

3-15-2024

## Research on Hybrid Experimental Scheme Design for Combat Simulation

Fei Liu

*School of Software Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China,  
feiliu@scut.edu.cn*

Peng Lai

*Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China*

Yingbo Lu

*Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China*

Min Wang

*Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Research on Hybrid Experimental Scheme Design for Combat Simulation

## Abstract

**Abstract:** Combat simulation experimental design refers to sampling the values of experimental factors based on baseline combat scenarios using various experimental design methods and then generating a set of experimental schemes for the sequential simulation. The complexity of combat simulation, such as numerous experimental factors and distinct factor types, including continuous and discrete numeric types, poses several challenges and requires efficient hybrid experimental design methods. To address these issues, this paper conducts a study on the hybrid experimental scheme design for combat simulation. This paper gives a brief classification and review of experimental design methods and presents three hybrid experimental scheme design methods with their merits and drawbacks analyzed. The paper introduces an experimental design system for combat simulation, including its software architectural design, functions, and experimental design procedure and demonstrates and analyzes the application of three hybrid experimental scheme design methods in a combat scenario. The tool and methods presented in this paper will effectively guide the experimental design problem in complex combat simulation with discrete and mixed type factors, and it has been applied and verified in several simulation projects.

## Keywords

combat simulation, scenario, experimental scheme design, hybrid experimental design, experimental design system

## Authors

Fei Liu, Peng Lai, Yingbo Lu, Min Wang, and Zhifeng Lu

## Recommended Citation

Liu Fei, Lai Peng, Lu Yingbo, et al. Research on Hybrid Experimental Scheme Design for Combat Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 735-742.

# 作战仿真混合实验方案设计研究

刘飞<sup>1</sup>, 赖鹏<sup>2</sup>, 陆营波<sup>2</sup>, 汪敏<sup>2</sup>, 陆志洋<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 软件学院, 广东 广州 510006; 2. 上海机电工程研究所, 上海 201109)

**摘要:** 作战仿真实验方案设计指的是基于基准的作战想定, 利用各种实验设计方法对实验因子的取值进行抽样, 形成一组实验方案, 供后续仿真使用。作战仿真的复杂性包括实验因子数目众多, 因子类型多样, 既有连续数值类型, 又有离散数值类型, 这对高效的混合实验设计方法提出了迫切的需求。针对这些需求, 对作战仿真混合实验方案设计技术展开了研究。对实验设计方法做了简单的分类和综述, 给出了 3 种混合实验方案设计方法的流程及其优缺点分析; 介绍了一个面向作战仿真的实验设计系统, 包括软件架构设计、功能组成及实验设计流程; 以一个作战想定为例, 演示和分析了 3 种混合实验方案设计方法的具体应用。上述方法和工具将有效指导复杂作战仿真中具有离散和混合类型因子的实验设计问题, 并在多个仿真项目得到了应用和验证。

**关键词:** 作战仿真; 想定; 实验方案设计; 混合实验设计; 实验设计系统

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)03-0735-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1309

**引用格式:** 刘飞, 赖鹏, 陆营波, 等. 作战仿真混合实验方案设计研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(3): 735-742.

**Reference format:** Liu Fei, Lai Peng, Lu Yingbo, et al. Research on Hybrid Experimental Scheme Design for Combat Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 735-742.

## Research on Hybrid Experimental Scheme Design for Combat Simulation

Liu Fei<sup>1</sup>, Lai Peng<sup>2</sup>, Lu Yingbo<sup>2</sup>, Wang Min<sup>2</sup>, Lu Zhifeng<sup>2</sup>

(1. School of Software Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Combat simulation experimental design refers to sampling the values of experimental factors based on baseline combat scenarios using various experimental design methods and then generating a set of experimental schemes for the sequential simulation. The complexity of combat simulation, such as numerous experimental factors and distinct factor types, including continuous and discrete numeric types, poses several challenges and requires efficient hybrid experimental design methods. To address these issues, *this paper conducts a study on the hybrid experimental scheme design for combat simulation*. This paper gives a brief classification and review of experimental design methods and *presents three hybrid experimental scheme design methods with their merits and drawbacks analyzed*. The paper introduces an experimental design system for combat simulation, including its software architectural design, functions, and experimental design procedure and demonstrates and analyzes the application of three hybrid experimental scheme design methods in a combat scenario. The tool and methods presented in this paper will effectively guide the experimental design problem in complex combat simulation with discrete and mixed type factors, and it has been applied and verified in several simulation projects.

