



航空学报
Acta Aeronautica et Astronautica Sinica
ISSN 1000-6893, CN 11-1929/V

《航空学报》网络首发论文

题目：有人/无人机协同作战效能智能评估方法
作者：赵子俊，陈士涛，贺维艳，刘龙浩，张政浩
收稿日期：2025-10-10
网络首发日期：2025-12-16
引用格式：赵子俊，陈士涛，贺维艳，刘龙浩，张政浩. 有人/无人机协同作战效能智能评估方法[J/OL]. 航空学报.
<https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20251216.0900.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引用格式：赵子俊，陈士涛，贺维艳，等. 有人/无人机协同作战效能智能评估方法[J]. 航空学报, 2025, XX(X): XXXXX. XX, XX, XX, et al. ZHAO Z J, CHEN S T, HE W Y, et al. Intelligent Assessment Method for MAV/UAV Collaborative Combat Effectiveness[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, XX(X): XXXXX (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2025.32887.

有人/无人机协同作战效能智能评估方法

赵子俊^{1,2,3}, 陈士涛^{1,2,3,*}, 贺维艳⁴, 刘龙浩^{1,2,3}, 张政浩^{1,2,3}

1. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 西安 710051
2. 无人飞行器技术全国重点实验室, 西安 710051
3. 陕西高校青年创新团队, 西安 710051
4. 解放军95972部队, 酒泉 735000

摘要：随着现代战争智能化、信息化、体系化程度提升, 对未来作战提出了作战效能实时评估和方案高效决策的需求。针对有人/无人机协同空面作战效能评估问题, 提出基于作战仿真推演和人工神经网络的智能评估方法。依托仿真推演平台, 通过构建作战效能评估指标体系、设计作战推演流程、综合评估结果, 获取推演评估数据, 运用BP神经网络对数据进行训练并检验训练效果, 最终进行实例分析验证方法可行性, 并通过灵敏度分析研究各方案关键指标及其影响。本文方法可为有人/无人机协同作战效能评估、装备研究改进以及作战方案快速决策提供技术参考。

关键词：有人/无人机协同作战; 仿真推演; 效能评估; BP神经网络; 灵敏度分析

中图分类号: V37; E91

文献标识码: A

文章编号: S1000-6893 (2025) XX-XXXXX-XX

1 引言

有人/无人机智能协同作战, 是应对未来体系化、无人化、智能化战争的新型作战样式, 将成为未来战争的核心形态之一^[1]。本文研究有人/无人机智能协同作战是以无人机作为指挥机、无人机作为攻击机的空对面体系作战, 具有制空压制、高体系破击率、低风险成本等优势^[2], 其作战效能评估研究对相关装备研发改进和作战方案决策优化具有重要意义。

作战效能评估最为常用的方法包括作战模拟法和解析法。作战模拟法是基于仿真推演, 通过

构建虚拟作战环境与过程模拟真实战场条件下的对抗与决策, 从而量化评估作战效能的方法^[3-5], 其优点与实战联系紧密、结果较为精确, 但缺点是平台门槛高, 需要大量试验, 成本高、周期长^[6]。解析法是通过建立效能指标、构建合适的数学模型计算评估值^[7], 例如ADC法^[8-10]、AHP法^[11, 12]、模糊综合评价法^[13, 14]、灰色关联评估法^[15, 16]等, 优点是模型便于分析、方法简单便捷, 但此类方法存在的普遍弊端是主观性依赖较强, 例如指标权重或相对重要度确定大多依赖主观确定, 导致结果难以避免出现偏差。随着现代作战节奏加快, 亟需对作战方案快速评估和决策的手段,

收稿日期: 2025-10-10; 退修日期: 2025-10-28; 录用日期: 2025-11-19; 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金(72203166); 军事类研究生资助课题 (JY2024C115)

*通讯作者. E-mail: chenshitao311@163.com

同时为方案改进提供理论指导,以支撑任务前和任务中的指挥决策。有人/无人机协同作战效能评估具有突出的时效性和指向性需求,需要对方案快速决策与实时调控,评估模型需紧贴实际任务。尽管技术不断发展,但要实现高效评估与快速决策,仍面临诸多严峻挑战,例如动态战场环境的适配性、快速决策的实时性与精准性平衡以及方法验证的实战化支撑等。当前关于有人/无人机协同作战效能评估研究多数基于数学模型或模拟仿真,这些方法除了上述不足外,还存在时限性差等弊端,不能满足实际应用需求。模拟仿真 是评估体系效能的理想工具,这得益于其能构建逼真的作战环境,能够揭示出装备在交互操作与对抗博弈中表现出的动态、非线性特性。结合人工智能和仿真推演,是解决作战效能评估时效性问题的突破口。

基于人工神经网络和作战仿真推演的作战效能智能评估方法通过仿真数据推演和神经网络学习,建立贴合作战实际、更加快速便捷的多指标综合评价模型进行评估,可有效克服上述传统方法弊端。出于模型的权值是通过实例学习得到的,避免了人为赋权等主观影响和不确定性,从而克服了传统解析法受主观偏差影响大的弊端^[17]。经过仿真数据训练支撑的效能评估模型不依赖仿真平台条件,更加快速便捷,能够有效支撑作战效能分析或作战方案快速决策,更好地适应智能化战争需求。

