

基于系统动力学的防空装备体系优化模型

储婷婷^{1,2}, 田建锋¹

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 空军装备部 北京 100076)

摘要:运用大系统理论研究防空装备体系的优化问题。基于系统动力学理论,通过对系统状态描述、结构分析设计和定量关系控制,建立体系优化模型,评估防空装备体系的系统效能。仿真结果表明此方法和所建模型是合理有效的,对装备体系优化具有适用性。

关键词:防空装备;系统动力学;模型;优化

中图分类号: O224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)05-0041-04

防空装备体系优化是指运用大系统理论,研究防空装备体系中的情报预警、指挥控制、拦截打击、后勤保障等系统,并通过系统结构调整,改善薄弱环节,使之发挥更大的作战效能。防空装备体系具有非结构化的主导特征,体系评价标准具有多样性,因此,体系要素的提炼与系统集成是一项研究难题。本文通过对防空装备体系结构的动力学描述,建立了体系结构动态优化模型,通过仿真策略及系统调整以评估体系效能,达到定性、定量、军事与技术的良好结合。

1 基于SD理论的防空装备体系建模

1.1 SD理论机制分析

系统动力学^[1-2](System Dynamics,简称SD)由美国麻省理工学院(MIT) Jay W. Forrester 教授创立。通过SD理论建立的模型是一种因果机理型模型。SD强调系统行为主要由系统内部机制决定,并在长程的动态中显示出系统症结之所在。运用SD理论研究防空装备优化具有独特优势^[3],其特点是将防空体系和空袭体系结合,分析系统对抗的机制与结构。SD的实质是寻优,通过调整体系内部的诸多变量和参数,寻求体系较优的结构和功能。防空装备体系优化是一个非结构化命题,但是运用SD理论,使之逐渐向半结构化和结构化问题转化。在结构转化过程中,逐步分析环境影响要素、约束条件、体系内部构成关系,使解决问题的途径程序化、模型化。

1.2 SD理论描述防空体系状态

防空装备的有机结合构成防空装备体系,防空装备体系的SD特征可用 m 个一阶微分方程组成的方程组来描述:

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_m; u_1, u_2, \dots, u_n; t); i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中: $x_i(t)$ 为状态变量, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为有限正整数,表示体系内一组时域水平变量; $u_j(t)$ 为控制变量, $j = 1, 2, \dots, n, n \leq m$,表示 $x_i(t)$ 对系统状态的依赖关系和控制策略; f_i 为非线性函数,反映 $x_i(t)$ 与 $u_j(t)$ 之间各种非线性关系,可采用表函数形式; $\dot{x}_i = dx_i/dt$ 为状态变量的一阶微分; t 为自变量(时间)。

输出特性可表示为

$$y_j = g_j(x_1, x_2, \dots, x_m; u_1, u_2, \dots, u_n; t); j = 1, 2, \dots, h \quad (2)$$

方程(1)、(2)组成了防空装备体系状态空间的完整描述。

引入相应的矢量函数 $F(X, U, t)$ 与 $G(X, U, t)$, 并令

收稿日期:2006-10-31

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:储婷婷(1964-),女,北京市人,博士生,主要从事军事装备管理研究。

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_m]; U = [u_1, u_2, \dots, u_n]; Y = [y_1, y_2, \dots, y_h]$$

式中, X 、 U 、 Y 分别为状态向量, 控制向量和输出向量。

则方程(1)、(2)变为

状态方程

$$\dot{X} = F(X, U, t), X \in R^m, U \in R^n \quad (3)$$

输出方程

$$Y = G(X, U, t) \quad Y \in R^h \quad (4)$$

式中: R 为欧氏空间; X 为 m 维矢量; U 为 n 维矢量; Y 为 h 维矢量。根据 F 、 G 的性质, 系统可描述为线性系统和非线性系统, 根据 X 、 U 的系数阵, 系统可描述为时变系统和时不变系统, 显然防空装备体系宏观上为非线性时变系统。

1.3 状态变量和决策变量

模型的各个反馈环中包含着两种基本变量: 状态变量(L 变量)和决策变量(R 变量)。 L 变量和 R 变量是性质完全不同的量, L 变量是系统内 R 变量的积累, 是系统的水平变量。在空袭体系(K)和防空体系(F)双方都有兵力支援的情况下, 多兵种、多目标, 多状态变量方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{dk_i}{dt} = - \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \psi_{ij} f_j + p_i, & i = 1, 2, \dots, m \\ \frac{df_j}{dt} = - \sum_{i=1}^m \alpha_{ji} \varphi_{ji} k_i + q_j, & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_i 为对空袭方设定的表示空袭能力的各类 L 变量水平因子; f_j 为对防御方设定的表示防御能力的各类 L 变量水平因子; β_{ij} 为 j 类防空武器对 i 类空袭武器的毁伤率; α_{ji} 为 i 类空袭武器对 j 类防空武器的毁伤率及防空武器自耗率; ψ_{ij} 为 j 类防空武器用于防御 i 类空袭武器的比例因子; φ_{ji} 为 i 类空袭武器用于攻击 j 类防空武器的比例因子。

