

# 基于模糊理论的导弹贮存使用环境分析

刘洪于

(93514 部队, 河北 唐山 064200)

**摘要:** **目的** 编制导弹贮存使用环境谱, 聚类分析导弹贮存使用环境, 指导各地域导弹贮存及战备部署工作。**方法** 针对不同环境因素对导弹寿命的影响, 收集各地域温度、湿度等影响导弹可靠性的自然因素数据, 编制导弹贮存使用环境谱。采用模糊聚类分析, 将导弹贮存使用环境进行分类, 并基于一定阈值确定最佳分类。**结果** 收集南部某地域温度等影响导弹贮存使用可靠性的环境因素数据, 编制温-湿度环境谱, 发现该地域比较潮湿, 对导弹寿命影响较大。整理 10 个地域的腐蚀环境数据库, 采用最大树法将贮存环境分类, 确定最佳分类阈值为 0.9, 将贮存环境分为 7 类。**结论** 通过编制导弹贮存使用环境谱, 并对贮存使用环境进行聚类分析, 可以为各战区评估导弹寿命和调整导弹部署提供科学支撑。

**关键词:** 导弹; 贮存使用; 环境谱; 聚类分析

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.12.015

**中图分类号:** TJ760 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)12-0095-06

## Analysis of Missile Storage/Use Environment Based On Fuzzy Theory

LIU Hong-yu

(93514 Army, Tangshan 064200, China)

**ABSTRACT:** The work aims to compile the missile storage and use environment spectrum, analyze the missile storage and use environment by clustering, and guide the missile storage and combat readiness deployment in all regions. In view of the influence of different environmental factors on the life of missile, the data of natural factors such as temperature and humidity in different regions which affected the reliability of missile were collected to compile the storage and use environment spectrum of missile. The storage and use environment of missile was classified by fuzzy cluster analysis, and the best classification was determined based on a certain threshold value. The data of temperature and other environmental factors affecting the reliability of missile storage and use in a certain region in the south of China were collected to compile the temperature humidity environmental spectrum. It was found that the region was relatively humid, which had a great impact on the missile life. The database of corrosion environment in 10 regions was sorted out, the storage environment was classified by the maximum tree method, and the optimal classification threshold was determined to be 0.9. The storage environment was divided into 7 categories. The compilation of missile storage and use environment spectrum and the cluster analysis on storage and use environment can provide scientific support for the evaluation of missile life and adjustment of missile deployment in each theater.

**KEY WORDS:** missile; storage and use; environmental spectrum; cluster analysis

收稿日期: 2020-02-28; 修订日期: 2020-03-18

Received: 2020-02-28; Revised: 2020-03-18

作者简介: 刘洪于(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航空导弹总体设计与作战使用。

**Biography:** LIU Hong-yu (1985—), Male, Master, Engineer, Research focus: overall design and operational use of air missile.

导弹武器系统复杂, 造价昂贵, 具有“长期贮存、一次使用”的特点, 现代战争要求其拥有高可靠性, 以便随时应对打击需求<sup>[1~3]</sup>。在导弹寿命周期内, 主要战备方式是贮存, 因而其贮存可靠性和工作可靠性同样重要<sup>[4~5]</sup>。导弹可靠性指标是基于几种典型环境条件下加速寿命试验和经验给出的概率值, 但是受贮存使用环境影响, 在经过贮存、维修后会下降, 影响导弹贮存使用寿命<sup>[6]</sup>。美国先后对民兵、三叉戟等导弹进行了延寿研究<sup>[7~9]</sup>, 俄罗斯也具有较为成熟的导弹装备延寿试验技术<sup>[10]</sup>, 但是我国在该领域还处于起步阶段。文献[11]指出, 美国民兵Ⅱ导弹服役超过25年, 民兵Ⅲ导弹计划服役50年, 远超我国导弹服役时间。文献[12]指出, 从西藏近几年演习、打靶情况来估算, 部分弹药贮存50年仍能可靠使用, 但高原某军械仓库历年报废的弹药的贮存期只有约30年的时间。为保障导弹高可靠性, 我军目前对同一型弹药在不同地域环境的贮存使用寿命普遍采用统一标准, 即试验条件下的设计寿命。很多导弹在到达规定寿命后, 检测依然合格, 性能依然稳定, 但是仍要按照规

