

doi: 10.7690/bgzdh.2015.08.022

武器装备作战运用实验设计中因子聚合研究

姚雾云, 黄贡献, 张翼鹏

(南京炮兵学院炮兵作战实验室, 南京 211132)

摘要: 针对高层次武器装备作战运用仿真实验中的模型参数组合爆炸的问题, 提出对实验因子进行聚合的仿真实验设计思路。首先提出了一种向下分解与向上聚合相结合的聚合实验因子构建思路, 给出了基于长度量的实验因子聚合模型, 研究了基于矢量量化的聚合实验因子值域确定方法, 为系统级(部队级)武器装备作战运用仿真实验设计提供有益参考。

关键词: 系统级武器装备; 作战运用; 仿真实验; 因子聚合

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Research on Factor Aggregating in Experiment Design of Artillery Weaponry Operational Application

Yao Wuyun, Huang Gongxian, Zhang Yipeng

(Artillery Operation Test Room, Nanjing Artillery Academy, Nanjing 211132, China)

Abstract: Aiming at combinatorial explosion of model parameter in the high level simulation experiment of weaponry operational application, presents a new simulation experiment design method based on aggregate-factor. Firstly, it proposes a new method to construct the aggregated factor which combines the downward-decompose with upward-aggregate method together, then presents the aggregating model of the experiment factors based on length of basic factors. Finally, research on a method to determine the domain of the aggregated factor based on vector quantization. It gives a good consultation for the design of simulation experiment of weaponry operational application on system level.

Keywords: system level; weaponry operational application; simulation experiment; factor aggregation

0 引言

武器装备作战运用的研究对象涵盖单件、单套、系统和部队等多个层次的武器装备^[1], 因此, 单层次作战实验无法满足全部武器装备作战实验研究的需要, 特别是在进行系统级、部队级的武器装备作战运用实验时, 由于仿真中的实体种类和数目众多, 大大增加了仿真实验的复杂度。在此类仿真实验中, 实验因子设计存在的主要问题有: 一是由于武器装备作战运用仿真实验中模型参数众多, 全面实验设计必将导致维数爆炸; 二是如果面向低层次模型参数进行实验因子设计, 则难以把握高层次实验问题本质^[2-4]。

为了解决这个问题, 笔者借鉴作战实验设计一般方法, 同时还考虑了武器装备作战运用仿真实验的多分辨率、多层次等特点, 提出了对实验因子进行聚合的仿真实验设计思路。

1 聚合实验因子设计

1.1 基本概念

基础实验因子指武器装备作战运用实验中与模

型输入参量直接对应的实验因子。

聚合实验因子指具有一定军事含义、由多个基础实验因子聚合而成的实验因子。

在系统(部队)级武器装备作战运用实验中, 对模型中的基础实验因子进行合理有效的处理, 面向系统级武器装备作战运用研究聚合实验因子, 更适合研究武器装备体系问题: 一方面能将实验因子的数量限定允许范围, 从而有效避免全面实验设计时的维数爆炸问题; 另一方面符合军事人员认知特性, 能更精准把握影响实验结果的关键影响因素。

1.2 聚合实验因子构建

1.2.1 基本思路

当前, 聚合实验因子的构建方法主要有分解映射法和聚合归并法 2 种^[5]。

分解映射法是一种自顶向下处理方法, 基本原理是由军事总体描述向具体概念逐步分解细化, 直至找到具有明确军事含义的实验因子与具体底层模型参数之间的映射关系。这种方法存在的问题是, 由于映射关系的描述不完整, 导致聚合实验因子分解时出现不一致性, 即同一个聚合实验因子, 在不

同条件下，对应不同的基础实验因子。

聚合归并法是一种自底向上处理方法，其基本原理是根据底层模型参数的性质进行合并处理，得到具有一定抽象意义的聚合实验因子。这种方法存在的主要问题是，由于只对概念相近的因子进行聚合，导致可能聚合出没有任何军事意义的实验因子。

针对上述 2 种方法的不足，笔者提出了一种将两者结合的聚合实验因子构建思路：

- 1) 根据作战实验想定，相关军事领域专家确定对实验结果有重要影响的军事层面的因素；
- 2) 基于 Delphi 法，将确定的影响因素与被选出的基础实验因子进行对应，构建映射参数集；
- 3) 根据映射结果确定每个映射参数的中心和范围(半径)；
- 4) 依据规则对各参数进行聚合判断，构建聚合实验因子；

