

综合环境下舰载导弹弹上计算机 加速寿命试验研究

吴一乔^{1,2}, 周刚¹, 韩建立¹, 姜普涛^{1,3}, 产世军²

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264000; 2. 92187 部队, 山西 长治 046000;
3. 91423 部队, 辽宁 大连 116041)

摘要: **目的** 研究一种综合考虑陆上环境与舰船环境多应力下的舰载导弹弹上计算机加速寿命试验方法, 能更具代表性和真实性地描述产品在综合环境条件下的环境应力, 进而为环境应力剖面尽可能准确地折算为加速应力剖面奠定基础。通过加速寿命试验, 将产品贮存时间加速至目标年限, 验证与评估产品剩余贮存寿命。**方法** 针对舰船工作环境条件, 从搭载研究对象的舰船出海海况入手, 利用海况与舰船振动量值的对应关系, 确定舰船振动应力。结合考虑综合环境下的其他应力, 研究出一种结合温度-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期限的舰载导弹弹上计算机为试验对象, 开展温度-振动-电应力综合加速寿命试验。**结果** 通过运用温度-振动-电应力的加速寿命试验方法, 验证和评估了某型舰载导弹弹上计算机具备延寿至目标年限的剩余贮存寿命, 取得了良好的试验效果。**结论** 根据舰船工作环境对贮存寿命的影响, 针对性地研究了舰船振动加速试验, 给出一个更加贴合实际寿命的寿命评估结果, 为后续延寿研究工作提供了可靠依据。

关键词: 舰载导弹; 弹上计算机; 加速寿命试验; 综合环境应力; 剩余贮存寿命; 舰船振动

中图分类号: TJ760

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)08-0027-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.08.005

Accelerated Life Test Research for Shipborne Missile Board Computer under Comprehensive Environmental Conditions

WU Yi-qiao^{1,2}, ZHOU Gang¹, HAN Jian-li¹, JIANG Pu-tao^{1,3}, CHAN Shi-jun²

(1. Naval Aviation University, Shandong Yantai 264000, China; 2. Unit 92187 of the PLA, Shanxi Changzhi 046000, China;
3. Unit 91423 of the PLA, Liaoning Dalian 116041, China)

ABSTRACT: This paper intends to study an accelerated life test method for shipborne missile board computer under the multi-stress of land environment and ship environment, which can describe the environmental stress of products under the comprehensive environment more representatively and authentically, and thus lay a foundation for converting the environmental stress profile into the accelerated stress profile as accurately as possible. Through the accelerated life test, the product storage life is accelerated to the target lifetime to verify and evaluate the residual storage life of products. According to shipboard work-

收稿日期: 2022-07-05; 修订日期: 2022-08-18

Received: 2022-07-05; Revised: 2022-08-18

作者简介: 吴一乔 (1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为武器装备综合保障。

Biography: WU Yi-qiao (1993-), Male, Master, Assistant engineer, Research focus: comprehensive support of weapons and equipment.

引文格式: 吴一乔, 周刚, 韩建立, 等. 综合环境下舰载导弹弹上计算机加速寿命试验研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 027-035.

WU Yi-qiao, ZHOU Gang, HAN Jian-li, et al. Accelerated Life Test Research for Shipborne Missile Board Computer under Comprehensive Environmental Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 027-035.

ing environment, and starting from the sea state of the ship carrying the research object, the vibration stress of the ship is determined by the corresponding relationship between the sea state and the vibration magnitude of the ship. Considering other stresses under the comprehensive environment, an accelerated test method combining temperature-vibration-electrical stress and other environmental conditions is developed. Taking the shipborne missile board computers that have reached the designed storage life as the test objects to carry out a comprehensive accelerated life test of temperature-vibration-electrical stress. By using the accelerated life test method combining temperature-vibration-electric stress, it was verified and evaluated that the residual storage life of shipborne computers could be extended to target lifetime, and good test results were obtained. According to the influence of ship working environment on storage life, the study on vibration acceleration test of ship achieves a life evaluation result which is more suitable for the actual life, providing a reliable basis for the follow-up life extension research.

KEY WORDS: shipborne missile; missile-borne computer; accelerated life test; comprehensive environmental condition; residual storage life; ship vibration

每一型导弹在其战术技术指标中都会规定该型导弹在不同贮存条件下的使用期限,而导弹一旦达到了规定的使用期限,弹上某些部件就会出现技术性能不满足要求、导弹整体可靠性下降等问题。如果不经延寿继续超期服役,就可能出现导弹不能完成作战任务,甚至还会出现使用安全性问题。但如果不区分情况,一律退役报废,就需要报废处理过期导弹,并花费巨资采购大量新导弹,这不仅是一个巨大的资源浪费,而且可能在短时间内不能及时补充到期导弹,严重削弱部队的战斗能力。加速寿命试验是目前国内外广泛采用的预测导弹寿命的技术手段,如何合理设计加速寿命试验,开展导弹延寿工作,是一个亟待研究的工程热点问题^[1]。

舰载导弹弹上计算机在任务剖面内受多种环境因素共同影响,包括自然环境因素、诱发环境因素、通电工作环境等^[2]。本文以达到设计贮存期限的舰载导弹弹上计算机为研究对象,针对舰载导弹弹上计算机贮存环境温度整体相对较高、在舰待机时间长、舰船在典型海况下的舰船振动环境等特点,设计了温度-振动-电应力综合环境加速寿命试验,为研究舰载导弹弹上计算机寿命评估与验证问题提供了一个合理有效的方案。

