

基于 ADC 模型的反导导弹战斗部作战效能评估

彭彪 张志锋 姜科

(空军工程大学导弹学院, 三原 713800)



摘要: 针对反导导弹战斗部的性能特点, 构建了反导导弹战斗部总体效能评估指标体系, 并依据ADC模型, 建立了反导导弹作战效能的综合评判模型。最后通过算例, 验证了该模型的合理性。

关键词: 反导导弹战斗部; ADC模型; 作战效能评估

Evaluating Operational Effectiveness of Missile Defense Warhead Based on ADC Model

Peng Biao Zhang Zhifeng Jiang Ke

(The Missile Institute of Air Force Engineering University, Sanyuan 713800)

Abstract: Aiming at the characteristics of missile defense warhead, the index system of the operational effectiveness evaluation is presented. Then, the model of evaluating operational effectiveness of missile defense warhead based on ADC is built, which rationality is verified by the arithmetic examples.

Key words: missile defense warhead; ADC model; operational effectiveness evaluation

1 引言

空天反导已经成为现代防空作战的新趋势, 新一代的防空导弹不仅要能够对付隐身飞机和巡航导弹等低速目标, 还要能抗击战术弹道导弹(TBM)这样的高速小目标^[1]。因此, 新的防空作战任务对防空导弹的反导作战效能提出了更高的要求, 而导弹战斗部作为弹上系统的重要组成部分, 其作战效能评估的准确性对整个武器系统作战效能分析的结果产生直接影响。目前, 国内学者对战斗部的效能还没有形成有效的或通用的效能分析方法, 建立在典型的作战环境和想定基础上的单项效能分析较多^[2, 3], 而鲜见关于战斗部总体效能的研究, 通常局限于定性比较分析^[4, 5], 没有提出具体计算战斗部效能的方法。本文利用被普遍接受的美国工业界武器装备系统效能咨询委员会的模型(ADC模型)^[6], 计算了反导导弹战斗部的系统效能, 为导弹战斗部的效能评估提供

了一种新的思路与方法。

2 ADC 模型概述

ADC模型是美国工业界武器系统效能咨询委员会(WSEIAC)提出的效能评估模型, 它被广泛应用于系统效能的评估。ADC模型认为“系统效能是预期一个系统满足一组特定任务要求程度的量度, 是系统可用性、可信性与固有能力的函数。”

可用性是在开始执行任务时系统状态的度量; 可信性是在已知系统开始执行任务时所处状态条件下, 在执行任务过程中某个瞬间或多个瞬间的系统状态的度量; 固有能力的度量是在已知系统执行任务过程中所处状态条件下, 系统达到任务目标的能力的度量。该模型的表达式是:

$$E=ADC \quad (1)$$

作者简介: 彭彪(1985-), 硕士, 管理科学与工程专业; 研究方向: 航空武器系统建模、仿真与效能评估。

基金项目: 国家航天创新基金(20090196005)

收稿日期: 2011-02-21

式中: A 为可用性向量, $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$, n 为系统在开始执行任务时的状态数目; D 为 $n \times n$ 的可信度矩阵, $d_{i,j}$ 是系统由初始状态 i 经历任务期间到任务结束时转移到状态 j 的概率; C 为固有能力向量, C_j 代表系统处于状态 j 时完成任务的概率或所能完成的任务量。若 C 为一矩阵时, $c_{j,k}$ 代表系统处于状态 j 时, 完成第 k 项子任务的概率或完成任务量, 此时的系统效能为向量。

3 反导弹战斗部效能评估模型

反导弹战斗部是反导弹的杀伤装置, 是为完成反导作战任务而研制的, 主要由壳体、杀伤元、装药、引信、安全引爆执行机构和传爆装置组成。反导弹战斗部效能是指战斗部在一定距离处击毁导弹目标的概率。根据 ADC 模型的原理, 反导弹战斗部的效能可以由可用性、可信性和毁伤能力三大要素组成^[7], 其效能分析结构框图如图 1 所示。

