

基于 FAHP 与 D-S 证据理论的地铁 PPP 项目 绩效评价

赵金先, 蒋克洁, 陈 涛, 孙 斐

(青岛理工大学 管理工程学院, 山东 青岛 266520)

摘 要: 为解决我国地铁 PPP 项目绩效监督效率低下、实践中缺乏相关考核体系的问题, 采用 D-S 证据理论模型对其绩效评价进行研究。以利益多方的绩效目标为切入点, 借助 PSR(压力-状态-响应)理论模型系统地分析绩效影响因素之间的关联性, 并从项目全寿命周期视角构建地铁 PPP 项目绩效评价指标体系; 引入 D-S 证据理论模型并辅以 FAHP 法对绩效指标赋权, 构建基于 FAHP 与 D-S 证据理论的地铁 PPP 项目绩效评价模型, 确定绩效等级; 以 X 市地铁 1 号线 PPP 项目为例, 进行证据信息融合, 测度绩效水平, 验证该模型的科学合理性。绩效评价结果表明: 此项目综合绩效评价等级为 I 级, 绩效状况优秀, 主要绩效影响因素为合理的定价及补贴机制、项目成本控制情况、私营部门收益, 为绩效监督与评价指明方向。

关键词: FAHP; D-S 证据理论; 地铁 PPP 项目; 绩效评价

中图分类号: F283 文献标识码: A 文章编号: 2095-0985(2020)01-0021-10

DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2020.01.004

Performance Evaluation of Subway PPP Project Based on FAHP and D-S Evidence Theory

ZHAO Jin-xian, JIANG Ke-jie, CHEN Tao, SUN Fei

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

Abstract: In order to solve the problems of inefficient performance monitoring of PPP projects in China and lack of relevant assessment system in practice, D-S evidence theory model is used to study its performance evaluation. Taking the multi-stakeholder performance goal as the entry point, the PSR (pressure-state-response) theoretical model is used to systematically analyze the correlation between performance influencing factors, and construct the performance evaluation index system of subway PPP project from the perspective of project life cycle. D-S evidence theory model is supplemented by FAHP method to weight performance indicators, and the performance evaluation model of subway PPP project based on FAHP and D-S evidence theory is constructed to determine the performance level. The PPP project of X city subway line 1 is taken as an example to carry out evidence information fusion, measure the performance level, and verify the scientific rationality of the model. The performance evaluation results show that the comprehensive performance evaluation level of this project is Grade I, and the performance status is excellent. The main performance influencing factors are reasonable pricing and subsidy mechanism, project cost control, and private sector income, which indicates the direction for performance supervision and evaluation.

Key words: FAHP; D-S evidence theory; subway PPP project; performance evaluation

近年来,我国地铁建设项目正处于跨越式的 大规模发展阶段。作为一项具有公益性的基础设施

收稿日期: 2019-05-07 修回日期: 2019-06-27

作者简介: 赵金先(1964-)男,山东诸城人,硕士,教授,研究方向为项目管理(E-mail: zhjxqdsd@163.com)

通讯作者: 蒋克洁(1995-)女,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为项目管理(E-mail: 963590423@qq.com)

基金项目: 山东省高等学校人文社科计划一般项目(J17RA106);住房和城乡建设部科学技术计划与北京未来城市设计高精尖创新中心开放课题资助项目(UDC2017011312)

施项目,地铁具有建设周期长,投资规模大的特性,仅依靠政府投资建设已不能满足城市化发展的需求。而公私合营(Public-Private Partnership, PPP)融资模式的引入,不仅在一定程度上减轻了政府的财政压力,而且可以提高地铁建设运营效率。为了规范和引导 PPP 项目的操作,财政部近几年相继出台了许多指导性文件。但在实践中,对地铁 PPP 项目的绩效如何评价却没有明确的指导,评价框架也比较模糊。同时地铁 PPP 项目具有建设投资规模大、参与方众多、实施过程复杂、经营周期长等特点。在实际运行中必然会出现一定的问题,为了提高项目在实施过程中的绩效水平,实现项目预期目标。因此,对地铁 PPP 项目绩效评价进行深入研究具有很大的现实意义。

目前,对于 PPP 项目的绩效评价研究主要从指标构建分析和评价模型选择两方面开展了相关探讨。定性研究方面,王玉梅等^[1]从 PPP 项目中独立的第三方利益出发,采用平衡记分卡从项目整体的角度进行绩效的综合评价;兰兰等^[2]利用层次分析(Alytic Hierarchy Process, AHP)模型从四个方面构建 PPP 项目绩效评价指标体系并进行深入解析;袁竞峰等^[3]基于最优价值概念和绩效目标确立了 PPP 项目的虚拟标杆并对其综合绩效做出定性分析;吴贤国等^[4]从 PPP 项目绩效的形成机理入手构建绩效评价指标体系及结合结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)分析其中的关键影响因素;Chan 等^[5]通过因子分析法综合探究 PPP 项目绩效成功的关键影响因素。定量研究方面,亢磊磊等^[6]从利益相关方角度构建城市轨道交通 PPP 项目绩效评价体系,利用 RBF(Radial Basis Function)神经网络对绩效等级进行模拟测试并辅以 Shapley 值赋予指标权重;王建波等^[7]引入 DPSIR(Drive Pressure State Influence Responce)框架模型构建城市轨道交通 PPP 项目绩效指标体系,结合 C-OWA(Continuous Interval Argument, Ordered Weighted Averaging)算子及物元分析法建立绩效评估模型;易欣^[8]从城市轨道交通 PPP 项目的知识转移方向入手建立绩效指标体系,采用 Vague 集模型及模糊物元理论对其绩效水平作出评估。总体来看,定性研究方面较为关注从不同的视角对 PPP 项目绩效指标体系的构建分析;但 PPP 模式应用于地铁项目仍处于初步探索阶段,现有研究对 PPP 项目的定位比较宽泛,缺乏针对于地铁 PPP 项目的绩效评价指标体系;对于绩效的定量评价仍较

空缺,缺乏系统综合性的研究。

鉴于此,本文从利益多方的绩效目标入手,提出基于 FAHP(Fuzzy Analytic Hierarchy Process)与 D-S(Dempster-Shafer)证据理论的地铁 PPP 项目绩效评价模型。运用 PSR(Pressure-State-Response)理论模型从系统的角度考察地铁 PPP 项目绩效因素之间的因果关系并构建指标体系;在层次分析法(AHP)的基础上通过三角模糊语言将定性指标定量化构建模糊决策矩阵,结合模糊优先规划(Fuzzy Preference Programming, FPP)法构造 FAHP 模型求其权重,可以避免正反判断矩阵的一致性检验问题且削弱了极端值对评价的影响;地铁 PPP 项目绩效指标因素具有不确定性和模糊性,专家评分通常与自身经历和经验相关,结果会出现不确定性和随机性。因此,引入不确定性推理方法 D-S 证据理论,将不确定结果进行可靠的数值转换,融合多个证据,有效地减少了因人的评判偏差而引起的随机误差,进而可靠评价地铁 PPP 项目绩效问题。