1 任务剖面的确定

1.1 总体履历和环境信息收集

为确定某型舰载导弹典型任务剖面,应当收集分析掌握该型舰载导弹的履历数据以及环境条件数据。需收集的数据项目包括但不限于:每枚导弹的编号及出厂日期、库房贮存、运输、上舰值班等不同任务阶段的起始时间、贮存和值班阶段的气候环境、力学环境、电环境、辐射环境等其他环境数据。

基于这些数据可以推断某型舰载导弹总体的平均服役时间、平均库房贮存时间、平均上舰值班时间,值班时长占服役时间长的占比、最长值班时间及其占

服役时间的占比以及每个任务阶段内导弹所受到的相应环境应力水平。经过梳理分析该型舰载导弹总体一个任务周期内的履历记录,对研究对象贮存寿命敏感的环境因素进行辨别甄选,得到一个任务周期内温度、振动和电应力的典型任务剖面,如图 1 所示。

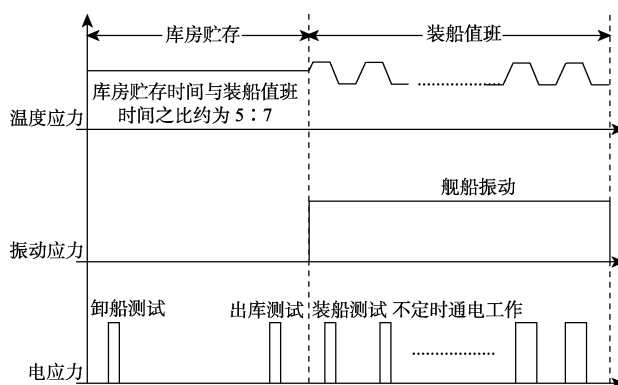


图 1 某型舰载导弹 1 个任务周期内的典型任务剖面
Fig. 1 Typical mission profile of a certain shipborne missile in one mission cycle

1.2 研究样机的选取以及试验输入信息的计算

本文以研究验证舰载导弹弹上计算机装弹出厂后贮存寿命能否延长至不低于 N_1 的寿命目标为例,基于普遍性和代表性考虑,从型号导弹总体中选取服役较长,累计上舰值班时间整体较长,但兼顾部分值班时间少的 10 枚返厂导弹的弹上计算机进行加速寿命试验。

加速试验剖面是指将产品规定时间内所受到的环境应力的时序描述通过加速因子等效折算成产品在加速应力下加速试验的时序描述。温度应力加速试验剖面则是将产品在规定时间内将所受到的环境温度应力作用时间作为输入,除以温度加速模型推导计算出的加速因子,换算成温度加速应力条件下的试验时间,并以尽可能还原产品在规定时间内所经历的事

件情形为原则,而安排分配应力水平和试验时间的时序描述。振动应力加速试验剖面同理。

由于返厂的导弹服役时间和累计值班时间各不相同,寿命期限与服役时间的差值 T_1 为温度应力加速试验剖面设计的输入,寿命期限内估计的平均上舰值班与实际值班时间的差值 T_2 即为振动应力加速试验剖面设计的输入。根据该 10 台试验样机的出厂履历记录,可估计出厂 N_1 时间内 10 台样机平均处于舰船环境的时间。本文假设该 10 台样机 N_1 内平均处于舰船环境的时间为 N_2 ,则 N_2 与实际在舰时间待机的差值即为 T_2 。按照上述规则,采用假定的 10 枚试验样弹的服役时间和值班时间数据计算出 10 台试验样机加速寿命试验剖面设计输入 T_1 和 T_2 ,结果见表 1。

表 1 加速寿命试验输入信息
Tab.1 Input information of accelerated life test

序 号	寿命期限与服役时间 的差值 T_1 (温度应力加速试验 剖面设计的输入)/月	寿命期限内估计的平均在舰时 间与实际在舰时间的差值 T_2 (振动应力加速试验剖面设计 的输入)/月
1	24	30
2	21	64
3	24	85
4	24	55
5	24	27
6	24	32
7	21	35
8	24	36
9	24	34
10	24	30

2 加速试验设计

根据环境应力对弹上计算机寿命影响分析,从而确定加速应力的类型,为选定的加速应力类型选择最合理、最贴合加速试验对象的环境应力物理失效加速模型。在试验对象失效机理以及寿命分布不改变的前提下确定应力水平,求出相较于正常应力的加速因子,进一步将常规应力典型贮存剖面转化为等效当量的加速应力试验剖面^[3]。除此之外,还应明确弹上计算机性能测试方法和步骤、测试时间间隔等技术细节。

2.1 加速应力类型的选择

舰载导弹弹上计算机在长期贮存、待机过程中,由于温度应力、湿度应力和振动应力等环境因素的影响,会发生一系列的物理化学效应,从而造成失效,降低可靠性水平。舰载导弹长期存放于密封充满干燥氮气的贮运发射筒中,因此暂不考虑湿度应力对舰载

