

一维修正弹任务可靠度的序贯截尾检验方法

马康^{1,2}

(1. 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001; 2. 92493 部队博士后科研工作站, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: **目的** 研究并提出一种基于序贯截尾检验方法的任务可靠度评定方法。**方法** 将序贯截尾检验方法引入一维修正弹任务可靠度评定过程中, 建立检验方法数学描述模型, 并结合工程实例, 综合应用 Monte-Carlo 法, 给出数值算例和任务可靠度检验方案, 验证方法的有效性和可行性。**结果** 与二项式经典假设检验方法(所需试验样本量 $N=54$) 相比, 采用序贯截尾检验方法能够显著减少试验样本数量, 给出了 6 种接收方案和 9 种拒收方案, 其中接收方案最少仅需要 16 个试验样本, 最大需要 38 个试验样本; 拒收方案最少仅需要 4 个试验样本, 最大需要 38 个试验样本。**结论** 该方法能够显著缩短试验周期、减少试验子样, 与传统经典假设检验方法相比, 更适合试验工程应用。

关键词: 一维修正弹; 任务可靠度; 序贯截尾检验

中图分类号: TJ412.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)04-0054-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.04.009

Sequential Truncated Inspection Method for the Mission Reliability of One Dimension Trajectory Correction Projectile

MA Kang^{1,2}

(1. Unit 92941 of PLA, Liaoning Huludao 125001, China;

2. Post-doctoral Research Center, Unit 92493 of PLA, Liaoning Huludao 125001, China)

ABSTRACT: A sequential truncated inspection method on the mission reliability has been investigated and proposed in this paper. The sequential truncated inspection method has been introduced into the evaluation process of the mission reliability in this paper, and the mathematical model of the checking methods has been established. Furthermore, the validity and feasibility of the method have been validated by numerical examples, and inspection schemes of mission reliability have been obtained by applying the Monte-Carlo method. Compared with the test sample size ($N=54$) based on the binomial distribution hypothesis inspection, the test sample size can be reduced by applying the sequential truncated inspection method. Six receiving schemes and nine rejection schemes have been proposed in this paper, among the receiving schemes, the needed test samples is minimum of 16, maximum of 38; among the rejection schemes, the needed test samples is minimum of 4, maximum of 38. Compared with the traditional classical hypothesis testing methods, this method can significantly shorten the test period and reduce the number of test samples, and is more suitable for test engineering applications.

KEY WORDS: one dimension trajectory correction projectile; mission reliability; sequential truncated inspection

收稿日期: 2021-10-18; 修订日期: 2021-12-23

Received: 2021-10-18; Revised: 2021-12-23

作者简介: 马康 (1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为武器装备试验与鉴定。

Biography: MA Kang (1981—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: test and evaluation of weapon equipment.

引文格式: 马康. 一维修正弹任务可靠度的序贯截尾检验方法[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 054-059.

MA Kang. Sequential Truncated Inspection Method for the Mission Reliability of One Dimension Trajectory Correction Projectile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 054-059.

舰炮一维修正弹属于信息化弹药,能够综合利用舰载雷达测量数据、火控预测弹道误差等实时信息,在预定时间对弹丸纵向距离进行修正,提高纵向密集度,改变了“传统弹药发射后不管”的模式,显著提高舰炮对海对陆打击能力,满足精确打击作战任务需求^[1-7]。作为一次性作战使用的火工品,一维修正弹的任务可靠度直接决定其能否有效发挥作战效能,完成规定的作战动作和任务,是靶场必须重点考核评估的战技指标。受性能鉴定试验阶段样本量限制,飞行器的可靠度指标考核属于小子样评估问题^[8-13]。本文应用序贯截尾检验方法^[14-20],对一维修正弹的飞行可靠度评定问题进行研究,并给出工程算例,为该型弹药装备的试验鉴定提供参考和借鉴。

