

可靠性强化试验在失速告警振杆器上的应用

徐凯, 李志强, 郭瑛, 于德淼, 姚征

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘要: 介绍了可靠性强化试验的概念及其国内外研究现状。以某型失速告警振杆器为对象, 通过设计试验剖面, 制定了相应的可靠性强化试验方案, 并进行实际应用。在试验实施过程中成功地将产品缺陷激发为可被检测的故障, 有效地发现了产品设计的薄弱环节。通过分析其故障模式和失效机理, 提出了有效的改进措施, 提高了产品的健壮性和可靠性。

关键词: 失速告警振杆器; 试验剖面; 可靠性强化试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.03.006

中图分类号: V241.01; V241.06 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)03-0021-05

Application of Reliability Enhancement Testing in Stick Shaker

XU Kai, LI Zhi-qiang, GUO Ying, YU De-miao, YAO Zheng

(School of Reliability and System Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The concept and worldwide research situation of reliability enhancement testing was introduced. A stick shaker was taken as the object, and the reliability enhancement testing plan was established through designing of test profile. Potential design flaws were successful stimulated as detectable faults during practical test application, which effectively finds the weak points of the product's design and development. Effective improvement measures were put forward through analysis of the failure mode and failure mechanism to improve the reliability of product.

Key words: stick shaker; test profile; reliability enhancement testing

随着科学技术的发展, 航空机电产品不断采用新技术、新工艺, 其功能越来越强大, 系统越来越复杂, 可靠性也越来越高。传统的可靠性试验时间过长、费用过高, 影响了产品尽快进入成熟期。随着航空机电产品在研制阶段的环境应力筛选、可靠性增长、可靠性鉴定等试验技术的发展日趋成熟, 为了减少试验费用, 需要寻找一种试验时间短而效率高的试验方法,

以提高产品的可靠性水平, 因此可靠性强化试验应运而生。可靠性强化试验是加速可靠性试验的一种, 不以模拟环境的真实性为目的, 而是以超出典型服役环境的加速试验条件来进行试验, 快速激发产品潜在缺陷使其以故障形式表现出来, 通过故障原因分析、失效模式分析和改进措施消除缺陷来提高产品可靠性, 并大幅度提高试验效率, 降低成本。

收稿日期: 2013-01-13

作者简介: 徐凯(1986—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境可靠性。

1 可靠性强化试验研究现状

可靠性强化试验属于激发试验的范畴,最早的激发试验是20世纪50年代的老化试验,70年代后发展成广义的环境应力筛选。环境应力筛选主要是激发产品生产过程中引入的缺陷,而对产品设计缺陷无能为力。从本质上讲,环境应力筛选不能真正提高产品的固有可靠性。Hobbs G k博士在1988年提出了高加速寿命试验 (highly accelerated life test, HALT) 和高加速应力筛选 (highly accelerated stress screen, HASS)。前者用于产品的设计阶段,提高产品固有可靠性;后者用于产品的生产阶段,目的是快速暴露产品在生产过程中的各种制造缺陷,为用户提供高可靠性的产品^[1]。

目前,国外有许多机构在从事可靠性强化试验技术的研究,如 Qual Mark 公司、Dalse Engineering Solutions 公司、Hobbs Engineering 公司、IBM 公司、Boreing 公司、SONY 公司等。据报道,美国的 Garwood Labratories 公司提供给客户的一项重要服务就是产品的可靠性强化试验,它把可靠性强化试验作为全面提高用户产品质量、根除产品保质期招回率的一项重要技术手段。

QualMark 公司^[2]在1995年5月至1996年3月期间为来自19个工业部门的33个公司的47种产品提供了可靠性强化试验服务。Dalse Engineering Solutions 公司曾经依靠可靠性强化试验技术帮助有关工业设备公司改进产品质量和加工能力,使其销售额提高35%。

国内可靠性强化试验技术理论和应用研究都开展得较晚,主要处于跟踪研究阶段。姜同敏等^[3-4]对可靠性强化试验定量评估方法开展了大量研究;国防科技大学的温熙森等^[5]对模块级电子产品的可靠性强化试验方法开展了研究工作。国内的可靠性强化试验技术相较于国外而言,仍缺乏系统的理论和指导方法,在实际应用方面数据积累更是匮乏。

以某型失速告警振杆器为试验对象,通过施加规定的环境应力,将产品缺陷激发为可被检测到的故障。通过对故障模式、故障机理的分析,从设计上进行改进来控制缺陷,提高产品健壮性和可靠性,进而降低产品使用过程中的故障发生率。

