

基于模糊FMECA的制导弹药可靠性分析

高萌¹, 王金柱¹, 林义²

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 武汉军械士官学校, 武汉 430000)

摘要: **目的** 解决在制导弹药系统可靠性分析过程中,评价指标具有模糊性和评价因素多的问题。**方法** 提出了一种模糊综合评价法与故障模式、影响及危害度分析(FMECA)相结合的方法,通过建立因素集、备择集、利用层次分析法确定权重集、评价矩阵。**结果** 对失效模式影响及严酷度分析中的定性评价指标进行定量化,找到了自动导引头的薄弱环节。**结论** 该方法是科学、准确的,克服了难以给出有效准确分析结果的问题,为提高制导弹药可靠性提供了依据。

关键词: 制导弹药; 可靠性分析; 模糊综合评判; FMECA

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.06.027

中图分类号: TJ410. 89 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)06-0127-04

Reliability Analysis of Guided Ammunition Based on Fuzzy FMECA

GAO Meng¹, WANG Jin-zhu¹, LIN Yi²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Wuhan Ordnance N.C.O Academy of PLA, Wuhan 430000, China)

ABSTRACT: Objective To solve the problem that the credible and accurate analysis results are difficult to be given owing to the facts that many evaluation elements are involved and the evaluation indices are fuzzy during the reliability analysis of guided ammunition. **Methods** A new method which combines fuzzy comprehensive evaluation with FMECA was proposed. Factor sets, evaluation set, judgment matrix for fuzzy factors and weights set were established to quantify the qualitative evaluation index. **Results** The failure mode effects and severity degree of qualitative evaluation index were quantified. The weak link of the automatic seeker was found. **Conclusion** The method is scientific and accurate, and the result analysis problem was solved with efficiency and accuracy. It provides the basis for improving the reliability of guided ammunition.

KEY WORDS: guided ammunition; reliability analysis; fuzzy comprehensive evaluation; FMECA

现代科技的发展使弹药智能化程度越来越高, 其组成系统越来越复杂,从而使制导弹药系统的可

收稿日期: 2013-03-21; 修订日期: 2013-04-15

Received: 2013-03-21; Revised: 2013-04-15

作者简介: 高萌(1989—),男,硕士,主要研究方向为弹药检测技术与质量评估。

Biography: GAO Meng(1989—),Male,Master,Research focus: ammunition quality evaluation and detection technology.

靠性也越来越受到重视。制导弹药可靠性分析可以有效地分析造成系统失效的薄弱环节,进而采取改进措施以提高制导弹药的使用和贮存可靠性。故障模式、影响及危害度分析(FMECA)是按照一定程序有步骤地分析系统的每一元件可能的失效模式、每一失效模式对上层次结构的影响,这样自下而上地逐步进行,一直分析到对系统的影响^[1]。模糊综合评判的方法可以有效地解决在制导弹药系统可靠性分析过程中评价指标具有模糊性的问题,所以笔者主要针对故障模式、影响及危害性分析(FMECA)和模糊综合评判相结合的方法在制导弹药可靠性分析中的应用进行探讨。

1 模糊FMECA方法

1.1 建立因素集

因素集是影响评估对象的各种因素所组成的一个普通的集合,即:

$$U=\{u_1, u_2, \dots, u_i, u_n\}$$

式中: U 是因素集; $u_i(i=1, 2, \dots, n)$ 代表各个影响因素,这些因素都具有一定的模糊性。

1.2 建立备择集

备择集是评判者对评判对象所有可能做出的评价结果的集合,一般用 V 表示,即:

$$V=\{v_1, v_2, \dots, v_j, v_n\}$$

各元素 $v_j(1, 2, \dots, n)$ 代表各种可能的总评判结果。模糊综合评判的目的是,在综合考虑所有影响因素的基础上,从备择集中得出一个最好的评价结果。

1.3 确定权向量

在因素集中,各个因素的重要程度是不一样的,为了反映各个因素的重要程度,对各个因素 $u_i(i=1, 2, \dots, n)$ 应赋予相应的权数 $a_i(i=1, 2, \dots, n)$ 。由各权数所组成的集合 $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 称为因素权重集,简称权重集。各权数应满足归一性和非负性条件^[2]:

$$\sum_{i=1}^m a_i=1, a_i \geq 0(i=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

