

地下综合管廊 PPP 项目模式选择研究

韦海民, 苏 桐

(西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 采用 PPP 模式建设和运营地下综合管廊可以缓解政府的财政压力。PPP 模式分类众多, 各个模式的运作方式均存在差异, 采用合适的 PPP 模式对地下综合管廊项目进行建设和运营十分必要。提出 PPP 模式的两阶段模式选择模型。首先, 分别建立二级和三级 PPP 模式选择的指标体系, 应用 BP 神经网络为具体的地下综合管廊项目选择出合适的二级 PPP 模式; 然后, 运用改进的 TOPSIS 法, 即直觉梯形模糊 TOPSIS 法求得选出的二级 PPP 模式下各三级模式的贴近度, 基于贴近度大小对三级 PPP 模式进行排序; 最后以郑州市地下综合管廊 PPP 项目为例, 通过建立的两阶段模式选择模型对该项目适宜采用的 PPP 模式进行选择。结果表明, 模型的预测性能良好, 所得模型对于地下综合管廊 PPP 项目进行模式选择具有较强的指导意义和操作性。

关键词: 地下综合管廊; PPP 模式; BP 神经网络; 直觉梯形模糊数; TOPSIS 法

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)01-0126-08

Research on mode selection of utility tunnel PPP project

WEI Haimin, SU Tong

(School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech. Xi'an 710055, China)

Abstract: Using PPP mode to construct and operate utility tunnel can alleviate the financial pressure of government. PPP mode has many classifications and each way of working of them is different, so it is necessary to construct and operate the utility tunnel project with the appropriate PPP mode. A two-stage mode selection model for PPP mode was proposed. Firstly, the index system of selection of secondary and tertiary PPP mode is established respectively, by using BP neural network to choose the appropriate secondary PPP mode for specific utility tunnel project. Then, an improved TOPSIS method was used, namely intuitionistic trapezoidal fuzzy TOPSPS method to find the closeness to the tertiary modes which belong to the selected secondary PPP mode and then sort the tertiary PPP mode by closeness. Finally, the effectiveness of the PPP mode selection model is further illustrated by an example. The results show that the model has good predictive and strong guiding significance and operability for the mode selection of utility tunnel PPP project.

Key words: utility tunnel; PPP mode; BP neural network; intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers; TOPSIS method

传统直埋管线的扩容和维修比较困难, 而且不同管线单位的埋设时间不同, 这些都导致道路被反复开挖, 严重影响城市环境和道路交通。为了解决这一问题, 世界上比较认同的做法是采用地下综合管廊对市政管线进行敷设。地下综合管廊建设成本巨大, 给政府带来了巨大的财政压力, 所以我国现阶段大力提倡采用 PPP 模式建设地下综合管廊。PPP 是在基础设施及公共服务领域建立的一种长期合作关系^[1], 在实际应用中衍生出了众多运作方式不同的具体模式, 因此需要理清 PPP 模式的种类并根据项目的特点来选择合适的 PPP 模式。对此, 王灏^[2]提出了 PPP 模式三级结

构分类法, 本文在参考以往研究的基础上建立了新的 PPP 模式三级分类, 以求最大程度涵盖所有 PPP 模式, 如图 1 所示。

我国基础设施建设仍然存在盲目采用 BOT 模式的现象, 且对于 PPP 模式选择的相关研究较少, 因此本文构建了地下综合管廊 PPP 项目模式选择模型, 该模型可以较准确地对项目适宜采用的二级和三级 PPP 模式进行选择, 从而为地下综合管廊 PPP 项目顺利运行提供指导。

1 模式选择研究现状

在项目模式选择方面, 国外学者的研究相对

收稿日期: 2017-04-02

修改稿日期: 2018-01-15

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目(11JK0069)

