

doi: 10.7690/bgzdh.2015.08.004

## 基于 ADC 的导弹武器系统效能评估方法

刘花云, 张贤椿

(中国电子科技集团第二十八研究所第十一研究部, 南京 210007)

**摘要:** 为更好地对存在阶段性飞行特点导弹系统进行效能评估, 在传统 ADC 效能评估方法基础上, 对导弹武器系统可信性(D)进行了阶段性分析, 将导弹飞行的初、中、后3个阶段的可信性分解为不同飞行阶段可信性的乘积, 给出了一种分阶段的 ADC 系统效能评估方法。算例分析结果表明: 相比以往的 ADC 系统效能评估方法, 该方法对可信性的分析和计算更为准确, 更符合导弹系统的实际工作规律。

**关键词:** 导弹; 武器系统; 效能评估; ADC 法

**中图分类号:** TJ760.6 **文献标志码:** A

## Effectiveness Evaluation Method of Missile Weapon System Based on ADC

Liu Huayun, Zhang Xianchun

(No. 11 Research Department, The 28th Research Institute,  
China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In order to improve the effectiveness evaluation of the missile weapon system with stage characteristics of flight course, based on the traditional ADC effectiveness evaluation method, carry out stage analysis for missile weapon system reliability (D), break missile flight primary stage, middle stage and last stage reliability into reliability product of different flight stage, put forwards the ADC system effectiveness evaluation method by stage. The example analysis results show that: compared with ADC system effectiveness evaluation method, the new method is correct in reliability analysis and calculation, and is more fit for weapon system work principle.

**Keywords:** missile; weapon system; effectiveness evaluation; ADC method

### 0 引言

武器系统的作战效能, 是在给定的使用环境和条件下, 对武器系统完成某指定作战任务所能达到效能的综合评估。目前对武器系统效能评价可通过专家评定、试验统计或作战模拟等方法进行评估, 也可采用量化标尺法<sup>[1]</sup>、ADC 法<sup>[2-3]</sup>、层次分析法<sup>[4]</sup>、模糊评价法<sup>[5]</sup>等解析法进行评估。其中 ADC 法是美国工业界武器效能咨询委员会(WSEIAC)提出的效能评估方法。ADC 效能评估模型能较全面地反映武器系统状态的多项战技指标在作战使用中的动态变化与综合作用, 比较适用于陆基常规导弹之类的大型武器系统的效能评估。

在 ADC 方法中, 系统效能由  $E = A \cdot D \cdot C$  计算,  $A$ 、 $D$ 、 $C$  分别为可用性(availability)、可信性(dependability)和能力(capability), 其中  $A$  指系统在执行任务开始时刻, 系统可用程度的度量, 反映系统的使用准备程度;  $D$  指在任务开始时刻可用性给定的情况下, 系统在使用过程或执行任务过程中, 处于正常工作或完成规定功能的度量;  $C$  指在系统处于可用且可信的状态下, 系统能达到任务目标的能力度量<sup>[6]</sup>。可用性  $A$  和能力  $C$  基本是确定的, 具

有静态性特点; 而可信性  $D$  刻画的是系统运行过程中的好坏, 具有动态性特点。

ADC 法经过多年的推广应用, 已针对不同类型的武器系统提出了很多扩展模型, 如考虑对抗因素  $Q$  的 QADC 扩展模型<sup>[7]</sup>、考虑人员素质因素  $K$  的 KADC 扩展模型<sup>[8]</sup>, 以及综合考虑多种因素的扩展模型等<sup>[9]</sup>, 这些扩展模型大都是在原有 ADC 算式基础上加上一个或多个乘积因子, 以满足特定的评估要求。而这些 ADC 的扩展模型较少从  $A$ 、 $D$ 、 $C$  本身的含义和特点出发, 特别是从可信性  $D$  的特点出发, 去研究对 ADC 的扩展问题。实际上从更广的意义上说, 现有 ADC 扩展模型中, 如 KADC 模型的  $K$  因素和 QADC 模型的  $Q$  因素均可纳入可信性  $D$  的数学描述范畴, 故直接针对系统运行的可信性  $D$  进行研究是必要的。

文献[10]提出的对评估导弹系统的 ADC 改进方法中, 将系统能力  $C$  分解为多个子能力的综合, 而将影响导弹系统飞行过程中的可信性因素  $D$  仅归结于系统的故障率, 未在可信性因素  $D$  中充分体现导弹在不同飞行阶段面临的不同因素的影响。笔者针对导弹武器系统在飞行过程中的阶段性特点(导弹飞行通常大体可分为飞行初期、飞行中期和飞行后

