

doi: 10.7690/bgzd.2025.03.013

基于数据驱动 Apriori-RMM 的装备采购合同履行风险评估

杨文俊^{1,2}, 谢力¹, 卢毅², 毛维平², 王敦宇³

(1. 海军工程大学管理工程与装备经济系, 武汉 430030; 2. 海军装备部, 北京 100036;
3. 四川九洲电器集团有限责任公司质量体系部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对装备采购合同履行风险评估过程受主观因素影响, 未能有效挖掘风险间与结果间的内在关联机理的问题, 提出一种基于数据驱动 Apriori-RMM 的风险评估方法。收集装备采购合同履行相关的历史数据形成合同风险数据库; 采用 Apriori 算法挖掘数据库中合同风险因素关联规则, 依据关联规则构建贝叶斯网络结构, 实现合同风险因素关系的可视化, 并依此开展风险分析及问题预防; 根据风险值计算方法, 对单个因素风险进行排序, 对合同整体风险进行评估。结果表明, 案例分析验证了模型的可行性和有效性。

关键词: 数据驱动; Apriori-RMM; 装备采购; 风险评估

中图分类号: E145.3 **文献标志码:** A

Data-driven Risk Assessment of Equipment Procurement Contract Fulfillment Based on Apriori-RMM

Yang Wenjun^{1,2}, Xie Li¹, Lu Yi², Mao Weiping², Wang Dunyu³

(1. Department of Economics and Management, Naval University of Engineering, Wuhan 430030, China;
2. Naval Equipment Department, Beijing 100036, China;

3. Quality System Department of Sichuan Jiuzhou Electric Appliance Group Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the risk assessment process of equipment procurement contract performance is affected by subjective factors, and the risk analysis method does not effectively explore the internal correlation mechanism between risks and results, a data-driven risk assessment method was proposed. Collect historical data related to the performance of equipment procurement contracts to form a contract risk database; The Apriori algorithm is used to mine the association rules of contract risk factors in the database, and the Bayesian network structure is constructed according to the association rules, so as to realize the visualization of the relationship between contract risk factors, and carry out risk analysis and problem prevention accordingly. This paper proposes a risk-based calculation method based on data-driven Apriori-RMM, which ranks the risk of a single factor and evaluates the overall risk of the contract. The results show that the case study verifies the feasibility and effectiveness of the model.

Keywords: data-driven; Apriori-RMM; equipment procurement; risk assessment

0 引言

武器装备生产是国防建设的重要一环, 装备采购合同能否有效履行, 采购的装备等能否按质按量按时交付, 对于军队战斗力生成至关重要。如何及时规避、有效遏制装备采购合同履行过程中各类风险问题发生, 确保合同有效履行, 意义重大。

风险评估是识别装备采购合同履行过程中的风险因素, 量化其对合同履行影响程度的重要方法。在装备采购合同风险评估方面, 胡玉清等^[1]针对技术密集、系统复杂、边研边产装备采购合同履行特点, 运用 3 维矩阵对合同风险因素进行分析, 用 Borda 序值法对风险因素重要性进行了排序; 张亚迪等^[2]运用模糊层次风险评估方法对合同订立阶段

风险进行评估, 实现了对订立阶段不同工作节点风险因素的定性与定量评估; 耿伟波等^[3]采用扎根理论的分析方法, 构建了“基于监管视角的合同履行风险要素及机理模型”, 探索了装备采购合同履行规律; 康欣林等^[4]采用数学指标法为基础、蒙特卡洛仿真为辅的风险评价方法, 运用 Excel 计算公式对装备维修项目风险进行评估。上述方法有 2 方面不足: 1) 风险评估过程受主观影响较大, 评估结果的可靠性不足、置信度不够; 2) 风险分析方法未有效挖掘风险间及其与结果间的内在关联机理, 不能为合同监管者开展后续风险防控工作提供针对性的指导。针对上述不足, 笔者采用一种基于数据驱动的风险评估方法, 评估过程依靠历史数据驱动算法计算, 消除主观因素影响, 提升了评估结果的客观性

