

# 航天产品故障模式及影响分析改进研究

崔铁铮, 李文钊

北京宇航系统工程研究所, 北京

收稿日期: 2023年7月22日; 录用日期: 2023年8月24日; 发布日期: 2023年9月1日

## 摘要

本文针对航天产品的具体特点和应用需求, 在GJB/Z 1391基础上结合型号工作实践, 从故障模式识别和风险分析两方面, 提出进一步提升航天产品FMEA效果的改进方法和实施途径, 有助于进一步识别产品薄弱环节并采取针对性的改进措施, 提高产品可靠性。

## 关键词

FMEA

# Research on Improvement of Failure Mode and Impact Analysis for Aerospace Products

Tiezheng Cui, Wenzhao Li

Beijing Aerospace Systems Engineering Research Institute, Beijing

Received: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Aug. 24<sup>th</sup>, 2023; published: Sep. 1<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

This article focuses on the specific characteristics and application requirements of aerospace products. Based on GJB/Z 1391 and combined with model work practice, it proposes improvement methods and implementation approaches to further improve the FMEA effect of aerospace products from the aspects of fault mode identification and risk analysis. This helps to further identify weak links in the product and take targeted improvement measures to improve product reliability.

## Keywords

FMEA

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

故障模式及影响分析(FMEA)是 GJB 450B《装备可靠性工作通用要求》规定必做的一项可靠性分析工作,也是一种分析产品所有可能的故障模式及其可能产生的影响,并按每个故障模式产生影响的严重程度及其发生概率予以分类的归纳分析方法。

航天产品 FMEA 工作是参考 GJB/Z 1391《故障模式、影响及危害性分析指南》开展的,经过多年的工程实践在故障模式识别、风险分析和工作效率等方面还存在进一步提升的空间[1]。本文结合航天产品的具体特点和应用需求,针对上述不足开展改进研究,提出了开展系统级 FMEA、多重维度分析、建立故障模式库、细化严酷度及发生可能性判别准则等进一步提升航天产品 FMEA 效果的改进方法和实施途径,可作为各级各类产品开展 FMEA 工作参考。

## 2. 故障模式识别

全面、准确识别故障模式是 FMEA 工作的重点,也是产品采取设计改进措施、提高可靠性的前提和基础。在产品开展 FMEA 时,往往存在故障模式识别不全面、不准确的情况,严重影响 FMEA 效果,因此考虑从以下几方面开展研究和改进,以提升故障模式识别的全面性和准确性。

### 2.1. 系统级 FMEA

以往航天产品 FMEA 工作一般是以单机级产品/设备为分析对象开展的,分系统、系统级 FMEA 仅是单机级 FMEA 结果的汇总,很少从系统的角度进行分析,系统级故障识别不充分,主要体现为:

a) 系统内部的故障往往不是由某个单机/组件故障引起的,而是两个甚至多个产品共同作用产生的,而单机级 FMEA 无法识别;此外,系统/总体设计上的缺陷和潜在故障、系统内部各单机/部件间的接口故障模式也容易忽略;

b) 由于系统内可能采取了冗余设计等措施或其它补偿、隔离等措施,单机故障未必一定会引起系统故障,而单机设计人员的对于系统设计情况的掌握具有一定的局限性,对于故障模式的分析判断可能会存在偏差。

因此,总体设计部门、分系统抓总部门应进一步开展系统级、分系统级 FMEA,而不是简单汇总单机 FMEA 结果,识别总体设计、分系统设计存在的潜在故障模式和薄弱环节,采取针对性的措施[2]。加强系统级 FMEA 工作的方式和途径有:

a) 在型号可靠性大纲、FMEA 实施方案等文件中,明确系统级 FMEA 工作计划,详细提出系统级 FMEA 工作时间节点、责任人、完成形式、审查方式等具体要求;

b) 研究并提出系统级 FMEA 工作要点,以指导系统级 FMEA 工作,如绘制故障树,重点围绕总体设计(包括总体方案、总体参数等)、分系统、分系统间接口、与外系统接口等方面,围绕设计、总装、使用等环节查找故障模式。

