

# ADC—云模型在头盔瞄准显示系统作战效能评估中的应用

刘伟, 陈华, 潘翔宇  
(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

**摘要:** 依据歼击机头盔瞄准显示系统的任务使命特点,建立了评价指标体系。以ADC模型为基础,结合云模型对模糊问题的评估特点,从能力矩阵 $C$ 的计算入手,在各个指标云隶属度计算时引入云模型算法,得到系统效能的云隶属度数值,对云隶属度进行了模拟仿真,并分析了云滴分布对结果评估的影响。

**关键词:** 头盔瞄准显示系统; 作战效能; ADC模型; 云模型

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2017)05-0093-04

## Application of ADC-Cloud Model in Effectiveness Evaluation of Helmet Mounted Sight/Display System

LIU Wei, CHEN Hua, PAN Xiang-yu  
(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** According to the mission of Helmet Mounted Sight/Display System (HMSDS), an effectiveness evaluation index system was established. Based on ADC model and the characteristics of cloud model to fuzzy problem evaluation, and by calculation of the capacity matrix  $C$ , the cloud model algorithm was introduced when calculating the cloud membership value of each index. Thus the cloud membership degree of the system effectiveness was obtained. Finally, analysis was made to the cloud membership degree through simulation, and the influence of cloud droplet distribution on the result of evaluation was given.

**Key words:** Helmet Mounted Sight/Display System (HMSDS); fight effectiveness; ADC model; cloud model

### 0 引言

歼击机头盔瞄准显示系统(Helmet Mounted Sight/Display System, HMSDS)是一种观察角度大、捕获目标快的高性能瞄准显示设备。在空中机动作战时,它能引导雷达、红外搜索跟踪系统等火控设备快速截获目标,也可直接引导空空导弹截获目标并实施攻击;与大离轴角导弹配合使用时,能极大地提高飞机的作战效能,有效地增强本机的安全性<sup>[1]</sup>。HMSDS出现至今50多年间,美国、英国、法国、德国、俄罗斯、以色列以及南非等国家对此均有深入的研究,对于HMSDS的作战效能就是研究的一个重要方面。HMSDS的总体作战效能就是其具有的作战效能和使用性能的综合指标,反映了系统的全面综合能力<sup>[2]</sup>。

对于武器系统作战效能的评估有许多方法,其中

ADC模型是一种应用比较广泛的方法。一般地,利用ADC模型计算能力矩阵 $C$ 时使用的层次分析(AHP)法对复杂问题评估时,评估模型存在一定的误差<sup>[3]</sup>。进行专家打分时自由度较高,引入的主观误差较大,评估结果波动大,而云模型就可以很好地表征这种模糊度及随机度。

### 1 ADC与云模型简介

ADC模型定义:系统效能是预期一个系统能否满足一组特定任务要求程度的度量,是系统的有效性、可信赖性和能力的函数,其表达式为

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

式中: $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ 为系统的有效性行向量, $n$ 为系统所具备状态的最大数, $A_i$ 为开始任务时处于 $i$ 状态的概率; $D = (D_{ij})_{n \times n}$ 为系统的可信性矩阵, $D_{ij}$ 表示系统在开始执行任务时处于第 $i$ 种状态,而在执行任务的过程中处于第 $j$ 种状态的概率; $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)^T$ 为系统的能力矩阵, $C_j$ 表示系统处于状态 $j$ 时完成任务的概率或所能完成的任务量<sup>[4]</sup>。

收稿日期:2016-12-28

修回日期:2017-03-02

基金项目:航空联合基金(6141B05110203)

作者简介:刘伟(1985—),男,陕西岐山人,硕士,工程师,研究方向为火控/武器系统仿真及试飞。

云模型是可以对定性概念进行定量表示的数学模型。云的数字特征可以用期望( $E_x$ )、熵( $E_n$ )和超熵( $H_x$ )3个参数来表征。其中: $E_x$ 是云的重心位置,表示相应的模糊概念的中心值; $E_n$ 是定性概念模糊度的度量,体现了定性概念裕度; $H_x$ 是 $E_n$ 的熵,反映了云滴的凝聚度。 $H_x$ 越大,云滴离散度越大,隶属度的随机性越大,云的厚度也越大<sup>[3,5]</sup>。

