

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.03.009

某型反舰导弹使用寿命主要影响因素分析

张福光, 崔旭涛, 洪亮

(海军航空工程学院科研部, 山东 烟台 264001)

摘要: 为了准确地修复反舰导弹中寿命较短的部件, 增加导弹的使用寿命, 对确定影响反舰导弹使用寿命的主要影响因素进行分析。根据导弹在不同服役环境下的寿命折算, 建立环境因子模型, 并使用寿命影响因素进行分析。分析结果表明: 导弹在温、湿、振动等综合环境应力影响下, 服役 5 a 后质量状态相对较差。该分析结果可为海军反舰导弹的备件采购和管理、延寿方案制订及新研反舰导弹论证、设计提供指导。

关键词: 反舰导弹; 寿命; 影响因素; 环境应力

中图分类号: TJ761⁺.4 **文献标志码:** A

Main Influence Factors Analysis of Some Anti-Ship Missile Usage Life

Zhang Fuguang, Cui Xutao, Hong Liang

(Dept. of Scientific & Research, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To repair the short-life components of anti-ship missile accurately and increase usage life of missile, the main influence factors affecting usage life of anti-ship missile are analyzed. According to missile life conversion under different service environment, environmental gene models are established, and influence factors of usage life are analyzed. Analysis results show that missile quality states are comparatively worse after five year's service under the influence of total environmental stress of temperature, humidity and libration. This analysis results can be used to provide instruction for naval anti-missile spare part stock and management, prolonging-life project drawing and new-researched anti-ship missile argumentation and design.

Key words: anti-ship missile; life; effect factor; environment stress

0 引言

现代高技术战争要求武器系统必须保证其战备完好性, 以充分发挥作战效能。而导弹武器系统的战备完好性是与其贮存、使用可靠性紧密相关的。目前导弹的使用寿命均由生产厂家提供, 而生产厂家在没有进行系统的理论研究和试验情况下, 仅考虑贮存环境和运输条件的严酷性和经济风险出发的高可靠性这 2 个因素, 预估的导弹寿命都比较短, 导致已达到生产厂家规定的服役年限的大部分反舰导弹实际仍可继续使用。

反舰导弹使用寿命取决于其部件寿命的短板, 故对于已经发生故障的导弹, 只要采取更换其寿命较短的部件或修复其缺陷等措施, 则导弹仍然能够服役。因此, 笔者以具有代表性的某型反舰弹作为研究对象, 通过开展有计划有系统的科学研究, 分析影响该型弹使用寿命的主要因素。

1 导弹服役环境分析

根据导弹贮存任务剖面, 导弹贮存主要有 3 种典型环境, 即: 在洞库或技术阵地的存储环境、进

行空间转移的运输环境与承担作战执勤的战备值班环境^[1-3]。

1.1 贮存环境

导弹的存储环境, 按其存储场所分为洞库贮存、地面库贮存和阵地待用贮存等。存储环境对导弹武器产生影响的因素主要有温度、湿度、霉菌、气压、腐蚀介质等, 其中以温度和湿度的影响最大。

1.2 运输环境

导弹运输环境可分为陆运(铁路、公路或阵地内)、空运和海运 3 种方式, 运输过程中对导弹产生的影响包括: 在运输和装卸过程中会遇到的颠簸振动, 以及在铁路和公路运输中的启动和急刹车的冲击, 装卸中可能遇到的跌落, 堆码操作中的叉车移动和其他包装件的碰撞等。运输过程中主要环境因素是振动、冲击, 一般而言, 陆运环境较海运、空运更为严峻, 而陆运中又以公路运输环境最为恶劣。

1.3 值班环境

战备值班环境是指导弹在战斗执勤状态下所处的环境, 包括导弹在陆上和舰载发射筒(箱)内、飞

收稿日期: 2011-10-19; 修回日期: 2011-12-08

作者简介: 张福光(1965—), 男, 山东人, 博士, 副教授, 从事可靠性工程研究。

机挂架上、以及在航空母舰舰上弹库、潜艇内弹架存储等环境。根据装载平台的不同，导弹所受的环境影响也不同，既有温度、湿度、气压等战备环境因素的影响，又有飞机起落过程中的过载冲击、温度冲击、压力速变以及舰艇摇摆振动等平台运载环境因素，还可能有电磁辐射、核辐射等战场环境因素的影响。

2 模型与方法研究

2.1 环境因子定义

在可靠性分析中，环境因子可以说是一种折算因子，环境因子的主要用途是利用它把一种环境下的寿命试验数据折算成另一种环境下的寿命试验数据。基于 Nelson 假设，给出了环境因子定义的一种形式：

