

无人系统集群及其对抗技术研究综述

刘鸿福 苏炯铭 付雅晶

摘 要 无人系统集群作战是智能时代重要的作战样式之一。围绕智能集群与对抗,综述了近年来无人系统集群的最新发展动态。深入梳理并分析了集群演化机理、对抗决策、智能控制、对抗态势感知 4 个方面关键技术的研究现状。讨论了集群对抗进一步需重点研究的技术难点及挑战。

关键词 无人系统集群 群体智能 集群对抗 群体决策 集群智能控制

引 言

智能无人武器的集群化运用,将颠覆性地改变未来作战“杀伤链”设计,催生新型作战样式,突破层级结构、线性积累等规律。集群系统的理论基础是群体智能(Swarm Intelligence),研究起源于法国生物学家 Pierre Paul Grasse 发现昆虫之间存在高度结构化组织可完成远远超出个体能力的复杂任务。

在军事领域,无人作战集群系统是由若干同构或者异构的智能无人装备通过自组织网络连接构成的智能群体,具有分布式感知、目标识别、自主决策、协同规划与攻击能力,具备分布式学习、智能涌现等群体智能行为特征。例如,将大量微型传感器网络机器人迅速地撒布在敏感区域,可用在大范围时空域内实施实时监控、感知敌情变化;由大规模无人机、无人舰艇和机器人等代替士兵进行侦察和作战;智能集群弹药具有良好协作和随机应变能力,提高火力打击的精度和效能。更进一步的作战

运用是:以适当规模的集群拦截集群、集群对抗集群。例如,以 50 架无人机对敌方 50 架无人机的侦察实施反监视,以 80 枚智能集群弹药对敌方 50 架无人机进行拦截攻击等。集群对抗对人工智能、自主决策与规划、集群控制、自适应组网通信等提出了更高的技术挑战。

1 无人系统集群研究与发展动态

无人机集群就是基于生物集群行为原理,以单个无人机间通过彼此的感知交互、信息传递、协同工作,在险恶的环境下可以低成本完成多样性的复杂任务。世界各军事强国均致力于开展无人机集群的研究。2016 年 5 月,美国空军正式提出《2016—2036 年小型无人机系统飞行规划》,希望构建横跨航空、太空、网空三大作战疆域的小型无人机系统,并在 2036 年实现无人机系统集群作战^[2]。美国国防预先研究计划局(DARPA)、战略能力办公室(SCO),以及空军、海军等开展了大量的研究和论证工作,并启动了多个项目。下面对美军相关项目的最新进展综述如下。

1.1 山鹑(Perdix)微型无人机项目

山鹑微型无人机高速发射演示项目由美国国防部战略能力办公室(SCO)主导。2014 年 9 月,SCO 首次利用 F-16 战机开展山鹑无人机空中发射试验。

基金项目:国家自然科学基金项目(61403411; 61702528)

本文 2018-06-21 收到,刘鸿福、苏炯铭分别系国防科技大学副研究员、讲师

2017 年 1 月,美国军方公布了其近期开展的一次微型无人机蜂群演示。演示中,美国海军 3 架超级大黄蜂战斗机(F/A-18F)以马赫数 0.6 的飞行速度投放了 103 架山鹑无人机,这群小型无人机演示了先进的群体行为,如集体决策、自修正和自适应编队飞行。

1.2 进攻性蜂群使能战术项目

2017 年 1 月,DARPA 发布了进攻性蜂群使能战术项目的招标书。OFFSET 项目主要工作是聚焦于开放式软件与系统架构、博弈软件设计与基于博弈的社群开发、沉浸式交互技术以及用于分布式机器人的系统集成与算法开发,开发并测试专为城市作战蜂群无人系统设计的蜂群战术。

该项目的第一阶段进度工作由雷锡恩公司(Raytheon)的子公司 BBN 技术公司和诺格公司承担。它们的技术团队将实现在虚拟和实体环境下面向群体技术的开放式无人体系架构的设计、开发和部署工作。其它参与该项目的竞争企业将会在该体系结构的基础上,重点从如下 5 项领域中分别进行技术研究:无人机蜂群体策略技术、无人机蜂群自主技术、人-机群结合技术试验、无人机蜂群虚拟环境试验技术和无人机蜂群实体试验环境技术。