**Keywords:** combat simulation; scenario; experimental scheme design; hybrid experimental design;

收稿日期: 2022-11-03 修回日期: 2023-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(61873094)

第一作者: 刘飞(1976-), 男, 教授, 博士, 研究方向为建模与仿真、人工智能。E-mail: feiliu@scut.edu.cn

experimental design system

## 0 引言

作战仿真实验是指按照规定的作战意图和作战方案,进行大规模仿真实验,从实验结果分析作战效果、作战的关键要素等问题。作战仿真实验通常表现为以下特征:参与实体数量多、实体之间交互复杂、作战样式多样、想定样本空间巨大。作战仿真实验通常遵循以下的主要步骤<sup>[1-2]</sup>:①确定作战仿真实验需求;②确定作战实验科目,并针对每个科目设计基础作战想定;③针对作战想定,进行具体实验方案设计;④针对每个实验方案,运行仿真,获取仿真结果;⑤对实验结果进行评估,并确定是否达到作战仿真实验目的。以上过程可能需要多次迭代,才能最终实现作战仿真实验的目的。

本文将关注上述过程的实验方案设计问题展开研究。实验方案设计指的是基于基准的作战想定,利用各种实验设计方法对实验因子的取值进行设计。作战仿真实验的上述特点对实验方案生成提出了若干挑战:①实验因子数量众多,因此需要探索如何筛选因子以及如何产生一个优化的小规模实验方案;②实验因子既有连续数值类型,又有离散数值类型,因此大多数传统实验设计方法都已不能适用,需要探索新的混合实验设计方法;③作战仿真实验设计的过程变得非常复杂,开发强大的工具来支持这一过程已成为必需。

本文针对上述问题对作战仿真混合实验方案设计技术展开研究。首先对实验设计方法做一个简单的综述,然后给出了3种混合实验方案生成方法,接下来描述一个面向作战仿真的实验设计系统,最后给出案例分析。

## 1 实验设计方法简述

传统的实验设计方法大概可分为3类<sup>[3-4]</sup>:

①析因设计,又分为全面析因设计和部分析因设计,其中前者考虑所有因子各水平的全部组合,后者则从全部组合中筛选出部分具有代表性的实验样本,代表性方法包括正交设计、均匀设计等。②响应曲面法<sup>[5]</sup>,即集实验设计、回归分析为一体的序贯性实验设计方法。③拉丁超立方抽样方法(Latin hypercube sampling, LHS),以及后来大量的改进算法,如各种最优LHS<sup>[6-10]</sup>。上述这些方法要么只能考虑离散的因子,要么只能考虑连续的因子,很难两者兼顾。

为了同时考虑定性(或离散取值)的因子,文献[11]提出了分片拉丁超立方体设计(sliced Latin hypercube designs, SLHD),将拉丁超立方体设计分为多个片段,每个片段都是一个LHD,分别对应离散型因子的一种水平组合,同时整体设计也是一个LHD,整体设计及各分片都具有最优一维投影均匀性。后来又出现了一些对SLHD的各种改进算法,例如两层SLHD<sup>[12-13]</sup>。SLHD既可处理定性和定量同时存在的因子,也可应用于分批计算机实验和交叉验证计算机实验等。然而,SLHD也有明显的不足,即需要考虑的离散因子不能多,否则会造成样本空间过大<sup>[14]</sup>。

为缓解这一问题,文献[15]进一步提出了最大投影设计方法,该方法能够处理同时存在连续型因子和离散型因子的情况,更进一步地,将离散型因子分为离散数值型因子和标称型因子两种,设计结果在整体设计空间和所有低维投影里都有良好的空间填充性。相比之下,分片拉丁超立方体设计需要将标称型因子的设计部分重复 $t$ 次进行拼接,而最大投影设计则不需要,故能支持更多离散型因子<sup>[16]</sup>。

## 2 混合实验方案设计方法

为支持复杂作战仿真实验,本文考虑了以下3种混合类型因子抽样设计方法:

## (1) 基于多种实验设计方法的混合分组因子抽样方法

该方法将待处理的因子集  $S$  分为  $M$  个子集  $\{S_i\}$ , 其中  $i=1, 2, \dots, M$ , 每个子集根据其特点可采用不同的抽样方法(如析因设计、正交设计、均匀设计、拉丁超立方设计、蒙特卡罗设计等), 从而为每个子集产生抽样结果  $A_i$ 。最后利用乘法原理, 将各个子集产生的抽样结果进行组合  $\prod_{i=1}^M A_i$ , 得到一个混合类型因子抽样结果。具体流程如图1所示。

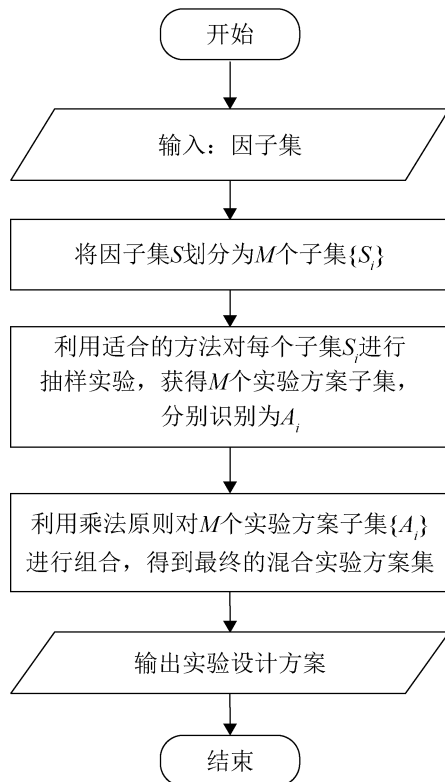


图1 基于多种实验设计方法的混合分组因子抽样流程  
Fig. 1 Mixed grouping factor sampling process based on multiple experimental design methods

## (2) 基于分片拉丁超立方设计的混合因子抽样实验

分片拉丁超立方设计<sup>[7]</sup>给出了另外一种混合因子抽样实验方法, 其流程如图2所示。假设有  $p$  个离散型因子和  $k$  个连续型因子。首先, 对离散型

因子可采用析因设计、正交设计等多种方法, 产生  $t$  种水平组合  $D_{t \times p}^v$ 。对于分片拉丁超立方设计来说, 则有  $t$  个分片。对于每个分片, 可以指定实验次数  $m$ , 因此对于  $k$  个连续因子每个分片可以产生  $m \times k$  的拉丁超立方设计。最后将各个分片的设计结果进行拼接, 可以得到一个  $mt \times (k+p)$  的总的混合抽样设计  $D_{mt \times (k+p)}$ 。

传统的拉丁超立方设计仅适用于连续型因子的实验, 分片拉丁超立方设计运用分片性质能够同时处理连续型和离散型因子, 同时兼顾了整体设计和分片设计的空间填充性。方法的局限性在于当分片数过大时会导致实验次数过多, 算法运行效率较低。而且, 与第一种方法相比, 其产生的实验方案的数目并没有降低, 而且对于连续因子, 只能采用拉丁超立方设计, 而不能选择其他方法, 如均匀设计、蒙特卡罗设计等。

