

北京航空航天大学学报

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics

ISSN 1001-5965, CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目: 基于改进 Hopfield 网络的对地攻击型无人机自主能力评价
作者: 丰雨轩, 刘树光, 解武杰, 茹乐
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0040
收稿日期: 2020-02-12
网络首发日期: 2020-05-26
引用格式: 丰雨轩, 刘树光, 解武杰, 茹乐. 基于改进 Hopfield 网络的对地攻击型无人机自主能力评价. 北京航空航天大学学报.
<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0040>



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。

基于改进 Hopfield 网络的对地攻击型无人机自主能力评价

丰雨轩¹, 刘树光^{1*}, 解武杰², 茹乐¹

(1. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 西安 710051; 2. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710051)

*通信作者 刘树光, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向: 从事自适应控制、飞行控制等研究。E-mail: dawnny418@126.com

摘要 对地攻击型无人机是当前最先进的无人装备之一。无人机“机上无人, 人在地面”, 决定了无人机必须具备很高的自主能力, 自主能力成为无人机的典型作战能力。针对对地攻击型无人机的自主能力量化评价问题, 从感知能力、决策能力、行为能力和安全能力四个方面, 并侧重机载装备参数分析, 提出了一套完整的自主能力评价指标体系。结合模型因素库, 运用奇异值分解设计 Hopfield 神经网络权值矩阵, 利用基于稀疏度的权值删减算法改进网络结构。最后, 构建自主能力评价标准, 对对地攻击型无人机系统自主能力进行量化分级。仿真结果表明, 相对于传统 Hopfield 网络, 改进算法能够在一定范围内删除非关键的连接权值, 降低网络复杂度, 工程上更容易实现对无人机系统自主能力的量化评价。

关键词 对地攻击型无人机; 自主能力; 综合评价; 改进 Hopfield 网络

中图分类号 V271.4

文献标志码 A

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0040

Autonomous Capability Evaluation of Ground-attack UAV Based on Improved Hopfield Network

FENG Yuxuan¹, LIU Shuguang^{1,*}, XIE Wujie², RU Le¹

(1. Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Aeronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

*E-mail: dawnny418@126.com

Abstract The ground-attack unmanned aerial vehicle (UAV) has been one of the most state-of-the-art unmanned equipments, which requires a high degree of autonomous capability. Autonomous capability is a typical operational ability of UAV. In view of the quantitative evaluation of autonomous capability for ground-attack UAV, this paper proposes a detailed evaluation index system of autonomous capability from four aspects of observation capability, decision capability, action capability and security capability, and places emphasis on the analysis of airborne equipment parameters. Combined with the model factor library, the weight matrix of Hopfield neural network is designed by singular value decomposition, and based on sparsity, the weight reduction algorithm is introduced to improve the network structure. Finally, the evaluation criterion of autonomy is established to quantify and grade the autonomous capability for ground-attack UAV system. The simulation results show that, compared with traditional Hopfield network, the improved algorithm could delete the unimportant connection weights within a certain range, reduce the network complexity, and easily achieve quantitative evaluation of the autonomous capability of the UAV system.

Key words Ground-attack UAV; Autonomous capability; Comprehensive evaluation; Improved Hopfield network

收稿日期: 2020-02-12

基金项目: 装备预研项目 (项目号 41411xxxx04)

作者简介: 丰雨轩, 男, 硕士研究生。主要研究方向: 智能数据处理。解武杰, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向: 飞行控制与仿真的研究。茹乐, 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 抗干扰通信、航空电子信息及其智能化。

Fund: Equipment Pre Research Project (41411xxxx04)

网络首发时间: 2020-05-26 17:08:33 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.v.20200526.0943.001.html>

对地攻击型无人机遂行地面目标的精确打击任务,其机上无人、复杂任务以及高对抗战场环境决定了无人机必须具备很高的自主能力^[1],自主能力成为对地攻击型无人机的典型作战能力。面对复杂战场环境和对抗作战任务,科学构建对地攻击型无人机自主能力评价指标体系,提出适合其技术特征和作战使用特点的自主能力评价方法,提升无人机体系化作战效能,具有迫切的军事需求。

评价指标体系和综合评价方法是对地攻击型无人机自主能力量化评价的关键。定性分析是定量分析的基础,目前国内外有关无人系统的评价指标体系构建主要基于定性定量相结合的方式,集中在功能性指标和任务型指标两个层次上。功能性指标方面,文献[2]针对无人机的自主能力评价提出了二维度和四维度评价模型;文献[3]基于模型化分类原则构建了高空长航时无人机系统总体方案的评价准则。任务型指标方面,文献[4]根据设定任务的完成程度来评价单项关键技术,减少了人为主观因素对评价指标的影响。针对无人系统的综合评价方法主要有模糊综合评价法^[5],贝叶斯网络^[6],有效性分析(SEA)方法^[7]等,传统的综合评价方法受主观因素影响大且不适用于复杂系统。Hopfield神经网络通过模拟生物神经网络的记忆机理,具有强大的联想记忆能力,能够体现复杂系统评价指标的关联关系和对主体对象的客观评价^[8],是量化评价复杂系统的理想方法。

综上所述,本文在分析机载装备系统相关性能参数的基础上,提出一套与作战环节相融合的自主能力评价指标体系,并运用改进型 Hopfield 神经网络综合评价无人机的自主能力,解决了对地攻击型无人机的自主能力量化评价问题,为无人机自主性实时调整及人机权限分配提供有效支撑。

