

基于半实物仿真的导弹批验收试验方法

张翔 刘满国 王洋 董国才

(中国兵器工业第203研究所,西安,710065)

摘要:针对传统“飞了买”批验收方法效费比较低的问题,提出一种基于半实物仿真的导弹批验收试验方法。首先进行导弹试验准备,对原有的抽样方法进行了改进;其次将导弹部件与仿真设备相连接,进而依照工作时序开展仿真试验;最后对仿真结果进行评定,以决定是否接收该批导弹。由于采用半实物仿真无需发射和破坏被试验导弹,因而可以节约大量成本;同时,采用半实物仿真可以测试导弹在不同战场环境下的作战效能,具有“飞了买”验收方法无可比拟的优势。试验结果证明了该方法的有效性。

关键词:导弹;半实物仿真;飞行试验;批验收

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)02-0257-05

Method for Missile Batch Acceptance Based on Hardware-in-the-Loop Simulation

Zhang Xiang, Liu Manguo, Wang Yang, Dong Guocai

(No. 203 Research Institute, China Ordnance Industries, Xi'an, 710065, China)

Abstract: According to the low performance-cost ratio of the "purchase after aero experiment" method, a method for missile batch acceptance based on hardware-in-the-loop simulation is presented. Firstly, the hardware-in-the-loop simulation experiment for the missile is prepared, and the batch sampling method is improved. Secondly, the parts of the missile are connected with simulation equipments, and the hardware-in-the-loop simulation experiment is carried out in accordance with time sequence. Finally, the simulation results are verified to decide whether to accept the batch of the missiles or not. The missiles are not need to be launched or destroyed due to the adoption of the hardware-in-the-loop simulation experiment, and large cost is saved. The combat effectiveness of the missile under different battlefields can be tested also, and the new method has incomparable advantages compared with the "purchase after aero experiment" method. The experimental results proves the validity of the new method.

Key words: missile; hardware-in-the-loop simulation; aero experiment; batch acceptance

导弹武器系统的批验收试验方法决定着批量内所有导弹的接收与否,严重影响着军方武器采购的质量^[1-2]。在过去的几十年中,世界各国的导弹系统验收都是从每一批量中抽取几个导弹样品进行飞行试验,确定其具有所需要的特定功能,然后决定是否购买^[3]。在这种质量验收方法下,导弹制造商只能从通过试验的批中获得费用。

这种验收方法称作“飞了买”,该方法要求对导弹样品进行飞行试验,这样必然会在验证导弹性能的同时破坏导弹。理论上,“飞了买”显得十分合理、有效,以至于直到现在各国在进行武器采购时仍然主要采用这种方法来判定整批产品是否接收。然而,随着导弹系统复杂程度的增加,其成本也水涨船高,以美军“海尔法”导弹为例,假如每月需要10

基金项目:总装预研课题资助项目。

收稿日期:2011-06-03;**修订日期:**2012-01-10

通讯作者:张翔,男,工程师,1982年生,E-mail:zh-xiang11@163.com。

发导弹用于飞行试验,每发“海尔法 I 型”导弹成本为 2 万美元,那么一年就需要 240 万美元的费用用于破坏性试验;而每发“长弓海尔法”导弹的价格为 30 万美元,则每年用于飞行试验的费用则增长为 3 600 万美元,如此庞大的支出使得军方不得不开发其他更经济的批验收方法^[4]。美国在这一领域走在了前面。1992 年空对地导弹项目办公室首次采用半实物仿真开发出一种可用于“长弓海尔法”导弹批量生产的验收方法,获得了巨大成功;此后,海军“战斧”巡航导弹项目部也开发出类似的半实物仿真系统,节约了大量成本;此外,“TACMS”导弹以及“伯欣”导弹系统在某种形式上也采用了半实物仿真导弹飞行试验的方法^[5]。而国内目前尚未对这种新型的验收方法展开研究。

采用半实物仿真无需发射和破坏被试验导弹,因而可以节约大量成本;同时,采用半实物仿真可以测试导弹在不同战场环境下的作战效能,能够更为全面地考核导弹的性能;此外,采用半实物仿真进行批验收试验可用于进行故障复现和问题分析,能够迅速定位故障来源查明失效原因。然而,由于西方军事发达国家的封锁,中国无法获得这种新型批验收方法的详细流程。鉴于此,本文提出了一种基于半实物仿真的导弹批验收试验方法。首先,进行导弹试验准备,确定批量抽样方法;其次,将导弹部件与仿真设备相连接,进而依照工作时序开展半实物仿真试验;最后对仿真结果进行评定,以决定是否接收该批导弹。实验结果进一步验证了本文方法能够很好地完成导弹的批验收试验,具有很好的应用前景。

