

基于改进 ADC 模型的反导弹战斗部作战效能评估

包 悦, 张志峰, 刘 力

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

摘要 传统 ADC(Availability Dependability Capacity, ADC)模型计算过程较为繁琐,同时评估的只是系统本身的基本效能,反映不出武器在实际战场环境中的作战效能。为了有效评估武器装备的系统效能,以传统 ADC 模型为基础,通过借鉴马尔科夫过程的思想,提出了一种简化算法,同时构造了一种改进的 ADC 模型,综合考虑了影响反导弹战斗部作战效能的因素,将定性问题量化,并通过实例验证了该模型的有效性;特别提出了将目标导弹的突防能力作为影响因素来分析,对装备的型号论证、方案研制具有一定的参考价值。

关键词 ADC 模型;战斗部;效能

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.06.007

中图分类号 TN953 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2012)06-0030-05

武器系统论证和使用中的一项重要工作是对其作战效能进行评估,以此作为部队列装,科学决策的基本依据。对于地空导弹的要求是不仅可以打击隐形飞机和巡航导弹等低速目标,还要能够对抗战术弹道导弹(Tactical Ballistic Missile, TBM)这样的高速小目标。战斗部作为常规武器系统的重要组成部分,对其效能评估的准确与否会直接影响到整个武器系统的效能分析,因此,研究常规武器战斗部的作战效能评估方法具有重要的意义^[1]。由于常规战斗部的种类繁多,作用机理差异较大,影响战斗部效能的因素也十分复杂,因此对其效能做出准确、合理的评估一直是一项比较困难的工作。

目前,国内的研究主要集中建立在典型的作战环境和想定基础上的单项效能分析^[2],而少有对地空导弹战斗部总体效能综合评估的研究,并且没有提出具体计算战斗部效能的方法。近年来被普遍接受的 ADC 模型^[3],解决了武器系统装备结构、技术特性和战术功能的相关性,增强了系统的整体性,能够全面方便地对地空导弹武器系统进行定量分析和评估,本文在此基础上进行了改进研究。

1 ADC 基本模型原理

由美国工业界武器装备系统效能咨询委员会(WSEIAC)给出的定义是:系统效能是系统预期达到一组专门任务要求程度的度量,而且是系统可用性、可信性及固有能力的函数。该模型将武器系统的可靠性、维修性、保障性、生存能力和固有能力等因素综合为可用性、可信性和固有能力 3 个指标效能,并认为系统效能是这 3 个指标效能的进一步综合^[4]。

1.1 确定有效向量 A

系统的有效性又称可用度,与武器系统可靠性、维修性、维修水平、维修管理水平、维修人员数量及水平、器材供应水平等因素有关。A 表示系统在任意随机时刻开始执行任务时的可能状态,它由系统按预定要求正常工作的概率组成。对于反导弹武器系统,可以用可用性来表示反导弹战斗部在开始执行任务时所处的状态。

收稿日期:2012-09-13

基金项目:航空科学基金资助项目(20120469801)

作者简介:包悦(1988-),男,陕西西安人,硕士生,主要从事装备采办与项目管理中费用效能分析研究。

E-mail:byssg@sohu.com

1.2 确定可信赖矩阵 D

可信赖矩阵 D 以有效向量 A 为基础,它描述系统在执行任务过程中的状态,反映了武器系统各子系统的工作可靠程度和连续工作的能力。

若某型号导弹的战斗部为不可修复系统,那么系统的可信性只与系统的可靠性有关^[5]。影响反导弹武器战斗部可靠性的主要因素见图 1。

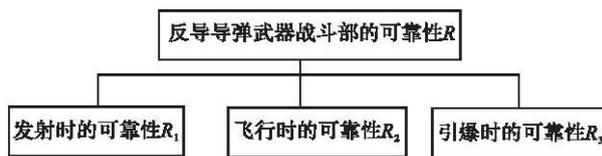


图 1 可靠性影响因素

Fig.1 Dependability influencing factors

1.3 确定能力矩阵 C

能力矩阵 C 的元素不仅与系统状态有关,更大程度上决定于被评价系统的能力。反导弹武器战斗部的能力用其对空中目标的毁伤能力表示。影响弹药系统对目标毁伤能力的因素见图 2。

