

航空导弹贮存期寿命分析

王春晖¹, 李忠东², 张生鹏³

(1. 海军装备部飞机办公室, 北京 100071; 2. 海军驻沈阳地区航空军事代表室, 沈阳 110015;
3. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要:系统地阐述了航空导弹贮存期寿命分析的相关背景和基本概念。从导弹贮存过程中故障发生的原因分类出发, 区分了导弹贮存过程中涉及到的贮存寿命、免维修期、维修间隔期、使用寿命等概念。介绍了国内外导弹贮存期寿命分析相关研究领域的进展情况。最后, 对航空导弹贮存期寿命分析领域的发展方向及关键技术进行了展望。

关键词: 贮存期; 贮存寿命; 免维修期; 维修间隔期; 使用寿命

中图分类号: TJ410.31 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)04-0068-05

Storage Life Analysis of Aircraft Missile

WANG Chun-hui¹, LI Zhong-dong², ZHANG Sheng-peng³

(1. Aircraft Office of Navy Armaments Department, Beijing 100071, China; 2. Navy Aviation Military Representative Office in Shenyang Area, Shenyang 110015, China; 3. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The relevant background and basic concepts of aircraft missile storage life analysis was systematically introduced. The different concepts, such as storage life, maintenance free period, maintenance intervals, service life, were distinguished from the cause of storage failure. The related research progress on missile storage life analysis was introduced both at home and abroad. The direction and key technology of missile storage life analysis was prospected.

Key words: storage period; storage life; maintenance free time; maintenance interval; service life

在航空导弹全寿命周期内, 贮存时间是工作时间的百万倍^[1]。新型导弹一般要求贮存寿命指标为 8~10 a, 有的甚至要求 15 a。贮存期间导弹免维修, 只进行不开箱检测。确定导弹的贮存期寿命指标不仅是工业部门的一项重要任务, 也是军方最关心的问题。因此要使导弹长期贮存后能够从贮存状态

直接转入使用状态, 必须提高贮存寿命预测能力和设计水平。

1 国内外导弹贮存寿命研究概述

美、俄等军事发达国家在导弹技术处于领先

收稿日期: 2011-01-13

作者简介: 王春晖(1968—), 男, 湖北孝感人, 硕士, 工程师, 主要从事航空装备科研管理研究。

水平的同时非常重视贮存寿命的研究,应用了许多切实可行的先进技术,并将成功的经验纳入了标准。

在美国,导弹贮存可靠性在20世纪80年代初期才被重视并得以迅速发展,最终很好地解决了导弹贮存技术。美国伊利诺斯理工学院研究所按合同要求提出了技术报告^[2],其目的是建立一种方法来预测不工作周期对装备可靠性的定量影响,目前此报告在美国已被公认为不工作可靠性预计方面的权威性文献,且得到了广泛应用。美国陆军导弹司令部的报告^[3]提供了由美国陆军导弹司令部的非工作可靠性数据库总结得到的贮存可靠性数据,其中还包含了用计算机处理得到的一般部件的贮存可靠性数据的分析结果。美国陆军导弹司令部将导弹设备分为5类:电子及电器设备^[4],机电设备^[5],液压及起动设备^[6],军械设备^[7]和光及光电子设备^[8],并提供了这5类导弹设备真实及加速贮存试验的数据,同时给出了这些数据的分析结果以及相关建议。

俄罗斯在“加速贮存试验”和“加速运输试验”等技术的应用方面取得了卓著成效,是目前整机产品加速贮存寿命试验技术最成熟的国家。俄罗斯“火炬”设计局的自然环境实验室对8 000多发导弹及弹上设备的失效情况进行了统计分析,对影响导弹产品的贮存寿命薄弱环节进行了仔细识别,对其失效机理进行了判断,然后对薄弱环节进行了改进,并在实验室条件下进行了加速试验验证。在失效机理不变的基础上,总结出一套加速因子,开发出导弹系统及整弹加速贮存试验方法,可以通过6个月的实验室加速试验模拟导弹10 a的贮存寿命^[1]。