通过专家的主观评审选取权重,带有一定的主观性。层次分析法(AHP)是确定权向量的行之有效

的方法,它通过划分互相联系的有序层次,使之条理化,根据对一定客观现实的判断,就每一层次的相对重要性予以定量,能够尽可能地消除人为因素对权重确定带来的影响,保证了权重的有效性和实用性。

假设 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_i, u_n\}$ 是全部因素的集,按1至9比率标度法构造判断矩阵 $HX = (a_{ij})_{n \times n}$ 。具体方法为:

$$\text{如果认为 } u_i \text{ 与 } u_j \text{ 相比} \begin{bmatrix} \text{同等重要} \\ \text{稍微重要} \\ \text{明显重要} \\ \text{重要得多} \\ \text{绝对重要} \end{bmatrix}, \text{ 则 } a_{ij} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 5 \\ 7 \\ 9 \end{bmatrix},$$

且 $a_{ji}=1/a_{ij}$,若居于它们之间可用2,4,6,8标度。

对得到的判断矩阵 HX ,采用方根法^[3]计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其所对应的特征向量 $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$,即该因素集中各元素的权重。

1.4 单因素模糊评判

单独从一个因素出发进行评判,以确定评判的对象对备择集元素的隶属程度。设评判对象按因素集中的第 i 个因素 u_i 进行评判,对备择集中的第 j 个元素 v_j 的评估集为 r_{ij} ,则按第 i 个因素 u_i 的评判结果^[4],可以用模糊集合来表示:

$$R = \frac{r_{i1}}{v_1} + \frac{r_{i2}}{v_2} + \dots + \frac{r_{in}}{v_n} \quad (2)$$

式中: R 称为单因素评判集,可简单地表示为 $R=(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 。

将各单因素评判集的隶属度为行,组成矩阵 R ,称为单因素的评判矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.5 一级模糊综合评判

单因素模糊评判,仅反映了一个因素对评判对象的影响^[5],想要得出科学的评判结果需要综合考虑所有因素的影响。对权重集 A 和单因素评判矩阵 R 作模糊变化来进行综合评判。因此,模糊综合评判可表示为:

$$B=A \times R=[a_1, a_2, \cdots, a_n] \times \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}=(b_1, b_2, \cdots, b_m) \quad (4)$$

式中 B 为模糊综合评判集。

1.6 评价指标的处理

得到评判指标 $b_j(j=1, 2, \cdots, m)$ 后,采用加权平均法具体确定评判对象结果^[6],即:

$$C = \sum_{j=1}^m b_j v_j / \sum_{j=1}^m b_j \quad (5)$$

1.7 多级模糊综合评判

在复杂系统中,由于考虑的因素很多,往往还有层次之分,需要进行多级模糊综合评判。假设因素作了 k 次划分,则第 $k(k=1, 2, \cdots, k-1)$ 次划分的单因素评判,应该是 $k+1$ 次划分的模糊综合评判。评判时,从最后的第 k 次划分的各个因素开始,一级一级

地往上评,一直到最高层,得出总的评判结果。

2 自动导引头可靠性综合分析

自动导引头是一种安装在制导弹药上,集微波、电子、电气、精密机械为一体的复杂的目标探测装置^[7]。它是自动寻的制导弹药弹的关键组成部分,它的作用是测量弹药偏离理想运动轨道的失调参数,利用失调参数形成控制指令,送给弹上控制系统,操纵弹药飞行,它对导弹的作战性能有着重大影响,其可靠性关系到整个制导弹药系统的成败。

2.1 FMECA分析

由于在制导弹药自动导引头系统失效模式影响和严酷度分析过程中,评价指标很多而且具有模糊性,难以准确有效地给出分析结果,因此,利用模糊FMECA的新方法对制导弹药自动导引头系统进行可靠性分析。制导弹药自动导引头系统失效模式影响和严酷度分析结果见表1。

表1 自动导引头FMECA
Table 1 FMEA for automatic seeker

序号	功能	失效模式	失效原因	失效影响
1	选择光谱,会聚激光	捕获目标失败	滤光镜涂层被破坏	不能保证视场角和映射目标
2	控制陀螺运动	修正系统滞后、无动作	修正线圈损坏、磁铁磁性下降、接触簧锈蚀	不能有效调节陀螺运动
3	保证物镜光轴与目标一致	陀螺解锁失败、转子转速下降	电作动器功能失效、转子不平衡	不能有效控制物镜动作
4	接受激光	输出电压降低、无输出	光电二极管断路、放大器故障	激光制导能力下降或功能失效
5	处理激光脉冲形成修正信号	电参数漂移、输出控制信号失常	接收器故障、插座锈蚀	比例导引能力下降

