

基于 ADC-BP 模型的对地攻击无人机自主作战效能评估

邵明军, 刘树光, 严惊涛

(空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 西安, 710051)

摘要 为紧贴实战背景进行对地攻击无人机自主作战效能, 提出一种改进 ADC 模型的效能评估方法。首先, 在传统 ADC 模型的基础上, 引入战场环境因素、人为干扰因素, 并基于遗传算法优化 BP 神经网络, 重构传统作战能力评估模型, 构建基于 ADC-BP 的自主作战效能评估模型; 其次, 基于无人机作战任务特点, 拓展并归纳影响效能的关键能力指标, 构建与作战全过程相适应的评估指标体系; 最后, 以对地攻击无人机执行压制防空任务为例进行效能评估, 结果验证了 ADC-BP 评估模型的合理性和实用性。

关键词 对地攻击无人机; 自主作战能力; 作战效能评估; ADC 模型; BP 神经网络

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.06.015

中图分类号 V279; E91 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)06-0112-08

Assessment of Autonomous Combat Effectiveness of Ground-Attack UAV Based on ADC-BP Model

SHAO Mingjun, LIU Shuguang, YAN Jingtao

(Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering School,
Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract In order to evaluate the autonomous combat effectiveness of ground-attack UAV, taking actual combat as a background closely, an autonomous combat effectiveness evaluation method is proposed based on the improved ADC model. Firstly, on the basis of the traditional ADC model, the battlefield environment factors and human interference factors are introduced, and the BP neural network is optimized based on genetic algorithm to reconstruct the traditional combat capability evaluation model, and an autonomous combat effectiveness evaluation model based on ADC-BP is constructed. And then, based on the characteristics of UAV combat mission, the key capability indicators affecting the effectiveness are summarized, and an evaluation index system suitable for the combat process is constructed. Finally, taking suppression of enemy air defense mission performed by a ground-attack UAV as an example, the rationality and practicability of the ADC-BP evaluation model are verified, and this provides a new idea for the evaluation of the autonomous combat effectiveness of ground-attack UAV in the future.

Key words ground-attack UAV; autonomous combat capability; effectiveness evaluation; ADC model; BP neural network

收稿日期: 2023-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(72271243); 国家社会科学基金(20BGL307); 研究生创新实践基金(CXJ2022045)

作者简介: 邵明军(1990-), 男, 山东滕州人, 硕士生, 研究方向为无人机自主作战效能评估。E-mail: 348677942@qq.com

通信作者: 刘树光(1981-), 男, 山西怀仁人, 副教授, 研究方向为无人机自主控制理论及应用。E-mail: dawnny418@163.com

引用格式: 邵明军, 刘树光, 严惊涛. 基于 ADC-BP 模型的对地攻击无人机自主作战效能评估[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 112-119.
SHAOMingjun, LIU Shuguang, YAN Jingtao. Assessment of Autonomous Combat Effectiveness of Ground-Attack UAV Based on ADC-BP Model[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 112-119.

近年来,随着无人技术与智能技术融合发展,以对地攻击无人机为代表的无人自主作战样式在实战环境中得到广泛应用。研究自主作战能力,评估自主作战效能,是衡量对地攻击无人机在特定作战条件下完成预定目标任务的有效途径,对对地攻击无人机的战术使用和装备研发具有实践指导意义。

目前,效能评估的常用方法有层次分析法、模糊评判法^[1]、灰色关联法^[2],ADC 模型法^[3]等。众多评估方法中,ADC 法作为一种较为成熟的评估方法,具有综合性强,评估过程全面,模型层次清晰等优点,主要是通过系统 3 大要素,即系统可用性 A、系统可靠性 D、系统能力 C 来对武器装备效能进行评估。文献^[3]基于 ADC 模型建立效能评估方法,提出了适用于无人装备的效能评估模型;文献^[4]考虑到武器作战使用方式和效能影响因素优化了传统 ADC 模型,实现了有人/无人机对海攻击协同作战的效能评估;文献^[5]将人为因素与传统 ADC 模型相结合,实现了对武器装备效能的有效评估;文献^[6]在考虑设备运行条件和环境适应性影响基础上,引入环境适应能力改进评估方法,构建了无人机效能评估模型;文献^[7]结合具体作战任务,对能力向量 C 进行重新定义、构建的基础上优化了 ADC 评估模型,解决了无人机作战能力依靠固有静态能力评估的问题。文献^[8]基于产品分解结构 PBS 思想,提出了 PBS-ADC 模型,将无人侦察机系统分解成各子系统,并重点分析了系统的可用性、可靠性指标,解决了无人侦察机研发阶段 ADC 模型效能评估不足的问题。

分析现有文献不难发现,传统 ADC 评估模型及改进型的应用对智能化武器装备的任务特点、作战场景、作战过程分析较少,部分评估只是针对武器装备的静态性能进行系统效能评估,而没有结合作战任务、对抗环境,有针对性地对武器系统的动态作战效能进行评估;其次,对影响作战效能的因素考虑也较为简单,指标体系的构建缺乏与作战过程、对抗环境的有效结合,无法贴近实战任务,真实反映作战效能指标;由于能力向量的构建没有统一的框架及公式,大多数都是依靠静态固有性能来分析,无法结合作战过程来综合评判作战能力的发挥,评估过程也仅停留在对各个指标参数的加权,主观性较强。

