

武器装备作战试验设计与分析

方甲永, 徐浩翔, 李永宾, 刘文杰, 盛 晟

(空军工程大学装备管理与安全工程学院, 西安, 710051)

摘要 通过分析作战试验与鉴定的深层次机理, 将基于统计学的试验设计与分析方法应用到作战试验与鉴定过程中, 给出了作战试验设计和分析的步骤, 分析了其相关理论和方法, 通过某型空空导弹的案例分析, 对作战试验设计和分析的步骤和方法进行了验证, 结果表明: 基于统计学的作战试验设计与分析提高了作战试验与鉴定的科学性和严格性。

关键词 作战试验; 试验设计; 试验分析

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.017

中图分类号 TJ01 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0101-05

A Design and Analysis of Operational Test for Weapon Equipment

FANG Jiayong, XU Haoxiang, LI Yongbin, LIU Wenjie, SHENGSheng

(Equipment Management and Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The Statistical test and analysis methodologies are applied to Operational Test and Evaluation (OT&E) by analyzing the mechanism of OT&E. The step of Operational Test and analysis (OT&A) based on Statistical test and analysis methodologies are concluded and the related theory of OT&A is discussed. An OT&A case of Air-to-Air Missile are studied to verify the proposed method. Both the science and stringency of OT&E are improved by applying statistical test and analysis methodologies.

Key words: operational test; test design; test analysis

武器装备作战试验是指在装备全寿命周期过程中, 为确定装备的作战适用性和作战效能, 由独立作战试验机构依据装备对抗性综合演练与训练以及作战任务剖面要求, 构建近似于实战的逼真战场环境, 运用多种试验方法和手段, 对装备进行综合性试验与评估的过程^[1]。武器装备的作战试验是提高武器装备作战能力、优化装备编配运用原则、检验装备体系结构的重要手段, 因此开展武器装备的作战试验迫在眉睫。

理论是行动的指南, 作战试验的理论建设是

作战试验体系建设的首要问题, 是法规制定和标准编制的重要依据。目前, 关于作战试验理论的研究还停留在作战试验概念定义、内涵外延、试验内容、流程方法、以及测试计量手段、评估考核依据等作战试验的方法和技术层次的研究。美军为了实现作战试验的科学性和鉴定的严密性, 2011年1月, 美国防部作战试验鉴定局联合各军种作战试验部门、军种试验鉴定执行官、军事院校和国防部负责试验鉴定的助理部长帮办开展了一项名为《试验科学路线图》的协作研究项目。

收稿日期: 2016-11-08

作者简介: 方甲永(1983—), 男, 河南濮阳人, 讲师, 博士, 主要从事武器装备试验与鉴定研究。E-mail: fjllylike@163.com

引用格式: 方甲永, 徐浩翔, 李永宾, 等. 武器装备作战试验设计与分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(2): 101-105. FANG Jiayong, XU Haoxiang, LI Yongbin, et al. A Design and Analysis of Operational Test for Weapon Equipment[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(2): 101-105.

该项目通过建立相关法规政策、开展教育培训工作,将科学的试验设计方法和严格的统计学方法引入试验鉴定工作中,将基于统计学的“实验设计”(DOE Design of Experiments)方法引入作战试验与鉴定中,加强作战试验鉴定的科学性与严格性,为全面、真实的鉴定武器装备的作战效能和适用性提供科学支撑^[2]。

1 作战试验与鉴定机理

武器装备作战试验与鉴定就是把装备置于真实的作战环境中,检验装备的作战效能与适用性,而检验装备的作战效能及适用性的根本目的就是为了在实战中赢取战争,也就是成功完成装备的使用任务,这也是作战试验与鉴定的根本目的。影响作战使命任务成败的因素主要有两大类:一是作战环境,包括电磁/自然环境、装备体系、战术战法;二是作战装备,包括红蓝双方的装备性能。因此,作战试验与鉴定一是在装备的方案研制阶段提出影响任务完成的装备性能指标,并通过作战试验与鉴定改进研制过程;二是在装备生产定型阶段,通过作战试验提出影响任务完成的装备战术策略,包括配套体系、战术战法,在装备部队前形成一套部队日常训练和作战使用的技战术策略。

