

doi: 10.7690/bgzd.2018.01.021

基于多级物元分析法的机载弹药技术保障安全风险综合评价

叶文, 赵建忠, 吕晓峰

(海军航空大学兵器科学与技术系, 山东烟台 264001)

摘要: 为解决评价指标间不相容问题, 采用多级物元分析法对机载弹药技术保障安全风险进行综合评价。在深入分析机载弹药技术保障安全风险评价特点的基础上, 确定其安全风险评估指标体系, 建立基于多级物元分析法的机载弹药技术保障安全风险综合评价模型, 并通过分析与案例验证。结果表明: 该方法能实现定性评价与定量评价的结合, 解决评估指标间互不相容的问题, 有效地应用于机载弹药技术保障安全风险评价。

关键词: 机载弹药技术保障; 安全风险评价; 多级物元分析法

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Security Risk Assessment of Airborne Ammunition Technical Support Based on Analysis Method of Multidimensional Matter

Ye Wen, Zhao Jianzhong, LYU Xiaofeng

(Department of Ordnance Science & Technology, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: For solving the problem of non-tolerance among evaluation indexes, use analysis method of multidimensional matter element to carry out integrate analysis of airborne ammunition technical support security risk assessment. Based on deep analysis of security risk assessment character, ascertain its security risk evaluation index system, establish security risk integrate assessment model, and verify the model by analysis and example. The results show that the method can realize the combination of qualitative assessment and quantitative assessment, and solve the problem of among evaluation indexes and it can be effectively used for security risk assessment of airborne ammunition technical support.

Keywords: airborne ammunition technical support; security risk assessment; analysis method of multidimensional matter element

0 引言

安全风险评估技术涉及社会科学、管理科学、自然科学和工程技术等领域, 是一门交叉学科^[1-2]。机载弹药实弹训练技术保障涉及人员、装备、环境和管理等多方面, 其安全风险是多要素的综合衡量, 不确定性因素多, 而且各因素的重要程度又不相同^[3-4]。物元分析法作为可拓学中重要的分析方法, 能够将事物的定性评价和定量评价相结合, 其通过物元变换和可拓集合论, 构建关联函数, 能够有效地解决评价指标间不相容的问题; 因此, 采用多级物元分析模型对机载弹药实弹训练技术保障安全风险进行评价, 可以有效地分析多个安全风险因

素之间的相关性对安全风险等级评价的影响, 并能以定量的数值较完整地反映机载弹药实弹训练技术保障安全风险的水平, 使评价结果更加全面、直观, 进一步提高评价结果的科学性、准确性。

1 评价指标体系的建立

1) 评级指标建立。

结合机载弹药技术保障特点, 根据安全工程相关理论、多次问卷调查和专家座谈的结果^[5], 遵循安全风险评价指标体系的构建原则, 依据所进行的机载弹药实弹训练技术保障安全风险因素识别结果, 笔者建立机载弹药实弹训练技术保障安全风险综合评价指标体系如图 1 所示。

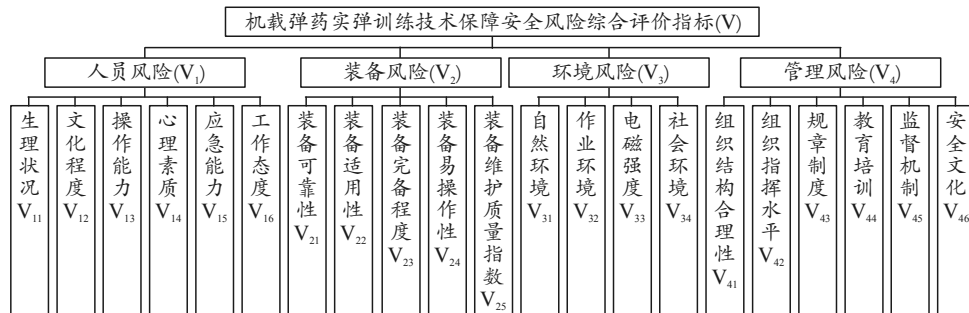


图 1 机载弹药实弹训练技术保障安全风险综合评价指标体系

收稿日期: 2017-09-29; 修回日期: 2017-10-24

作者简介: 叶文(1979—), 男, 安徽人, 博士, 从事弹药工程、任务规划、军械保障研究。

这些指标是保障机载弹药实弹训练技术保障安全的重要基础，是完成机载弹药实弹训练技术保障任务的必要条件。一级指标用 $V=(V_1, V_2, V_3, V_4)$ 表示；二级指标用 V_{ij} 表示，其含义为第 i 类中的第 j 个评价因子。

