

改进 ADC 法的 C⁴ISR 系统效能评估

闫永玲, 张庆波

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:针对 ADC 法中决定能力矩阵 C 的诸多随机事件复杂多变,且部分指标缺乏定量描述的问题,对该方法进行改进,即联合使用 ADC 法与层次分析法、专家征询法,通过定性与定量结合,实现对 C⁴ISR 系统效能的评估。首先,在分析传统 ADC 评估方法优缺点的基础上,确定本文采用的评估方法——改进 ADC 法。其次,建立基于改进 ADC 法的 C⁴ISR 系统效能评估指标体系及评估的基本程序。再次,分别建立可用性向量 A 、可信性矩阵 D 、能力矩阵 C 及其子模型的计算模型。其中重点描述了在 ADC 法基础上,综合运用层次分析法、专家征询法等方法建立能力矩阵 C 及其子模型的过程。最后通过实例计算分析,验证所建立模型的有效性和可用性。

关键词:C⁴ISR 系统;效能评估;改进 ADC 模型

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)01-0047-05

C⁴ISR 系统的多维性、复杂性及开发过程渐进性^[1],促使我们必须对现有系统作战效能进行科学评价,以不断完善现有系统性能^[2],并为后续系统研制开发提供科学依据。ADC 法是目前评估硬杀伤武器系统效能的有效方法,具有考虑问题全面,数学模型严谨的优点。但很少用于评估 C⁴ISR 这样的铰链武器系统,主要原因是该系统缺乏部分定量战技指标,无法完全用解析法建立全面且严谨的数学模型。故本文对 ADC 法进行改进,即以该法为主,结合层次分析法、专家征询法对无法定量描述的能力指标定性评估。

1 评价指标体系及评估基本程序

按照确立 C⁴ISR 系统效能评估指标体系的原则,结合改进 ADC 法评估要素,建立该系统效能评估指标体系,见参考文献[3]中的图 2.1。评估基本程序为:①描述系统可靠性框图及其状态;②建立效能评估模型;③采集初始数据,运用模型。

2 系统效能评估模型

2.1 C⁴ISR 系统状态分析

以典型 C⁴ISR 系统为例,其信息收集分系统由雷达、红外探测器组成,执行分系统包括 A、B 两种型号地空导弹的执行机构,分析得系统可靠性框图见文献[3],进而分析得出系统初始状态见表 1。

2.2 建立效能评估模型

ADC 法的基本模型为:

表 1 C⁴ISR 系统工作状态表

Tab.1 Working state of the C⁴ISR system

序号	状态	序号	状态
1	全部正常工作	6	2、8 故障,其他正常
2	2 故障,其他正常	7	2、7 故障,其他正常
3	1 故障,其他正常	8	1、7 故障,其他正常
4	8 故障,其他正常	9	1、8 故障,其他正常
5	7 故障,其他正常	10	1 和 2 故障或 7 和 8 故障或其他之一故障

* 收稿日期:2008-01-14

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2006F18)

作者简介:闫永玲(1978-),女,山西太原人,讲师,主要从事军用软件理论和军事装备研究。

E-mail: nihao_20082008@sina.com.cn

$$\mathbf{E}_S = \mathbf{A}^T \mathbf{D} \mathbf{C} \quad (1)$$

式中: \mathbf{E}_S 为系统效能行向量; \mathbf{A}^T 为可用性行向量; \mathbf{D} 为可信性矩阵; \mathbf{C} 为能力矩阵。

2.2.1 可用性向量 \mathbf{A} 子模型

C^4 ISR 系统为 8 个部件构成的混联系统。每个部件可用度^[4] 为 $A_i = F_{MTBF_i} / (F_{MTBF_i} + R_{MTTR_i})$ ($i = 1, 2, \dots, 8$); 其中 i 为文献[3]中系统可靠性框图中所示编号。结合表 1 所示系统 10 种状态, 由混联系统可用性计算模型得 C^4 ISR 系统可用性向量 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10})$$

