



# 飞行器任务规划技术综述

沈林成<sup>\*</sup>, 陈璟, 王楠

国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073

**摘要:** 任务规划是各类飞行器尤其是军用飞行器成功遂行任务的有效支撑和重要保证。首先,介绍了飞行器任务规划的基本概念;其次,系统地分析和梳理了任务规划技术的体系结构,从研究方法及对象的角度,将其归纳为面向多飞行器任务分配及协同的行动计划、面向飞行器战术动作实施方法设计的战术动作规划和面向飞行路径生成的航线/轨迹规划3个层次;随后,阐述了国内外飞行器任务规划各层次的研究现状,在问题建模与求解上所形成的代表性方法及其特点,以及飞行器任务规划在军事领域的应用现状;最后,论述了飞行器任务规划的关键技术及发展趋势。

**关键词:** 飞行器; 任务规划; 协同; 战术动作; 航线; 飞行轨迹

中图分类号: V19; TP18

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2014)03-0593-14

任务是对飞行器在空中所进行的活动的一种统称,如空中遮断、近距离空中支援、侦察、电子对抗、空运、加油等。对于有人机、无人机(Unmanned Air Vehicle, UAV)、巡航导弹等飞行器而言,任务规划主要指基于目标、地形、气象等环境信息,为飞行器制定出满足飞行性能等约束条件并使任务效能最优的任务实施计划。自20世纪80年代以来,世界各国纷纷开展了飞行器任务规划技术的研究工作,任务规划问题已逐步在控制科学、航空科学、信息科学等领域受到重视。研究人员在研究各种规划方法的基础上,通过多学科的交叉并结合人工智能、决策理论以及建模与优化技术,解决了一系列具有代表性的任务规划问题<sup>[1-5]</sup>,并研制出多种任务规划系统。目前,任务规划系统已广泛配备于各类军用飞行器及精确制导武器,成为巡航导弹作战使用所不可缺少的关键组成部分,以及作战飞机任务效能的倍增器。

任务规划技术在被广泛应用的同时,也暴露

出了许多新的问题,需要通过进一步的研究予以解决。其中一个主要问题是任务规划系统的烟囱式发展而导致的通用性降低,由于处在不同的系统和框架下,许多规划模型及数据无法通用,带来了开发、使用及维护的困难。同时,任务环境不确定性的增强、规划阶段由预先规划向动态实时规划转变都给规划方法及规划结果的有效性带来了考验。此外,随着平台、武器、航电技术的不断进步,新的规划需求也在不断涌现,任务规划技术也需要不断地向前发展和完善。

## 1 研究现状

飞行器任务规划是随着航空技术和制导/控制技术的进步及其在军事上的应用而形成的一个新的研究领域。在早期,飞行器任务规划主要侧重于研究及解决包括巡航导弹等精确制导武器在内的航线规划问题。随着作战飞机性能及装备水平的提升,以及高超声速飞行器等新型飞行器的出现,飞行器任务规划所涵盖的范围不断扩大,所

收稿日期: 2012-11-09; 退修日期: 2013-04-22; 录用日期: 2013-12-23; 网络出版时间: 2013-12-30 16:00  
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20131230.1600.001.html  
<sup>\*</sup> 通讯作者. Tel.: 0731-84573301 E-mail: lcshen@nudt.edu.cn

引用格式: Shen L C, Chen J, Wang N. Overview of air vehicle mission planning techniques[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 593-606. 沈林成, 陈璟, 王楠. 飞行器任务规划技术综述[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 593-606.

研究的内容更加深入,导致任务规划问题的规模和复杂性也在不断增加,主要体现在:规划要素多且相互耦合;指标/约束条件具有强非线性及不连续性;战场环境的动态性及不确定性增强;规划过程具有非马尔可夫特性;机载传感器、武器及电子对抗设备具有特殊的使用规则及要求;规划结果需体现作战意图及战术战法。为适应问题的不断发展和变化,任务规划方法逐渐呈现开放式的层次化特点,每一层在不同的细节粒度上进行求解,高层主要面向任务规划共性问题的研究,越往底层则与飞行器的性能特点及作战样式结合越紧密,如:巡航导弹航线规划受地形匹配区的约束<sup>[6-7]</sup>,直升机航线规划需关注沙尘和低空障碍等因素的影响<sup>[8-9]</sup>,高超声速飞行器轨迹规划需满足过载、热流、动压、能量等复杂的约束条件,其规划模型与弹道特征紧密耦合<sup>[10-12]</sup>等。

目前,国内外对飞行器任务规划问题已开展了大量的研究工作。美国国防部高级研究计划局(DARPA)主导的自治编队混合主动控制项目(Mixed Initiative Control of Automateams, MICA)<sup>[3,13]</sup>对多无人机的协同任务规划、协同航线规划、自主编队控制等问题进行了深入研究。美国空军研究实验室(AFRL)和空军技术研究院(AFIT)以多无人机广域搜索-打击一体化任务为研究背景,提出了协同任务规划的分层体系结构<sup>[14]</sup>。美国海军研究办公室(ONR)在其无人机智能自主计划中也对多类无人机的自主任务规划和动态重规划等技术展开了研究<sup>[15-16]</sup>。此外,包括加州伯克利大学、麻省理工学院、华盛顿大学、康奈尔大学、卡内基梅隆大学、英国宇航系统(British Aerospace)公司、波音公司、诺斯洛普·格鲁门(Northrop Grumman)公司、霍尼韦尔技术中心以及悉尼大学等在内的众多院校与科研机构针对飞行器的协同任务分配、协同目标跟踪、航线/轨迹规划等问题进行了持续而深入的研究<sup>[17-25]</sup>。在跟踪国外技术发展的基础上,国内各科研院所也相继开展了飞行器任务规划技术的研究工作,并取得了一定的进展<sup>[26-38]</sup>。

从总体上看,按照研究方法及对象进行划分,可将飞行器任务规划归纳为3个层次:行动规划,战术动作规划,以及航线/轨迹规划。其结构如图1所示。



图1 飞行器任务规划体系结构

Fig. 1 Architecture of air vehicle mission planning

在规划过程中,行动规划主要解决多飞行器的任务分配和协同规划问题,即对于给定的任务要求、总体目标及可用资源,为飞行器制定出最优的任务分配和行动方案。其中,行动通常以概略航线点的形式给出,如目标点、会合点等,各项行动之间通常需要满足空间及时序上的协同关系。针对某项行动,战术动作规划主要解决飞行器具体战术动作的实施问题,即根据行动的目标及约束条件、战场环境特点、平台/武器装备的使用要求等,确定威胁规避、传感器使用(Sensor Employment)、武器投放(Weapon Delivery)、电子干扰(Jamming)等动作执行的关键点、时机及参数。在战术动作规划的下一层次,航线/轨迹规划基于飞行器的飞行性能模型,规划出衔接各关键点及战术动作的最优航线或飞行轨迹。需要指出的是,在不同飞行器类型、任务、战场环境及作战要求下,任务规划问题研究的侧重点有所不同,如:单个飞行器在简单任务场景下一般只需进行航线规划,多个飞行器按时序到达多个目标等问题则可简化为行动规划和航线/轨迹规划2个层次。

通过上述层次划分,可以有效降低任务规划问题的整体求解难度,然而无法保证得到最优的规划结果。在许多复杂的情况下,规划过程需要在不同的层次间反复迭代,以获得最优或较优的任务计划。下面分别论述飞行器各层次任务规划问题的研究现状。