1.4 体系效能准则

效能准则是 SD 建模的要求, 效能准则必须能够反映体系所要实现的目的。防空装备体系的评价标准具有多样性, 如有效能、效能/费用、寿命/费用等。在防空装备体系优化时, 根据根本目的, 可以选择目标效能准则和拦截效能准则^[4]。

目标效能准则是指在给定的空袭条件下, 保卫区域目标的完好程度, 它是防空体系的综合作战能力在特定时空域的表现。在分布式区域目标中, 各个目标的重要性和价值是不同的, 因此不能用不被毁伤的保卫目标数目来表示防空效能, 需要对区域内各目标进行价值评估。以一轮空袭中未被毁伤部分的总价值与区域目标的总价值之比作为效能指标, 即:

$$E(OB) = E(S_{av})/E(I_{mi}) = 1 - E(R_{uin})/E(I_{mi}) \quad (6)$$

式中: $E(OB)$ 为防空体系的目标效能准则; $E(S_{av})$ 为防空体系内, 一轮空袭未被毁伤目标的总价值; $E(I_{mi})$ 为防空体系内, 目标的总价值; $E(R_{uin})$ 为防空体系内, 一轮空袭平均毁伤目标的总价值。

若空袭体系采用多轮方式进行空袭, 则每一轮的 $E(OB)$ 的动态表达式为

$$\begin{cases} E(OB_1) = E(S_{av1})/E(I_{mi}) \\ E(OB_2) = E(S_{av2})/E(S_{av1}) \\ \vdots \\ E(OB_n) = E[S_{av(n)}]/E[S_{av}(n-1)] \end{cases} \quad (7)$$

N 轮空袭后, 总的目标效能为

$$E(OB_N) = E[S_{av(n)}]/E(I_{mi}) \quad (8)$$

拦截效能可以有 3 种表达方式: 一是毁伤全部来袭目标的概率; 二是毁伤来袭目标的数学期望; 三是毁伤来袭目标不小于某个值的概率。

2 防空装备体系优化的 SD 模型

根据 SD 理论所建立的防空装备体系优化模型, 是空袭体系和防空体系二大对抗体系组成的复杂大系

统^[5]。模型以攻、防、反作为主环路,内设多重反馈环结构。按照多层状态空间理论,分级设置变量,扩充修改简单。子模型内分别设置若干状态变量(L)、决策变量(R)、辅助变量(A)、常变量(P)和表函数等。部分物流和信息流作归一化处理。SD模型经多种极限参数测试,证实模型对参数的灵敏度适中,模型的各类方程(子模型)设置合理,结构具有一定的稳健性。仿真环境采用 Vensim (Ventana Simulation Environment) SD 环境。

3 部分仿真及分析

系统仿真采用4阶 Runge - Kutta 算法。

3.1 “高性能”武器“纯防”与“低性能”武器“攻防”

设置两种情况:一种具有较高的体系防空能力,包括情报预警能力和火力拦截能力,但是采用“纯防御”模式;另一种是较低的体系防空能力,但采用攻势防空模式。防空体系和空袭体系中涉及到定性效能的一些因子作归一化处理,这些因子如指挥因子、部署因子、保障因子等,每个因子都有其相应的下级因子。部分仿真结果如图1-3所示。

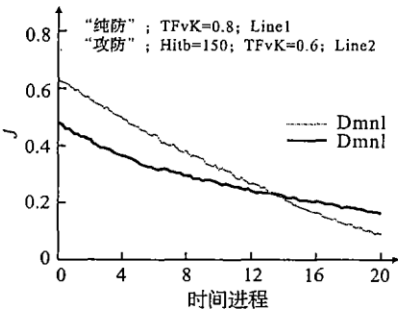


图1 总体拦截概率(J)变化趋势

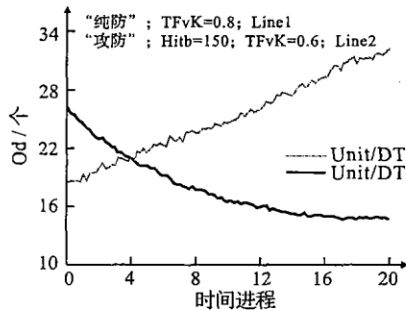


图2 保卫目标毁伤率(OBd)变化趋势

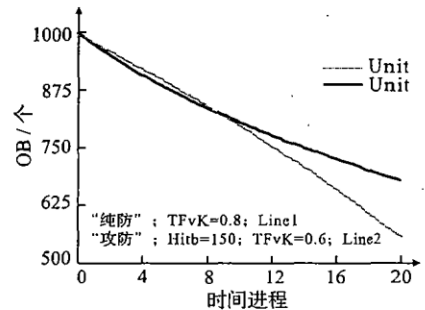


图3 保卫目标保存数量(OB)变化趋势

3.2 防空兵器数量与质量

本组是“纯防御”模式下的比较数据,防空装备综合质量指数由0.6上升到0.7,但是防空兵器的总体数量下降到“初始数据表”中设定数量的70%。因为模型中考虑了阵地容量,即增援总数与初始数量相关,所以单位时间增援数也随之减少,这里不改变防空兵器的增援率,是为了保证在同一个“初始数据表”条件下,以使仿真结果具有可比性。部分仿真结果如图4-6所示。

