

可靠性基础知识讲座

第三讲 系统可靠性分析

——FME(C)A分析

刘 春 刚

一、概 述

随着科学技术的发展，使用部门对产品提出了越来越高的要求。诸如卫星，火箭系统，其使用的零部件新，分系统和设备多，飞行环境变化大，精度高、寿命长，可靠性要求高，系统趋于复杂化。

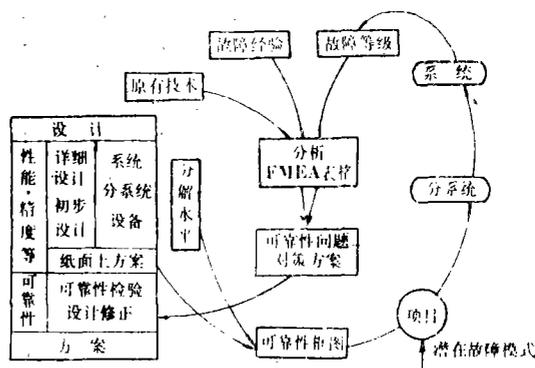
研制这样的复杂系统，周期长，耗费大，但生产量少，因而我们不可能像一般产品那样，通过选取较多的样件进行各种可靠性试验，待取得反馈信息后再修改产品设计。我们必须在产品设计阶段，就要考虑系统的可靠性。即在设计阶段就必须找出（实际是假定）系统或部件可能产生的所有故障模式，利用我们已经掌握的知识和积累的经验以及通过用过的类似部件或系统所出现过的故障事例等信息，找出故障原因和补偿措施，对系统进行较充分的分析，以期找出潜在故障，及早修改设计方案，做到防患于未然。这样才能保证产品“稳妥可靠，万无一失”。通常采取的是下面两种方法：

一种方法是从部件故障推至对分系统功能的影响，直至对整个系统任务有效完成的影响。这样从小到大地进行分析，是FMEA（故障模式及影响分析）法。另一种方法是从系统工作不正常找到分系统中对系统产生影响的部份，直至找到零部件级，这样从大

到小地分析，是FTA（故障树分析）法。这两种分析法，通过两种不同的技术途径，找到故障的因果关系。

二、FMEA分析

这种分析法的概要如图一所示：



图一 FMEA方法概要

对已经设计的系统，依可靠性框图及可靠性要求等，找出组成系统的全部分系统或各组成部分的全部故障模式，分析其原因，进而找出部件对其上位的装置或设备、分系统、直至系统功能的完成所带来的影响，指出可靠性的薄弱环节和可能出现的单点故障，并采取补救措施或修改原设计方案。

FMEA法是一种定性的分析方法。这种方法比较简单，不需要进行更多的数学计算，便于掌握和推广。但为了更好地完成

析工作,需要对系统或设备有一个较详细的了解。过去在我们的卫星或火箭发射之前,曾进行过“事故预想”活动,通过假设可能出现的故障,找出原因,影响和预防措施。它实际同于FMEA分析法,只不过过分依赖个人的经验和技术水平,带有主观性,且容易遗漏可能出现的故障,不够全面。所以有必要采取一套较为系统的、全面的、有一定标准格式的方法,这就是目前各国普遍采用的FMEA分析法。这种方法在美国的阿波罗飞行计划中,广泛地用来分析系统的可靠性和安全性,并且取得了很大成功。在国际通讯卫星计划实施中,也规定必须采取FMEA法进行分析。

三、FMEA的实施

1. 实施前的准备。

为了能有效地进行FMEA的分析,在实施之前,应该作好如下的准备工作。

a. 系统的组成。

一般系统由多个分系统组成,而分系统由多个设备组成,设备又由多个装置、组件和部件组成。分析前应搞清楚各环节之间的连接方式。如电缆连接、管道连接、螺钉连接、粘接等。

b. 系统的功能。

(1) 明确系统各组成环节在完成系统整个功能中所起的作用。

(2) 信号或力的输入和输出的关系,以及信号或力的传递媒介是什么。

(3) 尽可能了解如何消除相互干扰,以及由于下位级产生故障、破损、干扰等,对上位级会产生什么样的影响。

c. 掌握可靠性要求。

可靠性要求应明确地写在设计准则和设计说明书中,这样就可作为FMEA实施时的准备。否则由于可靠性要求不明确,即使找出薄弱环节,但应采取怎样的措施,改进到何种程度也无法确定下来。为此必须明确以