1) 落入概率计算模型:

$$P_L = 1 - e^{-\frac{R_z^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$\sigma = f(R, H, P) \quad (2)$$

式中: P_L 为落入概率; R_z 为战斗部的威力半径; R 、 H 、 P 分别为拦截弹遭遇目标时的距离、高度、航路捷径^[6]。

2) 引战配合效率模型:

$$P_{yz} = f(R_y, v_r, \rho_{min}, t_{yz}) \quad (3)$$

式中: R_y 为反导引信的作用距离; v_r 为交会时弹头的相对速度; ρ_{min} 为制导误差,即脱靶量; t_{yz} 为引战配合的时间,包括探测处理时间、延迟时间、起爆时间等^[7]。

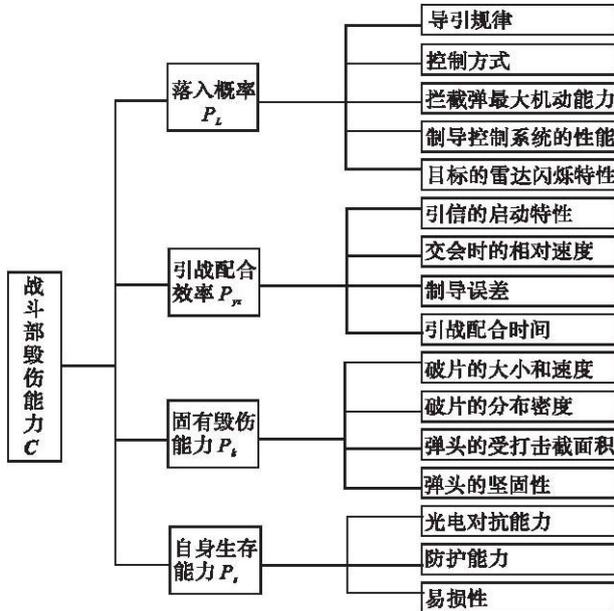


图 2 毁伤能力影响因素

Fig.2 Damage capacity influencing factors

3) 固有毁伤能力计算模型^[8]。固有毁伤能力是指在引战配合成功的条件下,破片对目标的毁伤效果 $P(u_k)$ 为:

$$P(u_k) = \begin{cases} 0, & u_k \leq 0 \\ 1 - 3.03e^{-5.6u_k} - \sin(0.3365 + 1.84u_k), & u_k > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$u_k = \frac{10^{-8} A_0 - A - 0.065}{1 + 2A^{2.31}} \quad (5)$$

$$A_0 = \rho \phi v_{f_i}^3 q^{2/3} / g \quad (6)$$

$$A = \phi \alpha \delta / (q^{1/3} \sin \gamma) \quad (7)$$

式中: $P(u_k)$ 为破片引爆弹头的概率; u_k 为破片的引爆参数; ρ 为弹头装药密度; ϕ 为破片形状系数; v_{f_i} 为破片撞击速度; q 为破片质量; g 为重力加速度; ρ 为弹头壳体密度; δ 为破片垂直穿过弹头壳体等效厚度; γ 为破片与弹轴的交会角。

4) 自身生存能力。通常用生存概率 P_s 表示反导弹战斗部生存能力的量度指标。

结合上述 4 个影响因素,将反导弹战斗部的毁伤能力表示为:

$$C = P_L P_{yz} P_k P_s \quad (8)$$

2 对于 ADC 模型的改进

2.1 简化算法

作战效能是指包括了作战可用性、作战可靠性和系统作战能力的一体化概念。借鉴马尔科夫过程的思想,因为战斗部在工作中发生状态转移,其系统的作战效能由系统的最终状态决定,而与系统的前一状态无关,即具有马尔科夫性。所以将影响反导弹战斗部效能的全寿命因素考虑成一个连续的过程,见图 3。

