

空天无人系统智能规划技术综述

杜永浩¹, 王 凌², 邢立宁¹

(1. 国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410072;

2. 清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 针对以无人机群和多航天器为代表的空天无人系统快速发展、任务需求多样化与复杂化程度持续增加的现状, 首先分析了空天无人系统智能规划技术的特点, 随后阐述了无人机群集散、编队飞行、编队保持与重构等航迹智能规划策略, 梳理了无人机群任务智能规划建模与优化方法, 同时介绍了多航天器飞行与避碰轨道规划的内容和现状, 综述了多航天器集中式与分布式任务规划主要研究成果, 最后, 面向未来空天无人系统的应用需求, 提出了空天无人系统智能规划技术未来发展建议。

关键词: 空天; 无人系统; 航迹规划; 任务规划; 智能规划

中图分类号: V279, V448

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2020)03-0416-17

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2020.03.011

Intelligent planning technologies for unmanned aerospace system:

A literature review

Du Yonghao¹, Wang Ling², Xing Lining¹

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China;

2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Considering the current rapid development of the unmanned aerospace system represented by unmanned aerial vehicles (UAVs) and multi-spacecraft, and the increasing diversity and complexity of their tasks, the characteristics of the intelligent planning technologies for the unmanned aerospace system are analyzed first. Then, the intelligent flight planning strategies for UAVs, such as gathering and dispersing, formation flying, formation keeping and reconstruction, are elaborated, and the modeling and optimization methods of the intelligent task planning for UAVs are summarized. Also, the research content and status of the orbit planning for multi-spacecraft flying and obstacle avoidance are introduced, and the main research results of centralized and distributed task planning for multi-spacecraft are reviewed. Finally, facing future application requirements, several development suggestions on the intelligent planning technologies for the unmanned aerospace system are proposed.

Key words: aerospace; unmanned system; flight path planning; task planning; intelligent planning

收稿日期: 2017-12-06; 修订日期: 2018-04-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61773120; 61525304; 71690233; 71331008; U1501254; 61472089); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(2014-92); 湖南省杰出青年基金资助项目(S2015J5050); 深圳市科技计划基础研究资助项目(JCYJ20160530141956915); 广东省科技计划资助项目(2015B010131015; 2015B010108006).

1 引言

随着传感器技术、控制技术、网络通讯技术和智能规划技术的快速发展,越来越多的无人系统在军事斗争、物流运输、遥感测绘、农林和畜牧业等领域得到了广泛应用^[1-4]. 无人系统指由人工个体组成的,在极少的人为干预下借助智能规划与决策技术有序执行任务的信息化系统. 无人系统具有较强的自主性、协同性和并行性,在遥远、危险、任务时间长或控制人员不可达的工作环境中已逐步取代有人系统,是未来信息化工业和军事发展的必然趋势. 同时,受到无人系统复杂性、约束性以及工作环境不确定性的影响,无人系统的智能规划水平对发挥无人系统优势、提升执行任务效率和质量起到举足轻重的作用.

根据任务环境和执行目的的不同,无人系统可分为陆面无人系统(unmanned ground system, UGS)、海域无人系统(unmanned maritime system, UMS)和空天无人系统(unmanned aerospace system, UAS). 现阶段,常见的空天无人系统主要表现为由无人机群组成的空中无人系统和多航天器组成天基无人系统. 与陆面和海域无人系统相比,空天无人系统研究的主要难点有: 1) 系统处于复杂的三维运动环境. 2) 系统运动速率大,响应频繁,容错率低. 3) 系统受天气等环境因素影响显著. 据统计,美国国防部空天无人系统的预算开支占无人系统预算总额的90%以上^[5,6],可见空天无人系统的应用需求显著. 本文面向空天无人系统的发展需求,按图1分类分别概述了无人机群和多航天器智能规划技术的发展现状,总结了无人机群和多航天器智能规划技术的主要研究内容,并指出未来空天无人系统智能规划技术进一步发展方向.

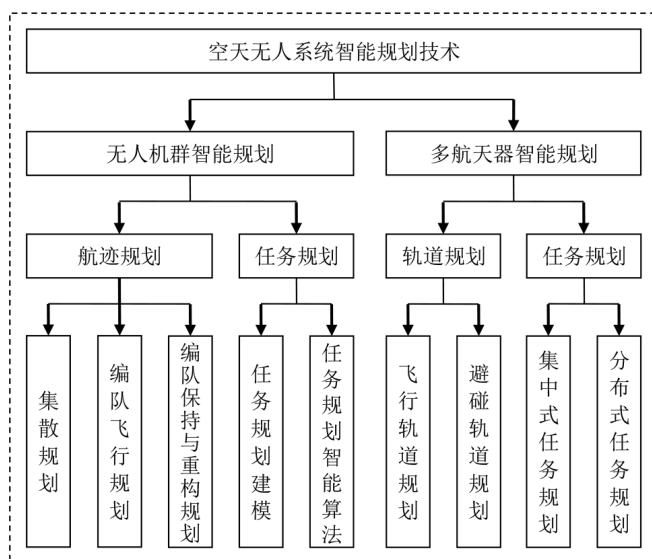


图1 空天无人系统智能规划分类图

Fig. 1 Classification diagram of intelligent planning technologies for unmanned aerospace system

