

装备故障测试方案优化的概率截止算法^{*}

吕建伟, 谢宗仁, 狄鹏

(海军工程大学管理工程系 武汉, 430033)

摘要 在装备研制的早期阶段,需要及时将装备的测试性指标和故障测试方案联系起来,并对测试方案进行优化。针对这些要求,首先,对常规故障模式、影响及危害性分析(failure mode effects criticality analysis,简称 FMECA)的不足之处,提出了对于 FMECA 故障模式的输入信息进行改进的设想和实施方式;然后,根据研究需求探讨并确定了故障的检测特性影响指标,分别给出了各特性指标的影响等级、影响值的确定方法;最后,建立了装备故障的检测特性指标综合评估模型,提出了测试方案的优化截止算法,采用典型示例对其进行了计算验证,并对其应用进行了深入探讨。结果表明,该方法能够有效弥补现有设计方式的不足,为在研制早期制订装备测试优化方案提供了理论依据。

关键词 武器装备;故障检测特性;研制早期;测试性;优化方案

中图分类号 TJ02; E920; TH165+.3

引言

在装备研制过程中,当人们通过作战需求分析、系统结构分析和类比分析等方式,提出了系统设备的测试性需求指标^[1-2]之后,在技术上就应该采取相应的测试性设计措施,来确保各系统设备的设计结果能够达到这些测试性指标,而且应在装备研制早期(例如方案阶段),在确定装备测试方案的时候,就能够知道所采取的设计措施,能否保证达到规定的测试性指标。从指标要求的角度看,概率型的测试性指标一般很少要求达到 100%,一般都在 80%~98%之间,这就说明,允许对于某些故障不采取诊断措施(允许漏检);从装备故障的角度来看,不是每一个故障都“值得”或“能够”采用机内测试(built in test,简称 BIT)等手段去诊断(检测+定位+隔离)的。例如:某类故障采用人工方式很容易发现和判别^[3];某类故障发生的概率非常低;某类故障的后果影响较为轻微等。

综上所述,在测试性设计中,人们所采取的设计措施,既要达到规定的测试性指标要求,还要以较低的代价达到要求,在选择测试方案时,还要对装备的故障有所取舍,在研制早期如何做到这一点,是一个很有价值的问题。目前,有的将其称为“诊断方案的

制订^[4]”,有的将其称为“测试方案的优化^[5-6]”,但是均不能完全满足以上要求。例如,有的只能适应装备的详细设计阶段^[7-10],有的对装备故障的取舍没有考虑到其本身的特性^[11-12]等。笔者就此问题给出一种基于改进的 FMECA 的概率截止算法。

1 常规的 FMECA 方法及其分析

FMECA 是针对装备所有可能的故障,确定每种故障模式对装备各层次的影响,按故障后果的严酷度及其发生概率确定其危害性。常规的 FMECA 包括故障模式及影响分析(failure mode effects analysis,简称 FMEA)和危害性分析(criticality analysis,简称 CA),见表 1 所示。

常规 FMECA 的实施可以划分为如下步骤。

1) 相关的准备工作。包括掌握装备结构和功能的有关资料,收集装备的使用、维修和环境条件等信息;定义装备及其功能和最低工作要求;同时根据需要来确定分析级别,即约定的分析层次。

2) 找出装备的故障模式,分析其原因及影响。

3) 确定装备故障的相关属性。包括确定故障的检测方法,找出可能的补偿措施,用定性或定量的形式确定故障模式危害的严酷程度以及对应的概率

^{*} 国家自然科学基金资助项目(71401171);军队院校 2110 工程 III 期建设基金资助项目(4142D4A3);总装预研基金资助项目(9140A19030214JB11273)

收稿日期:2014-02-28;修回日期:2014-05-05

等级。按照表 1 或类似的格式填写 FMECA 表,并生成危害性矩阵等。

表 1 故障模式影响及危害性分析(FMECA)工作表

Tab. 1 Failure mode effects and criticality analysis (FMECA) working sheet

初始约定层次_____阶段_____约定层次_____第_____页共_____页

代 码	产品标号或 元器件位号	功 能	故障 模式	故障 原因	故障影响			故障检测 方法	补偿 措施	严酷度 类别	概率 等级
					局部影响	高一层次 影响	最终影响				

分析人员_____审核_____批准_____填表日期_____

在实际工作中,如需要进行定量 FMECA,则需填写 CA 表;如果仅进行 FMEA,则确定概率等级和生成危害性矩阵工作就不必进行。常规的 FMECA 是一种适应面很广且在装备研制中广泛使用的工具,但就目前的使用结果而言,存在着形式化等不足之处,同时所能够提供的信息有限,现作具体分析。

