http://www.kekaoxing.com
维普资讯 http://www.cqvip.com

结合航天工程实际
谈开展"可靠性增长"试验的经验与体会

中国航天科技集团公司一院高级工程师　胡经畲

文　摘　指出了航天工程采用没有模型的可靠性增长试验方案的实用性，以及按 GJB1407《可靠性增长试验》进行的有模型的增长试验与没有模型的增长试验之间的关系，提出了可供参考的建议。

关键词　费效比　可靠性增长　试验　模型

一、前言

可靠性增长试验是为暴露产品的薄弱环节，并证明其改进措施能防止薄弱环节再现的一系列试验。

可靠性增长试验是在特定阶段(研制阶段的中、后期)、特定目标(实现可靠性增长)、特定试验条件(综合环境)下有计划的(有预期的试验目标值、有预定的试验方案)试验—分析—改进(TAAF)的过程，是一项工程试验。它通过 TAAF 流程主要解决系统性和批次性故障，重点是纠正设计上的薄弱环节，使产品在定型前达到可靠性设计指标要求。

航天产品具有"型号多、周期短、资源缺、价格高、子样少和高可靠"等特点。可是，多年来，在型号产品的可靠性试验中，无论是初样阶段还是试样阶段，最多只能安排生产一台样机专供可靠性增长试验之用，试验次数亦仅仅 1 次而已。为此，有必要去探索一种既能符合航天工程实际，又能为设计师系统所接受的方案来进行可靠性增长试验。

笔者在型号多、时间紧、经费相对不足的背景下，提出了下列建议："采用没有模型的增长试验方案"、"设备级、分系统级相结合的增长试验方法应多加提倡和支持以及充分利用其它试验信息，提高增长效果"等。这几点建议对于多个型号获得首飞试验成功起到了重要作用。

二、关于几点建议的综述

1. 采用没有模型的增长试验方案

目前，航天产品在工程上进行可靠性增长试验的方式大致分为两类：有模型的增长试验方案；没有模型的增长试验方案。

而没有模型的增长试验方案又可分为：与鉴定试验相结合的增长试验方案；采用综合环境步进应力来进行可靠性增长试验的方案。

有模型的增长试验方案应严格按 GJB1407《可靠性增长试验》的规定执行，即试验前要确定可靠性增长模型，绘制试验计划曲线，并按试验大纲的规定，不断地将观测的 MTBF 与计划的增长值进行比较，随时作出决策，对增长率和资源进行控制和再分配，以达到可靠性增长的阶段和最终增长到可靠性要求值。注意，标准中规定的可靠性增长模型是 Duane 模型和 AMSAA 模型。

可靠性增长试验一般采用定时截尾方案，总试验时间的计算与产品的任务时间、试验的要求值、产品的成熟程度以及预期的增长率、置信水平、故障数有关。此外，还与试验经费有关，工程中往往利用经验确定总试验时间。一般情况下，当 MTBF 值在 50h ~ 200h 时，试验时间为要求值的 5 ~ 25 倍。对于要求的 MTBF 值在 2000h 以上的产品来说，试验的总时间至少是要求的 MTBF 值的一倍。

GJB1407 中还规定，若试验过程中没有出现故障，可以允许在另外某一个固定时间截尾。例如，试验时间达到要求值的 2.3 倍，故障数为零，则可以以 90% 的置信水平确信受试设备的 MTBF 已达到要求

维普资讯 http://www.cqvip.com

值,从而提前结束试验。

由于受试验经费和周期进度等条件的制约,十多年来,航天系统一、二、三院多数采用没有模型的增长试验方案来进行可靠性增长试验,因为它更符合费效比的要求,是从工程实际出发的。

(1)与鉴定试验相结合的增长试验方案

采用这种试验方案必须事先拟制好一个符合工程实际的增长计划,对受试产品的总试验时间和资源作出统筹安排。如果订购方无特殊要求,工程上一般可将可靠性要求值分解为阶段值来拟定增长计划。