具体处理过程如图 1 所示，其核心在于第 3)步和第 4) 步。

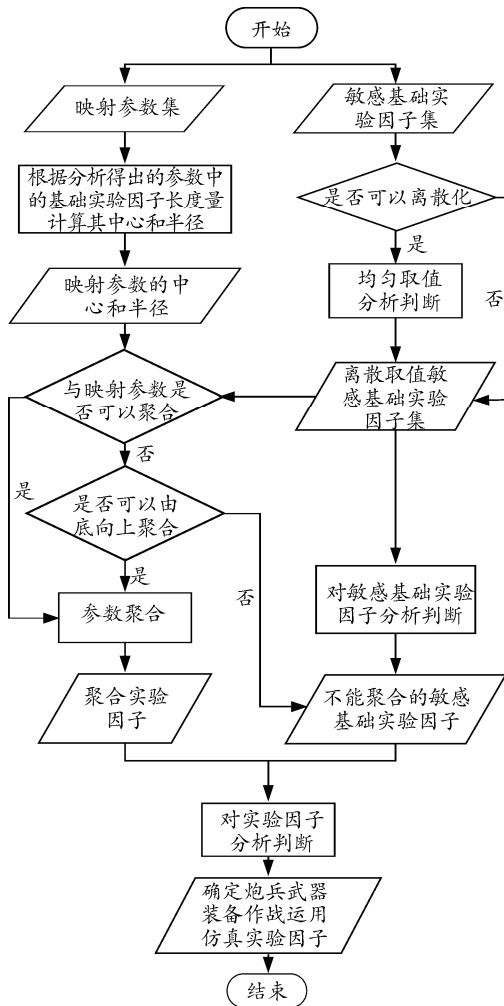


图 1 聚合实验因子构建流程

借鉴聚类分析的最短距离法分析思路，定义实验因子的“长度量”，表征基础实验因子的固有属性，用于表示其军事涵义与具体涵义，在此基础上计算每个映射参数的中心并实现向上聚合。具体确定规则如下：

- 1) 确定基础实验因子长度量的位数如图 2。

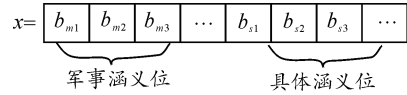


图 2 基础实验因子长度量的位数

式中： X 为表征基础实验因子固有属性向量； b_{mi} 为表征军事涵义位； b_{sj} 为表征具体涵义位。根据具体的应用领域和层次确定。例如，某一应用中基础实验因子长度量为 6 位数，军事涵义判定位为前 3 位，具体涵义判定位为后 3 位。前 3 位对应的军事涵义层次逐次降低，如武器系统、使用位置和使用方式等；后 3 位表示具体涵义，如具体的型号与模型的代码等。

- 2) 限制基础实验因子长度量的取值，确保各不相同。
- 3) 距离计算：距离=|长度量 1-长度量 2|。

1.2.2 映射中心计算

在相关军事领域专家定性分析确定映射参数集之后，统计相应映射参数内的基础实验因子的长度量。如果仅根据基础实验因子的具体涵义(长度量的后 3 位)相近性进行聚合，可能导致造成某些因子军事涵义(长度量的前 3 位)出现较大差异。为此，以军事涵义为基础计算并确定映射参数中心。基本步骤如下：

- 1) 任选 m 个初始映射参数中心： $C_1^{(1)}, C_2^{(1)}, C_3^{(1)}, \dots, C_m^{(1)}$ ，其中上角标表示聚类过程中的迭代运算次数， m 为军事专家确定影响因素数量。
- 2) 假设已进行到 n 次迭代。若对某一基础实验因子 X 有：

$$d(x, c_j^{(n)}) = \min \{d(x, c_i^{(n)}), i = 1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

则 $x \in S_j^{(n)}$ ，其中 $S_j^{(n)}$ 是以 $C_j^{(n)}$ 为映射参数中心的基础实验因子集。以最小军事涵义距离原则，将全部基础实验因子分配到 m 个聚类中。

- 3) 计算重新分类后各映射参数中心：

$$C_j^{(n+1)} = \frac{1}{k_j^{(n)}} \sum_{x \in S_j^{(n)}} x, (j = 1, 2, \dots, m)$$