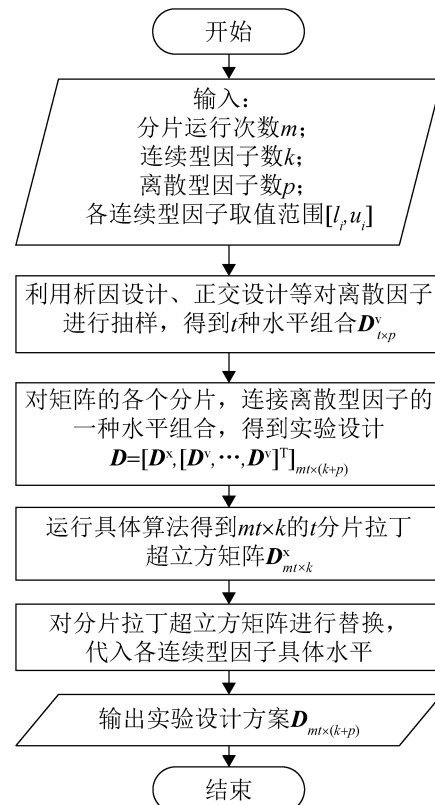


图2 分片拉丁超立方实验设计流程  
Fig. 2 Sliced Latin hypercube experimental design process

### (3) 基于最大投影实验设计的混合因子抽样实验

最大投影实验设计<sup>[8-9]</sup>是另外一种混合因子抽样实验，其设计流程如图3所示。最大投影实验设计同样同时考虑离散类型和连续类型因子。假设有 $p$ 个离散型因子和 $k$ 个连续型因子。首先，对离散型因子同样可采用析因设计、正交设计等多种方法，产生 $t$ 种水平组合 $D_{t \times p}^v$ 。然后利用实验扩展次数 $q$ 对离散水平组合数进行扩展，得到总的实验次数 $n=t \times q$ ，为减少实验次数， $q$ 通常取1。接下来对连续因子进行拉丁超立方抽样，得到随机矩阵 $D_{n \times k}^x$ ，从而得到拼接后的矩阵 $D_{n \times (k+p)} = [D_{n \times k}^x, D_{n \times p}^v]$ 。最后利用最大投影算法对其进行优化，得到最终的实验设计方案 $D_{n \times (k+p)}$ 。通过测试可知，最终结果在整体设计空间和所有因子的二维投影里都有良好的空间填充性。

与分片拉丁超立方设计相比，2种方法都能同时处理连续型和离散型因子，并且设计有良好的空间填充性。不同的是， $t$ 分片拉丁超立方设计需要将离散型因子的设计部分重复 $t$ 次进行拼接，而最大投影设计则不需要，故能处理更多的离散型因子。另外，分片拉丁超立方设计具有全维和一维投影均匀性，而最大投影设计可以实现所有 $p$ 维投影均匀性，一般取 $p=2$ ，即具有二维投影均匀性。

通过上述分析，可以看出，3种方法各有优缺点。表1给出了3种方法的比较分析。

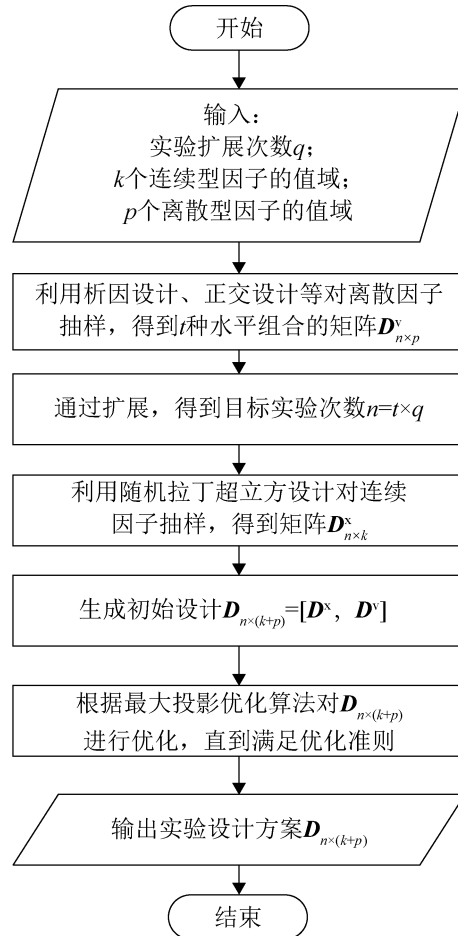


图3 最大投影实验设计流程

Fig. 3 Experimental design process of maximum projection

表1 混合实验设计方法的比较

Table 1 Comparison of hybrid experimental design methods

方法	优点	缺点
基于多种实验设计方法的混合分组因子抽样实验	分组灵活,可将因子分为任意离散和连续子集,每个子集采用任何一种实验设计方法	产生实验方案数目过多,需要运行大量仿真实验;样本空间原则上不满足整体均匀性
基于分片拉丁超立方设计的混合因子抽样实验	为每种离散类型因子的水平组合设计一个不同的拉丁超立方分片;充分考虑每个分片和整体的空间填充均匀性	只能处理较少的离散类型因子;分片数大时实验次数过多,产生实验方案数目过多
基于最大投影实验设计的混合因子抽样实验	可产生较少的实验方案数目;能处理更多的离散类型因子;设计结果有良好的整体均匀性和二维投影均匀性	方法本身较复杂,但通过封装在工具中,可以克服

### 3 面向作战仿真的实验设计系统开发

针对实际的复杂仿真作战, 本文开发了一个功能强大的实验设计系统。该工具主要用于开展武器装备体系作战仿真实验方案的设计、生成及样本数据的准备, 实现想定参数因子读取、因子属性设置、因子筛选设计、因子抽样设计、实验方案生成、实验结果分析、实验结果展示和实验方法扩展等功能, 为武器装备体系作战仿真实验及问题分析提供支撑软件。

