

航天电子产品可靠性增长试验的关键技术浅述

胡 经 畲

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘 要: 可靠性增长试验是以暴露产品的薄弱环节为出发点, 并证明改进措施有效, 以达到可靠性增长的目的。文中谈及的可靠性增长试验方案的选择, 试验过程中出现故障后试验如何往下进行、以及在试验结果评估中如何处置关联故障等是结合航天工程实践的具体经验总结。对开展好可靠性增长试验具有现实意义, 值得借鉴。

关键词: 电子产品; 可靠性增长; 试验; 关联故障

中图分类号: V 443 **文献标识码:** A

Key Technology of Reliability Growth Test for Avionics

HU Jing - yu

(China Academy of Launch, Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The Selection of reliability growth test, subsequent actions after occurrence of failure in testing and related handling of failures for test result evaluation were discussed based on the practical experiences in aerospace engineering.

Keywords: electronic products; reliability growth; test; related failure

1 概 述

可靠性增长试验是国军标 GJB 450 的一个工作项目, 是电子产品实现可靠性增长的一个有效途径。

可靠性增长试验是一项工程试验, 是为达到可靠性增长执行研制计划过程所采

用的一种试验方法。它是一个有目标、有计划的试验——分析——改进 (TAAF) 的迭代过程。在这个过程中, 电子产品处于实际使用环境或模拟环境的条件下经受试验。

可靠性增长试验本身只能暴露问题, 不能提高电子产品的固有可靠性。只有采

收稿日期: 2001-03-12

作者简介: 胡经畲 (1937-), 男, 浙江慈溪人, 中国运载火箭技术研究院高级工程师, 航天工业总公司可靠性专家组成员, 从事航天遥测总体非电量测量工作和航天电子产品可靠性研究。

取了防止电子产品在工作期间重复出现故障的纠正措施之后，才能达到可靠性增长的目的。因此，可靠性增长试验应与“故障报告、分析及纠正措施系统（FRACAS）”构成一个整体，要特别重视故障的分析、纠正措施及效果的验证几个环节。从某种意义上讲，故障原因的分析，比试验本身更为重要。因为故障原因的正确判断，乃是防止故障再现的关键。故障诊断过程，应设法使故障复现，以进一步证实对故障原因的判断是否符合实际。另外，一定要谨慎地采取纠正措施。因为可靠性增长试验要剔除的是电子产品系统性和批次性的故障，纠正措施对全部产品实施，而纠正措施是否真正有效，往往要到下一个试验周期才能得到证实。

在工程研制阶段，承制方为提高电子产品的可靠性可以有计划地按试验——分析——改进（TAAF）流程进行设计改进，而无严格的合同限制。如果投产之前已完全达到了可靠性要求，则一项成功的增长试验可以免去可靠性鉴定试验，这为十多年来航天工程中一贯采用的与可靠性鉴定试验相结合的增长试验方法提供了依据。

2 问题的提出

自20世纪80年代中期以来，我国航天科技领域开始重视可靠性增长以及可靠性增长试验技术的研究和应用。根据研制工作的需要，学习和借鉴美军标准，并结合航天电子产品实际，逐步开展了一些关键电子产品的可靠性增长试验工作，取得了对工程有指导意义的成功经验。

但是，在工程实践中我们不时地发现，航天电子产品的可靠性增长试验如果完全按照国军标 GJB 1407-92（它是参照美军标 MIL-STD-1635 所编制的）执行，就会在具体实施过程中暴露出周期进度和保障

经费等方面的两大问题。

（1）国军标 GJB 1407-92 规定，一般情况下，当 MTBF 的要求为 50—200h 时，试验时间为要求值的 5—25 倍。工程实践告诉我们，使用方（也包括军方）提出的 MTBF 要求值通常为 200 h，那么，按规定试验时间至少为 1 000 h。试验费用若按每小时 400 元计，则一次增长试验费用（尚不包括对试验过程中所出现故障的分析、纠正和验证费用）至少要 40 万元。显然，这种既费时又耗钱的试验，在工程上，往往难以实现，无法采纳。