1 导弹试验准备

1.1 试验前准备

采用半实物仿真的验收方法需遵循以下原则^[5]: (1)试验结果的置信度必须与“飞了买”批验收方法相当;(2)对导弹没有破坏性;(3)能够进行环境检验;(4)试验中不能拆卸掉导弹的主要部分;(5)能够对导弹的整体性能进行检验;(6)满足安全要求。其中,第(1,2,5,6)条容易理解,这里不再赘述。第(3)条在执行时要先于仿真试验,环境检验需进行以下内容:高/低气压、高/低温、湿热、振动、淋雨等。只有当这些导弹全部通过环境检验之后,才可进行下一阶段的试验,否则认为该批导弹不能达到接收标准。第(4)条要求在进行半实物仿真时不能像传统仿真试验那样将导弹各部件拆卸下来再

进行试验,导弹在试验过程中必须保持“整弹”状态,这就使得导弹在设计阶段必须考虑将来半实物仿真的需要,各部件要预留外部接口,以便与仿真设备连接,并要保证在仿真进行过程中不能触发发动机和战斗部。对发动机和战斗部的检测可采取如下办法:在导弹装配前对这两个部件单独进行抽样测试,如果试验结果符合《导弹批验收接收标准》给出的可接受质量水平,则认为这两个部件是合格的,否则停止装配并返修。

1.2 导弹批量抽样方法

依据美国军方对“长弓海尔法”导弹的抽样计划,假设该批导弹有 100 枚,则采用“飞了买”验收方法需要从中随机地抽取 10 枚导弹用于飞行试验,而采用半实物仿真方法的用弹量则增加到 15 枚。“飞了买”与半实物仿真批验收方法的抽样原则如表 1,2 所示^[5]。

表 1 “飞了买”飞行试验抽样方案

试验导弹 数目	试验失败导弹数目(累计)		
	批接收	继续试验	批拒收
4	0	1	2
8	1	2	3
10	2		3

表 2 半实物仿真批验收试验抽样方案

试验导弹 数目	试验失败导弹数目(累计)		
	批接收	继续试验	批拒收
6	0	1	2
6	1	2	3
3	2		3

注:限定条件下每个导弹样品必须通过每种试验情况下 3 次试验中的两次。

然而,这两种抽样方法均存在着一些不足。由于“海尔法”导弹高额的成本,“飞了买”批验收抽样方法制定的初衷是为了使用最少可行数量的导弹样品^[6],然而该标准却不适用于半实物仿真批验收试验,原因是半实物仿真对导弹及其组件没有破坏性作用,所以无需采用这种 4—4—2 的多阶段验收标准。而上述的半实物仿真批验收试验抽样方法的问题在于,该方法规定每个导弹在每种试验情况下(如本文在后面“试验结果分析”中所进行的试验有 5 种试验情况)要进行 3 次仿真试验,并且只有当该导弹顺利通过了其中的两次,该导弹才被认为是通过了该种试验情况下的测试。这个限定条件引发的

问题是,每个导弹样品在每种试验情况下重复进行3次试验,其结果在统计学上并不独立,原因是3次试验都是同一个导弹样品,假如这个导弹能够通过该种试验情况,那么它非常有可能顺利通过其余两次的重复试验。

1.3 导弹批量抽样方法的改进

本文对上述抽样方法进行了改进,抽样方案如表3所示。

表3 本文抽样方案

试验导弹数目		试验失败导弹数目(累计)			
		批接收	继续试验	批拒收	
第1 阶段	6	0	1	2	
	6	1	2	3	
	3	2		3	
第2 阶段	第1 阶段	2	0	1	2
	有1 枚失败	2	0		1
	第1 阶段	4	0		1
有2 枚失败					

