2)项目总体风险的等级评价

将可拓物元法进行扩展,对青岛地铁 1 号线项目总体风险进行更加综合的评价。

①将点距扩展成区间距。将区间 (x,y) 与区间 X_0 的距离称为区间距,由 $D((x,y), X_0)$ 表示,则

$$D((x,y), X_0) = \frac{1}{2} [D(x, X_0) + D(y, X_0)] \tag{13}$$

由式(8) 可得区间 (x,y) 与经典域 h_{ij} 的区间距

$$D((x,y), h_{ij}) = \frac{1}{2} \left[\left| x - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| + \left| y - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| - (b_{ij} - a_{ij}) \right] \tag{14}$$

由式(9) 可知,区间 (x,y) 与节域 h_{ip} 的区间距为

$$D((x,y), h_{ip}) = \frac{1}{2} \left[\left| x - \frac{1}{2}(a_{ip} + b_{ip}) \right| + \left| y - \frac{1}{2}(a_{ip} + b_{ip}) \right| - (b_{ip} - a_{ip}) \right] \tag{15}$$

②扩展关联函数。把式(10) 扩大为区间关联函数

$$K_j(x,y) = \begin{cases} \frac{D((x,y), h_{ij})}{D((x,y), h_{ip}) - D((x,y), h_{ij})} & (x,y \notin h_{ij}) \\ \frac{-D((x,y), h_{ij})}{|h_{ij}|} & (x,y \in h_{ij}) \end{cases} \tag{16}$$

由式(4) 得到物元模型

$$R = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_5 \\ c_1 & v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{15} \\ c_2 & v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_5 & v_{51} & v_{52} & \cdots & v_{55} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: N_j 为风险等级; c_j 为政治法律、经济、市场、公私合作以及技术 5 个一级风险指标,经典域和节域同一级指标。

由式(7)可知,青岛地铁 1 号线项目待评物元为

$$R_d = \begin{bmatrix} c_1 & (2,3) \\ c_2 & (3,4) \\ P & c_3 & (2,3) \\ c_4 & (2,3) \\ c_5 & (2,3) \end{bmatrix} \quad (18)$$

③明确评价指标权重。采用 C - OWA 算子进行指标加权,得到 $W = (0.123, 0.247, 0.259, 0.247, 0.123)$ 。

④确定关联度。计算其他 4 个风险指标与 5 个风险类别之间的关联度,汇总得到关联度矩阵

$$K_{Rd} = \begin{bmatrix} -0.4286 & -0.2000 & 0.0000 & -0.2000 & -0.4286 \\ -0.6250 & -0.5000 & -0.2500 & 0.0000 & -0.2500 \\ -0.4286 & -0.2000 & 0.0000 & -0.2000 & -0.4286 \\ -0.4286 & -0.2000 & 0.0000 & -0.2000 & -0.4286 \\ -0.2500 & 0.0000 & -0.2500 & -0.5000 & -0.6250 \end{bmatrix}$$

再考虑权重,计算综合关联度: $K_j(R_d) = (-0.4547, -0.2493, -0.0925, -0.1873, -0.4082)$ 。

由于 $K_3(R_d)$ 最大,判定青岛地铁 1 号线项目的总体风险级别为第三个风险类别,即中度风险。综上所述,青岛地铁 1 号线 PPP 项目运营期风险情况尚属正常水平,但从各一级指标的风险评价结果来看,经济风险水平较高,属于该项目的重点风险,因此,风险管理过程中应该加强此类风险的应对工作。

四、结 论

(1)从 C - OWA 算子所确定的指标权重数值来看,城市轨道交通 PPP 项目运营期

的政治法律风险、经济风险、市场风险、公私合作风险以及技术风险所占比重分别为 0.123,0.247,0.259,0.247,0.123。

(2)引入青岛地铁 1 号线实例验证应用,由评价模型得出的综合关联度数值表明该 PPP 项目运营期风险等级为中度,且一级指标政治法律风险、市场风险和公私合作风险均为中度,经济风险较大且技术风险较为轻微,该 PPP 项目运营期的经济风险应该作为该项目风险控制的重点。评论的结果与事实相符,验证了该模型的适用性和可行性。

(3)该案例分析不仅能帮助青岛地铁 1 号线的运营商对风险进行防范以及应对,还可以促进 PPP 融资模式在轨道交通领域的应用,为类似项目的风险管控提供参考。

参考文献:

[1] 熊婧涵. 探析我国城市轨道交通发展现状与对策[J]. 决策探索(中),2018(7):80.

