

doi: 10.7690/bgzdh.2023.05.005

FMECA 在舰船装备性能和“六性”一体化设计中的应用

胡小利¹, 郭周南², 赵飞², 李猛²

(1. 南部战区海军参谋部训练处, 广东 湛江 524000;

2. 中国船舶集团有限公司第七一三研究所, 郑州 450015)

摘要: 针对国内“六性”设计技术缺乏相互关联和顶层指标等问题, 采用故障模式影响及危害性分析 (failure mode effect and criticality analysis, FMECA) 技术开展性能和“六性”一体化设计。阐述如何在“六性”设计工作中开展 FMECA 分析, 并以某舰炮装备部件为例论述如何运用 FMECA 开展性能和“六性”一体化设计。结果表明, FMECA 技术对舰炮装备质量提升具有重要的价值。

关键词: FMECA; 舰船装备; 舰炮; 六性

中图分类号: TJ391 **文献标志码:** A

Application of FMECA in Integrated Design of Ship Equipment Performance and “Six Characteristics”

Hu Xiaoli¹, Guo Zhounan², Zhao Fei², Li Meng²

(1. Training Division of Naval Staff Department of Southern Theater Command, Zhanjiang 524000, China;

2. No. 713 Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: In view of the lack of correlation and top-level indicators in domestic “six characteristics” design technology, the integrated design of performance and “six characteristics” was carried out by using failure mode effect and criticality analysis (failure mode effect and criticality analysis, FMECA) technology. This paper expounds how to carry out FMECA analysis in the “six characteristics” design work, and takes a naval gun equipment component as an example to discuss how to use FMECA to carry out the integrated design of performance and “six characteristics”. The results show that FMECA technology is of great value to improve the quality of naval gun equipment.

Keywords: FMECA; ship equipment; naval gun; six characteristics

0 引言

随着我国海军创新体系的建设和高新技术的应用, 舰船装备复杂度和集成度越来越高。以舰炮装备为例, 随着我国海军朝“深海远洋”的方向发展, 舰炮装备作为舰船上的主战装备, 面对的海洋环境更加恶劣, 同时部队实战化训练增多, 这不仅对舰炮装备性能提出了较高的要求, 而且对舰炮装备“六性”(即可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性和环境适应性)的要求也随之提高。如何研制出“可靠顶用”的舰炮装备, 形成和保持有效的战斗力, 维护我国的海洋权益, 是舰炮装备设计过程中急需解决的问题。满足舰炮装备的性能要求是设计的基础和前提, 提升舰炮装备“六性”的设计能力是解决上述问题的关键。目前, 虽然国内开展了“六性”设计技术的相关研究^[1-3], 但仍存在“六性”设计和性能设计“两张皮”、“六性”设计缺乏相互关联和“六性”设计缺乏顶层指标等问题。

故障模式影响及危害性分析 (FMECA)^[4]是可靠性设计中常用、有效、经济的分析技术, 除此之外, 其对于“五性”之中其他特性的设计也发挥着重要的作用。笔者对以某舰炮装备部件为例, 论述如何运用 FMECA 开展性能和“六性”一体化设计, 指出该技术在舰船装备设计中开展的重要性。

1 FMECA 在一体化设计中的应用

1.1 FMECA 分析过程

FMECA 主要包括 2 部分内容: 故障模式及影响分析 (failure mode effect analysis, FMEA) 和危害性分析 (criticality analysis, CA)。

FMECA 是一个需要逐级推进、反复迭代的分析过程, 在对产品原有的规定层次上进行 FMECA 分析, 通过自上而下系统的归纳分析, 确定产品在设计与生产制作过程中可能潜在的故障模式、原因及影响, 找出薄弱环节, 提出改进措施, 其实施步

