

文章编号: 1000-6893(2006)05-0830-05

基于 ARM 的嵌入式系统的可靠性强化 试验定量分析评估

姚金勇, 姜同敏

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

Evaluation and Analysis of Reliability of ARM Based Embedded Systems Tested by Reliability Enhancement Test

YAO Jin-yong, JIANG Tong-min

(Department of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 针对可靠性强化试验难以定量计算产品可靠性指标的问题, 采用应力强度模型和数理统计理论, 提出一种通过强化试验数据计算产品外场可靠度的工程适用方法。在对某基于 ARM 微处理器的嵌入式系统进行可靠性强化试验的基础上, 采用该方法计算出产品在振动环境条件下的外场可靠度。提出的方法能够对改进产品可靠性起指导作用。

关键词: 可靠性试验; 可靠性强化试验; 可靠度; 可靠性评估

中图分类号: V215.7 **文献标识码:** A

Abstract: Reliability Enhancement Test (RET) can not directly produce a meaningful reliability parameter through the test results due to the limitation of its methodology. This paper develops an engineering suitable approach for evaluating the reliability of the outfield products, which adopts the vibration stress-strength model and the theoretical statistic approach. On the basis of the RET results of a set of ARM micro processor based embedded system, the reliability of the system in the field vibration environment is calculated by means of the derived method, which proves that the approach can be a guidance to improve the reliability of products.

Key words: reliability test; RET; reliable degree; reliability evaluation

可靠性强化试验 (RET) 是一种新的可靠性试验技术, 最初由美国 Gregg K Hobbs 博士于 1988 年提出。它采用人为施加强化的应力环境对产品进行试验, 快速激发出产品中的潜在缺陷, 使其以故障形式表现出来, 通过故障原因分析, 并采取改进措施消除缺陷, 从而提高产品的可靠性。目前, 国外 HP、QualMark、Boeing、Otis Elevator 和 Hobbs Engineering 等公司有很多成功应用的报道^[1-3]。由于其显著的试验效率, 某些工业部门也开始研究并开展该项试验工作, 以提高产品的固有可靠性, 并加快研制进度。

在某 GPS 接口设备研发中采用 ARM7TDMI^[4] 微处理器为核心构成系统平台。此类系统具有体积小、低功耗、低成本、高性能的优点, 但字长为 32 位, 系统结构和复杂度也比传统的基于 8 位 MCU 的系统高一个数量级。因此, 系统的初始可靠性较低, 为提高系统的固有可

靠性, 需要尽早掌握系统可靠度信息进行系统的改进。用传统的可靠性增长试验方法已无法在短的研发时间设计出具有成熟可靠性的产品, 例如, MTBF 要求为 500 h, 则试验时间需要 2 500 ~ 12 500 h。因此, 考虑用强化试验的方法进行系统的可靠性试验。

采用强化试验可节约试验时间和经费, 但强化试验目前没有成熟的增长模型, 一些模型给出的 MTBF 值的物理意义也不甚明显^[5], 这使得在有经费和时间约束的前提下, 难于根据产品可靠性的改进程度, 决定转阶段的时间。因而在一定程度上妨碍了该技术的推广应用。本文在考察强化试验原理的基础上, 采用材料力学中的应力强度模型, 用数理统计的方法, 给出系统可靠度的数学描述, 并得到利用强化试验数据计算产品在振动环境下外场可靠度的一种工程适用方法。最后, 采用该方法对某受试系统的可靠度进行了计算和评估, 并给出几点改进措施。

收稿日期: 2005-05-09; 修订日期: 2005-08-15
基金项目: “十五”国防预研

1 可靠性强化试验的概率评价

1.1 强化试验结果的统计特性

可靠性强化试验的理论依据是故障物理学。Gregg K Hobbs 对一批金属试件进行了试验,发现当应力强度增加 1 倍时,试件的疲劳寿命降低为原先的 1/1 000^[6]。进一步的研究表明,若产品中存在缺陷,缺陷处的应力集中系数将是正常产品中的 2~3 倍,因此,存在缺陷的产品在进行强化应力试验的条件下,其疲劳寿命要比正常产品的寿命低几个数量级,在强应力作用下,产品中缺陷元件将迅速暴露出故障,而无缺陷元件的寿命损失将很少。若强化应力所激发出的产品缺陷及故障模式与实际使用环境中产品出现的失效模式有强相关性,则说明强化试验的结果反映了产品的外场可靠度信息。为得到产品外场可靠度的概率描述,以试验中所加的应力(指广义应力,可以是温度、振动、湿度或综合应力)为横轴,以试件的失效数为纵轴,试验试件足够多,可得到类似于图 1 所示的统计特性曲线(该曲线为温度应力与试件失效数关系)^[7]。曲线上的应力极限定义如下:

工作极限:产品在该极限内工作不会失效。

破坏极限:产品在范围内工作而不出现不可逆失效。

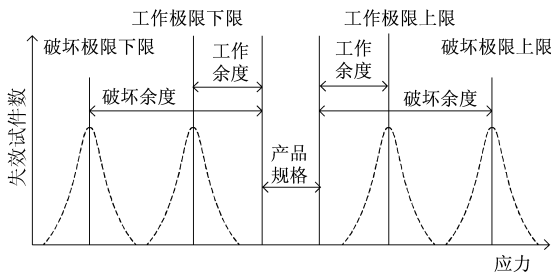


图 1 RET 试验中应力量级与试件失效数关系

Fig. 1 The relations between the stress level and the number of the failure items in RET

1.2 基于应力强度模型的概率评价

首先考虑具有单边工作极限的产品的可靠度(如在振动应力作用下)。依前面分析,产品的工作极限应力和实际环境应力都具有随机性,设随机变量 S 为产品的极限工作应力,随机变量 E 为产品在工作环境中所受到的应力, $f_S(x)$ 为 S 的概率密度函数, $f_E(x)$ 为 E 的概率密度函数,将两者画在同一坐标轴上如图 2 所示。则产品的可靠度 R 是事件 $\{S > E\}$ 的概率,即

$$R = P\{S > E\} \tag{1}$$

事件 $\{S > E\}$ 与事件 $\{(S - E) > 0\}$ 等价,因此

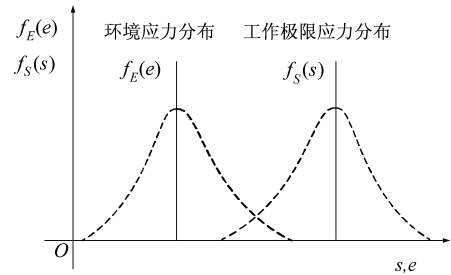


图 2 工作极限应力和环境应力的分布

Fig. 2 The probability distribution functions of the stresses of the operation limit and the environment

$$R = P\{S > E\} = P\{S - E > 0\} \tag{2}$$

设二维随机向量 (S, E) 的联合概率密度函数为 $f_{S,E}(x, y)$,则概率值为联合密度函数在图 3 所示区域 $D = \{(s, e) | (s - e) > 0\}$ 上的二重积分

$$R = \iint_{D} f_{S,E}(s, e) dsde = \iint_{(s-e)>0} f_{S,E}(s, e) dsde \tag{3}$$

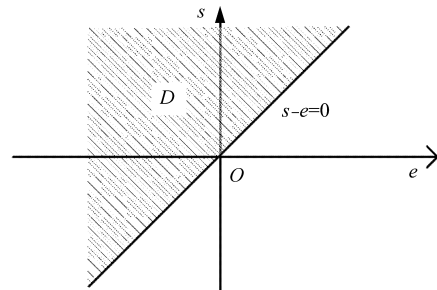


图 3 积分区域

Fig. 3 The integral area

一般不能直接计算式(3)。在工程上直接获得 $f_{S,E}(x, y)$ 也较为困难,考虑 S 与 E 的物理意义,可以认为 S 与 E 是相互独立的,即

$$f_{S,E}(s, e) = f_S(s) f_E(e) \tag{4}$$

将式(3)化为累次积分,并代入式(4)可得

$$R = \int_e^+ \left[\int_s^+ f_{S,E}(s, e) ds \right] de = \tag{5}$$

$$\int_e^+ \left[\int_s^+ f_S(s) ds \right] f_E(e) de \tag{6}$$

若需要对温度等具有双边工作极限应力(图 1 情形)的产品进行可靠度计算,可定义

$$R = P\{E_1 < S < E_2\} \tag{7}$$

并利用事件的运算及上述方法即可算出可靠度。下面给出几种常用分布的可靠度计算方法。

特别的,当 $S \sim N(\mu_S, \frac{2}{3})$, $E \sim N(\mu_E, \frac{2}{E})$ 时,由于 $(S - E) \sim N(\mu_S - \mu_E, \frac{2}{3} + \frac{2}{E})$,由定义式(1)即可以计算出产品外场可靠度为

