

一种运载火箭地面电子设备贮存期及使用寿命确定方法

尹子盟, 刘树仁, 沈 博

北京宇航系统工程研究所, 北京

收稿日期: 2022年7月13日; 录用日期: 2022年10月12日; 发布日期: 2022年10月20日

摘 要

本文介绍了运载火箭地面电子产品贮存期与使用寿命上暴露出的薄弱环节, 分析了美国航天电子设备贮存期及使用寿命的研究现状, 并重点介绍了航天电子设备贮存期及使用寿命确定方法, 给出了可供参考的在不同使用条件、质量等级、使用频次、复杂程度的产品贮存期与使用寿命估计指标, 最后通过长征五号部分重复使用电子产品进行了验证。

关键词

航天电子设备, 贮存期, 使用寿命

A Method for Determining the Storage Period and Service Life of Launch Vehicle Ground Electronic Equipment

Zimeng Yin, Shuren Liu, Bo Shen

Beijing Institute of Space System Engineering, Beijing

Received: Jul. 13th, 2022; accepted: Oct. 12th, 2022; published: Oct. 20th, 2022

Abstract

In this article, weak link of storage life and service life of aerospace products is introduced. The research status of U.S. aerospace electronic equipment storage and service life was analyzed. The method to determine the storage life and service life of aerospace products is recommended. The estimation indexes of product storage life and service life for different service conditions, quality

grade, service frequency, complexity are presented. In the end, the method is verified by part of Long March reusable electronic equipment.

Keywords

Aerospace Electric Products, Storage Life, Service Life

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 背景

航天电子设备长期贮存或长期使用后都会损耗产品寿命。以往由于火箭上电子设备“即产即用”的特点,产品贮存及使用寿命管理上的薄弱环节暴露的不明显。近年来,我国运载火箭进入高密度发射阶段,长期使用的地面设备陆续贮存到贮存期或接近贮存期,产品贮存及使用寿命上的薄弱环节被暴露出来,尤其是火箭发射用地面电子设备贮存期及使用寿命确定不合理导致大量设备超期使用,给运载火箭在发射窗口内可靠发射带来了风险,尤其是在海南文昌发射次数增加的情况下,产品贮存于使用寿命问题暴露的更加突出,贮存期与使用寿命确定方法成为领域内重要研究内容。

2. 贮存期及使用寿命确定方法研究现状

2.1. 贮存期及使用寿命的基本概念

航天电子产品贮存期是指产品从正式交付之日起,在规定的包装、维护和贮存条件下,能满足战术技术性能要求的存放期限[1],使用寿命是指产品使用到无论从技术上还是经济上考虑都不宜再使用,而必须大修或报废时的寿命单位数。实际上,重复使用电子产品尤其是地面电子设备在其全寿命周期内,贮存与使用这两种情形相互影响相互作用,产品在使用后贮存,贮存后使用,都会损耗产品寿命,因此对产品而言两种约束同时存在。

2.2. 国外贮存期及使用寿命确定方法研究现状

航天电子产品贮存期与使用寿命确定方法往往借鉴武器装备领域的相关经验。早在 20 世纪 50 年代,美国科研人员对装备进行贮存性能的研究,以外场贮存方式,通过元器件、零部件等外场贮存试验数据对整机进行贮存期与使用寿命进行评估。20 世纪 60 年代美国在开始组织实施装备贮存可靠性计划(The Storage Reliability of Materiel Program, SRMMP)和贮存可靠性研究计划(The Storage Reliability Research Program, SRRP) [2]。基本思路是收集全美范围内的现场贮存数据并辅以少量的加速试验、特殊测试等,获得大量的元器件、材料产品及部分整机设备贮存可靠性数据,然后由下至上逐级向上评估出分系统直至武器系统的贮存寿命,进而指导武器系统的设计工作。