收稿日期: 2023-01-20; 修回日期: 2023-02-18

作者简介: 胡小利(1975—), 男, 陕西人, 从事舰艇枪炮研究。E-mail: 96452722@qq.com。

骤如图1所示。

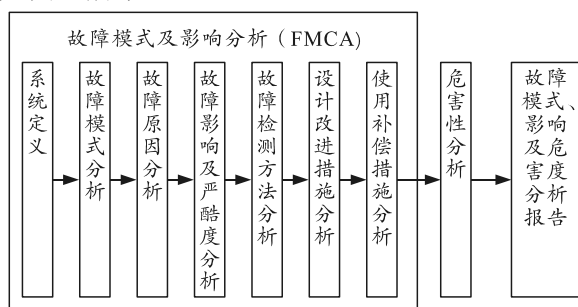


图1 FMECA实施步骤

1.2 性能与“六性”一体化设计

为解决“六性”设计中存在的问题，应在产品设计初期及时开展性能与“六性”的一体化设计工作。作为设备单位，应在方案阶段就开展该项工作。所谓性能与“六性”一体化设计工作是指，在方案设计阶段，开展性能设计时同步开展“六性”一体化设计工作。一方面，考虑设计方案是否能满足性能要求；另一方面，分析设计方案能否满足“六性”指标要求。同时，通过比较不同方案的优劣，选定更优的设计方案。在装备研制初期开展上述工作，可以及早发现设计方案能否满足要求，并尽早地进行迭代设计，可大大缩短研制周期、减少不必要的试验、节约研制成本。

常运用“功能法”在方案设计阶段开展 FMECA 分析工作，该方法主要用于细节设计不成熟的产品。首先列出装备所有的功能，然后分析每个功能可能的故障模式、原因及其影响，之后分析故障模式产生的原因与带来的后果。该方法的目的是分析研究系统功能设计的缺陷与薄弱环节，为系统功能设计改进和方案权衡提供依据^[5]。

1.3 FMECA在舰船装备“六性”工作中的应用

1) 在可靠性工作中的应用。

随着舰船行业对武器装备质量意识的提升，把舰船装备的可靠性设计放在了重要地位。舰船装备的可靠性设计工作是其他“五性”工作开展的基础。

FMECA 作为可靠性设计中一种常用、成熟、有效的方法，在可靠性工作中有着不可或缺的作用。在开展可靠性工作时，通过 FMECA 自底向上的分析，找到各层级的故障模式，并分析其产生的影响和危害，找到设计中的薄弱环节，提出有效的补偿措施，从而提高装备的可靠性。

2) 在维修性工作中的应用。

由于舰船在航行途中，维修能力有限；所以制定科学合理的维修计划，可大大提高舰船装备的战备完好率和任务成功率。

在开展维修性工作时，以 FMECA 分析结果为依据，通过开展故障类别、检测能力、故障率等的分析计算，结合舰船寿命剖面以及停航靠岸、坞修、小修的时机，明确预防性维修和修复性维修原则，制定定期维修检查计划。

3) 在保障性工作中的应用。

现代海战对舰船装备战备完好性指标要求日益提高，如何实现舰船装备与装备保障系统同步交付，保证我国海军战斗力的快速生成，是舰船装备保障性工作急需解决的问题。

在开展保障性工作中，首先运用 FMECA 技术分析故障模式，接下来分析不同故障应采取的补偿措施，找出可以通过维修解决的故障，并明确哪些故障需要预防性维修，哪些故障需要修复性维修。根据 FMECA 分析结果，合理制定备件清单，明确维修人员与工具，制定有效的维修和供应计划，科学编制《维修说明书》等资料，并定期对舰员进行理论、实操等形式多样的培训工作。

4) 在测试性工作中的应用。

测试性工作是在装备发生故障时，能快速准确地找到并隔离出故障的一种设计特性。高效地确定故障是维修性工作顺利开展的前提。

在开展测试性工作时，运用 FMECA 找到可能出现的故障模式，并确定该故障模式能否被检测到，随后进一步明确检测方法。装备测试性的评价指标为故障检测率 (failure detection rate, FDR) 和故障隔离率 (fault isolation rate, FIR)，可以通过 FMECA 分析中的“故障检测方法”和“故障率”来分析计算。

5) 在安全性工作中的应用。

武器装备的安全性是设计过程中需要重点考虑的问题，由于舰船上的装备种类以及人员繁多，一旦在使用过程中发生安全等级较高的事故，会造成不可估量的人员和经济损失；所以设计安全的舰船武器装备至关重要，装备设计时应将其安全性放在首要位置。

在开展安全性工作时，运用 FMECA 技术对故障的危害度等级进行分析，对于系统有致命影响的故障，需通过更换设计方案杜绝此类故障的发生；对于系统有中等或者严重影响的故障，需通过优化