1 任务可靠度指标分析

一维修正弹任务可靠度主要表征其在规定的条件和时间下完成规定作战任务的概率。分析飞行可靠度,首先要界定其任务剖面,在任务剖面里出现的故障,均应作为失败子样进行统计,一维修正弹飞行可靠度任务剖面主要包括发射无控阶段、指令修正阶段和命中起爆阶段。

装备研制总要求往往通过目标值 p_0 和最低可接受值 p_1 对任务可靠度指标进行明确:目标值是通过可靠性增长、装备到达成熟期后能够满足的要求;最低可接受值是装备必须达到的合同指标,是性能鉴定试验阶段考核评定的依据。最低可接受值和目标值的关系如图 1 所示。

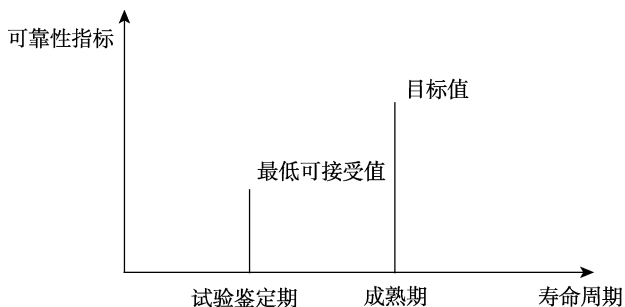


图 1 任务可靠度目标值与最低可接受值的关系
Fig.1 Relationship of the target value of mission reliability and the minimum acceptance value

2 任务可靠度检验的数学描述

按照规定的任务剖面,一维修正弹飞行试验存在 2 种情况,即成功和失败,可以用二项变量建立成败型任务可靠度数学模型。设 X 是二项变量,取值为 0 或 1:

$$X = \begin{cases} 0, & \text{当试验失败时} \\ 1, & \text{当试验成功时} \end{cases} \quad (1)$$

$P\{x=1\}=q$ 是一维修正弹飞行试验成功的概率,即任务可靠度; $P\{x=0\}=1-q$ 则为飞行试验失败的概率。因此,对一维修正弹任务可靠度指标考核就直接转变为成败型可靠性模型参数评定问题。

设任务可靠度目标值为 q_0 , 最低可接受值为 q_1 , 则 $p_0=1-q_0$ 是使用方希望的不可靠度值, $p_1=1-q_1$ 是使用方不希望但可以接受的不可靠性最大值。任务可靠度检验就可以转化为不可靠度的检验。建立统计假设, 见式 (2) 和 (3)。

$$H_0: p = p_0 \quad (2)$$

$$H_1: p = p_1 = \lambda p_0 > p_0 \quad (3)$$

式中: λ 为鉴别比, $\lambda > 1$ 。

开展 n 次独立的靶试后,每次试验成功概率和失败概率不变,成功概率即为试验的任务可靠度,记为 q , 失败概率记为 p 。对于 n 次独立的成败型试验,出现成功的次数是一个随机变量。当 S 取值为 s 的概率等于二项分布, 即:

$$P\{S=s\}=C_n^s q^s p^{(n-s)} \quad (4)$$

成功次数从 0 到 s 的概率则等于二项分布累积概率值, 即:

$$P\{S \leq s\} = \sum_{k=0}^s C_n^k q^k p^{(n-k)} \quad (5)$$

3 任务可靠度序贯截尾检验方法

对于一维修正弹设计鉴定试验,需要检验产品的可靠度是否达到规定的指标要求,本节给出基于序贯检验^[14-20]的任务可靠度检验方法。对于式 (2) 和 (3) 确定的统计假设检验,记 α 和 β 为检验中犯 2 类错误的概率。具体步骤为:

1) 根据式 (2) 和式 (3), 建立所需的统计假设检验。

2) 计算确定常数 A 和 B 的值, 见式 (6)。

$$A = \frac{1-\beta}{\alpha} \quad B = \frac{\beta}{1-\alpha} \quad (6)$$

3) 假设进行了 m 次试验,其中失败的次数为 k_m , 由式 (7) 确定统计量。

$$\ln \frac{P_{1m}}{P_{0m}} = k_m \ln \frac{p_1}{p_0} + (m-k_m) \ln \frac{1-p_1}{1-p_0} \quad (7)$$