[2] 王秋菲,石丹,常春光. 多案例的 PPP 项目风险分析与防范[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2016,18(5):494-500.

[3] THOMAS A V, KALIDINDI S N, GANESH L S. Modeling and assessment of critical risks in BOT road projects [J]. Construction management and economics, 2006, 24 (4): 407-424.

[4] 颜红艳,贺正楚,李晶晶,等. 城市轨道交通 PPP 项目主体行为风险评价[J]. 科学决策, 2019(4):1-22.

[5] 王建波,赵佳,牛发阳. 基于 Choquet 模糊积分的城市轨道交通 PPP 模式融资风险评价[J]. 青岛理工大学学报,2016,37(1):96-101.

[6] 谢飞,刘明,聂青. 基于 ISM - ANP - Fuzzy 的城市轨道交通 PPP 项目界面风险评价[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(3):167-172.

[7] 宋博,武瑞娟,牛发阳. 基于 OWA 与灰色聚类的城市轨道交通 PPP 融资风险评价方法研究[J]. 隧道建设,2017,37(4):435-441.

[8] 张磊,何鹏. 基于 AHP - FCE 的 PPP 项目风险评价[J]. 住宅与房地产,2018(9):22-23.

[9] 付彦霖. 高速公路 PPP 项目风险管理研究[J]. 价值工程,2019,38(12):67-69.

[10] 王建波,刘芳梦,有维宝,等. 基于平衡计分卡

的城市轨道交通 PPP 项目运营期绩效评价[J]. 工程经济,2018,28(8):71-75.

[11] 王雅华. 基于 PPP 模式的城市轨道交通项目风险识别研究[J]. 河南科技,2018(25):124-129.

[12] 盛立. 城市轨道交通 PPP 项目风险识别与分担研究[D]. 西安:西安工程大学,2018.

[13] 顾曼,陈红梅. 城市轨道交通 PPP 项目公私双方关键风险识别[J]. 四川建材,2016,42(6):193-195.

[14] 袁明霞. 城市轨道交通 PPP 融资模式的风险识别[J]. 现代经济信息,2015(10):414.

[15] 聂凌毅,邓隆添. 公私合作模式下城市轨道交通项目风险识别研究[J]. 铁路工程造价管理,2010,25(5):27-30.

[16] YAGER R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making[J]. IEEE transactions on systems,man, and cybernetics,1988,18(1):183-190.

[17] 刘彩霞,郭树荣,纪蕾,等. 基于 OWA 算子和云物元的 PPP 项目审计质量评价[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(5):152-158.

[18] 蔡文. 可拓集合和不相容问题[J]. 科学探索学报,1983(1):83-97.

[19] 尹璐洁. 城市轨道交通 PPP 项目特许投资商风险管理研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.

Risk Evaluation of PPP Project in Operation Period of Urban Rail Transit

WANG Jianbo^{1,2},ZHANG Na¹,WANG Zhengquan¹

(1. School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266000, China;2. University Research Center for Smart City Construction and Management of Shandong, Qingdao 266520, China)

Abstract:In order to study the current operation of PPP projects in urban rail transit, more scientifically and effectively evaluate its operational period risk, firstly, this paper starts from the integrity and systematization of PPP project of urban rail transit, and establishes a risk evaluation index system based on political law, economy, market, public - private cooperation and technology. Secondly, C - OWA operator is used to scientifically weight the evaluation index, which reasonably weakens the influence of subjective factors in expert scoring and satisfies the fairness principle. The risk assessment model is established by combining the extension synthetic evaluation method. Finally, the model is applied to Qingdao metro line 1 to verify the applicability and scientificity of the model. The research in this paper assists the government and social capital to fully and deeply understand the operational risks of PPP projects of urban rail transit, and takes timely measures to control and prevent them.

Key words:PPP project of urban rail transit; operating period; risk assessment; C - OWA operator; extension synthetic evaluation method

(责任编辑:郝 雪 英文审校:林 昊)