收稿日期: 2024-07-05; 修回日期: 2024-08-09

第一作者: 杨文俊(1989—), 男, 四川人, 硕士。

和可信度;采用 Apriori 关联规则挖掘算法对评估合同各风险因素间的关联关系进行挖掘,计算关联强度,并根据关联规则构建贝叶斯网络结构,实现风险因素间关系的可视化,便于开展风险分析工作,可为合同监管者根据风险评估结果有针对性地开展监管和风险防范工作提供参考。

1 Apriori 算法与 RMM 的基本原理

1.1 Apriori 算法基本原理

Apriori 算法是一种经典的关联规则分析方法,它通过在项集中寻找频繁项集,能够从大量数据中抽取有价值的信息,在煤矿安全事故分析、民航机务风险分析、化工事故分析、童装质量检验等领域广泛应用^[5-8]。笔者利用 Apriori 算法挖掘评估合同各风险因素间的关联规则,分析诱发问题发生的深层机理。该算法涵盖支持度、置信度及提升度 3 个指标,各指标计算过程如下所示:

$$S(A \rightarrow B) = P(A \cup B) = |A \cup B| / |D|。 \quad (1)$$

式中: $S(A \rightarrow B)$ 为 A 因素对 B 因素的支持度; $P(A \cup B)$ 为 A, B 因素同时在 D 中出现的概率; $|A \cup B|$ 为 A, B 因素在事物集里同时出现的次数; $|D|$ 为数据集。

$$C(A \rightarrow B) = P(B|A) = |A \cup B| / |A|。 \quad (2)$$

式中: $C(A \rightarrow B)$ 为 A 对 B 的置信度; $P(B|A)$ 为 A 因素出现时 B 因素出现的概率; $|A|$ 为 A 因素在数据集里出现的次数。

$$L(A \rightarrow B) = P(B|A) / P(B)。 \quad (3)$$

式中: $L(A \rightarrow B)$ 为 A 对 B 的提升度,即 A, B 的相关性; $L=1$ 、 $L<1$ 、 $L>1$ 分别为 A 因素与 B 因素无关、负相关、正相关。

1.2 RMM 基本原理

风险矩阵法 (risk matrix method, RMM) 作为一种执行便捷、输出结果明确的风险评估方法,在各类风险评估得到广泛应用^[9-10],是依据装备采购合同风险的影响严重程度和发生的可能性进行判断绘制,通过乘积计算风险值并按大小进行风险排序的方法,计算表达式如下:

$$R_j = Q_j \times P_j。 \quad (4)$$

式中: R_j 为第 j 个风险因素的风险值; Q_j 为第 j 个风险因素的严重性; P_j 为第 j 个风险因素的可能性。

2 基于数据驱动的风险评估模型

在国家有关法规中明确,装备采购合同履行过程中的风险评估包括风险识别、风险分析和风险评估

价的全过程。笔者依此构建基于数据驱动的风险评估模型如图 1 所示,模型主要分 3 个步骤分别为:数据收集与预处理(风险识别)、基于 Apriori-贝叶斯网络的装备采购合同履行风险可视化分析和基于数据驱动 Apriori-RMM 的装备采购合同履行风险评估。