## 2 ADC—云模型实例分析

### 2.1 ADC模型计算

本文假设 HMSDS 不考虑降级状态,只具有正常和故障两种状态,分别为状态 1、状态 2。

系统可用性为  $A = (a_1, a_2)$ ,系统可靠性为  $D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{pmatrix}$  服从指数分布<sup>[6]</sup>,系统能力矩阵  $C = (c_1 \ c_2)^T$ ,

则系统效能  $E = ADC = (a_1 \ a_2) \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}$ ,对

于 HMSDS,本文认为初始时系统故障就无法完成任务,则  $d_{21} = 0, d_{22} = 1, c_2 = 0$ ,因此,  $E = a_1 d_{11} c_1$ 。其中,

$a_1 = \frac{T_{MTBF}}{T_{MTBF} + T_{MTR}}$ ,  $d_{11} = e^{-1/T_{MTR}}$ ,  $T_{MTBF}$  为系统平均故障间隔时间,  $T_{MTR}$  为系统平均故障修复时间。

### 2.2 能力矩阵 C 的求解

能力矩阵 C 是求解效能的关键所在,本文利用层次分析法来求解某飞机 HMSDS 的能力矩阵。

#### 2.2.1 指标体系的建立

某 HMSDS 从任务使命角度分析,主要完成瞄准跟踪目标、空中格斗攻击、对地攻击、态势感知、夜视夜瞄、协同作战和弹射救生等功能<sup>[1]</sup>。

根据以上 HMSDS 的任务特点,可以将其作战效能分解得到指标评价体系,如图 1 所示。

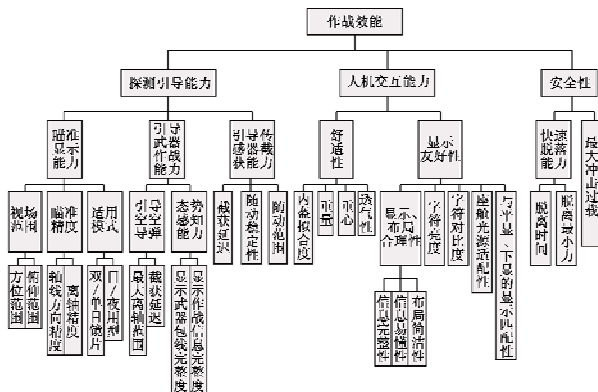


图 1 指标评价体系

Fig. 1 Index evaluation system

#### 2.2.2 指标权重的确定

利用层次分析方法计算指标权重。依据文献[7]计算权重的方法得到各因素的权重值,最终计算结果见表 1。

表 1 权重结果表

Table 1 Weight of each factor

二级指标权重	三级指标权重	四级指标权重	五级指标权重	
探测引导能力/ 0.64	瞄准显示能力/ 0.64	视场范围/0.34	方位范围/0.50 俯仰范围/0.50	
		瞄准精度/0.58	轴线方向精度/0.75 离轴精度/0.25	
		适用模式/0.08	双/单目镜片/0.50 日/夜用型/0.50	
		引导武器作战能力/0.22	引导空空导弹/0.75 态势感知能力/0.25	
	引导传感器截获能力/0.13	截获延迟/0.60	最大离轴范围/0.78 截获延迟/0.22	
		随动稳定性/0.23	武器包线完整度/0.60 作战信息完整度/0.40	
		随动范围/0.17		
	人机交互能力/ 0.26	舒适性/ 0.29	内盒拟合度/0.08	信息完整性/0.54 信息易懂性/0.16 布局简洁性/0.30
			重量/0.55 重心/0.23 透气性/0.14	
		显示友好性/ 0.71	显示、布局合理性/0.52	
字符亮度/0.11 字符对比度/0.11 光源适配性/0.06 显示匹配性/0.20				
安全性/ 0.10	快速脱离能力/0.33	脱离时间/0.75 脱离最小力/0.25		
	最大冲击过载/0.67			

