

城市地下综合管廊 PPP 项目运作方式选择

——基于组合赋权法与改进的 VIKOR 法

赵 辉,马胜彬,卜泽慧

(青岛理工大学管理工程学院,山东 青岛 266520)

摘 要:城市地下综合管廊 PPP 项目已引起社会各界的广泛关注,其 PPP 运作模式的选择成为焦点问题。基于此,构建了基于组合赋权法与改进的多准则妥协解排序法(Vlse Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, VIKOR)的城市地下综合管廊 PPP 项目运作方式选择模型。首先,建立了城市地下综合管廊 PPP 项目运作方式选择指标体系,将 G1 主观赋权法和 C-OWA 算子客观赋权法相结合来计算组合权重;其次,将灰色关联分析和 VIKOR 法相融合,运用灰色关联改进的 VIKOR 法对城市地下综合管廊 PPP 项目运作方式进行了选择,使评价更具合理性;最后,通过实证计算验证了该模型的适用性和科学性,以期为城市地下综合管廊的建设发展提供参考依据。

关键词:地下综合管廊;PPP 项目运作方式;G1 法;C-OWA 算子;灰色关联-VIKOR 法

中图分类号:F283 **文献标志码:**A

城市地下综合管廊是重要市政基础设施,主要用于铺设城市地下用水、用电、热力及通信等管线,能够有效提高城市承载能力,被认为是城市正常运行的“生命线”。近年来,在解决我国日益严重的“马路拉链”“天空蜘蛛网”“城市看海”等“城市病”问题过程中,城市地下综合管廊能够有效提高城市地下空间利用效率,集成地下管线并形成合理的地下空间布局,已被广泛认可和大力倡导^[1-2]。由于城市地下综合管廊具有投资规模大、建设周期长等特点,国内多采用政府和社会资本合作(Public-Private-Partnership, PPP)模式进行融资。城市地下综合管廊 PPP 项目责任主体众多,风险分担及责权归属等问题错综复杂,因此,为城市地下综合

管廊选择合理可行的 PPP 运作方式在一定程度上决定了项目的发展情况。城市地下综合管廊 PPP 项目的运作方式选择研究对其前期可行性研究以及后期的成功运作都具有重要意义。

当前,对于城市地下综合管廊 PPP 模式的研究多集中于发展现状及问题^[3]、物有所值评价^[4]、风险管理^[2]、项目收益及定价^[5]等方面;在 PPP 运作方式的选择方面,已有研究结合调水工程^[6]、城市轨道交通^[7]和海绵城市^[8]等展开分析,但是鲜有学者专门进行城市地下综合管廊 PPP 项目运作方式的选择研究。由于我国城市地下综合管廊的特性,直接应用上述方法将有失合理和科学性,笔者在已有研究的基础上,结合我国城市地下综合管廊的独特性质以

及PPP项目各运作方式的特点,通过组合赋权法进行指标权重的计算,构建了灰色关联改进的多准则妥协解排序法(VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje,VIKOR)的评估模型,力求通过更加科学、合理的方法为我国城市地下综合管廊PPP项目运作方式的选择提供参考依据。

一、城市地下综合管廊PPP项目发展情况

截至2019年5月31日,全国PPP综合信息平台项目管理库统计入库PPP项目共9001个,入库项目金额13.59万亿元^[9],财政部政府和社会资本合作中心PPP项目管理库已入库的综合管廊项目244个,储备清单项目73个。笔者依照入库时间和投资金额对244例综合管廊项目进行统计(见表1)。

表1 2016—2019年入库的综合管廊项目投资金额和分布阶段数量统计

入库年份	投资金额/元			项目阶段		
	1亿及以下	1~10亿	10亿及以上	准备	采购	执行
2016	0	26	65	2	13	76
2017	0	28	44	1	16	55
2018	1	34	38	12	24	37
2019	0	1	7	6	2	0