2 故障模式的输入信息来源和种类

要确定装备的测试方案进而开展测试性设计,FMECA 是其中不可缺少的环节。但是在实际工作中,开展 FMECA 分析是一项看似简单、实则很难做好的工作,不仅需要具备较为丰富的工程经验,还要求掌握装备的工作原理和使用、维修情况,其中最重要的是找出产品的故障模式。以往人们进行 FMECA 分析时,主要是依赖分析人员自身的努力,借助经验和对装备的工作原理的掌握来完成对应的分析,这样就容易产生很多问题,如系统和设备的层次划分不当、忽视和遗漏某些故障、所提出的故障模式过于粗陋且没有针对性等,导致往往只是形式上完成了这项工作,失去或降低了进行 FMECA 分析对设计工作的指导意义。

笔者在进行了广泛深入的分析以后认为,在进行装备 FMECA 分析时,其故障模式的输入形式应从“基于经验和理论知识的分析”转变为“基于同类型装备以往的故障记录的分析”,以此形成 FMECA 的初始输入,在分析中还必须有效扩展所提供的故障信息,才能够有效地提高分析质量,并使分析结果满足装备测试性设计的需求。

在装备论证阶段,应广泛收集同类装备以往所发生的尽可能多的故障类型以及相关的较为详细的原始信息,从中提取、归纳所需要的导出信息。

首先,完成常规的 FMECA 分析所需要的信息,如表 1 中所需的故障模式的严酷度和发生概率

等,这些已是常规的工作;其次,为了满足面向故障的装备测试性设计的需要,还需要考虑、评估某个故障在技术上是否易于实现对故障进行诊断,即实现诊断的技术难易程度^[3],以及对应的人工诊断故障的难易程度,这两个指标涉及到对装备进行测试性设计的成本问题。为了提取这些信息并使之量化,需要分析人员、产品设计人员与使用人员共同努力,使原始故障信息中的定性描述变为定量评估结果;在以上工作的基础上,考虑到面向故障的测试性设计的效益问题,还必须考虑对装备各类故障进行修复的时间性指标,例如平均故障修复时间(mean time to repair,简称 MTTR)的绝对值大小,以及故障诊断时间在 MTTR 中的相对占比等因素。

以上各指标分别涉及到 FMECA 所提供的常规信息、测试性设计的成本和测试性设计,包括了故障模式的 5 个属性,指标之间相互独立,构成了面向故障的测试性设计所需的完备信息,这里将其通称为故障的检测特性指标,见图 1。

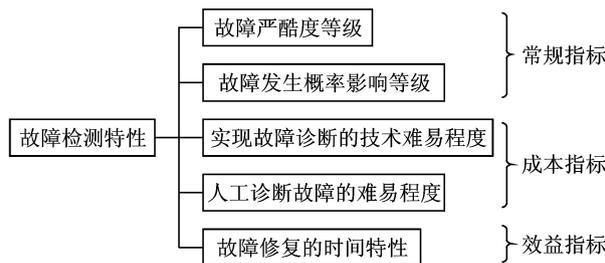


图 1 装备故障的检测特性指标

Fig. 1 Equipment failure test characteristics

与此相对应,在装备的方案阶段,应对系统设备承制方做进一步调研,通过新一轮的 FMECA 分析,预测新研制装备可能发生的故障,对论证阶段确定的故障模式进行修正,排除其中不大可能出现的故障,加入新预测到的故障,并分析得到新故障的检测特性指标。完成了以上工作,就可以对下面的建模和优化计算提供可靠有效的输入。

3 故障的检测特性指标及其影响值

根据以上分析,故障的检测特性指标包括故障严酷度等级、概率影响等级、实现测试的技术难易程度、人工诊断故障的难易程度以及故障修复的时间特性等 5 类。为便于评估和优化计算,这里将其影响值统一划分为 5 个影响等级。

1) 故障严酷度等级。故障严酷度一般定义为故障模式所产生后果的严重程度,包括灾难故障、致命故障、临界故障、轻度故障和轻微故障等。与严酷度影响等级“Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ”相对应,严酷度影响值 f_{i1} (i 为装备故障编号,下同)分别取为“5,4,3,2,1”。具体定义和等级划分如表 2 所示。

表 2 故障严酷度影响等级的定义和划分

Tab. 2 Definitions and grades about failure severity

严酷度类别	影响等级	影响值	严酷程度的说明
灾难故障	Ⅰ	5	会引起人员死亡或系统损坏的故障
致命故障	Ⅱ	4	会引起人员严重伤害,重大经济损失,导致任务失败的系统严重损坏的故障
临界故障	Ⅲ	3	会引起人员轻度伤害,一定的经济损失,或导致任务延误或降级的系统严重损坏的故障
轻度故障	Ⅳ	2	一种不足以导致人员伤害,经济损失较小,但会导致非计划维修的故障
轻微故障	Ⅴ	1	不影响完成规定功能,无需排除或可轻易排除的故障

