

基于智能仿真推演的导弹防御指挥控制系统研究

冷志成¹, 薛凤桐², 张灏龙², 刘瑞峰²

(1. 92578部队, 北京 100161;

2. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048)

✉ lengzhicheng1975@163.com; 1185021785@qq.com; 78058078@139.com; 1207018197@qq.com



摘要: 随着人工智能技术飞速发展, 体系化智能化作战成为未来战场的主要作战样式, 因此, 智能化的态势感知与指挥决策成为赢得战争的关键因素。为了实现战场态势的智能感知能力、作战知识的自主学习能力和作战指挥的自主决策能力, 针对导弹防御作战, 提出了一种基于智能仿真推演的导弹防御指挥控制系统, 重点研究设计了面向智能化作战的导弹防御指挥控制系统和智能仿真推演平台。测试表明, 该系统能够实现态势信息的智能认知与决策信息的自主生成, 为人工智能技术在军事作战仿真领域的应用提供了有效路径。

关键词: 作战仿真; 导弹防御作战; 智能指挥决策; 态势感知; 智能决策

中图分类号: TP311.5 **文献标识码:** A

Research on Missile Defense Command and Control System based on Intelligent Simulation Deduction

LENG Zhicheng¹, XUE Fengtong², ZHANG Haolong², LIU Ruifeng²

(1. Unit 92578, Beijing 100161, China;

2. China Aerospace Academy of System Science and Engineering, Beijing 100048, China)

✉ lengzhicheng1975@163.com; 1185021785@qq.com; 78058078@139.com; 1207018197@qq.com

Abstract: With the rapid development of artificial intelligence technology, systematic and intelligent operations have become the main combat style in the future battlefield. Therefore, intelligent situational awareness and command decision-making have become the key factors for winning wars. This paper proposes a missile defense command and control system based on intelligent simulation deduction for missile defense operations, in order to improve the ability of intelligent perception of battlefield situation, autonomous learning of operational knowledge and autonomous decision-making of operational command. The research has focused on designing intelligent combat missile defense command and control system and intelligent simulation deduction platform. Tests show that the system can realize the intelligent cognition of situation information and the autonomous generation of decision-making information, providing an effective path for the application of artificial intelligence technology in the field of military combat simulation.

Keywords: combat simulation; missile defense operations; intelligent command and decision-making; situational awareness; intelligent decision-making

1 引言(Introduction)

近年来, 随着大数据、云计算、深度学习等技术的飞速发展, 人工智能应用的广度与深度在不断地拓展, 给人们的生活带来颠覆性的变革。与此同时, 人工智能也成为新式武器装备、体系化作战等军事领域的研究热点。在实际作战过程中, 指挥官的每一个决策都需要根据当时的战场态势来制定, 这就

造成作战决策的动态性和强耦合性^[1], 所以, 战场的态势认知和决策速度成为打赢战争的关键因素^[2]。面对未来体系化智能化作战, 复杂的战场环境给作战决策带来更大的不确定性, 需要更快速地进行信息融合、态势认知和指挥决策来占据作战优势, 赢得战争主动权^[3-4]。因此, 为了打赢未来战争, 应用人工智能技术提升战场态势的智能感知能力、作战策略的自主学习

能力和作战指挥的自主决策能力成为军事领域需要解决的主要问题。

针对导弹防御的智能辅助决策应用需求,本文以导弹攻防为背景,在美国智能辅助决策技术研究和搭建的智能推演平台基础上,构建导弹防御指挥控制系统,形成导弹防御智能指挥控制系统,支撑防御方战场态势的智能感知、作战知识的自主学习和作战指挥的自主决策,为人工智能技术的军事应用提供可行性验证方案。

2 美国智能辅助决策技术研究(Research on intelligent supporting decision-making technology in America)