1 自主能力评价指标体系构建与分析

自主能力是无人系统拥有感知、观察、分析、交流、计划、制定决策和行动的能力,完成人类通过人机交互布置给它的任务^[9]。可见,评价对地攻击型无人机系统的自主能力,要融合观察(O)、判断(O)、决策(D)和行动(A)整个作战环节,考察无人机系统在各个环节的自主程度,进而量化评价出整个无人机系统的自主能力。为体现对地攻击型无人机判断、决策一体化,并考虑其安全能力的重要性,本文从感知能力(O)、决策能力(D)、行为能力(A)、安全能力(S)四个方面构建对地攻击型无人机系统的自主能力评价指标。感知能力是决策能力的前提,决策能力是感知能力的目的,行为能力需要感知能力和决策能力的密切配合,安全能力是有效完成任务的重要保障。自主能力评价指标体系如图1所示。

选取合适的机载装备参数作为无人机自主能力评价体系的底层指标。在查找飞机设计手册、无人机设计手册、装备国军标及大量文献基础上,机载装备参数主要从机载装备提供的技术指标中、参考文献的数学模型、说明书的性能要求中选取,按照技术指标的重要程度、数据可收集性、不同型号数据可对比性原则,同时参考适航性要求及装备合格审定相关内容,选取能够代表机载装备性能的装备参数。为了使不同机载装备的参数间具有可比性,采用对数法、加权、幂数运算方式将数据无量纲化;同时利用加法法则,表达底层指标与上级指标的关系。

1.1 感知能力

感知能力是对地攻击型无人机通过自身机载传感器获取内外部环境信息的能力,是无人机实现自主作战的首要考虑因素。由于作战环境的不确定性,无人机必须自主获取天气威胁状况、敌方作战目标相关的信息,为下一步自主决策提供实时判断依据。

1.1.1 风切变威胁感知能力

对地攻击型无人机一旦遭遇突发的恶劣气象条件,系统应自主地对恶劣气象进行威胁评估,判断无人机是否可以继续作战。风切变是指风的速度和方向突然改变,是当前无人机失事的主要自然因素^[10]。当风切变威胁度大于某定值时,将触发风切变警告。目前国内外飞机普遍安装有风切变预警系统,能够提前探测风切变信息。因此,用风切变预警系统性能优劣衡量无人机的风切变威胁感知能力 w ,根据文献[11],选取风切变预警系统参数根据航空条例审查内容和不同型号间提供可对比参数,确定为最小探测距离、提前预警时间、漏警率,计算公式为:

$$w = 0.6D_r + \frac{w_t}{60} + \lg(D_a) \quad (1)$$

式中： D_r 为最小探测距离； w_t 为提前预警时间； D_a 为漏警率。

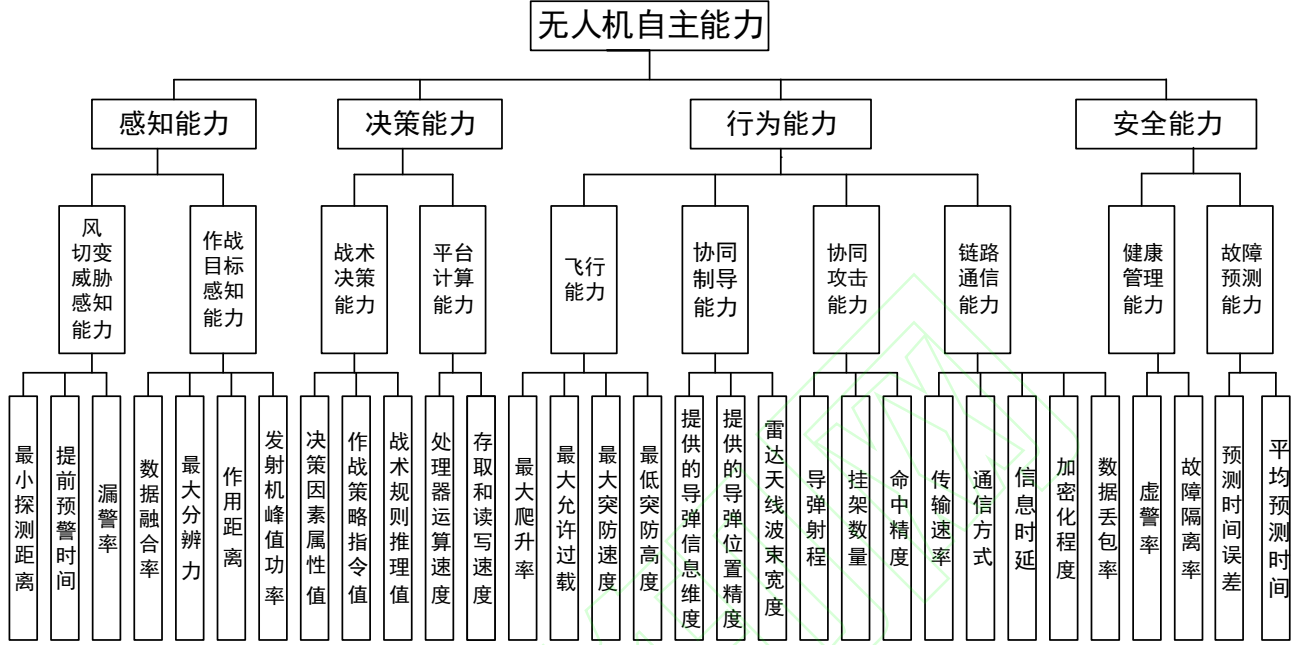


图 1 对地攻击型无人机自主能力评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system for autonomous capabilities of Ground-attack UAV