2 有人/无人机协同作战仿真推演

2.1 作战效能评估指标体系构建

指标体系构建严格遵循系统性、科学性与可操作性原则,结合空面打击作战的OODA循环理论,明确有人/无人机协同对面打击体系需具备搜索识别到协同打击全过程能力,聚焦有人/无人机协同作战模式,以有人/无人机协同对面作战任务为想定,从任务想定中分解提炼出战场适应能力、协同编组能力、侦察监视能力、电子对抗能力、协同攻击能力需求,并结合智能化特点补充智能协同特性等指标。通过有人/无人机协同作战概念、战法、智能化应用程度以及战技指标等分析,并经过相关专家进行论证最终确定作战效能

评估指标体系。其中一级指标是系统效能规划,包括作战系统(无人机系统)战场适应、侦察监视、电子对抗、协同攻击能力以及有人/无人体系协同编队能力^[18];二级指标是对各系统能力的分解;三级指标是对能力指标进一步分解得到的可量化的技术性指标。有人/无人机协同作战效能评估指标体系如图1所示。



图1 有人/无人机协同作战效能评估指标体系
Fig.1 MAV/UAV Cooperative Combat Effectiveness Evaluation Index System

有人/无人机协同作战效能评估指标体系共包含5个一级指标、10个二级指标和26个三级指标。可以看出指标体系较为复杂,采用传统的评估手段需要繁琐的数据处理和计算过程,且依赖大量的主观赋权或打分,导致计算结果容易出现偏差。

2.2 仿真推演流程设计

作战仿真推演首先要明确推演流程,确保仿

真推演战场关联性强、推演结果可信度高。本文根据作战概念图和作战时序图描述推演的兵力布势、任务规划以及作战流程。想定运用一架有人机与4架无人机，配合陆基导弹执行空面打击任务，作战概念图如图2所示。

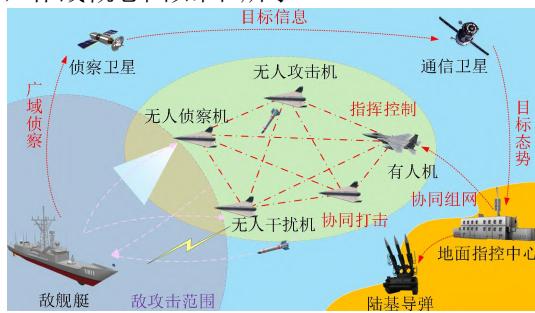


图2 作战概念图
Fig.2 Operational Concept Diagram

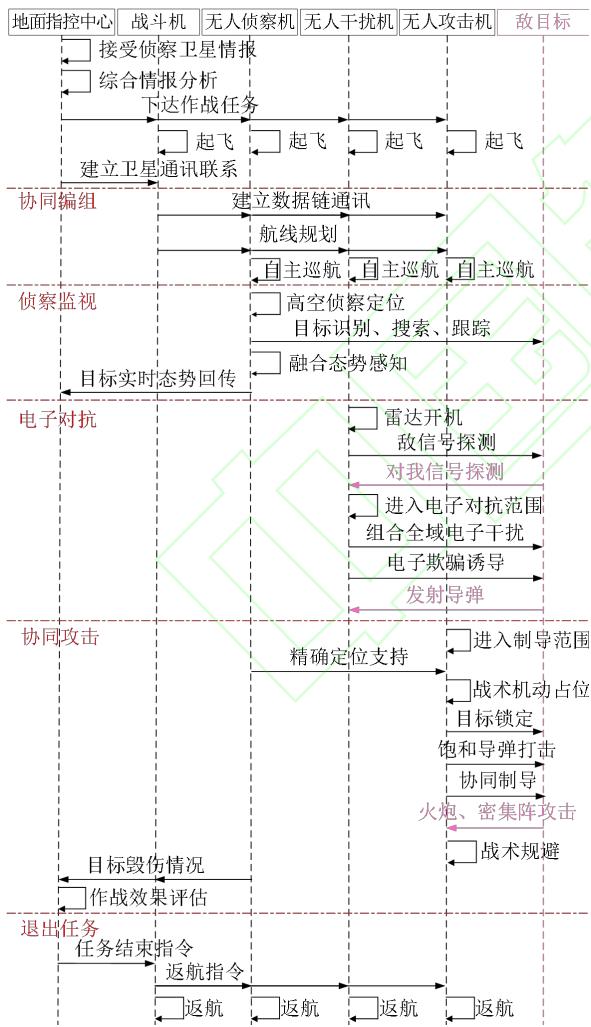


图3 作战时序图
Fig.3 Combat Sequence Diagram

作战推演的作战事件时序图如图3所示。根

据作战规划划分任务阶段，进而分解出各阶段作战事件，明确推演过程以及效能指标在作战推演中的体现，支撑动态推演验证，通过可视化作战流程时间逻辑增强推演的可追溯性与复盘效率[19]。