1 地铁 PPP 项目绩效指标分析

1.1 地铁 PPP 项目参与方的绩效目标

PPP 是指公共部门与私营机构基于合作关系共同为基础设施项目提供产品/服务的一种运作机制^[9]。项目绩效反映了项目目标的完成状态,即通过对项目绩效进行全方位的动态考核,评判项目的实施是否获得成功^[10]。PPP 项目涉及多方利益,各参与方的利益满意度是考察 PPP 项目是否成功运行的关键。参与地铁 PPP 项目的利益相关方有:公共部门(政府),专门负责 PPP 项目的机构,私人股权投资机构,PPP 项目公司,承包商,代表政府的股权投资机构,中介咨询机构,银行,保险公司以及公众等。具体关系如图 1 所示。将上述参与方进行归类,则可以划分为私营部门、政府部门以及公众三个群体。

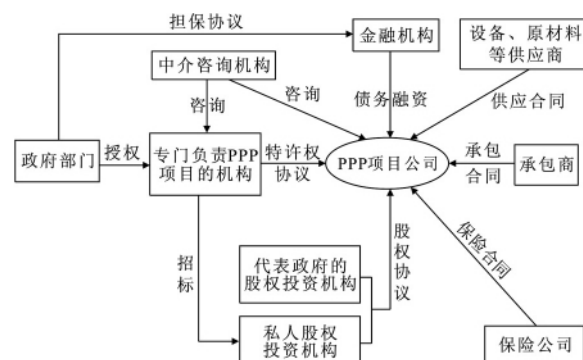


图 1 地铁 PPP 项目参与方关系

(1) 政府部门

采用 PPP 模式建设地铁项目很大程度上减轻了政府部门的财政压力,使其能够尽可能地满足区域对于地铁的基本需求,提升公众的出行质量,更好地促进政府提高公共服务供给能力。因此其关注点更多在于工期和成本,以及是否满足公众需求等方面。

(2) 私营部门

私营部门参与地铁项目建设则是民营资本投资的一个全新领域,为项目建设带来了许多新的经验和技能,并有效地提升项目建设运营的效率。对于私营企业而言,除了考虑成本和工期以外最重要的便是如何降低投资风险,从而确保自身投资回报的获取。

(3) 公众

在 PPP 模式下,公众不但是项目建设的参与方,更是地铁项目运营使用的主要受益者。同时由于在该模式下存在着特许经营项目要收取费用的问题,因此除了考虑地铁项目的质量以及便捷性外,公众还会关注收费的价格。具体绩效目标如表 1 所示。

表 1 地铁 PPP 项目参与方的绩效目标

政府部门	私营部门	公众
解决财政资金紧缺问题;工程项目质量达标,无安全事故;建设运营预算不超支;提高公众和社会效益;项目整体风险最小	工程质量达标;降低全寿命周期成本;按时竣工,工程项目质量达标,无安全事故;达到预算目标,投入资金能尽快回收;合格的公众服务	工程项目有可靠的质量,无安全事故;获得更便捷、优惠的服务;项目按时竣工并投入运营;交通出行的安全性与准时性

1.2 评价指标体系构建

1.2.1 PSR(压力-状态-响应)理论模型

经济合作和发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD) 联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP) 于 20 世纪 80 年代末提出了生态安全的 PSR 理论模型^[11]。PSR 理论模型是从系统学的角度出发,基于人类社会活动对生态环境施加的压力且改变着自然资源的数量与质量的本质状态这样一系列因果关系,综合探究生态资源压力、现状与响应三者之间的相互反馈作用。压力(P)是人类的的社会活动对生态界造成的负荷,即环境出现问题的原因;状态(S),表示在该压力作用下的环境属性和状态;响应(R),表现为改善环境状况做出的积极行动^[12]。PSR 模型反应的是一个动态的闭环逻辑关系,该模型系统分

析了人-环境-社会间的互动与变化。模型如图 2 所示。

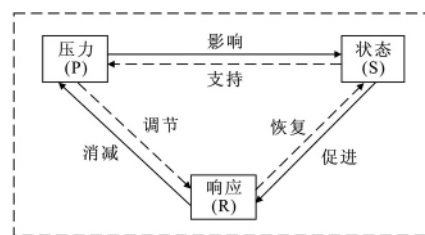


图 2 PSR(压力-状态-响应)理论框架模型

1.2.2 基于 PSR 理论模型的绩效指标因素分析

在分析地铁 PPP 项目绩效影响因素中,引入 PSR 模型,基于压力-状态-响应的逻辑关系将地铁 PPP 项目复杂的绩效因素进行有效简化分解,基于利益方关系,从系统的角度分析指标一定程度上可以避免指标重叠或遗漏,使指标体系对于地铁 PPP 项目更具有针对性。与其他理论对比,PSR 理论模型对影响因子间的内在逻辑和传递关系进行解释,具有直观、系统全面、动态的特点。因此,对解决地铁 PPP 项目中绩效指标因素关系复杂且利益方关系需要不断调整的系统问题较为适合。

地铁作为公益性的大型复杂项目,涉及多方利益部门,各参与方所追求的绩效目标不尽相同,但本质都是在促进地铁项目建设与社会发展且满足自身利益。同时地铁 PPP 项目的绩效水平与自然环境的状态表现均受到多重因素的影响,两者都遵循 PSR 的因果关系链,指标因素间相互关联、相互作用,是一个系统化的整体。因此地铁 PPP 项目绩效评价与生态环境状态评估相类似。

压力(P): 在政府推动支持及公众需求等环境作用下产生推进地铁发展的压力,是决定地铁 PPP 项目绩效水平的直接影响因素,地铁 PPP 项目绩效压力因素的选取从技术、资金、风险等方面考虑,包括建设及运营技术可靠性、资金到位情况、定价补贴机制执行状况等都是由压力产生的,进而影响整个地铁 PPP 项目的管理进程。

状态(S): 指在压力的作用下,地铁 PPP 项目在建设运营期的实际执行状况。状态指标的选取从建设和运营状态入手,选取能反映实际运行情况的指标进行研究,如项目进度、成本控制、运营情况及准时性、项目运作状态安全事故率、故障设备维修状况、以及公众的整体满意程度等。

响应(R): 为改善和提高地铁 PPP 项目的建设运营水平所采取的对策及相关的法律政策等,代表系统对上述行为的响应。响应的绩效评价指标从项目的合规化程度和社会效益等方面选取,