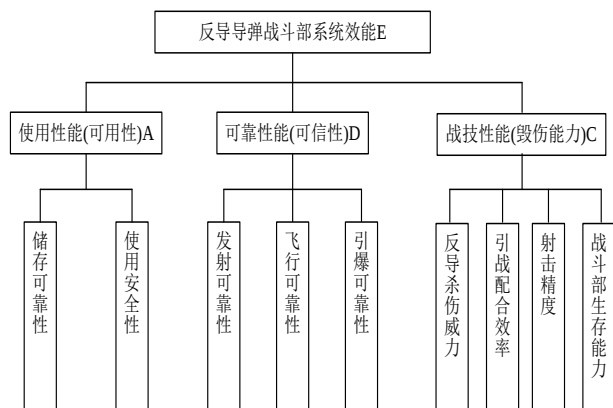


图 1 反导弹战斗部效能分析框架

3.1 可用性分析

反导弹战斗部是一个不可修复系统, 开始执行任务的状态可分为正常工作(可用)状态和发生故障(不可用)状态两种。所以, 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。用 a_1 和 a_2 分别表示战斗部开始执行任务时处于正常工作状态和发生故障状态的概率, 即可用度。于是, 可得反导弹战斗部可用性向量的一般表达式为:

$$A = (a_1, a_2) \quad (2)$$

由 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$, 则有 $a_1 + a_2 = 1$ 。对于不可修复的

反导弹战斗部, 系统的可用度只与系统的可靠性有关, 与系统的维修性无关。所以, 反导弹战斗部的可用度只与可靠性有关。导弹的储存期一般为 10 年左右, 在导弹储存期内, 战斗部任何时候都可以使用。一般情况下, 反导弹战斗部在规定的储存期内可用性比较高, 通常不小于 99%。

3.2 可信性分析

反导弹从发射车发射的瞬间, 战斗部执行任务就开始了, 经过发射、空中飞行运动到最终击毁敌目标。由于不可修复, 反导弹战斗部在开始执行任务后只处于正常工作和发生故障两种状态^[8]。那么, 反导弹战斗部在执行任务过程中的状态如下:

- 战斗部在开始执行任务时处于正常状态, 而在执行任务过程中仍然处于正常状态, 并用 d_{11} 表示正常工作状态的概率。
- 战斗部在开始执行任务时处于正常状态, 而在执行任务过程发生了故障, 并用 d_{12} 表示发生故障的概率。
- 战斗部在开始执行任务时处于发生故障状态, 而在执行任务过程中却处于正常工作状态, 并用 d_{21} 表示正常工作的概率。
- 战斗部在开始执行任务时处于发生故障状态, 而在执行任务过程中继续处于发生故障状态, 并用 d_{22} 表示发生故障的概率。

综合上述分析, 反导弹战斗部的可信度矩阵 D 为:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于 $\sum_{j=1}^n d_{i,j} = 1$, 有 $d_{11} + d_{12} = 1$, $d_{21} + d_{22} = 1$ 。

对于不可修复系统, 如果在开始执行任务时就处于发生故障状态, 那么, 它在执行任务过程也必然处于发生故障状态, 即 $d_{22} = 1$, 这是一个必然事件。如果在开始执行任务时处于发生故障状态, 而在执行任务过程却处于正常工作状态, 这对于不可修复系统是绝对不可能的, 即 $d_{21} = 0$ 。所以, 对于不可修复系统, 反导弹战斗部的可信性矩阵可改写为:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于在执行任务过程中的不可修复系统, 系统的可信性只与系统的可靠性有关。影响反导弹战斗部

可信性的主要因素有：在发射时的可靠性；在飞行过程中的可靠性；引爆过程中的可靠性。假设用 R_1 、 R_2 及 R_3 分别表示反导导弹战斗部在发射阶段、飞行阶段和引爆阶段的可靠度，则 $d_{11} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$ ， $d_{12} = 1 - d_{11}$ 。

