

# 综合环境条件下电子装备贮存寿命加速 试验方法研究

秦强, 张生鹏

(航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

**摘要:** **目的** 通过加速试验评估典型电子装备在综合环境应力条件下的剩余贮存寿命。**方法** 针对电子装备在贮存过程中受综合环境因素影响的特点, 提出一种综合考虑温度-振动-电应力等环境条件的加速试验方法, 以已经达到设计贮存寿命的某典型电子装备为试验对象, 开展温度-振动-电应力综合加速寿命试验。**结果** 通过4个月左右的综合环境条件贮存加速试验, 验证和评估了典型电子装备具备5年的剩余贮存寿命, 取得了良好的试验效果。**结论** 综合环境条件加速试验充分考虑了装备寿命期经受的环境因素, 能够准确模拟装备服役期间各种环境应力叠加效应以及不同任务阶段环境因素的累积效应。

**关键词:** 电子装备; 剩余贮存寿命; 加速试验; 综合环境应力

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.017

**中图分类号:** TJ760.89

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)03-0081-07

## Accelerated Storage Test of Electric Equipment under Integrated Environmental Stresses

QIN Qiang, ZHANG Sheng-peng

(Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China)

**ABSTRACT: Objective** To evaluate the residual storage life of typical electronic equipment under integrated environmental stresses through accelerated test. **Methods** In allusion to the integration of various environmental stresses that affects storage life of electric equipment, an accelerated test method considering the integrated stress of temperature-vibration-electric was proposed. Meanwhile, an accelerated life test under the proposed method was conducted with typical electric equipment which has already reached the design storage life as experiment subject. **Results** Through an accelerated storage test under integrated stresses of about 4 months, the typical electronic equipment's residual storage life of 5 years was verified and evaluated, and good experimental results were obtained. **Conclusion** The accelerated test under integrated stresses takes into full consideration of the environmental factors experienced by electric equipment during the storage process, and it can accurately simulate the cumulative effects of various environmental stresses during the service period and different mission stages.

**KEY WORDS:** electric equipment; residual storage life; accelerated test; integrated environmental stress

贮存寿命是导弹装备的重要战术技术指标之一, 反映了装备在服役期内完成规定任务, 进而转化为战斗力的能力, 对于确保装备维持较高的战备完好性,

进行军事任务, 维护国家安全具有重大意义。若导弹装备在其应有的寿命期限内报废, 则会造成不必要的经济损失; 若导弹装备超过规定的寿命期限而继续使

用,其工作可靠性和战备完好性将得不到有效保障。因此,如何通过高效的加速试验方法对导弹装备的贮存寿命进行验证和量化评估,为装备贮存寿命设计定型以及使用延寿提供依据,已成为亟待解决的工程问题<sup>[1]</sup>。

典型电子装备在全寿命周期内经历的任务阶段及面临的环境因素多样,既有自然环境,又有诱发环境,以及通电工作环境,但目前对于电子装备加速寿命试验问题,多是在单因素环境下进行的<sup>[2]</sup>。以往的贮存加速试验大多仅考虑库存的温度热老化应力<sup>[3-5]</sup>,没有考虑战备值班中昼夜温度循环、运输振动等应力的疲劳失效,环境因素不全面是导致贮存寿命加速试验结果可信度差的一个重要原因<sup>[6]</sup>。由于导弹装备包含多种材料及器件,在寿命期内要反复经历运输、贮存、值班、检测、机动转移等阶段,面临的环境因素多样,其失效模式和失效机理也多样化<sup>[7-9]</sup>。因此,为真实再现装备实际经受的综合环境的损伤效应,更有效地考核和验证导弹装备的贮存寿命指标,开展综合环境应力贮存寿命加速试验是一个

必然发展趋势。

文中以已经达到设计贮存寿命的某型号典型电子装备为试验对象,分析研究其实际使用模拟环境剖面,进而根据加速模型折算出等效当量加速试验剖面,开展综合环境条件加速贮存试验,以考核其剩余寿命,并探讨了加速模型中关键参数对试验时间的影响。