20世纪90年代,美国最早提出军事辅助决策技术的概念,以实现准确及时地预测出敌方意图并做出决策,展开行动^[5]。后来,随着军事辅助决策技术的不断发展,2004年,美军开始智能化辅助决策技术的研究,制定了实时作战智能决策制定计划(Real-time Adversarial Intelligence and Decision-making, RAID)。直到2007年,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)支持了一项指挥控制领域的项目——“深绿(Deep Green, DG)”计划,成为最典型的军事辅助决策系统^[6-8]。“深绿”计划原计划三年,但由于各种问题于2011年暂停,至今没有完成。“深绿”计划源于IBM公司的“深蓝”,旨在集成到美陆军现有的旅级战时指挥决策系统上,通过实时态势仿真,预测敌人的作战意图和行动,并据此提前做出决策。该计划较早地将人工智能技术引入作战辅助决策中,是智能辅助决策技术的早期实践,有很好的借鉴意义。

“深绿”计划的结构框图如图1所示^[2],主要包括三部分:指挥员助手、闪电战和水晶球。“指挥员助手”是与指挥员的人机交互接口,智能化生成作战计划;“闪电战”是作战计划方案的仿真分析引擎,用于战场态势的推演;“水晶球”则完成对战场态势的评估优化并自主给出决策。这三部分通过军用信息系统进行连接,实现未来战场态势推演、评估及预测,有效辅助指挥员的作战决策。但由于当时技术水平限制,作战人员认知判断模型难以构建,再加上复杂战场环境下的高度不确定性,使得“深绿”计划难以继续,被迫停止。

开展了“深绿”计划后, DARPA又在2009年至2014年之间启动了一系列智能辅助决策技术的项目^[5]:基于视觉信息的态势认知与推理系统的Mind's Eye计划;在对抗条件下以AI算法完成目标识别的TRACE计划;空中战场的智能辅助决策DBM;具备高效率、高精度认知能力的机器辅助决策TEAM-US等项目。这些项目的开展使得美国在智能辅助决策技术研究中积累了丰富的经验。

2016年6月,美国辛辛那提大学构建的“阿尔法”人工智能系统在模拟空战中,以快速的信息感知处理能力和准确的判断决策能力战胜了经验丰富的空军上校,验证了人工智能技术的优越性,推动了智能辅助决策技术的发展^[5]。同年年底,用来全程辅助指挥员决策应对复杂战场态势的Commander's Virtual Staff项目在美军成功立项,标志着美国在智能辅助决策领域已经走在了世界的前列。

相比较而言,我国在智能辅助决策技术方面的研究还是以专家系统、多智能体系统为主,虽然取得了大量的成果,但在成果质量与可推广性方面还存在较大差距。由于战场环境的复杂性和基于规则、专业知识的推理分析,国内的专家系统多限于解决特定领域问题的智能系统;即使多智能体系统在处理复杂系统问题方面具有显著优势,不过也存在知识处理能力差、统一协调差、适应能力差和人机交互差等缺点。为此,有必要应用新时代人工智能技术开展作战辅助决策研究。

3 基于智能仿真推演的导弹防御指挥控制系统框架(The framework of missile defense command and control system based on intelligent simulation deduction)

