

doi: 10.7690/bgzd.2022.11.014

无人机作战效能评估方法研究综述

寇昆湖, 刘登攀, 鹿珂珂, 钱 峰
(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对无人机作战效能评估问题, 对无人机系统作战效能评估的主要方法进行分析。在简要介绍作战效能评估的基础上, 介绍无人机系统作战效能评估技术进展, 重点分析 3 种不同评估方法的优缺点, 并分析未来无人机作战效能评估可能的研究方向。结果表明: 该分析可为无人机系统作战效能评估与提升提供理论依据, 对如何进行无人机效能评估及采用何种效能评估方法具有一定的指导作用。

关键词: 无人机效能评估; ADC 法; 层次分析法; 支持向量机法

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Review of Research on UAV Operational Effectiveness Evaluation Method

Kou Kunhu, Liu Dengpan, Lu Keke, Qian Feng
(Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the problem of UAV operational effectiveness evaluation, the main methods of UAV system operational effectiveness evaluation are analyzed. Based on the brief introduction of operational effectiveness evaluation, the technical progress of operational effectiveness evaluation for UAV system is introduced, the advantages and disadvantages of 3 different evaluation methods are analyzed, and the possible research directions of UAV operational effectiveness evaluation in the future are analyzed. The results show that the analysis can provide a theoretical basis for the evaluation and improvement of the operational effectiveness of UAV system, and has a certain guiding role in how to evaluate the effectiveness of UAV and what kind of effectiveness evaluation method to adopt.

Keywords: UAV effectiveness evaluation; ADC method; analytic hierarchy process; support vector machine method

0 引言

无人机是一种由遥控地面站或自主程序控制的不载人飞机, 具有造价低、无人员伤亡等特点, 适合执行对人员有高度危险的任务, 延伸有人战斗机的侦察和作战范围。一架典型无人机系统至少应包括无人机飞行器、地面控制系统、任务规划与控制站、有效载荷及数据链路等^[1]。

准确地评估无人机的作战效能, 使武器装备更好地辅助人、拓展人至关重要。笔者对无人机系统作战效能评估的主要方法进行综述, 并重点阐述可用性-可信性-固有能力(availability-dependability-capability, ADC)、层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)以及支持向量机(support vector machine, SVM)3种方法, 力图给出无人机系统作战效能评估研究与应用的现状及进展。

1 作战效能评估简介

1.1 效能定义及分类

系统的效能是建立在系统科学基础上的应用研

究领域^[2], 随着系统的结构和功能越来越复杂, 相较于系统应用要求的跨越式提高, 系统试验资源却相对缺乏, 由此产生效能。

根据中华人民共和国国家军用标准, 效能是指在规定的条件下, 达到规定使用目标的能力^[3]。

根据研究问题的不同, 可以将无人机的效能分为单项效能、系统效能和作战效能^[4]。

单项效能又称为指标效能, 指的是系统的单一使用目标, 如无人机的侦察效能、无人机的隐身性能等;

系统效能又称为综合效能, 比如某战斗机的综合性能, 某预警机的综合性能等;

作战效能关注的是无人机作战任务的完成程度, 是无人机在实际战场上的作战效果。

它们之间关系如图 1 所示^[5]。

1.2 作战效能评估基本步骤

无人机系统作战效能的评估主要包含 4 个步骤: 1) 无人机指标体系构建; 2) 评估体系指标量化; 3) 底层隶属度函数确立; 4) 单项指标效能

收稿日期: 2022-07-06; 修回日期: 2022-08-13

作者简介: 寇昆湖(1982—), 男, 山东人, 博士, 副教授, 从事无人机指挥控制研究。E-mail: liudengpan1995@163.com。

综合。

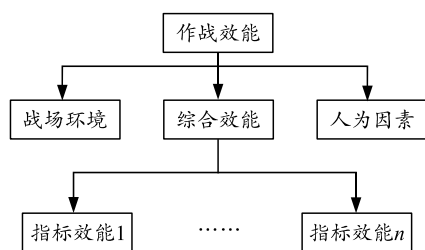


图 1 效能关系

1.3 作战效能评估基本方法

目前，传统的效能评估方法主要有^[6-12]AHP、模糊综合评判法、综合指数模型、灰色评估法、聚类分析法、ADC 方法和 SEA 方法等。

随着其他学科的发展，许多学者将其他学科领域的研究理论应用到效能评估中来。出现了许多新兴的效能评估方法^[13-17]：如相关向量机(relevance vector machine, RVM)、支持向量机以及神经网络等方法。