## 1 基本思路

某型号导弹电子装备交付部队服役后已达到设计定型时规定的贮存寿命,亟需开展加速寿命试验以深度挖掘其剩余寿命潜力,并修正设计定型时确定的贮存寿命,进而通过试验发现制约电子装备贮存寿命的薄弱功能部件和元器件,为后续具体维修、更换措施及时机提供依据。以此为背景,针对导弹装备的工程特点,提出综合环境条件下贮存加速试验设计的基本思路,如图1所示。

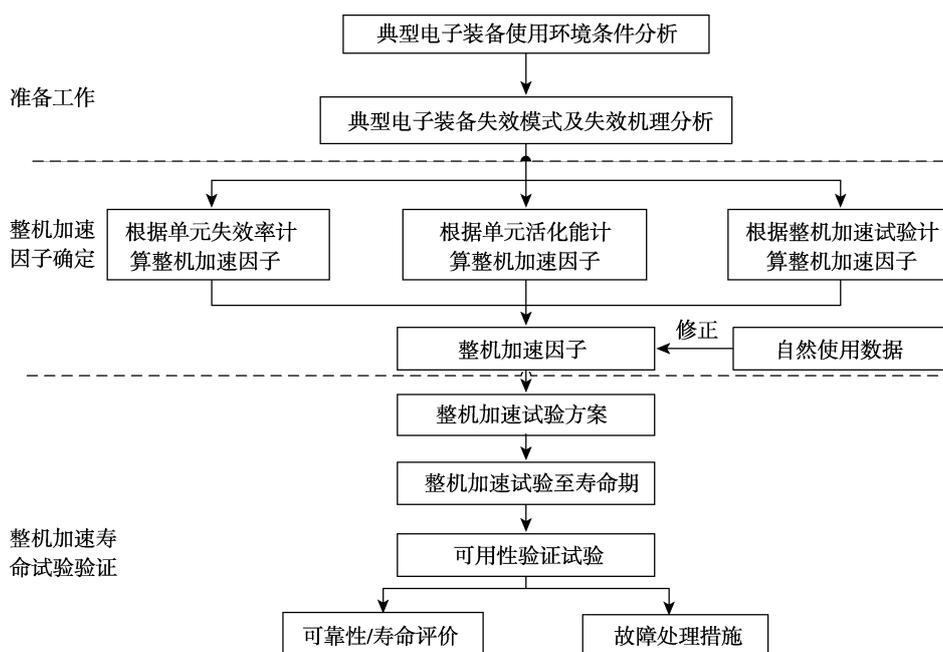


图1 典型电子装备加速试验基本思路

由图1可知,典型电子装备加速试验的设计主要包括如下步骤:

1) 贮存环境剖面分析。通过对导弹装备实际贮存环境条件的收集、统计、整理,结合产品的特点,确定敏感应力,确立装备使用综合环境应力剖面。

2) 加速因子求取。综合利用组成电子装备的底层材料/器件的贮存寿命、加速模型等信息,综合评估得到电子装备的加速因子<sup>[10-12]</sup>。

3) 等效加速试验剖面制定。根据实际使用环境剖面和整机的加速因子,折合出等效当量加速试验剖面,据此开展加速寿命试验。开展1个完整循环过程的加速试验等效于装备正常贮存1年的环境应力损

伤。为满足其贮存 $N$ 年的剩余寿命使用目标要求,至少需开展 $N$ 个循环的贮存加速试验。

4) 可用性验证试验。在完成加速寿命试验后,进行环境例行试验等可用性验证试验,以验证导弹装备贮存加速试验后的可用性。

5) 故障处理及贮存寿命评估。在加速寿命试验过程中,对出现的故障进行处理,并根据试验数据进行产品寿命评估。

## 2 全寿命周期环境条件分析

开展综合环境条件下电子装备贮存寿命加速试

验，首先应当根据导弹的全寿命周期贮存任务剖面，包括运输、装卸、库房贮存、战备值班等数据，来确定其贮存可靠性的“规定贮存条件”，并编制贮存环境载荷谱，作为开展导弹产品贮存加速试验验证的基准输入。