综合以上分析,本文在传统 ADC 评估方法的基础上,面向对地攻击无人机在实战化背景下的任务目标、战法使用以及动态效能评估的需求,考虑战场真实对抗环境以及影响无人机自主性发挥的人为干预因素,提出一种改进 ADC 评估模型结构;同

时,有效结合对地攻击无人机具体作战流程,分析实际作战对抗中真实的战场表现,拓展评估模型的自主作战能力 C 的范围,构建能够充分反映自主作战效能的能力指标体系;基于 GA-BP 方法改进了传统 ADC 方法对能力向量的计算。

1 自主作战效能评估模型构建

1.1 自主作战效能评估框架

作战效能是指在规定的作战环境条件下,运用武器系统及其相应的兵力执行规定的作战任务时所能达到的预期目标程度^[9]。无人机自主作战效能受作战任务、作战适宜性以及自主能力^[10]等因素的影响。

作战适宜性是指装备在实际使用环境下满足装备训练和作战使用要求的程度^[9]。本文主要针对对地攻击无人机的环境适用性和使用适用性两方面进行研究,即无人机的作战环境的适用性以及无人机在作战环境下是否“好用”的程度。根据对地攻击无人机作战任务的特点,环境适用性主要考虑装备受自然环境、电磁环境、人为因素等的影响;使用适用性主要分析装备的可靠性、可用性两个方面。以上因素能够从整体角度静态衡量对地攻击无人机在实战环境下受非作战能力因素影响的程度。

因此,本文参照 ALFUS 评估框架的思想^[12],从任务复杂度、环境复杂度、人工干预程度 3 个维度,结合对地攻击无人机的作战任务、作战适宜性、自主能力 3 个要素,改进 ADC 模型评估方法对对地攻击无人机的自主作战过程进行研究,评估框架见图 1。

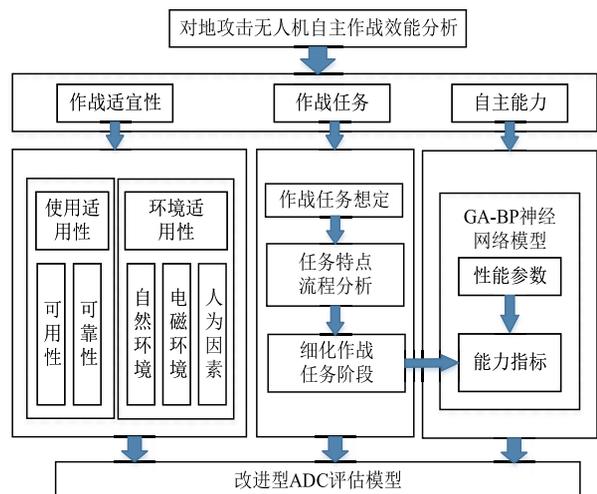


图 1 对地攻击无人机自主作战效能评估框架

该评估框架以战场环境下对地攻击无人机执行作战任务为基础,充分结合作战效能逻辑结构、作战

流程、作战功能,从静态、动态两个方面综合考虑,构建指标评价体系,改进效能评估模型和方法,对无人机自主作战效能进行研究。首先,全面分析对地攻击无人机具体作战任务,明确对地攻击无人机特定任务下的作战适宜性各要素,结合无人机系统状态描述和任务过程中状态变化情况,确定装备在作战环境下装备可用性、装备可靠性,针对对地攻击无人机受实战环境的因素影响程度,确定影响自主作战效能的具体因素;根据对地攻击无人机作战任务想定,细化分解作战全过程,通过全面分析每个作战阶段的动态过程以及在对抗过程中自主能力的综合表现,提炼与每个作战阶段相适应的作战能力指标,并运用 GA-BP 神经网络方法,通过主观评判与客观评估预测相结合的思想确定自主作战能力结果。最后,通过改进 ADC 评估模型,得到对地攻击无人机自主作战效能评估结果。

1.2 改进的 ADC 模型方法

ADC 模型是美国工业界武器系统效能咨询委员会提出的系统效能模型^[13],根据武器的可用性、可靠性和能力 3 个要素来评价武器系统。其模型的数学表达式为^[14]:

$$E = A \times D \times C \quad (1)$$

式中: E (effectiveness) 为系统的综合效能; $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]_{1 \times n}$ 为系统的可用性向量, n 为系统在执行任务时的状态数目, a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为执行任务时系统处于 i 状态的概率; $D = [d_{ij}]_{n \times n}$ 为系统的可靠性向量, d_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 表示系统从 i 状态转移到 j 状态的概率; $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]_{n \times 1}^T$ 为系统能力向量, c_j ($j = 1, 2, \dots, n$) 表示系统处于状态 j 时达到某项效能指标。