下几点:

(1) 系统的工作模式:明确系统是怎样工作的,各工作模式的时间长短等。

(2) 环境条件:温度、湿度、压力、气体尘砂、振动、加速度、冲击、反复加载等。

(3) 操作条件:工作模式中的工作次数、作用力和工作速度等。

(4) 可靠度的尺度:在规定的时间内,系统的可靠度、各环节的平均寿命和平均无故障时间等。

(5) 运行过程中具体故障的定义:系统或各环节性能劣化的允许限度和功能劣化的界限等都必须明确,否则无法确切地给出故障的定义。

(6) 维修方式。

d. 确定系统的分析层次。

进行FMEA分析时,到底分解到哪一级为止,这要依具体情况而定。但是在进行分析之前,必须确定下来。实际并非分解得越细越好,对于复杂的系统,如果分解到零部件级,这样虽然可以进行FMEA分析,但一方面会花费很多时间,另一方面,往往找出的薄弱环节和采取的措施也不一定都很合适。

e. FMEA分析结果的记录表格:事先准备好FMEA分析表格。依据分析的目的、要求及分解到哪一级的不同,表格中所列出的项目也不相同。项目的多少,以有利于既能说明问题,又能突出主要要找出的问题为准。后面列出几种格式,供参考(见表1、2)。

2. FMEA实施程序。

为了明了起见,把FMEA实施程序列于表3。

关于故障等级分类,因分析的重点不同,分类方法也不同。例如可以以完成任务为重点或以安全性为重点分类,也可以故障发生的次数的多少分类;还可以以严重度评分和对策分类。详见表4、5、6、7。

表 1

_____系 统		FMEA 表		填写日期_____									
_____分系统				制 表_____									
_____设 备				审 核_____									
				批 准_____									
序 号	对 象 名 称	功 能	故 障 模 式	故 障 原 因	故 障 影 响			故 障 检 测 法	工 作 阶 段	补 偿 措 施	严 重 性 等 级	发 生 概 率	备 注
					设 备	分 系 统	系 统						

表 2

_____系 统		FMEA 表		日 期_____					
_____分系统				制 表_____					
				批 准_____					
序 号	名 称	功 能	故 障 模 式	故 障 影 响		故 障 检 测 法	补 偿 措 施	严 重 性 等 级	备 注
				分 系 统	系 统				

表 3

序号	内 容	说 明
1	了解系统结构和功能	了解所分析的系统和分系统及以下各级之间的相互关系和连接方式，以及系统的使命和功能、工作阶段、可靠性尺度等FMEA实施程序，并准备好结构方框图。
2	分解层次的决定	决定FMEA分解到哪一级。一般系统的FMEA分解到分系统或设备级，分系统的FMEA分解到设备或装置级，而设备或装置的FMEA分解到组件或元部件。通常，设计初期把系统分解到各个分系统，后期详细设计时可分到各装置（有时为了分析问题明显起见，也可把系统按功能不同，先分成几个功能块后，进行FMEA分析，一般简单系统5—8个，复杂系统分至30—50个）。
3	作可靠性方框图	以各环节或功能块为单位，作出相应的可靠性方框图，可以对各环节之间的关系一目了然。
4	列举故障模式	集中设计、可靠性、管理、制造、维修等各方面人员，参照积累的其他型号产品的数据、信息，从各个不同角度找出各个环节或功能块的故障模式。
5	选定故障模式	把找出的所有的故障模式进行整理，从中找出对FMEA分析有较大影响的模式，略去影响较小的模式。
6	列出故障原因	尽可能参照过去试验报告和特征数据，集思广益，充分讨论找出故障的根本原因。
7	分析故障模式的影响	如果同一故障模式在不同运行阶段影响不同时，应该分阶段考虑。逐个找出该故障模式对本系统，上位系统邻近系统的影响。
8	故障检测法	给出故障的检测方法，如果能够给出故障的界限或特征值就更好了。
9	故障模式发生的概率	如果有可能的话可算出故障模式发生的概率。有时这项可略去。