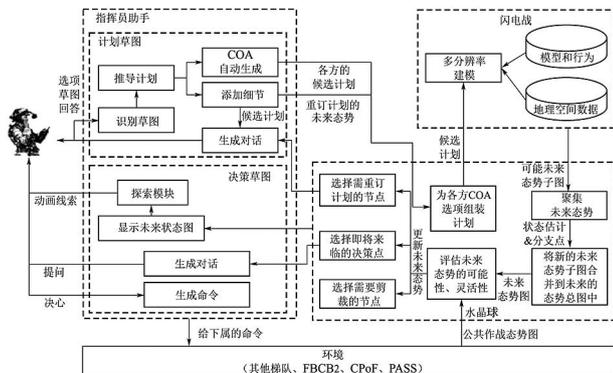
3.1 导弹攻防作战中防御方智能指挥决策分析

针对导弹攻防作战,作为导弹防御方,按照“观察—判断—决策—行动”(Observe—Orient—Decide—Act, OODA)环,主要完成态势感知、威胁判断、任务分配、拦截打击等任务。在态势感知阶段,防御方指挥控制中心通过预警卫星、预警雷达等传感器探测到进攻方导弹,并对导弹进行跟踪分析,明确进攻导弹弹道、落点等信息。在威胁判断阶段,根据态势感知结果,通过评估进攻导弹落点的重要程度、飞行速度、剩余飞行时间等对进攻导弹进行威胁评估,判断是否应该拦截。任务分配则是根据威胁判断结果和不同拦截基地拦截弹的作战能力,对各基地的拦截弹进行打击目标分配,装订目标信息。到了拦截打击阶段就是拦截弹装订发射诸元,发射拦截弹对目标实施打击,完成拦截任务。因此,面向智能化作战,导弹攻防作战中的导弹防御指挥控制系统主要实现三方面的能力^[9-11]:

(1)战场态势的智能感知能力:实现对来袭导弹的自主感知、自主识别,并给出来袭导弹的弹道信息、落点信息,完成对导弹攻防态势的评估。

(2)作战策略的自主学习能力:基于战场态势的感知,通过应用强化学习算法开展探测规划、拦截策略的自主学习,构建作战知识库。

(3)作战指挥的自主决策能力:以作战知识库为基础,以战场态势感知结果为输入,自主匹配响应的作战策略,完成作战指挥的自主决策。



注: COA: 精略行动计划; FBCB2: 21世纪部队旅及旅以下作战指挥;

CPoF: 未来指挥所; PASS: 有源空间监视系统

图1 “深绿”计划的结构框图

Fig.1 Block diagram of the DG

为了实现上述三方面能力，需要大量的仿真推演与模型的学习训练作为支撑，因此，本文搭建了基于智能仿真推演平台的导弹防御指挥控制系统：三种能力对应的业务分系统构成导弹防御指挥控制系统，智能仿真推演平台和导弹攻防装备模型库、算法库形成虚拟训练环境。

3.2 导弹防御指挥控制系统框架

基于智能仿真推演的导弹防御指挥控制系统可以分为面向智能化作战的导弹防御指挥控制系统、智能仿真推演平台以及模型算法库三大部分。

(1)面向智能化作战的导弹防御指挥控制系统是整个系统的核心功能部分，主要完成导弹防御系统的态势感知、作战指挥控制等功能，是整个导弹防御系统的神经中枢，主要由作战态势智能认知子系统、战前智能作战规划子系统、作战方案智能生成子系统三部分组成。

(2)智能仿真推演平台为面向智能化作战的导弹防御指挥控制系统提供了一个基础平台，可以实现各装备模型的交互，代理模型、指挥控制模型的训练，仿真试验方案的设计，作战想定设计编辑以及仿真数据的统计分析等功能。

(3)模型算法库中的模型包含导弹攻防双方的装备，即天基红外预警卫星、地/海基雷达、拦截装备以及进攻弹模型，接受指挥控制系统的调度；同时，应具备作战规则模型，作为仿真推演的边界约束条件，支撑完成导弹防御任务；还应具备人工智能算法、试验设计算法和代理模型构建算法等，为知识与规则的学习与智能推演提供支撑。

其中，智能仿真推演平台和模型算法库是导弹防御指挥控制系统的支撑资源。基于智能仿真推演的导弹防御指挥控制系统的结构框架如图2所示。本文主要针对面向智能化作战的导弹防御指挥控制系统(以下简称“智能指控系统”)和智能推演仿真平台进行详细设计。

