

【其他研究】

定量环境应力筛选的应用探讨

邢钉凡, 赵帮绪, 罗 凡

(驻广元地区军代室, 四川 广元 628017)

摘要: 简述了环境应力筛选、定量环境应力筛选的定义, 提出了适宜的定量环境应力筛选方案, 通过分析对比得出了定量环境应力筛选不但能达到筛选效果, 而且可以有效降低费用的结论。

关键词: 环境应力筛选; 定量; 筛选分析

中图分类号: TM20

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2011)05-0142-04

1 定量环境应力筛选简述

环境应力筛选是通过向电子产品施加合理的环境应力和电应力, 将其内部缺陷加速发展为故障, 并加以发现和排除的工艺手段, 因此环境应力是质量控制检查和测试过程的延伸。定量环境应力筛选是要求在筛选效果、成本和产品的可靠性目标、现场故障修理费用之间建立定量关系的筛选, 他是环境应力筛选的高级阶段, 是一个十分复杂的过程, 需要大量的数据进行支持, 并且随产品复杂程度情况需进行多批次的试验和调整后方可成型。

2 定量环境应力筛选大纲的制定

首先要根据定量目标制定定量筛选大纲, 然后实施大纲, 进行监督、评价和控制, 并且在必要时对定量环境应力筛选大纲进行适当的调整。由于定量环境应力筛选中的计算是十分粗略的估算, 只能大致确定一个范围, 故在情况改变时应仔细调整大纲要求。具体制定流程如图1所示。

2.1 数据采集

在编写定量环境应力筛选大纲时需进行大量的数据采集工作, 确定产品的 MTBF 目标值, 并对产品使用的元器件种类、数量、质量等级、装配方式、系统装配方法等进行全面统计, 计算出基础可靠性; 然后明确产品使用环境, 统计出产品的置信度、成品率下限要求, 得出无故障运行验收筛选时间, 计算出成本阈值, 并与筛选成本进行对比。环境应力筛选过程中还应随时对照与设定参数的差异以便调整。

2.2 目标制定

定量环境应力筛选有三大目标: ① 使筛选后产品残留的缺陷密度与产品的可靠性要求值达到相一致的水平; ② 使筛选后交付产品的成品率达到规定的水平; ③ 使筛选中排除每个故障的费用低于现场排除每个故障的平均费用。