#### 2.2.3 评估等级的确定

依据文献[4]将评估结果 0~1 细分为 9 个等级,分值对应的评估等级见表 2。

表 2 评估等级对应分值表

Table 2 The score of evaluation level

评估等级	极差	很差	差
评估分值	0 ~ 0.062	0.062 ~ 0.188	0.188 ~ 0.312
评估等级	较差	一般	较好
评估分值	0.312 ~ 0.438	0.438 ~ 0.562	0.562 ~ 0.688
评估等级	好	很好	极好
评估分值	0.688 ~ 0.812	0.812 ~ 0.938	0.938 ~ 1

参考文献[8],可将评估区间转化为云模型数字特征,即

$$\begin{cases} E_x = \begin{cases} \frac{a^- + a^+}{2} & i \neq 1, m \\ a^- & i = 1 \\ a^+ & i = m \end{cases} \\ E_n = \begin{cases} \frac{a^+ - a^-}{3} & i = 1, m \\ \frac{a^+ - a^-}{6} & i \neq 1, m \end{cases} \\ H_e = \begin{cases} 0.1E_n & a^+ - a^- \leq 0.1T \\ 0.3E_n & a^+ - a^- > 0.1T \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $T=1$  为评估分值  $[0, T]$  上限； $i$  为将评分区间划分成小区间时从左往右的序号； $m$  为最后一个小区间序号； $a^-$  和  $a^+$  分别为小区间的左右限值。因此可得各个评估区间对应的云模型数字特征如表 3 所示。

表 3 评估等级对应隶属云数字特征

Table 3 The evaluation level corresponding to the cloud digital feature

评估等级	极差	很差	差
数字特征	0, 0.0207, 0.0021	0.125, 0.021, 0.0063	0.25, 0.0207, 0.0062
评估等级	较差	一般	较好
数字特征	0.375, 0.021, 0.0063	0.5, 0.0207, 0.0062	0.625, 0.021, 0.0063
评估等级	好	很好	极好
数字特征	0.75, 0.0207, 0.0062	0.875, 0.021, 0.0063	1, 0.0207, 0.0021

2.2.4 底层指标的隶属云计算

对能够根据性能指标或实际使用效果直接得到优劣好坏判断的指标项，可从表 3 中得到对应指标的隶属云数字特征。对于无法量化或者难以简单判断的，采用专家打分、逆向云发生器得到该指标的隶属云数字特征。

例如引导空空导弹时“最大离轴范围”指标，其主要取决于飞行员头部转动的范围，某 HMSDS 可达到  $120^\circ$ ，完全满足空空导弹  $60^\circ \sim 70^\circ$ ，甚至  $80^\circ$  的离轴发射要求。发射离轴角范围较广，可以比较灵活地在不同态势下对敌发起攻击，提高了引导空空导弹的能力，因此对于“最大离轴范围”指标的评估等级属于“很好”，对应的隶属云数字特征为  $(0.875, 0.021, 0.0063)$ 。

依据文献 [9]，对于轴线方向的瞄准精度约为  $2 \text{ mrad}$ ，当离轴  $10^\circ$  时就降低到  $4 \sim 5 \text{ mrad}$ ，对于发射空空导弹来说能够满足使用要求，但是不能用于投放火箭、航炮及非制导武器，对于非制导武器常用传感器 HUD 来说，边缘精度为  $2 \sim 4 \text{ mrad}$  就能满足非制导武器投放需要。因此对于“轴线方向精度”评估等级属于“很好”，“离轴精度”评估等级属于“较好”，这两个指标对应的隶属云数字特征分别为  $(0.875, 0.021, 0.0063)$