2) 指标权重确定。

在机载弹药实弹训练技术保障安全风险评价指标体系中，各个指标的权重值将直接影响评价结果的准确性。笔者采用层次法确定各个指标的权重值，如表 1 所示。

表 1 指标权重值

一级指标	二级指标	权重
人员风险 (0.273)	人员生理状况	0.186
	技术水平	0.012
	操作能力	0.263
	应急能力	0.162
	心理素质	0.053
	工作态度	0.324
装备风险 (0.124)	装备可靠性	0.413
	装备适用性	0.182
	装备易操作性	0.108
	装备完备程度	0.237
	装备维护质量指标	0.060
环境风险 (0.207)	自然环境	0.494
	作业环境	0.319
	电磁环境	0.136
	社会环境	0.051
管理风险 (0.396)	组织结构合理性	0.099
	组织指挥能力	0.350
	规章制度	0.145
	教育培训	0.104
	监督机制	0.217
	安全文化	0.085

2 多级物元分析模型

2.1 一级评价^[6]

一级评价指对指标体系中每一类别的 V_i 进行评价，评价步骤如下：

1) 经典域确定：

$$R_{oj} = (N_{oj}, V_{oj}, X_{oj}) = \begin{bmatrix} N_{oj} & V_{oj1} & x_{oj1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{oj} & V_{ojn} & x_{ojn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{oj} & V_{oj} & \langle a_{oj1}, b_{oj1} \rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{oj} & V_{ojn} & \langle a_{ojn}, b_{ojn} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： R_{oj} 为机载弹药实弹训练技术保障的第 j 级安全风险状况的物元模型； N_{oj} 表示为机载弹药实弹训练技术保障安全风险评价指标 V_{oj} 的第 j 个安全水平的等级 ($j=1, 2, \dots, m$)； x_{oji} 为 N_{oj} 关于特征的量值范围，即 V_{oj} 的经典域 $\langle a_{oji}, b_{oji} \rangle$ 。

2) 节域确定，节域是指安全风险指标体系 V_o 各特征值等级的值域，用下式表示：

$$R_{op} = (N_{op}, V_{op}, X_{op}) = \begin{bmatrix} N_{op} & V_{op1} & x_{op1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{op} & V_{opn} & x_{opn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： R_{op} 为导弹技术保障安全风险评价物元模型的节域； N_{op} 为导弹技术保障安全风险等级的全体； x_{opi} 为 N_{op} 关于特征 V_{opi} 的量值范围，即 $\langle a_{opi}, b_{opi} \rangle$ 。

3) 待评物元确定，假设 V_o 为待评对象，则物元表示为

$$R_o = (N_o, V_o, X_o) = \begin{bmatrix} N_o & V_{o1} & y_{o1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_o & V_{on} & y_{on} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： R_o 为导弹技术保障安全风险的待评物元； N_o 为待评对象； y_{oi} 为待评对象 N_o 关于特征 V_{oi} 的量值，也就是 N_o 经分析得到的具体值。

4) 关联函数确定。根据可拓学理论可知，点 x_0 与有限实区间 $X = \langle a, b \rangle$ 的距 $\rho(x_0, X)$ 的表达式：

$$\rho(x_0, X) = \begin{cases} x_0 - \frac{1}{2}(a+b), & x_0 < \frac{1}{2}(a+b) \\ \frac{1}{2}(b-a), & x_0 > \frac{1}{2}(a+b) \\ 0, & x_0 \in [a, b] \end{cases}$$

则待评对象的特征 V_{oi} 关于第 j 等级的关联度为

$$k_j(y_{oi}) = \frac{\rho(y_{oi}, x_{oji})}{[\rho(y_{oi}, x_{opi}) - \rho(y_{oi}, x_{oji})]} \quad (4)$$