设计方案或者制定合理的维修计划减少此类故障的发生。

6) 在环境适应性工作中的应用。

环境适应性是装备开展设计工作时必须考虑的内容，是装备设计满足其功能和性能的前提条件。舰船装备面对的工作环境复杂恶劣，具有高盐雾、高湿热等特点，在进行方案设计时需对装备在全寿命周期内的环境剖面进行深入透彻的分析，只有明确装备的环境应力，才能在方案设计时综合考虑，从而设计出故障少、可靠性高的装备。

开展 FMECA 工作时，需对故障原因进行分析，找出由于环境因素而导致的故障。首先应考虑是否

可以优化设计方案，消除该环境因素导致的故障，若不能再考虑是否可以通过科学的保障措施，减少该故障的发生。

2 应用实例

笔者以某舰炮装备测合机作为应用案例，介绍 FMECA 技术在舰船装备性能和“六性”一体化设计中的应用方法。

2.1 故障模式及影响分析

首先明确初始约定层次为测合机，约定层次为基地级可更换单元。之后对测合机展开故障模式及影响分析，详情如表 1 所示。

表 1 故障模式及影响分析

代码	产品或功能	故障模式	故障原因	任务阶段与工作方式	故障影响			严酷度类别	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施	概率等级	
					局部影响	高一层次影响	最终影响						
1	对引信进行测合装定	测合头未伸出	油缸未伸出	所有阶段	测合机不动作	不能装定引信	无	Ⅲ类	动作检查	无	无	E	
		测合头未转动	未取到伸出到位信号	所有阶段	测合机不动作	不能执行下一个动作	停机	Ⅱ类	测量检查	无	定期检测	D	
			电机故障	所有阶段	测合机不动作	不能执行下一个动作	停机	Ⅱ类	测量检查	无	无	C	
		精度超差	测合刀头打滑	所有阶段	测合机精度不够	起爆时间不对	不能毁伤目标	Ⅲ类	测量检查	提高设计裕度	无	无	C
			传动机构空回大	所有阶段	测合机精度不够	起爆时间不对	不能毁伤目标	Ⅲ类	拆卸检查	提高零件加工精度	无	无	C
		测合头未收回	油缸未缩回	所有阶段	测合机不动作	不能执行下一个动作	停机	Ⅱ类	拆卸检查	无	无	无	E

2.2 危害性分析

根据故障模式及影响分析中测合机的故障模式进行定义，如表 2 所示。

表 2 测合机危害性矩阵图定义

序号	故障模式	定义	垂线点定义
1	测合头未伸出	M1	1
2	测合头未转动	M2	2
3	精度超差	M3	3
4	测合头未收回	M4	4

根据危害性分析方法，测合机的危害矩阵图如图 2 所示。

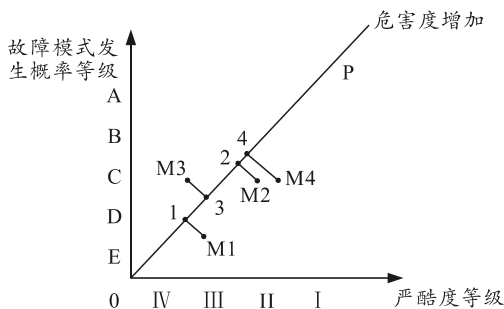


图 2 测合机危害矩阵

根据上图得到如下结论：测合头未收回和测合头未转动是影响测合正常工作的重要故障，由于这 2 个故障一旦发生，会造成任务中止，故其危害性较大。

2.3 FEMCA 分析在测合机“六性”分析中的应用

首先综合考虑产品使用环境和任务剖面，对产品开展方案设计；之后通过 FMECA 技术，分析测合机的故障模式、原因、影响、严酷度、概率等级等内容，并运用危害性分析方法得到对任务危害性较大的故障。

1) 提出强化结构设计、提高设计裕度和提高零件加工精度等设计改进措施。在产品方案设计阶段，使产品满足性能要求的前提下，通过优化设计，提高产品可靠性。

2) 提出定期检查的使用补偿措施，制定日常保养工作和计划，明确了日检、周检和月检的工作内容；制作维修工作卡，明确保障设备(工具)、备件、消耗材料、人力人员需求。

3) 将维修性工作的成果, 落实到产品《维修说明书》中, 并随产品交付用户; 另外, 制定了合理的培训计划, 定期对使用人员进行培训, 为产品提供完整的保障资源。

