



电光与控制

Electronics Optics & Control

ISSN 1671-637X, CN 41-1227/TN

《电光与控制》网络首发论文

题目: 基于 Hopfield 网络的有人机/无人机协同作战效能评估
作者: 王坦, 杨森, 齐晓慧, 贾红霞, 董海瑞
网络首发日期: 2021-08-11
引用格式: 王坦, 杨森, 齐晓慧, 贾红霞, 董海瑞. 基于 Hopfield 网络的有人机/无人机协同作战效能评估. 电光与控制.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.tn.20210811.1020.006.html>



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。

基于 Hopfield 网络的有人机/无人机协同作战效能评估

王坦, 杨森, 齐晓慧, 贾红霞, 董海瑞

(陆军工程大学石家庄校区无人机工程系, 石家庄 050000)

摘要：有人机/无人机(MAV/UAV)协同作战正成为各国的研究热点，针对领域目前对协同作战效能评估的需求，探讨了一种基于 Hopfield 网络的有人机/无人机协同作战效能评估的方法。通过分析有人机/无人机协同作战典型模式，综合“观察-判断-决策-行动(OODA)”任务回路，建立了有人机/无人机协同作战效能评估指标体系，利用可拓层次分析法(EAHP)和模糊评判法得到的评价数据作为离散型 Hopfield 神经网络(DHNN)的参考标准，依据 DHNN 的联想记忆功能设计了有人机/无人机协同作战效能评估模型，并进行了仿真验证分析。仿真结果表明，该方法能够实现对有人机/无人机协同作战效能客观有效的评估。

关键词：有人机/无人机；协同作战；Hopfield 神经网络；评估

中图分类号：V19；TJ85

文献标识码：A

Evaluation of MAV/UAV Cooperative Combat Effectiveness Based on Hopfield Neural Network

WANG Tan, YANG Sen, QI Xiaohui, JIA Hongxia, DONG Hairui

(Department of Unmanned Aerial Vehicle, Army Engineering University, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The coordinated combat of MAV and UAV is becoming a research hotspot in various countries. In response to the current demand for the effectiveness evaluation of cooperative operations, the paper discusses a method for evaluating the effectiveness of MAV/UAV cooperative operations based on the Hopfield network. By analyzing the typical models of MAV/UAV cooperative operations, and integrating the content of the “observation-judgment-decision-action (OODA)” mission loop, the evaluation index system of MAV/UAV cooperative combat effectiveness has been established. The evaluation data obtained by the extensional analytical hierarchy process (EAHP) and the fuzzy evaluation method are used as the reference standard of the discrete Hopfield neural network (DHNN). Based on the associative memory function of DHNN, the MAV/UAV cooperative combat effectiveness evaluation model is designed. At the same time, simulation verification analysis is carried out. Simulation results shows that this method can achieve an objective and effective evaluation of the effectiveness of MAV/UAV cooperative combat.

Key words : MAV/UAV; coordinated operations; Hopfield neural network; evaluation

0 引言

随着航空技术的发展和现代军事战争要求的

提高，无人机的研发呈现出通用化和系列化的趋势，其角色也由情报获取、战术侦察向察打一体化方向发展^[1-2]。但单架无人机载弹量、飞行能力和对

战场态势的感知水平都极其有限, 无人机协同作战通过各无人机之间的资源调度、态势统一、任务整合将提高无人机作战系统的作战效能。但目前无人机的智能化和自主化水平不可能在短期内达到人类思维的程度, 无人机协同作战对人的依赖程度依然很大, 传统的地面站控制存在通信时延、敌方监视和干扰等问题, 对无人机协同作战效能的发挥造成不利影响^[3]。有人机/无人机混合编队采用有人机就近指挥控制无人机的模式, 不仅可在很大程度上解决多机协同自主能力和通信方面的问题, 还可将无人机和有人机在功能和性能上的差异互补^[4]。目前, 有人机/无人机协同作战方面的研究仍处于起步阶段^[5], 科学评估协同作战效能, 定位协同作战能力的不足和缺陷, 可为优化协同作战体系结构和提高协同作战能力方面的研究提供理论依据。

