

武器装备典型故障和环境效应统计分析

刘学斌, 丁光雨, 郑兴帅, 杜超群

(中国人民解放军 63870 部队, 陕西 华阴 714200)

摘要: **目的** 针对武器装备典型故障环境效应进行统计并分析。**方法** 以收集到的 208 个试验故障为研究对象, 统计分析近 10 年来武器装备进行环境试验后产生的各种环境效应, 以及环境效应的分类、分布及失效原因等, 获取武器装备环境试验失效的统计数据。**结果** 环境效应引起的故障主要集中在电子元器件和机械件的失效上, 且电子元器件的失效所占比例在所有统计试验中占比最大。在环境试验中, 高温、低温、振动等环境试验产生的环境效应和故障模式有所差别。**结论** 提出了加快针对信息化武器装备环境效应的基础设备建设和研究的投入力度, 应对电子元器件故障比例攀升带来的挑战。

关键词: 武器装备; 环境效应与失效; 统计分析; 电子元器件

中图分类号: TJ01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)04-0046-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.04.008

Statistical Analysis of Typical Faults and Environmental Effects of Weapons and Equipment

LIU Xue-bin, DING Guang-yu, ZHENG Xing-shuai, DU Chao-qun

(63870 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Shaanxi Huayin 714200, China)

ABSTRACT: This paper is to carry out statistics and analysis on the typical faults and environmental effects of weapons and equipment. In this practice, two hundred and eight test faults collected are taken as the research object, and various environmental effects produced by environmental tests of weapons and equipment in recent ten years are statistically analyzed, as well as the classification, distribution and failure causes of environmental effects, etc. The statistical data of environmental test failures of weapons and equipment are obtained. The failures caused by environmental effects mainly focus on the failure of electronic components and mechanical parts, and the failure rate of electronic components accounts for the largest proportion in all statistical tests. In environmental tests, environmental effects and failure modes produced by environmental tests such as high temperature, low temperature and vibration are different. It is proposed to accelerate the investment in infrastructure construction and research for the environmental effects of information weapons and equipment, and to cope with the challenges brought by the rising failure rate of electronic components.

KEY WORDS: weapons and equipment; environmental effect and failures; statistics and analysis; electronic components

收稿日期: 2021-08-21; 修订日期: 2022-01-03

Received: 2021-08-21; Revised: 2022-01-03

作者简介: 刘学斌(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境试验。

Biography: LIU Xue-bin (1985—), Male, Master, Engineer, Research focus: environmental test.

通讯作者: 郑兴帅(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境试验。

Corresponding author: ZHENG Xing-shuai (1989—), Male, Master, Engineer, Research focus: environmental test.

引文格式: 刘学斌, 丁光雨, 郑兴帅, 等. 武器装备典型故障和环境效应统计分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 046-053.

LIU Xue-bin, DING Guang-yu, ZHENG Xing-shuai, et al. Statistical Analysis of Typical Faults and Environmental Effects of Weapons and Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 046-053.

随着武器装备环境试验类型的多样化, 武器装备出现的各类环境效应也出现了一定统计学上的规律^[1-3]。文中针对历年来武器装备进行环境试验后产生的各种环境效应, 参考试验大纲、试验报告和故障库等数据资料, 对环境效应的分类、分布及失效原因等进行了全面统计分析, 获得了武器装备环境试验失效的统计数据。通过对统计数据进行分析, 发现近年来武器装备电子元器件的环境失效日益增加等规律。对相关武器装备进行环境试验具有重要指导意义。

1 环境效应试验故障分类及失效统计

文中共收集 208 个武器装备试验故障案例。通过

对故障产生的失效部件、故障现象、故障原因和时间周期等数据进行分析, 获得武器装备环境效应与失效的主要类型、产生规律等。着重分析了故障产生的环境因素, 侧重于探索环境试验对武器装备环境效应与失效的影响及规律。

1.1 环境效应试验故障分类

武器装备试验产生的故障主要分为环境试验产生的环境效应与失效和其他类型试验产生的失效和故障^[4-7]。表 1 给出了 208 个故障案例中产生的环境效应与失效和其他类型试验产生的失效和故障个数以及其所占的比例。

故障案例中环境效应与失效比例分布直方图如图 1 所示。

表 1 环境试验和其他类型试验故障比例
Tab.1 Fault ratio of environmental test and other types of tests