### 1.1 行动规划

行动规划一直是飞行器任务规划研究的热点之一,其核心内容主要由任务分配(Task Allocation)及协同规划(Cooperative Planning)2部分组成。其中:任务分配主要研究任务、目标、平台及

武器间的优化配置;协同规划则是在任务分配的基础上确定各平台所执行的行动及其时序关系。由于任务分配与协同规划的紧密耦合性,通常将其作为一个整体考虑。目前,该方向的研究工作主要结合特定的任务背景展开,典型的背景问题包括协同侦察<sup>[39]</sup>、协同目标跟踪<sup>[40]</sup>、协同攻击<sup>[41]</sup>、协同干扰<sup>[42]</sup>等,也可以是上述问题的组合。针对该类问题,一般将其转化为经典的组合优化问题模型,再利用与经典问题相关的理论及方法进行求解。目前典型的任务分配及行动规划模型包括多旅行商问题(Multiple Traveling Salesman Problem, MTSP)模型<sup>[43]</sup>、车辆路由问题(Vehicle Routing Problem, VRP)模型<sup>[44]</sup>、混合整数线性规划(Mixed-Integer Linear Programming, MILP)模型<sup>[45]</sup>、动态网络流优化(Dynamic Network Flow Optimization)模型<sup>[46]</sup>、多处理器资源分配(Multiple Processors Resource Allocation)模型<sup>[47]</sup>等。其中,MILP模型具有较强的可扩展性,是目前应用十分广泛的一类模型;VRP模型及其扩展带时间窗约束的CVRPTW模型具有较强的描述能力,并已成功用于“全球鹰”和“捕食者”无人机协同侦察任务规划的建模中<sup>[48]</sup>。田菁<sup>[49]</sup>将MTSP、VRP与MILP模型相结合,提出了具有时间窗约束并体现目标优先级、平台/传感器性能差异的多无人机协同侦察模型。针对更为复杂的问题,例如防空火力压制(Suppression of Enemy Air Defense, SEAD),其中多架飞行器需要分别对多个目标依次执行搜索、识别、攻击及毁伤评估等多种行动,Shima等<sup>[50]</sup>提出了协同多任务分配问题(Cooperative Multi-Tasks Assignment Problem, CMTAP)模型,该模型能够描述不同行动间的时序关系、促进关系和使能约束,较好地解决了复杂任务分配及协同规划的建模问题。

目前,对上述模型的求解主要有集中式和分布式2类方法。

集中式求解方法又可进一步分为最优化方法(Optimization Method)和启发式方法(Heuristic Method)2类<sup>[51]</sup>。其中,最优化方法包括穷举法(宽度优先或深度优先)、动态规划(Dynamic Programming)、分支定界(Branch and Bound)等。在问题有解的情况下,最优化方法基于某些假设可以保证给出问题的最优解。然而,由于任务分

配及协同规划问题的NP特性,最优化方法的求解难度随问题规模的增大而急剧增加,时间耗费呈指数增长。与之不同,启发式方法并不试图求得问题的最优解,而是在计算时间和解质量之间进行折中,其目的是用可接受的计算量来获得问题的满意解。启发式方法又可进一步分为传统启发式算法和智能优化算法,后者因为具有易于实现、计算复杂度低、性能优越等特点,在任务规划问题的研究中得到了广泛的应用。目前,常用的智能优化算法包括禁忌搜索(Tabu Search, TS)算法、模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法等。

随着飞行器性能的提升及自主能力的增强,分布式控制条件下的任务分配及行动规划问题求解逐渐成为了研究的热点<sup>[52]</sup>。该类研究主要面向任务的动态执行和自主求解,并在求解过程中考虑各平台之间的信息交互和协商。目前,常用的分布式求解方法主要分为2种:自顶向下(Top-down)和自下而上(Bottom-up)。自顶向下的方法<sup>[53-55]</sup>主要基于分层递阶求解的思路,将原问题分解为若干个子问题,各平台之间通过协商与合作完成对子问题的求解,其代表性方法包括:基于合同网(Contract Net)市场竞拍机制的方法、分布式马尔可夫决策(Decentralized Markov Decision Process, Dec-MDP)方法、分布式模型预测控制(Distributed Model Predictive Control, DMPC)方法、动态分布式约束优化(Dynamic Distributed Constraint Optimization, D-DCOP)方法等。与之相反,自下而上的方法<sup>[56-57]</sup>侧重于研究基于反应和行为主义方法的优化与协调策略,强调个体对环境的动态反应,通过个体的局部感知和反应交互作用来涌现整体自组织行为,具有计算简单、鲁棒性好等诸多优点。此外,分布式控制条件下的求解还要考虑通信的影响。Dionne和Rabbath<sup>[58]</sup>提出了异步间断通信条件下的分布式任务一致性(Decentralized Task Consensus, DTC)方法,其重点是通过群组内其他平台的状态进行有效估计,提高多平台间任务分配的效能;Godwin<sup>[59]</sup>和Liao<sup>[60]</sup>等分别针对有限通信范围和平台运动所产生的动态通信连接等问题,提出了有限通信条件下的决策-估计结构和多平台

信息共享及融合策略。从发展趋势看,研究通信受限情况下的分布式求解方法正成为目前任务分配及协同规划的一个重要方向。

## 1.2 战术动作规划

战术动作规划是在行动规划的基础上,确定飞行器具体战术动作的实施方式,如传感器开机点的选择、武器投放参数的确定、电子干扰的位置、时机及参数设置等。战术动作规划一方面要满足飞行器及其所搭载的武器装备的物理特性要求,另一方面又要符合指挥员的战术意图,是一个战术与技术紧密结合的规划过程。然而,由于对战术知识缺乏足够的了解,目前国内外的相关工作主要从技术角度对上述问题展开研究。在传感器的战术运用规划方面,Thomas<sup>[61]</sup>从较宏观的层面阐述了传感器使用规划问题,并对相应的规划需求进行了梳理;Tattelman等<sup>[62]</sup>阐述了美国空军研究实验室研发的气象影响辅助决策(Weather Impact Decision Aid, WIDA)软件的结构与功能,表明其可对机载光电/红外(EO/IR)传感器在各种气象条件下对地面目标的探测性能进行分析和预测;Skoglar等<sup>[63]</sup>建立了携带EO/IR传感器的无人机搜索/侦察规划模型;杨满忠等<sup>[64]</sup>对电视制导类武器导引头的有效作用距离进行了研究与分析;陈琦<sup>[65]</sup>根据机载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的成像原理,研究了斜视情况下机载SAR传感器的成像性能。在武器投放规划方面,相关研究工作主要集中在精确制导武器的可投放区计算及效能评估上。其中:West II<sup>[66]</sup>介绍了美国空军使用的制导武器轨迹软件(Guided Weapon Trajectory Software, GWTS),利用该软件可以对激光制导炸弹等武器的可投放区进行分析;Siewert等<sup>[67]</sup>提出了联合直接攻击弹药(JDAM)投放区的快速计算方法;耿丽娜<sup>[68]</sup>论述了国内外对无控型制导炸弹可投放区计算的研究现状,并提出了方案型可投放区和导引型可投放区的计算方法;在此基础上,张煜等<sup>[69]</sup>进一步提出了多目标攻击情况下可投放区的计算方法。针对武器效能的评估问题,曹邦武等<sup>[70]</sup>研究了基于数据统计分析的通用化目标三级等效易损体模型,可对特定武器攻击特定目标的毁伤效果进行分析和计算。在电子干扰规划方