经过十几年的努力,美国的 SRMMP 和 SRRP 取得了很大成功,并形成了贮存可靠性数据库,并明确要求美国军火制造商依据上述数据库中的数据进行后续产品的设计工作。到了 20 世纪 80 年代,美国对装备贮存可靠性设计的研究更加深入,建立了预测不工作周期对装备可靠性定量影响的分析方法,并以电子元器件为主给出了一系列元器件、材料的非工作失效率评估模型及大量的相关数据,这些模型可用于评估多种贮存环境下元器件的贮存失效率,为多用途导弹的设计提供依据。20 世纪 90 年代以后,

主要根据几十年的贮存设计技术积累进行健康诊断的方法加以解决，必要时通过采用加速贮存试验获得产品的贮存可靠性信息，进而在较短时间内实现产品贮存寿命评估。

俄罗斯、欧盟等均采用加速贮存试验地方法进行贮存期与使用寿命的评估，不过由于技术保密等原因，其技术细节情况披露极少，尚无法参考。

2.3. 国内研究现状

我国自上世纪 60 年代逐步开展贮存期与使用寿命研究、贮存试验等工作。我国在六十年代对首代航天装备进行过现场贮存试验，积累了一定的实践经验。原航天部从 20 世纪 60 年代开始，开展了航天装备“三防”（防老化、防腐蚀、防霉变）等研究，当时的工作重点主要在分析贮存环境对贮存可靠性的影响，进而提高装备的环境适应性。上世纪 60 年代后期开始相继开展多个型号航天装备的现场贮存试验，积累了一定的经验[3]。

本世纪，中国运载火箭技术研究院相继开展了某型航天装备贮存延寿工程，通过加速贮存试验与自然贮存试验相结合的方法，其中加速贮存试验按照产品结构的组成形式，采用非金属材料及电子元器件、部组件、整机加速贮存层层递进的方式，通过对各级试验结果的分析、验证和反推，最终预示出产品的贮存期，自然贮存试验依靠贮存试验产品和部队收集自然贮存信息，并利用年度检测、贮存弹到期时的地面试验以及发射训练、飞行试验结果，进行自然贮存与加速贮存对比验证，最终对加速贮存试验的预示结论进行验证，进而指导后续改进型型号产品的研制工作。

总体来讲，国内贮存可靠性方面的研究起步较晚，但随着国家的逐步重视，近几年国内学者在贮存可靠性领域进行了大量研究，前沿的基于性能退化的贮存期分析思想已被国内多个研究机构采用并做了探索工作，该方法无疑正逐步成为高可靠产品可靠性分析的首选方法。通过已有的贮存信息，分析相关影响因素，进而快速估计出产品贮存期与使用寿命，同时在贮存与使用过程中通过详细记录数据，实时监测与健康管理的保证产品正常运行[4]。

3. 贮存期的确定

3.1. 贮存期指标确定的理论方法

研究电子设备故障与时间关系的宏观统计规律主要是研究故障率随时间变化的规律。在一段时间内，具有代表性的是浴盆曲线，如图 1 所示。

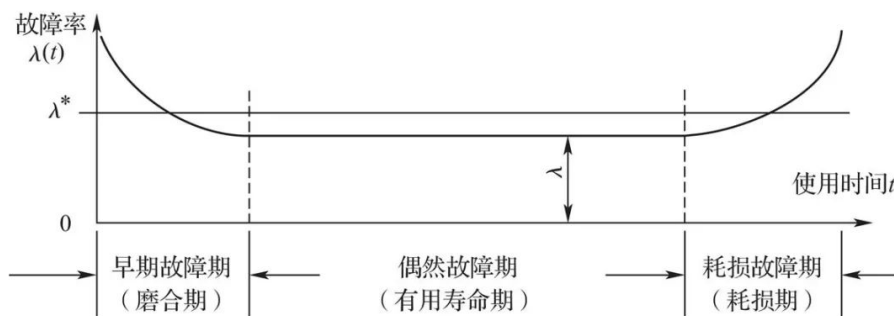


Figure 1. Schematic diagram of a typical bathtub curve
图 1. 典型浴盆曲线示意图

理论上，通过不断计算或评估设备的故障率，便可估算设备寿命，但在工程实际中无法得到实测指标和估计指标的情况下，尤其在海南文昌发射场的湿度、温度、盐雾等条件对地面电子设备影响难以估计时，运载火箭地面电子设备贮存期的确定可通过类比分析得出。由于电子产品贮存期影响寿命的因素