1.3 DARPA 集群挑战赛

2017 年 4 月 23 日,DARPA 和美国陆、海、空三军学员开展了集群挑战赛,旨在鼓励开发创新的进攻性及防御性小型无人机集群战术。在无需生成大量认知数据情况下,提高集群在复杂环境中的作战能力。项目的主要挑战包括:无人系统密切协同、区域快速搜索、态势感知、决策制定等相关难题。在为期 3 天的比赛中,美国海军学院最终战胜了美国军事学院和美国空军学院赢得挑战赛的冠军。

1.4 多弹同步作战巡飞弹项目

2017 年 6 月 22 日,美陆军发布了巡飞弹集群同步作战技术(MSET)信息咨询书,拟在 2024 年前实现巡飞弹集群同步作战能力。MSET 是一个可配置可缩放的组合套件,通过人在回路监控,巡飞弹自主作战,实现快速实时对多个分散目标进行探测和打击。

• 36 •

1.5 基于导弹部署的集群智能弹药系统项目

美陆军 2017 年发布了基于导弹部署的集群智能弹药系统项目,旨在发展一种可利用美陆军制式的制导火箭弹(MLRS)或陆军战术导弹(ATACMS)发射的巡飞弹集群。该系统由多架智能多旋翼巡飞弹组成,巡飞弹可携带 EFP 战斗部,可以对目标进行攻击。

1.6 海上蜂群项目

海上蜂群项目是由美国战略能力办公室与海军研究实验室合作,正在研发的可以集群协同作战的无人水面航行器。该项目将演示验证无人水面航行器之间生成通用态势感知地图的能力,以及保持系统作战所需要的协作动态规划能力。

在无人系统集群研发领域,我国也在加快跟跑、并跑的步伐,国内多家科研机构在民用、军用无人机集群上积极投入研发,进步迅速。文献[3]对 2017 年前无人机集群对抗进行了综述,指出了需研究的关键问题。清华大学构建了一种在实验室环境下低成本的人工智能集群控制演示验证系统^[4]。该系统以机动自组织探测集群为验证对象,对基于人工势场法的自组织控制策略进行了演示验证。2017 年 10 月,中国电子科技集团公司完成 119 架固定翼无人机集群飞行试验,119 架小型固定翼无人机成功演示了密集弹射起飞、空中集结、多目标分组、编队合围、集群行动等动作。

2018 年空军装备部正在积极举办无人争锋智能无人机集群系统挑战赛。本次挑战赛旨在考察无人机集群的智能自主水平。重点考核无人机集群密集编队、精确高速避障、协同搜索识别和定位、集群协同策略和动态任务规划、空中精确定位、精确编队和空中预对接等技术创新水平。相信通过该比赛,将充分展示我国在无人机集群方面的最新成果,检验无人机集群技术的实战化运用水平。

2 无人系统集群及其对抗关键技术研究现状

2.1 无人系统集群对抗建模与群体智能演化机理

无人系统集群对抗行为在本质上与多智能体系统具有相似的特征。每个个体根据空战对抗中己方和敌方的态势进行学习,并调整自身的行为应对各种战场局势。因此,罗德林等人^[5]引入了多 Agent

飞航导弹 2018 年第 11 期

系统的理论、空战态势评估方法和空战对抗理念,将个体无人机视为独立的 Agent,并设计了相应的行为集和决策方法,以此建立大规模无人机对抗模型,自适应地完成无人机集群之间的协同对抗过程。文献[6]也根据多智能体系统的原理,提出了一种将 UAV 建模为智能体的方法,并构造了一个满足仿真环境需要的模型,研究人员可以利用该模型进行评估和分析集群控制机制。