面,目前的研究成果主要集中在对地面雷达的有源干扰效能分析上。其中:Chi<sup>[71]</sup>研究了多种情况下有源噪声干扰的效能评估方法;Mears<sup>[72]</sup>提出了多机协同实施欺骗干扰的效能评估模型;Kim和Hespanha<sup>[73]</sup>根据干扰平台与目标雷达的性能以及位置关系,将干扰效果划分为4类区域,并将其转化为干扰平台航线规划的约束条件。

在实际作战中,采取适当的战术动作对提升飞行器的作战效能及生存性具有重要意义。例如,根据防空导弹的反应时间特点,实施“钳形”机动可以有效地降低飞机被锁定及拦截的概率;机载SAR传感器在使用时需要实施跃升成像机动(SAR Pop Mapping Maneuver)以获得足够的波束入射角及分辨率;根据目标区防空火力的特点,武器投放可采用拉起-俯冲攻击(Pop-up)、中高空俯冲(HADB)及低空上抛(LAT)等战术。为在任务规划过程体现上述战术动作的特点及其影响,首先需要解决战术知识的获取、表达与建模问题。该类知识主要由飞行员根据训练和实践积累经验形成,其构成比较复杂,飞行员自身往往难以对其进行系统地分析与表述,而研究人员由于对背景缺乏了解也难以找到合适的切入点。为促进研究人员与飞行员之间有效的沟通与交流,需要采用双方都可理解的结构化框架对战术知识进行表达。概念图<sup>[74]</sup>(Concept Mapping)技术作为一种高效的知识获取方法可以为该问题的解决提供有效的支撑。图2是针对拉起俯冲攻击战术动作的概念图表达示例。

在战术知识获取的基础上,需要建立一种高效的机制对战术动作进行表达与建模。根据战术动作的复杂性和多样性特点,可将其分解为基本的动作序列,如平飞、跃升、俯冲、开机、投弹等,并按照序列固化、参数可调的原则将其转化为一个离散动态系统。在此基础上,薄涛<sup>[75]</sup>面向空中格斗战术建模,提出了战术动作的有限状态机模型,可以对“半滚倒转”、“高速遥遥”等复杂战术动作进行表达与建模。王楠<sup>[38]</sup>结合传感器使用、武器投放及电子干扰等战术动作的特点,进一步将有限状态机模型发展为战术模板,从而将战术动作规划问题转化为对战术模板参数的优化问题。该问题以武器装备的性能、使用限制、飞机承受的威胁风险等作为优化指标及约束条件,具有较强的

非线性与不连续性,一般可采用遗传算法、粒子群优化等随机优化方法进行求解。目前,基于战术

模板的战术动作规划方法已经在 SAR 传感器使用规划、武器投放规划等问题中得到了应用<sup>[76-77]</sup>。

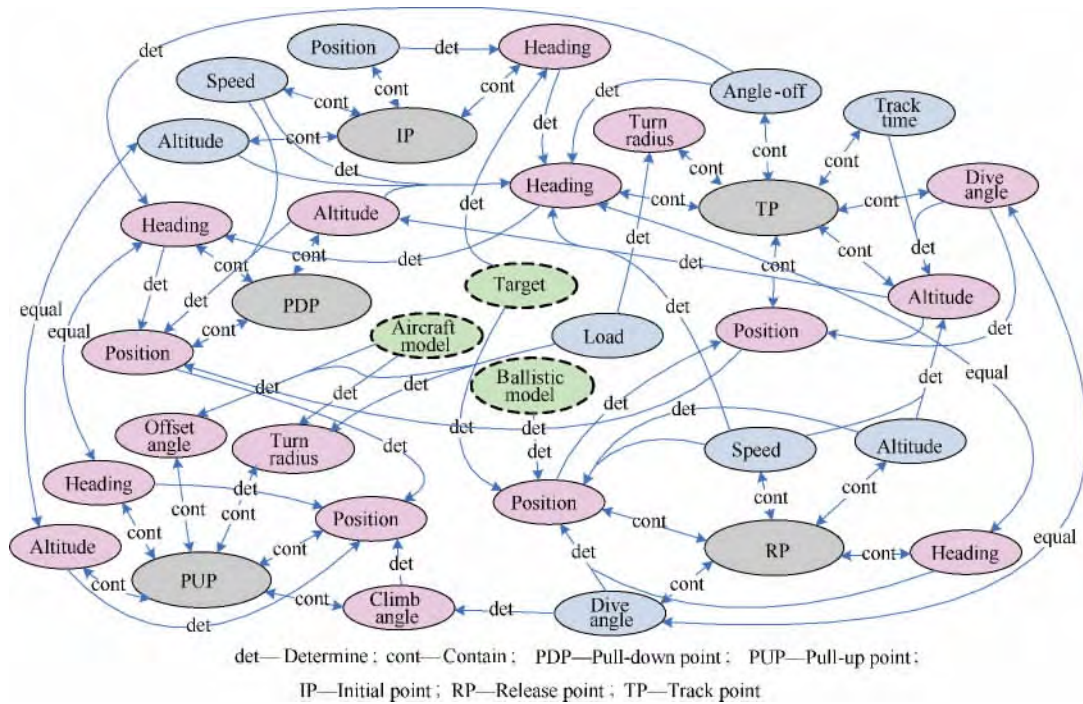


图 2 战术知识的概念图表达示例

Fig. 2 Example of tactics knowledge representation using concept mapping

### 1.3 航线/轨迹规划

航线/轨迹规划是航线规划与轨迹规划的统称,二者都属于飞行器任务规划的底层问题。航线规划与轨迹规划的共同点是考虑地形、气象等环境因素以及平台自身的飞行性能,为飞行器制定从初始位置到目标位置的最优飞行路径;而其区别主要体现在对飞行路径的表达粒度,以及对微分、姿态等约束条件的处理能力上。在航线规划中,飞行路径由多个航线点顺序连接所形成的航段序列表示,平台的飞行性能主要通过航段速度及航段间的夹角限制体现,一般适用于较大范围内飞行路径的搜索与求解,其规划结果对飞行过程仅具有引导作用。与之不同,轨迹规划直接从飞行器的飞行性能模型出发,在充分考虑速度、过载变化等微分约束以及航向、俯仰角、坡度等姿态约束的条件下生成飞行轨迹的控制指令序列,其规划结果具有可飞性,能够被飞行器跟踪,且始终处于飞行包线和操控能力范围内,其缺点是计算量大、求解复杂,一般用于需要进行精确的

轨迹控制和姿态控制的场合。

目前,对航线规划的研究主要由规划环境建模及优化搜索 2 部分组成。在规划环境建模上,由于实际的战场环境比较复杂,常根据几何学原理,按照特定的规则对战场空间进行结构划分,从而降低问题的规模。常用的划分方法<sup>[78-79]</sup>包括单元分解(Cell Decomposition)法、路标图法(Roadmap Method)、势场(Potential Field)法等。单元分解法将规划环境划分为离散栅格,如正四边形栅格或正六边形栅格,从而实现连续空间的离散化;路标图法则通过对规划环境进行采样处理,实现对规划空间的缩减,根据采样规则的不同,又可分为 V 图(Voronoi Diagram)法<sup>[3]</sup>,可视图(Visibility Graph)法<sup>[80]</sup>、概率路标图(Probabilistic Road Map, PRM)法<sup>[81]</sup>、快速扩展随机树(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)法<sup>[82-83]</sup>等;势场法则通过在空间中加入势函数,建立引力和斥力场等对航线搜索过程进行引导。在此基础上,需要设计高效的搜索算法,从上述结构化空间中搜索出最优航线。Canny<sup>[84]</sup>证明了航线优化搜

