

# 战斗机对空作战效能评估

陈国际, 姜长生, 吴庆宪  
(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 当前对战斗机的能力评估已经从关注其性能发展到关注其效能上, 研究人员一直在努力探索如何对战斗机作战效能进行评估。根据现代空战模式将空战过程分解为超视距空战和视距内空战, 并分别对作战飞机进行作战效能评估。针对战斗机的隐身性, 提出雷达探测能力、被动雷达探测能力和红外探测能力作为超视距空战中态势感知能力的指标。对于超视距空战和视距内空战的作战效能评估均采用层次分析法, 并给出计算各项子能力的计算模型。

**关键词:** 空战; 作战效能评估; 层次分析法

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0016-03

## Operational Effectiveness Evaluation of Fighter Aircrafts in Air Combat

CHEN Guo-ji, JIANG Chang-sheng, WU Qing-xian

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** At present, the estimation to the fighter aircraft capability is developed from function concerning to efficacy concerning, and how to evaluate the operational effectiveness of the aircrafts in air combat has been explored for a long time. The air combat process is resolved into two parts of beyond-visual-range and within-visual-range air combat according to the mode of modern air combat, and operational effectiveness of the fighter aircraft is evaluated respectively. In allusion to stealth fighter, the radar detection ability, passive radar detection ability and infrared detection ability are put forward as indexes of situational awareness ability for beyond-visual-range air combat. Analytic hierarchy process is used for operational effectiveness evaluation to both the beyond-visual-range and within-visual-range air combat, and the ability models are presented.

**Key words:** air combat; operational effectiveness evaluation; analytic hierarchy process

### 0 引言

作战效能最大的特点是具有动态化, 即对抗双方的作战能力随时间变化, 可通过模拟和仿真的方法, 根据已知或规定的程序和数据来描述和研究作战过程, 评估武器系统的作战效能。进行作战效能评估首先要选取评价指标, 由于战斗机的性能参数对超视距和视距内空战的影响各不相同, 因此超视距和视距内空战评价指标的选取也并不相同。

### 1 作战效能评估模型

#### 1.1 指标体系的建立

战斗机作战效能是对战斗机各项能力的实时综合

描述, 表现为多层次、多参数和多因素的特点。本文采取层次分析法进行作战效能的评估, 评价指标体系的正确选取决定了评估的合理性。本文评价指标的选取如图1<sup>[1-2]</sup>所示。

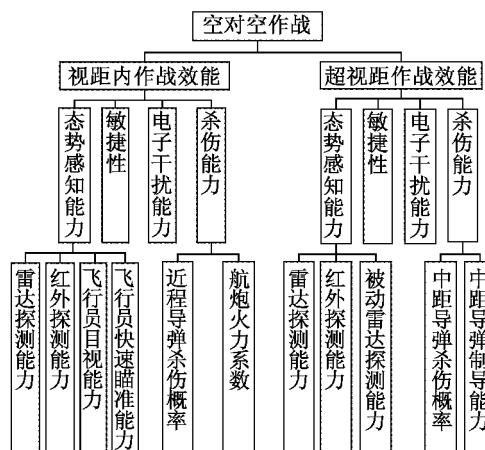


图1 空对空作战效能的指标体系

Fig.1 Index system of air-to-air combat effectiveness

收稿日期: 2013-09-11

修回日期: 2013-10-28

作者简介: 陈国际(1986—), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 研究方向为战斗机作战效能评估。

## 1.2 权重系数的确定

以超视距空战为例,战斗机在超视距空战中,先敌发现,先敌攻击,首攻歼敌是超视距空战的理想目标,因此,态势感知能力和杀伤能力占据首要地位。根据各项能力指标对战斗机超视距空战决策的重要程度,由专家两两打分,得到判断矩阵  $C$  如表 1 所示(态势感知能力、杀伤能力、电子干扰能力和敏捷性,分别用  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$  来代替)。

表 1 超视距空战的判断矩阵

Table 1 Judgment matrix of "over-the-horizon" air combat

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
$C_1$	1	1	4	7
$C_2$	1	1	7	7
$C_3$	1/4	1/7	1	4
$C_4$	1/7	1/7	1/4	1

