

doi: 10.7690/bgzdh.2020.11.015

## 基于无维修使用期的电子装备可靠性二步设计法

樊葡萄

(西安财经大学行知学院, 西安 710038)

**摘要:** 为解决电子装备传统可靠性指标存在的弊端, 提出基于无维修使用期(maintenance free operating period, MFOP)进行可靠性设计的新方法。简述 MFOP 在国内外的研究和应用现状, 研究基于 MFOP 的工作流程, 给出 MFOP 的二步设计方法, 并对进一步研究工作和应用前景进行展望。该研究可为国内电子装备开展 MFOP 设计分析工作提供有效思路。

**关键词:** 无维修使用期; 可靠性二步设计; 可靠性分析

**中图分类号:** TP302.1 **文献标志码:** B

## Two-step Reliability Design Method of Electronic Equipment Based on MFOP

Fan Putao

(Xing Zhi College of Xi'an University of Finance & Economics, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** For solving the problem of traditional reliability index of electronic equipment, put forward the new method for reliability design based on maintenance free operating period (MFOP). Firstly, the research and application circumstances of MFOP are briefly introduced at home and abroad. Secondly, the working process and two-step design method are researched based on MFOP. Finally, further research and application of MFOP are prospected in this paper. The research can give reference for MFOP design analysis work of domestic electronic equipment.

**Keywords:** MFOP; two-step reliability design; reliability analysis

### 0 引言

当前, 电子装备面临高性能、综合化、小型化、高可靠等需求。可靠性作为电子装备最重要的通用质量特性, 直接影响装备作战效能, 制约着装备的维修性、测试性、保障性。电子装备在研制过程中, 普遍开展装备可靠性工程, 相关标准有 GJB450A、GJB1909A、GJB451A 等。

GJB1909A 对电子装备定义了 2 个主要可靠性参数: 平均故障间隔时间(mean time between failure, MTBF)和平均致命故障间隔时间(mean time between component failures, MTBCF)。前者是基本可靠性参数, 反映电子装备的战备完好性; 后者是任务可靠性参数, 影响电子装备的任务成功性。MTBF/MTBCF 是否达标是电子装备可靠性能否通过鉴定的依据。开展可靠性定量设计的目标即需达到 MTBF/MTBCF, 虽然 MTBF/MTBCF 能反映电子装备可靠性的整体水平, 但存在以下缺陷:

1) MTBF/MTBCF 的定义表明: 电子装备随时随地都可能发生故障, 只是发生故障的频率高低有差异; 因此, 必须时刻准备所规划的维修保障方案, 往往让保障方案难以承受。

2) 通过对部分电子装备的失效机理和实际使用可靠性缺陷<sup>[1]</sup>分析可知: 除随机失效外, 某些失效模式属于耗损型退化失效, 即装备一旦投入使用, 部分特性参数会发生随机退化, 当退化量达到阈值时, 即出现故障, 该故障模式和 MTBF 的概念冲突。

3) MTBF/MTBCF 只反映电子装备的整体可靠性水平, 不考虑电子装备的故障影响程度。尽管故障模式、影响及危害性分析(failure mode, effects and criticality analysis, FMECA)/故障树分析(fault tree analysis, FTA)在试图规避此缺陷, 但试验验证工作只关注规定时间内发生的故障个数, 不考虑故障影响。

4) 当前的电子装备往往集成了多个功能: 如美军的主战数据链 LINK16 的终端集成了数据通信、相对导航、话音通信等功能; 又如机载 CNI 子系统集成通信、导航、空中交通管制、敌我识别等功能。各功能对作战效能的影响并非一致, 仅用 MTBF/MTBCF 来定义其可靠性显然不合理。

5) 诸如相控阵雷达阵列中的少部分收发通道失效, 不会明显影响雷达主要性能, 难以对这类产品制定保障方案<sup>[2]</sup>。MTBF/MTBCF/MTTR(mean

收稿日期: 2020-06-21; 修回日期: 2020-07-24

作者简介: 樊葡萄(1979—), 女, 陕西人, 硕士, 讲师, 从事可靠性工程与应用数学研究。E-mail: watyz2017@sohu.com。

time to repair, 平均恢复时间)等指标均无法给出明确的回答。

综上所述,有必要对电子装备定义一个新的可靠性指标。

### 1 MFOP 的概念

1996 年,英国空军引入了无维修使用期(maintenance free operating period, MFOP),对维修保障费用进行控制;美国国防部也将 MFOP 作为研究重点,将其作为一个基本的可靠性维修性参数,并在 F-35 联合战斗机的部分子系统内进行了工程应用。国内,王锡吉等<sup>[3-7]</sup>也对 MFOP 作了介绍,并简述了其设计理念和要点。

