

基于熵权-模糊综合评价的配套装备订购合同质量监督风险量化研究

叶卫民, 孙小淋*, 杨猛
海军工程大学, 湖北武汉, 中国
*通讯作者

【摘要】 配套装备的质量稳定性直接影响主装备的作战效能。针对配套装备订购合同质量监督过程中存在的多源不确定性风险, 本文构建了基于熵权法与模糊综合评价的风险量化模型。首先, 从生产准备、供应商、生产过程、检验验收四个维度构建了包含4个一级指标、17个二级指标的风险评价指标体系; 其次, 采用熵权法客观确定指标权重, 利用历史监督数据的离散程度反映各指标的信息量; 再次, 运用模糊综合评价法计算综合风险值, 实现风险等级判定; 最后, 以某型配套装备订购合同为案例进行实证分析。研究表明, 构建的量化模型可科学度量配套装备订购合同的质量监督风险, 为优化配套装备质量监督工作提供科学决策工具。

【关键词】 配套装备; 订购合同; 质量监督; 风险量化; 熵权法; 模糊综合评价

1. 引言

配套装备作为武器装备体系的重要支撑部分, 其质量是否稳定, 直接关系到主装备作战效能的发挥以及服役寿命的长短。近年来, 随着我军武器装备建设步伐持续加快, 配套装备的订购数量显著增长。与此同时, 供应商分布趋于分散、所执行的技术标准种类繁多、交付时限要求愈发紧张, 这些新变化使得合同履行过程中不可预见的因素明显增多, 给质量监督工作带来了不小的压力。实践中发现, 部分配套装备订购合同的供应商在生产准备阶段存在明显短板, 有些关键工艺环节未能严格达标, 质量检验流程也有所简化, 这些问题如果不加以及时纠正, 会给主合同的履行埋下质量隐患。而国防采购政策的变动、原材料市场价格的起伏等外部环境因素, 更进一步增添了质量监督工作的复杂程度。基于上述背景, 构建一套适应配套装备订购合同质量监督实际需求的风险量化方法, 既具有理论上的探索价值, 也能为一线监督工作提供实用的分析工具。

关于装备采购合同风险管理, 已有学者围绕合同实施过程中的风险判别与评估开展了较为系统的研究。杨文俊等[1]借助风险矩阵和层次分析法对合同履约风险加以评估, 从严重性和可能性两个层面设置标度, 并通过乘积运算获得综合权重; 李琦等[2]面向航

天装备合同监管的具体需要, 建立了一个基于灰色关联分析的风险评价模型, 首先运用层次分析法确定各项权重, 再引入灰色关联度来完成风险大小的量化计算; 胡玉清等[3]

则采用HHM模型构建风险场景识别方法, 在其中加入可控度这一属性, 进而利用三维矩阵和Borda序值法对各风险因素的重要程度进行排序。从现有研究来看, 风险量化手段多偏重于层次分析法这类主观赋权方式, 对历史监督数据中天然蕴含的客观信息未能充分加以利用, 并且大多数研究的着眼点放在主装备采购合同上, 专门针对配套装备订购合同的量化分析成果还比较有限。

就风险量化具体方法而言, 熵权法作为一项客观赋权技术, 借助数据本身的离散程度来衡量其所含信息量的大小, 能够较好地排除主观判断带来的偏差, 目前在多个工程评价领域已有成功应用。霍晓霞等[4]将其应用于仓储物流REITs融资模式的风险因素研究中, 利用熵权法对各风险指标进行客观赋权, 有效识别出影响融资模式运行的关键风险因子, 显示出熵权法在风险因素重要性排序中的客观性和可操作性。模糊综合评价法则因其处理等级边界模糊性的能力, 被广泛用于多指标综合评价场景。高国柱等[5]在大型对流层飞艇项目风险评价中, 基于已构建的指标体系, 借助模糊综合运算推算项目风险发生的概率、后果的严重程度以及综合风险系数, 最终实现了对项目风险等级的准确判定, 充分表明模糊综合评价法在应对定性指标和不确定性信息时的优势。将熵权法和模糊综合评价法结合起来, 已有一些研究将其应用于工程质量评价、安全风险评估等领域[6-10], 实践证明这一组合思路是可行且有效的。