随着战场态势的不断演变,集群个体必须与己方个体进行协作,并与对方进行博弈。采用博弈论对集群协同对抗过程机理进行建模及表述是目前的一个重要研究趋势。文献[7]分析了无人机空战中对阵双方的攻防策略及毁伤概率,然后建立了无人机集群作战的完全信息博弈模型。采用了改进的纳什均衡的粒子群算法对此类模型进行求解。但是,在实际战场环境中,由于机载传感器精度或环境中的各种干扰因素,往往不能精确地获得各种信息。因此,文献[8]通过分析无人机空战态势信息的不确定性,建立模糊信息下的多无人机动态博弈的作战优势函数。将动态扩展式博弈转化成静态策略式博弈,构建基于模糊信息的双方博弈的支付矩阵。将模糊结构元方法和粒子群算法相结合,给出模糊信息下动态博弈的混合战略的纳什均衡求解方法。文献[9]分析了实际战场中目标价值和毁伤概率信息的不确定性。以敌我双方发射导弹的价值信息为依据,建立基于不确定信息的多 UAVs 攻防对抗的支付函数,构建攻防双方博弈支付矩阵。将粒子群算法和区间数多属性方案排序方法相结合,给出基于不确定信息下博弈纳什均衡求解方法。文献[10]提出了一种基于捕食者与被捕食者粒子群优化算法的博弈论方法(PP-PSO),以及将军用应用中的多无人作战飞机的动态任务分配问题分解和建模为双方博弈游戏的每一步决策问题。最优分配方案的每一步可以建模为混合纳什均衡,可以采用 PP-PSO 进行求解。

已有的国内外研究成果分析了无人系统集群对抗中的关键因素,并给出了集群对抗行为的简化模型及求解方法。为进一步定量分析和研究无人系统集群对抗的非线性动态过程及群体智能演化指明了方向。

飞航导弹 2018 年第 11 期

2.2 集群协同决策与对抗自主决策

无人系统集群在不确定环境中和最少的人工干预下,通过集群协同决策,促使各个个体自适应地采取某种机动策略,使无人系统集群涌现出更有效的智能行为。

贝叶斯网络(BN)是一种能够对复杂系统进行建模和推理的有效工具,广泛应用于不确定环境下的决策及智能推理等领域。随着 UAV 的大规模发展和使用,学者们逐渐将 BN 应用于指挥和控制系统中。针对不确定环境下无人机任务决策问题,文献[11]提出一种基于变结构离散动态贝叶斯网络的自适应推理算法。该算法能够利用软硬证据和先验信息动态地调整任务决策模型参数,通过推理和参数学习互动的方式使任务决策模型具备适应动态环境的能力。

针对自主空战过程中无人作战飞机自主进行决策的问题,文献[12]提出一种基于飞行员空战经验的智能战术决策方法。首先,将飞行员空战决策经验知识根据情境表示为经验型隐性知识。然后,采用认知主导的情境推理方法实现直觉决策和云模型的定性规则推理方法实现分析决策,从而得到 UCAV 智能决策。文献[13]将飞行员空战经验与贝叶斯网络相结合,提出了一种基于飞行员空战经验知识库的机动判决算法。首先,建立了一种考虑历史态势的贝叶斯态势预测评估模型,同时对飞行员空战经验和启发式的多 UAV 协同攻击策略进行数学建模以提高决策的效率。最后,采用纳什均衡算法求解每个离散时刻点 UAV 的最优机动。

在 UAV 的中距离空中对抗中,实际战场环境中往往存在诸多不确定的因素以及对决策的实时性要求较高。文献[14]通过研究和分析 UAV 空中对抗过程中影响决策的主要因素,并建立了对应的专家系统和模糊贝叶斯网络模型。最后结合专家系统和贝叶斯网络的优点,给出了一种基于规则集和模糊贝叶斯网络的混合战术决策方法。

针对无人集群对抗系统的大规模、复杂多机动态交互性。有些学者提出根据贝叶斯理论的实时态势评估方法,将多对多的空中对抗模型转化为一对一的对抗模型^[15]。然后,进一步采用影响图方法分