明确推演流程后，运用战役级仿真推演平台进行作战仿真设计和推演。通过设计作战场景、导入武器库、输入装备指标值，可推演出作战结果。仿真推演核心参数设置如表1所示。

表1 仿真核心参数表

Table 1 Simulation Core Parameters Table

参数类别	具体参数	设定值
有人/无人机作战能力指标值	根据评估指标体系进行设置	根据方案设置
无人机初始状态	初始高度、速度、姿态等	8km、650km/h、水平平飞
无人机初始状态	初始高度、速度、姿态等	7km（攻击型）、9km（侦察/干扰型）、450km/h、跟随编队姿态
气象条件		晴天，能见度≥15km
战场环境	电磁环境	中等干扰强度
	地形类型	平原
	仿真步长	1s
仿真推演参数	蒙特卡洛次数	10
	仿真时长	单次≤1200s

2.3 仿真结果处理

每次仿真推演前，根据想定输入进行仿真推演场景构设，并进行10次蒙特卡洛仿真获取收敛数据。仿真系统输出包括任务完成时间、损伤率、弹药消耗率、目标毁伤率以及关键节点存活率。通过综合各输出指标值，得出综合效能评估结果。首先需要对输出结果进行标准化处理以消除量纲差异，方法为对各指标设定阈值，分别用 $T_{Threshold}$ 、 $L_{Threshold}$ 、 $A_{Threshold}$ 、 $D_{Threshold}$ 、 $S_{Threshold}$ 表示，用实际与阈值之比将指标值归为[0, 1]区间。以任务完成时间为例，其归一化公式如式(1)：

$$T = \frac{T_{actual}}{T_{Threshold}} \quad (1)$$

归一化后的指标值分别为 T 、 L 、 A 、 D 、 S ，根据任务要求设定权重，构建综合评估公式：

$$E_i = w_T \cdot T + w_L \cdot L + w_A \cdot A + w_D \cdot D + w_S \cdot S \quad (2)$$

最终可得到一次仿真结果。式(2)中权重的核心用途是将仿真推演输出的 5 个关键指标 T 、 L 、 A 、 D 、 S 聚合为单一综合效能值，作为 BP 神经网络的“真值标签”。神经网络通过学习 26 个三级指标与该标签的映射关系，自主习得指标间的内在关联，全程不再调用式(2)及相应权重。重复上述步骤，从而获取有人/无人机协同对面作战效能评估样本，为后续神经网络训练提供样本支持。本文参数较多，在表 2 中列举了本文各参数符号含义。

表2 符号含义对照表

Table 2 Symbol Meaning Reference Table

符号	含义	符号	含义
$T_{Threshold}$	任务完成时间	w_T	T 权重
$L_{Threshold}$	损伤率	w_L	L 权重
$A_{Threshold}$	弹药消耗率	w_A	A 权重
$D_{Threshold}$	目标毁伤率	w_D	D 权重
$S_{Threshold}$	关键节点存活率	w_S	S 权重
T	$T_{Threshold}$ 归一化	net_j^l	神经网络输入
L	$L_{Threshold}$ 归一化	h_j^l	神经网络输出
A	$A_{Threshold}$ 归一化	MSE	均方误差
D	$D_{Threshold}$ 归一化	MAPE	平均百分比误差
S	$S_{Threshold}$ 归一化	R2	拟合优度

3 BP 神经网络评估模型训练

前馈神经网络是人工神经网络中运用最广泛的模型之一，BP 网络则是前馈神经网络的核心部分，广泛应用于分类识别、逼近、回归等领域^[20]。在实际应用中，大约 80% 的神经网络模型采取了 BP 网络或 BP 网络的变化形式。运用 BP 神经网络进行评估首先要根据样本数据训练神经网络，而后将训练好的神经网络用于效能评估实际。因此智能评估模型的训练主要包括以下两个过程：一是基于训练样本，训练 BP 神经网络；二是对训练 BP 神经网络进行测试，如果训练结果满足要求则可以使用。

3.1 BP 神经网络训练

设定各指标值的上界、中位数、下界，分别对各指标进行三角抽样得到一组方案值，共抽取 1000 组，分别输入仿真推演系统，总共得到 1000 次仿真推演结果做为样本数据。将原始样本数据中 80% 作为训练样本以训练神经网络，将 20% 数据作为测试样本以检验训练效果。由于输入指标数据为原始数据，为减小数据量纲带来的影响，运用式(3)对数据归一化处理，同时将归一化参数传递给测试和后续评估函数，以确保采用相同的归一化方法。通过按行逐行地对数据进行标准化处理，将每一行数据分别标准化到区间 $[y_{\min}, y_{\max}]$ 内。

$$y = \frac{(y_{\max} - y_{\min}) \cdot (x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} + y_{\min} \quad (3)$$

3.1.1 网络模型

输入为 26 个指标，输出有 1 个结果（效能值），因此有 26 个输入节点，1 个输出节点。采用三层 BP 神经网络进行训练。神经网络结构如图 4 所示。

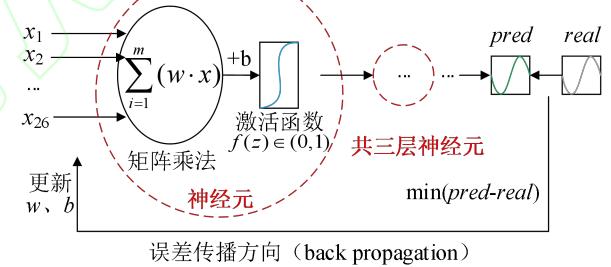


图 4 BP 神经网络结构
Fig.4 BP Neural Network Structure

在 BP 神经网络中，各神经元输入输出的数学模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} h_j^l = f(net_j^l) \\ net_j^l = \sum_{j=1}^{s_{l-1}} w_{ij}^l + b_j^l \end{cases} \quad (4)$$