和  $(0.625, 0.021, 0.0063)$ 。

例如布局简洁性指标就属于带有使用者主观感受类型的评价指标，无法根据具体指标值给出评估等级及隶属云的数字特征，因此对于“布局简洁性”邀请 10 位专家按照表 2 原则打分，结果见表 4。

表 4 专家打分结果

Table 4 Expert evaluation results

专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
0.68	0.70	0.71	0.72	0.71
专家 6	专家 7	专家 8	专家 9	专家 10
0.69	0.75	0.77	0.75	0.69

依据逆向云发生器算法，生成该指标的隶属云数字特征为  $(0.717, 0.0383, 0.0236)$ 。

按照以上两种方法，可以得到所有底层指标的隶属云数字特征。

2.2.5 顶层能力指标的云合成计算

评估指标的云合成计算为

$$\begin{cases} E_x = \sum_{i=1}^m (E_{x_i} \omega_i) \\ E_n = \sqrt{\sum_{i=1}^m (E_{n_i}^2 \omega_i)} \\ H_e = \sum_{i=1}^m (H_{e_i} \omega_i) \end{cases} \quad (3)$$

最终合成的一级指标“作战效能”的隶属云数字特征为  $(0.7701, 0.0249, 0.0079)$ 。

2.3 作战效能隶属度的计算

假设某 HMSDS 平均故障时间为  $300 \text{ h}$ ，平均修复时间为  $1 \text{ h}$ ，每次作战任务时间  $t = 1 \text{ h}$ ，因此， $E = 0.9967 \times 0.9967 \times c_1$ ，此处  $c_1$  按照云隶属度描述，因此最终的效能评估云隶属度为  $(0.7650, 0.0247, 0.0078)$ 。

2.4 作战效能的云滴分布的计算

根据该武器系统效能的云隶属度，正态云生成算法 [10]，进行 1000 次模拟计算，可得到云滴的分布见图 2。

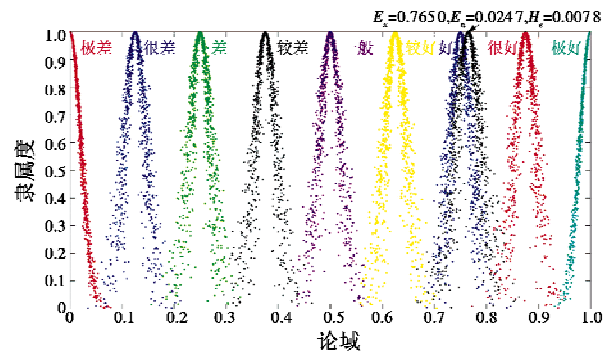


图 2 武器系统效能隶属云分布图

Fig. 2 Cloud distribution of weapon system effectiveness  
云滴分布数如表 5 所示。

表 5 1000 次模拟计算云滴分布数

Table 5 The number of cloud droplets distribution by 1000 simulation calculations

评估等级	极差	很差	差	较差	一般
云滴个数	0	0	0	0	0
评估等级	较好	好	很好	极好	
云滴个数	8	950	42	0	

### 3 结束语

由仿真计算结果可以看出,该 HMSDS 最终的评估结果是绝大部分云滴落在“好”区间内,有较少部分云滴落在“很好”区间内,从云滴个数可以反映出该评估结果整体为“好”的结果可信程度较高。

通过仿真结果可知,影响最终评估结果分布的主要是云数字特征中的期望 ( $E_x$ ),分析每个指标的云数字特征发现,指标“离轴精度”、引导传感器“截获延迟”、“双/单目镜片”、“透气性”的  $E_x$  较低,拉低了最终计算的效能期望值。这些指标按照权重依次排列,其中,“离轴精度”和“截获延迟”两个指标的权重远大于后两者,也就是说该 HMSDS 系统若能通过后续改进,如采用更先进的火控解算方法、先进的镜片材料以提高“离轴精度”,采用延迟更低的数据总线形式、处理速度更快的 CPU 芯片等方法来降低“截获延迟”,就可使其作战效能更上一层楼。目前,该系统作为我国歼击机头盔瞄准显示系统,能够满足当前训练、作战的