其中:

$$\begin{aligned} a_1 &= \prod_{i=1}^8 A_i, & a_2 &= (1 - A_2) \prod_{i=1, \neq 2}^8 A_i, & a_3 &= (1 - A_1) \prod_{i=2}^8 A_i, & a_4 &= (1 - A_8) \prod_{i=1}^7 A_i \\ a_5 &= (1 - A_7) \prod_{i=1, \neq 7}^8 A_i, & a_6 &= (1 - A_2)(1 - A_8) \prod_{i=1, \neq 2}^7 A_i, & a_7 &= (1 - A_2)(1 - A_7) \prod_{i=1, \neq 2, \neq 7}^8 A_i \\ a_8 &= (1 - A_1)(1 - A_7) \prod_{i=2, \neq 7}^8 A_i, & a_9 &= (1 - A_1)(1 - A_8) \prod_{i=2}^7 A_i, & a_{10} &= 1 - \sum_{i=1}^9 a_i \end{aligned} \quad (2)$$

2.2.2 可信性矩阵 \mathbf{D} 子模型

\mathbf{D} 中各元素均由可靠度决定。 C^4 ISR 系统除通信网以外每个部件的可靠度 R_i 为 $R_i = \exp(-\lambda_i t)$, 其中 $i = 1, 2, \dots, 8$ ($i \neq 6$); λ_i 为部件失效率, 有 $\lambda_i = 1/F_{MTBF_i}$ 。

通信网可靠度 $R_6 = R_{NODE} R_{LINK}$, 其中 R_{NODE} 为所有节点工作概率, $R_{NODE} = e^{-N\lambda_{nt}}$; R_{LINK} 为通信网络链路连通概率^[5], $R_{LINK} = \sum_{j=0}^{M-N+1} \text{num}_j e^{-(N+J-1)\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{M-N-J+1}$, 其中 j 连通子网的个数, N 为网络节点数, M 为网络链路数。根据系统开始状态和各部件可靠性, 分别计算状态转移概率 $d_{11} - d_{10,10}$ 。 d_{11} 系统开始工作全部正常, 在执行任务期间仍然正常运行的概率, $d_{11} = \prod_{i=1}^8 R_i$; d_{12} 系统开始工作全部正常, 在执行任务期间红外探测器故障的概率, $d_{12} = (1 - R_2) \prod_{i=1, \neq 2}^8 R_i$; 同理分析其它元素, 得可信性矩阵 \mathbf{D} 为:

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}(t) = \begin{cases} d_{ij} & i \leq j \\ 0 & i > j \end{cases} (i, j = 1, 2, \dots, 10) \quad (3)$$

2.2.3 能力矩阵 \mathbf{C} 子模型

由系统效能评估指标体系图^[3]可知能力矩阵 \mathbf{C} 由 4 个能力要素决定, 其中情报收集处理能力、生存能力和指挥控制能力起主要作用。

1) 情报收集和处理能力 C_q 。该能力主要由发现目标概率及目标识别能力决定: ① 发现目标概率 $P_f = 1 - (1 - P_{dr})(1 - P_{do})$, 其中 P_{dr} 为雷达发现目标概率, P_{do} 为红外探测器发现目标概率; 用计算机仿真系统进行 n 次模拟实验, 其中 m 次发现目标, 则雷达发现概率为 $P_{dr} = m/n$ 。红外探测器搜索发现目标概率^[6] $P_{do} = 1 - \exp(-xc^v)$, 式中 $c = |L_m - L_b|/L_b$, L_m 为目标亮度; L_b 为背景亮度; x 为尺度参数; v 为形状参数。② 目标识别概率 P_F 可由 4 维分辨体积的倒数^[7] 表示, 即:

$$P_F = T_d / (c^{\tau/2}) R_0^2 \theta_b \theta_e \quad (4)$$

式中: θ_b 、 θ_e 、 T_d 分别为雷达方位角、仰角及频率; R_0 为检测雷达定位能力参考距离^[8]。

分析系统 10 种工作状态: 状态 1 时, $P_f = 1 - (1 - P_{dr})(1 - P_{do})$, $C_{1q} = \omega_1 P_f + \omega_2 P_F$; 状态 2 时, $P_f = P_{dr}$, $C_{2q} = \omega_1 P_{dr} + \omega_2 P_F$; 状态 3 时, $P_f = P_{do}$, $C_{3q} = \omega_1 P_{do} + \omega_2 P_F$ 。依次分析得: $C_{4q} = C_{5q} = C_{1q}$; $C_{6q} = C_{7q} = C_{2q}$; $C_{8q} = C_{9q} = C_{3q}$; $C_{10q} = 0$, 式中 ω_1 、 ω_2 分别为 P_f 、 P_F 的权重, 专家给出值分别为: 0.47、0.53。将上述分析结果代入式(5), 可求得 C_q 为:

$$\mathbf{C}_q = (C_{1q}, C_{2q}, C_{3q}, C_{4q}, C_{5q}, C_{6q}, C_{7q}, C_{8q}, C_{9q}, 0)^T \quad (5)$$

2) 生存能力 C_s 。该能力主要由抗干扰能力决定。这里, 不妨设 $C_s = P_b$ 。用有干扰条件下雷达最大探测距离的相对变化量表征系统抗干扰能力。无干扰时, 雷达最大探测距离 R_{\max} 为:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_i G_i \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 K T_0 \Delta f_r F_n L (S/N)_{\min}} \right]^{1/4} \quad (6)$$

式中: P_i 为雷达发射功率; G_i 为天线增益; λ 为波长; σ 为目标有效反射面积; K 为波尔兹曼常数(取

$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T_0 为接收机噪声温度,取 290 K; Δf_r 为接收机带宽; F_n 为噪声系数; L 为系统损耗因子; $(S/N)_{\min}$ 为最小信噪比。有干扰时雷达最大探测距离^[9]为 $R'_{\max} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{R_j}{\theta_{0.5}}} \sqrt{\frac{\pi R_i G_r \sigma K \Delta f_j}{K \gamma_j P_j G_j \Delta f_r}}$, 式中: r_j 为干扰信号对雷达天线的极化损失,一般取 $r_j = 0.5$; P_j 为干扰机发射功率; G_j 为干扰机主瓣增益; Δf_j 为干扰信号带宽。则系统抗干扰能力为:

$$P_b = 1 - \overline{P_b} = 1 - (R_{\max} - R'_{\max}) / R_{\max} \times 100\% \quad (7)$$

3) 指挥控制能力 C_Z 。该能力主要由战场监视能力和指挥引导能力决定^[10], 将其继续分解为表 2 的 6 个次指标。因这些次指标难以定量表示,故用层次分析法和专家查询法进行评估。

先由层次分析法确定权重,即用 1-9 比例标度构造判断矩阵来表征各指标的相对重要性。设次指标监视空域范围、监视目标批次、监视精准度的相对评语集所构成的判断矩阵为:

$$T = (t_{mn})_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 2.5 & 2 \\ 0.4 & 1 & 0.83 \\ 0.5 & 1.2 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

用“和法”按式(8)求判断矩阵特征向量 $\omega_m = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 t_{mn} / \sum_{k=1}^3 t_{kn}$, 得权重为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T = (0.527, 0.213, 0.260)^T$ 。再由 10 名专家对各评估要素按表 2 标准打分,取均值,最后用线性加权法^[11]得:

$$C_Z = \sum_{m=1}^2 \omega_m \left[\sum_{k=1}^{m_n} \omega_{mk} F_{mk} \right] \quad (9)$$

式中: m_n 为子指标数; ω_m 为次指标权重系数; ω_{mk} 为子指标权重系数; F_{mk} 为子指标专家打分值。

表 2 评分标准

Tab. 2 Criteria of the C⁴ISR system

子指标	次指标	评价标准			
		0.75-1 分	0.5-0.75 分	0.25-0.5 分	0-0.25 分
战场监	监视空域范围/km	>300	200-300	100-200	<100
视能力	监视目标批次/批	>100	60-100	20-59	<20
	监视精准度	很好	好	较好	差
指挥引	引导武器种类/种	>8	5-7	2-4	<2
导能力	引导解算容量/批	>10	6-10	2-5	<2
	引导解算时延/s	<5	6-15	16-30	>30

