

伺服系统加速可靠性增长试验应用与探讨

张宏峰, 王晓林, 邢文忠

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 加速可靠性增长试验是可靠性试验新的研究方向和应用领域, 对于可靠性要求高、任务时间长、产品子样少或价格昂贵的航天产品的可靠性增长和评价工作有良好的实施效果。对加速可靠性增长试验技术的基本原理、应用和实施的必要性、加速应力选取方法和注意事项进行了阐述, 结合某型伺服系统加速可靠性增长试验方案设计实例, 对传统可靠性增长试验方案和加速可靠性增长试验方案进行了比较, 为加速可靠性试验技术在伺服系统后续工程研制中的应用提供了研究思路和经验借鉴。

关键词: 可靠性试验; 加速可靠性增长; 伺服系统

中图分类号: V216.5⁺7 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)04-0082-04

Application and Probe into Accelerated Reliability Growth Test of Servo System

ZHANG Hong-feng, WANG Xiao-lin, XING Wen-zhong

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: Accelerated reliability growth test is the new research and application fields of reliability test, which brings good effect on reliability growth and evaluation of the product with high reliability, few samples or high cost. With respect to the accelerated reliability growth test technology, its basic principle, concepts, application, choosing methods of accelerated stress, and notices were introduced. Further, based on accelerated reliability growth test of a certain type of servo system, the comparison was made between accelerated reliability growth test and traditional one. The purpose was to reference for the application of accelerated reliability growth technology on later engineering development.

Key words: reliability test; accelerated reliability growth; servo system

可靠性增长试验是保证武器装备可靠性达到型号研制任务书要求和设计水平的重要手段, 在任务可靠度要求较高的航天产品研制中具有重要的地位^[1]。实际工作中经常使用常规可靠性增长方法, 但是存在试验周期长、费用高、激励不充分等情况^[2]。文中提到的加速可靠性增长方案能够快速激发产品设计和工艺缺陷, 进而提高和改进产品可靠性, 缩短航天型

号产品研制周期, 且能提高可靠性试验效费比。

1 加速可靠性增长试验基本原理和实施必要性

1.1 加速可靠性增长试验基本原理

加速可靠性增长试验的基本原理是保持产品的

收稿日期: 2011-04-04

作者简介: 张宏峰(1977—), 男, 工程师, 主要研究方向为惯导产品环境与可靠性试验技术。

失效机理不变,通过施加加速环境应力,使设计和生产中的缺陷以故障的形式加速,从而提前暴露出来,根据试验统计数据,运用加速试验设计的应力量级等价换算公式计算出正常应力下的可靠性特征量值。加速可靠性增长试验设计和数据统计分析一般要基于以下5个假定^[3]。

假定1:在正常应力水平 S_0 及加速应力 $S_i(i=1, 2, 3, \dots, n)$ 下,产品均有显著的可靠性正增长,这是开展加速可靠性增长试验的前提。

假定2:应力水平不改变寿命的分布类型,只改变分布参数,产品寿命服从某个同族的概率分布,在试验时间区间内的故障数服从同族计数过程。

假定3:产品在正常和加速应力水平下,失效机理不变的条件是某个分布参数和/或某些分布参数的函数不随应力改变。

假定4:增长试验前要设计并给出产品寿命分布参数与应力水平间的关系式,即加速方程或加速模型。

假定5:要给出不同应力水平下的时间折合公式,即:

$$F_i(t_i) = F_j(t_{ij}) \quad (1)$$

在概率意义下,产品在 S_i 下工作 t_i 时间相当于在 S_j 下工作 t_{ij} 时间。

1.2 实施必要性

部分航天军工产品可靠性指标要求极高,任务时间长,研制阶段子样少且价格昂贵,因此开展可靠性增长试验时可能无法多机进行,这样单机试验用时长甚至无法开展,占用设备和人力资源很多,试验费用高。采用加速增长试验方案,单机产品的可靠性增长试验时间将大幅度缩短,从而大大提高了试验效率,降低了大批试验的费用;另外,由于较快暴露产品缺陷能尽早改进设计水平,一定程度上缩短了产品研制周期。

2 在伺服系统中的应用

2.1 明确和准备的事项

对航天系统产品的可靠性进行分析和评价时将产品分解,确定若干薄弱环节,通过FMEA识别各环节故障模式,并筛选出对产品功能具有颠覆性的、严

重影响的且发生频率较高的故障。伺服系统属于典型机电类产品,其寿命分布并不完全遵循指数分布,但考虑到航天军工系统产品工作任务属于成败类型,可靠度要求极高,服役时间短,其服役寿命周期几乎不可能发生在耗损失效阶段,所以对伺服系统的可靠性分析与评价仍按照指数寿命特征进行,这也是航天系统产品多年来开展可靠性增长试验工作惯用的方法。