故障类型	失效模式	故障数	占比/%	占比/%	总计/%
环境试验故障	电子元件	36	49.3	17.3	35.1
	机械件	26	35.6	12.5	
	润滑脂和密封件	6	8.2	2.9	
	其他	5	6.9	2.4	
其他类型试验故障	电子元件	53	39.3	25.5	64.9
	软件	30	22.2	14.4	
	机械	23	17.0	11.1	
	其他	29	21.5	13.9	

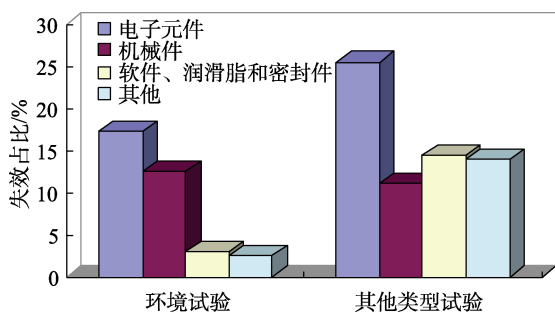


图 1 故障案例失效比例分布直方图
Fig.1 Histogram of failure ratio distribution of fault cases

由图 1 可以看出, 在所有故障案例中, 电子元件的失效占比最大, 占 42.8%, 其次是机械件失效, 占比 23.6%。环境试验故障占 35.1%, 在其他类型试验故障占 64.9%。其中, 在其他类型试验引起的故障中, 由于缺少环境条件记录, 以及最终的故障原因说明, 据经验初步统计, 有 62 个故障具有环境因素引起的典型故障模式, 约占 52.5%, 并且多数为高温、振动等环境因素引起的故障模式。失效件多为电子元器件的虚焊、电容击穿和芯片失效等和机械件的断裂、磨损和松动等。

从所有故障案例中初步统计, 由环境因素引起的故障为 133 个, 占有所有故障的 63.9%, 软件故障占

14.4%, 其他因素故障 19.3% (主要为机械件质量缺陷、电子元件批质量缺陷和元件设计缺陷等因素), 人员误操作故障 2.4%。统计数据直方图如图 2 所示。在统计的试验和故障案例中, 电子元件失效和机械件失效是引起装备失效和故障的主要失效模式。

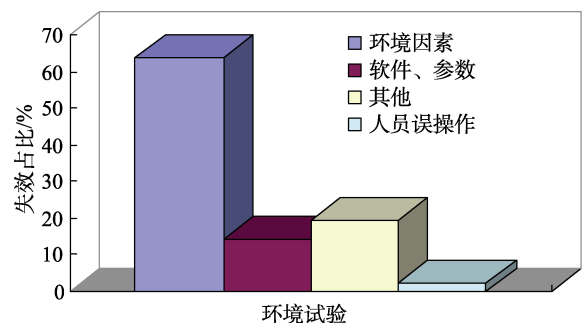


图 2 故障案例失效因素分布比例直方图
Fig.2 Histogram of distribution proportion of failure factors in fault cases

1.2 环境效应试验失效统计

1.2.1 环境效应试验失效模式统计

环境效应试验失效的种类很多, 分类方法也不同, 可以按环境类型、效应与失效类型等多种因素进

行分类。本次统计分析 208 个故障案例, 环境试验效应故障 73 个, 其他类型试验发现的故障 135 个。

在环境试验效应故障的 73 个案例中, 每个案例的具体失效模式有所不同, 但也有一定规律。按照产生环境效应与失效的组件或元件类型划分为: 电子元件失效、机械件失效、弹药火工品失效等。电子元件失效又可以划分为: 焊点失效、芯片失效、电容失效、电阻失效、电感失效等; 机械件失效又可划分为: 机械断裂失效、机械磨损失效等; 润滑脂和密封失效可划分为: 润滑脂变质失效、密封件失效等。本次汇总的 73 例失效分析中, 电子元件失效 36 个, 占环境效应失效和故障比 49.3%; 机械件失效 26 个, 占比 35.6%; 润滑脂和密封件失效 6 个, 占比 8.2%。总的来看, 电子元件失效是主要的失效模式。

1.2.2 环境效应试验失效原因统计

确定失效原因和失效机理是失效分析的主要目的, 只有准确地找到失效原因, 才能在以后的生产和使用过程中有针对性地进行改进和防范, 消除或减少失效的再发生, 保证武器装备整机和系统的可靠性。