如项目验收的达标度、运营管理能力、票价补贴制度的完善、公众配合度以及社会效益、合理的风险分担等。

1.2.3 基于 PSR 的绩效评价指标体系

本文在借助 PSR 系统理论对地铁 PPP 项目绩效进行分析的基础上,结合现有的 PPP 项目绩效评价的相关资料^[1-9],具体分析有关地铁 PPP 项目的文献^[6-8,13-17],得到影响地铁 PPP 项目绩效水平的初始指标,并通过 Delphi 法向有关领域专家、学者及相关单位管理人员进行走访、调查咨询,最终筛选出 26 个绩效评价指标,结合地铁 PPP 项目具有阶段性的特点,将绩效评价分为项目的立项准备、招投标、特许经营、建设及竣工验收、运营维护、特许期满移交这 6 类指标,以此建立包含 6 个一级指标及 26 个二级指标在内的地铁 PPP 项目绩效评价指标体系。如图 3 所示。

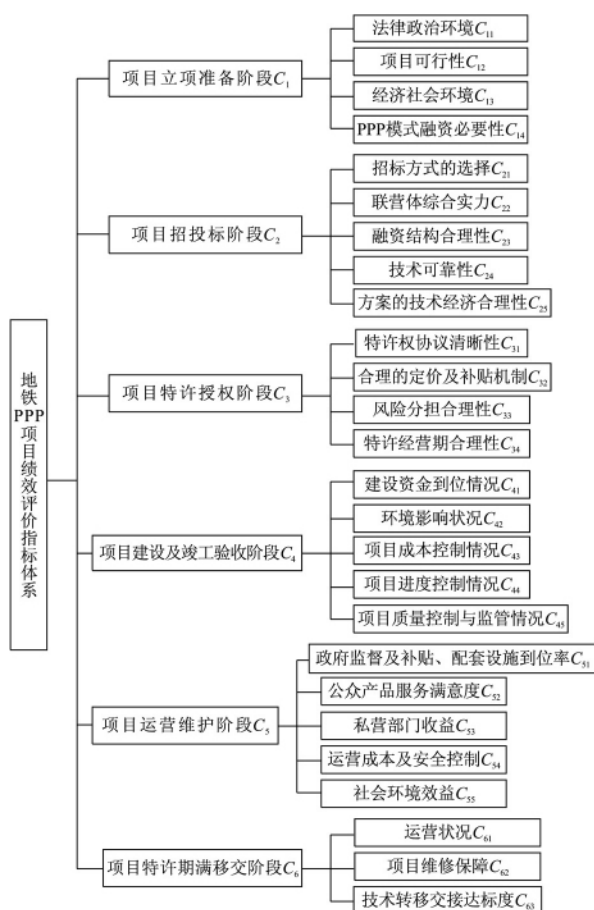


图 3 地铁 PPP 项目绩效评价指标体系

2 基于 FAHP 赋权的指标权重确定

地铁 PPP 项目绩效影响因素具有相互关联性、信息模糊不确定性、发生随机性等特点,由于专家评分法易因主观偏好而产生极端值。为消除极端值对评价结果产生偏差的影响,本文采用三

角模糊数结合 FPP 法构造 FAHP 赋权模型。基于 AHP 法改进 1~9 评判标度的基础上引入三角模糊语言变量构造模糊决策矩阵,关于模糊矩阵权重的求解本文选取了 Mikhailov^[18]提出的 FPP 法进行求解,依据构建的模糊判断矩阵结合模糊隶属度函数求解指标权重。

2.1 构造模糊判断矩阵

(1) 利用三角模糊数 M 消除绩效影响因素的模糊不确定性, M 用 (l, m, u) 表示并满足 $l \leq m \leq u$, 其中 l, m, u 分别表示模糊向量的下界、中值和上界^[19]。 $u-l$ 差值的大小反映评判模糊程度的高低; 仅当 $u-l=0$ 时, 即 l, m, u 三者相等, M 为非模糊判断, 其模糊隶属度函数如式 (1) 所示。

$$u_M(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m} & m \leq x \leq u \\ 0 & x < l \text{ 或 } x > u \end{cases} \quad (1)$$

(2) 设定的三角模糊语言变量对应转化关系如表 2 所示。

表 2 三角模糊语言变量

模糊语言	三角模糊数	三角模糊倒数
完全相同	$M_0 = (1, 1, 1)$	$(1, 1, 1)$
几乎相同	$M_1 = (1, 1, 3)$	$(1/3, 1, 1)$
中值	$M_2 = (1, 2, 3)$	$(1/3, 1/2, 1)$
稍微重要	$M_3 = (1, 3, 5)$	$(1/5, 1/3, 1)$
中值	$M_4 = (3, 4, 5)$	$(1/5, 1/4, 1/3)$
比较重要	$M_5 = (3, 5, 7)$	$(1/7, 1/5, 1/3)$
中值	$M_6 = (5, 6, 7)$	$(1/7, 1/6, 1/5)$
重要	$M_7 = (5, 7, 9)$	$(1/9, 1/7, 1/5)$
中值	$M_8 = (7, 8, 9)$	$(1/9, 1/8, 1/7)$
绝对重要	$M_9 = (7, 9, 9)$	$(1/9, 1/9, 1/7)$

(3) 依据表 2 给定的三角模糊语言变量关系, 对同一层级上的绩效指标影响因素的重要程度进行两两对比, 构造模糊决策矩阵 U 。如式 (2) 所示, 其中元素 u_{ij} 表示第 i 行第 j 列的三角模糊数。

$$U = \begin{bmatrix} 1 & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & 1 & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 利用 FPP 法给评价指标赋权

通过三角模糊数基于相对重要性构建的绩效指标影响因素的模糊决策矩阵, 设 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 为决策矩阵权向量, 若满足一致性要求, 有:

$$l_{ij} \leq \frac{w_i}{w_j} \leq u_{ij}, i=1, 2, \dots, n-1; j=2, 3, \dots, n; j>i \quad (3)$$

若不满足一致性判别, 则引入容差参数 d_k :

$$l_{ij} - d_k \leq \frac{w_i}{w_j} \leq u_{ij} + d_k, i=1, 2, \dots, n-1; j=2, 3, \dots, n; j>i \quad (4)$$

式中: \leq 表示模糊小于或等于。 d_k 无限趋向于零, 使得权向量尽可能满足所有评判意见且不对判断做出任意修改。依据模糊决策矩阵由构建的隶属函数求各绩效评价因素的权重, 如式 (5) 所示。

$$u_{ij}\left(\frac{w_i}{w_j}\right) = \begin{cases} \frac{\frac{w_i}{w_j} - l_{ij}}{m_{ij} - l_{ij}}, & \frac{w_i}{w_j} \leq m_{ij} \\ \frac{u_{ij} - \frac{w_i}{w_j}}{u_{ij} - m_{ij}}, & \frac{w_i}{w_j} > m_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