定义 1: 若 $F_i(t)$ 、 $F_j(t)$ 分别表示产品在应力 S_i 和 S_j 作用下的累积失效概率，那么，可将应力 S_i 相当于应力 S_j 的环境因子定义为满足式 $F_i(t_i) = F_j(t_{ij})$ 的时间 t_{ij} 和 t_i 的比，即

$$K_{ij} = \frac{t_{ij}}{t_i} \tag{1}$$

环境因子还可以使用另一种定义形式：

定义 2: 在可靠度同为 R 时，在应力 S_i 和 S_j 水平下产品的可靠寿命分别为 $t_{R,i}$ 和 $t_{R,j}$ ，则应力 S_i 对应 S_j 的环境因子为：

$$K_{ij} = \frac{t_{R,j}}{t_{R,i}} \tag{2}$$

不难看出，这两种定义在本质上是等价的。但是由工程实践的应用可知，环境因子 K 应该与可靠度 R 无关，而是仅由应力 S_i 和 S_j 所决定的常数，否则， K 将不具有工程应用价值。

2.2 环境因子研究方法及模型

2.2.1 方法选择

研究环境因子的常用方法有基于统计推断方法和基于失效物理模型方法，统计推断的基本思路是利用产品的环境试验数据，通过统计分析和估计理论得到环境因子的点估计和区间估计。基于统计推断的环境因子研究方法研究得最早、最多，在理论上也最为成熟，但在实际应用中并不是很理想，具

有试验数据的利用率不高、需要大量试验数据作为支撑以及不具有环境因子预测的功能等缺点^[4-9]。

失效物理模型方法认为，产品失效是一系列物理、化学过程的最终结果，因此通过对这些物理、化学过程即失效机理进行分析，可建立关于各种环境应力，如温度、湿度、振动等，与产品失效即到寿之间关系的模型。可以说，运用失效物理技术与少量试验相结合的方法，是可靠性工程未来发展的趋势^[8]。

2.2.2 Arrhenius 反应论模型

反应论模型是失效物理模型之一，是研究产品的状态退化速度与所受环境应力的关系模型，当状态内部技术状态退化到一定程度时，即发生失效。反应论模型是从微观出发研究产品失效的可靠性物理模型，其描述的是内部失效机理，因此，基于反应论模型研究更具实际意义。

Arrhenius 模型是一个以温度应力为基础的反应速率论模型，因此该模型特别适合于研究温度应力对产品寿命特征的影响。Arrhenius 公式为：

$$\frac{\partial M}{\partial t} = V = Ae^{-E/kT} \tag{3}$$

其中： M 为产品某特性值或退化量； $\frac{\partial M}{\partial t} = V$ 表示在温度 T (热力学温度) 时的反应速率，反应速率是时间 t 的线性函数； A 为系数； E 为对应某种反应的激活能； k 为波尔兹曼常数。

若在不同的温度应力 T_1 和 T_2 下，在其他条件不变时，要产生相同的退化量，所需的时间分别为 t_1 和 t_2 ，定义环境因子为：

$$K = \frac{t_2}{t_1} = e^{\frac{E}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \tag{4}$$

2.2.3 温度应力下加速寿命方程

进行不同环境下的产品寿命折算时，关键是建立环境应力与寿命特征间的作用关系的加速寿命方程。反应论模型是解决这一问题的有效途径之一。当环境应力为温度时，一般认为寿命特征与应力之间的关系符合 Arrhenius 模型：

$$\psi = Ae^{E/kT} \tag{5}$$

将式 (5) 两边分别取对数，可得：

$$\ln \psi = a + b/T \tag{6}$$

其中: ψ 表示某种寿命特征; $a=lnA$, $b=E/K$, 所以特征寿命的对数是温度倒数的线性函数。

3 导弹服役故障数据统计分析

通过对该型弹 3 处贮存区域的调研, 笔者收集了共多个批次、上百枚导弹及其弹上设备(弹上设备包括弹体、动力系统和制导系统)的服役故障数据。下面结合导弹服役信息, 对调研数据的统计分析(其中, 从区域 1 到区域 3 的温度、湿度呈上升趋势)。

