

doi: 10.7690/bgzd.2023.07.003

空战模拟训练智能化研究

郭亚楠^{1,2}, 曹小群², 任燕³, 张源原¹, 路欢¹, 黄国辉¹, 彭柯澄²(1. 海军航空大学教练机模拟训练中心, 辽宁 葫芦岛 125001; 2. 国防科技大学计算机学院, 长沙 410073;
3. 中国人民解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125003)

摘要: 为应对现代战争智能化的新挑战、赢得空中作战优势, 在空战模拟训练中进行人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术的应用研究。将空战中的人工智能关键技术作为切入点, 阐述空战模拟训练中智能算法的优势及适用性; 立足当前空战模拟训练需求以及人工智能应用中存在的不足, 对空战模拟中的人工智能应用研究趋势进行分析。结果表明, 该研究能对空战模拟训练领域的相关研究人员带来启发。

关键词: 人工智能; 空战; 模拟训练

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Research on Intellectualization of Air Combat Simulation Training

Guo Ya'nan^{1,2}, Cao Xiaoqun², Ren Yan³, Zhang Yuanyuan¹, Lu Huan¹, Huang Guohui¹, Peng Kecheng²(1. *Simulation and Training Center, Naval Aviation University, Huludao 125001, China;*
2. *College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;*
3. *No. 92493 Unit of PLA, Huludao 125003, China*)

Abstract: In order to meet the new challenge of modern war intelligence and win the air combat advantage, the application of artificial intelligence (AI) technology in air combat simulation training is studied. Taking the key technologies of AI in air combat as the starting point, the advantages and applicability of intelligent algorithms in air combat simulation training are expounded. Based on the current air combat simulation training needs and the shortcomings in the application of AI, this paper analyzes the research trend of the application of AI in air combat simulation. The results show that this research can enlighten the relevant researchers in the field of air combat simulation training.

Keywords: artificial intelligence; air combat; simulation training

0 引言

随着计算能力的提升和大数据的出现, 深度学习顺势崛起, 引发了新一轮人工智能 (AI) 研究热潮。目前, 人工智能技术已经在图像识别、目标检测、自然语言处理以及自动驾驶等领域产生了深刻影响, 并且正逐渐向传统领域渗透。在军事领域, 人工智能技术的价值也在逐渐显现, 各军事强国正在加紧现代作战中人工智能技术的应用研究^[1]。在当前联合作战背景下, 空中力量成为了影响战争走向的重要因素; 因此, 智能化空战研究成为了人工智能赋能军事作战的重要研究方向^[2-5]。

近年来, 在战斗力需求的牵引下, 现代空战与人工智能技术的融合速度不断加快, 已经出现了一大批有代表性的研究成果。例如, 空战智能化辅助决策研究中, 基于机器学习算法对飞机战术动作的识别与预测问题进行探索研究, 提出了一系列高效的战术动作识别算法框架, 能够为空战决策提供有

力支撑^[6-8]。在探索新型空战研究中, 基于深度强化学习等智能算法对空战行为进行探索, 通过分析大量的智能空战项目发现, 相关技术和方法在提升战斗力和创新作战模式方面具有广阔前景^[9-11]。美国为保持强大的空战优势, 除了开展人工智能空战算法研究, 更是一直大力推动智能空战的落地实践。近年来, 美国国防部国防高级研究计划局 (defense advanced research projects agency, DARPA) 致力于赋予先进战机自主作战能力, 着眼于近距空战场景, 基于人工智能技术开展了“空战演进” (air combat evolution, ACE) 项目研究^[12], 大大推动了现代空战的智能化进程。

与此同时, 在空战实装训练之外, 空战模拟训练是检验和提升空战水平的重要手段, 尤其是对于战斗机飞行员培养, 模拟训练是提升飞行员作战水平的重要途径。例如, 传统的近距空战技能训练是基于飞行模拟技术进行模拟对抗, 训练过程中需要多名飞行员同时操作多台飞行模拟器进行协同训

