

可靠性仿真试验在机载电子产品上的应用

胡博, 陈平玘, 邓明

(中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036)

摘要: 可靠性仿真试验技术作为可靠性设计重要工作之一, 因其周期短, 经费少, 效果明显, 现在被广泛应用在产品研发过程中。主要研究了可靠性仿真试验技术在机载电子产品上的应用, 通过简要介绍可靠性仿真试验原理、基本流程、试验方法、试验对象选取原则等, 并结合实际工程应用, 证明了该技术对于机载电子产品早期研发过程设计质量提升具有积极推动作用。相比于传统的实物参与的可靠性试验主要解决后端暴露的问题, 该技术面向设计前端, 通过可靠性仿真试验技术得出的机载电子产品可靠性评估结果, 可以使机载电子产品在方案阶段或下图制造前存在的薄弱环节和潜在故障, 得到提前释放, 同步优化设计, 切实提升产品可靠性水平。同时, 该技术也可以满足现阶段机载电子产品研制进度紧, 资源有限的研制需求。

关键词: 可靠性仿真试验; 可靠性评估; 机载电子产品

中图分类号: V21

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)12-0031-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.12.006

Application of Reliability Simulation Test in Airborne Electronic Products

HU Bo, CHEN Ping-ping, DENG Ming

(The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

ABSTRACT: As one of the important work of reliability design, reliability simulation test technology is widely used in product research and development because of its short cycle, low cost and obvious effects. This paper mainly studies the reliability simulation test technology in the application of airborne electronic products, through the brief introduction of the principle of reliability simulation test, the basic flow, test method, and test object selection principle, connecting with the actual engineering application, shows that the technology for airborne electronic products in the early development process design quality improvement has a positive role in promoting. Compared to the traditional physical in the back-end exposure of reliability test is mainly to solve the problem, the technology faces the front-end design, through the reliability simulation test technology of airborne electronic products reliability evaluation results, can release the weak links and potential failures of below airborne electronic products in the solution phase or before manufacturing, optimize design synchronously, and improve product reliability. As the same time, the technology can also meet the development requirements of the current stage of the development of airborne electronic products in a tight schedule and limited resources.

KEY WORDS: reliability simulation test; reliability evaluation; airborne electronic products

收稿日期: 2021-04-19; 修订日期: 2021-06-15

Received: 2021-04-19; Revised: 2021-06-15

作者简介: 胡博(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电子设备可靠性与环境设计。

Biography: HU Bo(1987—), Male, Master, Engineer, Research focus: electronic equipment reliability and environment design.

引文格式: 胡博, 陈平玘, 邓明. 可靠性仿真试验在机载电子产品上的应用[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 031-036.

HU Bo, CHEN Ping-ping, DENG Ming. Application of reliability simulation test in airborne electronic products[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(12): 031-036.

可靠性作为一种通用的质量特性,已经成为衡量装备尤其是机载设备是否满足要求的重要指标之一。与地面装备相比,机载设备的工作环境更加恶劣,如温度范围大、振动量级高等。

近年来,机载电子设备的体量越来越大,技术难度和复杂度越来越高,外场飞行强度越来越大。由于研制周期缩短,机载设备研产交叉、研产并行已成为一种趋势,而用户对产品的要求也从“交装备”转变为“交能力”,机载设备可靠性水平已经成为影响效能发挥的必要因素。

可靠性是设计出来的。在产品之初,就应策划可靠性工作,包括可靠性建模、分配预计、仿真分析、试验等,确保产品可靠性工作贯穿全寿命周期,有效提升产品可靠性水平。

可靠性仿真试验是可靠性的重要工作之一,其在研制初期开展,所需周期短、经费少,效果明显,越来越多地应用在产品研制过程中。祝耀昌^[1]、程德斌^[2]等主要从可靠性技术的发展及应用方面进行了说明;李付军^[3]、王宏^[4]、任雪峰^[5]等将可靠性仿真试验技术运用在雷达中,发现了设计中存在的薄弱环节;李振^[6]、王强^[7]、张蕊^[8]、罗锐^[9]、罗成^[10]、万博^[11]、乔亮^[12]等将可靠性仿真试验技术运用在机载电子产品上,通过建模仿真、评估,改善了设计中