近年来, 有学者在协同作战效能方面展开研究, 并提供了一些可供借鉴的方法和思路。文献[6]介绍了一种基于信息熵的有人机/无人机协同作战效能评估方法, 在有人机/无人机协同作战网络中建立了节点和边模型, 将能够独立完成战斗活动的敌方目标和作战装备视为网络节点, 将信息传递和战斗活动视为网络边, 但在计算每个边的信息熵和作战能力时, 依据专家经验来确定隶属函数, 不够客观准确; 文献[7]根据有人机/无人机协同对空作战的典型模式, 建立了有人机/无人机协同对空作战的综合评价数学模型, 评估了不同混合编队方案的协同空战效能, 但计算复杂, 且评估结果不够直观; 文献[7]采用层次分析法和模糊评判法对有人机/无人机协同作战效能进行定量评估, 传统的层次分析法过于主观, 赋权值对专家的依赖程度太深, 从而影响到评价结果的科学性。总的来看, 在协同作战效能评估方面存在的主要问题表现在: 难以高效直观地对协同作战效能进行等级分类, 评价指标的

权重值受主观因素影响较大。本文针对传统研究所存在的问题, 展开以下研究。

1 有人机/无人机协同作战效能指标体系分析与建立

合理的指标体系是进行效能评估的基础和关键, 其建立需遵从系统性、完整性、层次性和科学性的原则, 要求较好地熟悉有人机/无人机协同作战内涵。本文综合考虑影响有人机/无人机协同作战效能的因素和关键技术来建立指标体系。

1.1 有人机/无人机协同作战流程

有人机/无人机协同作战作为空天地(海)一体化作战网络中的一个节点, 受地面指挥控制中心或预警机的统一指挥引导, 在充分考虑战场不确定性的情况下, 制定符合攻击效率最优的作战策略。假设地面指挥控制中心发出命令, 要求摧毁敌方防御工事, 并根据已知战场信息对有人机和无人机进行占位引导。战机占据有力位置并将初步感知信息提供至飞行员和指控中心。考虑到敌方阵地作战飞机、防空导弹和雷达等武器存在的可能性, 有人机起飞位于敌方地面火力攻击范围之外, 可起飞多架有人机, 分工完成任务级决策、指挥引导等任务, 也可由一架或多架有人机另外担任空中保护和电子干扰等职责。无人机和有人机按照预先规划的航路飞往目标区域, 飞行过程中, 有人机和无人机保持安全距离。若遇突发危险, 无人机将感知信息发送至有人机, 有人机做出任务级决策, 无人机根据命令进行避让危险或做出攻击, 无人机在危险区域或目标区域完成攻击后, 会利用自身机载侦察摄像设备对攻击目标进行拍摄对攻击效果进行评估, 并将分析结果通过数据链传回有人机, 有人机对敌我双方的损失情况做出判断后, 做出再次攻击或返航命令。

1.2 影响有人机/无人机协同作战效能的因素

有人机/无人机协同作战的过程可以看作是观察(Observe)—判断(Orient)—决策(Decide)—行动(Act)四个作战环节的循环往复, 并且致胜的关键在于比敌方更快的完成OODA循环, 或者破坏掉敌方的OODA环。由于高效可靠的通信网络是协同

作者简介: 王坦(1995-), 男, 河南商丘人, 硕士生。

通讯作者: 杨森(1984-), 男, 河北石家庄人, 博士。

作战的基础和关键,本文以OODA环为基础,从感知能力(Observe)、决策能力(Decide)、行为能力(Act)、安全能力(Security)和通信能力(Communication)五个方面分析影响有人机/无人机协同作战效能的关键因素^[9-10]。建立的有人机/无人机协同作战指标体系如图1所示。

2 确定参考标准的策略

在参考标准的确定过程中,运用可拓层次分析法对比指标体系各层次的因素,确定各因素权重,选用模糊综合评判法进行隶属等级分析,得出的结果作为离散型Hopfield神经网络的理想等级评价标准,解决传统参考标准的确定受主观因素影响较大的问题。

2.1 可拓层次分析法

高洁等人从可拓集合和物元概念出发提出的可拓层次分析法,将不确定的相对重要性程度扩展到某一范围,利用区间数解决了人为判断因素相对重要性具有模糊性的问题,并改进了传统层次分析法一般不考虑判断矩阵的一致性方面的不足^[11],在确定数控设备故障部件重要性、化工生产风险评估等许多领域得到应用^[12-13]。其实现步骤如下:

步骤1 构造可拓判断矩阵,元素的相对重要性程度确定在某一可拓区间内。可拓判断矩阵

$$A = (a_{ij})_{n_k \times n_k}, \text{ 其中 } a_{ii} = 1, \\ a_{ji} = a_{ij}^- = \left(\frac{1}{a_{ij}^+}, \frac{1}{a_{ij}^-} \right), i, j = 1, 2, \dots, n_k \quad (1)$$