式中： $\rho(y_{oi}, x_{oji})$ 表示 N_o 与关于 N_{oj} ($j=1, 2, \dots, m$) 特征 V_{oi} 的距； $\rho(y_{oi}, x_{opi})$ 表示 N_o 与 N_{op} 关于特征 V_{oi} 的距，其算法如下：

$$\rho(y_{oi}, x_{oji}) = \begin{cases} a_{oji} - y_{oi}, & y_{oi} \leq (a_{oji} + b_{oji})/2 \\ y_{oi} - b_{oji}, & y_{oi} > (a_{oji} + b_{oji})/2 \end{cases}; \quad (5)$$

$$\rho(y_{oi}, x_{opi}) = \begin{cases} a_{opi} - y_{oi}, & y_{oi} \leq (a_{opi} + b_{opi})/2 \\ y_{oi} - b_{opi}, & y_{oi} > (a_{opi} + b_{opi})/2 \end{cases} \quad (6)$$

5) 待评对象 N_o 关于等级 j 的关联度计算：

$$K_{oj}(N_o) = \sum_{i=1}^n w_{oi} k_j(y_{oi}) \quad (7)$$

式中 w_{oi} 为 V_{oi} 的权重。

2.2 二级评价

所谓的二级评级是指计算待评事物 N 关于等级 j 的关联度 $K_j(N)$ ，其计算公式为

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^n w_{oi} k_{oj}(N_{oi}) \quad (8)$$

式中 w_{oi} 为 V_{oi} 的权重。

2.3 评定等级

对象符合标准对象等级的程度用关联度来表示，

关联度值越大，符合度越高。由最大隶属度原则 $K_{j_0} = \max K_j(N)$ 可知， N 属于 j_0 级别。如果对于所有的 j 都有 $K_j(N) \leq 0$ ，则说明 N 的等级已经不在所划分各个等级范围内，应该照下述方法进行确定。令：

$$k_j^*(y_{oi}) = \frac{K_j(N) - \min[K_j(N)]}{\max[K_j(N)] - \min[K_j(N)]}; \quad (9)$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^n j k_j^*(y_{oi})}{\sum_{j=1}^n k_j^*(y_{oi})} \quad (10)$$

式中 j^* 表示 N 所属等级的特征值，即待评对象属于等级 j_0 的程度。

综上所述，可以得到基于多级物元法的机载弹药实弹训练技术保障安全风险评价的基本程序，如图 2 所示。

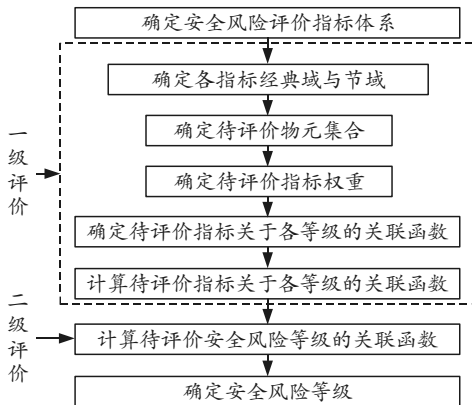


图 2 多级物元分析法的应用过程

3 案例分析

为参加海军某次重大实弹演练任务，海军某场站导弹技术队需要快速完成 $\times\times$ 导弹技术准备，然后送到外场进行挂机，保证任务飞机在最短的准备时间内挂弹起飞^[7]。笔者对海军某场站导弹技术队参加此次 $\times\times$ 导弹实弹演练技术保障任务的安全情况，进行安全风险综合评价。

1) 确定安全等级及各指标权重和得分。

由 $\times\times$ 导弹技术保障的专家组人员通过打分的方法，将导弹技术保障中各个安全风险评价指标的安全风险水平划分为 5 个等级(取 $m=5$)，分别为“低、较低、一般、较高、高”。其安全性取值分别为 $[90,100]$ 、 $[80,90]$ 、 $[70,80]$ 、 $[60,70]$ 、 $[50,60]$ 。表 1 为通过层次分析法确定的各个风险指标的相对权重。对各个风险指标的相对权重进行专家打分，最终求取代数平均值，作为该项指标的实际得分，如表 2 所示。