2.3 环境应力筛选方法及对应筛选度

环境应力筛选方法及对应筛选度见表1。

温度冲击目前没有具体的筛选度公式, 但与温度循环十分相似, 在此引用。

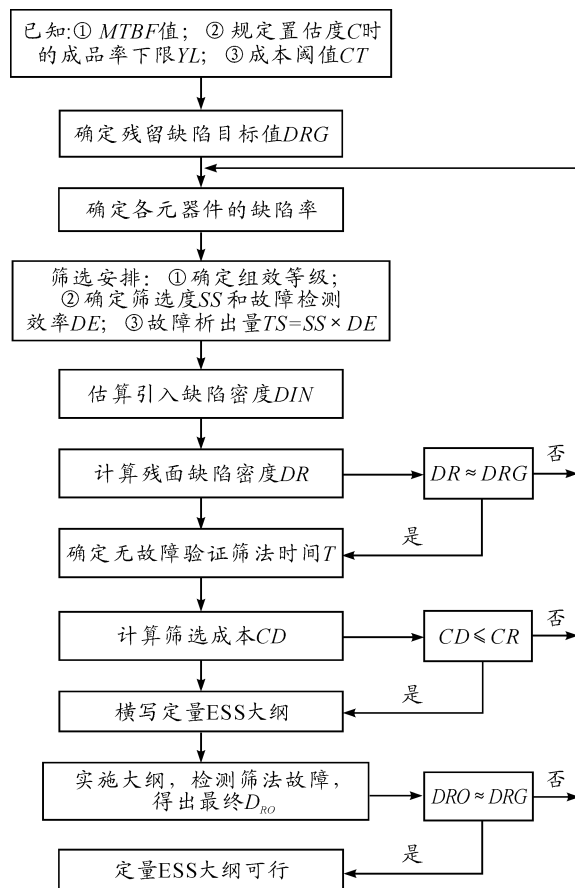


图1 定量环境应力筛选大纲流程

2.4 支持数据

产品使用环境为地面平稳移动(GM1), 元器件等级为军用级, 元器件经过入厂检验及筛选, 检测效率为95%。筛选条件如表2所示。

筛选前后常用元器件缺陷率如表 3 所示。

表 1 环境应力筛选方法及对应筛选度

类型	强度	费用	筛选度
恒定高温	低	低	$SS = 1 - \exp[-0.0017(R + 0.6)0.6t]$
扫频正弦振动	较低	适中	$SS = 1 - \exp[-0.000727(G/10)0.863t]$
随机振动	高	高	$SS = 1 - \exp[-0.004(G_{rms}/10)1.71t]$
温度冲击	较高	适中	$SS = 1 - \exp\{-0.0017(R + 0.6)0.6[\ln(e + V)]3N\}$
温度循环	较高	较高	$SS = 1 - \exp\{-0.0017(R + 0.6)0.6[\ln(e + V)]3N\}$

注:R 表示温度范围(最高温度 - 最低温度),℃;G 为加速度值, m/s²;G_{rms}为振动加速度均方根值, m/s²;N 为循环或冲击次数;t 为高温持续时间, h;e 为自然对数的底。

表 2 筛选条件

筛选方法	温度条件	时间	循环数
恒定高温	硅二、三极管, 数字集成电路 125 ℃ 锗二、三极管, 电容, 线性集成电路 85 ℃	24 h	
温度循环	硅二、三极管, 数字集成电路高温 125 ℃, 锗二、三极管, 电容, 线性集成电路, 继电器高温 85 ℃, 低温条件均为 -55 ℃		10 次
高温反偏	硅二、三极管, 数字集成电路 125 ℃ 锗二、三极管, 线性集成电路 85 ℃	12 h	

表 3 筛选前后元器件缺陷率

元器件种类	元器件缺陷率/ppm		备注
	筛选前	筛选后	
电阻	162.700 0	162.700 0	
电容	171.600 0	5.647 1	
数字集成电路	249.100 0	5.148 0	
线性集成电路	249.100 0	6.588 9	
硅二极管	461.000 0	9.527 2	
锗二极管	461.000 0	12.193 8	
硅三极管	3 666.500 0	77.773 4	
锗三极管	3 666.500 0	96.981 7	
感性元件	6 045.800 0	6 045.800 0	
继电器	1 694.300 0	87.316 3	
旋转器件	134 808.200 0	134 808.200 0	
印制板	3 457.500 0	3 457.500 0	

注:温变速率为 12 ℃/min, 检测效率为 95%, 前后数据未变动表示未经筛选。

2.5 制定初步的定量环境应力筛选方案

元器件经筛选后装配到印制板上, 印制板初步调试后要经过温度冲击, 完成后再检测, 故障排除后装配到组合上, 然后进行正弦扫频振动、温度循环、正弦扫频振动、最终测试, 完成后进行无故障温度循环试验, 达到指标要求并与目标值对照后得出结论。装配方式为无绕烙铁焊接, 缺陷率为 16.2 ppm, 安装到组合为簧片压接, 缺陷率为 11.4 ppm。制定方案如下。

温度冲击: 印制板装配完成后进行, 高温 + 70 ℃, 低温 -55 ℃, 用两箱法进行, 共 12 个循环, 温变速率估计为 10 ℃/min。

随机振动: 5 ~ 2 000 Hz 随机振动, 功率谱密度为 0.04g²/Hz(换算为加速度均方根值为 60.6 m/s²), 持续时间 20 min。

温度循环(含无故障温度循环): 高温 + 70 ℃, 低温 -55 ℃, 共 15 个循环, 温变速率估计为 5 ℃/min。

跑车: 500 km 跑车试验, 路况为 3 级路面, 平均时速大于 30 km/h。

3 试验验证

3.1 组合 1

要求 MTBF 时间为 2 000 h, 残留缺陷目标值为 0.000 5 个, 在置信度为 80% 时的成品率下限为 90%, 现场单次维修产生的费用约为 0.05 万元; 组合 1 元器件使用如表 4。