2.2.4 计算系统效能 E_s

由上分析得 $C = C_q P_b C_Z$, 则可将式(1)变换为:

$$E_s = ADC_q P_b C_Z \quad (10)$$

将式(2)、式(3)、式(5)、式(7)、式(9)代入式(10), 即得基于改进 ADC 法的 C⁴ISR 系统效能评估模型。

3 算例分析

用上述评估模型对 2 个假定典型 C⁴ISR 系统进行效能评估。系统 2 在系统 1 基础上进行部分改进, 主要提高系统各组成部分的可靠性指标和指挥控制能力。各参数取值见表 3、表 4 (表 4 中各指标后的数分别为其权重)。

表 3 可靠性参数表

Tab. 3 Reliability parameter of the C⁴ISR system

	雷达	红外探测器	计算机设备	指控台	通信网	雷达监视网	A 型地导执行机构	B 型地导执行机构
MTTR1/h	10	10	40	30	20	20	40	40
MTTR2/h	8	10	30	20	20	20	30	20
MTBF1/h	180	2 000	300	200	300	300	400	180
MTBF2/h	300	2 000	1 470	980	300	300	470	650

表4 指挥控制系统专家打分表

Tab.4 Delphi value of the C⁴ISR system

次指标	战场监视能力 (0.421)			指挥引导能力 (0.579)		
子指标	监视范围 (0.527)	监视批次 (0.213)	监视精度 (0.260)	引导武器种类 (0.461)	引导解算容量 (0.327)	引导解算时延 (0.212)
系统1/分值	0.73	0.81	0.74	0.66	0.70	0.85
系统2/分值	0.80	0.91	0.82	0.82	0.84	0.92

由表3得:

$$A_1 = [0.6897 \quad 0.0035 \quad 0.0383 \quad 0.0213 \quad 0.0213 \quad 0.001 \quad 0.001 \quad 0.0012 \quad 0.0012 \quad 0.2233]$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0.7494 & 0.0038 & 0.0428 & 0.0405 & 0.0116 & 0.0002 & 0.0001 & 0.0007 & 0.0002 & 0.1507 \\ 0 & 0.7532 & 0 & 0 & 0 & 0.0407 & 0.0117 & 0 & 0 & 0.1944 \\ 0 & 0 & 0.7922 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0123 & 0.0428 & 0.1527 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7899 & 0 & 0.0040 & 0 & 0 & 0.0451 & 0.1610 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7610 & 0 & 0.0038 & 0.0434 & 0 & 0.1918 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7939 & 0 & 0 & 0 & 0.2061 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7649 & 0 & 0 & 0.2351 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8045 & 0 & 0.1955 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8350 & 0.1650 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = [0.8382 \quad 0.0042 \quad 0.0168 \quad 0.0066 \quad 0.0186 \quad 0 \quad 0.0001 \quad 0.0004 \quad 0.0001 \quad 0.1150]$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0.8829 & 0.0044 & 0.0178 & 0.0117 & 0.0098 & 0.0001 & 0 & 0.0178 & 0.0002 & 0.0553 \\ 0 & 0.8873 & 0 & 0 & 0 & 0.0118 & 0.0099 & 0 & 0 & 0.0910 \\ 0 & 0 & 0.9007 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0100 & 0.0120 & 0.0773 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8946 & 0 & 0.0045 & 0 & 0 & 0.0199 & 0.0810 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8927 & 0 & 0.0045 & 0.0180 & 0 & 0.0848 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8991 & 0 & 0 & 0 & 0.1009 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8972 & 0 & 0 & 0.1028 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9108 & 0 & 0.0892 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9127 & 0.0873 \end{bmatrix}$$

由表4得 $C_{z1} = 0.729$; $C_{z2} = 0.840$ 。设系统1、2情报收集能力和生存能力相同,均取1。则得 $E_{s1} = 0.3775$; $E_{s2} = 0.6054$ 。

分析计算结果,可见随着系统2可靠性提高和指挥控制能力增强,求得的系统效能明显增大。计算结果与实际相符,充分验证了采用改进ADC法评估C⁴ISR系统效能的有效性。

4 结束语

本文利用改进ADC法对C⁴ISR系统进行了效能评估,并通过实例证明所建立模型的有效性。需要说明的是,为了简化研究对象,文中没有考虑火力威胁等战场环境,即没有分析其作战效能,今后可在这一方面作进一步研究。

参考文献:

[1] 孟庆玉,张静远,宋保维. 鱼雷作战效能分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.