收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2023-04-20

作者简介: 郭亚楠 (1995—), 男, 山东人, 硕士, 从事人工智能、作战仿真与评估研究。E-mail: guoyn18@163.com。

练。然而，基于人工智能技术构建智能虚拟对手^[13-14]，用于协助飞行员开展对抗训练，能够大大降低训练成本，避免缺少飞行员陪练所带来的问题，并且丰富了模拟对抗场景。为检验智能陪练的可行性，DARPA 开展了人工智能近距空中格斗项目研究，该项目中人类飞行员与基于深度强化学习的智能体进行对抗，最终结果为智能体获胜，证明了机器学习方法在空战模拟训练领域的巨大潜力。

尽管空战智能化研究已经取得了显著性进展，但仍然面临诸多挑战。首先，以往智能空战研究大多局限于理想环境，而实际的空战环境具有高度的不确定性和各种欺骗性干扰，仿真场景与真实环境有较大的差距。此外，机器学习方法虽然在信息挖掘、最优决策等方面具有显著优势，但距离实现工程落地，仍需要克服诸多挑战，尤其是深度学习模型的不确定性、可解释性、可迁移性以及抗欺骗能力等瓶颈^[15-17]。

为了深入理解空战智能化面临的机遇及挑战，笔者梳理了人工智能在空战对抗中的关键技术，立足空战模拟训练中人工智能应用需求和存在问题，对未来空战模拟训练智能化的发展趋势进行展望，为人工智能赋能空战模拟训练及工程化应用这一新的研究领域提供探索思路。

1 智能化空战关键技术研究概述

由于人工智能技术不断发展和迭代，智能空战的内涵也在不断丰富和发展，目前对智能空战的定义是利用先进的人工智能技术使机器实现复杂空战环境下的自主决策和作战行动^[2-4]。近年来，世界各国都高度重视智能空战的研究，尤其是美国已经取得了阶段性的研究成果。2016 年，美国科研机构研发的虚拟飞行员 AlphaAI 首次应用于虚拟环境下的空战模拟对抗，结果虚拟飞行员击败了人类飞行员，代表着智能空战从概念研究向落地实践迈进。2019 年，美军致力于开发基于人工智能的僚机系统，用于飞行员的协调飞行训练等场景。同时利用群体智能、人机协同等前沿技术，加快“忠诚僚机”等项目的研究，推进“有人-无人编队”智能空战的发展。

在技术层面，空战智能化研究的主要技术包括基于规则的专家系统和基于数据驱动的机器学习算法。其中，被广泛研究的机器学习方法主要是深度学习方法和深度强化学习方法。接下来，将对相关技术进行分析和阐述。

1.1 基于专家系统的智能空战研究

作为人工智能的初级形态，基于规则的专家系统主要包括知识库和专家系统内核 2 部分。知识库是规则集合，其形式为元数据编码的文件系统或是由关系数据库存储的规则库。专家系统内核是一个逻辑模块，具有创建、编辑和执行规则的功能。专家系统的软件架构如图 1 所示。

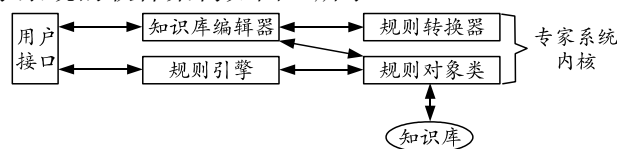


图 1 基于规则的专家系统框架

由于专家系统进行空战智能决策具有可解释性的优势，且易于实现工程落地，因此在早期空战智能化探索中得到了广泛的关注^[18]。在 20 世纪，美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)致力于研发基于专家系统的智能空战模型，构建了包含空战知识和经验的知识库，采用基于专家系统的人工智能模型完成空战决策，为战斗机飞行员提供实时战术决策的指导。

尽管基于专家系统的智能空战研究取得了显著进展，但其局限性也不容忽视。首先，由于规则设计无法避免“维数灾难”的问题，在空战状态空间维度较大的情况下，规则设计将十分困难。其次，基于专家系统的空战智能体受限于知识库的丰富度，无法做出超出知识库上限的创新性决策。为弥补专家系统的不足，研究人员将专家系统与其他人工智能算法进行结合，一定程度上克服了纯规则方法的短板。