通过梳理部队反馈的典型电子产品使用数据，得到该电子装备在环境条件最为严酷的一年中的使用数据，包括温度条件、通电时间，行驶里程等。

### 2.1 库房贮存和营区训练

装备全年共有 6 个月（180 天）在库房贮存和营区训练。其中：营区训练时，车上电子产品通电，全年营区训练通电时间共 100 h，温度环境 18~25℃；营区训练时，路面条件二、三级公路，行驶时间 20 h；除去营区训练外，产品贮存在库房，设备未开机时间 4200 h，库房温度年变化为 0~30℃。

### 2.2 野外训练

指挥系统每年有 6 个月（180 天）在野外进行作战训练。其中：野外环境温度年变化范围为-5~30℃，最大环境温差为 35℃；产品累计通电时间 1800 h，通电工作时，产品处于空调环境下，温度环境为 18~25℃；产品野外停放时间 3 个月，时间为 2160 h；在野外训练时，路面条件四级公路或越野路面，行驶时间 360 h。

### 2.3 铁路运输

火车运输时间 5 天（120 h），运输条件为 GJB 150.16A—2009《军用装备实验室环境试验方法：振动试验》中铁路货物运输条件，如图 2 所示。

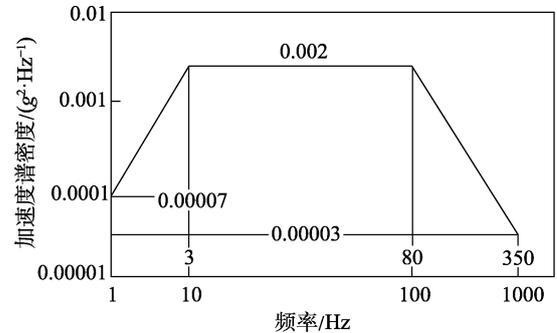


图 2 铁路运输振动试验条件

### 2.4 多应力环境试验剖面的制定

通过梳理分析装备 1 年的使用情况，并将装备 1 年内经受的典型环境作为输入条件，同时区分库房贮存段、营地贮存段、营区通电工作段、营区机动运输段、铁路运输段和野外训练段等 6 个阶段。分析各阶段装备的使用时间和环境因素，对敏感环境因素进行辨别和分析，得到装备在贮存 1 年中经历的包括温度、振动以及电应力的综合环境试验剖面，如图 3 所示。