1.1.2 作战目标感知能力

在无人机搜索阶段，需要精准检测和识别敌方警戒雷达、地空导弹等作战目标。合成孔径雷达(SAR)是目前对地攻击型无人机的标配机载装备，可有效识别伪装物，根据文献[12]得出 SAR 雷达在不同波段，其三个主要参数最大分辨率、作用距离、发射机峰值功率会连续可变，因此，用于衡量 SAR 雷达装备性能。同时，考虑多个传感器间数据融合的重要性，为使无人机获得更全面可靠的感知信息，根据文献[13]，通过计算融合前后数据的不确定度来衡量评价数据融合能力。因此，作战目标感知能力 K 用 SAR 雷达的性能和数据融合率 R 进行综合计算，计算公式为：

$$\begin{cases} K = P^{0.065} + 0.02L_s + \frac{\sqrt{(R_p)}}{10} + \frac{R}{100} \\ R = H(E_2) / H(E_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中： R_p 为 SAR 的最大分辨率(距离与方位的分辨率乘积)； L_s 为作用距离； P 为发射机峰值功率； $H(E)$ 为数据融合不确定性测度； E_1 为数据融合前的确定集， E_2 为数据融合后的特征确定集。

1.2 决策能力

自主决策系统是对地攻击型无人机系统的核心，其有效性直接决定着人机交互程度。决策推理机依据当前感知的战场信息和记忆单元存储的作战经验知识、地图信息等提出最优的战术，其决策结果直接用于辅助控制平台对无人机行为进行调整；并且，系统的决策速度快慢会影响无人机行为的滞后性，因此我们要考虑无人机平台的计算性能。

1.2.1 战术决策能力

对地攻击型无人机的主要任务是摧毁地面高价值目标，根据文献[14]，评估对地攻击型无人机的战术决策能力，主要考虑自主决策系统针对敌方单位的信息储备量（决策因素），依据产生式规则描述作战知识和以往战术经验（作战策略），模仿专家逻辑建立决策层次结构（战术推理）。因此通过

决策因素属性值、作战策略指令值、战术规则推理值三方面表示知识和经验储备量。计算公式为：

$$T_D = (0.3D_F + 0.3T_S + 0.4T_R)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

式中：\$T_D\$ 为战术决策能力；\$D_F\$ 为决策因素属性值，一般包含目标机场、雷达、油量充足等；\$T_S\$ 为作战策略指令值，包含绕后进入、低空突防、交换制导权等；\$T_R\$ 为战术规则推理值，包含武器选择、威胁类型等。

1.2.2 平台计算能力

当特殊情况发生时，无人机实时重规划时间要确保小于辅助控制平台的延迟时间，使其能够针对局势变化进行低延迟快速响应。无人机系统用于算法计算的分模块，一般对主机的运算速度要求较高；用于大型数据库处理的分模块，一般对主机的存取和读写速度要求较高。因此评价平台计算能力 \$B\$ 需要考虑机载计算机系统运算速度、存储器的存取和读写速度两个方面。计算公式为：

$$\begin{cases} P_s = I_{PC} \times F_z \\ B = P_s / 10^5 + 0.1V_s \end{cases} \quad (4)$$

式中：\$P_s\$ 为处理器运算速度；\$F_z\$ 为处理器的工作主频；\$I_{PC}\$ 为每个时钟周期平均执行的指令数；\$V_s\$ 为存储器的存取和读写速度。

1.3 行为能力

行为能力是对地攻击型无人机自主摧毁敌方地面目标的能力。单机模式下的无人机生存率和完成任务率较低，需由基于“单平台”的单机作战模式转向网络化的协同作战模式。评价对地攻击型无人机的行为能力首先考察无人机在作战过程中的飞行性能和数据传输能力，其性能直接决定了无人机的作战能力上限；无人机群组通过协同制导、组网通信，协同攻击地面目标，有效提高整体自主能力。

1.3.1 飞行能力

对地攻击型无人机相较于有人机不受人体生理极限的约束，可以极大地发挥其飞行性能潜力，完成高难度作战任务。根据文献[15、16]建立的对地攻击型无人机机动性能模型和突防模型，对地攻击型无人机飞行能力 \$M\$ 主要考虑最大爬升率、最大允许过载、最大突防速度、最低突防高度关键飞行性能参数，计算公式为：

$$M = \lg(C_{\max}) + \frac{N_{\max}}{9} + \frac{S_{\max}}{1200} + H_{\min}^{-0.05} \quad (5)$$

式中：\$C_{\max}\$ 为最大爬升率；\$N_{\max}\$ 为最大允许过载；\$S_{\max}\$ 为最大突防速度；\$H_{\min}\$ 为最低突防高度。

1.3.2 协同制导能力

协同制导是指当对地攻击型无人机突防成功并发射空地导弹后，若受到敌机拦截无法继续对已发射的空地导弹制导，可以将制导权移交给其它友机，友机通过接收空地导弹的图像、发送指令等信息，操控导弹飞行。用友机获取制导的交接信息评价协同制导能力 \$C_G\$（决策、通信等因素归纳在其他能力中）。根据文献[17]协同制导切换方式内容分析，制导交接需要的信息包括交班平台提供的导弹信息的维度和位置精度，同时要考虑接班平台雷达可以接受信号的范围。计算公式为：

$$C_G = 0.1I_d + I_a^{0.05} + 15\sin\theta \quad (6)$$

式中：\$I_d\$ 表示交班平台向接班平台提供的导弹信息的维度；\$I_a\$ 表示提供的导弹位置的精度；\$\theta\$ 表示接班平台制导雷达天线的波束宽度。

1.3.3 协同攻击能力

协同攻击是指将多个不同位置、不同价值的地面目标分配给不同的火力控制系统，避免进行重复攻击，发挥最大作战效能。协同作战过程中，长机需要了解僚机携带导弹的类型、作战使命、所攻击目标的特征。用无人机的火力配置评价协同攻击能力 \$C_A\$（导弹分配、识别等因素归纳在其他能力中）。根据文献[16]建立的攻击能力模型取值准则，火力配置考虑导弹射程、挂架数量、命中精度三个参