1.2 基于深度学习的智能空战研究

传统机器学习算法需要通过特种工程对数据进行预处理，而深度学习算法能够自动提取模型训练所需要的特征信息。深度学习(deep learning, DL)是以深度神经网络为基础的连接主义学习方法，具有强大的数据挖掘和特征提取能力。深度学习的理论基础为通用近似定理(universal approximation theorem)，该理论证明一个含有足够多隐含层神经元的多层前馈神经网络，在不同的精度要求下，均具备逼近任意预定的连续函数的能力^[15]。神经网络包含输入层、隐藏层以及输出层，图 2 为一个简单的神经网络。深度神经网络的特点在于具有更多的隐藏层，针对不同场景需求，研究人员提出了不同形式的深度神经网络，其中包括深度卷积神经网络、

深度循环神经网络、长短期记忆神经网络以及深度生成网络等，随着 GPU 的普及，相关技术方法也得以推广。

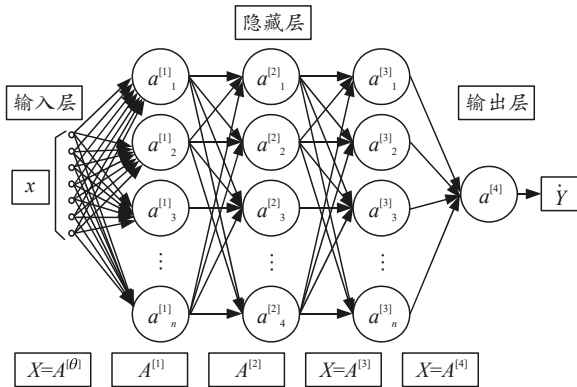


图 2 神经网络

作为近年来人工智能领域中发展最快的研究方向之一，深度学习被广泛应用于图像分类、目标检测和自动驾驶等诸多领域，并且取得了巨大成功^[15-16]。在军事领域，深度学习技术被用于快速处理战场情报信息，为战场决策、态势分析提供决策支持。借助强大的非线性映射能力，在空战模拟训练任务中，深度学习技术被用于开发智能空战决策系统。深度神经网络将空战机动决策问题转变为模式识别问题，构建由态势信息到战术机动动作的映射函数。在智能决策模型开发时，需要首先采集飞行员空战训练的战场态势信息和决策记录，获得原始数据，经过专家标注后，用于对智能决策模型进行离线训练。凭借其强大的拟合能力，深度神经网络使智能空战系统理解并掌握基本战术机动动作，从而在不同的空战态势下做出正确的决策动作。在模拟对抗时，智能系统将实时态势信息作为输入，经过非线性映射做出决策行动。基于深度学习模型的空战模拟训练流程如图 3 所示。

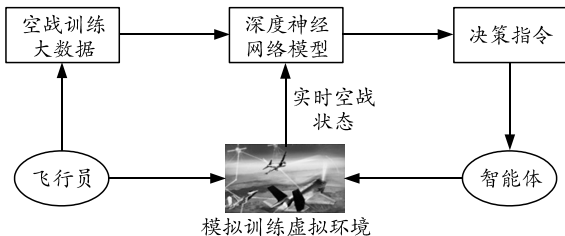


图 3 基于深度神经网络的空战模拟训练框架

1.3 基于深度强化学习的智能空战研究

深度强化学习 (deep reinforcement learning, DRL) 融合了深度学习和强化学习 (reinforcement learning, RL) 各自的优势，克服了传统表格型 (tabular) 强化学习方法只能使用低维输入的限制，

具有更强的特征提取能力，成为人工智能领域的重要研究方向。深度神经网络强大的特征表示能力，使 DRL 在游戏开发、机器人控制、空战智能决策等领域取得了一系列成就^[2,19-23]。

将深度强化学习应用于空战模拟对抗训练，需要空战智能体从模拟训练环境中获取高维度的观测信息，采用深度神经网络对观测信息进行处理，提取得到抽象的空战特征表示；接下来，通过强化学习进行策略优化，根据态势信息做出行为决策，进而与环境进行交互。对于智能体的行为，环境给出奖励或惩罚的反馈，智能体则根据奖惩信息进行行为修正并继续下一次试错行动。深度强化学习智能体通过最大化预期奖赏的方式执行学习任务，在学习过程中不断循环试错，直到搜寻到最优策略。基于深度强化学习的智能空战模拟训练框架如图 4 所示。