导弹弹上计算机寿命影响。对于某型舰载导弹弹上计算机寿命影响明显的环境应力是温度、振动和电应力^[4]。

电子产品对热应力的影响很敏感,通常温度每升高 10℃,电子元器件寿命将缩短 1/2。温度应力还可以使绝缘材料会发生软化和变形,结构减弱,甚至薄弱,同时会加速金属介质的腐蚀,使接触电阻增加。由于舰载导弹弹上计算机所处的海区环境温度日变化很小,且变化速度非常缓慢,因此不考虑温度循环应力影响。舰船振动可能引起结构疲劳、机械磨损、器件松动等损耗,而颠簸可能会引起设备的低周疲劳,是影响舰船弹上设备寿命的重要因素。电应力给电子产品带来的失效也非常明显,电迁移、腐蚀、与时间相关的介质击穿等电应力造成的失效模式相互竞争,导致电子产品电路的开路或短路^[5]。根据历史故障维修记录,这 3 种应力作用都与构成舰载导弹弹上计算机退化型失效有紧密关联。因此,本文选择温度、振动和电应力作为加速应力,通过加速模型对敏感环境应力剖面进行等效折算来确定加速剖面。

受试验条件制约,无法进行多应力共同作用,因此这里不考虑各个应力之间的耦合作用,加速模型也未采用多应力耦合作用的加速模型,各应力的加速试验剖面均不重叠。由于产品在 1 个任务剖面周期内通电时间的占比极小,电应力与温度应力和振动应力之间的耦合效应不明显,其损伤积累亦不显著。

在舰船海上作业阶段,虽然温度应力与舰船振动应力之间一直处于共同作用状态,但现阶段大多温度与振动应力之间对电子产品的耦合作用的研究显示,温度与振动应力对电子产品的耦合作用主要是温度循环与振动应力的耦合作用,而舰载导弹弹上计算机所处海洋环境中温度循环的影响十分微弱。张卫^[5]、潘骏^[6]对温度应力与振动应力对电子产品耦合作用失效机理分析指出,在温度循环低温平均应力作用不明显时,耦合失效主要机理是振动应力摩擦产生局部升温加速接触部位振动磨损腐蚀。宜紫薇^[7]对热循环和随机振动失效损伤的研究中均表明,振动应力在耦合作用和耦合失效中为主要因素。

国内有关单位开展过温度和振动耦合的相关试验,相关结论为:应变随温度、振动的变化趋势基本相同,随着温度升高,同一振动量级下的应变先减小、后增大,40、60℃下振动应力的应变响应小于常温,80℃下振动应力的应变响应近似等于常温。相同温度下,随着振动量值的增大,应变响应不断增大。温度加速试验设置的加速温度为 80℃,因此本文可以通过在常温下集中持续施加等效寿命期限内舰船振动应力当量的振动加速当量的方式持续积累热量,来模拟加速温度应力与振动应力的耦合作用。

综上所述,温度与振动应力耦合作用对舰载导弹弹上计算机的影响并不显著。在加速试验过程中,因

未施加温度应力与振动应力同时作用的耦合应力会造成试验验证寿命比实际剩余贮存寿命长的影响有限。这部分耦合应力当量也可由步进提升温度和振动加速应力水平或延长温度和振动加速应力作用时间来补偿。

2.2 各类应力加速试验方案设计

2.2.1 温度应力

由于舰载导弹弹上计算机无论处于陆地环境还是舰船环境之中,都长期处于恒温恒湿密封、充满干燥氮气的贮存发射筒环境之中,温度波动较小,因此常规温度环境应力可取其贮存温度的典型值 25℃。由于舰船作业海区温度日变化很小,且变化速度非常缓慢,因此不考虑温度循环应力的影响。借鉴该种计算机在先前其他加速寿命试验的经验,其温度加速应力取 80℃。高温加速采用阿伦尼斯 (Arrhenius) 模型,其加速因子计算见式 (1)。

$$A_F = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{test}}} \right) \right] \quad (1)$$

式中: T_0 为正常贮存热力学温度,取 298 K; T_{test} 为试验热力学温度,取 353 K; E_a 为激活能,电子产品取经验值 0.6 eV; k 为玻尔兹曼 (Boltzman) 常数, $k = 8.617\,385 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ 。根据式 (1) 计算出加速因子 $A_F = 38$ 。温度应力加速试验剖面设计的输入 T_1 为 2 a 时,等效的加速试验时间为: $t_1 = T_1/A_F \approx 461 \text{ h}$ 。

将舰载导弹弹上计算机放入温度箱,温度箱的温度设置成 80℃,温变率不大于 5℃/min。本文以一个周期剖面内处于陆地环境的时间与处于舰船环境的时间之比为 5:7 为例,将温度加速应力剖面总时间 461 h 按 5:7 的比例分割为前后 2 段,前段为 192 h,后段为 269 h,在 2 段温度加速应力剖面内,温度始终保持在 80℃。这种分割安排是为了在前段剖面高温加速寿命贮存结束后,冷却至正常环境条件下进行一次电应力加速试验,等效在库房贮存出库装船前,进行库房加电测试的温度应力加速当量。温度加速应力剖面如图 2 所示。温度加速寿命试验全部结束后,将样机恢复至常温,进行功能和技术指标测试。