依据美国空军上校飞行员约翰·博伊德的能力机动理论,影响作战任务成败的装备技术性能和战术策略,是一致的、相通的,并且是可以相互转换的。能量机动理论的核心思想就是把战术和装备问题统一为能量问题,只要己方的能量累积超过对方,即可赢得作战。按照能量机动理论,作战过程就是由典型的作战事件进行能力累积的过程,能量的累积过程是由装备的能力指标决定的,因此作战过程的能量累积就是把装备能力指标在关键作战事件中的动态变化和累积的过程^[3]。例如飞机的速度就是动能、高度就是势能、而雷达探测的能力为电能。飞行员在空中完成的一系列机动和战术的目的就是完成能量的转移,例如通过飞机的机动可以压制敌机的雷达探测能力,从而提高OODA环中己方的电能。装备的能力指标是动态的、可累积的、也是相对的,无论是飞行员的战术,还是装备之间的协同,以及装备本身的性能参数,最终目的都是为了压制对方的装备能力,提升我方的装备能力。装备能力的累积可以完成作战能量的累积,而作战能量的累积可直接作用和影响作战的结果。因此影响装备能力指标的因素就是影响最终作战结果的因素,进行作战试验与鉴定的目的就是建立

影响因素与作战结果数学关系模型,这也是作战试验与鉴定机理,见图1。

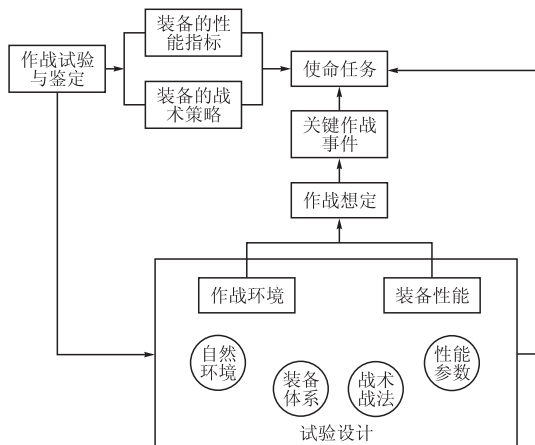


图1 作战试验与鉴定机理

Fig.1 The mechanism of OT&E

在特定的作战任务背景下,影响装备能力指标的因素主要有自然环境、装备体系、战术战法和装备性能参数。为了改进装备研制的过程,得出装备的技战术策略,保证作战试验与鉴定的科学性和严格性,作战想定要全面的覆盖影响装备能力指标的试验因素及其水平。由于作战试验涉及到试验因素及水平众多,在实际的试验过程中,受试验的资源和时间限制,不可能对所有的作战试验因素都开展试验,作战试验设计所要解决的就是以最少的试验资源和次数,最全面化的覆盖作战试验因素及其水平。通过作战试验分析,一是确定影响装备任务完成度的关键试验因素;二是得出能最大化完成使命任务的最优技术性能和战术策略及其相互作用效果。科学的作战试验设计和分析方法可以在有限试验资源的条件下,得出最优的作战试验鉴定结果。

2 作战试验设计与分析步骤

作战试验设计与分析主要有6个部分:确定试验目标、确定评估指标、确定影响因素、进行作战试验设计、试验实施和作战试验分析^[4-10]。6个步骤构成一个循环,通过作战试验与分析的6个步骤,得出满足试验目标的最优装备技术性能和战术策略。

1)确定试验目标。依据装备的作战使命任务,确定本次的试验目标是为了评估装备哪项使命的完成能力。确定试验目标的主要依据为装备的研制总要求和作战需求等方案文件。

2)确定评估指标。依据装备的使命,确定装备需提供哪些能力才能完成相应的使命,即能力评估

指标。评估指标可以从关键性能参数(KPP, Key Performance Parameter),效能量度(MOE Measure of Effectiveness),适用性度量(MOS Measure of Suitability),关键技术参数(CTP Critical Technical Parameters),关键系统属性(KSA Key System Attributes)中选取。评估指标可以是连续变量也可以使离散量,但是评估指标必须意义明确、数据易于采集,并且具有代表性。

3)确定影响因素。确定影响评估指标的因素及其水平,这些因素包括自然环境、电磁环境、目标特性、装备性能、战术战法等因素。有些因素是不可改变的,只能作为定值,有些因素是连续变化的,必须确定其典型的水平值。

4)进行试验设计。在特定的作战任务背景下,综合考虑试验的资源、试验的成本、以及试验的全面性及严格性,对多影响因素及其水平进行试验设计:正交设计、均匀设计、相应曲面设计等,并确定试验因素在作战想定中的变化策略。

5)进行试验。在装备的全寿命不同阶段采用不同的试验方法:数字仿真、半实物、实物试验的方式,依据试验设计方案,结合作战任务,构建作战想定,按照评估指标采集相应的试验数据。

