

文章编号: 1001-0920(2009)10-1576-04

基于仿真的空地导弹武器体系作战效能评估决策方法

郭继峰¹, 殷志宏², 崔乃刚¹

(1. 哈尔滨工业大学 航天工程系, 哈尔滨 150001; 2. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘 要: 首先, 采用任务完成量度、工作时间度量和代价度量方法, 设计了空地导弹武器体系的 4 个层次的作战效能评价指标; 然后, 建立射前阶段、突防阶段和毁伤阶段的数学模型, 完成了对体系对抗过程的数学描述; 同时, 提出了效能品质的概念, 采用风险场描述了空地导弹突防阶段的攻防对抗过程; 最后, 提供了效能指标的数学表达, 形成了完整的空地导弹武器体系作战效能评估方法, 并应用均匀设计方法设计了仿真方案, 仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 风险场; 均匀设计; 攻防对抗; 作战效能; 导弹武器体系

中图分类号: V57

文献标识码: A

Method to evaluate operational effectiveness of air-surface missile swarm based on combat simulation

GUO Ji-feng¹, YIN Zhi-hong², CUI Nai-gang¹

(1. Department of Astronautics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China. Correspondent: GUO Ji-feng, E-mail: gjfhit@163.com)

Abstract: A measure of operational effectiveness evaluation of an air-surface missile swarm is designed, which includes four levels, and each one describes the workload, the time and the cost of the system. An integrated model is established, which includes three parts, the pre-battle model, the penetration model and the destroy model. The effectiveness quality is referred. The danger of missiles getting across defense area is described as a risk field. The equations of measure are shown. The schemes of simulating are researched by using uniform design. A combat simulation result shows the effectiveness of the method.

Key words: Risk field; Uniform design; Combat; Operational effectiveness; Missile system

1 引言

空地导弹武器体系是指由一系列空地导弹构成的进攻系统, 对其作战效能的研究不仅是使用部门关心的问题, 而且是设计部门关注的问题。研究典型对抗条件下空地导弹武器体系作战效能, 有助于评价体系的作战能力, 同时可分析合理的协同作战对抗策略, 为指挥决策人员提供合理的作战决策依据。目前, 导弹武器作战效能研究方法有很多, 最常用的有效能模型(ADC)法、系统效能分析(SEA)法和阶段分析法等^[1]。针对武器体系作战效能的研究方法多采用弹道仿真和蒙特卡洛统计方法^[2]。因为模型合理性、粒度和仿真样本数量直接影响仿真结果的可信度, 所以需要较长的仿真运行时间。另外, 导弹武器体系由多个单元构成, 单一的概率指标无法全

面反映系统各个组成部分的能力, 因此需要研究新的综合评价指标和作战效能评估决策方法。

本文以空地导弹武器体系为研究对象, 针对单一任务目标, 构建作战效能评价指标体系, 研究一种新的基于仿真的导弹武器体系作战效能评估决策方法, 并进行相应的效能评估决策仿真, 通过仿真检验方法的可行性。

2 作战效能评价指标设计

本文从进攻系统和分系统进攻两个方面, 设计空地导弹武器体系的系统综合效能、系统阶段效能、分系统综合效能和分系统阶段效能 4 个层次的指标。根据武器系统作战效能的定义, 这些指标将从任务、时间和经济 3 个角度描述。具体来说, 空地导弹武器体系综合效能, 采用系统完成任务的情况、系统

收稿日期: 2009-01-04; 修回日期: 2009-05-05。

作者简介: 郭继峰(1977—), 男, 河南偃师人, 讲师, 博士, 从事导弹武器系统攻防对抗与作战效能的研究; 崔乃刚(1965—), 男, 沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事导弹武器系统总体设计的研究。

完成任务的时间和系统完成任务的代价表示,即系统的任务完成度、工作时间度量和代价度量,对应于每一个阶段,系统效能可用系统在该阶段的任务完成度、时间损失和经济代价来表征,即系统的阶段任务完成度、时间度量和代价度量,各分系统采用相同的评价方式。