定进行报废处理, 造成了极大的浪费。那么应该如何确定不同地域环境的导弹寿命, 各部队应该如何划分驻地环境条件, 对此, 提出建立导弹服役环境的腐蚀环境数据库, 研究某一个地域一定时间内的各种环境因素强度, 编制相应的贮存使用环境谱, 以研究导弹腐蚀变化规律, 指导加速寿命试验和导弹战备部署。在此基础上, 采用模糊聚类法将全军驻地环境进行分类, 结合加速寿命试验结果, 为各地域导弹贮存及部署提供更加科学的依据。

## 1 编制贮存环境谱

环境是影响导弹装备质量状态、可靠性的重要因素, 导弹在自然环境中所经历的环境谱是造成其环境腐蚀损伤的主要原因<sup>[13~14]</sup>。环境谱通常指导弹在特定服役环境中, 一定时间内, 温度、湿度、太阳辐射、污染介质等自然环境因素的强度、持续性、发生频次及其组合<sup>[15]</sup>, 如温度-湿度谱、日照辐射谱及污染介质谱等, 其编制具体流程如图1所示。

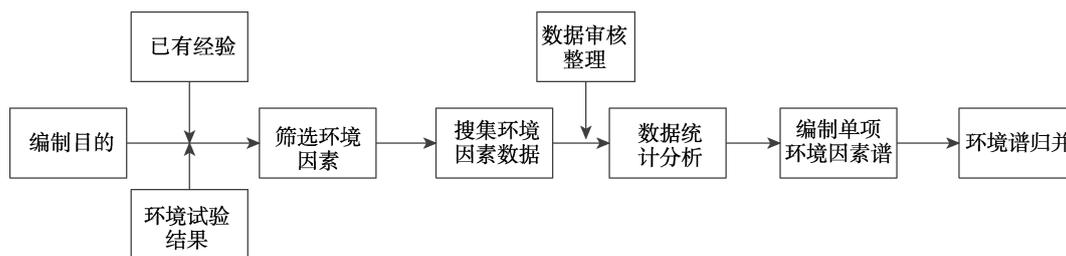


图1 环境谱编制流程

Fig.1 Environment spectrum compilation process

以温度-湿度谱为例, 需明确温度、湿度为环境因素, 根据统计数据确定温湿度区间和间隔。比如, 查阅历史资料, 自20世纪50年代以来, 某地最低温度为 $-44.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、最低相对湿度为3.1%, 最高温度为 $35.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、最高相对湿度为89.4%, 所以选择温度和湿度区间时可以分别定为 $[-45, 36]$ 和 $[0, 90]$ , 以 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或者 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一个温度间隔, 以5%或者10%为一个湿度间隔。在此基础上, 以小时为时间单位, 交互统计一定时期内温度-湿度区间的作用时间, 得到该地的温度-湿度谱。在编制出单因素谱的基础上, 分析各因素的关联性, 编制该地区的自然环境谱或者贮存环境谱。

## 2 环境聚类分析

通过分析贮存环境谱, 发现西部地区低温、干燥、多沙尘, 东南沿海地区高温、高湿、高盐雾, 各地域的环境因素对导弹贮存有利也有害。在人们的思维中, 利和害是一对模糊概念, 没有确切的分界线。因为许多模棱两可情形的存在, 使模糊集合比经典集合

能更客观地反映实际情况。1965年Zadeh提出模糊集, 为模糊集合理论奠定基础, 是经典集合论的一种推广<sup>[16~17]</sup>。1969年Ruspini引入模糊划分的概念进行模糊聚类分析, 我国学者对模糊聚类分析进行了深入研究, 已经广泛应用于各专业领域<sup>[18]</sup>。分析全军各驻地环境对导弹贮存的利弊, 就需要采用模糊聚类分析, 即依据模糊等价关系, 按照一定要求和规律对事物进行分类<sup>[19]</sup>。基于一定的分类阈值, 将贮存环境分为 $n$ 类, 通过组织寿命试验评定每类环境下的导弹贮存寿命, 可估算全国各地域环境条件下的导弹贮存寿命和加速因子, 为导弹战备部署提供依据。

