# 基于常规环境试验装备的 HALT 技术应用研究

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** 探索军用装备极限边界条件考核试验方法。**方法** 引入 HALT 技术，在前期装备试验各类故障案例统计的基础上，选择装备上应用普遍和故障发生较频繁的继电器为研究对象，探索应用常规环境试验设备，设计 HALT 试验，研究继电器极限边界条件下可靠性考核的技术和方法。**结果** 在进行低温–30 ℃和高温 70 ℃步进应力以及在–70~120 ℃内进行快速变温试验时，电磁继电器的各检测数据正常；而在振动步进试验过程中，采用正弦定频试验，初始加速度值为 5*g*，步进值为 5*g*，在达到 30*g* 时，固态继电器出现故障。**结论** 常规试验装备可以进行 HALT 试验，通过继电器的 HALT 试验结果，获得两种型号继电器的低温操作极限为–70 ℃，高温操作极限为 120 ℃，振动工作极限为 50 Hz、30*g*。

**关键词：**高加速寿命试验；继电器；故障激发；常规环境试验装备

**中图分类号：**TJ01 **文献标识码：**A **文章编号：**1672-9242(2022)02-0115-09

**DOI：**10.7643/ issn.1672-9242.2022.02.018

## Research on Routine Environmental Test Equipment Application of HALT Technology

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

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

**ABSTRACT:** In order to explore the test method of military equipment limit boundary conditions. The HALT test technique is introduced in this paper. Based on the statistics of all kinds of fault case in the early equipment test, the relay which is widely used in the equipment and has frequent faults is selected as the research object. It explores the application of conventional environmental test equipment, designs halts test, and studies the technology and method of reliability assessment of relay under limit boundary conditions. When the low temperature –30 ℃ and high temperature 70 ℃ step stress are carried out, as well as the temperature range from –70 ℃ to +120 ℃, the detection data of electromagnetic relay are normal; In the vibration step test, sine constant frequency test is used. The initial acceleration value is 5*g*, and the step value is 5*g*. When acceleration is 30*g*, the solid state relay fails. The conventional test equipment can carry out halt test. Through the halt test results of the relay, the low temperature operation limit of the two types of relays is –70 ℃, the high temperature operation limit is 120 ℃, the vibration working limit is 50 Hz, 30*g*. The failure analysis and temperature/vibration comprehensive test will be continued in the follow-up, and the test design method and test method will be explored and improved.

**KEY WORDS:** HALT; relay fault excitation; routine test equipment; routine environmental test equipment

**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.

**引文格式：**刘学斌，丁光雨，郑兴帅，等. 基于常规环境试验装备的 HALT 技术应用研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 115-123.

LIU Xue-bin, DING Guang-yu, ZHENG Xing-shuai, et al. Research on Routine Environmental Test Equipment Application of HALT Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 115-123.

军用装备在试验过程中，由于电子元件、机械件、软件、润滑脂、密封件等器件故障，导致试验故障。经过分析统计故障案例中产生的故障类型、个数和所占的比例发现，装备电子元件失效占比高居榜首，达42.8%[1]。经统计，电子元件的失效多数为高温、振动等环境因素引起的故障。失效模式多为电子元器件的虚焊、接触不良、电容击穿和芯片失效等。

如何高效考核出武器装备的这些故障和失效，最好的方法就是快速有效地将装备的故障全部激发出来，快速地将产品中的设计缺陷诱发为故障，提高产品的固有可靠性。高加速寿命试验便成为近年来国内外广泛采用的试验方法。

高加速寿命试验简称 HALT，是 Gregg K. Hobbs 等人于 20 世纪 80 年代末首先提出的，它主要用来快速寻找各种产品在设计、制造和优化过程中存在的需要关注的地方和薄弱环节[2]。过程主要采用多种环境综合效应试验：向产品施加各种严酷度不一的环境应力，并对产品进行连续的检测，进而快速地将产品中的设计缺陷诱发为故障，达到对故障加以定位、改正和验证的目的[3]，从而拓宽产品的操作和破坏极限。HALT 技术实际上是一种过应力试验，能够大大缩短研制和生产周期[4]。

目前，国内从事该项研究和应用的主要集中在科研机构、院校和一些大型公司。如北航、国防科大、华为、中兴、摩托罗拉、大唐等。国内已利用 HALT 技术对机载电子设备、军用直流电源、卫星组件、激光捷联惯导系统等开展了相关试验研究[5-7]。

在考核武器装备的可靠性或环境效应时，往往还存在故障激发慢、故障激发不透彻的薄弱环节[8-12]。HALT 作为一种高效的暴露被试品缺陷和故障的试验方法，完全可以用于检验武器装备的可靠性和环境适应性。目前，国内外开展 HALT 主要由元件级—器件级—组件级—电路板—装备系统级的顺序开展[13-15]。

