

人工智能在飞航导弹上的应用与展望

魏东辉 王长青

摘 要 简要概述了人工智能系统的典型特征,并结合未来战争形态演变,分析了飞航导弹对人工智能技术的需求。通过探讨智能飞航导弹的概念,初步描绘了飞航导弹实现人工智能的研究层级和发展路线图。在此基础上,指出了未来可行的关键研究方向。

关键词 人工智能 飞航导弹 控制 无人机

引 言

有资料显示,美国辛辛那提大学研发的专用空战人工智能电脑阿尔法驾驶三代机 F-15,与一名飞行 20 多年的美空军上校驾驶四代机 F-22 的模拟空战中,空战人工智能电脑完美击落了具备全面碾压 F-15 能力的 F-22。可以预见,人工智能军事技术创新和应用将进入一个集中爆发期,智能化战争也许比预料的来得更早、更快,更具颠覆性和深远性。

飞航导弹作为当前战争中的精确打击武器,在未来变化莫测的战争态势下,必须以更快的速度获取信息、认知到战场态势的变化并自主做出正确反应,以实现预定作战目标,这就要求飞航

导弹必须由精确化向智能化过渡。

1 人工智能简介

人工智能(Artificial Intelligence, AI)是研究用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的学科,是计算机学科的一个分支,它试图了解智能的实质,实现对人的意识、思维的信息过程模拟,并研制出一种能与人类智能相似的方式做出反应的机器。

应用人工智能技术的系统称为人工智能系统,人工智能系统具备全部或部分如下典型特征:

- 1) 知识表示和常识知识库——知识表示 = 数据结构 + 处理机制;
- 2) 规划——在不确定条件下的推理和决策能力;
- 3) 学习——从输入数据处获得知识进行归纳推理,从而帮助解决更多问题,减少错误,提高效率;
- 4) 感知——使用传感器获取资料并自主认知世界的状态;
- 5) 运动和控制——能够按照意图运动;

6) 自然语言处理——方便的人机交互;

7) 社交——通过理解他人的动机和情感状态,能够预测别人的行动;

8) 创作力——人工智能的巅峰,人工知觉和人工想像;

9) 多元智能——包含以上所有的技能,甚至超越人类。

目前,人工智能研究已经涉及机器学习、图形/图像/视频识别、语音识别、自然语言处理、类脑研究等多个领域,并已逐步在理论和实践上自成体系。随着技术进步,人工智能在无人飞行器上的应用也越来越多,如 X-47B 无人机自主航母起降、自主空中加油,神经元无人机与有人机编队飞行,多小型旋翼无人机协同完成抛球等,无不体现着飞行器在自主智能以及人机协同、群体智能等方面的飞速发展。

