

# 基于导弹现场数据的可靠性评估

刘洪于, 方洋旺, 张平, 高翔

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038)

**摘要** 通过检测可以有效监控导弹的状态,但是无法预知导弹出现故障的时间。为评估导弹贮存可靠性,需要对检测数据进行合理使用。但是目前利用导弹现场检测数据不够充分,造成导弹“检测过剩”或者“检测不足”的问题。通过研究导弹部件检测类型,总结导弹部件贮存情形,提出了4种导弹现场检测数据采集方案并分析了4种方案的优缺点;导弹的故障可以归结于部件性能退化,使用基于伪寿命分布的退化数据的处理方法能够很好的评估导弹的可靠性。根据基于伪寿命分布的退化数据分析方法,以方案1的数据进行算例分析,验证了方案的正确性和可用性。

**关键词** 导弹;现场数据;数据采集;可靠性评估

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.04.009

**中图分类号** TJ760.6 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)04-0041-05

导弹在经过贮存、维修后,其可靠性一般会降低<sup>[1]</sup>。为使导弹保持较高的可靠性和战备完好性,部队在贮存使用过程中必须对导弹进行检测<sup>[2]</sup>。限于实际情况,一般采用定期检测的方法对导弹进行检测。

近些年人们提出利用性能退化数据来估计导弹可靠性与寿命的思想。Nelson等<sup>[3-5]</sup>提供了退化模型和相关推断方法的回顾,文献[6]假设退化量为正态分布进行可靠性预计;文献[7]给出性能退化量分布参数的极大似然估计方法;文献[8]采用退化轨迹函数预测产品性能退化;文献[9]采用线性模型来描述退化量分布参数和退化轨迹。

确定导弹寿命的最经济合理的方法就是进行小样本加速寿命试验,即采用加速应力进行导弹的寿命试验,缩短试验时间<sup>[10]</sup>。Nikulin等<sup>[11]</sup>分析了常用的加速试验模型和退化模型。虽然小样本加速寿命试验方法经济合理,但对于导弹来说并不是最佳方案,其最佳方案是根据导弹的实际贮存使用情况,利用导弹的现场检测数据建立退化模型进行现场寿命评定。

## 1 导弹分析

### 1.1 导弹部件检测类型

针对可靠性研究的现实需求,将弹上部件分为5大类<sup>[12]</sup>:①长期贮存对其影响不大,可靠性极高的部件;②平时定期检测,发现故障对其进行维修或更换的部件,平时一般不装在弹上,只在战时进行安装使用;③平时定期检测,发现故障进行维修但始终装在弹上的部件等;④性能参数有变化趋势的部件等;⑤贮存寿命较短且易于更换的,为满足贮存可靠度定期更换的部件等。

### 1.2 导弹部件贮存情形

针对导弹实际贮存、检测、维修、更换的情况,将上述5类导弹部件分为3种贮存情形:第1类为可靠性满足贮存要求不需要检测和维修更换的部件;第2类为不需要定期检测,只需要定期更换的部件,这个更换

\* 收稿日期:2012-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60874040)

作者简介:刘洪于(1985-),男,河北沧州人,硕士生,主要从事航空导弹总体设计与作战使用研究。

E-mail:652641135@qq.com

周期  $T$  是检测周期  $\tau$  的  $n$  倍,受实际可靠性高低和更换经费要求所决定,如果经费和可靠性条件允许,可以采取  $T=\tau$  的更换周期;第 3 类为定期检测发现故障进行维修无需更换的部件。

从上述分析可以看出,对于第 1 类可靠性极高的部件,可以无需检测;对于第 2 类部件,选择一个合适的更换周期  $T$  更换新部件,就能随时保持一个高的可靠度。实际上对导弹武器系统检测维修只要花时间对第 3 类部件进行仔细的检测和修复即可,这样不仅可以大大缩短每次的检测时间,缩短准备时间,还可以保持武器装备的高可靠性和可用性,实现有限资源重点利用。这就要求部队能够科学合理利用现场检测数据,对导弹寿命进行评定,并预测下一次检测时间,以避免出现导弹“检测过剩”或者“检测不足”。

## 2 数据采集

随着维修次数的增多,导弹的可靠性会不可避免的下降,而且下降趋势越来越明显,如图 1 所示。虽然每次检测、维修之后都会对检测情况进行记录,填写履历表,但是维修部门并不会根据检测、维修情况对导弹的检测时间间隔进行新的评估,使用单位仍然按照使用维护手册规定的定检时间进行检测,这就会造成“检测过剩”或者“检测不足”。

