

【摘要】论述了可靠性增长的基本概念和实现可靠性增长的各种途径,指出了可靠性研制试验和可靠性增长试验仅是产品可靠性增长工作的组成部分,是提高产品性价比的最好方法。详细阐明了可靠性增长试验与可靠性研制试验的关系和区别,指出了可靠性研制试验中最为有效的方法是高加速寿命试验。

【关键词】可靠性增长;可靠性试验;可靠性研制;可靠性增长试验

【中图分类号】TB114.3【文献标识码】C【文章编号】1003-6660(2005)05-0034-05

可靠性增长、 可靠性研制试验 和可靠性增长试验 及其相互关系分析

王建刚

(中国航空综合技术研究所,北京 100028)

2004年发布的GJB 450A《装备可靠性工作通用要求》中,将可靠性工作项目从原GJB 450中规定的18个工作项目扩展到了32个工作项目,其中,可靠性试验与评价系列增加了可靠性研制试验、可靠性分析评价和寿命试验3个项目。下面重点说明可靠性增长的基本概念和途径,可靠性研制试验及其与可靠性增长试验的关系,进而说明这两个试验与可靠性增长的关系。

1 可靠性增长

1.1 可靠性增长的基本概念

应当指出,只要对发现的缺陷进行了设计改进并验证了改正措施的有效性,产品的固有可靠性就得到了提高,就实现了可靠性增长。可靠性增长的过程通常是反复进行的,一般包括以下5个步骤:

- 发现故障源和/或问题;
- 将确定的问题反馈给设计人员;
- 设计人员对问题进行分析并确定改正措施,进行再设计;
- 按更改的设计再制造产品;
- 用再制造的产品验证改正措施的有效性。

上述5个步骤中,发现故障源是实现可靠性增长的关键和前提。发现故障源的方法和途径多种多样,遍及产品寿命期的各个阶段。FMECA、性能试验、环境试验、外场使用等过程都能发现故障,因而都有机会改进产品的可靠性,直至使产品达到最终的可靠性目标,即产品成熟期的可靠性要求。

1.2 可靠性增长的途径

可靠性增长工作贯穿于产品全寿命的各个阶段。从理论上讲,产品寿命期的各个阶段都可以实现可靠性增长,但是对于各阶段所进行的可靠性增长,在经济性和及时性方面又都各不相同。

1.2.1 产品寿命周期早期阶段进行的可靠性增长

产品寿命周期早期阶段实现可靠性增长的主要优点是费用低,更改设计方便、及时。其不足之处是早期设计更改所依据的信息往往包含许多未知因素,如工作条件及元器件之间的相互影响,因而实现可靠性增长的确实性较差。

早期阶段进行可靠性增长的主要信息来源有3个方面。

一是外部经验。包括现役相似系统使用信息、历史经验数据、技术经验、各种数据库及出版物。这些

【收修订稿日期】2005-06-30



信息在方案论证阶段就可利用,以通过更改早期设计来实现可靠性增长,因此具有很好的及时性和经济性。

二是分析信息。指对新研制系统进行分析、研究及评审所获得的信息,如可行性研究、权衡分析、可靠性预计、FMEA、故障树分析、热分析、潜在通路分析以及设计评审等所获得的信息。利用分析信息实现可靠性增长的优点是及时性和经济性较好,特别是对于高可靠性要求的产品,可以减少或避免某些费时和昂贵的试验。

三是试验信息。寿命周期早期阶段可利用的试验信息种类多、范围广。研制过程各个阶段、各个层次的产品在各种环境条件下进行各种类型的试验都能提供有价值的信息。应当指出,试验信息是实现可靠性增长最为通用的信息源,利用试验信息实现可靠性增长的主要优点是具有很高的确实性。试验信息经济性则主要取决于产品的特性。对于复杂的高可靠性要求的产品而言,通过试验实现可靠性增长的费用较高;对于可靠性要求较低的产品而言,组成该产品的零部件或元器件故障易于进行分析,通过试验实现可靠性增长的费用较低,效益较高。尽管试验费用是影响利用试验信息实现可靠性增长的主要障碍,但是,在实现可靠性增长的过程中,最经济有效的方法仍是在研制阶段合理安排各种可靠性试验,即可靠性研制试验和可靠性增长试验。这两种试验与可靠性验证试验相比,便于在产品研制早期确定故障模式,设计更改更容易,试验费用和风险更低,具有更好的及时性和经济性。其与环境试验及性能试验相比,具有更系统、全面和深入发现故障,确实性好,效费比更高的优点,因此,可靠性研制和增长试验是目前国外在实现可靠性增长过程中广泛采用的方法。