2 飞航导弹人工智能发展需求

科技发展驱动战争形态演变,美军提出未来重点关注的五大技术领域:能够在海量数据中提取最有价值信息的深度学习系统,能够将人的洞察力和计算机

本文 2016-10-17 收到,魏东辉、王长青分别系北京机电工程研究所工程师、研究员

飞航导弹 2017 年第 1 期

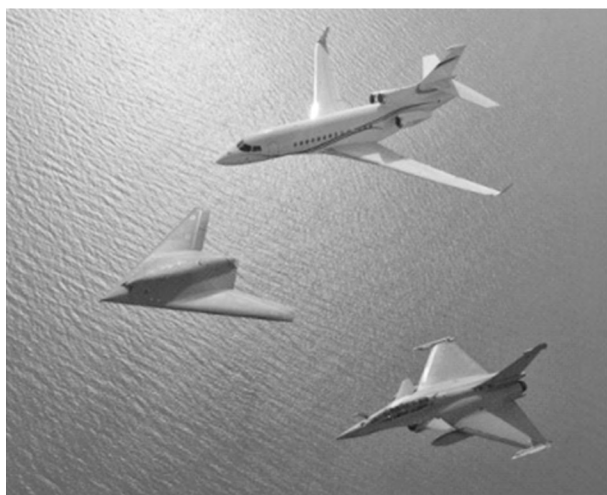
• 3 •



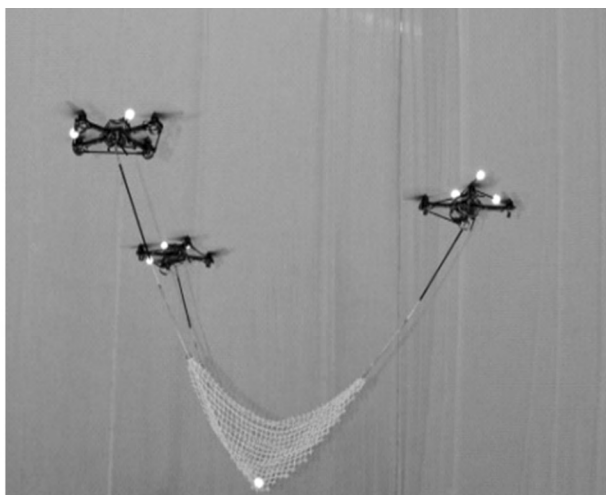
a) X-47B 无人机自主航母起降



b) X-47B 无人机自主空中加油



c) 神经元无人机与有人机编队飞行



d) 多小型旋翼无人机协同完成抛球

图1 人工智能在飞行器上的应用

的准确性完美结合以更好、更快决策的人机协作系统,能够用于人与无人系统并行作战的人机战斗系统,能够增强士兵能力的辅助人类系统,以及能够用于做好网络攻击准备的网络使能及网络加强武器系统。可见,美国已经开始将人工智能技术应用于武器系统的研究,未来战争中作战武器将不再局限于一两件主导性武器平台,而是一个由各种智能武器节点构成的分布式自主化的作战网络。飞航导弹是遂行精确目

标打击的武器,在网络化、信息化、智能化的战争形态下,飞航导弹必然需要与人工智能技术相结合,实现由精确化向智能化过渡。

飞航导弹人工智能是适应复杂作战环境的需求。未来作战面临高度对抗、有限信息支援、全气象条件、多任务需求的挑战,不确定性大幅增加,需要导弹具有自主感知和态势认知能力,以适应不确定的战场变化。

飞航导弹人工智能是实现体

系对抗的需求。为了提高武器的作战效能,协同作战、体系化作战已经成为发展趋势,需要飞航导弹能够像人一样互相协作完成复杂任务。面对敌我复杂博弈态势,单弹的任务完成效果对弹群攻击任务影响凸显,要求导弹能够依据全局目标智能决策,具备体系对抗能力。

飞航导弹人工智能是智能导航控制的需求。未来作战是全域作战,在外太空、空中、海面、水下开展,作战环境条件特性各

飞航导弹 2017 年第 1 期



图2 远程反舰导弹自主威胁规避及目标识别

异,为了保证良好的性能,需智能导航和运动控制,根据外界环境实施最佳控制,如智能变形、全源智能组合导航等。

飞航导弹人工智能是目标精确打击的需求。在末端攻击时,面对有限敌方信息、敌方干扰、伪装,需开展协同搜索,利用信息融合准确完成目标价值识别、要害识别,自动规避敌方拦截,实现高精度目标打击。

飞航导弹人工智能是武器系统快速反应的需求。未来作战面临快速反应、简化武器装备维护的迫切需求,这就要求武器装备使用全流程均进行智能管理,在贮存、转运、测试、发射准备流程中充分利用人工智能技术,通过智能处理、上报使用问题,减少人工环节,提高反应速度,降低保障要求。

3 飞航导弹人工智能概念

通过长期对飞航导弹的研究及对人工智能的理解,初步提出了飞航导弹人工智能概念。飞航导弹人工智能是利用人工智能技术,使飞航导弹具有感知、决策和执行能力,能便捷准确地理解人类的任务指令,具有一定的认知和学习能力,通过感知管理自飞航导弹 2017年第1期

