

基于失效模式与后果分析改进的投标策略风险分析

尤建新, 丁颖頔

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

摘要: 针对投标策略的风险分析中缺乏有效量化方法的问题, 提出了基于模糊集理论和灰色关联理论的改进 FMEA (失效模式与效果分析) 方法, 结合模糊集理论建立评价失效模式的模糊语言术语集和对应的模糊数, 并由 FMEA 小组对各种失效模式做出评价. 利用灰色关联理论计算各种失效模式的关联度, 通过排序来确定失效模式的风险顺序. 投标策略的风险分析案例说明了该研究具有适用性和有效性.

关键词: 投标策略; 风险分析; 失效模式与效果分析; 模糊集理论; 灰色关联决策

中图分类号: F27

文献标志码: A

Improved Failure Mode and Effects Analysis Approach to Risk Analysis of Bidding Strategy

YOU Jianxin, DING Yingdi

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The improved failure mode and effects analysis (FMEA) based on the fuzzy set theory and gray relational theory was proposed for the solution to effective quantization questions of risk analysis in bidding strategy. First of all, combining with the fuzzy set theory, the fuzzy linguistic terminology set of the failure mode and corresponding fuzzy numbers were established, and the different failure modes were evaluated by the FMEA team. Next, the relevance ratio of different failure modes was calculated using the gray relation theory and the risk order of failure modes was confirmed by sorting. Risk analysis cases of bidding strategy illustrate the usability and effectiveness of the proposed approach.

Key words: bidding strategy; risk analysis; failure mode and effects analysis (FMEA); fuzzy set theory; gray relational theory

近年来, 建筑市场日趋激烈的竞争导致工程项目的风险不断加大, 在招投标阶段强化风险管理, 有利于业主选择合适的承包商, 有利于承包商进行准确报价和对风险采取有效的对策和计划, 进而实现项目目标^[1].

本文以投标策略的风险管控为研究对象, 试图寻求一种有助于确定控制施工项目风险的优先顺序, 支持预防和改进措施的风险分析方法.

1 相关研究述评

风险管理的理论与方法本身并不是新生事物. 早在 1958 年, 美国海军武器局在研制北极星导弹潜艇时利用的计划评审技术 (PERT)^[2], 将工程提前两年完成. 吕军^[1] 总结了一些项目风险管理实用的方法: 德尔菲法^[3], 它试图通过小组意见的一致性来进行预测; 风险评审技术^[4], 但该方法编制网络图极为困难, 对大型项目应用较少; 蒙特卡罗模拟^[5]; 决策树^[6], 是用树状图形分析和选择行动方案的一种系统方法, 用于解决风险型决策问题; 检查表^[7], 从以往类似项目和某些其他信息来源中积累的历史信息和知识, 用于编制风险识别检查表. 李佳欣^[8] 提出对招投标风险估计的方法, 主要选择主观概率估计法. 利用专家及风险管理者的经验对风险事件和可能引发的后果进行主观估计. 陈超等^[9] 提出建立工程项目投标风险评估的指标体系是进行工程项目投标风险评估的基础. 刘志建^[10] 则将常用的风险识别方法分为两大类, 一类是定量分析方法, 其常用方法有故障树、概率树、统计和概率法、敏感性分析法等; 一类是定性分析方法, 其常用的有头脑风暴方法、情景分析方法、工作分解结构等. 这些研究与实践都有助于提升风险分析的工作成效, 但在一定程度上对风险

收稿日期: 2015-08-29

第一作者: 尤建新(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为管理理论与工业工程. E-mail: yjx2256@vip.sina.com

通讯作者: 丁颖頔(1993—), 女, 硕士生, 主要研究方向为管理理论与工业工程. E-mail: 745886763@qq.com

管理人员的知识、技能和使用技巧有很大的依赖性,在提升风险分析方法的认可、推广应用以及有效性水平方面存在进一步的探索空间^[11].