我国在贮存期寿命分析方面也开展了一系列工作,各类导弹从20世纪60年代开始进行现场贮存试验,获得了大量的贮存性能与贮存寿命的数据,为现役导弹的可靠使用及后续导弹设计积累了大量信息。工业和信息化部第五研究所借鉴了美国AD-A158843报告《非工作期对装备可靠性的影响》,确立了国产电子元器件的非工作失效率预计模型^[9]。刘松等^[10]在研究了美、俄等国家确定贮存寿命的经验的基础上,提出了确定导弹贮存寿命试验的基本思路;林震等^[11-12]提出系统级加速贮存寿命试验方法的3种研究思路。

2 导弹贮存期寿命及其分析方法

文中所述的贮存期寿命,包括免维修期、维修间隔期、贮存寿命(弹上薄弱环节的寿命)及使用寿命。它们之间的关系如图1所示^[1]:

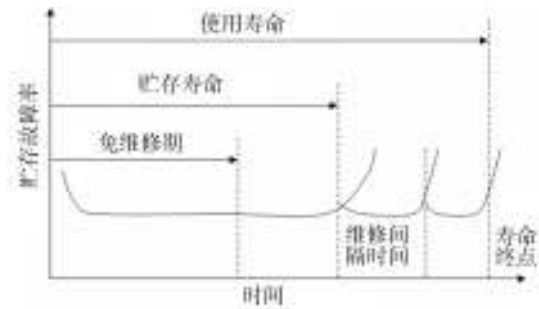


图1 导弹贮存期寿命曲线

Fig. 1 The storage life curve of missile

2.1 贮存可靠度与可靠寿命

贮存可靠度定义为“在规定的贮存条件下,在规定的贮存时间内,产品保持固定功能的概率”^[13]。

在偶然失效期内,可认为导弹的失效率为恒定值。导弹的贮存可靠性用贮存可靠寿命与贮存可靠度2个参数来表示。实际上,这2个参数是相互制约的,在规定的贮存期之内,导弹必须满足规定的贮存可靠度;如果导弹的贮存可靠度明显降低,说明其贮存寿命到期。导弹贮存期可靠寿命可由导弹贮存失效率求得^[14],按下式计算导弹的可靠寿命。

$$L_s = \frac{1}{\lambda_s} \ln \frac{1}{R_s}$$

其中: L_s 、 R_s 、 λ_s 分别为导弹的可靠寿命、规定临界可靠度及贮存失效率。

2.2 免维修期的确定

免维修期定义为“在既不需要任何维修也没有因系统故障或性能降级而对用户加以任何约束的情况下,导弹能够完成其所有预定任务的一段使用期限”。免维修期一般是指导弹的首次翻修期,即“在规定的条件下,产品从开始使用到首次翻修的贮存时间”^[13]。

据报道,过去美国空军要求每2 a对库存的导弹检测1次;后来,发现导弹的贮存可靠性并未在2 a内

发生变化。因此,要求将2次检测之间的间隔增加到3 a,后来又增加到5 a。检测结果表明,美国空军导弹的贮存可靠性已经达到了很高的水平。根据以上检测结果,认为导弹在服役期内的检测可以减少,导弹对维修的需求也可以减少,这对提到导弹的装备完好性及较低维修费用大有好处。特别值得注意的是:美国空军的试验结果表明频繁的检测对提高导弹的可靠性是没有必要的,并且会对导弹造成损伤^[1]。

从20世纪80年代初开始,美、俄等军事发达国家开始对一些导弹实施免维修方案,即导弹在长期贮存过程中不进行定期检测或只进行不开箱检测。美、俄针对这个问题采用了2种技术途径:美国采用了自然贮存试验,对大部分导弹长期不检测,同时用小批抽检的办法;俄罗斯通过加速贮存试验验证导弹可以在规定的贮存期内保持规定的贮存可靠性指标,而且这种试验结果经长期贮存的现场数据验证有效。