3.1 弹上设备故障率分析

根据 7 a 导弹服役中的故障数据, 给出弹上设备故障随贮存时间变化曲线如图 1 所示。

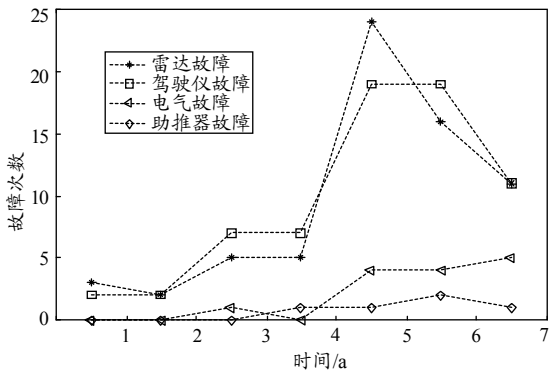


图 1 弹上设备故障随贮存时间变化曲线

由图 1 可知, 雷达和驾驶仪分别占 43.4%和 44.1%, 是导弹的关键分系统; 导弹弹上设备在导弹服役 5 a 左右时故障次数较多。

3.2 三地值班、贮存及总故障率分析

根据导弹服役中的故障数据, 给出 3 个贮存地区值班平均故障率、贮存平均故障率及总平均故障率的关系如图 2 所示。

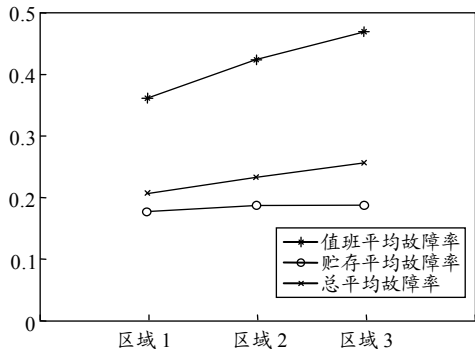


图 2 三地导弹值班、贮存及总平均故障率关系

由图 2 可知: 经计算, 按地域统计值班、贮存

故障率其比值为: 区域 1 为 2.0315:1、区域 2 为 2.263 2:1、区域 3 为 2.396 3:1, 导弹总平均值班与贮存故障率比值为: 2.2268:1。

4 使用寿命影响因素分析

根据以上对导弹故障数据统计分析, 导弹在 3 地贮存条件下的评价故障间隔时间与库房温度、湿度关系如图 3 所示。

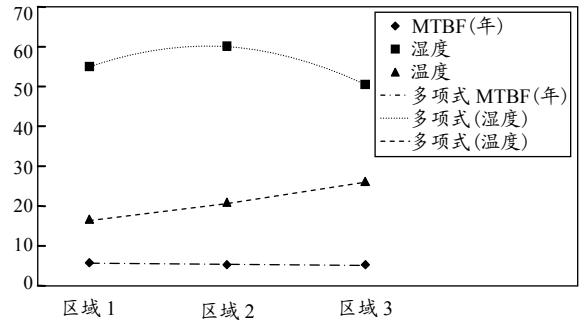


图 3 三地平均温、湿度与导弹 MTBF 关系图

由图 3 可以看出, 虽然三地温、湿度在满足“三七”线要求的范围内, 但故障率仍随地域由北至南逐渐增加。就三地贮存库房温、湿度条件看, 故障率随库房温度升高而增大。由于在发射筒(包装箱)小环境内对湿度的控制较好, 不同地区湿度差异不大, 因此湿度变化对导弹故障率影响不明显, 对与温度和湿度 2 种应力, 导弹状态受温度影响更大。

利用寿命特征与温度应力关系的 Arrhenius 模型, 根据数据统计结果建立温度应力与导弹寿命特征的关联模型。由式 (5)、(6) 分别可得:

$$\psi = Ae^{\frac{E}{K(T+273)}} \tag{7}$$

$$\ln \psi = a + b/(T + 273) \tag{8}$$

其中 ψ 为导弹平均寿命。根据三地的温度数据和导弹平均寿命数据, 利用最小二乘法, 可求得参数 a 、 b 分别为 -0.823 28 和 762.48。则在服役环境满足设计指标的前提下, 可得到导弹平均寿命与环境温度 T 的关联关系模型为:

$$\psi = 0.439 \times e^{732.48/(T+273)} \tag{9}$$

其中温度 T 单位为摄氏度。

利用导弹服役信息分别对 3 个地区年故障率的变化情况进行拟合, 得到导弹服役时间对导弹寿命影响曲线如图 4~6 所示。

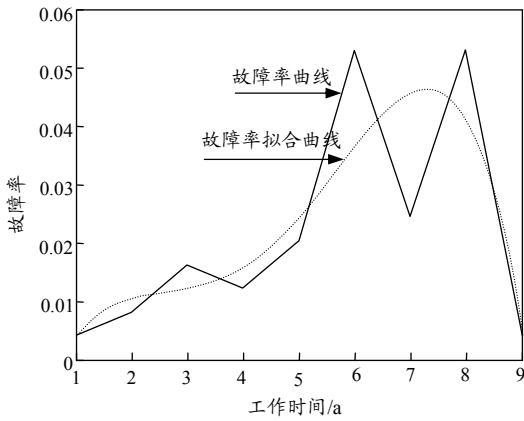


图 4 区域 1 故障率拟合

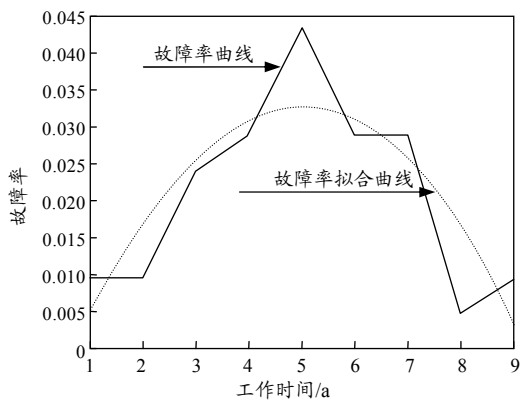


图 5 区域 2 故障率拟合

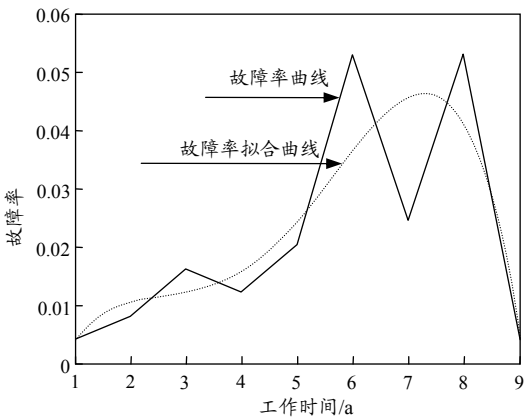


图 6 区域 3 故障率拟合

从图 4~6 可知, 导弹服役时间超过 5 a 后, 故障率明显升高, 3 个地区均有这一特点。这里分析

认为, 3 个地区的值班、运输等任务剖面内的振动、冲击等应力条件差异不大, 即导弹除受温度影响外, 还受振动、冲击等因素的影响, 由于未进行专项试验, 目前仅通过导弹服役过程中的相关数据进行分析, 无法对振动、冲击等应力下的导弹寿命影响进行量化。导弹在温、湿、振动等综合环境应力影响下, 服役 5 a 后质量状态相对较差。

5 结论

笔者利用失效物理模型方法及该型导弹服役信息, 建立了寿命特征与环境应力关系反映论模型, 定量地分析了影响反舰导弹主要影响因素。研究结果表明: 弹贮存故障率随贮存区域温度上升呈上升趋势; 湿度则无明显排序规律, 故温度是影响导弹技术状态的重要因素, 在服役环境满足设计指标的前提下, 温度越高, 导弹故障率越高。

参考文献:

- [1] 李久祥. 装备贮存延寿技术[M]. 北京: 宇航出版社, 2007, 4.
- [2] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003, 6.
- [3] 常少莉. 武器装备定延寿技术研究及其应用[J]. 战术导弹工程, 2007(6): 33-36.
- [4] Weimin Lv, Dong Hu, Jinsong Xie. Implementing Prognostics in Ship-borne Missiles as an Approach to Improve Their Maintenance and Logistic Efficiency [A]. IEEE-Prognostics & System Health Management Conference, Macau, 2010, 1.
- [5] Daniel J. Theunissen R. Owen Holbrook. Effects of Environment and Aging upon Missile Reliability [A]. Proceeding of Reliability and Maintainability Symposium [C]. 1998: 314-320.
- [6] 王炳兴. 环境因子的定义及其统计推断[J]. 强度与环境, 1998(4): 24-30.
- [7] 胡斌. 基于反应论模型的环境因子确定方法研究[D]. 四川: 中国工程物理研究院硕士论文, 2007.
- [8] 谢劲松. 失效模型的形式与实时故障诊断预测的基本方法和技术[A]. 第十一届全国可靠性物理学术讨论会论文集[C]. 浙江温州, 2005: 283-290.
- [9] 胡斌. 环境因子的定义及研究现状[J]. 信息与电子工程, 2003, 1(1): 88-93.