目前工程中常用的导弹寿命评定都是通过采用加速寿命试验方法,采集导弹的失效时间数据,进而对导弹可靠性进行评估,得到导弹寿命。但是该方法不能在基层使用,一是基层没有相关试验条件,二是基层无法承担试验费用。对此,只能利用现场检测数据来合理确定导弹寿命及检测时间,需要说明的是导弹现场检测数据虽然精度略有不足,但是利用该数据不需要考虑温度、湿度等环境因子的加速作用。综合而言,使用现场检测数据对导弹寿命进行评定的结果要优于工厂给出的寿命评定结果。基于伪寿命分布的退化数据可靠性评估算法思想是将产品性能退化量或与之相关的参数作为时间的函数(退化模型或退化轨迹),利用退化方程描述伪寿命值与应力水平的关系。因此,其数据采集方法不同于基于失效数据的数据采集方法。

### 2.1 建立检测数据库

对检测结果能够用数值精确表示的部件,将其检测结果用数值精确表示,根据标准值和合格范围,确定部件是否合格,并建立包含每一枚导弹的每一个检测部件的检测结果与标准值的差值的数据库  $A$ ,另外建立包含每一枚导弹的每一个检测部件连续 2 次检测之间的时间间隔的数据库  $B$ 。其中  $A$ 、 $B$  均为  $l \times m \times n$  维数组, $A_{ijk}$  表示第  $k$  ( $1 \leq k \leq n$ ) 枚导弹的第  $i$  ( $1 \leq i \leq l$ ) 个部件的第  $j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) 次检测的数值结果; $B_{ijk}$  表示第  $k$  ( $1 \leq k \leq n$ ) 枚导弹的第  $i$  ( $1 \leq i \leq l$ ) 个部件的第  $j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) 次检测与第  $j-1$  ( $1 \leq j \leq m$ ) 次检测的时间间隔。

为简单形象说明,假设有 4 枚导弹,从装备部队至今经历了 9 次检测,每次检测时间间隔不完全相同(以  $h$  为单位)。这里取某一部件来进行解释数据库的建立方法。该部件的检测标准值为 97.300(以  $V$  为单位),合格范围为  $[96,800,97,800]$ ,按照转换要求,建立数据库如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0.025 & 0.131 & 0.246 & 0.357 & 0.561 & 0.011 & 0.116 & 0.247 & 0.476 \\ 0.015 & 0.031 & 0.146 & 0.257 & 0.461 & 0.511 & 0.014 & 0.147 & 0.264 \\ 0.125 & 0.281 & 0.406 & 0.597 & 0.161 & 0.311 & 0.436 & 0.544 & 0.112 \\ 0.005 & 0.133 & 0.206 & 0.287 & 0.351 & 0.481 & 0.536 & 0.087 & 0.136 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 25 & 36 & 30 & 30 \\ 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 25 & 36 & 30 & 30 \\ 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 25 & 36 & 30 & 30 \\ 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 25 & 36 & 30 & 30 \end{bmatrix}$$

每次检测完成后,由操作人员将检测结果直接输入已建立的数据库,即将检测结果数组列扩展。

### 2.2 数据采集方案

根据基于伪寿命分布的退化数据分析算法思想,为合理选取样本,假设工厂维修效率很高,维修时间很

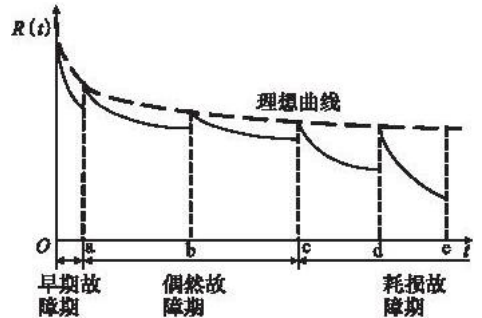


图 1 维修对可靠度的影响

Fig. 1 Effect of maintenance to reliability

短,定义“完整故障区间”为某部件前一次故障时刻到本次故障的时刻的时间区间(规定第0次检测为故障),将检测结果数据与检测间隔相关联,得到4种数据样本(4种方案):