的薄弱环节;徐冕^[13]、邵帅^[14]、淦创^[15]、陈颖^[16]分别将可靠性仿真试验技术应用在功能电路、组件、光电产品以及单板计算机上。通过可靠性仿真试验的应用,设计师发现了早期产品设计中的薄弱环节,提升了产品可靠性。同时,随着可靠性仿真试验技术的发展,形成了相关的设计指南,如可靠性仿真分析指南^[17],温度应力分析指南^[18],应力损伤分析指南^[19],指导可靠性仿真试验在工程上的运用。通过可靠性仿真试验技术,可以在产品制造前对产品进行快速验证与评估,及早地发现产品设计中的薄弱环节和潜在故障,提前释放产品设计风险,避免因实物产出后再进行整改带来的高成本、长周期等问题。

可靠性仿真试验对提升产品可靠性水平具有重要意义,文中将对可靠性仿真试验原理和机载电子产品开展可靠性仿真试验的过程及结果进行说明。

1 可靠性仿真试验原理和方法

可靠性仿真试验是一种基于故障物理原理和计算机技术,利用计算机仿真分析软件,对实际的或设想的设备进行数字模型可靠性分析、计算的过程。它包括产品设计信息采集、产品数字样机建模、应力分析、故障预计和仿真评估5部分内容,如图1所示。

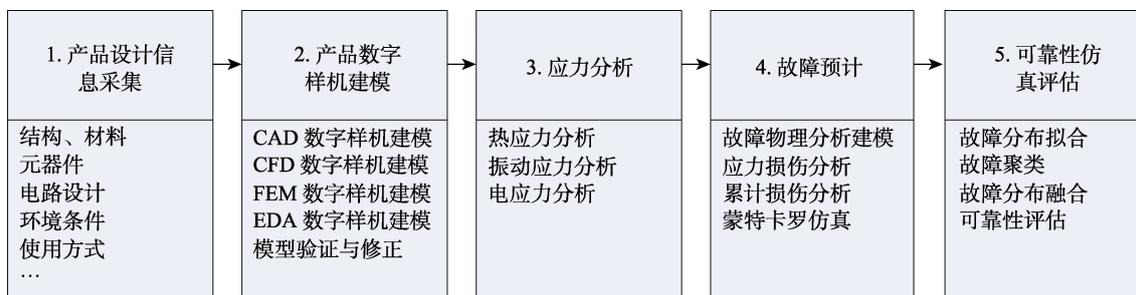


图1 可靠性仿真试验的基本流程

Fig.1 The basic flow of reliability simulation test

1.1 产品设计信息采集

机载电子产品设计信息采集是开展机载电子产品可靠性仿真试验的基础,采集的信息要尽量详细、准确,为可靠性仿真建模做准备,同时也能切实指导机载电子产品在薄弱环节中的改进。

机载电子产品设计信息采集主要包括产品的基本可靠性指标、结构、安装位置、安装方式、质量、功耗、可靠性仿真试验剖面(即实际使用环境)、产品功能说明、散热情况及条件、电路设计信息(含产品组成)、材料信息,元器件信息(含种类、数量、等级、封装形式)等。

1.2 产品数字样机建模

收集机载电子产品设计信息是开展机载电子产

品可靠性仿真试验数字样机建模的基础。数字样机建模均由软件实现,主要是将收集到的机载电子产品信息录入软件,进而开展建模工作。目前,可靠性仿真数字样机建模主要包括CAD、CFD、FEA和EDA这4种数字样机建模。其中,CAD数字样机主要建立机载电子产品的几何特征和材料属性模型;CFD数字样机主要建立机载电子产品的热仿真模型;FEA数字样机主要建立机载电子产品的振动模型;EDA数字样机主要建立机载电子产品的电气特性模型。通过建立以上数字样机模型,可以为产品开展应力分析奠定基础。