步骤2 计算综合可拓判断矩阵和权重向量,

$$\text{设 } a_{ij}^s = \langle a_{ij}^{-s}, a_{ij}^{+s} \rangle (i, j = 1, 2, \dots, T) \text{ 为第 } s \text{ 个专家} \\ \text{给出的可拓区间, 得到与第 } k-1 \text{ 层某一因素相关的} \\ \text{第 } k \text{ 层所有因素的综合可拓判断矩阵为} \\ A = \langle A^-, A^+ \rangle, \\ A_{ij}^k = \frac{1}{T} \otimes (a_{ij}^1 + a_{ij}^2 + \dots + a_{ij}^T) \quad (2)$$

A的满足一致性的权重向量 S^k 为:

$$S^k = (S_1^k, S_2^k, \dots, S_{n_k}^k)^T = \langle kx^-, mx^+ \rangle \quad (3)$$

其中, x^- , x^+ 分别 $A^- = (a_{ij}^-)_{n_k \times n_k}$, $A^+ = (a_{ij}^+)_{n_k \times n_k}$ 的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征

向量;

$$k = \sqrt{\frac{n_k}{\sum_{j=1}^{n_k} \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_k} a_{ij}^+}}}, m = \sqrt{\frac{n_k}{\sum_{j=1}^{n_k} \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_k} a_{ij}^-}}} \quad (4)$$

步骤3 层次单排序, 设 $S_i^k = (S_i^{k-}, S_i^{k+})$, $S_j^k = (S_j^{k-}, S_j^{k+})$, $(i, j = 1, 2, \dots, n_k)$, 则

$$V(S_i^k > S_j^k) = \frac{2(S_i^{k+} - S_j^{k-})}{(S_j^{k+} - S_j^{k-}) + (S_i^{k+} - S_i^{k-})} \quad (5)$$

若 $\forall i = 1, 2, \dots, n_k; i \neq j, V(S_i^k \geq S_j^k) \geq 0$, 则

$$P_{jh}^k = 1, P_{ih}^k = V(S_i^k \geq S_j^k), i = 1, 2, \dots, n_k; i \neq j.$$

经归一化得 $P_h^k = (P_{1h}^k, P_{2h}^k, \dots, P_{n_kh}^k)^T$ 。

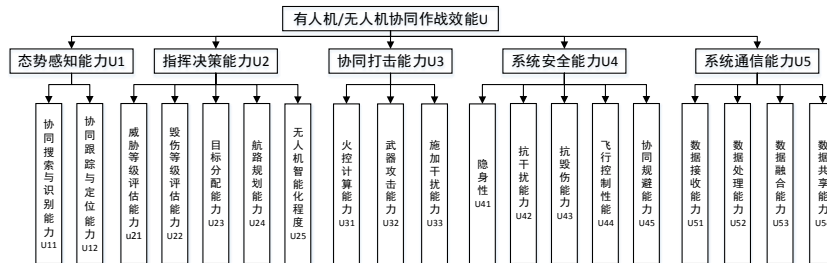


图1 有人机/无人机协同作战指标体系

Fig.1 Index system for MAV/UAV cooperative operations

就图1所示的有人机/无人机协同作战效能指标而言,设计调研问卷,得出可拓判断矩阵,经计

算,第一层影响因素对总效能的权重向量为 $P_1^1 = (0.242, 0.125, 0.226, 0.164, 0.243)^T$ 。第二层

相关因素对态势感知能力、指挥决策能力、协同打击能力、系统安全能力和系统通信能力的权重向量向量分别为 $P_1^2 = (0.454, 0.546)^T$;
 $P_2^2 = (0.128, 0.167, 0.243, 0.186, 0.276)^T$;
 $P_3^2 = (0.245, 0.463, 0.292)^T$;
 $P_4^2 = (0.179, 0.158, 0.214, 0.241, 0.208)^T$;
 $P_5^2 = (0.205, 0.197, 0.213, 0.385)^T$ 。

2.2 模糊综合评判法

模糊综合评判法是一种基于模糊集合理论的综合评价方法, 可以将模糊和定性问题转化为定量问题, 目的是对不同等级目标的隶属度进行综合评价。应用模糊综合评价法主要有如下步骤:

步骤 1 建立因素集, 设第一层影响因素组成的因素集为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, 第二层影响因素组成的因素集为 $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{im}\}$ 。

步骤 2 建立评价集, 取评价集为 $V = \{\text{优, 良, 中, 可, 差}\} = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 。

步骤 3 对单因素进行模糊评价, 得到隶属度矩阵, 将因素集 U 中第 i 个元素隶属于评价集中元素的隶属值组成集合 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij})$, 隶属度矩阵为: $R_{n \times j} = (R_1, R_2, \dots, R_n)^T$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nj} \end{bmatrix}$$