ADC 模型方法作为武器系统评估方法应用很广泛,但也有一定的局限性,仅涉及装备的可靠性、可用性及固有能力和能力,主要侧重在武器装备的系统效能评估,未考虑具体作战类型、战场环境、人为因素对无人机作战效能的影响。为此,本文结合对地攻击无人机实战背景,充分考虑战场环境影响因素 H 和人为干预因素 R 对无人机自主作战能力的影响,将两者引入系统效能评估模型中。同时考虑两者作为环境适用性的指标,是无人机环境适应能力的综合体现,在实战过程中只造成无人机部分作战能力的削弱或降级,不对系统性能造成故障。即改进后的 ADC 评估模型表达式为:

$$E = A \times D \times C \times (1 - H) \times (1 - R) \quad (2)$$

另外,运用传统 ADC 模型方法对装备进行评估的过程中,能力向量 C 的构建往往没有统一的标

准框架及公式,大部分还停留在层次分析法、模糊评估法以及依靠专家评分获得各项能力指标的权重,使得评估过程具有较强的主观性。同时,随着指标数量的增加,各指标权重的确定也愈加复杂,依靠传统方法已难以处理作战能力与各指标之间的非线性关系。因此,本文结合对地攻击无人机的作战任务、作战流程,在拓展能力 C 的基础上,采用 GA-BP 神经网络模型对能力值进行训练预测,进而高度逼近对地攻击无人机的实际作战能力值。

1.3 对地攻击无人机作战任务阶段细化

本文设定对地攻击无人机,为配合作战任务需要,在中低烈度对抗环境下,单机执行压制防空作战任务。敌方区域部署有防空武器系统 2 套、电子战干扰装备 1 套、预警雷达设备 2 套、地面武装部队等,要求对地攻击无人机能够侦察、搜索、定位目标,并发射 SDB 空地导弹以及反辐射导弹摧毁、压制敌方防空系统。

结合任务需求,对对地攻击无人机战术特点和作战任务剖面进行研究分析,考虑无人机执行作战任务是一个动态的、对抗的过程,需要对其各个阶段的作战性能进行分析,提炼与各个阶段相适应的作战能力,并为下一步指标模型构建提供参考依据。根据执行防空压制的作战目标和任务使命,将作战过程分为 5 个阶段:

1) 作战准备阶段。根据作战任务和战场环境,研究确定作战计划,预定战术规则,向无人机装订任务数据参数,挂载任务载荷,加载燃油,检查飞机状况,等待作战指令。

2) 向目标区域机动阶段。根据作战指令起飞,向目标区域机动过程中开启侦察、观瞄系统、探测雷达等机载设备,实时感知周围态势情况,并根据态势信息做出决策,必要时进行战术规避。

3) 突防阶段。抵近目标区域时,无人机通过探测感知,判断危险信息,并利用自身优势开展电磁干扰、高速机动、调整航迹、隐蔽突防等方式保存自己,进而突破敌防空火力网,必要时可对敌预警系统及防空阵地进行压制或摧毁。

4) 攻击阶段。飞临目标区域时,无人机根据预设方案,展开搜索,定位重点目标,在满足打击条件的情况下,对敌防空阵地等重点部位尽早尽快发起攻击,攻击后可对毁伤效果进行分析评估,判断是否再次打击。

5) 返航阶段。打击任务完成后,无人机迅速脱离危险区域,并针对自身完好情况进行自修复或故障隔离,同时按照任务规划选择安全航线返航着陆。

2 自主作战效能指标分析

2.1 自主作战效能指标体系构建

综合考虑对地攻击无人机压制防空作战任务过程、影响因素,参照效能评估指标的构建准则^[9],梳理归纳对地攻击无人机的作战效能指标

体系。根据无人机作战适宜性,构建对地攻击无人机综合效能层指标;基于无人机作战任务,将作战全过程细分成 5 个阶段,构建自主作战层指标;基于 OODA 作战环理论,细化分解作战流程 5 个阶段,构建局部效能层指标;针对作战过程中无人机所展现出的行为,进行量化描述,构建装备性能层指标,如图 2 所示。