根据矩阵  $C$  求出其最大特征根,其最大特征根对应的特征向量归一化之后即为相对权重。利用方根法可求出相对权重值<sup>[3]</sup>,即

$$\omega_i = \frac{\left(\sum_{j=1}^n c_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{k=1}^n \left(\sum_{j=1}^n c_{kj}\right)^{1/n}}, \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

得到相应因素的权重系数: $\omega_1 = 0.395$ ,  $\omega_2 = 0.454$ ,  $\omega_3 = 0.105$ ,  $\omega_4 = 0.046$ 。

经检验判断,矩阵具有较好的一致性,符合要求。同样,可以计算出超视距空战各项子能力指标权重系数和视距内空战各个层次的权重系数,则视距内和超视距的作战效能为

$$E_{IN} = 0.377E'_{PER} + 0.377E'_{FIRE} + 0.135E_{QU} + 0.051E_{DIS} \quad (2)$$

$$E_{OUT} = 0.395E_{PER} + 0.454E_{FIRE} + 0.105E_{DIS} + 0.046E_{QU} \quad (3)$$

式中: $E_{IN}$ 为视距内空战的作战效能; $E_{OUT}$ 为超视距的作战效能; $E_{PER}$ 为超视距情况下的态势感知能力; $E'_{PER}$ 为视距内情况下的态势感知能力; $E'_{FIRE}$ 为视距内情况下的杀伤能力; $E_{FIRE}$ 为超视距情况下的杀伤能力; $E_{DIS}$ 为干扰能力; $E_{QU}$ 为敏捷性。

## 2 分项能力的计算

### 2.1 态势感知能力

对于超视距空战,态势感知能力主要与雷达探测能力、红外探测能力和被动雷达探测能力有关。在一定的恒虚警概率情况下,当某雷达对目标的发现概率  $P_d \geq 0.9$  时,可认为雷达能够正常发现目标,此时对应的距离认为是雷达能够正常发现目标的距离,即雷达的最大发现距离<sup>[4]</sup>。定义雷达的探测能力为<sup>[5]</sup>

$$E_{RADAR} = \frac{R'_{max}}{R_{max}} \quad (4)$$

式中: $E_{RADAR}$ 为雷达探测能力; $R'_{max}$ 为在干扰情况下雷达的最大发现距离; $R_{max}$ 为在相同条件下没有干扰时雷达的最大发现距离。

被动雷达相对于普通雷达具有更远的探测距离,定义被动雷达的探测能力为

$$E_{RADAR,N} = \frac{R'_{maxN}}{R_{maxN}} \quad (5)$$

式中: $E_{RADAR,N}$ 为被动雷达探测能力; $R'_{maxN}$ 为被动雷达探测距离<sup>[6]</sup>; $R_{maxN}$ 为被动雷达的最大探测距离。

定义红外探测能力为

$$E_{RED} = \frac{R_{IR}}{R_{maxRED}} \quad (6)$$

式中: $E_{RED}$ 为红外探测器探测能力; $R_{IR}$ 为凝视型红外探测系统的作用距离<sup>[7]</sup>; $R_{maxRED}$ 为红外探测器的最大探测距离。

对于视距内的空战,态势感知能力除与雷达探测能力和红外探测能力有关外,还与飞行员目视能力和飞行员快速瞄准能力有关。

至于目视能力,其主要由飞机风挡、座舱盖的设计以及当时天气状况决定,在此不考虑天气因素的影响。目视可见最大距离一般为 8 km,发现概率  $P_e$  在 0.59 ~ 0.75 范围内,视场角在 160° ~ 360°,视不同飞机而定。若某时刻敌机在我飞行员视线范围内,且在视场角内,则定义目视能力  $E_e = P_e$ ,  $P_e \in (0.59, 0.75)$ , 否则  $E_e = 0$ 。

