

doi: 10.7690/bgzd.2014.04.002

## 反导作战效能仿真实验寻需策略

苏伟<sup>1</sup>, 李为民<sup>2</sup>, 赵永<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安 710051; 2. 空军工程大学训练部, 西安 710051)

**摘要:** 针对反导作战效能仿真实验寻需问题, 为了减少实验次数和节省实验时间, 提出一种基于贪婪算法的寻需策略。给出反导作战效能仿真实验寻需策略的具体算例步骤。实验结果表明: 该寻需策略可快速实现对有效组合点的优化探索, 最终获取能力需求空间, 验证其有效性和优越性, 为反导作战仿真实验的理论方法的丰富与发展提供参考。

**关键词:** 反导作战; 效能仿真; 实验寻需; 贪婪算法

**中图分类号:** TJ765.4 **文献标志码:** A

## Search for Demand Strategy of Missile Defense Operations Efficiency Simulation Experiment

Su Wei<sup>1</sup>, Li Weimin<sup>2</sup>, Zhao Yong<sup>1</sup>

(1. Air & Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Department of Training, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of missile defense operations efficiency simulation experiment search for demand, for the sake of experiment degrees decrease and experiment time economization, a search for demand strategy based on greedy algorithm is presented. And its concrete example procedure is given out. The experiment simulation shows the search for demand strategy could realize the optimized explore of efficient combination plots and finally get the ability requirement space, which validates the validity and advantage of the search for demand strategy. Reference can be supplied for the abundance and development of missile defense campaign simulation experiment's theory and method.

**Keywords:** missile defense operations; efficiency simulation; experiment search for demand; greedy algorithm

### 0 引言

研究反导作战效能问题, 总是希望能通过实验挖掘影响因子与作战效能之间的隐含规律, 进而反映到现实, 对装备战技参数、作战方案、部署等问题作出调整, 从而提高整体反导作战效能。然而, 受技术水平、部署地域地理条件等问题的限制, 可能很难做出使作战效能达到最大的调整<sup>[1]</sup>。比如, 反导作战中, 对目标的探测要求达到 500 km, 最小不能少于 300 km; 反导装备已定, 通过实验探讨的部署方式, 可以完成 500 km 探测, 但实际部署中, 可能受地形限制, 无法完成实验所探讨的部署方式。这时就需重新提出需求, 要求探测距离必须达到 400 km 以上, 那么哪些部署方式可以达到目标? 这样即是对部署提出能力需求, 通过仿真实验, 解算得雷达部署在距离保护目标 100~200 km 位置, 即可达到目标要求, 100~200 km 即为能力需求空间。

探讨这类使实验指标达到一定值时实验因子的取值范围, 或者说有哪些实验因子组合可以满足需求的问题显然意义重大。可根据实际需求, 提出多

种解决问题的方案, 更利于解决现实问题。这类问题即为仿真实验寻需问题, 显然比反导作战效能仿真实验寻优问题复杂。寻优只是在实验探索空间寻求一个优化的点, 而寻需则是找到满足一定需求条件的点集, 其仿真计算量要大得多。

寻需实验中, 如果因子维数很多, 且取值连续, 在连续的实验空间搜寻能力需求空间, 是非常困难的。一方面, 实验探索空间巨大, 目前计算机的计算能力很难完成相应的分析计算; 另一方面, 在连续实验空间探索能力需求, 在技术实现上有很大难度。为了解决这一问题, 可根据每个实验因子的实验颗粒度大小, 在连续空间合理选取若干水平, 这样因子水平连续空间就被合理地离散化, 将离散化的水平输入实验, 可近似代替连续空间。通过全因子实验设计, 将所有因子水平组合输入实验, 采用枚举法可以找到所有满足需求的因子取值组合, 但这种方法计算量非常大, 没有较好地利用能力的单调性, 实际实验中不可取。笔者提出一种基于贪婪算法<sup>[2-6]</sup>的寻需策略, 在解决问题的情况下, 能显著

收稿日期: 2013-11-12; 修回日期: 2013-12-22

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目(9140×××××××1001)

作者简介: 苏伟(1975—), 男, 河北人, 博士, 工程师, 从事防空反导作战运筹分析、作战建模与仿真研究。

减少实验次数，提高实验效率。

### 1 反导作战效能仿真实验寻需策略

首先假设反导作战效能仿真实验中有  $m$  个实验因子，每一个因子可取  $n$  个不同的值，这样就有  $n^m$  个组合，从中快速找出有效的组合，即为离散化的单调能力需求空间。采用文中的贪婪算法可以很好地求解这类问题。