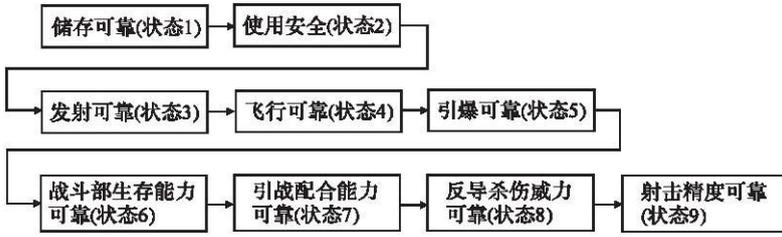


图3 全寿命连续状态

Fig.3 Life cycle running status

特别要指出,以上串联的9个状态是反导弹战斗部全寿命必经的过程,任何一个状态失效都会导致任务失败。

由马尔科夫过程的相关理论,结合本模型的实际意义,构造一步转移概率矩阵 P :

$$P = \begin{bmatrix} 0 & a_{21} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 P 中 a_{ij} 表示从状态 i 到状态 j 的一步转移概率,由于战斗部在完成任务过程中要经过9次状态转移,并且初始状态和末状态分别为状态1和状态9。9步转移概率矩阵为:

$$P^{(9)} = P^9 = \begin{bmatrix} 0 & a_{21} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{32} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}^9 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & a_{21} a_{32} \dots a_{98} \\ 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由转移概率矩阵的含义,可得反导弹战斗部作战效能:

$$E = P^9(1, 10) = a_{21} a_{32} \dots a_{98} \quad (11)$$

经过比较,本算法在计算步骤上较传统 ADC 模型算法有了一定的简化,特别适用于多个影响因素的情况。

2.2 综合考虑影响反导弹战斗部作战效能的因素

上述对反导弹战斗部效能 E 的影响因素都是在理想条件下考虑的,可以认为是基本效能 E_b 。但在实际战场环境中,还应考虑到其对抗效能 E_a ,其影响因素见图4。

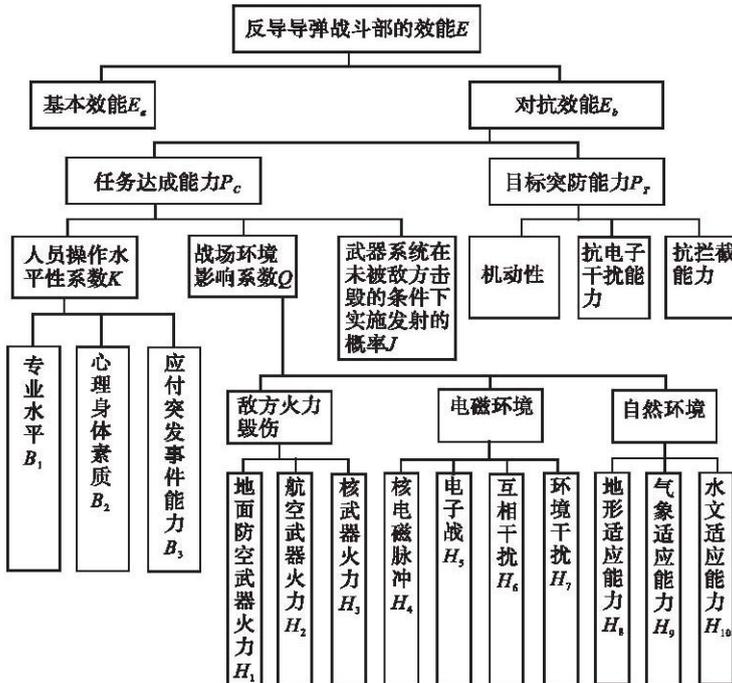


图4 战场环境下效能影响因素

Fig.4 Efficiency influencing factors in the battle

2.2.1 K值的确定

任何系统都需要人员的参与,人员的专业水平,心理身体素质,以及应付突发事件能力对于反导导弹武器战斗部效能的发挥都起着至关重要的作用。此处理用 Delphi 专家评估法来确定 K 值。以 $F_{\max} = 100$ 分为满分, F_i 为专家打分的平均分,则:

$$B_i = \frac{F_i}{F_{\max}} \quad (12)$$

根据部队演习资料和其他相关资料表明,这3项指标对反导导弹战斗部毁伤能力的影响权值分别为0.4、0.3、0.3。则根据加权平均法有:

$$K = 0.4B_1 + 0.3B_2 + 0.3B_3 \quad (13)$$

2.2.2 Q值的确定

战场外部环境对反导导弹战斗部的毁伤能力具有重大的影响。 Q 值的确定利用加权平均法可得:

$$Q = \sum_{i=1}^n \beta H_i \quad (14)$$

式中: H_i 为战场环境中的各个因素对反导导弹战斗部作战效能的损伤率; β 为其相应的权值。 $H_1 \sim H_7$ 可以在仿真实验室中通过模拟实际战场环境中的对抗条件来确定^[9];由于目前气象仿真实验与战场环境模拟结合领域的研究成果较为空白, $H_8 \sim H_{10}$ 的确定通常是在演习试验中测得(如高原试验等)。 β 可以利用层次分析法或者 Delphi 专家评估法来确定。

2.2.3 J值的确定

传统 ADC 模型未考虑对方的对抗。在实际战场上,必须抢得先机,使得武器系统在未被对方击毁的条件下实施发射,从而达到克敌制胜的目的。其 J 值为:

$$J = P_A + (1 - P_A)(1 - PR) \quad (15)$$

式中: P_A 为我方武器系统先于对方发射的概率; R 为对方武器系统发射可靠、飞行可靠的概率; P 为对方武器系统条件杀伤概率。

2.2.4 P_T 值的确定

传统 ADC 模型未考虑到目标导弹的突防能力,分析同一型号反导导弹战斗部的作战效能必须将不同目标的突防能力综合考虑进来才更为全面详尽。反导任务是否完成取决于对方导弹与我方导弹博弈的结果。因此在这里所提到的机动性、抗电子干扰能力和抗拦截能力都是目标导弹相对于我方整个反导体系而言的。将双方的武器参数代入仿真环境中,利用多次试验,得到机动率 s_1 ,抗电子干扰率 s_2 和抗拦截率 s_3 。则目标突防概率 $P_T = s_1 s_2 s_3$,未突防的概率为 $\overline{P_T} = 1 - P_T$ 。

2.3 改进后 E值的确定

由以上分析可得改进后的 E 值为:

$$E = E_a E_b = (A \cdot D \cdot C)(P_c \overline{P_T}) = (\omega \omega \cdots \omega) J Q K (1 - P_T) \quad (16)$$

3 算例分析

假设,某型反导导弹战斗部在战储期间规定条件下的储存可靠度为 98%,使用安全率为 97%;发射阶段、飞行阶段和引爆阶段的任务可靠度为别为 99%、95% 及 98%;根据取定的参数,结合式(1)~(7),可分别计算得该型反导导弹战斗部的落入概率 $P_L = 0.80$,引战配合效率 $P_{yz} = 0.85$,固有毁伤能力 $P_k = 0.90$,并假定其生存概率 $P_s = 0.99$;在一次部队演习训练过程中,保障人员的专业水平、心理身体素质、应付突发事件能力通过专家打分分别量化为 $B_1 = 0.90$ 、 $B_2 = 0.80$ 、 $B_3 = 0.80$;若该型反导导弹在未被击毁的情况下成功发射,靶弹的突防概率为 0.1。在不考虑电磁环境和自然环境影响的情况下,该型反导导弹的作战效能计算如下:

$$\begin{aligned} E &= E_a E_b = (A \cdot D \cdot C)(P_c \overline{P_T}) = (\omega \omega \cdots \omega) J Q K (1 - P_T) = \\ & (0.98 \times 0.97 \times 0.99 \times 0.95 \times 0.98 \times 0.80 \times 0.85 \times 0.90 \times 0.99) \times \\ & (0.4 \times 0.90 + 0.3 \times 0.80 + 0.3 \times 0.80) \times 0.9 = 0.40131 \end{aligned}$$