### 2.1 标定

以省为行政单位, 将全国分为34个地域, 则论域为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{34}\}$ 。以对装备腐蚀影响较大的温度、湿度、沙尘、霉菌、盐雾、氧气等6个因素作为特征, 以各特征对该地区导弹老化的作用(贡献值)作为标定数据, 建立导弹贮存使用腐蚀环境数据库 $X = (x_{ij})_{34 \times 6}$ 。

在确定各特征老化作用时, 可以采用德尔菲法<sup>[20]</sup>,

即由  $m$  个专家在互不影响的前提下，给出某地域贮存条件下各个因素的贡献值  $x_{ijk}$ ，即第  $k$  个专家认为第  $j$  个因素对第  $i$  个区域的导弹老化的作用比例。为得出各个因素的贡献值  $x_{ij}$ ，可以对  $m$  个专家的打分结果采用如下处理方法：

$$x_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{ijk} \quad (1)$$

$$x_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m a_k x_{ijk}, \sum_{k=1}^m a_k = 1 \quad (2)$$

$$x_{ij} = \max \{x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijm}\} \quad (3)$$

$$x_{ij} = \min \{x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijm}\} \quad (4)$$

式(1)、(2)、(3)、(4)分别为平均值法、加权平均值法、最大值法和最小值法，其中  $a_k$  为第  $k$  个专家的权重，表示该专家打分的可信度。

针对德尔菲法存在较大的主观性，提出另外一种方法，即利用加速因子对各特征老化作用进行标定。加速寿命试验由美国罗姆航展中心提出，目前在国内外工程中已经大量应用，加速因子是加速寿命试验的一个重要参数<sup>[21-22]</sup>。分别对 6 个因素在  $n$  种应力等级下进行恒加速寿命试验，得到加速因子矩阵  $AF=(AF_{jk})_{6 \times n}$ ，则各因素的加速因子  $AF_j$  为：

$$AF_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n AF_{jk} \quad (5)$$

该方法所需条件比较苛刻，需要专业人员以及设备进行加速寿命实验，但是可以排除主观干扰。建议由导弹试验部门结合定型时进行的加速寿命试验结果，制作各种环境因素在不同应力等级下的加速因子表。基层部队只要对照驻地温度、湿度等环境条件，查阅加速因子表即可得到各特征在该地域的贡献值  $x_{ij}$ 。以温度因素为例，可以将全国近 50 年温度的极值作为温度区间的上下限，然后以 5℃ 为间隔，分别给出各个温度值对应的加速因子，进而建立加速因子表。如果条件允许，甚至可以将间隔定为 1℃ 或者更小。

## 2.2 建立模糊矩阵

令  $r_{ij}$  表示待分类对象  $x_i$  与  $x_j$  之间的相似程度，可以采用下列两种方法求得，从而建立模糊相似矩阵  $R=(r_{ij})_{34 \times 34}$ 。

$$r_{ij} = 1 - c \sum_{k=1}^6 |x_{ik} - x_{jk}| \quad (6)$$

式中： $c$  为适当常数，使得  $r_{ij} \in [0,1]$ ，并在  $[0,1]$  中分散开。

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ \frac{1}{M} \sum_{k=1}^6 x_{ik} x_{jk} & i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{式中：} M = \max_{i \neq j} \left\{ \sum_{k=1}^6 x_{ik} x_{jk} \right\}。$$

式(6)、(7)分别为绝对值减数法和数量积法。如果出现  $r_{ij}$  出现负值，则可调整如下：

$$r'_{ij} = \frac{r_{ij} + 1}{2} \quad (8)$$

## 2.3 聚类

相似矩阵属于高阶矩阵，为使得计算尽量简便，采用吴望名教授提出的最大树法<sup>[23]</sup>进行聚类分析，步骤如下：

1) 以被分类元素为结点，以相似矩阵  $R$  的元素  $r_{ij}$  为权重，画出一棵最大树。

2) 取定  $\lambda \in [0,1]$ ，去掉权重低于  $\lambda$  的枝，得到一个不连通图，则各连通分支构成一种在  $\lambda$  水平上的分类。