式中: l_{ij} 和 u_{ij} 分别为专家模糊评判给出的最小值与最大值; m_{ij} 为最可能值; w_i, w_j 分别为第 i, j 个指标的权重值。模糊隶属度函数在 $(-\infty, m_{ij}]$ 上呈线性递增, 在 $(m_{ij}, +\infty)$ 线性递减, 当 $w_i/w_j < l_{ij}$ 或 $w_i/w_j > u_{ij}$ 时, 函数值为负数, 仅当 $w_i/w_j = m_{ij}$ 时, 函数取得最大值为 1, 式 (5) 在区间 (l_{ij}, u_{ij}) 与三角模糊判断 (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) 保持一致, 判断完全满足要求。在模糊可行权向量中, 定义其比值隶属度的最小值, 即:

$$u_p(w) = \min_{ij} \{ u_{ij}(w) \mid i=1, 2, \dots, n-1; j=2, 3, \dots, n; j>i \} \quad (6)$$

在满足条件的解集中, 隶属度最大的向量作为解向量, 即:

$$\lambda^* = u_p(w^*) = \max \{ u_p(w) \} \quad (7)$$

根据隶属函数公式 (5), 可构造基于多目标决策的分配模型, 将式 (7) 寻求最大解 w^* 的问题转化为求解的最优化 $u_{ij}(w_i/w_j) \geq \lambda$ 问题, 即对如下的非线性规划问题进行求解:

$$\begin{aligned} & \max \lambda \\ & \text{s.t.} \begin{cases} (m_{ij} - l_{ij}) \lambda w_j - w_i + l_{ij} w_j \leq 0 \\ (u_{ij} - m_{ij}) \lambda w_j + w_i - u_{ij} w_j \leq 0 \\ \sum_{k=1}^n w_k = 1, w_k > 0, k=1, 2, \dots, n \\ i=1, 2, \dots, n-1; j=2, 3, \dots, n; j>i \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

借助 MATLAB 编程实现非线性规划 (8) 的求解, 求得最优解向量为 (w^*, λ^*) , w^* 为模糊可行

域中隶属度最大的优化权重, λ^* 为用来决策模糊判断矩阵一致性的最大隶属度, $\lambda^* > 0$, 即 $l_{ij} \leq w_i/w_j \leq u_{ij}$, 表示一致性较好; 反之, 一致性较差。

3 基于 D-S 证据理论的地铁 PPP 项目绩效评价

3.1 D-S 证据理论

3.1.1 基本原理

D-S 证据理论是贝叶斯概率的扩展, 基于不确定性信息进行可信度推理。Dempster 于 1967 年提出, 后经 Shafer 拓展完善, 形成了 D-S 证据理论^[20-21]。D-S 证据理论的核心是将同一层次下识别的多个基本概率函数合成为一个函数, 满足了比贝叶斯概率更弱的条件, 具有直接表达“不知道”和“不确定”的能力。该方法已经成功应用于海军系统安全分析、建筑火灾安全评价、作业人员安全行为评价、软件需求评价等方面。在地铁 PPP 项目绩效评价中, 影响因素同样具有不确定与模糊性, 不同专家给出的评判结果可能存在较大偏差。因此, 将地铁绩效水平作为评价目标, 专家对每一种可能影响绩效大小的指标的衡量作为证据, 融合不同影响因素的评价结果, 得到其上、下界和融合后的综合评价结果, 最终精确地判定地铁 PPP 项目的绩效大小。

3.1.2 评价信息的表达

D-S 证据理论评价中的证据用一个有限非空集合 $\theta = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 表示, 其中称 θ 为评价的识别框架^[17], A 称为焦元, 是 θ 中的任一子集, 即 $A \subseteq \theta$ 。基本概率分配函数 $M: 2^\theta \rightarrow [0, 1]$ 满足 $M(\emptyset) = 0$ 且 $\sum_{A \subseteq \theta} M(A) = 1$, 其中 $0 \leq M(A) \leq 1$, $M(A)$ 表示评价因素 A 的基本概率赋值。对任意的 $A \in 2^\theta$ 定义其信任函数与似然函数, 公式如下:

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} M(B) \quad (9)$$

$$\text{Pl}(A) = 1 - \text{Bel}(\bar{A}) \quad (10)$$

式中: $\text{Bel}(A)$ 信任函数为对 A 的总信任, 为支持 A 的最小值; $\text{Pl}(A)$ 似然函数是不否定 A 的最大信任度。构成了对 A 的信任区间 $[\text{Bel}(A), \text{Pl}(A)]$, 而 $\text{Pl}(A) - \text{Bel}(A)$ 则表示不知道 A 的程度。

3.1.3 评价结果的信息融合

对于地铁 PPP 项目绩效评价, 采用证据融合的处理方法, 将同一影响因素的不同专家给出的多种评价结果进行正交和运算。设 M_1 和 M_2 是 2 个基本概率赋值, 则其正交和运算为:

$$M(\emptyset) = 0 \quad (11)$$

$$M(A) = M_1 \oplus M_2 = \frac{1}{K} \sum_{X \cap Y = A} M_1(X) M_2(Y) \quad (12)$$

$$K = 1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset} M_1(X) M_2(Y) = \sum_{X \cap Y \neq \emptyset} M_1(X) M_2(Y) \quad (13)$$

同理,对于多个但有限的基本概率赋值 M_1, M_2, \dots, M_n 其正交和运算为:

$$M(A) = M_1 \oplus M_2 \oplus \dots \oplus M_n$$

$$= \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} M_1(A_1) M_2(A_2) \dots M_n(A_n) \quad (14)$$

$$K = 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} M_1(A_1) M_2(A_2) \dots M_n(A_n)$$

$$= \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset} M_1(A_1) M_2(A_2) \dots M_n(A_n) \quad (15)$$

式中: K 为归一化常数, $0 < K < 1$, 表示 n 个证据信息之间的冲突程度, 程度越高 K 值越接近 1。 $K = 1$ 表示信息完全冲突, 无法使用 D-S 证据理论进行证据融合; 如果 $K = 0$, 表明基本概率赋值之间相互矛盾。

3.2 基于 FAHP 与 D-S 证据理论的地铁 PPP 项目绩效评价步骤

(1) 确定各级因素权重。在已构建的绩效指标体系的基础上, 利用 FAHP 赋权法确定各层绩效指标影响因素的权重, 同一等级 n 个因素的权重值用 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 表示。

(2) 绩效评价因素概率赋值。专家给出的各绩效指标因素的评分结果用 θ 表示, 即评价中的证据集合。邀请相关领域具有较高威望和地铁 PPP 项目经验的 m 位专家(包括政府部门、金融机构、工程项目企业和法律行业等)在 $[0, 1]$ 范围内评判各指标因素对绩效的影响程度, 评分越接近于 1, 反映该指标对绩效的影响程度越大。在以往研究的基础上, 结合地铁 PPP 项目绩效特性, 确定绩效评价等级。设立专家模糊评语集为:

$G = \{g_r | r = 1, 2, \dots, 5\} = \{\text{优秀, 良好, 中等, 较差, 很差}\}$ 5 个等级, 分别用 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级来表示。具体见表 3。

