

1-8-2019

Analysis and Optimization for Combat Capability Based on Sequential Simulation Experiment

Chenyan Kong

1. The 28th Research Institute of China Electronic Group Corporation, Nanjing 210007, China;;2. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, Nanjing 210007, China;

Zhu Jing

1. The 28th Research Institute of China Electronic Group Corporation, Nanjing 210007, China;;2. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, Nanjing 210007, China;

Jiao Song

1. The 28th Research Institute of China Electronic Group Corporation, Nanjing 210007, China;;2. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, Nanjing 210007, China;

Shaojie Mao

1. The 28th Research Institute of China Electronic Group Corporation, Nanjing 210007, China;;2. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, Nanjing 210007, China;

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.

Analysis and Optimization for Combat Capability Based on Sequential Simulation Experiment

Abstract

Abstract: To deal with the optimization of combat capability, the sequential simulation experiment method was proposed. *The simulation evaluation method with precision constraint was used to control the simulation running times. The sensitivity analysis experiment was carried out to identify the important factors affecting the combat capability.* The relation model between the important factors and combat capability was constructed via regression analysis experiment. To get the combat capability improvement as large as possible with the price as small as possible, the optimization was used. In the application example, the air-defense combat capability was improved by the method.

Keywords

combat capability, simulation experiment, sensitivity analysis, regression analysis

Recommended Citation

Kong Chenyan, Zhu Jing, Jiao Song, Mao Shaojie. Analysis and Optimization for Combat Capability Based on Sequential Simulation Experiment[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3333-3339.

基于序贯仿真试验的作战体系能力分析优化方法

孔晨妍^{1,2}, 朱晶^{1,2}, 焦松^{1,2}, 毛少杰^{1,2}

(1.中国电子科技集团公司第二十八研究所, 江苏 南京 210007; 信息系统工程重点实验室 南京 210007)

摘要: 针对作战体系能力的分析优化问题, 采用了一种序贯仿真试验的方法予以解决。给出了面向精度约束的体系能力仿真评估方法, 实现了仿真运行次数的控制; 开展灵敏度分析试验, 确定影响体系能力的关键要素, 聚焦了研究范围; 开展回归分析试验, 建立了关键要素与体系能力之间的关系模型; 在此基础上, 通过优化实现了以尽可能小的代价得到尽可能大的体系能力提升。在应用实例中, 采用本文方法有效地指导了某防空作战体系能力的提升。

关键词: 体系能力; 仿真试验; 灵敏度分析; 回归分析

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 09-3333-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809014

Analysis and Optimization for Combat Capability Based on Sequential Simulation Experiment

Kong Chenyan^{1,2}, Zhu Jing^{1,2}, Jiao Song^{1,2}, Mao Shaojie^{1,2}

(1.The 28th Research Institute of China Electronic Group Corporation, Nanjing 210007, China; 2. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, Nanjing 210007, China)

Abstract: To deal with the optimization of combat capability, the sequential simulation experiment method was proposed. *The simulation evaluation method with precision constraint was used to control the simulation running times. The sensitivity analysis experiment was carried out to identify the important factors affecting the combat capability.* The relation model between the important factors and combat capability was constructed via regression analysis experiment. To get the combat capability improvement as large as possible with the price as small as possible, the optimization was used. In the application example, the air-defense combat capability was improved by the method.

Keywords: combat capability; simulation experiment; sensitivity analysis; regression analysis

引言

随着信息化技术的发展, 战争模式逐步从以“平台”为中心发展成以“网络”为中心, 各种传感器、情报处理系统、指挥控制系统以及武器装备通过网络互连共享并形成作战体系, 实现实时感知、

高效指控、精确打击和快速机动等, 可大幅提升军队的作战能力。研究分析体系能力能有力支撑体系的设计和建设, 但由于作战体系具有规模庞大、组成要素之间交互复杂、结构动态变化以及不确定因素多等特点, 由此给体系能力研究工作的带来了严峻的挑战。