## 2.4 最佳分类

利用上述方法进行模糊聚类，形成一种动态聚类，它能表述分类的全面情况，但是不能确定哪种分类是最佳分类，对此需要引入  $F$  统计量来选取最佳分类阈值  $\lambda$ 。

设  $r$  为对应于  $\lambda$  值的类数， $n_i$  为第  $i$  类元素的个数，记  $\bar{x}_{ik}$  为第  $i$  类元素的第  $k$  个特征的平均值：

$$\bar{x}_{ik} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{jk}, \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (9)$$

记  $\bar{x}_k$  为全体样品第  $k$  个特征的平均值：

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jk}, \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (10)$$

设  $P$  为分类的方案总数，显然  $P \leq n$ 。考虑到实际应用中所有样本各自成类或者全部并成一类没有多少实际的意义，因而只需要考虑  $P - 2$  个方案。引入  $F$  统计量：

$$F = \frac{\sum_{i=1}^r n_i \sum_{k=1}^6 (\bar{x}_{ik} - \bar{x}_k)^2 / (r-1)}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^6 (x_{ik} - \bar{x}_{jk})^2 / (n-r)} \sim F(r-1, n-r) \quad (11)$$

式(11)的分子表征类与类间的距离，分母表征类内元素间距离，因此  $F$  值越大，说明分类越合理。对于给定的置信度  $\alpha$ ，查  $F$  临界值表可得  $F_\alpha$ ，然后将计算所得各  $F$  值与  $F_\alpha$  作比较。如果  $F > F_\alpha$ ，说明分类合理。在所有的合理分类中，取差值  $F - F_\alpha$  最大者的  $F$  所对应的  $\lambda$  值作为最佳  $\lambda$  值，其所对应的分类即为最佳分类。

## 3 算例仿真

### 3.1 贮存环境谱编制

查阅相关文献资料，我国南部某地域连续四年内

6种环境因素月平均统计数据见表1。以1h为时间单位,温度间隔为10℃,相对湿度分为[0,60]、(60,75)、(75,90)和(90,100)等四个区间,统计分析该地域1年的温度和湿度数据,得到温度-湿度谱,见表2。由表2可知,该地域空气比较潮湿,严重影响导弹贮存寿命。

### 3.2 环境聚类分析

查找收集相关资料,以温度、湿度、沙尘、霉菌、盐雾、氧气等6个对导弹贮存寿命影响较大的因素为主要环境因子,以其对导弹贮存寿命的作用为特征,采用德尔菲法对10个地域进行标定,结果见表3。

表1 某地域环境因素月平均统计数据

Tab.1 Monthly average statistical data of environmental factors in a certain region

月份	环境因素					
	温度/℃	相对湿度/%	日照时数/h	降水量/mm	降水时数/h	雨水 pH 值
1	5.1	54	31.5	26.6	46.5	4.85
2	9.3	61	79.7	22.7	29.4	5.01
3	11.3	70	126.4	37.0	37.3	5.12
4	14.5	73	111.3	61.6	55.9	5.45
5	20.5	77	141.4	67.3	41.8	6.12
6	25.5	81	113.0	220.0	92.2	6.29
7	29.2	85	192.1	161.3	35.8	6.57
8	32.2	83	211.9	103.5	34.4	6.71
9	27.6	78	137.6	108.5	46.9	6.42
10	20.1	75	85.4	119.4	111.3	5.73
11	14.7	68	74.4	45.8	44.0	5.38
12	8.4	71	34.2	22.0	37.3	5.27