2.2 模糊综合评判

2.2.1 建立因素集

$$U=\{u_1, u_2, u_3, u_4\} \quad (6)$$

式中: u_1 为故障概率; u_2 为严酷度; u_3 为检测难易程度; u_4 为可维修性能。

因素的等级集可表示为:

$$u_1=\{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}\}, u_2=\{u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}\}, u_3=\{u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}\}, u_4=\{u_{41}, u_{42}, u_{43}, u_{44}\}$$

其中, $u_{ij}(i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, 3, 4)$,其含义见表2。

2.2.2 权重集的确定

利用层次分析法得到故障模式1因素的权重集为 $A=\{0.5648, 0.2624, 0.0540, 0.1188\}$ 。经一致性检

验^[8]满足要求。

2.2.3 一级模糊综合评判

1) 单因素评判。单独从一个因素出发进行评判,得出各因素评判集为 $R_1=\{0.6, 0.3, 0.1, 0.0\}$, $R_2=\{0.1, 0.3, 0.5, 0.1\}$, $R_3=\{0.5, 0.4, 0.1, 0.0\}$, $R_4=\{0.0, 0.0, 0.6, 0.4\}$ 。因此,单因素评判矩阵为:

$$R=\begin{bmatrix} 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0.0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.6 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2) 一级模糊综合评判。

$B^1=A^1R=[0.3921 \ 0.2702 \ 0.2643 \ 0.0735]$,即故障模式1的危害程度等级分别为1, 2, 3, 4的隶属度

表2 因素等级
Table 2 Ranks of factors

影响因素		等级			
		1	2	3	4
u_1	故障概率	很少发生	偶尔发生	有时发生	经常发生
u_2	严酷度	轻微的危害	轻度的危害	中等的危害	致命的危害
u_3	检测难易程度	能准确检测到	不易检测到	很难检测到	无法检测到
u_4	可维修性能	不需要维修	维修成本不高	维修成本较高	维修成本高

为0.3921,0.2702,0.2643,0.0735。

2.2.4 评价指标的确定

按照加权平均法确定故障模式1的综合危害等级值: $C=2.0191$ 。采用相同的权重集求各故障模式的综合危害等级值,应用上述的方法对自动导引头其他故障模式进行模糊综合评价,得到故障模式2,3,4,5的综合危害等级值分别为:

$$C^2=2.4163, C^3=2.2582, C^4=3.0330, C^5=2.6609$$

依据 c 值的大小,按其危险度轻重将故障模式1—5排列为:故障模式1<故障模式3<故障模式2<故障模式5<故障模式4。

2.2.5 多级模糊综合评判

自动导引头是一个复杂的系统,各因素有层次之分,若用一级模糊综合评判模型,得不出有意义的评判结果,需要对自动导引头进行多级模糊综合评价。采用相同的备择集,令故障模式1,2,3,4,5为因素集的因素,根据重要程度,赋予自动导引头5种故障模式相应的权重,设为 $A=\{0.1, 0.2, 0.1, 0.4, 0.2\}$;评判矩阵为 $R=[B^1, B^2, B^3, B^4, B^5]^T$;则自动导引头的综合评价为:

$$B=A \cdot R=[0.2359 \ 0.1778 \ 0.2826 \ 0.3049]$$

进而计算得到自动导引头综合危害的等级值。因此,在自动导引头可靠性模糊综合评价的基础上对整个制导弹药系统进行模糊综合评价,得到制导弹药系统各部件的综合危害等级,找到薄弱环节,提出对危害度最大的部件进行相应的可靠性改进措施。