4) 结合梳理的测合机故障, 在测合机方案中增加传感器, 从而对测合头伸出、收回动作进行测试, 从而在故障发生时及时发现并隔离产品故障。

5) 通过产品危害度分析可知, 测合头未收回和测合头未转动故障一旦发生, 会造成任务中止, 故产品的危害性较大。测合机方案设计中增加传感器可有效避免上述故障发生, 从而对产品安全性设计提供保障。

3 结束语

笔者以某舰炮装备测合机为例, 论述了如何运用 FMECA 开展性能和“六性”一体化设计。分析

结果发现, 合理地运用 FMECA 技术可有效提升舰船装备质量; 因此, 应在舰船装备方案设计阶段深入开展 FMECA 工作。

参考文献:

- *****
- (上接第 10 页)
- [5] HO J, DAWES D M, KUNZ S N, et al. A comparative study of conducted electrical weapon incapacitation during a goal-directed task[J]. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 2020, 16(4): 613-621.
- [6] 孟波, 苏力. 远距离电击器的发展与创新技术研究——以一种新型远距离电击器为例[J]. *警察技术*, 2017(5): 79-82.
- *****
- (上接第 13 页)
- [2] 陈熙荣. 炸药性能与装药工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 27-41.
- [3] 王端颖. 熔注炸药装药在加压成型条件下的凝固冷却机理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [4] 邢书明, 荣振升. 加压凝固过程的协调方程[J]. *中国铸造装备与技术*, 1997(1): 46-49.
- [5] HAMMER J O, DIGRE K J, GJERSOE R, et al. RDX and HMX with reduced sensitivity towards shock initiation-RS-RDX and RS-HMX[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2008, 33(1): 20-24.
- [6] 花成, 黄明, 黄辉, 等. RDX/HMX 炸药晶体内部缺陷结果发现, 合理地运用 FMECA 技术可有效提升舰船装备质量; 因此, 应在舰船装备方案设计阶段深入开展 FMECA 工作。
- [1] 赵坤朋, 宋永磊. 直升机通用质量特性与性能综合权衡技术研究[J]. *直升机技术*, 2020(2): 35-40.
- [2] 张健, 于水游, 王雷. 装备通用质量特性关系概述[J]. *光电技术应用*, 2020, 35(4): 76-84.
- [3] 戈进飞. 军用电子设备结构设计“六性”分析[J]. *电子机械工程*, 2015, 31(2): 1-6.
- [4] 孔令倩, 尹超, 谢勇波, 等. FMECA 中危害性分析的方法选型及案例应用[J]. *新型工业化*, 2020, 10(4): 74-88.
- [5] 丁文飞. 故障模式影响及危害性分析系统开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- [7] 张喜, 马永忠. 电击武器对人体的电击效应和作用机理研究[J]. *电子世界*, 2018(9): 100.
- [8] 刘书雷, 邓启文, 沈雪石. 装备技术体系的战略地位、发展特征及启示思考[J]. *国防科技*, 2014, 35(3): 59-63.
- [9] 李志猛, 谈群, 董栋. 武器装备体系结构的能力视图[J]. *火力与指挥控制*, 2011, 36(11): 151-155.
- [10] 周华任, 马亚平, 郭杰. 基于五力的武器装备作战能力评估模型[J]. *火力与指挥控制*, 2011, 36(2): 11-14.
- 表征与冲击波感度研究[J]. *含能材料*, 2010, 18(2): 152-156.
- [7] 黄亨建, 董海山, 舒远杰, 等. HMX 中晶体缺陷的获得及其对热感度和热安定性的影响[J]. *含能材料*, 2003, 11(3): 123-126.
- [8] STOLTZ C A, MASON B P, HOOPER J. Neutron scattering study of internal void structure in RDX[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(10): 103527.
- [9] 董素荣, 陈国光. 弹药制造工艺学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [10] 金大勇, 王亲会, 牛国涛, 等. DNAN 基熔铸炸药的预整形同步块铸技术研究[J]. *爆破器材*, 2015(2): 48-52.