## 1 HALT 技术原理

在高加速寿命试验中，对于综合应力试验模型，应力和加速因子对产品产生的影响并不是等比例的，大部分情况下是呈指数级增加的，即提高应力能加速产品失效。产品最基本的失效模式是综合效应应力所引起的机械疲劳损伤[16]，它们之间的关系见式（1）。

$$D \approx N \times \sigma \times \beta \tag{1}$$

式中：$D$ 为疲劳损伤；$N$ 为应力循环次数；$\sigma$ 为机械应力；$\beta$ 为疲劳试验材料常数（米勒常数），其取值范围为 8~12。

## 2 基于常规环境试验装备的 HALT 试验设计

在国内开展高加速寿命试验的相关标准主要为 GB/T 29309—2012《电工电子产品加速应力试验规程 高加速寿命试验导则》。国标中虽然对试验装置、试验程序进行了一般规定，但针对开展 HALT 试验还需进行具体设计。本文参考标准，应用常规环境试验装备针对电子元件继电器开展 HALT 设计和试验。

### 2.1 试验设备

目前，国内外普遍采用 HALT 试验箱进行高加速寿命试验[17]，图 1 为美国生产的一种 HALT 试验设备[8]。本文试验采用 1 $m^3$ 快速变温箱+3.5T 振动台组合（下文简称 HALT3.5），作为 HALT 试验设备，如图 2 所示。HALT3.5 设备的试验参数：振动加速度总均方根值变化范围为 $0g_{rms}$~$50g_{rms}$，频率变化范围为 5~2400 Hz，温度范围为–80~150 ℃，温变速率最大为 40 ℃/min，振动台面承重 600 kg。设备具备在低频范围内传递较高的振动能量，从而激发大型产品潜在的缺陷。

图 1 HALT 试验设备(Typhoon 4.0)
Fig.1 HALT test equipment(Typhoon 4.0)

图 2 HALT3.5 试验设备
Fig.2 HALT3.5 test equipment

目前，在国内外，HALT 试验设备的试验能力各不相同，本文主要分析国标中一般要求的 HALT 试验设备和基地常规的环境试验设备（HALT3.5）的差别，见表 1。

表 1　HALT 试验设备与 HALT3.5 对比

Tab.1 Comparison of HALT test equipment with HALT3.5

| 序号 | 试验项目 | 技术指标 | HALT 试验装置（国标） | HALT3.5 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 振动 | 激励方向 | 六轴激励，六方向 | 单轴激励，三方向 |
| | | 激振方式 | 气锤连续冲击多向激励技术 | 电动激振 |
| | | 控制方式 | 均方根值控制，频谱不可控、低频能量小，位移小 | 功率谱控制，频谱可控，在给定带宽下能量可控、位移较大 |
| | | 频率范围 | 5 Hz~5 kHz | 5 Hz~2.4 kHz |
| | | 最大振动量级 | $Z$ 轴≥60$g_{rms}$，$X$ 轴、$Y$ 轴≥30$g_{rms}$ | $X$ 轴、$Y$ 轴、$Z$ 轴≥30$g_{rms}$ |
| 2 | 温度 | 冷却方式 | 液氮制冷 | 机械\液氮制冷 |
| | | 温度范围 | –80~170 ℃ | –80~150 ℃ |
| | | 温度波动度 | ±3 ℃ | ≤0.5 ℃ |
| | | 温变速率 | ≥60 ℃/min | 升温≥15 ℃/min<br>机械降温≥5 ℃/min<br>液氮降温≥40 ℃/min |

通过对比可以发现，本文采用的装备虽然在能力上与国标一般要求的试验装置存在一定差别，但总体上完全可以胜任一些高加速寿命试验的需求。国内许多科研单位正在开展应用常规试验设备进行 HALT 技术的相关研究。如北京卫星环境工程研究所郭秀才等人[5]应用常规温度试验箱开展了卫星电子组件高加速寿命试验技术研究。北京航空航天大学王凤金等人[7]研究应用常规试验设备进行 HASS（高加速应力筛选）试验等。

为监测继电器在试验过程中功能、性能的变化，采用美国尼高力（LDS）DIMENSION4i 数据采集分析仪采集和分析试验数据，如图 3 所示。电压实时监测，16 通道同时记录，每通道记录速度 200 kb/s，实时数据接收。主要用来实时监测继电器试验过程中的通断功能状态是否正常，以及利用采集数据分析通断时间是否符合技术指标要求。数据采集分析仪试验现场测试接线如图 4 所示，试验接线线路如图 5 所示。