- 1) 选取每一枚导弹的第*i*个部件最后一次“完整故障区间”为该枚导弹第*i*个部件的检测数据样本;
- 2) 选取每一枚导弹的第*i*个部件所有“完整故障区间”为该枚导弹第*i*个部件的检测数据样本;
- 3) 选取*n*枚导弹第*i*个部件的最后一次“完整故障区间”为第*i*个部件的检测数据样本;
- 4) 选取所有*n*枚导弹的第*i*个部件所有“完整故障区间”为第*i*个部件的检测数据样本。

根据已建立的数据库,以第3枚导弹第*i*个部件检测数据库为例,其最后一次“完整故障区间”为第4次检测到第8次检测时间区间,由于限定第3枚导弹为例,所以第2)、3)、4)种方案所得结果相同,则样本选取方案1)和方案2)、3)、4)的结果分别为:

(0.161,30), (0.311,55), (0.436,91), (0.544,121), 样本量  $N=4$ 。

(0.125,10), (0.28,25), (0.406,45), (0.597,70), (0.161,30), (0.311,55), (0.436,91), (0.544,121), 样本量  $N=8$ 。

### 3 数据统计分析

基于伪寿命分布的退化数据统计分析方法是在传统的失效数据分析之前增加了伪失效数据的确定不同的数据选取方案对应的具体数据处理方法不同,以方案1)为例,具体步骤包括:

#### 3.1 选择模型

假设共有4枚导弹进行了9次检测,对第*i*枚导弹的某一部件选择退化模型为:

$$y_{ij} = f(t_{ij}, \beta_i) + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

式中: $f(t_{ij}, \beta_i)$ 为第*i*枚导弹的某一部件在时刻 $t_{ij}$ 的退化真值; $\varepsilon_{ij}$ 为误差项。

考虑到导弹每次检测的时间间隔较大,通常认为 $\varepsilon_{ij}$ 之间的潜在自相关是可以被忽略的。因而可以利用检测数据 $(t_{i1}, y_{i1}), (t_{i2}, y_{i2}), \dots, (t_{im}, y_{im})$ ,采用极大似然法或者最小二乘法来估计模型中参数 $\beta_i = (\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{ki})$ 的值。

#### 3.2 外推数据

通过查阅相关资料可以获得导弹相关部件的检测参数的规定阈值 $Y$ ,利用寿命方程 $f(t, \beta_i) = Y$ 求解给定阈值时第*i*枚导弹的某一部件的寿命估计 $\hat{T}_i$ 。重复上述步骤求得所有导弹该类型部件的失效数据预报估计 $\hat{T} = (\hat{T}_1, \hat{T}_2, \dots, \hat{T}_n)$ 。

#### 3.3 统计推断

根据前面所得失效数据预报估计,利用基于失效数据的统计分析方法来推导导弹该类型部件的寿命分布类型,如指数分布、威布尔分布、正态分布等,进而求得该部件的可靠性相关指标。在此基础上分析导弹具体结构和各测量部件的相互关系,建立串联、并联、混联、旁联等模型来评估导弹全弹可靠性,得到导弹全弹可靠度。根据任务要求,需要保证整批次*n*枚导弹中有*k*枚保持战备完好,能够随时挂机使用。因此在该批次导弹进行可靠性评估时,将系统视为由*n*个相同成毁型单元(每枚导弹检测结果只有合格和故障2种,所有检测部件任何一个故障则认为导弹故障)组成,只有当*k*个以上(含*k*个)I级单元检测合格,系统可靠度才算符合要求,即将系统视为表决系统( $k/n(G)$ )。假设该批次导弹在历次检测中,共检测*N*枚次,*S*枚次检测合格,*F*枚次检测故障。则系统可靠度的极大似然估计为:

$$\hat{R}_s = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} \left(\frac{S}{N}\right)^i \left(\frac{F}{N}\right)^{n-i} \quad (2)$$

#### 3.4 预测修正

理论上利用方案1)求得第*i*枚导弹的某一部件参数达到阈值的时间,不如利用第*i*枚导弹的某一部件最后一次故障至今的数据所得的结果准确,但是考虑到某些导弹最后一次故障至今的数据可能很少,不足以完成数据推断,所以在进行下一次检测时间预测时要在考虑方案1)的基础上,使用导弹最后一次故障至今的数据所推断的结果对预测的时间进行修正,从而使预测结果更加合理准确。