6)进行试验分析。利用试验分析方法:方差分析、回归分析、相应曲面分析等方法,建立试验因素与评估指标的数学模型,确定对试验指标影响程度最大的因素,并分析出最优的试验因素水平组合。

3 作战试验设计与分析方法

作战试验设计与分析属于试验设计领域中的多因素水平优化试验,目的是利用基于试验统计的方法,在降低试验规模的条件下,保证试验结果分析的科学性和严格性。常用的多因素水平优化试验设计方法包括:析因设计、正交设计、均匀设计、回归正交设计、回归旋转设计、响应曲面设计等方法;常用的多因素水平优化试验分析方法包括:极差分析法、方差分析法、回归分析法、响应曲面分析法等方法^[11-12]。其中以正交试验设计与正交试验方差分析应用最为广泛,下面主要讲解正交试验设计和正交试验方差分析方法。

3.1 正交试验设计的方法

正交试验设计是日本统计学家田口玄一提出的,目的是从全面试验的样本点中选取部分有代表性的样本点进行试验,选取的依据是正交表^[13]。正交表的表示方式为: $L_n(t)^q$,其中 L 为正交表代号, n 为试验次数, t 为试验因素水平数,

q 为试验因素数。常用的正交表有2水平正交表: $L_4(2)^3, L_8(2)^7, L_{12}(2)^{11}, L_{16}(2)^{15}$;3水平正交表: $L_9(3)^4, L_{18}(3)^7, L_{27}(3)^{13}$;4水平正交表: $L_{16}(4)^5, L_{32}(4)^9, L_{64}(4)^{21}$;5水平正交表: $L_{25}(5)^6, L_{50}(5)^{11}, L_{125}(5)^{31}$ 。

正交表中的正交性为:①表中任一列,不同的数字出现的次数相同。也就是说每个因素的每一个水平都重复相同的次数。例如因素 A 的水平1、2和3都重复了3次。②表中任意两列,把同一行的两个数字看成有序数字对时,所有可能的数字对(或称水平搭配)出现的次数相同。例如因素 A 和因素 B 的3个水平组合各出现了一次。

除了等水平正交表,还有混合水平的正交表和交互作用正交表。混合水平正交表见文献[14],即因素 A 有4个水平,其他4个因素为2个水平,混合水平正交表同样具备正交性。交互作用正交表见文献[14],试验因素除了考虑单独的因素 A 、 B 和 C ,还考虑了因素的交互因素 $A * B$ 、 $A * C$ 和 $B * C$ 。

3.2 正交试验方差分析方法

方差分析用来判断因素的水平对评估指标的影响是否有显著性差异的统计方法,如果因素水平的变化所引起的试验结果间的差异在误差范围内,可以判断因素水平的变化并不引起评估指标的显著变动;反之,则说明因素水平变化可引起试验结果的显著变动。正交试验方差分析的步骤如下^[15]:

1)计算总的离差平方和:

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

2)计算各因素离差平方和:

$$S_A = \frac{n}{t} \sum_{i=1}^t (k_i^A - \bar{y})^2$$

3)计算试验误差离差平方和:

$$S_e = S_T - \sum S$$

4)计算 F 值:

$$F_A = \frac{\frac{S_A}{p-1}}{\frac{S_e}{(n-1-qt+q)}} \sim F(t-1, n-1-qt+q)$$

5)进行显著性判断:

$F_A \geq F_{0.01}(t-1, n-1-qt+q)$:称试验因素 A 对试验指标有显著的影响; $F_{0.01}(t-1, n-1-qt+q) > F_A \geq F_{0.05}(t-1, n-1-qt+q)$:称试验因素 A 对试验指标有影响; $F_A < F_{0.05}(t-1, n-1-qt+q)$:称试验因素 A 对试验指标无影响。

6)确定最优方案:按照 F 值排序和极差确定最优方案。

7)验证方案:通过指标值估计或试验进行验证。

关于公式中各参数计算方法,可参考4节的案例分析。

4 作战试验设计与分析案例

针对某型雷达制导空空导弹开展作战试验设计与分析。依据图1的步骤开展。

4.1 确定试验目标

某型空空导弹用于在单机或机群空战时,从较远距离和机动条件下,攻击各种有人驾驶飞机、无人驾驶飞机和巡航导弹,同时兼具近距格斗能力。可全天候、全高度、全方位攻击目标,可在陆地或海洋背景下以及在敌机施放干扰条件下完成作战任务。依据使命任务确定某型空空导弹的作战试验目标之一:在单机挂载此导弹的情况下,远距攻击有人驾驶飞机。