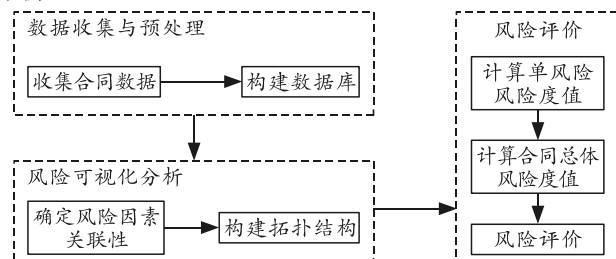


图 1 数据驱动装备采购合同履行风险评估流程模型

2.1 数据收集与预处理

数据梳理与预处理的流程如下:首先,基于规定的合同履行流程,梳理出一个包含研制、订购、试验、维修、保障等阶段的合同履行全流程风险清单,包含质量、进度和费用 3 类风险因素,这一步可为后续筛选合同履行风险因素提供方便;其次,根据评估合同特点从风险清单中摘选涉及的风险因素并根据实际情况进行补充调整,需要注意的是,不同承制单位的能力、规模、承制装备类型等情况是不同的,同一承制单位不同类型装备的研发、生产、维修等情况也不同,故无法对合同履行风险因素进行简单地罗列固化,需根据不同承制单位,不同类型产品实际情况进行分别梳理。将同一承制单位中标的相同或相似合同的风险因素进行甄选归纳,分别形成相应类型装备的合同风险因素数据库。风险数据可通过人工收集或采用文本挖掘技术获得,即通过合同文本检索、信息挖掘等方法提取,获取的来源主要为问题归零报告、合同监管纪实和相应合同文本等。在整个风险评估过程中,数据梳理与预处理是首要步骤,是开展后续评估工作的基础来源。装备采购合同履行风险数据收集示例如表 1 所示。

表 1 装备采购合同履行风险数据收集示例

合同数据	风险因素 Y				问题类型	严重程度
	A	B	C	$\dots$		
合同 X_1	a_{11}	$\dots$	$\dots$	a_{1n}	无	无
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
合同 X_i	a_{ij}	$\dots$	$\dots$	a_{in}	质量问题	严重

示例展示了 j 个装备采购合同的履行风险数据收集情况,其中 X_i 表示收集的第 i 项合同, A 、 B 、 C 分别代表该类合同的风险因素,该合同共有 j 个

风险因素， a_{ij} 为 0 或 1，当该风险因素发生时， a_{ij} 填 1，若未发生，则填 0，问题类型根据实际填质量、进度、费用问题或无，当多类问题一同发生时填写多类问题，严重程度根据问题严重性填一般、严重、重大或无。

2.2 基于 Apriori-贝叶斯网络的风险可视化分析

该步骤分 2 步：1) 利用 Apriori 算法关联装备采购合同履行风险数据中的各风险因素，计算关联强度；2) 基于关联规则构建装备采购合同履行风险可视化的贝叶斯网络^[11-13]，便于观察分析风险间因果关系，采取应对措施。详细操作步骤如下：首先，将梳理好的装备采购合同履行风险数据库导入 Apriori^[14-15]算法中，设置最小支持度和最小置信度，最小支持度和最小置信度的设定需要根据实际情况不断改变，直至规则符合研究要求，表 2 所示为关联规则示例。

表 2 关联规则示例

序号	前项	后项	风险因素		
			支持度	置信度	提升度
1	A	D	S_1	C_1	L_1
2	B	D	S_2	C_2	L_2
3	C	D	S_3	C_3	L_3
4	A	D	S_4	C_4	L_4
	B				
	C				
5	A	D	S_5	C_5	L_5
⋮	B				

由式(3)可知，若表 2 中提升度 L_1, L_2, L_3 均大于 1，关联规则的前后项呈正相关，则装备采购合同履行风险因素 A, B, C 与风险因素 D 呈正相关具有关联性，相应风险因素的贝叶斯网络结构可构建如图 2 所示。将 A, B, C 和 D 进行多因素关联规则，如表 2 中的规则 4 和 5，多因素关联规则便于分析多因素对装备采购合同履行风险的影响。若 $L_5 < 1$ ，那么风险因素 A, B 与 D 不具有正相关性，A 与 B 同时发生造成 D 发生的概率为 0，不发生的概率为 1。

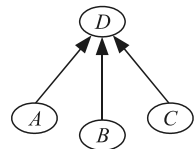


图 2 风险因素 D 的贝叶斯网络结构

2.3 基于 Apriori-RMM 的合同履行风险评价

该步骤分 2 步：1) 结合风险矩阵法与 Apriori 算法计算单个因素的风险值并进行排序；2) 按照算数平均法计算合同整体风险值，并依据设定的规则

对装备采购合同整体风险等级进行评估。具体步骤如下：对单个风险因素的严重性及可能性值分别计算，并根据装备采购合同风险矩阵计算单个风险的风险值，严重性值的计算方法为按设定的分值规则对合同数据中的问题分值进行累计，可能性值参照数据中该风险因素对发生问题的置信度计算方法进行计算：

$$R_j = C\{(Y_j = 1) \rightarrow (X = \text{occu}_{(a,b,c)})\} \sum_{i=1}^n \varphi(X_i | Y_j = 1)。(5)$$