析了多 UAVs 协同空战的机动决策过程,并建立决策模型。

2.3 无人系统集群智能控制与编队控制

无人系统集群是由若干同构或者异构的智能无人装备通过自组织网络连接构成的智能群体,具有分布式的特征。其智能控制方法主要有局部规则法、领航法、人工势场法等。

局部规则控制方法是通过设计智能个体的若干行为规则,然后将行为规则的各个控制分量进行加权得到个体的控制参量,从而控制个体的具体行为,并且使得集群系统涌现出预期的行为。孙强等人^[16]基于集群智能理论建立了 UAVs 系统概念模型,在考虑智能个体排斥作用、一致作用、吸引作用和个体行动意愿作用 4 种因素的情况下建立了集群运动的变系数(Repulsion Matching Attracting Desire, RMAD)控制器模型。以此为基础,研究了所有个体掌握航迹信息和部分个体掌握航迹信息两种情况下 UAVs 自组织飞行控制问题,提出 UAVs 自组织飞行控制策略,实现了 UAVs 可控性自组织飞行。针对 2D 平面和 3D 空间,文献[17]探讨并研究了几种基本的 UAVs 集群规则。基于两种典型的碰撞避免规则(Group-wise 和 Individual),提出了一种自组织自主分散决策的方法以达到碰撞避免。

在集群中设定少数领导者,通过局部的信息交互起到领航作用,在领导者的领航作用下达到控制集群行为的目的,即为领航控制方法。文献[18]针对高质量的森林地图场景,在 UAVs 集群中挑选一个领航 UAV,建立了一种 UAVs 集群移动拓扑网络模型,并提出了一种解决 UAVs 集群的编队飞行方法,以完成复杂的森林环境下的集群编队飞行任务。文献[19]假设虚拟领导者的作用范围是全局的且虚拟领导者以恒速运动,提出了一种基于领航反馈的集群算法,使群体能够跟踪上虚拟领导者。文献[20]考虑虚拟领导者作用范围不是全局的且运动速度是不恒定的情况,研究了带有虚拟领导者的多智能体群实现群体匀速跟踪虚拟领导者的方法。文献[21]中,考虑了 Leader-Follower 增强策略的自适应性和鲁棒性,研究了在变化的环境中个体自行选择和跟踪新目标的能力。

人工势场法是将势能场的概念引入到集群系统

中,用势函数模拟影响个体行为的内外作用,群中个体在势函数的作用下行动,从而实现对集群系统的控制。安梅岩等人构建了一种在实验室环境下低成本的人工智能集群控制演示验证系统^[4]。该系统以机动自组织探测集群为验证对象,对基于人工势场法的自组织控制策略进行了演示验证。

文献[22]中提出了一种基于机器人和障碍物相对位置的控制模型,通过建立能调节引力场和斥力场比例的势场函数,有效地解决了机器人之间的势场远小于机器人与障碍物间的势场而引起的碰撞问题。文献[23]研究了未知环境中基于人工势场方法的移动机器人实时运动规划问题。文献[24]通过优化势函数的定义消除局部最小化和振荡问题,利用优化的势函数在已知和局部已知或未知的静态、动态环境中获得一个无局部最小和振荡的更好的最短路径,实现了规划与搜索控制。

上述 3 类集群控制方法都有一定的局限性,并且针对无人集群系统的高度复杂性,集群行为的多样性,仅靠单一的控制策略往往不能满足控制需求。因此,很多学者将多种控制方法相结合对集群系统进行控制取得了一定的成果。文献[25]研究了在动态环境中基于人工势场法构造状态反馈控制器,用以控制无人机群追踪移动目标。在该方法中,通过领航者和目标相对位置定义引力势场以驱动领航者追踪目标,其它机器人个体通过与领航者间的引力场而得到控制。文献[26]研究了无人机群的自主护航编队飞行问题,定义了虚拟领航者基于局部规则控制法引领护航编队沿着规划路径飞行,定义了运输机与护航机之间的人工势场函数实现护航编队飞行控制以及自主拦截进攻敌机。

2.4 无人系统集群对抗态势感知

无人系统集群是通过自组织网络连接构成的智能群体。集群中的个体可以看作是分布式传感器网络的每个节点。借鉴多传感器网络的协同探测和信息融合技术,无人系统集群通过个体间的协同和信息的融合可以获得更广的观测范围、更高的探测精度,从而实现对战场环境的全面感知。文献[27]提出了一种基于环境参数模型的分布式控制策略和智能个体的梯度控制方法。在模型的不确定因素下,