第一作者: 韦海民(1971—), 男, 硕士生导师, 主要从事工程经济与管理等领域的教学与科研工作。E-mail: whmxs168@163.com

通讯作者: 苏 桐(1992—), 男, 硕士生, 主要研究城市建设与房地产开发。E-mail: al396798354@163.com

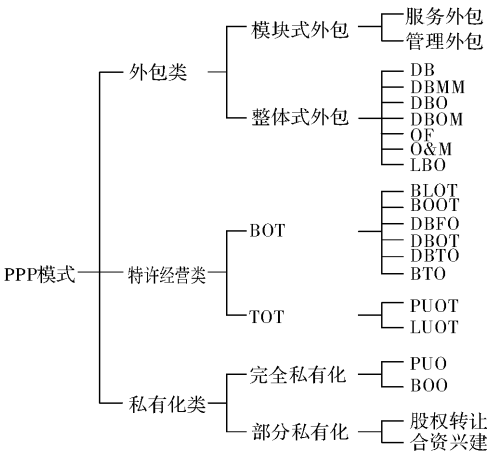


图 1 PPP 模式三级分类

Fig. 1 Three-stage classification of PPP mode

较早，Cheung^[3]和 Chang^[4]均采用多属性分析法对项目模型进行选择，并且 Chang 指出，应用多属性分析法选择项目模式时，需要综合考虑风险分担、契约不完备性和数据充足性等因素。Thomas^[5]和 Chan^[6]在 Cheung 和 Chang 研究的基础上提出了模糊选择模型以解决多属性分析法模式选择标准模糊的问题。Luu^[7]等提出了项目模式选择的案例式推理模型。Yuan^[8]等通过文献分析及案例研究的方法找出了影响 PPP 模式选择的 15 个指标。Thomas 等指出，政府的经济政策、社会对产品和服务的长期需求、私人部门的实力、运营效率、税率、服务质量等是决定 PPP 模式选择的因素^[9]。

国内对于项目模式选择的研究起步较晚，胡振^[10]研究了 PPP 项目模式选择与项目领域、特许经营期、收益方式和 VFM 效果这四个因素间的关系。简迎辉等^[11]认为项目自身特点、政府部门能力及经验偏好和法律政策等因素都会影响 PPP 模式选择。杨卫华^[12]等构建了以所有权转移效益、经营权控制程度、公私合作程度为坐标的三维框

架，识别出了 PPP 模式选择的三条路径。

综上所述，国内外对 PPP 模式选择的相关研究大多是针对整个基础设施领域选择二级 PPP 模式，而针对地下综合管廊的三级 PPP 模式选择研究甚少，鉴于此，本文首先针对地下综合管廊项目建立了二级和三级 PPP 模式选择指标体系，然后通过 BP 神经网络和直觉梯形模糊 TOPSIS 法为地下综合管廊项目选择合适的三级 PPP 模式。

2 指标体系的建立

2.1 指标初选

采用依次确定二级和三级 PPP 模式的方法，首先建立二级 PPP 模式选择的指标体系，再针对不同的二级模式分别建立对应的三级模式选择指标体系，保证模式选择结果的准确性。

地下综合管廊属于大型基础设施，项目最终的所有权不能属于私人部门，因此将私有化类 PPP 模式排除，考虑到项目类型分为新建和存量，模块式外包和 BOT 模式只适用于新建项目，TOT 模式只适用于存量项目，而整体式外包同时适用于新建和存量项目，故本文将二级 PPP 模式分为 5 类：模块式外包、整体式外包（新建）、整体式外包（存量）、BOT、TOT。

从项目全生命周期角度来看，存量项目可看作新建项目生命周期的一部分，因此，影响前者 PPP 模式选择的因素包含于影响后者 PPP 模式选择的因素之中，所以可先确定出影响新建地下综合管廊项目二级 PPP 模式选择的指标，再针对存量项目从中选择。在前人研究的基础上，结合地下综合管廊的特点，初选出了影响新建地下综合管廊项目二级 PPP 模式选择的 25 个指标，如表 1 所示。

表 1 新建地下综合管廊 PPP 项目二级 PPP 模式选择初选指标
Tab. 1 Primary index of secondary PPP mode of new utility tunnel project

指标		
项目自身	政府	社会资本
x_1 管廊投资规模	x_{11} 政府监管能力	x_{19} 社会资本融资能力
x_2 管线网络属性	x_{12} 政府财政支付能力	x_{20} 社会资本技术水平
x_3 外部性大小	x_{13} 政府管理能力	x_{21} 社会资本风险承受能力
x_4 技术复杂程度	x_{14} 政府既有经验	x_{22} 社会资本运营能力
x_5 管线单位入廊费用	x_{15} 政府风险承受能力	x_{23} 社会资本数量
x_6 可入廊单位数量	x_{16} 政策优惠	x_{24} 社会资本收益期望
x_7 管廊规模大小	x_{17} 政策倾向	x_{25} 社会资本收益稳定性
x_8 项目区位	x_{18} 政府目标偏好	
x_9 收益方式		
x_{10} 特许经营期		

为保证指标体系的准确性,本文采用聚类—灰色关联分析法,先通过聚类分析消除相关性大的指标,然后通过灰色关联分析筛选出重要性较大的指标,从而确定出最终的指标体系。

2.2 基于聚类分析的指标筛选

2.2.1 数据获取和预处理

通过邀请5位PPP领域专家和5位地下综合管廊领域专家对初选出的25个指标进行打分(打分标准采用李克特七级量表),然后采用min-max标准化对原始数据进行线性变换,公式为:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (\text{极大型指标})$$

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (\text{极小型指标})$$

2.2.2 聚类分析

将数据标准化后,通过SPSS 19.0软件的ward's method对初选的25个指标进行系统聚类分析,度量标准区间使用平方Euclidean距离,最终得到如表2所示的聚类结果。