数。计算公式为：

$$C_A = \lg\left(\frac{R_w}{3}\right) + \frac{n_t}{15} + k_a^{0.05} \quad (7)$$

式中： R_w 为无人机搭载导弹的射程； n_t 为无人机的挂架数量； k_a 为导弹的命中精度。

1.3.4 链路通信能力

数据链路是实现多维化联合作战的关键要素，是融合传感器、控制平台、异构平台信息的“纽带”。链路通信能力主要考虑机内数据传输和机外数据共享、机外数据安全监管三个方面^[18]。

数据传输指战时环境下通过数据总线在规定时间内收发信息的能力，根据文献[19]的作战数据保障体系结合通讯系统基本传输要求，考虑传输速率、通信方式、信息时延三个方面。数据共享指不同单元通过联合作战系统交换数据，用数据丢失率评价其性能。数据安全监管是信息化作战中最引人关注的焦点，一旦核心作战信息被敌方窃取，将造成不可估量的后果，加密化程度是其关键。计算公式为：

$$\begin{cases} G = D_{TR} + 0.1S_c + D_i^{-1} + D_l^{-0.1} + S_p \\ S_p = P(D|D') \\ D_l = \lg n_t / n_i \end{cases} \quad (8)$$

式中： G 为链路通信能力； D_{TR} 为传输速率； S_c 为通信方式； D_i 为信息时延； D_l 为数据丢包率； n_i 为平台数据发送量； n_t 为异域平台接受量； S_p 为加密化程度； D 为原始数据记录； D' 为加密后数据记录。

1.4 安全能力

安全能力是对地攻击型无人机实现自主飞行的基本保障。在飞行过程中，无人机需要具备健康管理能力，并借助数据监测和推理，对系统故障进行预测、隔离。健康管理面向“现在”，故障预测面向“未来”。

1.4.1 健康管理能力

健康管理系统通过实时评估无人机的健康状态（传感器失效、剩余寿命、操作极限监控等），确定设备退化程度（故障级别）。根据文献[20- 21]PHM 系统故障检测与故障隔离能力，选取基本检测标尺，评价健康管理能力考虑虚警率和故障隔离率，计算公式为：

$$\begin{cases} R_{FA} = N_{FA} / N \\ H_M = R_{FA}^{-0.65} + R_{Fi}^{0.05} \end{cases} \quad (9)$$

式中： H_M 为健康管理能力； R_{FA} 为虚警率； R_{Fi} 为故障隔离率； N_{FA} 为虚警数，一般分错报和假报两种情况； N 为总的指示报警次数。

1.4.2 故障预测能力

故障预测以大数据为基础，提前预测无人机系统未来的健康状态。如果预测的故障发生时间早于实际产生时间，则说明预测是有意义的。根据文献[21]预测算法计算性能公式，采用预测时间误差和平均预测时间评价故障预测能力 F ，计算公式为：

$$\begin{cases} F_p = n / \sum_{i=1}^n |(x(t) - \hat{x}(t)) / x(t)| \\ M_p = \sum T_i / n \\ F = 10M_p^{-1} + F_p^{0.05} \end{cases} \quad (10)$$

式中： F_p 为预测时间误差； M_p 为平均预测时间； $x(t)$ 为实际失效时间； $\hat{x}(t)$ 为预测失效时间； n 为预测次数； T_i 为第 i 次预测所需时间。

2 建立改进 Hopfield 神经网络评价模型

本节考虑机载数据对自主能力评价的影响, 依托自主能力评价指标体系, 建立改进 Hopfield 神经网络评价模型。通过 Hopfield 神经网络的学习过程将样本指标逼近标准理想等级, 运用联想记忆功能实现自主能力量化评价, 完成无人机系统自主能力从底层数据到智能化结果的评估。对地攻击型无人机系统自主能力评价流程如图 2 所示, 具体分为以下六个步骤: 选取评价指标→数据预处理→建立等级划分标准→创建 Hopfield 神经网络→仿真验证→无人机自主等级确定。

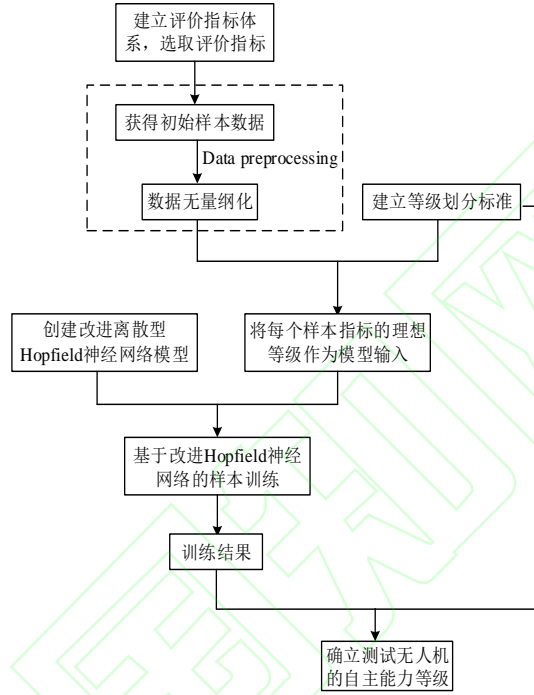


图 2 自主能力评价的总体流程图
Fig.2 Overall flow chart of Autonomous Capability Evaluation

2.1 Hopfield 网络基本原理

离散 Hopfield(DHNN)是一种单层全连接反馈型神经网络, 通过模拟生物神经的记忆机理实现联想记忆功能。它从初始状态向“能量”减小方向演化, 保证了局部极小收敛, 当“能量”达到最小值时网络稳定。