## 2.2　试验对象

本文选择电子元器件中的继电器作为试验对象。其中，选择 MY2N-J 型电磁继电器（高仿、原厂家各

图 3　数据采集分析仪

Fig.3 Data acquisition

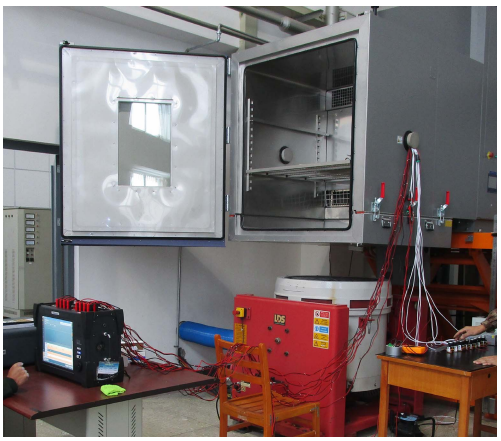



图 4　数据采集分析仪测试

Fig.4 Test chart of data acquisition analyzer

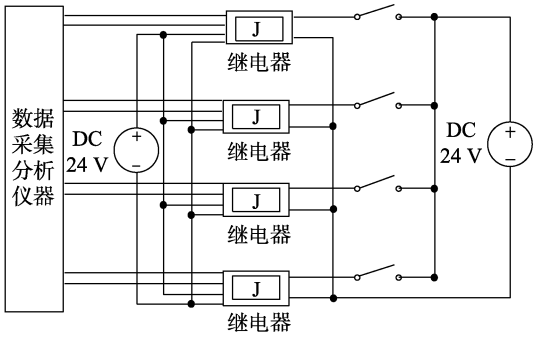



图 5　试验接线线路

Fig.5 Test wiring diagram

4 个，编号 1#—8#）、PQSSR-DD 型固态继电器（4 个，编号 9#—12#）2 两种继电器，如图 6、图 7 所示，样品编号见表 2。在试验样品数量上参考 GB/T 29309—2012《电工电子产品加速应力试验规程高加速寿命试验导则》，要求不少于 3 种试验样品，本次试验每种型号继电器使用了 4 个样品进行试验。被试品试验接线如图 8、图 9 所示。继电器被试品的主要技术指标见表 3。

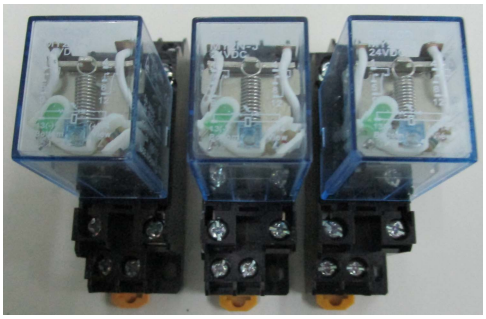


图 6　MY2N-J 型电磁继电器
Fig.6 MY2N-J type electromagnetic relay

图 7　PQSSR-DD 型固态继电器
Fig.7 PQSSR-DD type solid state relay

**表 2　被试样品编号**
Tab.2 Sample number

| 样品序号 | 项目 | 编号 |
|---|---|---|
| 1 | MY2N-J 型电磁继电器（高仿） | 1—4 |
| 2 | MY2N-J 型电磁继电器（原厂家） | 5—8 |
| 3 | PQSSR-DD 型固态继电器 | 9—12 |

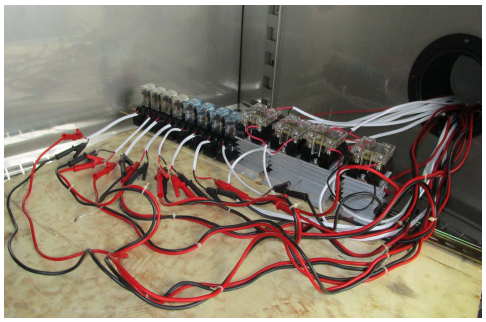


图 8　试验箱内部接线
Fig.8 Internal wiring diagram of test box

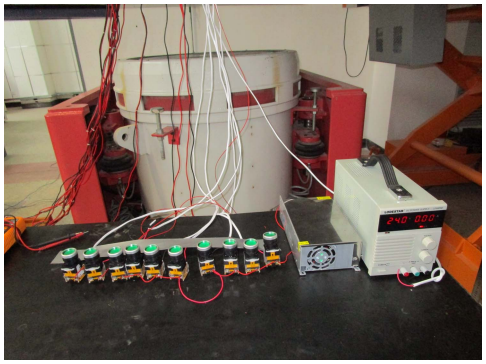


图 9　试验箱外部接线
Fig.9 External wiring diagram of test box

**表 3　MY2N–J 型和 PQSSR–DD 继电器主要技术指标**
Tab.3　Main technical indexes of MY2N-J type relay and PQSSR-DD type relay

| 序号 | MY2N-J | | PQSSR-DD | |
|---|---|---|---|---|
| | 性能 | 指标 | 性能 | 指标 |
| 1 | 接触电阻 | 50 mΩ 以下 | 控制电压 | 3~32 V |
| 2 | 动作时间 | 20 ms 以下 | 控制电流 | 8~35 mA |
| 3 | 复位时间 | 20 ms 以下 | 通断时间 | 10 ms 以下 |
| 4 | 环境温度 | –55~70 ℃ | 环境温度 | –30~75 ℃ |
| 5 | 环境湿度 | 35%~85% | 动作指示 | LED |
| 6 | 动作指示 | LED | | |

## 2.3　试验程序和方法

### 2.3.1　继电器 HALT

参考 GB/T 29309—2012《电工电子产品加速应力试验规程高加速寿命试验导则》，确定试验项目和顺序，见表 4。

按照试验程序（如图 10 所示），在准备工作中，首先应制定试验剖面，确定应力起点。然后，根据继

**表 4　继电器 HALT 试验项目**
Tab.4 Relay HALT test items

| 试验顺序 | 试验项目 |
|---|---|
| 1 | 常温性能测试 |
| 2 | 温度均匀性测试 |
| 3 | 低温步进试验 |
| 4 | 高温步进试验 |
| 5 | 快速温变循环试验 |
| 6 | 振动步进试验 |
| 7 | 快速温变循环与振动步进综合试验 |