①初样阶段:指标分解后,初样阶段的阶段值低于要求值,它是现阶段受试产品可靠性增长到要求值的最长试验时间,其试验时间的确定与试验方案的设计参数、产品的任务时间以及置信水平有关。

②试样阶段:根据产品规范的可靠性要求,把可靠性增长与可靠性鉴定试验结合起来,用一次成功的可靠性增长试验替代可靠性鉴定试验。

采用这种试验方案时,对电子产品(甚至包括机电一体化的产品)而言,其总试验时间的确定,通常选用指数分布的定时截尾方案。即:

a. 根据阶段可靠性增长要求值 R_L,按式(1)计算平均故障间隔工作时间 MTBF,在这里用 θ_L 来表示。即:

$$\theta_L = -t/\ln R_L \qquad (1)$$

式中:

R_L——阶段可靠性增长要求值;

t——任务时间;

θ_L——平均故障间隔工作时间。

b. 当试验中不允许出现故障(即 $Z=0$)时,则:

$$T = \theta_L \cdot \ln(1/\beta) \qquad (2)$$

式中:

T——总试验时间;

θ_L——平均故障间隔时间;

Z——故障数;

β——使用方风险。

采用这种试验方案具有两大优点:

——符合我国国情,在经费有限和时间进度不很充裕的情况下,这种试验方案易于被设计师系统所接受,亦是航天工程上近十几年来常用的做法之一。

——可以考核现阶段产品的可靠性水平。

(2) 采用综合环境步进应力来进行可靠性增长试验的方案

步进应力试验方法是将受试产品按预定的时间间隔逐步增加应力,激发产品的缺陷、故障,通过寻找故障原因,分析故障机理、采取有效的纠正措施,以提高产品的可靠性。但必须注意以下几点。

①试验中所采用的步进应力,不应改变产品原来的故障机理。如果这个前提不能满足,说明选取的各级应力水平不够合理。

②选取应力水平时,要特别注意相邻应力等级之间不应相隔太近,以避免不同应力等级的互相干扰。

③最高应力不应超过产品所能承受的极限应力,以免带进新的故障机理。

步进应力试验通常采用温度循环再加振动应力量级的逐步递增。具体实施办法是将试验分成三段,每个阶段分若干个高、低温循环,每个试验段内可参考表 1 中的各项规定施加振动应力。

这种试验方法的优点在于使受试产品经受某种过应力试验条件,使其容易暴露设计和工艺的薄弱环节,有利于设计和工艺的改进。它的不足之处是由于过应力试验有可能造成估计上的差错以及试验结果难以直接给出可靠性量值。

航天科技集团一院曾为某型号研制电子产品,在某可靠性增长试验方案中规定:通过了可靠性寿命增长试验的产品,还要进行环境应力安全余量的试验,即在超过正常飞行环境或逃逸飞行环境的试验条件下,测定产品对环境应力的安全余量。如表 1 所示。

表 1 产品对环境应力的安全余量

应力等级	温度循环	湿度	电应力	随机振动	试验循环数
1	与使用条件相同			使用条件的 1.5 倍	6
2	与使用条件相同			使用条件的 2 倍	6
3	与使用条件相同			使用条件的 2.5 倍	6

2. 尽可能采用设备级、分系统级相结合的增长试验方法

目前,航天产品可靠性增长试验方法大致可分为以下几种类型:设备级(或称单机级)可靠性增长

http://www.kekaoxing.com
维普资讯 http://www.cqvip.com

试验;设备级与分系统相结合的可靠性增长试验;分系统级可靠性增长试验。

上述三种方法在工程上均有实例。实践告诉我们,这三种方法各有利弊。

①设备级(或单机级)增长试验是一种普遍采用的试验方法。这种方法在试验过程中产品一旦出现了故障,对寻找故障原因、分析故障机理和采取纠正措施等环节相对比较容易,完成 FRACAS 的时间相对较短。但由于单机可靠性指标高(一般在 0.997 左右),试验时间长、试验费用高,再加上单机级试验时,单机与单机之间的接口部分和电缆网部分的可靠性水平得不到考核,这些是它的弊端。

