

红外抗干扰评估序贯均匀试验设计方法研究

陈 鞭¹, 伍友利¹, 周 浩², 甘跃鹏¹, 刘同鑫¹, 吴 鑫¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 95889 部队, 甘肃酒泉, 735018)

摘要 为了从全局出发, 不断缩小研究范围, 高效地进行红外抗干扰评估探索工作, 提出采用序贯均匀试验设计方法开展研究。利用该方法设计红外抗干扰评估试验方案, 通过数字仿真系统进行试验, 在试验研究过程中可以掌握每阶段的详细信息并视情况作出相应调整, 直至得到最终满意的试验域和脱靶量。试验结果表明: 该方法有效可行, 缩小了研究范围, 与其他方法的比较也显示出该方法收敛快、效果好等独特优点, 为红外抗干扰评估研究提供了一种方法思路。

关键词 红外抗干扰评估; 序贯均匀试验设计; 试验域

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2022.05.003

中图分类号 TJ760.1 **文献标志码** A **文章编号**: 2097-1915(2022)05-0016-06

Research on the Sequential Uniform Design Method of Infrared Anti-Jamming Evaluation

CHEN Bian¹, WU Youli¹, ZHOU Hao², GAN Yuepeng¹, LIU Tongxin¹, WU Xin¹

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Unit 95889, Jiuquan 735018, Gansu, China)

Abstract This research is proceeding in all cases from the overall situation to continuously narrow the research scope and efficiently carry out the exploration of infrared anti-jamming evaluation, a sequential uniform experimental design method is proposed to carry out the research. The infrared anti-jamming evaluation test scheme is designed by adopting the method, and the test is carried out by the digital simulation system. In the process of experimental research, the detailed information of each stage can be mastered and adjusted appropriately according to the situation, until the final satisfactory test area and miss distance are obtained. The results show that the method is effective and feasible, and the research scope is gradually reduced. Compared with the other methods, this method is unique in advantages, fast on convergence, and good in effect, and provides a method for the study of infrared anti-jamming evaluation.

Key words infrared anti-jamming evaluation; sequential uniform design; test area

强抗干扰能力、高制导精度、机动灵活和高效费比等优良特点, 使红外空空导弹成为非常有效的近距空战杀伤武器^[1]。但是, 有进攻就会有防守, 各式

各样的红外干扰技术相继产生且迅猛发展, 使得红外空空导弹的作战环境变得更加复杂, 加大其命中目标的难度^[2-3]。为分析红外空空导弹的性能, 需要

收稿日期: 2021-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61973253)

作者简介: 陈 鞭(1997—), 男, 湖北咸宁人, 硕士生, 研究方向为红外抗干扰评估。E-mail: 1916454941@qq.com

引用格式: 陈鞭, 伍友利, 周浩, 等. 红外抗干扰评估序贯均匀试验设计方法研究[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(5): 16-21. CHEN Bian, WU Youli, ZHOU Hao, et al. Research on Sequential Uniform Design Method of Infrared Anti-Jamming Evaluation [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(5): 16-21.

在复杂的作战环境下对其进行全面有效的抗干扰评估^[4]。在评估中,除了利用历史数据外,还需进行必要的试验,无论是打靶试验还是仿真试验,若采用合理的试验设计方法,则能降低评估成本、提高评估效率。因此,探索一种高效的试验设计方法,对进行红外抗干扰评估来说极其重要。