2 空天无人系统智能规划技术的特点

智能规划技术对空天无人系统发展的意义在其很好地迎合了空天无人系统发展趋势,满足了发展中的需求,解决了发展中遇到的难题,如图2所示: 1) 系统功能方面,空天无人系统向着自主化与协同化的趋势发展,如无人机群实时自主的避障功能、航天器组网的自主任务规划功能等. 2) 个体行为方面,空天无人系统向着小型化与敏捷化的趋势发展,如小体积的无人侦察机、小型敏捷化成像卫星等. 3) 任务需求方面,空天无人系统向着复杂化与多样化的趋势发展,如复杂化的天地一体协同作战、多样化的卫星成像、数传与中继任务等.

针对上述空天无人系统发展趋势,智能规划技术可以为空天无人系统的研究与应用带来以下优势:

1) 提升了空天无人系统的自主化与协同化水平

智能规划技术能够通过个体信息的通讯与融合,快速、充分地获取系统的全局信息,维持多智能体之间协同合作关系,降低了系统反应与决策层级,极大地提升了系统的智能化水平^[7].同时,智能规划技术还能够很好地应对系统环境的不确定性和任务的动态变更,有针对性地改善系统动态决策与自适应能力^[8],对空天无人系统的自主性、协同性、鲁棒性和容错性^[9]等方面起到至关重要的作用.

2) 满足了空天无人系统的小型化与敏捷化需求

小型化与敏捷化的个体行为为空天无人系统带来了更充裕的规划空间,但无疑也带来了规划精度和决策难度的增加,对系统的规划水平提出了更高要求.多敏捷型卫星成像任务规划是空天无人系统小型化和敏捷化发展的典型.敏捷卫星与传统卫星相比,拥有更强的轨道机动能力、更快的机动速度和更多的成像时间窗,同时,学者们也发现传统的排序策略或启发式算法已经很难求解敏捷卫星多维度的决策问题^[10].由此,面向空天无人系统小型化与敏捷化的需求,充分考虑飞行或姿态控制约束,具有更高决策水平的智能规划技术能够取得传统规划策略无法企及的求解效果.