3.3 毁伤能力分析

反导导弹战斗部在最后阶段完成反导作战任务的程度，通常用战斗部对空中目标的毁伤能力表示。一般情况下，战斗部的毁伤能力越大，完成给定任务的概率就越高，战斗部的毁伤能力可用完成给定任务的概率来量度。大量实验和实战表明，弹药系统对目标的毁伤能力主要取决于导弹的落入概率、引战配合和弹片对导弹的固有毁伤能力及自身生存能力。

3.3.1 落入概率计算模型^[9]

考虑到反导导弹的战斗部对弹道导弹弹头的杀伤距离是有限的，即超过一定距离飞散出的破片将不能杀伤弹道导弹弹头，故对拦截弹提出了较高的导引精度要求。假设制导精度服从二维独立不相关的正态分布，密度函数为：

$$f(y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{(y-m_y)^2}{2\sigma_y^2}} e^{-\frac{(z-m_z)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (5)$$

若战斗部的威力半径为 R_z ，则将拦截弹引入半径为 R_z 的圆内概率为落入概率：

$$P_L = \iint_S f(y, z) dydz, s = \pi R_z^2 \quad (6)$$

拦截弹的制导精度主要受以下因素影响：导引规律、控制方式、拦截弹最大机动能力、制导控制系统的性能、目标的雷达闪烁特性等。

按 P_L 积分公式计算落入概率是比较困难的。若假设 $m_y = m_z = 0$ ， $\sigma_y = \sigma_z = \sigma$ ，即制导精度二维正态圆散布，这种假设不失一般性，则落入概率 P_L 的计算就很容易了。

$$P_L = 1 - e^{-\frac{R_z^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

$$\sigma = f(R, H, P) \quad (8)$$

式中： R ， H ， P 分别为拦截弹遭遇目标时的距离、高度和航路捷径。

3.3.2 引战配合效率模型^[10]

由于反导导弹采用逆轨拦截，所以遭遇段拦截弹的速度矢量与弹道导弹的速度矢量近似成180°，即交会角（取锐角）较小，角散布也小，这样有利于提高

引战配合效率。

引战配合的好坏，即是引信作用区与破片动态飞散区配合的好坏。配合好，则命中的破片数多；配合不好，命中的破片数就少或者没有破片命中目标。由于反导导弹拦截弹道导弹时弹头的相对速度 v_r 高达3000m/s以上，若战斗部引爆提前或滞后1ms，杀伤距离将有±3m以上的误差。由此可见，反导拦截对引战配合提出了很高的要求。

无线电引信的作用距离通常可以用正态分布来描述，其引战配合的效率 P_{yz} 为：

$$P_{yz} = f(R_y, v_r, \rho_{\min}, t_{yz}) \quad (9)$$

式中： R_y 为反导引信的作用距离； v_r 为交会时弹目相对速度； $\rho_{\min}$ 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。引战配合的效率 P_{yz} 可采用蒙特卡洛法来仿真模拟。引战配合的效率主要取决于引信的启动特性、交会时的相对速度、制导误差和引战配合时间四个因素。

3.3.3 条件杀伤概率计算模型^[11]

引战配合成功仅表示能将弹道导弹弹头引入反导导弹战斗部的动态破片飞散区内。而弹道导弹弹头能否被击穿和引爆，还取决于破片的大小和速度、破片分布密度、弹头的受打击截面积及弹头的坚固性等要素。条件杀伤概率即是在引战配合成功的条件下，研究破片对弹道导弹弹头的毁伤效果，即杀伤概率。

若反导导弹拦截弹头为破片杀伤，破片能将弹头局部破坏或引爆，杀伤半径大，对拦截精度要求较低，其单块破片引爆弹头的半经验公式为：

$$P(u_k) = \begin{cases} 0, u_k \leq 0 \\ 1 - 3.03e^{-5.6u_k} - \sin(0.3365 + 1.84u_k), u_k > 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$u_k = \frac{10^{-8} A_0 - A - 0.065}{1 + 2A^{2.31}} \quad (11)$$

$$A_0 = \rho_d \phi v_{ft}^3 q^{2/3} / g \quad (12)$$

$$A = \phi \rho_s \delta / (q^{1/3} \sin \gamma) \quad (13)$$

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； q 为破片质量； v_{ft} 为破片撞击速度； ϕ 为破片形状系数； ρ_d 为弹头装药密度； ρ_s 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； g 为重力加速度。由此可以计算战斗部条件毁伤概率为 P_k 。