注:限定条件为每个导弹样品在每种试验情况下只进行1次试验。

由于基于半实物仿真的验收方式对导弹没有破坏性,因此用于试验的导弹样品增加到19枚。试验分为两个阶段。第1阶段用弹15枚,仍采用表2的抽样方法进行处理,所不同的是每个导弹样品在每种试验情况下只进行1次试验。如果所有导弹均顺利通过了试验,则认为该批量的导弹符合接收标准,予以接收;如果这15枚导弹中有3枚或3枚以上没有通过,则认为该批量的导弹不符合接收标准,拒绝接收;当这15枚导弹中有1枚或2枚没有通过,则需要进行第2阶段的试验。这里又分为两种情况:(1)有2枚未通过的情况,则使用剩下的全部4枚导弹进行试验,只有当这4枚导弹全部通过了试验,才可接收该批量的导弹,否则拒收;(2)有1枚导弹未通过的情况,先使用剩余导弹中的2枚进行试验,如果全部通过则接收该批量的导弹,如果全部失败则拒收,如果只有1枚失败则必须使用剩余的2枚导弹继续试验,只有当这2枚导弹全部通过了试验才能接收该批量导弹,否则拒收。可以看出,采用改进的抽样方案进行试验,能够很好地检验导弹的性能,同时有效地避免了“飞了买”抽样方法和以往半实物仿真抽样方法引发的问题。

2 半实物仿真批验收试验

用于导弹半实物仿真批验收试验的设备包

括^[5]:(1)环境检测试验室。用于半实物仿真前对导弹样品进行环境检测,主要测试内容包括高/低气压、高/低温、湿热、振动、淋雨等。(2)导弹综合测试试验室。用于对每发导弹进行仿真之前的开环测试以及整体性能的检验,如果被试验的导弹样品未能通过环境检测试验室和导弹综合测试试验室的检验,则后面的仿真试验就不用进行了,这样可以避免对有问题的导弹进行不必要的仿真试验而造成的资源浪费。(3)导弹仿真试验室和计算机室。用于对导弹进行半实物仿真试验,其中,导弹仿真试验室包括待试验的导弹样品、飞行转台、目标模拟器等,计算机室包括目标生成设备、测试设备、仿真计算机、数据采集与分析计算机等。图1给出了用于导弹批验收试验的半实物仿真系统原理框图,为了便于论述,该原理图依据后面试验结果分析中所使用的某型激光制导导弹的工作原理进行设计,不同类型的导弹其半实物仿真系统会有所不同。

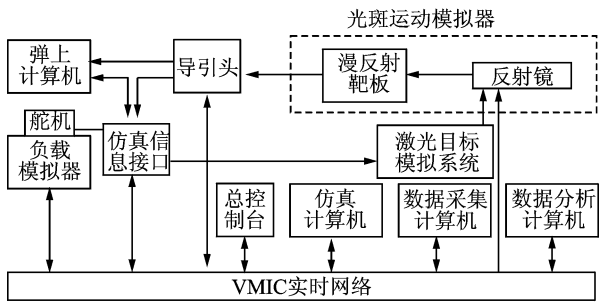


图1 导弹半实物仿真批验收试验系统原理框图

如图1所示,导弹批验收半实物仿真系统的工作流程为:仿真开始时,总控制台给仿真设备及参试部件装订仿真参数,设定仿真状态;仿真计算机运行导弹运动学、动力学、目标运动学模型,生成导弹弹道、姿态以及目标运动坐标,输出至实时网络;光斑运动模拟器按照弹目相对关系,将激光目标模拟系统产生的编码激光投射到漫反射靶板上;三轴转台负载导引头,从实时网络接收指令,模拟导弹的运动姿态;弹体姿态信号通过仿真信息接口输出至弹上计算机;弹上计算机依据制导控制模型,形成舵控制指令控制舵机偏转,并在适当时机生成导引头启动信号,通过实时网络和仿真计算机送给导引头,使导引头进入工作状态;当导弹飞抵目标捕获区域后,导引头接收漫反射靶板上的激光信号,输出导引信号至弹上计算机;弹上计算机按照制导控制系统模型形成控制指令,送舵机形成舵偏角;负载模拟器按照仿真计算机给出的指令给舵机实

时加载;仿真计算机按照舵偏角计算控制力和力矩,控制导弹飞行,形成仿真闭环。该试验系统与文献[5]所使用的半实物仿真系统不同的是,由于该型导弹在设计阶段并未考虑将来半实物仿真批验收试验的需求,因此在导弹安装到转台之前,要移去导弹的警报装置,关闭发动机和战斗部的安全锁,同时安装一束电缆,将导弹内部的制导系统与仿真设备相连接,保证接下来的仿真试验能够顺利进行。

3 仿真结果的评定

为了验证本文方法的有效性,将少量通过了半实物仿真试验的导弹给定一种试验情况进行发射,用飞行试验的结果来验证仿真试验的结果。半实物仿真系统的输出数据分为静态数据和动态数据,静态数据主要是导弹的脱靶量,动态数据是导弹在飞行过程中的特性数据,包括导弹飞行速度、 x 向运动坐标、 y 向运动坐标、 z 向运动坐标、俯仰角、滚转角、偏航角等导弹运动参量。下面来验证仿真试验结果与飞行试验结果是否相容。