目前, 关于体系还没有公认的统一定义, 美空军于 2005 年提出体系是系统的配置, 其组成系统在体系运用期间可退出也可加入, 每一个系统在其正确的位置都提供有用的服务, 每一个系统管理



收稿日期: 2016-03-10 修回日期: 2016-08-24;
作者简介: 孔晨妍(1982-), 女, 江苏, 硕士生, 高工, 研究方向为系统仿真; 朱晶(1981-), 女, 江苏, 硕士生, 工程师, 研究方向为系统评估; 焦松(1985-), 男, 湖北, 博士, 工程师, 研究方向为系统评估。

<http://www.china-simulation.com>

• 3333 •

自身的服务,这些系统在体系中正确配置导致体系具备了卓越的能力。文献[1]提出了一种新的分析C2体系指挥控制效率的测度指标—鲁棒的连通性,并使用基于Agent的仿真方法验证了该测度指标与以往的指挥控制效率度量指标特征值同样重要;文献[2]致力于开发一个体系仿真工具集,在高层使用DoDAF和MoDAF的统一剖面来规范体系和体系需求,在底层使用仿真和统计模型检验来分析验证;近年来,美国、澳大利亚、加拿大、新西兰和英国联合建立的技术合作项目(The Technical Cooperation Program, TTCP),探索研究了体系能力建模以及评估等问题^[3-4]。

国内也有不少学者开展了相关研究工作。文献[5]给出了一个ABMS体系效能评估技术参考框架,确定了ABMS体系效能评估需要的主要子系统和相关的数据接口关系,包括体系效能评估准备、联合作战想定编辑、ABMS体系仿真引擎、作战过程表现及战果统计,以及体系效能综合评估等。文献[6]通过仿真实验实现体系异常状态的确定、回溯和级联反应分析,并认为相应的仿真支撑环境要支持跨尺度、多分辨率模型的联合实验,支持多重循环反馈和有目的地调整实验空间的机制;文献[7]提出了五环聚焦实验框架,将新型武器装备模型加入到适当的仿真实验背景体系中,通过循环往复的仿真实验,逐步缩小研究范围、聚焦关键要素,最终获取新知识或者发现事物因果关系;文献[8]根据复杂网络度量的指标和方法,从静态和动态复杂性出发,提出了C4ISR体系结构信息流复杂性的评估过程和评估算法。

综上所述,国内外对作战体系能力进行了初步研究,已有的研究成果给出了体系能力的研究框架,主要解决了体系能力的度量问题,但是对于体系能力的关键要素分析、体系贡献率分析以及体系能力优化等问题有待解决。本文将综合采用仿真实验、统计分析以及优化等方法,采用序贯仿真实验的思想,通过多次迭代、循序渐进的仿真实验,实现作战体系能力分析和优化方法,以期能支撑作战

体系的设计和建设。

1 问题描述及分析

假定用 S 表示作战体系; X_1, X_2, \dots, X_n 为作战体系的基本要素,例如传感器平台、指挥所以及火力单元等; $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im_i}$ 为第 i 个要素 X_i 的属性,例如平台个数、部署位置等。进一步,假定作战体系 S 的任务集合为 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$,则将作战体系 S 的能力定义为针对任务集合 T 的完成,定义如下:

$$E = \omega_1 \times \eta_1 + \omega_2 \times \eta_2 + \dots + \omega_m \times \eta_m \quad (1)$$

式中: E 为体系能力; $\eta_i, i = 1, 2, \dots, m$ 为执行任务 T_i 的完成率; $\omega_i > 0, i = 1, 2, \dots, m$ 为任务 T_i 的权重,且 $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_m = 1$ 。

对于 $\eta_i, i = 1, 2, \dots, m$ 而言,当任务 T_i 确定时,则其与 $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im_i}, i = 1, 2, \dots, n$ 相关,定义如下:

$$\eta_i = F_i(A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im_i}; A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2n_2}; \dots; A_{n1}, A_{n2}, \dots, A_{nm_n}), i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中: $F_i(\bullet)$ 为任务完成率 η_i 与作战体系基本要素属性的关系函数。