3.3.4 反导导弹战斗部生存能力

反导导弹战斗部生存能力是指反导导弹战斗部从开始执行任务到毁伤目标的全过程中，仍然保持其预期功能的能力，通常用生存概率表示反导导弹战斗部生存能力的量度指标，用符号 P_s 表示。影响反导导弹战斗部生存能力的主要因素有：光电对抗能力、防护能力、易损性等。由于反导导弹战斗部一般较小，且在空中飞行时间较短，具有较高的生存能力。

综合上述分析，反导导弹战斗部毁伤导弹(TBM)目标的能力可表示为：

$$C_{11} = P_L \cdot P_{YZ} \cdot P_K \cdot P_S \quad (14)$$

由于反导导弹战斗部是一个不可修复系统，一旦处于发生故障状态，就不具有毁伤空中目标的能力，也就是说毁伤敌目标概率为 0，即 $C_{21} = 0$ 。

因此，反导导弹战斗部能力矩阵为：

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.4 效能计算

综合各要素分析结果，根据 ADC 模型，反导导弹战斗部效能计算公式可表示为：

$$E = ADC = (a_1, a_2) \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{11} \\ 0 \end{bmatrix} = a_1 d_{11} c_{11} \quad (16)$$

4 算例

假设，某型反导导弹战斗部在战储期间规定的条件下的可用度 $a_1 = 99\%$ ；在发射阶段、飞行阶段和引爆阶段的任务可靠度分别为 $R_1 = 99\%$ 、 $R_2 = 95\%$ 及 $R_3 = 98\%$ ，则该型反导导弹战斗部的可信度为 $d_{11} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 = 0.99 \times 0.95 \times 0.98 = 0.9212$ ；根据取定的参数，通过上节中模型和公式(5)至(16)，可分别计算得该型反导导弹的战斗部落入概率为 $P_L = 0.80$ ，引战配合效率为 $P_{YZ} = 0.85$ ，条件毁伤概率为 $P_K = 0.90$ ，并假定其生存概率为 $P_S = 0.99$ ，由于文章篇幅有限，上述数据来源和计算过程不作赘述。

将这些数据代入式(14)，可得战斗部毁伤导弹(TBM)目标的能力为 $C_{11} = 0.80 \times 0.85 \times 0.90 \times 0.99 = 0.6059$ 。将其代入式(16)得 $E = 0.5526$ 。通过与其它成熟的模型算法比较，计算结果真实可信，有较强的适用性。

5 结束语

本文利用 ADC 模型，为反导导弹战斗部的作战效能评估提出了一种新的计算方法，解决了战斗部效能评估的定量计算问题，对装备的型号论证、方案研制具有一定的借鉴意义。但该效能评估方法在指标体系优选和建立方面还有待进一步探讨，复杂电磁环境下战斗部毁伤能力的计算也将是下一步的主要研究方向。

参考文献

- 1 李静海. 防空导弹战斗部性能分析及发展趋势[J]. 地面防空武器, 2005(1): 25~28
- 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
- 3 郑平泰, 杨涛, 王宝敏. 导弹破片战斗部对空中目标的杀伤概率计算[J]. 弹道学报, 2006, 18: 45~47
- 4 顾晓辉, 王晓鸣, 赵有守. 神经网络智能雷战斗部总体效能评价研究[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(9): 50~52
- 5 杨萍, 毕义明. 常规战斗部作战效能综合评定模型和方法[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(12): 69~72
- 6 高尚, 姜寿春, 等. 武器系统效能评价方法综述[J]. 系统工程理论与实践, 1998(7): 109~114
- 7 王君, 周林, 等. 中远程地空导弹系统效能评估模型[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(7): 1761~1768
- 8 王儒策. 弹药工程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002
- 9 唐雪梅, 徐文旭, 蒙源愿, 等. 地地弹道导弹武器系统攻防系对抗[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(10): 10~12
- 10 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
- 11 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