

# 基于应力分析法的士兵系统电子器件 可靠性研究

司访<sup>1</sup>, 王新蕊<sup>1</sup>, 李鹏杰<sup>1</sup>, 李小奇<sup>1</sup>, 管小荣<sup>2</sup>

(1.中国兵器装备集团兵器装备研究所, 北京 102202; 2.南京理工大学, 南京 210094)

**摘要:** **目的** 提高士兵系统元器件可靠性, 提出一种可应用于士兵系统电子装备可靠性设计的方法。**方法** 以士兵某探测器设计过程为研究对象, 依据军用电子元器件标准和规范对 2 种可靠性保证要求表征方法进行分析, 采用应力分析法针对士兵电子器件进行可靠性设计。**结果** 该探测器的 MTBF 值为 90 345.56 h, 达到了该设备基本可靠性要求。当产品工作到 2 a 时, 探测器任务可靠度为 0.833, 达到了该设备任务可靠性要求。**结论** 提出的方法可为士兵系统电子装备可靠性设计提供技术支持。

**关键词:** 士兵系统; 电子器件; 可靠性; 应力分析法; 信息系统; 军用可靠性标准

**中图分类号:** TJ01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)06-0006-05

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.002

## Reliability of Electronic Devices of Soldier System Based on Stress Analysis Method

SI Fang<sup>1</sup>, WANG Xin-rui<sup>1</sup>, LI Peng-jie<sup>1</sup>, LI Xiao-qi<sup>1</sup>, GUAN Xiao-rong<sup>2</sup>

(1. Ordnance Equipment Research Institute of China Ordnance Equipment Group, Beijing 102202, China;

2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**ABSTRACT:** In order to improve the reliability of the components of the soldier system, this paper proposes a method that can be applied to the reliability design of the electronic equipment of the soldier system. Taking the design process of a soldier's detector as the research object, two characterization methods of reliability assurance requirements are analyzed according to the standards and specifications of military electronic components, and the reliability design of the soldier's electronic devices is carried out by using the stress analysis method. The MTBF value of the detector is 90 345.56 hours, which meets the basic reliability requirements of the device. When the product works for 2 years, the detector mission reliability is 0.833, which meets the mission reliability requirements of the device. The proposed method can provide technical support for reliability design of electronic equipment of soldier system.

**KEY WORDS:** soldier systems; electronic devices; reliability; stress analysis; information systems; military reliability standards

收稿日期: 2022-04-30; 修订日期: 2022-06-17

Received: 2022-04-30; Revised: 2022-06-17

作者简介: 司访 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为士兵信息系统装备设计。

**Biography:** SI Fang (1992-), Male, Masteh, Engineer, Research focus: equipment design of soldier information system.

通讯作者: 管小荣 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向单兵智能装备。

**Corresponding author:** GUAN Xiao-rong (1979-), Male, Doctor, Professor, Research focus: individual inteulgent eqmupnent.

引文格式: 司访, 王新蕊, 李鹏杰, 等. 基于应力分析法的士兵系统电子器件可靠性研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 006-010.

SI Fang, WANG Xin-rui, LI Peng-jie, et al. Reliability of Electronic Devices of Soldier System Based on Stress Analysis Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 006-010.

应力分析法是考虑电子产品中的每个元器件类型、工作应力、环境应力、质量等级的不同,根据经验详细计算每个元器件的故障率,再将组成产品的所有元器件的故障率累加,得到产品故障率。应力分析法适用于工程研制中后期电子产品的可靠性预计。此时,元器件的具体种类、数量、工作应力和环境、质量系数等已确定。

李培基等<sup>[1]</sup>提出了一种利用有限元分析作为“数值实验”工具的新方法,通过模糊线性回归法,直接求出了结构应力的统计特性。基于本文提出的模糊应力-随机强度干涉模型,可以对机械结构的模糊可靠性进行评估。周元初等<sup>[2]</sup>提出了一种更通用、稳健的方法,该方法能够准确评估并确定失效概率。张晓迎<sup>[3]</sup>等研究了涉及相关非正态分布的可靠性分析,概率密度函数是从可靠性指数中获得的,并与蒙特卡罗模拟产生的可靠性值进行了比较。