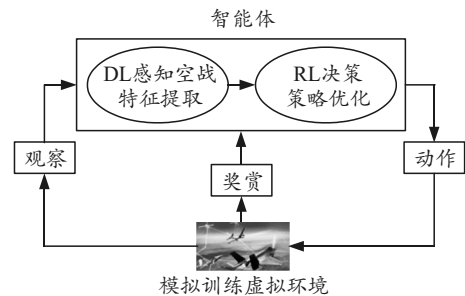


图 4 基于深度强化学习的智能空战框架

2 人工智能赋能空战模拟训练的发展趋势

现阶段航空兵模拟飞行训练仍以传统飞行模拟器为主，绝大多数飞行模拟器视景仿真较为简单、训练场景单一，训练方式以学员单向操作为主，缺乏交互反馈，未能较好地模拟真实作战场景、缺乏逼真的战场环境体验，学员在模拟训练中习得飞行技能的过程，仍停留于“记忆学习”而非“体验学习”。尽管一些新研发的飞行模拟器引入了部分交互功能，但受限于传统飞行仿真技术，仍无法呈现丰富且逼真的战场对抗场景。此外，由于不同的模拟训练场景和真实作战环境存在不同差距，导致模拟训练评价指标也较为混乱。因此，针对传统飞行模拟训练存在的飞行模拟器老旧、模拟训练方式单一、模拟训练评判指标混乱等问题，必须克服“维修旧模拟器、申领新模拟器”的惯性思维，以科技创新驱动模拟训练的发展与变革。

基于人工智能技术的空战模拟器，将成为虚拟战场的“智能蓝军”，代表着空战模拟训练的最新进展；因此，充分挖掘人工智能、虚拟现实等技术的

应用潜力，提升模拟训练效益，加紧建设面向现代战场的智能空战模拟器，成为了当前航空兵模拟训练的重要任务。可以预见，未来的模拟训练将从单一模拟器、多模拟器网络互联的模拟训练向智能化、虚拟化的模拟训练转变，作战演习将从现实场景下的“红蓝对抗”向虚实结合的复杂环境下的智能博弈对抗转型，模拟训练评估手段也将从“人为主导+计算机辅助”向大数据驱动的智能评估升级，为了顺应这一趋势，笔者对人工智能赋能空战模拟训练进行分析，提出了图 5 所示的训练体系。接下来，将对其中的主要内容进行分析和阐释。

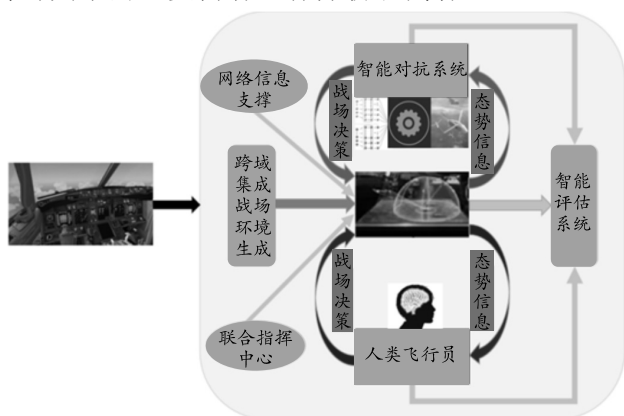


图 5 未来智能空战模拟训练系统

2.1 基于“实况-虚拟-构造”的智能空战仿真

随着仿真技术的不断发展，基于“实况-虚拟-构造”（live-virtual-constructive, LVC）的训练架构应运而生^[24-29]，图 6 所示为一个简单的 LVC 训练场景。LVC 训练环境能够为受训人员提供高逼真度的训练体验，改善模拟训练效果。随着航空兵联合对抗训练场景日益复杂，将飞行模拟器和数字构造兵力与实装训练相结合的 LVC 架构成为了空战模拟训练的主流趋势。

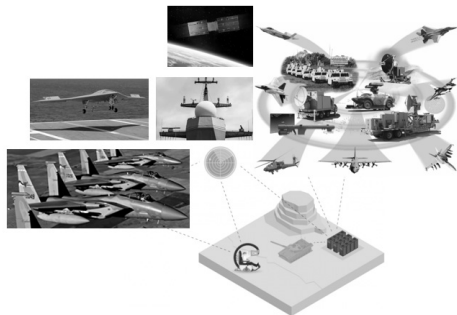


图 6 “实况-虚拟-构造”仿真训练体系

在战争形态由信息化向智能化转变过程中，人工智能技术与 LVC 技术的有机融合成为了空战模拟训练的重要发展方向。将专家系统、深度强化学

习以及多智能体强化学习等前沿技术应用于 LVC 空战的构造仿真领域，构建具有自学习能力的空战智能体，将极大地丰富模拟训练场景、提升空战模拟训练效果，促进战斗机飞行员实战能力的提升。此外，针对军事数据的匮乏、数据制作成本高等问题，基于 LVC 仿真架构，采用各类仿真软件来生成战场数据，将其应用到人工智能自主决策、目标识别等领域的模型训练过程，可以大大加速训练过程，提高人工智能应用的开发效率。

