

# 基于 D—S 证据理论的海外公路工程投标决策

杨文安, 陈龙\*

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**海外公路工程具有规模大、范围广、工期长等特点,使项目投标评估的复杂程度显著提高,难以简单地做出投标决策。该文通过文献分析建立业主及相关管理方、建设项目本身、投标企业自身三大类 28 个投标决策影响因素集,针对拟投标项目筛选影响因素并构建项目的评价指标体系,然后采用层次分析法、D—S 证据理论构建的决策模型融合专家评价数据,在确定项目整体风险等级的同时,进一步获得融合后项目的关键影响因素,最后做出是否投标的决策。应用决策模型对菲律宾 2.2 公路项目进行评价,结果为中等风险可投标,前三大关键影响因素为项目预期利润、企业索赔能力、项目所需材料和设备的供应情况。模型能有效处理不同评估意见,可为投标决策、标书报价、风险预防提供参考。

**关键词:**海外项目;公路工程;投标决策;层次分析法;D—S 证据理论

**中图分类号:** F284

**文献标志码:** A

自 2013 年习近平总书记提出“一带一路”倡议起截止至 2019 年 11 月,中国已经和 137 个国家、30 个国际组织达成合作共识。在“一带一路”倡议中,交通基础设施建设一直处于优先发展领域。作为倡议的重要推动者,中资承包商为中国企业树立了责任担当的旗帜,赢得了东道国政府的肯定和当地社会的认可。根据中国商务部统计数据,2019 年中国企业与“一带一路”沿线国家新签对外承包工程项目合同 6 944 份,合同额 1 548.9 亿美元,占同期中国对外承包工程新签合同额的 59.5%;完成营业额 979.8 亿美元,同比增长 9.7%。与不断扩大的海外市场相伴的,不仅仅是节节攀升的营业收入,还有逐步浮现的风险,国际承包企业为此付出了惨痛的代价。2011 年,以 4.72 亿美元中标波兰 A2 高速项目的中国海外工程有限责任公司,亏损 3.95 亿美元;由于多项目延后开工、延期交付,叠加法规变动、资金断裂导致巴西施工企业 Odebrecht 于 2019 年宣布破产保护<sup>[1]</sup>。直面日益增长的风险和欣欣向荣的国际建筑市场,企业想要进入海外市场,实现可持续发展,除了提高国际工程施工管理水平外,还要提升工程承揽能力。能客观量化分析投标项目的风险,做出合理的投标决策是竞标企业必须面对的关键环节。

国内外许多学者对投标决策进行了探索,取得了一系列研究成果。常见的投标决策方法有两类,一类基于企业自身和竞争对手的投标数据进行决策:王博等<sup>[2]</sup>通过样本训练建立 BP 神经网络模型,解决了影响因素之间,以及与投标决策的非线性关系问题;Ag-nieszka 等<sup>[3]</sup>对波兰南部承包商进行了问卷调查,设计了基于改进模糊理论的参数模型和神经网络模型;孔令祯等<sup>[4]</sup>以企业战略为导向,结合三角模糊数、蒙特卡罗模拟法、灰色关联度进行了多项目排序决策;卢睿等<sup>[5]</sup>研究了企业资源受限情况下的粒子群算法的项目择优决策模型;第二类是非投标数据决策方法:郭清娥等<sup>[6]</sup>组合交叉评价和模糊理论构建的投标决策方法,有效地减少了模糊综合评价的主观性;李娟芳等<sup>[7]</sup>使用层次分析法、信息熵确定权重,以相对熵理论构建了优选决策模型,降低了风险指标权重对决策的影响;Duygu 等<sup>[8]</sup>以实用性为目标,为投标企业开发了一款基于层次分析法的投标决策工具。已有的投标决策研究成果丰硕,但仍存在改进空间:大部分研究忽略了不同市场、项目的差异性,以一套指标体系有效评价不同项目难以实现;许多学者的决策模型聚焦于多项目对比排序,欠缺对单一项目投标决策的考虑;部分决策过程依赖于一定数量的可用历史数据,或决策模型没能

**收稿日期:** 2020-05-01

**基金项目:** 长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(编号: SJCX202010)

**作者简介:** 杨文安,男,博士,副教授. E-mail: ywenan@163.com

\* **通信作者:** 陈龙,男,硕士研究生. E-mail: quilchen@foxmail.com

处理好评价信息中的模糊性,无法有效地综合专家的不一致意见。综上所述,为提高投标决策的针对性、适用性、有效性,将 D—S 证据理论(Dempster-Shafer Theory of Evidence)应用于海外公路工程投标决策。D—S 证据理论是一种处理不确定、不清晰信息的推理方法,能有效地融合模糊信息,在多目标决策上常被推广应用。该文尝试从现有研究中分析、筛选,建立海外公路工程投标决策影响因素集,然后,使用 D—S 证据理论解决海外公路工程投标时的不确定和模糊信息,融合专家的不同评价意见,确定拟投标项目的整体风险等级,进一步获得融合后的项目关键影响因素,并依据评价结果做出是否投标的决策,最后,选用菲律宾 2.2 公路项目进行实例分析。