#### 3.1 软件架构设计

本项目开发的软件属于单机软件, 因此本文采用流行的分层架构设计思想, 将软件系统分为4个抽象层: 用户界面层、业务层、算法层、持久化层, 如图4所示。每层都包含一组特定的子任务, 每层为下一层提供更高层次的服务。

(1) 用户界面层: 该层负责向用户显示信息和接受用户指令。

(2) 业务层: 实现软件系统的业务逻辑。

(3) 算法层: 提供业务层所需的各种算法。

(4) 持久化层: 实现数据的持久化服务。

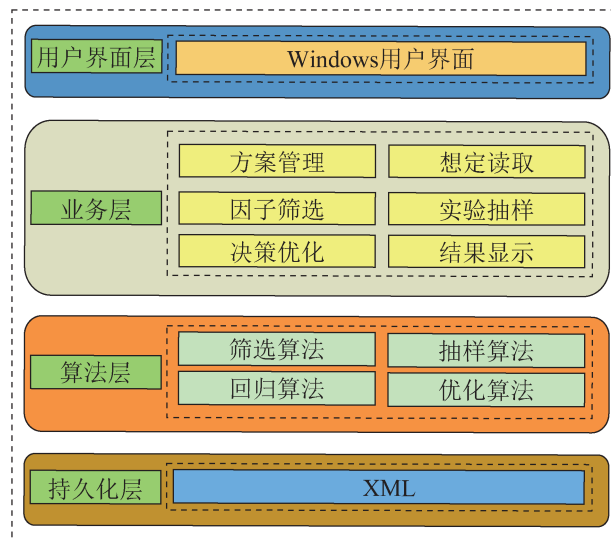


图4 实验设计工具的架构设计

Fig. 4 Architectural design of experimental design tool

#### 3.2 组成

实验设计系统的组成如图5所示, 主要包括以下6个模块:

(1) 方案管理: 支持实验方案的新建、打开、编辑、保存及删除等功能。

(2) 因子管理: 加载联合仿真想定资源库中的想定文件资源, 并以列表形式展示。

(3) 筛选实验设计: 提供顺序分枝法 SB (sequencia bifurcation)、SB-X(SB-extended)等筛选实验方法, 实现实验因子的初步筛选。

(4) 抽样实验设计: 提供均匀设计、正交设计、拉丁超立方、分片拉丁超立方等实验抽样方法, 实现因子的有效抽样。

(5) 实验决策优化: 提供直观分析、回归分析、目标优化分析等功能, 实现实验方案的优选。

(6) 分析结果显示: 支持使用丰富的图表形式可视化显示实验分析结果。

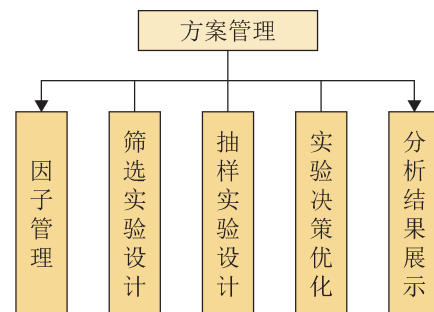


图5 实验设计工具的组成

Fig. 5 Composition of experimental design tool

系统采用一个流程化的设计思路, 即先读入仿真想定, 然后顺序执行筛选实验、抽样实验、结果分析与优化、结果展示等多个流程, 直到获得满意优化的实验方案。这一过程可能需要与仿真执行工具多次交互才能达到最终的目标。

#### 3.3 作战仿真实验方案设计流程设计

针对复杂作战仿真实验, 利用上述开发的实验设计系统, 本文设计了如图6所示的实验方案设计流程。

步骤 1: 基于经验的初步筛选。利用专家的先验知识以及历史实验信息, 针对工程级、交战级、任务级等各层次模型, 确定实验因素模板。利用该实验因素模板, 对基准作战想定进行第一次筛选。

步骤 2: 执行筛选实验。针对步骤 1 初步筛选的结果, 进一步利用顺序分枝法 SB、SB-X 等, 通过与仿真运行工具进行多次交互, 对实验因子进行深入的筛选, 确定出真正有价值的因子。这一过程根据仿真系统的复杂性, 可能耗费较长的时间。