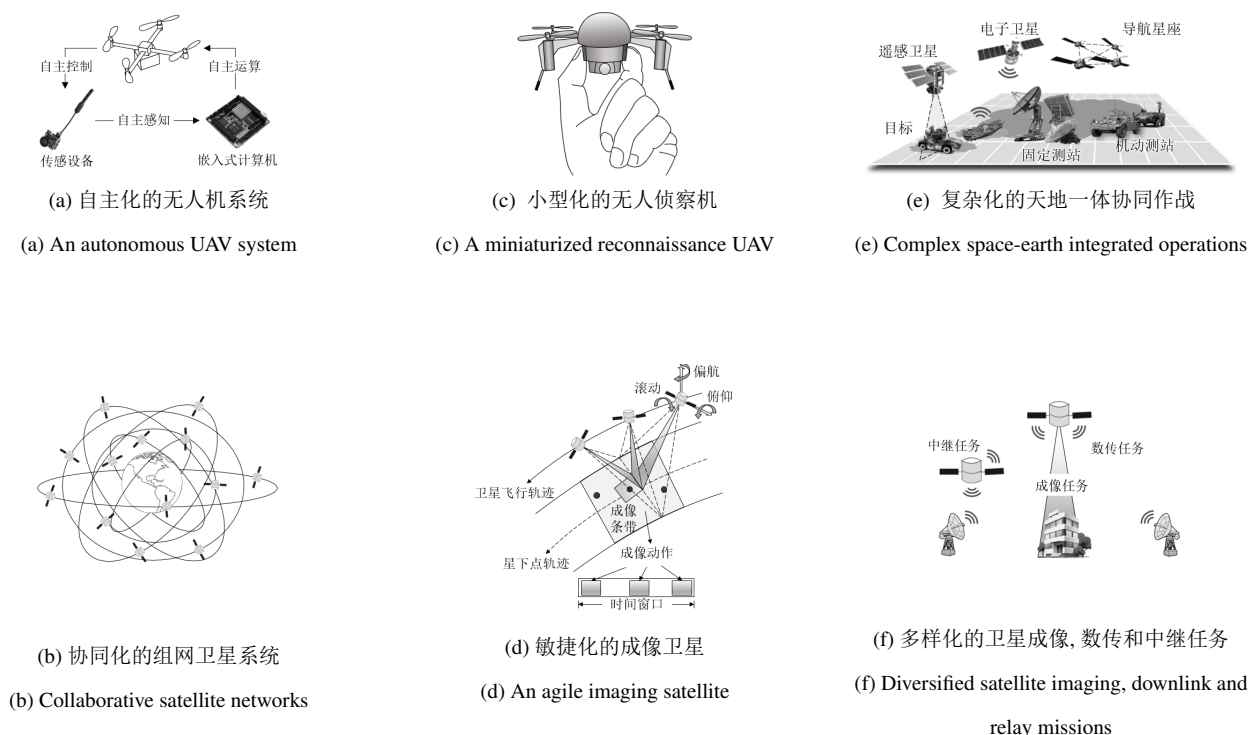


图2 空天无人系统智能规划技术的特点

Fig. 2 The characteristics of the intelligent planning technology of aerospace unmanned systems

3) 解决了空天无人系统的复杂化与多样化难题

空天无人系统的复杂化与多样化提升了系统执行任务的能力,但也很大程度上增加了问题规模、冲突与约束规模以及建模难度.在传统的无人机任务规划中,旅行商模型常被用来描述无人机简单的遍历任务,但随着无人机技术的不断发展,油耗、动力学、避障、通讯和威胁等越来越多的约束与动态影响被实际考虑^[11].在传统的卫星任务规划中,成像任务与数传任务往往分开执行,且考虑的任务形式单一,而现如今高质量的任务需求、庞大的任务规模和拥挤的星地链路通道要求系统不得不接受多样化的任务格局和一体化的规划模式.因此,针对空天无人系统复杂化与多样化的难题,智能规划技术运用合理的问题建模方式、针

对性的智能优化算法和分布式的优化策略等往往能够实现系统功能的最大化利用,提升规划速率与鲁棒性,获得满意的规划效果。

可见,智能规划技术对空天无人系统的研究与发展起到了不可或缺的作用。下面,本文针对无人机群和多航天器智能规划的特点,结合发展趋势,分别介绍无人机群航迹规划与任务规划的研究内容与现状,多航天器轨道规划与任务规划的主要研究成果,并对空天无人系统智能规划技术提出未来发展建议。

3 无人机群智能规划

无人机系统在民用和军用领域有着广阔的应用前景,但单个无人机携带资源和执行任务的能力有限,难以满足日趋复杂的多样化任务需求。因此,由多架无人机组成机群、协同执行任务的智能规划问题逐渐成为无人系统研究领域的热点。无人机群智能规划可分为航迹规划和任务规划两大类。

3.1 无人机群航迹智能规划

无人机群执行任务的生命周期主要经历机群集结、机群以编队形式向任务区域飞行、机群进入任务区域执行任务、机群返回和机群解散等5个阶段,同时在机群飞行和执行任务过程中伴随着机群编队的动态改变^[12]。因此,无人机群航迹智能规划可分为集散规划、编队飞行规划、编队保持与重构规划三部分,如图3所示。

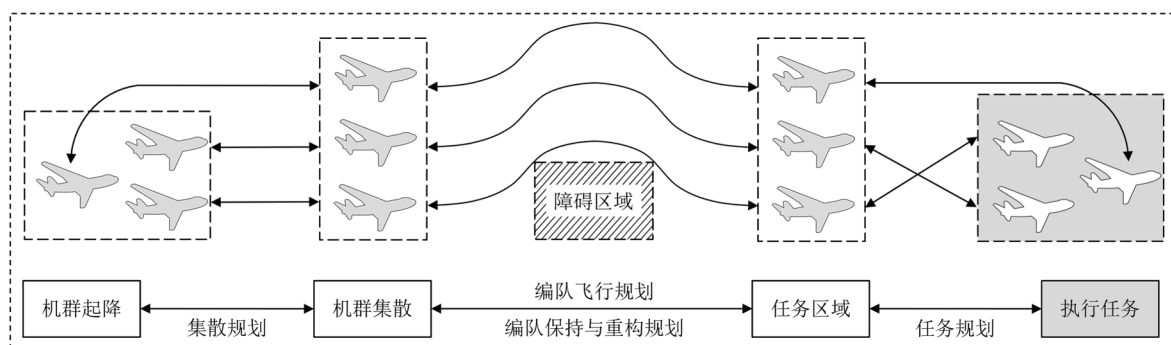


图3 无人机群生命周期航迹图

Fig. 3 Flight path in the life cycle of UAVs

3.1.1 集散规划

集散规划指无人机分别从准备机场起飞,通过航迹规划与控制在指定时间内到达编队集结地点,或在任务完成后由解散地点独立返回机场降落的过程。考虑到环境与机群协同因素,在无人机数量较多或起降机场较分散的情况下,集散规划的计算量可能较大,可将集散规划问题分为初始航迹规划和飞行过程中的航迹控制两个独立部分^[12]。初始航迹规划是无人机从准备机场起飞至集结地点的典型路径规划问题,可用经典路径规划方法进行求解。航迹控制则指无人机沿既规划的航迹飞行时,控制和调整无人机速度,以实现机群同时到达集合地点的目的。其中航迹控制又可分为集中式控制和分布式控制^[9,12,13]。前者虽可能获得全局最优解,但要求中心无人机对编队所有成员进行交互,这对中心无人机计算性能、稳定性和安全性要求较高;后者则仅需与邻近无人机进行交互,控制稳定性较好,效率较高,赋予机群一定的自主反应空间。