表 3 地铁 PPP 项目绩效评价等级

绩效评价等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
评语	$[0.75, 1]$	$[0.55, 0.75]$	$[0.45, 0.55]$	$[0.25, 0.45]$	$[0, 0.25]$

(3) 确定评价指标综合概率。基于每个绩效影响因素所在评价体系中的层次, 综合概率值为绩效评价因素概率值乘以对应各层次总目标的权重 W^q 。以三级指标 A_{111} 为例:

$$M\{A_{111}\} = a_{111} \prod_{q=1}^3 W^q \quad (16)$$

式中: a_{111} 是专家对绩效指标 A_{111} 的评分; q 为绩效

指标评价体系的层次 $q = 1, 2, 3$ 。则综合概率值为: $M\{M(A_{111}), M(A_{112}), \dots, M(A_{jst})\}$, 其对应的不确定度为: $m(A) = 1 - M(A_{111}) - M(A_{112}) - \dots - M(A_{jst})$ 。

(4) 确定信任区间。根据绩效因素综合概率值的确定, 利用公式(9)(10)可以求得绩效评价指标的信任函数和似然函数, 从而确定绩效信任区间的上下界。

(5) 绩效综合评价。多个专家对绩效影响因素进行评分, 得到多组评价结果, 利用公式(11)~(15)进行正交和运算, 对多组评价信息进行证据融合, 确定综合的信任区间并根据表 2 的绩效评价等级进行评判, 使最终绩效评价更加精确、真实。

4 实例分析

X 市地铁 1 号线采用 PPP 特许经营融资模式, 政府通过与社会投资方合作成立特许经营公司参与该线路的建设及运营。1 号线的整个建设结构依据投资建设责任主体分为 A、B 两个相对独立的部分。A 部分为土建、隧道工程等, 投资约 137.86 亿元, 占总投资额的 62.4%; B 部分为机电、车辆等设备部分, 投资约占项目总金额的 37.6% 为 82.9 亿元。项目概算总投资约 220.76 亿元, 线路全长 47.97 公里, 共设车站 31 座, 该线路已于 2012 年开通运营, 项目公司拥有的特许经营期为 25 年。特许经营期届满, PPP 项目公司将 A 部分地铁项目交还给 HZ 地铁集团, B 部分项目设施无偿地归还给该市政府指定部门接管。本文从绩效的研究角度出发, 对 X 市地铁 1 号线进行绩效水平评价。具体如图 4 所示。

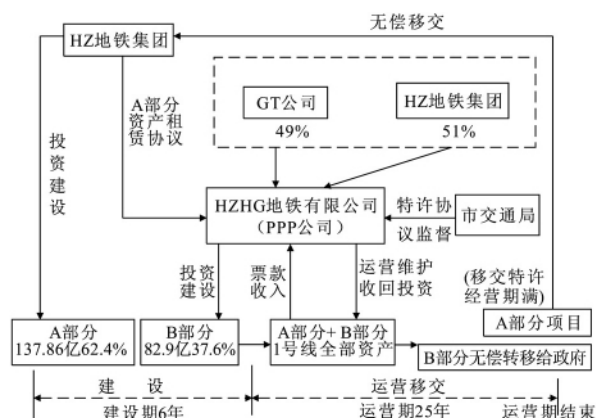


图 4 X 市地铁 1 号线 PPP 模式

4.1 基于 FAHP 的权重确定

定性数据采用调查问卷方式收集, 邀请专家对影响绩效水平的指标因素进行评分, 为保证专家打分的客观公正, 本文尽可能选取与项目相关

的各领域代表专家保证评判的有效性,采取在互不干扰的情况下针对某一问题向专家发放调查问卷使其独立地做出决策,专家背景信息见表4。定量数据通过相关研究文献^[6-8,13-17]、政府和社会资本合作(PPP)研究中心以及网站查询等公开的资料进行收集。取各项得分的平均值作为指标因素的最终评价,最终依据表2的三角模糊语言变量转换关系,构造模糊决策矩阵。以一级指标“项目招投标阶段 C_2 ”为例,判断矩阵如表5所示。

表4 专家背景信息

专家	工作单位性质	学历	工作经验/年
1	高校(研究PPP方向的大学教授)	博士	12
2	金融机构(招商银行青岛分行主管)	硕士	11
3	监理单位(青岛建通浩源集团有限公司监理工程师)	本科	9
4	法律行业(山东齐鲁(青岛)律师事务所律师)	硕士	10
5	运营机构(青岛地铁集团运营部管理负责人)	硕士	15
6	PPP咨询单位(注册咨询工程师)	本科	18
7	施工单位(中国交建项目经理)	本科	12

表5 C_2 层次下指标 $C_{21} \sim C_{25}$ 的三角模糊决策矩阵

C_2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}
C_{21}	(1, 1, 1)	(1/5, 1/3, 1)	(1/3, 1/2, 1)	(1, 2, 3)	(1, 1, 3)
C_{22}		(1, 1, 1)	(1, 1, 3)	(3, 4, 5)	(1, 3, 5)
C_{23}			(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1, 2, 3)
C_{24}				(1, 1, 1)	(1/3, 1, 1)
C_{25}					(1, 1, 1)

利用 FPP 法将上述三角模糊判断矩阵通过式(8)转换为非线性规划方程:

$$\begin{cases} 2/15\lambda w_2 - w_1 + 1/5w_2 \leq 0 \\ 2/3\lambda w_2 + w_1 - w_2 \leq 0 \\ 1/6\lambda w_3 - w_1 + 1/3w_3 \leq 0 \\ 1/2\lambda w_3 + w_1 - w_3 \leq 0 \\ \lambda w_4 - w_1 + w_4 \leq 0 \\ \lambda w_4 + w_1 - 3w_4 \leq 0 \\ \vdots \\ 2/3\lambda w_5 - w_4 + 1/3w_5 \leq 0 \\ w_4 - w_5 \leq 0 \\ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1 \\ w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

借助 MATLAB 编程计算对转换的非线性规划方程进行指标权重求解。得: $\lambda^* = 0.7076 > 0$, $\omega_2 = (0.193, 0.250, 0.232, 0.150, 0.175)$, 反映判断

矩阵的一致性满足要求。同理可得其他一级指标及对应的各二级评价指标的权重值:

$$\omega_0 = (0.048, 0.119, 0.167, 0.214, 0.261, 0.191);$$

$$\omega_1 = (0.217, 0.377, 0.259, 0.147);$$

$$\omega_3 = (0.198, 0.286, 0.272, 0.244);$$

$$\omega_4 = (0.183, 0.122, 0.257, 0.201, 0.237);$$

$$\omega_5 = (0.118, 0.221, 0.260, 0.233, 0.168);$$

$$\omega_6 = (0.437, 0.324, 0.239)。$$

4.2 初级评价

4.2.1 评价因素初始概率赋值

根据图3建立的地铁PPP项目绩效评价标体系,得到影响指标因素集合为: $C = \{C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, C_{41}, C_{42}, C_{43}, C_{44}, C_{45}, C_{51}, C_{52}, C_{53}, C_{54}, C_{55}, C_{61}, C_{62}, C_{63}\}$ 。邀请相关领域的7位评价专家(专家背景信息如表4所示)对影响绩效指标体系中的各个评价因素根据表3中的对应范围进行评分,专家的评分结果如表6所示。