综合以上分析,已有成果为开展合同质量监督风险量化提供了有益的方法参考,但针对配套装备订购合同这一特定对象,将熵权法与模糊综合评价法加以融合的研究仍不多见。本文拟以配套装备订购合同质量监督为切入点,尝试采用熵权法结合模糊综合评价法的方式搭建风险量化模型,具体围绕指标体系构建、权重计算、模糊合成运算以及等级判定四个主要环节加以展开,形成一套完整的评价流程,并通过实际案例对模型的可用性进行验证,以期军队采购部门和合同监管机构提供具有一定参考价值的决策依据。

2. 配套装备订购合同质量监督风险评价指标设计

表 1. 配套装备订购合同质量监督风险评价指标体系

一级指标	二级指标	指标含义
生产准备风险	A11 人员配置有效性	生产及检验人员的资质、数量与技能是否满足合同要求
	A12 工装设备符合性	工装夹具、生产设备是否处于完好状态且精度达标
	A13 生产文件完备性	工艺规程、检验规程等技术文件是否齐全有效
	A14 物料与场地准备充分性	原材料、元器件库存及生产场地条件是否满足开工要求
供应商风险	A21 供应商质量水平	关键供应商的资质、历史供货质量及质量体系运行情况
	A22 外购(协)件质量水平	外购件入厂检验的合格率及质量稳定性
	A23 供应商管控能力	承制方对供应商的遴选、评价、监督机制是否有效
生产过程风险	A31 人员操作合规性	操作人员是否按工艺文件作业
	A32 设备维护能力	生产设备的日常保养、定期检修及故障响应能力
	A33 过程控制能力	关键工序的质量控制点设置及监控有效性
	A34 工艺文件管理能力	工艺文件的分发、变更、回收是否规范
	A35 环境控制能力	生产现场温度、湿度、清洁度等环境条件是否符合要求
	A36 在制品保管制度落实	在制品的标识、搬运、储存防护是否到位
	A37 不合格品管理能力	不合格品的识别、隔离、评审及处置流程是否规范
检验验收风险	A41 计量器具和试验设备管理水平	量具、测试设备的校准状态及台账管理是否规范
	A42 检验方法合理性	检验项目设置、抽样方案及检测方法是否符合标准
	A43 检验制度落实有效性	入厂检验、过程检验、最终检验的执行记录及不合格处置情况

3. 基于熵权-模糊综合评价的风险量化模型构建

3.1 风险等级划分与数据采集

参考装备采购与合同履行领域现行的标

风险评价指标体系的科学性将直接影响到量化结果的可靠性。本文在构建指标体系时主要遵循以下原则:一是覆盖配套装备订购合同的全寿命周期,从生产准备到检验验收的各个环节均设置对应指标;二是指标数据应当便于获取,优先从质量监督档案、检验报告、现场巡检记录等已有资料中提取;三是指标之间尽量避免强关联,保持相对独立。

依据上述原则,同时参考已有相关研究的成果,本文将配套装备订购合同质量监督风险划分为四个一级维度:生产准备风险、供应商风险、生产过程风险、检验验收风险。每个一级维度下设置若干二级指标,共计 17 个指标。各指标的含义如表 1 所示。

准规范,并结合实际管理经验,本文将配套装备订购合同质量监督风险划分为 5 个等级,每个等级对应的风险值区间、定性描述以及量化赋值(取区间中值)均在表 2 中予以列示。

表 2. 风险等级划分标准

风险等级	风险值区间	风险定性特征	量化赋值
I 级(极低风险)	[0, 0.2)	风险因素单一且影响极小,质量偏差在允许范围内	0.1
II 级(低风险)	[0.2, 0.4)	风险因素影响范围有限,仅作用于非关键质量特性	0.3
III 级(中等风险)	[0.4, 0.6)	存在多项风险因素,可能影响关键质量特性稳定性	0.5
IV 级(高风险)	[0.6, 0.8)	风险因素交叉耦合,可能导致产品关键性能偏离设计指标	0.7
V 级(极高风险)	[0.8, 1.0]	多项核心风险因素集中爆发,易引发重大质量事故	0.9