相似，其理论计算模型具体如下：

$$T_{NG} = \frac{T_J \pi_{NQ}}{A \pi_{NE} \pi_{CYC}}$$

式中：

- T_{NG} ——设备非工作贮存期；
- A ——复杂度调整系数；
- π_{NE} ——环境系数比例；
- π_{CYC} ——电源通断循环系数比例；
- π_{NQ} ——质量系数比例；
- T_J ——贮存期基准值。

3.2. 模型中的参数取值

3.2.1. 环境系数比例

重复使用地面电子设备所处环境直接影响产品贮存期与使用寿命，总的来说环境越好贮存期与使用寿命越长。环境系数比例为该设备所处环境与所选用基准之间的环境系数比值。其中“环境类别”部分参照国内各大运载火箭发射场实际监测环境，“环境系数选取”依据典型环境监测数据后相互比值确定，环境系数比例为该设备与所选用基准之间的通断循环系数比值。运载火箭地面电子设备非工作环境分类、说明及环境系数取值方法见表 1。

Table 1. Classification and value method of non-working environment

表 1. 非工作环境分类及取值方法

环境类别	代号	说明	环境系数取值
地面良好	G_B	能持续保持恒温恒湿，并对温湿度机械应力接近于零的地面良好环境，维护条件好。比如有温湿度控制的良好库房和实验室。	1.0
导弹仓库	G_{MS}	导弹及其辅助设备所处的仓库，能保持恒温恒湿，短时间温湿度控制措施失效能快速修复，维护条件好。	1.5
一般地面固定	G_{F1}	设备非工作时不移动，贮存于普通库房或通风较好的实验室内，基本没有振动、冲击、高温、高湿、霉菌、盐雾、沙尘环境。	2.5
一般地面	G_{F3}	设备非工作时不移动，贮存环境会出现振动、冲击、高温、高湿、霉菌、盐雾、沙尘环境，但有相应保障措施。	4.0
恶劣地面固定	G_{F2}	设备非工作时不移动，贮存环境易出现振动、冲击、高温、高湿、霉菌、盐雾、沙尘环境，如沿海普通库房。	6.5
平稳地面移动	G_{M1}	设备非工作时处于较平稳的移动状态，如在公路上行驶的专用车辆、火车车厢等环境。	7.0
剧烈地面移动	G_{M2}	设备非工作时处于剧烈的移动状态，受振动冲击较大，温湿度控制条件受限，维护条件较差。如履带车辆，装甲车等。	11

3.2.2. 通 - 断循环系数

重复使用地面电子设备非工作电源通断循环系数表征产品实际使用的频次。其中“设备通电使用频次”一列参考 GJB/Z 108A《电子设备非工作状态可靠性预计手册》中“每千小时使用次数”折合成“每年使用次数”，其中一年按 12 个月，每个月按 720 小时计算，具体见表 2。

Table 2. On-off cycle coefficient value method**表 2.** 通 - 断循环系数取值方法

设备通电使用频次	设备通电使用频次	π_{cyc}
不通电	不通电	1.00
低	不足 18 次/年	1.03
一般	多于 18 次/年不足 35 次/年	1.12
中等	多于 35 次/年不足 87 次/年	1.31
高	多于 87 次/年	1.62

3.2.3. 复杂度调整系数

重复使用地面电子设备复杂度直接影响产品贮存期与使用寿命，总的来说产品越复杂贮存期与使用寿命越短，其中 $7N_{IC} + 1.5N_T + N_D + N_N$ 是本文提供的一个经验判别公式，判别依据具体见表 3。

Table 3. Description of complexity**表 3.** 复杂度相关说明

复杂度		A
$7N_{IC} + 1.5N_T + N_D + N_N \leq 2000$	简单	1.00
$2000 < 7N_{IC} + 1.5N_T + N_D + N_N \leq 6500$	一般	1.15
$6500 < 7N_{IC} + 1.5N_T + N_D + N_N \leq 16500$	常规	1.30
$16500 < 7N_{IC} + 1.5N_T + N_D + N_N$	复杂	1.45