FMEA(失效模式与效果分析)是企业实践中比较熟悉的方法,常用于质量和风险分析.传统的 FMEA 方法是通过计算 RPN(风险顺序数)对产品或系统的风险等级进行评估的,RPN 是 O(发生率)、S(严重度)和 D(难检度)三者变量的乘积.由于 O, S, D 这三个变量之间没有明确的线性关系,因此在实际计算 RPN 时往往会忽略三者之间的相对重要性,认为三个变量之间的重要性是等同的.另外,由于不同的 O, S, D 相乘可以得到相同的 RPN 值,而实际各种失效模式对于风险作用是不相同的,仅仅以 RPN 来判断各种失效模式的风险顺序在实际应用中存在较大问题.为了避免这些不足,本文针对投标策略的风险评估要求,引入了基于模糊集理论和灰色关联理论的改进 FMEA 方法,期望能够有效地处理各种模糊和不确定性信息,综合考虑比较 O, S, D 三者之间的相对重要性,克服仅仅以 RPN 来判断

失效模式风险顺序的局限性^[12].

2 基于改进 FMEA 方法的模型

在确定施工项目各种可能的失效模式、产生原因及其检测方法的基础上,本文将三个输入变量 O, S, D 看作是模糊语言变量,应用模糊集理论,结合专家的知识 and 经验建立各语言变量的模糊语言术语集和对应的模糊数,为投标策略的风险分析小组对各种失效模式进行模糊评价提供依据.风险分析小组将根据已建立的模糊语言术语集对各种失效模式做出评价,再应用灰色关联决策的方法确定各失效模式的风险排序.

2.1 建立 O, S, D 的模糊语言术语集

每个模糊语言变量包括五种评价语言术语,即 O, S, D 分别包括:极低(R)、较低(L)、一般(M)、较高(H)、很高(VH)这五种评价语言术语.各种模糊语言术语的含义见表 1,与传统 FMEA 中 O, S, D 取值的关系准则见表 2.

表 1 各种评价语言术语的含义

Tab.1 Meaning of various evaluation linguistic terms

语言术语	发生率	严重度	难检度
R	不太可能发生	不会对施工项目产生任何影响	失效不被检出的概率很低
L	失效相对很少发生	施工项目运作正常,只对某些特性产生微弱影响	失效不被检出的概率较低
M	失效偶尔发生不被检出	施工项目能运作,但是某些重要特性受到影响,业主有些不满意	失效偶尔不被检出
H	经常发生	施工项目运作出现较大问题,基本丧失运作能力,业主不满意	失效不被检出的概率较高
VH	失效发生	施工项目运作失效,危及个人安全或违反法律法规,严重度很高	失效不被检出的概率极高

表 2 FMEA 评价准则

Tab.2 Evaluation criteria of FMEA

评价语言	发生率	严重度	难检度
R	$\leq 1:20\ 000$	1	$\leq 1:20\ 000$
L	$> 1:20\ 000 \sim 1:10\ 000$	2/3	$> 1:20\ 000 \sim 1:15\ 000$
M	$> 1:10\ 000 \sim 1:100$	4/5/6	$> 1:15\ 000 \sim 1:800$
H	$> 1:100 \sim 1:20$	7/8	$> 1:800 \sim 1:40$
VH	$> 1:20$	9/10	$> 1:40$

2.2 确定模糊语言术语对应的模糊数

本文采用三角模糊数对模糊语言术语进行量化处理.三角模糊数可以表示为 $A = (a, b, c)$,其隶属函数^[13]是

$$u_A(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a), & a < x \leq b \\ (c-x)/(c-a), & b < x \leq c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

通过德尔菲法,借助专家的知识 and 经验来确定模糊语言术语对应的三角模糊数.假设有 n 个专家,第 i 个专家的能力为 β_i ,该专家对失效模式某一变量

的模糊评价术语为 x_i ,用三角模糊数的形式表示为 $x_i = (a_i, b_i, c_i)$,则按照专家意见,该变量的模糊语言术语对应的三角模糊数可以根据下式汇总得到:

$$a = \sum_{i=1}^n \beta_i a_i, \quad b = \sum_{i=1}^n \beta_i b_i, \quad c = \sum_{i=1}^n \beta_i c_i \quad (2)$$

式中: $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1, \beta_i \in (0, 1)$.