1.3 应力分析

可靠性仿真试验应力分析包括温度分析和振动分析,主要是在模型上施加机载电子产品的实际工作环境条件,分析其响应和应力分布。

1) 温度应力分析。采用计算流体力学数值分析方法进行机载电子产品的温度分析。分析中应全面考虑热交换的三种方式：传导、对流和辐射；根据分析对象的不同，除了进行稳态温度分析，某些零部件还需要进行局部的瞬态温度分析；必须分析机载电子产品在最高/最低工作温度下的稳态温度分布情况，并依据耐热设计的准则、规范和使用范围，对机载电子产品的耐温度环境能力进行评价，指出设计中的问题以及不能满足要求的薄弱部位。其中，关于元器件材料的导热率和比热参数需进行等效处理，处理原则是等效后元器件的传热特性与原始传热特性保持一致，如式(1)所示。

$$\lambda = \lambda_1 \times V_1 + \lambda_2 \times V_2 + \dots \quad (1)$$

式中： λ_i 为单项材料导热率； V_i 为单项材料体积分数； λ （综合导热率）等于各种材料的导热率乘以相应的体积分数。

2) 振动应力分析。采用有限元数值分析方法进行机载电子产品的振动分析。按照机载电子产品模态分析—频率响应分析—随机响应分析的顺序完成分析；对重要零部件还需要进行局部的细化建模和分析；必须分析机载电子产品在最大振动条件下的振动响应分布情况，并依据抗振动设计的准则、规范和使用范围，对机载电子产品的抗振动能力进行评价，指出设计中的问题以及不能满足要求的薄弱部位。根据多自由度系统的动力学方程对产品开展模态分析^[20]，如式(2)所示。

$$F(t) = M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx \quad (2)$$

式中： M 为质量矩阵； C 为阻尼矩阵； K 为刚度矩阵； x 为位移； \dot{x} 为速度； \ddot{x} 为加速度； $F(t)$ 为载荷； t 表示时间。

1.4 故障预计

可靠性仿真试验故障预计是以故障物理分析结果为基础，采用故障物理模型，分析机载电子产品预期环境下的可靠性水平，主要包括故障模式、机理和影响分析(FMMEA)，应力损伤分析，累积损伤分析等。

1) 故障模式、机理和影响分析(FMMEA)。FMMEA分析是研究机载电子产品中每个组成部分可能存在的故障模式、故障机理，并确定各个故障模式对机载电子产品其他组成部分和功能的影响的一种定性的可靠性分析方法。通过FMMEA分析，可以初步预计机载电子产品的潜在故障模式和故障机理，并选取合适的故障物理模型，为后续的应力损伤分析奠定基础。

2) 应力损伤分析。针对每种可能的故障机理，由应力分析结果提取或细化建模分析得到的潜在故障点的应力，经过数据处理转化为故障模型所需的输

入形式，计算得到该故障点在某一应力水平下的故障时间。常用的故障物理模型有很多，如描述焊点热疲劳的Coffin-Manson模型、描述随机振动疲劳的Steinberg模型。其中，Coffin-Manson模型如式(3)所示。

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\gamma}{2\varepsilon_f} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (3)$$

式中： N_f 为平均失效循环次数； ε_f 为疲劳延性系数； $\Delta\gamma$ 为焊点总应变； c 为疲劳延性指数； f 为频率。对于焊点热疲劳故障，可采用该公式进行应力损伤计算。

3) 累积损伤分析。机载电子产品的载荷历程比较复杂，需要转化为多个载荷水平进行应力分析和应力损伤计算，再按照不同的持续时间进行损伤累积，以获得各潜在故障点的故障时间。所有潜在故障点的累积损伤分析结果形成了设备的故障信息矩阵(包括故障模式、故障位置、故障机理及故障时间)。Miner线性累积模型为累积损伤分析常用模型，如式(4)所示。

$$D = \sum_{i=1}^n n_i / N_i = 1 \quad (4)$$

式中：1为主幅载荷的应力水平级数； n_i 为第 i 级数荷的循环次数； N_i 为第 i 级载荷的寿命；当损伤 D 达到临界值时就会发生破坏。通过累积损伤分析可得到多应力下的单点故障时间。