表2 聚类分析结果

Tab. 2 Results of cluster analysis

聚类数	指标聚类
3	$\{x_2, x_3, x_4, x_6, x_8, x_{12}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{23}, x_{24}, x_{25}\} \{x_1, x_5, x_7, x_9, x_{10}\} \{x_{11}, x_{13}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}\}$
4	$\{x_2, x_3, x_4, x_6, x_{16}, x_{17}, x_{23}, x_{24}, x_{25}\} \{x_8, x_{12}, x_{14}, x_{15}, x_{18}\} \{x_1, x_5, x_7, x_9, x_{10}\} \{x_{11}, x_{13}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}\}$
5	$\{x_2, x_3, x_4, x_6, x_{16}, x_{17}, x_{23}, x_{24}, x_{25}\} \{x_8, x_{12}, x_{14}, x_{15}, x_{18}\} \{x_1, x_5, x_7, x_9, x_{10}\} \{x_{11}, x_{13}\} \{x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}\}$
7	$\{x_{16}, x_{17}\} \{x_2, x_3, x_4\} \{x_6, x_{23}, x_{24}, x_{25}\} \{x_8, x_{12}, x_{14}, x_{15}, x_{18}\} \{x_1, x_5, x_7, x_9, x_{10}\} \{x_{11}, x_{13}\} \{x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}\}$

对表2聚类结果进行单因素方差分析,结果显示聚类数为7的结果通过显著性检验,结合各指标的现实意义得出,将指标分为7类的聚类结果是合理的,因此最终选用该聚类结果进入下一步筛选。

2.3 基于灰色关联分析的指标筛选

按照以下四个步骤,分别对聚类结果的7组指标进行灰色关联分析,这里以第3组为例:

(1)以上一节中标准化后的指标为矩阵求差序列

$$\Delta x_{ij}(k) = |x'_i(k) - x x'_j(k)|$$

式中: $i, j = 6, 23, 24, 25$ 且 $i \neq j, k = 1, 2 \dots 10$ 。

(2)求关联系数

$$\xi_{ij}(k) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta x_{ij}(k) + \rho \Delta \max}$$

表3 灰色关联分析结果

Tab. 3 Results of Grey Correlation

组数	指标	重要度	选择结果
1	x_{16}, x_{17}	$x_{16} = x_{17}$	x_{16}
2	x_2, x_3, x_4	$x_2 = x_3 > x_4$	x_2, x_3
3	$x_6, x_{23}, x_{24}, x_{25}$	$x_6 > x_{24} > x_{25} > x_{23}$	x_6, x_{24}
4	$x_8, x_{12}, x_{14}, x_{15}, x_{18}$	$x_{12} = x_{15} > x_{18} > x_{14} > x_8$	x_{12}, x_{15}, x_{18}
5	$x_1, x_5, x_7, x_9, x_{10}$	$x_7 > x_1 > x_5 > x_9 > x_{10}$	x_1, x_7
6	x_{11}, x_{13}	$x_{11} = x_{13}$	x_{11}
7	$x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}$	$x_{19} > x_{22} > x_{21} > x_{20}$	x_{19}, x_{22}

式中: $i, j = 6, 23, 24, 25$ 且 $i \neq j, k = 1, 2 \dots 10$ 。 $\rho \in [0, 1]$ 为分辨系数, 常取 0.5。

(3)计算关联度

$$r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{ij}(k), i, j = 6, 23, 24, 25$$

且 $i \neq j, k = 1, 2 \dots 10$

(4)计算重要性并排序

第3组指标的重要性矩阵为 $A = (r_{ij})_{4 \times 3}$, 每一行的均值 $(\bar{r}_6, \bar{r}_{23}, \bar{r}_{24}, \bar{r}_{25})$ 即为指标 $x_6, x_{23}, x_{24}, x_{25}$ 的重要度, 重要度越大, 说明该指标对系统的影响越大, 可根据实际情况将重要度较小的指标剔除出去, 留下对系统影响较大的指标。

分别对聚类分析求得的7组指标进行灰色关联分析, 结果见表3。

2.4 确立指标体系

地下综合管廊 PPP 项目二级 PPP 模式选择的指标体系，见表 4。

经过聚类—灰色关联分析，最终确定了新建

表 4 新建地下综合管廊 PPP 项目二级 PPP 模式选择指标体系

Tab. 4 Index system of secondary mode selection of new utility tunnel PPP project

编号	指标	编号	指标	编号	指标
x_1	管廊投资规模	x_{11}	政府监管能力	x_{19}	社会资本融资能力
x_2	管线网络属性	x_{12}	政府财政支付能力	x_{22}	社会资本运营能力
x_3	外部性大小	x_{15}	政府风险承受能力	x_{24}	社会资本收益期望
x_6	可入廊管线单位数量	x_{16}	政策优惠		
x_7	管廊规模	x_{18}	政府目标偏好		