1 建立投标决策影响因素集

1.1 影响因素检索

海外公路工程的投标决策有别于中国国内公路项目,涉及的影响因素更加繁多,不确定性更加复杂,不同的国家、业主、工程所在地都将直接影响项目的投标决策。国内外学者对评价指标体系有较为深入的研究,但标准并未统一。Agnieszka 等<sup>[3]</sup>通过对波兰大、中、小承包企业发送两种不同的问卷,从 61 份答卷中分析得出了工作类型、类似项目经验和合同条款三大决定性因素;周英<sup>[9]</sup>经过对 86 个投标案例的分析和统计,筛选出五大类 18 个影响因素;胡振宇等<sup>[10]</sup>通过文献统计归纳出项目外部环境、项目本身、企业本身三类 15 个影响因素;Maxwell<sup>[11]</sup>把承包企业按中标率的高、中、低划分为三类并分别进行研究,总结出 11 个影响因素;朱思雅等<sup>[12]</sup>总结了海外项目的 10 个影响因素,其中设计变更、咨工团队影响最为关键;陈志鼎等<sup>[13]</sup>通过文献分析得到了影响境外工程投标的 24 个影响因素。虽然学者们从不同角度对国际工程投标决策影响因素进行了相关研究,但都未能契合公路工程项目的特点,该研究将组建海外公路工程投标决策影响因素集。

1.2 建立影响因素集

通过文献分析,结合海外公路工程的特点,基于专家讨论法对各个影响因素进行定性评价,筛选出海外公路工程投标决策影响因素集,并按照影响因素与投标项目的关系划分成三类:业主及相关管理方、建设项目本身、投标企业自身,共 28 个影响因素(表 1)。

表 1 投标决策影响因素集

类别	影响因素
业主和相关管理者	业主经济实力和信誉
	业主和监理的工程管理方式和能力
	当地政府对项目的干预程度
	当地建筑行业相关法律和规章
	外汇汇率的波动
	原材料市场价格的波动
	当地环保和安全管理规定
	当地政府的管理方式和国家政策
	官方语言的差异
	建设项目规模
建设项目本身	招标文件质量水平
	地质勘察详略和设计图纸质量
	不良土质地基处理范围和难度
	桥梁和隧道工程技术复杂程度
	合同条款
	征地拆迁进展
	项目所需材料和设备的供应情况
	项目预期利润
	项目所在地治安和气候状况
	分包商的信誉和能力
投标企业自身	劳工供应
	投标企业的资金实力
	投标企业人员和设备条件
	类似工程的施工经验
	投标方与业主和当地政府的关系
	企业工程饱和程度
	投标人风险偏向
	企业的索赔能力

2 投标决策模型

2.1 构建拟投标项目评价指标体系并确定权重

根据拟投标项目的实际情况和类似工程经验,采用专家讨论法对影响因素集进行约减,筛选出主要影响因素,构建项目评价指标体系。指标权重采用层次分析法由专家对各影响因素进行评价并获得权重系数。首先,建立判断矩阵  $P$ ;然后,求得每一行的乘积  $V_k$ ,并将  $V_k$  开  $n$  次方( $n$  为该矩阵  $P$  的阶数)后归一化处理得到指标权重  $\omega_i$ ;最后,进行一致性检验,当指标  $CR \leq 0.1$  时,该评价满足一致性要求;当  $CR > 0.1$  时,需要重新评价,构建新的判断矩阵直至满足一致性检验为止<sup>[14]</sup>。

2.2 D-S 证据理论模型原理

D-S 证据理论是一种重要的决策信息融合方法,能够在结构简单的算法上实现模糊数据的有效处理,且融合结果可靠性高<sup>[15]</sup>。证据理论由 Dempster 于 1967 年首次提出,Shafer 于 1976 年在其理论的基础上形成了 D-S 证据理论<sup>[16]</sup>。

定义 1 识别框架  $\Theta$ ,表示为决策问题所有可能结果的集合。基本概率函数  $\text{Mass}:2^\Theta \rightarrow [0,1]$ ,满足:

$$\begin{cases} m(\phi) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \end{cases}$$