索是一个 NP 问题。针对该问题,搜索算法主要分为两大类:确定性算法和随机性算法<sup>[85]</sup>。确定性算法包括最速下降法、A\* 搜索算法、稀疏 A\* 搜索(Sparse A\* Search, SAS)算法、基于图搜索的 Dijkstra 算法等;随机性算法则包括遗传算法、粒子群优化算法、蚁群算法以及复合算法等。在与问题的结构及规模相匹配时,上述算法在求取航线规划问题的最优解或近似最优解上可以取得良好的效果。

随着对任务执行精度要求的提高,规划结果更符合实际飞行过程的轨迹规划方法逐渐成为了研究的热点。根据建模与求解的特点,近些年发展的轨迹规划方法主要包括:最优控制方法(Optimal Control Method, OCM)、微分平坦方法(Differential Flatness Method),以及机动自动机(Maneuver Automation, MA)方法等。由于飞行器轨迹规划问题可以看做非线性、带有状态约束和控制约束的最优控制问题,采用最优控制方法进行求解是最自然的选择<sup>[86]</sup>。根据求解策略的不同,可将最优控制方法进一步分为间接法(Indirect Method)和直接法(Direct Method)<sup>[87-88]</sup>。间接法基于 Pontryagin 极小值原理推导最优控制的一阶必要条件,进而构成最优轨迹的 Hamilton 边值问题进行求解。直接法则采用参数化方法将最优控制问题转化为非线性规划问题(Nonlinear Programming Problem, NLP),并通过数值优化方法求解来获得最优轨迹。与间接法相比,直接法的应用更为广泛,并衍生出多种类型<sup>[89-90]</sup>,其中伪谱法(Pseudospectral Method, PM)<sup>[91]</sup>作为一类典型代表,因其求解精度高、收敛速度快等优点在轨迹规划中得到了广泛应用<sup>[92-96]</sup>。与最优控制方法的思路不同,微分平坦方法<sup>[97]</sup>以飞行状态方程组的平坦输出为出发点,通过求取平坦输出到输入空间的逆映射来获取最优轨迹控制量,目前已在无人机等飞行器轨迹规划中展开了初步应用。机动自动机方法<sup>[98]</sup>则通过构建机动轨迹片元库(Trajectory Primitives),并利用优化算法选择一个从初始状态到目标状态的最优轨迹片元序列。该方法将搜索空间从连续的轨迹控制量空间转换到离散的轨迹片元空间,能够生成有利于飞行控制的配平轨迹,并在一定程度上减少时间开销。

## 2 应用现状

目前,任务规划技术的研究成果已广泛应用于各国为其军事飞行器所配备的任务规划系统(Mission Planning System, MPS)中,通过智能化和自动化的方式辅助指挥员和飞行员制定任务计划,以保障任务的实施,提高作战效能和生存能力。

美国是最早研究和装备作战飞机任务规划系统的国家,其陆海空三军都分别装备有不同的任务规划系统,并经历了 3 代的发展历程,如图 3 所示。第 1 代任务规划系统以 20 世纪 80 年代初装备的计算机辅助任务规划系统(Computer-Aided Mission Planning System, CAMPS)以及任务支持系统(Mission Support System, MSS) I 和 II 为典型代表,主要用于 F-16 及 F-15 等机型,为飞行员提供辅助计算和航线的手动编辑能力,缺点是自动化程度低且操作复杂。第 2 代任务规划系统于 20 世纪 80 年代末开始研制,初步实现了对各种机型的覆盖,形成并装备了空军的任务支持系统(Air Force Mission Support System, AFMSS)<sup>[99]</sup>、海军的战术协同打击模块(Tactical Strike Coordination Module, TSCM)、战术电子攻击任务系统(Tactical Electronic Attack Mission System, TEAMS)、战术任务规划系统(Tactical Aircraft Mission Planning System, TAMPS)<sup>[100]</sup>、陆军的陆航任务规划系统(Aviation Mission Planning System, AMPS)<sup>[101]</sup>等,其能力及自动化程度较第 1 代有了大幅提高,具备了武器投放规划、通用低可探测性自动航线规划(Common Low-Observable Auto-Router, CLOAR)等功能。其中,AFMSS 又进一步分为任务规划站(Mission Planning Station, MPS)、可搬移式任务规划站(Portable Mission Planning Station, PMPS)和便携式飞行规划软件(Portable Flight Planning Software, PFPS)。为促进各军兵种任务规划结构及功能的统一,降低系统的维护成本及缩短规划时间,第 3 代联合任务规划系统(Joint Mission Planning System, JMPS)<sup>[102]</sup>于 20 世纪 90 年代末开始研制,系统采用组件化的体系结构,集成了大量任务规划的先进技术,具备了自动航线规划(Autorouter, AR)、传感器使



用规划(Sensor Employment Planning, SEP)、精确制导弹药规划(Precision Guided Munitions Planning, PGMP)以及电子战规划(Electronic Warfare Planning, EWP)等功能。JMPS从2005年开始装备美军,目前已支持30余型飞机,包括战斗机、轰炸机、直升机、侦察机、无人机等,涵盖了美军各军兵种大部分机型。

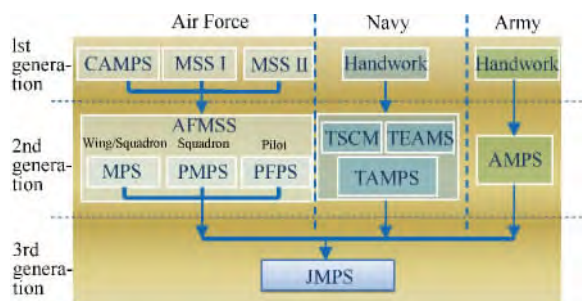


图3 美国MPS的发展

Fig 3 Development of MPS in USA

随着航空计算机性能的提升以及战场环境动态性、不确定性的增强,任务规划功能开始逐步融入机载航电系统,提供飞行中实时任务规划的能力。美国洛克希德马丁公司在可配置任务座舱验证项目(Mission Reconfigurable Cockpit, MRC)中开发的机载实时任务规划器(Real-Time In-Flight Planner, RTIFP)<sup>[103]</sup>可依据对地攻击方式的要求实时制定出任务计划。美国空军的综合飞行/轨迹控制(Integrated Flight Trajectory Control, IFTC)发展计划和先进战斗机技术综合(Advanced Fighter Technology Integration, AFTI)计划<sup>[104]</sup>所开发的实时武器投放计算、轨迹生成等功能已应用于F-15及F-16等飞机的最新改型上。B-1B、B-2等战略轰炸机已经具备了飞行中进行任务重规划的能力<sup>[105]</sup>。