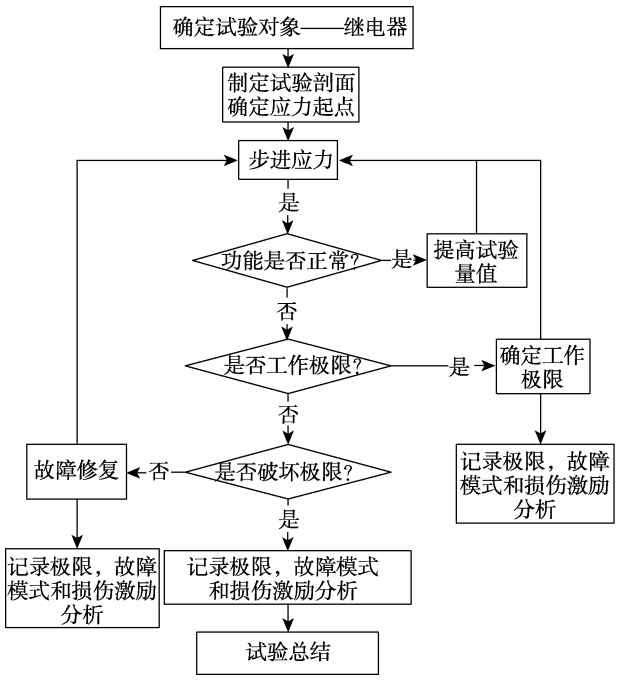



图 10　继电器 HALT 试验程序
Fig.10 Relay HALT relay test

电器材料热变形温度的极限信息，确定温度环境的应力水平。最后，由振动极限信息和热变形极限来确定综合试验的应力水平。

#### 2.3.2　HALT 试验剖面设计

电磁继电器、固态继电器是应用比较广泛的一种电器元件。考虑继电器实际使用温度，同时为了最大限度地激发故障缺陷以及小型快速变温箱的试验能力，参考 GJB 360.1《电子及电气元件试验方法》、GJB 1042—90《电磁继电器总规范》、GJB 1515A—2001《固体继电器总规范》，将试验振动上限设为 $50g_{rms}$，温度设定为–70~120 ℃，温变速率为 40 ℃/min。详细的试验方案见表 5。本文振动试验部分使用振动台进行正弦扫频试验，找到谐振频率后，再做定频正弦振动试验。

**表 5　继电器 HALT 试验设计**

Tab.5 Relay HALT test design

| 试验名称 | 试验剖面设计 | 通电状态 | 说明 |
|---|---|---|---|
| 低温步进试验 | 起始温度为–30 ℃，区间步进步长为–10 ℃；每个温度台阶驻留 30 min，并完成测试 | 全程通电 | 若在–70 ℃时被测样品仍未出现失效，则停止试验 |
| 高温步进试验 | 起始温度为 70 ℃，区间步进步长为 10 ℃；每个温度台阶驻留 30 min，并完成测试 | 全程通电 | 若在 120 ℃时被测样品仍未出现失效，则停止试验 |
| 快速温变循环 | 高温为 120 ℃，低温为–70 ℃，温变速率≥40 ℃/min。高低温各驻留 20 min，进行 5 个循环 | 全程通电 | 若 5 次循环后被测样品仍未出现失效，则停止试验 |
| 振动步进试验 | 起始振动量级为 $5g_{rms}$，区间步进步长为 $5g_{rms}$，每个振动台阶驻留 30 min | 检测时通电 | 若至 $30g_{rms}$ 时，被测样品仍未出现失效，则停止试验 |
| 振动/温度综合试验 | 起始振动量级为 $5g_{rms}$，区间步进步长为 $5g_{rms}$，每个振动台阶驻留 30 min，高低温各驻留 30 min，温变速率≥40 ℃/min，进行 5 个循环 | 检测时通电 | 若至 $30g_{rms}$ 时，被测样品仍未出现失效，则停止试验 |

#### 2.3.3　继电器失效判据和 HALT 试验终止依据

在进行 HALT 试验前，首先应大致清楚继电器在温度和振动条件下，典型失效的主要失效类型和失效模式。当试验过程中出现继电器失效时，可大致判断故障的部位，确定是否为可恢复性失效。查阅相关资料，继电器常见的失效模式见表 6。

**表 6　继电器常见的失效模式**

Tab.6 Common failure modes of relay

| 序号 | 电磁继电器失效模式 | 固态继电器失效模式 |
|---|---|---|
| 1 | 接触电阻增大或时断时通 | 高温，芯片特性劣化 |
| 2 | 触点粘结 | 浪涌电流过大，功能失效 |
| 3 | 触点断开故障 | 内部 RC 和感性负载性能差，输出震荡，工作不稳定 |
| 4 | 吸合/释放电压飘移 | 灵敏度过高，误动作 |
| 5 | 线圈断线 | 可控硅性能变差，断态漏电流大 |
| 6 | 线圈电阻超差或短路 | 光电耦合器性能变坏，输入电流变大 |
| 7 | 密封失效 | |
| 8 | 绝缘失效 | |