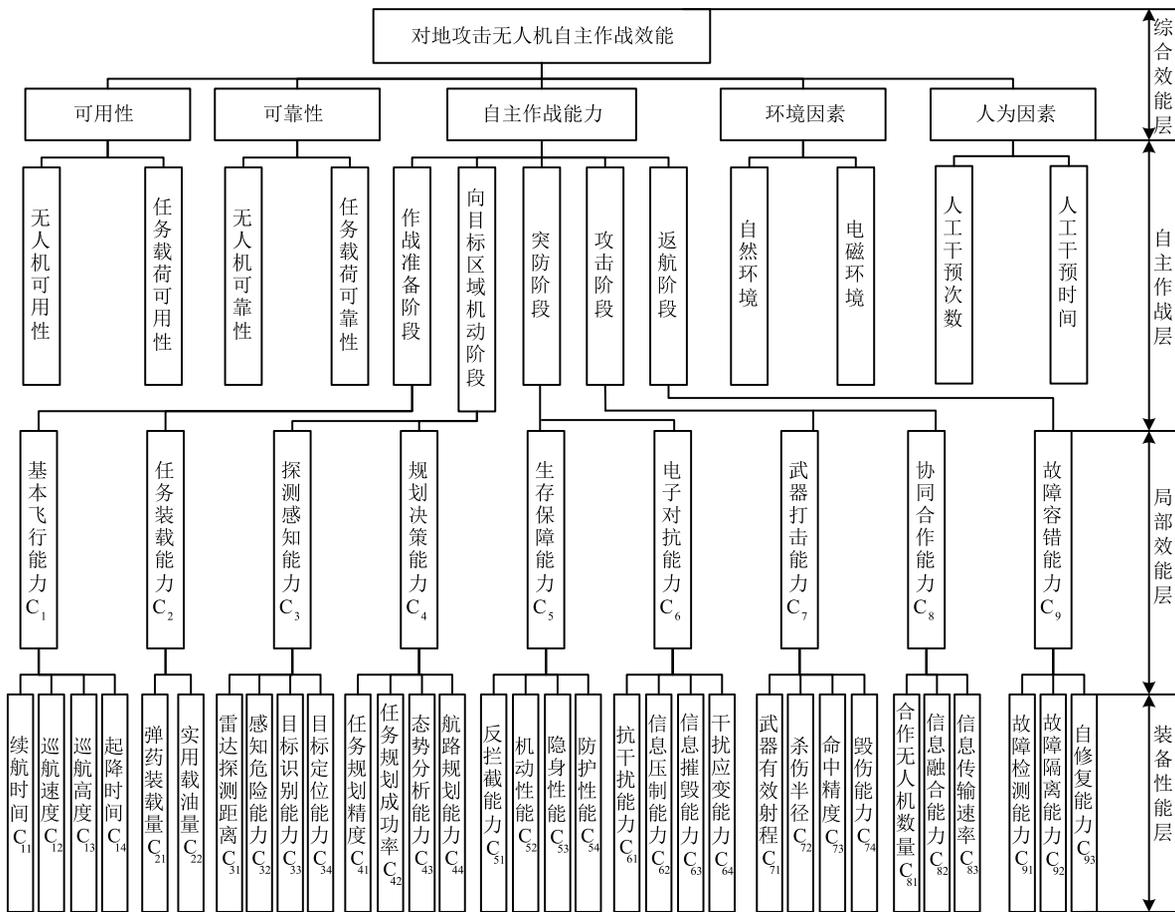


图 2 对地攻击无人机自主作战效能指标体系

2.2 评估模型指标分析

2.2.1 可用性向量

对地攻击无人机可用性表示在执行作战任务前无人机所处的状态,是能够执行作战需求程度的度量。分析可用性向量,首先要确定与其有关的结构组成和可能出现的状态数量。

本文将对地攻击无人机分为无人机平台和任务载荷平台两部分,其中任务载荷平台包括由态势感知和武器打击两部分。通常认为无人机每个部分都处于完好状态或故障状态,但由于机载设备多采用冗余^[15]设计,所以本文认为故障状态均为非重大故障,从而确定系统可用性向量为:

$$A = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4] \quad (3)$$

式中: a_1 为任务期间无人机和任务载荷系统都能正常工作状态的概率; a_2 为任务期间无人机系统正常工作,任务载荷系统出现故障的概率; a_3 为任务期间无人机系统出现故障,任务载荷系统能够正常工

作的概率; a_4 为任务期间无人机系统和任务载荷系统均出现故障的概率。

设 t_{mtbf1} 、 t_{mtbf2} 分别为无人机平台、任务载荷平均故障概率时间; t_{mttr1} 、 t_{mttr2} 分别为无人机平台、任务载荷平均故障维修时间,有:

$$a_1 = \frac{t_{mtbf1}}{t_{mtbf1} + t_{mttr1}} \times \frac{t_{mttr2}}{t_{mttr2} + t_{mttr2}}$$

$$a_2 = \frac{t_{mtbf1}}{t_{mtbf1} + t_{mttr1}} \times \frac{t_{mttr2}}{t_{mttr2} + t_{mttr2}}$$

$$a_3 = \frac{t_{mttr1}}{t_{mtbf1} + t_{mttr1}} \times \frac{t_{mttr2}}{t_{mttr2} + t_{mttr2}}$$

$$a_4 = \frac{t_{mttr1}}{t_{mtbf1} + t_{mttr1}} \times \frac{t_{mttr2}}{t_{mttr2} + t_{mttr2}} \quad (4)$$

2.2.2 可靠性向量

执行任务过程中,对地攻击无人机存在正常工作和故障 2 种状态,根据其执行任务过程中可能发生的状态变化情况,可靠性向量表示为:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： d_{ij} ($i, j=1, 2, 3, 4$) 表示系统从状态 i 转移到状态 j 的概率。由于无人机在执行作战任务时，故障状态不可修复。由此，可知：

$$d_{21} = d_{23} = d_{31} = d_{32} = d_{41} = d_{42} = d_{43} = 0 \quad (6)$$

$$d_{44} = 1 \quad (7)$$

$$D = \begin{bmatrix} e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2)} & e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{-\lambda_2 t}) & (1 - e^{-\lambda_1 t}) e^{-\lambda_2 t} & (1 - e^{-\lambda_1 t}) (1 - e^{-\lambda_2 t}) \\ 0 & e^{-\lambda_1 t} & 0 & 1 - e^{-\lambda_1 t} \\ 0 & 0 & e^{-\lambda_2 t} & 1 - e^{-\lambda_2 t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： λ_1, λ_2 分别为无人机平台和任务载荷执行任务时的故障率。

