

多无人机协同空战关键技术研究

吕鹭, 王健

(中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

摘要: 无人机零伤亡、低成本和高机动性等优点使其在越来越复杂的空战中表现出极大的优越性; 多无人机协同作战已成为现代空中战场的主要作战形式之一。本文从协同空战的无人机航迹规划和攻击决策这两个关键技术出发, 概括并比较了现有技术的优缺点, 最后对多无人机协同空战技术做出展望。

关键词: 协同空战, 无人机, 航迹规划, 攻击决策

0 引言

随着计算机和通信技术的迅速发展, 无人机 (Unmanned Air Vehicle, UAV) 的研制已取得了突破性的进展。机动灵活的无人机与有人驾驶飞机相比, 具有尺寸小、重量轻、成本低、维护少、隐蔽性强、机动性高、适应性强等优点, 已广泛应用于侦察、监视、攻击、拦截等作战任务中。无论在军事领域还是民用领域都得到了广泛的关注。毋庸置疑, 无人机在未来的空战中, 将会扮演越来越重要的角色^[1-2]。

近年来, 由于空战环境的复杂性及瞬时性, 一对一的空战方式已不能满足战场需求, 多无人机的协同空战应运而生。多无人机协同空战, 顾名思义, 就是指多架无人机相互配合、相互协作、执行战斗任务的作战方式。无人机协同空战通过数据链进行信息传输, 若有合理且有效的协同策略, 多无人机协同作战就能发挥出很好的效能。另外, 随着数据链系统、协同决策等系统的计算和通信能力的提高, 以及 UAV 机动性的提高, 智能技术的广泛应用, 决策者能够制定出非常有效的攻击策略, 且使无人机具有自主决策能力, 这将会使无人机的应用前景十分广泛^[3]。

目前, 多无人机协同空战是指机群之间的攻防, 主要包括机群航迹规划、攻击决策和多无人机局域组网通信技术等。本文主要从前两个方面对协同空战技术进行阐述。

1 多 UAV 航迹规划技术

1.1 单架 UAV 航迹规划

无人机航迹规划就是在一定约束条件下, 寻找从起始点到目标点并满足无人机性能指标的最优或可行的航路, 达到保证无人机安全, 尽量减少被敌方防空设施捕获和击毁的概率的目的。其中, 约束条件包括 UAV 到达时间、燃料限制、威胁以及飞行区域大小等因素^[4]。其本质是多约束条件下最优或可行解的求解问题^[5]。无人机航迹规划主要包括四大部分, 即环境信息、飞行约束、航路目标和航路规划, 如图 1 所示。

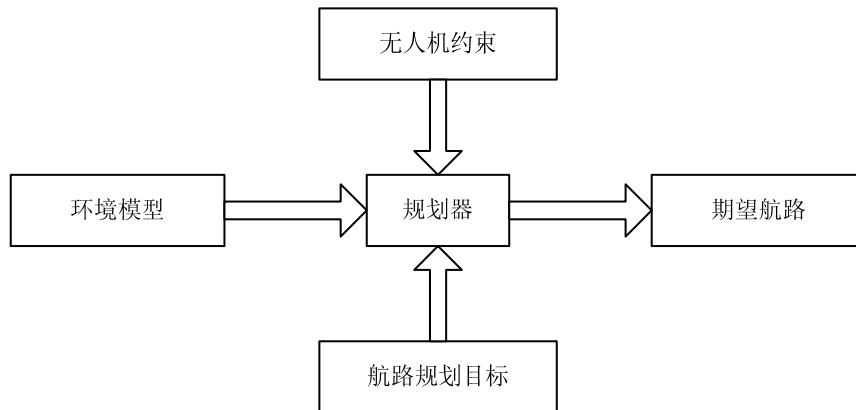


图 1 航迹规划框图

无人机的航迹规划涉及飞行力学、自动控制、导航、雷达、火控、作战效能分析、人工智能、运筹学和图像处理等多个学科和专业，是一个综合性的、难度很大的研究课题。一般情况下，UAV 航迹规划可分为三步：

- (1) 对环境进行建模；
- (2) 分析约束来源；
- (3) 利用航迹规划算法确定航路。

1.2 环境建模

要将无人机航迹规划技术应用于实际，首先要在一个经过科学、严谨地定义的环境中描述这个问题，使得航迹规划中牵涉到的无人机、航迹、障碍物以及威胁区域等概念在这个约定的环境里有具体的定义和表示，即环境建模。简而言之，环境建模就是提供一套科学的方法来描述和定义我们所要处理的无人机航迹规划问题。与空地作战不同，空战中所讲的环境一般情况下不包括自然环境。对无人机进行航迹规划可参考机器人路径规划采用的建模方法有状态空间法 (State space) 和位姿空间法 (Configuration space)。