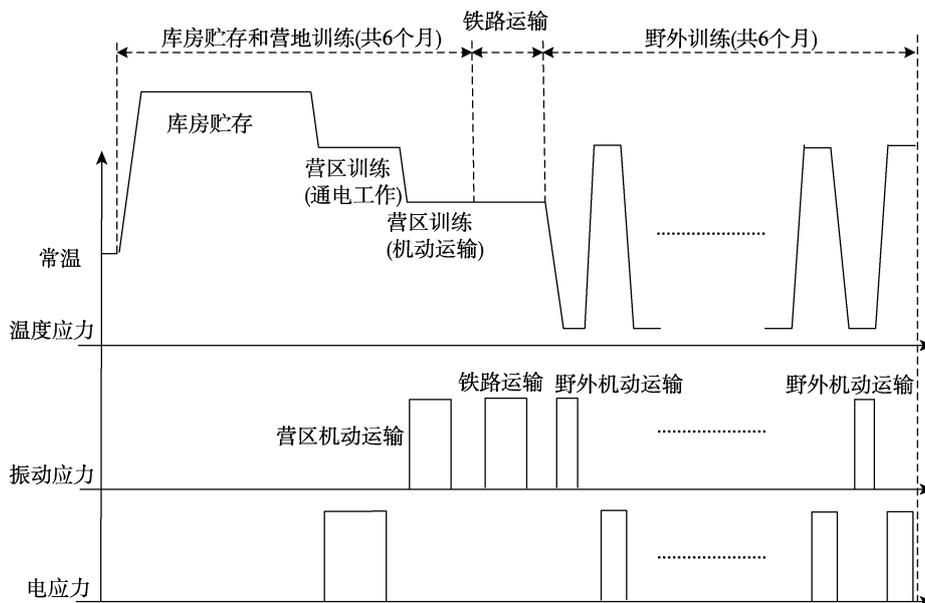


图 3 装备贮存 1 年的综合环境试验剖面

## 3 等效贮存加速试验剖面制定

通过开展加速试验可以在短期内有效地考核典

型电子产品的剩余寿命，这就需要根据梳理出的全寿命周期环境条件，并结合相应的加速模型，制定出合理的加速试验剖面，进而根据该剖面在试验室对典型

电子产品进行加速试验。

### 3.1 加速试验剖面参数设计

#### 3.1.1 温度应力

根据装备在全寿命周期剖面的使用情况可知,温度应力分为恒定高温应力以及温度循环应力两个部分。

1) 恒定高温应力。在对恒定温度应力进行加速试验时,采用阿伦尼斯加速模型<sup>[10]</sup>:

$$\xi = Ae^{E/KT} \quad (1)$$

式中: $\xi$ 为产品寿命特征,如平均寿命、中位寿命、特征寿命等; $A$ 为未知常数; $E$ 为产品激活能,与材料有关; $K$ 为波尔兹曼常数, $K=8.617 \times 10^{-5}$  eV/K; $T$ 为绝对温度。

为保证加速贮存试验中产品失效机理不变,根据以往型号的贮存延寿工程经验,本方案中库房贮存和营区贮存段加速温度应力量级取为 70 °C。根据文献[12]等资料对各种元器件失效机理与对应激活能的描述,贮存过程中典型电子单机与机电设备失效对应的激活能分布在 0.2~1.0 eV 之间。激活能越大,表明产品越不容易失效。通常在较低温度下,失效产品的激活能也比较小,参考国内类似产品信息,取激活能为 0.6 eV。

库房贮存阶段:根据全寿命期任务剖面分析,装备每年在库房不加电贮存时间为 4200 h,实际贮存温度应力可统一取为 15 °C (0~30 °C取平均值)。通过加速因子将贮存温度下的时间向加速试验温度折算,可以得到库房不加电贮存环境下电子装备等效每年自然贮存的高温加速贮存试验时间。

野外停放阶段:装备每年有 6 个月 (4320 h) 在野外进行作战训练,除去 1800 h 的通电时间,还有 2520 h 的野外停放不加电贮存状态。根据计算得到各单机的加速因子,通过加速因子将贮存温度下的时间向加速试验温度折算,可以得到野外停放不加电贮存环境下各类产品等效每年自然贮存的高温加速贮存试验时间。

2) 温度循环加速应力。温度循环应力加速模型为 MIL-HDBK-340A 中推荐的 COFFIN-MANSON 模型,即:

$$\Delta T^P N = C \quad (2)$$

式中: $N$ 为试验循环数; $\Delta T$ 为温度循环的温差; $C$ 为常数; $P$ 为疲劳指数因子,取 1.4。

由 COFFIN-MANSON 模型可以得到产品在不同温差下的温度循环次数之间的关系:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left[ \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right]^P \quad (3)$$

产品在野外停放的每年 6 个月期间,需要经受昼夜温差引起的周期性机械应力,可能导致器件疲劳失

效。统计的气象数据显示,昼夜温差一般在 10 °C 左右。根据环境温度范围,在不改变产品失效模式和失效机理的情况下,温度循环加速应力定为 -20~+50 °C,温度变化率 5 °C/min,循序 12 次。

#### 3.1.2 电应力

电应力的加速一般采用温度-电双应力模型,而文中考察的典型电子产品不能通过提升电应力达到加速的目的。因此在设计加速剖面时,电应力保持其标准输入电压,但在通电时的温度应力仍采用阿伦尼斯加速模型,即通过提高温度应力的方式进行加速因子的计算,及试验时间的折合。