2.3 维修间隔期的确定

维修间隔期定义为“在规定的条件下,导弹2次相继翻修间的贮存时间”^[13]。检测周期越短,系统的可用度就越高。导弹检测的周期越长,相应投入的资源 and 成本也就越多,而且实际工作实施有时也会有一定的困难。另外据美国20世纪70年代的经验,导弹在贮存过程中发现的故障,大约有40%属于人为的故障,检测过程会产生人为的故障,检测维修过程也会加速导弹的腐蚀。过多的测试不但无益而且有害,因此应尽量减少检测,确定导弹的检测周期非常重要。

检测周期不仅与贮存时间、贮存环境条件、生产过程中对质量的控制、生产工艺有关,而且与技术构成、固有可靠度、部队对完好率的要求等因素紧密相关。文献[15]基于导弹的定期检测数据,通过对导弹贮存可靠性的变化机理进行了分析,建立了若干种导弹贮存可靠性预测模型。

2.4 贮存寿命分析

贮存寿命定义为“产品在规定条件下贮存时,仍能满足质量要求的时间长度”^[13]。此处的质量要求与具体工程有关,一般是指失效率在允许的范围内没有增大的趋势,即没有腐蚀和耗损。

在导弹长期贮存过程中,因腐蚀和气候原因,会发生一系列的“物理时效”变化、金属腐蚀和非金属材料老化。例如产品性能降低,包括由于老化造成的性能参数超差、绝缘电阻下降、电阻值增加、防潮能力降低、耐振能力降低;材料老化,包括材料变硬、变脆等;机械磨损,腐蚀等。凡有老化迹象的部件可确定为导弹的贮存寿命薄弱环节。导弹达到贮存寿命的标志是贮存寿命薄弱环节数量明显增加。因此,导弹的贮存寿命就转化为零部件或元器件的贮存寿命,选取贮存寿命最短的薄弱环节的寿命为导弹的贮存寿命。

贮存寿命分析的目的是确定导弹的贮存薄弱环节的寿命,可以通过加速寿命试验^[16-18]、加速退化试验^[19]等得到。在确定贮存寿命之后,将贮存寿命作为导弹延寿的起点,对贮存寿命薄弱环节采取相应的延寿措施。

2.5 使用寿命分析

在我国,维修性对大多数整机、整弹来说是一种必不可少的属性。通过维修,消除贮存寿命薄弱环节,使产品仍能满足规定的质量要求即为延寿。导弹的贮存寿命用于确定采取延寿措施时机的依据,贮存寿命薄弱环节用于确定应采取的延寿措施。

由以上分析可知,整机、整弹的贮存期寿命不会因为它们之中某部分的寿命到期而失效报废。由此提出了使用寿命的概念。使用寿命亦称为有用寿命,定义为“导弹从制造完成到其不可修复的失效,或不可接受的故障率时的寿命单位数”^[13]。在确定贮存寿命之后,将贮存寿命作为延寿的起点,对贮存寿命薄弱环节采取延寿措施。表1列出了美国几种导弹的使用寿命^[20]。

表1 美国几种导弹的使用寿命
Table 1 Service life of several missiles in USA

导弹名称	大力神II	民兵III	战斧	潘兴1A	陶氏	罗兰特	三叉戟I	三叉戟II	尾刺
使用寿命/a	24	30~35	15	20	20	17	10	20	20

由表1可知,美国战略导弹的使用寿命已经达到30 a,战术导弹的使用寿命也在10 a以上。表1给出的是导弹的使用寿命,事实上导弹很多部件的贮存寿命都小于导弹的使用寿命,由于按期更换了个别易损部件进行延寿,使得使用寿命长于贮存寿命。