根据存量和新建项目的包含关系，从表 4 中选择存量地下综合管廊 PPP 项目模式选择指标体系，由于存量项目不需考虑地下综合管廊前期建设以及管线入廊等问题，故排除 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_6 、 x_{12} 五个指标，选择出的指标体系如表 5 所示。

在三级 PPP 模式选择指标体系的构建上，本文借鉴了 Yuan^[8]和李英攀^[13]的相关研究，并通过深入分析各三级 PPP 模式的含义，建立了一套三级 PPP 模式选择指标体系，如表 6 所示。

表 5 存量地下综合管廊 PPP 项目二级模式选择指标体系

Tab. 5 Index system of secondary mode selection of completed utility tunnel

编号	指标	编号	指标
x_7	管廊规模	x_{18}	政府目标偏好
x_{11}	政府监管能力	x_{19}	社会资本融资能力
x_{15}	政府风险承受能力	x_{22}	社会资本运营能力
x_{16}	政策优惠	x_{24}	社会资本收益期望

表 6 三级 PPP 模式选择指标体系

Tab. 6 Index system of tertiary PPP mode

二级 PPP 模式	三级 PPP 模式	选择指标	二级 PPP 模式	三级 PPP 模式	选择指标
模块式外包	服务外包 管理外包	政府监管能力	BOT	BLOT BOOT DBFO DBOT DBTO BTO	政府监管能力
		政府运营能力			政府财政能力
		私人部门运营能力			政府风险承受能力
		私人部门技术水平			政策优惠
整体式外包 (存量)	O&M LBO	政府监管能力			私人部门技术水平
		私人部门融资能力			私人部门风险承受能力
		私人部门运营能力			私人部门运营能力
		私人部门收益期望			私人部门收益期望
TOT	PUOT LUOT	政府监管能力	整体式外包 (新建)	DB DBMM DBO DBOM DF	政府监管能力
		私人部门融资能力			政府财政能力
		私人部门运营能力			政府运营能力
		私人部门收益期望			政府风险承受能力

3 地下综合管廊 PPP 项目模式选择模型的建立

对 PPP 模式的选择分为两个阶段，第一阶段采用 BP 神经网络对二级 PPP 模式进行选择，BP

神经网络拥有较强的非线性映射能力和泛化能力，适用于在多因素影响下对二级 PPP 模式进行选择；第二阶段采用直觉梯形模糊 TOPSIS 法针对选择出的二级 PPP 模式下的三级模式进行选择，既可以降低专家评价的主观性，充分利用原

始数据信息,又能集中反映每一种三级PPP模式的适用度。

3.1 基于BP神经网络的PPP二级模式选择模型

3.1.1 BP神经网络结构的确定

本文采用1个输入层、1个隐层和1个输出层的三层神经网络。表7中14个指标作为输入指标,因此输入层神经元数为 $P_n=14$ 。5类PPP二级模式作为输出,由于 $2^2 < 5 < 2^3$,故输出层神经元数为3个,用 (x, y, z) 的形式表示5个二级模式的期望输出值, $x, y, z=0, 1$,其中 $(1, 0, 0)$ 代表模块式外包; $(0, 1, 0)$ 代表整体式外包(新建); $(0, 0, 1)$ 代表整体式外包(存量); $(1, 0, 1)$ 代表BOT模式; $(0, 1, 1)$ 代表TOT模式。

隐层神经元个数的确定根据经验公式:

$$P_m = \sqrt{P_n + r} + \alpha$$

式中: P_m 为隐层神经元数, P_n 为输入层神经

数, r 为输出层神经元数, α 为 $[1, 10]$ 之间的整数。通过对模型的反复训练比较得出,隐层神经元数为10时BP神经网络的收敛效果最好。因此,本文建立了拓扑结构为14—10—3的BP神经网络模型。

3.1.2 数据获取和预处理

邀请4位政府部门专家、4位地下综合管廊领域专家和5位PPP领域专家针对5类PPP二级模式按照表7对各指标进行评价打分,作为BP神经网络输入层的输入值。这里将数据标准化到 $[-1, 1]$ 区间作为输入变量,公式为

$$x'_{ij} = \frac{2[x_{ij} - \min_j(x_{ij})]}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} - 1$$

式中: x_{ij} 为第 i 个指标原始值; $\max_j(x_{ij})$ 为第 i 个指标的得分最大值; $\min_j(x_{ij})$ 为第 i 个指标的得分最小值; x'_{ij} 为第 i 个指标归一化后的值。