（2）由于研制的型号多，而每个型号的各个分系统均要求在产品初样阶段和试样阶段各安排一次可靠性增长试验。当时（试验初期的 80 年代）能投入试验的“三应力（温度、随机振动和湿度）”试验箱只有一台（到 90 年代中期才增至两台），因而出现了需要试验的各型号的分系统多，而能投入试验的设备太少这两者之间的矛盾，有时这种矛盾甚至十分突出。

遵照提出问题、分析问题和解决问题的行为逻辑，针对上述情况，促使试验一线人员去研究和探索一条符合航天工程实际、具有可操作性的可靠性增长试验的路子。

3 没有模型的（与可靠性鉴定试验相结合的）增长试验方案

在试验经费和周期进度受限制的条件下，采用这种方式来进行可靠性增长试验是从工程实际出发的，它适用航天电子产品。

没有模型的可靠性增长试验方案，并不是说它没有试验时间 T 的计算公式和对试验结果的评估方法。它只表明将不执行

GJB 1407 中所推荐的 Duane 模型和 AMSAA 模型来进行可靠性增长试验。

这种试验方式必须事先拟制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。

3.1 初样阶段

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一个目标,它的试验时间的确定与试验方案的设计参数、产品的任务时间和置信水平有关。

3.2 试样阶段

根据产品规范的可靠性要求,与可靠性鉴定试验一并进行,用一次成功的可靠性增长试验替代可靠性鉴定试验。

对航天电子产品(甚至包括机电一体化的产品)而言,采用与可靠性鉴定试验相结合的方法进行可靠性增长试验时,其总试验时间的确定,通常采用指数分布的定时截尾试验方案。具体规定如下:

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

$$\theta_L = t / \ln R_L \quad (1)$$

(2) 当试验中不允许出现故障(即 $Z = 0$) 时,则:

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

式(1)、(2)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;

T ——总试验时间;

β ——使用方风险。

采用这种试验方式具有如下两大优点:

①符合航天工程实际,在经费有限和周期不很充裕的情况下,这种试验方式易为设计师系统所接受,亦是航天工程上十多年来惯用的做法;

②可以考核现阶段电子产品的可靠性水平。

在这里值得提醒的是:在国军标 GJB 1407 中有这样一段话,“如果试验过程中一直没有出现故障,可以假设其寿命服从指数分布而在另外某一时间结束试验。例如,试验时间达到要求的 MTBF 的 2.3 倍时,故障数为零,则可以以 90 % 的置信水平,确信受试设备的 MTBF 已达到了要求值,从而提前结束试验。”由此联想到工程实际中,使用方提出的产品定型时的置信水平 γ ,一般要求为 80 % (或 70 %),也就是说相应的使用方风险 β 为 20 % (或 30 %)。那么当采用没有模型的可靠性增长试验方案时,就可以利用公式(1)和(2),计算得出如表 1 (它的前提是试验中故障数 $Z = 0$) 所示的结果。

表 1 试验结果

置信水平 $\gamma/\%$	使用方风险 $\beta/\%$	$Z=0$ 时结束试验时间 (MTBF 的倍数)
90	10	2.31
85	15	1.90
80	20	1.61
75	25	1.39
70	30	1.24
65	35	1.05

从表 1 中可知,只有在试验过程中故障数为零时,才允许以一定的置信水平,确信受试产品的 MTBF 已达到了要求值,

从而提前结束试验。同时,表1亦为增长试验与鉴定试验的结合提供了可操作的依据。

4 一次成功的可靠性增长试验可以替代可靠性鉴定试验

可靠性鉴定试验是统计试验工作项目,虽然它不能直接提高产品的可靠性,但作为对产品工程研制阶段的全部可靠性工作成果的考核,可用来判定产品可靠性是否达到了预期目标。所以,即使在产品可靠性大纲中规定有可靠性增长试验,然而通常仍将可靠性鉴定试验作为一个重要工作项目列入可靠性大纲。

但是,当产品可靠性大纲中有可靠性增长试验时,由于可靠性增长试验是工程类工作项目,它确实能使产品的可靠性得到提高,并能用数理统计方法进行评估。因此,当可靠性增长试验成功后,并经订购方同意,可用可靠性增长试验代替可靠性鉴定试验。