定义 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 为空地导弹作战效能指标集,其中: A_1, A_2, A_3, A_4 分别表示作战效能的 4 个层次; A_1 表示系统综合效能; A_2 表示系统阶段效能; A_3 表示分系统综合效能; A_4 表示分系统阶段效能。按照阶段分析法将导弹武器的作战过程分为 3 个阶段:射前阶段、突防阶段和毁伤阶段^[1]。每个阶段包含 3 种度量,则有

$$A_1 = \{a_{11}, a_{12}, a_{13}\},$$

$$A_2 = \{a_{21}^0, a_{22}^0, a_{23}^0, a_{21}^1, a_{22}^1, a_{23}^1, a_{21}^2, a_{22}^2, a_{23}^2\},$$

$$A_3 = \{a_{31}^i, a_{32}^i, a_{33}^i\},$$

$$A_4 = \{a_{41}^{i0}, a_{42}^{i0}, a_{43}^{i0}, a_{41}^{i1}, a_{42}^{i1}, a_{43}^{i1}, a_{41}^{i2}, a_{42}^{i2}, a_{43}^{i2}\}.$$

其中: $i = 1, 2, \dots, N$ (以下 i 取值相同), N 为分系统数,每一个层次都采用任务、时间和经济度量。例如: $a_{31}^i, a_{32}^i, a_{33}^i$ 分别表示分系统 i 的效能指标。

为了实现效能之间的对比,定义效能品质 Z 为任务完成量、任务规定时间和系统最大经济消耗之积与完成任务所用时间和任务实际经济消耗之积的比值。对于系统综合效能、系统阶段效能品质、分系统综合效能和分系统阶段效能,利用 a_{11}, a_{12}, a_{13} 与任务规定时间 T_T ,系统最大经济度量 $C_{\max}$ 描述,即

$$Z = a_{11}(T_T C_{\max}) / (a_{12} a_{13}). \quad (1)$$

假设在分系统评价指标相互独立的条件下,评价指标层次间的关系可表示为

$$\begin{cases} f_1(A_2, k) = A_1, \\ f_2(A_3, k) = f_1(A_2, k), \\ f_3(A_4, k) = A_2, \\ f_4(A_4, k) = f_3(A_3, k), \\ f_5(A_4, k) = A_3, \end{cases} \quad (2)$$

其中 k 表示武器体系攻防对抗的约束的集合。

3 基于仿真的作战效能评估决策方法

空地导弹武器体系攻防对抗过程按射前阶段、突防阶段和毁伤阶段逐步展开。

3.1 射前阶段

射前阶段采用载机对抗能力 D_f , 导弹发射距离 L_H , 导弹发射高度 H 等进行描述,主要表现为导弹的射前生存概率

$$P_1 = 1 - \exp(-c_1 D_f L_H / H), \quad (3)$$

其中 c_1 为常数。

3.2 突防阶段

突防阶段用幸存概率 P_2 来描述,主要研究的是人为因素和自然因素对导弹幸存概率的影响,即

$$P_2 = (1 - P_D) P_S, \quad (4)$$

其中: P_D 表示自然因素,本文指撞地概率; P_S 表示人为因素,本文指突防概率。

1) 撞地概率模型为^[3]