式中， net_j^l 为第 l 层第 j 个神经元的输入， w_{ij}^l 和 b_j^l 分别代表权重和偏置，为输出变量，对于激活函数，通常选用 Sigmoid 函数，如式(5)所示。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^x} \quad (5)$$

BP 神经网络通过误差反向传播算法调整网络权重，运用梯度下降法更新权重与偏置，直至误差

最小，此过程在此不做赘述。

3.1.2 训练效果

在训练过程中，BP 神经网络拟合优度如图 5 所示。四张图分别为训练集、验证集、测试集和所有数据的拟合优度图形，对于一个理想的拟合，数据应该沿着 45° 下降，即网络输出和目标相等。若相关性 R 在 0.9 以上，说明模型预测较为精准。据图 5 可知 R 最小值为 0.93428，最大值为 0.96477，且总体目标已达到了 0.9521，说明拟合较为精准。

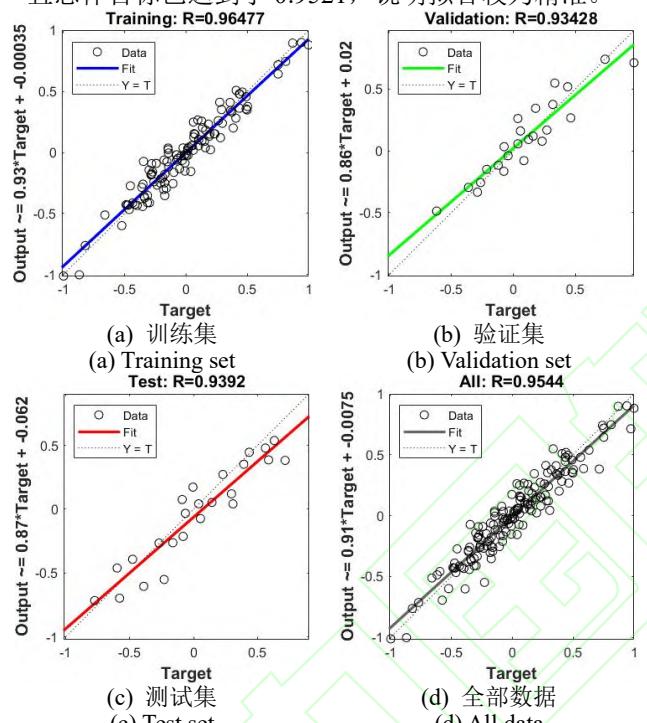


图 5 BP 神经网络训练拟合优度

Fig.5 BP Neural Network Training Goodness of Fit

3.2 BP 神经网络测试

在此主要采用 MSE、MAPE 和拟合优度 R2 三个指标判定测试效果。在本案例中，测试数据的 MSE 为 0.000082，表明误差非常小。而 MAPE 值也仅为 1.415515，测试 R2 为 0.8748，表明测试效果较好。测试真实值与网络预测值如图 6 所示，测试残差图如图 7 所示。据图可知真实值曲线与网络测试值曲线拟合程度较好、测试残差近似随机分布，说明训练精度较好。

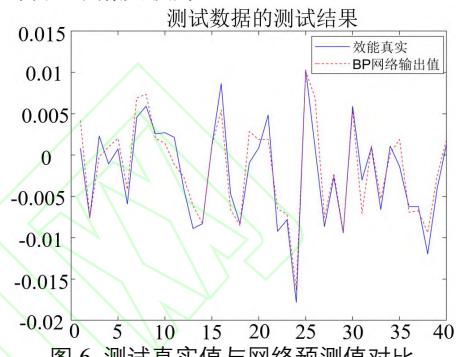


Fig.6 Comparison of Actual Values and Network Predictions

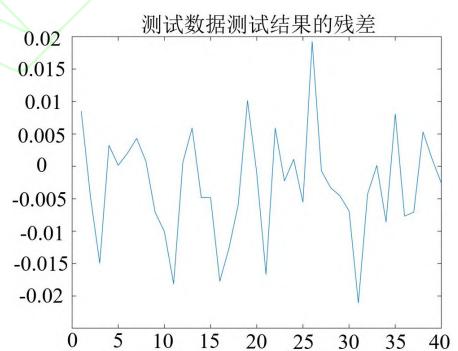


图 7 测试残差

Fig.7 Test Residuals

表3 有人/无人机协同作战效能指标参数

Table 3 MAV/UAV Cooperative Combat Effectiveness Metrics

一级指标	二级指标	三级指标	类型	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
A ₁	B ₁	C ₁	+	340	510	630	550	500
		C ₂	+	8700	10400	9400	7200	7800
		C ₃	+	1500	1400	1600	1400	1500
	C ₄		+	25	23	20	24	20
A ₂	B ₂	C ₅	+	0.47	0.76	0.71	0.56	0.61
		C ₆	+	0.58	0.78	0.53	0.61	0.64
	B ₃	C ₇	+	85	104	80	125	106
		C ₈	+	7.3	15.8	12.7	17.6	10.0
		C ₉	-	2.3	4.5	4.1	3.2	5.8