步骤 3: 执行抽样实验。针对上述筛选的有价值的因子, 利用均匀设计、正交设计、拉丁超立方等方法, 开展抽样实验。抽样结果导出为想定格式的方案文件, 供仿真运行工具使用, 产生仿真结果。

步骤 4: 执行实验分析优化。针对上述仿真运行结果, 首先回归模型, 利用  $p$  值进一步筛选因子。然后构造多目标优化函数, 利用其获得优化的因子水平值, 进而生成实验方案, 将其输出给仿真执行工具, 继续获取仿真运行结果, 从而得到最终经过优化的仿真实验方案。

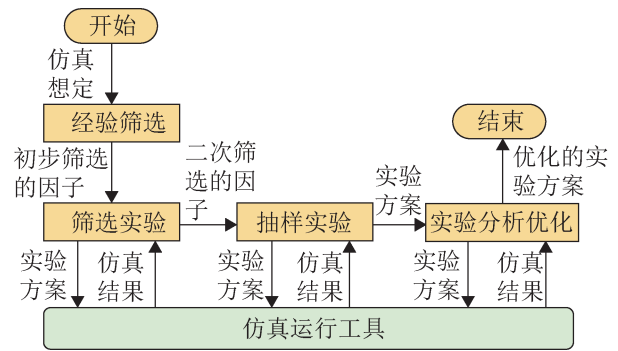


图 6 作战仿真实验设计流程

Fig. 6 Design process of combat simulation experiment

### 3.4 实例分析

目前实验设计系统完全支持上述 3 种混合实验设计方法。下面使用一个防空作战想定的实验设计来演示本文的方法。

在防空导弹武器系统评估任务分析中重点考察探测跟踪能力、系统反应能力、火力拦截能力、目标突防能力。通过特征分析, 本文确定了表 2 所示的 8 项指标来进行实验设计, 以分析防空导弹武器系统作战效能<sup>[17]</sup>。其中, 单目标发射导弹数量  $X_1$  和使用火力通道数  $X_2$  离散类型的因子, 各取 2 个水平, 分别为 1 和 2 以及 4 和 8, 并采用正交设计方法。  $X_3 \sim X_8$  为连续类型的因子, 每个因子符合均匀分布, 采用拉丁超立方设计。

表 2 因子水平设置  
Table 2 Factor level setting

编号	名称	因子类型	因子水平数	水平设置
$X_1$	单目标发射导弹数量	离散	2	1 和 2
$X_2$	使用火力通道数	离散	2	4 和 8
$X_3$	雷达发现概率	连续	4	均匀分布[0.7,0.9]
$X_4$	战斗准备时间	连续	4	均匀分布[1,8]
$X_5$	单发导弹发射时间间隔	连续	4	均匀分布[1,4]
$X_6$	拦截斜距	连续	4	均匀分布[6 000,25 000]
$X_7$	发射导弹时间间隔	连续	4	均匀分布[1,4]
$X_8$	目标 RCS	连续	4	均匀分布[0.1,1.9]

(1) 基于多种实验设计方法的混合分组因子抽样方法

针对  $p=2$  个离散因子子集  $\{X_1, X_2\}$ , 利用正交设计和表 2 给出的 2 个水平设置, 可以得到其正交

设计表, 在此记为  $A_1 = \{1,4;2,4;1,8;2,8\}$ 。针对  $k=6$  个连续因子子集  $\{X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$ , 利用拉丁超立方设计, 产生了 4 种方案的因子水平表, 记为  $A_2$ 。接下来采用乘法原理进行 2 个因子表  $A_1$  和



$A_2$ 的组合, 得到 $4 \times 4 = 16$ 种总的实验方案, 如表3所示。由此可以看出, 该种混合实验设计方法直接采用乘法原理, 会产生非常多的实验方案, 并且产生的总的因子水平表在整体上不满足填充性和均匀性准则。但其优点在于可灵活采用各种方法的组合。

表3 基于多种实验设计方法的混合分组因子抽样结果  
Table 3 Results of mixed grouping factor sampling based on multiple experimental design methods