身状态及战场环境变化,实时替人类完成中间过程的分析和决策,最终辅助人类完成所赋予的作战使命。

最早智能导弹概念由夏国洪老师系统地提出,他指出智能导弹是一个自主、相对、渐进、博弈的概念。智能导弹是一个自主的概念,智能反映在能自主地通过对各种感知的信息进行处理,对外界环境、目标特性及变化进行分析、判断和推理,具有一定的思维能力和联想能力,从而做出正确的决策和反应,也就是说,智能导弹应具有自主性、自适应性。智能导弹是一个相对的概念,导弹的智能应该指高于敌方“弱智”一方面的能力,是相对的“强智”,可以理解作为一种“不对称的战略思想”。智能导弹是一种渐进的概念,导弹制导技术已从过去的指令制导发展到目前的自寻的,智能化有了进一步的提高,但随着科学技术的发展,导弹制导智能水平还要继续提高,否则,就不能称为智能。智能导弹是一种博弈的概念,导弹只有在敌我双方交战时,通过几个回合的较量,比哪方导弹打得进、打得准、打得狠、防得住,哪方导弹才算更智能。

飞航导弹是依靠弹体产生的空气动力以及发动机的推力,沿着机动多变的弹道自主飞行,并将战斗部载荷投送到目标的武器,可以说,飞航导弹从诞生就是一个人工智能系统,它具备了知识表示、感知、规划、运动控制等特征。如上所述,飞航导弹的智能化是渐进的概念,随着技术进步,飞航导弹的智能化也在不断提高,目前美国的远程反舰导弹(LRASM)被认为是当前智能化飞航导弹的典型代表。

由LRASM宣传片,部属在海上的美国舰艇编队派出挂载LRASM的F-48战机巡逻,监视卫星发现俄罗斯海上舰艇编队目标后,向指挥中心发送目标指示信息。作战指挥系统根据作战需求,发射两枚舰载LRASM,通过数据链由舰艇向导弹传输目标指示信息,随后F-48战机发射一枚LRASM导弹。弹间通过数据链进行通讯,可在GPS拒止条件下正常工作,并在线规划航迹。飞行过程中能自主感知突然出现的威胁,并对威胁进行建模,实现在线航迹重规划,绕过障碍。导弹飞到末段,首先用被动远距离探测目标,完成虚假目标剔除,高价值目标识别和锁定,并

降高贴海面超低空突防,在距离目标较近时用成像导引头实现目标薄弱部位识别,最终完成目标攻击。在此过程中,三发导弹还完成了自主的目标打击任务分配。可见,LRASM 在自主感知威胁、自主在线航迹规划、多弹协同、目标价值等级划分、目标识别等方面的智能化水平有了大幅度提高。

4 飞航导弹人工智能研究层级

为将人工智能技术更好地应用于飞航导弹,推进飞航导弹的智能化水平,本文根据人类认知控制行为模型,阐述了飞航导弹人工智能的研究层级。将人类决策性行为层、程序性行为层以及反射性行为层分别映射为具有物理意义的飞航导弹任务管理系统、飞行管理系统以及控制执行系统,各个系统的功能和待解决的问题如下所述。

任务管理系统是飞航导弹的决策性行为层。应具备更加全面的环境感知能力,包括在高度对抗的环境和恶劣气象(如雷暴、风切变、紊流)条件下,对更广阔范围的自然环境、各种威胁与敌我目标的感知与识别等,并且根据突发状况进行动态任务重规划,提高导弹系统作战响应的实时性。需要重点解决的问题包括:战场数据挖掘及自主决策、态势感知、模式识别、认知无线电、超维度物联等。

飞行管理系统是飞航导弹的程序性行为层。应具备在复杂战场和对抗环境下的自主导航能力,能够及时响应任务管理系统

的决策,完成飞航导弹运动协调规划与控制,以及多弹的编队飞行,具有对自身健康状态的管理能力,能够在突发故障状态下自主地完成容错控制。需要重点解决的问题包括:全源智能组合导航、健康管理与容错控制、编队控制等。