3.1.2 编队飞行规划

编队飞行规划指无人机群集结完毕后,以编队形式向任务区域飞行并规避障碍和动态影响的过程,是无人机群航迹规划的重要内容。在保持编队队形的情况下,机群可视为一个具有更大几何轮廓的无人机体。不过,与无人机集结前独立的航迹规划不同,集结后的航迹规划不再是简单的路径规划问题,而需同时考虑无人机群的速度控制和协同因素,以实现对飞行过程中的障碍物和动态扰动做出快速响应。无人机群编队飞行规划方法可采用采样模型法、数值优化法和智能优化算法等^[13]。

采样模型法指无人机群在连续空间中有限的候选解中选择一条可行路径。根据模型搜索算法的不同,采样模型法可分为确定性模型法和概率性模型法。确定性模型将无人机群飞行空间划分为有限的节点,将问题转变为目标节点间最短路径规划问题,可通过旅行商模型求解,但无法考虑无人机群避碰问题,只适用于无人机群航迹的初步规划^[14]。概率性模型则基于快速随机树搜索算法确定机群距离目标的飞行路线^[15],可针对障碍目标进行有效避让^[16],但算法的收敛性需进一步验证和提升。

数值优化法主要有混合整数线性规划法^[17,18]、非线性规划法^[19,20]、动态规划法^[21]和二次规划法^[22]等。智能优化算法近年来得到了较多的研究和应用,譬如改进的遗传算法能够很好地实现无人机群线上/线下航迹和近地飞行的智能规划^[23];粒子群算法在求解考虑时序、环境和动力学混合约束的无人机群航迹规划问题时,表现出良好的收敛性、鲁棒性和求解效果^[24,25];结合混沌理论的人工蜂群算法^[26]和生物地理学优化算法^[27]提升了无人机群动态航迹规划的种群多样性,在复杂机群作战环境下展现出较好的鲁棒性。

3.1.3 编队保持与重构规划

编队保持规划指无人机群飞行过程中保持编队几何形状不变并避免相互碰撞的规划过程。编队重构规划指机群在编队飞行过程中,遭遇障碍物,任务需求改变或编队中个别无人机遭遇故障或损毁时,机群改变原有队形并以较快速度重新编组的过程。在无人机群编队飞行过程中,编队保持与编队重构规划往往交替进行。

编队保持规划策略主要来源于机器人编队控制领域,主要分为领航-跟随规划策略、虚拟结构规划策略和基于行为规划策略三类^[12,28]。

1) 领航-跟随规划策略

领航-跟随(leader-follower)规划策略指定由编队中某架无人机担任领航机,严格依照航迹飞行;其余无人机作为跟随机,与领航机进行实时信息交互并调整本机运动状态,始终保持与领航机相对位置不变,达到无人机编队几何形状不变与避碰的效果。该策略的优点在于信息交互单一,计算与控制简单,但过于依赖领航机的航迹规划精度。若领航机航迹规划出现偏差,交互设备发生故障或跟随机掉队,可能导致整个无人机群的编队失效。因此,学者们还提出了链式领航-跟随策略,即机群采用链式的跟随结构,每架无人机仅跟随其前一架、距离最近或性能最好的一架无人机^[12,29],但也会引发位置误差迭代传递的问题。由此可见,增强无人机编队的队形反馈^[30],提升领航机航迹与速度的智能规划水平,对领航-跟随规划策略起着至关重要的作用。

2) 虚拟结构规划策略

虚拟结构(virtual structure)规划策略将无人机群视为一个虚拟编队结构,以结构中某一固定的虚拟点作为领航点,编队所有无人机均作为跟随机。虚拟结构规划策略本质上是一种领航-跟随策略,但虚拟结构不再以真实的无人机作为领航机,可避免领航机失效导致编队崩溃的致命缺陷,但虚拟领航点的合成和传输也需要复杂计算和信息交互的支持。虚拟结构规划可分为刚性和柔性两类^[12,28]。在刚性虚拟结构航迹规划中,编队内所有无人机与虚拟领航点保持一个恒定的直线矢量,对编队几何结构的保持十分有效^[31],但当机群转向或避障时规划效果欠佳。柔性虚拟结构在虚拟领航位置外,还定义了机群曲率运动的虚拟参考点,可以达到机群在爬升、转向等曲线运动时能够平滑飞行并保持编队结构不变的效果^[32]。