2 可靠性强化试验应用

受试产品为某型失速告警振杆器(如图1所示)。它是飞控系统的部件,安装在飞机驾驶杆的下端,由上壳体组件、下壳体组件、电机与齿轮组件、摆轮组件及控制电路板组件组成。它的功能是当飞机接近或处于失速攻角飞行姿态时,产生一个振动信号,通过电机带动齿轮转动使驾驶杆抖动,发动触觉警告,提醒飞行员处于危险状态。

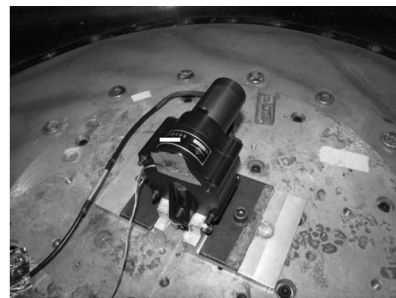


图1 产品安装在试验箱中

Fig. 1 Product fixed in the chamber

2.1 确定可靠性强化试验流程

根据可靠性强化试验的机理探析^[6],制定本次可靠性强化试验的试验流程:低温步进应力试验、高温步进应力试验、快速温度变化试验、振动步进试验和综合环境应力试验5个阶段。各步骤间相互关系如图2所示。

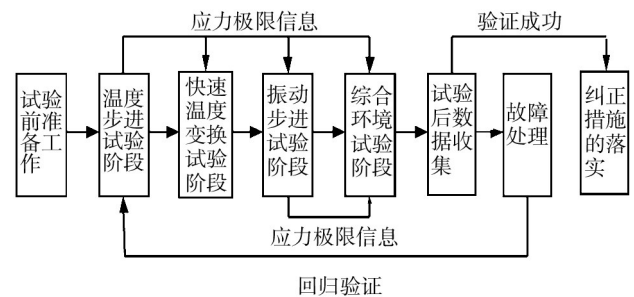


图2 可靠性强化试验流程

Fig. 2 Reliability enhancement testing flow

2.2 确定产品可靠性强化试验剖面

经过试验前温度和振动响应调查,确定产品温

度响应时间为40 min;最大振动响应为 $22g_{\text{rms}}$ 。在高温试验阶段温度达到 $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之前,以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为步长,在达到 $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后,以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为步长;在低温试验阶段温度达到 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之前以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为步长,达到 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后,以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为步长。每个温度台阶保温40 min。在快速温变试验时,采用 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的温变率。未选择更高的温变率,因为并不是所有的产品缺陷都对温度变化敏感。根据QualMark公司^[9]为33个公司做过的强化试验数据分析,采用高温、低温、温度冲击、振动、振动与温度循环组合,温度冲击所发现的故障比例仅为4%。对文中试验来说,采用 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的温变率已经提供了较高的应力,能够满足研究的需要。为了节约试验费用,试验循环周期一般为5次,视试验情况可以增加。各循环通电电压分别按“上限—标称—下限”变化,电应力变化范围见表1,产品施加的电应力按温度循环段进行。

表1 电应力变化范围

Table 1 Range of electrical stress

电源类型	上限值	标称值	下限值
直流电源	32 V	28 V	18 V

试验振动形式基于电磁振动台随机激励,频率范围为 $15\sim 2000\text{ Hz}$,振动步长采用 $2g_{\text{rms}}$ 。为及时发现高量级振动时出现的焊点断裂情况,振动量级大于 $12g_{\text{rms}}$ 时,在每个振动量级台阶结束后将振动量值降至 $4g_{\text{rms}}$,每个振动量级保持10 min。振动功率谱如图3所示。综合环境试验时温度应力,电应力的施加方法按照前面温度循环剖面进行,振动量级按照前面振动工作极限80%(用 g_{max} 表示)的1/5作为步长进行振动递增。在每个循环的高温阶段结束前5 min左右,将振动量级降至 $4g_{\text{rms}}$ 并维持到循环结束,以发现由于温度应力和振动应力同时作用于受试产品而出现的焊点断裂等情况。

2.3 可靠性强化试验实施结果

对产品按照前面制定的试验剖面实施可靠性强化试验,暴露出3个故障,故障信息统计见表2。

在振动步进试验中,当振动量级达到 $22g_{\text{rms}}$ 时,产品在整个试验过程中的性能测试均符合产品规范要求。试验结束后,当产品恢复到标准试验条件下,