当前,由于红外抗干扰评估中涉及到的因素多、随机性和非线性强,使得多数研究仅通过选取典型对抗场景进行^[5-8],但这不能全面了解和反映红外弹的整体抗干扰性能。因此,要采用恰当的试验设计方法,设计出适量的对抗场景数,使红外抗干扰评估更加充分。目前,析因、正交、均匀和拉丁超立方等,都是经常被用到的试验设计方法^[9]。方丹等^[10]采用完全析因试验设计生成试验方案,研究红外成像导引头的抗干扰性能,此时仅考虑 6 个因素,每个因素都有 3 个不同值,对于这种因素数和水平数少的情形,析因试验设计是可行的。牛得清等^[11]采用拉丁超立方试验设计生成试验方案,通过仿真试验评估红外弹的抗干扰效能,此时考虑 12 个因素,且水平数较多,设计并进行了 50 000 次仿真试验,在研究中需要消耗更多的时间和精力。张凯等^[12]给出了在红外抗干扰评估中各种试验设计方法的具体应用,为红外弹的评估试验提供参考。总之,析因试验设计虽然全面,但不适用于红外抗干扰因素多的情形;正交设计和均匀设计的设计表的构造相对困难,且试验次数有限;拉丁超立方试验设计能产生大量试验点,但影响研究效率。因此,考虑序贯均匀试验设计,既能从全局出发,一步步缩小研究范围,为后续研究提供参考和便利,又能减少试验次数,提高收敛速度和研究效率。

本文将通过分析影响红外弹性能的干扰因素,来构建数字仿真系统,然后考虑采用序贯均匀试验设计方法,一步一步研究红外抗干扰评估问题,不断缩小研究范围,并与其他试验设计方法进行比较,突出该方法的独特优点。

1 红外抗干扰分析与仿真系统构建

1.1 红外抗干扰分析

在红外空空导弹攻击目标的过程中,目标会通过投掷诱饵、采取机动等策略来干扰导弹,从而摆脱导弹以保护自身,同时,对抗环境、对抗态势等也会影响导弹的命中率,因此,导弹需要采取各种有效的抗干扰手段以提升在复杂对抗环境下的命中率。影响红外弹抗干扰性能的因素有很多^[13],主要的干扰因素如图 1 所示。

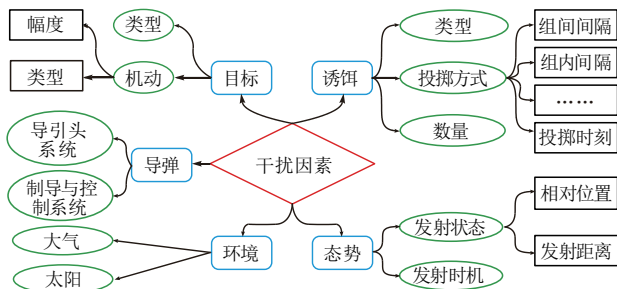


图 1 影响红外弹抗干扰性能的因素

由图 1 知,干扰红外弹的因素主要来自外部环境、战术参数和自身性能 3 个方面。红外成像导引头根据目标的红外图像进行目标识别并确定其方位,随后将此信息传输到导弹制导与控制系统,引导红外弹向目标飞去。目标除了机动逃逸外,还会释放诱饵来干扰导弹。诱饵的剧烈燃烧会在红外成像导引头中生成干扰图像,从而以假目标诱骗导引头,迫使导弹识别不出真目标。同时,不利的对抗态势以及太阳、云层等环境因素,也能严重影响导弹的最终抗干扰效果。因此,想要在复杂的干扰环境下提升红外弹的精确打击能力,不仅要在改善导引头性能和导弹机动性能这些硬件上下功夫,还要优化导引头中的目标识别算法,同时要配以合理的作战使用策略。

1.2 仿真系统构建

利用 MATLAB2018b 和 Visual Studio2010,再结合前文关于红外抗干扰的分析,构建如图 2 所示的红外抗干扰试验仿真系统。

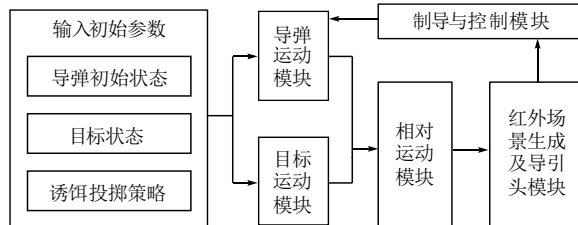


图 2 仿真系统结构图

在仿真系统中,导弹和目标都是六自由度模型,诱饵是三自由度模型,其除了没有动力外,与导弹、目标的模型类似^[14]。同时,导弹采用经典的比例导引法进行制导。在导引头模块中,由于导引头是通过识别图像特征而确定目标,因此仿真系统选取的主要图像特征有能量、能量变化率、平均灰度和长宽比。此外,自然环境等基础模块并没有在图中标出,有地面、云层、天空等背景以及大气传输模型。