模型计算涉及到的原始数据,按其来源可分为两类。一部分指标存在客观记录可供查阅,例如工装设备符合性这一项,直接从设备台账和校准记录中就能提取到相应数据,过程控制能力也可依据质量控制图或巡检记录加以量化。另一部分指标则缺少直接的量化记录,比较典型的是供应商管控能力,这类指标需要借助专家赋值法来处理。具体操作是邀请3到5名对该合同情况比较熟悉的质量监督人员,按照事先拟定的评分参考标准分别独立打分,最后取算术平均值作为该项得分。各指标评分值均需要经过极差标准化处理,统一转换为[0, 1]区间,分值越高代表风险越大。

3.2 基于熵权法的指标权重确定

熵权法的基本逻辑是利用指标数据本身的离散程度来度量信息量,如果在各个样本之间某个指标的取值差异比较明显,说明该指标携带的信息较为丰富,因而应当赋予更高的权重。这一方法可降低专家打分等主观因素对权重结果的科学性的影响。

熵权法计算步骤如下。设有 m 个评价样本 ($m = 10$), n 个评价指标 ($n = 17$), 原始数据矩阵为 $X = (x_{ij})_{10 \times 17}$, 其中 x_{ij} 表示第 i 个样本在第 j 个指标上的评分值,该值已经过标准化处理,位于 $[0, 1]$ 区间,且为正向指标(分值越高风险越大)。

第一步,计算指标比重。第 j 个指标下第 i 个样本的比重为:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (1)$$

第二步,计算熵值。第 j 个指标的熵值为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (2)$$

其中 $0 \leq e_j \leq 1$, 且规定当 $p_{ij} = 0$ 时, $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。

第三步,计算差异系数与权重。差异系数 $g_j = 1 - e_j$ 反映指标的信息量,差异系数越大则权重越高。第 j 个指标的权重为:

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (3)$$

3.3 基于模糊综合评价的风险量化

熵权法计算得出的权重,反映了各指标在整体风险评价中的重要程度,但权重本身并不足以直接判定待评合同归属于哪一个风险等级。而模糊综合评价法的作用就在于此,它将待评合同在各指标上的实际取值,转换为对各个风险等级的隶属程度,再结合已求得的权重进行合成,最终输出一个综合风险值,并依

据该值落入的风险值区间给出明确的等级判定结果。

实现这一转换的关键在于隶属度函数的设定。本文在综合考虑各风险等级边界过渡的平滑性和判别灵敏度后,采用三角形与梯形相结合的函数形式进行构建。

设指标评分值为 $x \in [0, 1]$, 五个风险等级对应的标准区间中心值为 $c_k = \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9\}$, 区间边界为 $d_k = \{0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\}$ ($k = 0, 1, \dots, 5$)。

第 k 个等级 ($k = 1, \dots, 5$) 的隶属度函数为:

$$r_k(x) = \begin{cases} 0, & x \leq d_{k-1} \text{ 或 } x \geq d_{k+1} \\ \frac{x-d_{k-1}}{c_k-d_{k-1}}, & d_{k-1} < x \leq c_k \\ \frac{d_{k+1}-x}{d_{k+1}-c_k}, & c_k < x < d_{k+1} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $d_0 = 0$ 。对于 $k=1$, 仅保留右半支(从 d_0 到 d_2); 对于 $k=5$, 仅保留左半支(从 d_4 到 d_5)。该函数的设计原则是:评分值越靠近某个等级的典型区间中心,对该等级的隶属度越高;越靠近相邻等级的边界,隶属度在两个等级之间平滑过渡,避免因边界划分过刚而导致评价结果不稳定。

得到评判矩阵后,需要将其与各指标的权重向量进行合成。本文采用加权平均型模糊合成算子 $M(\cdot, \oplus)$, 该算子的特点是兼顾所有指标的贡献,不会因某一指标的隶属度过低而完全忽略其他信息,适合用于多指标综合评价的场景。合成运算如式(5)所示,其中 b_k 表示待评合同整体隶属于第 k 个风险等级的程度。

$$B = W \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_5) \quad (5)$$

综合评价向量 B 给出了配套装备订购合同对各风险等级的隶属度分布,但尚未形成一个可直接比较的单一数值。为便于直观判定,采用表2中各区间的中值作为各等级的量化赋值,记为 $S = (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9)$ 。