### 4 算例分析

以方案1)所得数据为例进行仿真计算,结果见图2-4。图2为最后一次“完整故障区间”和最后一次故障至今的检测数据偏差随时间变化曲线。图3为最后一次“完整故障区间”数据最佳拟合曲线。图4为最后一次故障至今的检测数据的最佳拟合曲线。由图1可知,导弹1最后一次“完整故障区间”时间长度为100 h,而最后一次故障维修后已经121 h仍然检测合格,对于这种情况需要对预测结果进行修正,由原来的92.99 h修正为122.43 h。由图4可知,由于导弹2、3、4最后一次故障至今的检测数据不足,不能得到拟合结果,只能使用最后一次“完整故障区间”数据的预测结果。

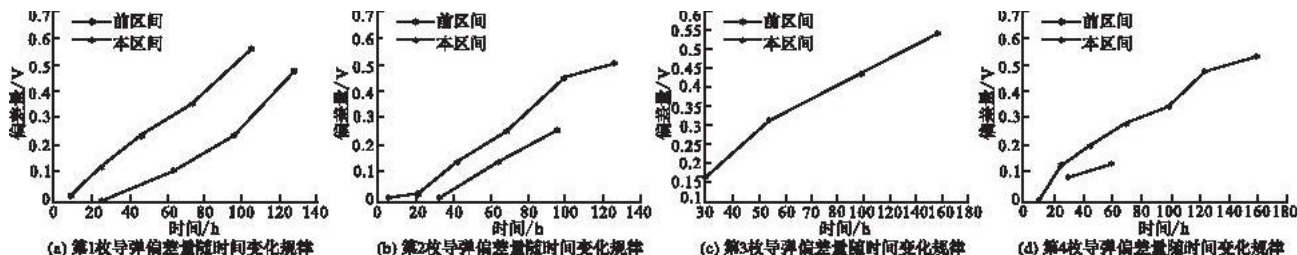


图2 偏差随时间变化曲线

Fig.2 Variation of deviation with time

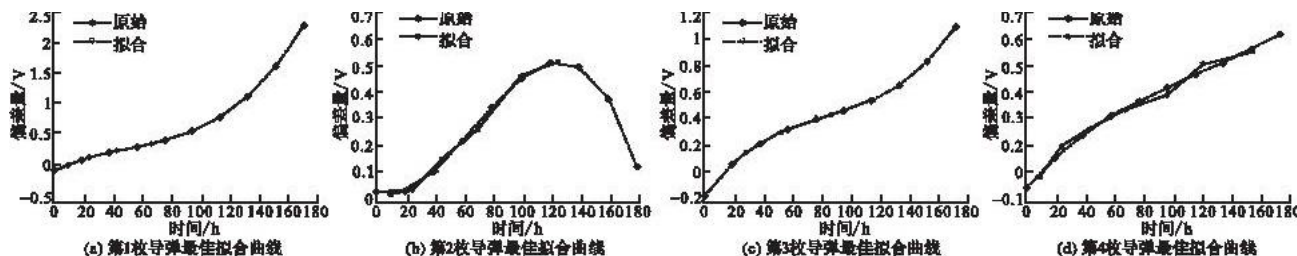


图3 最佳拟合曲线

Fig.3 Best stimulant curve

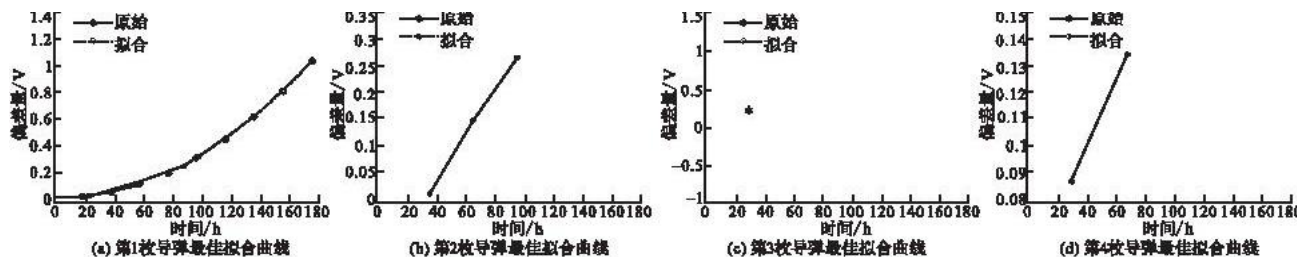


图4 最佳拟合曲线

Fig.4 Best stimulant curve

### 5 结束语

本文研究了导弹贮存类型,分析了基于伪寿命分布的退化数据统计分析方法,提出了4种导弹现场检测数据采集方案,基于方案1)给出可靠性计算的步骤,并通过算例对导弹的检测时间间隔进行合理预测,仿真结果表明所提算法的正确性。从而说明利用本文所提出的方案可以有效避免导弹“检测过剩”或者“检测不足”等问题的出现,有利于提高导弹在贮存期间的可用度,为实际导弹的贮存和维修策略提供了一种参考。