$$R = \left. \begin{aligned} & \Phi \left(\frac{\mu_S - \mu_E}{\sqrt{\frac{s^2}{2} + \frac{2}{E}}} \right) \\ & = \frac{\mu_S - \mu_E}{\sqrt{\frac{s^2}{2} + \frac{2}{E}}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; μ_S 为 S 的均值; μ_E 为 E 的均值; s 为 S 的标准差; E 为 E 的标准差。为在计算机上编程计算 $\Phi(\cdot)$, 可采用如下近似公式

$$(x) \left\{ \begin{aligned} & 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-x^2/2} (a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3), \quad x > 0 \\ & \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-x^2/2} (a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3), \quad x < 0 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} t &= \frac{1}{1 + a/x}, a = 0.332\,67, a_1 = 0.436\,183\,6, \\ a_2 &= -0.120\,167\,6, a_3 = 0.937\,298\,6 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

该公式对于所有 x , 绝对误差 $< 10^{-5}$, 对一般的应用精度已足够。

当 S 与 E 服从其他概率分布时, 可采用表 1 公式进行计算, 公式的推导从略。若得到 S 与 E 的分布函数比较困难, 可采用试验结果的样本矩来估计总体矩, 得到 S 或 E 的统计特性^[8]。

表 1 各种应力分布下产品的可靠度计算公式

Table 1 The probability calculation formulas for the different stress distribution functions

序号	环境应力分布	工作极限应力分布	可靠度计算公式
1	$N(\mu_E, \frac{2}{E})$	$N(\mu_S, \frac{2}{S})$	$\left[\frac{\mu_S - \mu_E}{\sqrt{\frac{2}{S} + \frac{2}{E}}} \right]$
2	$e(-E)$	$s(s)$	$E/(E + s)$
3	$N(\mu_E, \frac{2}{E})$	$s(s)$	$\left[1 - \left(-\frac{\mu_E - s}{E} \right) \right] \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} (2\mu_E s - s^2) \right]$
4	$e(-E)$	$N(\mu_S, \frac{2}{S})$	$\left(\frac{\mu_S}{S} \right) - \left(-\frac{E - s}{E} \right) \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} (2\mu_E s - E^2) \right]$
5	$e(-E)$	(s, m)	$1 - [s/(s + E)]^m$
6	(E, n)	$e(s)$	$[E/(s + E)]^n$

1.3 产品实际工作环境应力的分布

根据式(6)可知, 若计算产品在实际环境中的可靠度, 需要知道产品工作环境的应力分布情况。对于航空器、航天器、车辆、舰船等各类平台振动, 可以对产品的使用环境进行具体的测量, 并根据 GB/Z 126-99 对环境数据进行归纳, 得到该分布, 并采用文中公式进行计算, 将能得到比较准确的计算结果。但这种方法周期太长, 大多数情况下, 无法在短时间内直接得到环境应力的分布, 这时, 可根据具体情况采用国标或国军标的环境试验标准来估算环境应力的分布情况。这些标准已经根据实际的测量结果对军用产品所经历的各种典型环境条件按照某种归纳标准进行了科学的归纳, 其所制定的试验条件具有统一性、再现性和通用性。

当产品的环境条件以振动为主时, 可采用 GJB150.16-86 提供的随机振动环境试验条件, 对产品在使用环境中所受的应力情况进行估算。将产品 3 个主振方向上随机振动的 PSD 值综合起来作为振动应力的估计值, 并用随机振动试验中的波峰因子数据估计振动环境应力的方差。也即

(这是偏保守的估计)。

$$\mu_E = \sqrt{\mu_{Ex}^2 + \mu_{Ey}^2 + \mu_{Ez}^2} \quad (11)$$

$$E = 0.097\,35\mu_E \quad (12)$$

2 某型嵌入式系统的强化试验评估

2.1 试验方法和过程

经分析, 该产品主要使用环境为车载, 使用环境处温度湿度变化不大, 可认为其失效主要由振动应力引起, 故选择用全轴随机振动对印制板板样品试验。样本数 $N = 12$, 同一工艺生产。样品印制板板层为 FR4 材料, 双面贴片, 板长 254 mm, 宽 150 mm, 厚 1.5 mm。