在整个 HALT 试验过程中，需要进行功能判断和失效分析及故障维修，主要按照以下程序进行。

1）功能、性能故障或失效判据。试验过程中，进行检测时，根据电路开关开断状态，观察数据采集分析设备的信号，判断继电器是否功能正常，并记录采集的数据；同时，观察继电器 LED 指示灯状态是否正常。根据测试设备和 LED 的指示情况，判断继电器是否处于正常工作状态。当功能出现异常或失效时，试验结束后，按照表 1 以及失效分析程序进行故障和失效机理分析，并确定故障性质。

2）试验终止的依据。设备能力超限，试验达到了现有设备的能力极限而造成试验终止；失效机理发生改变，温度达到了试件的破坏极限，试件出现的故障，其主要功能不能正常实现。

## 3　HALT 试验结果

### 3.1　试验曲线

在进行下面的温度试验时，选取了电磁继电器 1#—8#和固态继电器 9#—12#同时进行试验。低温步进试验、高温步进试验和快速温变试验曲线如图 11、12、13 所示。振动步进试验选取了电磁继电器 1#、2#、5#、6#和固态继电器 9#、10#进行试验，被试品安装如图 14 所示。进行振动步进试验前，首先采用扫频试验，摸索出被试品的共振频率，试验曲线如图 15 所示。

通过扫频试验，获得被试品的共振频率在 50 Hz 左右，选定 50 Hz 作为步进试验用频率。然后，采用正弦定频试验，步进加速度值的方法，进行振动步进试验。

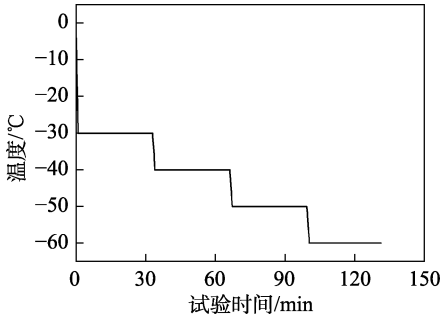



图 11　低温步进试验曲线

Fig.11 Low temperature step test curve

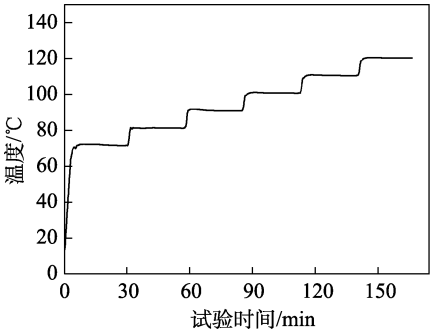



图 12　高温步进试验曲线

Fig.12 High temperature step test curve

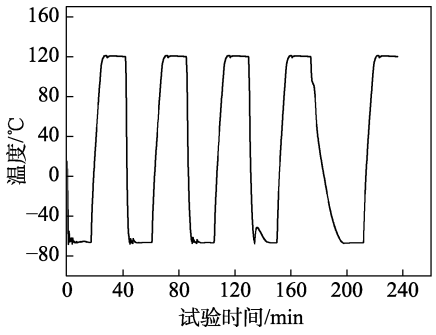
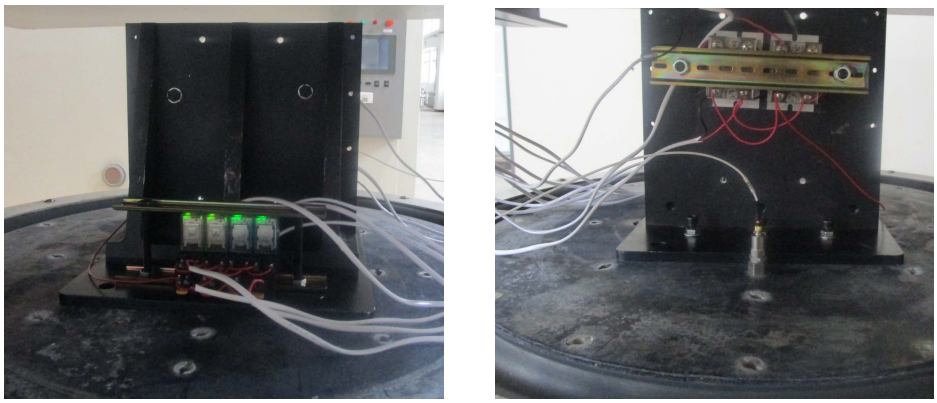



图 13　快速变温试验曲线

Fig.13 Rapid temperature change test curve



a 电磁继电器　　b 固态继电器

电磁继电器图 14　继电器振动试验安装

Fig.14 Installation drawing of relay vibration test: a) electromagnetic relay; b) solid state relay