将失效原因分为两大类: 一类是失效件本身的质量和可靠性问题, 具体失效机理有焊点虚焊、引线接触不良、芯片缺陷、润滑脂、电源使用不当等; 另一类是使用不当导致的元件失效, 简单分为人员操作故障、软件和参数设置故障等。在所有故障案例中, 软件和参数设置故障共 30 个, 占 14.4%, 人员误操作引起的故障共 5 个, 约占 2.4%。其他重要失效约占 83.2%。

1.2.3 环境效应试验类型分类统计

在统计过程中, 按照环境试验类型划分, 环境效应试验失效模式大致分为以下几类: 低温环境效应、高温环境效应、振动环境效应、湿热环境效应等。按照以上分类, 对环境试验失效的 73 个故障案例进行数据统计分析。

在故障案例统计过程中, 火炮振动造成的装备失效和故障相对比例比较大, 也被列为振动环境效应的统计范围内。由于炮振属于装备的振动环境效应, 同时炮振试验也属于国军标中的环境试验的一种。虽然, 目前基地还不具备炮振试验的条件, 但统计数据可以说明炮振试验的重要性, 同时也验证了建设和发展炮振试验的必要性。装备环境试验类型失效和故障数分类统计数据见表 2。

由于故障案例记录年限的限制, 只统计到了 2003—2013 年 10 a 间产生的故障案例, 并且对于新形成的环境试验能力的故障案例记录滞后的原因, 在近几年新形成的环境试验能力(如盐雾、淋雨、沙尘、霉菌、低气压、太阳辐射等)的故障案例数据记录较少。在统计过程中, 部分故障记录对环境量值的描述不清, 有些环境效应引起的故障案例未能完全统计。

表 2 装备环境试验类型失效和故障数
Tab.2 Type failure and fault number of equipment environmental test

序号	环境试验类型	失效和故障数	备注
1	低温试验	24	
2	高温试验	13	
3	振动试验	29	其中炮振故障 26 个
4	湿热试验	4	
5	温度冲击	2	
6	淋雨试验	1	
7	其他环境试验	—	
总计		73	

2 环境效应试验失效统计结果分析

本文按照环境试验的类型, 对产生的主要环境效应和失效进行统计分析, 主要分为低温、高温、振动、湿热、温度冲击、淋雨环境效应等。对于多种环境效应综合作用的结果分析, 由于试验数据统计较少, 并且多环境综合效应其失效机理更加复杂, 可以积累大量数据后, 再进行详细分析讨论。

2.1 低温环境效应

低温环境效应主要包括: 材料的硬化和脆化; 在对温度瞬变的响应中, 不同材料产生不同程度的收缩, 以及不同零件的膨胀率不同, 引起零部件相互咬死; 由于黏度增加, 润滑油的润滑作用和流动性降低; 电子元器件性能改变; 变压器和机电部件的性能改变; 减振架刚性增加; 固体爆炸药丸或药柱产生裂纹; 破裂与龟裂、脆裂、冲击强度改变和强度降低; 受约束的玻璃产生静疲劳; 水的冷凝和结冰; 穿防护服的操作人员灵活性、听力和视力降低; 燃烧率变化等。在统计的故障案例中, 其中低温环境效应引起的故障和失效有 24 个, 主要故障统计见表 3。

为了获得低温环境故障近几年随时间变化产生的规律, 将以上统计数据按时间绘制成曲线变化图, 如图 3 所示。为了获得低温环境效应主要失效模式的规律, 将低温环境效应的主要失效模式和产生的故障数绘制成直方图如图 4 所示。

2.2 高温环境效应

高温环境效应主要包括: 不同材料膨胀不一致使得零部件相互咬死; 润滑剂粘度和润滑剂外流造成连接处润滑能力降低; 材料尺寸全方位改变或有方向性的改变; 包装材料、衬垫、密封垫、轴承和轴发生变形、咬合和失效, 引起机械故障或者完整性损坏; 衬垫出现永久变形; 外罩和密封条损坏; 固定电阻的阻值改变; 温度梯度不同和不同的材料膨胀不一致使电