		C ₁₀	+	2.0	3.0	3.4	1.8	4.6
	B ₄	C ₁₁	+	6.5	6.8	3.9	6.3	4.4
A ₃	B ₅	C ₁₂	+	70	85	90	75	75
		C ₁₃	+	3800	1600	4400	3400	2300
A ₄	B ₆	C ₁₄	+	160	230	210	230	160
		C ₁₅	+	220	200	250	200	250
		C ₁₆	+	0.5	0.7	0.5	0.6	0.7
A ₄	B ₇	C ₁₇	+	3.5	2.0	3.0	2.7	2.1
		C ₁₈	+	6.2	7.2	5.7	5.5	5.0
A ₅	B ₈	C ₁₉	-	45	41	43	46	37
		C ₂₀	-	1.6	1.3	2.9	1.6	1.6
A ₅	B ₉	C ₂₁	+	130	132	100	160	150
		C ₂₂	+	5	3	2	5	4
A ₅	B ₁₀	C ₂₃	+	2.2	3.8	2.6	4.0	3.0
		C ₂₄	+	0.50	0.52	0.60	0.70	0.50
		C ₂₅	+	0.50	0.53	0.65	0.40	0.50
		C ₂₆	+	0.55	0.50	0.60	0.65	0.65

4 实例分析

4.1 评估案例

选取 5 组有人/无人机协同作战效能指标参数, 如表 3 所示。表中指标数据类型分为正向指标和反向指标, 对于正向指标数值越高越好, 对于负向指标则是数值越低越好。接下来确定各输出指标的权重值, 首先运用德尔菲法征询专家意见, 确定权重初步范围; 接着以 100 组历史仿真推演数据为基础, 计算各输出指标与作战任务成功与否的相关系数, 对专家初始权重进行修正。综上基于专家主观赋权与数据客观赋权相结合的方式确定 w_T 、 w_L 、 w_A 、 w_D 、 w_S 分别为 0.2、0.2、0.1、0.3、0.2。

4.2 评估结果分析

根据 BP 神经网络的基本原理, 通过模拟数据训练好的网络可以评估各方案作战效能综合效能值, 评估结果如图 8 所示。其中, $T_{\text{阈值}}$ 、 $L_{\text{阈值}}$ 、 $A_{\text{阈值}}$ 、 $D_{\text{阈值}}$ 、 $S_{\text{阈值}}$ 值分别为 50、0.7、0.8、0.8、0.6。通过柱状图, 可以快速识别出最优和最劣的方案。

各方案评估结果依次为 0.5072, 0.5456, 0.5345, 0.5675, 0.4903。综合来看, 该神经网络评估模型能有效对方案效能进行评估, 结果为方案 4 的综合效

能最高。采用图 1 所示的三级指标体系, 邀请 10 名作战效能评估领域专家, 针对同一层级指标的相对重要性构建各层级判断矩阵, 并经验证满足逻辑一致性要求。最终确定作战系统战场适应能力为 0.18、侦察监视能力为 0.22、电子对抗能力为 0.20、协同攻击能力为 0.25、体系协同编队能力为 0.15, 采用加权求和法最终得到各方案的综合效能值。AHP 法得出的 5 组方案效能排序为: 方案 4 (0.665)、方案 2 (0.643)、方案 3 (0.632)、方案 1 (0.606)、方案 5 (0.589), 与 BP 神经网络的排序结果完全一致。