1.5 可靠性仿真评估

根据分析结果，评估机载电子产品的可靠性。主要包括：单点故障分布拟合、故障聚类、多点故障分布融合等。

1) 单点故障分布拟合。采用蒙特卡洛仿真方法获得潜在故障点的故障时间数据，再通过统计学方法拟合该潜在故障点的故障时间分布，从而获得其故障密度分布。威布尔分布是机载电子产品的常用分布，可用于失效率数据模型的建立，具有广泛的应用范围。威布尔分布函数如式(5)所示。

$$F(t) = 1 - \exp[-(t-t_0)/\varphi]^\beta \quad (5)$$

$$F(t) = 1 - e^{[-(t-t_0)/\varphi]^\beta}$$

式中： β 为形状参数； φ 为尺度参数； t_0 为位置参数； t 为故障时间参数。其中： $t > t_0$ ， $\beta > 0$ ， $\varphi > 0$ 。

2) 故障聚类。故障聚类的基本思想是在故障物理分析结果的基础上，识别机载电子产品中所有的潜在故障点，对所有的潜在故障进行聚类；根据各潜在故障类对应的密度分布进行排序，确定关键、重要的潜在故障类，从而发现机载电子产品的薄弱环节，并进行改进。

按照概率分布和潜在故障发生的先后顺序，可以

将潜在故障聚类为 I 类、II 类、III 类。通常情况下, I 类潜在故障为产品重要故障, 必须采取措施消除; II 类潜在故障为产品一般故障, 消除该故障可以提升可靠性; III 类潜在故障为产品小概率故障, 不易发生, 如果时间和经费允许, 可以消除该故障进一步提升产品可靠性。故障聚类通常采用正态分布进行分析, 把密度分布相似的故障聚为一类, 然后进行聚类分析。

3) 多点故障分布融合。采用蒙特卡罗仿真方法对机载电子产品, 在寿命期内由于应力累积损伤作用而造成的各单点故障进行融合, 得到寿命期内的故障时间分布。一般来说, 分布融合后为指数分布的形式。

2 可靠性仿真试验应用

为了提高机载电子产品可靠性, 本次参与试验的机载电子产品在研制过程中, 将可靠性仿真试验工作列入了产品可靠性的工作计划中, 希望通过可靠性仿真试验, 发现产品早期设计薄弱环节, 以提升机载电子产品的可靠性水平。

开展该机载电子产品可靠性仿真试验对象的选取原则主要为: 1) 关键、重要产品; 2) 通过 FMECA 分析出危害度等级为 II 级及以上的产品; 3) 新研产品或有重大设计改进的产品; 4) 影响飞行安全或任务完成的产品; 5) 有可靠性指标的产品。

基于以上对试验对象的选取原则, 并考虑成本及周期因素, 文中选取了安装在气密区的机架内模块开展可靠性仿真试验。基于前面介绍的试验流程, 可靠性仿真试验开展了以下工作: 试验方案及大纲编制与评审、设计信息收集、数字样机建模、模型验证与修正、应力分析(热分析与振动分析)、故障预计、可靠性评估等。通过分析可以发现, 所选取产品的可靠性水平较高, 可以有效支撑后续的生产制造。

2.1 设计信息收集

对参加本次可靠性仿真试验的模块进行了信息收集, 包括电路板设计和布局信息, 元器件信息(含种类、型号、封装、数量等), 模块使用环境和散热方式等信息。

开展本次可靠性仿真的模块采用液冷散热方式, 环境高温为 70 °C, 振动量值约为 14g, 机箱材料为铝合金, 模块中电路板材料为 FR4, 元器件封装包括塑料封装、金属封装和陶瓷封装。

2.2 数字样机建模

分别采用 CATIA、AnsysWorkbench、Flotherm、Calce 等软件开展数字样机建模, 包括 CAD 数字样机、CFD 数字样机、FEA 数字样机。首先建立产品 CAD 数字样机(见图 2), 然后根据热设计信息建立产品 CFD 数字样机(见图 3), 最后根据耐振动设计信息建立产品 FEA 数字样机(见图 4)。