表7 神经网络输入变量表

Tab. 7 Input variables of neural network

编号	指标	评价标准
x_0	项目类型	1-新建项目, 0-存量项目
x_1	管廊投资规模	5-大于50亿, 4-30~50亿, 3-20~30亿, 2-10~20亿, 1-小于10亿
x_2	管廊网络属性	3-对周边影响很大, 2-对周边影响大, 1-对周边影响较小
x_3	外部性大小	5-很大, 4-较大, 3-大, 2-中等, 1-较小
x_6	可入廊管线单位数量	4-多于8个, 3-6~8个, 2-3~6个, 1-少于3个
x_7	管廊规模	4-大于100 km, 3-60~100 km, 2-20~60 km, 1-小于20 km
x_{11}	政府监管能力	5-很强, 4-较强, 3-一般, 2-较差, 1-很差
x_{12}	政府财政支付能力	5-大于8 500亿, 4-5 000~8 500亿, 3-3 000~5 000亿, 2-1 500~3 000亿, 1-小于1 500亿
x_{15}	政府风险承受能力	5-很强, 4-较强, 3-一般, 2-较差, 1-很差
x_{16}	政策优惠	3-大力扶持, 2-适度优惠, 1-无优惠
x_{18}	政府目标偏好	4-融资, 3-提高运营效率和服务质量, 2-加快进度, 1-降低成本
x_{19}	社会资本融资能力	5-很强, 4-强, 3-较强, 2-中等, 1-一般
x_{22}	社会资本运营能力	4-很强, 3-较强, 2-一般, 1-较差
x_{24}	社会资本收益期望	4-很高, 3-较高, 2-中等, 1-较低

3.1.3 BP神经网络的学习训练和测试验证

选取5种二级PPP模式各8组数据作为训练数据,其余各5组数据用作测试验证。将40组归一化后的训练数据输入模型,对BP神经网络进行多次训练,将误差较小的一次保存用来测试。最终选取了训练次数为573,累计误差为 9.9716×10^{-4} 的BP神经网络模型用作PPP模式选择,如图2。

由于输出向量 x, y, z 的值在 $[0, 1]$ 区间,且存在误差,本文规定如果输出向量在 $[0, 0.4]$ 区间则近似看作0,如果在 $[0.6, 1]$ 区间则近似看

作1。

将剩余的5种PPP二级模式共25组数据归一化后输入训练好的BP神经网络模型进行测试验证,结果表明预测精度为92.89%,表明该模式选择模型具有较高的精度。

3.2 基于直觉梯形模糊TOPSIS法的PPP三级模式选择模型

传统的TOPSIS方法忽视了专家获得信息的不确定性以及专家权重,本文引入直觉梯形模糊数,将其与TOPSIS法相结合来解决该多属性群决策问

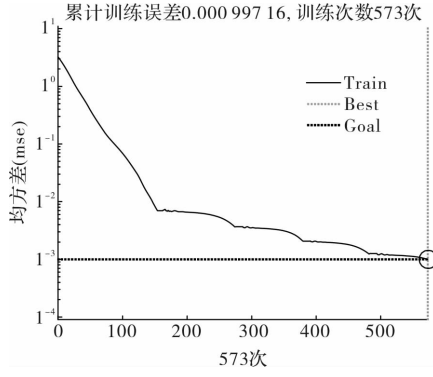


图2 BP神经网络性能曲线图

Fig. 2 Graph of BP neural network

题, 考虑了专家权重, 降低了专家评价的主观偏好和模糊性。

(1) 确定专家群体偏好值 r'_{ij}

设 $r_{ij}^{(k)} = \langle (a_{ij1}^{(k)}, a_{ij2}^{(k)}, a_{ij3}^{(k)}), (b_{ij1}^{(k)}, b_{ij2}^{(k)}, b_{ij3}^{(k)}), b_{ij4}^{(k)} \rangle (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, l)$ 是第 k 个专家针对第 i 个方案给出的第 j 个指标的偏好值, 则专家群体关于该方案上该指标的偏好均值 r'_{ij} 可通过 TrIFA 算子求得:

$$r'_{ij} = \langle (a'_{ij1}, a'_{ij2}, a'_{ij3}), (b'_{ij1}, b'_{ij2}, b'_{ij3}), b'_{ij4} \rangle = \text{TrIFA}(r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)} \dots r_{ij}^{(l)}) = \frac{1}{n} \bigoplus_{k=1}^l r_{ij}^{(k)} \quad (1)$$

这里自定义运算:

$$\bigoplus_{k=1}^l r_{ij}^{(k)} = \langle (\sum_{k=1}^l a_{ij1}^{(k)}, \sum_{k=1}^l a_{ij2}^{(k)}, \sum_{k=1}^l a_{ij3}^{(k)}, \sum_{k=1}^l a_{ij4}^{(k)}), (\sum_{k=1}^l b_{ij1}^{(k)}, \sum_{k=1}^l b_{ij2}^{(k)}, \sum_{k=1}^l b_{ij3}^{(k)}, \sum_{k=1}^l b_{ij4}^{(k)}) \rangle$$