除美国之外,其他北约成员国也相继开发及配备了任务规划系统<sup>[105]</sup>,例如英国空军的Pathfinder 2000及先进任务规划装置(Advanced Mission Planning Appliance, AMPA),能在夜间和恶劣天气条件下支持鹞式、狂风以及EFA(European Fighter Aircraft)等飞机进行隐蔽攻击;法军研制和装备了多型任务规划系统,早期装备有MIPSY、CINNA、CIRCE 2000等任务规划系统,此后又陆续发展了MARS、SLPRM等任务规划

系统。2008年,法军装备了新一代的任务规划系统HelipSys<sup>[106]</sup>,可支持所有型号法制直升机,并提供多种任务规划能力。

在无人机方面,其任务规划技术早期主要集成在地面控制站中,随着精确制导控制技术的发展和无人机能力水平的不断提升,无人机的任务规划系统开始出现并逐步投入使用。美国的“全球鹰”、“火力侦察兵”、法国的“玛鲁拉”、法德共同研制的“布雷维尔”、南非的“百灵鸟”等无人机都配备有任务规划系统,用于为其制定满足侦察、通信等任务要求和飞行约束的任务计划,并在任务执行过程中实施监控,对平台故障、突发威胁、任务变更等情况做出反应,适时调整任务计划。在巡航导弹任务规划方面,美军在1991年的海湾战争中首次使用了战区任务规划系统(Theater Mission Planning System, TMPS)进行“战斧”巡航导弹的任务分配及航线规划,系统最初大量依赖人工作业,具有规划过程复杂、效率低、反应慢等缺点。海湾战争结束后,美军广泛吸纳人工智能、知识工程以及面向对象的软件技术研究成果,从多个方面对巡航导弹任务规划系统进行了改进:一是小型化和通用化,增加系统的灵活性;二是提升规划过程的自动化水平,如缩短规划时间、计算机辅助选取匹配区,以及增加对全球定位系统(GPS)导航制导方式的支持等;三是融入智能化因素,如自适应地调整航线飞行剖面、实现多条航线同时到达、进行附加机动规划等。美军的“斯拉姆”等新一代巡航导弹任务规划系统还采用了人在回路设计,使得规划人员和系统能够对不确定和无法预知的事件做出灵活的反应。

由于技术保密和型号保密等因素,对国内任务规划技术的应用现状在此不作阐述。

### 3 关键技术及发展趋势

飞行器任务规划技术涉及飞行力学、导航与控制、雷达、光电/红外探测、电子干扰、制导与火控、毁伤评估,以及人工智能、机器人、决策与优化、计算机应用等多个学科及专业,是一个综合性的研究领域。从任务规划系统架构及应用的角度分析,该领域还存在以下关键问题需要进一步研究与解决。

### 3.1 开放、通用及互操作性

目前,各类飞行器数量不断增加,类型层出不穷,为避免任务规划系统的烟囱式发展,降低系统开发、使用、维护及相互交联的成本,构建统一、开放、通用的规划环境已成为当前任务规划系统发展的迫切需求。该环境需具备一个标准、通用的底层框架,各种规划功能及规划模型以标准组件的形式集成到框架中,从而支持对不同飞机、武器的任务规划。同时,该环境还需与主流 IT 技术相融合,将规划系统、情报信息系统、气象系统等通过有线/无线通信链路集成到一个通用网络体系中,实现数据的快速更新与共享,以及规划系统间的互联、互通、互操作,以充分发挥系统协同的整体效益。

### 3.2 基于动力学模型的轨迹/弹道规划

基于动力学模型的轨迹/弹道规划方法能够很好地与飞行器的物理特性相结合,确保规划结果满足飞行器控制要求,对于空天飞行器、弹道导弹的轨迹或弹道设计尤为重要。然而,该类方法由于求解维度的增加而导致算法效率下降,其求解效率与动力学模型离散化方法密切相关。目前的离散化方法主要有两种:第 1 种是传统方法,该方法首先建立显式的连续时间动力学模型,再通过数值方法对其离散化,其效率取决于离散化方式,如伪谱法比等分离散法在收敛速度上有明显提高;第 2 种方法是直接对动力学模型进行离散化建模,如拉格朗日力学、哈密顿力学结合李群的离散动力学建模方法,既减少了离散化建模环节,又能够有效地保守系统的几何特性,提高规划与控制的精度。该方向需要重点研究和解决的问题是如何在动力学模型的精细度和算法效率之间取得平衡。

### 3.3 多要素综合任务规划

随着武器装备的发展和作战样式的转变,飞行器的任务类型趋于复杂化,传感器使用、武器投放及电子干扰等任务要素相互融合,使任务规划问题由以往的单一型规划问题转换为需要同时考虑多个要素的综合型规划问题。由于各要素间既相对独立,又相互影响,对规划问题的建模与求解

提出了新的挑战。针对该挑战,研究有效的多要素综合任务规划方法,既保持各要素求解过程的相对独立性,又使其在一定的协调策略引导下,以较高的效率规划出合理、一致的任务计划,使整体任务效能达到最优,是关键所在。

### 3.4 时/空/频域冲突消解

对飞行器在空中的活动进行合理、有效的冲突消解是现代交通运输与军事行动所不可避免的问题。随着机载电子设备的增多,以及电子干扰和通信手段的发展,冲突消解的维度不断增加,从时域、空域延伸至频域,导致问题更为复杂。同时,飞行器的种类和数量、出动的规模、使用的密集度也在不断增加,从而使集中式的冲突检查与消解变得尤为困难。在该情况下,结合人工智能、多智能体理论和网络技术,研究分布式条件下的冲突消解策略和方法将成为解决日益复杂的飞行器冲突消解问题的有效途径。

### 3.5 不确定条件下的任务规划

目前的任务规划方法主要侧重于解决确定条件下的规划问题。在实际应用中,由于任务环境的部分可观性,加上传感器及情报信息的误差,以及可能存在的对抗,规划时所依赖的环境信息是不确定的。同时,对规划结果的执行也不可避免地存在误差,并可能对任务执行的成败造成重要影响。因此,在任务规划过程中需要对上述不确定性予以考虑。其中,对信息的不确定性可采用概率统计、部分可观马尔可夫过程等方法进行处理;对于存在对抗方而引起的不确定性(Adversarial Uncertainty),则需要结合博弈论(Game Theory)等方法展开进一步研究。

### 3.6 动态实时任务规划

在飞行器执行任务的过程中,当预设目标及外部环境发生改变时,进行实时任务规划对于提高飞行安全及任务成功率具有重要意义。与预先规划相比较,实时任务规划一方面需要克服信息的动态性及不确定性所带来的影响,另一方面需要在有限的时间及计算资源的条件下给出合理可行的规划结果,具有更高的复杂性和求解难度。目前,国内外主要从问题简化建模及滚动优化两



方面对实时任务规划进行了研究,如何在真实模型和简化模型,以及在局部最优和全局最优间进行合理、有效折中还需要进行深入的研究与探索。

总地来看,目前飞行器任务规划技术正朝着大体系、大融合的方向迈进,并呈现两个趋势:一是军事背景越来越突出,强调规划模型和算法面向实际战场环境的应用,如处理和应对未知威胁、考虑通信干扰以及对抗博弈等;二是精细化程度不断提高,更为重视微观层面规划问题的研究,如战术动作的设计、多指标/多约束条件下机动轨迹的生成等。在该情况下,多学科交叉、多方法协作将成为解决日益复杂的飞行器任务规划问题的重要途径。