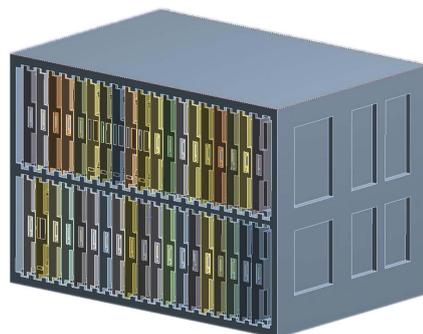


图 2 受试产品 CAD 数字样机
Fig.2 Test product CAD digital prototype

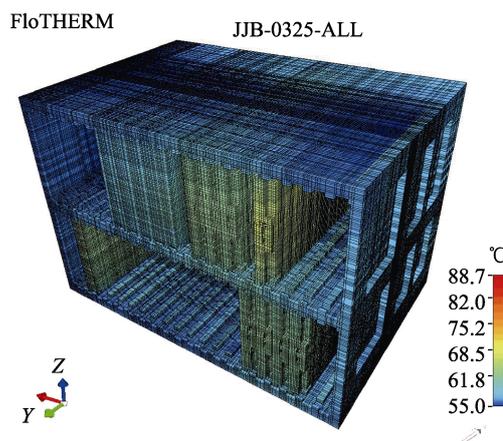


图 3 受试产品 CFD 数字样机
Fig.3 Test product CFD digital prototype

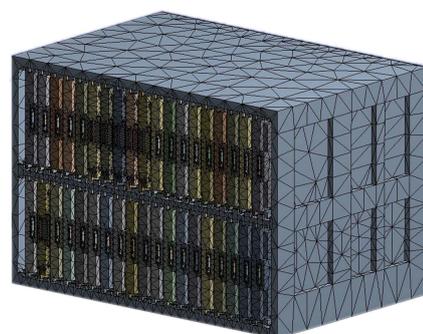


图 4 受试产品 FEA 数字样机
Fig.4 Test product FEA digital prototype

2.3 应力分析

2.3.1 热应力分析

机架内两种模块的热仿真结果见表 1, 产品使用环境温度为 70 °C。

表 1 各模块热分析结果
Tab.1 Thermal analysis results of each module

| 模块 | 功耗 /W | 温度/°C | | | 温升/°C | |
|------|-------|-------|------|----|--------|---------|
| | | 最低 | 最高 | 平均 | 较冷却液温度 | 较机箱平均温度 |
| 模块 1 | 8.6 | 59.6 | 86.2 | 73 | 13 | 8 |
| 模块 2 | 10 | 62 | 69 | 66 | 6 | 1 |

模块温度分布如图 5 所示,通过热应力分析结果可知,模块 1 和模块 2 均无高温器件,热设计合理。

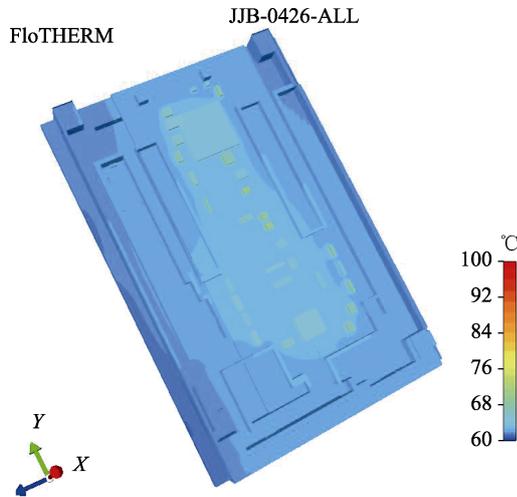


图 5 模块温度分布
Fig.5 Temperature distribution in module

2.3.2 振动应力分析

机架内两种模块随机振动的加速度响应分析结果见表 2,随机振动位移响应分析结果见表 3。通过分析可知,各模块振动设计合理,随机振动最大响应加速度为 37.054g,最大位移为 0.026 mm,比实际使用的随机振动量值 14g 高,产品的振动设计合理。

表 2 各模块随机振动加速度响应分析结果

Tab.2 Analysis results of random vibration acceleration response of each module

| 名称 | 均方根最大值/g | 说明 |
|------|----------|----|
| 模块 1 | 37.054 | — |
| 模块 2 | 21.584 | — |

表 3 各模块随机振动位移响应分析结果

Tab.3 Random vibration displacement response analysis results of each module

| 名称 | 位移最大值/mm | 说明 |
|------|----------|----|
| 模块 1 | 0.026 | — |
| 模块 2 | 0.020 | — |