2.2.3 环境因素

战场环境作为战场态势的重要组成部分，对执行作战任务的无人机武器系统效能的影响尤其突出，具体的环境中考虑的因素也有所区别，因此本文将自然环境和电磁环境作为影响作战效能一般因素来考虑，既是整体衡量作战过程中战场环境对效能的影响程度，也是无人机适应战场环境的能力表现。其中电磁环境只考虑外部电磁环境对无人机系统的干扰情况，电子对抗情况作为作战能力来进行分析，此处不考虑。

战场环境影响系数 H 的表达式为：

$$H = \sum_{i=1}^2 \omega_i h_i \quad (11)$$

式中： ω_i 为各指标权重； h_i 为战场环境各影响因素对系统效能的损伤情况，并通过专家评判进行打分来确定。

2.2.4 人为因素

实际作战过程中无人机装备操作、指挥、保障人员，专业技能可以达到任务要求，本文不考虑人员本身素质对无人机作战任务的影响，人为因素主要指在执行作战任务期间，地面操作人员根据无人机实时传输的信息，对无人机飞行管理系统、任务管理系统、控制执行系统、感知与通信系统等^[16]的干预程度，通过人工对无人机自主能力的干预时间、次数来总体衡量自主能力受限程度以及对作战效能的影响。

人为因素影响系数 R 的表达式为：

$$R = \sum_{i=1}^2 \omega_i r_i \quad (12)$$

式中： ω_i 为各指标权重； r_i 为人为因素对系统效能的影响值。

2.2.5 自主作战能力

无人机的自主作战能力主要是以自主能力在战场环境下的作用情况来体现。当其自主性越强，应

假设对地攻击无人机执行任务时的故障概率服从指数分布，在开始执行任务时系统处于可工作状态，在任务完成时仍处于可工作状态的概率为：

$$p_i = \exp(-\lambda_i t) \quad (8)$$

式中： t 为执行任务持续时间； λ_i 为第 i 个子系统的故障率。有：

$$\lambda_i = \frac{1}{t_{\text{mtbf}_i}} \quad (9)$$

则系统的可靠性矩阵 D 为：

对战场态势变化的能力也就越好，所展现的作战效能也就越突出，反之体现的自主作战效能越低。

对地攻击无人机执行压制防空任务的作战能力，即对敌防空系统及重要目标的毁伤能力，按照作战全过程进行划分，作战能力可分为基本飞行能力、任务装载能力、探测感知能力、规划决策能力、生存保障能力、电子对抗能力、武器打击能力、协同合作能力、故障容错能力。针对对地攻击无人机执行作战任务全过程所展现出行为能力，提出基于 GA-BP 神经网络的自主作战能力评估模型。

BP 神经网络作为一种单向传播的多层前向型神经网络，能够逼近评估模型指标之间的非线性映射关系，克服传统方法处理大量数据能力不足，但也存在训练速度慢、易陷入局部最优、全局搜索能力弱等问题^[17]，因此，本文拟采用 GA 遗传算法优化 BP 神经网络初始权值和阈值，使优化后的神经网络模型更好地进行评估预测，算法流程见图 3。

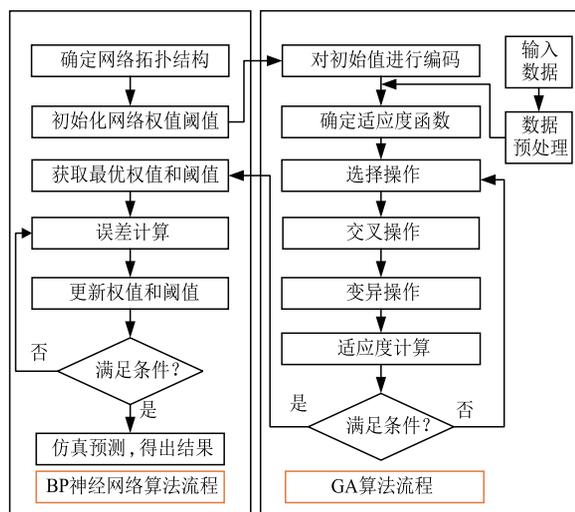


图 3 GA-BP 神经网络算法流程

本文采用 3 层 BP 神经网络对作战能力进行预测，神经网络输入层节点为 $C_{11} \sim C_{93}$ ，分别对应能力指标体系底层的 32 个指标，输出节点数为 1，

根据式(13)来确定隐含层节点数:

$$m = \sqrt{m_0 + m_1} + a \quad (13)$$

式中: m 、 m_0 、 m_1 分别为隐含层、输入层、输出层的神经元数; a 为 1~10 之间的整数。经过仿真试验,当 $m=8$ 时性能表现最佳,见图 4。