产品在正式开始增长试验前必须已经通过环境应力筛选和一段时间(采取2个完整循环)的综合环境应力试验,剔除掉早期缺陷和故障。然后进行加速应力增长试验,快速激发和暴露可能由于应力增加导致的耗损性故障,加速阶段完成后,最后再进行一段(采取2个完整循环)常规条件综合环境试验暴露在加速综合应力下产品可能会产生的耗损故障。环境应力筛选中出现的故障不统计但进行纠正,筛选时间不累积计算。后续试验阶段出现的故障全部进行统计,若未出现责任故障则说明产品现阶段可靠性水平已经满足总体和研制任务书要求;若出现责任故障,采取改进措施并经试验验证措施有效完成后续试验,产品经过此试验可靠性得到增长,满足现阶段规定值。加速阶段折合成典型服役环境下的试验时间与常规试验方案时间相同,由于并未统计第一和第三阶段常规试验循环时间,实际加速折算后的累积试验时间比常规要求试验时间要略长,因此对产品的可靠性具体指标和水平进行了偏保守估计和分析。

可靠性增长试验需要施加的应力主要是温度、振动、电应力和湿度应力,产品由于温度和振动应力引起的故障占到了93.6%,其中振动应力引起的故障比例是58.4%。北京自动化控制设备研究所同类伺服系统以往可靠性信息故障统计数据显示,由于振动应力引起的产品故障比例达到了78.8%,由于温度应力引起的产品故障比例占16.5%,基于这些考虑,加速应力主要考虑温度应力和振动应力2个变量。

2.2 增长试验加速应力设计

试验方案设计是加速可靠性增长试验成功的关键环节,而加速应力的选取是核心,必须要遵循的原则是产品在高应力水平下与典型服役环境下故障模

式和故障机理保持不变,选择加速变量时要选择对主要失效机理起促进作用的应力,并且这个应力便于在试验中进行控制和监测。加速试验方案设计步骤如下。

1) 建立伺服系统可靠性模型。

2) 进行综合工作环境应力分析,仅考虑温度应力和振动应力,在仿真模型上施加规定随机振动条件获取模型对随机振动应力响应分布情况,施加温度条件获取模型对温度应力响应分布情况,将这2种应力分布作为应力-损伤分析的输入。

3) 通过同类型结构产品以往可靠性增长试验中故障暴露情况和潜在故障分析确定产品关键故障,潜在故障分析是根据各种故障机理的应力损伤模型。将仿真模型上各潜在故障点的应力代入计算潜在故障发生时间,而首先发生的由同一故障机理造成的一个或多个故障被视为关键故障,关键故障处的应力-损伤模型决定了关键耐受应力和最早故障发生时间。

4) 确定加速试验应力和试验时间。综合以上仿真和分析结果确定产品的关键应力类型,加速应力重点针对关键故障,对于确定的关键故障,确认影响其发生的主要应力后,仅考虑该应力加速,其他影响微小的应力暂不考虑。基于这样的假设,通过该应力加速模型计算出的试验时间同样适用于温度、湿度和电应力,而试验效果与常规综合环境试验条件下可靠性增长试验效果是等同的。

2.3 设计实例

某型伺服系统产品根据任务书要求采用指数分布的无故障定时截尾试验方案,根据最低可接收可靠度 R_L 、任务时间 t 和置信度计算伺服系统常规可靠性增试验的时间、循环数如下:

- 1) 有效试验时间 t 为1 295.9 h;
- 2) 试验循环数 N 为87;
- 3) 总试验时间为2 209.4 h。

对伺服系统的潜在故障分析主要考虑温度和振动应力,根据仿真模型分析结果显示,该伺服系统关键故障模式为模块器件管脚断裂或焊点脱落、结构磨损破坏和机械强度降低导致功能下降,故障机理是随机振动导致的应力损伤疲劳累积,温度应力对该故障基本无影响。温度应力主要对产品的绝缘性

能、电气性能、润滑性能、材料老化等方面产生影响,结合该产品试验剖面和工作环境分析,试验剖面规定温度上、下限分别是60℃和-45℃,产品设计上、下限分别是85℃和-55℃,即使考虑温度应力加速也不能超出产品设计极限应力,所以可选择较小的加速值。这样的增幅温度对于快速激发故障并无实质促进作用,分析产品可能遇到的极端使用和工作环境也在-45~60℃之间,综合以上几点,此次不考虑试验温度应力加速,仅考虑振动应力加速。电应力施加参照《航天产品可靠性增长试验指南》:循环周期内50%时间施加标称电压,25%施加上限拉偏电压,25%施加下限拉偏电压。由于产品工作在密封舱段环境内,无典型湿度工作环境,本次试验湿度应力全程不进行单独控制,试验空气湿度按照航天军用产品增长试验实验室环境条件要求执行。