计算结果与以往成熟模型算法比较偏差不大,表明本模型可行。

4 结语

改进后的 ADC 模型在算法上较以往有了一定的简化,并且讨论了在实际战场环境中反导弹战斗部作战效能的评估方法,有较好的现实意义。但本研究在对于战场环境影响系数 Q 的定量化方面以及不同型号目标导弹的突防能力 P_T 对反导弹战斗部作战效能 E 影响的计算方法上还有待进一步的深化。

参考文献(References):

- [1] Ones N W. Application of simulation to the evolution of weapon system performance[C]//1986 Summer computer simulation conference. Paris: Kigil Nide, 1986: 17-23.
- [2] 李晋庆,胡焕性. 聚焦型破片战斗部对目标毁伤概率的工程算法[J]. 兵工学报, 2003, 24(4): 555-557.
LI Jinqing, HU Huanxing. The engineer algorithm of the focusing fragment warhead on the target damage probability [J]. Acta armamentarii, 2003, 24(4): 555-557. (in Chinese)
- [3] 高尚, 娄寿春. 武器系统效能评价方法综述[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(7): 109-114.
GAO Shang, LOU Shouchun. The overview of weapon system effectiveness evaluation[J]. System engineer theory and practice, 1998, 18(7): 109-114. (in Chinese)
- [4] Li W, Mao N, Pan W. The effectiveness evaluation model of radar jamming system based on WSEIAC model[C]//Control and decision conference 2008. Yantai: IEEE press, 2008: 1848-1852.
- [5] GU Xiaohui, CAO Bing. The synthetic evaluation of warhead overall efficiency[J]. Journal of systems engineering and electronics, 2003, 14(1): 12-17.
- [6] 唐雪梅, 徐文旭, 蒙源愿, 等. 地地弹道导弹武器系统攻防体系对抗[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(10): 10-12.
TANG Xuemei, XU Wenxu, MENG Yuanyuan, et al. The attack-defense counter of the ground-ground ballistic missile weapon system[J]. Systems engineer and electronics, 2000, 22(10): 10-12. (in Chinese)
- [7] 庄志洪, 刘剑锋, 李立荣, 等. 引战配合效率分析[J]. 兵工学报, 2001, 22(1): 41-44.
ZHUANG Zhihong, LIU Jianfeng, LI Lirong, et al. The fit efficiency analysis of the fuze and the warhead[J]. Acta armamentarii, 2001, 22(1): 41-44. (in Chinese)
- [8] 胡勇, 唐雪梅. TBM 突防能力评估方法[J]. 现代防御技术, 2005, 33(3): 39-47.
HU Yong, TANG Xuemei. The evaluation methods of TBM penetration ability[J]. Modern defense technology, 2005, 33(3): 39-47. (in Chinese)
- [9] Brockel K H, Cofield D, DeALLsume W, et al. Electromagnetic environment effects compendium [R]. Research and development technical report, CECOM-TR-93-5, 1993: 1-20.

(编辑: 田新华)

Evaluating Operational Effectiveness of Missile Defense Warhead Based on the Modified ADC Model

BAO Yue, ZHANG Zhi-feng, LIU Li

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to evaluate the weapon system effectiveness, American Weapon System Effectiveness Industry Advisory Committee advanced the ADC model. The model enhances the system integrity of weapons' structure, technical feature and tactical function. The defect of the traditional ADC model lies in the complex calculation procedure. Also, the evaluation is only confined to the basic effectiveness. The effectiveness of weapon system based on the conflict circumstance in reality can't be evaluated. This paper, based on the traditional ADC model, puts forward a simplified algorithm by referencing the thought of Markov process and establishes an improved ADC model by which the conflict circumstance is overall considered in reality to make the qualitative problem quantized. A real case is analyzed to confirm the effectiveness and scientificness of the new model. The paper shows particular concerns about the target missiles defense penetration ability, which is of some reference value to the weapons' conceptualization, initiation and design.

Key words: ADC model; warhead; effectiveness