表 3 低温环境效应故障案例

Tab.3 Fault cases of low temperature environmental effect

装备名称	失效部件	故障现象	时间	原因
某型榴弹炮	继电器	机箱电源指示灯不亮	2005	机箱内继电器绝缘失效
	二极管	开机检查时通讯错误		电子器件虚焊
某型雷达	导线	天线升降动作无法完成	2006	导线磨损切断
	密封圈	天线升降无动作		密封圈损坏
某型烟火燃放系统	电子元件	转速缓慢	2006	元件虚接
	导线	控制器显示故障		触点接触不良
	硬盘	不能正常启动		硬盘损坏
	润滑脂	调炮速度缓慢		润滑油粘度变大
	电源	方位数不正确		接入触点连结不可靠
某型雷达	电源	无输出	2007	滤波电容故障
某型榴弹炮	调节器	平衡机漏气	2008	加工尺寸超差
某型榴弹炮	润滑脂	手轮力大	2010	润滑脂低温胶化
	继电器	无法正常启动		继电器接触不良
某型导弹	电阻	脱靶	2011	电阻虚焊
某型发射车	插头	低温黑屏	2011	电源连接插头松动
	润滑脂	观瞄仪没有升起到位		润滑脂黏稠度增加
	插头	黑屏		塑料插头松动
某型传输设备	电源	查询不到模块状态	2011	性能不满足
某型杀伤弹	发动机	尾焰引燃靶	2011	燃速散布范围大
某型迫击炮	复进簧	开门异常	2011	不能满足使用要求
某型榴弹炮	传感器	指示器精度偏差大	2012	指示器精度问题
某型杀伤弹	发射药	药管底座被剪断	2013	发射药的冷脆性
某型破片弹	弹壳	产生裂纹	2013	生产工艺缺陷

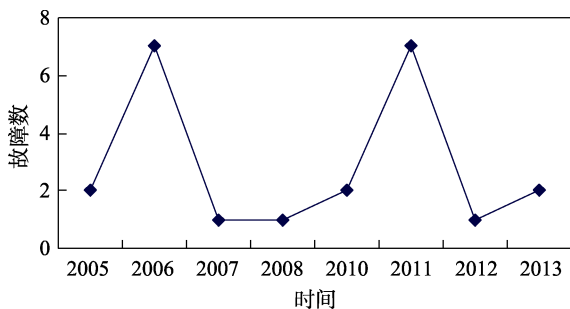


图 3 低温环境效应统计

Fig.3 Statistics of low temperature environmental effects

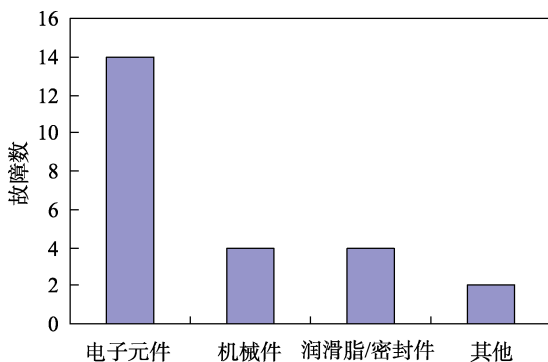


图 4 低温环境效应失效类型

Fig.4 Failure types of low temperature environmental effects

子线路的稳定性发生变化;工作寿命缩短;固体药丸和药柱分离;密封壳体(炮弹、炸弹等)内产生高压;爆炸物或推进剂的加速燃烧;炸药溶化并渗出;有机材料褪色、裂解或龟裂纹;复合材料放气等。在统计的故障案例中,其中低温环境效应引起的故障和失效有 15 个,主要故障统计见表 4。

为了获得高温环境故障近几年随时间变化产生的规律,将以上统计数据按时间绘制成曲线变化图,如图 5 所示。为了获得高温环境效应主要失效模式的规律,将高温环境效应的主要失效模式和产生的故障数绘制成直方图如图 6 所示。

2.3 振动环境效应

振动环境效应主要包括:导线磨损;紧固件/元器件松动;断续的电气接触;电气短路;密封失效;元器件失效;光学上或机械上的失调;结构裂纹或断裂;微粒和失效元器件的移位;微粒或失效元器件掉入电路或机械装置中;过大的电气噪声;轴承的磨蚀等。在统计的故障案例中,其中由振动环境引起的失效有 29 个,占环境试验失效故障 5%。其中,振动试验 3 个,炮振引起的失效故障共 26 个。主要故障统计见表 5。