2) 故障发生概率影响等级。其概率影响等级 f_{i2} 反映了故障发生概率的大小。这里设故障发生概率影响等级Ⅰ级最高,故障发生概率影响等级越高,相应地对测试性的要求也越高,故障模式发生概率特征及其影响等级如表 3 所示。

表 3 故障发生概率影响等级的定义和划分

Tab. 3 Definitions andgrades about failure probability

发生概率特征	影响等级	影响值	发生概率的说明	参考概率 p_{i2}
高概率	Ⅰ	5	经常发生	>0.20
中等概率	Ⅱ	4	有时发生	$0.10 \sim 0.20$
不常发生	Ⅲ	3	偶然发生	$0.01 \sim 0.10$
不大可能发生	Ⅳ	2	很少发生	$0.001 \sim 0.010$
近乎为零	Ⅴ	1	极少发生	<0.001

影响等级和影响值是一种为了便于进行评估计

算的表达方式。同时,为了考虑和计算设计措施与测试性指标之间的定量关系,表中最后一列采用 GJB1391-2006 中的范围,给出了相应等级的参考概率 p_{i2} (i 为故障编号),在收集数据时,最好能收集齐全所需信息,以便从统计数据中计算得到该指标,否则也可采用经过广泛核实的估计数值。

3) 实现故障诊断的技术难易程度^[3]。其技术难易程度 f_{i3} 是指在技术上达到预定的故障诊断目标(例如设置检测点或电路)的难度。确定该指标一般要综合考虑故障部位、装备的性质和诊断技术的最新发展等因素。

实现故障诊断的技术难易程度影响等级Ⅰ级为最高,该指标等级越高,相应地对测试性的要求也就越高,实现故障诊断的技术难易程度的 5 个影响等级见表 4。

表 4 实现故障诊断的技术难易程度影响等级定义和划分

Tab. 4 Definitions andgrades about technical difficulty degree of failure diagnosis

实现故障诊断难易程度	影响等级	影响值	实现故障诊断的技术难易程度的定义
很容易	Ⅰ	5	很容易实现测试性设计
容易	Ⅱ	4	较容易实现测试性设计
一般	Ⅲ	3	一般能实现测试性设计
较难	Ⅳ	2	较难实现测试性设计
很难	Ⅴ	1	很难实现测试性设计

4) 人工诊断故障的难易程度。这里指的是采用人工的形式,通过使用人员的感官意识到或发现故障,并较易进行故障定位、隔离的难易程度。其程度影响等级Ⅰ级为最高,人工诊断故障的难易程度等级越高,相应地对测试性设计的要求也越高,难易程度 f_{i4} 的 5 个影响等级见表 5。

表 5 人工诊断故障的难易程度影响等级的定义和划分

Tab. 5 Definitions andgrades about difficulty degree of failure diagnosis by manual acting

人工诊断故障的难易程度	影响等级	影响值	人工诊断故障的难易程度的定义
很难	Ⅰ	5	很难进行人工故障诊断
较难	Ⅱ	4	较难进行人工故障诊断
一般	Ⅲ	3	一般能实现人工诊断
容易	Ⅳ	2	容易能实现人工诊断
很容易	Ⅴ	1	很容易实现人工诊断

5) 故障修复的时间特性。在 GJB451A-2005 中,故障平均修复时间定义为产品维修性的一种基本参数,它是一种设计参数。从故障诊断和装备修复的角度来看,可以将故障修复的时间特性归结为

两个方面:a.故障平均修复时间(MTTR)的绝对值大小;b.故障诊断(检测、隔离)时间在MTTR中所占的百分比^[3]。因此,MTTR越长,故障检测、隔离时间在MTTR中所占的百分比越大,则平均故障修复时间对测试性要求的影响也就越大,相应地进行测试性设计的效益也就越高。为与前面的指标评估值统一起见,综合MTTR大小和故障诊断时间所占百分比这两个方面的特性,将故障修复的时间特性 f_{15} 指标仍分为5个影响等级,见表6。