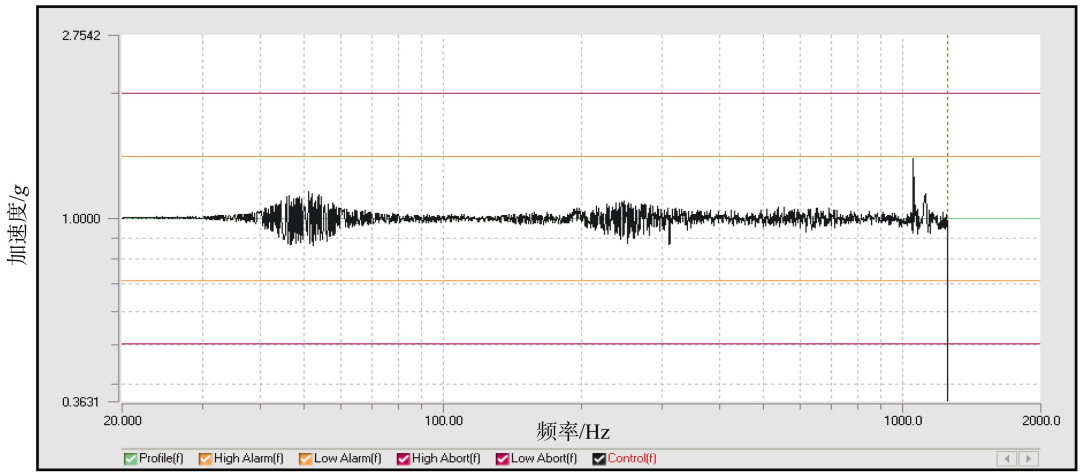



图 15　扫频试验信号

Fig.15 Sweep frequency test signal

## 3.2　测试结果

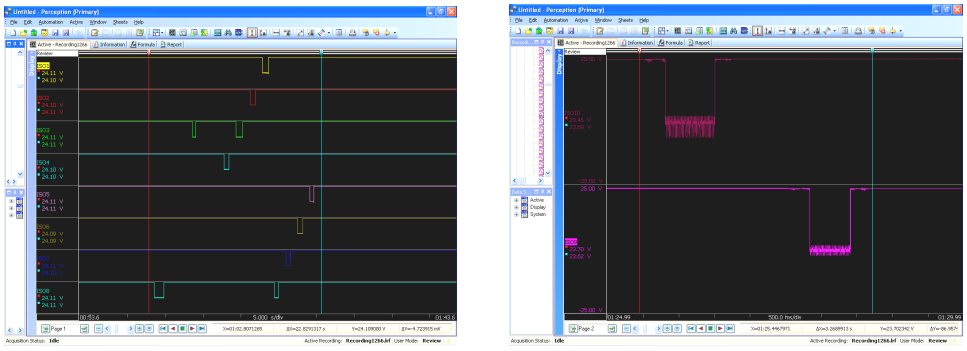
### 3.2.1　常温静态检测

试验前的静态检测，主要是确定继电器和数据采集设备状态是否正常，以及获得初始的继电器通断检测数据，以便与试验过程中的检测数据进行对比，确定继电器的功能和性能。继电器通断静态检测如图 16 所示。

### 3.2.2　低温步进试验结果

在进行低温步进应力时，电磁继电器的各检测数据正常，如图 17 所示。

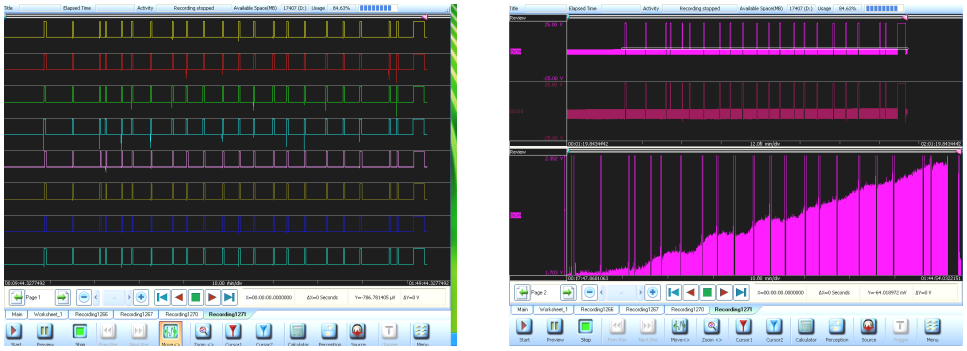
经过对采集的数据进行分析，在各温度段内，通断时间均在 20 ms 以内，符合电磁继电器技术要求。固态继电器各功能均正常，由数据可以看出，固态继电器的断态电压随着温度的降低，呈现出增大的趋势，说明固态继电器内部呈现出性能变化，但没有导致功能失效。



a 电磁继电器　　b 固态继电器

图 16　试前继电器通断静态检测

Fig.16 Static detection of relay on-off before test: a) electromagnetic relay; b) solid state relay