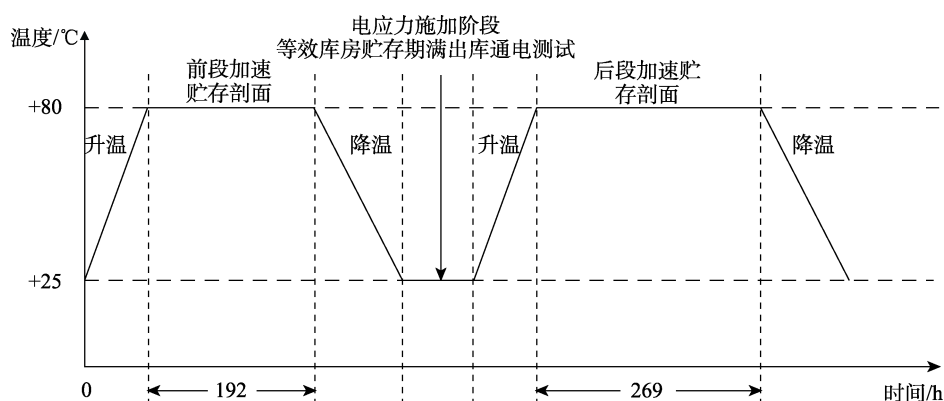


图2 温度应力加速试验剖面
Fig.2 Temperature stress accelerated test section

2.2.2 舰船振动应力

对该型舰载导弹总体舰船振动应力进行分析和勘查,根据国内对舰载电子设备和舰船的振动等效性的研究,在低频振动激励下,结构响应传递基本保持线性,50 Hz 以下的振动响应与振动激励相比,基本保持不变。舰船随海浪的振动频率基本在 50 Hz 以下,可以近似认为导弹及其分机的振动基本与舰船的振动载荷谱一致。

根据对装备舰船出海海况调研考察统计,经历 1~3 级海况和 7~9 级海况的时间比例均较低,4~6 级海况时间占比 50%~60%,比例较高。因此,确定典型海况为 5 级。根据 GJB 4000—2000^[8]《舰船通用规范》的海况分布数据、英国国防部标准《国防装备环境手册 第五部分 诱发机械环境》^[9]中“运输舰船振动严酷度随海况变化的示例”数据 (见图 3),基于 GJB

150.16A^[10]不同振动环境的疲劳等价关系分析,得到典型海况为 5 级海况下,其垂直轴、横向、纵向的振动量值分别为 0.075g、0.021g、0.013g。以此为基准,作为典型舰船振动的条件,舰船振动环境参数见表 2。

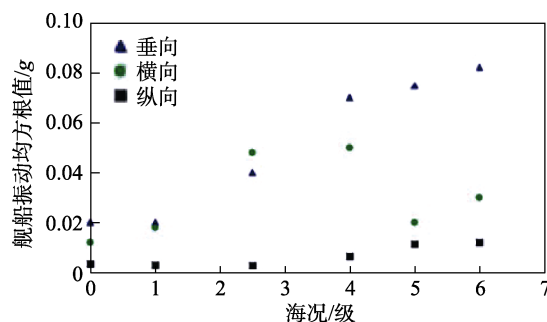


图3 运输舰船振动严酷度随海况变化的示例
Fig.3 Example of variation of vibration severity of transport ship with sea conditions

表 2 舰船振动环境量值 (覆盖 5 级海况)
Tab.2 Environmental values of ship vibration
(covering level 5 sea conditions)

设备名称	振动均方根值 RMS/g		
	轴向条件 (舰垂向)	横向条件	纵向条件
二舱内设备	0.075	0.021	0.013

在典型振动环境应力的技术上, 基于 GJB 150.16A 的不同振动环境的疲劳等价关系, 进行加速剖面设计, 见式 (2)。

$$\frac{W_0}{W_1} = \left(\frac{t_1}{t_0} \right)^\alpha \tag{2}$$

则加速因子可表示为:

$$A = \frac{t_0}{t_1} = \left(\frac{W_1}{W_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \tag{3}$$

式中: W_0 、 W_1 分别表示环境随机振动谱密度和施加的加速随机振动谱密度; t_0 、 t_1 分别表示 W_0 、 W_1 对应振动应力作用时间; α 为材料常数 (疲劳曲线的斜率或 S/N 曲线斜率)。

GJB 150.16A 指出, 航空电子装备 α 取 1/4, 导弹试验大纲使用的指数值为 1/3.25~1/6.6, 多数材料的指数取 1/6~1/6.5。参考 GJB 1032^[11]随机振动筛选等效时间的公式 (α 取 1/3), 从严角度出发, 该型舰载导弹弹上电子设备常数可参考标准选取 1/3。

根据文献[12-13], 式 (3) 的加速因子还可以表示为:

$$A = \frac{t_0}{t_1} = \left(\frac{g_1}{g_0} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \tag{4}$$

式中: g_0 、 g_1 分别表示环境随机频谱振动量值和施加的加速随机频谱振动量值 (随机频谱振动量值为振动加速度均方根值); t_0 、 t_1 分别表示 g_0 、 g_1 对应振动应力作用时间。

振动应力上限的选取应以不改变产品的失效机理和寿命分布为前提, 舰载导弹弹上计算机筛选量值为 6g, 舰载导弹弹上计算机所在的二舱舱段振动筛选振动量值为 3g。考虑加速寿命试验最大振动量值不超过二舱筛选振动量值 3g, 可选取 2 倍的舰船环境随机频谱振动量值作为加速试验振动量值^[14]。