表2 某地域温度-湿度谱

Tab.2 Temperature-humidity spectrum of a region

相对湿度/%	作用时间/h						合计
	<0℃	0~10℃	10~20℃	20~30℃	30~40℃	>40℃	
0~60	32.5	85.0	451.2	740.3	745.8	28.1	2082.9
60~75	42.6	467.7	864.6	875.2	21	0	2271.1
75~90	45.3	572.9	1359.6	1125.7	6.1	0	3109.6
90~100	0	164.5	495.8	590.4	85.0	0	1381.7
合计	120.4	1291.1	3171.2	3331.6	917.9	28.1	8760.0

表3 十个地域的标定结果

Tab.3 Calibration results of ten regions

地域	元素					
	温度	湿度	沙尘	霉菌	盐雾	氧气
1	0.4352	0.2319	0.0952	0.0450	0.0650	0.1277
2	0.3658	0.2569	0.0360	0.0640	0.0845	0.1927
3	0.4211	0.2125	0.1056	0.0728	0.0327	0.1553
4	0.3324	0.2516	0.0929	0.0507	0.0890	0.1834
5	0.3936	0.2604	0.1167	0.0734	0.0788	0.0772
6	0.1234	0.2891	0.1125	0.1541	0.1423	0.1786
7	0.3012	0.3716	0.1947	0.0435	0.0403	0.0487
8	0.3834	0.2996	0.1132	0.0621	0.0338	0.1080
9	0.2514	0.4125	0.1059	0.0124	0.0794	0.1384
10	0.4657	0.2134	0.0812	0.0673	0.0428	0.1297

采用绝对值减数法建立模糊相似矩阵，取  $c=0.8$ ，得模糊相似矩阵  $R$ ：

$$R = \begin{pmatrix} 0.4352 & 0.2319 & 0.0952 & 0.0450 & 0.0650 & 0.1277 \\ 0.3658 & 0.2569 & 0.0360 & 0.0640 & 0.0845 & 0.1927 \\ 0.4211 & 0.2125 & 0.1056 & 0.0728 & 0.0327 & 0.1553 \\ 0.3324 & 0.2516 & 0.0929 & 0.0507 & 0.0890 & 0.1834 \\ 0.3936 & 0.2604 & 0.1167 & 0.0734 & 0.0788 & 0.0772 \\ 0.1234 & 0.2891 & 0.1125 & 0.1541 & 0.1423 & 0.1786 \\ 0.3012 & 0.3716 & 0.1947 & 0.0435 & 0.0403 & 0.0487 \\ 0.3834 & 0.2996 & 0.1132 & 0.0621 & 0.0338 & 0.1080 \\ 0.2514 & 0.4125 & 0.1059 & 0.0124 & 0.0794 & 0.1384 \\ 0.4657 & 0.2134 & 0.0812 & 0.0673 & 0.0428 & 0.1297 \end{pmatrix} \quad (12)$$

由最大树法得到最大树如图 2 所示。

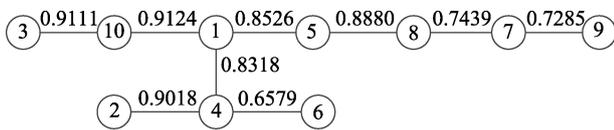


图 2 最大树  
Fig.2 Maximum tree

取  $\lambda = 1$ ，砍断权重低于 1 的枝，得 10 类：{1}、{2}、{3}、{4}、{5}、{6}、{7}、{8}、{9}、{10}；取  $\lambda = 0.9$ ，砍断权重低于 0.9 的枝，得 7 类：{1,3,10}、{2,4}、{5}、{6}、{7}、{8}、{9}；取  $\lambda = 0.8$ ，砍断权重低于 0.8 的枝，得 4 类：{1,2,3,4,5,8,10}、{6}、{7}、{9}；取  $\lambda = 0.7$ ，砍断权重低于 0.7 的枝，得 2 类：{1,2,3,4,5,7,8,9,10}、{6}；取  $\lambda = 0.6$ ，砍断权重低于 0.6 的枝，归为 1 类：{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}。