(续)表 3

10	补偿措施	对于选定的影响较大的故障模式,所能采取的补救办法是什么?以便采取冗余,容错等措施。
11	故障严重性等级分类	依据故障对系统功能影响的大小,处理时的难易程度,时间的充裕程度以及对人身安全等影响程度进行分类,一般分成四级。
12	填写FMEA表格	把前面分析得出的各项,填入FMEA表格。
13	归纳整理FMEA	因为FMEA分析的目的是为了找出薄弱环节,进而找出补偿措施。从填写的表格中找出对系统或分系统影响严重的环节,归纳整理出来填入关键项目表。表中把故障模式,严重性等级及对系统的影响一并列入,可以使问题点更明显。
14	设计变更的研究	据前面分析,采取的补偿措施是否充分,方案设计是否有必要。

表 4 以完成任务的程度进行分类

等级	基 准
1 严重的	人员伤亡、任务无法完成。
2 重大的	主要的任务无法完成。
3 轻微的	任务小部分无法完成,利用率降低。
4 极小的	几乎没有什么影响。

表 5 以安全性为重点分类

等级	基 准
1 灾难的	人员伤亡,系统受重大损失
2 关键的	人员伤亡,系统受损,立即采取损失
3 临界的	能采取对策和控制
4 微小的	对人员、财产几乎没影响

表 6 以故障发生的频度分类

等级	故障发生分类	发生概率
5	极常发生的故障模式	75%以上
4	发生次数较多的故障模式	40~75%
3	发生次数一般的故障模式	15~40%
2	虽然发生次数很少,但还可能发生的故障模式	5~15%
1	几乎不发生的故障模式	5%以下

表 7 严重度评分和对策的分类

严重度评分值	分 类 基 准
1.0以上	变更设计,必须制订防止发生的对策
0.5~1.0	可变更设计,或有必要用某种手段防止发生
0.5以下	不用变更设计

把失效严重等级较高的环节,填入关键项目表格中,以便在研制过程中,加强特殊

表 8 关键项目清单

序号	名称	故障模式	影响后果	严重度	补偿措施	备注

管理。

3. FMECA.

FMECA是FMA(故障模式分析)、FEA(故障影响分析)和FCA(故障后果分析)三种分析方法的组合。FMEA是分析元部件的各种故障模式对整个系统的影响,而FMECA是在FMEA分析的基础上,再增加判断该故障模式影响的致命性有多大。这样就在FMEA定性分析的基础之上,又增加了定量计算分析的特点,可以使故障模式的影响的严重程度更加明确和便于比较。

a. 致命度(或严重度)C.

致命度C与故障模式对系统的影响程度E,故障模式发生的频度P和采取补偿措施所允许的时间 τ 的长短有关。可用下式表示。

$$C=E \cdot P \cdot \tau$$

公式中E、P、 τ 的分级,分别表示在表9、10、11中。

表 9 按影响度分类表

等级	影响度分类	评分
1	人员伤亡, 任务大部分放弃	9—10
2	任务主要部分无法完成	6—8
3	任务很少一部分无法完成	3—5
4	几乎没有影响	1—2

表 10 按发生频度分类表

等级	发生频度分类	概率
1	极易发生的故障模式	80%以上
2	相当容易发生的故障模式	51—80%
3	发生是很普通的	21—50%
4	有时发生	6—20%
5	几乎不发生	5%以下