差分演化方程(串行工作方式)为

$$u_j(t) = \sum_{i=1}^n w_{ij} y_i(t) + b_i \quad (11)$$

$$y_j(t+1) = \text{sgn}[u_j(t)] = \begin{cases} 1 & u_j(t) \geq \theta_j \\ -1 & u_j(t) < \theta_j \end{cases}$$

离散 Hopfield 神经元为二值神经元, 本文取 -1 和 1 分别代表神经元的激活和抑制状态 $[y_1, y_2, \dots, y_n]$, 当输出 $[u_1, u_2, \dots, u_n]$ 大于阈值 $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ 时, 经阈值函数 sgn 处理后输出 1, 反之输出 -1。

2.2 创建改进 Hopfield 神经网络模型

对地攻击型无人机系统自主能力评价模型指标数量多, Hopfield 网络评价方法适用于复杂系统, 其指标权值按一定的学习规则事先计算出来。为克服权值交叉干扰问题, 本文采用奇异值分解设计方法; 同时考虑 Hopfield 为全连接网络, 为了降低网络复杂度, 便于工程上设计神经电路, 采用基于稀疏度的结构优化算法减少权值连接数量。

2.2.1 确立理想稳定点

创建 Hopfield 神经网络首先要确定理想稳定点。Hopfield 网络可以记忆特殊的稳定点，当输入样本时，演变过程就是寻找理想稳定点的过程。理想的指标等级是确立理想稳定点的关键，本文根据式 (11)，采用 31 个机载装备性能指标作为 Hopfield 神经网络的训练指标 $y_i(t)$ ，将对地攻击型无人机自主能力指标性能分为五个等级，等级 V 为该装备参数性能最高等级，等级 I 为性能最低等级。依据现有数据库，每个指标选取 200 个数据进行冒泡排序，均分为五个区间，将区间内数据的平均值作为该等级的理想指标值。理想的指标等级划分数据如表 1-表 4。

表1感知能力
Tab.1 Observation capability

指标等级	风切变威胁感知能力(风切变告警系统)				作战目标感知能力(合成孔径雷达)		
	最小探测距离/km	提前预警时间/s	漏警率/%	数据融合率/%	最大分辨率/m	作用距离/km	发射机峰值功率/w
V	6.5	60	1	100	8*8	80	960
IV	5.6	50	3	80	6*6	64	750
III	4.5	35	6	60	4*4	50	600
II	3	25	8	45	3*3	26	320
I	1.2	15	10	25	2*2	18	180

表2决策能力
Tab.2 Decision capability

指标等级	战术决策能力(自主决策专家系统)			平台计算能力(主处理运算单元)	
	决策因素属性值	作战策略指令值	战术规则推理值	处理器运算速度	存取和读写速度GB/s
V	50	29	23	600	25
IV	45	22	18	200	18
III	39	18	14	50	10
II	32	12	11	30	3.2
I	25	8	9	20	1.6

表3-(1)行为能力
Tab.3-(1) Action capability

指标等级	飞行能力(飞行数据记录器)				协同制导能力(空地导弹与制导雷达)		
	最大爬升率 m/s	最大允许过 载/g	最大突防速度 km/h	最低突防高 度/m	提供的导弹 信息维度	提供的导弹位置 精度/%	制导雷达天线波束 宽度/°
V	350	9	1480	200	12	95	2
IV	310	7.5	1390	540	10	92	1.5
III	246	5.4	1080	720	8	88	0.92
II	148	4	900	900	6	84	0.57
I	85	3.2	720	1000	3	80	0.32

表3-(2)行为能力
Tab.3-(2) Action capability

指标等级	协同攻击能力(航空火力控制系统)				链路通信能力(数据总线通讯系统)			
	武器射程/km	挂架数量	武器精度/%	传输速率Mbit/s	通信方式	信息时延/ms	加密化程度	数据丢包率
V	3000	16	98	3	8	5	1	0.2
IV	2500	14	95	2	6	18	0.8	2.2
III	1000	10	92	1.5	5	30	0.6	5
II	750	8	90	1	2	50	0.3	8.3
I	120	4	85	0.5	1	100	0.1	10

表4安全能力
Tab.4 Security capability

指标等级	健康管理能力(中央维修监测系统)		故障预测能力(中央维修监测系统)	
	虚警率	故障隔离率	预测时间误差	平均预测时间
V	0.5	100	0.5	10
IV	2	97	1.1	30
III	3.5	93.9	2.5	52
II	5	87.1	3.9	86
I	8	85	5	100

2.2.2 基于奇异值分解的权值规则设计

为了克服交叉干扰问题,采用奇异值分解方法设置权值矩阵。设给定 m 个样本向量 $\mathbf{x}^{(k)} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 组成 $n \times (m-1)$ 阶矩阵: $\bar{\mathbf{Y}} = [\mathbf{x}^{(1)} - \mathbf{x}^{(m)}, \mathbf{x}^{(2)} - \mathbf{x}^{(m)}, \dots, \mathbf{x}^{(m-1)} - \mathbf{x}^{(m)}]$, 对 $\bar{\mathbf{Y}}$ 进行奇异值分解:

$$\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{U} \mathbf{\Gamma} \mathbf{V}^T \quad (12)$$

式中: $\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$,

$\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n)$ 为 $\bar{\mathbf{Y}}$ 的奇异矩阵, $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$ 为非零奇异值。对称权值矩阵 \mathbf{W} 为

$$\mathbf{W} = \sum_{k=1}^r \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^T$$