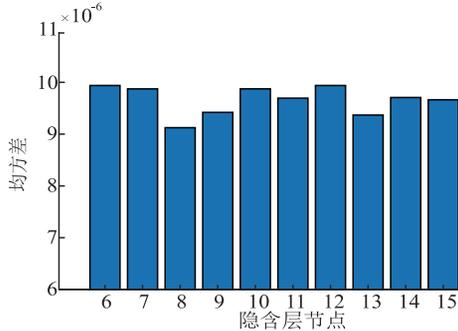


图 4 数据样本均方差值

模型采用梯度下降动量和自适应学习率方法^[19]进行训练,作用函数为 S 型函数:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (14)$$

函数用来训练神经网络的样本直接关系到无人机自主能力的大小,影响自主作战效能的综合评估。为此,本文根据多次仿真试验得到仿真数据,通过专家打分以及综合评判,选取 60 组数据作为神经网络的样本,其中选取 10 组数据作为测试样本,见表 1。本文取种群规模 40,遗传代数 为 100,训练目标误差为 1×10^{-5} ,最大迭代次数为 2 000,学习率为

0.035,在 MATLAB 环境下对神经网络模型进行训练,仿真情况见图 5~6。

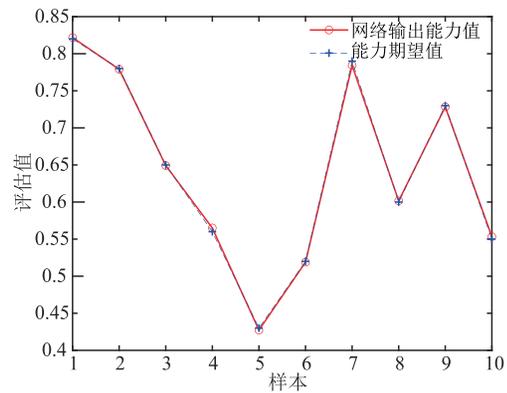


图 5 网络输出值与期望值

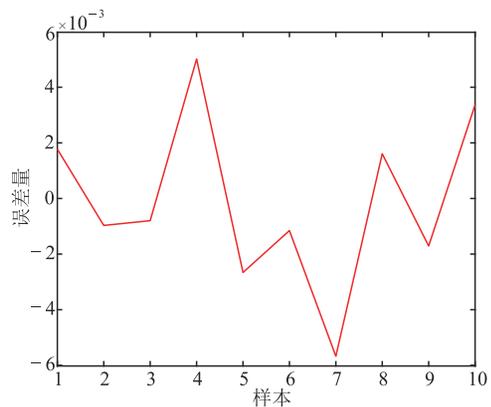


图 6 网络输出值与期望值的误差变化曲线

表 1 归一化后的指标数据样本及测试样本数据统计

样本	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{21}	...	C_{92}	C_{93}	期望值	测试输出值	相对误差/%
1	0.083 7	0.133 3	0.101 6	0.350 0	0.147 1	...	0.702 1	0.501 2	0.821 2	0.822 9	0.216 1
2	0.100 4	0.066 7	0.084 6	0.400 7	0.058 8	...	0.651 2	0.298 8	0.783 2	0.782 2	0.123 8
3	0.100 5	0.071 4	0.076 2	0.452 8	0.088 2	...	0.668 7	0.504 8	0.650 1	0.649 3	0.122 8
4	0.125 5	0.133 3	0.145 6	0.403 7	0.117 6	...	0.714 0	0.413 2	0.564 1	0.569 1	0.889 0
5	0.083 7	0.095 2	0.093 1	0.430 2	0.058 8	...	0.756 8	0.461 1	0.434 4	0.431 7	0.612 7
6	0.075 3	0.104 8	0.110 0	0.603 9	0.088 2	...	0.538 7	0.609 5	0.525 4	0.524 2	0.358 7
7	0.092 1	0.085 7	0.094 8	0.650 0	0.147 1	...	0.534 4	0.277 9	0.792 1	0.786 4	0.716 1
8	0.066 9	0.095 2	0.094 4	0.554 2	0.117 6	...	0.644 3	0.312 7	0.600 3	0.601 9	0.267 7
9	0.146 4	0.123 8	0.101 6	0.352 1	0.117 6	...	0.798 9	0.204 1	0.734 5	0.732 7	0.232 8
10	0.125 5	0.090 5	0.098 2	0.484 3	0.058 8	...	0.780 9	0.403 3	0.553 2	0.556 5	0.609 2

从表 1 中可以看出,利用神经网络模型得到的测试值与专家评估的期望值之间的最大相对误差为 0.889 0%,最小相对误差 0.122 8%,证明了基于神经网络的预测方法的有效性。

3 自主作战效能评估验证分析

假定某型对地攻击无人机按照第 1.3 节任务想定在中低烈度对抗环境下执行压制防空作战任务,

对其进行自主作战效能评估。用于执行任务的对地攻击无人机平均故障间隔时间、平均修复时间以及任务前无人机各系统处于正常状态和故障状态的概率情况,见表 2~3。

表 2 对地攻击无人机的平均故障间隔时间和修复时间

系统	平均故障间隔时间/h	平均故障修复时间/h
无人机平台子系统	500	24
任务载荷子系统	100	8

表3 对地攻击无人机各系统正常、故障的概率

系统	正常状态 概率	故障状态 概率
无人机平台子系统	0.954 2	0.045 8
任务载荷子系统	0.925 9	0.074 1

根据式(4)得出可用性向量 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = [0.883\ 5\ 0.070\ 7\ 0.042\ 4\ 0.003\ 4] \quad (15)$$