3.1 静态数据的验证

采用秩检验法进行评定^[7]。设 X_1, X_2, \dots, X_n 是来自总体 X 的样本,将其样本值进行排序,即有式(1)成立

$$x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)} \tag{1}$$

若 $x_k = x_{(j)}$,则定义 X_k 的秩为 j ,记做 $R_k(X) = j$, j 为 X_k 在顺序统计量中的位置。设总体 X 和 Y 的分布函数分别为 $F(x)$ 和 $G(x)$, X_1, X_2, \dots, X_n 和 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 分别为从 X 和 Y 中抽取的样本,其顺序统计量分别为 $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ 和 $Y_{(1)}, Y_{(2)}, \dots, Y_{(m)}$ 。将两个样本混合,并对这 $(n+m)$ 个样本值进行排序

$$Z_{(1)} \leq Z_{(2)} \leq \dots \leq Z_{(n+m)} \tag{2}$$

同理,若 $X_k = Z_{(j)}$,则称 j 为 X_k 在混合样本中的秩,记做 $R_k(X) = j$;若 $Y_l = Z_{(i)}$,记 $R_l(Y) = i$,称 i 为 Y_l 在混合样本中的秩。设 $m \leq n$,选择 Y 的样本 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 在混合样本中的秩和作为检验统计量,即有

$$T = \sum_{l=1}^m R_l(Y) \tag{3}$$

T 的数学期望和方差分别计算如下

$$E(T) = (m + n + 1)n/2 \tag{4}$$

$$V(T) = (m + n + 1)mn/12 \tag{5}$$

根据式(3)设计秩检验分位表,对于给定的 n

和 m 及显著性水平 α ,在该表中查找满足式(6)的 T_1 和 T_2

$$P\{T_1 < T < T_2; \text{样本}(X_1, X_2, \dots, X_n) \text{ 与 } (Y_1, Y_2, \dots, Y_m) \text{ 相容}\} = 1 - \alpha \tag{6}$$

总结起来,利用秩检验法验证仿真数据与飞行试验数据是否相容的步骤如下:

(1)假设检验。 H_0 :样本 X_1, X_2, \dots, X_n 与 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 相容; H_1 :样本 X_1, X_2, \dots, X_n 与 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 不相容。

(2)对于显著性水平 α ,查秩检验分位表得到 T_1 和 T_2 ,使得 $P(T \leq T_1) = P(T \geq T_2) = \alpha/2$,否定域为 $G\{T; T \leq T_1 \cup T \geq T_2\}$ 。

(3)将两样本混合排序,求样本容量较小的样本中每个分量的秩,由式(3)计算出秩和 T ,判断该值是否落入否定域 G 。若 $T_1 < T < T_2$,则接受原假设,认为仿真试验数据与飞行试验数据相匹配;若 $T \leq T_1$ 或 $T \geq T_2$,则否定原假设,认为仿真试验数据与飞行试验数据不匹配。

3.2 动态数据的验证

采用相关系数法进行评定^[8]。设 x_1, x_2, \dots, x_N 为仿真试验数据, y_1, y_2, \dots, y_N 为飞行试验数据,则两者间的相关系数计算如下

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N y_i^2}} \tag{7}$$

式中, ρ 的取值范围在 $[0, 1]$ 之间。 ρ 越接近于1,表明仿真试验数据与飞行试验数据越相容; ρ 越接近于0,表明仿真试验数据与飞行试验数据越不相容。

4 试验结果分析

对某型激光制导导弹进行半实物仿真和靶场飞行试验,得到10组有效数据。受试验条件的限制,这里所进行的半实物仿真并不是整弹进行的,而是将导弹各部件连接起来进行试验,这样做并不影响仿真结果。下面对半实物仿真试验和靶场飞行试验的结果进行评定。两者脱靶量如表4所示。

对半实物仿真试验和靶场飞行试验的脱靶量进行混合排序并计算秩,结果如表5所示。

表 4 半实物仿真试验与靶场飞行试验脱靶量 cm

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
仿真	53	69	57	51	52	41	50	49	33	29
靶试	52	70	60	63	49	53	47	64	40	48