注:数据来源于财政部政府和社会资本合作中心(全国PPP综合信息平台项目库)。

以PPP项目储备清单中仍处于识别阶段的73个项目为例,对其按照公布年份和投资金额进行统计(见表2)。

表2 2016—2019年储备清单中综合管廊项目投资数量统计

公布年份	投资金额/元		
	1亿及以下	1~10亿	10亿及以上
2016	3	23	21
2017	0	4	5
2018	0	4	13
2019	0	0	0

注:数据来源于财政部政府和社会资本合作中心(全国PPP综合信息平台项目库)。

2016年被称为我国城市地下综合管廊的建设元年,建设项目多,投资额度大,在已入库的项目中,有60个国家级示范项目、27个省级示范项目;2017—2018年处于稳步发

展阶段。从PPP综合信息平台项目库的统计分析来看,国内地下综合管廊PPP项目主要有如下特点:投资金额大,4年里,PPP项目管理库中投资金额在10亿元及以上的综合管廊项目有193个,占综合管廊PPP项目总数的61.8%;项目回报机制以政府付费和补助为主;PPP运作模式多采用建设—经营—转让(Build-Operate-Transfer,BOT)模式;合作年限较长。

二、PPP运作方式分类

PPP作为有效解决融资困境的途径之一,已得到国际公认。虽然各国已对PPP模式的运作方式进行了分类,但目前尚未形成统一体系:世界银行将PPP运作方式分为管理外包、服务外包、特许经营、租赁、BOT/建造—拥有一运营(Build-Own-Operate,BOO)和剥离6类;联合国培训研究院认为PPP模式包括BOT、BOO和特许经营3类运作方式;欧盟委员会将其划分为传统外包类、合伙开发类和一体化开发及经营类;加拿大政府与社会资本合作(PPP)国家委员会则将其归纳为包括捐赠协议在内的12类运作方式。

笔者在财政部和国家发展和改革委员会对PPP运作方式的分类基础上,参考文献[10-11]内容,根据我国城市地下综合管廊的复杂特性,从外包类、特许经营类、私有化类3个方面进行了分类总结(见表3)。外包类:针对整个项目中的一个或几个子项目,由政府 and 私营部门签订相关协议,明确分工,项目建设全过程的某个阶段或全过程由私营部门负责;特许经营类:政府和私营部门本着“利益共享、风险共担”的原则签订特许经营协议,项目部分或全部投资来自私营部门,同时,政府将特许期内的经营权移交给私营部门,私营部门在特许期内可通过项目获得收益,期满后项目归还政府;私有化类:政府和私营部门签订合约,政府将部分项目的经营权和资产所有权永久性地移交给私营部门,项目全部投资由私营部门承担,私营部门通过向政府或使用 者收费来获取利益,政府

在其中起监督作用。

表 3 PPP 运作方式分类汇总

一级分类	二级分类	三级分类
外包类	建设外包	设计—建造 (Design - Build, DB)
		设计—建造—主要维护 (Design - Build - Major Maintenance, DBMM)
	经营外包	服务外包
		管理外包
特许经营类	整体外包	设计—建造—运营 (Design - Build - Operate, DBO)
		设计—建造—运营—维护 (Design - Build - Operate - Maintain, DBOM)
		经营和维护 (Operations and Maintenance, O&M)
	BOT	建造—拥有—运营—移交 (Build - Own - Operate - Transfer, BOOT)
		建造—租赁—运营—移交 (Build - Lease - Operate - Transfer, BLOT)
		重构—运营—移交 (Reconstitution - Operate - Transfer, ROT)
私有化类	移交—运营—移交 (Transfer - Operate - Transfer, TOT)	购买—更新—运营—转让 (Purchase - Upgrade - Operate - Transfer, PUOT)
	私人融资倡导 (Private Finance Initiate, PFI)	设计—建造—移交—运营 (Design - Build - Transfer - Operate, DBTO)
		设计—建造—投资—运营 (Design - Build - Finance - Operate, DBFO)
	完全私有化	建造—拥有—运营 (Build - Own - Operate, BOO)
		建造—开发—运营 (Build - Develop - Operate, BDO)
	部分私有	股权转让