快速瞄准能力取决于飞行员是否配备快速瞄准仪器,若有,则快速瞄准能力  $E_A = 1$ , 否则,  $E_A = 0$ 。

根据上述分析,对于超视距空战,态势感知能力  $E_{PER}$  为

$$E_{PER} = 0.163E_{RED} + 0.540E_{RADAR} + 0.297E_{RADAR,N} \quad (7)$$

视距内态势感知能力  $E'_{PER}$  为

$$E'_{PER} = 0.607E_{RED} + 0.065E_{RADAR} + 0.210E_e + 0.118E_A \quad (8)$$

### 2.2 电子干扰能力

无论是超视距空战还是视距内空战的电子干扰能力,均选取敌方雷达发现距离的损失程度来度量。定义干扰能力为<sup>[8]</sup>

$$E_{DIS} = \frac{R_{maxD} - R'_{maxD}}{R_{maxD}} \quad (9)$$

式中: $R_{maxD}$ 为敌方雷达在没有干扰情况下的最大发现距离; $R'_{maxD}$ 为敌方雷达在我方干扰情况下的最大发现距离。

### 2.3 敏捷性

战斗机的敏捷性是对飞机机动性和机动能力变化的综合评价,反映了飞机的瞬时机动能力。定义敏捷性

$$E_{QU} = \frac{1}{3} \times \frac{\omega_{zx}}{\omega_{maxzx}} + \frac{1}{3} \times \frac{\omega_{zy}}{\omega_{maxzy}} + \frac{1}{3} \times \frac{\omega_{zr}}{\omega_{maxzr}} \quad (10)$$

式中： $\omega_{ax}$ 、 $\omega_{ay}$ 、 $\omega_{az}$ 分别为战斗机的滚转角加速度、俯仰角加速度、偏航角加速度； $\omega_{maxax}$ 、 $\omega_{maxay}$ 、 $\omega_{maxaz}$ 分别为最大滚转角加速度、最大俯仰角加速度、最大偏航角加速度。

## 2.4 杀伤能力

对于超视距空战，定义杀伤能力为

$$E_{\text{FIRE}} = 0.4P_d + 0.6P_{\text{GUIDE}} \quad (11)$$

式中： $P_d$ 为中距导弹的杀伤概率； $P_{\text{GUIDE}}$ 为中距导弹的制导性能，由于干扰条件下导弹对目标探测与识别能力、导弹对目标捕获能力、导弹中末制导交接时捕获概率和导弹末制导能力决定<sup>[9]</sup>。

对于视距内空战，杀伤能力由近程导弹的杀伤概率和航炮火力系数决定。航炮的火力系数为

$$A = K_{\text{瞄}} \left( \frac{V_{\text{射}}}{1200} \right) \left( \frac{V_{\text{初}}}{1000} \right)^2 \left( \frac{M_0}{400} \right) R_0 n \quad (12)$$

式中： $V_{\text{射}}$ 为航炮射速； $V_{\text{初}}$ 为航炮初速； $R_0$ 为弹丸口径； $M_0$ 为弹丸重量； $K_{\text{瞄}}$ 为瞄准具修正系数； $n$ 为此种航炮配置数量。用陀螺活动光环瞄准具时 $K_{\text{瞄}}$ 为1.0；用固定光环瞄准具时 $K_{\text{瞄}}$ 为0.4~0.5；用快速瞄准具时 $K_{\text{瞄}}$ 为1.2~1.5。

用S函数对火力系数进行归一化处理。定义视距内空战杀伤能力为

$$E'_{\text{FIRE}} = 0.7P'_d + 0.3A' \quad (13)$$

式中： $P'_d$ 为近程导弹的杀伤概率； $A'$ 为归一化后的火力系数。

## 3 系统仿真

假设机载雷达在某工作模式下的部分参数为<sup>[10]</sup>：在雷达横截面积(RCS)为5 m<sup>2</sup>时，最大作用距离为160 km，平均功率为250 W，噪声指数为4，波长为0.03 m，带宽为1.0 × 10<sup>4</sup> Hz。红外探测器的部分参数为：工作波段为3~5 μm，光学系统透过率为0.6，信号处理损失系数为3，光学系统通光孔径的直径为8.8 mm，最大探测距离为100 km。飞机装备快速瞄准仪器，机炮的最大射速为每分钟110发。