控制执行系统是飞航导弹的反射性行为层。采用新一代自主导航与智能控制技术,既能够实现在局部范围内动力和流场的精确控制,实现复杂的动作,也能够实现具有故障自修复和飞行环境自适应。需要重点解决的问题包括:控制律重构、面向飞行状态的适应性控制、面向任务的智能变形、电磁赋形、主动流动控制、多模式可控毁伤等。

5 飞航导弹人工智能发展路线

图3 为美国空军研究实验室无人机自主控制等级发展路线图。

美国空军研究实验室提出了自主作战的理念,定义了无人机10个自主控制等级(Autonomous

Control Level, ACL)。ACL1 ~ ACL3 追求的是成员个体的飞行控制能力,包括实时健康诊断、适应故障条件、在不同的飞行条件下能够自主的导航飞行;ACL4 开始追求成员个体的作战能力,代表了成员个体的最高性能,但是 ACL1 ~ ACL4 只是侧重于成员个体的自主能力。ACL5 ~ ACL10 则注重追求群体的联合作战能力,从群体协调到群体协同,从小规模机群的战术层面到大规模机群的战略层面,直至群体具备完全自主能力。其中,ACL7 ~ ACL10 是美军未来的主要发展方向。

本文结合人工智能技术和飞航导弹技术发展现状,针对作战使用需求,提出了飞航导弹人工智能的发展路线。

第一阶段,导弹子系统专用人工智能。该阶段主要是将最新的高效的人工智能算法应用到导弹子系统上,颠覆现有的方法,实现由传统的专家系统、神经网络等智能算法向深度学习算法过渡,提高导弹子系统的智能化水

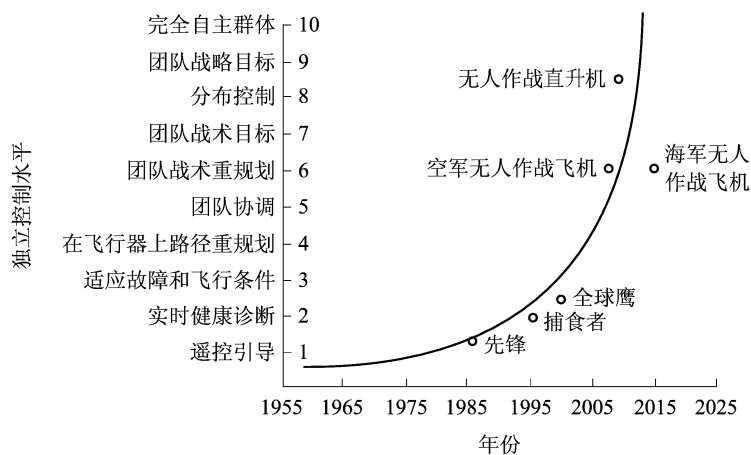


图3 美国空军研究实验室无人机自主控制等级发展路线图

飞航导弹 2017 年第 1 期

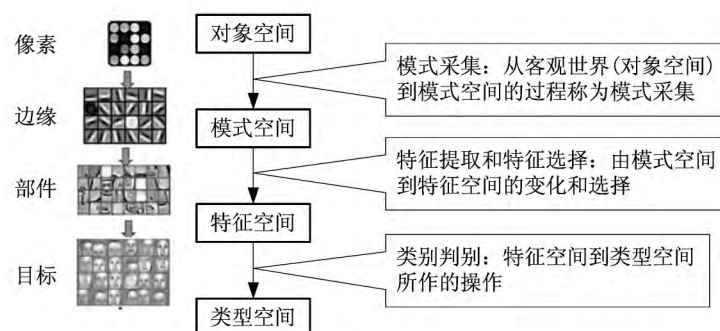


图4 模式识别空间描述与映射变换

平,从而提高整个导弹的作战效能。

第二阶段,人工智能飞航导弹大脑。该阶段的目标是单枚飞航导弹的人工智能化,实现类似于阿尔法的空战人工智能电脑。实时获取战场信息、处理信息,对态势进行预测,给出导弹下一步决策到执行全面由人工智能导弹大脑完成。该阶段要解决的根本问题是如何从海量的信息中提取有效作战信息,并能够自主做出决策。