该仿真系统中,导弹初始参数有初始速度、框架角、进入角、弹目距离等。其中,导弹初始速度取决于载机速度,将其设为 1.0Ma。框架角会影响到导弹发射时对目标的搜索定位,将其设为 0°以确保导弹发射时能搜索定位到目标。进入角分为水平进入

角和垂直进入角,决定了弹目初始对抗态势。垂直进入角表明导弹向上或向下打击目标,但在实际中,向上或向下都不利于攻击目标,通常是在导弹与目标大致处于同一水平面的时候发射导弹,因此将其设为 0° 。而水平进入角表示导弹从目标尾后到目标头部,即 $0^\circ\sim 180^\circ$ 的范围内攻击目标。且弹目距离受初始对抗态势的影响,其范围为 $3\sim 10$ km。考虑到目标实际速度受机动方式的影响,不是单独可控的,因此将目标初始速度设为 $0.8Ma$,飞行高度设为 $5\ 000$ m,且机动完成后速度趋于 $0.8Ma$ 。目标的机动类型值取为 $1,2,3,4,5$,分别表示无机动、右转弯、左转弯、跃升和俯冲5种机动方式。对于诱饵投掷模块,需要考虑诱饵总数、单次投掷数、每组诱饵数、投掷时刻、组内间隔、组间间隔、投掷速度和投掷角度等因素。综上,该红外抗干扰试验仿真系统的输入输出因素如表1所示。

表1 仿真系统的输入输出因素

因素/单位	取值范围	类型	
		输入	输出
诱饵总数/枚	{12,24,36,48}	√	
单次投掷数/枚	{1,2,3,4}	√	
每组诱饵数/枚	{4,6,12}	√	
诱饵投掷时刻/s	[0,5]	√	
组内时间间隔/s	[0,0.5]	√	
组间时间间隔/s	[0,1]	√	
诱饵投掷速度/(m·s ⁻¹)	[0,50]	√	
投掷水平角/(°)	[0,180]	√	
投掷垂直角/(°)	[-90,90]	√	
导弹进入角/(°)	[0,180]	√	
目标机动类型	{1,2,3,4,5}	√	
弹目初始距离/km	[3,10]	√	
导弹脱靶量/m	[0,+∞)		√

2 红外抗干扰评估序贯均匀试验设计

序贯均匀设计通过多次试验才能够实现预期目标,其下一步试验取决于上一步的试验结果,非常适用于预先没有多阶段试验计划的探索性试验。同时,结合均匀设计在试验域内均匀布点使数据更具代表性的特点,使探索试验更加全面。

2.1 均匀设计

均匀设计是一种使试验点均匀散布在试验域内的确定性试验方法,由方开泰、王元通过联合多元统计与数论而创立。其作为一种稳健的试验设计方法,与拉丁超立方等随机抽样方法一样,都是目前常用的计算机试验设计方法。

均匀设计来源于总体均值模型,其一般采用偏

差来表示试验点在试验域内分布的均匀性,目前受到广泛使用的偏差有中心化偏差、星偏差、可卷偏差等^[15-16]。在实际的应用中,一般通过具体的均匀设计方法求出均匀性较好的均匀设计表,用于后续研究。当前,好格子点法及其改进方法都是构造均匀设计表的经典方法,同时,也不断涌现出大量改进的、创新的均匀设计方法。经过专家学者们的不懈努力,目前已求得许多在不同偏差下优良的均匀设计表,并整理成册,便于在工作研究中进行选用。