结合式(1)和式(2)可知,当任务集合 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ 确定时,体系能力 E 与 $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im_i}, i = 1, 2, \dots, n$ 相关,定义如下:

$$E = H(A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1m_1}; A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2n_2}; \dots; A_{n1}, A_{n2}, \dots, A_{nm_n}) \quad (3)$$

式中: $H_i(\bullet)$ 为体系能力 E 与作战体系基本要素属性的关系函数。

进一步,假定作战体系的组织关系、基本要素 X_1, X_2, \dots, X_n 、部署位置或者范围以及战术战法确定,仅 X_1, X_2, \dots, X_n 的数量可调整,则有:

$$\{N_1, N_2, \dots, N_n\} \subseteq \{A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1m_1}; A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2n_2}; \dots; A_{n1}, A_{n2}, \dots, A_{nm_n}\} \quad (4)$$

式中: $N_i, i = 1, 2, \dots, n$ 为 X_i 的数量。

由此,式(3)可以简化为如下公式:

$$E = G(N_1, N_2, \dots, N_n) \quad (5)$$

式中: $G(\bullet)$ 为体系能力 E 与作战体系基本要素数量的关系函数。

本文所研究的仅为式(5)的情形, 即将作战体系基本要素的数量视作可调整因素; 其它的基本要素属性则视作常值, 例如: 某旅团的组织关系, 或者视作随机变量, 例如: 在某区域内部署的雷达位置。为了开展体系能力 E 的分析和优化工作, 主要存在以下两方面的难点: 1) 由于体系中存在大量随机变量, 需要确定体系能力的估计值; 2) 体系中基本要素个数众多, 且 N_1, N_2, \dots, N_n 与 E 的关系复杂, $G(\bullet)$ 难以确定, 优化工作不易开展。

2 体系能力分析优化方法

针对上述难点, 本文采用仿真的手段, 通过大样本试验给出作战体系能力的估计方法, 开展正交试验识别影响体系能力的关键因素, 进一步通过回归试验建立关键因素与体系贡献率的关系模型, 由此指导体系能力的优化调整。

2.1 体系能力评估方法

仿真系统中存在大量的随机变量, 由此需要依据多次仿真运行数据估计得到评估指标值。仿真运行次数越多, 则估计精度越高, 但仿真时耗也越大。为了估计得到满足精度要求的评估指标值, 由此需要确定仿真运行次数^[9]。

用 Y_i , $i=1, 2, \dots, l$ 表示每次仿真运行对应的体系能力值, 可将它们视作独立同分布的随机变量, 则表示体系能力 E 的抽样均值 \bar{Y} 为:

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^l Y_i / l \quad (6)$$

当 l 比较大时, 可认为它近似满足 t 分布, 当 l 足够大时, 则 t 分布趋于正态分布, 则有 E 期望的估计值 μ 为:

$$\mu = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l Y_i \pm t_{l-1, \alpha/2} \sqrt{S^2(l)/l} \quad (7)$$

式中: $S^2(l) = \sum_{i=1}^l [\bar{Y} - Y_i]^2 / (l-1)$ 。

假定置信水平为 α , 亦即期望置信度不小于 $1-\alpha$, 要求的估计精度临界值为 ε , 亦即期望置信区间属于 $[\bar{Y} - \varepsilon, \bar{Y} + \varepsilon]$, 则需要满足:

$$t_{l-1, \alpha/2} \sqrt{S^2(l)/l} \leq \varepsilon \quad (8)$$

进一步可得:

$$l \geq \left[\frac{t_{l-1, \alpha/2} \times S(l)}{\varepsilon} \right]^2 \quad (9)$$

由此, 给出相应的仿真评估算法如下:

Step 1: 预设仿真初始运行次数 $l = l_0 \geq 2$, 且仿真系统独立运行 l 次;