增长试验的顺序是先进行2个循环的常规应力综合环境试验条件,然后进行振动应力加速、其他应力不变的综合环境试验,最后再进行2个循环的常规应力综合环境试验。通过可靠性仿真分析和以往产品故障信息统计,伺服系统的关键应力是宽带随机振动,故障机理是一阶随机振动激励引发的力学疲劳,针对此情况进行振动应力加速设计。

MIL-STD-810F和GJB 1032-90中都对振动应力加速提供了振动等价公式,均描述了不同振动谱密度下应力作用的疲劳等效关系,给出了通过加大振动量级、缩短试验时间的等效公式。MIL-STD-810F的振动等价公式见式(2),试验量级功率谱密度在增加1倍的情况下,产品在高量级振动1 h,相当于在低量级下振动2ⁿ h,那么产品在高振动量级下工作1 h,就相当于在低振动量级下工作2ⁿ h,见式(3)。

MIL-STD-810F的应力加速折算公式如下:

$$W_0/W_1 = (t_1/t_0)^{1/n} \quad (2)$$

式中: W 为随机振动量级, W_0 为正常值, W_1 为加速值; t 为试验时间, t_0 为正常值, t_1 为加速值; n 为折算系数,MIL-STD-1540C推荐 $n=4$,GJB 1032中推荐 $n=3$ 。

时间折算公式如下:

$$t_1 = (W_0/W_1)^n \times t_0 \quad (3)$$

加速振动应力要保证不因应力量级的加大而导致新的失效模式和机理产生。在产品研制中,产品鉴定试验的功能和耐久振动试验是产品经受的最大

振动量级,本加速方案中振动应力的选取以不大于鉴定试验量级的1/2为准则,以保证不产生故障模式和机理的变化以及过应力试验。为真实模拟产品工作振动环境,加速随机振动谱形与典型服役振动环境要求保持一致。折算系数 n 结合伺服系统可靠性实际水平和型号审批意见确定为4,对试验阶段振动应力按系数4进行加速,加速后的试验时间、循环数如下:

- 1) 有效试验时间 t 为298.1 h;
- 2) 加速试验循环数 N 为20;
- 3) 总试验时间为427 h。

加速后与常规可靠性增长试验的时间比较见表1。

表1 伺服系统加速可靠性增长试验方案比较

Table 1 Servo system accelerated reliability growth test method comparison

项目	试验时间/h	循环数	随机振动量级($\times g$)		总试验时间/h	试验费用/万元
			待机阶段	飞行阶段		
加速前	1 295.9	87	1.033 1	3.078 3	2 209.4	140
加速后	298.1	24	1.1	3.7	529	32

振动工装或夹具的传递和频响特性,确保随机振动控制量级增加后,其关键部位和有代表性的监测谱线振动响应比例增加,监测通道响应量值不能减小或过度放大。

2) 等效加速系数选择是方案设计中核心内容之一,合理选择加速系数既要能快速激发产品故障,又要保证加速折算等效效果。由于没有太多的经验和应用案例可以借鉴,需要参考多方意见和经验信息。

3) 关键故障分析决定了加速应力的选择,关键故障定位不准确加速应力选择就会不正确,这将直接导致加速试验失败和结果的不可信。因此如何利用基于故障物理可靠性技术确定关键故障和建立产品可靠性信息数据库,是今后开展加速试验技术需要关注的工作。

4 结论

加速可靠性增长试验是一个新的研究和应用方向,能够较好地解决模拟试验的消耗和效率问题,能快速提高和判定产品可靠性水平。文中提到的伺服

从表1中可以看出,采用加速可靠性增长方案后,试验时间和费用缩短80%左右,大大节约人力、物力和试验经费,试验效费比大大提高,也在一定程度上缩短了产品可靠性研制周期,在短时间内使产品的可靠性水平得到增长,并根据试验数据和故障统计信息进行了产品本阶段可靠性量化评价。

3 需要关注的问题

为使加速试验取得比较可信和可靠的实施效果,在实际应用中以下3点需要引起型号研制人员和试验设计实施人员的关注和思考。

- 1) 针对加速变量选择振动应力的情况,要考虑

系统可靠性增长实例,按常规可靠性增长方案总试验时间需要2 209 h,试验经费至少需要140万元,而采取加速试验方案后,试验时间缩短至529 h,试验经费降至32万元,有效降低了人力资源、试验设备资源和试验经费的耗费,同时快速提高了产品可靠性水平,保障了研制进度,说明加速可靠性增长方法具有很好的应用价值和空间。

参考文献:

- [1] 杨为民. 可靠性、维修性、保障性总论[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [2] 何国伟. 可靠性试验技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [3] 周源泉,朱新伟. 论加速可靠性增长试验(I)新方向的提出[J]. 推进技术,2000,21(6):6—9.
- [4] 周正伐. 航天可靠性工程[M]. 北京:中国宇航出版社,2006.
- [5] 张志华. 加速寿命试验及其统计分析[M]. 北京:北京工业大学出版社,2002.