在利用均匀设计解决实际问题时,首先要确定研究对象涉及的因素及其水平,然后根据因素和水平选择合适的均匀设计表,接着由设计表得到试验方案,然后通过随机化方法确定试验顺序用于后续试验,并记录结果,最后分析结果数据,并得到结论。

2.2 序贯均匀试验设计

序贯均匀设计的核心思想就是把原试验域内的问题,转化到比原试验域小很多的小试验域内进行求解。即对于在试验域 V 内的未知目标函数 $f(x)$,先用均匀设计在 V 内均匀布点,设计出的试验点数通常不大,然后进行试验,并由试验结果按一定的准则来缩小试验域,随后在较小的试验域内进行相同的均匀设计,并进一步缩小试验域,如此一步一步进行下去,一直到精度满足要求为止^[17]。

在红外抗干扰评估中,若以未知函数 $f(x)$ 最小化为目标,也就是使导弹脱靶量最小化,则序贯均匀试验设计的算法如下^[18]。

Step 1 初始化试验域。令:

$$\begin{cases} t=1 \\ V^{(1)}=[a^{(1)},b^{(1)}]=V=[a,b] \\ a^{(1)}=a=(a_1,a_2,\dots,a_s) \\ b^{(1)}=b=(b_1,b_2,\dots,b_s) \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 表示算法进行到第 t 阶段; a, b 分别为起始试验域的下限和上限; s 为因素的总个数,由表1可知,共有12个输入因素,则 $s=12$ 。第 i 个输入因素 x_i 的范围是 $a_i \leq x_i \leq b_i, i=1,2,\dots,s, a_i, b_i$ 分别为第 i 个输入因素取值范围的下、上限,且每个因素取值后构成的水平组合即为一个试验点 x ,也就是一个具体的对抗场景,即 $x=(x_1,x_2,\dots,x_s)$ 。

由表1可知,诱饵总数(x_1)、单次投掷数(x_2)、每组诱饵数(x_3)和目标机动类型(x_{11})是离散因素,为了方便得到试验域,也为了后续能顺利得到试验方案并进行试验域的更新等工作,分别用意义相同的连续因素 k_1, k_2, k_3 和 k_{11} 进行代替,关系如下:

$$x_1 = f(k_1) = \begin{cases} 12, & 0 \leq k_1 \leq 18 \\ 24, & 18 < k_1 \leq 30 \\ 36, & 30 < k_1 \leq 42 \\ 48, & 42 < k_1 \leq 54 \end{cases} \quad (2)$$

$$x_2 = f(k_2) = \begin{cases} 1, & 0 \leq k_2 \leq 1.5 \\ 2, & 1.5 < k_2 \leq 2.5 \\ 3, & 2.5 < k_2 \leq 3.5 \\ 4, & 3.5 < k_2 \leq 5 \end{cases} \quad (3)$$

$$x_3 = f(k_3) = \begin{cases} 4, & 0 \leq k_3 \leq 5 \\ 6, & 5 < k_3 \leq 9 \\ 12, & 9 < k_3 \leq 15 \end{cases} \quad (4)$$

$$x_{11} = f(k_{11}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq k_{11} \leq 1.5 \\ 2, & 1.5 < k_{11} \leq 2.5 \\ 3, & 2.5 < k_{11} \leq 3.5 \\ 4, & 3.5 < k_{11} \leq 4.5 \\ 5, & 4.5 < k_{11} \leq 6 \end{cases} \quad (5)$$

再结合表 1 中各因素的取值范围,即可得初始试验域 V 的上、下限。

Step 2 生成均匀设计方案。即在试验域 $V^{(t)} = [a^{(t)}, b^{(t)}]$ 内,求一个均匀设计 $P^{(t)}$,其试验点数,即试验次数为 n_t ,也就是要寻找一个均匀设计表 $U_n(q^s)$ 。其中, s 为因素的总个数, q 为因素的水平数, n 为试验点的个数,则 $n_t = n$ 。随后由均匀设计表即可得到具体的试验方案 $X^{(t)}$ 。