(2) 计算 $r_{ij}^{(k)}$ 与群体平均偏好 r'_{ij} 的相似度

每位专家与专家群体平均偏好 r'_{ij} 之间的距离为:

$$D(r_{ij}^{(k)}, r'_{ij}) = (\frac{1}{12} (\sum_{c=1}^4 ((a'_{ijc} - a_{ijc}^{(k)}) + (b'_{ijc} - b_{ijc}^{(k)})^2) + \sum_{d=1,3} ((a'_{ijd} - a_{ijd}^{(k)}) (a'_{ij(d+1)} - a_{ij(d+1)}^{(k)}) + (b'_{ijd} - b_{ijd}^{(k)}) (b'_{ij(d+1)} - b_{ij(d+1)}^{(k)})))^{1/2} \quad (2)$$

与平均偏好的相似度为:

$$S(r_{ij}^{(k)}, r'_{ij}) = 1 - \frac{D(r_{ij}^{(k)}, r'_{ij})}{(\sum_{k=1}^l D(r_{ij}^{(k)}, r'_{ij}))} \quad (3)$$

(3) 确定直觉梯形模糊决策矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$

计算专家权重 $\omega_{ij}^{(k)}$:

$$\omega_{ij}^{(k)} = \frac{S(r_{ij}^{(k)}, r'_{ij})}{\sum_{k=1}^l (S(r_{ij}^{(k)}, r'_{ij}))} \quad (4)$$

通过 TrIFWA 算子确定出直觉梯形模糊决策矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$, 将每个专家的个人决策信息集结为专家群体决策信息, 公式为

$$r_{ij} = \langle (a_{ij1}, a_{ij2}, a_{ij3}, a_{ij4}), (b_{ij1}, b_{ij2}, b_{ij3}, b_{ij4}) \rangle = \text{TrIFWA}(r_{ij}^{(1)}, [r_{ij}^{(2)}]) = \bigoplus_{k=1}^l \omega_{ij}^{(k)} r_{ij}^{(k)} \quad (5)$$

(4) 确定指标标准化的期望决策权重

每位专家针对每个指标以直觉梯形模糊数的形式给出指标重要性评价, 设 $\xi_j^{(k)}$ 表示第 k 位专家对指标 j 的重要性评价, 则通过 TrIFWA 算子可求出第 i 个方案关于指标 j 的权重 ξ_{ij} :

$$\xi_{ij} = \langle (p_{ij1}, p_{ij2}, p_{ij3}, p_{ij4}), (q_{ij1}, q_{ij2}, q_{ij3}, q_{ij4}) \rangle = \text{TrIFWA}(\xi_j^{(1)}, \xi_j^{(2)} \dots \xi_j^{(l)}) = \bigoplus_{k=1}^l \omega_{ij}^{(k)} \xi_j^{(k)} \quad (6)$$

期望权重:

$$EV(\xi_{ij}) = \frac{1}{8} (\sum_{d=1}^4 (p_{ijd} + q_{ijd})) \quad (7)$$

标准化的期望决策权重为

$$\xi'_{ij} = \frac{EV(\xi_{ij})}{\sum_{j=1}^n EV(\xi_{ij})} \quad (8)$$

(5) 计算各个方案的加权正负分离测度

首先确定正理想解 o^+ 和负理想解 o^- :

$$o^+ = (o_1^+, o_2^+ \dots o_k^+)^T$$

$$o^- = (o_1^-, o_2^- \dots o_k^-)^T$$

当第 j 个指标为收益型指标时,

$$o_j^+ = \langle (\max_i a_{ij1}, \max_i a_{ij2}, \max_i a_{ij3}, \max_i a_{ij4}), (\max_i a_{ij1}, \max_i a_{ij2}, \max_i b_{ij3}, \max_i b_{ij4}) \rangle$$

$$o_j^- = \langle (\min_i a_{ij1}, \min_i a_{ij2}, \min_i a_{ij3}, \min_i a_{ij4}), (\min_i a_{ij1}, \min_i b_{ij2}, \min_i b_{ij3}, \min_i b_{ij4}) \rangle \quad (9)$$

当第 j 个指标为成本型指标时,

$$o_j^+ = \langle (\min_i a_{ij1}, \min_i a_{ij2}, \min_i a_{ij3}, \min_i a_{ij4}), (\min_i a_{ij1}, \min_i b_{ij2}, \min_i b_{ij3}, \min_i b_{ij4}) \rangle$$

$$o_j^- = \langle (\max_i a_{ij1}, \max_i a_{ij2}, \max_i a_{ij3}, \max_i a_{ij4}), (\max_i a_{ij1}, \max_i b_{ij2}, \max_i b_{ij3}, \max_i b_{ij4}) \rangle \quad (10)$$

第 i 个方案的正分离测度 S_i^+ 和负分离测度 S_i^- 为:

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^n \xi'_{ij} D(r_{ij}, o_j^+)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n \xi'_{ij} D(r_{ij}, o_j^-) \quad (11)$$

