导弹武器系统 ADC 效能模型分析

马　琳[1]，王宏伟[2]，宋贵宝[3]，罗云宝[1]

（1. 海军航空工程学院研究生管理大队；2. 海军航空工程学院指挥系；
3. 海军航空工程学院飞行器工程系，山东烟台，264001）

摘　要：以美国工业界武器效能咨询委员会提出的武器系统效能评估方法为基础，将导弹武器系统分为发射平台、飞航导弹和技术保障设备三个部分，并以对导弹武器系统各部分保持状态良好和发生故障的概率作为能力参数，建立了效能评估模型，并进行了实例计算。

关键词：导弹武器系统；效能；模型

中图分类号：E 911　　**文献标识码：**A

系统的效能是指武器装备系统在规定的条件下达到规定使用目标的能力[1]，是武器系统完成规定任务程度的度量，能从总体上描绘出一种武器在特定作战环境下完成规定任务的实际能力，因而成为在新武器研制工作中对武器作战能力进行综合评估的有效指标。它不仅可以使武器的发展规划、方案论证和决策更加科学，而且可以定量地描绘出新武器的发展前景和改进方向[2]。

随着人们对装备效能分析的进一步深入，出现了多种武器系统效能评估模型[3]，其中最常用的是美国工业界武器效能咨询委员会（WSEIAC）提出的 $E=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{C}$ 武器系统效能评估模型[4]。本文就以 $E=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{C}$ 效能模型为基础，结合导弹系统的特点，综合其组成部分，对其进行系统效能分析。

1 导弹武器系统效能评估模型

分析导弹武器系统的作战效能时，首先应该明确它的基本组成。跟大多数武器系统一样，导弹武器系统大略可分为发射平台、飞航导弹和技术保障设备三个部分。发射平台可以是舰艇、载机或其他岸基平台。飞航导弹是武器系统的核心，它由弹体、推进系统、制导系统、引战系统和电气系统组成。技术保障设备包括用于完成起吊、运输、储存、维护、检测、供电和技术准备，以保障导弹和发射平台处于完好的技术状况和战斗待发状态。技术保障设备具体应该包括哪些设备随着发射平台的变化而变化[2]。研究武器系统效能应该综合所有这些构成元素的作战效能，根据元素间的构成结构进行综合计算。

本文只在把系统分为发射平台、飞航导弹和技术保障设备三部分的基础上进行讨论。并且假设三部分之间为互不影响元素，即在概率上为独立事件。

1.1 导弹武器系统可用性分析

在 WSEIAC 模型中，$\boldsymbol{A}$ 表示可用性向量，表征系统在执行任务之前的状态。根据 WSEIAC 的定义，把可用性定义为在开始执行任务时系统状态的量度，是硬件、人员和程序时间之间的函数。

假设系统有 n 种不同的状态，且在任一时刻系统处于状态 i 的概率为 a_i，则可用性向量

$$\boldsymbol{A}=(a_1,a_2,\cdots a_n\cdots,a_n)\text{。}\qquad(1)$$

设 A、B、C 分别表示发射平台、飞航导弹和技术保障设备 3 个系统，这 3 个系统的平均故障间隔时间分别表示为 T_1、T_2、T_3；平均故障修复时间分别为 M_1、M_2、M_3。

3 个组成部分在工作时有 8 种工作状态。状态 1（ABC）表示三部分全部处于正常状态；状态 2（$AB\overline{C}$）表示发射平台和飞航导弹正常、技术保障设备故障；状态 3（$A\overline{B}C$）表示发射平台和技术保障设备正常、飞航导弹故障；状态 4（$A\overline{B}\overline{C}$）表示发射平台正常、另外两部分故障；状态 5（$\overline{A}BC$）表示发射平台故障，另外两部分正常；状态 6（$\overline{A}B\overline{C}$）表示飞航导弹正常，另外两部分故障；状态 7（$\overline{A}\overline{B}C$）

收稿日期：2005-12-15
作者简介：马　琳（1981–），女，硕士生.