收稿日期: 2015-03-19; 修回日期: 2015-04-12

作者简介: 刘花云(1975—), 女, 山东人, 学士, 工程师, 从事炮兵指挥信息系统总体技术研究。

期 3 个阶段),对武器系统进行效能评估中的可信性  $D$  进行了阶段性的分析和评估,将  $D$  分解为不同阶段可靠性矩阵的乘积,给出了一种分阶段的 ADC 扩展方法,相比现有的 ADC 扩展方法,该方法更符合导弹的作战特点,具有更好的实用价值。

### 1 导弹系统的 ADC 效能评估分析

导弹武器系统的工作原理如图 1 所示。系统中侦察平台、目标处理平台、控制平台及发射平台构成火控子系统。其工作原理可概括为:导弹发射前,该武器系统首先通过侦察平台得到目标位置信息,目标位置信息经目标处理平台处理后发送至指挥控制平台,指挥控制平台向发射平台(发射架)发送打击指令并实施发射。

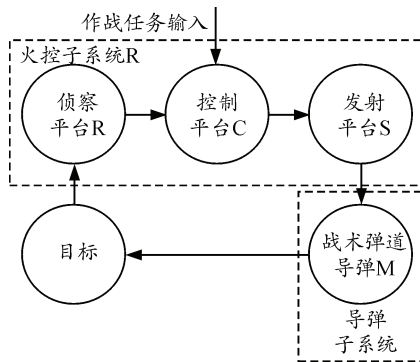


图 1 导弹武器系统工作示意图

对图 1 武器系统的效能评估大体分为如下几个部分:导弹武器系统发射前可用性(A)的评估,即各系统处于正常状态的概率;导弹武器系统发射后至飞抵目标过程的系统运行的可信性(D)度量;最后是对系统能力 C 的评估,即导弹最终对目标的打击能力的度量。

在处理系统可信性上,传统的 ADC 法通常用单一的可靠性矩阵  $D$  来描述系统运行过程的可靠程度,这种用单一可信性矩阵描述整个系统运行过程的方法,在系统运行过程较为复杂时往往过于笼统或简单。

### 2 导弹武器系统效能评估

针对导弹系统的组成情况,笔者将导弹系统分为火控子系统和导弹子系统 2 部分组成,其对应的系统状态有 4 种,分别描述如下:

- 状态 1: 火控子系统正常及导弹子系统正常;
- 状态 2: 火控子系统故障及导弹子系统正常;
- 状态 3: 火控子系统正常及导弹子系统故障;
- 状态 4: 火控子系统故障及导弹子系统故障。

文中主要阐述的是分阶段的 ADC 法的具体内容,仅考虑各阶段系统状态变化的主要概率(如发动机故障、遭敌武器拦截的概率),对概率如何计算获得不再赘述。

#### 2.1 系统可用性评估

系统可用性是指系统在工作期间的平均无故障工作时间(MTBF)和平均故障修复时间(MTTR)满足指标要求,如果系统的 MTBF 和 MTTR 不符合要求,显然不能保证系统顺利地执行任务,本系统中  $A$  表达如下:

$$A = [a_1, a_2, a_3, a_4] \quad (1)$$

其中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  分别为系统处于状态 1、状态 2、状态 3、状态 4 的概率,即

$$A = [a_H a_M, (1 - a_H) a_M, a_H (1 - a_M), (1 - a_H)(1 - a_M)] \quad (2)$$

其中:  $a_H$  为火控子系统正常工作的概率;  $a_M$  为导弹子系统正常工作的概率,由于火控子系统由侦察平台、控制平台和发射平台串联工作,火控子系统正常工作的概率

$$a_H = a_R \cdot a_C \cdot a_S \quad (3)$$

上式  $a_R$ 、 $a_C$ 、 $a_S$  分别为侦察平台、控制平台、发射平台的可用性。

系统中某一环节可能有多个同类平台并联共同工作,如多个侦察设备共同执行侦察任务,其中只要一个侦察设备能正常工作,则系统的侦察任务即可实现。对多平台并联工作的情况,以  $m$  个侦察平台共同实行侦察任务为例,将侦察平台看出一个整体,其正常工作的概率

$$a_R = 1 - (1 - a_{R1})(1 - a_{R2}) \cdots (1 - a_{Rm}) \quad (4)$$

其中  $a_{Rm}$  为第  $m$  个侦察平台正常工作的概率。

对于每个基本的武器平台单元,其可用性计算公式如下:

$$a = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (5)$$

其中: MTBF 为平均无故障工作时间; MTTR 平均故障修复时间。

#### 2.2 武器系统的可信性评估

可靠性评估指系统运行时的稳定性。对于导弹的打击任务而言,由于导弹发射后需要后方火控子系统的支持,故其系统运行的可靠性需考虑火控子系统和导弹的可靠性。通常导弹飞行可分为 3 个阶