Step 2: 计算 l 次仿真运行对应的体系能力为 Y_1, Y_2, \dots, Y_l 以及 $S^2(l)$;

Step 3: 计算 $\beta = t_{l-1, \alpha/2} \sqrt{S^2(l)/l}$, 若 $\beta \leq \varepsilon$, $\beta \leq \varepsilon$ 则得到置信度为 $1-\alpha$ 的满足精度要求的置信区间为 $[\bar{Y} - \beta, \bar{Y} + \beta]$, 相应的仿真运行次数为 l 次, 转至执行 Step 5;

Step 4: 否则, 令 $l = l + 1$, 进而得到仿真样本 Y_{l+1} , 并转至执行 Step 3;

Step 5: 仿真运行结束。

2.2 关键要素识别方法

假定体系中基本要素 X_i , $i=1, 2, \dots, n$ 的数量 N_i 当前取值为 $N_i = n_i^0$ 。在此基础上设置 N_i 的摄动范围如下:

$$N_i \in [l_i, u_i] = [n_i^0 \times (1-b\%), n_i^0 \times (1+b\%)], i=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中: b 为 N_i 摄动幅度; l_i 和 u_i 分别为 N_i 的取值下界和上界。

依据正交试验设计方法确定试验点集合 $\{P_1, P_2, \dots, P_q\}$, 定义如下:

$$P_i = \langle N_{1i}, N_{2i}, \dots, N_{ni} \rangle, i=1, 2, \dots, q \quad (11)$$

式中: $N_{1i}, N_{2i}, \dots, N_{ni}$ 分别为 N_1, N_2, \dots, N_n 在第 i 个试验点的取值。

采用算法 1 得到每个试验点对应的体系能力为 E_i , $i=1, 2, \dots, q$ 。通过方差分析得到总平方和 SST 与总自由度 f_T 为:

$$SST = \sum_{i=1}^q (E_i - T)^2, f_T = q - 1, \text{ 其中:} \\ T = \sum_{i=1}^q E_i / q \quad (12)$$

同理, 得到 $N_i, i=1,2,\dots,n$ 对应的平方和 SS_i 以及自由度 f_i , 具体算法参见文献[10-11]。进一步, 得到误差平方和 SSE 与自由度 f_e 为:

$$SST = SST - \sum_{i=1}^q SS_i, \quad f_e = f_T - \sum_{i=1}^q f_i \quad (13)$$

由此, 得到 $N_i, i=1,2,\dots,n$ 对应的 F 值为:

$$F_i = \frac{SS_i}{f_i} \times \frac{f_e}{SSE}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (14)$$

给定显著水平 α , 并依据 F_i 由 F 分布确定检验值 P_i 。判断 $P_i \leq \alpha$ 是否成立, 若是则认为 $N_i, i=1,2,\dots,n$ 对体系能力为 E 的影响显著; 反之, 则认为 $N_i, i=1,2,\dots,n$ 对体系能力 E 的影响不显著。

2.3 体系能力优化方法

假定 $\{\tilde{N}_1, \tilde{N}_2, \dots, \tilde{N}_k\} \subseteq \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ 被识别出对体系能力 E 的影响较为显著, 对应的体系要素分别为 $\{\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_k\} \subseteq \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。进一步将识别出的关键因素视作试验因子, 基于拉丁超立方试验设计得到的试验点集合为 $\{U_1, U_2, \dots, U_p\}$, 具体算法参见文献[12-13], 且定义如式(15)。

$$U_i = \langle \tilde{N}_{1i}, \tilde{N}_{2i}, \dots, \tilde{N}_{ki} \rangle, \quad i=1,2,\dots,p \quad (15)$$

式中: $\tilde{N}_{1i}, \tilde{N}_{2i}, \dots, \tilde{N}_{ki}$ 分别为 $\tilde{N}_1, \tilde{N}_2, \dots, \tilde{N}_k$ 在第 i 个试验点的取值。

