

地面雷达可靠性加速试验方法研究

孔耀¹, 袁宏杰², 王政¹, 朱绪珪¹

(1.中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081;
2.北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100083)

摘要: **目的** 缩短可靠性鉴定时间, 降低试验费用, 形成工程化方法。**方法** 以 GJB 899A—2009 为依据, 根据雷达产品的实际特点, 选择合适的定时统计试验方案, 确定可靠性鉴定试验剖面。参考国内外加速试验标准, 运用阿伦尼乌斯模型、Norris-Landzberg 模型、疲劳累积损伤模型对可靠性鉴定试验剖面中温度、温度循环、振动应力水平进行加速, 分别给出温度、温度循环、振动应力加速因子计算方法, 得到加速条件下的等效试验剖面及故障时间。**结果** 通过可靠性加速试验等效剖面计算, 雷达可靠性鉴定试验时间由 1100 h 等效为加速条件下 367 h。**结论** 地面雷达可靠性加速试验方法能够明显缩短试验时间, 降低试验成本, 可以在工程中推广应用。

关键词: 地面雷达; 可靠性加速试验; 加速因子; 可靠性鉴定试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.08.017

中图分类号: TB114.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)08-0110-05

Reliability Acceleration Test Method of Ground Radar

KONG Yao¹, YUAN Hong-jie², WANG Zheng¹, ZHU Xu-yao¹

(1. The Fifty-Fourth Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China; 2. School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to form an engineering method to shorten the time of reliability evaluation and reduce the cost of test. On the basis of GJB 899A—2009, according to the actual characteristics of radar products, an appropriate timing statistical test program was selected to determine the reliability evaluation test profile. With reference to domestic and international acceleration test standards, Arrhenius model, Norris-Landzberg model and fatigue cumulative damage model were adopted to accelerate the temperature, temperature cycling and vibration stress level in the reliability evaluation test section to obtain the equivalent test profile and fault time. By calculating the equivalent profile of the reliability acceleration test, the radar reliability evaluation test time was equivalent to 367 hours under the acceleration condition from 1100 hours. The reliability acceleration test method of ground radar can obviously shorten the test time and reduce the test cost, and can be popularized and applied in engineering.

KEY WORDS: ground radar; reliability acceleration test; acceleration factor; reliability evaluation test

地面雷达主要通过天线发射和接收电磁波, 并从接收到的电磁波中解析探测范围内的动目标, 最终将

动目标数据发送到处理终端, 由处理终端做进一步处理, 输出可以直接观测的动目标轨迹。新军事变革及

收稿日期: 2020-01-15; 修订日期: 2020-03-22

Received: 2020-01-15; Revised: 2020-03-22

作者简介: 孔耀(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为可靠性设计、试验与评估。

Biography: KONG Yao(1991—), Male, Master, Engineer, Research focus: reliability design, testing and evaluation.

复杂的战场环境对雷达的功能性能指标要求不断提高,可靠性指标达到了上千小时。在可靠性鉴定试验过程中采用环境模拟试验面临着试验样本量少、试验时间长、费用高等问题,且故障激发效果低,在工程实际中难以实现。可靠性加速试验已成为可靠性试验领域的研究热点,能够明显地降低试验经费,缩短试验时间。

1 整机的可靠性模型

在给定的时间 t_0 , 产品的可靠度可表示为^[1]:

$$R_{\text{Item}}(t_0) = \prod_{i=1}^S R_{\text{Stress}_i}(t_i) \quad (1)$$

式中, R_{Stress_i} 为产品在某一种应力(工作应力或环境应力)下的可靠度。

环境应力包括温度、温度循环、湿度、振动、冲击等。工作应力包括与产品使用相关的应力,如:开

机/停机、功率、电压波动、负载等。

根据产品的使用环境确定应力种类和应力水平。产品失效率可表示为:

$$\lambda_{\text{Item}} = \sum_{i=1}^S \lambda_{\text{Stress}_i} \quad (2)$$

式中, $\lambda_{\text{Stress}_i}$ 为产品在某一应力(使用应力或环境应力)下的失效率。该模型将产品的可靠度按应力的类型进行分配。

2 加速试验方案设计流程

以 GJB 899A—2009 的统计试验方案为基础,首先根据产品的实际情况选择确定合适的定时统计试验方案和可靠性鉴定试验剖面^[2],然后对鉴定试验剖面温度和振动应力水平进行加速,并分别计算加速因子,从而得到加速条件下的等效试验剖面^[3-9]。加速试验方案制定流程如图 1 所示。

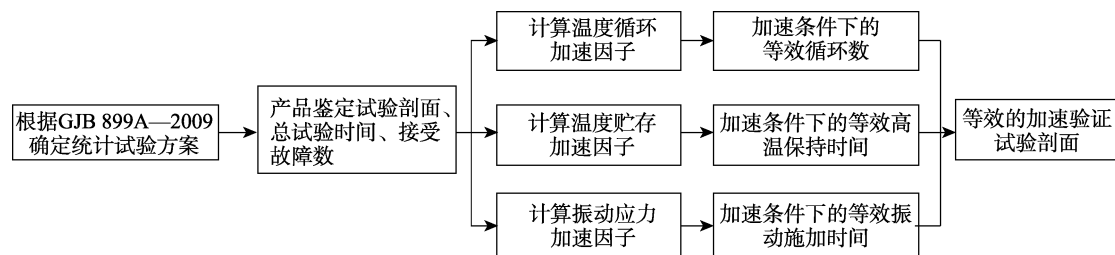


图 1 加速试验方案设计流程
Fig.1 Acceleration test program design process

具体试验方法确定步骤为:

- 1) 根据受试设备的实际情况,选择试验方案;根据产品可靠性指标及试验方案确定总试验时间及故障判据;
- 2) 参照相关规范,制定可靠性鉴定试验剖面;
- 3) 根据强化试验结果或产品耐应力极限分析,确定加速试验的最高温度、最低温度、温变率;
- 4) 根据 Norris-Landzberg 模型计算温度循环加速因子,并确定加速条件下总温度循环数;
- 5) 根据阿伦尼斯模型,将正常工作温度应力折合到加速温度应力,计算加速条件下温度保持总时间;
- 6) 确定加速条件下每个循环中温度保持时间及每个循环时间;
- 7) 确定加速试验总时间;
- 8) 根据疲劳累积损伤模型及总的加速试验时间,计算加速试验振动量级。
- 9) 确定加速试验剖面;
- 10) 计算故障时间折合因子;
- 11) 估算 MTBF 值。

3 加速因子及故障时间的确定

3.1 温度加速因子的确定

激活能决定了温度应力的加速因子。加速因子的计算公式为:

$$A_{\text{AF}} = \frac{t_{\text{use}}}{t_{\text{test}}} = \exp\left(\frac{E_a}{k} \cdot \frac{T_{\text{use}}^{-1}}{T_{\text{test}}^{-1}}\right) \quad (3)$$

式中: k 为波尔兹曼常数, 8.617×10^{-5} eV/K; E_a 为元件的激活能, eV; T_{use} 为正常工作温度; T_{test} 为加速试验温度。

分析国内外的规范可以得出结论:

- 1) 激活能越大,加速因子越大,集成电路的激活能一般高于电阻、电容等分立元件,是其两倍左右。集成电路的基本失效率大于分立元件的基本失效率。

- 2) 如果电子产品包含较多的集成电路,可以选取较高的加速因子。

对于通讯装备,有较多的集成电路,因此,建议激活能选用 0.5~0.9 eV。

3.2 振动加速因子的确定

振动应力的加速因子按 GJB 150.16A 《军用装备实验室环境试验方法》中第 16 部分振动试验给出的方法确定^[10-14]。

随机振动的加速公式：

$$\frac{W_0}{W_1} = \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{4}$$

正弦振动的加速公式：

$$\frac{g_0}{g_1} = \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{\frac{1}{6}} \tag{5}$$