3) 基于行为规划策略

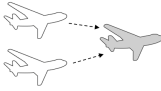
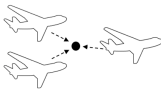
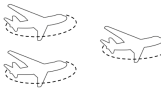
基于行为(behavior-based)的规划策略为无人机定义了目标搜索、目标追随、队形保持、躲避障碍和规避相互碰撞等基本行为,对行为加权合成的飞行速度作为控制动作^[12,28]。与机器人编队行为策略相比,无人机处于三维的飞行环境,机体速度更快、运动更为复杂、碰撞风险更高。Kim等^[33]将一种基于微分同胚映射的线性化反馈技术应用于无人机三维运动学模型,实现了机群飞行过程中编队的稳定保持。

上述三种编队保持规划策略的特点对比如表1所示^[12]。可见,三种规划策略各有优劣,因此设计混合的规划策略有利于提升无人机群航迹规划的智能化水平,增强机群避障能力,减少不必要的重复控制与规划。

在无人机群航迹规划的过程中, 编队重构和编队保持往往交替进行. 针对二维环境中无人机群编队重构规划问题, 最小持久图理论被用于设计重构规划算法^[34,35], 但未考虑机群三维编队重构问题. 邓婉等^[36]针对两架无人机的“长机-僚机”编队结构重构问题, 推导了编队三维飞行动力学方程, 并采用 PID(proportion integral derivative)控制方法实现对编队航迹、速度和高度的有效规划, 但编队成员数量较小, 不能很好地反映多机编队重构规划问题. Zhang 等^[37]结合差分进化和滚动时域控制方法对 5 架无人机二维编队进行了重构规划. Duan 等^[38]给出了二维无人机群编队重构最短时间规划模型, 利用控制参数化和时间离散化的粒子群算法实现了机群灵活而有效的重构效果.

目前无人机群航迹规划得到广泛的研究, 但还是以二维环境和少量成员的机群编队问题为主. 未来机群编队航迹规划研究应该面向三维环境、复杂障碍环境、大型机群编队和多机群耦合编组问题等.

表 1 无人机编队保持规划策略的对比
Table 1 Comparison among the strategies of UAVs' formation maintaining

编队保持规划策略	示意图	优点	缺点
领航-跟随规划策略		1) 控制简单, 无人机仅需与领航机进行信息交互 2) 无人机的计算量小	1) 链式领航-跟随规划策略存在位置误差的迭代传递 2) 无位置误差反馈, 跟随机易掉队 3) 领航机故障将导致编队瘫痪
虚拟结构规划策略		1) 机群跟随虚拟点, 无位置误差传递迭代 2) 避免了领航机故障引发编队瘫痪的问题	1) 虚拟领航点位置的合成与传输需复杂计算和大量信息交互, 2) 虚拟领航点位置固定, 机群避障和转向能力欠佳
基于行为规划策略		1) 通信量少 2) 有行为反馈 3) 可以自主快速响应	1) 机群全局行为受个体行为组合叠加影响缺乏准确定义或描述 2) 基本行为的数学描述困难 3) 编队队形稳定性欠佳

3.2 无人机群任务智能规划

无人机群任务智能规划的目的是在战术或技术指标的指导下, 将不同类型、权重、难度、威胁程度和执行时间的任务合理地分配给不同的无人机去执行, 使得机群有效遍历所有任务目标, 且执行任务的收益最高, 成本最小, 风险最低. 因此, 无人机群任务智能规划问题可映射为经典问题模型, 进而利用智能优化算法进行求解.

3.2.1 任务规划建模

1) 旅行商模型

旅行商模型是无人机群任务规划问题最基本且常用的描述模型. Alemayehu 等^[39]将无人机群任务规划问题映射为多旅行商问题, 即将每架无人机作为具有一定任务执行能力的旅行商, 以机群在复杂约束条件下遍历所有目标点且成本最小为优化目标. 杜于飞等^[40]针对无人机作战的实际需求, 将机群任务规划分为侦察任务规划和轰炸任务规划两部分, 其中侦察任务本质上是满足各项约束的路径规划问题, 而轰炸任务则是可选派多人多类的单双循环混合旅行商问题.

2) 车辆路径规划模型

车辆路径规划模型也是求解NP难问题的经典建模方法之一, 其时间约束和任务约束特征明显, 与无人机群任务规划问题十分相似^[41]. Rourke 等^[42]以美军无人机群作战任务为背景, 针对机群执行任务过程中可能出现的突发状况, 提出了一种动态三维车辆路径规划模型, 有效应对了传统静态无人机群任务规划灵活性差、突发事件响应慢的问题. Guerrer 等^[43]综合考虑无人机群能量约束和风速影响, 将任务规划问题分别映射为车辆路径规划和旅行商问题, 开展了仿真对比与验证研究. 美国空军研究实验室建立了多时间窗车辆路径规划模型, 并成功运用于“全球鹰”和“捕食者”等无人机侦察任务规划中^[44].