2.2.3 基于稀疏度的网络结构优化算法

无人机系统自主能力评价指标数量多,网络结构过于复杂。为优化 Hopfield 结构,解决全连接网络资源消耗大、工程难以实现的问题^[22],采用基于稀疏度的权值删减算法,当网络进行记忆时,在一定范围内删除非关键权值。由于经奇异值分解设计后的权值矩阵是对称的,故删除 w_{ij} 同时也要删除 w_{ji} 。定义网络神经元个数 n , 删除权值连接数为 $2m$, 则稀疏度 τ :

$$\tau = 2m/n^2 \quad (13)$$

设定稀疏度参数为 $\Gamma (0 < \Gamma < 1)$, 求出需要删减的权值连接数 $2m$, 权值重要程度 $\varphi(w_{ij})$

$$\varphi(w_{ij}) = \frac{|w_{ij}|}{\max |w_{ij}| - \min |w_{ij}|} \quad (14)$$

根据权值的重要程度从小到大冒泡排序, 设第 $2m$ 个权值重要程度为 $\varphi_\tau(w_{ij})$, 则

$$w_{ij} = \begin{cases} w_{ij} & \varphi(w_{ij}) > \varphi_\tau(w_{ij}) \\ w_{ji} = 0 & \varphi(w_{ij}) \leq \varphi_\tau(w_{ij}) \end{cases}$$

综上,改进的 Hopfield 神经网络结构如图 3 所示,红色虚线为删除的连接权值。

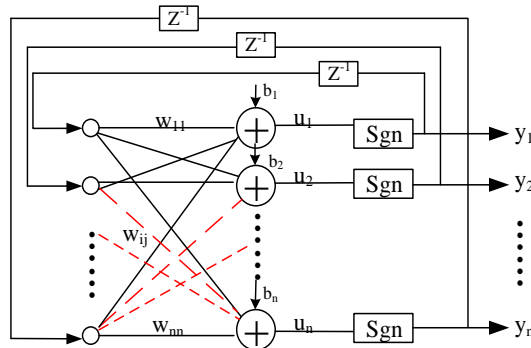


图3 改进的网络结构
Fig.3 Improved network structure

3 自主能力综合评价仿真

3.1 自主能力等级划分标准

尽管美国早期定义了多种自主控制水平等级，如 ACL、ALFUS、人机权限模型等^[1]，但这些标准仅通过单一功能划分自主等级且缺乏具体的定量度量指标，难以准确定义整个无人机系统的自主能力。因此，本文考虑无人机从单机执行预计划任务到集群全自主的整体递进过程，并结合 ODAS(感知、决策、行为、安全)评价因素，将对地攻击型无人机自主能力划分标准细分为五类，并参考文献[23]，将每个等级的自主能力具体内容映射到各个能力中。自主能力等级划分标准如表 5 所示，从单机执行简单计划任务→单机执行复杂计划任务→单机实时规划任务→多机协作→集群合作，体现由单机到集群，任务复杂度逐渐增加，人机交互程度逐渐减少的趋势。

表5自主能力等级划分标准
Tab.5 Criteria for the level of autonomous capabilities

级别	感知能力	决策能力	行为能力	安全能力
V	集群互助感知	集群互助决策	集群协助攻击	预测故障并隔离
IV	复杂环境自主追踪	长机分配战术规划	多机协助攻击	预测故障发生
III	机外数据辅助感知	机外重新规划上传	及时规避部分威胁	补偿大多数故障
II	天气威胁感知	数据库调整决策	单机攻击并毁伤评估	实时健康诊断
I	针对性感知地面目标	执行预编程的决策	单机对地攻击	状态报告

3.2 仿真验证与对比

稀疏度的不同影响网络的记忆恢复特性，定义网络的性能函数^[24]为

$$\Psi(y) = (\sum_{i=1}^n yy^*) / n \tag{15}$$

式中： n 为神经元个数， $y=[y_1,y_2,...y_n]$ 为最终输出， $y^*=[y^*_1,y^*_2,...y^*_n]$ 为期望输出。实验通过改变设定的稀疏度求出对应的删除权值数量，网络性能随删除权值的性能表现如图 4 所示，当删除的权值数量小于 34 时，网络的性能保持不变，当删除的权值数量大于 34 时，网络性能随稀疏度增加而不断下降。

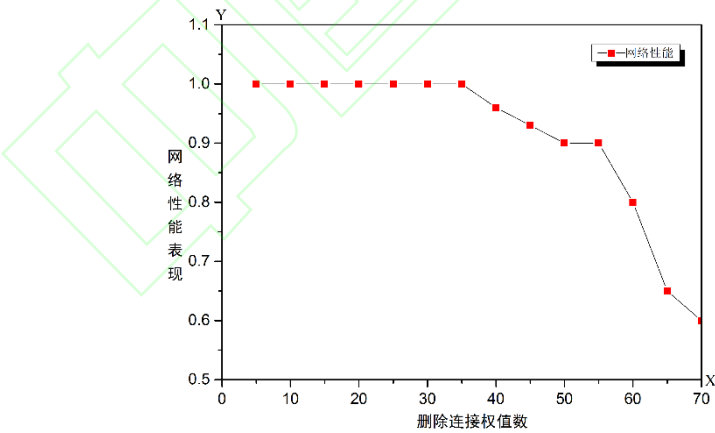


图 4 改进网络的性能表现
Fig.4 Improved network performance

将 Z 轴定义自主能力级别，Y 轴定义为机载参数指标排序，添加 X 轴使样本更可观，实验选取某三型对地攻击型无人机机载设备数据，作为测试样本带入训练好的 Hopfield 神经网络评估模型中。测试样本的指标编码和评价结果如图 5 和图 6 所示。