$A$  表示  $\Theta$  的任意一个子集,  $m(A)$  表示事件  $A$  的基本概率分配函数。

定义 2 信任函数  $Bel$ 。对于识别框中的任意子集  $A$ ,其信任函数为:

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \tag{1}$$

若一个集合  $A$  的  $m(A) > 0$ ,则  $A$  为信任函数的焦元。式中  $B$  为识别框中子集  $A$  的焦元。

定义 3 似然函数  $Pl$ 。

$$Pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \phi} m(B) \quad \forall A \subseteq \Theta \tag{2}$$

$Pl(A)$  表示  $A$  不是假的信任程度。

定义 4 D-S 证据融合规则。

假设两个独立证据的 Mass 函数为  $m_1$  和  $m_2$ ,则 D-S 证据融合规则为:

$$m(A) = [m_1 \oplus m_2](A) = \begin{cases} 0 & (A = \phi) \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j \neq \phi} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j)} & (A \neq \phi) \end{cases} \tag{3}$$

假设有  $P$  个独立的证据,它们的 Mass 函数分别为  $m_1, m_2, \dots, m_p$ ,则其融合规则为:

$$m(A) = [m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_p](A) = \begin{cases} 0 & (A = \phi) \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j \cap W_t \dots \neq \phi} m_1(A_i) m_2(B_j) m_3(W_t) \dots}{1 - \sum_{A_i \cap B_j \cap W_t \dots = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j) m_3(W_t) \dots} & (A \neq \phi) \end{cases} \tag{4}$$

2.3 投标决策评估风险等级划分

使用等分原则,把海外公路工程风险等级  $R$  划分为 5 个级别,即:  $R = \{R_i | i=1,2,3,4,5\}$ ,以  $SR$  ( $0 \ll SR \ll 1$ ) 表示评估概率范围<sup>[13]</sup>,见表 2。

表 2 投标决策评估风险等级

风险等级	概率范围 SR	定义
$R_1$	$[0, 0.2]$	低风险,应投标
$R_2$	$(0.2, 0.4]$	一般风险,宜投标
$R_3$	$(0.4, 0.6]$	中等风险,可投标
$R_4$	$(0.6, 0.8]$	较高风险,慎投标
$R_5$	$(0.8, 1.0]$	高风险,不投标

指标层各项指标所处的风险等级的可能性  $M_{kR_i}$ :

$$M_{kR_i} = \sum_{j=1}^k (m_i \omega_j) \tag{5}$$

式中:  $k=1,2,\dots,28$ ;  $R_i$  为风险等级;  $m_i$  为指标在某个风险等级下融合后的概率;  $\omega_i$  为指标的权重。

2.4 投标决策评估流程

基于 D-S 证据理论的海外公路工程投标决策的评估流程为:

步骤 1:根据拟投标项目情况采用专家讨论法筛选主要影响因素,建立项目评价指标体系,并运用层次分析法获得各项评价指标权重。

步骤 2:由  $m$  位专家根据项目信息对各项指标的风险等级进行评价打分,并对该评价进行不确定程度的评判,然后使用归一化法则将评价数据进行换算,利用式(1)~(4)进行专家评价数据的融合,使用式(5)求得投标项目各个风险等级下的概率。

步骤 3:采用最大隶属度原则确定投标项目所属的风险等级。

步骤 4:为了避免风险等级概率等分对关键影响因素的弱化,突出高风险的关键影响因素,结合拟投标项目的整体风险等级,将全部评价指标选取高于项目风险等级的概率按式(5)计算,可进一步预测出项目在较高风险下的关键影响因素。

3 实例分析

3.1 工程概况

菲律宾 2.2 公路项目位于民都洛岛,全长 24.697 km,计划工期 26 个月,总投资折合人民币约 7 214 万元,业主为菲律宾公造部。该项目路线途径 6.2 km 的农田为私有土地,其余路段为岛内交通要道的升级改造,施工期间不得中断通行;所在地无钢筋、水泥、砂石生产商,沥青混凝土供应商唯一且产能有限等。项目实际情况较为复杂,因此需采用 D-S 证据理论模型进行评估是否可投标。

3.2 决策过程

根据菲律宾 2.2 公路项目信息和菲律宾以往项目经验,由 2 位技术专家和 1 位经济专家通过专家讨论法对影响因素集按相对于拟投标项目的重要性进行约减,筛选出 17 项主要影响因素,构建 2.2 公路项目的评价指标体系,并利用层次分析法计算出各项指标权重,见表 3。