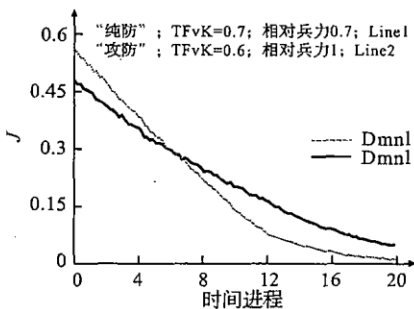


图4 总体拦截概率(J)变化趋势

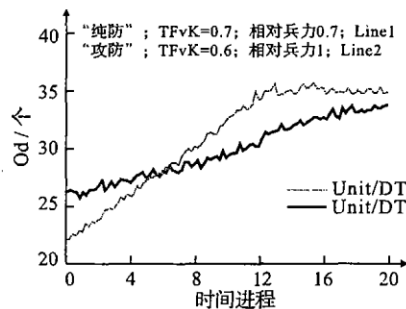


图5 保卫目标毁伤率(OBd)变化趋势

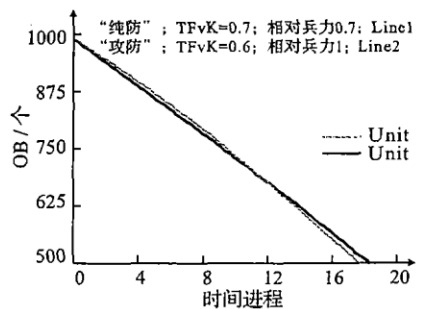


图6 保卫目标保存数量(OB)变化趋势

3.3 仿真结果简要分析

1)防空装备体系的优化必须从全局高度出发。通过SD模型,使防空装备发展从定性研究转到定性、定量综合研究,找出影响体系效能的关键因素,指导防空装备的全面协调建设。

2)体系效能存在对策敏感点。从仿真结果可以看出,提高防空体系效能的关键对策是采取攻势防空。在防御性装备性能低、数量少的情况下,攻势防空更为重要。

3)防空装备的质量、数量、指挥、部署、后勤保障等均有关键影响。其他因素还有防空体系软、硬抗毁能力,特别是指挥、预警等关键因素的抗毁能力,体系的动态防空能力,体系的火力增援能力,装备的寿命周期,体系的自组织、自修复能力等。

4 结束语

系统运行表明所建立的 SD 模型是合理有效的。SD 模型具有可扩充性,完善模型时可以考虑更多有关理论^[6-8]。如在决定决策变量特征时,融合其它决策理论,如模糊决策理论、突变论等;在决定各参量时,融合多属性效用评估(MAUE)、层次分析法(AHP)理论等;涉及到的大量非数量依据,可采用专家法、群策法等。通过这些方法可使 SD 模型不断完善和深化,满足防空装备体系优化的理论需求。

参考文献:

- [1] [美]J W Forrester. 系统原理[M],王洪斌,译.北京:清华大学出版社,1986.
- [2] 王其藩. 高级系统动力学[M].北京:清华大学出版社,1996.
- [3] 王可定. SD 模型用于作战模拟的优越性[J]. 装备指挥技术学院学报,1999,10(8):63-65.
- [4] 徐品高. 分布式区域防空导弹体系的效能评定问题[J]. 现代防御技术,1993,5(3):32-34.
- [5] 田建锋. 防空体系优化研究[D]. 陕西三原:空军工程大学导弹学院,2002.
- [6] 李明,刘澎. 武器装备发展系统论证方法与应用[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [7] 马振华. 运筹学与最优化理论[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [8] 申卯兴,刘铭,闻宏伟. 系统动态学在防空系统中的应用研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2003,4(3):40-42.

(编辑:田新华)

Modeling of Optimize Aerial Defense Equipment System Based on System Dynamics

CHU Ting-ting^{1,2}, TIAN Jian-feng¹

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China; 2. Air Force Equipment Ministry, Beijing 100076, China)

Abstract: This paper studies the optimum problem of aerial defense equipment on the basis of system theory. By way of system state describing, structure analyzing design and quantitative relation control, a model is established based on system dynamics theory to evaluate campaign efficiency of aerial defense system. Simulation result shows that the method and the model are reasonable, effective and applicable for optimizing aerial defense equipment.

Key words: aerial defense equipment; system dynamics; model; optimization