### 2.2. 多重维度分析法

开展 FMEA 时考虑采取多重维度分析法,全方位识别产品故障模式。多重维度分析法指重点围绕产

品各项主要功能(如完成动作、输出能量、结构保持、状/姿态控制等)进行故障模式分析:

- a) 动作维度。
- b) 输出维度。
- c) 结构完整性维度。
- d) 状(姿)态控制等维度。

多重维度分析法可根据具体产品性质和功能调整分析维度,每一维度中故障模式识别结果应取全集,如动作维度一般存在以下故障模式:

- a) 未动作,即该动作时不动作;
- b) 误动作,即不该动作时反而产生动作;
- c) 动作指标超差,即虽动作了,但动作相关指标不满足要求。

### 2.3. 建立故障模式库(清单)

建立典型产品故障模式库(清单)是一种十分有效的加强故障模式识别的手段,也是产品设计经验与技术的传承的一种表现形式。可梳理分析产品历史故障模式、历次 FMEA 开展情况,编制形成本产品的故障模式库(清单),作为后续相关产品 FMEA 工作的指导和参考,故障模式库表格形式可参考表 1,并根据产品技术状态更改、FMEA 迭代完善等进行动态更新。

**Table 1.** Failure mode library (list)  
**表 1.** 故障模式库(清单)

序号	产品类别	产品名称	故障原因	功能	故障模式			故障影响			技术准则或禁忌	改进措施	举一反三	...
					故障模式 1	故障模式 2	...	对局部影响	对高一层次影响	对最终影响				
...														

## 3. 风险分析

识别产品故障模式后,需根据故障模式的严酷度、发生可能性等级,判别风险指数评估风险。在产品开展 FMEA 时,往往存在严酷度、发生可能性等级判别依据少、风险指数判别不全面的情况,缺乏具体的、可供产品设计人员参考的细化严酷度及发生可能性判别准则,也没有体现出航天产品特点。因此本节结合航天产品实践经验,进一步细化了严酷度类别判别准则和发生可能性判别准则,对于 FMEA 工作是一种十分有效的补充[3]。

### 3.1. 细化严酷度类别

严酷度类别用于表征故障模式引发的后果严重程度,分为四类。航天产品可根据产品层级、产品类别等细化制定各级各类产品的严酷度类别判别准则,如表 2 所示。

### 3.2. 细化发生可能性分析维度

发生可能性等级用于表征故障模式的发生可能性大小,分为五级。针对航天产品特点,考虑在标准规范以发生概率为主进行发生可能性判断的基础上,增加其它分析维度,以更好的判断产品发生可能性[4],如表 3 所示。各级各类产品可以下表的基础上,根据各自产品的特点,细化或修改判别准则。

**Table 2.** Criteria for discriminating severity category of products at all levels

**表 2.** 各级各类产品严酷度类别判别准则

严酷度类别 产品类别	I (灾难的)	II (严重的)	III (轻度的)	IV (轻微的)
全系统/ 型号	导致人员死亡, 产品毁坏, 重大财产损失和重大环境损害	导致人员严重伤害, 产品严重损坏, 型号任务 失败, 严重财产损失和严重环境损害	...	...
分系统	导致人员死亡, 产品毁坏, 重大财产损失和重大环境损害	导致人员严重伤害, 产品严重损坏, 分系统 功能失效, 严重财产损失和严重环境损害	...	...
单机/设备	导致人员死亡, 产品毁坏, 重大财产损失和重大环境损害	导致人员严重伤害, 产品严重损坏, 单机/设备 功能失效, 严重财产损失和严重环境损害	...	...
结构类 产品	结构破坏、失稳, 导致人员死亡, 产品 毁坏, 重大财产损失和重大环境损害	结构功能丧失, 导致人员严重伤害, 产品严重 损坏, 严重财产损失和严重环境损害	...	...
电子电气类 产品	产品功能丧失, 导致人员死亡, 产品毁坏, 重大财产损失和重大环境损害	产品主要功能丧失, 导致人员严重伤害, 产品 严重损坏, 严重财产损失和严重环境损害	...	...
...	...	...	...	...