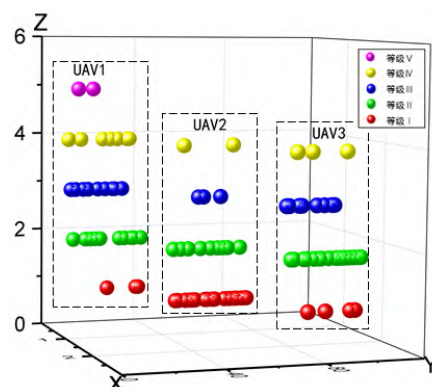


图 5 测试样本的指标编码
Fig.5 Index coding of test samples

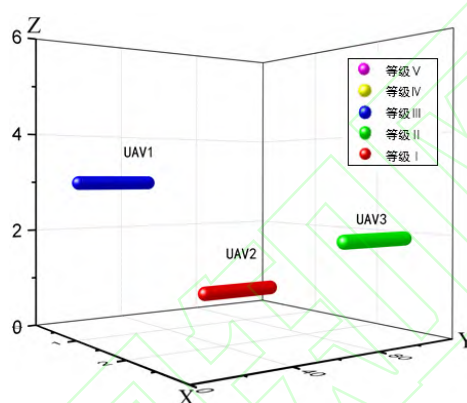


图 6 评价仿真结果
Fig.6 Simulation results of evaluation

评价仿真结果如图 6 所示, 仿真结果表明, UAV1 的自主能力为等级 III, 属于现有无人机高端机型, 可动态调整作战任务, 未来重点发展方向是多机协作和如何预测隔离故障; UAV2 的自主能力为等级 I, 属于现有低端机型, 发展方向为可在复杂环境下作战; UAV3 的自主能力为等级 II, 发展方向为可实时规划任务。连接权值以一定的稀疏度被删除, 网络仍保持健壮性并不断调整, 为工程实现节省了运算资源, 但当删除的权值数量大于一定数值时会使网络性能大幅下降。可见, 与奇异值分解结合显著提高了模型记忆和联想能力, 实现了更加合理的评价无人机系统的自主能力。

4 总结

建立科学的指标体系是对地攻击型无人机自主能力量化评价的基础, 本文从实际装备角度出发, 基于大量的机载装备数据, 构建了改进离散型 Hopfield 神经网络评价模型。仿真结果表明:

1) Hopfield 神经网络模型在高噪信比情况下仍具有很高的联想成功率, 可以准确划分对地攻击型无人机的自主能力等级,

2) 改进算法使 Hopfield 神经网络具有类似生物神经网络的稀疏结构, 节省了神经电路设计成本。

研究结果对当前对地攻击型无人机自主能力评价研究具有一定的参考应用价值。

致谢 感谢刘老师的悉心指导, 感谢解老师和茹老师对文章细节方面的把关。感谢北航学报的编辑部和评审专家。

参考文献 (References)

- [1] 刘树光, 茹乐, 王柯. 无人机自主性评价方法新进展[J]. 飞航导弹, 2019 (2): 43-49.
Liu S G, Ru L, Wang K. New progress in autonomous evaluation methods of UAV[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(2):43-49. (in Chinese)
- [2] 王新星. 无人平台自主能力分级模型研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.