②分系统级增长试验是基于分系统为各单机的可靠性串联系统。其可靠性是各单机和连接电缆网可靠性指标的连乘,因此分系统的可靠性指标远远低于各单机的可靠性指标。可以肯定,用分系统级进行可靠性增长试验不但试验时间短,试验经费少,而且还可以考核各单机接口和电缆网的可靠性水平。不过,一旦试验过程中出现了故障,在多数情况下,寻找故障的原因时需要逐机检查,完成 FRACAS 比单机级试验时需要更多的时间。

③设备级与分系统级试验相结合的增长试验方法。这种方法是先用设备级做增长试验时把可靠性考核到某一量值,然后不足部分数值就用分系统级试验进行补充[如某型号各分系统(遥测、控制、外测安全等分系统)的单机指标一般都在 0.997 左右,单机级试验只考核到 0.99,不足部分数值由分系统级试验时进行补充]。这样做,即避免了单机级试验可能出现的弊端,又保留了分系统级试验时的种种益处。笔者认为,这种试验方法在航天工程上很有推广价值。

究竟采用哪一种试验方法来进行可靠性增长试验?应考虑从工程实际的需要与可能,采用"费效比"来分析评价各种方法的利弊,从中选择符合型号的最佳试验方法。这里有必要指出,在方方面面条件具备的前提下,用设备级试验与分系统级试验相结合的方法来进行可靠性增长试验更符合费效比要求。

3. 充分利用其它试验信息,提高增长效果

在工程上,制定综合的可靠性增长规划是一项系统工程。按规划要求,综合利用产品研制过程中所有研制试验(包括功能试验、环境试验、安全试验、性能试验、运行试验)得到的信息,都可以用来支持产品的可靠性增长试验。例如:

①故障数据的利用。通过统计分析估计可靠性增长的起始点;通过失效物理分析,为 FMECA 分析计算危害度提供数据。这些都是可靠性增长试验管理的先决条件。

②试验应力信息的利用。在各种试验中都必须对产品施加环境应力和工作应力。虽然各种试验中设置应力的侧重面不同,但是许多试验的结果都能为可靠性增长试验提供数据。例如测得的产品温度特性:高(低)温下产品温度的稳定时间,热点部位;产品的振动特性,谐振(吸收)点;以及各项性能对环境应力的敏感程度等。

③产品较低级别结构层次试验信息的利用。在制定可靠性增长计划时,要有意识地增加产品较低级别结构层次的试验,如元器件入库和装机前的检测,单板级的环境应力筛选,剔除不合格的试件,促使设备和分系统级在可靠性增长试验之前设计成熟,以此提高增长效果,尽早达到目标要求。

试验信息的综合利用,是节省费用和缩短周期的重要手段。可靠性增长试验除了要达到可靠性增长的目的之外,通常还可同时进行维修性和各种性能的增长改进。因此,成功的可靠性增长试验信息不仅可以作为鉴定中可靠性指标评定的依据,还可作为维修性和某些性能指标的评定依据。对于某些环境适应性试验或功能极限试验,如果使用的综合环境应力等信息必须与可靠性增长试验相一致,则应当尽量地将这几种试验安排在一起,以达到综合利用、节约资源的目的。

三、结束语

工程上,尤其是对于运载火箭一类的航天产品,加强可靠性增长试验,少做或免做可靠性鉴定试验,这种做法是符合航天工业行业标准 QJ1408A《航天产品可靠性保证要求》的总体要求的。

由于可靠性增长试验一般安排在研制阶段的中、后期(如初样转试样、试样阶段),其首要目的是排除对任务有关键影响和对用户费用有关键影响的故障,以提高任务可靠性。正因为如此,目前,多数产品在进行可靠性寿命增长试验时,采用了与鉴定试验相结合的增长试验方案,用一次成功的可靠性增长试验替代可靠性鉴定试验(需取得订购方的许可为前提)是可行的,也是符合标准规定的。