2.4 故障预计

采用 CALCE PWA 软件对模块 1 和模块 2 建立故障预计模型,将热分析和振动分析结果加载到每个模块的故障预计模型中,进行分析可以发现,模块 1 和模块 2 无明显薄弱点,但对于机箱而言,由于模块 1 和模块 2 采用液冷散热的方式,机箱上冷却液入口温度将决定机架的整体温度,在冷却液温度一定的前提下,适当增加供液流量,可以为模块散热带来帮助,进一步提升可靠性。

若在分析过程中发现模块存在相对设计薄弱点,

则需要采取措施进行设计优化迭代,如调整器件选用、优化结构布局等,再进行可靠性仿真试验,直到模块没有相对薄弱点为止。

2.5 可靠性仿真评估

采用 PRICE 软件开展受试产品的可靠性评估。受试各模块的故障时间概率密度函数和平均首发故障时间评估值见表 4。

表 4 各模块可靠性评估表

Tab.4 Reliability evaluation form of each module

| 名称 | 故障时间概率密度函数 | | | | 平均首发故障时间/h |
|------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | 分布类型 | 形状参数 | 尺度参数 | 位置参数 | |
| 模块 1 | 威布尔分布 | 3.942 609 | 56 197.74 | 0 | 50 757.08 |
| 板子 1 | 威布尔分布 | 3.887 696 | 62 221.59 | 0 | 56 199.14 |
| 板子 2 | 威布尔分布 | 2.855 109 | 50 395.22 | 21 619.39 | 66 641.47 |
| 模块 2 | 威布尔分布 | 2.478 96 | 7022 9 | 31 283.14 | 93 582.71 |
| 板子 1 | 威布尔分布 | 2.507 713 | 69 337.02 | 30 804.22 | 92 424.88 |
| 板子 2 | 威布尔分布 | 9.350 397 | 518 549.1 | 367 737.6 | 859 687.6 |
| 板子 3 | 威布尔分布 | 6.815 705 | 542 798.4 | 480 192.1 | 987 296.5 |

通过可靠性评估结果可知,模块 1 平均首发故障时间为 50 757.08 h,模块 2 平均首发故障时间为 93 582.71 h,均远高于模块 1 可靠性指标 10 000 h 和模块 2 可靠性指标 15 000 h 的要求,产品设计风险较小。

3 结论

通过简要介绍可靠性仿真试验原理和方法,以及在机载电子产品上的应用,强调了仿真验证对机载电子产品早期设计的重要性。可靠性仿真试验周期短、成本低、效率高,是一种在设计早期可以发现薄弱环节的有效手段;通过反复迭代优化,可以消除产品设计缺陷,让可靠性仿真技术真正为产品质量提供帮助。在当前“研产交叉”、“研产并行”的背景下,通过可靠性仿真试验技术可以快速有效地提高机载电子产品的可靠性水平,让机载电子产品真正发挥效能。

参考文献:

[1] 祝耀昌. 可靠性故障物理技术及其应用[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 28-33.
ZHU Yao-chang. Physical methods of reliability failure and its application[J]. Equipment environmental engineering, 2005, 2(2): 28-33.

[2] 程德斌. 可靠性试验评价技术发展及其应用[J]. 环境技术, 2010, 30(5): 21-26.
CHENG De-bin. The development and application of assessment technology of reliability test[J]. Environmental technology, 2010,30(5): 21-26.