采用算法 1 得到每个试验点对应的体系能力为 $E_i, i=1,2,\dots,p$ 。基于多项式拟合建立 $\tilde{N}_1, \tilde{N}_2, \dots, \tilde{N}_k$ 与体系能力 E 之间的关系模型 $L(\cdot)$ 如式(16)。

$$E = L(\tilde{N}_1, \tilde{N}_2, \dots, \tilde{N}_k) \quad (16)$$

进一步假定 $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_k$ 的价值分别为 V_1, V_2, \dots, V_k , 定义体系能力的投入和效益比 Ψ 如式(17)。

$$\Psi = \frac{L(\tilde{N}_1, \tilde{N}_2, \dots, \tilde{N}_k)}{V_1 \tilde{N}_1 + V_2 \tilde{N}_2 + \dots + V_k \tilde{N}_k} = Z(\tilde{N}_1, \tilde{N}_2, \dots, \tilde{N}_k) \quad (17)$$

式中: $Z(\cdot)$ 为 Ψ 与 $\tilde{N}_1, \tilde{N}_2, \dots, \tilde{N}_k$ 之前的关系模型。

在此基础上, 一方面为了保证体系能力提升到一定的水平; 另一方面期望通过尽可能少的投入得到尽可能大的体系效能, 建立优化方程如式(18)所示。

$$\begin{cases} \max & \Psi = Z(\tilde{N}_1, \tilde{N}_2, \dots, \tilde{N}_k) \\ \text{st.} & \tilde{N}_i \in [\tilde{l}_i, \tilde{u}_i], i=1,2,\dots,k \\ & E \geq E^* \end{cases} \quad (18)$$

式中: \tilde{l}_i 和 \tilde{u}_i 分别为 \tilde{N}_i 取值的上下界; E^* 为期望体系能力 E 达到的最低值。

针对上述构建的优化方程, 采用遗传算法进行优化, 算法执行过程中采用二进制进行编码, 适应度函数取为 $Z(\tilde{N}_1, \tilde{N}_2, \dots, \tilde{N}_k)$, 选择算法采用轮盘赌选择法, 交叉和变异操作分别采用单点交叉和基本变异算法。依据优化得到的 $\tilde{N}_1^*, \tilde{N}_2^*, \dots, \tilde{N}_k^*$, 指导作战体系的优化调整。

3 应用实例

假定研究对象为某防空体系, 主要由预警探测雷达、情报中心、指控中心、地空导弹以及作战飞机等组成。该防空体系的任务是拦截某空域的来袭导弹或飞机, 则体系能力可通过两类任务完成率的加权综合来确定。在现有建设基础上, 需要研究如何配置雷达、地空导弹以及作战飞机形成提升体系能力的最佳方案。

针对该防空体系能力的分析优化问题, 拟采用上文给出的仿真试验方法予以解决。基于 HLA(High Level Architecture)构建的防空作战体系结构如图 1 所示。

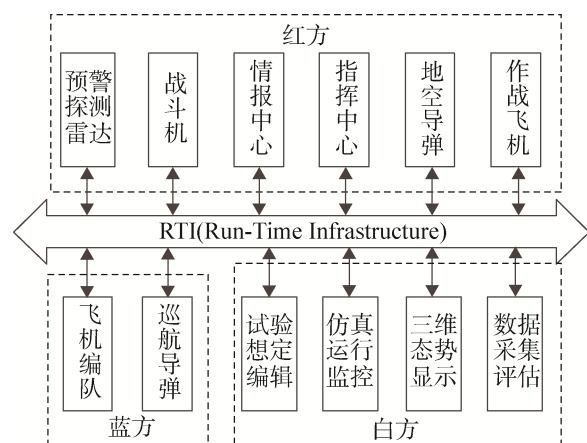


图 1 基于 HLA 的防空作战仿真系统组成结构
Fig. 1 Composition structure of Air defense simulation system based on HLA