表4 组合1元器件使用表

元器件种类	数量	缺陷率/ppm	引入故障数
数字集成电路	64	5.266 9	0.000 337 3
线性集成电路	8	6.922 6	0.000 055 4
硅三极管	8	9.747 3	0.000 078 0
硅二极管	7	12.811 4	0.000 087 9
电阻	32	162.700 0	0.005 206 4
电容	18	9.936 8	0.000 178 9
印制板	4	3 457.500 0	0.013 830 0
焊接点数	826	16.200 0	0.013 381 2
共计引入故障数			0.033 155 1

此时 $MTBF$ 值仅有 30.16 h。

步骤1 经过印制板温度冲击后,由公式 $SS = 1 - \exp\{-0.0017(R+0.6)0.6[\ln(e+V)]3N\}$,代入 $R = 70 - (-55) = 125$ 、 $V = 10$ 、 $N = 12$ 得 $SS = 99.77494\%$,检测效率 $DE = 92\%$,残留故障数为 $(1 - SS \times DE) \times$ 引入故障数 = 0.002 72个,此时 $MTBF$ 值为 367.50 h。

将印制板安装到组合上,采用簧片压接的插卡方式,共 120 个点接触,共计引入故障数为 $0.002 72 + 120 \times 11.4 \text{ ppm} = 0.004 088$ 个,此时 $MTBF$ 值为 244.62 h。

步骤2 进行随机振动,由公式 $SS = 1 - \exp[-0.004(G_{rms}/10)1.71t]$,代入 $G_{rms} = 60.6 \text{ m/s}^2$ 、 $t = 20 \text{ min}$,得 $SS = 82.487 91\%$,检测效率 $DE = 90\%$,残留故障数为 $(1 - SS \times DE) \times 0.004 088 = 0.001 053$ 个,此时 $MTBF$ 值为 949.57 h。

步骤3 进行温度循环,由公式 $SS = 1 - \exp\{-0.0017(R+0.6)0.6[\ln(e+V)]3N\}$,代入 $R = 55 - (-40) = 95$ 、 $V = 5$ 、 $N = 15$,得 $SS = 96.517 3\%$,检测效率 $DE = 90\%$,残留故障数为 $(1 - SS \times DE) \times 0.001 053 = 0.000 138 3$ 个,此时 $MTBF$ 值为 7 230.37 h。由于此时 $MTBF$ 值远大于要求值,故对方案进行调整。

印制板温度冲击调整为 10 次,并且每次可以加大被冲击产品的数量,相对使温变速率降为 $9 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。温度循环次数调整为 12 次,温变速率调整为 $4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。调整后的环境应力筛选情况如下。

温度冲击后, $SS = 1 - \exp\{-0.0017(R+0.6)0.6[\ln(e+V)]3N\}$,代入 $R = 70 - (-55) = 125$ 、 $V = 9$ 、 $N = 10$,得 $SS = 99.000 1\%$,检测效率 $DE = 92\%$,残留故障数为 $(1 - SS \times DE) \times 0.033 155 1 = 0.002 96$ 个,此时 $MTBF$ 值为 338.14 h。

将印制板安装到组合上,共计引入故障数为 $0.002 96 + 120 \times 11.4 \text{ ppm} = 0.004 328$ 个,此时 $MTBF$ 值为 231.05 h。

进行随机振动,由公式 $SS = 1 - \exp[-0.004(G_{rms}/10)1.71t]$,代入 $G_{rms} = 60.6 \text{ m/s}^2$ 、 $t = 20 \text{ min}$ 得 $SS = 82.487 91\%$,检测效率 $DE = 90\%$,残留故障数为 $(1 - SS \times DE) \times 0.004 328 = 0.001 115$ 个,此时 $MTBF$ 值为 896.92 h。

再进行温度循环, $SS = 1 - \exp\{-0.0017(R+0.6)0.6[\ln(e+V)]3N\}$,代入 $R = 55 - (-40) = 95$ 、 $V = 4$ 、 $N = 12$ 得

$SS = 88.555 9\%$,检测效率 $DE = 90\%$,残留故障数为 $(1 - SS \times DE) \times 0.001 115 = 0.000 226 3$ 个,此时 $MTBF$ 值为 4 418.1 h。