取  $\alpha = 0.025$ ，计算  $\lambda$  取 0.9、0.8 和 0.7 的时候对应的  $F$  统计量，见表 4。

表 4 聚类方案比较  
Tab.4 Comparison of clustering schemes

分类数 $r$	7	4	2
分类阈值 $\lambda$	0.9	0.8	0.7
统计量 $F$	17.0010	1.0872	1.6111
临界值 $F_\alpha$	14.73	6.60	7.57

观察比较，当且仅当  $\lambda = 0.9$  时， $F > F_\alpha$ ，则最佳分类阈值  $\lambda$  为 0.9，最佳分类为 7 类，分别是 {1,3,10}、{2,4}、{5}、{6}、{7}、{8}、{9}。

根据表 3 标定结果，比较各因素对导弹寿命的作用，地域 5 的各因素对导弹寿命作用处于中等水平，地域 1、3、10 的各因素对导弹寿命作用相近，且温度因素作用平均比地域 5 约超 13%；地域 2、4 的各因素对导弹寿命作用相近，且氧气因素作用平均比地域 5 约超 170%；地域 6 的霉菌和盐雾因素对导弹寿命作用比地域 5 分别约超 120%、100%；地域 7 的沙

尘因素对导弹寿命作用比地域 5 约超 70%；地域 8 的盐雾因素对导弹寿命作用很小，约是地域 5 的二分之一；地域 9 的霉菌因素对导弹寿命作用很小，约是地域 5 的七分之一。由分析可见，模糊聚类分析结果比较符合实际情况，可以将之应用于全国地域环境的划分。

#### 4 结语

主要介绍了导弹贮存使用环境谱的编制方法，基于环境因素对导弹贮存使用的影响进行模糊聚类分析，确定最佳贮存区域划分。导弹研制单位可以对全国各地域环境进行聚类分析，通过组织有限数量的针对性的加速寿命试验，确定同型导弹在不同类型地域环境的寿命，进而修改现有的导弹统一寿命标准，实现同型导弹在不同环境下贮存使用寿命差异化。在保障可靠度的基础上，从研发层面延长导弹服役时间，从而减少导弹武器装备及经费的浪费，为全军导弹储存和战备部署提供科学支撑。在算例仿真中，收集某地域的环境数据编写温度-湿度谱。采用德尔斐法对十个地域的环境因素作用进行标定，通过模糊聚类分析将十个地域环境分为 7 类。

#### 参考文献：

- [1] 单鑫, 董文洪, 曹阳. 导弹设备贮存可靠性灰色预计模型[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(1): 308-310.  
SHAN Xin, DONG Wen-hong, CAO Yang. Storage Reliability Grey Prediction Model for Missile Equipment[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(1): 308-310.
- [2] 张生鹏, 李宏民, 赵朋飞. 导弹装备贮存寿命加速试验技术体系探讨[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 92-96.  
ZHANG Sheng-peng, LI Hong-min, ZHAO Peng-fei. Accelerated Testing Technology System for Storage Life of Missile Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 92-96.
- [3] 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 Yu-shi. Research on a Missile Storage Reliability Model Based on the Markov Process[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(1): 33-36.
- [4] 于运治, 李建林, 龚红良. 导弹贮存的失效模式及失效机理[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(4): 27-29.  
YU Yun-zhi, LI Jian-lin, GONG Hong-liang. Failure Mode And Mechanism of Missile Storage[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2009, 30(4): 27-29.
- [5] 李正, 宋保维, 毛昭勇. 装备贮存可靠性研究工作探讨[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 376-378.  
LI Zheng, SONG Bao-wei, MAO Zhao-yong. Discussion on Storage Reliability of Material[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(1): 376-