1) 营区训练阶段电应力。营区训练阶段通电时间进行恒定高温加电考核,模拟产品在车厢内通电工作。根据任务剖面,车厢内为空调环境温度 (18~25 °C),装备在营区训练期间通电 100 h。在不改变产品失效模式和失效机理的情况下,高温通电加速应力定为 50 °C。通过阿伦尼斯方程,可以计算出该温度下的加电时间。

2) 野外训练阶段电应力。在温度循环试验的每个高温保持阶段,均匀施加电应力。通过查询电子装备外场训练数据,野外训练阶段通电时间为 1800 h。通电工作时,产品处于空调环境下,环境温度为 18~25 °C。温度循环高温保持温度为 50 °C。通过阿伦尼斯方程,可以计算出该温度下的加电时间。

#### 3.1.3 振动应力

根据总体要求及 GJB 150.16A—2009《军用装备实验室环境试验方法:振动试验》中的方法,为缩短试验时间,允许采用提高振动量级的方法加速试验。加速试验的试验量级与试验持续时间的关系为:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \quad (4)$$

式中: $W_1$ 为试验量级 1 的加速度功率谱密度,  $g^2/Hz$ ;  $W_2$ 为试验量级 2 的加速度功率谱密度  $g^2/Hz$ ;  $t_1$ 为试验量级 1 对应的持续时间, h;  $t_2$ 为试验量级 2 对应的持续时间, h。

1) 营地训练运输。营地训练运输的加速试验中,将加速度功率谱密度提高 2 倍,且选取加速系数  $n=4$ ,计算得到加速试验时间为 5 h。

2) 野外训练运输。在野外训练运输的加速试验中,同样将加速度功率谱密度提高 2 倍,且选取加速系数  $n=4$ ,计算得到该阶段的加速试验时间为 90 h。

3) 铁路运输。在铁路运输的加速试验中,加速度功率谱密度设定为 0.016  $g^2/Hz$ ,计算得到该阶段的加速试验时间为 1.875 h。

### 3.2 等效加速试验剖面制定

考虑装备全寿命周期的温度和振动等环境应力

和工作时电应力的影响，在确定了加速试验剖面各环境参数后，可以给出典型电子产品贮存 1 年的等效当

量加速试验剖面。剖面中包括振动、温度应力和电应力，如图 4 所示。

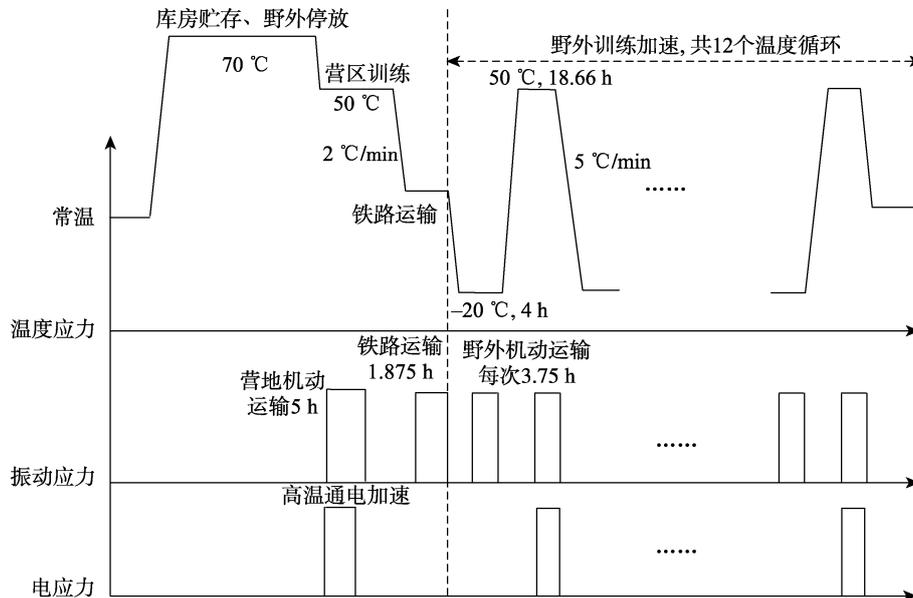


图 4 等效外场贮存 1 年的当量加速试验剖面

### 4 贮存加速试验方案及实施

电子装备贮存加速试验采用加速寿命验证试验与可用性验证试验相结合的试验方案。根据产品的加速因子，将产品在实际使用环境条件下的应力转化为加速试验应力，通过加速试验使产品加速使用至规定年限，对加速试验后的产品开展可用性验证试验，验证产品贮存后是否满足使用要求。