为在试验过程中实时监视系统的运行状况, 用两台 PC 机作为系统的测试设备, 系统连接如图 4 所示。一台 PC 机模拟 GPS, 从受试系统接收命令并向系统返回状态信息, 根据需要还可擦除和校验系统的 Flash 程序存储器; 另一台计算机通过 10M/100 Mbit/s 以太网接口与系统连接, 一方面检测系统网络通讯模块的工作状态, 另一方面,

通过网络向系统的 16M 字节 SDRAM 存储器中下载 uCLinux 的内核,以检测 SDRAM 的工作状态。

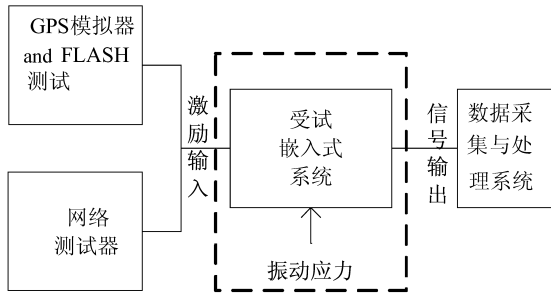


图 4 某基于 ARM 的嵌入式系统的强化试验配置

Fig. 4 The configuration of the RET for an ARM based embedded system

全轴随机振动试验在常温下进行,采用步进应力试验方法,振动量级从 2 Grms ($1 \text{ Grms} = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) 开始,在每个量级上保持 10 min,试验剖面如图 5 所示。

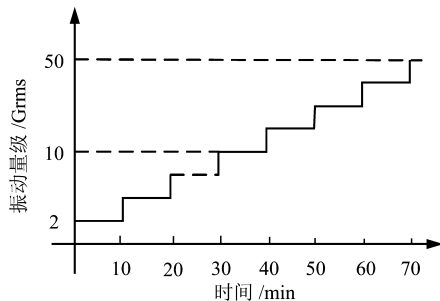


图 5 全轴随机振动试验剖面

Fig. 5 The profile of the three axis's random vibration test

试验过程中,在每个试验量级上,将测试设备与被测系统构成闭环系统,用网络测试器向系统发送 PING 命令,从 GPS 模拟器上对试样的工况进行实时观测。在每个量级结束后,对

系统上下电测试 3 次,先用 Flash 中的 BIOS 程序引导系统,系统引导成功后通过网络将 uCLinux 的内核下载到 SDRAM 中,然后解压缩内核,在内核正常工作的基础上利用网络进行系统的闭环测试。

在试验过程中发现,从 2 Grms 至 10 Grms 量级,12 个样品均能正常工作。为节约时间和费用从 10 Grms 开始将步长增加到 5 Grms。试验过程中,各样品的失效情况如表 2 所示。表中工作极限和破坏极限的量级是由产品上所贴三向加速度传感器测得,取主要振动方向的值。

2.2 试验结果分析

评估系统的功能可靠度只需工作极限的数据,将表 2 工作极限的数据整理后,进行数据分布的检验。给定显著性水平 0.1 的情况下,用²检验法算得 $K_{s,x} = 5.8333$, $X_a = 0.0158$,正态分布的 $K=4$, $X_a = 0$ 。可以认为数据近似服从正态分布。由表 2 还可以知道,多数故障模式都出现了不止一次,故可认为若强化应力所激发出的产品缺陷及故障模式与实际使用环境中产品出现的失效模式有强相关性,这说明强化试验的结果反映了产品的外场可靠度信息。用本方法评估系统外场可靠度是适用的。

假定产品在实际环境中所受应力的分布为正态分布,根据式(8)、式(11)和式(12),并采用 GJB 150.16-86 根据实际测量的结果归纳出的实测环境数据,对产品处于公路运输状态、安装在轮式战车上、履带车上等环境条件下的外场可靠度进行计算,可算得该产品在几种典型工作环境中的可靠度如表 3 所示。

表 2 受试产品失效情况表

Table 2 The failures of the tested products

样本编号	工作极限/ Grms	破坏极限/ Grms	故障现象	故障原因
1	25	30	引导失败,重新引导正常	Flash、SDRAM 工作不稳定
2	30	30	系统 BIOS 自检报错	实时时钟电路晶振脱落
3	20	25	异步串行通讯单元失败	MCU 焊盘故障
4	25	25	网络通讯单元工作错误	MCU 引脚焊接不良
5	30	30	设备停止工作,无电源	LT1086 第 1 引脚断裂
6	20	25	网络通讯单元工作错误	SDRAM 工作不稳定
7	20	25	设备电源指示灯不亮	LT1086 第 1,2 脚断裂
8	40	40	串口数据发送、接收失败	MCU 故障
9	20	25	设备引导过程失败	flash 故障
10	30	30	设备复位后无提示,发送灯常闪	MCU 故障
11	30	35	从网络引导系统失败	flash 故障
12	15	20	设备 BIOS 自检报错	实时时钟电路晶振脱落