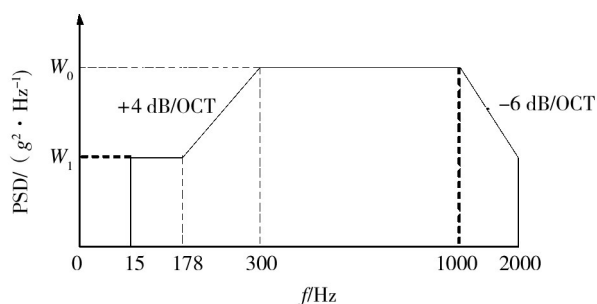


图3 振动功率谱

Fig. 3 Power spectrum of vibration

表2 故障信息统计

Table 2 Statistics of fault information

编号	故障阶段	故障应力	故障现象	故障原因
1	振动试验结束	28 V, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	产品通电不工作	电机失效
2	综合试验结束	28 V, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	产品通电不工作	导线磨损
3	低温补充试验	28 V, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$	产品通电不工作	电机卡滞

进行产品全性能检测时,产品出现不工作现象。现场用检测设备给产品通电,产品不工作;检查控制电路,发现电路输出正常;检查电机,发现电机不工作,用万用计测量电机每组绕组的阻值,其中一组绕组阻值为 ∞ 。判断由于电机绕组断路造成了产品的不工作现象。故障电机如图4所示。现场更换新电机后,产品正常工作,性能测试符合产品规范要求。



图4 故障电机

Fig. 4 Broken-down motor

在综合环境试验中,参照振动步进试验的振动极限,综合试验的振动极限 g_{max} 为 $18g_{\text{rms}}$,温度范围为 $-75\sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$,温变率为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。在综合试验顺利结束后,恢复到标准试验条件,对产品进行全性能

测试时,产品出现不工作现象。现场用检测设备给产品通电,产品不工作;检查控制电路,发现电机的电源引线绝缘层有磨损,将电机电源引线的磨损处与壳体接触,产品不工作;将电机电源引线绝缘层与壳体分离后,产品正常工作。判断由于在更换新电机后,装配人员未按要求将产品内部的引线安装好,导致电机电源引线绝缘层与线路板上的器件发生摩擦,使引线绝缘层磨破发生短路,造成产品不工作现象。导线磨损如图5所示。现场使用绝缘胶带修复后,产品正常工作。性能测试符合产品规范要求。



图5 导线磨损故障
Fig. 5 Wire wear failure

为更有效地获得产品信息,产品在完成全部试验的基础上,进行了-80℃低温极限补充试验。当温度达到-80℃,产品在保温40min后出现不工作现象;当产品恢复到常温状态后,产品可以正常工作,性能测试符合产品规范要求。现场未进行处理,但经初步分析,认为可能是更换新电机后,电机上的齿轮与产品内摆轮没有按工艺要求进行工艺磨合,导致产品出现卡滞,造成产品不工作。

2.4 故障机理分析

2.4.1 电机绕组断路故障

发生断路的电机其电枢绕组与换向器之间采用高温焊接,焊接质量存在缺陷。虽然厂家对电机的电枢进行了片间电阻及耐压检查,但焊接质量不会全部体现。在振动步进试验阶段,产品在完成22g_{rms}振动后,电机焊接不良的焊点由于受到高量级的振动应力,出现焊点开裂现象,直接造成电枢绕组与换向器间断路,导致绕组不通,电机在常温下无法转动,产品不能工作。电机绕组与换向器焊接开裂处如图6所示。

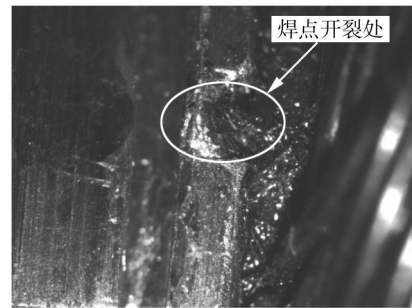


图6 电机绕组与换向器间焊开裂处
Fig. 6 Weld cracking between motor windings and commutator

2.4.2 导线磨损故障

在综合环境试验阶段,施加的振动应力为18g_{rms}。由于更换故障电机后,装配人员未能按要求将导线理顺、铺好,导线在线路板的继电器上堆积,经过5个循环的综合应力(-75~105℃,18g_{rms})后,引线绝缘层与线路板上的器件发生摩擦,导致电机电源引线绝缘层磨破,发生短路,造成电机电源在常温下无法接通,产品不能工作。