综合风险值 F 即为 B 与 S 的加权和:

$$F = \sum_{k=1}^5 b_k \cdot s_k \quad (6)$$

计算出 F 值后,对照表2中的风险值区间即可判定该合同的质量监督风险等级。此外,最大隶属度原则可作为辅助验证手段加以使用,若 $\max(b_k)$ 对应的等级与 F 落入的区

间所对应的等级一致,则说明评价结果具有较好的内部一致性;若出现不一致,应以综合风险值 F 的区间判定结果为准,同时有必要核查原始数据采集过程中是否存在偏差。

4.实证分析

4.1 历史样本数据与熵权法权重计算

本文选取不同装备承制单位近三年内完成的 10 个同类型配套装备订购合同的质量监

督数据作为历史样本(编号 C01~C10),各指标评分值已标准化至 $[0, 1]$ 区间。根据熵权法计算公式(1)-(3),得到 17 个二级指标的权重,如表 3 所示。各一级指标权重由其下属二级指标权重求和得到:生产准备风险 $W_{A1}=0.198$, 供应商风险 $W_{A2}=0.163$, 生产过程风险 $W_{A3}=0.360$, 检验验收风险 $W_{A4}=0.159$ 。

表 3.二级指标权重

指标	A11	A12	A13	A14	A21	A22	A23	A31	A32
权重	0.052	0.048	0.045	0.058	0.053	0.057	0.069	0.072	0.065
指标	A33	A34	A35	A36	A37	A41	A42	A43	
权重	0.084	0.049	0.041	0.038	0.067	0.074	0.066	0.062	

4.2 待评合同数据采集

以某型号飞控系统的订购合同作为分析案例。该合同为一轮配套,涉及某型飞行控制伺服电动缸等多个二轮配套装备订购合同,合同金额约 xxx 万元,交付周期为 10 个月。前期质量监督中发现该供应商在生产过程控制

方面存在一定不足,如关键工序监控记录不完整、个别操作人员未严格按工艺文件作业等。

各指标评分值来源于质量监督档案、检验报告及 5 位质量监督专家的独立打分(取平均值),已标准化至 $[0, 1]$ 区间,在表 4 中列示。

表 4.待评合同各指标评分值

指标	A11	A12	A13	A14	A21	A22	A23	A31	A32
评分	0.38	0.3	0.21	0.34	0.26	0.3	0.42	0.48	0.4
指标	A33	A34	A35	A36	A37	A41	A42	A43	
评分	0.52	0.28	0.24	0.18	0.36	0.44	0.38	0.3	

4.3 综合风险值计算

第一步,构建模糊评判矩阵。

采用式(4)所示的三角形与梯形隶属度

函数,将表 4 中各指标评分值代入,得到每个指标对五个风险等级的隶属度向量。所有向量的计算结果汇总于表 5。

表 5.模糊评判矩阵

指标	I级	II级	III级	IV级	V级
A11	0.00	0.10	0.90	0.00	0.00
A12	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00
A13	0.00	0.95	0.05	0.00	0.00
A14	0.00	0.30	0.70	0.00	0.00
A21	0.00	0.70	0.30	0.00	0.00
A22	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00
A23	0.00	0.00	0.90	0.10	0.00
A31	0.00	0.00	0.60	0.40	0.00
A32	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
A33	0.00	0.00	0.40	0.60	0.00
A34	0.00	0.60	0.40	0.00	0.00
A35	0.00	0.80	0.20	0.00	0.00
A36	0.20	0.80	0.00	0.00	0.00
A37	0.00	0.20	0.80	0.00	0.00
A41	0.00	0.00	0.80	0.20	0.00
A42	0.00	0.10	0.90	0.00	0.00
A43	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00

第二步,合成综合评价向量。

将表 3 的权重向量 W 与表 5 的评判矩阵 R 按式(5)进行加权合成,得到综合评价向量:

$$B=W \cdot R=(0.008, 0.299, 0.593, 0.101, 0.000)$$

第三步,计算综合风险值。

将各风险等级量化赋值 $S=(0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9)$ 与 B 按式(6)