表6 专家评分汇总

评价指标	专家						
	1	2	3	4	5	6	7
C_{11}	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5
C_{12}	0.7	0.6	0.6	0.7	0.3	0.3	0.3
C_{13}	0.8	0.6	0.7	0.6	0.2	0.2	0.2
C_{14}	0.6	0.7	0.5	0.7	0.2	0.2	0.2
C_{21}	0.5	0.5	0.4	0.6	0.2	0.2	0.2
C_{22}	0.7	0.8	0.9	0.8	0.3	0.3	0.3
C_{23}	0.6	0.6	0.8	0.7	0.2	0.2	0.2
C_{24}	0.5	0.7	0.6	0.7	0.1	0.1	0.1
C_{25}	0.5	0.5	0.7	0.6	0.2	0.2	0.2
C_{31}	0.8	0.8	0.7	0.6	0.3	0.3	0.3
C_{32}	0.6	0.5	0.8	0.7	0.3	0.3	0.3
C_{33}	0.4	0.7	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4
C_{34}	0.6	0.8	0.6	0.7	0.2	0.2	0.2
C_{41}	0.7	0.7	0.8	0.7	0.2	0.2	0.2
C_{42}	0.5	0.5	0.4	0.6	0.1	0.1	0.1
C_{43}	0.6	0.6	0.6	0.7	0.3	0.3	0.3
C_{44}	0.8	0.7	0.6	0.7	0.2	0.2	0.2
C_{45}	0.5	0.6	0.5	0.6	0.3	0.3	0.3
C_{51}	0.8	0.8	0.7	0.7	0.2	0.2	0.2
C_{52}	0.6	0.6	0.8	0.7	0.3	0.3	0.3
C_{53}	0.9	0.7	0.6	0.7	0.4	0.4	0.4
C_{54}	0.8	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.3
C_{55}	0.7	0.7	0.8	0.6	0.2	0.2	0.2
C_{61}	0.6	0.8	0.5	0.7	0.2	0.2	0.2
C_{62}	0.8	0.5	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3
C_{63}	0.6	0.6	0.6	0.7	0.3	0.3	0.7
信任区间	[0.658, 1]	[0.657, 1]	[0.640, 1]	[0.660, 1]	[0.266, 1]	[0.267, 1]	[0.285, 1]
不确定度 $m(C)$	0.342	0.343	0.360	0.340	0.734	0.733	0.715
评价结果	良好	良好	良好	良好	较差	较差	较差

4.2.2 确定指标综合概率值

依据每个指标因子所在评价体系中的层次,指标的综合概率值为专家对该因素的评分值乘以对应总目标的综合权重 w 。以项目立项准备阶段 C_1 指标下的法律政治环境 C_{11} 为例,专家 1 对该指标因素的评分为: $C_{11} = 0.6$,通过公式(16)得:
 $M_1(C_{11}) = C_{11} w^1 w^2 = 0.6 \times 0.217 \times 0.048 = 0.006$,同理可得,在专家 1 的评分下其他各指标影响因素的综合概率值,由此得到专家 1 评分的综合概率值集合:

$M\{M\{C_{11}\}, M\{C_{12}\}, \dots, M\{C_{63}\}, m_1\{C\}\} = \{0.006, 0.013, 0.010, 0.004, 0.011, 0.021, 0.017, 0.009, 0.010, 0.026, 0.029, 0.018, 0.024, 0.027, 0.013, 0.033, 0.034, 0.025, 0.025, 0.035, 0.061, 0.049, 0.031, 0.050, 0.050, 0.027, 0.342\}$;其中,不确定值:

$$m_1(C) = 1 - M_1(C_{11}) - M_1(C_{12}) - \dots - M_1(C_{63}) = 0.342。$$

4.2.3 确定信任区间

在专家 1 的评分下,项目立项准备阶段 C_1 指标的信任函数可利用公式(9)求得, $Bel(C_1) = M_1(C_1) = M_1\{C_{11}\} + M_1\{C_{12}\} + M_1\{C_{13}\} + M_1\{C_{14}\} = 0.006 + 0.013 + 0.010 + 0.004 = 0.033$ 同理, $Bel(C_2) = 0.068$, $Bel(C_3) = 0.097$, $Bel(C_4) = 0.132$, $Bel(C_5) = 0.201$, $Bel(C_6) = 0.127$ 。通过公式(10)可得到项目立项准备阶段 C_1 指标的似然函数:

$$Pl(C_1) = 1 - Bel(\overline{C_1}) = 1 - (M_1\{C_{21}\} + M_1\{C_{22}\} + \dots + M_1\{C_{63}\}) = 1 - 0.625 = 0.375。同理可求出其他一级指标因素在专家 1 评分下的似然函数: $Pl(C_2) = 0.410$, $Pl(C_3) = 0.439$, $Pl(C_4) = 0.474$, $Pl(C_5) = 0.543$, $Pl(C_6) = 0.469$ 。$$

可以得出,由项目立项准备阶段 C_1 影响绩效大小的赋值下界为 0.033,上界是 0.375,即信任区间为 $[0.033, 0.375]$ 。类似地,其他评价指标因素的信任区间以此类推。对于不确定性问题,与利用其它评价方法相比,运用证据理论可将其不确定性概率的范围确定,从而便于对该问题的进一步量化分析。同理可得其他评价指标的信任区间以及不确定度的大小。详见表 6。

4.3 证据融合及综合评价

对于影响 X 市地铁 1 号线绩效的评价指标因素评分情况,邀请的 7 位专家给出的评分结果存在着差异,但利用正交和运算,仍可得到可靠的评价结果。为了便于比较和验证该方法的科学合理性,本文设定,专家 6 与专家 5 除指标“法律政

治环境 C_{11} ”的评分不同以外,其余各指标因素评分均相同;设定专家 7 与专家 6 除指标“技术转移交接达标度 C_{63} ”评分有差异,其他因素的评分值均一致。

经过综合概率值的计算,得出各专家针对指标评价因素的综合概率集合如下:

专家 1:

$$M_1\{M_1(C_1), M_1(C_2), M_1(C_3), M_1(C_4), M_1(C_5), M_1(C_6), m_1(C)\} = \{0.033, 0.068, 0.097, 0.132, 0.201, 0.127, 0.342\}。$$

专家 2:

$$M_2\{M_2(C_1), M_2(C_2), M_2(C_3), M_2(C_4), M_2(C_5), M_2(C_6), m_2(C)\} = \{0.028, 0.074, 0.115, 0.133, 0.182, 0.125, 0.343\}。$$