由于协同航迹规划并未形成系统理论，因此对环境建模的描述也不尽相同。比如，很多学者将模型中十分重要的威胁因素单独提出来建模，称为威胁态势评估模型（这里主要是指对航迹上的已知和突发威胁的评估），基于动态贝叶斯网络 (DBN) 的威胁感知是常用且效果较好的方法之一。

1.2.1 约束条件

在无人机航迹规划约束中，主要有以下几种基本的约束，而对于特殊航路的约束则更加复杂。

- (1) 无人机的最小飞行距离 S ；
- (2) 无人机的最大航程 L ；
- (3) 无人机的最小飞行高度 H ；
- (4) 无人机的最大转弯角度 Φ ；
- (5) 无人机的最大爬升角 γ 等。

1.2.2 规划器

按照环境描述方式的不同，规划器可分为基于图形 (Graph-based) 的规划方案和基于栅格 (Lattice cell-based) 的规划方案。基于图形的航迹规划方法中，首先根据一定的规则将飞行环境表示成由一系列飞行航路组成的网络图，然后根据特定的评价函数对网络图进行航路搜索，最后得到最优航路，典型方法有切线图法、Voronoi 图法、PRM 法；栅格法将无人机的飞行环境分为一系列具有二值信息的大小相同或不同的单元格，其中的一些单元格为不可飞单元，其它的为可飞单元，每个栅格的信息用结构体类型定义。

航迹规划算法是航迹规划器的灵魂^[6]，许多学者在这方面作了大量的工作，常用的航迹规划算法可分为最优式和启发式算法；最优算法包括梯度法、穷举法、动态规划、牛顿法等；启发式算法^[7]则包括启发式搜索、神经网络、遗传算法^[8-10]、机器学习等。如在任务级航迹规划中有采用网络法，符号规划方法、试探法和知识推理法等方法进行规划，又如求解战术级突防航路问题，采用动态规划算法或 A* 算法得到优化航迹^[11]。另外，模拟退火算法、遗传算法、蚁群算法也在航迹规划问题中得到广泛应用，而快速扩展随机树算法则是这几年发展起来的一种新方法。

1.2.3 多 UAV 协同航迹规划

从现有的研究来看，多 UAV 协同进行航迹规划主要是指多架无人机形成团队进行联合作战的时候，每架无人机自主进行战略决策，并作为编队的一分子与其它成员机之间通过协同达到高水平任务指标，也就是说多无人机协同航迹规划是在使团队代价最小的前提下，满足每架无人机规避威胁、不可飞区 (No-Fly Zone)、燃料限制、团队要求、力学约束等条件，安全地飞抵目标点。与单架无人机航迹规划相比，多无人机协同航迹规划的约束更为复杂，不仅要考虑单架 UAV 的航路问题，还要着眼于整体，满足整体最优的要求。

一方面，航迹代价函数的具体形式与主观要求密切相关；另一方面，它也有一些硬性指标。例如，当 UAV 在不经过威胁区的预定航路轨迹上时，航迹代价主要考察航迹的长度。因此，如何设计航迹代价函数需综合考虑主客观因素。显然，代价函数是否合理直接关系到协同航迹规划能否达到最优。

3 多 UAV 协同空战攻击决策技术

多机协同攻击是指多架UCAV协同攻击多个空中分散的目标^[12],是未来空战的主要形式和发展趋势。多机空战与一对一空战相比,最显著的差别就是面对多个敌方目标需要根据我方资源为各个友机进行目标分配,而威胁评估和空战态势评估是目标分配和目标分配的基础。空战态势评估、威胁评估和排序、目标分配和火力分配一起构成了多机空战协同战术决策的核心内容。

3.1 空战优势

空战优势主要包括两个方面,即空战效能优势和空战态势优势。前者囊括了机动性、火力、探测性、飞行员操纵效能、生存力、航程及电子对抗能力等因素;后者主要考虑了角度优势、距离优势和速度优势等几何态势优势。当前,使用较多的威胁函数是通过无人机的角度优势、速度优势、距离优势和空战效能优势的线性加权来构建的,这种方法计算简单且较为有效,但没有考虑双方的作战意图,不能从整体编队的角度考虑目标的威胁等级,因此,有人提出采用灰色系统理论的关联度分析法的双层评判模型来计算威胁度和威胁等级^[19]。

3.1.2 威胁评估

威胁评估是根据态势情况,估计目标对无人机是否构成了威胁,以及威胁程度的大小。然后,根据威胁程度的大小对无人机进行目标分配。敌方目标威胁程度的大小是由多种因素决定的,在威胁评估时必须综合考虑,且要加入人的偏好信息^[13]。目标的威胁特征可描述为目标类型、威胁属性、威胁等级。在实际作战过程中,敌方信息较为保密,作为攻击方,只能通过传感器信息和经验、知识进行判断,通常情况下可得到目标类型、运动速度、方位、相对无人机的距离、目标的攻击能力等信息。目标的这些威胁特征是影响威胁评估的主要因素。