假设对地攻击无人机执行本次作战任务的持续时间为 5 h, 则无人机各系统在执行任务期间保持正常工作的概率和转为故障状态的概率情况见表 4。

表4 对地攻击无人机系统保持正常、故障状态的概率

系统	保持正常工作 状态概率	转为故障状态 概率
无人机平台子系统	0.990 0	0.010 0
任务载荷子系统	0.951 2	0.048 8

根据式(10), 得出可靠性矩阵为:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0.941\ 7 & 0.048\ 3 & 0.009\ 5 & 0.000\ 5 \\ 0 & 0.990\ 0 & 0 & 0.010\ 0 \\ 0 & 0 & 0.951\ 2 & 0.048\ 8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

经过咨询专家对战场环境影响因素分析, 进行比较得到各因素情况, 见表 5。

表5 战场环境因素两两比较

战场环境	自然环境 h_1	电磁环境 h_2
自然环境 h_1	1	1/2
电磁环境 h_2	2	1

根据表 4, 计算权重得:

$$\omega = [0.333\ 3\ 0.666\ 7], \lambda_{\max} = 2, C.I. = 0, C.R. = 0, \text{ 满足一致性指标。}$$

表6 对地攻击无人机指标数据及预测值

指标	C_{11}	...	C_{31}	C_{32}	C_{33}	...	C_{51}	C_{52}	...	C_{93}	预测值
测试值	0.146 4	...	0.187 2	0.702 5	0.800 0	...	0.122 9	0.142 9	...	0.598 2	0.813 3
方案 1	0.146 4	...	0.143 2	0.632 4	0.524 1	...	0.122 9	0.142 9	...	0.598 2	0.602 5
方案 2	0.146 4	...	0.187 2	0.702 5	0.800 0	...	0.098 3	0.114 3	...	0.598 2	0.757 0

参照传统 ADC 模型的评估方法, 该机的作战效能:

$$E_0 = \mathbf{A} \times \mathbf{D} \times \mathbf{C} = 0.798\ 0 \quad (21)$$

从式(20)和式(21)的评估结果可以发现, 在考虑了对地攻击无人机战场环境和人为干预的影响因素后, 其自主作战效能相较于传统 ADC 评估方法较低。这是由于传统 ADC 评估模型没有充分考虑无人机自主作战的环境适宜性, 将无人机作战全过程理想化所导致。而在实际作战过程中, 无人机会受到战场环境和人为干预因素的影响, 其自主作战无法发挥出最佳效能, 导致实际效能值偏低, 这与评估结果相符, 进而验证了改进 ADC 模型的合理性。

同时, 考虑到压制防空作战任务的复杂性, 本文

专家对环境影响因素打分, 确定自然、电磁环境。影响因素分别为 1.1、0.2, 则:

$$H = \sum_{i=1}^2 \omega_i h_i = 0.1667 \quad (17)$$

通过咨询专家对人为因素的各项指标分析判断, 得出各项指标的权重值, 其方法与计算环境影响因素权重相同, 此处不再赘述。根据对地攻击无人机执行作战任务期间人为干预的情况, 进行统计分析, 并将干预时间、次数进行数据标准化处理。假设本次执行作战任务期间地面人员对无人机干预 5 次, 干预时间总计为 0.5h, 可以得出人工干预的影响系数为:

$$R = \sum_{i=1}^2 \omega_i r_i = 0.149\ 9 \quad (18)$$

将执行本次作战任务的对地攻击无人机能力指标参数作为预测样本, 输入到训练后的神经网络模型中, 得到作战能力预测值, 见表 6。

根据对地无人机的装备性能和作战经验, 无人机子系统发生故障时, 仍具备完成作战任务的能力, 但其作战效能势必会有不同程度的削弱。本文假设: 当对地攻击无人机出现一个子系统故障, 其作战能力减弱 10%; 出现两个子系统故障, 作战能力减弱 40%, 则执行本次压制防空任务, 对地攻击无人机的自主作战能力为:

$$\mathbf{C} = [0.813\ 3\ 0.731\ 9\ 0.731\ 9\ 0.487\ 9]^T \quad (19)$$

根据改进 ADC 模型方法式(2), 对地攻击无人机执行压制防空作战任务的自主作战效能:

$$E = \mathbf{A} \times \mathbf{D} \times \mathbf{C} \times (1-H) \times (1-R) = 0.565\ 3 \quad (20)$$