式中 $k_j^{(n)}$ 为中 $S_j^{(n)}$ 所包含的基础实验因子数量。

4) 若 $C_j^{(n+1)} = C_j^{(n)}, j=1,2,\dots,m$, 则得到映射参数中心 $C_1^*, C_2^*, C_3^*, \dots, C_m^*$, 结束; 否则转到步骤 2)。

1.2.3 计算军事涵义半径与具体涵义半径

在中心确定的基础上, 需要计算映射参数的军事涵义半径与具体涵义半径。

军事涵义半径 R_j^{mil} 可用如下公式计算:

$$d_{\text{mil}}(x, C_j^*) = \sum (b_{m1}^x - b_{m1}^{C_j^*})^2$$

$$R_j^{\text{mil}} = \max \{d_{\text{mil}}(x, C_j^*)\}$$

式中 $x \in S_j^*, j=1,2,\dots,m$ 。

具体涵义半径 R_j^{spe} 可用如下公式计算:

$$d_{\text{spe}}(x, C_j^*) = \sum (b_{s1}^x - b_{s1}^{C_j^*})^2$$

$$R_j^{\text{spe}} = \max \{d_{\text{spe}}(x, C_j^*)\}$$

式中 $x \in S_j^*, j=1,2,\dots,m$ 。

在很多情况下, 某些基础实验因子被认为非常重要, 需要单独观察其可能引起的变化, 此时此类敏感基础实验因子应当单独成为实验因子。

1.2.4 聚合流程

1) 计算某一基础实验因子 x 与各映射参数中心 C_j^* 的距离 $d_{\text{mil}}^x, j=1,2,\dots,m$;

2) 比较 d_{mil}^x 、 R_j^{mil} ; 如果有且只位于一个映射参数中心军事涵义半径内, 跳至 3); 如果不在任一映射参数中心军事涵义半径内, 跳至 4); 如果在多个映射参数中心军事涵义半径内, 跳至 5);

3) 该基础实验因子向 C_j^* 聚合; 返回 1);

4) 将其单独作为实验因子; 或是向 d_{mil}^x 、 R_j^{mil} 差距最小的映射参数中心聚合; 返回 1);

5) 如果 d_{mil}^x 各不相同, 跳至 6); 如果 d_{mil}^x 相同跳至 7);

6) 根据“远近”原则进行聚合, 返回 1);

7) 计算 d_{spe}^x 并与具体涵义半径 R_j^{spe} 进行比较, 如果对位于映射参数具体涵义半径内的进行聚合; 如果同时在或不在具体涵义半径内, 那么比较与具体涵义中心的距离, 同样根据“远近”原则进行聚

合。返回 1);

8) 处理不能与映射参数聚合的敏感基础实验因子。

1.3 确定聚合实验因子值域

由于聚合实验因子由多个基础实验因子聚合而成, 其中各基础实验因子可能是连续取值, 也可能是离散取值, 而同是离散取值的基础实验因子的水平数目也不尽相同, 因此确定聚合实验因子的值域是一个重要问题。由于实验设计时要求实验因子水平的选择是离散的, 因此连续取值的实验因子需要被离散化, 重点发现其对实验结果影响的特征。笔者拟通过矢量量化的思路来确定聚合实验因子的值域范围。

设 X 表示基础实验因子集, 即 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, 其中 X_i 表示第 i 个基础实验因子, X_i 有 k 个实验水平, 即 $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, $i=1,2,\dots,k$ 。把基础实验因子集 R^k 维空间划分为 J 个互不相交的子空间, J 的数量根据实验需要选取。选取的子空间越多, 即 J 越大, 则越逼近原始模型, 但相应计算量也随之增大。即满足

$$\begin{cases} \bigcup_{j=1}^J R_j = R^k \\ R_i \cap R_j = \emptyset, i \neq j \end{cases}$$

此时, 在这 J 个空间中每个子空间分别选取一个合适的实验水平 y_j , 即可聚合实验因子。

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_j\}$$

该过程是一个矢量量化过程, 表示为 $y_j = Q(X_i) (1 \leq j \leq J; 1 \leq i \leq N)$ 。

当得到一个聚合实验因子实验水平时, 首先判断它属于哪个空间 R_j , 然后输出该空间的代表实验水平 y_j 。

通常, 可定义一个失真测度 $d(X, Y)$, 一般采用欧式测度。其定义为

$$d(X, Y) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2 = (X - Y)^T (X - Y)$$

