

# 基于云重心法修正 Shapley 值的 EPC 联合体收益分配研究

杨文安, 田若晗

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** EPC 总承包模式是目前中国工程建设中普遍采用的模式, 由于 EPC 项目体量大、专业复杂, 相关公司往往以联合体的方式参与项目, 收益分配的合理性是决定联合体成败的关键因素之一。为了使 EPC 联合体收益分配更加合理, 文中在 Shapley 值法分配收益的基础上, 从项目的固定和优化两部分利润着手, 引入风险承担、投入程度、工作成效、协作融合 4 个影响因素, 运用云重心评价法对其进行修正, 降低评价过程中的随机性和模糊性。实例分析结果表明, 基于云重心法修正 Shapley 值能使收益分配更加合理, 提高各成员进行项目优化的积极性。

**关键词:** 工程管理; EPC 联合体; 收益分配; Shapely 值法; 云重心法

中图分类号: U415.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)01-0143-04

EPC 总承包模式是建设单位将工程发包给总承包单位, 由总承包单位负责设计、施工、供应等过程的一种承包模式, 它是目前中国工程建设中普遍采用的模式。由于有能力总揽设计、施工、供应的公司较少, 相关公司往往以联合体的方式参与 EPC 项目, 经常出现联合体内收益分配不公的问题, 导致联合体的某些成员因分配不公而消极怠工, 影响项目的质量甚至导致联合体失败。因此, 联合体成员中合理分配收益是决定项目能否按质按量完成的重要因素之一。

针对收益分配问题, 管百海等在合约理论和博弈思想的基础上建立数学模型求得设计方与施工方的最佳分配比例; 王洁等考虑联合体成员所承担的风险, 将风险因子纳入 Shapley 值模型, 建立“基于贡献、兼顾风险”的收益分配模型; 吴玮玥等考虑 DB 模式中双方风险责任, 按其大小分配优化收益; 张洪波等通过构建联合体不完全信息博弈模型, 求解比较得出风险偏好、公平关切对优化收益分配的影响; 安晓伟等将谈判机制引入施工联合体收益分配; 徐勇戈等考虑 IPD 模式下各方努力行为, 建立努力系数, 并结合重要系数、风险系数等建立利益分配模型; 朱建波等引入行为经济学中的公平偏好理论, 建立 DB 模式下设计施工双方的博弈模型; 刘佩等利用风险偏好下的机会约束 DEA 模型对 Shapley 值进行修正, 引入绿色供应链系统各成员的相对贡献度, 得出收益分配方式。

Shapley 值法是研究多人合作收益分配的常用方法, 为使其结果更贴近实际, 国内外学者提出了很多 Shapley 值修正方法, 多是在原模型的基础上根据实际引入各类影响因素, 但在影响因素的量化过程中受数据随机性和模糊性的影响, 结果的确定过于主观。云重心评价法是在传统模糊集理论和概率统计学的基础上提出的定性定量之间转换模型, 其转换过程较好地解决了模糊性和随机性的问题。该文运用云重心法修正 EPC 联合体收益分配值, 综合考虑并量化影响收益分配的因素, 使 EPC 联合体收益分配结果更公平合理。

## 1 影响收益分配的因素

EPC 项目中常采用总价合同, 即业主付给承包商一个明确的总价。设计方、施工方、供应方组成 EPC 联合体时, 会对整个项目进行优化设计和管理, 以降低成本, 获得更多的利润。EPC 联合体的可分配收益来自于工作后的总利润, 包括项目固定利润和项目优化利润两部分。项目固定利润是指完成项目后业主支付给承包商的金额扣减基础成本后的获利; 项目优化利润是指通过一系列措施降低基础成本而获得的额外利润。设计方、施工方、供应方作为独立企业, 其自身条件和在合作中的表现将影响项目收益分配。根据相关研究成果, 影响 EPC 联合体收益分配的因素有风险承担、投入程度、工作成效和协作融合。

### 1.1 风险承担

(1) 外部风险。是指 EPC 项目进行过程中可能面临的自然、市场、政治等风险。由于 EPC 总承包一般采用总价合同,联合体承担较大的风险,而联合体各成员对风险的承担各有不同,风险承担影响其收益分配。

(2) 内部风险。是指 EPC 项目进行过程中,由于联合体各方自身能力的高低而承担的内部风险,包括各方的技术、经济、管理等方面的风险。这部分风险承担的多少主要取决于联合体成员的自身实力,自身能力强、经验足,将更有把握面对这类风险。