目前,国内外很多专家学者开始了研究装备可靠性评估方法,但是使用应力分析法研究士兵系统电子器件可靠性的论文尚处于空白<sup>[4]</sup>。因此,本文创新采用应力分析法,研究了士兵系统电子器件的可靠性设计方法,为士兵系统电子器件设计提供理论支撑<sup>[5]</sup>。

## 1 应力法设计流程及使用规则

### 1.1 应力法设计流程

应力分析法可以快速确定产品设计是否满足规定的可靠性指标,一般实际产品很难达到规定的可靠性指标要求<sup>[6]</sup>。在产品设计过程中,可以通过应力分析法,找出产品设计的薄弱环节,达到提高产品可靠性的目的<sup>[7]</sup>。可靠性预计有多种方法,主要有评分法、相似产品法、元件计数法、应力分析法等<sup>[8]</sup>。

采用应力分析法设计士兵系统的电子模块,首先分析元器件来源(生产国、用途、生产厂家所属行业、使用状态等),选择数据手册,对于那些根据手册无法进行可靠性预计的元器件,需要厂家提供元器件故障率<sup>[9]</sup>。然后,确定元器件进行应力分析的模型,统计元器件相关信息,计算元器件故障率,依照所选数据手册,确定出每种元器件进行应力分析所需的模型和相关参数(工作应力、环境条件、质量等级等)<sup>[10]</sup>。了解元器件的相关信息,由此查找数据手册,得到模型中的各类系数,代入该元器件的故障率模型,由此可计算得出元器件故障率<sup>[11]</sup>。最后,综合计算产品可靠性,由可靠性建模得到的基本可靠性模型和任务可靠性模型,预计产品的基本可靠性和任务可靠性<sup>[12]</sup>。

### 1.2 使用规则

士兵系统的电子元器件使用环境更加恶劣复杂,在应力分析法分析可靠性过程中,相应的可靠性预计标准、手册是非常宝贵的借鉴工具<sup>[13]</sup>。这些标准、手

册大多数是根据不同元器件、部件进行大量试验得出的参考数据,常用的预计标准有 HDBK-217F 和 GJB 299C 电子产品可靠性预计手册、RDF2000 法国电信设备可靠性预计手册、HRD5 英国电子元器件可靠性数据手册、SR-332 贝尔电信设备可靠性预计手册等<sup>[14]</sup>。应力分析法使用规则:

1) 数据手册选择直接关系到可靠性预计结果的准确性。切忌为简单省事,不按元器件生产国、用途(军用/民用)、生产厂家所属行业、使用状况(工作/非工作)选择最为合适的数据手册<sup>[15]</sup>。

2) 应力分析法预计,通常从每块电路板上元器件开始,然后逐级向上累加,最后计算出整机(或系统)的可靠性<sup>[16]</sup>。

3) 注意区分不同小类的元器件,避免参数选择错误。

4) 电路板上一般有不同类型的元器件,故应在预计表上列出各种元器件可靠性有关的系数<sup>[17]</sup>。

5) 凡超出手册上规定参数范围的元器件,不能随意外推,而应当优先选用其他替代的数据手册或根据经验判定其故障率,并给出理由。该项工作需与订货方沟通,所采用方法和数据需得到订货方认可。

6) 不同数据手册上对同一品种元器件提供的故障率计算模型可能并不相同,因此故障率模型和数据应采用同一手册上的内容,不可混用<sup>[18]</sup>。

7) 国产元器件中,如按电子行业企业军用标准或按国外相关军用标准生产的元器件,可按质量等级来取质量系数;如按上级规定的二次筛选要求(规范)进行筛选的元器件,可按质量等级中最低的等级来取质量系数<sup>[19]</sup>。