第三阶段,社会型人工智能飞航导弹。本阶段的目标是,在第二阶段的基础上,实现多弹、导弹与无人平台、导弹与人之间的协同作战。该阶段需要解决弹间以及弹与无人平台、弹与人之间的协作问题。

6 飞航导弹人工智能重点研究方向

根据目前飞航导弹技术发展现状,结合飞航导弹人工智能发展路线,本文提出不依赖卫星的导航、模式识别、健康管理与容错控制、智能变形、认知雷达与认知对抗、智能毁伤、战场数据飞航导弹 2017年第1期

挖掘与自主决策、超维度物联、协同作战九大关键技术,作为飞航导弹人工智能当前重点研究方向。

1) 不依赖卫星的导航

不依赖卫星的导航将发展与任意导航传感器和敏感器组合方案相关的快速集成和重新配置的架构、抽象方法及滤波算法,降低系统集成成本,为用户提供无卫星导航服务条件下的高精度定位、导航与授时能力,满足不断变化的任务需求与环境变化的要求。

研究内容包括:开放式的导航系统方案及自适应导航滤波算法,实现多种传感器的即插即用的集成和重构;高精度小型化惯性导航设备,以提供高精度导航和授时;空间自然信息辅助导航技术,如地形地物、景象、星光、地磁、阳光等自然信息;人造信号辅助导航技术,如利用手机通讯、广播电视、商用卫星、光波、机载伪卫星、VOR/DME、TACAN、罗兰-C等信号;其它信息辅助导航技术,如视觉(图像)、多普勒等信息。

2) 模式识别

在复杂的自然环境和战场对抗环境下,为实现更高的作战效能而在导弹上自主开展的目标识别、敌我识别、威胁识别、障碍物识别等运算过程,在学科上均属于模式识别的范畴。在飞航导弹应用过程中,重点是要解决四个空间的描述与映射变换,如图4所示。

模式识别的主要方法有:统计模式识别、句法结构模式识别、模糊模式识别、人工神经网络模式识别、模板匹配模式识别。

3) 健康管理与容错控制

飞航导弹自身能够根据飞行状态和感知的外部信息,自动检测、推理判断运行过程中已经发生的或潜在故障,并主动调整控制器,解决在故障状态下的稳定飞行和后续任务执行策略问题,实现故障容错。其容错层级分为弹上分系统级容错、导弹个体级容错和群体容错。容错执行的结果分为增强置信度、降额使用或任务改变。

考虑飞航导弹故障特点,容错控制面临不确定性、复杂性和模糊性的问题。由于专家系统、

模糊逻辑和神经网络这三者都具有解决人工智能中知识表达与不确定性推理的信息表达和处理能力,因此,需要对这些技术进行交叉与结合,实现智能容错控制。研究内容分为有限分布式测量信息故障诊断技术、故障巡航导弹能力评估技术、自适应容错控制与智能决策技术。

4) 智能变形

智能变形飞行器是一种具有智能功能,按需应变的多用途、多形态的全新概念飞行器。它能够根据飞行环境、飞行剖面和作战任务的不同进行自主变形,对其自身特性进行智能调节和变化。

智能变形在飞航导弹上的应用形态主要包括以下几种:物理变形,如滑动蒙皮、伸缩翼、可变后掠翼,这种变形方式是通过直接改变外形结构,改变导弹气动性能,实现变速度、变航迹机动以及长航时、大空域、经济飞行,并保持在全飞行包络内不同的任务剖面具备良好的战术技术性能;RCS 变形,如电磁赋形,是通过改变材料的几何形状,实现等效的电磁参数渐变,进而控制雷达波偏转,实现主要探测角域内的 RCS 减缩;局部气动变形,如主动流动控制,是通过对运动的流体施加力、质量、热量、电磁等物理量来改变流动状态,从而改变运动物体的受力状态或运动状态。