GJB 1407《可靠性增长试验》前言中亦明确规定:“如果投产之前已完全达到了可靠性要求,则一项成功的可靠性增长试验可以免去可靠性鉴定试验。”

对于价格昂贵、试验子样较少、代表性差的航天产品,更应该加强可靠性增长试验,减少可靠性鉴定试验,尤其是在工程研制的试样阶段用一项成功的可靠性增长试验免去可靠性鉴定试验,更符合航天工程实际。它的突出优点体现在以下几个方面:

(1) 它符合我国当前元器件和加工工艺水平的现状,符合价格昂贵、小子样产品的质量水平,亦符合费效比的要求,一句话,它符合我国国情。

(2) 它避免了统计试验方案中过于绝对的“拒收”与“接收”的判别法则。允

许用 TAAF 流程对产品试验过程中出现的问题和故障进行分析、处理和采取有效的纠正措施,为试验创造一种宽松的环境。

(3) 它避免了订购方与承制方之间关于平均寿命 θ 设在 θ_1 , 还是 θ_0 (θ_0 是 MTBF 的检验上限) 处那种无休止的争论。如今,如果采用可靠性增长试验与可靠性鉴定试验相结合的方法,用一次成功的可靠性增长试验去替代可靠性鉴定试验,只要阶段的可靠性指标达到了要求,试验就可结束。

(4) 它可节省一笔用于可靠性鉴定试验的可观费用。

5 “重在增长”的工程观点应贯穿于可靠性增长试验的全过程

“重在增长”的工程观点,涉及到可靠性增长试验的方方面面,如增长试验采用什么样的方案;试验过程中出现故障后,试验如何往下进行;以及对试验结果评估时如何处理试验中出现的关联故障等等。这里只想对下列两个问题进行讨论和分析。

5.1 可靠性增长试验采用没有模型的试验方案时,当试验过程中出现故障后,试验如何往下进行的工程处理方法

“希望出故障”是可靠性增长试验时对故障所持的态度。对出现的故障采取 TAAF 流程进行分析和纠正,并用试验的方法验证纠正措施的有效性,以防止故障的复现,从而使产品的可靠性得以提高。

从理论上讲,采取正确纠正措施后的产品,相当于一台新投入的参试产品,再次投入试验后,只要在原先计算得出的总试验时间内不再出现故障,试验就可结束。

但是,工程上由于受试验经费和周期进度的制约,有必要作出一些符合工程实

际的处理方法。尽管这些工程处理方法由于与传统的可靠性理论不太符合,曾受到过一些可靠性理论专家的非议和否定,但是工程中确实是实实在在地在这样处理和实施。在这里,特别应该提醒的是:这些工程处理方法的实施必须得到型号总设计师系统的认可和批准。

(例)某型号某系统电子设备可靠性增长试验

按照某系统电子设备可靠性增长试验方案的规定,各单机的可靠性指标 R_L 、总试验时间 T 以及试验循环数如表 2 所示:

表 2 可靠性增长试验方案

R_L	T/h	试验循环数
0.999	331	48
0.997	124	18

(注:每试验循环时间为 7 (h),试验循环数应取整。)

就表 2 中的 $R_L = 0.999$ (或 0.997) 的电子设备而言,其试验循环数对应为 48 (或 18) 个。假设当试验进行至第 47 (17) 个时出现了故障,待故障改正有效后,试验将如何往下进行呢?从理论上讲,应继续进行 48 (或 18) 个试验循环,只要故障不再复现,试验就可结束。但是在工程上由于受试经费和研制进度等种种因素的制约,完全执行理论上规定的一套办法,确实难度很大。于是,根据十多年来工程实践经验的积累,提出了一种得到型号总设计师系统认可批准的工程处理方法。即:

(1) 在第 1~5 个循环内出现故障、要采取改正措施,并做两个循环的验证试验。确认改正措施有效后,重新进行增长试验,故障前的试验时间无效。

(2) 在第 6~48 (或 6~18) 个循环内

出现故障,要采取改正措施,并做两个循环的验证试验。确认改正措施有效后,除出现故障的那个循环无效外,其余试验循环的结果依然有效,然后再补做尚未做完的试验循环数。

5.2 试验结果的评估

(1) 评估公式

试验结果按公式 (3)、(4) 进行评估。

$$\theta_L = 2T / \chi^2_{(2Z+2), \gamma} \quad (3)$$

$$R_L = e^{-\nu \theta_L} \quad (4)$$

式 (3)、(4) 中:

χ^2 —— χ^2 分布的分位点值 (下侧);

Z ——关联故障数;

γ ——置信水平;

其余符号的物理意义同式 (1)、(2)。

(2) 处置试验过程中出现的关联故障的工程方法

可靠性增长试验过程中,发现与产品本身质量有关的关联故障,是我们所希望的。从理论上讲,对于关联故障 (即使已有效纠正了的),在试验结果评估时,均应该算入故障数。但是,凭着十多年来实践经验的积累,工程上如何处置试验过程中曾出现而又有效纠正了的关联故障?本文提出的“重在增长”的工程观点,确有独到之处。

“重在增长”的要点是:只要严格按照经评审通过、并由主管总设计师 (或领导) 批准的试验大纲进行的可靠性增长试验,凡是在试验过程中出现的关联故障,经故障机理分析,确定故障原因,采取相应的纠正措施,并在相同的环境条件下对纠正措施进行充分的验证,确认纠正措施的有效性,防止在以后的试验时间内该故障不再重现。从工程的角度考虑,可以把这样

的关联故障加以剔除，依然以零故障（即 $Z=0$ ）对试验结果进行可靠性评估。或者用另一番语言更直接地描述：即在试验大纲规定的总试验时间内把受试产品所有缺陷和问题均得以充分的暴露，并加以有效的改正，且不再复现。通过试验，使产品的可靠性确实得到了增长和提高，我们的目的也就完全达到。

至此，不难发现，只有当关联故障数 $Z=0$ 这个前提成立时，文中式（2）与式（3）才能完全等同，才能更好地按照没有模型的（与可靠性鉴定试验相结合的）试验方案进行航天电子产品的可靠性增长试验。

6 结束语

应该承认，“重在增长”的工程观点，从采用的试验方案到对试验评估的整套思路的方方面面，与至今已颁发的有关可靠性试验标准上的要求，以及已正式出版的可靠性试验理论书籍上的观点是有不小差距的。但是，笔者认为这些并不十分重要。因为，自80年代中期以来，我们在有限的试验保障费用和允许的研制周期进度等诸多条件的制约下，一直就采用没有模型的（与可靠性鉴定试验相结合的）试验方案对航天电子产品进行可靠性增长试验，可以

肯定地说，在地面实验室范围内，航天电子产品处于模拟使用环境条件下的这种试验，从工程角度判断，应该说是充分的。正因为如此，它确保了包括“神舟1号”运载器在内的多种型号首发飞行试验的圆满成功。

1998年，航天系统组织有关专业人员对这种试验方法进行了认真的总结、提高和完善，并在此基础上，由航天科技集团公司708所策划、组织编写了航天专业标准 QJ 3127—2000《航天产品可靠性增长试验指南》，经国防科工委批准，已于2000年9月颁布实施。

可靠性增长试验是一项系统工程，涉及到方方面面的诸多矛盾和问题。由于笔者水平和能力所限，文中提及的问题以及解决问题的思路和方法，难免有疏漏，甚至谬误之处，希望广大可靠性试验工作者多提指正意见，以便共同加以完善。

参考文献：

- [1] 祝耀昌. 可靠性试验 [M]. 北京：国防工业出版社，1994.
- [2] 何国伟. 可靠性试验技术 [M]. 北京：国防工业出版社，1995.
- [3] 安伟光，胡经奋. 可靠性增长试验方法的研究 [M]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，1996.

《电工电子产品环境试验国家标准汇编（第二版）》 2001年7月出版

本汇编汇集了截至目前我国正式发布实施的有关国家标准72项，其中有50项不同程度地采用IEC标准，内容包括：总则，名词术语，各种试验方法，试验导则及环境参数测量方法标准，第二版与第一版相比增加新标准3项，修订5项，邮购价157元。邮购地址：北京55信箱清平书店 金莉收，邮编：100053。开户行：招商银行展览路支行，帐号：0981106810001。户名：北京清平书店有限公司。电话：010-83154081。