可选用 LBG 算法或模拟退火法求解, 因子聚合的过程既是 $d(X, Y)$ 最小化的过程, 其具体求解过程可参考文献[6-7]。

2 实验方案生成

在确定聚合实验因子和需要单独分析的敏感基础实验因子值域后,就要进行实验点选择,形成实验方案。根据实验目的的不同,实验点的确定不尽相同。实验设计是一个迭代过程,依据军事规则、模型参数的约束关系和效能分析的临界点,采用正交抽样、均匀抽样等实验设计方法,可以有效缩减武器装备作战运用仿真实验方案空间;因此,在作战实验设计阶段,需要通过多次实验才能确定最后选择的实验点,并根据最后确定的实验点,进行全面组合生成实验方案。

3 结论

笔者通过研究聚合实验因子的构建,提出了一种将军事概念向下分解映射与模型参数向上聚合归并相结合的聚合实验因子构建方法。通过军事概念向模型参数的分解映射,可以将高度抽象的实验问题变成细粒度的实验方案;通过将军事涵义相近的

(上接第 88 页)

$$(2a + T)y(k) + (T - 2a)y(k - 1) = Z^{-\tau} [u(k) + u(k - 1)] \tag{3}$$

经过上述变换后即可用程序实现传感器模型,为方便动态调整传感器模型,将时间常数 a 和时延系数 τ 做到仿真界面上。

4 结束语

该套无人机通用半物理仿真系统已应用在多款直升机及固定翼平台中。实践结果表明:该套仿真系统可以有效地验证飞行控制系统的控制逻辑,直观地验证飞行控制系统控制效果的优劣,为飞控系统的优化设计和系统的性能评估等提供数据支持,还可以降低无人机的试飞风险,节省试验费用,具备良好的工程应用价值。

参考文献:

[1] 李婷,张继周. 飞控实时仿真系统构建技术研究[J]. 微处理机, 2009, 4(4): 104-106.

模型参数合并,可以将模型参数转变为军事人员更容易理解的军事概念,方便其把握影响实验结果的关键因素,为武器装备作战运用仿真实验设计提供了有益的思路。

参考文献:

[1] 龙建国. 作战实验设计原理与方法探析[J]. 军事运筹与系统工程, 2003, 17(4): 2-6.

[2] 胡剑文, 常青, 张岱, 等. 作战仿真实验设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 15-83.

[3] 别晓峰, 董艳, 王剑飞. 作战仿真实验设计的基本问题讨论[J]. 军事运筹于系统工程, 2008, 22(4): 51-56.

[4] 卜先锦, 董献洲. 作战实验设计与运筹分析方法[J]. 军事运筹于系统工程, 2009, 23(3): 16-21.

[5] 陶玉森, 耿松涛, 王袅. 电子对抗作战仿真实验设计研究[J]. 兵工自动化, 2013, 32(1): 15-16.

[6] Yi Xiao, Chi Sing Leung. A GPU implementation for LBG and SOM training[J]. Neural Computing & Applications, 2011, 20(7): 1035-1042.

[7] 李金忠, 夏浩武, 曾小荃, 等. 多目标模拟退火算法及其应用研究进展[J]. 2013, 35(8): 77-88.

[2] 应浩, 黄健, 孙宾. 一种多通道电气冗余度的无人直升机舵系统[J]. 兵工自动化, 2014, 33(8): 20-21.

[3] 卢慧民. 飞行仿真数学建模与实践[M]. 北京: 航空工业出版社, 1994: 58-112.

[4] 杨一栋. 直升机飞行控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 110-130.

[5] 顾冬雷, 高正, 孙传伟. 无人直升机控制动态特性的频域辨识建模方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(6): 688-692.

[6] L Tomek et al. Reliability modeling of Life-Critical, Real-Time System[J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(1): 108-121.

[7] David R. Butenhof. POSIX 多线程程序设计[M]. 于磊, 曾刚, 译. 中国电力出版社, 2003: 147-148.

[8] 吕彦霖, 吴成富, 陈怀民, 等. 基于 QNX 的飞控计算机外场测试设备开发研究[J]. 测控技术, 2008, 27(11): 36-37.

[9] 武宝军. 无人机飞行控制系统故障检测技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

[10] 贾彩娟, 祝小平, 周洲. 无人机控制系统传感器故障诊断的方案与仿真[J]. 计算机仿真, 2005, 22(11): 53-55.