(6) 求相对贴近度 Z_i 并排序

$$Z_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (12)$$

贴近度越大, 则该方案越优。

4 案例分析

郑州市中心城区地下综合管廊工程位于郑州市二七商业区, 包含二七路、太康路两条道路, 呈“十字”形分布, 共需建设地下综合管廊 3.129 km (其中主线 2.079 km, 支线 1.05 km)。项目的总投资约 60 405.2 万元, 其中包括中央财政补贴暂定为 12 500 万元, 采用 PPP 模式投资部分为 47 905.2 万元, 采用 BOT 模式运作, 合作期限 30 a。

首先邀请 10 位专家针对当地具体情况按照表 7 对 14 个指标进行打分,其中政府部门 3 位,地下综合管廊领域专家 3 位,PPP 模式领域专家 4 位.项目类型取 1(新建项目),其余 13 个指标采取归一化后取平均值的方法确定每个指标的得分,确定输入矩阵为 $S=(1,-0.6,-0.2,-0.6,0.6,0.8,0.6,0.4,0.6,0.2,0.6,-0.6,0.6,-0.4)$,将其输入训练好的结构为 14-10-3 的 BP 神经网络模型中,实际输出为 (0.997 8, 0.006 4, 0.918 2),可近似看作 (1, 0, 1),对应 PPP 二级模式中的 BOT 模式,与项目在实际中选

择的模式相符合.

其次运用直觉梯形模糊 TOPSIS 法针对 BOT 模式下的三级 PPP 模式进行选择.分别用 $O_i(i=1,2,\cdots,6)$ 表示 BOT 模式下的 6 个 PPP 模式,用 $C_j(j=1,2,\cdots,8)$ 表示其模式选择指标.邀请 $k=8$ 位专家对该问题进行评价,评价时参考 Jun Ye^[14] 建立的语言变量与直觉梯形模糊数的转化标准,见表 8.

运用公式(1)~(5)计算出直觉梯形模糊决策矩阵 R ,表 9 为每位专家针对每个指标以直觉梯形模糊数的形式给出的指标重要性评价.

表 8 语言变量和直觉梯形模糊数的转化标准

Tab. 8 Transformation standard between linguistic variables and intuitionistic trapezoidal fuzzy number

编号	语言变量	直觉梯形模糊数
h_0	非常低	$\langle(0.0\ 0.0\ 0.0\ 0.0), (0.0\ 0.0\ 0.0\ 0.0)\rangle$
h_1	低	$\langle(0.0\ 0.1\ 0.2\ 0.3), (0.0\ 0.1\ 0.2\ 0.3)\rangle$
h_2	较低	$\langle(0.1\ 0.2\ 0.3\ 0.4), (0.0\ 0.2\ 0.3\ 0.5)\rangle$
h_3	中等	$\langle(0.3\ 0.4\ 0.5\ 0.6), (0.2\ 0.4\ 0.5\ 0.7)\rangle$
h_4	较高	$\langle(0.5\ 0.6\ 0.7\ 0.8), (0.4\ 0.6\ 0.7\ 0.9)\rangle$
h_5	高	$\langle(0.7\ 0.8\ 0.9\ 1.0), (0.7\ 0.8\ 0.9\ 1.0)\rangle$
h_6	非常高	$\langle(1.0\ 1.0\ 1.0\ 1.0), (1.0\ 1.0\ 1.0\ 1.0)\rangle$

表 9 指标重要性评价

Tab. 9 Importance evaluation of index

专家 k	指标 C_j								
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
1	h_3	h_2	h_4	h_2	h_3	h_3	h_3	h_4	h_4
2	h_2	h_3	h_3	h_3	h_2	h_5	h_3	h_3	h_5
3	h_3	h_4	h_4	h_4	h_3	h_3	h_4	h_3	h_6
4	h_2	h_3	h_5	h_3	h_2	h_4	h_3	h_5	h_5
5	h_3	h_3	h_4	h_3	h_3	h_5	h_4	h_6	h_5
6	h_3	h_2	h_3	h_2	h_2	h_4	h_3	h_4	h_5
7	h_3	h_4	h_3	h_4	h_3	h_3	h_3	h_3	h_6
8	h_3	h_3	h_5	h_3	h_3	h_4	h_3	h_4	h_4

通过公式(6)~(10)计算出正负理想解,并运用公式(11)~(12)计算各三级 PPP 模式的正负分离测度和相对贴近度,如表 10 所示.

表 10 正负分离测度和相对贴近度

Tab. 10 Positive and negative separation measure and relative close degree

模式	S_i^+	S_i^-	Z_i
BLOT	0.192	0.057	0.228
BOOT	0.152	0.097	0.389
DBFO	0.106	0.144	0.575
DBTO	0.090	0.160	0.639
DBOT	0.144	0.110	0.433
BTO	0.176	0.078	0.307

将相对贴近度按照大小排序, $Z_4 > Z_3 > Z_5 > Z_2 > Z_6 > Z_1$, 所以最优方案为 DBTO 模式.