表6 故障修复的时间特性影响等级的定义和划分

Tab. 6 Definitions and grades about time characteristics of failure repair

故障诊断 程度	MTTR				
	很长	较长	一般	较短	很短
百分比很大	I / 5	I / 5	II / 4	III / 3	III / 3
百分比比较大	I / 5	II / 4	III / 3	III / 3	IV / 2
百分比一般大	II / 4	II / 4	III / 3	IV / 2	IV / 2
百分比比较小	III / 3	III / 3	IV / 2	V / 1	V / 1
百分比很小	III / 3	III / 3	V / 1	V / 1	V / 1

在表6中,与“Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ”相对应的影响值取值分别为“5,4,3,2,1”。

4 装备故障的检测特性综合评估和测试性设计的优化算法

这里以故障检测率 P_D 为例给出优化算法。以 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示装备的故障特性模式集,其中 n 为故障模式的数量,则有 $x_i = (f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, f_{i4}, f_{i5})$ 。以 $F(x_i)$ 表示故障模式的检测特性综合指标,将其定义为

$$F(x_i) = f_{i1} f_{i2} f_{i3} f_{i4} f_{i5} \quad (1)$$

根据所收集的导出信息按照表2~6进行评估,可得到各故障模式 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 的单项特性影响值 $f_{ij}(j=1, \dots, 5)$,同时根据相关信息得到每个故障模式发生的参考概率 p_{i2} 。

按式(1)进行计算,即可得到装备(或其某个系统、设备)的各个故障模式的检测特性综合评估指标 $F(x_i)$ 。在此基础上对 $F(x_i)$ 进行排序,并依序计算其参考概率的累计值 $P_m = \sum_{k=1}^m p_{k2}$ 。若有

$$P_{m-1} \leq P_D \leq P_m \quad (2)$$

则表明应以标号 m 为截止点,标号 $\leq m$ 以前的所有故障模式都必须采用测试性设计措施而实现故障诊断。

由于式(1)综合考虑了故障模式的严酷度、发生概率、实现测试的技术难易程度、人工诊断故障的难

易程度以及故障修复的时间特性,用这种方法选出的待检测故障,是综合考虑了以上因素而要求进行测试性设计的,这就可以确保“能够、值得而且必须”检测的故障能够入选,其特性一般包括:故障后果较为严重-故障发生较为频繁-检测的技术难度不大-人工检测困难-故障的时间特性使得技术检测的效益较高;而具有相反特征的故障,在式(2)成立的前提下则会被舍弃。

5 优化计算示例和结果分析

设某系统要求的故障检测率 $P_D^* = 0.92$,这里采用调研所得的该系统故障信息(经合并与简化)对其进行优化计算。为简化分析计,表7中数据已经过 $F(x_i)$ 排序。

表7 某系统故障模式信息与评估结果

Tab. 7 The information and evaluation sheet to a system's failure modes

故障序号	f_{i1}	f_{i2}	f_{i3}	f_{i4}	f_{i5}	$F(x_i)$	p_{i2}	p_m
1	5	4	5	3	4	1 200	0.173	0.173
2	4	3	4	4	4	768	0.090	0.263
3	3	4	3	4	3	432	0.182	0.445
4	4	3	5	2	3	360	0.090	0.535
5	3	4	2	5	3	360	0.160	0.695
6	4	2	5	3	2	240	0.008	0.703
7	5	3	2	3	2	180	0.070	0.773
8	5	3	3	2	2	180	0.080	0.853
9	2	3	3	3	3	162	0.070	0.923
10	2	3	3	4	2	144	0.060	0.983
11	3	2	4	2	3	144	0.008	0.991
12	3	2	4	2	2	96	0.009	1.000

从表7中最后一列的计算结果可以看到,对于要求的故障检测率 $P_D^* = 0.92$ 而言 $m=9$,说明故障1~9是必须进行采取测试性设计手段进行检测的(包括选择检测参数、设置传感器或检测电路、进行信号采集和数据处理等),而对于故障10~12来说,可以不必采取任何测试性设计措施。此时,对应的故障诊断方案的测试性指标 $P_D = 0.923 > P_D^*$ 。如果要求 $P_D^* = 0.98$,则令 $m=10$ 即可。

在该例中,采用以上分析方法和结果不仅可以确保系统的故障检测率 P_D 满足规定的要求,而且可以使得入选的故障能够、值得而且必须进行检测。例如故障1,其特性值向量为 $x_1 = (5, 4, 5, 2, 4)$,对应着(后果严重,发生概率中等,技术上容易检测,人工检测难度一般,检测效益较高),对此故障理应进行测试性设计;而被放弃的故障在综合特性方面则恰好相反,故障12为例,其特性值向量为 $x_{12} =$

(3, 2, 4, 2, 2), 对应(后果轻微, 发生概率低, 技术上较难检测, 人工检测难度低, 检测效益较低), 对此类故障, 在系统设计已经满足了测试性要求指标 P_D^* 时, 以放弃检测为宜。