表示技术保障设备正常，另外两部分故障；状态 8（$\overline{A}\overline{B}\overline{C}$）表示三部分全部处于故障状态。

可用度的计算[5, 6]：可用度是该系统处于工作状态的概率。用 A_A、A_B 和 A_C 分别表示系统 A、B、C（即发射平台、飞航导弹和技术保障设备 3 个系统）的可用度，则

$$\begin{cases} A_A = T_1/(T_1+M_1) \\ A_B = T_2/(T_2+M_2) \\ A_C = T_3/(T_3+M_3) \end{cases}。 \tag{2}$$

定义：$a_i = P\{$系统在开始时刻处于状态 i 的概率$\}$，是分系统 A、B、C 的可用度函数。

则有：

$$a_1 = (A_A)(A_B)(A_C) = \frac{T_1T_2T_3}{(T_1+M_1)(T_2+M_2)(T_3+M_3)},$$

$$a_2 = (A_A)(A_B)(1-A_C) = \frac{T_1T_2M_3}{(T_1+M_1)(T_2+M_2)(T_3+M_3)},$$

$$a_3 = (A_A)(1-A_B)(A_C) = \frac{T_1M_2T_3}{(T_1+M_1)(T_2+M_2)(T_3+M_3)},$$

$$a_4 = (A_A)(1-A_B)(1-A_C) = \frac{T_1M_2M_3}{(T_1+M_1)(T_2+M_2)(T_3+M_3)},$$

$$a_5 = (1-A_A)(A_B)(A_C) = \frac{M_1T_2T_3}{(T_1+M_1)(T_2+M_2)(T_3+M_3)},$$

$$a_6 = (1-A_A)(A_B)(1-A_C) = \frac{M_1T_2M_3}{(T_1+M_1)(T_2+M_2)(T_3+M_3)},$$

$$a_7 = (1-A_A)(1-A_B)(A_C) = \frac{M_1M_2T_3}{(T_1+M_1)(T_2+M_2)(T_3+M_3)},$$

$$a_8 = (1-A_A)(1-A_B)(1-A_C) = \frac{M_1M_2M_3}{(T_1+M_1)(T_2+M_2)(T_3+M_3)}。$$

由此可计算系统可用性向量：

$$\boldsymbol{A} = (a_1,a_2,a_3,a_4,a_5,a_6,a_7,a_8) = \frac{1}{(T_1+M_1)(T_2+M_2)(T_3+M_3)}\left[T_1T_2T_3 \quad T_1T_2M_3 \quad T_1M_2T_3 \quad T_1M_2M_3 \quad M_1T_2T_3 \quad M_1T_2M_3 \quad M_1M_2T_3 \quad M_1M_2M_3\right]。 \tag{3}$$

1.2 导弹武器系统可信性分析

在 WSEIAC 模型中，可信性是指系统在任务开始时可用性给定的情况下，规定的任务剖面中的任一随机时刻，能够使用且能完成规定任务的能力。可信性在概念上与可靠性有相似之处。可信性参数矩阵：

$$\boldsymbol{D}(t) = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix}。 \tag{4}$$

式中：d_{ij} 表示若系统在开始执行任务时处于状态 i，系统在执行任务过程中处于状态 j 的概率；t 表示执行任务的时间。

导弹系统的可信性矩阵描述系统在执行任务过程中可靠工作能力的大小。假设系统是不可修复的，可信性是与分系统 A、B、C 的运行有关的可靠性量度。系统运行过程中的可靠性函数为指数函数，并由下式给出[5]：

$$R = \exp(-t/T)。 \tag{5}$$

因此，发射平台、飞航导弹和技术保障设备的可靠性如下：

$R_A = \exp(-t/T_1)$，$R_B = \exp(-t/T_2)$，$R_C = \exp(-t/T_3)$。

基本的转移概率为：

$P(A\to A) = R_A$，$P(B\to B) = R_B$，

$P(C\to C) = R_C$，$P(A\to \overline{A}) = 1-R_A$，

$P(B\to \overline{B}) = 1-R_B$，$P(C\to \overline{C}) = 1-R_C$，

$P(\overline{A}\to A) = 0$，$P(\overline{B}\to B) = 0$，$P(\overline{C}\to C) = 0$，

$P(\overline{A}\to \overline{A}) = 1$，$P(\overline{B}\to \overline{B}) = 1$，$P(\overline{C}\to \overline{C}) = 1$。