#### 4 结束语

在飞行器任务规划技术的发展过程中,科技的不断进步、需求的不断提升,以及各种新理论、新方法的涌现为该领域注入了源源不断的动力,其研究的范围越来越广,研究的对象越来越复杂,研究的内容越来越深化,研究过程与实际应用的结合越来越紧密。作为一个综合性的研究领域,在航空技术和空中交通工具迅猛发展的今天,飞行器任务规划技术具有广阔的研究前景与应用价值,其研究成果对推动国民经济的发展和国防力量的建设具有极为重要的意义。

#### 参 考 文 献

- [1] Bortoff S A. Path planning for UAVs[C]//Proceedings of the 2000 American Control Conference, 2000, 1(6): 364-368.
- [2] Beard R W, McLain T W, Goodrich M, et al. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(6): 911-922.
- [3] Bellingham J, Tillerson M, Richards A, et al. Multi-task allocation and path planning for cooperating UAVs [M]//Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003: 23-41.
- [4] Pongpunwattana A. Real-time planning for teams of autonomous vehicles in dynamic uncertain environments [D]. Seattle: University of Washington, 2004.
- [5] Ownby M. Mixed initiative control of automa-teams (mica)-a progress report, AIAA-2004-6483 [R]. Reston: AIAA, 2004.
- [6] Qian J, Xu X Z, Liu Z Y. Exploration of cruise missile trajectory planning techniques[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2008(1): 16-19. (in Chinese)  
钱进, 徐兴柱, 刘赵云. 巡航导弹航迹规划技术初探[J]. 飞航导弹, 2008(1): 16-19.
- [7] Zhao H, He H C, Zhao Z T, et al. A terrain analysis method and the application of it to route planning[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2006, 7(4): 36-38. (in Chinese)  
赵红, 何华灿, 赵宗涛, 等. 一种地形分析方法在航迹规划中的应用[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(4): 36-38.
- [8] Zhao L, Murthy V R. Optimal flight path planner for an unmanned helicopter by evolutionary algorithms, AIAA-2007-6741[R]. Reston: AIAA, 2007.
- [9] Zhang G L, Cao Y H, Su Y. Helicopter optimal trajectory planning and terrain following[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(5): 594-599. (in Chinese)  
张广林, 曹义华, 苏媛. 直升机最优航迹规划与地形跟踪[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(5): 594-599.
- [10] Pan L. Research on multi-objective mission planning methods and implement techniques under complex environment[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)  
潘亮. 复杂环境下多目标任务规划方法及实现技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2003.
- [11] Kang B N, Tang S, Starkey R P. Optimal trajectories of hypersonic vehicle for global reach, AIAA-2008-2595 [R]. Reston: AIAA, 2008.
- [12] Peng S C. Trajectory planning and guidance technology of near-space supersonic cruise missile[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)  
彭双春. 临近空间超声速巡航导弹轨迹规划与制导技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2011.
- [13] Johnson C L. Inverting the control ratio: human control of large autonomous teams[C]//Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems, 2003.
- [14] Chandler P R, Pachter M, Rasmussen S. UAV cooperative control[C]//Proceedings of the 2001 American Control Conference, 2001: 50-55.
- [15] Sengupta R, Godbole D. Architectures for UCAV and results on multi-agent coordination[EB/OL]. (1998-07-21)[2012-11-07]. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/>

- ~sastry/ppt.files/ONR/prog-rep.ppt.
- [16] Sastry S S. ONR UCAV project overview[EB/OL]. (1998-07-21)[2012-11-08]. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~sastry/ppt.files/ONR/year1.ppt>.
- [17] Chandler P R, Pachter M. Hierarchical control for autonomous teams, AIAA-2001-4149[R]. Reston: AIAA, 2001.
- [18] Chandler P R. Decentralized control for an autonomous team, AIAA-2003-6571[R]. Reston: AIAA, 2003.
- [19] Rathinam S, Zennaro M. An architecture for UAV team control[C]//Proceedings of the 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, 2004: 1-7.
- [20] Shamma J. Cooperative control of distributed autonomous vehicles in adversarial environments [EB/OL]. (2006-08-14) [2007-10-04]. <http://www.seas.ucla.edu/coopcontrol/>.
- [21] Butenko S, Murphey R, Pardalos P. Cooperative control: models, applications and algorithms [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2006: 96-111.
- [22] Honeywell Technology Center. Multi-agent self-adaptive CIRCA[EB/OL]. [2012-11-08]. <http://www.htc.honeywell.com/projects/ants/6-00-quadcharts.ppt>.
- [23] Campbell M, D'Andrea R, Schneider D, et al. Robo-Flag games using systems based, hierarchical control [C]//Proceedings of the American Control Conference, 2003: 661-666.
- [24] Wong E M, Bourgault F, Furukawa T. Multi-vehicle Bayesian search for multiple lost targets[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 3169-3174.
- [25] Bryson M T, Sukkarieh S. Decentralised trajectory control for multi-UAV SLAM[C]//Proceeding of the 4th International Symposium on Mechatronics and its Applications, 2007.
- [26] Shen L C, Gao G H, Chang W S, et al. An open system approach to mission route planning[J]. Journal of Astronautics, 1998, 19(2): 13-18. (in Chinese)  
沈林成, 高国华, 常文森, 等. 开放式飞行任务规划方法[J]. 宇航学报, 1998, 19(2): 13-18.
- [27] Min C W, Yuan J P. Introduction of military aircraft route planning[J]. Flight Dynamics, 1998, 16(4): 14-19. (in Chinese)  
闵昌万, 袁建平. 军用飞行器航迹规划综述[J]. 飞行力学, 1998, 16(4): 14-19.
- [28] Liu C A, Wang H P, Li W J. Coordinated path planning of attacking unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2003, 21(6): 707-710. (in Chinese)  
柳长安, 王和平, 李为吉. 攻击无人机的协同航路规划[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(6): 707-710.
- [29] Zheng C W, Ding M Y, Zhou C P, et al. Coordinated route planning for multiple air vehicles[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(2): 115-120. (in Chinese)  
郑昌文, 丁明跃, 周成平, 等. 多飞行器协调航迹规划方法[J]. 宇航学报, 2003, 24(2): 115-120.
- [30] Gao X G, Fu X W, Song S M. Trajectory planning for multiple uninhabited combat air vehicles[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2004, 24(5): 140-143. (in Chinese)  
高晓光, 符小卫, 宋绍梅. 多UCAV航迹规划研究[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(5): 140-143.
- [31] Ye Y Y. Research on mission planning for cooperative UCAVs[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)  
叶媛媛. 多UCAV协同任务规划方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2005.
- [32] Long T. Research on distributed task allocation and coordination for multiple UCAVs cooperative mission control[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)  
龙涛. 多UCAV协同任务控制中的分布式任务分配与任务协调技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2006.
- [33] Yan P. Research on methodology of route planning and task assignment for unmanned air vehicles[D]. Wuhan: Institute of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science & Technology, 2006. (in Chinese)  
严平. 无人飞行器航迹规划与任务分配方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 2006.
- [34] Huo X H. Research on modeling and rolling optimization methods for multi-UCAV dynamic cooperative mission planning[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)  
霍霄华. 多UCAV动态协同任务规划建模与滚动优化方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2008.
- [35] Duan H B, Ding Q X, Chang J J, et al. Multi-UCAVs task assignment simulation platform based on parallel ant colony optimization[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(s1): 192-197. (in Chinese)  
段海滨, 丁全心, 常俊杰, 等. 基于并行蚁群优化的多无人作战飞机任务分配仿真平台[J]. 航空学报, 2008, 29(s1): 192-197.
- [36] Peng H. Research on distributed cooperative area searching of multiple unmanned aerial vehicles[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation,