表 4 高温环境效应故障案例
Tab.4 Fault cases of high temperature environmental effect

装备名称	失效部件	故障现象	时间	原因
某型烟火燃放系统	电源	方位角读数不正确	2006	触点连结不可靠
某型迫榴炮系统	瞄准装置	瞄准线偏移量过大	2007	未对偏移量进行测试
某型迫榴炮系统	电击发	不能一次完成击发动作	2008	击针卡滞
某型榴弹炮	螺栓紧固件	摇架焊缝开裂	2008	螺栓强度不够
某型迫榴炮系统	固定器	挂耳干涉	2008	挂耳位置偏差
某型航炮	反馈线	计数不正确	2010	信号发生错误
	药筒	不能正常抽出		药筒贴合过紧
某型炮塔系统	击针簧	无法正常击发	2010	击针簧超出使用寿命
	电流环参数	系统有抖动和异常声响		温度冲击
某型榴弹炮	轴承珠架	无法射击	2010	轴承珠架碎裂
某型榴弹炮	导线	通话不清晰	2010	断路
某型增程弹	推进剂药柱	早炸	2010	药柱破裂
侦察系统	电子元件管脚	操作死机	2011	管脚虚焊
某型迫击炮	内存	终端黑屏	2011	内存接触不良
某型雷达	排线	无法启动	2011	排线松动

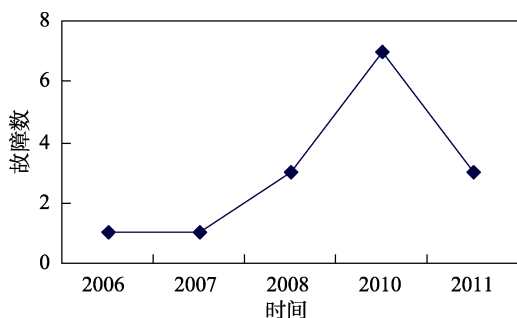


图 5 高温环境效应统计

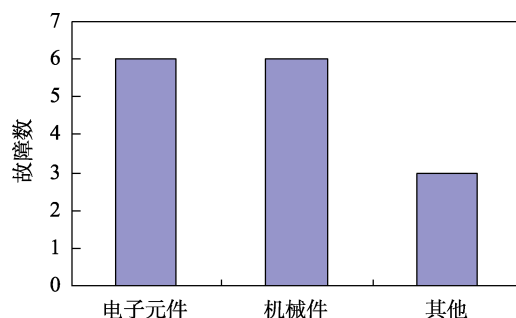


图 6 高温环境效应失效类型

Fig.5 Statistics of high temperature environmental effects

Fig.6 Failure types of high temperature environmental effects

表 5 振动环境效应故障案例
Tab.5 Fault cases of vibration environmental effect

装备名称	失效部件	故障现象	时间	原因
某型榴弹炮	散热风扇	数据超差	2005	散热风扇, 振动后偏移
某型榴弹炮	紧固件	数据超差	2007	连接螺栓的螺母松动
	电子元器件管脚	甩炮		电子元器件管脚虚焊
	导线	充电指示灯常亮		导线末端焊接处断开
某型榴弹炮	护额座	观察镜损坏	2008	护额座铝合金断裂
	减震器	数据异常跳变		减震器疲劳损伤
	电源引脚	黑屏		短路
某型榴弹炮	导线	无法自动操瞄调炮	2008	导线断开
	显示屏	黑线		显示屏内落入异物
	显示屏排线	显示器加电无显示		显示器排线插头松动
	显示屏排线	炮长显控台黑屏		显示器排线接触不良
	瞄准具	连接头断裂		剪切断裂
	弹丸架	脱焊掉落		药架焊缝开裂脱焊
某型榴弹炮	焊缝	固定器扣紧环脱落	2009	焊缝裂纹开裂
	关门簧	关门簧断裂		关门簧局部裂纹扩展裂

续表 5 振动环境效应故障案例
Tab.5 Fault cases of vibration environmental effect

装备名称	失效部件	故障现象	时间	原因
某型榴弹炮	电子元件	数码管不显示	2010	管脚接触不良
	电源管脚	输弹机不工作		电源电子元件管脚松动
	紧固件	输弹机不工作		电源接地线松动
某型航炮	信号线	测试台无法加电	2010	信号线断开导致无法加电
	凸轮轴	轴断裂		疲劳应力集中
	螺钉	螺钉脱落射		紧固件脱落
	电阻	系统异常抖动		电阻有松动, 虚接
某型迫击炮	弹簧	延迟击发	2011	弹簧摩擦阻力变大
	滑轮轴	延迟击发		滑轮轴断裂
某型榴弹炮	螺帽	输弹不到位	2012	螺帽松动
	螺钉	指示器绿灯不亮		螺钉松动
	电池	指示器复位		电池性能下降
某型观察镜	螺钉	螺套部分脱出	2013	螺套强度失效
	电路板	目镜黑屏		虚焊