4) 计算实际风险率 α_s 和 β_s , 确定截尾数 n_0 。应用 Monte-carlo 方法, 计算实际风险率 α_s 和 β_s , 并结合仿真结果, 根据平均所需样本量确定截尾数 n_0 。

5) 计算拒绝数 a_m 和接收数 b_m 。首先, 进行判别, 规则如下: 如果 $\ln(P_{1m}/P_{0m}) \leq \ln B$, 那么接收假设

H_0 ，即认为“一维修正弹任务不可靠度小于等于 p_0 ”，满足指标要求，试验亦告终止；如果 $\ln(P_{1m}/P_{0m}) > \ln A$ ，那么接收假设 H_1 ，即认为“一维修正弹任务不可靠度大于 p_1 ”，不满足指标要求，试验终止；如果 $\ln B < \ln(P_{1m}/P_{0m}) \leq \ln A$ ，那么继续进行试验，即进行第 $(m+1)$ 次试验。

为便于计算，对上述步骤 3 给出的判别关系式进行改写，当满足式 (8) 时，接受假设 H_0 ：

$$k_m \leq b_m \quad (8)$$

当满足式 (9) 时，接受假设 H_1 ：

$$k_m > a_m \quad (9)$$

当满足式 (10) 时，继续进行试验：

$$b_m < k_m \leq a_m \quad (10)$$

式中：

$$a_m = \frac{\ln A}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}} + m \frac{\ln \frac{1-p_0}{1-p_1}}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}} \quad (11)$$

$$b_m = \frac{\ln B}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}} + m \frac{\ln \frac{1-p_0}{1-p_1}}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}} \quad (12)$$

表 1 统计模拟试验计算结果

Tab.1 Calculation results of the statistical simulation tests

方案序号	p_0	p_1	λ	α	β	n_0	α_s	β_s
1				0.20	0.20	91	0.183 4	0.194 8
2	0.20	0.26	1.3	0.25	0.25	62	0.225 1	0.247 7
3				0.30	0.30	40	0.270 5	0.298 2

5) 计算拒绝数 a_m 和接收数 b_m 。根据式 (11) 和式 (12)，计算得到拒绝数 a_m 和接收数 b_m 。根据表 1 计算结果，综合考虑试验周期和经费，建议采用 $p_0=0.2$ ， $p_1=0.26$ ， $\alpha=\beta=0.3$ 的检验方案，此时对应的试验截止数 $n_0=40$ ，表 2 给出了具体的序贯检验方案。

由表 2 可知，与二项式经典假设检验方法（所需试验样本量 $N=54$ ）相比，采用序贯截尾检验方法可以减少试验样本数量，分别给出了 6 种接收方案和 9 种拒收方案。其中，接收方案最少仅需要 16 个试验样本，最大需要 38 个试验样本；拒收方案最少仅需要 4 个试验样本，最大需要 38 个试验样本。比如，当 16 发一维修正弹试验结束后，试验结果是 16 发 1 败，根据表 2 给出的接收方案，则认为装备任务可靠度满足规定的指标要求，试验结束；再如，当 4 发一

6) 绘制序贯截尾检验图，若决策数据一直落于继续试验区内，导致一直无法作出评定结果，则在到达截尾数处采用强制截尾的判决方法。

4 工程实例分析

本工程实例目的在于介绍一维修正弹可靠性评定方法的工程应用，涉及的指标和试验数据都经过处理。取 $p_0=0.2$ ， $p_1=0.26$ ，若采用二项式经典假设检验方法，取双方风险为 $\alpha=\beta=0.3$ ，则所需试验次数为 $N=54$ 。为减少试验消耗，采用序贯截尾检验方法进行一维修正弹任务可靠度检验，评定过程如下。