8) 对半导体器件、电阻器、电容器等的环境系数,虽然属同一种类,但如果是不同品种,一般其环境系数也不相同,选取系数时应认真查找有关的预计手册。

9) 预计温度一般在产品环境温度最高值的基础上进行调整<sup>[20]</sup>。对于有通风条件的,环境温度需要适当降低;对于局部环境有发热器件的,环境温度需要适当升高<sup>[21]</sup>。在条件允许的情况下,应当进行实际测量以明确器件温度。

## 2 某士兵探测器可靠性设计

下面以某探测器为例,阐述应力分析法的应用。该探测器基本可靠性要求为平均故障间隔时间(Mean Time between Failures, MTBF)大于 10 a。

1) 定义产品。该探测器执行任务时,所有元器件在任务剖面内均处于工作状态。探测器的工作环境一般在普通建筑物内,为一般地面环境<sup>[22]</sup>。

2) 选择可靠性预计方法。由于该设备正处于工程研制中后期,且元器件的具体种类、数量、工作应

力和环境、质量等级等已确定，因此采用应力分析法进行系统可靠性预计<sup>[23]</sup>。

3) 按照预计步骤进行预计。

a) 分析元器件来源，选择数据手册。所有元器件中，除振荡器 G1 是进口的美国军用元器件，铝电解电容 C4 是进口的美国民用元器件外，其他元器件均是国产元器件。执行任务时，所有元器件均处于工作状态。因此，振荡器 G1 应选用振荡器型号 MIL-STD-217F，铝电解电容 C4 应选用 Telcordia SR-332，其他元器件应选用 GJB/Z 299C。

b) 确定元器件进行应力分析的模型，统计元器件相关信息，计算元器件故障率。根据不同预计手册，明确进行应力分析的模型和数据，计算出元器件的故障率。

对于电容 C1，通过查找 GJB/Z 299C，确定其属于 1 类瓷介电容器，工作故障率计算公式为<sup>[24]</sup>：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_e \pi_q \pi_{cv} \pi_{ch} \quad (1)$$

式中： $\lambda_p$  为通用故障率； $\lambda_b$  为基本故障率； $\pi_e$  为环境系数； $\pi_q$  为质量系数； $\pi_{cv}$  为电容量系数； $\pi_{ch}$  为表面贴装系数。

①确定环境系数。由于探测器的工作环境为一般地面环境，即  $G_{FI}$ 。根据 GJB/Z 299C 表 5.7.5-2 “环境系数”可知，电容 C1 的环境系数为 2.4。

②确定质量系数。由于电容 C1 属于低档产品，根据 GJB/Z 299C 表 5.7.5-3 “质量等级与质量系数”可知，电容 C1 的质量系数为 5。

③确定电容量系数。由于电容 C1 的电容量为 (82±4.1%) pF，根据 GJB/Z 299C 表 5.7.5-4 “电容量系数”可知，电容 C1 的电容量系数为 0.75。

④确定表面贴装系数。由于电容 C1 是 1 类瓷介，片式，根据 GJB/Z 299C 表 5.7.1-1 “表面贴装系数”可知，电容 C1 的表面贴装系数为 1.5。

⑤确定基本故障率。由于电容 C1 的工作电压与额定电压之比为 0.1，工作环境温度为 40 °C，根据 GJB/Z 299C 表 5.7.5-1 “基本失效率”可知，电容 C1 基本故障率为  $0.001 9 \times 10^{-6} h^{-1}$ 。

⑥由此可知，电容 C1 的工作故障率为：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_e \pi_q \pi_{cv} \pi_{ch} = 0.025 65 \times 10^{-6} h^{-1} \quad (2)$$