式中： W_0 为规定的随机振动量值（加速度谱密度）， g^2/Hz ； W_1 为施加的随机振动量值（加速度谱密度）， g^2/Hz ； g_0 为规定的正弦振动量值（峰值加速度）， g ； g_1 为施加的正弦振动量值（峰值加速度）， g ； T_0 为规定的时间； T_1 为施加的时间。

式(4)–(5)是线性疲劳损伤累积的简化表达式。指数是材料常量，给出的值适用于航空电子装备。导弹试验大纲使用的指数值为 1/3.25~1/6.6，航天器试验大纲有时使用 1/2，多数材料的指数取 1/6~1/6.5。指数值的变化范围与所要求的保守程度以及材料特性有关。必要时应根据具体材料的疲劳数据（S/N 曲线）进行分析。

3.3 温度循环加速因子的确定

由 JEDES 标准 JESD94A 可知，温度循环的加速因子符合 Norris-Landzberg 模型：

$$A_{TC} = \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)^{1.9} \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{1/3} \exp[0.01(T_{max1} - T_{max2})] \tag{6}$$

式中： ΔT_1 为加速应力温度循环的变化范围； ΔT_2

为使用温度循环变化范围； v_1 为使用时温度循环的温变率； v_2 为加速时温度循环的温变率； T_{max1} 、 T_{max2} 分别为两种温度循环中的最高温度。

3.4 故障时间的确定

制定的加速可靠性试验方案与可靠性鉴定试验方案之间的故障时间折合因子为：

$$k = \frac{t_0}{t_{AT}} \tag{7}$$

加速可靠性验证试验中出现故障的时间折合到可靠性鉴定试验剖面下为：

$$t_{failure_0} = k \times t_{failure_AT} \tag{8}$$

4 地面雷达可靠性加速试验方案设计

地面雷达由雷达主机、AC-DC 电源、座体和支架、处理终端和显控软件五部分组成，主要用于固定场景（铁塔架设等）。其可靠性指标 MTBF 值不低于 1000 h，即 $\theta_1=1000$ h。鉴定试验采用 GJB 899A—2009 中的定时截尾试验方案 21 号。方案参数详见表 1，可靠性鉴定试验剖面见图 2。

表 1 试验方案参数
Tab.1 Test program parameters

决策风险%		鉴别比	试验时间	判决故障数	
α	β	d	θ_1 的倍数	拒收	接收
30	30	3	1.1	≥ 1	≤ 0

总有效试验时间是指所有被试品承受试验应力的累积时间，用被试品试验累积的台时数表示。

根据选定的试验方案，本次鉴定试验的总有效试验时间为：

$$T_{鉴定} = 1.1 \times \theta_1 = 1.1 \times 1000 \text{ h} = 1100 \text{ h} \tag{9}$$