$$P_D = 1 - \exp(c_2 \exp(-y^2 / \sigma_D^2)). \quad (5)$$

2) 突防概率描述。本文采用风险场描述防空火力威胁分布,即

$$U = U(B, L, M, \sigma). \quad (6)$$

其中: B 为拦截器的布防描述, L 为拦截器的拦截能力描述, M 为目标飞行航迹描述。根据攻防对抗过程分析,空间任何一点的风险场分布为

$$U^* = \sum_{j=0}^m r_j U_j. \quad (7)$$

其中: m 为拦截单元火力通道总数, r_j 为拦截状态, U_j 为第 j 个拦截单元的威胁强度,即

$$U_j = (c_3 \lambda_j P_{j0}) / v. \quad (8)$$

这里: c_3 为常数, P_{j0} 为第 j 个拦截单元拦截器单发拦截概率, v 为目标飞行速度, λ_j 为第 j 个拦截单元射击频率。

假设风险累积服从指数分布,则风险梯度

$$\Delta U_j = U_j \exp(-k_j U_j h). \quad (9)$$

其中: k_j 为拟合常数, h 为步长。

从而可得

$$P_S = 1 - \int \Delta U_i dt. \quad (10)$$

拦截器单发拦截概率为^[4]

$$P_0 = 1 - 0.5^{R_d / CEP}. \quad (11)$$

根据雷达探测理论^[5],雷达探测模型表示为

$$S_j = f_L(RCS, R, C_U, C_W, \sigma). \quad (12)$$

3.3 毁伤阶段

毁伤阶段采用以下毁伤概率 P_3 描述:

$$P_3 = \sum_{i=1}^n \eta_i p_i \exp(-k_i p_i), \quad (13)$$

$$p_i = 1 - 0.5^{R_d / CEP}. \quad (14)$$

战斗部有效毁伤半径为^[6]

$$R_d = G_W^{1/3} / k_f. \quad (15)$$

3.4 综合评估

在攻防对抗过程中,空地导弹的飞行过程是一个风险累积的过程。根据攻防对抗仿真的统计结果,空地导弹武器体系作战效能的描述如下:

$$\begin{cases} a_{11} = a_{23}^0, \\ a_{12} = \max(a_{32}^i), \\ a_{13} = a_{21}^2 + a_{22}^2 + a_{23}^2; \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} a_{21}^0 = \sum_{i=1}^K N_i a_{41}^{i0} / \sum_{i=1}^K N_i, \\ a_{21}^1 = \min(a_{41}^{i1}), \\ a_{21}^2 = \sum_{i=1}^K a_{41}^{i2}; \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} a_{22}^0 = \sum_{i=1}^K N_i a_{42}^{i0} a_{42}^{i1} / \sum_{i=1}^K N_i, \\ a_{22}^1 = \max(a_{42}^{i1}), \\ a_{22}^2 = \sum_{i=1}^K a_{42}^{i2}; \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} a_{23}^0 = \sum_{i=1}^K a_{43}^{i0}, \\ a_{23}^1 = \max(a_{43}^{i1}), \\ a_{23}^2 = \sum_{i=1}^K a_{43}^{i2}; \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} a_{31}^i = P_{3i}, \\ a_{32}^i = \max(t_j), \\ a_{33}^i = N_i C_i; \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} a_{41}^{i0} = P_{1i}, \\ a_{41}^{i1} = \max(t_f^i) - T_b, \\ a_{41}^{i2} = N_i (1 - P_{1i}) C_i; \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} a_{42}^{i0} = P_{2i}, \\ a_{42}^{i1} = a_{32}^i - \min(t_f^i), \\ a_{42}^{i2} = N_i P_{1i} (1 - P_{2i}) C_i; \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} a_{43}^{i0} = P_{3i}, \\ a_{43}^{i1} = \max(t_j) - \min(t_j), \\ a_{43}^{i2} = N_i P_{1i} P_{2i} C_i. \end{cases} \quad (23)$$

其中: t_j 为分系统 i 的单元 j 工作时间, t_f^i 为分系统 i 的单元 j 的发射时刻, T_b 为作战开始时刻, P_{1i} 为分系统 i 的射前生存概率, P_{2i} 为分系统 i 的突防概率, P_{3i} 为分系统 i 的毁伤概率, N_i 为分系统 i 的单元个数, C_i 为分系统 i 单元平均成本, K 为分系统数。

4 仿真算例及评估决策结果分析

本文采用均匀设计方法,以减少空地导弹武器体系攻防对抗仿真的次数. 仿真方案如下:

1) 首先,针对空地导弹攻防体系有 5 个因素,且每个因素有 10 个水平的情况下,研究攻防对抗的仿真方案. 选取均匀设计表 $U_{10}^*(10^8)^{[7]}$, 根据 $U_{10}^*(10^8)$ 的使用表依次选取 $U_{10}^*(10^8)$ 的第 1, 3, 4, 5, 7 列,可以得到 5 个因素 10 个水平条件下的仿真方案,其偏差为 $D = 0.2414$.