笔者分别就资产所有权、经营期限、投资主体和政府风险 4 个方面对 PPP 项目中的外包类、特许经营类和私有化类 3 种不同运作方式的主要特征进行了归纳总结 (见表 4)。

表 4 PPP 运作方式的主要特征

类别	资产所有权	经营期限/年	投资主体	政府风险
外包类	政府部门	1 ~ 5	政府部门	高
特许经营类	政府部门	25 ~ 30	私营部门	适中
	私营部门			
私有化类	私营部门	永久	私营部门	最小化

三、城市地下综合管廊 PPP 项目运作方式选择指标体系的构建

综合管廊 PPP 项目近几年发展迅速,融资额巨大、参与方众多、运作流程复杂 (见图 1),而不同城市背景、不同规模要求的项目呈现出一定的差异性,因此,每个项目在选择 PPP 运作方式时不能一概而论。

笔者在综合考虑国内其他城市基础设施 PPP 项目与城市地下综合管廊项目的共有影响因素的基础上,结合城市地下综合管廊的

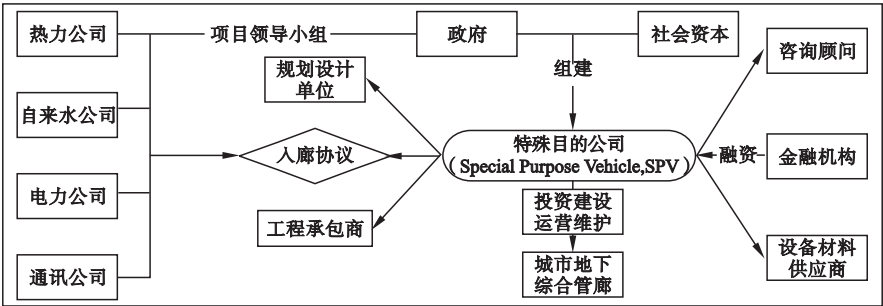


图 1 城市地下综合管廊 PPP 项目运作流程

特殊性和适用性,梳理国内 PPP 的相关政策文件,遵循综合性和可行性原则、普遍性和特殊性原则以及定性和定量相结合的原则,参考文献[3 - 8]中的相关内容,将其指标加以

概括整合,并结合城市地下综合管廊 PPP 项目的现实特征,最终从合作伙伴关系、政府能力、可实施性、项目收益 4 个方面筛选出适用性较强的影响指标。为进一步保证指标的可

信度,首先对从事城市地下综合管廊及 PPP 相关研究的部门和专家进行走访及问卷调查,共计发放问卷 120 份,回收有效问卷 103 份。根据第一轮问卷调查结果及专家反馈意见来设计第二轮专家调查问卷,通过两次问卷调查,筛选冗余性和相关性较强的指标,最终构建了由 10 项主要指标构成的城市地下综合管廊 PPP 项目运作方式选择指标体系(见表 5)。

表 5 PPP 项目运作方式衡量指标体系

目标层	准则层	指标层
城市地下综合管廊 PPP 项目运作方式选择 A	合作伙伴关系 B ₁	运营过程所有权要求 C ₁₁
		风险分配框架 C ₁₂
		期满处置 C ₁₃
	政府能力 B ₂	政府政策倾向 C ₂₁
		财政能力 C ₂₂
		运作程序复杂性 C ₃₁
	可实施性 B ₃	技术适应性 C ₃₂
		投资收益水平 C ₄₁
		收费定价机制 C ₄₂
	项目收益 B ₄	融资需求 C ₄₃

合作伙伴关系指社会资本方参与综合管廊 PPP 项目的方式与程度,主要从运营过程所有权要求、风险分配框架和期满处置等方面着手考量;政府能力指当地政府在城市地下综合管廊建设方面对于社会资本参与的政策倾向以及政府的财政能力等,政策的开放程度和财政能力的强弱水平决定着私有化的程度,影响着运作方式的选择;可实施性指某种运作方式应用于某个城市管廊项目的技术可行性,主要考虑运作程序复杂性和技术适应性两个方面;项目收益指不同运作方式应用于具体的城市管廊项目时的预期收益效果,不同运作方式具有不同的投资收益水平、收费定价机制以及融资需求。