对于振荡器 G1，通过查找振荡器型号 MIL-STD-217F，确定其属于石英谐振器，工作故障

$$R_s(17 520) = \prod_{i=1}^{17} e^{-\lambda_i t} \times \left( \prod_{j=1}^5 e^{-\lambda_j t} + \prod_{k=1}^5 e^{-\lambda_k t} - \prod_{j=1}^5 e^{-\lambda_j t} \cdot \prod_{k=1}^5 e^{-\lambda_k t} \right) = e^{-10.437 64 \times 10^{-6} \times 17 520} \times \quad (9)$$

$$\left[ 2 \times e^{-0.315 486 \times 10^{-6} \times 17 520} - \left( e^{-0.315 486 \times 10^{-6} \times 17 520} \right)^2 \right] = 0.833$$

4) 得出可靠性预计结论。该探测器的 MTBF 值为 90 345.56 h，达到了该设备基本可靠性要求 ( $t_{mbf} > 87 600 h$ )；当产品工作到 2 a 时，探测器任务可靠度为 0.833，达到了该设备任务可靠性的要求。

率计算公式为：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_q \pi_e \quad (3)$$

在 MIL-STD-217F 19-1 节中，根据该石英谐振器的频率为 10 MHz，查找到振荡器 G1 的基本故障率为  $0.022 \times 10^{-6} h^{-1}$ 。由于振荡器 G1 工作环境为一般地面环境，即  $G_F$ ，根据 MIL-STD-217F 19-1 节“环境系数”表可知，振荡器 G1 的环境系数为 3.0。由于振荡器 G1 属于低档产品，根据 MIL-STD-217F 19-1 节“质量系数”表可知，振荡器 G1 的质量系数为 2.1。由此可知，振荡器 G1 的工作故障率为：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_q \pi_e = 0.138 6 \times 10^{-6} h^{-1} \quad (4)$$

对于铝电解电容 C4，通过查找电子设备可靠性预测程序 (Telcordia SR-332)，确定其属于铝电解电容，其故障率计算公式为：

$$\lambda_{bb} = \lambda_h \pi_q \pi_s \pi_t \quad (5)$$

式中： $\lambda_{bb}$  为黑箱稳态故障率； $\lambda_g$  为平均通用稳态故障率； $\pi_s$  为电应力系数； $\pi_t$  为温度系数。

由于铝电解电容 C4 为 410 μF，根据电子设备可靠性预测程序 (Telcordia SR-332) 表 8-1 “电容故障率参数”可知，平均通用稳态故障率  $\lambda_g$  为  $0.014 \times 10^{-6} h^{-1}$ 。根据电子设备可靠性预测程序 (Telcordia SR-332) 表 9-4 “元器件质量等级和质量系数”，铝电解电容 C4 的质量等级属于 I 级，可知质量系数  $\pi_q$  为 3。由于铝电解电容 C4 的工作电压与额定电压之比为 0.5，根据电子设备可靠性预测程序 (Telcordia SR-332) 表 9-2 “电应力系数”，可知电应力系数  $\pi_s$  为 1.0。由于铝电解电容 C4 的工作环境温度温度为 40 °C，根据 Telcordia SR-332 表 9-1 “温度系数”可知，温度系数  $\pi_t$  为 1.0。由此可知，铝电解电容 C4 的黑箱稳态故障率为：

$$\lambda_{bb} = \lambda_g \pi_q \pi_s \pi_t = 0.042 \times 10^{-6} h^{-1} \quad (6)$$

c) 综合计算产品可靠性。根据基本可靠性模型，该探测器故障率为：

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^{27} \lambda_i = 11.068 61 \times 10^{-6} h^{-1} \quad (7)$$

该探测器的 MTBF 值为：

$$t_{mbf} = \frac{1}{\lambda_s} = 90 345.56 h \quad (8)$$

根据探测器任务可靠性模型，可知其任务可靠度为：

其中，薄弱环节存在于集成电路 D1 和 D2，其故障率分别都为整个探测器故障率占 27%。建议提高集成电路 D1 和 D2 的质量等级，或采取降额设计法，加强筛选，改变设计方案，以达到提高产品可靠性的目的。