3) 线性规划模型

李炜等^[45]、梁国伟等^[46]建立了拓展的混合整数型线性规划模型,利用改进的智能优化算法实现了无人机群任务的有效规划。Alighanbari^[47]认为旅行商和路径规划问题虽极大简化了模型,但对于机群实时动态任务的优化速度偏低,因而建立了基于滚动时域的混合整数线性规划模型,综合考虑了任务风险、飞行噪音和不确定性环境等影响因素,开展了复杂环境下无人机群任务规划研究。李大东等^[48]将无人机群的动态任务规划问题近似处理为线性数学模型,提出了将敌方威胁随我方机群状态变化的双向动态规划模型,并以执行任务时间最短为优化目标实现了机群任务的有效规划。

3.2.2 任务规划智能算法

近些年智能算法在无人机群任务规划中应用广泛,下面介绍一些代表性方法的研究。

1) 蚁群算法

Cekmez 等^[49]构建了无人机群执行任务过程中的无线传感网络,结合 CUDA(compute unified device architecture)平台设计了一种并行蚁群算法,在求解多目标复杂任务规划问题中表现出较好的收敛性。黄伟民等^[50]提出了针对大密度任务目标区域的规划优化方法,通过优化蚁群算法的搜索条件,有效降低了蚁群算法求解多目标任务规划问题的时间和空间复杂度。Perez-Carabaza 等^[51]针对无人机不确定环境中搜索时间优化问题,在蚁群算法引入了时间概率和空间属性信息,取得了良好的收敛速度和规划效果。

2) 粒子群算法

针对海上无人机群与舰艇之间协调作战问题,马华伟等^[52]利用自适应式粒子群算法对无人机群协同任务规划进行求解,算法能够自适应调整粒子群的惯性权重,很好地防止算法陷入局部最优。杜继永等^[53]通过位置饱和策略构造粒子搜索空间,并采用自适应惯性权重提高算法收敛速度和全局寻优能力。此外,粒子群算法与蚁群^[54]、蜂群^[55]等算法的混合使用也具有不俗的效果。

3) 遗传算法

Choi 等^[56]设计了一种基于遗传算法的无人机群分布式任务规划模型,通过成员间的交互协商策略进一步提高任务规划效果,在动态任务环境中表现出良好的全局寻优能力。Roberge 等^[57]对比了并行遗传算法和粒子群算法在无人机群三维动态侦察任务中的规划效果。杨尚君等^[58]借鉴遗传变异思想改进了鱼群算法,获得了无人机群任务分配的多目标最优解集,并根据决策偏好选择最佳的任务规划方案。Wang 等^[59]利用双染色体编码和多变异算子的遗传算法有效地提高了种群多样性,在大规模无人机侦察任务规划中表现出优越的全局寻优能力。

4) 合同网协议算法

合同网协议算法可通过成员间的协商和竞争提高寻优能力,在无人机群任务规划中也得到广泛应用。Liu 等^[60]在合同网协议算法的基础上,考虑无人机在军事任务中的优先级、攻击效率和被击毁概率,从目标分配的收益和成本两方面构造任务分配的总体目标函数。刘宏强等^[61]在合同网协议算法的基础上引入了熟人库和公共消息机制,有效缩小了任务合同网招标范围,提高了无人机感知和接受任务的主动性。Meng 等^[62]研究了考虑通信距离的无人机群持续动态任务规划问题,通过基于合同网协议算法和无人机动力学模型的混合三维仿真系统对机群任务规划效果进行了评估。

5) 分布式算法

基于并行、协同、通信和多 Agent 策略的分布式算法具备较强的问题导向性和可拓展性,有助于降低系统响应层级,提高规划速率和鲁棒性等^[63]。Kingston 等^[64]设计了一种基于共识与协商策略的分布式算法,可以灵活地增减无人机数量,具有较好的收敛性和优化能力。Johnson 等^[65]针对大规模无人机任务规划问题,设计了一种基于异步通讯和共识策略的分布式算法,通过实验验证了该算法在收敛速度和优化质量上较一般的分布式算法均有显著提升。曹攀峰等^[66]提出了一种基于分布预测模型的分布式算法,通过引入缓冲周期和协商机制,有效应对了无人机通讯延迟问题,在恶劣多变的任务环境中表现出较强的鲁棒性和灵活性。晋一宁等^[67]考虑了无人机飞行动力学约束,提出了基于局部感知和局部通信策略的在线分布式覆盖

算法,促进了无人机系统对动态目标覆盖行为的持续涌现,在机群和任务规模持续增加的情况下保持了良好的稳定性和规划效果。

综上,无人机群任务规划的问题建模与优化算法相辅相成,缺一不可。只有综合考虑实际环境和各类约束,准确描述问题并合理建模,有针对性地设计高效的智能优化算法,才能取得理想的任务规划结果。