MENG Qingyu, ZHANG Jingyuan, SONG Baowei. Analysis of the Campaign Effectiveness of Fish Torpedo[M]. Beijing: the

- Publishing Company of National Defence Industry, 2003. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 闫永玲. 基于改进 ADC 法的防空 C⁴ISR 系统效能评估[D]. 西安:空军工程大学, 2006.
YAN Yongling. Efficiency Valuation of Air Defense C⁴ISR System Based on ADC Method[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2006. (in Chinese)
- [4] 闫永玲, 雷英杰, 张庆波. 关于 ADC 法评估 C⁴ISR 系统效能中的可靠性研究[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(1): 18 - 22.
YAN Yongling, LEI Yingjie, ZHANG Qingbo. Research on Reliability of the Efficiency Evaluation of the C⁴ISR System Based on ADC Method[J]. Firepower Command and Control, 2008, 33(1): 18 - 22. (in Chinese)
- [5] 孙永平, 刘元, 毛建舟. 舰载 C³I 系统通信网络可靠性效能分析[J]. 光电技术应用, 2004, 19(6): 65 - 67.
SUN Yongpin, LIU Yuan, MAO Jianzhou. Analyse of Communications Net Reliability Efficiency of the Carrier C³I System [J]. The Application of Photoelectricity Technic, 2004, 19(6): 65 - 67. (in Chinese)
- [6] 郇能敬. 监视雷达网效能评价研究[J]. 现代雷达, 2000, 22(4): 1 - 4.
LI Nengjin. Research on the Effectiveness Evaluation of Stakeout Radar Net [J]. Radar of Modern Time, 2000, 22(4): 1 - 4. (in Chinese)
- [7] 王鹤磊. 一种雷达系统效能的综合评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(3): 40 - 44.
WANG Helei. The Synthetical Efficiency Evaluation Model of the Radar System [J]. Systems Engineering and Electron Technic, 2001, 23(3): 40 - 44. (in Chinese)
- [8] Randing G W. A Simple Method to Determine Airborne Radar Detection Performa in Clutter[C]//IEEE National Radar Conference. New York: Bard Gelle, 1999: 192 - 196.
- [9] Li Nengjing. A Study of the Cost - effectiveness of Air Defense Surveillance Radars [C]//IEEE International Radar Conference. New York: Bard Gelle, 1999: 116 - 119.
- [10] Gerd Schrick. Interception of LPI Radar Singles[C]// IEEE Int Conf on Radar. New York: Bard Gelle, 1990: 33 - 38.
- [11] Paul J Hiniker. A Model of Command and Control Processes for JWARS[J]. Test Results from Controlled Experiments and Simulation Runs, 2003, 12(6): 48 - 51.

(编辑: 田新华)

The Effectiveness Evaluation of C⁴ISR System Based on the Improved ADC Method

YAN Yong - ling, ZHANG Qing - bo

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: The effectiveness evaluation of C⁴ISR system is an important link of the current research. Correctly and exactly evaluating the system effectiveness is an important means of decreasing cost and raising usage effectiveness of weapon equipment. In view of the complexity and changefulness of the diverse random events in deciding the competency matrix C and the fact that some criterions lack quantified representation in ADC method, an improvement on the method is proposed in this paper. Through the combination of qualitative and quantitative processes, ADC method, analytic hierarchical process and Delphi method are used jointly to implement the effectiveness evaluation of C⁴ISR systems. Firstly, the evaluation method employed in this paper, i. e. the improved ADC method, is determined based on the analysis of the advantages and disadvantages of the conventional ADC method. Secondly, the evaluation criteria and the primary evaluation process of C⁴ISR systems are established. Thirdly, availability vector A, dependability matrix D, competency matrix C and the computational models of their sub models are set up respectively. The process of establishing competency matrix C and its sub model is described emphatically, by applying the analytic hierarchy process and Delphi method synthetically, based on the ADC method. And finally the effectiveness and availability of the established model are verified through the calculation and analysis of examples.

Key Words: C⁴ISR system; system effectiveness evaluation; improved ADC model