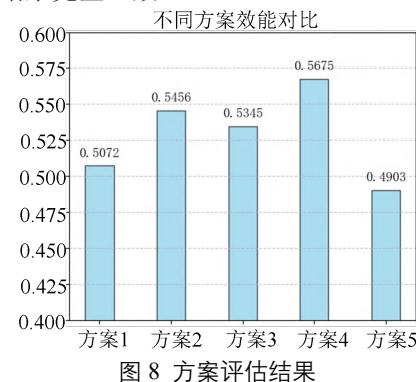


Fig.8 Evaluation Results of the Proposal

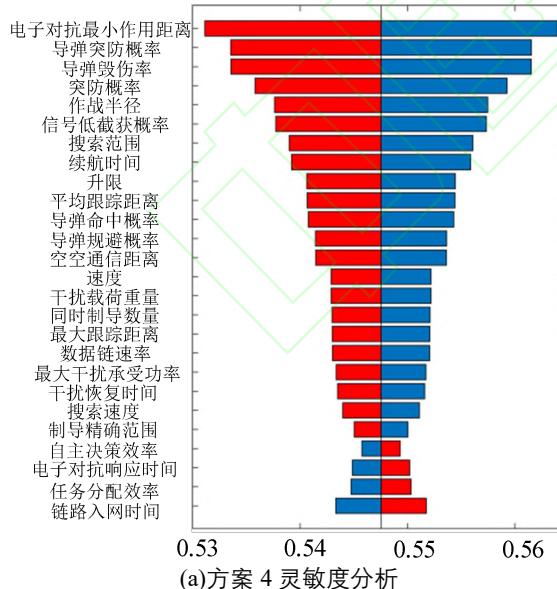
4.3 指标灵敏度分析

灵敏度分析 (Sensitivity Analysis) 的基本原理是通过评估输入变量的变化对输出结果的影响, 来确定哪些输入变量对模型或决策过程最为关键, 包

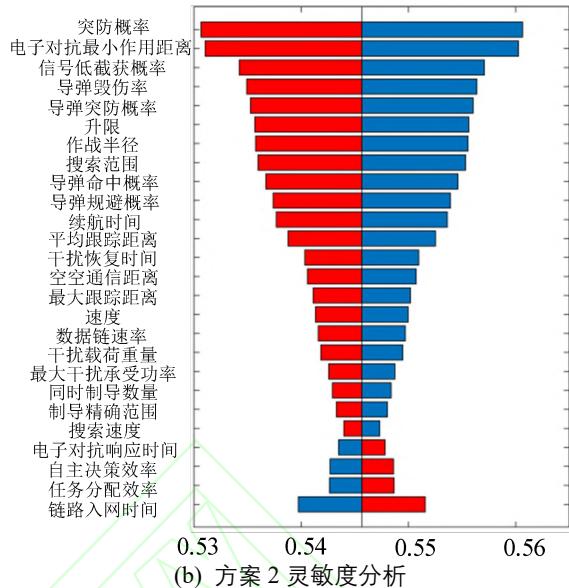
括指标灵敏度对比和单指标值灵敏度分析。针对BP神经网络评估模型的灵敏度分析，能够挖掘指标属性值与方案总体效能间的相互关联关系，如正向、负向、线性或非线性关系等，揭示有人/无人机作战效能评估内在机理。指标进行灵敏度对比侧重于横向对比指标对方案效能的影响程度；单指标值灵敏度分析则侧重于考察单个指标的变化对整体评估结果的影响程度。

4.3.1 指标灵敏度对比分析

指标灵敏度对比分析旨在比较某一方案不同指标灵敏度强弱，从而确定对方案效能的影响最为显著的指标。方法是通过增加或减少方案的某一指标值，同时保持其余指标值不发生变化，观察该方案效能评估值的变化情况。指标均为定量指标，以指标值增大或减小20%为例，分析不同指标对方案评估结果影响的大小。运用龙卷风图展示各方案效能对指标值变化的灵敏度。图9分别展示了排名靠前的方案4、方案2的灵敏度分析图，图形最顶层指标表示对效能灵敏度影响最大，例如对于方案4“电子对抗最小作用距离”指标对整体效能影响最大，该指标增大20%使效能值从基准值的0.5675增大到0.5832（蓝色），增幅为2.7%，而减小20%则效能降低到0.5509（红色），降幅为2.9%。



(a) 方案 4 灵敏度分析
(a) Sensitivity Analysis for Scenario 4



(b) 方案 2 灵敏度分析
(b) Sensitivity Analysis for Scenario 2

图9 方案指标灵敏度分析

Fig.9 Sensitivity Analysis of Scheme Indicators

根据图9对方案2和方案4的指标灵敏度分析排名可知，不同方案指标灵敏度排名大致相同，但存在个别指标排名不同，且同一指标对不同方案效能值影响也各有差异。这一方面反映出各因素对方案效能值的影响机理不同，因此指标值变化相同幅度导致效能值增减变化；另一方面反映出某些指标在达到特定阈值后对效能产生影响减弱，例如在方案2中“突防概率”指标值为0.78，可能相对整体效能值已满足需求，其变化对效能影响较小；而在方案4“突防概率”指标值为0.61，远低于整体效能要求，其轻微变化就会导致效能大幅上升。整体来看，对各方案效能值影响较大的指标主要集中于电子对抗最小作用距离、突防概率、导弹突防概率、导弹毁伤率、信号低截获概率等指标。

4.3.2 单指标值灵敏度分析

以方案效能评估值对单一指标值变化灵敏度研究为目的，分析指标值从所有方案的最小变化到最大时，方案效能值及其排序的变化。图10展示了方案2的3个指标的灵敏度分析，其中方案效能变化对应左轴，名次排序变化对应右轴。“导弹毁伤率C26”为正向指标，其值从0.5上升至0.74，整体效能提升5.0%，排名从第二上升至第一位；“电子对抗响应时间C20”为负向指标，其值从1.3增加至2.66，整体效能降低2.1%，排名从第二下降至第三位；“导弹突防概率C24”为正向指标，其值从0.52下降至0.4，整体效能降低1.7%，排名从第二下降至第三位，而当指标值从0.52提升至0.74，

整体效能提升 4.1%，排名上升至第一位。分析结果表明上述指标与效能之间呈显著正相关关系，根据分析结果可明确指标改进或波动控制范围，为方案以及决策调整改进提供参考。