序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
1	1	4	0.82	7.63	1.03	19 243.90	2.95	1.18
2	1	4	0.71	3.16	3.20	23 245.30	3.29	0.95
3	1	4	0.80	1.07	2.06	9 980.30	1.68	1.68
4	1	4	0.90	4.99	3.72	13 361.40	2.40	0.36
5	2	4	0.85	6.43	2.59	21 724.10	1.36	1.28
6	2	4	0.79	4.18	2.27	12 964.40	3.75	1.88
7	2	4	0.75	4.77	3.27	6 653.18	2.01	0.56
8	2	4	0.85	2.33	1.25	18 859.50	2.81	0.24
9	1	8	0.77	6.98	3.99	15 934.30	2.51	1.60
10	1	8	0.80	1.88	2.95	11 445.40	3.91	0.48
11	1	8	0.73	3.77	1.88	20 513.20	1.38	0.70
12	1	8	0.89	5.54	1.62	7 220.82	2.15	1.06
13	2	8	0.84	1.68	3.62	14 975.50	1.00	0.85
14	2	8	0.72	5.95	1.40	8 472.10	1.90	1.50
15	2	8	0.75	7.34	2.70	16 781.10	3.23	0.18
16	2	8	0.87	3.26	2.38	24 000.90	3.58	1.41

(2) 基于分片拉丁超立方设计的混合因子抽样实验

同样, 针对 $p=2$ 个离散因子子集 $\{X_1, X_2\}$ , 利用正交设计和表2给出的二水平设置, 可以得到具有 $t=4$ 方案的正交设计表, 在此记为 $\{1,4;2,4;1,8;2,8\}$ 。对于分片拉丁超立方设计来说, 此处的 $t$ 即为分片数。

对于每个分片, 针对 $k=6$ 个连续因子子集 $\{X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$ , 本文执行 $m=4$ 次随机实验, 4个分片共计得到 $4 \times 4 = 16$ 种实验方案, 如表4所示。可以看出, 分片拉丁超立方设计同样会产生大量的实验方案。但是, 与第1种方法相比, 该种方法产生的总的因子水平表在整体上能够满足填充

性和均匀性准则。

表4 基于分片拉丁超立方设计的混合因子抽样实验结果  
Table 4 Results of mixed factor sampling based on sliced Latin hypercube design

序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
1	1	4	0.81	4.29	3.78	9 735.99	1.22	1.49
2	1	4	0.80	1.96	2.83	24 577.30	3.91	1.00
3	1	4	0.71	5.31	1.25	11 319.60	2.98	1.29
4	1	4	0.88	6.67	1.91	17 812.00	2.29	0.29
5	2	4	0.77	6.09	3.32	9 283.48	1.59	0.20
6	2	4	0.83	6.73	2.48	22 826.20	2.08	1.58
7	2	4	0.71	1.00	3.10	16 319.30	2.63	1.39
8	2	4	0.89	3.28	1.68	12 413.50	3.70	0.82
9	1	8	0.74	7.37	2.91	21 340.30	3.17	0.61
10	1	8	0.85	3.67	3.46	13 680.00	3.45	1.71
11	1	8	0.78	1.76	2.06	19 881.10	1.51	0.46
12	1	8	0.84	5.54	1.48	7 050.16	1.82	1.12
13	2	8	0.86	4.57	3.91	21 564.20	2.44	0.75
14	2	8	0.81	3.15	1.18	18 788.40	2.74	1.88
15	2	8	0.73	7.82	2.24	14 725.40	1.15	1.05
16	2	8	0.76	2.42	2.66	7 396.35	3.30	0.37

(3) 基于最大投影实验设计的混合因子抽样实验

同样, 针对 $p=2$ 个离散因子子集 $\{X_1, X_2\}$ , 利用正交设计和表2给出的二水平设置, 可以得到具有 $t=4$ 种方案的正交设计表, 在此记为 $\{1,4;2,4;1,8;2,8\}$ 。

对于上述 $t$ 种方案中的每一种方案, 最大投影设计针对 $k=6$ 个连续因子子集最少可执行一种随机试验(即令 $q=1$ ), 因此最终的混合因子水平表只有4种方案, 如表5所示。可以看出, 最大投影设计显著降低了总的实验方案数目, 并且同样能够保持整体上的填充性和均匀性。

因此, 在使用实验设计系统时, 可以根据设计因子的类型和数据等因素, 灵活的选择适合的混合实验设计方法, 产生需要数目的实验方案。对于因子数目多、实验次数要求少的情况, 可尽量使用最大投影设计方法。

表5 基于最大投影实验设计的混合因子抽样实验结果  
Table 5 Results of mixed factor sampling experiment based on maximum projection experimental design