在序贯均匀设计算法中,为降低计算复杂度,在每个阶段中,把均匀设计的试验次数通常取为 $n_1 > n_2 = n_3 = n_4 = \dots$,使第一阶段在初始试验域内分布的试验点较多,从而有较大概率接近全局最小值点,而后面阶段就可以适当减少试验次数。考虑到红外抗干扰评估中有 12 个输入因素,且在实际中优良的均匀设计表随着因素数和水平数的增大设计难度也不断加大,因此,从目前已有的性能良好的均匀设计表中,选择试验次数和水平数均较大的设计表 $U_{120}(10^{12})$ 作为第 1 阶段的均匀设计,选择设计表 $U_{50}(5^{12})$ 作为后续阶段的均匀设计。得到均匀设计表后并不能直接用于试验,必须将其中的水平值转化成红外抗干扰评估中的实际因素值才行。具体的处理方法是,将均匀设计表中的正整数对应为对应因素区间的第几等份的中心值,由此可得具体的试验方案。

Step 3 更新最小近似值。由 Step 2 设计出的试验方案进行试验,然后从试验结果中选取试验点 $x^{(t)}$,即某一具体对抗场景,及其对应的响应值 $T^{(t)}$,即输出因素导弹脱靶量,且 $x^{(t)} \in X^{(t)} \cup \{x^{(t-1)}\}$,使得:

$$T^{(t)} = f(x^{(t)}) \leq f(y), \forall y \in X^{(t)} \cup \{x^{(t-1)}\} \quad (6)$$

式中: $x^{(t-1)}$ 是上一阶段试验中最小近似值对应的试验点,且 $x^{(0)}$ 为 \emptyset ; $T^{(t)}$ 和 $x^{(t)}$ 分别为目标函数最小值的近似值和对应自变量的近似值。

该步的最小值点,是从本阶段的试验设计方案以及上一阶段的最小值点中选取的,保证每一阶段

选取的最小值点的响应值都是单调不增的,从而使目标函数一步步趋近最小值。

Step 4 判断是否停止。令:

$$\begin{cases} z^{(t)} = (z_1, z_2, \dots, z_s) = \frac{b^{(t)} - a^{(t)}}{2} \\ ma = \max z^{(t)} = \max_{1 \leq i \leq s} z_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: z_i 为第 i 个因素的区间半径,即区间长度的一半; ma 为所有因素区间半径中的最大值,若 $ma < \sigma$,其中 σ 为提前设置好的一个较小的数,则表明试验域 $V^{(t)}$ 足够小,同时 $T^{(t)}$ 和 $x^{(t)}$ 是能够接受的,此时就可以终止算法,否则就要转到下一步。

该步取试验域所有维度的区间半径中的最大值作为评判标准,即试验域要足够小,而不是简单的以相邻两步的响应值之差的绝对值进行判断,避免响应值不减小的情况下直接终止算法,而此时的响应值又很大,达不到最小化目标函数的目的。考虑到 12 个输入因素的区间半径中,3 个与角度有关的因素最大,为 90,因此暂时将 σ 设为 6。当算法终止时,试验域相对于初始时已足够小,若对最终结果不满意,可进一步调整 σ ,继续运行算法。

Step 5 求解下一阶段的试验域。由本阶段获得的 $x^{(t)}$ 和 $z^{(t)}$,以及 a, b ,可得新试验域为 $V^{(t+1)} = [a^{(t+1)}, b^{(t+1)}]$,其中:

$$\begin{cases} a_i^{(t+1)} = \max(x_i^{(t)} - \lambda z_i^{(t)}, a_i) \\ b_i^{(t+1)} = \min(x_i^{(t)} + \lambda z_i^{(t)}, b_i) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, s$; λ 为压缩比,通常取为 0.5。