实例分析表明, 对地攻击无人机对敌防空系统实施压制的自主作战效能基本达到要求。

假定对地攻击无人机在作战方案 1“敌方强电磁干扰环境下”和方案 2“敌方进行空中拦截的情况下”执行压制防空任务, 其自主作战效能为:

$$E_1 = \mathbf{A} \times \mathbf{D} \times \mathbf{C}_1 \times (1-H) \times (1-R) = 0.418\ 8$$

$$E_2 = \mathbf{A} \times \mathbf{D} \times \mathbf{C}_2 \times (1-H) \times (1-R) = 0.526\ 2$$

$$(22)$$

对以上 2 种方案作战效能进行评估, 其评估结果与式(20)结果进行对比发现 $E > E_2 > E_1$ 。这是由于对地攻击无人机在复杂多变的作战环境下, 面对敌方不同对抗模式时, 无人机作战阶段的能力指标侧重不同, 不同任务阶段下自主作战效能不同。方案 1 在强电磁干扰的对抗模式下, 对地攻击无人

机的探测感知能力、电子对抗能力、协同合作能力会有不同程度的变化,方案2在面对敌方拦截的情况下,无人机突防困难,生存能力受到影响。由此可见,在面对不同对抗环境时,自主能力并不是一成不变的,作战过程中的自主能力很容易受到敌方对抗方式影响,双方作战能力在彼此攻防对抗的动态过程中不断变化。此外,通过分析自主能力在作战过程中的动态变化趋势,找准关键能力指标、调整机载设备参数、改善无人机装备性能、提升自主作战能力,将是下一步重点研究方向。

4 结论

本文以对地攻击无人机执行压制防空任务时自主作战为背景,考虑作战任务、作战适宜性、自主作战能力,优化改进了传统ADC评估模型;在拓展能力向量 C 的基础上,构建了与作战全过程相适应的指标体系,并通过GA-BP神经网络方法设计了自主作战能力评估指标模型,最后通过实例分析验证了ADC-BP评估方法的有效性。本文所提出的评估模型较传统ADC模型而言,考虑因素更为全面,评估过程更为科学,解决了传统方法过于依赖专家确定权重及主观评价的问题,提升了效能评估应用的适应性和准确性,为今后对地攻击无人机自主作战效能评估提供了科学依据。

参考文献

- [1] 王红旗, 牟泽龙, 郭亚子. 基于层次分析与模糊综合评价的无人机精确保障效能评估[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(5): 109-112.
- [2] 丰雨轩, 刘树光, 解武杰. 基于灰色关联分析的对地攻击型无人机自主能力评价[J]. 电光与控制, 2021, 28(6): 16-19.
- [3] GUI C. Evaluation of Unmanned Equipment Operational Effectiveness Based on ADC Model[C]// 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou: IHMSC, 2018:299-303.
- [4] 王光源, 孙涛, 毛世超, 等. 基于任务协同的有人机/无人机对海攻击作战效能评估研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(5): 491-494.
- [5] LIU S L, LI H. A Human Factors Integrated Methods for Weapon System Effectiveness Evaluation [EB/OL]. Man-Machine-Environment System Engineering. Singapore: Springer. doi: 10. 1007/978-981-10-2323-153.
- [6] ZHANG G F, QIAO X M, et al. Effectiveness Evaluation Model of Fixed Wing UAV Based on the Improved ADC Model[C]// IEEEICUS, Beijing: IEEE, 2017:288-292.
- [7] 何胜杰, 郭强, 王兴虎, 等. 基于ADC分析法优化的无人机效能评估方法[J]. 无人系统技术, 2022, 5(2): 106-116.
- [8] 王召, 刘思峰, 方志耕, 等. 无人侦察机系统研发阶段的效能评估 PBS-ADC 模型[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(10), 2279-2286.
- [9] 燕雪峰, 张德平, 黄晓冬, 等. 面向任务的体系效能评估[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [10] 于丽莉, 何明利, 常书杰. 地面无人装备自主作战效能评估方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2020, 34(3): 26-32.
- [11] 尹纯, 黄炎焱, 王建宇, 等. 武器装备作战效能评估指标体系指导模式[J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(6): 779-784.
- [12] 杜梓冰, 陈银娣. 无人机自主作战能力试验评价技术综述[J]. 航空兵器, 2021, 28(6): 58-65.
- [13] MURRAY N L. Task Group I. Requirements Methodology [R]. USA: Weapon System Effectiveness Industry Advisory Committee (WSEIAC), 1965.
- [14] LI Q Y, CHEN G M. Effectiveness Evaluation of Missile Electromagnetic Launch System Based on ADC Model Improved by EWM-FAHP-ICWGT[J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2020:1-9. <http://doi.org/10.1155/2020/7208563>.
- [15] 杨璐. 无人机多余度航空电子系统设计与应用[J]. 电子设计工程, 2018, 26(16): 143-146.
- [16] 唐强, 张宁, 李浩, 等. 无人机自主控制系统简述[J]. 测控技术, 2020, 39(10):114-123.
- [17] 陈侠, 胡乃宽. 基于APSO-BP神经网络的无人机空地作战效能评估研究[J]. 飞行力学, 2018, 26(1): 88-92.
- [18] 王晓军, 黄沛, 唐彬鑫. 基于GA-BP神经网络的无人防空装备作战效能评估[J]. 无人系统技术, 2022, 5(3):106-113.
- [19] 史加荣, 王丹, 尚凡华, 等. 随机梯度下降算法研究进展[J]. 自动化学报, 2021, 47(9): 2103-2119.

(编辑:徐敏)