在算法中，假设每个因子取值水平的编号为  $1, 2, \dots, n$ ，假设是单调递增的，需求约束小于某个值，并假设有  $m$  个因子。算法步骤<sup>[7-8]</sup>如下：

Step 1: 为每个组合标记一个值，这个值表示这个组合的代表度，每个代表度存入一张组合表中。代表度指计算这个组合的需求指标值后，平均能减少的探索量。根据单调性求出某个组合需求指标值后，可免于计算某些探索组合个数。比如，若  $m=4$ ， $n=5$  则对于某个组合如(3 3 3 4)，在初始条件下，若其能满足需求，根据单调性，则其代表了  $3 \times 3 \times 3 \times 4 = 108$  个值都满足需求，称为下截集。如，(1 1 1 1)，(1 2 2 2)，(3 3 3 3)等。如果不能满足，则代表了  $3 \times 3 \times 3 \times 2 = 54$  个组合都不能满足，称为上截集。如，(4 4 4 4)，(5 5 3 4)等。由于不能预先知道其是否能满足需求约束条件，所以采取了加权代表度的计算方法。计算方法如下：

$$\begin{aligned} \text{加权代表度} = & \text{上截集个数} \times (\text{初始下截集个数} / \\ & (\text{初始上截集个数} + \text{初始下截集个数})) + \\ & \text{下截集个数} \times (\text{初始上截集个数} / (\text{初始上截集个数} + \\ & \text{初始下截集个数})) \end{aligned} \quad (1)$$

在探索求值过程中，有些组合会被去掉，相应的上截集与下截集个数会发生变化。所以，每个组合的加权代表度将会不断地变化，越来越小。

Step 2: 扫描组合表，采用贪婪策略，选取加权代表度最大的组合进行求值。假设这一组合为  $I_1 I_2 \dots I_m$ 。其计算方法如下：

1) 如果组合  $I_1 I_2 \dots I_m$  满足需求约束条件，则对于在组合表中任何其他组合  $J_1 J_2 \dots J_n$ ，其代表度计算方法，令  $K_1 = \min(I_1, J_1)$ ，这样把组合  $J_1 J_2 \dots J_n$  下截集总数减去组合  $K_1 K_2 \dots K_m$  的下截集的总数即为组合  $J_1 J_2 \dots J_n$  调整后的下截集，代表度在此基础上进一步调整。

2) 如果组合  $I_1 I_2 \dots I_m$  不满足需求约束条件，则对于任何其他组合  $J_1 J_2 \dots J_n$ ，其代表度计算方法，令  $K_1 = \max(I_1, J_1)$ ，这样把组合  $J_1 J_2 \dots J_n$  的上截集总数减去组合  $K_1 K_2 \dots K_m$  的上截集的总数，即为组合

$J_1 J_2 \dots J_n$  调整后的上截集，代表度在此基础上进一步调整。

3) 根据求值结果，如果满足需求，则去掉在组合表中此组合所代表的所有其他组合。

4) 根据重新计算的加权代表度，转步骤 Step 2，直到组合表是个空集。

### 2 算例验证

运用贪婪算法在反导作战效能仿真实验空间寻需，要求实验因子在实验空间内具有单调特性。为了满足期望误差范围在  $[-2, 2]$ ，将整个实验空间 A 分成 4 部分  $A_1, A_2, A_3, A_4$ ，本例中选取子空间  $A_1$ ，对其采取均匀设计，生成实验数据，拟合得二次响应曲面方程，即约束条件，见公式 (2)。对拟合方程进行分析，确定实验因子在卫星[1 4]，地面站融合能力[1 5]，探测灵敏度[1.5 17.5]空间内具有单调性，将卫星[1 4]，地面站融合能力[1 5]，探测灵敏度[1.5 17.5]标记为实验 B 空间。本次反导作战效能仿真寻需实验将在 B 空间进行，搜寻探测时间小于等于 90 的所有实验因子水平组合。