5) 认知雷达与认知对抗

认知雷达是第五代雷达的发展方向。在密集杂波、多目标背景等日益复杂的战场环境下,传

统雷达所采用的固定发射信号、接收端的自适应处理及滤波算法的设计已难以进一步提升雷达的性能。认知雷达是具有感知周围环境能力的智能、动态的反馈系统,该系统通过先验知识(内在的和外在的)以及与合作环境的交互来感知环境,并进行检测、分析、学习、推理和规划,在此基础上,实时调整发射机和接收机的参数,使用最合适的系统配置(频率、信号形式、发射功率、信号处理方式等)来适应环境的变化,达到与外部环境和目标状态相匹配,从而有效、可靠、稳健地达到预定目标。其作用是一方面可提高雷达的探测能力,另一方面可提高雷达的环境适应能力,提高抗杂波、抗干扰能力。

认知对抗也称认知电子战,是依据实时环境态势感知、作战效能评估以及学习、积累的结果,动态地自主调整攻击与防护策略,通过流程的闭环,实现智能、高效的信息对抗。

6) 智能杀伤

目标智能杀伤指根据目标类型、遭遇条件、环境条件和目标要害等的不同,自适应地调整引信起爆方式和启动位置,改变战斗部的杀伤方式,以达到对目标的最大杀伤效果,减小附带杀伤。对飞航导弹而言,当前迫切需要解决的是适应陆、海、空、电磁目标一体化打击的智能毁伤技术,智能毁伤主要包括智能引信技术和智能战斗部技术。

智能引信指能自适应地调整起爆点和起爆方式,提高引战配合效果,达到最佳毁伤,涉及的

技术包括:引信与制导一体化、引信智能抗干扰、战斗部起爆方式控制。智能战斗部涉及的技术包括:子弹头智能抛撒及智能爆炸成型弹头技术,借助可变形智能材料发展,应用智能材料的变形特性,设计战斗部的外壳,根据目标类型改变战斗部形状。

7) 战场数据挖掘与自主决策

美军在伊拉克战争中依靠网络中心战的作战环境,通过数据链将高度分散的作战力量链接在一起,一旦发现敌情,作战指挥中心便可通过漫游者软件和 Link 16 等数据链,实时快速地对分析与评估作战对手的实力和规模,优化配置作战力量,实施有效打击。当前飞航导弹的任务规划系统和空间数据管理初步涉及数据挖掘的相关技术。

飞航导弹在实际飞行中受到很多不确定因素的影响,如平台信息的不确定、目标任务的变化、环境和战场态势的变化,以及复杂的非线性因素等。面对这种复杂、不确定的作战条件,导弹必须具备一定的自主决策能力。自主决策就是当发现目标并经目标识别和态势评估后调取决策数据库中的决策信息,在这些信息的激励下,对导弹的战术意图和行为做出实时决策。

8) 超维度物联

物联网是一种将任何物品通过信息传感设备与互联网联结,实现智能识别、定位、跟踪、监控和管理的网络技术。美俄第六代战机的一个显著特点就是通过物联网构成的作战平台。

飞航导弹超维度物联网要实

飞航导弹 2017 年第 1 期

现与陆基、空基、海基、天基授权用户的在线访问,实现超越维度的“即插即用”式物联,实现基于物联网的互联、互通、互操作,以最大限度地提高作战效能。

9) 协同作战

协同作战是为提高飞航导弹自主作战能力,充分利用飞航导弹飞行轨迹可控性强的特点,在多弹编队飞行过程中,通过多传感器协同、多弹协同和编队协同,而采取的导航、制导与控制技术的总称,是未来导弹武器进行体系化作战的关键技术。

协同探测是突破飞航导弹体积的约束,将多个导弹上的传感器协调应用形成更大的探测口径,提高探测能力;另外,通过多元传感器融合可以提高导弹对复杂对抗战场环境的适应性,提高综合抗干扰能力。