4.2 确定评估指标

脱靶量是指导弹引爆时距离目标的实际距离,导弹的毁伤受杀伤半径的影响,这里认为当脱靶量大于10 m的时候,导弹的毁伤效果为0,脱靶量为0的时候毁伤效果为10。为了使导弹完成试验目标中确定的作战试验任务,以导弹的毁伤效果作为评估指标。毁伤效果为连续值,取值范围为 $[0,10]$,定义脱靶量为 $\text{MissDis}(M)$,则毁伤效果为:

$$y = \begin{cases} 10 - M & , M \leq 10 \\ 0 & , M > 10 \end{cases}$$

4.3 确定影响因素

假设导弹自身的性能参数、目标特性以及作战环境是固定的因素,那么影响导弹毁伤效果的因素主要为载机的战术因素。这里选取3个最为关键的因素:相对位置、相对高度、发射距离。对每个因素选取3个水平,发射距离水平1代表20 km、水平2代表50 km、水平3代表80 km。相对高度水平1代表目标高于载机5 km、水平2代表同一高度、水平3代表载机高于目标5 km。相对位置水平1代表侧向攻击、水平2代表尾后攻击、水平3代表迎头攻击。

4.4 进行试验设计

试验因素为3个,每个因素的水平数为3,在不考虑交互作用的情况下,选取正交试验表 $L_9(3)^4$,见表1。 A 因素为发射距离; B 因素为相对位置, C 因素为相对高度。在考虑交互作用情况下,可选取正交试验表 $L_{27}(3)^{13}$ 。

4.5 进行作战试验

采用基于建模仿真的方法开展作战试验,通过

构建载机、空空导弹和目标的数字化模型,按照步骤4的试验设计方案,仿真运行作战想定,采集导弹的毁伤效果数据见表1。

表1 导弹毁伤效果数据

Tab. 1 Damage effect data of missile

试验号	因素			毁伤效果
	A	B	C	
1	1	1	1	6
2	1	2	2	5
3	1	3	3	7
4	2	1	2	3
5	2	2	3	5
6	2	3	1	1
7	3	1	3	5
8	3	2	2	1
9	3	3	1	1

4.6 进行试验分析

1)计算总的离差平方和:

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$n = 9, y = (6, 5, 7, 3, 5, 1, 5, 1, 1), \bar{y} = 3.7778, S_T = 43.5556$ 。

2)计算各因素离差平方和:

$$S_A = \frac{n}{t} \sum_{i=1}^t (k_i^A - \bar{y})^2,$$

$$S_B = \frac{n}{t} \sum_{i=1}^t (k_i^B - \bar{y})^2, S_C = \frac{n}{t} \sum_{i=1}^t (k_i^C - \bar{y})^2,$$

$$\text{式中: } t = 3, k_1^A = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} = 6, k_2^A =$$

$$\frac{y_4 + y_5 + y_6}{3} = 3, k_3^A = \frac{y_7 + y_8 + y_9}{3} = 2.3333, S_A$$

$$= 22.8889$$

同理可得: $k_1^B = 4.6667, k_2^B = 3.6667, k_3^B = 3, S_B = 4.2222, k_1^C = 2.6667, k_2^C = 3, k_3^C = 5.6667, S_C = 16.2222$ 。

3)计算试验误差离差平方和:

$$S_e = S_T - \sum SS_e = S_T - S_A - S_B - S_C = 43.5556 - 22.8889 - 4.2222 - 16.2222 = 0.2222$$

4)计算 F 值:

$$F_A = \frac{\frac{S_A}{p-1}}{\frac{S_e}{(n-1-qt+q)}} \sim F, (t-1, n-1-qt+q),$$

$$F_A = 103 \sim F(2, 2)$$

$$F_B = \frac{\frac{S_B}{t-1}}{\frac{S_e}{(n-1-qt+q)}} \sim F, (t-1, n-1-qt+q),$$

$$F_B = 19 \sim F(2, 2)$$

$$F_C = \frac{\frac{S_C}{t-1}}{\frac{S_e}{(n-1-qt+q)}} \sim F, (t-1, n-1-qt+q),$$

$$F_C = 73 \sim F(2, 2)$$

5) 进行显著性判断: $F_{0.01}(2, 2) = 99$, $F_{0.05}(2, 2) = 19$. $F_A > F_{0.01} > F_C > F_B \geq F_{0.05}$, 所以, 因素 A: 发射距离对毁伤效果具有显著性影响, 因素 B: 相对位置和因素 C: 相对高度对毁伤效果具有影响。