式中： X_i 为第 i 个合同； Y_j 为第 j 个风险因素； n 为评估合同数量； $C\{(Y_j=1) \rightarrow (X=\text{occu}_{(a,b,c)})\}$ 为该类合同第 j 项风险因素对应的值为 1 时对合同发生 3 类问题的置信度； a 为质量问题； b 为进度问题； c 为费用问题； $\sum_{i=1}^n \varphi(X_i | Y_j = 1)$ 为合同在第 j 项风险因素的值为 1 时合同发生问题的严重性分值累积，一般问题记 1 分，严重问题记 3 分，重大问题记 5 分； R_j 为第 j 项风险因素的风险值，需注意的是，一项合同出现多类问题的情况下，质量、进度、费用的风险值需分开计算，分别记 R_{ja} 、 R_{jb} 、 R_{jc} 。

按照算数平均法来计算合同数据整体风险值，并依据设定的规则对风险等级进行评价，同类合同整体风险值计算方法如式(6)所示：

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi(x_i)}{n}。(6)$$

式中： $\varphi(x_i)$ 为第 i 个合同的风险严重性分值； R 为该类合同整体风险值。若 $R \in (0, 0.5]$ ，则风险等级为一般； $R \in (0.5, 1.5]$ ，风险等级为严重； $R \in (1.5, 5]$ ，则认为该类合同存在重大风险。质量、进度及费用风险值需分开计算，分别记 R_a 、 R_b 、 R_c 。

3 案例分析

笔者收集某装备承制单位某类装备订购合同数据，采用上述风险评估模型对该类合同履行过程风险进行评估。

1) 数据收集与预处理。从梳理好的风险因素清单中筛选出涉及该类装备订购合同相关风险因素，并根据实际情况进行筛选补充。经筛选补充，共获取风险因素 28 个，如表 3 所示。

2) 基于 Apriori-贝叶斯网络的风险可视化分析。收集好的数据为该承制单位已完成 20 份订购合同的相关数据，20 份合同中有需归零的质量问题 3 项，进度问题 5 项，费用问题 0 项，将合同数据导入 TBM SPSS Modeler18 软件，采用 Apriori 算法获

得关联规则，同时，根据关联规则数量设定最小支持度和置信度，根据调整，本文中最小支持度设置为 12%，置信度设置为 20%。在以上设置条件下，共存在 138 条关联规则。以“生产能力不足”风险

因素为例，在有效关联规则中，有 5 项风险因素可直接导致“生产能力不足”。如表 4 所示，多因素关联规则见表 6 和 7，所有规则的提升度均大于 1，具有正相关性。

表 3 某类装备订购合同履行风险因素

序号	风险因素	序号	风险因素	序号	风险因素	序号	风险因素
1	质量管理体系运行不正常	8	设计文件管理不当	15	技术状态控制不严	22	工艺设计存在问题
2	人员缺乏培训	9	关键工序“三定”未落实	16	设备老化或故障	23	计量、试验设备管理不规范
3	外购/协件质量不合格	10	软件出入库管理不严	17	特殊过程未按规定确认	24	不合格品控制不严
4	批次管理不严	11	质量意识欠缺	18	人员资质不达标	25	环境控制不达标
5	质量问题未归零	12	存储、运输不当	19	资源分配不合理	26	资金短缺
6	生产能力不足	13	外购/协配套滞后	20	保障条件不足	27	合同约定周期/价格不合理
7	组织、管理、协调缺位	14	预算编制不合理	21	外购/协件价格变动	28	成本控制不严