### 3 结语

现代电子装备的复杂程度和集成度日益提高,士兵系统电子器件通常在恶劣的自然环境和电磁环境中工作,对于电子器件可靠性要求较高。本文针对士兵电子器件采用应力分析法进行了可靠性设计,通过查阅相关数据手册,分析了电容、振荡器等电子器件的可靠性,并以某士兵探测器为例,开展了可靠性设计。本文的研究结果,可为士兵系统电子器件可靠性设计,提供理论指导。

#### 参考文献:

- [1] 李培基. 应力分析法可靠性预计实践中的几点认识[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2001, 19(5): 19-21.  
Li Bin. Application of Stress Analysis in Reliability Prediction[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2001, 19(5): 19-21.
- [2] 周元初, 李超峰, 卓礼章, 等. 电视接收机的应力分析法可靠性预计技术[J]. 应用概率统计, 1986, 2(4): 373-374.  
Wang Ming, LI Chao-feng, ZHUO Li-zhang, et al. Stress Analysis Method Reliability Prediction Technology for Television Receivers[J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 1986, 2(4): 373-374.
- [3] 张晓迎, 张晓丽. 可靠性预计中计数法和应力分析法的比较[J]. 压电与声光, 2005, 27(3): 215-217.  
Li Hang, ZHANG Xiao-li. Comparison of Counting Method and Stress Analysis Method in Reliability Prediction[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(3): 215-217.
- [4] 刘向东, 杨广平, 吴金. 一种用“应力分析法”对电子系统进行可靠性预计的通用微机程序[J]. 系统工程与电子技术, 1986, 8(7): 8-14.  
LIU Xiang-dong, YANG Guang-ping, WU Jin. A General Microcomputer Program for Reliability Prediction of Electronic Systems by "Stress Analysis Method"[J]. Systems Engineering and Electronics, 1986, 8(7): 8-14.
- [5] 赵嘉媛. 基于应力分析法的水下液压机机械手控制器可靠性预计[J]. 科技与创新, 2020(9): 49-51.  
ZHAO Jia-yuan. Reliability Prediction of Underwater Hydraulic Manipulator Controller Based on Stress Analysis Method[J]. Science and Technology & Innovation, 2020(9): 49-51.
- [6] 田乾. 电站锅炉汽包的应力分析及疲劳可靠性计算[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.  
TIAN Qian. The Stress Analysis and Reliability of Fatigue Calculations of Boiler Drum in Power Station[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [7] 许一力. 合成孔径雷达系统设计的可靠性技术研究[D]. 西安: 中国电子科技集团公司第二十研究所, 2005.  
XU Yi-li. Research on Reliability Technology of Synthetic Aperture Radar System Design[D]. Xi'an: China Electronics Eechnology Group Corporation, 2005.
- [8] 沈剑波. 电子元器件可靠性技术在发展航天中的重要作用[J]. 导弹与航天运载技术, 1999(5): 55-62.  
SHEN Jian-bo. The Important Role of Reliability Technology of Electronic Components in the Development of Aerospace[J]. Missiles and Space Vehicles, 1999(5): 55-62.
- [9] 肖虹, 田宇, 蔡少英, 等. 国外军用电子元器件可靠性技术研究进展[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2005, 23(S1): 184-188.  
XIAO Hong, TIAN Yu, CAI Shao-ying, et al. Research Progress of Foreign Military Electronic Components Reliability Technology[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2005, 23(S1): 184-188.
- [10] 何荣华, 张亚, 李波, 等. 军用电子元件的可靠性强化试验方案研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(18): 5460-5464.  
HE Rong-hua, ZHANG Ya, LI Bo, et al. Research Program of Reliability Enhancement Test about Military Electronic Components[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(18): 5460-5464.
- [11] 王蕴辉, 于宗光, 孙再吉. 电子元器件可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
WANG (W /Y)H, YU Zong-guang, SUN Zai-ji. Reliability Design of Electronic Components[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [12] 郑怡东. 用测量非线性度的方法提高电子元件的可靠性[J]. 电子测量技术, 1980, 3(3): 66-71.  
ZHENG Yi-dong. Improving the Reliability of Electronic Components by Measuring Nonlinearity[J]. Electronic Measurement Technology, 1980, 3(3): 66-71.
- [13] 张磊, 刘丙杰, 肖凡. 基于应力分析的导弹测试设备可靠性预测方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(6): 89-92.  
ZHANG Lei, LIU Bing-jie, XIAO Fan. Reliability Forecasting Method of Missile Testing Equipment Based on Stress Analysis[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(6): 89-92.
- [14] 陈冰, 尹禄, 徐魁. 威布尔分布在电子元器件可靠性评估中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(s10): 17-19.  
[14]CHEN Bing, YIN Lu, XU Kui. Application of Weibull Distribution in Reliability Evaluation of Electronic Components[J]. Chinese Jouunal of Suientofic Instlument, 2009, 30(s10): 17-19.
- [15] 朱朝轩, 罗俊, 林震, 等. 军用电子元器件可靠性强化试验的可行性研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2018, 36(4): 40-43.  
ZHU Chao-xuan, LUO Jun, LIN Zhen, et al. Research on the Feasibility of Reliability Enhancement Test of Military Electronic Components[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2018, 36(4): 40-43.
- [16] 朱朝轩, 罗俊, 林震, 等. 浅析军用电子元器件可靠性强化试验的可行性[J]. 环境技术, 2018, 36(2): 42-44.