因此，在未来智能空战模拟训练研究中，应当重视人工智能技术与 LVC 训练体系的融合发展，构建虚实结合的空战模拟训练平台，充分吸收强化学习、群体智能、人机交互等技术丰富虚拟构造仿真，给予空战训练人员高逼真度的实战化体验，促进战斗力的提升和训练模式的创新，同时降低训练成本、提高训练效率。

2.2 大数据驱动的空战模拟训练智能评估

空战仿真已成为战斗机性能评估和战斗机飞行员培养与考核评价的重要手段，并且根据不同评估目的，可以设计出不同的空战对抗场景，展现出模拟训练的巨大优势。随着航空兵部队模拟训练不断增加，积累了大量的训练数据，高效利用大数据资源、深入分析和评估模拟训练效果，对于未来空战研究具有重要意义。传统的信息处理与数据评估已经不能满足空战大数据分析的任务要求，因此必须加快研发基于大数据的智能评估方法，从而为空战智能化进程提供坚实支撑^[30]。

人工智能算法在处理模拟训练大数据时具有天然优势，例如，通过深度神经网络处理海量的飞参数据，可以完成复杂飞行动作的识别，并且结合专家系统进行评判，构建飞行模拟训练质量智能评估系统将大大提升训练效率。此外，战场训练数据的匮乏、数据制作成本高、验证困难等问题已经成为空战模拟训练中人工智能应用研究的发展瓶颈。因此，在 LVC 训练体系下，通过收集大量的演训数据，构建大数据中心，能够为未来空战智能化发展提供强大的数据支撑，将成为未来模拟训练数据智能评估的重要研究方向。

2.3 空战模拟训练智能系统安全性研究

在人工智能研究中，智能算法的不确定性、可解释性、可迁移性以及安全性等问题是实现通用智能的重要挑战^[15-17]。为充分理解智能系统的内在逻辑

辑, 必须深入研究人工智能方法的可解释性。空战模拟训练智能化研究尽管尚处于早期阶段, 但应当尽早开展针对空战智能系统可解释性、不确定性量化评估、抗干扰能力等问题的研究。

到目前为止, 空战模拟训练智能化研究仍然停留在小规模的理想环境, 与真实作战环境有一定差距。此外, 对于有监督学习模型, 往往无法正确地处理未经训练过的场景, 尤其面对具有欺骗性质的输入信息, 智能系统表现出迁移能力较差、易受干扰等问题。为应对空战模拟训练智能系统面临的安全性挑战, 提升空战模拟训练智能系统对抗欺骗攻击的鲁棒性, 保证空战模拟训练效果, 需要加快研发能够有效防御敌对欺骗意图的空战模拟训练智能系统, 既能够应对特定、预先设定的敌对攻击, 也要能够对抗突发情境下的攻击。目前研究表明, 具有可解释性的深度强化学习有望推动人工智能系统向通用智能发展, 并促进自主决策领域的突破创新; 因此, 该技术也成为构建可解释性空战模拟训练智能系统的重要研究方向。

3 结束语

笔者针对人工智能在空战模拟训练中的应用, 论述了空战智能化研究中的关键技术, 对典型算法的特点及适用性进行了分析。针对当前航空兵模拟训练中存在的问题, 基于当前人工智能在空战模拟训练中的研究现状, 对人工智能赋能空战模拟训练的发展趋势进行了展望, 提出基于“真实-虚拟-构造”的智能空战仿真, 展望空战模拟训练智能评估与大数据中心建设前景, 梳理了空战模拟训练智能系统安全性研究的关键问题和研究方向。

参考文献:

- [1] 张智敏, 石飞飞, 万月亮, 等. 人工智能在军事对抗中的应用进展[J]. 工程科学学报, 2020, 42(9): 1106-1118.
- [2] 贺嘉璠, 汪慢, 方峰, 等. 深度强化学习技术在智能空战中的运用[J]. 指挥信息系统与技术, 2021, 12(5): 6-13.
- [3] 付翔, 叶永凯, 张萍, 等. 面向军事智能的空中作战能力特征研究[J]. 飞航导弹, 2021(9): 73-79, 95.
- [4] 孙智孝, 杨晟琦, 朴海音, 等. 未来智能空战发展综述[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 35-49.
- [5] ERNEST N, CARROLL D, SCHUMACHER C, et al. Genetic fuzzy based artificial intelligence for unmanned combat aerial vehicle control in simulated air combat missions[J]. Journal of Defense Management, 2016, 6(1): 2167-0374. 1000144.
- [6] 王志刚, 杨宁, 米禹丰. 基于动态时间规划和支持向量机的飞机机动动作识别方法[J]. 飞机设计, 2020, 40(4): 35-40.
- [7] 贾镇泽, 樊晓光, 薛明浩, 等. 基于机动动作元的敌机战术机动在线识别方法[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(8): 820-827.
- [8] RODIN E Y, AMIN S M. Maneuver prediction in air combat via artificial neural networks[J]. Computers & mathematics with applications, 1992, 24(3): 95-112.
- [9] FLOYD M W, KARNEEB J, MOORE P, et al. A Goal Reasoning Agent for Controlling UAVs in Beyond-Visual-Range Air Combat[C]//Proceedings of Twenty-Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence. 2017: 4714-4721.
- [10] SUN Z, PIAO H, YANG Z, et al. Multi-agent hierarchical policy gradient for Air Combat Tactics emergence via self-play[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 98: 104112.
- [11] 左家亮, 杨任农, 张滢, 等. 基于启发式强化学习的空战机动智能决策[J]. 航空学报, 2017, 38(10): 217-230.
- [12] 唐川. DARPA 拟借助人工智能推进“空战演化”项目[J]. 科研信息化技术与应用, 2019, 10(3): 95-96.
- [13] 陈斌, 王江, 王阳. 战斗机嵌入式训练系统中的智能虚拟陪练[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 366-380.
- [14] 孟光磊, 刘德见, 周铭哲, 等. 近距空战训练中的智能虚拟对手决策与导引方法[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-19[2022-02-14]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0687>.
- [15] GOODFELLOW I, BENGIO Y, COURVILLE A. Deep learning[M]. Cambridge, MA: MIT press, 2016: 198-201.
- [16] 曾春艳, 严康, 王志锋, 等. 深度学习模型可解释性研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(8): 1-9.
- [17] 化盈盈, 张岱坤, 葛仕明. 深度学习模型可解释性的研究进展[J]. 信息安全学报, 2020, 5(3): 1-12.
- [18] 王炫, 王维嘉, 宋科璞, 等. 基于进化式专家系统树的无人机空战决策技术[J]. 兵工自动化, 2019, 38(1): 42-47.
- [19] KONG W, ZHOU D, YANG Z, et al. Maneuver strategy generation of UCAV for within visual range air combat based on Multi-Agent reinforcement learning and target position prediction[J]. Applied Sciences, 2020, 10(15): 5198.
- [20] 李永丰, 史静平, 章卫国, 等. 深度强化学习的无人作战飞机空战机动决策[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(12): 33-41.
- [21] 施伟, 冯昶赫, 程光权, 等. 基于深度强化学习的多机协同空战方法研究[J]. 自动化学报, 2021, 47(7): 1610-1623.
- [22] 杨霄, 李晓婷, 赵彦东, 等. 基于DRL与微分对策的无人机空战决策研究[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(5):