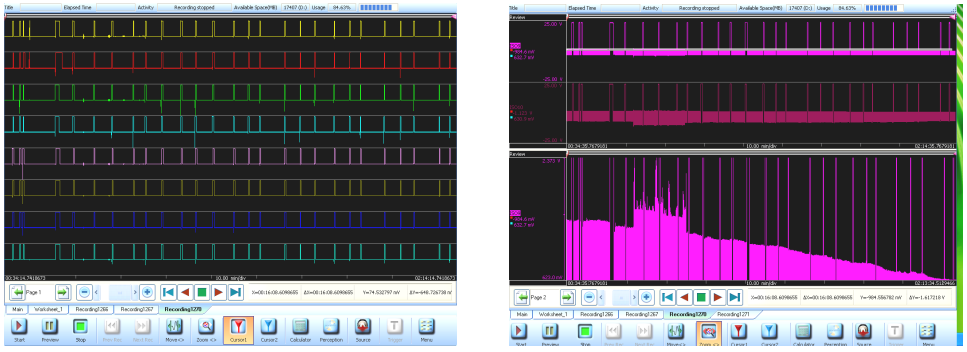
a 电磁继电器　　b 固态继电器

图 17　低温步进应力试验继电器工作检测结果

Fig.17　Working test results of relay in low temperature step stress test: a) electromagnetic relay; b) solid state relay

### 3.2.3　高温步进试验结果

在进行高温步进应力时，电磁继电器的各检测数据正常，如图 18 所示。经过对采集的数据分析，在各温度段内，通断时间均在 5 ms 以内，符合电磁继电器通断时间≤20 ms 的技术要求。固态继电器各功能均正常，由数据可以看出，固态继电器的断态电压随着温度的升高，呈现出减小的趋势，但也没有导致功能失效。



a 电磁继电器　　b 固态继电器

图 18 高温步进应力试验继电器工作检测结果

Fig.18　Working test results of relay in high temperature step stress test: a) electromagnetic relay; b) solid state relay

通过以上对继电器的 HALT 试验结果，获得该样品的低温操作极限为–70 ℃，高温操作极限为 120 ℃，即在–70~120 ℃内，继电器能够正常使用。未继续寻找此使用条件下的高低温破坏极限。

### 3.2.4　快速温变试验结果

快速温变试验采用液氮制冷，温变速率≥40 ℃/min，最高达到 45 ℃/min。根据低温、高温步进试验结果，在–70~120 ℃内进行了快速变温试验。试验过程全程通电检测，在每个温度段进行通断功能检测，通过测试数据分析，1#—10#继电器功能检测正常。

### 3.2.5　振动步进试验结果

在振动步进试验过程中，采用正弦定频试验，初始加速度值为 5*g*，步进值为 5*g*。在达到 30*g* 时，2#

电磁继电器和 9#固态继电器出现故障，两个继电器均在 30*g* 的振动条件下触发故障。2#电磁继电器初步判定故障为断路故障，如图 19a 所示；9#固态继电器初步判定为输出震荡，工作不稳定，如图 19b 所示。

a 2#　　b 9#

图 19　继电器故障数据采集结果

Fig.19 Relay fault data acquisition results

通过以上试验分析，温度步进试验产生的潜在缺陷，在振动试验将会集中触发并体现，这也是 HALT 技术的重要加速原理。被试品的失效分析是很繁琐、重要的一环，后续将借助环境效应实验室分析设备进行继电器故障失效分析，深入探讨研究继电器失效机理和 HALT 试验加速原理。

## 4　结论

本文通过对试验案例的分析统计，分析应用 HALT 技术充分激发故障，开展了装备电子元件、组件的试验考核方法研究。采用常规环境试验装备 HALT3.5，对继电器进行 HALT 试验研究，获得如下结论：

1）开展 HALT 试验需要具备一定特殊试验能力的设备，应用常规试验装备 HALT3.5，对某型继电器的高加速寿命试验设计，快速激发电子元器件继电器故障和失效。实际应用表明，HALT3.5 可以进行 HALT 试验，但在试验能力上还需不断进行挖掘。

2）通过继电器的 HALT 试验结果，获得两种型号继电器的低温操作极限为–70 ℃，高温操作极限为 120 ℃，振动工作极限为 50 Hz、30*g*，未寻找高低温破坏极限。

3）在振动步进试验中，激发 2 个样品的功能失效，初步判断为断路故障和固态继电器输出不稳故障。后续将进行两个故障的失效机理和原因分析。

本文初步探索了进行 HALT 试验的方法，通过对继电器 HALT 试验的相关研究，取得了一些 HALT 试验开展的经验和结论，但也还存在一些不足。例如试验过程测试还不充分，功能测试还比较单一等问题。后续还将继续进行故障失效分析和温度/振动综合试验，试验过程中会不断摸索和改进试验设计方法和测试手段。努力在开展 HALT 试验方面获得一些有益的研究和结论，为考核武器装备极限边界条件考核提供科学高效的试验方法和手段。对现阶段军用装备电子类产品的研制定型，从产品底层开始，可以提高其试验考核的精准能力，提升产品的可靠性。

**参考文献：**

[1] 祝耀昌. 高效强应力筛选方法[J]. 环境条件与试验, 1988(2): 70-80.
ZHU Yao-chang. High Efficiency and Strong Stress Screening Method[J]. Environmental Conditions and Tests, 2008:70-80.