四、城市地下综合管廊 PPP 项目运作方式选择模型的构建

1. G1 法与 C - OWA 算子组合赋权

由于直接应用 G1 法进行赋权主观性过强,引入了 C - OWA 算子与其构成组合

赋权法,避免了采用单一赋权法的主观和客观偏差,保证了指标权重计算过程中的合理性。

(1)G1 法。G1 法通过专家意见对指标进行重要度排序,主要步骤如下。

①确定各指标的排序关系:假设存在指标集为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$,若 $c_l(l \in 1, 2, \dots, n)$ 比 $c_k(k \in 1, 2, \dots, n)$ 重要,记为 $c_l > c_k$,其他指标间的比较类似,从而得到各指标的重要性排序。

②确定相邻指标之间重要程度的比值。由专家通过式 $r_j = c_j/c_{j+1}(j = 1, 2, \dots, n - 1)$ 进行比较, r_j 赋值如表 6 所示。

表 6 r_j 赋值参考表

取值	含义
1.0	前者与后者同等重要
1.2	前者比后者稍微重要
1.4	前者比后者明显重要
1.6	前者比后者非常重要
1.8	前者比后者极其重要

③计算指标相对于准则层的权重。

$$\begin{cases} u'_j = (1 + \prod_{i=j}^{n-1} r_i)^{-1} \\ u'_{j+1} = r_j u'_j (j = 1, 2, \dots, n - 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u'_j 为第 j 项指标层的权重,值($j = 1, 2, \dots, n - 1$); r_j 为指标重要程度之比。

④计算指标相对于目标层的权重。

$$\omega'_j = u'_j \times u'_d \quad (2)$$

式中: $u'_d(d = 1, 2, \dots, n - 1)$ 为第 d 项准则层的权重值。

(2)C - OWA 算子赋权法。C - OWA 是一种基于组合数改进加权向量,以实现科学加权计算的组合数有序加权算子。

①将某一个指标数据集 $C_i = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 中的数据按从大到小顺序排列,得 $b_0 \geq b_1 \geq \dots \geq b_{m-1}$,得到新的数据集 $b_i = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ 。

②通过组合数设计数据 b_i 的权重。

$$w_{i+1} = \frac{C_{m-1}^i}{\sum_{k=0}^{m-1} C_{m-1}^k} = \frac{C_{m-1}^i}{2^{m-1}} \quad (3)$$

式中: C_{m-1}^i 为组合数, $i = 1, 2, \dots, m - 1$ 。

③通过权重 w_{i+1} 对决策数据加权,得到

指标 C_j 的绝对权重值 ϖ_j 。

$$\varpi_j = \sum_{i=1}^m w_{i+1} b_i, j = 1, 2, \cdots, n \tag{4}$$

④计算指标 C_j 的相对权重值 ω''_j 。

$$\omega''_j = \frac{\varpi_j}{\sum_{j=1}^n \varpi_j}, j = 1, 2, \cdots, n \tag{5}$$

(3)通过两种方法分别赋权后,确定两个权重分别占组合权重的比例。

$$\omega_j = v_1 \omega'_j + v_2 \omega''_j \tag{6}$$

式中: v_1, v_2 为待定系数, $j = 1, 2, \cdots, n, v_1, v_2 \geq 0, v_1 + v_2 = 1$ 。

将待定系数 v_1, v_2 转化为以下优化问题求解

$$\begin{cases} \max F(v_1, v_2) = \sum_{i=1}^m (\sum_{j=1}^n (v_1 \omega'_j + v_2 \omega''_j)) \\ v_1 + v_2 = 1, v_1, v_2 \geq 0 \end{cases}$$

根据拉格朗日极值条件求解,得到

$$\begin{cases} v'_1 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega'_j x_{ij}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega'_j x_{ij})^2 + (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega''_j x_{ij})^2}} \\ v'_2 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega''_j x_{ij}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega'_j x_{ij})^2 + (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega''_j x_{ij})^2}} \end{cases}$$