- 71-75, 80.
- [23] LI Y, HAN W, WANG Y. Deep reinforcement learning with application to air confrontation intelligent decision-making of manned/unmanned aerial vehicle cooperative system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 67887-67898.
- [24] GUSTAVSSON P M, BJÖRKMAN U, WEMMERGÅRD J. LVC aspects and integration of live simulation[C]//2009 Fall Simulation Interoperability Workshop. Orlando, Florida, 2009.
- [25] 何晓骁, 王秉涵. 美军“实况-虚拟-构造”仿真技术发展及应用研究[J]. 航空兵器, 2021, 28(6): 14-18.
- [26] 刘怡静, 李华莹, 刘然, 等. LVC 空战演训系统发展研究[J]. 飞航导弹, 2020(12): 55-60, 77.
- [27] NOSEWORTHY J R. The test and training enabling architecture (TENA) supporting the decentralized development of distributed applications and LVC simulations[C]//2008 12th IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications. IEEE, 2008: 259-268.
- [28] 高昂, 董志明, 张国辉, 等. LVC 训练系统中计算机生成兵力生成技术研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(3): 745-752.
- [29] CHOI S Y. Study on the Architecture of Combat Training Center LVC-System[J]. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 2008, 11(2): 80-87.
- [30] 徐琳, 周自力, 艾尔, 等. 基于大数据的未来智能空战研究[J]. 飞航导弹, 2020(10): 41-46.

(上接第 4 页)

4.3 数据挖掘及可视化技术

数据挖掘是在役考核数据采集管理平台进行数据处理的重要环节,其任务是关联分析、分类分析、聚类分析、考核评估和故障预测。数据挖掘的技术关键在于算法创新与模型构建,引入遗传算法、神经网络、深度学习等智能算法,构建与不同在役考核任务相匹配的数学模型,实现在役考核数据智能化评估^[14]。可视化技术是指依托大数据分析挖掘工具和常用算法,利用计算机图形学与图像处理技术,以散点图、仪表盘、驾驶舱等多种方式实现对数据挖掘结果的展现,为首长机关提供直观、简明的可视化决策支撑^[15]。

5 结束语

笔者通过分析天基信息支援装备在役考核数据特点与采集管理现状,指出了在役考核采集管理平台研究的现实意义,深入分析了平台建设的具体需求,借助系统工程、数据工程及大数据管理思想,参照现有试验数据管理平台建设经验,设计了“基础层、数据层、管理层、应用层”4层架构的在役考核数据管理平台。该平台有助于加强试验鉴定部门对在役考核数据的采集管理及分析应用,促进数据管理人员将数据优势转化为决策支撑优势,也可为各军兵种建设通用型试验数据采集管理平台提供借鉴。下一步,将围绕需要解决的关键问题进行技术攻关,开展平台各模块的具体开发。

参考文献:

- [1] 孟庆均, 曹玉坤, 张宏江. 装备在役考核的内涵与工作方方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(5): 18-22.
- [2] 陈庆贵, 谢静, 蔡娜, 等. 军用航空发动机大数据管理系统设计开发研究[J]. 兵工自动化, 2021, 40(7): 21-23, 52.
- [3] 侯妍, 范丽, 杨雪榕, 等. 太空信息支援[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 1-3.
- [4] 张宏江, 罗建华, 郭英, 等. 装备在役考核[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 117-118.
- [5] 罗晓强, 王毅刚, 游修东. 水雷武器在役考核数据采集与管理方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019, 2(4): 70-75.
- [6] 李亚楠, 山雪颖, 王志梅. 基于大数据的航天装备试验鉴定数据管理及分析应用研究[J]. 航天工业管理, 2018, 41(7): 35-40.
- [7] 郝旭东, 苑建伟, 刘道伟. 电子信息装备试验大数据系统建设[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(1): 6-9.
- [8] 胡晓枫, 胡伟杰, 曹啸博, 等. 装备试验大数据管理平台设计研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(11): 1207-1213.
- [9] 李一, 冯楠, 谭顺成. 基于云的装备试验数据中心架构设计[J]. 海军航空工程学院学报, 2019, 34(2): 217-222.
- [10] 魏雁飞, 薛永奎, 杨涛. 电子装备试验大数据分析服务平台架构设计[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(5): 18-22.
- [11] 杜伟, 张成举. 陆军演训数据分析系统建设[J]. 兵工自动化, 2020, 39(5): 15-18.
- [12] 李萌, 魏玮. 基于 SOA 的主数据管理架构设计及实践[J]. 兵工自动化, 2015, 34(8): 49-51, 64.
- [13] 赵守香, 唐胡鑫, 熊海涛. 大数据分析与应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015: 94-98.
- [14] 糜旗. 网络安全态势感知平台架构设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(1): 17-21.
- [15] 战晓苏. 军事系统工程与技术基础[M]. 北京: 军事科学出版社, 2016: 201-204.