步骤4 计算无故障验收时间。已知置信度 80%,成品率下限 90%, $\lambda_0 = 1/MTBF = 0.000 5$,根据 GJB/Z34 查表得 $\lambda_D = 0.187$, $\lambda_D/\lambda_0 = 0.187/0.000 5 = 374$,即在常温下需通电工作 374 h 无故障方可接收,用温度循环进行筛选,查表得 $\lambda_D T = 2.8$,无故障运行时间 $T = \lambda_D T/\lambda_D = 2.8/0.187 = 15 \text{ h}$ 。

由于按上述方法完成后的 $MTBF$ 值为 4 418.1 h,大于 2 000 h 的要求,在目前是较为适宜的方案,在可靠性指标提高后仍可使用。

最终方案为如下。

温度冲击:印制板装配完成后进行,高温 $+70 \text{ }^\circ\text{C}$,低温 $-55 \text{ }^\circ\text{C}$,用两箱法进行,共 10 个循环,温变速率为 $9 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$;

随机振动:5 ~ 2 000 Hz 随机振动,功率谱密度 $0.04 \text{ g}^2/\text{Hz}$ (换算为加速度均方根值为 60.6 m/s^2),持续时间 20 min;

温度循环(含无故障温度循环):高温 $+70 \text{ }^\circ\text{C}$,低温 $-55 \text{ }^\circ\text{C}$,共 12 个循环,最后 7 个循环要求无故障工作。温变速率应为 $4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$;

印制板冲击费用:1 600 元/循环 \times 10 循环 = 1.6 万元;

随机振动费用:1 600 元/次 \times 1 次 = 0.16 万元;

温度循环费用:800 元/循环 \times 12 循环 = 0.96 万元;

费用总计:1.6 + 0.16 + 0.96 = 2.72 万元。

如果不进行环境应力筛选, $MTBF$ 值为 $1/(0.033 155 1 + 0.004 088) = 29 \text{ h}$,现场发生故障的总次数约为 $2 000/29 = 69$ 次,以单次排除费用 0.05 万元计算,总的排除费用为 3.45 万元,满足成本阈值要求。

3.2 组合2

要求 $MTBF$ 时间为 500 h,残留缺陷目标值为 0.002 个,该产品质量较大,由 500 km 跑车替代振动。在置信度为 80% 时的成品率下限为 90%,现场单次维修产生的费用约为 0.05 万元。组合 2 元器件使用如表 5 所示。

表5 组合2元器件使用表

元器件种类	数量	缺陷率	引入故障数
数字集成电路	622	5.647 1	0.003 513
线性集成电路	36	6.588 9	0.000 237
硅三极管	106	77.773 4	0.008 244
锗三极管	0	96.981 7	0
硅二极管	94	9.527 2	0.000 896
锗二极管	0	12.193 8	0
电阻	811	162.700 0	0.131 950
电容	248	5.647 1	0.001 401
继电器	13	87.316 3	0.001 135
感性器件	11	6 045.800 0	0.066 504
印制板	36	3 457.500 0	0.124 470
焊接点数	11791	16.200 0	0.191 014
共计引入故障数			0.397 414

此时 $MTBF$ 值仅有 2.52 h。

步骤 1 经过印制板温度冲击后,由公式 $SS = 1 - \exp\{-0.0017(R+0.6)0.6[\ln(e+V)]3N\}$,代入 $R = 70 - (-55) = 125$ 、 $V = 10$ 、 $N = 12$ 得 $SS = 99.77494\%$,检测效率 $DE = 95\%$,残留故障数为 $(1 - SS \times DE) \times$ 引入故障数 = 0.020 72个,此时 $MTBF$ 值为 48.26 h。

将印制板安装到组合上,采用簧片压接的插卡方式,共 1 076 个点接触,共计引入故障数为 $0.020 72 + 1 076 \times 11.4 \text{ ppm} = 0.032 986 4$ 个,此时 $MTBF$ 值为 30.32 h。

步骤 2 进行温度循环,由公式 $SS = 1 - \exp\{-0.0017(R+0.6)0.6[\ln(e+V)]3N\}$,代入 $R = 55 - (-40) = 95$ 、 $V = 5$ 、 $N = 15$ 得 $SS = 96.517 3\%$,检测效率 $DE = 95\%$,残留故障数为 $(1 - SS \times DE) \times 0.032 986 4 = 0.002 74$ 个,此时 $MTBF$ 值为 364.96 h。