2.3 模糊数的非模糊化

在模糊环境下,模糊数的非模糊化是应用灰色关联理论计算的基础.国内外有许多学者对非模糊化算法进行了深入的研究.本文采用如下公式^[14]:

$$A(x) = \frac{a}{2(1+N)} + \frac{b(N+2NM+M)}{2(1+N)(1+M)} + \frac{c}{2(1+M)} \quad (3)$$

式中: M, N 的值根据 a, c 与 b 的偏离程度来确定, 分别表示 b 的可能性大小是 c 的 M 倍, 是 a 的 N 倍.

以失效模式的 O 为例, 选择 5 位专家进行评价,

评价结果以三角模糊数的形式表示(见表 3), 将各专家的评价意见按照式(2)汇总, 可以得到 O 的三角模糊数. 利用式(3)将表 3 中的三角模糊数转化为清晰数, 见表 4. 采用同样的方法, 可以得到 S 和 D 的模糊语言术语集以及对应的清晰数.

表 3 发生率的模糊语言术语对应的三角模糊数

Tab.3 Occurrence of fuzzy linguistic terms corresponds to triangular fuzzy number

专家	β	模糊语言术语				
		R	L	M	H	VH
1	0.3	(0, 1.3, 2.8)	(1.6, 3.3, 4.8)	(3.8, 5.8, 7.8)	(6.8, 8.3, 9.8)	(8.8, 10, 10)
2	0.2	(0, 1.3, 2.6)	(1.2, 3.0, 4.6)	(3.3, 5.3, 7.6)	(5.8, 7.8, 9.8)	(8.3, 10, 10)
3	0.2	(0, 1.3, 2.3)	(1.4, 3.5, 5.1)	(3.5, 5.5, 8.2)	(6.6, 8.6, 9.8)	(8.5, 10, 10)
4	0.2	(0, 1.3, 3.0)	(1.5, 3.4, 5.1)	(3.6, 5.6, 8.0)	(7.0, 8.5, 9.8)	(9.2, 10, 10)
5	0.1	(0, 1.3, 2.7)	(1.3, 3.3, 4.8)	(3.4, 5.6, 8.0)	(6.7, 7.9, 9.8)	(8.6, 10, 10)
总和	1.0	(0, 1.3, 2.7)	(1.4, 3.3, 4.9)	(3.6, 5.6, 7.9)	(6.6, 8.2, 9.8)	(8.7, 10, 10)

表 4 模糊语言术语的清晰数

Tab.4 Crisp number of fuzzy linguistic terms

语言术语	R	L	M	H	VH
清晰数	1.3	3.3	5.7	8.2	9.8

2.4 建立比较矩阵

假设某施工项目有 n 种失效模式, 分别记为 $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n$, 其中 x_j 为第 j 种失效模式. 由于每种失效模式均有 O, S, D 三个变量, 因此反映第 j 种失效模式的数据列可表示为 $x_j = \{x_j(1), x_j(2), x_j(3)\}$, 其中 $x_j(t) (t=1, 2, 3)$ 表示风险分析小组对三个变量的评价, 其代表的数值通过非模糊化公式(3)计算得到. 按照上述方法, 可以得到反映 n 种失效模式比较矩阵^[15]:

$$\{x_j(t)\} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & x_1(3) \\ x_2(1) & x_2(2) & x_2(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & x_n(3) \end{bmatrix}$$

2.5 建立参考矩阵

失效模式的风险排序是相对于一定的参考基准而言的, 从施工项目可靠性的角度考虑, 应选择失效模式各变量的最优或最差值作为参考基准. 本文选择最差值作为参考基准建立参考矩阵, 即每一种失效模式的数据列均可表示为 $x_0 = \{x_0(1), x_0(2), x_0(3)\}$, 其中 $x_0(t) (t=1, 2, 3)$ 表示风险分析小组对 S, O, D 这三个变量的评价, 且 $x_0(t) = 10$

$$\{x_0(t)\} = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 10 & 10 & 10 \end{bmatrix}$$