- National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- 彭辉. 分布式多无人机协同区域搜索中的关键问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2009.
- [37] Li Y. Research on resources allocation and formation trajectories optimization for multiple UAVs ground attack mission[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- 李远. 多 UAV 协同任务资源分配与编队轨迹优化方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2011.
- [38] Wang N. Research on route/sensor/weapon delivery integrated mission planning for combat aircraft[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- 王楠. 作战飞机航线/传感器/武器投放综合任务规划技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2012.
- [39] Gil A E, Passino K M, Cruz J B. Stable cooperative surveillance[C]//Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005: 2182-2187.
- [40] Campbell M E, Whitacre M W. Cooperative tracking using vision measurements on SeaScan UAVs[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(4): 613-627.
- [41] Lua C A, Altenburg K, Nygard K E. Synchronized multi-point attack by autonomous reactive vehicles with simple local communication[C]//Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium, 2003: 95-102.
- [42] Kim J, Hespanha J P. Cooperative radar jamming for groups of unmanned air vehicles[C]//Proceedings of the 43rd Conference on Decision and Control, 2004, 1: 632-637.
- [43] Secrest B R. Traveling salesman problem for surveillance mission using particle swarm optimization[D]. Wright-Patterson AFB: Air Force Institute of Technology, 2003.
- [44] O'Rourke K P, Bailey T G, Hill R, et al. Dynamic routing of unmanned aerial vehicles using reactive tabu search[J]. Military Operations Research Journal, 2001(6): 5-30.
- [45] Alighanbari M. Task assignment algorithms for teams of UAVs in dynamic environments[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [46] Nygard K E, Chandler P R, Pachter M. Dynamic network flow optimization models for air vehicle resource allocation[C]//Proceedings of the 2001 American Control Conference, 2001, 3: 1853-1858.
- [47] Alvaro E G. Stability analysis of network-based cooperative resource allocation strategies[D]. Columbus: Ohio State University, 2003.
- [48] Brown D T. Routing unmanned aerial vehicles while considering general restricted operating zones[D]. Wright-Patterson AFB: Air Force Institute of Technology, 2001.
- [49] Tian J. Modeling and optimization methods for multi-UAV cooperative reconnaissance mission planning problem[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- 田菁. 多无人机协同侦察任务问题建模与优化技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2007.
- [50] Shima T, Rasmussen S J, Sparks A G, et al. Multiple task assignments for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms [J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(11): 3252-3269.
- [51] Rasmussen S, Chandler P, Mitchell J W, et al. Optimal vs. heuristic assignment of cooperative autonomous unmanned air vehicles, AIAA-2003-5586 [R]. Reston: AIAA, 2003.
- [52] Wang L. Research on modeling and optimization methods for multi-UAV cooperative target tracking [D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- 王林. 多无人机协同目标跟踪问题建模与优化技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2011.
- [53] Atkinson M L. Contract nets for control of distributed agents in unmanned air vehicles, AIAA-2003-6532[R]. Reston: AIAA, 2003.
- [54] Keviczky T, Borrelli F, Fregene K, et al. Decentralized receding horizon control and coordination of autonomous vehicle formations[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 16(1): 19-33.
- [55] Li W, Cassandras C G. Centralized and distributed cooperative receding horizon control of autonomous vehicle missions[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2006, 43(9-10): 1208-1228.
- [56] Parunak H V D, Purcell M, O'Connell R. Digital pheromones for autonomous coordination of swarming UAVs, AIAA-2002-3446[R]. Reston: AIAA, 2002.
- [57] Price I C. Evolving self-organized behavior for homogeneous and heterogeneous UAV or UCAV swarms[D]. Wright-Patterson AFB: Air Force Institute of Technology, 2006.

- [58] Dionne D, Rabbath C A. Multi-UAV decentralized task allocation with intermittent communications; the DTC algorithm[C]//Proceedings of the 2007 American Control Conference, 2007: 5406-5411.
- [59] Godwin M F, Spry S, Hedrick J K. Distributed collaboration with limited communication using mission state estimates[C]//Proceedings of the 2006 American Control Conference, 2006: 2040-2046.
- [60] Liao Y, Jin Y, Minai A A, et al. Information sharing in cooperative unmanned aerial vehicle teams[C]//Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005: 90-95.
- [61] Thomas B J. Mission-planning concepts for interaction of multiple reconnaissance platforms[C]//Airborne Reconnaissance XVII, 1993: 6-12.
- [62] Tattelman P, Madsen D M, Mozer J B, et al. Optimizing infrared and night vision goggle sensor performance by exploiting weather effects[C]//RTO SET Symposium on "E-O Propagation, Signature and System Performance Under Adverse Meteorological Conditions Considering Out-of-Area Operations", 1998: 25-1-25-6.
- [63] Skoglar P, Nygard J, Björström R, et al. Path and sensor planning framework applicable to UAV surveillance with EO/IR sensors[R]. Stockholm: Swedish Defence Research Agency, 2005.
- [64] Yang M Z, Yin J, Yu L. Research on operation distance of TV homer[J]. Electronics Optics & Control, 2003, 10(2): 27-30. (in Chinese)  
杨满忠, 尹健, 于雷. 电视导引头作用距离研究[J]. 光电与控制, 2003, 10(2): 27-30.
- [65] Chen Q. Study on systems of airborne squint mode and forward looking mode synthetic aperture radar[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)  
陈琦. 机载斜视及前视合成孔径雷达系统研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2007.
- [66] West II W J. Developmental testing of a laser-guided bomb simulation, AIAA-2008-1629 [R]. Reston: AIAA, 2008.
- [67] Siewert C V L, Sussingham M J C, Farm J A. 6-DOF enhancement of precision guided munitions testing, AIAA-1998-0396[R]. Reston: AIAA, 1998.
- [68] Geng L N. Study on release region calculation for guided bombs[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)  
耿丽娜. 制导炸弹投放区计算研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2009.
- [69] Zhang Y, Wang N, Chen J, et al. Research on launch acceptable region for guided bombs in air-to-ground multi-target attack[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(12): 1474-1480. (in Chinese)  
张煜, 王楠, 陈璟, 等. 空地多目标攻击中制导炸弹可投放区计算研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(12): 1474-1480.
- [70] Cao B W, Jiang C S, Yang M Z. Research on the damage potential of TV-command-guided air-to-ground missiles[J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11(2): 31-34. (in Chinese)  
曹邦武, 姜长生, 杨满忠. 电视指令制导空地导弹对目标的毁伤性能研究[J]. 光电与控制, 2004, 11(2): 31-34.
- [71] Chi Y K. Evaluation of radar performance degradation due to standoff jamming[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1992.
- [72] Mears M J. Cooperative electronic attack using unmanned air vehicles[C]//Proceedings of the 2005 American Control Conference, 2005, 5: 3339-3347.
- [73] Kim J, Hespanha J P. Cooperative radar jamming for groups of unmanned air vehicles[C]//Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004, 1: 632-637.
- [74] Snyder D E, McNeese M D, Zaff B S, et al. Knowledge acquisition of tactical air-to-ground mission information using concept mapping[C]//Proceedings of the 1992 National Aerospace and Electronics Conference, 1992, 2: 668-674.
- [75] Bo T. Research on human behavior representation of fighter dogfight combat[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2002. (in Chinese)  
薄涛. 格斗空战行为建模技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2002.
- [76] Wang N, Li Y, Bu Y L, et al. SAR sensor employment planning for tactical aircrafts[C]//The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010: 603-608.
- [77] Wang N, Zhang W P, Zhang C J, et al. Optimization of tactical aircraft weapon delivery using tactics templates[C]//2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR), 2010: 21-27.
- [78] Frazzoli E, Dahleh M A, Feron E. Real-time motion planning for agile autonomous vehicles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2002, 25(1): 116-129.
- [79] Goerzen C, Kong Z, Mettler B. A survey of motion planning algorithms from the perspective[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2010, 57(1-4): 65-100.
- [80] McLain T W, Chandler P R, Rasmussen S, et al. Coop-