基本使用要求。

### 参考文献

- [1] 王永生,刘红漫. 机载头盔瞄准显示系统的人机工效综述[J]. 电光与控制,2014,21(7):1-5.
  - [2] 孙向东. 导弹武器系统总体效能评估[J]. 系统工程理论与实践,1995,19(1):54-58.
  - [3] 王志生,苏建刚,黄艳俊. 基于云模型-AHP 的制导弹药射击效能评估[J]. 火力与指挥控制,2016,41(4):121-125.
  - [4] 金哲,张金春,杨学会. 基于 WSEIAC 模型的导弹武器系统效能分析[J]. 战术导弹技术,2004(3):11-13.
  - [5] 雷志良,秦开兵,许明,等. 基于 AHP-云模型的雷达对抗装备组网作战效能评估[J]. 舰船电子对抗,2014,37(6):77-82.
  - [6] 史玮玮,鞠传文,宋贵宝. 空空导弹武器系统实战效能评估[J]. 战术导弹技术,2009(2):6-10.
  - [7] 刘伟,张安,俞峻. WSEIAC 模型的中远程空空导弹武器系统效能分析[J]. 火力与指挥控制,2012,37(1):87-90.
  - [8] 崔凯旋,石全,胡起伟,等. 基于梯形云模型的装备保障训练效果评估研究[J]. 计算机仿真,2013,30(5):306-310.
  - [9] 王辉,刘春华,王永生. 头盔显示系统评述[J]. 电光与控制,2012,19(8):45-49.
  - [10] 叶琼,李绍稳,张友华,等. 云模型及应用综述[J]. 计算机工程与设计,2011,32(12):4198-4201.
- (上接第 72 页)
- 求解该组合优化问题的数学模型的严谨性;在最小抖动分配中,考虑了对于变长作业占据时隙的处理。案例结果表明,对于整体上不能完全保证严格周期调度的任务集合,相对于单纯采用最小抖动准则的方法,该混合调度方法虽然运算的时间开销较大,但它不仅可以提高严格周期调度任务的比例,同时还能在一定程度上降低抖动率,对于有充足计算时间的离线调度表设计具有很好的适用性。
- ### 参考文献
- [1] MAROUF M, SOREL Y. Scheduling non-preemptive hard real-time tasks with strict periods[C]//The 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), IEEE, 2011:1-8.
  - [2] 陈进朝,杜承烈. 单处理器平台下的严格周期任务可调度性判定[J]. 计算机工程,2016,42(5):288-291.
  - [3] AL-SHEIKH A, BRUN O, HLADIK P E, et al. Strictly periodic scheduling in IMA-based architectures [J]. Real-Time Systems, 2012, 48(4):359-386.
  - [4] STEINER W. An evaluation of SMT-based schedule synthesis for time-triggered multi-hop networks[C]//The 31st Real-Time Systems Symposium (RTSS), IEEE, 2010:375-384.
  - [5] DONG L, MELHEM R, MOSSÉ D. Effect of scheduling jitter on end-to-end delay in TDMA protocols[C]//Proceedings of the Seventh International Conference on Real-Time Computing Systems and Applications, IEEE, 2000:223-230.
  - [6] KORST J, AARTS E, LENSTRA J K, et al. Periodic multiprocessor scheduling[C]//International Conference on Parallel Architectures and Languages Europe, 1991:166-178.
  - [7] AL-SHEIKH A, BRUN O, HLADIK P E, et al. A best-response algorithm for multiprocessor periodic scheduling [C]//Proceedings of the 23rd Euromicro Conference on Real-Time Systems, 2011:228-237.
  - [8] 郑大钟,赵千川. 离散事件动态系统[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
  - [9] GAUBERT S, SCILAB M P. Max-plus linear algebra with Scilab[Z]. ALAPEDES Max-plus Software Workshop, INRIA, 2000.