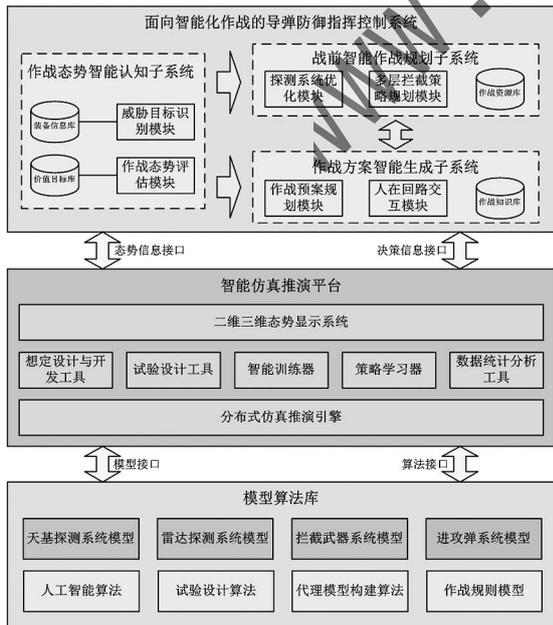


图2 基于智能仿真推演的导弹防御指挥控制系统架构图
Fig.2 Architecture of missile defense command and control system based on intelligent simulation deduction

4 面向智能化作战的导弹防御指挥控制系统 (Missile defense command and control system for intelligent operations)

4.1 指控系统组成

面向智能化作战的导弹防御指挥控制系统主要包括作战态势智能认知子系统、战前智能作战规划子系统和作战方案智能生成子系统三部分，如图3所示。

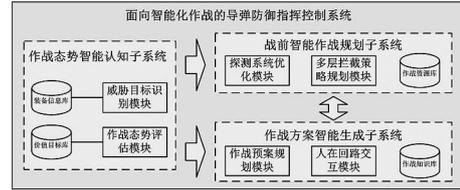


图3 面向智能化作战的导弹防御指挥控制系统结构图

Fig.3 Structure of missile defense command and control system for intelligent operations

作战态势智能认知子系统采用多源数据融合技术，对天基预警探测系统和地/海基雷达探测系统等数据进行融合，提取目标的状态和属性后，与装备信息库中的威胁特征进行比对，识别出威胁目标以及威胁的位置、速度和方向等信息。在此基础上，对威胁的弹道进行预估，确定打击目标，对作战态势展开评估，为后续的作战指挥控制奠定基础。

战前智能作战规划子系统基于上面作战态势的认知，通过构建导弹防御装备代理模型，利用深度强化学习算法，对导弹防御系统的探测规划和拦截策略进行学习训练。在有限的作战资源约束下，得到不同作战态势下探测系统的优化配置关系以及拦截系统的拦截策略，是智能指控系统的核心。

作战方案智能生成子系统是在战前智能作战规划子系统学习训练的基础上，深度挖掘探测系统组网与拦截策略的作战知识，构建出作战知识库，通过与态势感知系统得到的态势信息进行特征匹配，快速制定出可行有效的作战方案。由于态势的不确定性以及知识挖掘的片面性，系统提供人在回路的交互模块，实现在已有的作战知识基础上机器与人的智能结合，提高导弹防御系统的整体效能。

上述三个子系统构成了智能指控系统，实现了导弹防御系统的智能态势感知与作战方案的自主生成。

4.2 作战态势智能认知子系统

导弹防御作战可分为预警探测、指挥控制及火力拦截三大阶段。“及时发现、精确跟踪、正确识别和有效拦截”是导弹防御作战取胜的四大要素，而预警数据接收贯穿于整个导弹防御作战的全过程。如何实现及时发现、精确跟踪和正确识别是导弹防御系统数据接收的核心任务。

导弹防御智能指控系统的传感器主要包括天基预警卫星、远程预警雷达、目标跟踪雷达以及制导雷达等。作战态势智能认知子系统完成卫星与雷达的数据融合以及多种雷达的数据融合，并对战场态势进行评估。因此，分系统主要包括两个主要模块：威胁目标识别模块和作战态势评估模块，其结构图如图4所示。