3 位专家对业主经济实力和信誉的风险等级  $R$  和

其评价的不确定性  $U$  采用数值 1~9 进行评价标度,使用归一法换算成相应概率,见表 4。然后使用式(1)~(4)进行三项评价数据的融合。重复该步骤获得其他 16 项指标融合后的概率。

运用式(5)计算项目所处风险等级概率,见表 5。由表 5 的数据按隶属度排序可得风险等级  $R_3$  的概率最大,表明菲律宾 2.2 公路项目投标风险等级为中等可投标。

表 3 菲律宾 2.2 公路项目评价指标体系和权重以及评价数据融合后各风险等级的概率

准则层	指标	权重	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$U$
业主及有 关管理方	业主经济实力和信誉	0.108 6	0.123 5	0.502 0	0.302 6	0.050 2	0.010 9	0.010 9
	业主、监理的工程管理能力	0.082 5	0.035 1	0.364 5	0.487 4	0.097 9	0.000 0	0.015 1
	当地政府对项目的干预程度	0.029 7	0.244 5	0.308 4	0.364 5	0.055 1	0.005 5	0.022 0
	当地建筑行业相关法律和规章	0.020 1	0.275 4	0.558 7	0.120 7	0.030 2	0.000 0	0.015 1
	外汇汇率的波动	0.059 1	0.039 5	0.328 8	0.446 5	0.159 2	0.015 6	0.010 4
建设项 目本身	建设项目规模	0.082 5	0.250 8	0.583 1	0.138 6	0.023 4	0.000 0	0.004 1
	地质勘察详略、设计图纸质量	0.036 0	0.048 6	0.353 3	0.497 3	0.073 8	0.000 0	0.027 0
	合同条款	0.107 0	0.114 2	0.360 3	0.394 6	0.114 2	0.000 0	0.016 6
	征地拆迁进展	0.025 5	0.000 0	0.093 1	0.557 6	0.271 7	0.046 6	0.031 0
	项目所需材料、设备的供应情况	0.068 0	0.015 4	0.188 9	0.421 0	0.282 2	0.069 4	0.023 1
	项目预期利润	0.144 0	0.008 1	0.116 6	0.403 0	0.421 6	0.037 2	0.013 5
投标企 业自身	项目所在地治安、气候状况	0.037 0	0.081 7	0.343 6	0.414 5	0.126 8	0.010 0	0.023 4
	投标企业的资金实力	0.068 8	0.062 1	0.565 7	0.330 6	0.030 5	0.000 0	0.011 1
	投标企业人员、设备条件	0.025 4	0.331 8	0.443 5	0.178 1	0.029 1	0.000 0	0.017 5
	类似工程的施工经验	0.030 0	0.177 2	0.431 2	0.349 7	0.032 6	0.000 0	0.009 3
	投标方与业主、当地政府的 关系	0.023 4	0.458 0	0.386 9	0.138 0	0.005 7	0.000 0	0.011 4
	企业的索赔能力	0.052 2	0.001 3	0.003 9	0.481 7	0.407 2	0.102 1	0.003 9

表 4 业主经济实力和信誉所处风险等级的概率

专家	低风险 $R_1$	风险一般 $R_2$	中等风险 $R_3$	较高风险 $R_4$	高风险 $R_5$	不确定性 $U$
专家 1	0.000 0	0.208 3	0.375 0	0.250 0	0.083 3	0.083 4
专家 2	0.238 1	0.381 0	0.142 9	0.047 6	0.000 0	0.190 4
专家 3	0.409 1	0.318 2	0.181 8	0.000 0	0.000 0	0.090 9

表 5 菲律宾 2.2 公路项目所处风险等级概率

项目	低风险 $R_1$	风险一般 $R_2$	中等风险 $R_3$	较高风险 $R_4$	高风险 $R_5$	不确定性 $U$
菲律宾 2.2 公路项目	0.100 1	0.340 9	0.366 3	0.158 7	0.019 3	0.014 7

为了突出高风险的关键因素,结合 2.2 公路项目评估出的中等风险  $R_3$ ,全部 17 项评价指标取风险等级  $R_4$  和  $R_5$  的概率按式(5)计算,进一步得到项目较高风险下的关键影响因素,并按隶属度排序,见表 6。

表 6 的排序结果显示:在项目整体风险等级为中等的情况下,项目预期利润、企业的索赔能力、项目所需的材料和设备供应情况这三项影响因素的概率远高于其他因素。

表6 菲律宾2.2公路项目关键影响因素排序

指标类型	概率
项目预期利润	0.047 4
企业的索赔能力	0.019 7
项目所需材料、设备的供应情况	0.017 7
合同条款	0.008 5
外汇汇率、原材料市场价格的波动	0.007 4