该步试验域的求解方法,保证了新试验域一直在原始试验域内。新的试验域求出后,令 $t = t + 1$,然后转到 Step 2,进入到下一阶段。

至此,红外抗干扰评估试验已设计完成,再结合仿真系统,就可开展红外抗干扰评估工作。以上序贯均匀试验设计算法的示意图见图 3。

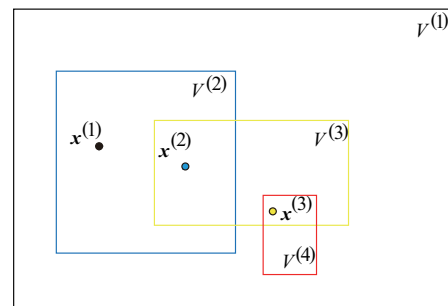


图 3 序贯均匀设计示意图

3 仿真试验

3.1 试验及结果分析

采用上一节序贯均匀试验设计方法,并结合仿真系统进行试验,则红外抗干扰评估试验结果如表 2 所示。由表 2 知,该算法在第 5 阶段终止,其中,

第1阶段试验次数为120,后续4个阶段的次数均为50,总试验次数为320。随着算法的进行,导弹脱靶量不断减小,终止时最小值达到1.018 m。

表2 序贯均匀设计试验结果

阶段 t	试验次数 n_t	最小脱靶量 $T^{(t)}$ /m	最大区间 半径
1	120	1.409	90
2	50	1.409	45
3	50	1.088	22.5
4	50	1.076	11.25
5	50	1.018	$5.625 < \sigma$

每阶段的试验域如图4所示,随着序贯均匀设计算法的进行,试验域不断缩小,且向着脱靶量最小值的方向缩小。算法终止时,结合式(2)~(5),试验域为:诱饵总数48枚,单次投掷数1枚,每组诱饵数12枚,诱饵投掷时刻1.84~2.15 s,组内时间间隔0.25~0.29 s,组间时间间隔0.95~0.99 s,诱饵投掷速度46.1~47.7 m/s,诱饵投掷水平角 $57.4^\circ \sim 68.6^\circ$,投掷垂直角 $57.4^\circ \sim 68.6^\circ$,导弹进入角 $48.4^\circ \sim 59.6^\circ$,目标机动类型3,即左转弯机动,弹目初始距离5.9~6.4 km。