段：飞行初期阶段，该阶段尚未遭受敌武器拦截，该阶段影响导弹状态的主要是发动机故障和火控系统故障；飞行中期阶段，该阶段主要遭遇到敌中远程武器拦截；飞行后期(末端)阶段，该阶段主要遭遇敌近程武器拦截，拦截方式通常是电子干扰或火

$$D_1 = \begin{bmatrix} d_{f11} & d_{f12} & d_{f13} & d_{f14} \\ d_{f21} & d_{f22} & d_{f23} & d_{f24} \\ d_{f31} & d_{f32} & d_{f33} & d_{f34} \\ d_{f41} & d_{f42} & d_{f43} & d_{f44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-p_g)(1-p_f) & p_g(1-p_f) & (1-p_g)p_f & p_g p_f \\ 0 & 1-p_f & 0 & p_f \\ 0 & 0 & 1-p_g & p_g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $d_{fij}$  为导弹从状态经  $i$  转换到状态  $j$  的概率，如  $d_{f12}$  为由状态 1 转变为状态 2 的概率，就是在火控子系统正常及导弹子系统正常的前提下，转化为火控子系统不正常而导弹子系统保持正常的概率。对火控子系统来说，由正常状态转变为故障状态的概率为  $p_g$ ；对导弹子系统来说，在开始正常的前提下在飞行初段继续保持正常状态的概率为  $(1-p_f)$ （由于初段来说影响导弹子系统的主要因素就是发动机故障），故  $d_{f12} = p_g(1-p_f)$ ，式 (6) 其他项以及式 (7) 和式 (8) 同理可得。

#### 4 飞行中期阶段

该阶段系统状态的改变主要是导弹将面临敌中远程武器的拦截，以及火控子系统可能遭受的打击。假设导弹的被拦截概率为  $p_t$ ，火控子系统遭受敌破坏的概率为  $p_h$ ，则导弹在主动飞行中期阶段的可靠性为

$$D_2 = \begin{bmatrix} (1-p_h)(1-p_t) & p_h(1-p_t) & (1-p_h)p_t & p_h p_t \\ 0 & (1-p_t) & 0 & p_t \\ 0 & 0 & (1-p_h) & p_h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于导弹在一个飞行阶段可能需要突防敌多种拦截武器的攻击， $p_t$  为敌不同拦截网对导弹的拦截概率，即

$$p_t = 1 - (1-p_{t1})(1-p_{t2}) \cdots (1-p_{tm}) \quad (8)$$

其中  $p_{ti} (i=1 \cdots m)$  为第  $i$  次拦截武器对导弹的拦截概率。

#### 5 飞行后期阶段

该阶段导弹进入末端自导阶段，导弹主要面临敌近程武器的拦截，通常不需要后方火控子系统的支持，此时可认为火控子系统一直处于正常状态，

力拦截。下面对这 3 个阶段分别进行可信性分析。

#### 3 飞行初期阶段

令导弹发动机故障概率为  $p_f$ ，火控子系统在该阶段的故障率为  $p_g$ ，则导弹在主动飞行段的可靠性

即火控子系统无论是处于正常状态或故障状态，其向下一个正常状态的转移概率为 1，反之火控子系统向故障状态的转移概率为 0。假设该阶段导弹被拦截的概率为  $p_j$ ，则导弹在主动飞行后期阶段的可靠性为

$$D_3 = \begin{bmatrix} 1-p_j & 0 & p_j & 0 \\ 1-p_j & 0 & p_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

则导弹的可靠性是由导弹的 3 个阶段飞行的可靠性来决定，它是一个概率传递的过程，即

$$D = D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 \quad (10)$$

#### 6 武器系统毁伤能力性评估

能力性评估是对武器系统的最终作战能力可达程度的综合评估。由于笔者研究的是火力打击武器系统，其主要的作战能力是其战斗部对目标的毁伤能力，故笔者仅考虑导弹飞抵目标后对目标的毁伤概率，武器系统的能力矩阵可如下表示：

$$C = \begin{bmatrix} P_h \\ P_h \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中  $P_h$  为导弹正常工作情况下对目标的毁伤概率，0 是导弹故障情况下的毁伤概率。

综上所述，考虑导弹分阶段飞行的特点，其导弹武器系统效能可如下式表示

$$E = A \cdot D \cdot C = A \cdot D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 \cdot C \quad (12)$$

相对传统的 ADC 法中可信性  $D$  的单一矩阵表达，笔者针对导弹武器系统分阶段飞行的特点，对导弹系统在不同飞行阶段分别进行了可信性分析，显然文中的方法更符合导弹系统实际工作情况。如