表 2 安全风险评价指标得分

一级指标	二级指标	得分
人员风险 (V_1)	生理状况 (V_{11})	92.5
	文化程度 (V_{12})	78.4
	操作能力 (V_{13})	86.2
	心理素质 (V_{14})	90.5
	应急能力 (V_{15})	85.4
	工作态度 (V_{16})	94.0
装备风险 (V_2)	装备可靠性 (V_{21})	88.5
	装备适用性 (V_{22})	89.3
	装备完备程度 (V_{23})	84.6
	装备易操作性 (V_{24})	90.5
环境风险 (V_3)	装备维护质量指数 (V_{25})	92.7
	自然环境 (V_{31})	92.3
	作业环境 (V_{32})	85.6
	电磁环境 (V_{33})	80.5
	社会环境 (V_{34})	94.2
管理风险 (V_4)	组织结构合理性 (V_{41})	93.3
	组织指挥水平 (V_{42})	91.6
	规章制度 (V_{43})	87.0
	教育培训 (V_{44})	86.5
	监督机制 (V_{45})	85.4
	安全文化 (V_{46})	74.8

2) 确定经典域。

以人员风险为例，根据所分安全级别，可用以下 5 个矩阵表示 $\times\times$ 导弹技术保障经典域：

$$R_{01} = \begin{bmatrix} \text{低} & \text{生理状况} & [90 & 100] \\ \text{低} & \text{文化程度} & [90 & 100] \\ \text{低} & \text{操作能力} & [90 & 100] \\ \text{低} & \text{心理素质} & [90 & 100] \\ \text{低} & \text{应急能力} & [90 & 100] \\ \text{低} & \text{工作态度} & [90 & 100] \end{bmatrix},$$

$$R_{02} = \begin{bmatrix} \text{较低} & \text{生理状况} & [80 & 90] \\ \text{较低} & \text{文化程度} & [80 & 90] \\ \text{较低} & \text{操作能力} & [80 & 90] \\ \text{较低} & \text{心理素质} & [80 & 90] \\ \text{较低} & \text{应急能力} & [80 & 90] \\ \text{较低} & \text{工作态度} & [80 & 90] \end{bmatrix},$$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} \text{一般} & \text{生理状况} & [70 & 80] \\ \text{一般} & \text{文化程度} & [70 & 80] \\ \text{一般} & \text{操作能力} & [70 & 80] \\ \text{一般} & \text{心理素质} & [70 & 80] \\ \text{一般} & \text{应急能力} & [70 & 80] \\ \text{一般} & \text{工作态度} & [70 & 80] \end{bmatrix},$$

$$R_{04} = \begin{bmatrix} \text{较高} & \text{生理状况} & [60 & 70] \\ \text{较高} & \text{文化程度} & [60 & 70] \\ \text{较高} & \text{操作能力} & [60 & 70] \\ \text{较高} & \text{心理素质} & [60 & 70] \\ \text{较高} & \text{应急能力} & [60 & 70] \\ \text{较高} & \text{工作态度} & [60 & 70] \end{bmatrix},$$

$$R_{05} = \begin{bmatrix} \text{高} & \text{生理状况} & [50 & 60] \\ \text{高} & \text{文化程度} & [50 & 60] \\ \text{高} & \text{操作能力} & [50 & 60] \\ \text{高} & \text{心理素质} & [50 & 60] \\ \text{高} & \text{应急能力} & [50 & 60] \\ \text{高} & \text{工作态度} & [50 & 60] \end{bmatrix}.$$

3) 确定节域。

根据定义可知, 该体系的节域为

$$R_v = \begin{bmatrix} \text{安全等级 生理状况} [50 \ 100] \\ \text{安全等级 文化程度} [50 \ 100] \\ \text{安全等级 操作能力} [50 \ 100] \\ \text{安全等级 心理素质} [50 \ 100] \\ \text{安全等级 应急能力} [50 \ 100] \\ \text{安全等级 工作态度} [50 \ 100] \end{bmatrix}。$$

4) 确定待评物元。

以人员风险为例, 可得待评物元为:

$$R_v = \begin{bmatrix} \text{人员风险 生理状况} \langle 92.5 \rangle \\ \text{人员风险 文化程度} \langle 88.4 \rangle \\ \text{人员风险 操作能力} \langle 86.2 \rangle \\ \text{人员风险 心理素质} \langle 90.5 \rangle \\ \text{人员风险 应急能力} \langle 85.4 \rangle \\ \text{人员风险 工作态度} \langle 94.0 \rangle \end{bmatrix}。$$