步骤 4 计算各因素的权值, 得出权向量, 采用可拓层次分析法计算出各因素的权值。

步骤 5 模糊综合评价, 由权重集和隶属度矩阵进行合成运算可得模糊评价矩阵, 第二层次的一级评价结果作为第一层次的隶属度矩阵再次进行合成运算。

3 基于 DHNN 的评价模型构建

鉴于 Hopfield 神经网络具有类人类的联想记忆功能, 其可以保证全局最优并存储某些通用模式, 在输入模式未知时, 寻找最相似的模式, 适合应用于等级分类^[14]。本文建立基于离散型 Hopfield 神经网络的有人机/无人机协同作战等级分类评价

模型。

3.1 离散型 Hopfield 神经网络

离散型 Hopfield 神经网络是一种全连接型的单层反馈网络, 输出值为 1 或 -1, 分别表示神经元处于激活或抑制状态。

离散型 Hopfield 神经网络的计算公式如下:

$$u_j = \sum_i w_{ij} y_i + x_j \quad (6)$$

$$\begin{cases} y_j = 1, u_j \geq \theta_j \\ y_j = -1, u_j < \theta_j \end{cases} \quad (7)$$

公式 (6)、(7) 中 w_{ij} 为连接权值, y_j 为输出值, x_j 为外部输入, θ_j 为阈值。

离散型 Hopfield 神经网络的状态为当前时刻各个节点输出的集合, 若网络有 n 个输出, $y_j(t)$ 表示节点 j 在 t 时刻输出, 则网络在 t 时刻的状态为:

$$Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]^T \quad (8)$$

3.2 算例分析及仿真验证

有人机/无人机协同作战效能等级分为优、良、中、可、差, 依次对应为 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级, 将这五个等级作为离散型 Hopfield 神经网络的平衡点。Hopfield 神经网络学习过程中, 典型等级的样本指标数据趋近于其平衡点。学习完成后, 平衡点存储各典型分类等级的指标。当输入待分类评价的指标值时, Hopfield 神经网络利用其联想记忆功能可以快速的趋近于某个平衡点, 当网络处于平衡稳定状态时, 此时的平衡点即为求解的分类等级。模型设计流程图如图 2 所示。

以我单位的科研数据为基础, 应用可拓层次分析法和模糊评判法进行等级分类, 将各等级的指标数据平均化, 即作为理想的评价指标值, 将图 2 所示体系结构的第二层指标作为评价指标, 理想的评价指标值见表 1。

离散型 Hopfield 神经网络的处于平衡状态时, 其输出只有 1 和 -1 两个值, 所以需要将理想的等级样本数据编码, 当指标值大于或等于某一等级指标数值时, 输出为 1, 否则为 -1。理想等级样本指标

数据编码如图 3 所示, 从左到右, 分别对应作战效能等级为 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级, 图中●表示神经元状态为激活状态, 即值为 1, ○表示神经元状态为抑制状态, 即值为-1。

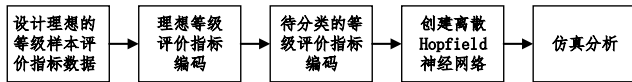


图 2 模型设计流程图

Fig.2 Flow chart of model design



图 3 理想等级样本指标数据编码

Fig.3 Coding result of ideal sample index data

将表 2 中的有待评价的指标数据进行编码, 编码结果如图 4 所示。随后在 MATLAB 中创建离散型 Hopfield 神经网络, 将待评价的指标编码值作为输入, 如上所述, 经过一段时间的训练, Hopfield 神

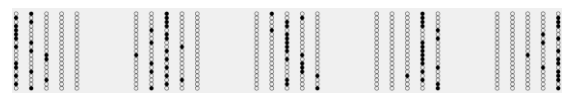


图 4 有待评价的指标数据进行编码

Fig.4 Coding result of index data to be evaluated



图 5 仿真结果

Fig.5 Simulation results

经网络会在特定的平衡点静止, 得出仿真结果如图 5 所示。仿真结果显示, 表 2 所示的 5 个评估对象的评估等级分别为 I 级、III 级、III 级、IV 级、V 级, 与科研人员使用可拓层次分析法和模糊评判法得出的结果一致, 即所构建的基于 DHNN 的评价模型可对有人机/无人机协同作战效能进行客观、准确、快速的等级分类及评估。