**Table 3.** Criteria for discrimination level of occurrence possibilities

**表 3.** 发生可能性等级判别准则

判别 维度	等级				
	A (经常)	B (有时)	C (偶然)	D (很少)	E (极少)
可靠性设计 准则落实情况	无相关可靠性设计 准则, 或已有相关 可靠性设计准则 但均未落实	已有部分相关 可靠性设计准则且 部分已落实	已有部分相关 可靠性设计准则 且均已落实	已有全面的相关 可靠性设计准则且 大部分已落实	已有全面的相关 可靠性设计准则且 均已落实
新设计或状态 更改验证情况	未通过工程计算、 仿真分析或原理 试验验证	仅通过工程计算、 仿真分析或原理 试验 X 种方式验证	通过工程计算、 仿真分析和原理 试验 X 种及以上 方式验证	通过工程计算和 额定工况下的实物 试验或结果可信的 仿真验证	通过工程计算和 拉偏工况下的实物 试验或结果可信的 仿真验证
历史故障 情况	发生过 X 次及以上 同类故障, 且有 未归零的问题	发生过 X 次同类 故障, 且有未归零 的问题	发生过 X 次同类 故障, 且有未归零 的问题	发生过 X 次同类 故障, 且已归零	未发生同类故障, 或 故障已归零且经飞 行任务或拉偏工况 试验/仿真成功验证
...					

### 3.3. 发生概率替代发生可能性

为进一步细化发生可能性判别准则, 考虑结合航天产品试验充分性分析和裕度分析结果, 用发生概率替代发生可能性, 增加试验充分性分析和裕度分析因素, 并部分实现通过定量计算方式判别发生可能性。

发生概率 P 计算公式如(1)所示, 即某故障模式的发生概率按两个等级中的最高等级确定。

$$P = \text{MAX}(C1, C2) \tag{1}$$

式中:

C1 为试验充分性分析得出的裕度等级, 共分 5 个等级, 从高到低分为 5、4、3、2、1;

C2 为发生可能性等级, 判别准则影响系数参考表 3, 其中等级 A、B、C、D、E 分别对应等级 5、4、3、2、1。

计算出发生概率后, 由发生概率和严酷度类别共同判断风险指数, 如表 4 所示。

**Table 4.** Risk index value rules

**表 4.** 风险指数取值规则

发生概率 \ 严酷度类别	I (灾难的)	II (严重的)	III (轻度的)	IV (轻微的)
A (经常, 5 级)	1	3	7	13
B (有时, 4 级)	2	5	9	16
C (偶然, 3 级)	4	6	11	18
D (很少, 2 级)	8	10	14	19
E (极少, 1 级)	12	15	17	20

#### 4. 总结

本文提出了开展系统级 FMEA、多重维度分析、建立故障模式库、细化严酷度及发生可能性判别准则等进一步提升航天产品 FMEA 效果的改进方法和实施途径, 有助于进一步暴露产品薄弱环节并采取针对性的改进措施, 提高产品可靠性, 可作为各级各类产品开展 FMEA 工作参考。

#### 参考文献

- [1] 周正伐. 航天可靠性工程[M]. 城市: 中国宇航出版社, 2007.
- [2] 刘志全, 宫颖. 航天产品 FMEA 工作有效性的思考[J]. 航天器工程, 2011, 20(1): 142-146.
- [3] 赵海涛. 卫星系统级设计 FMEA 方法探讨与实践[J]. 质量与可靠性, 2009(5): 28-30, 33.
- [4] 王晶燕, 饶炜, 孙泽洲. 嫦娥一号卫星飞行事件的系统级 FMEA [J]. 航天器工程, 2008, 17(2): 90-93.