[2] 褚卫华, 陈循, 陶俊勇, 等. 高加速寿命试验(HALT)与高加速应力筛选(HASS)[J]. 强度与环境, 2002, 29(4): 23-37.
CHU Wei-hua, CHEN Xun, TAO Jun-yong, et al. Highly Accelerated Life Test (HALT) and Highly Accelerated Stress Screen (HASS)[J]. Structure & Environment Engineering, 2002, 29(4): 23-37.

[3] 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.

[4] 石士进, 董澍, 米海波. 高加速寿命试验技术在宇航单机产品中的应用[J]. 质量与可靠性, 2013(1): 9-12.
SHI Shi-jin, DONG Shu, MI Hai-bo. Application of High Accelerated Life Test Technology in Aerospace Single Product[J]. Quality and Reliability, 2013(1): 9-12.

[5] 郭秀才, 冯伟泉, 郑会明, 等. 卫星电子组件高加速寿命试验技术[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(5): 454-458.
GUO Xiu-cai, FENG Wei-quan, ZHENG Hui-ming, et al. HALT Technology for Satellite Electronic Components[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(5): 454-458.

[6] 鲍进, 周超, 田正其, 等. 高加速寿命试验在智能电能表可靠性研究中的应用[J]. 电测与仪表, 2014, 51(19):

17-23.
BAO Jin, ZHOU Chao, TIAN Zheng-qi, et al. The Application of Highly Accelerated Life Test in Smart Electricity Meter Reliability Study[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(19): 17-23.

[7] 王凤金, 李晓阳, 姜同敏. 基于常规试验设备的 HASS 技术在航空电子产品上的应用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 86-90.
WANG Feng-jin, LI Xiao-yang, JIANG Tong-min. Application of HASS Based on Routine Test Equipment in Avionics[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 86-90.

[8] 韩少华, 张延风, 付晨晖, 等. 导弹武器系统环境工程中的高加速寿命试验[J]. 装备环境工程, 2006, 3(6): 58-60.
HAN Shao-hua, ZHANG Yan-feng, FU Chen-hui, et al. High Accelerated Life Test in Environmental Engineering of Missile Weapon System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(6): 58-60.

[9] 史晓雯, 徐剑峰, 徐丹. HALT 试验技术综述[J]. 环境技术, 2011, 34(3): 24-27.
SHI Xiao-wen, XU Jian-feng, XU Dan. Comprehensive Review of HALT Technology[J]. Environmental Technology, 2011, 34(3): 24-27.

[10] 吴焕, 唐勇, 赵润生. 高加速极限试验的原理及其工程应用[J]. 机械工程与自动化, 2015(6): 120-122.
WU Huan, TANG Yong, ZHAO Run-sheng. Principle of Highly Accelerated Limit Test and Its Engineering Application[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(6): 120-122.

[11] 刘宏, 全凌云. 高加速寿命试验和高加速应力筛选技术[J]. 电子质量, 2009(2): 55-57.
LIU Hong, QUAN Ling-yun. Technology for Highly Accelerated Life Test and Highly Accelerated Stress Screening[J]. Electronics Quality, 2009(2): 55-57.

[12] 祝耀昌, 郭奎. 高加速应力试验[R]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2006.
ZHU Yao-chang, GUO Kui. High Acceleration Stress Test[R]. Beijing: China Aero-Poly Technology Establishment,2006.

[13] HOBBS G K. Accelerated Reliability Engineering: HALT and HASS[M]. New York: Wiley, 2000.

[14] 樊强. 高加速寿命试验和高加速应力筛选试验技术综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2011, 29(4): 58-62.
FAN Qiang. Overview of HALT & HASS[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2011, 29(4): 58-62.

[15] 张国英, 王毅. 外饰车灯高加速寿命试验技术应用分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(2): 22-26.
ZHANG Guo-ying, WANG Yi. Application Analysis of Highly Accelerated Life Test Technique in Exterior Light of Vehicle[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2016, 34(2): 22-26.

[16] 闫玉洁, 王晓红, 赵国志. 高加速寿命试验在车身控制器上的应用研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 34-37.
YAN Yu-jie, WANG Xiao-hong, ZHAO Guo-zhi. Application Research of Highly Accelerated Life Test in Body Control Module[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 34-37.

[17] 王志兵, 邵咏松. 可靠性强化试验在某继电器失效机理分析中的应用[J]. 航空兵器, 2006, 13(4): 54-57.
WANG Zhi-bing, SHAO Yong-song. Application of Reliability Enhancement Testing in Relay Failure Mechanism Analysis[J]. Aero Weaponry, 2006, 13(4): 54-57.

[18] 宋扬, 袁胜智, 曲凯. 空空导弹电子产品加速寿命试验模型研究及应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(6): 689-692.
SONG Yang, YUAN Sheng-zhi, QU Kai. Research and Apply of Air-to-Air Missile Electronic Products Accelerated Life Test Model[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27(6): 689-692.

[19] 沈峥嵘, 蔡自刚. 基于加速寿命理论和应力强度干涉模型的可靠度评估[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(5): 16-19.
SHEN Zheng-rong, CAI Zi-gang. Reliability Evaluation Based on Accelerated Life Theory and Stress Strength Interference Model[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2016, 34(5): 16-19.

[20] 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.