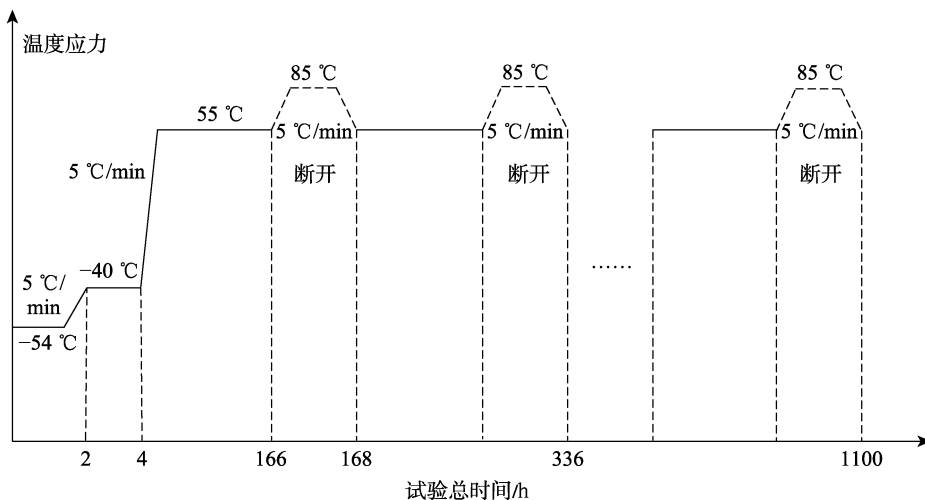


图 2 雷达可靠性鉴定试验剖面
Fig.2 Reliability evaluation test profile of radar

雷达的发射机是薄弱环节，自身功耗较大，因此高温对其影响较大，整个可靠性试验剖面高温时间约为持续时间的一半。发射分机的主要元件包括电阻、电容、电感、集成电路等，电子元件的失效率与元件的工作温度有关。美国军用手册《HandBook of 217Plus Reliability Prediction models》给出了不同元件的温度激活能。如集成电路的温度激活能为 0.8 eV，陶瓷电容、二极管为 0.3 eV，电阻的激活能为 0.2 eV，电感激活能为 0.47 eV。法国 FIDES

《Reliability Methodology for Electronic Systems》给出了不同元件的温度应力的激活能，如集成电路、二极管、电感、微波器件等激活能为 0.7 eV，铝电容的激活能为 0.4 eV、电阻的激活能为 0.15 eV，电压转换器的激活能为 0.44 eV，光耦、DIP 插座、开关、继电器等的激活能为 0.25 eV。我国 GJB/Z 299C—2006《电子设备可靠性预计手册》给出了不同元件的温度应力系数，具体见表 2。

表 2 部分元件的温度应力系数
Tab.2 Temperature stress coefficient of some components

元件	温度/℃				
	30	40	50	60	70
双极微处理器、存储器	0.14	0.24	0.41	0.66	1.04
MOS 处理器存储器	0.15	0.30	0.56	1.0	1.75
混合集成电路	—	0.97	1.36	1.87	2.52
1 类瓷介电容(S=1)	0.0517	0.0703	0.0956	0.1299	0.1767
2 类瓷介电容(S=2)	0.056 53	0.057 33	0.058 13	0.5978	0.061 47

由 3.1 小节中公式(3)可知，激活能决定了加速因子，表 3 给出了不同激活能对应的加速因子。

表 3 不同激活能对应的加速因子
Tab.3 Acceleration factors corresponding to different activation energies

激活能/eV	加速因子			
	70 °C/20 °C	70 °C/30 °C	70 °C/40 °C	70 °C/50 °C
0.1	1.8	1.6	1.4	1.3
0.2	3.2	2.4	1.9	1.5
0.3	5.7	3.8	2.6	1.9
0.4	10	6	3.7	2.3
0.5	18	9.3	5.1	2.9
0.6	32	15	7	3.5
0.7	57	22.8	9.7	4.3
0.8	101	36	13.4	5.3
0.9	180	55	19	6.6

分析这些国内外的规范可以得出结论：

1) 激活能越大，加速因子越大，集成电路的激活能一般高于电阻、电容等分立元件，是其两倍左右，集成电路的基本失效率大于分立元件的基本失效率。

2) GJB/Z 299C—2006 给出的加速因子低于美军标和 FDES。

3) 如果电子产品包含较多的集成电路，可以选择较高的加速因子。

对于地面雷达，发射分机的功耗较大，约 40 W，功率模块存在散热的风险，有较多的微波功率器件，因此选用 0.7 eV 激活能。70 °C 到 55 °C 加速因子约为 3。

电应力按下述要求：50%的时间输入为设计的标称电压；25%时间为标称电压的上限，25%为标称电压的下限。设备连续工作时间为 168 h，电应力的工作循环时间也为 168 h。

