

同类异型产品环境因子的确定方法及应用

丁光雨^{1,2}, 陆山¹, 撒彦成²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072; 2. 67870部队, 陕西 华阴 714200)

摘要: 把同类异型产品在不同试验条件下的试验数据作为一个整体, 提出了同类异型产品环境因子的2种确定方法, 推导了极大似然估计和利用混合泊松分布模型的矩估计环境因子估计公式。通过数值仿真对所提方法进行了验证, 分析了环境因子估计方法的精度。最后, 将该方法应用于火炮火力系统的环境因子估算中, 结果合理。

关键词: 环境因子; 可靠性数据; 环境试验; 火炮火力系统

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.05.013

中图分类号: TG172.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)05-0061-04

Determination Method of Environmental Factors for Same Kind Products and Its Application

DING Guang-yu^{1,2}, LU Shan¹, SA Yan-cheng²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Unit 67870 of PLA, Huayin 714200, China)

Abstract: The experiment data of same kind products under different test environments were considered as an integrated whole. On the basis of this, two methods used for environmental factors determination were put forward, and the formulae to evaluate environmental factors were established on basis of the maximum likelihood estimation and the moment estimation of mixed Poisson random variables. The accuracy of environmental factors determined by the two methods was analyzed by numerical simulation. Finally, the methods established were applied to evaluate the environmental factors in cannon fire system, and reasonable results were obtained.

Key words: environmental factor; reliability data; environmental test; cannon fire system

环境因子是表征相同产品在不同环境中失效快慢程度的一个参数, 它反映了环境对产品可靠性影响的严酷等级。确定环境因子是可靠性工程与环境工程共同关心的边缘课题^[1]。

在武器装备的研制、定型以及验收试验过程中,

都会进行各种环境试验, 其目的是为了考核装备对环境适应性, 同时对装备进行可靠性评估。在环境试验条件下的故障数据如不加处理直接用于可靠性计算明显是不合理的, 但放弃环境试验条件下的故障数据会减少产品试验数据的样本量, 也是不可取

收稿日期: 2013-05-26

作者简介: 丁光雨(1983—), 男, 河南邓州人, 硕士, 工程师, 主要从事环境模拟实验工作。

的。由此需要把不同环境条件下的试验数据折算为一种基准环境条件下的试验数据来合理地扩大样本量,而解决这类问题的有效方法是使用环境因子。

环境因子的研究工作已开展了较长时间,一些文献提出了定型号产品不同寿命分布下环境因子确定的数学方法^[2-4]。到目前为止,国内尚未系统地给出同类产品在各种环境条件下的环境因子^[5],其中最主要的一个原因就是特定型号产品的试验样本量有限。多数环境因子的确定方法都依赖2种不同环境下产品的寿命分布参数,而整机的产品寿命分布参数并不易知,特别是特殊环境条件下,高额的试验费用导致试验时间很短,分布参数很难精确估计。特定型号产品的试验数据较少,很难确定出不同环境条件下准确的环境因子。由于环境因子的应用是以同类各型号产品具有相同环境因子为基础,因此可以在同类异型产品中来考查环境因子。将同类异型产品的试验数据作为一个整体来考查环境因子,可以将统计样本扩大很多倍。在武器装备的研制、定型以及验收试验过程中,同类型异型的武器装备经历的试验条件是相同或近似的。文中将同类异型武器装备的各种环境条件下的试验数据作为一个整体,讨论了不同试验环境条件下环境因子的确定方法。

1 同类产品环境因子的确定

1.1 指数分布下同类产品的环境因子

环境因子的3个基本假设。

1) 失效机理一致性假设。在不同的环境应力水平 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 下,产品的失效机理保持不变。该假设是进行环境因子相关问题研究的前提条件。只有在失效机理保持一致性的情况下才能进行不同应力水平下可靠性信息的等效折算与综合,环境因子的研究才具有意义。通常情况下,该假定可通过试验设计来保证。指数分布的分布函数为 $F(t)=1-e^{-\lambda t}$,环境因子 $\pi=\lambda_2/\lambda_1$,且自然满足失效机理不变的约束条件。

2) 分布同族性假设。在不同的环境应力水平 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 下,产品的寿命服从同一形式的分布。它表明不同环境应力水平下寿命数据的分布形式相

同,只是在分布参数上存在差异。

3) Nelson假设。产品的残存寿命仅依赖于已累积的失效和当前的环境应力,而与累积方式无关。它实际上是将累积失效概率作为环境对产品损伤作用的外在表现,认为即使在不同环境下,只要产品的累积失效概率相同,则产品中累积的损伤是相同的。