2 效能评估方法

2.1 ADC 法

2.1.1 基本思想

ADC 是 1963 年美国工业界武器系统效能咨询委员会(WSEIAC)在其提出的系统效能定义的基础上建立的系统效能评估模型^[18-20]，其表现形式为：

$$E=A \cdot D \cdot C. \quad (1)$$

对于无人机系统来说： E 为无人机的综合效能； A 为系统可用性向量，表示无人机系统在执行任务前所处的所有可能状态； D 为系统可信性向量，表示无人机系统在执行任务期间状态转换概率； C 为无人机系统的固有能力。

2.1.2 基本步骤

1) 可用性指标 A 分析。

可用性指标是指无人机系统在执行作战任务前处于可用状态的度量，其公式为^[21]：

$$\eta = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}). \quad (2)$$

式中： MTBF 为飞机平均故障间隔时间，指无人机各部分系统的平均故障时间， MTBF 取值参考最易故障系统的平均故障间隔时间； MTTR 为平均故障修复时间，具体取值参考 MTBF 取值。

2) 可信性指标 D 分析^[11]。

可信性指标 D 表示无人机系统在执行任务期间的状态转换概率。

假设无人机系统在执行任务时有 n 种可能的状态，在任务初始阶段无人机可能处于任何一种状态，在任务过程中可能转化为 $n-1$ 种其他状态，也就是说无人机系统有 n 种状态转化可能，因此可信性 D 可表示为：

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中， d_{ij} 为无人机系统在执行任务过程中，无人机系统由第 i 状态转移到第 j 状态的状态转移概率，且矩阵各行元素之和为 1。

3) 能力指标 C 分析。

如果对无人机系统的某单一项效能进行评估，则能力指标 C 为 1 维向量。如果对无人机系统的整体作战能力进行效能评估，则能力指标 C 为多维矩阵。

以无人侦察机为例，无人机系统能力指标主要包括隐身性、机动性、生存性、数据链能力以及侦察能力等。

4) 效能 E 分析。

$E=A \cdot D \cdot C$ 为 3 项指标的乘积，计算之和得到的 1 维向量为无人机系统的综合效能。

2.1.3 应用难点

1) 无人机系统状态的划分。

传统的 ADC 方法在无人机系统状态的划分上无法准确全面地描述无人机装备各种状态，且无人机系统以及任务需求复杂多变，使其在描述状态时变得更加困难。

2) 无人机系统能力聚合。

在传统的 ADC 方法中，对能力进行分解，建立能力指标体系。

对于复杂的无人机系统来说，其能力指标体系一般为网状关系、采用 ANP 方法分析^[22]。网状关系的指标体系层次清晰，但各指标之间相互独立，影响无人机系统效能评估的整体性，且无人机系统底层指标隶属度函数较难分析。

2.1.4 方法改进

前面提到，无人机系统的作战效能是在它系统综合效能的基础上增加人为因素及战场因素。

结合以上分析，在原有 ADC 方法的基础上，无人机的作战效能分析增加战场环境因素以及人为

因素，由此可对无人机系统作战效能分析的 ADC 方法进行改进：

$$E=A \cdot D \cdot C \cdot B \cdot H。(4)$$

式中： B 为战场环境因素； H 为人为因素。

在传统 ADC 方法基础上充分考虑战场环境因素以及人为因素，包括操纵水平、心理因素等，将二者加入到无人机系统作战效能的评估体系中。

2.2 层次分析法(AHP)

2.2.1 基本思想

AHP 是 20 世纪 70 年代美国匹兹堡大学运筹学专家 Satty 提出的一种系统效能评估方法^[23]，被广泛应用于各行各业，其中，在军事武器的效能评估方面也发挥了非常重要的作用^[24-27]。

AHP 法在某个系统多个目标不确定的情况下，进行方案决策研究具有较强的适用性。该方法将定性与定量相结合，不仅可以吸收决策者的定性分析，还可以根据各个指标之间的隶属度关系进行定量分析，并通过科学分析建立系统的指标结构模型^[28]。