对 v'_1, v'_2 归一化处理。

$$\begin{cases} v_1 = v'_1 / (v'_1 + v'_2) \\ v_2 = v'_2 / (v'_1 + v'_2) \end{cases} \tag{7}$$

2. 建模过程

VIKOR 法基本观点是:确定理想解与负理想解,然后比较各被评价对象的评估值,根据其与理想指标值的距离大小进行优劣排序。笔者充分考虑到 VIKOR 法在信息有限的条件下进行评价可能会丢失部分信息的缺点,将灰色关联分析引入该方法,基于其能够充分挖掘数据信息,使数据更具有准确性的优点构建了灰色关联 - VIKOR 模型^[12-13]。

在一个多准则决策中,假设待评价对象有 n 个,评价指标有 m 个,记 f_{ij} 为在指标 a_j 下评价对象 A_i 的评价值($i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m$),采用改进的 VIKOR 法进行评价

的步骤如下。

(1)根据决策矩阵 F ,计算各个指标的正理想解 f_i^* 与负理想解 f_i^- 。

$$f_i^* = [(\max_j f_{ij} | j \in I), (\min_j f_{ij} | j \in O)] \tag{8}$$

$$f_i^- = [(\max_j f_{ij} | j \in O), (\min_j f_{ij} | j \in I)] \tag{9}$$

式中: I 为效益性指标集合; O 为成本型指标集合。

(2)计算基于传统 VIKOR 法的群体效益值 S_i 和个别遗憾值 R_i 。

$$S_i = \sum_{j=1}^m W_j (f_{ij}^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-) \tag{10}$$

$$R_i = \max_j \{ W_j (f_{ij}^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-) \} \tag{11}$$

式中: S_i 和 R_i 均为越小越好型指标。

(3)确定最大、最小群体效益及个别遗憾值。

$$S^* = \min_i S_i, S^- = \max_i S_i \tag{12}$$

$$R^* = \min_i R_i, R^- = \max_i R_i \tag{13}$$

(4)计算待确定方案与正、负理想解的灰色关联度。

A_i 在指标 a_j 下与正理想解的灰色关联系数为

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^* = & \frac{\min_i \min_j |W_j (f_{ij} - f_j^*)| + \rho \max_i \max_j |W_j (f_{ij} - f_j^*)|}{W_j |f_{ij} - f_j^*| + \rho \max_i \max_j |W_j (f_{ij} - f_j^*)|} \end{aligned} \tag{14}$$

式中:分辨系数 ρ 取 0.5。

A_i 在指标 a_j 下与负理想解的灰色关联系数为

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^- = & \frac{\min_i \min_j |W_j (f_{ij} - f_j^-)| + \rho \max_i \max_j |W_j (f_{ij} - f_j^-)|}{W_j |f_{ij} - f_j^-| + \rho \max_i \max_j |W_j (f_{ij} - f_j^-)|} \end{aligned} \tag{15}$$

式中:分辨系数 ρ 取 0.5。

与正、负理想方案的关联度分别为

$$\varepsilon_i^* = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}^* \tag{16}$$

$$\varepsilon_i^- = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}^- \tag{17}$$

(5)计算基于灰色关联分析的方案 A_i 与负理想方案的相对关联度 α_i 和方案 A_i 中与

负理想方案相对关联最大指标的关联度 β_i , 两指标均为越小越优型。

$$\alpha_i = \varepsilon_i^- / \varepsilon_i^*, \beta_i = \max_j (\varepsilon_{ij}^- / \varepsilon_{ij}^*) \quad (18)$$

式中: α_i 为群体效益值; β_i 为个别遗憾值。

(6) 确定 α_i 和 β_i 的最大值和最小值。

$$\alpha^* = \min_i \alpha_i, \alpha^- = \max_i \alpha_i$$
$$\beta^* = \min_i \beta_i, \beta^- = \max_i \beta_i \quad (19)$$

(7) 计算各方案综合指标 Q_i 。

$$Q_i = v \frac{(\lambda_i - \lambda^*)}{(\lambda^- - \lambda^*)} + (1 - v) \frac{(\mu_i - \mu^*)}{(\mu^- - \mu^*)} \quad (20)$$