步骤 3 进行 500 km 跑车试验,公式 $SS = 1 - \exp[-0.004(G_{rms}/10)1.71t]$,此时仅能依据国军标推荐的经验值估计 $SS = 30\%$,检测效率 $DE = 95\%$,残留故障数为 $(1 - SS \times DE) \times 0.002 74 = 0.001 959 1$ 个,此时 $MTBF$ 值为 510.44 h。

步骤 4 计算无故障验收时间。已知置信度 80%,成品率下限 90%, $\lambda_0 = 1/MTBF = 0.002$,根据 GJB/Z34 查表得 $\lambda_D = 0.187$, $\lambda_D/\lambda_0 = 0.187/0.002 = 93.5$,即在常温下需通电工作 93.5 h 无故障方可接收,用温度循环进行筛选,查表得 $\lambda_D T = 2.4$,无故障运行时间 $T = \lambda_D T/\lambda_D = 2.4/0.187 = 12.83$ h。

由于按上述方法完成后的 $MTBF$ 值为 510.44 h,大于 500 h 的要求,在目前是适宜的方案。

最终方案如下。

温度冲击:印制板装配完成后进行,高温 +70 °C,低温 -55 °C,用两箱法进行,共 12 个循环,温变速率为 10 °C/min;

温度循环(含无故障温度循环):高温 +70 °C,低温 -55 °C,共 15 个循环,最后 6 个循环要求无故障工作,温变

速率应为 5 °C/min,振动方式改进后循环次数不变;

进行 500 km 跑车试验,路况为 3 级路面,平均时速大于 30 km/h;

印制板冲击费用:2 400 元/循环 \times 12 循环 = 2.88 万元;

跑车费用:4 000 元/次 \times 1 次 = 0.4 万元;

温度循环费用:1 200 元/循环 \times 15 循环 = 1.8 万元;

费用总计:2.88 + 0.4 + 1.8 = 5.08 万元。

如果不进行环境应力筛选, $MTBF$ 值为 $1/(0.397 417 + 0.032 986 4) = 2.32$ h,现场发生故障的总次数约为 $500/2.32 = 215$ 次,以单次排除费用 0.05 万元计算总的排除费用为 10.75 万元。环境应力筛选效益显著。

4 结束语

上述试验方案是在经过多个批次的试验中逐步改进而形成的最接近要求的方案,当环境应力条件还能提高时,可以随条件改变而适当调整。经过上述试验的产品的可靠性满足了技术条件要求,整机可靠性得到了大幅度提升,定量环境应力筛选工作取得了初步的成功。

参考文献:

- [1] 周星如. 军工质量管理[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [2] 黄益喜. 装备保障性工程与管理[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [3] 姜兴渭. 可靠性工程技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
- [4] 陈奇妙. 电子产品环境应力筛选指南[M]. 北京:强度与环境编辑部,1983.
- [5] GJB1032—90, 电子环境应力筛选方法[S].

(责任编辑 周江川)

(上接第 133 页)

参考文献:

- [1] 洪卫,李长军,李卓. 基于贝叶斯网络的 UUV 威胁评估[J]. 四川兵工学报,2009,30(3):89-93.
- [2] Commander's Handbook for Joint Battle Damage Assessment [Z]. United States Joint Forces Command Joint Warfighting Center, Office of the Secretary of Defense, Joint Battle Damage Assessment Joint Test and Evaluation, 2004.
- [3] Pearl J. Fusion, Propagation, and Structuring in Belief Net-

works[J]. Artificial Intelligence, 1986(29):241-288.

- [4] 黄建明,方娇莉,赵波. 贝叶斯网络推理的研究与分析[J]. 电脑知识与技术,2007(15):834-835.
- [5] 罗宇智,陈臻. 贝叶斯网络的气象威胁建模及评估方法研究[J]. 计算机仿真,2008,25(11):52-55.
- [6] 王志成,王润生,贾希胜,等. 战场损伤快速评估系统数据库研究[J]. 军械工程学院学报,2002,14(3):31-35.
- [7] 马志军,贾希胜,陈丽. 基于贝叶斯网络的目标毁伤效果评估研究[J]. 兵工学报,2008,29(12):1509-1513.

(责任编辑 周江川)