5 结论

(1)选择合适的 PPP 模式建设和运营地下综合管廊直接关系着项目的成功与否.研究建立了两阶段 PPP 模式选择模型,第一阶段通过 BP 神经网络对二级 PPP 模式进行选择,第二阶段运用直觉梯形模糊数与 TOPSIS 结合的方法选择三级 PPP 模式,降低了决策的主观性和模糊性,减少了决策信息的损失,使选择结果更加客观合理.

(2)通过案例分析可知,不同的三级 PPP 模式对同一项目来说适用度各不相同,所以在建设运

营地下综合管廊项目时不能仅靠以往经验选择PPP模式,而要结合项目实际情况和具体特点,通过合理的方式选择最合适的三级PPP模式,以确保项目顺利实施。

(3)指标体系在地下综合管廊PPP项目模式选择中起着至关重要的作用,本文建立的二级和三级PPP模式选择指标体系是在前人研究的基础上,结合对地下综合管廊自身特点的分析建立的,在指标种类上可能会存在缺失或冗余,应在今后的研究中逐步加以改善。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国财政部. 关于推广运用政府和社会资本合作模式有关问题的通知[R/OL]. (2014-09-23). [2017-06-15]. http://www.mof.gov.cn/pub/jinrongsi/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201409/t20140924_1143760.html.
Ministry of Finance of the People's Republic of China. Notifications about the promotion and application of PPP mode[R/OL]. (2014-09-23). [2017-06-15]. http://www.mof.gov.cn/pub/jinrongsi/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201409/t20140924_1143760.html.
- [2] 王灏. PPP的定义和分类研究[J]. 都市轨道交通, 2004, 17(5): 23-27.
WANG Hao. Research on the definition and classification of PPP[J]. Urban Rail Transit, 2004, 17(5): 23-27.
- [3] CHEUNG S, TSUNIP L, LEUNG M, et al. An analytical hierarchy process based procurement selection method[J]. Construction Management & Economics, 2001, 19(4): 427-437.
- [4] CHANG Chenyu, GRAHAM Ive. Rethinking the multi-attribute utility approach based procurement route selection technique[J]. Construction Management & Economics, 2002, 20(3): 275-284.
- [5] THOMAS S Ng, LUU D T, CHEN S E, et al. Fuzzy membership functions of procurement selection criteria[J]. Construction Management & Economics, 2002, 20(3): 285-296.
- [6] CHAN C T W. Fuzzy procurement selection model for construction projects[J]. Construction Management & Economics, 2007, 25(6): 611-618.
- [7] LUU D T, THOMAS S Ng, CHEN S E. Formulating Procurement Selection Criteria through Case-Based Reasoning Approach[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2005, 19(3): 269-276.
- [8] YUAN Jingfeng, MIROSLAW J, SKIBNIEWSKI, LI Qiming, et al. The driving factors of china's public - private partnership projects in Metropolitan transportation systems: Public sector's viewpoint[J]. Journal of Civil Engineering & Management, 2010, 16(1): 5-18.
- [9] THOMAS S N, WONG Y M W, WONG J M W. Factors influencing the success of PPP at feasibility stage-A tripartite companion study in Hong Kong[J]. Habitat International, 2012, 36(4): 423-432.
- [10] 胡振. 公私合作项目范式选择研究:以日本案例为研究对象[J]. 公共管理学报, 2010, 7(3): 113-121.
HU Zhen. Study on the paradigm selection of public-private partnership project: Taking the case of Japan as the research object[J]. Journal of Public Management, 2010, 7(3): 113-121.
- [11] 简迎辉, 包敏. PPP模式内涵及其选择影响因素研究[J]. 项目管理技术, 2014, 12(12): 24-28.
JIAN Yinghui, BAO Min. Research on the connotation and influence of PPP mode[J]. Project Management techniques, 2014, 12(12): 24-28.
- [12] 杨卫华, 王秀山, 张凤海. 公共项目PPP模式选择路径研究:基于交易合作三维框架[J]. 华东经济管理, 2014, 28(2): 121-126.
YANG Weihua, WANG Xiushan, ZHANG Fenghai. Research on selection path of PPP mode in public project: Based on the three-dimensional framework of trading and cooperation[J]. East China Economic Management, 2014, 28(2): 121-126.
- [13] 李英攀, 刘名强, 王芳. 基于PPP大型建筑企业项目运作模式研究[J]. 施工技术, 2017 (9): 107-112, 130.
LI Yingpan, LIU Mingqiang, WANG Fang. Study on project operation mode of large-scale construction enterprises based on PPP mode[J]. Construction Technology, 2017 (9): 107-112, 130.
- [14] YE J. Expected value method for intuitionistic trapezoidal fuzzy multicriteria decision-making problems[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9): 11730-11734.

(编辑 桂智刚)