飞航导弹 2018 年第 11 期

最大化智能体的感知信息。Prithviraj Dasgupta^[28]借鉴昆虫集群克隆的思想,提出了一种使用 UAVs 集群进行自动目标识别的分布式模型,在该模型的基础上论证了目标识别任务分配的前向策略在效率上明显优于就近策略。文献[29]考虑在封闭区域内的 UAVs 网络完成任务的部署问题。优化智能体的部署使得监测整个区域的最大时间最小化。为此,该问题被形式化为最差情况下的发现问题,设计了一种分布式的协同控制策略,提出了碰撞避免以及合并最优方法以改进算法性能。

集群个体间的动态飞行过程非常复杂。但是对于执行监视任务的低空巡航飞行其本质上可以建模为平面定速巡航^[30],该模型的控制难点在于飞行器一直在不停地巡航飞行,短时间内局部难以控制。文献[31]提出了一种非线性梯度下降角度控制方法。由于每个 UAV 的探测能力有限,每个 UAV 只探测整个集群的某个局部信息,整个集群按照 PI (Proportional-Integral) 平均一致估计方法产生每个 UAV 期望的局部控制信息。文献[32]将合作博弈的思想引入到集群的协同监视过程中。各智能体(无人车)以实现群体聚集为“合作目标”,以降低自身能量消耗为“竞争目标”开展博弈。基于微粒群算法规划局部路径,最终使集群系统涌现出自主聚集监视行为。文献[33]使用 UAVs 集群对“移动目标”进行搜索。目标在预先制定的区域移动,并且试图躲避集群的检测。通过部署它们高效的几何飞行路线,优化它们的综合检测能力,最大化 UAVs 的搜索区域。

3 无人系统集群及其对抗技术难点与挑战

随着无人机、无人车、集群弹药、无人艇等智能化、集群化水平的提高和走向实用,无人集群系统对抗将成为越来越重要的一种作战样式,集群对抗技术将成为智能化战争的核心关键技术。当前已经取得了一些成果,但面临的技术难点和挑战还很多。

在群体对抗建模方面:一是对群体智能的演化、学习、自组织基本原理的认识仍不充分;二是在具体建模方法上,目前主要是将多对多的协同空战分解为单个无人机之间的对抗,或者将多 Agent 系统理论引入到无人集群系统,或者采用博弈论方

法给出一些简化模型;这与对抗动态过程的实际情况存在较大的差距,还需深入研究大规模无人集群协同体系对抗的动态自适应模型;三是集群对抗过程的演化机理。在双方甚至多方集群对抗的情况下,利用系统动力学、复杂系统理论、复杂网络理论建立各种因素的相互作用和信息的传递关系、网络拓扑架构,以及对集群对抗过程的定量和定性分析。

在集群协同决策与规划方面:一是深化集群架构的研究,一方面需要贴近作战理论与实践,如分布式作战等,另一方面是从理论上探索新型的群体智能协同组织架构与方法;二是在实际应用中,集群协同决策与规划所需的网络通信条件一般是带宽有限、资源有限的,单个平台/弹体上的决策计算资源也十分有限,如何在有限,甚至不可靠的通信、计算等资源下,进行有效、可靠的协同决策,面临新的挑战;三是群体决策的结果,需要让人或指挥员能够理解,进而信任智能决策的结果,可解释性也十分重要。

在集群智能控制方面:大规模智能无人集群系统是一类特殊的复杂系统。为了有效完成对抗作战任务,其控制包括多个层面:一是底层的运动控制;二是逻辑结构与关系的可控性;三是功能的优化与控制。如何对智能个体进行分布式控制,使得在集群对抗的不同阶段集群中的个体能够采取协同的行动达到所预期的对抗要求。目前的研究还大多停留在运动控制层面,且鲜有考虑对抗情形下的集群编队与运动控制。集群对抗过程个体存在不确定性,但通过集群的组织和控制,实现集群整体的可控,综合考虑对抗中的要素,对集群控制规则的深度和广度进行量化研究,研究适应于集群对抗的智能控制方法是将无人集群系统大规模应用于实战所必须攻克的难题与挑战。