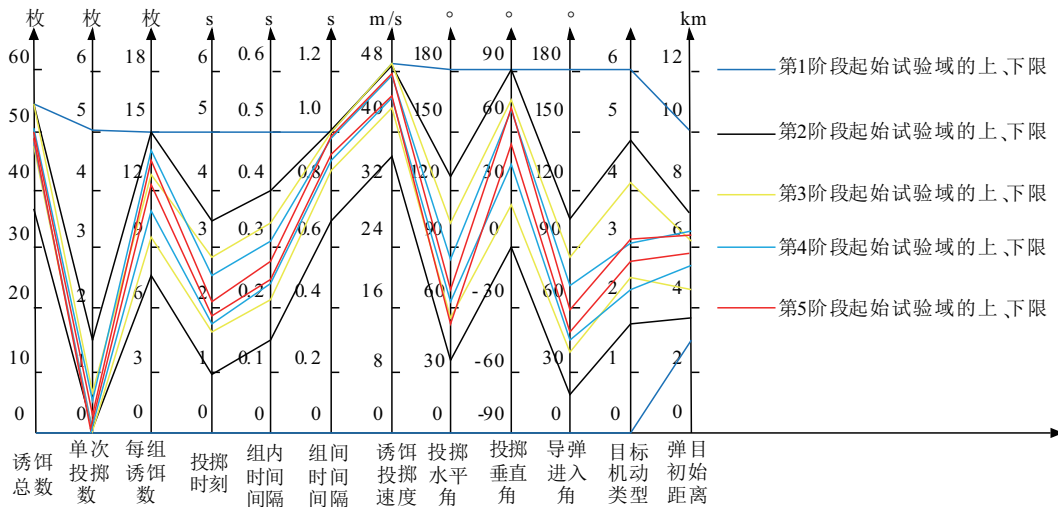


图4 每阶段的试验域

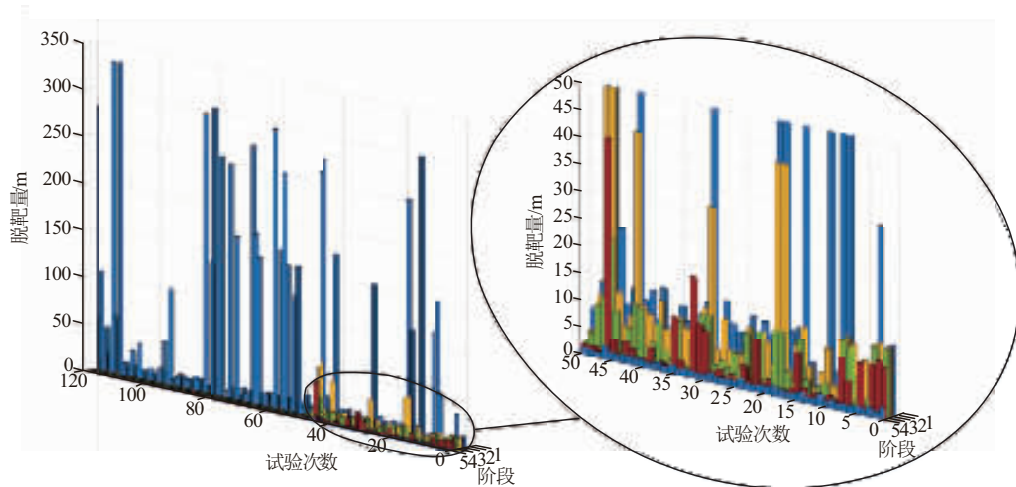


图5 每阶段的脱靶量

每阶段的导弹脱靶量如图5所示,随着序贯均匀设计算法的进行,每阶段的脱靶量大体上呈逐渐减小的趋势。算法终止时,也即在第5阶段的起始试验域内,导弹的脱靶量不超过2.5 m。

3.2 与其它试验设计方法的比较

为了更进一步分析序贯均匀设计在红外抗干扰

评估应用中的特点,将其与均匀设计和拉丁超立方设计2种试验设计方法进行比较。其中,均匀设计采用设计表 $U_{160}(10^{12})$,而拉丁超立方设计采用生成速度快且空间填充性较好的快速平移传播拉丁超立方设计^[19-20],即联合平移传播和局部连续枚举法产生100 000个试验点。2种试验方法均使用文中构建的仿真系统进行试验,结果见表3。

表3 各种试验设计方法的比较

序号	试验设计方法	试验次数	最小脱靶量/m
1	均匀设计	160	1.878
2	序贯均匀设计	320	1.018
3	快速平移传播拉丁超立方设计	100 000	0.975

由表3可知,单独采用均匀设计时,虽然试验次数最少,节省评估时间,但同时,试验次数少也意味着试验点靠近最小值点的概率低,最终导致该方法的最小脱靶量在3种方法中最大。同时,均匀设计方法只能给出一些脱靶量较小的试验点,即红外弹抗干扰效果较好的对抗场景,而不能像序贯均匀设计那样,给出抗干扰效果好的一片对抗区域。对于快速平移传播拉丁超立方设计,生成了100 000个试验点,充满了整个试验域,最终得到的最小脱靶量在3种方法中最小。但是,大量的试验点需要进行多次试验,不管采用何种方法,终究是要消耗较多的时间和资源。同时,序贯均匀设计与快速平移传播拉丁超立方设计的效果相当,其最小脱靶量之间仅相差4.3 cm,而序贯均匀设计只需进行320次试验就能得到,收敛速度快。