表 4 某类装备订购合同履行生产能力不足风险因素关联规则

序号	关联规则	指标		
		支持度	置信度	提升度
1	保障条件不足→生产能力不足	0.190	1.000	4.000
2	设备老化或故障→生产能力不足	0.238	1.000	4.000
3	资源分配不合理→生产能力不足	0.238	0.600	2.400
4	资金短缺→生产能力不足	0.286	0.667	2.668
5	组织、管理、协调缺位→生产能力不足	0.333	0.429	1.716
6	{资金短缺, 保障条件不足}→生产能力不足	0.143	1.000	4.000
7	{组织、管理、协调缺位, 资金短缺}→生产能力不足	0.195	0.500	2.000

虽然 Apriori 算法能构建风险因素间的相互关联性，并计算出风险关联的强弱程度，但它会忽略掉风险因素间的指向性原则，存在将后项风险因素关联为前项或前项关联为后项的情况。为进一步分析合同风险间相互影响程度及其对问题发生的贡献程度，便于监管者开展风险分析工作，继续获取风险因素与 3 类问题的关联规则并根据合同实际情况构建该类合同质量、进度、费用问题的贝叶斯网络

结构，如图 3 所示。

3) 基于 Apriori-RMM 的装备采购合同履行风险评价。根据式(5)对单个风险因素的风险值进行计算，以“生产能力不足”风险因素为例，在 20 个合同中，该风险值共出现 7 次，7 次中发生进度问题 4 次，2 次为一般质量问题，2 次为严重质量问题，相应计算过程如下：

$$R_{b(\text{生产能力不足})} = 4 \times (3 + 3 + 1 + 1) / 7 = 4.57。$$
 (7)

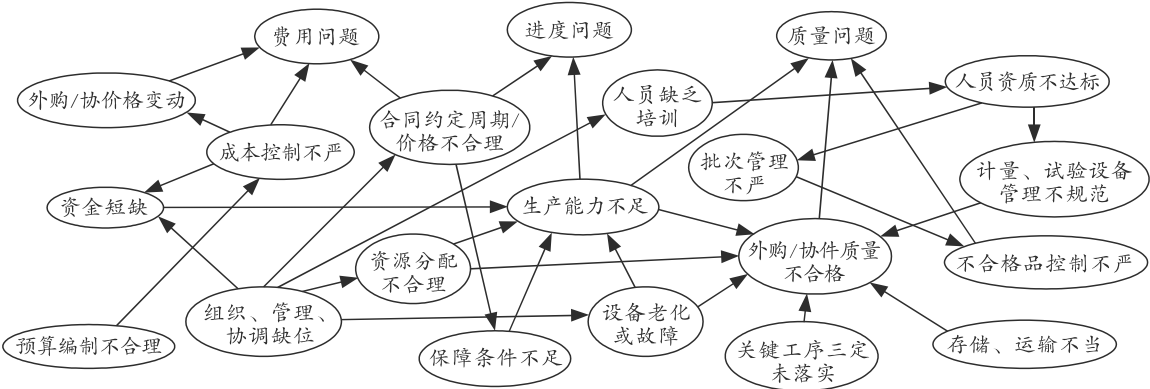


图 3 某类装备订购合同履行风险的贝叶斯网络结构

故“生产能力不足”风险因素的风险值为 4.57，同理，得到其他风险因素风险值。本文中列举风险值由大到小前 6 个风险因素，如表 5 所示。由表 5 可以看出：“保障条件不足”和“合同约定周期/价格不合理”是影响该类装备订购合同正常履行最关

键的风险因素。根据图 3 可知：“合同约定周期/价格不合理”作为“保障条件不足”的父节点，是造成“保障条件不足”因素的主要原因，同时“保障条件不足”可引发“生产能力不足”，并间接导致质量问题 and 进度问题发生。此外，“外购/协件质量不

合格”是影响该系列产品订购合同正常履行的又一重要风险因素。根据图 3 可知：影响“外购/协件质量不合格”的风险因素是多样的，但当“外购/协件质量不合格”发生时，将直接引发质量问题。此外，该类合同进度问题大多由“合同约定周期/价格不合理”“组织、管理、协调缺位”引发，质量问题大多由“外购/协件质量不合格”引发，后续在该类合同监管过程中应着重关注合同签订和外购/协件质量管理。