表 1 理想的评价指标值

Table 1 Ideal index value for evaluation

指标等级	U1				U2				U3				U4				U5			
	U11	U12	U21	U22	U23	U24	U25	U31	U32	U33	U41	U42	U43	U44	U45	U51	U52	U53	U54	
I	98	95	97	92	96	91	90	95	94	97	93	90	98	96	95	91	93	90	95	
II	82	86	85	82	79	84	81	83	85	87	83	84	78	80	81	86	84	88	80	
III	65	70	68	67	69	62	64	65	63	62	68	63	68	66	62	63	65	68	63	
IV	50	48	52	56	48	46	47	52	56	52	53	55	52	53	54	56	54	53	52	
V	26	28	31	21	33	31	28	26	24	19	23	24	35	34	36	29	30	27	32	

表 2 有待评价的指标数据

Table 2 Indicator data to be evaluated

指标 序号	U1		U2					U3			U4					U5			
	U11	U12	U21	U22	U23	U24	U25	U31	U32	U33	U41	U42	U43	U44	U45	U51	U52	U53	U54
1	93	98	96	96	98	96	91	90	98	91	81	79	99	96	91	92	80	95	92
2	79	84	81	70	85	81	69	84	60	78	93	76	87	78	86	70	62	84	89
3	89	60	74	75	81	76	78	74	65	68	63	65	67	60	56	50	78	84	36
4	58	49	63	57	36	29	36	56	60	61	65	60	60	49	60	65	56	49	50
5	25	30	36	41	30	50	46	63	23	48	79	36	46	56	40	31	43	26	38

4 总结

本文以 OODA 务回路为基础, 结合影响有人机/无人机协同作战效能的因素, 提出一种范围广、易扩展的指标体系, 该指标体系旨在强调影响协同作战效能的关键因素, 当作战模式和影响协同作战的技术发生改变时, 可在本文建立的指标体系的基础上做出改变。同时, 首次提出将可拓层次分析法、模糊综合评判法和 Hopfield 神经网络综合应用有人机/无人机协同作战效能评估, 建立基于 DHNN 的

协同作战效能评估模型, 仿真结果表明所建模型在有人机/无人机协同作战效能评估中是客观有效的, 所建模型可在有人机/无人机协同作战能力生成方面的研究得到应用。

参考文献

- [1] FAN J R, LI D G and LI R P, Research on mission planning for MAV/UAV cooperative combat[C]//2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), Beijing, China, 2019: 548-553
- [2] FAN B, LI Y, ZHANG R, et al. Review on the technological development and application of UAV systems[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29(2):

- 199-207.
- [3]李文,陈建. 有人机/无人机混合编队协同作战研究综述与展望[J]. 航天控制, 2017. 35(3): 90-96.
- [4] ZHONG Y, YAO P Y, ZHANG J Y, et al. Formation and adjustment of manned/unmanned combat aerial vehicle cooperative engagement system[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018,29(4):756-767.
- [5]王新尧.基于 DoDAF 的有人/无人机协同作战体系结构建模[J]. 系统工程与电子技术, 2020: 1-12.
- [6] Fan J, Li D, Li R. Evaluation of MAV/UAV collaborative combat capability based on network structure[J]. International Journal of Aerospace Engineering,2018, 2018:1-12.
- [7]杨昌发.基于威胁的有人机/无人机协同作战效能评估[C]. 广东:中国航空学会.第八届中国航空学会青年科技论坛. 2018:717-722.
- [8]董彦非,崔巍,张旺. 有人机/无人机协同空战效能评估的综合指数模型[J]. 飞行力学, 2014. 32(5): 472-476.
- [9]张明智,马力.体系对抗 OODA 循环鲁棒性建模及仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2017. 29(9): 1968-1976.
- [10]丰雨轩,刘树光,解武杰等. 基于改进 Hopfield 网络的对地攻击型无人机自主能力评价[J]. 北京航空航天大学学报: 1-12.
- [11]王娜娜,刘巍,高红.基于可拓层次分析法求解最佳生成树[J]. 计算机应用, 2020. 40(S1): 132-135.
- [12] YANG W F, ZHENG Z H, ZHANG X Q, et al. Analysis of landslide risk based on fuzzy extension analytic hierarchy process. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems [J], 2017,33(4): 2523-2531.
- [13] LV C, WU Z Z, LIU Z G, et al. The multi-level comprehensive safety evaluation for chemical production instalment based on the method that combines grey-clustering and EAHP. International Journal of Disaster Risk Reduction [J], 2017,21: 243-250.
- [14] GAN J, IEEE. Discrete Hopfield neural network approach for crane safety evaluation[C]//2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering. New York:Ieee,2017:40-43.