### 1.2 投入程度

(1) 资源投入。是指联合体成员为完成各自负责的工作而投入的人力、物力、财力等,这些投入是保证项目成功的关键,是联合体成员的主要经济投入,应以此来分配收益。

(2) 隐性收益。是指无法用货币衡量的收益,如经验、知名度、合作关系等。进行收益分配时,应考虑隐性收益,如获得隐性收益较大的小型公司应适当减少经济收益。

### 1.3 工作成效

(1) 项目成果。是指联合体成员对自身合同内工作的完成情况。能以高质量完成自身工作的成员应分得更多的收益,将成果情况纳入收益分配,有利于联合体成员高质量严要求地完成自身工作。

(2) 优化效果。是指在联合体愿意进行项目优化的基础上,实施项目优化能达到的成果。项目优化效果直接影响整体的优化利润,联合体收益分配中应予以考虑。

### 1.4 协作融合

(1) 合作程度。在 EPC 项目进行过程中,联合体成员间的相互协作能促使整个项目更好更快地完成。将合作程度作为收益分配的指标可调动联合体成员的积极性,实现利益最大化。

(2) 优化意愿。是指联合体成员愿意付出努力进行项目优化且协助其他方实现优化。优化意愿高且协助程度高的联合体成员应获得更多的收益。

## 2 EPC 联合体收益分配模型构建

### 2.1 Shapley 值法

Shapley 值法是在合作博弈中运用最广泛的收益分配方法,它基于“贡献越多收益越多”的原则选择多人合作中分配收益最大的方案。

EPC 联合体通常由设计方、施工方、供应方组成,即其中有 3 位成员,联合体成员合集  $N = \{\text{设计方, 施工方, 供应方}\}$ 。3 位成员间可形成不同的联盟子集  $S$ ,  $v(S)$  为联盟  $s$  的特征函数,表示联盟  $s$  获得的最大收益。设  $\varphi_i(v)$  为成员  $i$  的收益,当  $\varphi_i(v)$  同时满足对称性、可加性、有效性条件时,EPC 联合体成员的收益分配方案存在唯一 Shapley 值:

$$\varphi_i(v) = \sum_{S \subset N} \omega(|S|) [v(S) - v(S - \{i\})] \quad (1)$$

$$\omega(|S|) = (n - |S|)! (|S| - 1)! / n! \quad (2)$$

式中: $s$  为子集  $S$  中成员个数; $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $v(S - \{i\})$  为子集  $S$  中不含成员  $i$  时的收益。

Shapley 值是在各参与者风险中性、投入均等的前提下进行收益分配,没有考虑各参与者在投入、风险承担、贡献等方面的差异。因此,需引入风险承担、投入程度、工作成效、协作融合 4 个影响因素对 Shapley 值进行修正。

### 2.2 基于云重心的 Shapley 值收益分配模型

云重心法是由正态云理论发展而来的新的评价方法,能解决定性定量之间转换过于主观的问题。云重心可用  $G = LH$  表达( $L$  为云重心的位置,即期望值  $E_x$ ;  $H$  为云重心的高度,即权重  $\Omega^*$ ),其随  $L$ 、 $H$  的变化而变化,当云重心位置一致时,可比较云重心的高度来判断各云的重要性。基于云重心修正的 Shapley 值收益分配模型的求解过程如下:

(1) 各影响因素的云模型表示。请  $n$  位专家对风险承担、投入程度、工作成效、协作融合 4 个影响因素进行评定和赋值,其精确数值表示为  $E_{x_1} \sim E_{x_n}$ , 4 个影响因素可用 4 个云模型表示:

$$E_x = (E_{x_1} + E_{x_2} + \dots, E_{x_n}) / n \quad (3)$$

$$E_n = [\max(E_{x_1}, E_{x_2}, \dots, E_{x_n}) - \min(E_{x_1}, E_{x_2}, \dots, E_{x_n})] / 6 \quad (4)$$

(2) 构建反映系统状态变化的四维综合云。将 4 个影响因素用云模型表示并构建四维综合云。当该系统发生变化时,云重心的位置和高度会发生变化,可用云重心的变化来反映系统状态的变化。四维综合云的云重心可表示为:

$$G = (G_1, G_2, G_3, G_4) \quad (5)$$

式中: $G_i = L_i H_i$ ;  $L_i$ 、 $H_i$  分别为第  $i$  个指标的期望值和权重值。

(3) 确定各指标权重。采用熵权法确定各指标权重  $\omega$ 。先根据专家打分得到原始数据矩阵[见式(6)],再按式(7)计算第  $i$  个指标下第  $j$  个项目的指

标值的比重  $p_{ji}$ ,按式(8)计算第  $i$  个指标的熵值  $e_i$ ,最后按式(9)计算第  $i$  个指标的熵权  $\omega$ 。

$$R = (r_{ji})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{m4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$p_{ji} = r_{ji} / \sum_{j=1}^m r_{ji} \quad (7)$$

$$e_i = -1/\ln m \sum_{j=1}^m p_{ji} \cdot \ln p_{ji} \quad (8)$$

$$\omega_i = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^n (1 - e_i) \quad (9)$$