表 11 对策允许时间分类表

等级	对策允许时间
1	对策没有充裕允许时间
2	对策允许时间很短
3	对策允许时间很长
4	对策允许时间无限制

表 12 致命度分析表

名称	致命故障			致命度的计算								
	故障模式	使用阶段	故障影响	可靠度数据来源	故障影响概率β	故障模式比α	环境系数K _E	使用系数K _A	基本失效率λ _G	工作总时间t	乘积 α·β·K _E K _A · λ _G ·t·10 ⁶	C _r

c. 致命度评分法。

致命度评分C_E可由下式求出。

$$C_E = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5$$

式中F₁、F₂、F₃、F₄、F₅的意义及分类见表13。

4. FME (C) A的评价。

FME (C) A法在可靠性设计中是一种行之有效的办法, 它有如下功能:

(1) FME (C)A法适用于研制工作的各个阶段, 可应用于电气、机械等各种系

b. 致命度指数法。

指在100万小时或100万次作动中, 系统可能出现的故障次数。公式如下:

$$C_r = \sum_{n=1}^j (\alpha \cdot \beta \cdot K_E \cdot K_A \cdot \lambda_G \cdot t \cdot 10^6) \cdot n$$

式中n: 致命的故障模式序号。n=1, 2, ..., j。

C_r: 致命度系数; t: 每次任务中动作的时间或次数; K_E: 环境修正系数; K_A故障率修正系数; λ_G: 基本失效率; α: 在全部故障模式中, 该故障占的比例; β: 该故障模式发生时, 造成致命的影响的概率。λ_G、K_E、K_A可由MIL-HDBK--217D中查出。

最后把计算的结果和参数填入表中, 见表12。

统。

(2) 通过分析可以查明所有的故障模式及其对于系统功能级的影响。并可定量地判断故障的致命度等级。

(3) 可以查明系统中的薄弱环节及单点故障, 从而提出补偿措施和修改设计方案。

(4) 通过分析, 从FMEA表格中可以找出故障严重等级高的项目, 列出关键项目表, 对表中项目在研制过程中予以充分注

表13 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 意义及分类

项 目	内 容	系 数
故障影响的大小 F_1	造成致命性的故障	5.0
	造成相当大的损失的故障	3.0
	引起功能丧失的故障	1.0
给与系统影响的程度 F_2	给系统2个以上的重大影响	2.0
	给系统1个重大影响	1.0
	给系统的影响并不大	0.5
发生频度 F_3	发生频度高	1.5
	有可能发生	1.0
	发生的可能性很小	0.7
防止的可能性 F_4	不能防止	1.3
	可能防止	1.0
	容易防止	0.7
改变设计的程度 F_5	大幅度地改变设计	1.2
	改变部分设计,但同原设计很类似	1.0
	几乎没改变设计	0.8

意, 这样有利于可靠性增长。

(5) 在设计分析和设计评审中, 可用该方法进行不同方案的比较和选择, 还可作为可靠性预测和评定的依据。

(6) 在试验、测试、实际运行过程中, 该方法还可作为故障诊断的工具。查出相互间的干扰, 进行有效屏蔽。通过分析可以选出最佳的测试点和遥测点, 以利于更好地监测系统。

虽然FME (C) A方法具有以上的功能, 但是当系统比较复杂时, 分析起来就很繁琐, 很费时间, 尤其是当环境效应影响较大时, 用该方法分析就较困难了。再者由于FME (C) A是一种单因素的分析法, 在研究系统各个故障模式的影响时, 是作为系统中唯一存在故障来考虑的。若有几种因素同时起作用, 才引起某种故障时, 用FME (C) A分析就比较困难了。这时可以用FTA, ETA (事件树) 或者FME (C) A与FTA、ETA综合使用。对于大型复杂系统的分析, 可借助于计算机, 用FMEA的矩阵分析法进行分析。由于篇幅有限, FME (C) A举例和FTE、ETA、FMEA矩阵分析等方法请参阅有

关书籍。

参 考 文 献

1. 小岛年彦著 FMEA·FTA解析 技法
2. 铃木顺二郎等著 FMEA·FTA 实施法
3. 石荣德著 失效模式影响及其后果分析
4. 梅启智、廖炯生、孙惠中编著 系统可靠性工程基础