- [3] 李付军, 敬敏. 可靠性仿真在机载雷达中的应用与分析[J]. 现代雷达, 2017, 39(2): 87-90.
LI Fu-jun, JING Min. Application and analysis of reliability simulation method in air-borne radars[J]. Modern radar, 2017, 39(2): 87-90.
- [4] 王宏, 王宇歆. 可靠性仿真试验及其在雷达研制中的应用[J]. 现代雷达, 2017, 39(1): 11-16, 68.
WANG Hong, WANG Yu-xin. Reliability simulation testing and its application in radar design[J]. Modern radar, 2017, 39(1): 11-16, 68.
- [5] 任雪峰, 林新党. 某型雷达系统可靠性分析与仿真[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(9): 82-85.
REN Xue-feng, LIN Xin-dang. Reliability analysis and simulation for radar systems[J]. Ship electronic engineering, 2015, 35(9): 82-85.
- [6] 李振. 航空电子产品的可靠性设计与仿真试验[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(6): 46-51.
LI Zhen. Reliability design and simulation test of the aerospace electronic products[J]. Ship electronic engineering, 2014, 34(6): 46-51.
- [7] 王强, 吴海容, 陈晓晨. 基于故障物理的航空电子设备高可靠性评估[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(2): 216-219.
WANG Qiang, WU Hai-rong, CHEN Xiao-chen. Estimate of high reliability of aviatric electrical equipment based on physics of failure[J]. Spacecraft environment engineering, 2016, 33(2): 216-219.
- [8] 张蕊, 汪凯蔚, 沈峥嵘. 高可靠电子设备可靠性仿真试验技术应用研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2012, 30(6): 13-19.
ZHANG Rui, WANG Kai-wei, SHEN Zheng-rong. Research on reliability simulation test technology application of high reliability electronic equipment[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2012, 30(6): 13-19.
- [9] 罗锐. 海军机载电子产品(电子方舱)的可靠性设计与仿真试验[J]. 2015, 35(4): 16-18.
LUO Rui. Reliability design and simulation test of navy airborne electronic products (electronic fang cang)[J]. Ship electronic engineering, 2015, 35(4): 16-18.
- [10] 罗成, 徐文正, 王云. 航空电子产品环境仿真试验技术[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 21-23.
LUO Cheng, XU Wen-zheng, WANG Yun. Aviation electronics environmental test simulation technology[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(6): 21-23.
- [11] 万博, 付桂翠, 邹航. 航空电子产品可靠性仿真预计数据处理方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2011(01): 5-9.
WAN Bo, FU Gui-cui, ZOU Hang. Research on data processing method in reliability simulation and prediction of avionics[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2011, 29(1): 5-9.
- [12] 乔亮, 李传日, 刘龙涛. 基于故障物理的可靠性仿真试验的应用[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 7-11.
QIAO Liang, LI Chuan-ri, LIU Long-tao. Application of reliability simulation test based on failure physic[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(2): 7-11.
- [13] 徐昇, 刘春志, 郑久寿, 等. 电路功能可靠性仿真技术及应用[J]. 测控技术, 2016, 35(1): 145-148.
XU Ao, LIU Chun-zhi, ZHENG Jiu-shou, et al. Circuit functional reliability simulation technology and its application[J]. Measurement & control technology, 2016, 35(1): 145-148.
- [14] 邵帅, 刘柳, 钟季龙. 电子产品故障物理模型仿真分析与试验验证[J]. 测控技术, 2016, 35(11): 141-145.
SHAO Shuai, LIU Liu, ZHONG Ji-long. Simulation analysis and experimental verification on fault physics model of electronic products[J]. Observation and control technology, 2016, 35(11): 141-145.
- [15] 涂创. 光电产品的可靠性仿真试验[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(8): 115-117.
GAN Chuang. Reliability simulation test of the photoelectric products[J]. Ship electronic engineering, 2012, 32(8): 115-117.
- [16] 陈颖, 高蕾, 康锐. 基于故障物理的电子产品可靠性仿真分析方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(5): 444-448.
CHEN Ying, GAO Lei, KANG Rui. Research on reliability simulation prediction of electronic product based on physics of failure method[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2013, 8(5): 444-448.
- [17] HB/Z 20037—2016, 航空电子产品功能可靠性仿真分析指南[S].
HB/Z 20037—016, Functional reliability simulation analysis guide for avionics products[S].
- [18] HB/Z 20035—2016, 航空电子产品温度应力分析指南[S].
HB/Z 20035—2016, Temperature analysis guide for avionics products[S].
- [19] HB/Z 20038-2016, 航空电子产品应力损伤分析指南[S].
HB/Z 20038—2016, Stress damage analysis guide for avionics products[S].
- [20] 李德雄, 王大伟, 龚清萍. 基于有限元方法的航空电子产品振动特性分析[J]. 航空电子技术, 2016, 47(3): 36-42.
LI De-xiong, WANG Da-wei, GONG Qing-ping. Vibration analysis of aviation electronic equipment based on FEM[J]. Avionics technology, 2016, 47(3): 36-42.