对照表 2, 根据式 (4) 计算得垂向、横向、纵向的加速因子为 64, 则 10 台试验样机的振动应力加速试验时间为:

$$t_1 = \frac{t_0}{A} \tag{5}$$

此处正常振动应力 g_0 的作用时间 (也是舰载导弹弹上计算机在舰延寿时间) t_0 正是 2.2 节表 1 中的 T_2 。根据式 (5) 计算出等效加速试验时间 t_1 , 结果见表 3。

表 3 舰载导弹弹上计算机振动应力加速试验时间 t_1 统计
Tab.3 The t_1 statistics of computer vibration stress acceleration test on shipborne missile

序号	延寿时间 t_0 /月	试验时间 t_1 /h
1	30 (915 d)	343
2	64 (1 952 d)	732
3	85 (2 593 d)	972
4	55 (1 373 d)	515
5	27 (824 d)	309
6	32 (976 d)	366
7	35 (1 068 d)	401
8	36 (1 098 d)	412
9	34 (1 037 d)	389
10	30 (915 d)	343

振动应力从 3 个方向作用于样机: 垂向 (X)、横向 (Y)、和纵向 (Z), 试验样机方向定义见图 4。振动应力加速试验在温度应力加速试验完成之后开展, 分别施加垂向、横向、纵向振动加速应力, 振动应力加速试验时间见表 3。试验时间等效为在服役时间 N_1 内估计在舰待机时间 N_2 与实际在舰待机时间的差值 T_2 。

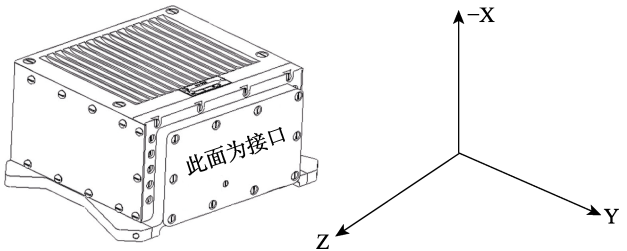


图 4 舰载导弹弹上计算机方向
Fig.4 Computer direction of shipborne missile

2.2.3 电应力

舰载导弹弹上计算机在装船值班期间, 除装船测试期间为定时加电状态外, 直到靠岸卸船为止, 期间所有的加电状态均为不定时加电, 且每次加电时间很短。因此, 在舰船值班阶段, 安排 4 次电应力加速试验 (包括最后一次等效卸船测试的电应力加速试验) 用于等效舰载导弹弹上计算机装船值班在非加电期间受到的温度应力和各方向上舰船振动应力作用当量。在装船值班阶段, 舰载导弹弹上计算机供电记录中绝大部分电压记录都为标准电压, 异常电压记录出现次数很少, 且持续时间很短。

电应力试验方法: 整机加电进行功能检测, 依次调整外接直流电源至 31 V 保持 10 min、24 V 保持 10 min、27 V 保持 20 min, 其中 27 V 为标称电压, 31 V 为上限电压, 24 V 为下限电压。整机功能测试结果正确则通过电应力试验^[15-16]。

舰载导弹弹上计算机加速寿命试验中, 共需完成 5 次电应力测试, 分别等效为库房出库测试、装船测试、次振向测试 (2 次)、卸船测试。其中, 卸船测

试为简弹状态下加电测试。

试验样机在温度贮存和振动过程中不加电,除了库房出库测试,其他电应力测试仅在每个轴向的振动前后进行。

2.3 等效加速寿命试验剖面的制定

考虑某型舰载导弹弹上计算机贮存和在舰待机

任务剖面内的温度和振动等环境应力和工作时电应力的影响,在确定了各类应力加速试验剖面各环境参数后,可以给出某型舰载导弹弹上计算机贮存 T_1 和待机 T_2 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5所示。最终,根据加速寿命试验剖面开展试验,根据试验结果对某型舰载导弹弹上计算机寿命进行验证与评估^[17-20]。