为了获得振动环境故障近几年随时间变化产生的规律, 将以上统计数据按时间绘制成曲线, 如图 7 所示。为了获得振动环境效应主要失效模式的规律, 将振动环境效应的主要失效模式和产生的故障数绘制成直方图, 如图 8 所示。

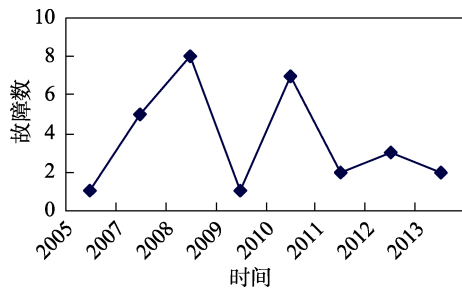


图 7 高温环境效应统计
Fig.7 Statistics of high temperature environmental effects

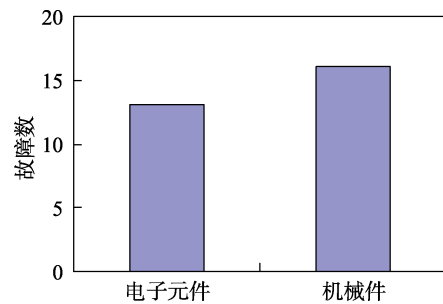


图 8 高温环境效应失效类型
Fig.8 Failure types of high temperature environmental effects

2.4 湿热及其他环境效应

在统计的故障案例中, 其中由湿热环境引起的失效有 4 个, 占 5%; 淋雨环境引起的失效有 1 个。主要故障统计见表 6。

表 6 湿热和其他环境效应故障案例
Tab.6 Fault cases of damp heat and other environmental effects

装备名称	失效部件	故障现象	时间	原因
某型炮塔系统	动力线缆	电子箱突然断电	2010	湿热环境, 动力线缆短路
	制动器	电子箱报警	2010	制动器密封性不足
	表面镀层	表面有白色锈斑	2010	镀层未达到规定的厚度要求
某型发射车	密封法兰	伺服装置出现振荡的现象	2011	法兰密封失效
某型制导装置	密封胶条	电池盒门渗水	2012	淋雨, 密封胶条脱胶

3 电子元器件故障案例统计分析

3.1 电子元器件失效模式分析

随着武器装备信息化程度的不断提高, 电子元器件、集成电路对武器装备的整体性能和质量的影响越来越明显。由表 1 可以看出, 电子元件失效占到总失

效数的 42.8% (不包括软件故障)。在电子元件失效统计中, 49.3%是由环境试验引起的。可见环境条件对电子元件的影响尤为明显。在其他的很多失效模式中, 理论上也可以通过环境试验诱发, 使其在实验室阶段就暴露出来。

电子产品的故障在武器装备使用过程中, 往往是致命性故障, 具有不易检查发现、危害大等特点。然

而事先如果能通过试验手段使其在早期试验阶段暴露出来,则电子产品的故障是易于通过更改设计来彻底解决的。电子元器件的失效中,虚焊、脱焊、虚接等电子元器件连接问题是最常见的失效。类似失效模式应作为开展研究的重点,通过实验室的方法开展失效机理研究,通过实验室试验充分激发电子元器件的故障。

3.2 电子元器件故障统计结果

本文对 208 个故障案例中的电子元器件故障的分布规律进行了统计分析,由于 2012 年至今的试验记录数据统计数目不全,只统计截止到 2011 年的试验故障记录。通过统计分析,获得了电子元器件故障随统计年限的变化规律,如图 9 所示。