果其他运行过程具有阶段性特点的武器系统，以上评估方法同样适用，其系统效能可由  $E = A \cdot D \cdot C = A \cdot (D_1 \cdot D_2 \cdots D_n) \cdot C$  ( $n$  为系统过程中所分阶段数量) 来计算。

### 7 算例

某导弹武器系统(含火控系统和导弹)对某一目标进行攻击，系统各平台平均无故障时间和平均故障修复时间如表 1。

表 1 各平台的平均无故障工作和平均故障修复时间 h

项目	侦察平台 1	侦察平台 2	指挥控制平台	发射平台	导弹
MTBF	100	100	60	30	50
MTTR	4	5	1	2	2

导弹在飞行初段的发动机故障概率  $p_f = 0.05$ ，火控系统的故障率  $p_g = 0.08$ ；导弹在飞行中段的被拦截概率为  $p_l = 0.2$ ，火控系统遭受敌破坏的概率为  $p_h = 0.15$ ；导弹在飞行后期阶段被拦截的概率为  $p_j = 0.3$ ，导弹对舰船的毁伤概率为  $P_h = 0.35$ ，据此计算该系统的系统效能。

由表 1 给出的数据及式 (5)，武器系统中指挥控制平台、发射平台及导弹处于正常工作状态的概率分别为  $a_c = 0.983$ ， $a_s = 0.938$ ， $a_m = 0.961$ 。

其中侦察平台由于为并联工作，其可用性可由式 (4)、式 (5) 求取，即

$$a_r = 1 - (1 - \frac{4}{100+4})(1 - \frac{5}{100+5}) = 0.998$$

由式 (3) 可得到火控系统正常运行的概率为

$$a_h = a_r \cdot a_c \cdot a_s = 0.920$$

再由式 (2) 可得系统可用性矩阵为

$$A = [0.884 \quad 0.077 \quad 0.036 \quad 0.003]$$

由式 (6)~式 (9) 及实例给出的数据，可得到飞行初段、中段及末段的可靠性矩阵，以及能力矩阵分别为：

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0.874 & 0.076 & 0.046 & 0.004 \\ 0 & 0.95 & 0 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.92 & 0.08 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0.68 & 0.12 & 0.17 & 0.03 \\ 0 & 0.80 & 0 & 0.20 \\ 0 & 0 & 0.85 & 0.15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_3 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

其中系统能力矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.35 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

由式 (12) 得系统的效能

$$E = A \cdot D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 \cdot C = 0.179$$

如果采用传统的 ADC 效能评估方法对导弹系统的效能进行评估，则可信性矩阵  $D$  将由单一矩阵来表达，这样的可信性不能更好地刻画导弹实际的阶段性飞行特点。

### 8 结束语

不同类型的武器系统具有不同的运行特点，对特定类型的武器系统的评估亦不能照搬通用的评估方法，而应该结合该类武器系统的特点对传统方法进行不同的适应性改造，才能使该评估方法具有更好的现实意义和说服力。笔者从导弹武器系统使用过程中分阶段的特点出发，对 ADC 法的可信性  $D$  进行了不同阶段下的可信性分析，将系统可信性分解为不同阶段导弹飞行可信性的乘积。该方法较以往的 ADC 系统效能评估方法，其可信性的分析更为详细，更符合导弹系统的工作规律，该武器系统的效能评估方法同样适用于工作过程存在阶段性划分的系统。

### 参考文献：

- [1] 牛坤, 庞志兵. 基于多目标决策理论武器装备效能综合评估方法[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005, 27(1): 50-53.
- [2] 吴超, 徐宏飞. 潜艇打击水面舰艇的作战方案效能评估 ADC 法[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(2): 75-80.
- [3] 戴静, 宋敏. 基于 ADC 模型的临近空间信息系统效能评估体系研究[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(5): 144-151.
- [4] 金鑫, 徐军, 曾杰. 系统效能评估模型探索[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(1): 36-40.
- [5] 许腾, 盖世昌, 朱智. 舰载 C-3I 系统人机可信性模糊综合评估[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(5): 61-63.
- [6] 张最良, 李长生, 赵文志, 等. 军事运筹学[M]. 北京: 军事科学出版社, 1993: 129-145.
- [7] 卜广志, 张宇文. 鱼雷武器系统作战效能研究方法初探[J]. 系统工程理论与实践, 2001(2): 138-141.
- [8] 张勘振, 张建康, 陈云翔. 操作可靠性对地空导弹武器系统效能的影响[J]. 上海航天, 2006(5): 62-64.
- [9] 成科平. 基于改进 ADC 模型的电子对抗系统作战效能评估[J]. 电子科技, 2013, 26(1): 30-33.
- [10] 鞠巍, 童幼堂, 王泽. 基于改进的 ADC 法的反舰导弹武器系统效能评估模型[J]. 战术导弹技术, 2010(3): 19-22.