文献[14]对影响空战中目标威胁程度的指标进行了深入的研究,建立了综合威胁函数。文献[15]在目标综合优势度矩阵的基础上,提出了一种按照“优势下降准则”进行目标分配的算法。文献[16]分别从战役层和战术层两个方面,建立了分层递阶的空战目标攻击决策模型。文献[14-16]均建立综合优势度函数来对目标进行威胁评估,计算方法简洁,但是主观性不可避免。近年来,国外多应用计算智能理论与技术,使用专家系统、遗传算法、神经网络等进行多目标多属性决策、威胁评估。例如文献[17]使用遗传算法来分析和预测目标的行为,以此为基础进行威胁评估。文献[18]提出了一种基于贝叶斯网络的威胁评估算法。

3.1.3 目标分配

多无人机协同攻击在完成目标威胁评估的基础上进行目标分配。常用的分配方法有自主优先权的分配和协同优先权的分配,前者在不考虑与其它友机进行协同的情况下根据态势和威胁判断独自确定目标跟踪优先排序,这可能导致重复攻击和信息资源的浪费,称不上实际意义上的协同决策。

应用于目标分配的算法主要有启发式蚁群算法、启发式遗传算法、启发式粒子群算法、神经网络训练算法、模拟退火算法等,这些算法已得到较多应用,但依然存在明显缺点,如蚁群算法计算量大,遗传算法存在汉明悬崖(Hamming Cliff)的问题,粒子群算法容易陷入局部最优解等等。为了解决这些问题,很多研究者对现有算法进行了改进,如结合遗传算法的变异和交叉策略解决粒子群算法易陷入局部最优解的问题。

4 发展趋势

随着无人机所要执行任务越来越复杂,对航路规划和攻击决策的要求也将越来越高。不确定环境下的实时航迹规划和如何提高攻击效能将是未来的研究重点。实时航迹规划首要解决弱实时的航路规划,其次要解决战术级的强实时的航路规划问题;要提高无人机攻击效能必须在多无人机协同作战的基础上,通过提高通信能力和协作能力来完成。

参考文献:

- [1] 吕正学, 蔡群. 无人机作战运用及发展趋势刍议[J]. 国防科技, 2007, 04: 60-63.
- [2] 邹湘伏, 何清华, 贺继林. 无人机发展现状及相关技术[J]. 飞航导弹, 2006, 10: 9-14.
- [3] 朱昆. 无人机协同攻防关键技术研究[D]. 沈阳, 沈阳航空航天大学, 2011.
- [4] C. Goerzen, Z. Kong, B. Mettler. A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance[J], J Intell Robot Syst, 2010, 57: 65-100
- [5] 严建林, 李春涛. 无人机航路规划技术研究进展[J]. 航空计算技术, 2007, 37: 123-126.
- [6] P. R. Chandler et al. Research issues in autonomous control of tactical UAVs[J]. Proceedings of the American Control Conference, pp. 394 - 398, 1998.
- [7] 刑文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 清华大学出版社, 1999.
- [8] 张光澄. 最优控制计算方法[M]. 成都科技大学出版社, 1991.
- [9] Kwangjin Yang, Seng Keat Gan, Salah Sukkarieh. An Efficient Path Planning and Control Algorithm for RUAV's in Unknown and Cluttered Environments[J]. J Intell Robot Syst, 2010, 57: 101-122.
- [10] 曾佳, 周德云, 马云红. 基于五叉树搜索算法的无人战斗机航迹规划[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 01(36): 266-268.
- [11] Emilio Frazzoli et al. Real-time motion planning for agile autonomous vehicles[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 25, No. 1, pp. 116-129, 2002.
- [12] 符小卫, 高晓光. 多架无人作战飞机协同作战的几个关键问题[J]. 电光与控制, 2003, 10(3): 19-22.
- [13] 胡军, 都基焱, 刘文清. 多无人机控制与定位系统的研究[J]. 航空科学技术, 2004(3): 29-32.
- [14] 董彦非, 冯惊雷, 张恒喜. 多机空战仿真协同战术决策方法[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(6): 723-725.
- [15] 霍宵华, 朱华勇, 沈林成. 群机协同空战中的多目标攻击决策模型研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2573-2576.
- [16] 付新华, 王健. 多机协同多目标攻击的目标分配和攻击排序[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(3): 75-77.
- [17] Onsalves P G, Burge J E, Harper K A. Architecture for Genetic Algorithm-based Threat Assessment Information Fusion[A]. Proceedings of the Sixth International Conference of Volume 2[C]. 2003 First International, 2003.
- [18] Okello N, Thorns G. Threat Assessment Using Bayesian Networks Information Fusion[A]. Proceedings of the Sixth International Conference of Volume 2[C]. 2003 First International, 2003.
- [19] 朱艳萍, 姚敏, 赵敏. 敌对环境下多无人机协同空战决策[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(3): 12-16.