4 结束语

无人系统集群对抗是未来智能化战争的重要作战样式。本文围绕以无人集群对抗无人集群的应用背景,综述了无人系统集群的最新发展动态,梳理并总结了集群演化机理、对抗决策、智能控制、对抗态势感知 4 个方面的关键技术。基于当前的研究

现状,展望了集群对抗进一步需重点研究的技术难点及挑战,以期望为该领域研究提供借鉴。

参考文献

- [1] Bonabeau A. Brief histroy of stigmergy guy theraulaz. *Artificial Life*, 1999, 5(2)
- [2] 牧野. 无人机集群作战技术研究进展及发展建议. *远望周刊*, 2017(1)
- [3] 罗德林,徐扬,张金鹏. 无人机集群对抗技术新进展. *科技导报*, 2017, 35(7)
- [4] 安梅岩,王兆魁,张育林. 人工智能集群控制演示验证系统. *机器人*, 2016, 38(3)
- [5] 罗德林,张海洋,谢荣增,等. 基于多 Agent 系统的大规模无人机集群对抗. *控制理论与应用*, 2015, 32(11)
- [6] Zhu Xueping. Model of collaborative UAV swarm toward coordination and control mechanisms study. *Procedia Computer Science*, 2015(1)
- [7] 王宏,李建华. 无人机集群作战指挥决策博弈分析. *军事运筹与系统工程*, 2017, 31(2)
- [8] 陈侠,赵明明,徐光延. 基于模糊动态博弈的多无人机空战策略研究. *电光与控制*, 2014, 21(6)
- [9] 陈侠,刘敏,胡永新. 基于不确定信息的无人机攻防博弈策略研究. *兵工学报*, 2012, 33(12)
- [10] Duan H B, Li P, Yu Y X. A predator-prey particle swarm optimization approach to multiple UCAV air combat modeled by dynamic game theory. *IEEE/CAA Journal of Automation*, 2015, 2(1)
- [11] 任佳,杜文才,白勇. 基于贝叶斯网络自适应推理的无人机任务决策. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(10)
- [12] 唐传林,黄长强,丁达理,等. 一种 UCAV 自主空战智能战术决策方法. *指挥控制与仿真*, 2015, 37(5)
- [13] Zu W, Gao Y, Chang H X, et al. A UAV formation maneuvering decision algorithm based on heuristic tactics knowledge. *The 29th Control And Decision Conference (CCDC)*, Chinese, IEEE, 2017
- [14] Geng W X, Kong F E, Ma D Q. Study on tactical decision of UAV medium-range air combat. *The 26th Control And Decision Conference (CCDC)*, Chinese, IEEE, 2014
- [15] Xie R Z, Li J Y, Luo D L. Research on maneuvering decisions for multi-UAVs air combat. *The 11th Control & Automation (ICCA) Conference*, Taiwan, 2014
- [16] 孙强,梁晓龙,尹忠海,等. UAV 集群自组织飞行建模与控制策略研究. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(7)
- [17] Sharma R K, Ghose D. Collision avoidance between UAV clusters using swarm intelligence techniques. *International Journal of Systems Science*, 2009, 40(5)
- [18] Matthias R Brust, Bogdan M Strimbu. A networked swarm model for UAV deployment in the assessment of forest environments. *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, Singapore: The Tenth IEEE International Conference, 2015
- [19] Olfati Sabe R R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2006, 51(3)
- [20] Su H S, Wang X F, Lin Z L. Flocking of multi-agents with a virtual leader. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2009, 54(2)
- [21] 王冬梅,方华京. 基于虚拟领航者的智能群体群集运动控制. *华中科技大学学报*, 2008, 36(10)
- [22] Kim D H, Wang Hua, Shin S. Decentralized control of autonomous swarm systems using artificial potential functions: analytical design guidelines. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2006, 45(4)
- [23] Zhang T, Zhu Y, Song J Y. Real-time motion planning for mobile robots by means of artificial potential field method in unknown environment. *Industrial Robot*, 2010, 37(4)
- [24] Li G H, Tamura Y, Yamashita A, et al. Effective improved artificial potential field-based regression search method for autonomous mobile robot path planning. *International Journal of Mechatronics and Automation*, 2013, 3(3)
- [25] Dang A, Horn J. Formation control of leader-following UAVs to track a moving target in a dynamic environment. *Journal of Automation and Control Engineering*, 2014, 3(1)
- [26] Liang X L, Sun Q, Yin Z H. A study of aviation swarm convoy and transportation mission. *Advances in Swarm Intelligence*, Berlin: Springer, 2013
- [27] Lynch K M, Schwartz I B, Yang P, et al. Decentralized environmental modeling by mobile sensor networks. *IEEE Trans Robot*, 2008, 24(3)