(4) 计算四维综合云的加权偏离度  $\Omega$ 。假设理想状态(各影响因素均为最佳状态)下云重心表示为式(10),理想值为 1,对式(8)进行归一化处理,得式(11),其中  $G_i^Y$  按式(12)计算。最后按式(13)计算  $\Omega$ 。

$$G^0 = (G_1^0, G_2^0, G_3^0, G_4^0) \quad (10)$$

$$G^Y = (G_1^Y, G_2^Y, G_3^Y, G_4^Y) \quad (11)$$

$$G_i^Y = \begin{cases} (G_i^0 - G_i) / G_i^0, G_i^0 > G_i \\ (G_i - G_i^0) / G_i^0, G_i^0 \leq G_i \end{cases} \quad (12)$$

$$\Omega = \sum_{i=1}^n (\omega_i^* G_i^Y) \quad (13)$$

(5) 计算 EPC 联合体各成员收益修正值。对 EPC 联合体各成员的加权偏离度  $\Omega$  进行归一化处理,得到各成员的权重  $\Omega^*$ ,再按式(14)计算各联合体成员的收益修正值  $\Delta\varphi_i(v)$ 。

$$\begin{cases} \Delta\varphi_i(v) = v(n) \Delta R_i \\ \Delta R_i = -1/n + \Omega^* \end{cases} \quad (14)$$

(6) 计算修正后实际收益分配。经过云重心法修正后的最终分配收益见式(15)。

$$\varphi_i(v)^* = \varphi_i(v) + \Delta\varphi_i(v) \quad (15)$$

根据以上分析,修正的 Shapley 值法充分考虑了 EPC 项目可分配收益的两大来源即项目固定利润和项目优化利润,引入风险承担、投入程度、工作成效、协作融合 4 个影响因素进行收益分配修正,且在修正过程中运用云重心评价法解决了评价中随机性、模糊性的问题,使 EPC 联合体各成员间收益分配更合理,有利于激励各成员付出更多的努力实现整个项目的增值。

### 3 实例分析

#### 3.1 项目概况

长沙市雨花区某镇乡村道路提质改造工程,由某设计单位(A)、某施工单位(B)、某供应单位(C)

组成的联合体中标,该联合体可用集合的形式表示为  $N = \{1, 2, 3\}$ 。根据该工程实际情况及类似工程情况,估算 A、B、C 单独参与工程分别可获利 30、65、15 万元;如果 A、B 合作可获利 110 万元,A、C 合作可获利 55 万元,B、C 合作可获利 95 万元,A、B、C 三者联合体可获利 145 万元。下面运用上文模型进行该联合体收益分配。

#### 3.2 Shapley 值法分配联合体收益

由上文描述可得: $v(1) = 30, v(2) = 65, v(3) = 15, v(1, 2) = 110, v(1, 3) = 55, v(2, 3) = 95, v(1, 2, 3) = 145$ 。求得设计方的收益分配见表 1。

表 1 设计方的 Shapley 值收益分配 万元

项目	{1}	{1,2}	{1,3}	{1,2,3}
$v(s)$	30	110	55	145
$v(s - \{1\})$	0	65	15	95
$v(s) - v(s - \{1\})$	30	45	40	50
$\omega(s)$	1/3	1/6	1/6	1/3
$\omega(s)[v(s) - v(s - \{1\})]$	10	15/2	20/3	50/3

根据式(1),求得  $\varphi_1(v) = 40.83$  万元,  $\varphi_2(v) = 78.34$  万元,  $\varphi_3(v) = 25.83$  万元。三者组成联合体获得的收益比单独参与项目时多,更有利于调动三方的积极性。但运用经典的 Shapley 值法分配收益是站在各方风险和贡献一致的基础上,欠合理,需采用云重心法进行收益分配修正。

#### 3.3 云重心法修正 Shapley 值分配联合体收益

邀请 4 位有 EPC 联合体项目实际经验的专家对风险承担、投入程度、工作成效、协作融合 4 个影响因素进行评判,按式(3)、式(4)计算其期望值和熵值,建立四维云模型。以设计方为例,各影响因素的专家评价结果及期望值、熵值计算结果见表 2。

表 2 设计方指标评判及计算

专家	风险承担	投入程度	工作成效	协作融合
专家 1	0.16	0.58	0.15	0.11
专家 2	0.23	0.47	0.17	0.13
专家 3	0.19	0.61	0.12	0.08
专家 4	0.15	0.59	0.14	0.12
理想值	1	1	1	1
期望	0.183	0.563	0.145	0.110
熵	0.013	0.023	0.008	0.008