多弹集群是多发具有自主能力的导弹,参照自然界中蜂群、鱼群等的行为模式,通过相互间的信息交换和有限的人员干预,完成预期任务的模式。编队控制是多弹集群协同作战的基础,主要涉及编队组成/重组和编队的稳定性、鲁棒性。目前,很多研究者在对生物界中的鱼群、蜂群、鸟群等集群行为进行研究,建立仿生控制模型,同时结合动态系统理论、开关系统、图论和运筹学等。

美国海军正在研发一种能够在 1 min 内发射 30 架袖珍无人机的新型装备。这种装备发射的无人机能够像蝗虫群一样扑向敌人,因此被命名为蝗虫袖珍无人机群作战系统。该系统研发计划

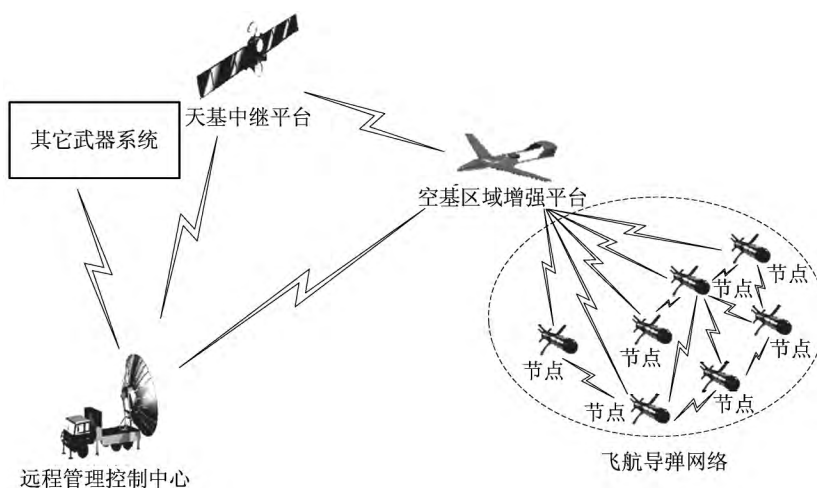


图5 飞航导弹超维度物联示意图



图6 美国蝗虫袖珍无人机群

经理李·马斯特罗扬尼说,这种无人机既能单独执行任务,也能组成编队集体执行任务;不仅能执行预先编程任务,还能自主执行任务。战争中,在实现对方封锁的前提下,用蝗虫系统首先实施 90 min 攻击,可发射 2 700 架无人机,可对机场、雷达站、导弹发射基地、弹药库等发动饱和式攻击,即使这些无人机被击落,对方将耗费超过 2 700 枚以上的防空导弹。在被封锁的前提下,如此大的耗费根本难以承受。

7 结束语

飞航导弹人工智能是人工智能技术在飞航导弹武器领域的一种创新应用,是未来武器发展的一个重要技术群,值得相关科研单位联合开展研究,以快速形成技术优势。相信,随着人工智能技术不断渗透到飞航导弹的各个组成部分,在未来信息化空天战场中,飞航导弹的功能和性能将得到极大提升。

(下转第 54 页)

SA-ARM 混成群纵深会歼宽正面配置,旨在基于 SA-ARM 反辐射火力充分发挥常规中远程武器火力,以拦截敌空中进攻编队。配置时,考虑到 SA-ARM 阵地对空安全,其一般配置于常规火力单位后方,确保常规火力对 SA-ARM 阵地的掩护,同时常规火力单位在敌空袭主要方向的当面,呈横向一线配置,扩大拦截正面宽度。

实施逐层抗击宽正面部署时,SA-ARM 系统负责远程反辐射节点打击,常规防空系统负责来袭常规目标拦截以及对 SA-ARM 阵地的掩护。中程常规防空系统的配置要满足作战任务需求的拦截宽度,且在远程常规防空火力的掩护范围内尽量前伸部署,扩大常规防空火力远界,常规近程火力单位配置在 SA-ARM 阵地附近,在担负近程防空的同时末端掩护 SA-ARM 阵地的对空安全。