(下转第 91 页)

飞航导弹 2018 年第 11 期

表6 投弃发动机进行的 BATES 系列试验

试验情况	BATES-1	BATES-2	BATES-3
试验日期	2007 年 10 月 2 日	2007 年 10 月 9 日	2007 年 10 月 17 日
描述	采用自由体积模拟器的 点火器组件试验	轴向喷管组件试验	倾斜和斜接喷管组件试验
试验构型	<ul style="list-style-type: none"> • 全尺寸点火器 • 开放式 BATES 燃烧室 • 无喷管 	<ul style="list-style-type: none"> • 缩比点火器 • BATES 燃烧室, 装有约 1/4 飞行质量的推进剂 • 单喷管、轴向, 与飞行状态相似的喉部(较大) 	<ul style="list-style-type: none"> • 缩比点火器 • BATES 燃烧室, 装有约 1/4 飞行质量的推进剂 • 单喷管, 倾斜和斜接, 与飞行状态相似的喉部(较大)

一代载人太空船,其发射紧急逃逸系统采用了不同于历史上阿波罗飞船发射逃逸系统的新设计,应用了多种固体火箭发动机新技术。尤其值得注意的是,在新一代发射紧急逃逸系统的3台固体发动机中,有两台发动机(分别是姿态控制发动机和投弃发动机)都采用了可控推力固体火箭发动机技术。这也意味着原本应用于导弹防御领域的可控推力固体技术开始在航天探索任务中崭露头角,同时也代表着可控推力固体发动机的技术水平取得了显著的进步。

参考文献

- [1] Jim Geffre. Orion program overview. 2016
- [2] Orion crew exploration vehicle. www.nasa.gov
- [3] Daniel S Jones. Executive summary of propulsion on the Orion abort flight-test vehicles. NASA/TM-2012-216049
- [4] Daniel S Jones. Orion launch abort system (LAS) propulsion on pad abort 1 (PA-1). Salute Event Edwards AFB, CA, March 2nd, 2015
- [5] The Orion pad abort (PA-1) flight test: a propulsion success. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140017388> 2018-01-15T07:11:49+00:00Z
- [6] Attitude control motor (ACM) for the orion launch abort system. Orbital ATK, Dec. 15, 2009
- [7] An overview of materials structures for extreme environments efforts for 2015 SBIR phases I and II. NASA/TM-2017-219461
- [8] David McGrath. ATK advances in solid propulsion. October 9, 2014
- [9] Rachel J McCauley. Orion launch abort system jettison motor performance on exploration flight test-1. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150016522> 2018-03-29T02:06:18+00:00Z

(上接第40页)

- [28] Prithviraj Dasgupta. A multiagent swarming system for distributed automatic target recognition using unmanned aerial vehicles. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part A: Systems and Humans, 2008, 38(3)
- [29] Hu J W, Xu Z. Distributed cooperative control for deployment and task allocation of unmanned aerial vehicle networks. IET Control Theory and Applications, 2013, 7(11)
- [30] Lalish E, Morgansen K A, Tsukamaki T. Oscillatory control for constant-speed unicycle-type vehicles. Decision and Control, New Orleans, LA, USA: The 46th IEEE Conference, 2007
- [31] Fabio Morbidi, Randy A Freeman, Kevin M Lynch. Estimation and control of UAV swarms for distributed monitoring tasks. American Control Conference, San Francisco, USA, 2011
- [32] 王训, 王兆魁, 张育林. 基于合作博弈的智能集群自主聚集策略. 国防科技大学学报, 2017, 39(2)
- [33] Yaniv Altshuler, Vladimir Yanovsky, Israel A Wagner, et al. Efficient cooperative search of smart targets using UAV swarms. Robotica, 2008(6)