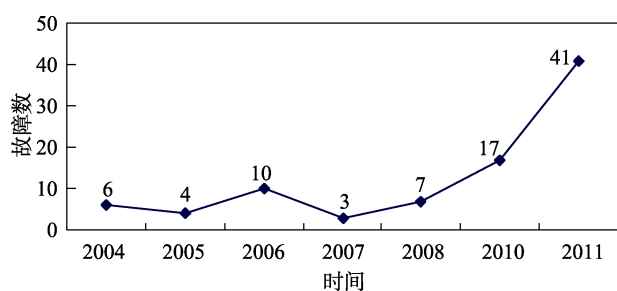


图 9 电子元器件故障统计分布
Fig.9 Statistical distribution chart of fault of electronic component

由图 9 可以看出,电子元器件故障数随统计年限的延续而递增,电子元器件故障数由 2004 年的 6 个到 2011 年 47 个,几近指数型递增的变化。完全说明目前试验过程中故障的主要对象及变化趋势。在统计的电子元器件故障中,而环境因素引起的故障是主要故障因素(主要是振动和温度等环境因素)。因此,针对电子元器件的故障激发主要以环境试验类型进行激发。目前单位针对电子元器件的故障激发设备和基础效应研究尚不具备条件,进行有效的电子元器件故障激发和故障机理分析还存在较大差距。

4 结论

本文通过以上统计数据可获得以下主要结论:环境效应引起的故障主要集中在电子元器件和机械件的失效上;环境试验产生的环境效应集中体现的失效模式有所差别,低温环境效应主要集中在电子元器件失效上,高温、振动效应电子元器件和机械件失效比例差不多;振动环境效应中炮振引起的故障和失效占比非常大;电子元器件故障数随统计年限的延续而递增,呈现几近指数型递增的变化趋势。

5 结语

首先,环境效应引起的故障主要集中在电子器

件和机械件的失效上,所以在未来进行环境试验时,应该更加注重电子元器件和机械件的失效方面的基础研究力度。在所有试验过程中,重视试验前电子元器件故障的激发,降低试验过程中电子元器件的故障率,在试验前尽可能地发现电子元器件的潜在故障,保证试验过程中装备的可靠性,提高试验的可靠性。故障的产生有其发生的特定环境因素,因此在装备试验记录过程中应更加重视环境因素的记录和描述。在进行故障复现和故障原因时,需充分考虑环境因素的叠加。针对在试验统计过程中并未明显发现环境试验(如霉菌试验、沙尘试验、盐雾试验、淋雨试验、太阳辐射试验等)造成的失效,分析主要原因是,新形成的试验能力,故障案例较少。

其次,环境效应和失效是快、慢破坏作用,以上几类环境试验的环境效应和失效往往是一种慢速的累积环境效应,对这类效应的基础研究,应加以重视,效应表现出来的微观变化往往被忽视。因为这些微观变化在试验过程中不足以引起装备的失效或故障。例如盐雾引起的装备上的螺钉腐蚀、沙尘引起的装备涂层磨损、机械结构磨损、霉菌引起的表面局部材料变化等。

最后,所有统计数据表明,电子元器件的失效所占比例在所有统计试验中占比最大,呈现几近指数型递增的变化趋势。这种趋势反映了部队信息化装备的日益增加,电子元器件故障也在递增的变化,而电子元件故障的递增也为环境试验能力提出了新的要求。在未来信息化装备不断增多的形势下,应该逐步形成电子元器件失效和故障分析的一个核心能力,以应对电子元器件故障对试验的严重影响带来的挑战。

参考文献:

- [1] 祁美兰,贺红亮.延性金属材料中损伤分布的统计方法[J].武汉理工大学学报,2008,30(8):23-26.
QI Mei-lan, HE Hong-liang. Statistic Analysis of Damage Distribution in Ductile Metals under Dynamic Impact[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(8): 23-26.
- [2] 张净敏.可修复系统可靠性统计分析[J].空军工程大学学报(自然科学版),2002,3(4):62-64.
ZHANG Zheng-min. Statistic Analysis of Reliability for Repairable System[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2002, 3(4): 62-64.
- [3] 颜钟得,谢致薇.动态磨损试验数据的数理统计分析[J].广东工业大学学报,2006,23(4):110-112.
YAN Zhong-de, XIE Zhi-wei. Mathematical Statistics Analysis of the Dynamic Wear Test Data[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2006, 23(4): 110-112.
- [4] 来萍,李萍.微波组件和模块失效分析结果统计与分析[C]//第十四届全国混合集成电路学术会议论文集.