1.2.2 在产品寿命周期后期阶段进行的可靠性增长

在产品寿命周期后期阶段(包括生产和使用阶段)实现可靠性增长具有很好的确实性,因为在此阶段,硬件设计日趋成熟,未知信息越来越少,对于设计更改更易控制。在产品寿命周期后期阶段实现可靠性增长的主要途径是充分利用生产经验和使用经验以及部分试验所获得的信息。

(1)利用生产经验及有关试验信息实现可靠性增长

产品在生产过程中的各个检验和试验环节都可以暴露制造工艺缺陷以及设计的薄弱环节,通过剔除制造工艺缺陷及设计薄弱环节便可实现可靠性增长。

(2)利用使用经验及有关的试验信息实现可靠性增长

产品服役之后,可利用使用中设计缺陷,采取纠正措施,更改局部设计实现可靠性增长。其存在的主要问题是更改费用较高、经济性较差。尽管如此,在实践过程中,特别是对研制中未全面深入开展可靠性工作的复杂系统(如军用飞机),也经常采用这种方法。依据采取纠正措施的方式、内容和时机等因素,利用外场信息实现可靠性增长的方法大致可分为以下4类:

a. 自然增长

自然增长是利用外场使用所获得的数据,提出工程修改建议,然后制定改进计划送至承制厂进行改进或改装的过程。这一过程可随着故障的不断出现而反复进行,从而不断地实现可靠性增长。这是一种被动的、无计划的自然增长,其增长周期较长、效果差而且风险较大。美国20世纪50年代后期之前使用的武器系统均采用这种方法,例如,用了5年多的时间才使B-36飞机的使用可靠性增长了82%。

b. 通过可靠性改进计划实现可靠性增长

这种类型的可靠性增长是根据武器系统在外场使用和使用试验中发现的可靠性问题(故障),专门制定可靠性改进计划(包括改进设计及工艺),从而提高整个武器系统的可靠性,提高战备完好性,降低维修和保障费用。由于采用专门的改进计划,其增长速度比自然增长要快,可在较短的时间内达到所要求的可靠性水平。例如,美国B-58飞机是1952年开始研制,1956年首次试飞的,1959年开始服役并于1962年退役的轰炸机。针对该机在试飞后存在的可靠性问题,美国空军和通用动力公司于1959年实施了一项可靠性改进计划,至1961年3月,其可靠性就增长了72%,其增长速度比B-36飞机采用自然增长的方法高出数倍。

c. 通过改进改型实现可靠性增长

改进改型指的是根据外场使用经验对系统的某些关键分系统或设备进行重新设计,以提高系统的性能和可靠性。在产品的改进改型中,它与可靠性改进计划的主要差别在于对被改进的分系统或设备是通过实施正式的TAAF过程来提高可靠性,即按照规定的试验程序及方法进行试验和评估。因此,能在较短的时间内以较快的速度提高产品的可靠性,节省试验费用,减少试验时间。例如,美国F-15战斗机于1975年投入使用,一年后其MFHBF只达到0.68飞行小时

(设计指标为3.5飞行小时),在实施改进改型计划后,于20世纪80年代初,其MFHBF就达到了1.7飞行小时。

d. 通过使用试验实现可靠性增长

使用试验(如飞机试飞)是在实际的使用环境下对系统性能及可靠性进行连续评估,以测定整个系统是否达到规定的要求,同时通过对试验中发现的故障进行设计更改来实现可靠性增长。

使用试验可验证设计是否达到所要求的可靠性及维修性,但它不仅仅是为了发现故障,而是为了进行故障分析和采取纠正措施,从而达到可靠性增长的要求。

美国空军通过对机载雷达试飞这一使用试验及分析,发现了内场试验所没有发现的锡须所造成的问题(故障),并采取了改进措施,大大提高了雷达的外场使用可靠性。

2 可靠性研制试验(RDT)

2.1 设置可靠性研制试验工作项目的原因

众所周知,GJB1407对可靠性增长试验的目的、内容和方法都作出了明确的界定。例如,受试产品要有明确的增长目标并要评估增长后达到的可靠性水平。为达到预定的增长目标,需要很长的试验时间,通常为目标值的5~25倍,并在整个试验过程中要不断进行监控,不断评估可靠性增长情况以采取相应的措施,其试验过程较为复杂。为准确评估产品所达到的可靠性水平,其试验条件必须模拟真实环境。这些要求使可靠性增长试验(RGT)的应用受到一定的限制,其原因主要有以下几个方面。

a. 所需时间长,资源及费用较高

由于可靠性增长试验所需时间长,费用高,必然使得该试验不可能适用于所有的产品,而往往只能用于一些关键产品、高风险产品或复杂的产品。所谓关键产品,是指对系统可靠性有着重要影响的产品或新研制的、采购费用较高的产品和需作重大改型才能满足使用要求的产品。

b. 试验实施时间滞后,纠正措施实施较晚

RGT要求评估增长后达到的可靠性,必然使其应用阶段转向受试产品技术状态与最终技术状态相近或一致的研制阶段后期,因为此时评估可靠性值才有意义,才有可能替代可靠性鉴定试验。此外,对于研制阶段后期进行可靠性增长试验所发现的问题,采取纠正措施已相对较晚,使设计更改难度较大、成本较