综上所述，可靠性加速试验时间 $T_{加速}$ 为 367 h，可靠性加速试验剖面见图 3。

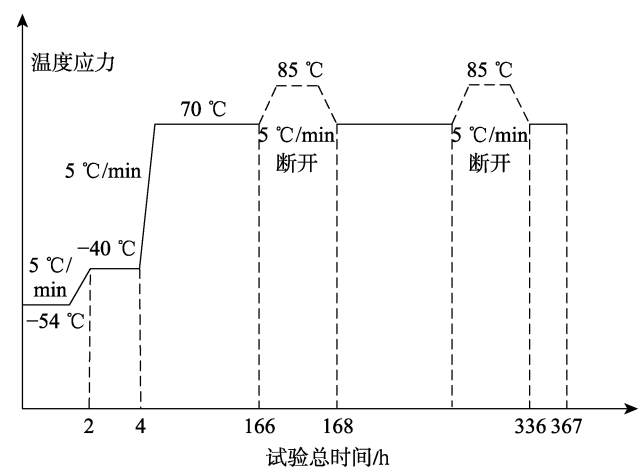


图 3 雷达可靠性加速试验剖面
Fig.3 Reliability acceleration test profile of radar

5 结论

1) 依据国内外试验标准提出了可靠性加速试验方案的设计流程，给出了温度、振动加速因子的计算方法。

2) 在不改变失效机理的情况下可以明显缩短试验时间，降低试验成本，可在工程实践中进行推广。

参考文献:

- [1] IEC 62506—2013, Methods for Product Accelerated Testing[S].
- [2] GJB 899A—2009, 可靠性鉴定与验收试验[S].
GJB 899A—2009, Reliability Testing for Qualification and Production Acceptance[S].
- [3] HUANG W, ASKIN R G. Reliability Analysis of Electronic Devices with Multiple Competing Failure Modes Involving Performance Aging Degradation[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2003, 19: 241-254.
- [4] 黄婷婷, 姜同敏. 加速寿命试验中统计加速模型综述[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 57-62.
HUANG Ting-ting, JIANG Tong-min. Review of Statistical Acceleration Methods of in Accelerated Life Testing[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(4): 57-62.
- [5] IEC 60068-2-38: 2009, Environmental testing: Composite Temperature/Humidity Cyclic Test[S].
- [6] FIDES, Reliability Methodology for Electronic Systems[S].
- [7] RIAC-HDBK-217Plus, Handbook of 217 plus Reliability Prediction models[S].
- [8] JESD94A, Application Specific Qualification Using Knowledge Based Test Methodology[S].
- [9] GJB 150.16A—2009, 军用装备实验室环境试验方法第16部分: 振动试验[S].
GJB 150.16A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel-Part 16: Vibration Test[S].
- [10] BAI D S. Optimam Simple Step-Stress Accelerated Life Tests with Censoring[J]. IEEE Trans Reliability, 2001, 32(1): 98-103.
- [11] 王冬梅, 谢劲松. 随机振动试验加速因子的计算方法[J]. 环境技术, 2010, 28(2): 47-51.
WANG Dong-mei, XIE Jin-song. Acceleration Factor Calculation Method of Random Vibration Test[J]. Environment Technology, 2010, 28(2): 47-51.
- [12] 张晓洁, 李政. 一种基于振动应力变换的加速试验方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2015, 33(1): 20-23.
ZHANG Xiao-jie, LI Zheng. Accelerated Test Method of Based on Altering the Vibration Stress[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2015, 33(1): 20-23.
- [13] 钱自富, 张庆军, 陈涛. 典型机载设备加速振动试验应用方法研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14 (11): 70-75.
QIAN Zi-fu, ZHANG Qing-jun, CHEN Tao. Application of Accelerated Vibration Test for Typical Airborne Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14 (11): 70-75.
- [14] 蒋瑜, 陶俊勇. 结构振动疲劳加速试验技术研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 30-35.
JIANG Yu, TAO Jun-yong. Accelerated Vibration Fatigue Testing of Structures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 30-35.