- erative control of UAV rendezvous[C]//Proceedings of the 2001 American Control Conference, 2001, 3: 2309-2314.
- [81] Kavraki L E, Sevestka P, Latombe J C, et al. Probabilistic roadmaps for path planning in high dimensional configuration space[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(4): 566-580.
- [82] LaValle S M. Rapidly-exploring random trees: a new tool for path planning[R]. Ames: Computer Science Department, Iowa State University, 1998.
- [83] Karaman S, Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 846-894.
- [84] Canny J F. The complexity of robot motion planning[M]. Cambridge: MIT Press, 1988: 1-18.
- [85] Gao G H. Research on multi-path planning problem in large area[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 1999. (in Chinese)
- 高国华. 大范围多路径规划问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 1999.
- [86] Betts J T. Survey of numerical methods for trajectory optimization[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1998, 21(2): 193-207.
- [87] Yong E M, Chen L, Tang G J. Survey of aircraft trajectory optimization methods[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2): 398-406. (in Chinese)
- 雍恩米, 陈磊, 唐国金. 飞行器轨迹优化数值方法综述[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 398-406.
- [88] Huang G Q, Lu Y P, Nan Y. A survey of numerical algorithms for trajectory optimization of flight vehicles[J]. Sci China Tech Sci, 2012, 42(9): 1016-1036. (in Chinese)
- 黄国强, 陆宇平, 南英. 飞行器轨迹优化数值算法综述[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(9): 1016-1036.
- [89] Yang K, Sukkarieh S, Kang Y. Adaptive nonlinear model predictive path tracking control for a fixed-wing unmanned aerial vehicle, AIAA-2009-5622[R]. Reston: AIAA, 2009.
- [90] Zhang Y, Chen J, Shen L C. Real-time trajectory planning for UCAV air-to-surface attack using inverse dynamics optimization method and receding horizon control[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(4): 1038-1056.
- [91] Huntington G T. Advancement and analysis of Gauss pseudospectral transcription for optimal control problems[D]. Cambridge: Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [92] Zhang Y, Chen J, Shen L C. Hybrid hierarchical trajectory planning for a fixed-wing UCAV performing air-to-surface multi-target attack[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(4): 536-552.
- [93] Zhang Y, Zhang W P, Chen J, et al. Air-to-ground weapon delivery trajectory planning for UCAVs using Gauss pseudospectral method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(7): 1240-1251. (in Chinese)
- 张煜, 张万鹏, 陈璟, 等. 基于 Gauss 伪谱法的 UCAV 对地攻击武器投放轨迹规划[J]. 航空学报, 2011, 32(7): 1240-1251.
- [94] Yong E M, Tang G J, Chen L. Rapid trajectory optimization for hypersonic reentry vehicle via Gauss pseudospectral method[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 1766-1772. (in Chinese)
- 雍恩米, 唐国金, 陈磊. 基于 Gauss 伪谱方法的高超声速飞行器再入轨迹快速优化[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1766-1772.
- [95] Liu H F, Chen S F, Shen L C, et al. Tactical trajectory planning for stealth unmanned aerial vehicle to win the radar game[J]. Defence Science Journal, 2012, 62(6): 375-381.
- [96] Chen S F, Liu H F, Shen L C, et al. Penetration trajectory planning based on radar tracking features for UAV[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2012, 85(1): 62-71.
- [97] Milam M B. Real-time optimal trajectory generation for constrained dynamical systems[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2003.
- [98] Frazzoli E. Robust hybrid control for autonomous vehicle motion planning[D]. Cambridge: Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [99] Air force mission support system (AFMSS)[EB/OL]. (1999-01-09)[2012-11-07]. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ac/equip/afmss.htm>.
- [100] AN-SYQ-21 Tactical automated mission planning system (TAMPS)[EB/OL]. (1999-01-11)[2012-11-07]. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/weaps/tamps.htm>.
- [101] AN/TYQ-77 Aviation mission planning system (AMPS)[EB/OL]. (2011-07-07)[2012-11-07]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/antyq-77.htm>.
- [102] Joint mission planning system[EB/OL]. (2011-07-07)[2012-11-07]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/jmps.htm>.
- [103] Leavitt C A. Real-time in-flight planning[C]//Proceedings of the IEEE 1996 National Aerospace and Electronics Conference, 1996, 1: 83-89.
- [104] F-16 AFTI Advanced fighter technology integration[EB/



- OL]. [2012-11-07]. [http://www.f-16.net/f-16\\_versions\\_article13.html](http://www.f-16.net/f-16_versions_article13.html).
- [105] Zhang Y. Research on air-to-ground attack trajectory planning for combat aircraft[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- 张煜. 作战飞机空地攻击轨迹规划技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2012.
- [106] HELIPSYS[EB/OL]. [2013-12-09]. <http://www.sagem.com/spip.php?rubrique76>.
- 作者简介:
- 沈林成 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 飞行器任务规划、无人机自主协同控制、仿生机器人与智能控制。
- Tel: 0731-84573301  
E-mail: lcshen@nudt.edu.cn
- 陈璟 男, 博士, 教授。主要研究方向: 飞行器任务规划、人工智能。  
Tel: 0731-84573361  
E-mail: Chenjing001@vip.sina.com
- 王楠 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 飞行器任务规划、智能优化理论与方法。  
Tel: 0731-84576420  
E-mail: acnwang@aliyun.com

## Overview of Air Vehicle Mission Planning Techniques

SHEN Lincheng<sup>\*</sup>, CHEN Jing, WANG Nan

*College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

**Abstract:** Mission planning provides effective support and insurance for aircraft, especially military aircraft in mission success. First, the concept of air vehicle mission planning is introduced. Second, according to the research methodology and objects, the system architecture of mission planning is analyzed, which is divided into three levels: operation planning for multi-vehicle task allocation and coordination, tactic activity planning for the design of air-vehicle tactic activity employment, and route/trajectory planning for flight route or trajectory generation. Then, advances in the three levels of air vehicle mission planning are discussed, and the characteristics of the representative problem formulation and solution approaches are analyzed. Besides, their military applications are discussed. Finally, the key technique and future research trends on air vehicle mission planning are summarized.

**Key words:** air vehicle; mission planning; coordination; tactic activity; route; flight trajectory

Received: 2012-11-09; Revised: 2013-04-22; Accepted: 2013-12-23; Published online: 2013-12-30 16:00  
URL: [www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20131230.1600.001.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20131230.1600.001.html)  
<sup>\*</sup> Corresponding author. Tel.: 0731-84573301 E-mail: lcshen@nudt.edu.cn