当然, 一旦出现 P_D 和 P_D^* 相差过大, 说明故障 x_m 发生的概率较高(对算法进行分析可知, 这种情况发生的可能性很小, $F(x_i)$ 排序靠后的故障, 其 p_{i2} 值一般较低), 则需要对 x_m 做进一步的细分, 以便确保不以过大的代价实现规定的测试性指标。

6 结束语

在装备测试性设计工作中, 当人们通过作战需求分析、系统结构分析和类比分析等方式, 提出了系统设备的测试性需求指标之后, 下一步的重要工作就是确定装备的故障诊断方案。对于在装备研制早期(包括论证和方案阶段)所确定的故障诊断方案有很多方面的要求, 包括能够满足规定的指标要求, 能够明确设计措施和所规定指标的一一对应关系, 允许忽略和放弃一部分故障(不采取设计措施)并以较低的代价实现故障诊断方案等, 笔者所提出的优化算法能够较好地解决以上问题。和常规方法相比, 该算法思路清晰, 针对性较强, 计算简洁明了, 有效弥补了现有方法的不足。同时, 如果原始数据较为可靠, 采用这种算法可以精确计算截止累计概率, 能够确保设计结果以较低的成本达到规定的测试性指标, 从而可以有效指导装备研制早期的测试性优化方案的制订。

参 考 文 献

- [1] 张延生, 黄考利, 陈建辉. 复杂装备测试性指标确定方法研究[J]. 军械工程学院学报, 2010, 22(6): 7-10. Zhang Yansheng, Huang Kaoli, Chen Jianhui. Research on determining TFOMs of complex equipment [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2010, 22(6): 7-10. (in Chinese)
- [2] Su Yongding, Qiu Jing. Modeling of testability requirement based generalized stochastic petri nets[J]. Journal of China Ordnance, 2009, 5(1): 60-64.
- [3] 陈春良, 王森. 典型装甲车辆测试性要求确定及验证研究[R]. 北京: 装甲兵工程学院, 2008.
- [4] 石君友. 测试性设计分析与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 94-97.
- [5] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 测试不确定条件下基于贝叶斯网络的装备测试优化选择技术[J]. 中国机械工程, 2011, 22(4): 379-384. Chen Xixiang, Qiu Jing, Liu Guanjun. Optimal test

selection of materiel based on bayesian network under test uncertainty [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(4): 379-384. (in Chinese)

- [6] 黄鑫, 连光耀, 常天庆, 等. 基于技术成熟度和二进制粒子群优化算法的装备测试优化方法研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(9): 1171-1176. Huang Xin, Lian Guangyao, Chang Tianqing, et al. Study on optimization method based on technology readiness assessment and binary particle swarm optimization for equipment test design[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(9): 1171-1176. (in Chinese)
- [7] Francesca G, Antonio V, Enrico N, et al. Modelling and solving optimal placement problems in wireless sensor networks[J]. Applied Mathematical Modeling, 2011, 35(1): 230-241.
- [8] Edward M, Kevin M, Jonathan N. Optimized sensor placement for damage parameter estimation[J]. Structural Health Monitoring, 2013, 12(3): 197-206.
- [9] 吴定海, 张培林, 任国全, 等. 发动机异常检测多目标优化方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(2): 214-218. Wu Dinghai, Zhang Peilin, Ren Guoquan, et al. Multi-objective optimization of diesel engine abnormal detection[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2): 214-218. (in Chinese)
- [10] 朱喜华, 李颖晖, 侯世芳, 等. 考虑传感器故障检测能力的PHM系统传感器优化配置方法[J]. 宇航学报, 2013, 34(9): 1253-1258. Zhu Xihua, Li Yinghui, Hou Shifang, et al. Sensor optimization placement method for PHM system taking the fault detectability of the sensor into account [J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(9): 1253-1258. (in Chinese)
- [11] Liu Ying, Ma Hailiang, Zhou Fangjun. Optimization of test points at circuit board based on network topology structure [J]. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2012, 169(2): 507-511.
- [12] Sen Deng, Bo Jing, Zhou Yang. Test point selection strategy under unreliable test based on heuristic particle swarm optimization algorithm[C]// Proceedings of IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference. Beijing, China; IEEE Reliability Society, 2012: 1-6.



第一作者简介: 吕建伟, 男, 1962年10月生, 博士、教授、博士生导师。主要研究方向为装备系统分析。曾发表《舰船总体任务可靠性的多阶段工程分析法》(《中国造船》2011年第52卷第3期)等论文。

E-mail: L2015wh@163.com.