2.6 计算灰色关联系数

根据灰色关联理论, 由下式可以计算出失效模式各变量与参考基准的关联系数:

$$\xi(x_0(t), X_j(t)) = \frac{\min_j \min_t |x_0(t) - x_j(t)| + \zeta \frac{\max_j \max_i |x_0(t) - x_j(t)|}{\zeta \max_j \max_i |x_0(t) - x_j(t)|}}{|x_0(t) - x_j(t)|} \rightarrow \quad (4)$$

式中: ζ 为分辨系数, $\zeta \in (0, 1)$.

2.7 计算灰色关联度

由于在衡量失效模式的风险排序时各变量的影响程度不同, 因此, 设失效模式三个变量指标间的权重分别为 λ_t , 则第 j 种失效模式与参考基准的关联度可由下式得到:

$$\gamma(x_0, x_j) = \sum_{t=1}^3 \lambda_t \{ \xi(x_0(t), X_j(t)) \} \quad (5)$$

式中: $\sum_{t=1}^3 \lambda_t = 1$, λ_t 由专家根据实际情况事先确定.

2.8 排序

按照各失效模式关联度从大到小进行排序, 确定风险顺序, 有针对性地制定改进措施.

3 算例与分析

假设施工企业面临招标项目拟定投标策略, 需进行投标策略风险分析.

招标人发布的招标文件有如下主要条款: 此项工程采用综合评分法评标; 合同拟采用固定总价合同(除合同约定的调价内容外, 不得调整总价及单价); 严格按照承包商所报的分部分项工程单价进行

结算,不接受任何原因导致的部分项工程单价调整;招标人只接受针对招标人提供清单中所列措施项目的费用报价和未来价款结算申请;招标文件要求目标工期短于工期定额 20%以上,而且合同条款中工期提前或拖延所导致的奖励和罚款额度较高。

3.1 找出重点失效分析对象并确定失效模式

关于价格调整:严格按照中标承包商投标所报的部分项工程单价进行结算,不接受任何原因导致的部分项工程单价调整.对于这一风险,本文将此项失效模式名称确定为实际工程单价出现调整。

关于措施费用:招标人只接受针对招标人提供清单中所列措施项目的费用报价和未来价款结算申请.投标人可能会面临招标人所列措施项目漏项,进而导致投标人报价过低的风险.将此项失效模式名称确定为措施项目漏项。

关于工期:招标文件要求目标工期短于工期定额 20%以上,而且合同条款中工期提前或拖延所导致的奖励和罚款额度较高.投标人会面临赶工期失败的风险.将此项失效模式名称确定为工期延误。

关于合同形式:采用固定总价合同(除合同约定的调价内容外,不得调整总价及单价).固定总价合同对于投标人来说风险很大.将此项失效模式确定为固定总价偏低。

关于质量标准:项目质量要符合国家相关验收规范要求.将此项失效模式确定为不符合验收规范。

3.2 确定风险排序

步骤一 确定模糊语言术语集和模糊数.为了简化计算, S, D, O 采用相同的模糊语言术语集及其对应的模糊数(见表 3)。

步骤二 对各失效模式进行评价.通过对合同履行过程进行分析后,综合各方面的意见确定其潜在的各种失效模式,并根据专家小组建立的模糊语言术语集,对各种失效模式进行评价,评价结果如表 5 所示。

表 5 算例中的模糊语言术语的清晰数

Tab.5 Crisp number of fuzzy linguistic terms in a numerical example

潜在失效模式	S	O	D
实际工程单价出现调整	H	H	R
措施项目漏项	H	M	R
工期延误	H	H	L
固定总价偏低	H	H	M
不符合验收规范	VH	L	H