1) 建立统计假设检验，见式 (13) 和 (14)。

$$H_0: p = p_0 = 0.2 \quad (13)$$

$$H_1: p = p_1 = \lambda p_0 = 0.26 > p_0 \quad (14)$$

式中： $\lambda = p_1/p_0 = 1.3$ 。

2) 计算确定常数 A 和 B 的值。按照双方风险一致的原则，并结合工程经验，研制方风险 α 和使用方风险 β 分别取值 $\alpha=\beta=0.2, 0.25, 0.3$ 。根据式 (6)，可得不同 α 和 β 值时 A 和 B 的值。

3) 根据式 (7)，确定统计量。

4) 计算实际风险率 α_s 和 β_s ，确定截尾数 n_0 。应用 Monte-carlo 方法，计算不同 α 和 β 条件下的截尾次数 n_0 及实际风险 α_s 和 β_s ，计算结果见表 1。

维修正弹飞行试验均失败，即 4 发 4 败，根据表 2 给出的拒收方案，可认为装备任务可靠度不满足规定的指标要求，试验结束。

6) 绘制序贯截尾检验图。接收线 L_0 的计算公式为：

$$L_0 = \frac{\ln B}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}} + m \frac{\ln \frac{1-p_0}{1-p_1}}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}} = -2.4897 + 0.229m \quad (15)$$

拒收线 L_1 的计算公式为：

$$L_1 = \frac{\ln A}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}} + m \frac{\ln \frac{1-p_0}{1-p_1}}{\ln \frac{p_1}{p_0} - \ln \frac{1-p_1}{1-p_0}} = 2.4897 + 0.229m \quad (16)$$

表 2 序贯检验判决表及检验方案
Tab.2 Sequential inspection judgment table and inspection scheme

序号	试验 次数 m	接收 数 b_m	合格 的 k_m	拒绝 数 a_m	不合格 的 k_m	序号	试验 次数 m	接收 数 b_m	合格 的 k_m	拒绝 数 a_m	不合格 的 k_m
1	1	-2.26		2.72		21	21	2.32	2	7.30	8
2	2	-2.03		2.95		22	22	2.55	2	7.53	8
3	3	-1.80		3.18		23	23	2.78	2	7.76	8
4	4	-1.57		3.41	4	24	24	3.01	3	7.99	8
5	5	-1.34		3.64	4	25	25	3.24	3	8.22	9
6	6	-1.12		3.86	4	26	26	3.47	3	8.45	9
7	7	-0.89		4.09	5	27	27	3.70	3	8.67	9
8	8	-0.66		4.32	5	28	28	3.92	3	8.90	9
9	9	-0.43		4.55	5	29	29	4.15	4	9.13	10
10	10	-0.20		4.78	5	30	30	4.38	4	9.36	10
11	11	0.03		5.01	6	31	31	4.61	4	9.59	10
12	12	0.26		5.24	6	32	32	4.84	4	9.82	10
13	13	0.49		5.47	6	33	33	5.07	5	10.05	11
14	14	0.72		5.70	6	34	34	5.30	5	10.28	11
15	15	0.95		5.93	6	35	35	5.53	5	10.51	11
16	16	1.18	1	6.15	7	36	36	5.76	5	10.74	11
17	17	1.40	1	6.38	7	37	37	5.99	5	10.97	11
18	18	1.63	1	6.61	7	38	38	6.22	6	11.19	12
19	19	1.86	1	6.84	7	39	39	6.44	6	11.42	12
20	20	2.09	2	7.07	8	40	40	6.67	6	11.65	12
接收的方案		16 发 1 失败、20 发 2 失败、24 发 3 失败、29 发 4 失败、33 发 5 失败、38 发 6 失败									
拒收的方案		4 发 4 失败、7 发 5 失败、11 发 6 失败、16 发 7 失败、20 发 8 失败、25 发 9 失败、29 发 10 失败、33 发 11 失败、38 发 12 失败									

绘制直线 L_2 ， L_2 过原点并与 L_0 和 L_1 平行，经计算，可得截尾点 E 的坐标为 $(40,9.16)$ 。每发一维修正弹试验后，依据式（8）—（12）给出的决策方法进行序贯检验和决策。如果进行到 $n_0=40$ 处仍未结束，可由点 E 的位置来判断。如果失败数大于等于 10，则拒绝 H_0 ，认为指标不合格；如果失败数小于等于 9，则接收 H_0 ，认为指标合格。序贯截尾检验图见图 2。