专家 3:

$$M_3\{M_3(C_1), M_3(C_2), M_3(C_3), M_3(C_4), M_3(C_5), M_3(C_6), m_3(C)\} = \{0.030, 0.084, 0.108, 0.125, 0.187, 0.106, 0.360\}。$$

专家 4:

$$M_4\{M_4(C_1), M_4(C_2), M_4(C_3), M_4(C_4), M_4(C_5), M_4(C_6), m_4(C)\} = \{0.030, 0.081, 0.109, 0.141, 0.172, 0.127, 0.340\}。$$

专家 5:

$$M_5\{M_5(C_1), M_5(C_2), M_5(C_3), M_5(C_4), M_5(C_5), M_5(C_6), m_5(C)\} = \{0.012, 0.026, 0.050, 0.051, 0.077, 0.050, 0.734\}。$$

专家 6:

$$M_6\{M_6(C_1), M_6(C_2), M_6(C_3), M_6(C_4), M_6(C_5), M_6(C_6), m_6(C)\} = \{0.013, 0.026, 0.050, 0.051, 0.077, 0.050, 0.733\}。$$

专家 7:

$$M_7\{M_7(C_1), M_7(C_2), M_7(C_3), M_7(C_4), M_7(C_5), M_7(C_6), m_7(C)\} = \{0.013, 0.026, 0.050, 0.051, 0.077, 0.068, 0.715\}。$$

(1) 利用证据融合模型中的公式(12)~(15)作正交和运算,以专家 1 和专家 2 的证据信息进行证据融合为例。

$$\begin{aligned} K_{1,2} &= 1 - \sum_{C_i \cap C_j = \emptyset} M_1(C_i) M_2(C_j) \\ &= 1 - \{M_1(C_1) M_2(C_2) + M_1(C_1) M_2(C_3) + \dots + M_1(C_1) M_2(C_6) + \dots + M_1(C_6) M_2(C_5)\} \\ &= 1 - 0.345 = 0.655; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{1,2}(C_1) &= K^{-1} \sum_{C_i \cap C_j = C} M_1(C_i) M_2(C_j) \\ &= \frac{0.033 \times 0.028 + 0.033 \times 0.343 + 0.028 \times 0.342}{0.655} \\ &= 0.033。 \end{aligned}$$

同理 $M_{1,2}(C_2) = 0.082$, $M_{1,2}(C_3) = 0.128$, $M_{1,2}(C_4) = 0.165$, $M_{1,2}(C_5) = 0.256$, $M_{1,2}(C_6) = 0.156$ 。则:

$$m(C) = 1 - \sum_{i=1}^6 C_i = 1 - (0.033 + 0.082 + 0.128 + 0.165 + 0.256 + 0.156) = 0.180。$$

整理可得:

$$M_{1,2} \{ M_{1,2}(C_1), M_{1,2}(C_2), M_{1,2}(C_3), M_{1,2}(C_4), M_{1,2}(C_5), M_{1,2}(C_6), m_{1,2}(C) \} = \{ 0.033, 0.082, 0.128, 0.165, 0.256, 0.156, 0.180 \}。$$

(2) 将 $M_{1,2}$ 的结果与余下的其他专家的综合概率值依次进行融合,最后得到:

$$M_{1,2,3} \{ M_{1,2,3}(C_1), M_{1,2,3}(C_2), M_{1,2,3}(C_3), M_{1,2,3}(C_4), M_{1,2,3}(C_5), M_{1,2,3}(C_6), m_{1,2,3}(C) \} = \{ 0.031, 0.089, 0.136, 0.176, 0.298, 0.158, 0.112 \};$$

$$M_{1,2,3,4} \{ M_{1,2,3,4}(C_1), M_{1,2,3,4}(C_2), M_{1,2,3,4}(C_3), M_{1,2,3,4}(C_4), M_{1,2,3,4}(C_5), M_{1,2,3,4}(C_6), m_{1,2,3,4}(C) \} = \{ 0.027, 0.084, 0.132, 0.180, 0.309, 0.158, 0.110 \}。$$

由表3得到,1到4号专家评分结果分别为“良好”,证据融合至专家4的证据信息,使得不确定度逐渐缩小,4次融合得到信任函数: $Bel(C) = M_{1,2,3,4}(C) = 0.890$, $Pl(C) = 1$,信任区间为 $[0.890, 1]$,不确定度 $m(C) = 0.110$,综合评判该地铁的绩效等级为“I级”,即优秀,4位专家单独评判的不确定度分别为 $m_1(C) = 0.342$, $m_2(C) = 0.343$, $m_3(C) = 0.360$, $m_4(C) = 0.340$ 。融合后结果与单独评价相比,不确定度降低且信任区间范围更准确。

(3) 为说明证据理论模型的可行性,将前4位专家的证据分别与专家5,6,7的评级信息进行证据融合,得:

$$M_{1,2,3,4,5} \{ M_{1,2,3,4,5}(C_1), M_{1,2,3,4,5}(C_2), M_{1,2,3,4,5}(C_3), M_{1,2,3,4,5}(C_4), M_{1,2,3,4,5}(C_5), M_{1,2,3,4,5}(C_6), m_{1,2,3,4,5}(C) \} = \{ 0.026, 0.082, 0.134, 0.147, 0.319, 0.159, 0.133 \};$$

$$M_{1,2,3,4,6} \{ M_{1,2,3,4,6}(C_1), M_{1,2,3,4,6}(C_2), M_{1,2,3,4,6}(C_3), M_{1,2,3,4,6}(C_4), M_{1,2,3,4,6}(C_5), M_{1,2,3,4,6}(C_6), m_{1,2,3,4,6}(C) \} = \{ 0.027, 0.082, 0.134, 0.181, 0.289, 0.159, 0.128 \};$$

$$M_{1,2,3,4,7} \{ M_{1,2,3,4,7}(C_1), M_{1,2,3,4,7}(C_2), M_{1,2,3,4,7}(C_3), M_{1,2,3,4,7}(C_4), M_{1,2,3,4,7}(C_5), M_{1,2,3,4,7}(C_6), m_{1,2,3,4,7}(C) \} = \{ 0.026, 0.081, 0.133, 0.179, 0.293, 0.164, 0.124 \}。$$

由表3知,专家5的打分显示X市地铁1号线绩效的综合评价较差,但与前4位专家信息融合后的信任函数 $Bel(C) = 0.867$, $Pl(C) = 1$,信任区间为 $[0.867, 1]$,不确定度为 $m(C) = 0.133$,评价等价上升为“I级”。由于专家5给出的评分结果与前4位专家有较大的差异,使得与前4位专家融合的结果相比信任函数值降低,不确定度值增加。