6) 确定最优方案: 按照 F 值排序和极差确定最优方案。 $k_1^A = 6$, $k_2^A = 3$, $k_3^A = 2.3333$, $k_1^B = 4.6667$, $k_2^B = 3.6667$, $k_3^B = 3$, $k_1^C = 2.6667$, $k_2^C = 3$, $k_3^C = 5.6667$, $S_C = 16.2222$,

所以, 最优方案为: $A_1B_1C_3$, 即在发射距离 20 km, 高于目标 5 km, 侧向攻击, 毁伤效果最佳。

7) 验证方案: 通过指标值估计或试验进行验证。表 1 中并没有方案 $A_1B_1C_3$ 的试验结果, 首先通过指标值估计试验结果:

$$y = \mu + a_1 + b_1 + c_3 + \varepsilon$$

式中: μ 为毁伤效果的数学期望; a_1 为因素 A 的水平 1 对毁伤效果影响; b_1 为因素 B 的水平 1 对毁伤效果影响; c_3 为因素 C 的水平 3 对毁伤效果影响; ε 为试验本身引起的误差, $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。

$E(y) \sim \mu$, $E(k_1^A - y) \sim a_1$, $E(k_1^B - y) \sim b_1$, $E(k_3^C - y) \sim c_3$, 因此 $E(k_1^A + k_2^B + k_3^C - 2y) = y$, $y \approx 8.7778$ 。

5 结语

武器装备的作战试验与鉴定涉及到众多的研究领域, 包括装备知识、作战理论、仿真建模、系统工程、军事运筹、作战指挥等, 其中试验设计与分析的理论与方法, 是支撑作战试验与鉴定的基础科学之一, 是保证作战试验与鉴定科学性与严格性的重要理论支撑, 美军专门成立了相关结构开展试验与鉴定的科学性研究, 并把试验设计学作为其核心理论。目前, 我军对于试验与鉴定的基础理论的研究才刚刚起步, 还有许多科学性问题需要解决。本文通过分析作战试验与鉴定的深层次机理, 将试验统计学应用到作战试验设计与分析中, 并以典型案例验证作战试验设计与分析方法的应用。本文对促进作战试验与鉴定基础支撑理论的研究, 以及作战试验与鉴定人才的培养理论体系建设都具有重要的推动作用。

参考文献 (References):

[1] 王凯, 赵定海, 闫耀东, 等. 武器装备作战试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.

- WANG K, ZHAO D H, YAN Y D, et al. Operational Test of Weapon Equipment[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [2] Catherine Warner. Report on the Test Science Road map[R]. DOT&E 201307, 2013.
- [3] HAMMOND G T. The Mind of War: John Boyd and American Security[M]. [S. l.]: Smithsonian Books, 2004.
- [4] Department of Defense of the United States. The Director, Operational Test and Evaluation Master Plan [R]. DODI 5000.02, 2015.
- [5] MCOTEA. Operational Test&Evaluation Manual [R]. OMB 0704-0188, 2011.
- [6] AFOTE. Operational Test Processes and Procedures [R]. AFOTECMAN 99-101, 2011.
- [7] AFOTE. AFOTEC Operational Suitability Test and Evaluation Guide[R]. AFOT ECPAM 99-104, 2010.
- [8] Office of the Under Secretary of Defense for Personnel and Readiness. Operational Test and Evaluation Report[R]. FY2006-FY2011, 2011.
- [9] 洛刚, 康丽华, 吕威. 关于我军开展武器装备作战试验的思考[J]. 装备学院学报, 2014, 25(3): 103-106.
- LUO G, KANG L H, LYV W. Consideration for Some Issues of Equipment Operational Test by PLA [J]. Journal of Equipment Academy, 2014, 25(3): 103-106. (in Chinese)
- [10] 罗小明, 何榕, 朱延雷. 装备作战试验设计与评估基本理论研究[J]. 装备学院学报, 2014, 28(6): 1-7.
- LUO X M, HE R, ZHU Y L. Research on Design of Equipment Operational Test and Basic Theory of Evaluation[J]. Journal of Equipment Academy. 2014, 28(6): 1-7. (in Chinese)
- [11] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- LI Y Y, HU C R. Experiment Design and Data Processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [12] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法及数据分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- HE W, XUE W D, TANG B. Optimized Test Design Method and Data Analyze[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- CHEN K. Test Design and Analyze [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [14] 刘文卿. 实验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- LIU W Q. Test Design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [15] MONTGOMERY D C. Design and Analysis of Experiments[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2005.

(编辑: 姚树峰)