表5 混合排序及计算秩的结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
仿真	29	33		41			49		50	51	52		53		57				69	
靶试			40		47	48		49				52		53		60	63	64		70
秩	1	2	3	4	5	6	7.5	7.5	9	10	11.5	11.5	13.5	13.5	15	16	17	18	19	20

由式(4,5)计算,可得 $E(T)=105,V(T)=175$ 。取显著性水平 $\alpha=0.05$,由正态分布表查得临界值 $u_{\alpha/2}=1.96$ 。由于仿真试验与飞行试验的样本容量相等,所以对它们分别计算秩和统计量 T :对于仿真试验, $T_{\text{仿真}}=1+2+4+7.5+9+10+11.5+13.5+15+19=92.5$,对于飞行试验, $T_{\text{靶试}}=3+5+6+7.5+11.5+13.5+16+17+18+20=117.5$ 。由于 $\left|\frac{T-E(T)}{\sqrt{V(T)}}\right|\approx 0.95<1.96$,即 $\left|\frac{T-E(T)}{\sqrt{V(T)}}\right|<u_{\alpha/2}$,所以接受原假设,即认为两个样本来自于同一总体,表明半实物仿真试验得到的脱靶量与飞行试验得到的脱靶量是相容的。

利用式(7)对半实物仿真试验和靶场飞行试验的动态数据进行评定,计算出导弹飞行速度、 x 向运动坐标、 y 向运动坐标、 z 向运动坐标、俯仰角、滚转角、偏航角的相关系数分别为 0.88,0.86,0.84,0.85,0.8,0.84,0.83。可以看出,导弹各动态数据间的相关系数值接近于1,表明半实物仿真试验与飞行试验得到的动态数据是相容的。

从以上分析可以看出,无论是静态数据还是动态数据,半实物仿真结果与飞行试验结果均是相容的,从而验证了本文方法的有效性。

5 结束语

针对传统“飞了买”批验收方法效费比较低的问题,本文提出一种基于半实物仿真的导弹批验收试验方法,利用半实物仿真来提升导弹批验收的质量。本文改进了导弹批量抽样方法,克服了“飞了买”抽样方法和以往半实物仿真抽样方法在统计上不独立的缺点;详细论述了半实物仿真批验收试验的工作流程,并给出了对该方法有效性的评定手段。试验结果验证了本文方法能够很好地完成导弹的批验收试验,具有很好的应用前景。

参考文献:

[1] 邢云燕,武小悦,刘琦. 指数寿命系统可靠性增长的动态 Bayes 评估方法[J]. 系统工程学报,2010,25(5): 712-716.
Xing Yunyan, Wu Xiaoyue, Liu Qi. Dynamic

Bayesian evaluation method of reliability growth for exponential life system[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(5): 712-716.
[2] 刘君,李庆民,张志华. Bayes 小子样分析在武器性能评估中的应用[J]. 兵工学报,2008,29(9): 1114-1117.
Liu Jun, Li Qingmin, Zhang Zhihua. Bayesian analyses in small sample circumstance for assessment of weapon performance[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(9): 1114-1117.
[3] 李智生,李俊山,张军团,等. 贝叶斯融合方法在武器小子样试验中的应用[J]. 指挥控制与仿真,2006,28(3): 64-67.
Li Zhisheng, Li Junshan, Zhang Juntao, et al. The application of Bayes fusion method in weapon small-sample test circumstances[J]. Command Control & Simulation, 2006, 28(3): 64-67.
[4] 赵雯,胡德风. 武器系统虚拟试验验证技术发展研究[J]. 计算机测量与控制,2008,16(1): 1-7.
Zhao Wen, Hu Defeng. Towards the technology development of weapon system virtual test and evaluation[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(1): 1-7.
[5] Machin J R. An analysis of the longbow hellfire hardware in the loop lot acceptance plan[M]. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 1994.
[6] 胡正东,曹渊,张士峰,等. 特小子样试验下导弹精度评定的 Bootstrap 方法[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(8): 1493-1497.
Hu Zhengdong, Cao Yuan, Zhang Shifeng, et al. Bootstrap method for missile precision evaluation under extreme small sample test[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(8): 1493-1497.
[7] 单家元,孟秀云,丁艳. 半实物仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
Shan Jiayuan, Meng Xiuyun, Ding Yan. Hardware-in-the-loop simulation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
[8] 刘藻珍. 基于飞行试验数据的仿真模型验证方法的研究[J]. 系统仿真学报,2002,14(3): 281-284.
Liu Zaozhen. Model and simulation validation based on the data of the aero experimentation[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2002, 14(3): 281-284.