约束条件为：

$$\begin{aligned} y = & 124.0373 + 2.2352x_1 - 1.3964x_2 - 0.6625x_3 - \\ & 2.6071x_1^2 + 0.1464x_2^2 + 0.023x_3^2 - 0.5754x_1x_2 - \\ & 0.0859x_1x_3 - 0.0036x_2x_3 + 0.0061x_1x_2x_3 \leq 90 \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $x_1$  为卫星数量取值； $x_2$  为地面站融合能力取值； $x_3$  为探测灵敏度取值； $y$  为探测时间。此时，最优解为：卫星数量取 4 个水平，分别为 1, 2, 3, 4；地面站融合能力取 5 个水平，分别为 1, 2, 3, 4, 5；探测灵敏度取 17 个水平，1.5 至 17.5 间隔 1 取值。采用全排列实验，枚举法搜寻满足需求的实验因子组合，将进行  $4 \times 5 \times 17 = 340$  次实验。若采用上文反导作战效能仿真实验寻需策略搜寻满足约束的实验点，则具体步骤如下：

Step 1: 从组合表中寻找最大代表度组合，算法求解示例如表 1。第一轮找到组合(3, 3, 8.5)，不满足约束条件，其所有下截集都不满足。

Step 2: 在组合列表中寻找(3, 3, 8.5)对应的下截集，并将对应下截集中的所有组合从组合列表中删除。

Step 3: 重新调整组合列表中剩余组合代表度和上、下截集数，以(1 1 1.5)为例调整过程如下：

1) 获得 2 个组合的最大交集： $\max((3 3 8.5), (1 1 1.5)) = (3 3 8.5)$ 。

2) 判断最小交集是否为上截集中的组合：(3 3 8.5)是上截集列表中的组合。

3) 最大交集在上截集中，调整该组合上、下截集数和代表度：

① 新上截集(1 1 1.5)=原上截集(1 1 1.5)-上截集数(3 3 8.5)=340-60=280；

② 新代表度(1 1 1.5)=新上截集数(1 1 1.5)×(1-权重(1 1 1.5))+上截集(1 1 1.5)×权重(1 1 1.5)=1×(1-0.002 932 6)+280×0.002 932 6=1.818 2。其中，权重=初始下截集/(初始上截集+初始下截集)。

表1 算法求解示例

组合序号	下截集	上截集	代表度	权重
(1 1 1.5)	1	340	1.994 1	0.002 933
(1 1 2.5)	2	320	3.975 2	0.006 211
(1 1 3.5)	3	300	5.940 6	0.009 901
	...			
(1 1 15.5)	15	60	24.000 0	0.200 000
(1 1 16.5)	16	40	22.857 0	0.285 710
(1 1 17.5)	17	20	18.378 0	0.459 460
(1 2 1.5)	2	272	3.970 8	0.007 299
(1 2 2.5)	4	256	7.876 9	0.015 385
(1 2 3.5)	6	240	11.707 0	0.024 390
	...			
(3 3 8.5)	72	60	65.455 0	0.545 45
	...			
(4 5 14.5)	280	4	7.887 3	0.985 92
(4 5 15.5)	300	3	5.940 6	0.990 10
(4 5 16.5)	320	2	3.975 2	0.993 79
(4 5 17.5)	340	1	1.994 1	0.997 07

依次调整组合列表中剩余的上下截集和代表度，经这一轮调整后得到新的代表度，如表2。

表2 具有新的代表度的组合

组合	下截集	上截集	代表度
(1 1 9.5)	9	126	14.571
(1 1 10.5)	10	112	16.000
(1 1 11.5)	11	98	17.338
	...		
(4 5 14.5)	280	0	3.943 70
(4 5 15.5)	300	0	2.970 30
(4 5 16.5)	320	0	1.987 60
(4 5 17.5)	340	0	0.997 07

经过多轮以上3个步骤后，程序最终经过108次迭代计算，得到满足约束的组合如表3所示。

从上例可以看出，采取贪婪算法进行寻需实验，仅需设定一约束条件，运行程序即可，而不需要再次进行实验，如果采取枚举法进行寻需，则要采取全因子实验设计，将所有因子组合都进行实验，遍历所有的因子取值空间<sup>[9]</sup>。上例中，进行卫星数量4水平，地面站融合能力5水平，探测灵敏度17水平的寻需实验，采用全排列实验，枚举法搜寻满足需求的实验因子组合，需进行4×5×17=340次实验。而采取贪婪算法，则仅需要程序迭代运行108次，就能全部搜索出满足需求的所有实验点。在实际运用中，可将实验空间进行拟合得到约束条件，运行