根据式(6)~(9),运用熵权法求得设计方各影响因素的权重为:

$$\omega_i = (0.333, 0.124, 0.189, 0.355)$$

根据式(5)、式(10),求得设计方四维综合云的

云重心为:

$$G = (0.061, 0.070, 0.027, 0.039)$$

设计方理想状态下四维综合云的云重心为:

$$G^0 = (0.333, 0.124, 0.189, 0.355)$$

以  $G^0$  为参照对  $G$  进行归一化, 得:

$$G^Y = (-0.818, -0.438, -0.855, -0.890)$$

根据式(13), 求得设计方加权偏离度  $\Omega = -0.803$ 。同理, 对施工方、供应方进行计算, 求得其加权偏离度分别为  $-0.819, -0.879$ 。对三方的加权偏离度进行归一化, 得:

$$\Omega_s^* = (0.321, 0.327, 0.351)$$

最后根据式(14)、式(15)求出运用云重心法修正后的收益分配结果(见表3)。图1为不同分配方法的收益分配对比。

表3 基于云重心法修正后的收益分配

项目	设计方	施工方	供应方
$\Delta R_i$	-0.012	-0.006	0.018
$\Delta \varphi_i(v)$	-1.740	-0.870	2.610
$\varphi_i(v)$ / 万元	40.83	78.34	25.83
$\varphi_i(v)^*$ / 万元	39.09	77.47	28.44

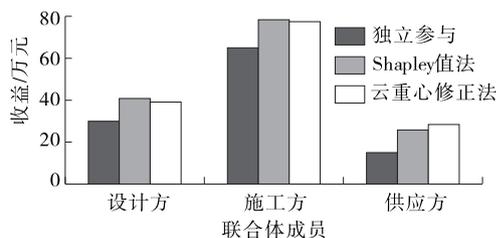


图1 不同分配方法的收益分配对比

根据表3和图1, 设计、施工、供应三方选择组成联合体的获利比独立参与时的大, 这一点将促使他们组成联合体共同参与EPC项目。通过云重心法修正后, 降低了设计方、施工方的分配值, 提高了供应方的分配值, 在考虑风险承担、投入协作的基础上平衡了参与方进行优化的行动却未获得相应收益的问题, 使分配结果更好地平衡各方努力, 更易被各方接受, 也可提高各方进行项目优化的积极性, 从而提高联合体合作的稳定性, 降低EPC项目的成本, 更好地实现增值。

#### 4 结语

EPC联合体模式是现阶段工程实践中普遍运用的模式, 其中各方收益分配是该模式能否成功的关键。该文从EPC项目可分配收益的两大来源即

项目固定利润和项目优化利润进行分析, 得出影响收益分配的因素为风险承担、投入程度、工作成效、协作融合, 在Shapley值法的基础上, 引入影响因素, 运用云重心法对其进行修正, 得出最终收益分配模型。实例分析结果表明, 该分配模型能更好地平衡各方的努力, 使各参与方在参与项目优化的基础上能获得相应的收益, 从而更好地激励联合体各方的积极性。

该文讨论了项目优化利润对收益分配的影响, 也证实了其重要性, 但未明确该部分利润如何较好地量化以便于各成员间分配。项目优化利润如何定量表达有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 管北海, 胡培. 联合体工程总承包商的收益分配机制[J]. 系统工程, 2008, 26(11).
- [2] 王洁, 章恒全. 项目联合体EPC模式下基于考虑风险的Shapley值的收益分配模型[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(2).
- [3] 袁军, 张云宁, 翁清, 等. 基于TOPSIS的联合体总承包项目利益分配[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(2).
- [4] 吴玮玥, 王卓甫, 丁继勇, 等. 基于互惠共赢的DB联合体工程优化收益分配机制[J]. 工程管理学报, 2017, 31(1).
- [5] 张洪波, 侯嫚嫚. 考虑风险偏好与公平关切的设计施工总承包联合体优化收益分配[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(6).
- [6] 安晓伟, 王卓甫, 丁继勇, 等. 联合体工程总承包项目优化收益分配谈判模型[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(5).
- [7] 徐勇戈, 王若曦. IPD模式下努力因素对利益分配机制的影响[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2018, 50(4).
- [8] 朱建波, 时茜茜, 盛昭瀚, 等. DB模式下考虑公平偏好的重大工程设计施工合作机制[J]. 系统管理学报, 2018, 27(5).
- [9] 刘佩, 高更君. 基于绿色供应链利益分配的P-DEA与Shapley值模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(9).
- [10] 柳丽娟, 苏义坤, 周晓冬. 设计施工联合体博弈合作: 以设计变更条件下大型建设项目为例[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(3).
- [11] 刘海军. 运用Shapley值法分配供应链合作收益存在的问题及对策[J]. 工业工程, 2010, 13(6).
- [12] 王放, 李彦鹏, 黎湘. 一种基于正向云的自动目标识别效果评估方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7).

(下转第150页)