表 5 某类装备订购合同履行风险值排序

排序	风险因素 Y	风险值 R
1	保障条件不足	8.00
2	合同约定周期/价格不合理	6.75
3	生产能力不足	4.57
4	外购/协件质量不合格	3.00
5	组织、管理、协调缺位	3.00
6	资金短缺	2.50

根据式(6)对合同总体风险进行计算，计算过程如下：

$$R_a=(1+1+1)/20=0.15。$$
 (8)

同理可得 $R_b=0.55$ ， $R_c=0$ 。根据式(6)描述，该承制单位此类装备订购合同质量风险为一般，进度风险为严重，暂无费用风险。在后续此类合同监管工作中，需结合单因素风险值情况加强合同进度和质量风险管理。

在开展上述风险评估过程的同时，邀请 10 名专家(含监管该厂甲方代表 2 人，承制单位计划部、质量部、生产部、财务部各 1 人以及外请专家 4 人)对该类合同某份新签合同风险进行评估，运用头脑风暴法对合同风险进行识别，采用专家打分法对合同开展分析和评价，评估结果为：该合同质量风险为一般，进度风险为严重(较轻)，费用风险较低。经分析对比，邀请专家开展风险评估的最终结果与本文中方法基本一致，但本文中方法基于数据驱动不受主观影响，置信度、稳定性更高。邀请专家进行风险评估，从会议筹划、人员预约、后勤保障等到开会评估，共花费一周时间，而本文中方法可结合软件实现，只需收集合同履行相关数据，可一定程度节约评估时间和精力。此外，本文中方法对风险因素关联性进行研究，并构建了可视化的贝叶斯网络结构图，方便合同监管人员找寻致因机理，有针对性地采取风险预防措施。

4 结束语

针对现行装备采购合同履行风险评估过程受主

观因素影响、风险分析方法研究不够深入的问题，笔者基于 Apriori 算法、贝叶斯网络、风险矩阵构建的基于数据驱动的风险评估模型，可有效消除装备采购合同风险评估过程主观因素干预，增强风险评估结果的可靠性，运用关联规则挖掘不同风险因素间的相互联系，构建贝叶斯网络结构，可帮助合同监管者深入了解合同履行问题发生内部致因机理，为后续开展合同风险预防工作提供参考，最后通过案例分析验证了上述方法的可行性，以期为装备合同监管者提高监管效率、有针对性地开展监督工作提供理论支撑，为企业、政府及其他相关单位开展合同履行风险评估工作提供借鉴。

参考文献：

[1] 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(7): 123-128.

[2] 张亚迪, 刘宝平, 李璐. 基于 FAHP 的装备采购合同订立阶段风险评估[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(3): 400-403.

[3] 耿伟波, 赵英潇, 徐萍, 等. 基于扎根理论的装备采购合同履行风险研究[J]. 质量与可靠性, 2023(5): 52-60.

[4] 康欣林, 孙胜祥, 成慧娇, 等. 基于蒙特卡洛模拟的装备维修项目风险评估方法分析[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(8): 98-102.

[5] 景国勋, 秦洪利, 蒋方. 基于 Apriori 算法的煤矿安全事故分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(6): 2313-2320.

[6] 刘伟伟, 王华伟, 侯召国. 基于 BL-Apriori 的民航机务风险关联规则分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(4): 27-33.

[7] 林其彪, 李鑫, 葛樊亮, 等. 基于数据驱动贝叶斯网络的化工事故风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(4): 180-185.

[8] 王宇娴, 魏孟媛, 薛文良, 等. 童装质量检验不合格项的关联规则研究[J]. 纺织学报, 2024, 45(4): 204-210.

[9] 张利, 梅浙川, 潘传波, 等. 基于风险矩阵法的方舱医院感染风险防控管理效果评估[J]. 重庆医学, 2023, 52(7): 1109-1112.

[10] 徐宁, 梁第. 建筑安全风险因素分级排序的风险矩阵法[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(4): 24-27, 46.

[11] KULBIR S, KAUSHIK M, KUMAR M. Inte-grating α -cut interval based fuzzy fault tree and Bayesia-n network analysis for criticality analysis of submarine p-ipeline leakage: A novel approach[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 166: 189-201.