2.4.3 电机卡滞故障

故障电机经拆解检查,发现电机的换向器端轴承表面有不均匀摩擦痕迹,如图7所示。该电机的端盖中轴承室的靠压台阶只有0.5mm宽度,而电机轴承室内倒角过大,加之轴承外圆本身有倒角0.2mm,使轴承在轴承室中无法压靠到位。由于该工艺装配导致了电机故障,因而产品出现在-80℃低温试验时不工作的现象。另外值得注意的是,电机在综合环境试验后,受振动应力(18g_{rms})5个循环的长久影响,会产生一定的轴向错移,加重了轴承在轴承室中无法压靠到位的问题,因而会出现产品在经过工作人员施加外力后恢复工作的现象。

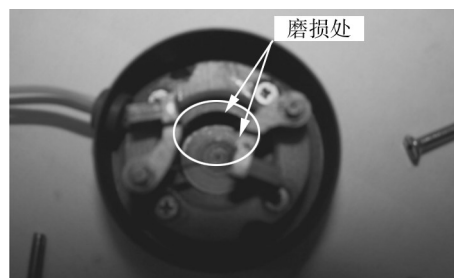


图7 电机换向器端轴承表面不均匀摩擦痕迹
Fig. 7 Uneven friction marks on the surface of the motor commutator bearing

2.5 纠正措施

1) 针对故障1焊接不良的问题,重新将换向器与绕组之间焊接得光滑、圆润。为保证电枢的换向器与绕组可靠焊接,在今后电机的检查工序中,加强检查力度,严格控制焊接质量,防止出现焊接不良的电枢。

2) 针对故障2由于安装工艺不规范出现的导线磨损问题,首先严格按照工艺安装要求进行重新安装。其次,在今后所有的装配安装工艺文件中提高重视度,严格按照工艺文件的规范要求进行操作。加强检查力度和执行力度,杜绝人为因素所引起的故障发生。

3) 针对故障3轴承在轴承室中无法压靠到位的问题,对电机端盖的轴承室进行了优化设计。将轴承室的靠压台阶加宽,使轴承定位台阶面由原来的单边0.5 mm增加到1 mm,避免电机运行过程中出现死点和卡滞现象,提高电机运行的可靠性。对轴承室的具体改进措施如图8所示。

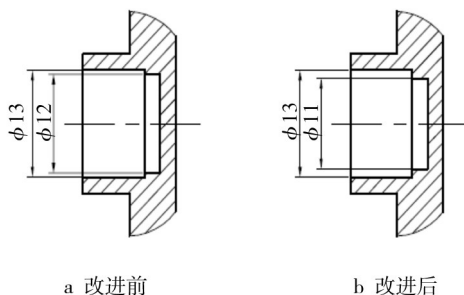


图8 轴承室的结构改进

Fig. 8 Structural improvement of bearing chamber

2.6 纠正措施的回归验证试验

为验证某型失速告警振杆器在经过纠正措施改进后的有效性,结合产品在可靠性强化试验过程中出现故障的时间点,回归验证试验只进行综合环境试验。振动步长按照 $20g_{rms}$ (g_{max} 为 $18g_{rms}$)的1/5进行振动递增,其它应力剖面不变。

试验过程顺利,按要求共进行5个循环。产品在整个综合应力试验过程中均按规定进行检测和记录,产品检测正常。回归试验结果证实产品原有的故障模式已消除,说明纠正措施是正确可行的。因

此,今后的产品可按照这些措施执行。

3 结语

通过对某型失速告警振杆器进行可靠性强化试验,将产品缺陷激发为可被检测到的故障,包括典型的导线磨损故障以及非常罕见的电机故障。通过对故障模式、故障机理的分析,从设计上给出了相应的改进措施,并通过回归验证试验验证了其有效性。从实际应用上证明了可靠性强化试验技术可以从根本上提高产品固有可靠性、健壮性,从而大大缩短产品的研制时间,加快新产品的投放应用,而且增加了可靠性强化试验技术在航空机电产品领域的数据积累,为以后可靠性强化试验技术在航空机电产品上广泛应用提供了数据借鉴。

参考文献:

- [1] 温熙森,陈循,张春华. 可靠性强化试验理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2007:4—6.
- [2] SILVERMAN M. Summary of HALT and HASS Results at an Accelerated Reliability Test Center[C]// Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Santa Clara:Qual Mark Corporation,1988:30—36.
- [3] 吴戈,姜同敏,万博. 武器装备中电子产品模块级可靠性强化试验[J]. 舰船电子对抗,2007,30(4):111—113.
- [4] 姜同敏,姚金勇. 基于ARM的嵌入式系统的可靠性强化试验定量分析评估[J]. 航空学报,2006(5):830—834.
- [5] 温熙森,褚卫华. 模块级电子产品可靠性强化试验方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2003.
- [6] 刘加凯,齐杏林. 可靠性强化试验的机理探析[J]. 装备环境工程,2009,6(6):36—38.