5) 计算关联度。

将有关数据代入关联度计算公式中, 得到各个评价因子对于各等级的关联度。以人员风险为例, 具体计算结果如表 3 所示。

表 3 人员风险关于各等级的单指标关联度

指标	K_{1i}	K_{2i}	K_{3i}	K_{4i}	K_{5i}
生理状况 (V_{11})	0.001 2	0.042 9	0.040 0	-0.418 8	-0.674 8
文化程度 (V_{12})	-0.225 1	0.415 4	0.288 0	-0.292 3	-0.646 1
操作能力 (V_{13})	0.086 1	0.153 7	0.266 7	-0.359 5	-0.599 7
心理素质 (V_{14})	-0.151 3	0.061 5	0.400 0	-0.378 3	-0.612 0
应急能力 (V_{15})	-0.158 9	0.199 6	0.250 0	-0.346 6	-0.673 3
工作态度 (V_{16})	-0.174 9	0.253 7	-0.359 5	-0.273 6	-0.723 6
人员风险 (V_1)	-0.070 8	0.392 3	0.131 1	-0.138 3	-0.639 4

余下类推。

6) 进行一级评价。

将得到的值代入公式进行一级评价, 可得:

$$\begin{bmatrix} K_{11}(V_1) & K_{21}(V_2) & K_{31}(V_3) & K_{41}(V_4) & K_{51}(V_5) \\ K_{12}(V_1) & K_{22}(V_2) & K_{32}(V_3) & K_{42}(V_4) & K_{52}(V_5) \\ K_{13}(V_1) & K_{23}(V_2) & K_{33}(V_3) & K_{43}(V_4) & K_{53}(V_5) \\ K_{14}(V_1) & K_{24}(V_2) & K_{34}(V_3) & K_{44}(V_4) & K_{54}(V_5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.071 & -0.101 & -0.054 & -0.281 & -0.252 \\ 0.121 & 0.238 & -0.024 & 0.413 & 0.312 \\ -0.358 & -0.381 & -0.181 & -0.293 & -0.248 \\ -0.432 & -0.488 & -0.472 & -0.524 & -0.404 \end{bmatrix}。$$

7) 进行二级评价。

将数据代入公式进行二级评价, 求得各类等级

的关联度。

$$\begin{bmatrix} K_1(V) \\ K_2(V) \\ K_3(V) \\ K_4(V) \\ K_5(V) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.125 \\ 0.208 \\ -0.327 \\ -0.481 \\ -0.629 \end{bmatrix}。$$

很显然, 0.208 最大。根据多级物元分析模型中的评价等级标准, 以及最大隶属的原则可知, 该场站导弹技术队参加此次实弹演练任务的安全风险等级应该评为“较低”。说明执行此次实弹演练任务技术保障存在一定的安全风险, 但是这种程度的安全风险对任务的开展影响有限。

4 结束语

笔者根据机载弹药实弹训练技术保障安全风险评价需求, 构建机载弹药实弹训练技术保障安全风险评价指标体系, 及基于多级物元的机载弹药实弹训练技术保障安全风险评估模型, 并进行了分析与案例验证, 将定性评价与定量评价相结合, 解决了评价指标间不相容问题。实例结果证明该方法科学、有效, 可以很好地适用于机载弹药实弹训练技术保障安全风险评价。

参考文献:

[1] 朱爱勇, 常旺. FMEA 与 RCA 在食品安全风险评估中的应用[J]. 解放军医院管理杂志, 2013, 20(4): 372-375.

[2] 肖龙, 李千目. 基于 AHP 和模糊综合评判的信息安全风险[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(22): 82-85.

[3] 赵丽俊, 焦志刚, 刘锦春, 等. 常规弹药研发过程中的可靠性预计与分配[J]. 兵工自动化, 2016, 35(10): 86-90.

[3] 冯登国, 张阳, 张玉清. 信息安全风险评估综述[J]. 通信学报, 2004, 25(7): 7-11.

[4] 胡雪明, 刘志坚. 基于多层次灰色评价的后方军械仓库安全风险[J]. 空军勤务学院学报, 2015, 60(4): 59-62.

[6] 谢秋慧, 张昊, 童瑜, 等. 新能源汽车电驱动系统能耗检测方法及其评价体系研究[J]. 机电工程, 2016, 33(4): 464-469.

[7] 刘卫星, 王贺林, 王铁璋, 等. 某型地空导弹作战效能评估[J]. 兵工自动化, 2016, 35(3): 90-96.