4 多航天器智能规划

随着航天任务需求和多样性的不断提升,越来越多的航天器通过组合的形式执行任务。多航天器组合运行具有协同性能好、运行成本低、飞行效率高、执行任务可靠性高和适应性强等优点,是未来航天器在轨服务形式的发展趋势。同时,多航天器以组合形式执行任务也对航天器智能规划技术提出了新的挑战。多航天器智能规划问题主要分为轨道规划和任务规划两大部分。轨道智能规划是在航天器任务需求的驱动下,规划多航天器成员的飞行轨道,并规避飞行过程中风险因素的规划问题。任务规划则是将地面管控中心发布的任务需求进行分层、分解,智能地分配给多航天器执行的规划过程。由于地面管控中心无法对所有航天器不确定性任务变更、环境影响等进行实时快速的响应,因此如何充分发挥多航天器轨道与任务规划的智能化水平、降低多航天器组合运行风险、提高协同执行任务效率是多航天器智能规划技术的研究重点。

4.1 多航天器轨道智能规划

多航天器轨道智能规划的核心思路与无人机群航迹规划相近,均是以最大限度访问目标、实现个体功能、避免碰撞与障碍为目的的路径规划问题。但多航天器轨道规划具有以下难点: 1) 飞行速率与惯性大、灵活性低。2) 轨道约束性强、机动能力有限。3) 航迹具有不可逆性、重访周期长等。因此,多航天器轨道智能规划一直以来都是航天技术的热点问题。

多航天器轨道智能规划可分为飞行轨道规划和避碰轨道规划两种。前者是指多航天器编组完成后,以整体的形式在轨飞行并执行任务的规划过程,是一种长距离路径规划问题;后者则是指航天器在执行任务过程中避免与其他合作成员或非合作障碍物发生碰撞的短途路径规划问题。

4.1.1 飞行轨道规划

上世纪90年代起,基于卫星技术的多航天器组合飞行概念受到重视。根据航天器相对运动状态的不同,多航天器飞行轨道规划可分为组网飞行轨道规划和编队飞行轨道规划,如图4所示。

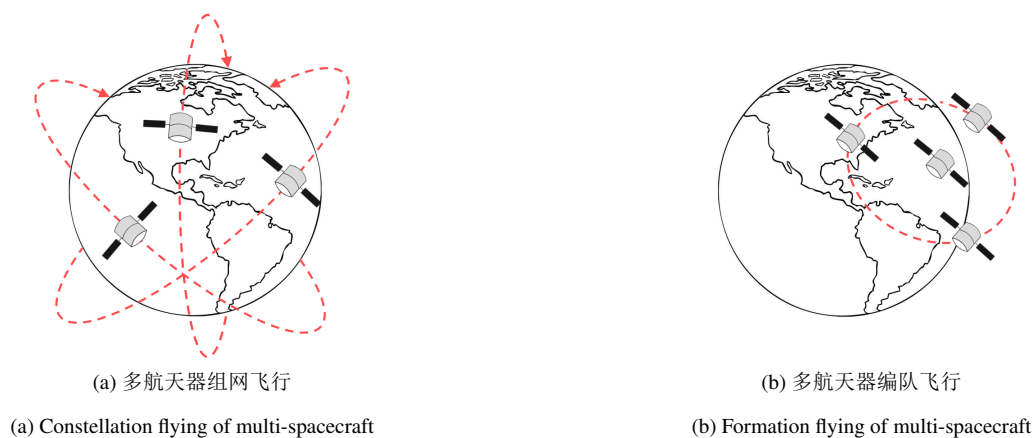


图4 多航天器轨道规划示意图

Fig. 4 Diagram of orbit planning for multi-spacecraft

1) 组网飞行轨道规划

组网飞行轨道规划是指多航天器在不同轨道平面飞行,各航天器轨道有所重叠以实现有效增大航天器作用覆盖范围、缩短目标重访周期的目的^[68].组网飞行轨道规划的主要因素^[69]如表 2 所示.

多航天器组网飞行轨道规划以卫星组网为主,又称“星座”,典型技术有 GPS 导航规划技术、铱星星座规划技术和 Orbcomm 星座规划系统等. GPS 导航规划目前较为成熟,其智能规划系统和优化算法的研究一直以来得到广泛关注.铱星星座规划技术较早实现了航天器组网中的星链技术,打通了多航天器间的通信交互链路,为多航天器航迹智能规划提供了重要前提. Orbcomm 星座规划系统^[70]将多航天器组网飞行轨道规划分为轨道保持、在轨操作和轨道确定三部分,通过地面监控和全球网络控制中心对组网航天器进行轨道规划,能够实现多航天器间相对距离的稳定保持和任务需求变更时的轨道重规划.