步骤三 确定风险排序.根据对各失效模式的评价,按照表 4 中模糊语言术语对应的清晰数,建立如下比较矩阵:

$$\{x_j(t)\} = \begin{bmatrix} 8.2 & 8.2 & 1.3 \\ 8.2 & 5.7 & 1.3 \\ 8.2 & 8.2 & 3.3 \\ 8.2 & 8.2 & 5.7 \\ 9.8 & 3.3 & 8.2 \end{bmatrix}$$

选择最差值作为参考基准建立如下参考矩阵:

$$\{x_0(t)\} = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \end{bmatrix}$$

取 $\zeta=0.5$,根据公式(4)计算失效模式各变量与参考基准间的关联系数,并得到如下灰色关联矩阵:

$$\{\xi(x_0(t), x_j(t))\} = \begin{bmatrix} 0.740 & 0.740 & 0.349 \\ 0.740 & 0.526 & 0.349 \\ 0.740 & 0.740 & 0.412 \\ 0.740 & 0.740 & 0.526 \\ 1.000 & 0.412 & 0.740 \end{bmatrix}$$

由专家确定的失效模式各变量的系数分别为: $\lambda_1=0.4, \lambda_2=0.4, \lambda_3=0.2$,则根据式(5)计算得到各失效模式相对于参考基准的关联度,并将各失效模式按关联度由大到小进行排序,见表 6。

表 6 失效模式的风险排序(引入改进 FMEA)

Tab.6 Risk ranking of failure modes (introduction of improved FMEA)

失效模式	关联度	排序
不符合验收规范	0.712 8	1
措施项目漏项	0.576 2	2
固定总价偏低	0.549 2	3
工期延误	0.526 4	4
实际工程单价出现调整	0.513 8	5

表 7 给出了传统 FMEA 方法应用时的风险排序结果,可供比较分析。

表 7 失效模式的风险排序(传统 FMEA)

Tab.7 Risk ranking of failure modes (traditional FMEA)

潜在失效模式	S	O	D	RPN	排序
固定总价偏低	8	8	5	320	1
工期延误	9	7	3	189	2
不符合验收规范	10	2	8	160	3
实际工程单价出现调整	7	8	2	112	4
措施项目漏项	7	6	2	84	5

3.3 对风险排序进行分析及应对措施

3.3.1 关于合同形式及价格调整

通过表 6 的排序可以看出:固定总价偏低的关联度较高,是需重点进行预防控制的对象.由于固定总价合同需要严格按照承包商所报的部分项工程

单价进行结算,不接受任何原因导致的部分分项工程单价调整,因此承包商需要承担的由工程量增加导致成本增加的风险是很大的.而实际工程单价调整的排序为 5,关联度最低.综合分析,应将风险费率适当上调,而无需将过多精力投入到防止工程单价出现调整的情况中去.

3.3.2 关于工期及质量标准

不符合验收规范的关联度为 1,工期延误的关联度为 4.因此,施工企业 A 应在提高工程质量标准方面多下工夫,严格按照验收规范进行施工作业.由于招标人对工期要求较高,同时提出的奖惩措施力度很大.这对于投标人来说是风险与机遇并存,需投入较多资源,善于合理调度分配.这将导致管理费用上升,原管理费率应适当上调.此外针对可能造成工程延误的原因,可从以下几方面来加以改进:选配项目班子,明确责任目标;编制施工进度计划;细化实施计划,合理配置资源;利用合同措施控制施工工期;统一组织部署,搞好施工协调工作;强化计划管理.

3.3.3 关于措施项目

措施项目漏项的关联度为 2,施工企业应提高重视,仔细研究招标文件,若确实属于漏缺项,可按变更形式申报相关漏项费用,尽量避免措施项目漏项的发生,并可根据具体情况适当调整组织措施费率来降低风险.