- Wang X X.Study on model for autonomy level of unmanned platforms[D].Shenyang:Shenyang Aerospace University,2012.(in Chinese)
- [3] 张毅. 高空长航时无人机总体方案评价准则方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- Zhang Y.Study on evaluation criterion method of overall program of high altitude long endurance UAV[D].Xian: Northwestern Polytechnical University,2006.(in Chinese)
- [4] 史辉, 刘向前. 地面无人平台在典型战场环境中的自主机动性能评价研究[J]. 兵工学报, 2014, 35 (S1): 17-24.
- Shi H,Liu X Q.Assessment method for autonomous mobility of UGV in a typical battlefield environment[J].Acta Armamentarii, 2014, 35 (S1):17-24.(in Chinese)
- [5] Sun Y,Tao G,Xiong G,et al.The FUZZY-AHP evaluation method for unmanned ground vehicle[J].Applied Mathematics&Information Sciences,2013,7(2):653-658.
- [6] Li D,Liu T,Cao T,et al.The risk assessment for unmanned vehicle using bayesian network [C]// International Conference on Geoinformatics in Resource Management & Sustainable Ecosystems. Singapore: Springer,2016:200-207.
- [7] 蔡金煌, 王晓薇, 叶博. 远程支援干扰下搜索雷达探测效能评估[J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (21): 5163-5167.
- Cai J H,Wang X W,Ye B.Evaluation of detection effectiveness of search radar under remote support jamming[J].Science Technology and Engineering,2012,12(21):5163-5167.(in Chinese)
- [8] 刘胜, 刘娜, 杨育, 等. 危险源安全评价的离散 Hopfield 神经网络[J]. 重庆大学学报, 2013, 36 (4): 26-32.
- Liu S,Liu N,Yang Y,et al.safety evaluation of hazards based on discrete Hopfield neural network [J].Journal of Chongqing University, 2013,36(4):26-32.(in Chinese)
- [9] Clough B.Metrics,schmetrics! how do you track a UAV's autonomy ? [C]//AIAA's 1st Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicles.Portsmouth,Virginia,US:AIAA,2002.
- [10] 董卓宁, 张汝麟, 陈宗基. 无人机在恶劣气象条件下的自主决策技术[J]. 航空学报, 2008, 29 (S1): 107-113.
- Dong Z N,Zhang R N,Cheng Z J.autonomous decision-making technique of UAVs under hazardous weather condition [J].Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica,2008,29(S1):107-113.(in Chinese)
- [11] 胡朝江, 李晓冲, 袁有志. 大飞机风切变探测告警系统[J]. 中国民航大学学报, 2008 (5): 23-25.
- Hu C J,Li X C,Yuan Y Z.Airborne wind shear detection and warning system on large transport[J].Journal of Civil Aviation University of China,2008(5):23-25. (in Chinese)
- [12] 曲长文, 何友, 龚沈光. 机载 SAR 发展概况[J]. 现代雷达, 2002 (1): 3-12.
- Qu C W,He Y,Gong S G.A Survey of airborne SAR development[J]. Modern Radar,2002(1):3-12. (in Chinese)
- [13] 王洁. 多传感器数据融合及其综合性能评估[D]. 江苏: 南京理工大学, 2008.
- Wang J.Multi-sensor data fusion and comprehensive performance [D].Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology,2008. (in Chinese)
- [14] 张磊. 无人作战飞机自主决策技术研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25 (5): 49-53.
- Zhang L. Research on autonomous decision making technology of UCAV[J].Aeronautical Science&Technology,2014,25(5):49-53. (in Chinese)
- [15] 王亮, 李仁府, 孙悦. 飞翼无人机气动布局及飞行性能计算分析[J]. 中国设备工程, 2017 (3): 153-154.
- Wang L,Li R F,Sun Y. Aerodynamic layout and flight performance analysis of flying wing UAV[J].China Plant Engineering, 2017(3): 153-154. (in Chinese)
- [16] 屈高敏. 对地攻击型无人机作战效能评估与软件开发[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- Qu G M.The research of UCAV effectiveness assessment and software development[D]. Nanchang :Nanchang Hangkong University,2015. (in Chinese)
- [17] 刁兴华, 方洋旺, 张磊, et al. 中远程空空导弹多机协同中制导交接方法[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36 (3): 77-82.
- Diao X H,Fang Y W,Zhang L ,et al.Method of guidance handover in midcourse guidance phase of air-to-air missile about cooperative multi-platform[J].Journla of National University of Defense Technology,2014,36(3):77-82.(in Chinese)
- [18] 刘亭, 姜忠龙. 舰载作战系统信息传输能力评价指标研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35 (6): 30-32.
- Liu T ,Jiang Z L.A Study of the evaluation Index system on the information transmitting ability of theshipboard combat system [J].Ship Electronic Engineering,2015,35(6):30-32.(in Chinese)
- [19] 张耀鸿, 叶培春. 面向任务的作战数据保障能力评估方法与工具[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37 (3): 136-138.
- Zhang Y H,Ye P C.Tool and method of task-oriented operational data guarantee capability evaluation[J].Fire Control & Command Control, 2012,37(3):136-138.(in Chinese)
- [20] 崔嘉, 贺静, 刘奇, 白杰, 等. 无人机 PHM 系统体系结构设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6): 133-135.
- Cui J ,He J,Liu Q.et al.Research on the architecture design of UAV PHM system[J].Computer Measurement &Control ,2016,24(6): 133 -135. (in Chinese)
- [21] 李璠, 蒋觉义. PHM 系统验证指标研究[J]. 航空标准化与质量, 2013 (2): 36-40.
- Li P,Jiang J Y.Research on verification index of PHM system[J].Aeronautic Standardization&Quality,2013(2):36-40.(in Chinese)
- [22] 郑鹏升. Hopfield 神经网络动力学分析与应用[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- Zheng P S.Dynamic analysis of hopfield neural networks and applications[D].Tianjin:Tianjin University,2010.(in Chinese)
- [23] Clough B T.Metrics,schmetrics! how the heck do you determine a UAV's autonomy anyway[J].Security,2002,990:313-319.
- [24] Oshima H O,dagaki T.Storage capacity and retrieval time of small-world neural networks[J]. Physical Review E,2007,76(3): 036114.
- [25] Aonishi T,Komatsu Y,Kurata K.Self-consistent signal-to-noise analysis of Hopfield model with unit replacement[J].Neural Networks,2010,23(10):1180-1186.
- [26] Date A,Kurata K.A property of neural network of associative memory with replacing units[J].Artificial Life and Robotics,2008, 12(1):291-294
- [27] Mica R E.Autonomous horizons:system autonomy in the air force—a path to the future[R].Washington,DC,US:United States Air Force Office of the Chief Scientist,2015.
- [28] Insarov W V,Sebriakov G G,et al.Autonomous unmanned aerial vehicles control system intel-lectualization[J].Procedia Computer Science,2019,150:376-380.
- [29] Insaurralde C C,Lane D M .Metric assessment of autonomous capabilities in unmanned maritime vehicles[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2014,30(3):41-48.
- [30] Mostafa S A,Ahmad M S,Mustapha A.Adjustable autonomy: a systematic literature review[J].Artificial Intelligence Review, 2019, 51:149-

186.

- [31] Qi M T. Evaluation of scientific research ability in colleges and universities based on discrete Hopfield neural network[J]. Academic Journal of Computing & Information Science, 2019,2(3):1-8.
- [32] Rødseth Ø J. Defining ship autonomy by characteristic factors[C] //International Conference on Maritime Autonomous Surface Ships. Busan, Korea: SINTEF Academic Press, 2019:19-26.
- [33] Morris R, Chakrabarty A. Addressing autonomy in conceptual design[J]. AI Magazine, 2019,40(2):3-16
- [34] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册 4: 军用飞机总体设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.
Total editorial board of aircraft design manual. Aircraft design manual 4: Overall design of military aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [35] 陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. 航空学报, 2011, 32 (6) : 1075-1083.
CHENG Z J, WEI J Z, WANG Y X, et al. UAV autonomous control levels and systems structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(6):1075-1083. (in Chinese)