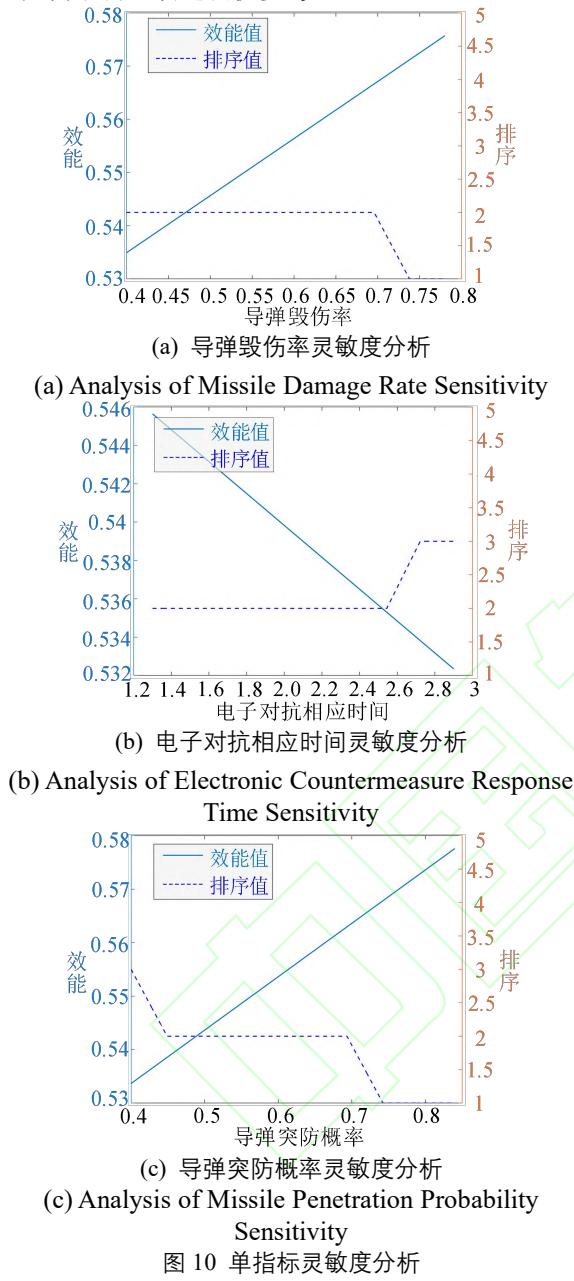


Figure 10 Single-Indicator Sensitivity Analysis

5 结束语

针对有人/无人机协同作战效能高效评估和方案快速决策问题，在深入分析传统作战效能评估方法基础上，提出基于仿真推演和神经网络的作战效能智能评估方法。通过建立作战效能指标体系，借助仿真推演平台设计蜂群反舰作战场景并输入指标数

值，综合推演结果得到作战效能评估数据。利用推演评估数据对模型训练，并运用实例分析验证了模型的可行性。最后通过指标灵敏度分析对指标值与效能值关系研究，明确灵敏度较高指标及其影响机理，从而为关键指标识别和方案改进提供指导。

参 考 文 献

- [1] 张宏宏, 李文华, 郑家毅, 等. 有人/无人机协同作战: 概念、技术与挑战[J]. 航空学报, 2024, 45(15): 168-194.
ZHANG H H, ZHU W H, ZHENG J Y, et al. Manned/Unmanned Aerial Vehicle Cooperative Combat System: Concepts, Technologies, and Challenges[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(15): 168-194.(in Chinese)
- [2] 熊威, 张栋, 任智, 等. 面向有人/无人机协同打击的智能决策方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(04): 1285-1299.
XIONG W, ZHANG D, REN Z, et al. Research on Intelligent Decision-making Methods for Coordinated Attack by Manned Aerial Vehicles and Unmanned Aerial Vehicles[J]. Systems Engineering and Electronics, 2025, 47(4): 1285-1299.(in Chinese)
- [3] 王晓悦, 王珣, 王永贞, 等. 基于仿真的蜂群体系对抗效能评估方法[J]. 航空学报, 2022, 43(S1): 110-118.
WANG X Y, WANG X, WANG Y Z, et al. Evaluation Method for Combat Effectiveness of Task-based Simulated UAV Swarm System[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(S1): 110-118.(in Chinese)
- [4] 杨松, 王维平, 李小波, 等. 无人集群体系设计与仿真评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(03): 126-136.
YANG S, WANG W P, LI X B, et al. Design, Simulation and Evaluation Method for Unmanned Swarm System-of-System. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(03): 126-136.(in Chinese)
- [5] 魏武臣, 徐硕, 何晓夫, 等. 基于作战仿真推演的空-地制导弹药效能评估[J]. 兵工学报, 2022, 43(S1): 107-114.
WEI W C, XU S, HE X F, et al. Effectiveness Evaluation of Air-ground Guided Ammunition[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(S1): 107-114.(in Chinese)
- [6] 胡杰, 陈化良, 刘亮, 等. 无人机蜂群作战效能评估研究[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(4): 164-168.
HU J, CHEN H L, LIU L, et al. Research on Operational Effectiveness Evaluation of UAV Swarm[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(4): 164-168.(in Chinese)
- [7] 赵江, 潘江峰, 邱锐生. 基于熵修正 G1 方法的智能装备支撑信息系统效能评价[J]. 物理学报: 会议系列, 2021, 2033(1).
ZHAO J, PAN J F, QIU R S. Effectiveness Evaluation of Smart Equipment Support Information System Based on Entropy-revised G1 Method[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2033(1).
- [8] 常会振, 秦大国, 孙盛智, 等. 基于ADC模型优化的海上无人机作战效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(9): 58