#### 4.1 综合环境条件下贮存寿命加速验证试验

根据实际使用环境剖面 and 电子装备的贮存加速因子，折合成等效当量加速试验剖面，据此开展加速寿命试验。为了满足典型电子装备剩余寿命挖潜要求，根据图 4 开展 1 个循环的贮存加速试验等效装备在部队正常贮存 1 年的环境应力损伤情况。

在加速试验过程中，设置一定的检测点，以便对电子装备的性能指标进行检测，进而判断是否满足指标要求。在根据图 4 进行 5 个循环的加速试验的过程中，电子装备的性能指标始终在技术指标规定的范围内，并且没有明显的退化趋势。

#### 4.2 贮存后可用性验证试验

电子装备在进行加速试验后，是否能够满足期望的剩余贮存寿命要求，应当由贮存后能否满足使用性能来评价。因此，对该型电子装备进行贮存寿命加速验证试验后，对其开展了环境试验以及可靠性鉴定试验，给出了其仍然具备 5 年贮存期的鉴定结论。

### 5 加速模型参数对试验时间影响分析

在制定加速寿命试验剖面的过程中，部分参数会对加速试验的时间起到影响作用。这些参数包括激活能、高温贮存的温度、Coffin-Manson 公式中的疲劳因子等。

#### 5.1 激活能对试验时间的影响

在 3.1 节中选取的激活能为 0.6 eV，这是根据经验值进行的选择。在实际情况下，应结合组成电子装备的元器件的激活能，采用单、多因素加速因子综合方法获得电子装备整机的激活能，然而，各元器件的激活能不易获取。因此，本节仅通过改变整机激活能的大小（范围在 0.5~1.0 eV 之间）分析其对试验时间的影响。加速寿命试验的总时间随着激活能的改变而变化的曲线如图 5 所示。

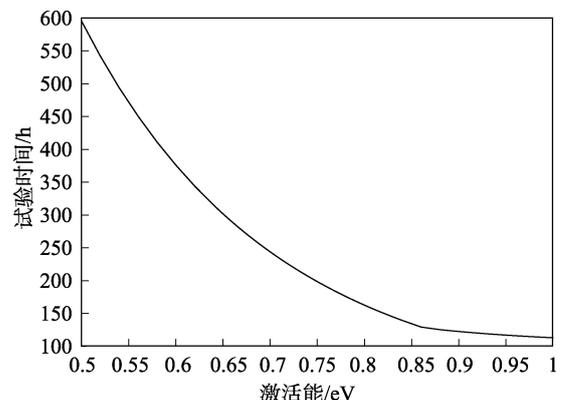


图 5 加速寿命试验总时间变化趋势

由图5可知,激活能的大小对试验时间的影响较为显著,试验时间随着激活能的增大有着以指数形式减小的趋势。这主要是因为,在加速寿命试验中选取了阿伦尼斯方程作为温度应力的加速模型,而该方程就是以指数形式存在的。

## 5.2 温度对试验时间的影响

### 5.2.1 高温贮存时间的变化

根据第3节等效贮存加速试验剖面制定的方法,并结合该型电子装备不加电贮存的极限温度(90℃),计算出在不同温度下各单机的加速因子,进而根据加速因子将实际贮存时间折算到加速试验时间。表1给出了电子装备在库房贮存与野外停放不加电贮存环境下的实际贮存时(共6720h),不同加速贮存温度下对应的加速试验时间。

表1 不同温度下库房贮存与野外停放加速试验时间

温度/℃	70	75	80	85	90
试验时间/h	139.74	104.41	78.66	59.73	45.71

由表1可以看出,随着温度应力水平的提高,加速试验时间显著缩短。在从70~90℃的温度变化范围内,试验时间由139.74h减小至45.71h,效率提高了67.23%。因此,在不改变失效机理的情况下,可以考虑提高温度应力水平缩短试验时间。