3.3 结果分析

(1) 投标企业应根据项目评估结果和关键风险,做出是否参与投标的决策。若投标,宜根据项目评估结果制定好风险预防和应对措施,如选取合适的投标策略、熟悉合同条款和索赔要求、制定商品混凝土供应备选方案等。

(2) 三项关键影响因素反映了海外公路市场的普遍现象。投标人作为中资企业,受限于项目资金或贷款来源、国家政策对本国企业的保护,导致允许投标的项目有限,呈现出海外公路市场竞争大,整体利润水平低的现状;中国施工企业普遍受到国际工程高额利润的激励进入海外市场,又急于承接工程业务,对项目所在地的法律法规、行业规范、国家政策的熟悉和掌握程度不够,当项目实施过程中出现索赔事件时,往往处于被动局面,待后续再采取相应措施,致使索赔延误甚至拒赔;菲律宾作为发展中国家,以第三产业和农产品出口为主,项目所需材料和设备的本地供应能力有限,通常依靠大量进口,长期受到海、陆运输效率低下,进口清关效率缓慢以及台风的影响。

(3) 菲律宾2.2公路项目实施后的实际情况和D-S证据理论模型评估结果相吻合,验证了模型的有效性。

4 结论

(1) 该文在文献分析的基础上,结合海外招投标实际情况和公路工程项目特点,从业主及相关管理方、建设项目本身、投标企业自身三个方面归纳出比较全面的海外公路工程投标决策影响因素集,解决了单一评价指标体系难以合理评估不同项目的问题,提高了模型在实际投标决策过程中的适用性。

(2) 该文在海外公路工程投标决策中引入D-S证据理论,有效地融合了不确定信息和专家的不一致意见,使投标决策相比简单的线性加权更趋合理,菲律宾2.2公路项目的实例分析也验证了模型的可靠性,

但对新进市场投标决策的效用性有待进一步研究。

(3) 投标企业宜逐步完善投标决策影响因素集,增加有当地或类似工程经验评估人员的数量,以减少评估结果受个体影响的程度,提高模型的可靠性和投标决策质量。

参考文献:

[1] 周家义,王哲.“一带一路”下中资企业海外基础设施建设可持续发展策略[J].宏观经济管理,2019(11):63—68,74.

[2] 王博,顿新春,李智勇.基于BP神经网络的水利工程投标决策模型及应用[J].水电能源科学,2013,31(3):131—134.

[3] LEŚNIAK Agnieszka,PLEBANKIEWICZ Edyta. Modeling the Decision-Making Process Concerning Participation in Construction Bidding[J]. Journal of Management in Engineering,2013,31(2):04014032.

[4] 孔令祯,张云宁,张雪娇.战略导向下施工企业投标决策研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2016,38(2):238—243.

[5] 卢睿,李学伟,陈雍君.基于粒子群算法的铁路工程投标项目择优决策研究[J].铁道学报,2017,39(1):19—24.

[6] 郭清娥,王雪青.基于交叉评价和模糊理论的工程项目投标决策方法研究[J].运筹与管理,2012,21(6):100—104.

[7] 李娟芳,何亚伯.基于粗糙集和相对熵的工程项目投标决策研究[J].数学的实践与认识,2017,47(21):60—67.

[8] KALAN Duygu,OZBEK Mehmet Egemen. Development of a Construction Project Bidding Decision-Making Tool[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction,2020,25(1):04019032.

[9] 周英.中国企业参与国外大型工程投标的多目标决策研究[J].中国软科学,2016(12):154—162.

[10] 胡振宇,张水波.国际PPP项目投标决策指标体系研究[J].国际经济合作,2017(10):72—76.

[11] CHISALA Maxwell L. Quantitative Bid or No-Bid Decision-Support Model for Contractors[J]. Journal of Management in Engineering,2017,143(12):04017088.

[12] 朱思雅,高幸.基于改进DEMATEL的海外工程项目进度影响因素分析[J].中外公路,2018,38(5):310—314.

[13] 陈志鼎,曹胤杰.境外水电工程项目投标决策D-S证据模型研究[J].人民黄河,2019,41(5):135—137,142.

[14] 徐东强,李永亮,王可意.基于AHP-DEA的公路隧道大变形风险评估[J].中外公路,2018,38(4):218—222.

[15] 胡晓伟,刘响,孙航航.基于D-S证据理论的出租车减排策略评价[J].交通信息与安全,2019,37(1):113—120.

[16] GLENN Shafer. A Mathematical Theory of Evidence [M]. New Jersey: Princeton University Press,1976.