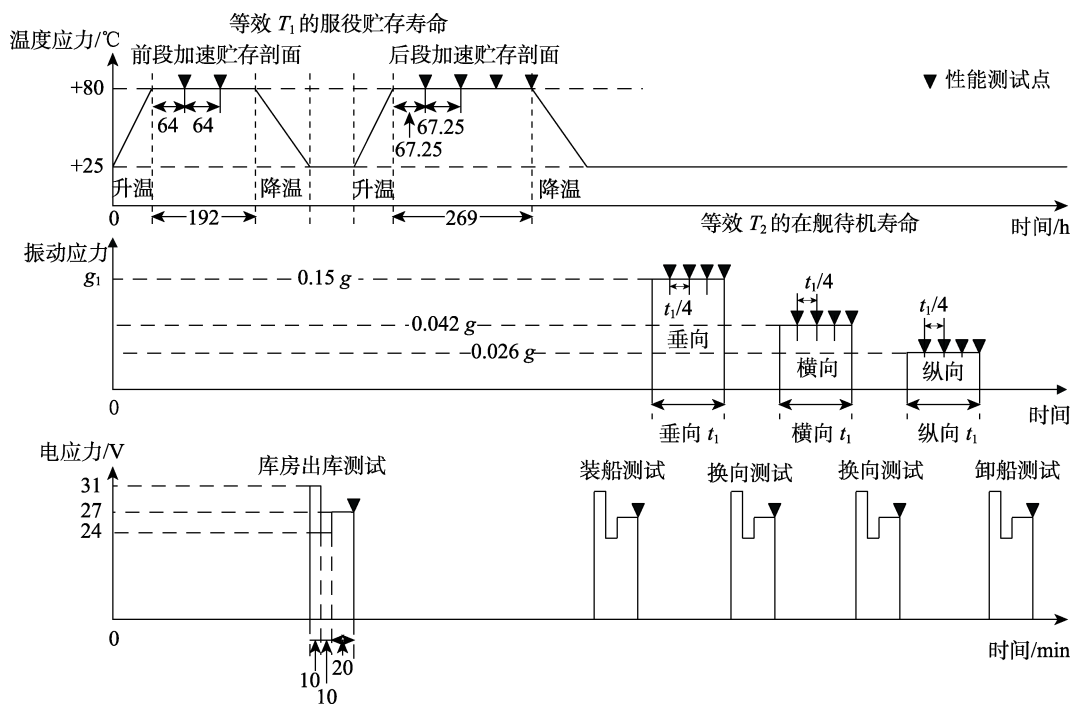


图5 舰载导弹弹上计算机加速寿命试验剖面

Fig.5 Computer accelerated life test section of shipborne missile

2.4 试验样机的性能测试

试验样机的性能测试主要为加电性能测试,测试方法为试验样机与测试工装通过电缆连接构成单元测试状态,运行工装测试中的功能测试软件,完成对整机的功能测试。测试项目包括:RS-485自检测试、开关量测试、存储器测试、中断检测、弹地通讯测试、A/D和D/A转换器测试、电源测试。

测试时机为在温度应力加速剖面内前段测试2次,从升温至80℃的开始时刻,每间隔64h降温至标准条件进行1次样机性能测试。在温度加速应力剖面后段内测试4次,从升温至80℃开始,每间隔67.25h降温至标准条件进行1次样机性能测试。在加速振动剖面中,从开始时刻每隔 $t_1/4$ 时刻进行1次性能测试,期间进行4次性能测试。此外,每次电应力加速试验后也进行1次性能测试。每次性能测试的结果均是对试验样机寿命验证评估的重要依据。

3 环境验证试验

在完成加速寿命试验后,为验证经过寿命加速后

舰载导弹弹上计算机剩余贮存寿命是否达到寿命目标要求,还要进行环境验证试验,以鉴定寿命加速之后舰载导弹弹上计算机在各种环境条件下的适应性和可靠性^[21]。

舰载导弹弹上计算机环境验证试验项目有:低温工作、低温贮存、高温工作、高温贮存、低气压、湿热、振动、冲击、加速度、舰船振动、颠簸试验。各项环境验证试验目的均是考核舰载导弹弹上计算机在该种环境条件下的适应或承受能力^[22]。其中高温工作、低温工作、低气压、振动、冲击、加速度环境验证试验是在试验过程中进行加电性能测试,而低温贮存、高温贮存、舰船振动、颠簸环境验证试验的加电性能测试均在试验结束恢复正常实验室环境条件后进行^[23]。

4 试验方案的实施

根据舰载导弹弹上计算机的实际任务剖面 and 第2节中设计的加速试验方案安排,折合成如图5所示结构的等效当量加速试验剖面,据此开展加速寿命试验。具体试验实施流程^[24]见图6。