2) 为了分析评估方法的有效性,需设计补充仿真方案:单个因素的 10 个水平仿真.

为了研究攻防对抗条件下空地导弹武器体系的作战效能,本文选取 5 类空地导弹(A类, B类, C类,

D类, E类) 为研究对象,每类导弹最大使用量 N 为 10, 目标毁伤程度要求为 0.99, 作战时间小于 3600 s, 步长取 1 s, 给定典型的作战环境和攻防策略. 均匀设计方案的仿真结果如表 1 所示, 补充方案的仿真结果如图 1 ~ 图 4 所示.

表 1 均匀设计方案仿真结果

导弹数量	完成任务概率	耗用时间/s	代价/ 10^5 ¥
1	0.992646	2004.5	361
2	0.993376	2006.6	572
3	0.988698	2006.3	385
4	0.990886	2008.8	319
5	0.994190	2009.5	352
6	0.991682	2004.3	583
7	0.992332	2005.3	616
8	0.995427	2005.9	550
9	0.988491	2018.2	363
10	0.993153	2010.9	484

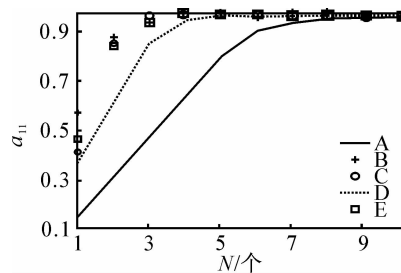


图 1 导弹数量与任务完成度量的关系

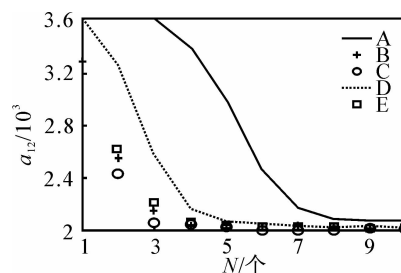


图 2 导弹数量与任务时间度量的关系

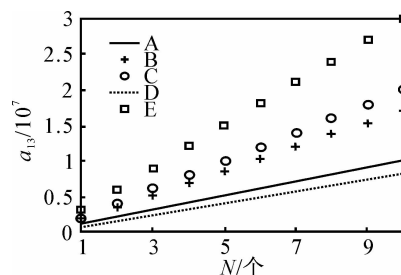


图 3 导弹数量与任务经济消耗度量的关系

仿真结果分析如下:由表 1, 图 1 ~ 图 3 可知,空地导弹体系的构成不是决定作战效能的唯一因素. 对于单种空地导弹构成的武器体系,随着单元数量的增加,任务度量增加到一定程度后,基本保持不变;时间度量减少到一定程度后,基本保持不变. 即系统的任务度量和时间度量不会因为空地导弹的增加而无限增大. 而随着空地导弹武器体系单元数

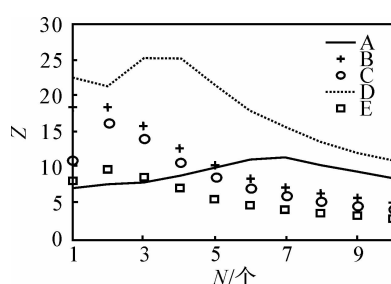


图 4 导弹数量与效能品质的关系

量的增加,空地导弹系统经济度量也不断增加.评价结果符合逻辑,即评估方法是有效的.