式中: $\lambda_i = S_i \times \alpha_i$ 和 $\mu_i = R_i \times \beta_i$ 分别为灰色关联改进后的 VIKOR 法的群体效益值和个别遗憾值, 群体效益值的最大值和最小值分别为 $\lambda^* = S^* \times \alpha^*$, $\lambda^- = S^- \times \alpha^-$; 个别遗憾值的最大值和最小值分别为 $\mu^* = R^* \times \beta^*$, $\mu^- = R^- \times \beta^-$ 。 v 为决策者的决策偏好系数, $v > 0.5$ 表示决策者乐意以群体效益大为倾向; $v < 0.5$ 表示决策者乐意以个体遗憾值小为倾向; 笔者选取 $v = 0.5$, 表示决策者更乐意以折衷的态度选择方案。

(8) 确定备选方案的排序和折衷方案。

按照 λ_i, μ_i, Q_i 从小到大的顺序对待决策方案进行排序, 评价对象排在前面的优。

若满足以下两个条件则根据 Q_i 的大小进行排序, Q_i 值越小, 则待决策方案越优。若不能满足条件②, 则排序最优方案 A_1 、排序次优方案 A_2 均为折衷方案; 若只满足条件②, 则可确定不满足条件①的方案的总体评价均为最优。

① $Q(A_2) - Q(A_1) \geq DQ, DQ = 1/(n - 1)$

式中: DQ 为判定系数。

② A_1 是 λ_i 或 μ_i 的排在前面的对象。

$$F = \begin{Bmatrix} 0.391 & 0.303 & 0.391 & 0.317 & 0.420 & 0.344 & 0.299 & 0.322 & 0.344 & 0.345 \\ 0.328 & 0.249 & 0.407 & 0.453 & 0.451 & 0.309 & 0.341 & 0.208 & 0.369 & 0.308 \\ 0.377 & 0.406 & 0.189 & 0.366 & 0.175 & 0.408 & 0.356 & 0.312 & 0.278 & 0.388 \\ 0.261 & 0.190 & 0.284 & 0.307 & 0.352 & 0.219 & 0.297 & 0.315 & 0.377 & 0.265 \\ 0.264 & 0.310 & 0.438 & 0.414 & 0.414 & 0.309 & 0.414 & 0.420 & 0.385 & 0.229 \\ 0.423 & 0.460 & 0.379 & 0.452 & 0.408 & 0.440 & 0.381 & 0.375 & 0.354 & 0.400 \\ 0.424 & 0.423 & 0.332 & 0.258 & 0.312 & 0.454 & 0.377 & 0.447 & 0.431 & 0.484 \\ 0.338 & 0.399 & 0.345 & 0.154 & 0.173 & 0.286 & 0.365 & 0.365 & 0.258 & 0.345 \end{Bmatrix}$$

五、实证应用

青岛西海岸新区贡北路、海口路地下综合管廊 PPP 项目共涉及 2 个子项目, 总长度约为 14.43 km, 两个子项目分别投资 145 003.36 万元和 19 387.84 万元, 总投资额 164 391.20 万元。规划入廊管线有热力、110 kV 电力、10 kV 电力、污水、给水、再生水、通信、天然气等 8 种管线, 回报机制采用“可行性缺口补助”。

结合青岛市的特征, 笔者选取股权转让、BDO、BOO、DBO、TOT、BOOT、BOT 和 PFI 8 种运作方式, 对该路段综合管廊 PPP 项目运作方式的选择进行研究。

1. 基于 G1 法和 C-OWA 算子的组合赋权

通过式(1)~(5)计算主观权重和客观权重, 利用式(6)~(7)求出待定系数 $v_1 = 0.45, v_2 = 0.55$, 从而得到组合权重(见表 7)。