5 结束语

随着武器装备技术的快速发展,地空反辐射导弹武器系统也逐渐由技术预研向工程研制,并最终向作战使用迈进,鉴于装备作战使用特点,SA-ARM 武器系统与常规防空装备混编作战势在必行。以此为背景,对 SA-ARM 混成群兵力部署开展了深入研究,研究成果可为 SA-ARM 混成群作战兵力部署提供参考。后续,将围绕 SA-ARM 武器系统作战运用持续开展研究,并依托有关仿真平台对研究成果进行验证,以期为该新体制防空武器作战使用提供借鉴。

参考文献

- [1] 陈鸿猷,郭有全,王颖龙. 中国人民解放军空军地空导弹

兵战术学. 北京: 解放军出版社, 2014

- [2] 马拴柱,刘飞,曹泽阳. 地空导弹射击学. 西安: 西北工业大学出版社, 2013
- [3] 顾尔顺. 地空反辐射导弹综合分析研究. 地面防空武器, 2010(1)
- [4] 吴诚,预警机——现代战争的空中指挥所. 科技风, 2010(6)
- [5] 季军亮,陈斐,李炜. 地空反辐射导弹武器系统防空作用分析. 飞航导弹, 2014(5)
- [6] 孙德海. 国外电子战发展综述及对电子战研究的思考. 舰船电子对抗, 2013(1)
- [7] 刘大勇,刘佳,杨慧君. 美国 F-35 联合攻击战斗机的机载武器. 飞航导弹, 2015(8)
- [8] 成茂英,蔺卫,罗金亮. 信息化条件下空中作战任务规划问题研究. 飞航导弹, 2015(9)
- [9] 李朝伟,黎湘,庄钊文. 地空反辐射导弹抗目标关机技术研究. 电子对抗技术, 2012(4)
- [10] 朱刚,谭贤四,王红. 军事体系结构框架元模型发展趋势. 飞航导弹, 2014(16)
- [11] 张伟杰,武卉明,冯复祥. 美军空基巡航导弹作战使用研究. 飞航导弹, 2014(10)
- [12] 陈兢,高雁翎. 国外防空反导系统新进展. 战术导弹技术, 2015(6)
- [13] 宋怡然,何煦虹,文苏丽,等. 2015 年国外飞航导弹武器与技术发展综述. 飞航导弹, 2016(2)
- [14] 张翼麟,文苏丽,陈英硕,等. 导弹协同作战的自组织网络技术发展. 飞航导弹, 2015(4)
- [15] 雷宇曜,姜文志,顾佼佼,等. 防空导弹协同制导交接班模型研究. 战术导弹技术, 2015(3)
- [16] 秦玉亮,于涛,邓斌. 地空反辐射导弹红外/被动微波复合导引头数据融合技术研究. 兵工学报, 2009(3)

(上接第 9 页)

参考文献

- [1] 杜晓菲. “阿尔法”来袭! 人工智能战机模拟空战中获胜. 环球网, 2016-06-29
- [2] 文苏丽,苏鑫鑫,刘晓明. 美国远程反舰导弹项目发展分析. 飞航导弹, 2015(4)
- [3] 宋怡然,何煦虹,文苏丽,等. 2015 年国外飞航导弹武器与技术发展综述. 飞航导弹, 2016(2)
- [4] 刘晓明,叶蕾,李文杰,等. 2015 年高超声速技术发展综述. 飞航导弹, 2016(7)

- [5] 夏国洪,王东进. 智能导弹. 北京: 宇航出版社, 2008
- [6] 杨宝奎. 构建以信息化为主导的无人机应用体系. 飞航导弹, 2015(4)
- [7] 薛俊杰,王瑛,祝捷,等. 美国无人机分布式处理系统研究现状综述. 飞航导弹, 2015(10)
- [8] 毕开波,董受全,张翼飞. 队形识别技术对反舰导弹作战使用的影响分析. 飞航导弹, 2015(12)
- [9] 陈晶. 解析美海军低成本无人机蜂群技术. 飞航导弹, 2016(1)