- 黄山: 中国电子学会, 2006.
- Lai Ping, Li Ping, Zhang Xiaoming, et al. The Statistics and Analysis for the Failure Analytical Result of Microwave Module[C]//Proceeding of the 14th National Hybrid Integrated Circuit Conference. Huangshan: The Chinese Institute of Electronics 2005.
- [5] 孙青, 庄奕琪, 王锡吉, 等. 电子元器件可靠性工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- SUN Qing, ZHUANG Yi-qi, WANG Xi-ji, et al. Reliability Engineering of Electronic Components[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2002.
- [6] 祝耀昌. 可靠性试验及其发展综述[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(5): 261-269.
- ZHU Yao-chang. Reliability Tests and Their Developments[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007, 24(5): 261-269.
- [7] 郭正铭, 黄飞, 王永峰, 等. 电器防雷滤波技术探讨[J]. 环境技术, 2012, 30(3): 22-25.
- GUO Zheng-ming, HUANG Fei, WANG Yong-feng, et al. Discussion on the Appliances' Lightning Protection Filtering Technology[J]. Environmental Technology, 2012, 30(3): 22-25.
- [8] 陆江艳. 电子对抗装备例行试验项目的选择及应用[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2008, 26(5): 48-51.
- LU Jiang-yan. Application and Selection of Environmental Test Items for EW Equipment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2008, 26(5): 48-51.
- [9] 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.
- [10] 张晶, 郭定, 杨国光. 武器装备发展战略概述[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(9): 1-5.
- ZHANG Jing, GUO Ding, YANG Guo-guang. A Brief Account of our Army Weapon Equipment Development Strategy[J]. Fire Control and Command Control, 2009, 34(9): 1-5.
- [11] 章黎明. 军用车载电子设备可靠性综合环境应力试验验证技术研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 1999, 17(5): 8-13.
- ZHANG Li-ming. The Demonstration Technology of Reliability Combined Environmental Stress Testing for Military Electronic Equipment of Vehicle[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 1999, 17(5): 8-13.
- [12] 凌刚. 可靠性试验及其在继电保护装置的应用[J]. 电工电气, 2012(7): 42-46.
- LING Gang. Reliability Test and Its Application in Relay Protection Equipment[J]. Electrotechnics Electric, 2012(7): 42-46.
- [13] 武海军. 航天电连接器综合应力可靠性建模及统计验证[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- WU Hai-jun. Reliability Statistical Model and Demonstration of Electrical Connectors under Multiple Stresses[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [14] 王婉秋, 杨松. 航天器动力学环境试验故障诊断专家系统[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(1): 36-40.
- WANG Wan-qiu, YANG Song. The Fault Diagnosis Expert System for Spacecraft Dynamic Environment Test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(1): 36-40.
- [15] 颜钟得, 谢致薇. 静态磨损试验数据的数理统计分析[J]. 广东工业大学学报, 2007, 24(1): 50-52.
- YAN Zhong-de, XIE Zhi-wei. Mathematical Statistics Analysis of the Static Wear Test Data[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2007, 24(1): 50-52.
- [16] 吴顺萍, 叶芄. 提高电子装备元器件可靠性的措施和方法[J]. 电子质量, 2008(10): 39-41.
- WU Shun-ping, YE Peng. Measure and Method of Enhancing Electronic Equipment Component Reliability[J]. Electronics Quality, 2008(10): 39-41.
- [17] 高亮. 航天电连接器空间环境可靠性试验与评估的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- GAO Liang. Research on Space Environment Reliability Test and Evaluation of Aerospace Electrical Connector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [18] 王德言, 姜同敏, 李晓纲, 等. 环境系统工程[J]. 环境技术, 1998, 16(1): 6-8.
- WANG De-yan, JIANG Tong-min, LI Xiao-gang, et al. Environment System Engineering[J]. Environmental Technology, 1998, 16(1): 6-8.
- [19] 石磊, 程继红. 基于电学特性的电子元器件失效分析[J]. 仪器仪表用户, 2007, 14(6): 113-114.
- SHI Lei, CHENG Ji-hong. The Failure Analysis of Electronic Element Based on Electronics Character[J]. Electronic Instrumentation Customer, 2007, 14(6): 113-114.
- [20] 李峥辉. 侵入测试系统可靠性研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.
- LI Zheng-hui. Reliability Research of the Penetration Test System[D]. Taiyuan: North University of China, 2010.

责任编辑: 刘世忠