表 7 PPP 项目运作方式衡量指标权重

目标层	准则层	指标层	主观权重	客观权重	组合权重
A	B ₁	C ₁₁	0.040	0.107	0.077
		C ₁₂	0.065	0.112	0.091
		C ₁₃	0.076	0.043	0.058
	B ₂	C ₂₁	0.071	0.082	0.077
		C ₂₂	0.098	0.085	0.091
	B ₃	C ₃₁	0.083	0.121	0.104
		C ₃₂	0.173	0.138	0.154
	B ₄	C ₄₁	0.183	0.163	0.172
		C ₄₂	0.133	0.089	0.109
		C ₄₃	0.071	0.060	0.065

2. 应用改进的 VIKOR 法进行评价

(1) 应用式 $f_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}$ 对约简后的

原始打分数据进行标准化处理, 得到标准化矩阵 F 。

(2)由式(8)~(9)确定正、负理想解。

$$f_i^+ = (0.424, 0.460, 0.438, 0.453, 0.451, 0.454, 0.414, 0.447, 0.431, 0.484)$$
$$f_i^- = (0.261, 0.190, 0.189, 0.154, 0.173, 0.219, 0.297, 0.208, 0.258, 2.229)$$

(3)由式(14)~(17)求解得到与正、负理想方案的关联度。

$$\epsilon^+ = (0.697, 0.712, 0.675, 0.595, 0.771, 0.855, 0.861, 0.630)$$
$$\epsilon^- = (0.658, 0.700, 0.707, 0.802, 0.640, 0.551, 0.566, 0.760)$$

(4)由式(10)~(13)计算得到基于传统VIKOR的群体效益值 S_i 、个体遗憾 R_i ;由式(18)~(19)计算得到基于灰色关联的群体效益值 α_i 、个体遗憾值 β_i (见表8)。

表8 不同方法下的群体效益值和个体遗憾值

运作方式	S_i	R_i	α_i	β_i
股权转让	0.515	0.162	0.944	1.107
BDO	0.542	0.172	0.983	1.177
BOO	0.544	0.097	1.048	1.188
DBO	0.694	0.154	1.349	1.349
TOT	0.471	0.191	0.830	1.076
BOOT	0.365	0.052	0.644	0.926
BOT	0.189	0.050	0.657	0.951
PFI	0.615	0.109	1.205	1.277

(5)由表8数据计算可得 $\lambda^+ = S^+ \times \alpha^+ = 0.122$, $\lambda^- = S^- \times \alpha^- = 0.936$, $\mu^+ = R^+ \times \beta^+ = 0.046$, $\mu^- = R^- \times \beta^- = 0.258$ 。通过式(20)计算基于改进VIKOR法的待决策方案的群体效益值 λ_i 、个体遗憾值 μ_i 和综合指数 Q_i (见表9)。

表9 基于灰色关联改进的VIKOR的群体效益值、个别遗憾值及综合指数

运作方式	λ_i	μ_i	Q_i
股权转让	0.486	0.179	0.537
BDO	0.533	0.202	0.622
BOO	0.569	0.116	0.878
DBO	0.936	0.208	0.882
TOT	0.391	0.205	0.542
BOOT	0.235	0.048	0.073
BOT	0.124	0.048	0.004
PFI	0.741	0.139	0.598

鉴于评价对象为PPP项目的8种运作方式,即 $n=8$,可得 $DQ=1/(n-1)=0.143$,

根据表9的计算结果以及折衷方案的两个判定条件进行排序,最终可以得到8种运作方式的综合排名结果为:BOT>BOOT>股权转让>TOT>PFI>BDO>BOO>DBO。由此可得,BOT是该PPP项目的最佳运作方式,BOOT次之。而青岛西海岸新区贡北路、海口路地下综合管廊PPP项目正是采用了这类运作方式,该结果符合实际情况,从而验证了该模型的有效性。