- ZHU Chao-xuan, LUO Jun, LIN Zhen, et al. Analysis of Feasibility of Reliability Enhancement Test for Military Electronic Components[J]. Environmental Technology, 2018, 36(2): 42-44.
- [17] 邵明省, 宋素萍. 电子元器件可靠性分析[J]. 内江科技, 2007, 28(9): 107.  
SHAO M (S /X), SONG Su-ping. Reliability Analysis of Electronic Components[J]. Neijiang Science and Technology, 2007, 28(9): 107.
- [18] 柏小娟. 电子元器件可靠性筛选方案设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.  
BAI Xiao-juan. Design of Reliability Screening Scheme for Electronic Components[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [19] 王甫明. 电子元器件可靠性评价与质量控制对策探究[J]. 2020, 28(9): 107.  
Wang Fuming. Research on the Reliability Evaluation and Quality Control Countermeasures of Electronic Components [J]. 2020, 28(9): 107.
- [20] 罗小兵, 杨江辉, 刘胜. 温度和湿度对 LED 可靠性的影响及其机制分析[J]. 半导体光电, 2009, 30(3): 366-370.  
LUO Xiao-bing, YANG Jiang-hui, LIU Sheng. Effect of Temperature and Moisture on LED Reliability and Its Mechanism Analysis[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(3): 366-370.
- [21] 黄苏萍. 电子元器件可靠性与检测筛选[J]. 中国新技术新产品, 2010(4): 143.  
HUANG Su-ping. Reliability and Testing and Screening of Electronic Components[J]. China New Technologies and Products, 2010(4): 143.
- [22] 钱俊锋, 章云峰, 郑荣良, 等. 基于热分析的电子元器件可靠性探讨[J]. 微计算机信息, 2005, 21(22): 161-163.  
QIAN Jun-feng, ZHANG Yun-feng, ZHENG Rong-liang, et al. A Preliminary Study on Improving the Reliability of Electronic Components[J]. Control & Automation, 2005, 21(22): 161-163.
- [23] 韩少华, 寇烈, 张增照. 电子元器件可靠性技术在反坦克导弹武器系统中的应用[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2004, 22(4): 19-22.  
HAN Shao-hua, KOU Lie, ZHANG Zeng-zhao. Application of Reliability Technology in Electronic Components for Anti-Tank Missile Weapon System[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2004, 22(4): 19-22.
- [24] 李龙刚. 低气压环境下电子元器件可靠性的若干研究[J]. 通讯世界, 2016(15): 253-254.  
LI Long-gang. Several Studies on Reliability of Electronic Components under Low Pressure Environment[J]. Telecom World, 2016(15): 253-254.

责任编辑: 刘世忠