程序，搜索满足需求实验点，将节约大量实验次数和时间。

表3 探索结果

满足约束的组合表				
(4 2 6.5)	(4 3 15.5)	(4 5 11.5)	(4 1 14.5)	(4 3 2.5)
(4 2 7.5)	(4 3 16.5)	(4 5 12.5)	(4 1 15.5)	(4 4 2.5)
(4 2 8.5)	(4 3 17.5)	(4 5 13.5)	(4 1 16.5)	(4 5 2.5)
(4 2 9.5)	(4 4 6.5)	(4 5 14.5)	(4 1 17.5)	(4 1 5.5)
(4 2 10.5)	(4 4 7.5)	(4 5 15.5)	(4 1 8.5)	(3 5 8.5)
(4 2 11.5)	(4 4 8.5)	(4 5 16.5)	(4 1 7.5)	(3 5 9.5)
(4 2 12.5)	(4 4 9.5)	(4 5 17.5)	(4 2 3.5)	(3 5 10.5)
(4 2 13.5)	(4 4 10.5)	(4 2 5.5)	(4 1 6.5)	(3 5 11.5)
(4 2 14.5)	(4 4 11.5)	(4 3 5.5)	(3 4 12.5)	(4 1 4.5)
(4 2 15.5)	(4 4 12.5)	(4 4 5.5)	(3 4 13.5)	(4 2 2.5)
(4 2 16.5)	(4 4 13.5)	(4 5 5.5)	(3 4 14.5)	(4 1 3.5)
(4 2 17.5)	(4 4 14.5)	(4 3 4.5)	(3 4 15.5)	(4 4 1.5)
(4 3 6.5)	(4 4 15.5)	(4 4 4.5)	(3 4 16.5)	(4 5 1.5)
(4 3 7.5)	(4 4 16.5)	(4 2 4.5)	(3 4 17.5)	(4 3 1.5)
(4 3 8.5)	(4 4 17.5)	(4 4 3.5)	(3 5 12.5)	(4 1 2.5)
(4 3 9.5)	(4 5 6.5)	(4 5 3.5)	(3 5 13.5)	(4 2 1.5)
(4 3 10.5)	(4 5 7.5)	(4 1 9.5)	(3 5 14.5)	(4 1 1.5)
(4 3 11.5)	(4 5 8.5)	(4 1 10.5)	(3 5 15.5)	(4 3 3.5)
(4 3 12.5)	(4 5 9.5)	(4 1 11.5)	(3 5 16.5)	(4 5 4.5)
(4 3 13.5)	(4 5 10.5)	(4 1 12.5)	(3 5 17.5)	(4 1 13.5)
(4 3 14.5)	—	—	—	—

### 3 结束语

笔者针对反导作战效能仿真实验寻需问题，提出了一种基于贪婪算法的寻需策略。该策略在能力空间中进行优化探索，取得有效组合点，最终获取能力需求空间。由于相比采用全排列实验，减少了很多实验次数，尤其对于实验因子多且全排列需要很多实验次数的情况，可以节省大量时间。同时，在满足一定约束条件下，文中反导作战效能仿真实验寻需策略具有普遍的使用价值。

### 参考文献：

- [1] 刘健, 别晓峰, 李为民. 反导作战运筹分析[M]. 北京: 中国人民解放军出版社, 2013: 335-359.
- [2] 李志伟. 基于贪婪策略的分布式数据库查询优化研究[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(17): 3838-3840.
- [3] 陈荣光, 李春升, 陈杰, 等. 基于贪婪算法的近空间平台区域覆盖优化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(5): 547-550.
- [4] 徐忠超, 黄永宣. 基于贪婪算法的空间编目观测任务调度方法[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(1): 89-94.
- [5] 朱昱, 王连锋, 杨雪松, 等. 一种基于维修流程的装备维修任务调度方法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(12): 28-32.
- [6] Thomas H, Charles E, Ronald L, et al. Introduction to Algorithms[M]. 3rd ed. Cambridge: The MIT Press, 2009: 370-399.
- [7] 胡剑文. 作战仿真实验设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 109-113.
- [8] 胡晓峰, 杨靖宇, 司光亚. 战争复杂系统仿真分析与实验[M]. 北京: 国防大学出版社, 2008: 635-638.
- [9] 方龙伟, 贡超, 鹿红超. 快速发药系统出药方式优化研究及仿真[J]. 机电工程, 2013, 30(6): 689-692.