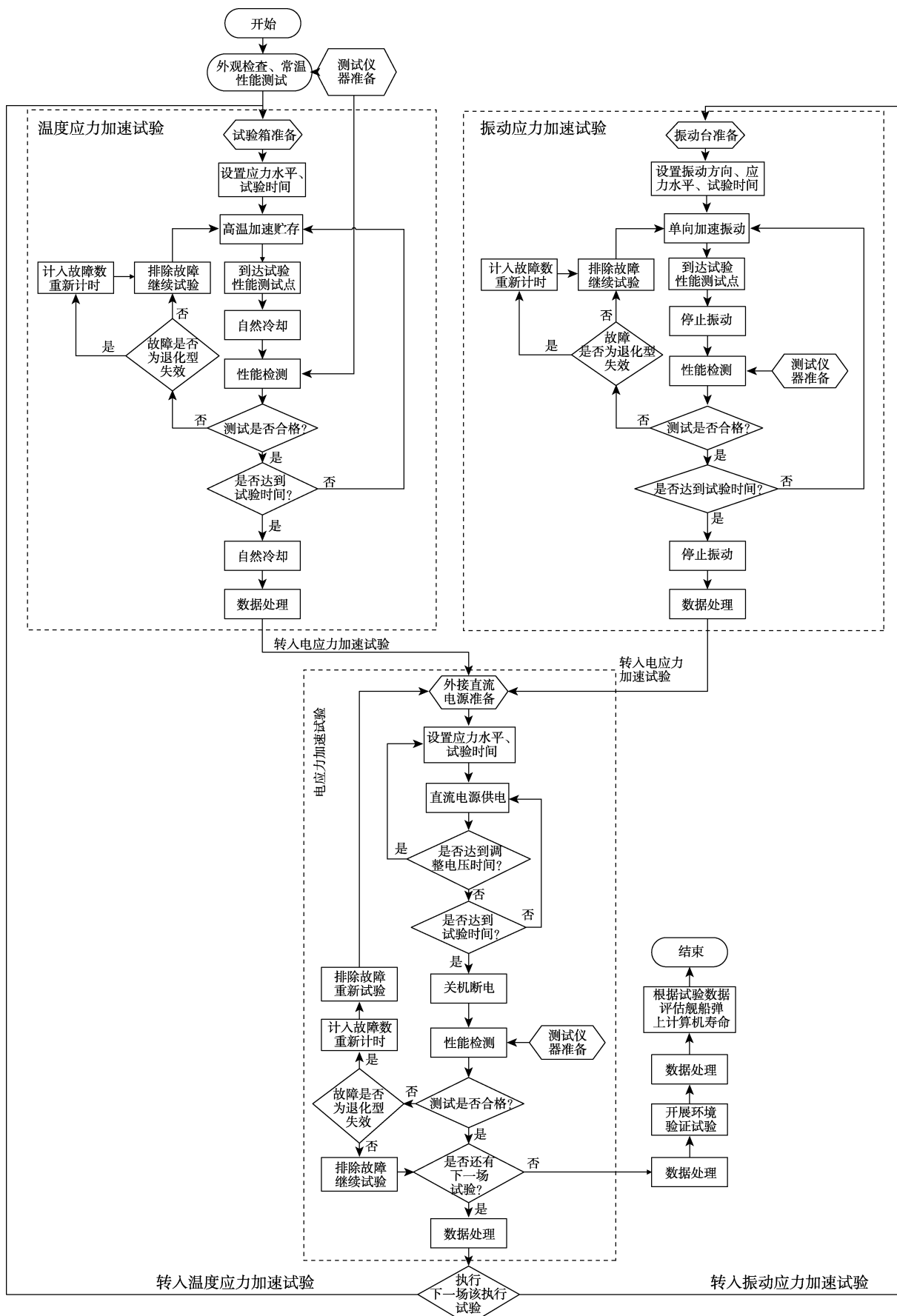


图 6 舰载导弹弹上计算机加速寿命试验实施流程

Fig.6 Implementation process of computer accelerated life test of shipborne missile

将试验样机贮存寿命加速至寿命目标年限。整个加速试验中,舰载导弹弹上计算机的性能指标始终没有超出技术指标可接受的范围,且无显著退化趋势。加速试验后,对试验样机开展环境验证试验,结果均通过环境验证试验,表明经过贮存至目标寿命年限的舰载导弹弹上计算机仍能符合使用要求^[25],可以给出该批舰载导弹弹上计算机具备延寿至目标年限的剩余贮存寿命的试验结论。

5 结语

本文根据舰船振动环境,鉴于海况与舰船振动量值的关系,针对性设计了振动应力加速试验,在温度和振动加速寿命试验间隙进行了电应力加速寿命试验,形成综合3种环境加速应力的加速寿命试验剖面,并据此开展了舰载导弹弹上计算机加速寿命试验。结合环境验证试验,对舰载导弹弹上计算机进行了寿命评估,从而提供一个在试验条件受限情况下贴近服役剖面且可行的舰载导弹弹上电子设备加速寿命试验方案,可为后续延寿研究工作提供参考。限于试验条件和试验时间紧迫,舰载导弹弹上计算机加速寿命试验研究尚有诸多可进一步探讨改进优化工作没有来得及展开。

1)关于工作海上温度应力与舰船振动应力对舰载电子设备耦合作用的影响可深入研究,进而可为设计出由步进提升温度和振动加速应力水平或延长温度和振动加速应力作用时间来等效温度和振动耦合应力当量的加速试验方案。

2)该舰载弹用计算机为通用的军用加固计算机,其组成部件和元器件为通用的军工级产品,所以这里的加速模型参数为相关军工行业研究人员采用的经验值^[26]。目前没有对该计算机元器件、材料等层级产品进行加速寿命试验,后续计划选取典型元器件和材料开展试验进行验证。

3)可优化设计综合应力同时作用的舰载导弹弹上计算机加速寿命试验方案,选用合适的多应力耦合加速模型和耦合应力水平,优化加速试验剖面,大大减少加速试验时间与成本。优化加速试验剖面中的性能测试时机,更加贴合舰载导弹弹上计算机失效规律,为更准确的失效时间估算打下基础。

参考文献:

- [1] MEEKER W, NELSON W. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 236.
- [2] 秦强, 张生鹏. 综合环境条件下电子装备贮存寿命加速试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 81-87.
- QIN Qiang, ZHANG Sheng-peng. Accelerated Storage Test of Electric Equipment under Integrated Environ-