2.2.2 基本步骤

AHP 大致分为 4 个步骤：

1) 指标体系构建。

根据无人机结构、作战影响因素以及演训数据等建立无人机作战效能的指标体系^[29]。

2) 判断矩阵构造。

在构建好无人机作战效能指标体系之后，采用专家评比的方法对同层中各因素进行两两比较，确定同一层次中诸因素的相对重要性，然后综合专家的判断，决定各因素相对重要的顺序。根据专家打分以及判断等级表，得到无人机指标体系的判断矩阵^[26]。

3) 指标权重计算。

通过第 2) 步得到的判断矩阵，计算无人机作战系统各指标的权重。此时，判断矩阵 A 的最大特征值所对应的最大特征向量即为该层指标的权重系数矩阵。

$$\lambda_{\max} W = A W。$$

利用公式或 Matlab 工具对上式做计算，得到判断矩阵 A 的最大特征值以及该层指标的权重系数矩阵 W 。

4) 一致性检验。

解出最大特征值和各层指标的权重系数矩阵之后，根据一致性指标 CI 和平均一致性指标 RI 表格

对判断矩阵进行一致性检验。

$$\left. \begin{aligned} CI &= (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \\ CR &= CI / RI \end{aligned} \right\}。(5)$$

AHP 方法流程如图 2 所示。

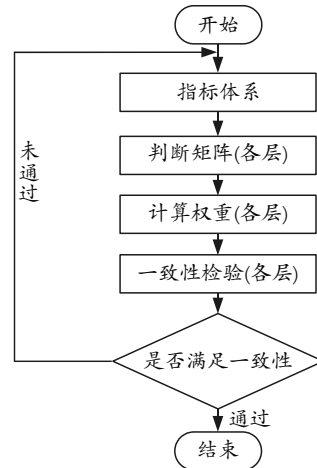


图 2 AHP 流程

2.2.3 应用难点

1) 指标体系简化。

无人机作战系统复杂多变，建立起包含全部指标的无人机系统指标体系较为困难，只能针对相比较来说更为重要的部分建立；因此，导致建立的无人机作战系统指标体系较为简化，对于一些非线性的指标以及各指标间的耦合关系不能够直观反映。

2) 定性分析存在偶然性。

由于不同专家在对无人机系统的判断上以及各自专业领域、思维的不同，导致在系统各指标间重要程度进行两两比较时，不能够使时钟保持判断的完全一致，受人的主观影响较大，定性分析存在一定的偶然性。

2.2.4 方法改进

在无人机作战系统指标体系的建立过程中，应尽可能全面、科学地分析可能影响无人机作战的因素，建立较为完备的无人机作战系统指标体系。

前面提到 AHP 方法的核心是判断矩阵，因此如何更好地构造无人机系统的判断矩阵及调整判断矩阵的一致性改进 AHP 方法的一个重要方向。郭竹梅^[30]通过分析诱导矩阵与判断矩阵之间的关系，对矩阵中偏差最大的元素进行修正。李伟等^[31]以现阶段多维决策问题为视角，针对 AHP 中判断矩阵的一致性问题，提出了一种新的调整方法。

无人机作战系统层次分析法的改进同样可以借鉴以上方法。

2.3 支持向量机法(SVM)

2.3.1 基本思想

SVM 是由 Hava Siegelmann 和 Vladimir N Vapnik 在 1995 年提出^[32]。一开始, SVM 主要应用于数据分类问题的处理, 随着理论不断成熟, SVM 逐渐应用于效能评估等问题, 并取得了一定的研究成果^[33-34]。

SVM 又称为支持向量网络, 与神经网络相似, 主要包括输入、输出以及学习样本 3 个关键因素。其中, 输入变量为无人机作战系统的效能评估指标体系, 输出变量为无人机系统的实际效能, 之后通过 SVM 对已知效能指标数据进行学习, 从而建立无人机系统评估指标到实际效能值的非线性映射, 对建立好的 SVM 模型输入新的指标变量, 即可做出相应的系统效能的输出预测, 从而达到对系统效能评估的目的。