图 1 中红方包含预警探测雷达、情报中心、地面防空指挥所、地空导弹以及作战飞机等仿真实体; 蓝方为某典型的作战飞机编队以及巡航导弹; 白方包含了试验想定编辑、仿真运行监控、三维态势显示、数据采集以及评估分析等子系统。在此给出拦截来袭飞机的仿真运行流程, 如图 2 所示, 具体描述如下: 红方预警探测雷达在某一时刻发现蓝方战斗机群并上报情报中心, 红方指控中心获取情报后, 引导飞机出动予以拦截; 双方战斗机在空中交战后, 部分蓝方战斗机突围并重新组建新的战斗单位, 红方预警探测雷达再次发现目标并上报情报中心; 红方指控中心获取情报后, 装订地空导弹发射参数, 并实施目标拦截, 仿真运行至此结束。

由于情报中心和指控中心相对固定, 初步确定拟通过增加预警探测雷达、地空导弹以及作战飞机的数量实现体系能力的提升。当前, 地空导弹、作战飞机以及预警探测雷达的数量分别为 $N_1 = 20$

枚、 $N_2 = 10$ 架和 $N_3 = 6$ 部。以此为基础, 设定 20% 的波动幅度, 得到各体系要素的波动范围为 $N_1 \in [16, 24]$ 、 $N_2 \in [8, 12]$ 和 $N_3 \in [4, 6]$ 。基于正交试验设计方法, 得到 3 个因子、3 个水平共 9 组试验方案如下表 1 所示, 其中空列的设计是用以考察试验误差。在每组试验条件下分别开展拦截飞机和拦截导弹两类试验, 依据算法 1 得到多次仿真运行结果, 并综合得到防空体系能力如下表 1 第 6 列所示。依据上述试验结果, 通过方差分析, 得到每个因素对应的平方和 SS_i 、自由度 f_i 、均方差 SS_i/f_i 、 F_i 值以及检验值 P_i 如表 2 所示, 其中令显著水平 $\alpha=0.100$ 。

由上述分析可知, 对于该防空作战体系而言, 飞机数量对体系能力的影响较为敏感。为进一步验证分析结果的合理性, 给出每个试验因素水平对应的平均体系能力如图 3 所示, 从图中可直观看出体系能力随飞机数量的调整具有较大的幅度变化。

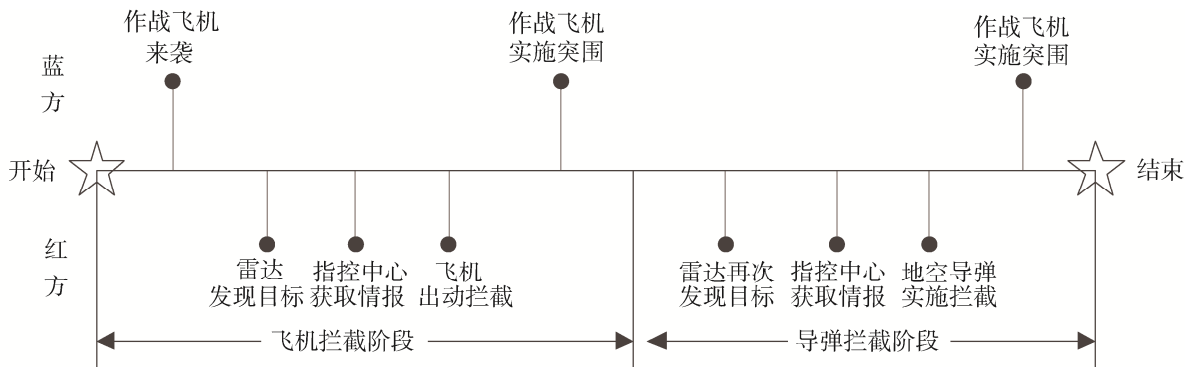


图 2 拦截来袭飞机的仿真运行流程

Fig. 2 The simulation process of intercepting incoming aircraft

表 1 正交试验点及试验结果

Tab. 1 Orthogonal test point and test result

试验序号	导弹数量水平	飞机数量水平	雷达数量水平	空列	体系能力
1	1(16 枚)	1(8 架)	1(4 部)	1	0.533
2	1	2(10 架)	2(5 部)	2	0.644
3	1	3(12 架)	3(6 部)	3	0.765
4	2(20 枚)	1	2	3	0.619
5	2	2	3	1	0.672
6	2	3	1	2	0.779
7	3(24 枚)	1	3	2	0.631
8	3	2	1	3	0.701
9	3	3	2	1	0.804