其中：

N_{IC} ——集成的电路总数量；

N_T ——晶体管数量；

N_D ——二极管数量；

N_{IC} ——无源元器件数量。

3.2.4. 质量系数

元器件质量直接影响其使用寿命，不同质量等级对元器件非工作失效率的影响程度以非工作质量系数 π_{NQ} 来表示，其取值取决于元器件的质量等级。在元器件的标准中，一般都规定了元器件在制造、检验及筛选过程中的质量控制水准，按此不同控制水准组织生产和管理的产品，具有不同的质量档次。于是，产品标准是划分其质量等级的主要依据，如下表 4。

Table 4. Description of quality levels**表 4.** 质量等级说明

质量等级	质量等级说明
A	所选集成电路 85%以上符合 Q/Y1044-2020 D 级以上产品，且 85%国产半导体分立器件、光电子器件均在军级以上；
B	所选集成电路 85%以上符合 Q/Y1044-2020G 级以上产品，且 85%国产半导体分立器件、光电子器件均在七专以上；
C	其他产品

3.2.5. 贮存期基准值

贮存期基准值尽可能选取技术状态、贮存条件、产品质量相似的到寿产品。经调研 CZ-2C、CZ-3A、CZ-5、CZ-7 型号地面电子设备情况，为尽可能做到基准值的明晰，选取在自然贮存状态下，贮存期普遍达 27.5 年(含 2.5 年周转期)、年检测试电源通 - 断循环间隔大于 1000 h 产品作为基准。这也与目前重复使用地面电子设备贮存期指标相印证。在缺乏到寿产品信息的情况下，可采取下列基准数据，见表 5。

Table 5. Benchmark data sheet

表 5. 基准数据表

名称	环境系数	循环系数	复杂度	质量等级	贮存期
基准数据产品	1.5	1.03	1.15	1	27.5

3.3. 典型产品贮存期指标的确定结论

基于上述分析，给出目前各类地面电子设备贮存期参考指标，如下表 6-9。

Table 6. Reference indicators for storage period of ground self-developed equipment (without electricity)

表 6. 地面自研设备贮存期参考指标(不通电)

贮存场景	质量等级	贮存期(年)				主要适用对象
		简单	一般	常规	复杂	
特殊库房或实验室(内陆)	A	31.5	27.5	24.0	21.5	长期在仓库和贮存库贮存及使用的地面电子设备
	B	26	22.5	20	17.5	
	C	15.5	13.5	12.5	10.5	
普通库房或实验室(内陆)	A	18.5	16.5	14.5	13.0	长期在北京、酒泉、太原、西昌发射场使用的地面电子设备
	B	15.5	13.5	12.0	10.5	
	C	9.5	8.0	7.0	6.5	
普通库房或实验室(沿海)	A	6.5	6.0	5.5	5.0	长期在大连、文昌及海上发射使用的地面电子设备
	B	6.0	5.0	4.5	4.0	
	C	4.0	3.5	3.0	3.0	
特殊库房或实验室(沿海)	A	10.0	9.0	8.0	7.0	长期在大连、文昌及海上发射使用且有特殊温湿度保证措施的地面电子设备
	B	8.5	8.0	7.0	6.5	
	C	5.5	5.0	4.5	4.0	

Table 7. The reference index for the storage period of ground electronic equipment (low power-on frequency)

表 7. 地面电子设备贮存期参考指标(通电频率低)

贮存场景	质量等级	贮存期(年)				主要适用对象
		简单	一般	常规	复杂	
特殊库房或实验室(内陆)	A	30.5	26.5	23.5	21.0	陆基液体、固体导弹型号长期在仓库和贮存库贮存及使用的地面电子设备
	B	25.5	22.0	19.5	17.5	
	C	15.0	13.0	11.5	10.5	
普通库房或实验室(内陆)	A	18.0	16.0	14.0	12.5	长期在北京、酒泉、太原、西昌发射场使用的地面电子设备
	B	15.0	13.0	11.5	10.5	
	C	9.0	8.0	7.0	6.0	