在已知空战双方战机实时数据的情况下，利用本文提出的作战效能评估计算方法，空战过程中的不同时刻，作战飞机的作战效能和各分项能力如表2所示。

表2中： $A_1$ 表示雷达探测能力； $A_2$ 表示红外探测能力； $A_3$ 表示被动雷达探测能力； $A_4$ 表示飞行员目视能力； $A_5$ 表示飞行员快速瞄准能力； $A_6$ 表示态势感知能力； $A_7$ 表示敏捷性； $A_8$ 表示电子干扰能力； $A_9$ 表示导弹杀伤概率； $A_{10}$ 表示航炮火力系数； $A_{11}$ 表示中距导弹制导能力； $A_{12}$ 表示导弹杀伤能力。

由表2知，在此次空战训练中，无论视距内还是视距外空战，态势感知能力和杀伤能力都发挥较好；但是

电子干扰能力都发挥较差，尤其在超视距空战中，电子干扰能力占有更大比重，更应提高其电子干扰能力；对于敏捷性，在视距内空战中发挥不错，在超视距空战中表现较差，但由于其占有很小的比重，所以其对作战效能影响较小。

表2 空战过程中不同时刻战机的作战效能和各分项能力

Table 2 Combat effectiveness and subentry ability of the fighter at different time of air combat

空战能力	视距内空战				超视距空战			
	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$	$t_5/s$	$t_6/s$	$t_7/s$	$t_8/s$
$A_1$	0.833	0.838	0.844	0.840	0.738	0.745	0.758	0.764
$A_2$	0.736	0.734	0.731	0.733	0.750	0.749	0.749	0.748
$A_3$	/	/	/	/	0.580	0.580	0.580	0.580
$A_4$	0.750	0.750	0.750	0.750	/	/	/	/
$A_5$	1.000	1.000	1.000	1.000	/	/	/	/
$A_6$	0.776	0.775	0.774	0.775	0.693	0.700	0.703	0.707
$A_7$	0.533	0.533	0.533	0.533	0.167	0.167	0.167	0.167
$A_8$	0.125	0.125	0.125	0.148	0.161	0.152	0.141	0.138
$A_9$	0.700	0.800	0.800	0.600	0.400	0.600	0.800	0.500
$A_{10}$	0.992	0.992	0.992	0.000	/	/	/	/
$A_{11}$	/	/	/	/	0.850	0.850	0.850	0.850
$A_{12}$	0.788	0.858	0.858	0.600	0.670	0.750	0.830	0.710
作战效能	0.700	0.726	0.726	0.562	0.602	0.639	0.677	0.624

## 4 结束语

相较于其他超视距空战中选取雷达探测能力来评估态势感知能力，本文选取雷达探测能力、红外探测能力和被动雷达探测能力来评估态势感知能力，更能适应现代战机的态势感知能力评估。本文根据空战中战斗机作战效能评估的特点，提出合理的作战效能评估指标，利用层次分析法进行战斗机作战效能的评估。

## 参考文献

- [1] 董彦非,王礼沅,王卓健,等.基于空战模式和AHP法的空战效能评估模型[J].系统工程与电子技术,2006,28(6):885-888.  
DONG Y F, WANG L Y, WANG Z J, et al. Air combat effectiveness assessment model based on operational pattern and analytic hierarchy process[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(6):885-888.
- [2] 粘松雷,严建钢,林云.基于模糊理论的战斗机空战效能评估模型[J].舰船电子工程,2011,31(7):29-31,48.  
NIAN S L, YAN J G, LIN Y. Estimation model of air combat effectiveness for fighter based on fuzzy theory[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(7):29-31, 48.
- [3] 朱宝鏊,朱荣昌,熊笑非.作战飞机效能评估[M].2版.北京:航空工业出版社,2006:101-107.

精度要求,以提升UCAV对空作战效能,设计了滑模变结构导引律并对自主攻击占位过程进行了仿真。仿真结果表明,滑模变结构导引方法能够在短时间内导引UCAV到达导弹发射位置并保持姿态稳定。