5 结语

本文将序贯截尾检验方法引入一维修正弹任务可靠度评定过程中，研究结果表明，本方法具有以下特点：该方法能够有效减小试验次数，缩短试验周期，提高试验效益；预先确定试验次数上限，当序贯检验到达次数上限处仍未终结，给出截尾决策方法；在求解过程中，综合运用 Monte-carlo 法等多种先进优化算法，提高计算效率和结果精度。

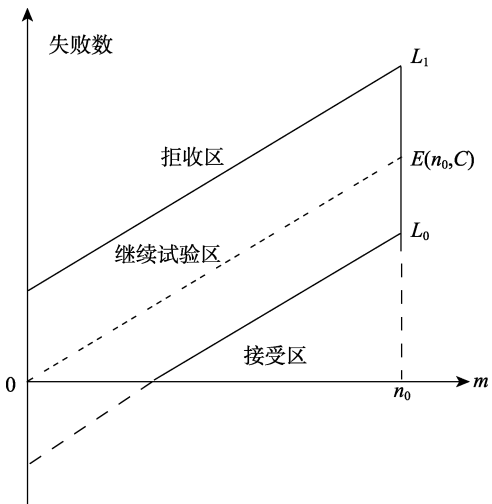


图 2 序贯截尾检验图
Fig.2 Diagram of the sequential truncated inspection

本文给出数值算例，检验了方法的有效性，为该型弹药装备的试验鉴定提供了参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 黄义, 汪德虎, 余家祥, 等. 舰炮一维弹道修正弹射击误差分离和校正研究[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(3): 44-46.
HUANG Yi, WANG De-hu, YU Jia-xiang, et al. Research on Separating and Correcting Firing Errors of one Dimension Trajectory Correction Projectile Fired by Shipborne Gun[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(3): 44-46.
- [2] 袁新波, 王朋飞. 海拔高度对一维修正弹弹道特性的影响[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(11): 34-36.
YUAN Xin-bo, WANG Peng-fei. Influence of Altitude on the one Dimensional Correction Projectile for Ballistic Characteristics[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(11): 34-36.
- [3] 黄义, 汪德虎, 杨绍清. 舰炮一维修正弹校正诸元误差和预测误差试射[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(1): 120-123.
HUANG Yi, WANG De-hu, YANG Shao-qing. Test Firing to Correct Firing Data Error and Forecasting Error of one Dimension Trajectory Correction Projectile Fired by Shipborne Gun[J]. Command Control & Simulation, 2015, 37(1): 120-123.
- [4] 刘延友, 李忠新. 某一维弹道修正机构设计与气动特性分析[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(1): 52-57.
LIU Yan-you, LI Zhong-xin. One-Dimensional Trajectory Correction Mechanism Design and Aerodynamic Characteristics Analysis[J]. Machine Building & Automation, 2015, 44(1): 52-57.
- [5] 舒延春. 一维修正弹射击校正方法[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(2): 1-3.
SHU Yan-chun. Method for Correcting Firing Errors of One-Dimensional Trajectory Correction Projectile[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(2): 1-3.
- [6] 李元生, 陈礼国. 舰炮一维弹道修正弹校射方法研究[J]. 弹道学报, 2016, 28(2): 25-28.
LI Yuan-sheng, CHEN Li-guo. Study on Firing Correction Method of One-Dimensional Trajectory Correction Projectile Fired by Naval Gun[J]. Journal of Ballistics, 2016, 28(2): 25-28.
- [7] 丁翔洲, 李银伢. 一种一维弹道修正弹自适应落点控制算法[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(2): 48-52.
DING Xiang-zhou, LI Yin-ya. One Dimensional Trajectory Correctional Projectile Self-Adaptive Impact Point Control Algorithm[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(2): 48-52.
- [8] 赵永刚, 米晓莉. 基于可靠性和命中精度的导弹批抽检方法[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(8): 29-31.
ZHAO Yong-gang, MI Xiao-li. Missile Batch Sampling Method Based on Reliability and Accuracy[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(8): 29-31.
- [9] 孙公道, 尹文进, 林一品. 火箭助飞鱼雷飞行可靠性评定方法[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(4): 13-17.
SUN Gong-dao, YIN Wen-jin, LIN Yi-pin. The Evaluation Methods of Rocket Assisted Torpedo Flight Reliability[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(4): 13-17.
- [10] 徐廷学, 王鑫, 安进, 等. 基于故障统计分析的导弹可靠性研究[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(9): 117-120.