表3 ARM系统在不同使用环境中的可靠度

Table 3 The reliabilities of the ARM based embedded system in different environments

环境	$\mu_E/Grms$	$\sigma_E/Grms$	$\mu_S/Grms$	$\sigma_S/Grms$	R
公路运输	1.29	0.13	25.4	6.9	0.999 8
轮式战车	3.79	0.37	25.4	6.9	0.999 1
履带(I)	2.61	0.25	25.4	6.9	0.999 5

根据表3数据,提出如下改进措施,可在不增加成本的前提下提高产品的可靠度。

(1)将晶振的外壳焊接到PCB的信号地,可大大增加系统的抗振强度,并提高时钟信号的稳定性。

(2)由于晶振的管脚在焊接过程中需要弯曲成型,会产生一定的应力集中,建议重新设计该器件的PCB封装,减轻应力集中效应。

(3)建议用螺栓将LT1086固定到PCB上,或改用表贴封装器件直接将散热片焊到电路板上,可增加抗振强度,并改善器件的散热条件。

3 结论

综合材料力学中的应力强度模型和试验结果的统计特征,给出对强化试验结果数据的一个概率描述。据此模型给出了在振动环境条件下根据强化试验数据计算产品外场可靠度的一般计算方法。为验证该方法,对某嵌入式系统的可靠度进行了定量计算,并提出几点改进措施。该方法的物理意义明确,适用于工程实际,但由于试验样本较为昂贵,样本量较小,该方法的准确程度有待更多的外场实测数据的验证。

致谢

在本文的写作过程中,曹心宽、原艳宾两位同学提供了资料和试验方面的帮助,对此表示感谢。

参考文献

- [1] Minor E O. Reliability enhancement testing of Boeing 777 avionics[C]// Inst of Environmental Sciences ed. Proceedings of the 1996 42nd Annual Technical Meeting of the Institute of Environmental Sciences. USA, IL, Mount Prospect: Inst of Environmental Sciences, 1996: 20-28.
- [2] Silverman M. Summary of HAL T and HASS results at an

accelerated reliability test center[C]// IEEE ed. Proceedings of the 1998 Reliability and Maintainability Symposium. USA, NJ, Piscataway: IEEE, 1998: 30-36.

- [3] Kyser E L. Reliability enhancement testing of a new computer by ESS[C]// Inst of Environmental Sciences ed. Proceedings of the 1996 42nd Annual Technical Meeting of the Institute of Environmental Sciences. USA: Reed Exhibition Companies, 1996: 422-430.
- [4] 李驹光,聂雪媛,江泽明,等. ARM应用系统开发详解——基于S3C4510B的系统设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2003: 3-4.
- Li J G, Nie X Y, Jiang Z M, et al. Detailed guide for ARM application system development-S3C4510 based system design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 3-4. (in Chinese)
- [5] Silverman M. Why HAL T cannot produce a meaningful MTBF number and why this should not be a concern [R/OL]. http://www.qualmark.com/library/lib_technical.aspx, 2005.
- [6] Hobbs G K. Highly accelerated stress screens-HASS[C]// NEPCON ed. Proceedings of the Technical Program National Electronic Packaging and Production Conference. USA, IL, Des Plaines: Cahner Exposition Group, 1992: 1565-1572.
- [7] Doertenbath N. Highly accelerated life testing-testing with a different purposes [R/OL]. http://www.qualmark.com/library/lib_technical.aspx. 2005.
- [8] 曾声奎,赵廷第,张建国,等. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001: 202-206.
- Zeng S K, Zhao T D, Zhang J G, et al. System reliability design and analysis course [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2001: 202-206. (in Chinese)

作者简介:

姚金勇(1974 -) 男,河北廊坊人,北京航空航天大学博士生。主要研究方向为环境与可靠性试验技术。联系电话:010-82316449。



姜同敏(1949 -) 男,北京人,北京航空航天大学教授,博士生导师。主要研究领域为环境与可靠性试验技术。

(责任编辑:李铁柏)