对于指数寿命型产品,环境因子是在统计意义上,表征产品在不同环境下失效快慢的一个参数。

数学模型:认为同类产品在对应的环境条件下具有相同的环境因子 π 。同类型的 n 种($n \geq 2$)武器装备在鉴定试验中,经历了 k 个($k \geq 2$)试验项目,每个试验项目的试验时间为 t_{ij} ,故障次数为 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k$)。将一般试验条件($j=1$)作为基准试验条件,求不同试验条件下的环境因子 π_j 。

n 种指数寿命型产品它们有各自的失效率,设其在基准试验条件下失效率为 λ_{i1} ,那么在第 j 个试验条件下,失效率为:

$$\lambda_{ij} = \lambda_{i1} \cdot \pi_j \quad (1)$$

当第 i 种产品在第 j 个试验条件下的工作时间为 t_{ij} 时,其当前阶段下的故障次数 x_{ij} 是强度为 $\lambda_{ij}t_{ij}$ 的泊松分布:

$$P(X_{ij} = r) = \frac{(\lambda_{i1} t_{ij} \pi_j)^r e^{-\lambda_{i1} t_{ij} \pi_j}}{r!} \quad (r=0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

1.2 环境因子的极大似然估计

样本 $(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})$ 是 n 种产品在第 j 个($j=1, 2, \dots, k$)环境条件下的故障次数观测值。其联合似然函数为:

$$L(\pi_j | \lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{in}) = \prod_{i=1}^n \frac{(\lambda_{i1} t_{ij} \pi_j)^{x_{ij}} e^{-\lambda_{i1} t_{ij} \pi_j}}{x_{ij}!} \quad (3)$$

$$\ln L(\pi_j | \lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{in}) = \sum_{i=1}^n x_{ij} \ln(\lambda_{i1} t_{ij}) + \sum_{i=1}^n x_{ij} \ln \pi_j - \sum_{i=1}^n \lambda_{i1} t_{ij} \pi_j - \sum_{i=1}^n \ln x_{ij}! \quad (4)$$

令其导数为0,求极值为:

$$\frac{\partial \ln L(\pi_j | \lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{in})}{\partial \pi_j} = \frac{1}{\pi_j} \sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{i=1}^n \lambda_{i1} t_{ij} = 0 \quad (5)$$

可解得:

$$\hat{\pi} = \sum_{i=1}^n x_{ij} / \sum_{i=1}^n \lambda_{il} t_{ij} \quad (6)$$

对于 $\lambda_{ij}(i=1,2,\cdots,n)$, 基准条件下试验时间较长, 采用其基准试验条件下试验数据的极大似然估计, 可按式(7)确定。

$$\hat{\lambda}_{il} = x_{il} / t_{il} \quad (7)$$

由式(6), (7)得环境因子的极大似然估计为:

$$\hat{\pi}_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} / \sum_{i=1}^n \frac{x_{il} t_{ij}}{t_{il}} \quad (8)$$

1.3 利用混合泊松分布模型的矩估计

假设随机变量 $x=(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 是来自 M 个泊松分布总体 $G_1, G_2, \cdots, G_M$, 且分别以比例 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_M$ 混合而成的分布 G , 于是 M 阶混合泊松分布模型的密度函数 $f(x|\lambda)$ 就可以表示为:

$$f(x|\lambda) = \alpha_1 f_1(x|\lambda_1) + \alpha_2 f_2(x|\lambda_2) + \cdots + \alpha_M f_M(x|\lambda_M) \quad (9)$$

$$\text{其中 } \sum_{i=1}^M \alpha_i = 1, 0 < \alpha_i < 1, i=1, 2, \cdots, M. f_i(x|\lambda_i)$$

和 λ_i 分别是相应总体 G_i 的密度函数和参数, 整个总体的参数 θ 由 α_i 和 λ_i 组成, 称之为随机变量 X 是服从混合泊松模型。

$$\text{性质: } \mu = E(X) = \sum_{i=1}^M \alpha_i \lambda_i \quad (10)$$

那么样本的一阶矩估计为:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^M \alpha_i \lambda_i \quad (11)$$

将第 j 种试验条件下的故障数据看作一组服从参数为: $(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n, \lambda_{1j} t_{1j}, \lambda_{2j} t_{2j}, \cdots, \lambda_{nj} t_{nj})$ 的阶数为 n 的混合泊松分布。

单个产品单独试验阶段下故障数据的个数为 1 (如果某个试验条件下是分段数据, 也可看作是 2 个数据, 但不推荐这样)。

$$\therefore \alpha_1 = \alpha_2 = \cdots = \alpha_n = \frac{1}{n} \quad (12)$$

由式(1), (11), (12)得:

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} t_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{il} t_{ij} \pi_j \quad (13)$$

$$\frac{\bar{X}_j}{\bar{X}_1} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{il} t_{ij} \pi_j}{\sum_{i=1}^n \lambda_{il} t_{il}} = \pi_j \quad (14)$$

可得环境因子的矩估计为:

$$\hat{\pi}_j = \frac{\bar{X}_j}{\bar{X}_1} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij} / \sum_{i=1}^n t_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{il} / \sum_{i=1}^n t_{il}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot \sum_{i=1}^n t_{il}}{\sum_{i=1}^n x_{il} \cdot \sum_{i=1}^n t_{ij}} \quad (15)$$

1.4 环境因子估计的仿真计算

用 Monte—Carlo 方法进行模拟验证环境因子估计方法的合理性。其主要步骤如下:

1) 随机设定 n 种产品在基准试验条件下的失效率 $\lambda_{il}(i=1,2,\cdots,n)$, 以及在第 j 个 ($j=1,2,\cdots,k$) 试验条件下的工作时间 t_{ij} , 设定在第 j 个试验条件下环境因子为 π_j ;

2) 根据公式(2)产生不同试验条件下产品的故障次数 x_{ij} ;

3) 分别由公式(8)和(15)通过极大似然估计 $\hat{\pi}_M$ 和矩估计计算环境因子 $\hat{\pi}_E$;

4) 取 $\pi=4$, 当 $n=20$ 及 $n=1000$ 时, 随机模拟 1000 次, 统计结果见式(16)—(19)。

其中 $n=20$ 时:

$$P(0 \leq |\hat{\pi}_M - \pi| \leq 1) = 0.702 \quad (16)$$

$$P(0 \leq |\hat{\pi}_E - \pi| \leq 1) = 0.716 \quad (17)$$

$n=1000$ 时:

$$P(0 \leq |\hat{\pi}_M - \pi| \leq 0.2) = 0.882 \quad (18)$$

$$P(0 \leq |\hat{\pi}_E - \pi| \leq 0.2) = 0.913 \quad (19)$$

由仿真结果可以看出, 利用混合泊松分布的矩估计比极大似然估计精确略高。极大似然估计中用到的参数 λ_{il} 本身就是一个估计量, 这在一定程度上影响了环境因子的估计。

2 不同环境下的环境因子确定

火炮的火力部分属于复杂的机械产品, 是寿命型的, 应采用指数分布^[6]。某类火炮火力系统在鉴定验收过程中, 一般要经历基准环境条件试验、寒区部队试验、热区部队试验、低温环境试验、高温环境试验(其它项目的环境试验无射击)等。火力系统可靠性统计采用的是平均故障间隔发数 MRBF, 用射弹发数代替试验时间。将不同型号的火炮火力系统作为同类产品, 8 种火炮火力系统不同环境下射弹数 t_{ij}

及相应出现的故障次数 x_{ij} 见表1。

利用式(8)和式(15)可以得到火炮火力系统的

表1 不同型号火炮火力系统不同环境下试验的故障统计

Table 1 Failure data of different type cannon fire system under different test environments

序号	基准环境下试验		低温环境试验(-40℃)		高温环境试验(+50℃)		寒区部队试验		热区部队试验	
	t_{i1}	x_{i1}	t_{i2}	x_{i2}	t_{i3}	x_{i3}	t_{i4}	x_{i4}	t_{i5}	x_{i5}
1	958	6	10	1	10	1	38	1	50	0
2	371	3	10	0	40	0	25	0	25	0
3	820	4	10	1	10	0	30	1	30	1
4	900	6	10	1	10	1	20	0	20	0
5	581	3	10	0	30	2				
6	737	7	20	1	20	1	27	1	41	1
7	791	1	5	0	5	0	20	0	20	0
8	824	3	10	1	10	0				

注: t_{ij} 为射弹数; x_{ij} 为故障次数; $i=1, 2, \dots, 8$ 。

寒区部队试验环境因子矩估计 $\hat{\pi}_E=3.4$, 最大似然估计 $\hat{\pi}_M=3.0$; 热区部队试验矩估计环境因子 $\hat{\pi}_E=1.9$, 最大似然估计 $\hat{\pi}_M=1.7$; 低温环境试验环境因子矩估计 $\hat{\pi}_E=10.7$, 最大似然估计 $\hat{\pi}_M=9.2$; 高温环境试验环境因子矩估计 $\hat{\pi}_E=6.7$, 最大似然估计 $\hat{\pi}_M=5.6$ 。

3 结语

把同类异型产品不同试验条件下的试验数据作为一个整体, 提出了同类异型产品的环境因子的确定方法, 推导了极大似然估计和利用混合泊松模型的矩估计环境因子估计方法。通过数值仿真的方法分析了环境因子估计精度, 并验证了矩估计法略优于极大似然估计法。最后, 将该方法应用于火炮火力系统的环境因子估计中, 得出了几种环境条件下火炮火力系统环境因子。

参考文献:

- [1] 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—92.
- [2] 周源泉, 翁朝曦. 可靠性评定[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [3] 张春华, 陈循, 杨拥民. 常见寿命分布下环境因子的研究[J]. 强度与环境, 2001(4): 7—12.
- [4] 韩庆田, 李文强, 卢洪义. 逆 Weibull 1 分布环境因子及其统计分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 54—57.
- [5] 刘春和, 陆祖建. 武器装备可靠性评定方法[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 60—70.
- [6] 邱有成. 可靠性试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 49—56.
- [7] GJB889A—2009, 可靠性鉴定和验收试验[S].
- [8] 赵宇, 黄敏, 王智. 一种用于变环境数据的可靠性增长分析模型[J]. 航空学报, 2002, 23(2): 111—115.
- [9] 胥泽奇, 张世艳, 宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 54—59.