XU Ting-xue, WANG Xin, AN Jin, et al. Study on Missile Equipment Reliability Based on Fault Statistics Evaluation[J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(9): 117-120.
- [11] 王瑞臣, 徐文焱, 李建林. 导弹可靠性抽检方案[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(3): 121-124, 137.
WANG Rui-chen, XU Wen-yan, LI Jian-lin. Research on the Reliability Acceptable Method of Missiles[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(3): 121-124, 137.
- [12] 甄昕, 丁力军. 复合假设下导弹可靠性指标 Bayes 检验方法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(10): 183-185.
ZHEN Xin, DING Li-jun. Method for Bayesian Hypothesis Testing of Missile Reliability Indexes under Complex Hypothesis[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(10): 183-185.
- [13] 刘洪于, 方洋旺, 张平, 等. 基于导弹现场数据的可靠性评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(4): 41-45.
LIU Hong-yu, FANG Yang-wang, ZHANG Ping, et al. The Reliability Assessment Based on Missile Field Data[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012, 13(4): 41-45.
- [14] 张金槐, 李菊生, 常兆诚. 飞行器试验统计学[M]. 长沙: 国防科技大学, 1982.
ZHANG Jin-huai, LI Ju-sheng, CHANG Zhao-cheng. Experimental Statistics on the Aircraft[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1982.
- [15] 唐雪梅, 张金槐, 邵凤昌. 武器装备小子样试验分析与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
TANG Xue-mei, ZHANG Jin-huai, SHAO Feng-chang. Test Analysis and Evaluation of Weapon Systems in Small-Sample Circumstances[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [16] 张金槐. 多元正态总体分布参数的 Bayes 序贯检验后加权检验及估计[J]. 飞行器测控学报, 2002, 21(4): 65-69.
Zhang Jin-huai. Bayesian Sequential Posterior Odd Test and Evaluation on the Multi-Parameter Normal Population Distribution[J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2002, 21(4): 65-69.
- [17] 刘奎永, 黄守训, 郝瑞云. 序贯分析法在舰炮武器试验中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(1): 98-102.

- LIU Kui-yong, HUANG Shou-xun, HAO Rui-yun. The Application of Sequential Analysis in Shipborne Gun Weapon System Test[J]. Fire Control & Command Control, 2004, 29(1): 98-102.
- [18] 金振中, 贾旭山. 武器系统 MTBF 的 Bayes 序贯检验方法[J]. 现代防御技术, 2007, 35(2): 15-18.
- JIN Zhen-zhong, JIA Xu-shan. The Bayes Sequential Test Method on MTBF of Weapon System[J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(2): 15-18.
- [19] 王森, 孙晓峰. 基于二项分布的优化序贯截尾检验方法分析计算[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(4): 421-424.
- WANG Miao, SUN Xiao-feng. Arithmetic of Optimization Sequential Truncated Inspection Based on Parameter for Binomial Distribution[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2013, 28(4): 421-424.
- [20] 马康, 吴艳征. 基于序贯截尾检验的一维修正弹精度评估方法[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(3): 31-34.
- MA Kang, WU Yan-zheng. Evaluation Method on Dispersion of Impact Point for one Dimension Trajectory Correction Projectile Based on Sequential Truncated Inspection[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(3): 31-34.

责任编辑：刘世忠