将 $M_{1,2,3,4}$ 的结果与专家6的证据信息融合后的信任函数为: $Bel(C) = 0.872$, $Pl(C) = 1$,信任区间为 $[0.872, 1]$,不确定度为 $m(C) = 0.128$,评价等级为“I级”。专家6相较于专家5除了对指标 C_{11} 评分高点以外,其余分值均一致,与前4位和与前5位专家分别进行证据信息融合后虽评价等级相同,但5位融合的信任函数值增加了0.005,是因为指标因素 C_{11} 的评分值与前4位专家对该指标的打分更一致,符合实际。

专家7与专家6的评分相比,只有二级指标的最后一个影响因素“技术转移交接达标度 C_{63} ”不同,其余要素均相同。前4位专家信息与专家7的证据信息融合后的信任函数: $Bel(C) = 0.876$, $Pl(C) = 1$,信任区间为 $[0.876, 1]$,不确定度为 $m(C) = 0.124$,评价等级为“I级”。与 $M_{1,2,3,4,6}$ 的结果比较,信任函数增加了0.004,不确定度降低了。因为专家7在最后一项指标的评分上可信度高,与前4位专家的评价更贴近,因此融合后评价可信度更高。

综合上述的分析可以得出:基于FAHP赋权法确定的X市地铁1号线绩效指标权重结果知:项目特许经营阶段 C_3 (占16.7%)、项目建设及竣工验收阶段 C_4 (占21.4%)、项目运营维护阶段 C_5 (占26.1%)、项目特许期满移交阶段 C_6 (占19.1%),在6项绩效评价指标中所占的比重最大;其所对应的二级绩效因子:合理的定价及补贴机制 C_{32} 、项目成本控制情况 C_{43} 、私营部门收益 C_{53} 是影响项目绩效水平的主要因素,为今后绩效评价与监督提供参考。基于D-S证据理论融合7位专家的评价信息得出X市地铁1号线PPP项目的绩效评价等级为I级优秀,与实际情况相符合,表明了该模型的可行性和适用性。

5 结 论

(1) 考虑到地铁PPP模式的复杂性,通过PSR(压力-状态-响应)理论模型分析结合利益多方的绩效目标构建评价指标体系,从系统学的

角度出发,使绩效评价体系更加综合完善。

(2) 将三角模糊数与模糊偏好法相结合构建 FAHP 赋权法,实现了对认知不明确、难以量化的影响因素的合理转化,将对传统的约束条件求解转换为对非线性规划问题进行求解,直接避免了因专家的主观随意性评判而导致决策矩阵的不一致性验证问题和受极端值影响的问题。

(3) 运用 D-S 证据理论处理绩效评价过程中所涉及的大量不确定信息,解决专家意见的综合问题,将多组评价信息进行证据融合,对一致的部分会进行评价结果的加强,有信息冲突或不一致时,综合考虑融合各证据信息之间的共同部分,从而缩小不确定性值的区间范围,有效地减少了因人的评判偏差而引起的随机误差,使绩效结果更加全面可信。最后通过实例分析,验证了该评价模型的可行性,为今后绩效评价研究提供参考。

(4) 本文主要针对 X 市地铁 1 号线 PPP 项目的绩效水平进行评价研究,从评价结果看,建设和运营维护阶段是影响项目绩效的关键阶段,项目实施时应给予这两个阶段更多的关注。合理的定价及补贴机制、项目成本控制情况、私营部门收益是影响该项目绩效水平的主要因素;政府方面应加大对私营部门的监督力度和落实各项补贴机制,严选施工单位,同时要提高公众参与度。但本文在绩效评价体系构建方面的分析中未能针对不同地域地铁 PPP 项目特点细化、筛选绩效评价指标,在今后的研究中还需不断地深入和补充完善,进而为地铁 PPP 项目绩效监督和评价提供更科学的决策。

参 考 文 献

- [1] 王玉梅,严丹良. 基于平衡计分卡的 PPP 项目绩效评价研究[J]. 会计之友, 2014, (2): 14-17.
- [2] 兰 兰,高成修. 基于 AHP 的 PPP 绩效评估体系研究[J]. 海南大学学报(人文社会科学版), 2013, 31(3): 115-119.
- [3] 袁竞峰,季 闯,李启明,等. 基于虚拟标杆的基础设施 PPP 项目绩效评价体系构建[J]. 现代管理科学, 2011, (7): 12-14.
- [4] 吴贤国,冉连月,张立茂,等. 基于 SEM 的 PPP 项目绩效关键影响因素分析[J]. 工程管理学报, 2017, 31(5): 46-51.
- [5] Chan A P C, Lam P T I, Chan D W M, et al. Critical success factors for PPPs in infrastructure developments: Chinese perspective [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2010, 136(5): 484-494.
- [6] 亢磊磊,牛发阳. 基于 Shapley 值复合权重的城市轨道交通 PPP 项目绩效评价[J]. 会计之友, 2018, (15): 85-89.
- [7] 王建波,刘芳梦,有维宝,等. 基于 DPSIR 与物元分析的城市轨道交通 PPP 项目绩效评价[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(7): 1100-1107.
- [8] 易 欣. 知识转移视角的城市轨道交通公私合作项目合作绩效评价[J]. 城市轨道交通研究, 2015, (4): 27-33.
- [9] 袁永博,叶公伟,张明媛. 基础设施 PPP 模式融资结构优化研究[J]. 技术经济与管理研究, 2011, (3): 91-95.
- [10] 孙 慧,申宽宽,范志清. 基于 SEM 方法的 PPP 项目绩效影响因素分析[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2012, 14(6): 513-519.
- [11] 海全胜,宁小莉,霍 擎,等. 基于压力状态响应模型的达茂旗生态安全现状评价[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(11): 115-123.
- [12] 车娅丽,徐 慧,龚李莉,等. 基于 PSR 模型和主成分分析法的节水型社会建设评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 124-127.
- [13] 任红波. 城市轨道交通运营绩效考核指标体系探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2013, (12): 21-23.
- [14] 张晓丽,尹贻林. 基于利益相关者理论的城市综合交通枢纽项目需求分析[J]. 城市轨道交通研究, 2013, (5): 27-32.
- [15] 黄文成,帅 斌,左 静,等. 基于修正熵权的未成网城市轨道交通绩效评价[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, (6): 115-121.
- [16] 余慕溪,陆 瑶. PPP 模式下轨道交通项目干系人动态管控——以徐州轨道交通项目 1 号线为例[J]. 科技进步与对策, 2016, 33(16): 119-123.
- [17] 苏汝劫,胡富捷. 基础设施 PPP 项目定量 VIM 评价方法研究——以北京地铁四号线为例[J]. 宏观经济研究, 2017, (5): 74-79.
- [18] Mikhailov L. Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 134: 365-385.
- [19] 范 英,李 辰,晋民杰,等. 三角模糊数和层次分析法在风险评价中的应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7): 70-74.
- [20] 梅 莹,丁晓明. 证据理论在软件需求工程中的应用研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(11A): 237-239.
- [21] 马 剑,叶 新,林 鹏. 基于证据理论的地铁火灾安全评价方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(1): 134-140.