SVM 评估法模型^[35]如图 3 所示。

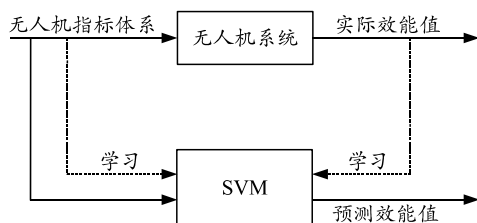


图 3 SVM 评估模型

2.3.2 基本步骤

SVM 的数学模型可以表示为:

$$f(x) = \omega \varphi(x) + b. \quad (6)$$

式中: x 为输入, 表示无人机系统作战指标体系; $f(x)$ 为输出, 表示要得到的无人机的实际效能值; ω 为权重向量; $\varphi(x)$ 为映射到高维特征空间的非线性函数; b 为偏置向量。

SVM 要解决非线性回归问题, 引入松弛变量 ξ_i 和 ξ_i^* , 该问题也就转化为:

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*). \quad (7)$$

该式满足约束条件:

$$\text{s.t.} \begin{cases} (\omega \cdot x_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i, & i=1, \dots, l \\ y_i - (\omega \cdot x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i, & i=1, \dots, l. \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0, & i=1, \dots, l \end{cases} \quad (8)$$

式中: c 为惩罚函数; ε 为不敏感损失函数。

通过引入拉格朗日公式和 KKT 条件^[36]转化为对偶问题:

$$\max \left[\sum_{i=1}^l (\alpha_i^* + \alpha_i) (\alpha_j^* - \alpha_j) (x_i \cdot x_j) \right] / 2 + \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i). \quad (9)$$

约束条件为:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i; \alpha_i \leq C, & i=1, \dots, l \end{cases}. \quad (10)$$

式中 α_i, α_i^* 为拉格朗日乘子。

根据 Mercer 条件, 引入径向基函数 (radial basis function, RBF) 为核函数 $K(x_i, x)$, 最终得到 SVM 的回归拟合函数, 即需要的无人机作战效能评估模型:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{nsv} (\alpha_i^* - \alpha_i) K(x_i, x) + b. \quad (11)$$

2.3.3 应用难点

1) 样本数据不够清晰。

无人机作战系统是一个非线性、结构复杂的系统, 演训数据较为复杂, 利用 SVM 进行效能评估需要一定数量、清晰的演训数据作为训练样本。

2) 评估体系指标复杂。

无人机系统复杂多变, 评估体系指标多而复杂, 存在不容易量化的指标, 但是作为 SVM 的输入, 应该为可量化的数据, 无论是使用数据拟合还是其他的量化办法, 无疑都会增加较大的计算量。

3) 惩罚参数和核函数参数 SVM 在对无人机进行作战效能评估时, 需要选择合适的惩罚参数 c 和核函数参数 δ , 才能获得精确的评估结果^[37]。

2.3.4 方法改进

相较于传统的效能评估方法, 新兴的 SVM 等方法更加客观, 但是也存在缺点, 各个领域的学者都进行了不同方式的改进。陈侠等^[33]在 SVM 算法的基础上对无人侦察机的作战效能进行评估。为了解决在设定惩罚参数 c 和核函数参数时的盲目主观性, 利用 PSO 算法^[38]的优势对找惩罚参数 c 和核函数 δ 参数进行寻优。

3 发展前景

许多经典的方法在无人机作战系统的效能评估中发挥了重要作用, 效果非常显著, 但是劣势也较为明显, 常常带有较大的主观性, 且不能根据战场环境的变化而灵活地对无人机系统进行效能评估。如果可以与新兴的评估方法结合起来, 在经典效能评估方法的基础上使其更具有科学性, 这将是未来

无人机作战效能评估的一个重要方向。

4 结束语

笔者阐述作战效能评估的相关基础概念, 详细介绍无人机系统作战效能评估技术进展, 主要分析了 3 种不同评估方法的优缺点, 以及未来无人机系统作战效能评估有可能的研究方向。该研究旨在为无人机系统作战效能评估提供一定理论依据。

参考文献:

- [1] PAUL G F, THOMS J, GLEASON. 无人机系统导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 30-41.
- [2] HABAYEB A R. System effectiveness[M]. UK: Pergamon Press, 1987: 25-32.
- [3] 罗云, 张际良, 蔡鲁闻, 等. 中华人民共和国国家军用标准: 装备费用-效能分析 GJB1364-92[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1993: 1-4.
- [4] 郭齐胜, 张磊. 武器装备系统效能评估方法研究综述[J]. 计算机仿真, 2013, 30(8): 1-4, 18.
- [5] 焦松. 武器装备效能评估关键问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 3, 11-12.
- [6] 胡昌栋, 滑楠, 岳地久, 等. 基于灰色层次分析法的机动通信系统效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(11): 106-112.
- [7] 郭辉, 徐浩军, 任博, 等. 基于模糊综合评判的预警机作战效能评估[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(4): 102-106.
- [8] 权家乐, 钱杭. 基于指数模型的无人机侦察能力评估[J]. 科技创新与应用, 2020(9): 65-66.
- [9] 刘刚, 叶广庆, 汪民乐. 基于层次灰色决策理论的侦察无人机系统效能评估[J]. 战术导弹技术, 2005(2): 44-47, 12.
- [10] 林志强, 樊斌斌, 王磊. 基于模糊聚类分析的相控阵雷达效能评估[J]. 电子信息对抗技术, 2020, 35(3): 64-67.
- [11] 刘大成, 蚩建峰, 刘宗福. 一种改进 ADC 模型的反辐射无人机作战效能评估方法研究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(8): 130-133.
- [12] 何希盈, 黄凡, 朱璟, 等. 基于 SEA 法的水下无人航行器侦察效能评估[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(12): 161-164.
- [13] WANG Q, DING L Y, HAN B, et al. Research on Fighter Air Combat Effectiveness Evaluation Based on RVM and KFPA[C]//2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA). IEEE, 2020.
- [14] 任水利, 甘旭升, 丁黎颖, 等. 基于核 Fisher 鉴别分析的 RVM 战斗机空战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(10): 143-147, 152.
- [15] 罗杰, 苏兵, 翟乐育. 基于 BP 神经网络的空中无人通信平台作战效能评估[J]. 指挥控制与仿真, 2021, 43(4): 21-25.
- [16] 李永新, 陈双艳, 甘旭升, 等. 对地攻击型无人机作战效能多核 RVM 评估模型[J]. 电光与控制, 2021, 28(10): 16-20.
- [17] 袁起鹏, 李江. 基于支持向量机的雷达网抗干扰效能评估[J]. 电子科技, 2014, 27(9): 101-103.
- [18] 程梦梦, 项清, 胡煦芜. 基于 ADC 模型的防空反导作战效能评估[J]. 通信电源技术, 2014, 31(2): 19-21.
- [19] 孙杨超, 乐荣剑, 申赞. 基于 ADC 模型的侦察雷达效能评估研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(10): 62-64.
- [20] 孔勇, 孟祥忠, 王智, 等. 基于 ADC 模型的天波超视距雷达作战效能评估[J]. 火控雷达技术, 2005, 34(3): 77-79.
- [21] 马琳, 王宏伟, 宋贵宝, 等. 导弹武器系统 ADC 模型效能分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2006, 4(7): 471-472.
- [22] 黄武超, 陈小银. 基于 ANP 的航空导弹作战效能指标权重确定方法研究[J]. 船舶电子工程, 2011, 31(1): 27-31.
- [23] SATTY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 29-68.
- [24] 王旭赢, 王春艳, 周江. 基于灰色层次分析的雷达组网效能评估[J]. 雷达与对抗, 2008(1): 13-16.
- [25] 郑孝勇, 姚景顺. 基于模糊层次分析法的雷达效能评估方法[J]. 现代雷达, 2012, 24(2): 7-9.
- [26] 邓海飞, 刘晨涛, 李胜. 基于模糊层次分析法的无人机系统效能评估方法[J]. 航空兵器, 2005(4): 40-42.
- [27] 谢涌纹. 基于灰色层次分析法的舰艇卫星通信效能评估方法研究[J]. 科技创新与应用, 2016(31): 66-67.
- [28] 李莎澜, 刘清国, 魏文斌, 等. 应用模糊层次分析法评估雷达组网作战效能[J]. 湖北工业大学学报, 2007(1): 91-93.
- [29] 阴小晖. 有人机/无人机协同作战效能评估研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013: 12-15.
- [30] 郭竹梅. AHP 中判断矩阵一致性改进的一种新方法[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2010, 26(6): 84-86.
- [31] 李伟, 张明生, 陈德强. 基于 AHP 判断矩阵一致性调整的一种新方法[J]. 海南热带海洋学院学报, 2019, 26(2): 67-72.
- [32] VAPNIK V N. An overview of statistical learning theory[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(5): 988-999.
- [33] 陈侠, 胡乃宽. 基于改进型支持向量机的侦察无人机作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(10): 31-34.