- mental Stresses[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 81-87.
- [3] 宋岩, 李人擎, 陆家乐, 等. 船用电子设备可靠性加速试验方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(S1): 6-9.
- SONG Yan, LI Ren-qing, LU Jia-le, et al. Research on Accelerated Test Method for Marine Electronic Equipment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020, 38(S1): 6-9.
- [4] 洪亮, 张福光, 崔旭涛. 海军导弹服役环境对导弹寿命的影响及防护包装对策的研究[J]. 包装工程, 2011, 32(23): 1-4.
- HONG Liang, ZHANG Fu-guang, CUI Xu-tao. Research on Influence of Naval Missile Service Environment on Missile Life and Countermeasures of Protection Packaging[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(23): 1-4.
- [5] 张卫. 考虑多失效机理耦合的电子产品寿命预测方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- ZHANG Wei. Research on Life Prediction Method of Electronic Product Combined Multiple-Failure Mechanism[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [6] 潘骏. 航天电连接器振动可靠性建模与评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- PAN Jun. Model and Estimate of Electrical Connectors under Vibration Stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [7] 宜紫薇. 热循环与随机振动加载下电子封装结构的寿命预测[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- YI Zi-wei. The Life Prediction of Electronic Packaging Structures under Thermal Cycling and Random Vibration Loading Condition[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [8] GJB 4000—2000, 舰船通用规范[S].
- GJB 4000—2000, General Specification for Naval Ships General Volumes[S].
- [9] Defence Standard 00-35, Environmental Handbook for Defence Materiel Part 5—Mechanical Environments[S].
- [10] GJB 150.16A—2009, 军用装备实验室环境试验方法. 第16部分: 振动试验[S].
- GJB 150.16A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Material—Part 16: Vibration Test[S].
- [11] GJB 1032—90, 电子产品环境应力筛选方法[S].
- GJB 1032—90, Environmental Stress Screening Process for Electronic Products[S].
- [12] 曹强, 何亚屏, 王婷, 等. 基于逆幂率模型的随机振动疲劳加速试验应用方法研究[J]. 环境技术, 2020, 38(3): 7-12.
- CAO Qiang, HE Ya-ping, WANG Ting, et al. Study on the Application Method of Random Vibration Fatigue Accelerated Test Based on the Inverse Power Model[J]. Environmental Technology, 2020, 38(3): 7-12.
- [13] ALLEGRI G, ZHANG X. On the Inverse Power Laws for Accelerated Random Fatigue Testing[J]. International

- Journal of Fatigue, 2008, 30(6): 967-977.
- [14] 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.
ZHANG Guo-long, CAI Jin-yan, LIANG Yu-ying, et al. Research on Reliability Assessment Method of Electronic Equipment Based on Multi-Stress ADT[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(12): 2815-2822.
- [15] 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): 24-28.
ZHANG Sheng-peng, WANG Xiao-hong, LI Xiao-gang. Design of Accelerated Storage Test Scheme for Electronic Complete Machine[J]. Quality and Reliability, 2011(2): 24-28.
- [16] 刘佩风, 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.
LIU Pei-feng, WANG Yi-fei, BAI Ming-ming, et al. Study on Storage Accelerated Aging Test and Life Assessment of Assembly Product[J]. Structure & Environment Engineering, 2018, 45(1): 57-62.
- [17] 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): 101-105.
CHEN Wen-hua, FENG Hong-yi, QIAN Ping, et al. Theory & Method for Optimum Design of Accelerated Life Test Plan under Multiple Stresses[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 101-105.
- [18] 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.
ZHOU Jie, YAO Jun, SU Quan, et al. Optimum Design of Accelerated Storage Test Plan under Multiple Stresses[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(4): 1202-1211.
- [19] 张鑫, 韩建立, 张崇会, 等. 弹载二次电源加速寿命试验试验谱研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 54-59.
ZHANG Xin, HAN Jian-li, ZHANG Chong-hui, et al. Study on Accelerated Life Test Spectrum of Bomb Secondary Power Supply[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(5): 54-59.
- [20] 王艳艳, 舒畅, 李超. 自然环境谱转化为加速试验环境谱的方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 34-38.
WANG Yan-yan, SHU Chang, LI Chao. Method for Conversion of Natural Environmental Spectra to Accelerated Test Environmental Spectra[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 34-38.
- [21] 王浩伟, 滕克难, 吕卫民. 导弹贮存延寿试验关键技术及研究进展[J]. 含能材料, 2019, 27(12): 1004-1016.
WANG Hao-wei, TENG Ke-nan, LÜ Wei-min. Review on Key Technologies for Missile Storage and Life-Extension Test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(12): 1004-1016.
- [22] 刘佩风, 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.
LIU Pei-feng, WANG Yi-fei, BAI Ming-ming, et al. Study on Storage Accelerated Aging Test and Life Assessment of Assembly Product[J]. Structure & Environment Engineering, 2018, 45(1): 57-62.
- [23] 程鹏斌, 卢阳, 马英. 加速寿命试验在弹载电子设备寿命试验中研究及应用[J]. 环境技术, 2018, 36(3): 7-10.
CHENG Peng-bin, LU Yang, MA Ying. Study and Application of Accelerated Life Test in Life Test of Missile Electronic Equipment[J]. Environmental Technology, 2018, 36(3): 7-10.
- [24] 王浩伟, 徐廷学, 杨继坤, 等. 基于加速因子的退化型产品可靠性评估方法[J]. 战术导弹技术, 2013(6): 36-41.
WANG Hao-wei, XU Ting-xue, YANG Ji-kun, et al. Reliability Assessment Method of Degradation Production Based on Accelerated Factor[J]. Tactical Missile Technology, 2013(6): 36-41.
- [25] 陈海建, 李波, 顾钧元, 等. 基于加速寿命试验的导弹寿命预估方法[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(4): 11-12.
CHEN Hai-jian, LI Bo, GU Jun-yuan, et al. Missile Life Prediction Method Based on Accelerated Life Test[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 31(4): 11-12.
- [26] 赵建印, 刘芳. 加速退化失效产品可靠性评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(10): 1669-1671.
ZHAO Jian-yin, LIU Fang. Reliability Assessment from Accelerated Performance Degradation Tests[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(10): 1669-1671.

责任编辑: 刘世忠