Continued

普通库房或实验室(沿海)	A	6.5	6.0	5.5	5.0	长期在大连、文昌及海上发射使用的地面电子设备
	B	6.0	5.0	4.5	4.0	
	C	4.0	4.0	3.5	3.5	
特殊库房或实验室(沿海)	A	10.0	9.0	8.0	7.0	长期在大连、文昌及海上发射使用且有特殊温湿度保证措施的地面电子设备
	B	8.5	8.0	7.0	6.5	
	C	5.5	5.0	4.5	4.5	

Table 8. Reference indicators for storage period of various ground electronic equipment (medium power-on frequency)
表 8. 各类地面电子设备贮存期参考指标(通电频率中等)

贮存场景	质量等级	贮存期(年)				主要适用对象
		简单	一般	常规	复杂	
特殊库房或实验室(内陆)	A	24.0	20.5	18.5	16.5	陆基液体、固体导弹型号长期在仓库和贮存库贮存及使用的地面电子设备
	B	20.0	17.0	15.0	13.5	
	C	12.0	10.0	9.0	8.0	
普通库房或实验室(内陆)	A	14.0	12.5	11.0	9.5	长期在北京、酒泉、太原、西昌发射场使用的地面电子设备
	B	12.0	10.0	9.0	8.0	
	C	7.0	6.0	5.5	4.5	
普通库房或实验室(沿海)	A	6.5	6.0	6.0	5.5	长期在大连、文昌及海上发射使用的地面电子设备
	B	6.0	6.0	5.5	5.0	
	C	4.5	4.5	4.0	4.0	
特殊库房或实验室(沿海)	A	10.0	9.5	8.5	7.5	长期在大连、文昌及海上发射使用且有特殊温湿度保证措施的地面电子设备
	B	8.5	8.0	7.0	7.0	
	C	6.0	6.0	4.5	4.5	

Table 9. The reference index of the storage period of ground electronic equipment (high power-on frequency)
表 9. 地面电子设备贮存期参考指标(通电频率高)

贮存场景	质量等级	贮存期(年)				主要适用对象
		简单	一般	常规	复杂	
特殊库房或实验室(内陆)	A	19.5	16.5	15.0	13.0	陆基液体、固体导弹型号长期在仓库和贮存库贮存及使用的地面电子设备
	B	16.0	14.0	12.5	11.0	
	C	9.5	8.0	7.5	6.5	
普通库房或实验室(内陆)	A	11.5	10.0	9.0	8.0	长期在北京、酒泉、太原、西昌发射场使用的地面电子设备
	B	9.5	8.0	7.5	6.5	
	C	5.5	5.0	4.5	4.0	
普通库房或实验室(沿海)	A	6.5	6.0	6.0	5.5	长期在大连、文昌及海上发射使用的地面电子设备
	B	6.0	6.0	5.5	5.0	
	C	4.5	4.5	4.0	4.0	
特殊库房或实验室(沿海)	A	10.5	9.5	8.5	7.5	长期在大连、文昌及海上发射使用且有特殊温湿度保证措施的地面电子设备
	B	8.5	8.0	7.0	7.0	
	C	6.0	6.0	4.5	4.5	

4. 使用寿命的确定

4.1. 使用寿命的理论确定方法

在无法得到实测指标和估计指标的情况下，重复使用地面电子设备的使用寿命可用累积通电时间来表征，其过程可视作产品在工作时由于温度升高造成的寿命损耗，因此可通过温度加速退化寿命模型来近似拟合。本标准推荐选用我院以往加速贮存试验中成熟模型——阿伦尼乌斯模型，具体如下：

$$AF = \frac{T_{LJ}}{T_{NG}} = \exp\left(\frac{Ea}{k}\right) \left[\frac{1}{t_{LJ}} - \frac{1}{t_{NG}} \right]$$

式中：

- AF ：加速因子；
- T_{LJ} ：累积通电时间；
- T_{NG} ：设备非工作贮存期；
- t_{NG} ：贮存温度；
- t_{LJ} ：工作温度；
- k ：波尔兹曼常数 = 8.617×10^{-5} eV/K；
- Ea ：损伤机理和材料的激活能。