定义 $d_{ij} = P\{t$ 时间内状态 i 转移到状态 $j\}$，则有各状态的转移概率为：

$d_{11} = P(A\to A)\cdot P(B\to B)\cdot P(C\to C) = R_AR_BR_C$。

以此类推。可得到系统的可信性参数矩阵为：

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} R_AR_BR_C & R_AR_B(1-R_C) & R_A(1-R_B)R_C & R_A(1-R_B)(1-R_C) & (1-R_A)R_BR_C & (1-R_A)R_B(1-R_C) & (1-R_A)(1-R_B)R_C & (1-R_A)(1-R_B)(1-R_C) \\ 0 & R_AR_B & 0 & R_A(1-R_B) & 0 & (1-R_A)R_B & 0 & (1-R_A)(1-R_B) \\ 0 & 0 & R_AR_C & R_A(1-R_C) & 0 & 0 & (1-R_A)R_C & (1-R_A)(1-R_C) \\ 0 & 0 & 0 & R_A & 0 & 0 & 0 & 1-R_A \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_BR_C & R_B(1-R_C) & (1-R_B)R_C & (1-R_B)(1-R_C) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_B & 0 & 1-R_B \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_C & 1-R_C \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \tag{6}$$

1.3 导弹武器系统能力分析

在 WSEIAC 模型中，能力矩阵 $\boldsymbol{C}$ 是描述系统处于 n 个状态时，完成规定任务的固有能力。$\boldsymbol{C}$ 是一个具有 n 个元素的列向量。

$$\boldsymbol{C}=\left(c_1,c_2\cdots c_j\cdots c_n\right)^{\mathrm{T}}。\tag{7}$$

建立能力向量是非常关键的一环。能力参数的选取比较灵活，其综合方式也多种多样，所以能力向量的求解一直是人们争议的焦点。假设：

p_1 表示发射平台状态良好，能顺利完成发射任务的概率；p_2 表示导弹发射后，飞行过程中各部件工作状态良好，能够完成制导、突防以及有效打击对方目标的概率；p_3 表示技术保障设备状态良好，能够成功保障顺利发射的概率。

根据实战经验和导弹武器性能，这三个组成部分在状态良好时和发生故障时应该具备都能完成任务的能力，只是根据故障的实际情况和具体环境影响的不同而不同，所以假设：

p_1' 表示发射平台发生故障，但能顺利完成发射任务的概率；p_2' 表示导弹发射后，飞行过程中某部件发生故障，但能够完成制导、突防以及有效打击对方目标的概率；p_3' 表示技术保障设备发生故障，能够保障顺利发射的概率。

根据以上分析得出在各状态下的能力参数

$c_1=p_1p_2p_3$，$c_2=p_1p_2p_3'$，$c_3=p_1p_2'p_3$，

$c_4=p_1p_2'p_3'$，$c_5=p_1'p_2p_3$，$c_6=p_1{}'p_2p_3{}'$，

$c_7=p_1'p_2'p_3$，$c_8=p_1'p_2'p_3'$。

所以，能力参数矩阵应表示为：

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}c_1\\c_2\\c_3\\c_4\\c_5\\c_6\\c_7\\c_8\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}p_1p_2p_3\\p_1p_2p_3'\\p_1p_2'p_3\\p_1p_2'p_3'\\p_1'p_2p_3\\p_1'p_2p_3'\\p_1'p_2'p_3\\p_1'p_2'p_3'\end{bmatrix}。\tag{8}$$

1.4 导弹武器系统效能模型

由以上所得的导弹武器系统可用性向量 $\boldsymbol{A}$、可信性矩阵 $\boldsymbol{D}$ 和系统能力参数向量 $\boldsymbol{C}$ 代入，得出在本文引言中假设情况下导弹武器系统效能分析的表达式：

$$E=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{C}。\tag{9}$$

2 算例

现有导弹发射平台平均故障间隔时间 T_1 为 12h，平均故障修复时间 M_1 为 8h；飞航导弹平均故障间隔时间 T_2 为 24h，平均故障修复时间 M_2 为 6h；技术保障设备平均故障间隔时间 T_3 为 18h,平均故障修复时间 M_3 为 8h。代入式(3)得