表2 方差分析结果
Tab. 2 Variance analysis result

方差来源	平方和	自由度	均方差	F_i 值	检验值 P_i
导弹数量变化	0.008	2	0.004	4.260	0.190>0.1
飞机数量变化	0.061	2	0.031	33.19	0.029<0.1
雷达数量变化	0.002	2	0.001	1.270	0.440>0.1
误差	0.002	2	0.001	—	—
总和	0.073	8	—	—	—

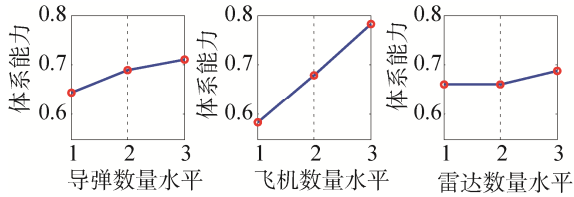


图3 各试验因素水平对应的平均体系能力

Fig. 3 Average system capacity corresponding to the level of each test factor

为指导体系能力的提升,以飞机数量为试验因子,且仍设置 $N \in [6,14]$,导弹数量和雷达数量设置为初始值20枚和6部。采用算法1开展仿真试验,得到 N 的每个取值点以及对应的体系能力,如表3所示。采用多项式拟合得到飞机数量与体系能力之间的关系模型如式(19)所示,变化曲线见图4。

$$E = -0.0013N^3 + 0.0409N^2 - 0.3685N + 1.6068 \quad (19)$$

表3 各试验点取值及其对应的体系能力值
Tab. 3 Test point and its system capacity value

序号	飞机数量	体系能力	序号	飞机数量	体系能力
01	6	0.572	06	11	0.732
02	7	0.588	07	12	0.775
03	8	0.597	08	13	0.797
04	9	0.623	09	14	0.812
05	10	0.668			

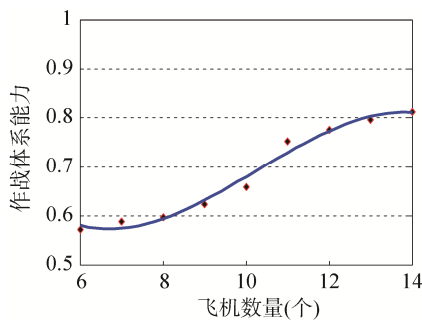


图4 飞机数量与体系能力的关系曲线

Fig. 4 The relationship curve between aircraft number and system capacity

在提升体系能力的同时,考虑飞机价值 $K > 0$ 的因素,以期采用最少的投入获取最大的体系能力提升量,采用式(18)得到如下的优化方程。其中,期望的体系能力 E 不能小于0.7,通过寻优得到飞机数量的最佳取值为 $N^* = 11$ 。

$$\begin{cases} \max \Psi = \\ \frac{-0.0013N^3 + 0.0409N^2 - 0.3685N + 1.6068}{K \times N} \\ \text{st. } N \in [6,14] \\ E = -0.0013N^3 + 0.0409N^2 - \\ 0.3685N + 1.6068 \geq 0.7 \end{cases} \quad (20)$$

用 $\Psi(N)$, $N \in [6,14]$ 表示飞机数量对应的优化目标取值,将 $\Psi(N)$, $N \in [6,14]$ 与 $\Psi(11)$ 的比值进行比较如图5所示,结合图4~5可知,当要求 $E \geq 0.7$ 时, $\Psi(11)$ 为最大值。