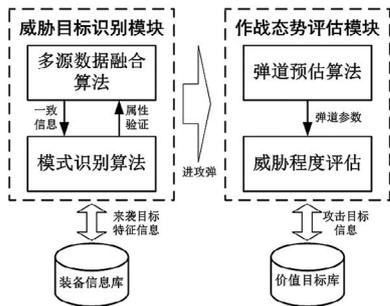


图4 作战态势智能认知子系统构成

Fig.4 Subsystem structure of intelligent combat situation awareness

在威胁目标识别模块中，根据系统接收到的多源异构数据信息，利用数据融合算法完成数据的坐标转换、航迹关联等数据融合工作，获得一致性的目标状态和属性数据，包括位置坐标、速度、飞行高度、加速度、RCS、红外特性等参数。基于已有的对方装备信息库中的特征信息，利用模式识别算法，完成来袭目标匹配，得出来袭目标即进攻弹的参数。

根据威胁目标识别模块得出的进攻弹参数，作战态势评估模块对作战态势开展评估。通过弹道预估算法对进攻弹的弹道进行预测，主要获得进攻弹的剩余飞行时间以及落点坐标。在此基础上，通过与价值目标的数据库中的目标数据进行对比，采用评估分析方法，对进攻弹的威胁展开评估。通过对全部进攻弹的态势评估，完成对整个态势的评估。

4.3 战前智能作战规划子系统

战前智能作战规划子系统是结合作战态势的认知，以基于试验设计得到的历史仿真样本数据为基础，构建探测系统与拦截武器的代理模型；再通过深度强化学习算法，对导弹防御系统的探测系统规划和拦截策略进行学习训练，形成“仿真数据—代理模型—作战知识”三阶段的认知提升，具体的系统结构关系如图5所示。

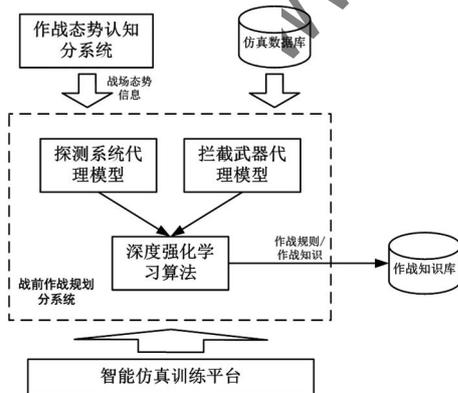


图5 战前智能作战规划子系统构成

Fig.5 Subsystem structure of intelligent prewar combat planning

代理模型是采用数学拟合的思想代替现有物理分析模型的近似技术，从20世纪50年代开始，已经成功应用于各个领域。由于各种原因输入输出变量之间的物理分析模型难以准确

构建，一般可以基于多次实验数据通过数学拟合的方式搭建输入输出之间的响应曲面模型，因此，构建代理模型的实质可以认为是样本数据的拟合。目前比较主流的代理模型构建方法包括：响应面方程、人工神经网络、随机森林模型、Kriging模型、支持向量机模型、径向基函数模型以及高斯过程等。

4.4 作战方案智能生成子系统

作战方案智能生成子系统是在战前智能作战规划子系统学习训练的基础上，利用探测系统组网与拦截策略的作战知识，对多层拦截方案进行规划，同时对探测资源进行优化部署。此外，由系统提供人在回路的交互模块，支持人的指令控制。分系统结构图如图6所示。

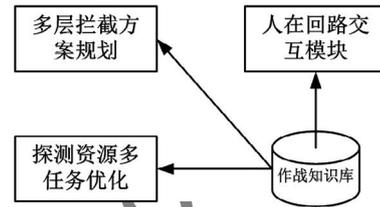


图6 作战方案智能生成子系统结构

Fig.6 Subsystem structure of battle plan intelligent generation

5 智能仿真推演平台(Intelligent simulation deduction platform)