图 4 表明在给定的指标体系下,空地导弹武器体系的作战效能品质随着单元数的增加先增后减.由此说明,存在最佳的攻防消耗使体系的作战效能品质最佳.另外,以 D 类空地导弹和 E 类空地导弹作对比,D 导弹的效能品质明显高于 E 导弹的效能品质.由此说明,针对本文所给定的作战任务,D 导弹比 E 导弹更加有效.

以上结果表明,本文提供的作战效能指标和评估方法是合理的.本文采用风险场描述防空威胁,提高了评估计算速度;均匀设计仿真方案,大大减少了仿真次数,提高了攻防仿真的效率.

5 结 论

本文提出了一种基于仿真的空地导弹武器体系的作战效能评估方法.首先,建立了体系作战效能评价指标;然后,分 3 个阶段研究了攻防对抗模型及相关评价指标的获取,采用均匀设计方法设计了仿真方案,结合补充方案,进行计算机仿真,并通过分析得到相关结论,初步检验了作战效能评估方法的有效性.下一步,将进一步完善攻防对抗模型,利用作战效能评估方法,研究决策因素和体系构成对空地导弹体系作战效能的影响.

参考文献 (References)

[1] 张克,刘永才,关世义,等.关于导弹武器作战效能

评估问题的探讨[J]. 宇航学报, 2002, 23(2): 58-66.

(Zhang K, Liu Y C, Guan S Y, et al. An investigation into the problem of evaluating combat effectiveness for missile weapon systems[J]. J of Astronautics, 2002, 23 (2): 58-66.)

[2] 谢邦荣,尹健,宋劲松.巡航导弹对地空导弹的突防概率仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2687-2695.

(Xie B R, Yin J, Song J S. Simulation and research on the penetration probability of ALCM against SAM[J]. J of System Simulation, 2004, 16(12): 2687-2695.)

[3] 姜联堂,周成平,丁明跃.基于误差随机过程无人飞行器的撞地概率计算公式[J]. 宇航学报, 2003, 24(2): 121-125.

(Lou L T, Zhou C P, Ding M Y. Clobber probability of pilotless aircraft based on error stochastic process[J]. J of Astronautics, 2003, 24(2): 121-125.)

[4] George J Ferren, Randolph W Gallas. DILUTE: A mini-campaign simulation model to analyze strategic penetration of various force mix combinations of cruise missiles and manned penetrators[R]. ADA 115698.

[5] 王国玉,汪连栋.雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京:国防工业出版社, 2004: 115-125, 265-285.

(Wang G Y, Wang L D. Simulation and evaluation of radar electronic warfare systems[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 115-125, 265-285.)

[6] 崔乃刚,殷志宏,杨宝奎.基于效能的时间敏感目标打击策略问题研究[J]. 控制与决策, 2008, 23(5): 559-562.

(Cui N G, Yin Z H, Yang B K. Research on strategy problem of striking time sensitive target based on effectiveness[J]. Control and Decision, 2008, 23(5): 559-562.)

[7] 方开泰.均匀设计与均匀设计表[M]. 北京:科学出版社, 1994.

(Fang K T. Uniform design and programs[M]. Beijing: Science Press, 1994.)

(上接第 1575 页)

[5] Tong S C, Li Y M. Direct adaptive fuzzy backstepping control for nonlinear systems[C]. Proc of the 1st Int Conf on Innovative, Information and Control. 2006, 2: 623-627.

[6] Wang M, Chen B, Dai S L. Direct adaptive fuzzy tracking control for a class of perturbed strict-feedback nonlinear systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2007, 158(24): 2655-2670.

[7] Chen B, Tong S C, Wang X Y. Adaptive fuzzy control

output tracking control of nonlinear systems Via Backstepping [C]. Proc the 6th World Conf on Intelligent Control and Automation. Dalian, 2006: 61-65.

[8] Zhang T, Ge S S, Hang C C. Adaptive neural network control for strict-feedback nonlinear systems using backstepping design[J]. Automatica, 2000, 36(12): 1835-1846.