高、易造成反复等问题。

c. 环境应力平和,激发故障效率差

RGT应用模拟真实环境的应力,而不是高强度的加速应力,其对故障的激发能力较差,从而降低了可靠性增长的效率。

由此可见,单靠可靠性增长试验的方法不能满足提高产品固有可靠性所需的要求。在工程实践中,应用更多的是加速应力的方法,以快速激发设计缺陷的研制性试验,即可靠性研制试验(RDT)。由于可靠性研制试验具有实用性和广泛性,但往往在研制过程中易被忽视,因此,GJB 450A将其专门列为一个试验工作项目,以为专门安排这种试验提供依据。

可靠性研制试验是一个典型的TAAF过程,用于产品研制阶段的早期。目前,国外广泛开展的可靠性强化试验或高加速寿命试验实际上就是可靠性研制试验。

2.2 可靠性研制试验的特点

目前,RDT没有一个规范化的试验设计方案和实施方法,而在工程中,只是根据实际情况选取应力、施加应力,对激发出来的缺陷采取纠正措施,直到自己认为适当的时候结束试验,所以急需制定相应的标准来指导其如何实施。

2.2.1 应用对象

可靠性研制试验是一个典型的TAAF过程,由于其没有明确的定量目标,且对施加的环境应力、载荷及其时间也无明确的规定,因此,试验方法的随意性较大,试验对象也没有明确的约束条件。要想通过施加应力来帮助激发产品内部的设计和工艺缺陷,使可靠性有切实提高的产品都可应用这一试验,因而可靠性研制试验适用于所有的研制产品。

需要指出的是,产品按设计图纸制成硬件后,要经历功能、性能和环境试验、安全性试验乃至电磁兼容性试验,这些试验中必然会发现一些设计和工艺缺陷,通过对这些缺陷采取纠正措施,不仅可促使产品达到这些试验考核的目标,同时也可提高产品的可靠性。这些试验可以看作是可靠性研制试验的组成部分,但并不是可靠性研制试验。

2.2.2 应用时机

从理论上讲,可靠性研制试验的最佳应用时机是在制造出样机之后,而且其功能和性能在实验室环境条件(常温、静态)下满足设计规范要求和经过环境鉴定试验之后进行。鉴于产品的可靠性和环境适应性均与环境应力和载荷应力密切相关,而且环境适应



性高的产品必然可靠,因此,在工程实践中,常常将环境适应性研制试验和可靠性研制试验一起进行,从而在样机制成且其功能和性能在实验室条件下满足规范要求后,与环境适应性研制试验一起开始进行可靠性研制试验。研制早期阶段的环境适应性研制试验及可靠性研制试验实质上都属于工程研制试验。两者的区别在于传统的环境适应性研制试验有一组环境极值(环境适应性要求)作为目标,但无论是环境应力和可靠性水平,可靠性研制试验均无具体的目标值或约束条件。

2.2.3 试验所用应力

RDT的应力可以根据产品特性、可靠性的提高幅度、试验设备条件、经费和进度等资源确定。一般采取用温度应力、振动应力、湿度应力和产品特别敏感的其他应力进行依次单独、组合或综合施加的方式,可以模拟或不模拟真实环境,也可以使用不加速或加速应力。但为了快速激发产品的内在缺陷,一般采用不模拟实际环境的加速应力。

以往的RDT,其施加应力一般不会超过规范或合同环境适应性要求中规定的最大环境应力,但近年来,施加应力已远远超出规定的应力值,且又不会激发现场使用中不会出现的故障,这一思路已在高加速寿命试验中得到广泛应用。

2.3 可靠性研制试验的发展

由于可靠性研制试验能与设计结合,并能经济有效和及时地提高产品的可靠性,因此,在工程中得到了越来越多的应用,并形成了两种相对规范化的试验方法。

一种试验方法就是可靠性增长试验(RGT)。这种试验就其本质而言,与可靠性研制试验没有区别,都是为了暴露产品内的设计缺陷并加以改进,以提高产品的固有可靠性,但增加了定量目标要求,导致增加了试验中监视可靠性增长和试验后评估达到可靠性水平的内容。为了确保评估结果的准确性,明确规定试验条件要模拟真实环境,因而应力强度较低,激发设计缺陷的能力较差。这些要求使该试验的实施时机向研制阶段后期方向移动,常常作为可靠性鉴定试验前评定产品可靠性的手段,其结果作为是否进行可靠性鉴定试验决策的根据之一。虽然GJB450及GJB450A中都将其作为一个独立的可靠性试验工作项目,但本质上它是属于可靠性研制试验的范畴。