MFOP 指在工作时系统不需进行任何维修或仅需简单的计划维修,且不会因为系统故障或性能衰退对用户的使用造成限制,能顺利完成所分配的任务,即使出现故障,系统仍然能正常工作。所有维修都集中在 MFOP 的维修恢复期(maintenance recovery period, MRP)进行。MFOP 不可能达到 100%的置信度,因此,用无维修使用期置信度或生存率(maintenance free operating periods, MFOPS)来度量 MFOP。MFOPS 是系统工作过程中成功完成免维修使用的概率度量。

### 2 电子装备可靠性设计

在以 MFOP 为目标的可靠性设计中,由于 MFOP 不可能达到百分之百的置信度,即失效总可能发生;因此,必须开展失效模式和效果分析(failure mode and effects analysis, FMEA),找到设计薄弱环节并采取针对性设计措施,将严酷度较高、对作战效能影响较大的故障模式发生概率进行控制。

传统上认为,电子装备的故障原因主要在于使用过程中环境因素(自然环境、诱发环境、电磁环境等)引发的结构破坏而造成的随机失效。在浴盆曲线底部时装备失效率近似恒定,即寿命服从指数分布,这些失效模型往往是造成非计划维修的主要原因。通过对失效机理研究及实际使用可靠性统计发现,电子装备还有另一类由于随机退化造成的故障,例如蓄电池性能退化、液冷系统防冻液防冻性能下降、真空电子器件寿命退化等。摸清这类失效模式往往有助于提升维修的计划性。当前,消除随机失效或削减随机失效所造成影响的途径主要通过降额设计、冗余设计、容错技术、可重构设计、通过综合化和集成化而实现的简化设计等。消除随机退化故

障模式的主要途径有 2 个:1)对已知的寿命件进行维修保障;2)通过可靠性试验,对随机退化型故障模式进行预测,寻求设计改进和使用补偿措施。

基于无维修使用期的电子装备可靠性设计包括 2 个步骤:1)初步设计以降低随机失效故障率为主;2)二次设计目的在于防御退化型失效模式,程序如图 1 所示。

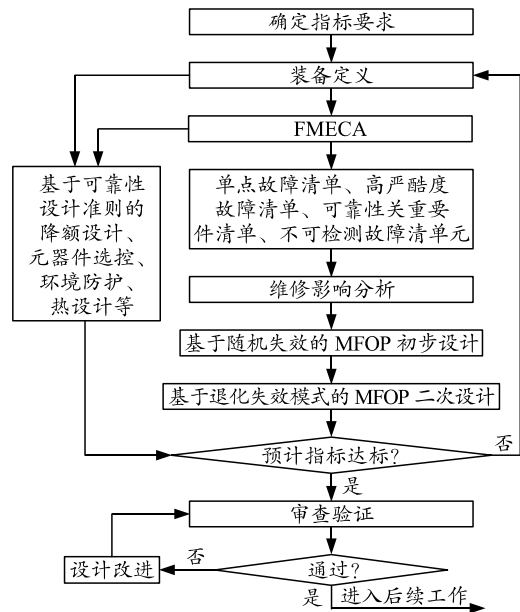


图 1 电子装备可靠性步设计法程序

#### 2.1 确定指标要求

根据装备作战需求、限定因素和相似产品等多方面信息,经论证确定顾客方可容许 MFOP、MFOPS、MRP 作为可靠性设计输入。

#### 2.2 装备定义

装备定义主要包括装备功能定义、功能框图、初步硬件组成、任务可靠性模型和约定层次定义等。

#### 2.3 FMECA

故障模型、影响与危害性分析。分析结果包括单点故障,可靠性关重件,严酷度为 I、II 类的故障清单以及不可检测故障清单。

#### 2.4 维修影响分析

针对上述故障模式及其对装备作战效能的影响,按 MFOP 的理念,对维修决策的影响分析,将故障模式分为 2 类:1)一类故障模式,直接影响 MFOPS 及装备主要作战效能,一旦发生一类故障模式,必须开展非计划维修作业;2)二类故障模式,发生后不直接影响装备作战效能,也不会造成严酷度过高的后果,可过渡到 MRP 阶段进行计划修复。

例如: 雷达装备发射无输出会直接导致雷达任务失败, 而雷达的中频模拟故障不直接影响作战使用, 只影响日常训练; 因此, 发射无输出为一类故障模式, 中频模拟功能故障为二类故障模式。