- 378.
- [6] 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 Yu-shi. Research on One Kind of Missile Storage Reliability Model based on Strategy of Servicing[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(10): 44-45.
- [7] 张宗美. 民兵洲际弹道导弹[M]. 北京: 宇航出版社, 1985.  
ZHANG Zong-mei. Minuteman, the Intercontinental Ballistic Missile[M]. Beijing: The Aeronautics Press, 1985.
- [8] 张仕念, 何敬东, 颜诗源, 等. 导弹贮存延寿的技术途径及关键技术[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 37-41.  
ZHANG Shi-nian, HE Jing-dong, YAN Shi-yuan, et al. Basic Approaches and Key Techniques for Missile Storage Life Extension[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 37-41.
- [9] 王宜晓, 刘晓恩. 美国“民兵”3 和“三叉戟”2 导弹改进计划综述[J]. 中国航天, 2011(3): 35-37.  
WANG Yi-xiao, LIU Xiao-en. An Overview to the US Minuteman 3 and Trident 2 Missile Improvement Projects[J]. Aerospace China, 2011(3): 35-37.
- [10] 滕飞, 王浩伟, 滕克难. 面向导弹延寿的冲压发动机加速贮存试验方法[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 37-42.  
TENG Fei, WANG Hao-wei, TENG Ke-nan. Accelerated Storage Test Method of Ramjet for Life Extension of Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 37-42.
- [11] 张仕念, 孟涛, 张国彬, 等. 从民兵导弹看性能改进在导弹武器贮存延寿中的作用[J]. 导弹与航天运载技术, 2012, (1): 58-61.  
ZHANG Shi-nian, MENG Tao, ZHANG Guo-bin, et al. Effect of Performance Improvement in Guided Missile Weapon Storage Life Prolonging Indicated by Militiaman Missile[J]. Missiles and Space Vehicles, 2012, (1): 58-61.
- [12] 傅孝忠, 罗峰, 张志会, 等. 西藏高原弹药贮存可靠性浅析[J]. 物流工程与管理, 2010, 32(10): 113-115.  
FU Xiao-zhong, LUO Feng, ZHANG Zhi-hui, et al. Research on Ammunition Storage Reliability of the Tibetan Plateau[J]. Logistics Engineering and Management, 2010, 32(10): 113-115.
- [13] 赵建印, 王玺, 刘星. 海军导弹装备结构件腐蚀寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 51-54.  
ZHAO Jian-yin, WANG Xi, LIU Xing. Corrosion Life Prediction of Naval Missile Structure Parts[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(4): 51-54.
- [14] 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.
- [15] 舒畅, 苏艳, 吴龙益, 等. 自然环境谱编制方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 93-96.  
SHU Chang, SU Yan, WU Long-yi, et al. Research on Establishment Method of Natural Environmental Spectrum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 93-96.
- [16] 许力. 智能控制与智能系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
XU Li. Intelligent Control and Intelligent System[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.
- [17] 哈明虎. 不确定统计学理论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
HA Ming-hu. Theory of Uncertain Statistics[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [18] 何清. 模糊聚类分析理论与应用研究进展[J]. 模糊系统与数学, 1998, 12(2): 89-94.  
HE Qing. Research Progress In Theory And Application Of Fuzzy Cluster Analysis[J]. Fuzzy System and Mathematics, 1998, 12(2): 89-94.
- [19] 肖辞源. 工程模糊系统[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
XIAO Ci-yuan. Engineering Fuzzy System[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [20] 袁志彬, 任中保. 德尔菲法在技术预见中的应用与思考[J]. 科技管理研究, 2006, 26(10): 217-219.  
YUAN Zhi-bin, REN Zhong-bao. Application And Thinking Of Delphi Method In Technology Foresight[J]. Science And Technology Management Research, 2006, 26(10): 217-219.
- [21] YURKOWSKY W, SCHAFFER R E, FINKELSTEIN J M. Accelerated Testing Technology[R]. New York: Rome Air Development Center, 1967.
- [22] 王九兴, 付力力, 邢志伟, 等. 一种高可靠电子产品贮存寿命评估方法[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 26-29.  
WANG Jiu-xing, FU Li-li, XING Zhi-wei, et al. A Storage Life Assessment Method of Highly Reliable Electronic Product[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 26-29.
- [23] 李相镐, 李洪兴, 陈世权, 等. 模糊聚类分析及其应用[M]. 贵阳: 贵州科学技术出版社, 1994.  
LI Xiang-gao, LI Hong-xing, CHEN Shi-quan, al. Fuzzy Cluster Analysis and Its Application[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1994.