### 5.2.2 温度循环加速循环次数

在Coffin-Manson公式中,温差会对加速循环的次数产生直接的影响,而加速循环次数对升降温的时间会产生影响。在不改变电子装备失效模式和失效机理的情况下,仍然选取低温为-20℃,表2给出了在不同高温条件下的温度循环次数。

表2 不同温度下的温循次数

温度/℃	50	55	60	65	70
温循次数	12	11	10	9	8

由表2可知,温循次数随着温度的提高而减小,但是产生的影响效果并不显著。在高温为50℃的情况下,共12个温度循环,产生的升降温时间为336min,而在70℃对应的8个温度循环所需要的升降温时间为288min。

### 5.2.3 电应力及其试验时间的变化

由全寿命周期环境条件分析可知,电子装备在营区训练阶段和野外训练阶段均有通电测试,但是通电时间不同。在不改变电子装备失效机理和失效模式的情况下,电子装备在以上两个阶段不同温度下的高温通电试验时间见表3。

表3 营区训练阶段不同温度下的高温通电试验时间

温度/℃	50	55	60	65	70
营区训练	2.49	1.79	1.30	0.96	0.71
野外训练	223.94	161.27	117.29	86.11	63.79

由表3可以看出,随着温度应力水平的提高,高温通电试验时间显著缩短。在从50~70℃的温度变化范围内,营区训练及野外训练的加速试验的效率均提高了71.5%。

## 6 结论

文中研究了考虑综合环境因素情况下的典型电子装备加速寿命试验技术,根据全寿命周期环境条件,制定了综合环境试验剖面,并通过加速模型,将综合环境试验剖面转换为加速寿命试验剖面,进而研究了加速模型中关键参数对加速试验时间的影响。

1) 综合环境条件能够真实反映电子装备全寿命周期所经历的环境因素,能够准确模拟其在服役期间所经历的环境条件和工作条件。

2) 根据加速模型计算得到的等效当量加速试验剖面,开展电子装备加速寿命试验,通过4个月左右的综合环境条件贮存加速试验,验证和评估了典型电子装备具备5年的剩余贮存寿命。

3) 加速模型中的激活能以及温度会对试验时间产生显著的影响,因此在设计加速试验方案时,应充分获取电子装备中各元器件的激活能以及工作极限温度,以确保试验方案的合理性。

### 参考文献:

- [1] NELSON W. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses[M]. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [2] 张国龙,蔡金燕,梁玉英,等. 电子装备多应力加速退化试验技术及可靠性评估方法研究[J]. 航空学报, 2013, 34(12): 2815-2822.
- [3] 张生鹏,王晓红,李晓钢. 电子整机加速贮存试验方案设计[J]. 质量与可靠性, 2011(2): 24-27.
- [4] 申争光,苑景春,董静宇,等. 弹上设备加速寿命试验中加速因子估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1948-1952.
- [5] 刘佩凤,王毅飞,白明明,等. 电子整机加速贮存试验及寿命评估方法研究[J]. 强度与环境, 2018, 45(1): 57-62.
- [6] 王宇,王欣汝,黄进永,等. 通用电子产品全寿命周期可靠性分析方法[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(0): 40-44.

- [7] 陈文华, 冯红艺, 钱萍, 等. 综合应力加速寿命试验方案优化设计理论与方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12):1 01-105.
- [8] 张策, 王冬, 刘艳, 等. 防空导弹的综合环境可靠性试验剖面研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(5): 48-52.
- [9] 周洁, 姚军, 苏泉, 等. 综合应力加速贮存试验方案优化设计[J]. 航空学报, 2015, 36(4): 1202-1211.
- [10] 李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(5): 828-831.
- [11] 查国清, 黄小凯, 康锐. 基于多应力加速试验方法的智能电表寿命评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(12): 2217-2224.
- [12] 祝学军, 管飞, 王洪波, 等. 战术弹道导弹贮存延寿工程基础[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015.