- 68.
- CHANG H Z, QIN D G, SUN S Z, et al. Operational effectiveness evaluation of marine un-manned aerial vehicle based on ADC model optimization[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(9): 58-68.(in Chinese)
- [9] 刘登攀, 寇昆湖, 王超, 等. 基于改进ADC法的侦察无人机作战效能评估[J]. 电光与控制, 2024, 31(4): 121-127.
- LIU D P, KOU K H, WANG C, et al. Operational Effectiveness Assessment of Reconnaissance UAS Based on Improved ADC Method[J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31(4): 121-127.(in Chinese)
- [10] LIANG Q, LUO M, WANG Y, et al. Multi-attacks effectiveness evaluation of UUV based on wake guidance[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112654.
- [11] 邓力源, 杨萍, 刘卫东, 等. 基于证据理论层次分析法的云贝叶斯网络在预警雷达毁伤效果评估中的应用[J]. 兵工学报, 2022, 43(04): 814-825.
- DENG L Y, YANG P, LIU W D, et al. Application in Damage Effect Evaluation of Early Warning Radar of Cloudy Bayesian Network Based on Dempster-Shafer/Analytic Hierarchy Process Method[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(04): 814-825.(in Chinese)
- [12] 孔刚鹏. 基于AHP-模糊综合评定的炮兵连作战试验能力评价方法研究[J]. 兵工自动化, 2024, 43(11): 52-56.
- KONG G P. Research on Evaluation Method of Artillery Company Operational Test Capability Based on AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Ordnance Industry Automation, 2024, 43(11): 52-56.(in Chinese)
- [13] 袁彭求, 杨朝旭, 荣海军. 面向定性与定量指标的轻量化高空飞艇效能评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(03): 817-826.
- YUAN Z Q, YANG Z X, RONG H J. Lightweight Effectiveness Evaluation Method for High Altitude Airships for Both Qualitative and Quantitative Indicators[J]. Systems Engineering and Electronics, 2025, 47(3): 817-826.(in Chinese)
- [14] 高俊吉, 王司霖, 朱雪莲. 舰艇磁性对抗能力综合评估模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(08): 1559-1563.
- GAO J J, WANG S L, ZHU X L. Comprehensive Evaluation Model for The Magnetic Confrontation Capability of Ships[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(8): 1559-1563.(in Chinese)
- [15] 王光源, 李浩民, 祝大程, 等. 基于熵权法-灰色关联法的海面目标威胁度评估[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(04): 57-61.
- WANG G Y, LI H M, ZHU D C, et al. Threat Evaluation of Targets at Sea Based on Entropy Weight-Grey Correlation Method[J]. Command Control & Simulation, 2023, 45(04): 57-61.(in Chinese)
- [16] WANG X Y, YANG Z, CHAI S Y, et al. Integrated Threat Assessment Method of Beyond-Visual-Range Air Combat[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2025, 36(1): 176-193.
- [17] 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.
- SHAO M J, LIU S G, YAN J T. 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.(in Chinese)
- [18] 尹浩, 魏急波, 赵海涛, 等. 面向有人/无人协同的智能通信与组网关键技术: 现状与趋势[J]. 通信学报, 2024, 45(1): 1-17.
- YIN H, WEI J B, ZHAO H T, et al. Intelligent Communication and Networking Key Technologies for Manned/Unmanned Cooperation: States-of-The-Art and Trends[J]. Journal on Communications, 2024, 45(1): 1-17.(in Chinese)
- [19] 徐向前, 豆亚杰, 钱立炜, 等. 作战体系能力需求敏捷开发方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(10): 3139-3148.
- XU X Q, DOU Y J, QIAN L W, et al. Research on Agile Development Method-of-Combat System-of-Systems Capability Requirements[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(10): 3139-3148.(in Chinese)
- [20] WANG S, DU Y, ZHAO S, et al. Research on The Construction of Weaponry Indicator System and Intelligent Evaluation Methods[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 19370.

Intelligent Assessment Method for MAV/UAV Collaborative Combat Effectiveness

ZHAO Zijun^{1, 2, 3}, CHEN Shitao^{1, 2, 3*}, HE Weiyuan⁴, LIU Longhao^{1, 2, 3}, ZHANG Zhenghao^{1, 2, 3}

1. Air Force Engineering University, Equipment Management and UAV Engineering School, Xi'an 710051, China

2. National Key Laboratory of Unmanned Aerial Vehicle Technology , Xi'an 710051, China

3 The Youth Innovation Team of Shaanxi University, Xi'an 710051, China

4. Unit 95972 of PLA, Jiuquan 735000, China

Abstract: With the increasing intelligence, informatization, and systematization of modern warfare, there emerges a demand for real-time combat effectiveness evaluation and efficient decision-making in future operations. To address the effectiveness evaluation problem in manned aerial vehicle(MAV)/unmanned aerial vehicle(UAV) cooperative air-to-ground combat, this paper proposes an intelligent assessment method based on combat simulation deduction and artificial neural networks. Supported by the simulation deduction system, evaluation data are obtained through constructing an combat effectiveness evaluation index system, designing simulation deduction processes, and synthesizing evaluation results. BP neural network is employed to train the data and verify training effectiveness. Case analysis validates the feasibility of the method, while sensitivity analysis investigates key indicators of various schemes and their impacts. The proposed method provides technical references for effectiveness evaluation of MAV/UAV cooperative combat, equipment improvement research, and rapid operational decision-making.

Keywords: MAV/UAV cooperative combat; simulation deduction; effectiveness evaluation; BP neural network; Sensitivity Analysis

Received: 2025-10-10; Revised: 2025-10-28; Accepted: 2025-11-19; Published online:

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (72203166); Military Graduate Student Research Funding Program (JY2024C115)

*Corresponding author. E-mail: chenshitao311@163.com