3 结语

在分析FMECA不足的基础上,利用模糊综合评价方法对FMECA进行改进,提出了一种基于模糊综合评价法的FMECA新方法。利用层次分析法确定

权重,尽可能地避免了人的主观因素所造成的影响,应用新方法对制导弹药自动导引头系统进行可靠性分析,模糊综合评判的综合危害等级表明,光电二极管断路、放大器故障导致的制导能力下降或功能失效的危害度最大,是提高系统可靠性的关键部件。此评判结果与实际情况相符,表明新方法是科学、准确的,为提高制导弹药系统可靠性和延长可靠储存寿命具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] 刘传模. 弹药可靠性工程基础[M]. 石家庄: 军械工程学院, 1996.
LIU Chuan-mo. Ammunition Reliability Engineering Foundation[M]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 1996.
- [2] 杨松森. 工程模糊论方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
YANG Song-sen. Established Fuzzy Comprehensive Method and its Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.
- [3] 彭祖曾. 模糊数学(Fuzzy)及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
PENG Zu-zeng. Fuzzy Mathematics and Its Application [M]. Wunhan: Wunhan University Press, 2007.
- [4] 王春健, 刘勇志, 肖凡. 基于模糊理论的某型导弹保障性评估[J]. 装备环境工程, 2007, 4(4): 45—47.
WANG Chun-jian, LIU Yong-zhi, XIAO Fan. A Certain Type of Missile Protection Evaluation Based on Fuzzy Theory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4 (4): 45—47.
- [5] 宣兆龙. 野战弹药环境安全的灰色模糊综合评判[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 56—58.
XUAN Zhao-Long. Environmental Safety of Field Ammunition

(下转第151页)

- YI Ping, QIN Xiao-zhou, WEI Xiao-qin, et al. Contrast Study of Solar Radiation of Different Angles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(3): 73—77.
- [5] 程丛高, 徐路, 陈丹明. 沙尘对直升机挂架影响的分析及试验验证方法[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 117—122.
- CHENG Cong-gao, XU Lu, CHEN Dan-ming. Impact of Sand-dust on Helicopter Pylon and Its Verification Test Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(3): 117—122.

=====

(上接第 130 页)

- tion Grey Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(1): 56—58.
- [6] 左浩, 马亮, 刘博. 基于模糊理论的鱼雷武器系统作战效能分析[J]. 装备环境工程, 2007, 4(4): 42—45.
- ZUO Hao, MA Liang, LIU Bo. Based on the Theory of Fuzzy Torpedo Weapon System Combat Effectiveness Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(4): 42—45.
- [7] 孟秀云. 导弹制导原理与控制系统原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.
- MENG Xiu-yun. Principle of Missile Guidance and Control System[M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 2003.
- [8] 周真, 马德仲, 于晓洋. 用于产品可靠性分析的模糊 FMECA 方法[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(10): 90—93.
- ZHOU Zhen, MA De-zhong, YU Xiao-yang. Used for Product Reliability Analysis of Fuzzy FMECA Method[J]. Journal of Motor and Control, 2010, 14(10): 90—93.

=====

(上接第 135 页)

- XIN Tie-zhu, ZHAO Wan-sheng, LIU Jin-chun, etc. The Characteristics Research and Mechanism Analysis in Aluminum MAO Process[J]. Surface Technology, 2006, 35(2): 14—15.
- [2] 薛文彬, 邓志威, 来永春, 等. 铝合金微弧氧化陶瓷膜的相分布及其形成[J]. 材料研究学报, 1997, 11(4): 169—171.
- XUE Wen-bin, DENG Zhi-wei, LAI Yong-chun, etc. The Facies Distribution and Formation of Aluminum MAO Ceramic Coating[J]. Materials Research Journal, 1997, 11(4): 169—171.
- [3] 薛文彬, 来永春, 邓志威, 等. 铝合金微弧氧化膜的形成与特性[J]. 电镀与精饰, 1996, 18(5): 3—5.
- XUE Wen-bin, LAI Yong-chun, DENG Zhi-wei, etc. The Formation and Characteristics of Aluminum MAO Film[J]. Plating and Finishing, 1996, 18(5): 3—5.
- [4] 薛文彬, 邓志威, 来永春, 等. 铝合金微弧氧化陶瓷膜的形貌及相组成分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1996, 32(1): 67—70.
- XUE Wen-bin, DENG Zhi-wei, LAI Yong-chun, etc. The Morphology and Phase Composition Analysis of Aluminum MAO Ceramic Coating, Beijing Normal University Journal (Natural Science Edition) [J]. 1996, 32(1): 67—70.
- [5] 胡正前, 马晋. 硅酸盐电解液中铝合金微弧氧化陶瓷膜层的结构与性能[J]. 金属热处理, 2003, 28(3): 23—26.
- HU Zheng-qian, MA Jin. The Structure and Properties of Aluminum MAO Ceramic Coating in Silicate Electrolyte[J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 28(3): 23—26.