$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0.33 & 0.15 & 0.08 & 0.04 & 0.22 & 0.10 & 0.06 & 0.02\end{bmatrix}$。

根据上文分析式(5)得知 $R=\exp(-t/T)$，其中 t 代表执行任务时间，取 t=3h，则

$R_A=\exp(-3/12)=0.778$；$R_B=\exp(-3/24)=0.882$；$R_C=\exp(-3/18)=0.846$。

代入式(6)得：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}0.580 & 0.106 & 0.078 & 0.014 & 0.166 & 0.030 & 0.022 & 0.004\\0 & 0.686 & 0 & 0.092 & 0 & 0.196 & 0 & 0.026\\0 & 0 & 0.658 & 0.120 & 0 & 0 & 0.188 & 0.034\\0 & 0 & 0 & 0.778 & 0 & 0 & 0 & 0.222\\0 & 0 & 0 & 0 & 0.746 & 0.136 & 0.010 & 0.018\\0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.882 & 0 & 0.118\\0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.846 & 0.154\\0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}。$$

该导弹发射平台状态良好能够完成发射任务的概率 p_1=0.95；飞航导弹状态良好，能够命中目标的概率 p_2=0.85；技术保障设备状态良好，能够保障顺利发射的概率 p_3=0.98；发射平台发生故障，但能顺利完成发射任务的概率 p_1'=0.01；导弹发射后，飞行过程中某部件发生故障，但能够完成制导、突防以及有效打击对方目标的概率 p_2'=0.03；技术保障设备发生故障，能够成功保障顺利发射的概率 p_3'=0.04。

根据式(8)计算得出导弹能力矩阵：

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}0.79135 & 0.0323 & 0.02793 & 0.00114 & 0.00833 & 0.00034 & 0.000255 & 0.000012\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}。$$

代入式(9)得出该导弹系统效能 E=0.91。

3 结束语

需要指出的是，在进行导弹武器系统作战效能评估时，除了考虑武器系统本身的作战效能外，还应该考虑作战样式、作战流程、作战环境以及与多种武器的协同等因素，评估结果才能更全面地反映导弹武器系统的作战效能[7]。关于能力的计算，特别是当设备发生故障，但能完成任务的能力计算是很复杂的，因为故障随时间的分布而随机变化，所以计算能力指标时，需要进行更深入的具体研究。另外，本文在对效能评估模型进行分析和计算时，忽略了导弹发射过程中人的因素，这在实际评价武器系统效能时是必需考虑的。文章还假设了构成导弹武器系统组成各部分之间在数学上的独立性，这是一种理想化的数学假设。在实际运用中，既要考虑以上各因素的影响，也要考虑因素之间的关联影响，如此方能得到比较完善的评估结果。

参考文献：

[1] 花兴来, 刘庆华. 装备管理工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002:38-44

[2] 张福光, 宋贵宝, 彭绍雄. 海军导弹总体设计原理[M]. 北京: 海潮出版社, 2001:7-8

[3] 花文健, 刘宁, 刘作良. 基于模糊数排序的武器效能评估方法[J]. 空军工程大学学报（自然科学版）, 2004,5(5):28-31

[4] 李明, 刘澎, 张宏森, 等. 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, 2002:370-375

[5] 陈学楚. 装备系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995:68-73

[6] 刘国栋, 吴进煌, 石伟锋. 反舰导弹武器系统作战效能分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2004,19(1):152-154

[7] 谢小平, 彭绍雄, 赵俊. 反舰导弹武器系统作战效能评估模型研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2004,19(2):214-216

Analysis of missile weapon system ADC effectiveness model

MA Lin[1]，WANG Hongwei[2]，SONG Guibao[3]，LUO Yunbao[1]

（1．Graduate Students' Brigade of NAEI；2．Department of Command；
3．Department of Airborne Vehicle Engineering，NAEI，Yantai，Shandong，264001）

Abstract: Based on the method of evaluating weapon system effectiveness of WSEIAC, missile weapon system is separated into three parts: platform, missile body and technological safeguard equipment. Then the effectiveness evaluation model is set up using the probability of every missile weapon system part that keeps good and goes wrong as ability parameters. At last, the computing example is given.

Key words: missile weapon system; effectiveness; model