### 参考文献:

[1] 耿飞,刘雨时.一种基于维修策略的导弹贮存可靠性模型研究[J].装备制造技术,2009(10):44-45.  
GENG Fei, LIU Yushi. Research on one kind of missile storage reliability model based on strategy of servicing[J]. Equipment

- manufacturing technology,2009,10:44 - 45. (in Chinese)
- [2] 张金春,刘超. 定期检测对导弹武器系统贮存可靠性的影响分析[J]. 战术导弹技术,2008(1):44 - 48.  
ZHANG Jinchun, LIU Chao. Analysis of the influence of periodic check on reliability of missile weapon system[J]. Tactical missile technology,2008(1):44 - 48. (in Chinese)
- [3] Nelson W. Accelerated testing: Statistical methods, test plans and data analysis[M]. New York:John Wiley & sons inc, 1990.
- [4] Meeker W Q, Escobar L A. Statistical methods for reliability data[M]. New York:John Wiley & sons inc,1998.
- [5] Couallier V. Some recent results on joint degradation and failure time modeling[C]//Probability statistics and modeling in public health. New York; Springer, 2006: 73 - 89.
- [6] Jayaram J S R, Girish T. Reliability prediction through degradation data modeling using a quasi - likelihood approach[C] // Proceedings annual reliability & maintainability symposium. New York: IEEE press, 2005:193 - 199.
- [7] Huang W, Duane L. An alternative degradation reliability modeling approach maximum likelihood estimation[J]. IEEE transactions on reliability, 2005,54(2):310 - 317.
- [8] Wilson S P, Taylor D. Reliability assessment from fatigue microcrack data [J]. IEEE transactions on reliability, 1997,46(2):165 - 171.
- [9] 邓爱民,陈循,张春华. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报,2006,27(3):546 - 552.  
DENG Aimin, CHEN Xun, ZHANG Chunhua. Reliability assessment based on performance degradation data[J]. Journal of astronautics,2006,27(3):546 - 552. (in Chinese)
- [10] 陈海建,徐廷学,李波,等. 导弹加速寿命试验方法研究[J]. 装备环境工程,2010,7(5):115 - 118.  
CHEN Haijian, XU Tingxue, LI Bo, et al. Research on method of missile accelerated life test[J]. Equipment enviromental engineering, 2010,7(5):115 - 118. (in Chinese)
- [11] Nikulin M, Commenges D, Huber C. Probability, statistics and modeling in public health[M]. New York: Springer - Verlag, 2006.
- [12] 耿飞,刘雨时. 基于马尔科夫过程的导弹贮存可靠性模型的研究[J]. 山东大学学报:工学版,2010,40(1):33 - 36.  
GENG Fei, LIU Yushi. Research on a missile storage reliability model based on the Markov process[J]. Journal of Shandong university:engineering science edition,2010,40(1):33 - 36. (in Chinese)

(编辑:田新华)

## The Reliability Assessment Based On Missile Field Data

LIU Hong - yu, FANG Yang - wang, ZHANG Ping, GAO Xiang

(School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 70038, China)

**Abstract:** Missile is a kind of costly and long - stored equipment. The state of missile can be monitored effectively, but the broken - down time cant be forecasted. It is needed to use the test data logically for assessing the storage reliability. Now the missile field test data cant be fully used that cause the problem of superfluous or deficient test. By investigating the test and storage type of missile components, 4 kinds of missile field test data - acquisition projects are brought forward. The advantage and disadvantage of the projects are analyzed. The failure of missile can be ascribed to degraded capability. It is better to use the approach about degradation data analysis based on the pseudo life distribution to assess the reliability. According to the approach, an emulator in which the data of project 1 is used is given. The results validate the validity and practicability of the project.

**Key words:** missile; field data; data - acquisition; reliability assessment