4 结论

本文借助 FMEA 方法所具有的事前风险预防的特点,将 FMEA 方法应用在投标策略的风险分析之中,有助于提升风险分析方法的认可和应用推广水平.本文研究发现:FMEA 不但能够很好地反映投标中可能存在的风险,还可以更加直观、具体地告知投标者风险的大小甚至可以进行比较各个风险,进而可以有针对性地对重点对象进行严密监控和及时调整,达到防患于未然的目的.

通过算例应用和比较可以看到,不符合验收规范的 S 和 D 均较高,其风险影响应该较高,但是由于其 O 偏低,在用传统 FMEA 方法进行分析时其排名为 3.在引入改进 FMEA 方法后,由于综合考虑了 S, O, D 三个变量对失效模式的影响,因此,该失效模式的风险排序提升为 1.可见,引入改进 FMEA 方法,将能够综合比较选择风险作用较大的潜在失效模式作为改进对象,提高风险判断的准确性,对于投标策略的制定具有更有效的支持.

参考文献:

- [1] 吕军.湖南西城建设公司投标阶段风险分析与控制研究[D].长沙:湖南大学,2011.
LÜ Jun. Risk analysis and control of Hunan Xicheng Construction Company bidding phase[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [2] Simmons L F. Mangement-critical path method (CPM) and PERT simulated with process mode[C]// Proc of Simulation Conference. New York:[s. n.], 2002:24-86.
- [3] Douglas R S, Tsirbas A, Gordon M. Development of criteria for evaluating clinical response in thyroid eye disease using a modified Delphi technique[J]. *Archi Ophthalmology*, 2009, 127(9):1155.
- [4] XU Na, WANG Jianping. Synthetic and integrated analysis project risk based on VERT [C] // International Project Management Association. Shanghai:[s. n.], 2006:84-86.
- [5] 毛禹忠,张迪.蒙特卡罗法与计算机模拟不编程序决策支持系统[J]. *技术经济与管理研究*, 2000(2):61.
MAO Yuzhong, ZHANG Di. The monte carlo method and the computer simulation program decision support system [J]. *Technoeconomics & Management Research*, 2000(2):61.
- [6] Szeg G. Measures of risk[J]. *Journal of Banking & Finance*, 2002, 26(7):1253.
- [7] 孙建先,李江.安全检查表的数据处理方法[J]. *中小企业管理与科技*, 2009, 22(8):45.
SUN Jianxian, LI Jiang. Safety check list of data processing method [J]. *Management & Technology of SME*, 2009, 22(8):45.
- [8] 李佳欣.工程项目招投标风险研究[D].北京:北京邮电大学, 2007.
LI Jiaxin. Research on bidding risk of engineering project[D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications, 2007.
- [9] 陈超,刘国买.工程项目投标风险的模糊评估方法[J]. *浙江万里学院学报*, 2006, 19(5):4.
CHEN Chao, LIU Guomai. Fuzzy evaluation method of bidding risks in engineering project [J]. *Journal of Zhejiang Wanli University*, 2006, 19(5):4.
- [10] 刘志建.施工企业工程项目投标风险管理研究[D].成都:西南交通大学, 2007.
LIU Zhijian. Research on bidding risk management of construction enterprise's engineering project [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [11] Royer P S. Risk managemet: The undiscovered dimension of project management[J]. *PM Network*, 2000, 14:31.
- [12] 门峰,姬升启.基于模糊集与灰色关联的改进 FMEA 方法[J]. *工业工程与管理*, 2008, 13(2):55.
MEN Feng, JI Shengqi. An improved FMEA based on fuzzy set theory and grey relational theory [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2008, 13(2):55.
- [13] LIU Huchen, YOU Jianxin, YOU Xiaoyue, et al. A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 28:579.
- [14] 肖钰,李华.基于三角模糊数的判断矩阵的改进及其应用[J]. *模糊系统与数学*, 2003, 17(2):59.
XIAO Yu, LI Hua. Improvement on judgement matrix based on triangle fuzzy number [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2003, 17(2):59.
- [15] LIU Huchen, YOU Jianxin, FAN Xiaojun, et al. Failure mode and effects analysis using D numbers and grey relational projection method [J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(10):4670.