总之,序贯均匀设计的思想方法是值得借鉴的,即对于未知领域的研究,先采用适当的方法进行探索,划分或缩小研究范围,然后再在小范围或感兴趣的范围内进行研究。

4 结语

在红外抗干扰评估中,高效的试验设计方法,能降低评估成本、提高评估效率。为此,本文研究了序贯均匀试验设计方法。该方法从全域出发,将均匀设计融入到序贯思想中,来进行全面的探索性研究。仿真表明,该方法收敛快、效率高,有效可行。但是本文研究的因素还不够全面,今后将加入环境背景等因素,以及探索更优良的试验方案,从而展开更加全面、深入的研究。

参考文献

[1] 黄鹤松,童中翔,李建勋,等.基于空战评估的红外空空导弹功能仿真[J]. 红外与激光工程,2015,44(3):803-809.

[2] 李慧,吴军辉,陈前荣,等.红外导引头注入式闭环试验的边界能力及一致性[J]. 光学精密工程,2016,24(4):913-921.

[3] LI N, HUAI W Q, WANG S D, et al. A Real-Time Infrared Imaging Simulation Method with Physical Effects Modeling of Infrared Sensors [J]. Infrared

Physics & Technology,2016,78:45-57.

[4] AVDELIDIS N P, GAN T H, IBARRA C C, et al. Infrared Thermography as a Nondestructive Tool for Materials Characterisation and Assessment [C]// Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIII. [S. l.]: SPIE, 2011: 308-314.

[5] 高卫,孙奕帆.精确制导武器系统电子干扰效果试验与评估[M]. 北京:国防工业出版社,2018:119-123.

[6] 胡朝晖,闫杰.红外空空导弹抗干扰性能评估方法研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2008,9(4):44-49.

[7] 李慎波,李韬锐,童中翔,等.导弹战术参数对面源红外诱饵干扰效能影响[J]. 红外与激光工程,2018,47(7):133-142.

[8] 徐洋,方洋旺,伍友利,等.红外诱饵干扰下导引头视线角速度跳变特征建模[J]. 红外与激光工程,2019,48(5):110-120.

[9] 王泉,董维浩,刘新爱,等.新型红外空空导弹抗干扰能力评估分析[J]. 航天电子对抗,2019,35(3):16-19.

[10] 方舟,周永恒,崔少辉,等.红外成像导引头抗干扰性能评估方法[J]. 火力与指挥控制,2020,45(6):141-144.

[11] 牛得清,伍友利,徐洋,等.红外空空导弹抗干扰效能评估建模[J]. 北京航空航天大学学报,2021,47(9):1874-1883.

[12] 张凯,张邵宇,杨东升,等.红外制导导弹抗干扰能力仿真鉴定评估技术[J]. 上海航天,2019,36(4):83-89.

[13] 牛得清,伍友利,徐洋,等.点源红外诱饵干扰下环境复杂度量建模[J]. 红外与激光工程,2020,49(2):0204003.

[14] 吴鑫,伍友利,高翔,等.基于FP增长算法的红外抗干扰评估指标简约方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(1):99-104.

[15] 徐静安,彭东辉.第六讲_均匀设计应用案例解读[J]. 上海化工,2016,41(10):13-18.

[16] 贺平,林共进,刘民千,等.均匀设计理论与应用[J]. 中国科学:数学,2020,50(5):561-570.

[17] 方开泰,刘民千,周永道.试验设计与建模[M]. 北京:高等教育出版社,2019:234-239.

[18] 蒋孟灵,李婉玉.基于序贯均匀设计的支持向量机超参数的优化方法[J]. 乐山师范学院学报,2019,34(12):18-23.

[19] ZHU H G, LIU L, LONG T, et al. A Novel Algorithm of Maximin Latin Hypercube Design Using Successive Local Enumeration[J]. Engineering Optimization,2012,44(5):551-564.

[20] VIANA F, VENTER G, BALABANOV V. An Algorithm for Fast Optimal Latin Hypercube Design of Experiments [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,2010,82(2):135-156.

(编辑:徐楠楠)