六、结 语

笔者总结了我国当前城市地下综合管廊PPP项目的发展情况,概括出该类项目的主要特征,结合PPP运作方式的运作流程及以往学者的研究,构建了衡量指标体系。通过组合赋权法计算权重,既有效避免了G1主观赋权法过于依赖人为经验的缺点,也弥补了C-OWA算子客观赋权法在对评价指标进行数学量化时的不足;同时引入了灰色关联分析法改进的VIKOR法,将灰色关联分析法能够充分挖掘数据信息的优势与VIKOR法有效融合,使运作方式的选择过程更具合理性和科学性;最后,通过实证计算得出待选择运作方式的综合排名,从而指导决策者采取有效措施进行决策,据此可以进一步为未来的城市地下综合管廊PPP项目建设和运营过程中的理论研究及实际运用提供参考依据。在未来的研究中,笔者将针对PPP项目的不同运作方式对评价指标体系进行完善,在前人研究的基础上采用更加智能、优化的算法选取指标,尽可能减少指标种类的冗余或缺失。

参考文献:

[1] 油新华.我国城市综合管廊建设发展现状与未来发展趋势[J].隧道建设(中英文),2018,38(10):19-27.

[2] 有维宝,王建波,张樵民,等.基于TOPSIS-UT的城市地下综合管廊PPP项目风险分担[J].土木工程与管理学报,2019,36(2):190-198.

[3] 王建波,赵佳,覃英豪.城市地下综合管廊投

融资体制[J]. 土木工程与管理学报,2016,33(4):8-11.

[4] 刘慧慧,孙剑,李飞飞. 城市地下综合管廊应用 PPP 模式的 VFM 评价[J]. 土木工程与管理学报,2016,33(4):122-126.

[5] 韦海民,李轶豪. 地下综合管廊 PPP 项目入廊定价影响因素研究:基于结构方程模型的分析[J]. 会计之友,2018(22):101-107.

[6] 刘博,沈菊琴,孙付华. PPP 模式下调水工程项目运作方式选择研究[J]. 中国农村水利水电,2017,422(12):145-149.

[7] 赵辉,邱玮婷,王楠,等. 城市轨道交通 PPP 项目运作方式选择[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(4):42-49.

[8] 赵辉,屈微璐,邱玮婷,等. 基于组合赋权法与可拓物元的海绵城市 PPP 项目运作方式选择研究[J]. 科技管理研究,2019,39(6):207-213.

[9] 全国 PPP 综合信息平台项目管理库. [EB/OL]. (2019-05-31). [2019-07-22]. <http://www.cpppc.org:8086/pppcentral/map/toPPP-Map.do>.

[10] 王灏. PPP 的定义和分类研究[J]. 都市轨道交通,2004,17(5):23.

[11] 李芊,王莹莹. 城市地下综合管廊项目 PPP 模式选择[J]. 隧道建设,2017,37(9):27-33.

[12] 刘学之,王潇晖,马婧,等. 乙烯行业低碳管理评价指标体系构建及分析[J]. 科技管理研究,2017(22):241-248.

[13] 董文心,王英,张悦,等. 基于 DEMATEL-相关性分析和 VIKOR-灰色关联分析的供应链绩效评价模型研究[J]. 科技管理研究,2018(9):198-204.

Selection of PPP Operation Mode in Urban Underground Utility Tunnel: Based on the Combined Weights Method and Improvement of VIKOR

ZHAO Hui, MA Shengbin, BU Zehui

(School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: The PPP project of urban underground utility tunnel has attracted wide attention from all walks of life, and the selection of its PPP operation mode has become a focus issue. Based on this, this paper constructs a PPP operation mode selection model of urban underground utility tunnel based on combination weighting method and the improved VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje). The model first establishes the index system of PPP operation mode selection for urban underground utility tunnel, and then calculates the combined weights by combining G1 subjective weighting method and C-OWA operator objective weighting method. Then the operation mode of PPP project of urban underground utility tunnel is selected by the improved VIKOR model based on grey correlation. The model combines grey correlation analysis with VIKOR, and the shortcomings of the two methods are complemented each other, so that the evaluation is more reasonable. Finally, the applicability and scientificity of the model are verified by empirical calculation, in order to provide reference for the construction and development of urban underground utility tunnel.

Key words: urban underground utility tunnel; PPP operation mode; G1 method; C-OWA operator; grey correlation-VIKOR method

(责任编辑:郝 雪 英文审校:林 昊)