另一种试验方法就是高加速寿命试验(HALT)。这种试验属一个典型的TAAF过程,该试验不去评估

试验后达到的可靠性水平,但期望通过施加高加速应力激发和消除现场中可能出现的所有故障模式,以得到使用中不出现故障的产品。

3 RDT、RGT与可靠性增长的关系

3.1 RDT与RGT的关系

从GJB 451A《可靠性维修性保障性术语》中对RDT和RGT的定义可以看出,无论是RDT,还是RGT都是通过施加环境应力和(或)工作载荷应力来激发产品内存在的设计和/或工艺缺陷,并加以分析定位,以采取设计和工艺改进措施,从而使产品的固有可靠性水平得到切实提高,即降低浴盆曲线底部的高度。

但应当指出,试验本身只能暴露产品中存在的设计和工艺缺陷,反映出产品的可靠性水平,而不能提高产品的可靠性,只是为设计人员改进产品设计提供了机会。产品设计人员根据试验暴露出的产品缺陷信息,进行分析定位,采取改进措施,从而使产品可靠性得到提高。

由于产品的可靠性是靠设计纳入的,因此首先应当提倡充分利用各种可靠性设计技术对产品进行精心设计。但是,即使是最有经验的设计人员所设计的产品也不可能没有缺陷,而这些设计缺陷仅靠图面检查或原理演示往往是难以发现的,经验证明,产品设计能否达到可靠性的要求,离不开试验这一重要手段。RDT和RGT均是与设计紧密结合的试验,是一个TAAF过程,国外常常把这两种试验,特别是RDT看作是产品设计的组成部分。

获取产品设计缺陷和各种有关故障信息的途径是多方面的,遍及产品寿命期的各个阶段。RDT和RGT仅是这些途径之一,但由于可靠性研制试验处于寿命期早期阶段,便于同设计过程紧密结合,能更加及时和经济地提高产品的可靠性,因此,越来越得到人们的重视和广泛应用。

3.2 RDT与RGT的区别

如上所述,RDT与RGT有一个共同的目标,就是提高产品固有可靠性水平,但在具体目标上,两者有一定的差别,RDT只是不断地暴露产品设计缺陷,以采取纠正措施,逐步提高产品的固有可靠性水平,而没有一个定量的要求,具体目标较模糊,试验做到什么时候结束,也没有明确的说明,具体则取决于研制部门的态度和决策,有一定的盲目性;RGT则有一个定量的可靠性目标,不仅要不断地暴露缺陷和进行改进,还要用试验验证改进措施的有效性,最后要对

产品的可靠性作出评估,以判断其是否达到预定的可靠性目标值。由于在具体目标上存在较大差异,使这两个试验在应用阶段、环境条件、试验方法上也有所不同。

例如 RDT 一般在研制阶段早期进行, RGT 则一般在研制阶段后期进行; RDT 使用的应力可以模拟/不模拟真实环境,而 RGT 由于要评估增长后达到的可靠性水平,必须模拟真实环境; RDT 往往采用步进应力的方法,不断发现深层次的缺陷,但对试验过程的控制不十分严格,而 RGT 主要靠施加固定不变的综合应力,使产品反复经受同样应力产生累积疲劳和损伤,暴露缺陷。

3.3 RDT/RGT与可靠性增长的关系

如前所述, RDT 和 RGT 同属于 TAAF 过程,但 TAAF 过程中的试验也不限于 RDT/RGT 两个试验,还有其他试验。TAAF 过程是实现可靠性增长的一个最为有效的手段,另一方面,可靠性增长不限于 TAAF 过程,因为从非试验方法得到故障信息后,同样也可以实施设计改进和提高产品可靠性,因此 RDT 和 RGT 仅是可靠性增长工作中的一个组成部分。

4 结论

a. 可靠性增长遍及产品寿命期的各个阶段,对于不同阶段,实现产品可靠性增长有着不同的途径和效果。RDT 和 RGT 是产品研制阶段安排进行可靠性增长工作中的组成部分,由于这种试验处于产品研制阶段,且有可能与设计工作结合进行,因此,其效果较为显著。

b. RDT 和 RGT 同属于 TAAF 过程,两者只是在目标、应用环境条件、应用阶段和试验方法上有所区别,因此,可以把可靠性增长试验看作是一种特定的可靠性研制试验。

c. 高加速寿命试验(HALT)或可靠性强化试验(RET)可以看作是可靠性研制试验的一种。其目标较可靠性研制试验更为广泛,不仅能大幅度地提高产品的可靠性,使产品在使用中几乎不出故障,而且可找出产品耐环境应力的工作和破坏极限。这种试验不适用于传统的按规范要求的应力条件设计的产品,而仅适用于按“技术极限能力”思路设计的产品。



(编辑:雨晴)