智能仿真推演平台作为面向智能化作战的导弹防御指控系统的基础支撑环境，提供分布式实时仿真试验环境，并为指挥决策模型的训练提供平台基础。智能仿真推演平台包括分布式仿真推演引擎、想定设计与开发工具、试验设计工具、智能训练器、策略学习器、数据统计分析工具以及二维三维态势显示系统等七大部分，平台组成如图7所示。

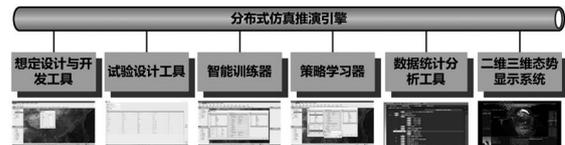


图7 智能仿真推演平台组成

Fig.7 Components of intelligent simulation deduction platform

分布式仿真推演引擎是在应用系统执行期间为对象模型、试验对象和试验资源的调度提供高性能、强实时、低延迟的通信支撑平台。仿真引擎以中间件标准为信息交换规范，将仿真对象接入智能仿真应用中，为仿真模型提供实时运行环境，通过发布订购组件提供仿真对象之间的交互机制，以消息处理组件为公共通信手段，为核心服务生成的实物仿真对象和综合仿真对象提供可靠的信息交互手段，并对通信服务质量和通信网络进行管理。

想定设计与开发工具为平台提供可视化、图形化想定编辑模块，可通过鼠标操作快速部署仿真实体，编辑各类航线航道、任务区域等仿真资源，指导任务计划，形成仿真作战想定。

试验设计工具根据试验目的选取试验因子和多因子水平，采用独立因子试验设计、全部析因试验设计、正交试验设计、均匀试验设计等多种试验设计方法，批量生成想定样本集。试

验设计工具通过函数形式调用底层试验设计算法接口，按照给定的格式传入因子、因子水平分布以及生成样本信息，返回试验因子水平列表。

智能训练器支持装备代理模型的训练过程。训练器通过调用试验设计工具生成的试验样本数据或者历史仿真数据，再通过调用指控系统中的代理模型构建算法，通过多样本数据的运行管理，实现对导弹防御装备代理模型的拟合，为后续深度强化学习提供模型支撑，提高学习效率。

策略学习器支撑导弹防御作战知识的学习过程。学习器是在智能仿真推演平台的基础上，利用指控系统中构建的深度强化学习模型以及装备代理模型，通过平台的仿真引擎与仿真工具开展攻防作战的仿真学习，形成拦截作战知识，支撑战前作战规划和防御作战方案的自主生成。

数据统计分析工具针对智能仿真推演产生的数据开展统计分析，包括对数据的预处理、标准化、聚类分析、统计分析等，支撑智能训练器、策略学习器应用深度学习、强化学习算法开展训练，并为后续的效能评估奠定数据基础。

二维三维态势显示系统可基于二维、三维数字地图对整个对抗及学习过程进行直观显示，包括仿真流程、关键事件、特效、学习曲线等。

根据上述智能仿真推演平台的组成，得到平台的框架，如图8所示。智能仿真推演平台主要分为四层：资源层、引擎层、工具层和应用层。资源层是整个平台的基础，主要包括模型库和算法库，为智能推演训练提供红蓝方装备模型、作战规则模型、作战决策模型、试验设计算法、代理模型构建算法和人工智能算法等支撑。引擎层主要完成智能推演训练的流程调度和管理，实现数据分发、流程管控、时间管理、想定解析、模型/实体管理等功能服务。工具层是支持用户完成智能推演训练的工具集合，实现智能仿真训练的基本功能，包括想定设计与开发工具、试验设计工具、态势显示工具、智能训练工具、策略学习工具、数据统计与分析工具。应用层是用户的应用需求，包括作战仿真推演、智能感知、智能决策、二维三维态势显示以及作战仿真数据分析等主要功能。