4.2. 模型中的参数取值

累积通电时间的模型中的参数取值如下

a) 贮存温度

如果有明确贮存温度的，按照已明确的贮存温度取值。没有明确贮存温度的取 20 摄氏度。

b) 工作温度

如果有明确工作温度的，按照已明确的工作温度取值。没有明确工作温度的取 40 摄氏度。

c) 激活能

如果有明确激活能的，按照已明确的激活能取值。没有明确激活能的取 $0.8 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

4.3. 累计通电时间的参考指标

各类地面电子设备累积通电时间参考指标如下表 10。

Table 10. The reference index of cumulative power-on time of ground electronic equipment

表 10. 地面电子设备累积通电时间参考指标

场景	产品质量	累积通电时间(小时)			
		简单	一般	常规	复杂
特殊仓库或贮存库	A	36018.99736	31345.64644	27709.55145	24859.94723
	B	30015.83973	26121.37464	23091.29514	20716.624723
	C	18009.49868	15672.82322	13849.07652	12424.27441
普通库房或实验室(内陆)	A	21611.39842	18807.38786	16618.89182	14909.12929
	B	18009.49868	15672.82322	13849.07652	12424.27441
	C	10805.69921	9403.693931	8309.44591	7454.564644

Continued

普通库房或实验室(沿海)	A	8309.44591	7237.994723	6394.511873	5733.403694
	B	6918.83905	6029.762533	5323.060686	4775.93667
	C	4160.422164	3624.69657	3191.556728	2849.604222
特殊库房或实验室(沿海)	A	13507.12401	11751.76781	10383.95778	9323.905013
	B	11261.63588	11193.24538	8651.398417	7762.3219
	C	6759.261214	5870.184697	5186.279683	4661.952507

5. 理论应用

针对现有地面设备情况,选取长征五号部分地面电子设备产品进行数据对比,结果基本吻合,如表 11 所示。

Table 11. The actual storage period of a certain type of ground electronic equipment
表 11. 某型号地面电子设备实际贮存期

	动力测控解调设备	配电控制组合	基带	PXI
集成的电路总数量	292	21	111	202
晶体管数量	0	0	0	34
二极管数量	224	36	7	346
无源元器件数量	3664	437	0	2425
复杂度特征量	5932	620	784	4236
复杂度	一般	简单	简单	一般
元器件等级	C	B	A	B
通电频次	中等	中等	中等	中等
贮存及使用环境	普通库房或 实验室(沿海)	普通库房 或实验室(沿海)	特殊库房 或实验室(沿海)	特殊库房 或实验室(沿海)
查表贮存年份	4.5 年	6 年	10 年	8 年
实际贮存年份	7 年(1 次故障)	7 年(1 次故障)	7 年(2 次故障)	7 年(2 次故障)

6. 总结

本文介绍了一种运载火箭地面电子设备贮存期与使用寿命确定方法,分析了美国航天电子设备贮存期及使用寿命的研究现状,并重点介绍了重复使用地面电子设备贮存期及使用寿命模型,给出了可供参考的在不同使用条件、质量等级、使用频次、复杂程度的产品贮存期与使用寿命估计指标,最后通过长征五号部分产品进行了验证。

参考文献

- [1] 康锐,王自力,赵宇.航空装备可靠性系统工程技术规范体系的研究与建立[C].中国航空学会 2005 学术年会论文集. 2005: 262-269.
- [2] 施建荣.美军可靠性标准和规范的变革与沿革现状[C].中国电子学会可靠性分会第十四届学术年会. 2008: 101-157.

- [3] 龚庆祥. 航空装备可靠性维修性保障性验证技术发展综述[C]//北京航空航天大学可靠性工程研究所. 航空可靠性工程进展暨可靠性工程专业委员会第9届学术年会论文集. 2003: 371-377.
- [4] 曾天祥. 国外武器装备可靠性维修性保障性的发展[C]. 2001年中国航空学会可靠性工程学术年会论文集. 北京: 中国航空学会, 2001: 7-12.