序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
1	1	4	0.90	5.02	2.96	19 565.80	3.76	1.07
2	2	4	0.76	1.82	1.69	17 919.90	2.00	0.15
3	1	8	0.80	6.60	1.50	21 431.90	2.20	1.64
4	2	8	0.73	5.55	2.45	22 360.10	3.18	0.39

## 4 结论

针对复杂作战仿真实验设计面临的问题和挑战, 本文给出了一个系统化的解决方案, 包括混合因子抽样方法、实验设计工具、复杂作战仿真实验设计流程等。这一解决方案将有效辅助复杂作战仿真实验设计的执行和开展。在下一阶段, 团队将继续针对复杂作战仿真实验设计存在的问题进行深入挖掘, 并研究新的方法以及集成进现有的工具之中。

## 参考文献:

- [1] 孔晨妍, 崔鹏. 联合作战仿真实验设计方法研究[C]//第八届中国指挥控制大会论文集. 北京: 兵器工业出版社, 2020: 674-679.
- [2] 杨雪生, 刘云杰, 李梦汶. 联合作战仿真实验的设计与开发[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1522-1526.  
Yang Xuesheng, Liu Yunjie, Li Mengwen. Design and Development of Simulation Experimentation for Joint Warfare[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(7): 1522-1526.
- [3] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [4] Wang Shuo, Lü Liye, Du Li, et al. An Improved LHS Approach for Constrained Design Space Based on Successive Local Enumeration Algorithm[C]//2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 896-899.
- [5] Navin Mahto, Satyanarayanan R Chakravarthy. Response Surface Methodology for Design of Gas Turbine Combustor[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118449.
- [6] Chen R B, Hsieh D N, Hung Y, et al. Optimizing Latin Hypercube Designs by Particle Swarm[J]. Statistics and Computing, 2013, 23(5): 663-676.
- [7] 耿国庆, 王成皓, 段利斌, 等. 一种改进的约束域拉丁方抽样算法及工程应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(10): 58-66.  
Geng Guoqing, Wang Chenghao, Duan Libin, et al. Formulation and Engineering Application of an Improved Constrained Domain Latin Hypercube Sampling Algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2020, 34(10): 58-66.
- [8] Shang Xiaobing, Chao Tao, Ma Ping, et al. An Efficient Local Search-based Genetic Algorithm for Constructing Optimal Latin Hypercube Design[J]. Engineering Optimization, 2020, 52(2): 271-287.
- [9] Wang Lin, Sun Fasheng, Lin D K J, et al. Construction of Orthogonal Symmetric Latin Hypercube Designs[J]. Statistica Sinica, 2018, 28(3): 1503-1520.
- [10] Su Zheren, Wang Yaping, Zhou Yingchun. On Maximin Distance and Nearly Orthogonal Latin Hypercube Designs[J]. Statistics & Probability Letters, 2020, 166: 108878.
- [11] Qian P Z G. Sliced Latin Hypercube Designs[J]. Journal of the American Statistical Association, 2012, 107(497): 393-399.
- [12] Chen Hao, Yang Jinyu, Lin D K J, et al. Sliced Latin Hypercube Designs with Both Branching and Nested Factors[J]. Statistics & Probability Letters, 2019, 146: 124-131.
- [13] Wang Xiaodi, Chen Xueping, Lin D K J. Sliced Symmetrical Latin Hypercube Designs[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2022, 218: 59-72.
- [14] Ba Shan, Myers W R, Brenneman W A. Optimal Sliced Latin Hypercube Designs[J]. Technometrics, 2015, 57(4): 479-487.
- [15] Joseph V R, Gul E, Ba Shan. Designing Computer Experiments with Multiple Types of Factors: the MaxPro Approach[J]. Journal of Quality Technology, 2020, 52(4): 343-354.
- [16] Kang Xiaoning, Deng Xinwei. Design and Analysis of Computer Experiments with Quantitative and Qualitative Inputs: a Selective Review[J]. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, 2020, 10(3): e1358.
- [17] 祝颂, 钱晓超, 陆营波, 等. 基于XGBoost的装备体系效能预测方法[J]. 空天防御, 2021, 4(2): 1-6.  
Zhu Song, Qian Xiaochao, Lu Yingbo, et al. An XGBoost-based Effectiveness Prediction Method of Equipment System-of-systems[J]. Air & Space Defense, 2021, 4(2): 1-6.