### 参考文献

- [1] 黄长强,曹林平,翁兴伟,等.无人作战飞机精确打击技术[M].北京:国防工业出版社,2011.  
HUANG C Q, CAO L P, WENG X W, et al. Accurate attacking technology of UCAV[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [2] 魏瑞轩,李学仁.无人机系统及作战使用[M].北京:国防工业出版社,2009.  
WEI R X, LI X R. System and combat usage of UAV[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [3] 王重秋,李锋,张靖.无人作战飞机系统综述[J].电光与控制,2004,11(4):41-45.  
WANG C Q, LI F, ZHANG J. Overview of UCAV system[J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11(4):41-45.
- [4] OGREN P, BACKLUND A, HARRYSON T. Autonomous UCAV strike missions using behavior control Lyapunov functions[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2006, AIAA 2006-6197.
- [5] 施蓉花.无人机自主飞行控制和自主攻击研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.  
SHI R H. UAV autonomous flight control and autonomous attack[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [6] 陈志伟.无人机空战攻防一体化自主攻击决策研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.  
CHEN Z W. UAV air-to-air integrated attack and defense autonomous attack decision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [7] ERKAN S, KANDEMIR M, GIRER G. Advanced task assignment for unmanned combat aerial vehicles targeting cost efficiency and survivability[C]//AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008, AIAA 2008-873.
- [8] 魏小丰,高晓光.攻防对抗的无人作战飞机效能评估系统[J].火力与指挥控制,2008,33(4):23-26.  
WEI X F, GAO X G. UCAV effectiveness evaluation system based on offense-defense countermeasure[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(4):23-26.
- [9] 宁全利,汪卫华,张益兴.提高无人机装备作战效能方法研究[J].航空兵器,2003,3:44-45,48.  
NING Q L, WANG W H, ZHANG Y X. Study on improving the UAV operation effectiveness[J]. Aviation Weapon, 2003, 3:44-45, 48.
- [10] 张煜,王楠,陈璟,等.空地多目标攻击中制导炸弹可投放区计算研究[J].兵工学报,2011,32(12):1474-1480.  
ZHANG Y, WANG N, CHEN J, et al. Air-to-ground multi-target attack based calculation of guided bomb's release zone[J]. Journal of Armament and Engineering, 2011, 32(12):1474-1480.
- [11] 周隆亮,周德云,李兆强.基于变结构导引律的UCAV自主轨迹控制[J].火力与指挥控制,2012,37(9):42-44.  
ZHOU L L, ZHOU D Y, LI Z Q. Autonomous trajectory control for UCAV based on variable structure guidance law[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(9):42-44.
- (上接第18页)
- ZHU B L, ZHU R C, XIONG X F. Combat aircraft effectiveness evaluation[M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2006:101-107.
- [4] 李相民,张安,张斌.压制性干扰对地面警戒雷达的效能影响分析[J].电光与控制,2006,13(1):1-4.  
LI X M, ZHANG A, ZHANG B. Influences of oppressive jam on effectiveness of ground early warning radar[J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(1):1-4.
- [5] 金虎兵,李政杰.雷达抗有源压制性干扰综合效能评估[J].电视技术,2008,48(10):55-58.  
JIN H B, LI Z J. Comprehensive evaluation on the effectiveness of radar against active blanket jamming[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(10):55-58.
- [6] 黄仁全,李为民,王春阳,等.无源雷达系统探测与定位能力分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(1):25-29.  
HUANG R Q, LI W M, WANG C Y, et al. Research on the detecting and locating capability of the passive radar system[J]. Journal of Air Force Engineering University; Natural Science Edition, 2013, 14(1):25-29.
- [7] 申俊杰.凝视型红外成像探测系统的作用距离分析与验证[J].电脑知识与技术,2009,5(26):7553-7555.  
SHEN J J. Analysis and validation of operating range of staring IR imaging detecting system[J]. Computer Knowledge and Technology, 2009, 5(26):7553-7555.
- [8] 李京,杨根源.动态贝叶斯网络用于雷达遮盖干扰效果评估[J].电子信息对抗技术,2012,27(2):55-59.  
LI J, YANG G Y. Dynamic Bayesian network for radar masking jamming effectiveness assessment[J]. Electronic Warfare Technology, 2012, 27(2):55-59.
- [9] 方洋旺,伍友利,方斌.机载导弹武器系统作战效能评估[M].北京:国防工业出版社,2010:53-55.  
FANG Y W, WU Y L, FANG B. Combat effectiveness evaluation of airborne missile weapon system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010:53-55.
- [10] 薄涛.格斗空战行为建模技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2002.  
BO T. Study the dogfight behavior modeling technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002.