加权求和:

$$F=0.008 \times 0.1 + 0.299 \times 0.3 + 0.593 \times 0.5 + 0.101 \times 0.7 \\ = 0.458$$

4.4 结果分析与讨论

综合风险值 $F=0.458$, 落在Ⅲ级(中等风险)的区间 $[0.4, 0.6)$ 内。综合评价向量显示Ⅲ级隶属度最高(0.593), 与区间判定结果一致, 表明该配套装备订购合同的质量监督风险处于中等水平。

从B的分布来看, 该合同虽被判定为中等风险, 但Ⅱ级的隶属度接近0.3, Ⅳ级也超过0.1, 表明风险处于中等区间的中下部, 尚未明显向高风险偏移。将模型判定结果与前期监督记录对照: 监督中发现的“关键工序监控记录不完整”“个别操作人员未按工艺文件作业”等问题, 虽未造成重大质量缺陷, 但已构成质量隐患, 与中等风险的定性特征(“存在多项风险因素, 可能影响关键质量特性稳定性”)吻合。模型识别出的关键高风险指标

(A33 过程控制能力 0.52、A31 人员操作合规性 0.48、A41 计量器具管理水平 0.44)恰好对应了监督中的薄弱环节。经深入调查发现, 附件技术规格书中精度要求为“ $\leq 0.5^\circ$ ”, 但未明确测试方法和环境条件; 乙方测试用的转台校准证书已过期3个月; 现场操作人员未按SOP执行测试, 且无操作记录, 这在一定程度上验证了模型的有效性。针对关键高风险点, 可以采取加强关键节点过程参数过程波动控制等措施, 从而有效降低质量监督风险。

5. 结语

本文构建了熵权法与模糊综合评价相结合的风险量化模型, 并在配套装备订购合同质量监督场景中进行了实证验证。研究表明, 该模型能够有效识别关键风险点, 得出了与监督实际基本吻合的评价结果。后续可从三方面深入: 一是扩大样本数据量, 增强权重系数在统计上的可靠性; 二是可以考虑引入趋势分析方法, 跟踪同一合同不同阶段的风险变化; 三是探索将模型嵌入日常监督信息系统, 让风险

值计算和等级判定能够依托实时录入的数据自动完成, 增强对一线监管工作的支撑作用。

参考文献

- [1] 杨文俊, 谢力, 卢毅.基于风险矩阵-AHP的装备采购合同履行风险评估[J].舰船电子工程, 2025, 45(12): 151-154+224.
- [2] 李琦, 朱晓林, 蒲希, 等.基于灰色关联分析的航天装备合同履行风险评价及应用研究[J].质量与可靠性, 2024(04): 61-66.
- [3] 胡玉清, 刘丽珍, 周云.基于三维矩阵-Borda序值法的装备采购合同履行风险评估[J].项目管理技术, 2023, 21(07): 123-128.
- [4] 霍晓霞, 枚文远, 徐畅.基于熵权法的仓储物流REITs融资模式风险因素研究[J].价值工程, 2022, 41(35): 37-39.
- [5] 高国柱, 熊思进, 周萌.大型对流层飞艇项目风险的模糊综合评价[J].舰船电子工程, 2026, 46(03): 137-139+144.
- [6] 吕剑.基于熵权-模糊综合评价法的航道工程施工安全风险评价与应对策略研究[J].珠江水运, 2025(24): 63-67.
- [7] 董鹏, 马瑞, 苏伯威, 等.基于改进型模糊综合评价法的安防系统工程项目质量风险评价[J].兵工自动化, 2026, 45(2): 66-69.
- [8] 金建.基于层次分析法-熵权法的公路工程施工安全风险模糊综合评判方法[J].交通世界, 2025(24): 4-6+25.
- [9] 郭志杰, 马天星, 孙庆云.基于结构熵权-模糊综合评价的采油气作业区安全生产评价法的研究[J].化工安全与环境, 2026, 39(03): 46-50.
- [10] 严秋萍, 胡秀连, 江琪, 等.基于熵权-模糊综合评价法生鲜电商冷链物流配送风险评估[J].福建轻纺, 2025(02): 63-69.