导弹使用寿命分析有2种方法:系统效能分析法和费用效能分析法。对于前者,导弹的使用寿命定义为导弹从出厂之日起,到不能用于作战时止的日历时间;对于后者,将导弹的使用寿命定义为导弹的费用效能为最小时的使用期限,这种使用寿命称为最优使用寿命。文献[21]综合考虑了武器系统效能和全寿命周期费用,对影响导弹最佳使用寿命的因素进行了研究,建立了导弹最佳使用寿命决策模型。

3 导弹贮存期寿命之间的关系

导弹贮存期各种寿命都从不同侧面反映了导弹的贮存耐久性,但又各有侧重。正确区分导弹贮存期的几种寿命,需要深刻理解导弹“故障”的含义,几种贮存寿命的主要差别是故障种类的不同。根据故障发生的原因,贮存中发现的故障可能有工艺质量问题、设计质量问题,偶然故障和耗损故障。其中属于工艺质量问题和设计质量问题的,应采取纠正措

施来消除,例如在导弹研制过程中通过环境试验、综合环境可靠性试验及可靠性强化试验等充分暴露工艺质量问题及设计质量问题,并加以改进。对于无法通过采取纠正措施消除的上述2项质量问题可以归于偶然故障,由于腐蚀、老化等原因导致的失效称为耗损故障。

免维修期内,可以认为产品的故障主要是偶然故障,产品的故障率为恒定值。偶然故障的失效率决定了导弹免维修期的长度。使用可靠度分析确定满足一定可靠度要求的可靠寿命即为免维修期,对于电子产品,一般假设其寿命分布为指数分布,在耗损型失效之前,确定其免维修期与维修间隔期是一样的。贮存寿命分析主要考虑耗损型失效,凡找到产品耗损老化迹象者,即可确定为贮存寿命薄弱环节。产品到贮存寿命的标志是贮存寿命薄弱环节数量明显增加,可将薄弱环节的寿命作为导弹的贮存寿命,并作为确定采取延寿措施的依据。从技术上讲,可以认为确定导弹的使用寿命是确定贮存寿命的延续。导弹各种故障的水平,作战性能的先进程度及运行维修费用决定了导弹的使用寿命。

各种寿命分析的目的、关注的故障类型、试验分析方法及适用组装等级见表2。

表2 各种寿命分析方法比较

Table 2 Comparison among several life analysis

分析目的	关注故障类型	试验分析方法	适用组装等级
确定免维修期	偶然故障	可靠性验证试验	整机、设备级
确定维修间隔期	偶然故障	可靠性验证试验	整机、设备级
确定贮存寿命	耗损型故障失效	加速寿命试验,加速退化试验,现场统计试验效能分析	器件、组件级
确定使用寿命	偶然故障,耗损型故障	效能-费用分析	系统级

4 研究展望

1) 免维修方案研究。现代导弹要求在长期贮存过程中不进行定期检测,有效地控制了导弹的腐蚀,因而大幅度提高了导弹的战备完好性,可以更好地满足现代战争的需求。

2) 整机、系统级贮存寿命加速试验技术。目前,对于整机(设备)的加速贮存寿命试验情况很少

报导,在现有研究基础上需要借鉴国外先进经验,突破整机和系统加速贮存试验技术。

3) 导弹贮存延寿技术。导弹贮存延寿实际上是一种预防性维修,传统的方法已不能满足现代装备对高可靠性,低寿命周期费用的要求。需要进一步开展“以可靠性为中心的维修分析”以及预防性维修工作的逻辑决断法的研究。

参考文献:

[1] 黄瑞松. 飞航导弹储存可靠性分析[M]. 北京:中国航天科

- 工集团三院, 2003.
- [2] AD-A158843. Impact of Non-operating Periods on Equipment Reliability, F30602-83-C-0056[R]. IIT Research Institute, 1977.
- [3] AD-A122439. Storage Reliability Prediction Handbook for Parts Count Prediction, DAAH01-80-D-0020 [R]. USA, 1982.
- [4] AD-A122053. Storage Reliability Analysis Summary Report, DAAH01-80-D-0020 [R]. USA, 1982.
- [5] AD-A122440. Storage Reliability Analysis Summary Report, DAAH01-80-D-0020 [R]. USA, 1982.
- [6] AD-A122194. Storage Reliability Analysis Summary Report, DAAH01-80-D-0020 [R]. USA, 1982.
- [7] AD-A122054. Storage Reliability Analysis Summary Report, DAAH01-80-D-0020 [R]. USA, 1982.
- [8] AD-A122441. Storage Reliability Analysis Summary Report, DAAH01-80-D-0020 [R]. USA, 1982.
- [9] GJB/Z 108A—2006, 电子设备非工作状态可靠性预计手册[S].
- [10] 刘松, 温世经, 侯希久, 等. 如何确定导弹的贮存寿命[J]. 质量与可靠性, 1998(5): 15—18.
- [11] 林震, 李宪嫻, 姜同敏, 等. 整机产品加速贮存寿命试验研究思路探讨[J]. 航空标准化与质量, 2006(4): 38—41.
- [12] 李宪嫻. 可靠性或寿命加速试验与分析的新思路[C]//第一届国防科技工业可靠性技术交流会论文集. 2003: 540—546.
- [13] GJB 451—1990, 可靠性维修性术语[S].
- [14] 杨家铿. 电子元器件长期贮存可靠性分析[C]//第九届全国可靠性物理学术讨论会论文集. 2001: 65—73.
- [15] 史连艳, 张睿, 宋文渊. 导弹武器系统贮存期间检测周期的确定方法[J]. 战术导弹技术, 2004(3): 22—25.
- [16] NELSON W B. Accelerated life testing—step—stress models and data analysis[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980, 29(2): 103—108.
- [17] 张春华, 温熙森, 陈循. 加速寿命试验技术综述[J]. 兵工学报, 2004, 25(4): 485—490.
- [18] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验技术[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1—28.
- [19] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 加速退化试验技术综述[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 1002—1007.
- [20] 冯志刚, 方昌华, 李静. 国外导弹加速老化试验现状分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2008(2): 30—34.
- [21] 赵英俊, 刘铭, 刘毅静. 巡航导弹费用—效能分析综述[J]. 飞航导弹, 2001(4): 42—45.

(上接第 67 页)

展寿命的计算方法;

4) 确定有效的有限元预测模型。

参考文献:

- [1] GODET M. Third-bodies in Tribology WEAR[J]. Tribology International, 1990, 136: 29—45.
- [2] ZHOU Z R, VINCENT L. Cracking Induced by Fretting of Aluminium Alloys[J]. Journal of Tribology, 1997, 119: 36—42.
- [3] BEARD J. An Investigation into the Mechanisms of Fretting Fatigue[D]. University of Salford, 1982.
- [4] SACHIN R S. A Study of Fretting Fatigue Damage Transition to Cracking in 7075 Aluminum Alloy[D]. University of Utah, 2005.
- [5] 何明鉴. 机械构件的微动疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [6] 周仲荣, VINCENT L. 微动磨损[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] 陈跃良, 郁大照. 飞机结构腐蚀损伤加速因子研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2003, 18(5): 558—560.
- [8] SURESH S. Fatigue of Materials[M]. Second Edition. London: Cambridge University Press, 1998.
- [9] NEWMAN J C, RAJU I S. An Empirical Stress—Intensity Factor Equation for the Surface Crack[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1981, 15: 185—192.
- [10] CARLOS N. Propagation in Fretting Fatigue from a Surface Defect [J]. Tribology International, 2006, 128: 1149—1157.
- [11] GARY W, KIRKPATRICK B S. Civil Engineering, Fretting Fatigue Analysis and Palliative [D]. University of Missouri—Columbia, 1999.