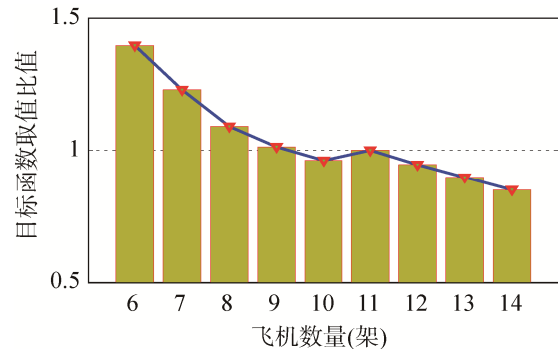


图5 优化结果对比图

Fig. 5 Constrast diagram of optimization results

4 结论

影响作战体系能力的因素众多,给体系能力的分析和优化工作带来了很大的困难,本文提出了一种序贯仿真试验方法予以解决。先通过灵敏度分析试验,识别影响体系能力的关键因素,聚焦研究范

围; 再开展回归分析试验, 建立关键因素与体系能力之间的关系模型; 以此为基础指导体系能力的优化调整。本文方法适应于体系要素对能力的交互影响较弱的情形, 而当交互影响较强时, 将有待对本文方法进行改进研究。

参考文献:

- [1] Deller S, Rabadi G, Tolk A, et al. Organizing for Improved Effectiveness in Networked Operations[J]. *Military Operations Research (S1082-5983)*, 2012, 17(1): 5-16.
- [2] Arnold A, Boyer B, Legay A. Contracts and Behavioral Patterns for System of Systems: The Eu IP DANSE Approach[R]. 2012.
- [3] TTCP JSA-TP3. Guide to Capability-based Planning[R]. 2008:1-14.
- [4] Bernier F, Couture M, Dussault G, et al. CapDEM-toward Capability Engineering Process[R]. DRDC Ottawa, 2005: 1-4.
- [5] 黄建新, 李群, 贾全, 等. 基于 ABMS 的体系效能评估框架研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(8): 1794-1798.
Huang Jian-xin, Li Qun, Jia Quan, et al. Research on ABMS-based SoS effectiveness evaluation framework[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(8): 1794-1798.
- [6] 杨镜宇, 胡晓峰. 基于信息系统的体系作战能力评估研究[J]. *军事运筹与系统工程*, 2011, 15(1): 11-14.
Yang Jingyu, Hu Xiaofeng. Research on Evaluation of system operational capability based on information system[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2011, 15(1): 11-14.
- [7] 张昱, 杨镜宇, 李仁见, 等. 面向武器装备体系仿真的五环聚焦实验框架[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(11): 2541-2545.
Zhang Yu, Yang Jingyu, Li Renjian, et al. 5-Loop framework of making and converging experiments for simulation of weapon system of systems[J]. *Journal of system simulation*, 2014, 26(11): 2541-2545.
- [8] 刘刚, 罗爱民, 罗雪山. 体系结构信息流复杂性评估[J]. *指挥信息系统与技术*, 2012, 3(3): 20-24.
Liu Gang, Luo Aiming, Luo Xueshan. Complexity assessment of architecture information flow[J]. *Command information system and technology*, 2012, 3(3): 20-24.
- [9] Law A W. 仿真建模与分析[M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2009: 49-50.
Law A W. *Simulation modeling and analysis*[M]. fourth edition. Beijing: Tsinghua university press, 2009: 49-50.
- [10] Montgomery D C. 实验设计与分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 147-150.
Montgomery D C. *Experimental design and analysis*[M]. Beijing: People's post and telecommunications press, 2009: 147-150.
- [11] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 87-88.
Chen Kui. *Test design and analysis*[M]. Beijing: Tsinghua university press, 2005: 87-88.
- [12] Minasny B, McBratney A B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information[J]. *Computers & Geosciences (S0098-3004)*, 2006, 32(9): 1378-1388.
- [13] Law A M. A Tutorial on Design of Experiments for Simulation Modeling[C]. *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*, 2014: 66-80.