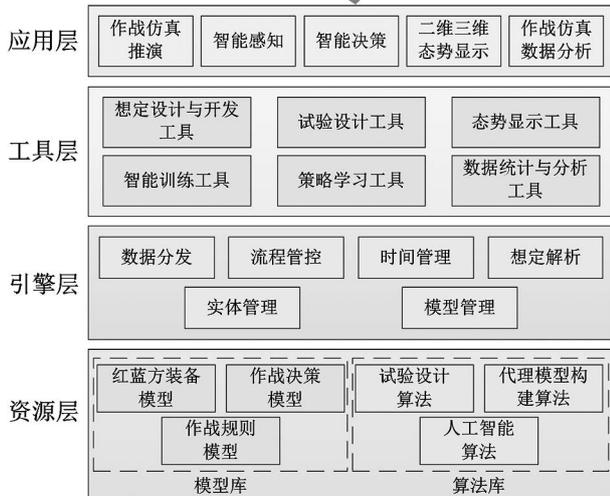


图8 智能仿真推演平台架构图

Fig.8 Architecture of intelligent simulation deduction platform

6 结论(Conclusion)

本文主要在研究美国智能辅助决策技术的基础上，针对导弹攻防作战中导弹防御作战，分析导弹防御智能指挥决策的能力需求，搭建了基于智能仿真推演平台的导弹防御指挥控制系统，该系统主要包括面向智能化作战的导弹防御指挥控制系统、智能仿真推演平台及模型算法库三部分，并详细阐述了各系统的功能及模块构成，提出了系统实现的可行技术路线。本文研究内容对人工智能技术在作战仿真推演方面的应用具有一定的参考意义。

参考文献(References)

- [1] 吴金平,杨静,范学满.指挥控制智能决策系统与技术研究[C]//中国指挥与控制学会.第八届中国指挥控制大会论文集.北京:兵器工业出版社,2020:368-373.
- [2] 郭圣明,贺筱媛,胡晓峰,等.军用信息系统智能化的挑战与趋势[J].控制理论与应用,2016,33(12):1562-1571.
- [3] 胡晓峰,荣明.智能化作战研究值得关注的几个问题[J].指挥与控制学报,2018,4(03):195-200.
- [4] 付长军,郑伟明,葛蕾,等.人工智能在作战仿真中的应用研究[J].无线电工程,2020,50(04):257-261.
- [5] 张晓海,操新文.基于深度学习的军事智能决策支持系统[J].指挥控制与仿真,2018,40(02):1-7.
- [6] 胡晓峰,郭圣明,贺筱媛.指挥信息系统的智能化挑战——“深绿”计划及AlphaGo带来的启示与思考[J].指挥信息系统与技术,2016,7(03):1-7.
- [7] ZHOU Y, HUANG J, HUANG K. A study on impact of "deep green" on command and control[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(6):3-6.
- [8] ZHOU Y, HUANG J, HUANG K. Review on key technology in deep green[J]. Journal of System Simulation, 2013(7):34-37.
- [9] 彭希璐,王记坤,张昶,等.面向智能决策的兵棋推演技术[C]//中国指挥与控制学会.第七届中国指挥控制大会论文集.北京:兵器工业出版社,2019:193-198.
- [10] 陆凌云,王芳,何加浪,等.指挥控制系统仿真建模思考[C]//中国指挥与控制学会.第七届中国指挥控制大会论文集.北京:兵器工业出版社,2019:625-628.
- [11] 曹雷.基于深度强化学习的智能博弈对抗关键技术[J].指挥信息系统与技术,2019,10(05):1-7.

作者简介:

冷志成(1975-),男,硕士,高级工程师.研究领域:仿真技术.
 薛凤桐(1993-),男,硕士,助理工程师.研究领域:系统工程.
 张灏龙(1977-),男,博士,研究员.研究领域:系统仿真与评估技术.
 刘瑞峰(1994-),男,硕士,助理工程师.研究领域:仿真技术.