### 3 基于随机失效的 MFOP 初步设计

按 2 类故障模式的划分方式, 产品可靠性模型如图 2 所示。



图 2 系统可靠性框图

其中:  $U_1$  为所有的一类故障模式之并集;  $U_2$  包含所有的二类故障模式之并集。要提高 MFOP、降低 MFOPS, 必须减少  $U_1$  内的故障模式, 或者将这些故障模式转移到  $U_2$  中。降低  $U_1$  和  $U_2$  故障率的常见方法如下:

常规设计方法: 1) 元器件选控; 2) 简化设计; 3) 热设计; 4) 环境防护设计; 5) 电磁兼容设计; 6) 容差分析; 7) 降额设计。

故障模式由  $U_1$  向  $U_2$  转移的设计方法: 1) 余度设计; 2) 容错技术; 3) 故障软化; 4) 模块重构设计; 5) ……。

提高 MFOPS 的关键是控制  $U_1$  的可靠性, 包括通过上述常规设计方法降低故障率, 并通过余度设计等措施将  $U_1$  内的故障模式转化到  $U_2$  中。

根据上述假设和分析, 若只考虑随机失效对装备的影响, 在 MFOP 周期内, MFOPS 达标等价于:

$$R_{U1}(\text{MFOP}) \geq \text{MFOPS} \quad (1)$$

其中  $R_{U1}(t)$  为  $U_1$  的可靠度函数。该函数基于随机失效进行可靠性预计, 且只考虑  $U_1$  内的功能故障率; 因此, 要使 MFOP 设计达标, 首先应控制  $U_1$  的故障率。

还要进一步考虑退化失效模式的影响,  $R_{U1}(\text{MFOP})$  相比 MFOPS 应留有更多余量, 笔者基于退化失效模式对 MFOP 进行二次设计。

### 4 基于退化型失效模式的 MFOP 二次设计

大量事实表明: 除随机恒定失效外, 还有一些电子产品或电子部件在使用过程中的特性参数会发生随机退化现象。其常见特性退化轨迹为:

$$X(t) = X(0) + \theta t^b + \sigma B, t \geq 0 \quad (2)$$

式中:  $X(t)$  为可测量的特性参数;  $X(0)$  为特性参数的初始测量值;  $\theta$  是漂移系数;  $b$  为漂移形状参数;  $\sigma$  是扩散系数;  $B$  是标准布朗运动或与时间无关的标

准正态分布。在上述模型中, 当  $X(t)$  到达失效阈值时, 产品将出现故障。胡昌华等<sup>[1,8-9]</sup>对该类模型展开了大量研究工作, 给出了该类模型下产品的可靠度函数和参数估计方法, 即通过试验过程参数测量可评估产品的可靠性函数。

因此, 在样机研制的试验阶段, 同步对各类特定参数定期进行多次测量, 或单独规划可靠性增长试验, 对具有退化特征的参数进行识别, 对符合上述退化规律的参数, 可基于上述退化轨迹模型进行参数估计和可靠性函数预计。

若通过可靠性增长试验已识别出  $n$  个具有退化规律的参数, 通过测量数据可靠性评估, 其可靠性函数预计值为

$$R_i(t), t=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

系统可靠度为

$$R_S(t) = R_{U1}(t) \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (4)$$

考虑随机失效和随机退化双重影响时, 在 MFOP 周期内, MFOPS 达标等价于:

$$R_S(\text{MFOP}) \geq \text{MFOPS} \quad (5)$$

若按上式计算, 实际可靠性预计值 MFOPS 不达标, 应改进可靠性设计, 降低随机失效和退化失效的影响, 直到系统可靠度达到 MFOPS。

### 5 MFOP 内的维修保障规划

由于电子装备失效的随机性, 通过设计 MFOP 控制系统可靠性外, MFOP 内仍然可能发生严酷度较高、对作战效能影响较大的故障。需要对 MFOP 设计进行计划维修保障, 如余度单元部分失效维修、不可检测故障的人工或自动监测、寿命件的更换和不可改进退化型故障模式的预防性修复等。

### 6 结束语

笔者简述了 MFOP 在国内外的应用现状和内涵, 鉴于电子装备的随机失效和随机退化特性, 给出 MFOP 的二步设计方法。可为国内电子装备开展 MFOP 设计分析工作提供一种有效思路, 但要在装备型号中应用 MFOP 理论开展可靠性设计工作, 则需进一步做后续研究, 包括 MFOP 指标的论证方法、故障模式具体划分标准、无维修使用期内维修保障的具体规划标准、MFOPS 试验验证方法等。MFOP 的应用, 则有赖于顶层行政和技术管理部门的有力推动和电子装备的可靠性需求。