表 2 多航天器组网飞行轨道规划中主要因素
Table 2 Major factors in constellation orbit planning for multi-spacecraft

因素	影响	规划准则
航天器数量	任务成本和任务覆盖能力	以较少的航天器满足任务需求
轨道高度	发射、任务覆盖变轨成本	成本与组网性能相互权衡
轨道平面数量	灵活性和任务覆盖能力	以较少的轨道数量满足任务覆盖需求
轨道倾角	任务覆盖的纬度分布	任务覆盖的维度分布和成本相互权衡,
轨道平面相位	任务覆盖的均匀程度	以在各项独立相位中实现最优覆盖
偏心率	任务的复杂性、可达高度	除特殊任务需求外一般取零

2) 编队飞行轨道规划

编队飞行轨道规划是指多航天器组成并保持一定几何形状,共同围绕地球周期性运转的轨道规划问题,具有成本低、性能与灵活性高,编队成员协同性好等优点.多航天器编队结构复杂、航天器功能齐全、任务性能和任务需求均较高,已在国内外取得许多研究成果,如美德合作的重力与气候实验卫星(GRACE)^[71]、德国 Tandem-TerraSAR 编队卫星^[72]、我国天宫二号伴随小卫星等^[73].

从规划参照系的角度来看,编队飞行轨道规划可分为绝对轨道规划和相对轨道规划两种.绝对轨道规划是一种导航式轨道规划方法,主要通过 GPS 等位置跟踪与测量系统对航天器编队成员进行独立轨道规划,这要求编队内所有航天器都具备精准的导航与规划能力.而相对飞行轨道规划是指在编队中主航天器绝对轨道规划的基础上,伴随航天器相对于主航天器进行轨道规划的问题,是目前航天器编队规划的主要手段^[74].相对飞行轨道规划通常借助 C-W 方程^[75]等动力学模型或轨道根数差法^[76]的运动学模型进行求解和优化.

此外,在多航天器组网或编队飞行的同时,航天器往往会受到诸如地球非球形摄动、大气阻力摄动和太阳光压摄动等因素的干扰^[68].林来兴等^[77]提出了一种多航天器编队同步轨道规划方案,在地球同步轨道摄动的影响下实现了编队动力学的稳态仿真. Bevilacqua 等^[78]分析了摄动对编队中主航天器绝对轨道和伴随航天器轨道的影响,改进了编队相对轨道规划动力学方程,取得了良好的规划效果.

4.1.2 避碰轨道规划

根据多航天器编队飞行过程中避碰对象的不同,可以将多航天器避碰轨道规划问题分为防编队内航天器相互碰撞(防碰)和防与编队外障碍物发生碰撞(避障)两类.

1) 防碰轨道规划

防碰轨道规划指多航天器飞行过程或队形调整的过程中,编队内航天器之间避免相互碰撞的规划问题.由于航天器质量大、飞行绝对速度快、轨道机动响应速度较慢、碰撞成本高等特点,多航天器编队防碰规划研究一直是编队飞行轨道规划中的重要内容.

王辉等^[79]指出多航天器编队在队形重构和队形失效重组时是航天器之间发生碰撞概率最高的两种机动工况,并利用数学规划方法研究了多航天器避碰准则、规避策略和规划方法,实现了避碰路径规划中燃料消耗最小的性能指标. Amico 等^[80]运用相对偏心率和相对轨道倾角矢量来描述多航天器编队相对运动方

法,通过令二者平行来保证航天器在法向和径向安全距离,实现防止航天器编队成员相互碰撞的目的,进而开发了一种被动式航天器编队避碰规划系统^[81]. Izzo 等^[82]在国际太空站的 MIT Spheres 平台内建立了基于行为的航天器模型,通过粒子群算法开展航天器模型编队规划,在距离与角度方面均取得了微米级的精度效果.

2) 避障轨道规划

避障轨道规划指多航天器在飞行过程中,遇到非合作的其它航天器、太空垃圾或禁飞区域等不确定性障碍物时,通过调整轨道和飞行状态以躲避障碍物的规划问题.由于非合作障碍物运动和结构的偶然性和不确定性,会对多航天器编队带来较大的碰撞风险,因此避障轨道规划近年来也受到广泛关注.多航天器开展避障轨道规划前首先需要判定障碍物碰撞风险,目前航天器障碍物碰撞风险评估主要有 Box 区域判定法和碰撞概率判定法.

Box 区域判定法是以航天器为中心,以一定的长方体范围定义航天器不同程度的碰撞警报区,当监测到障碍物进入航天器警报区内则触发航天器必要的规避响应^[83].该方法可降低障碍物监测误差带来的影响,具有较高的安全性,但缺乏对碰撞风险的准确评估,预警虚报率高,易导致航天器频繁的轨道机动,降低了航天器燃料使用率和任务执行效率.由此,学者们引入了航天器障碍碰撞概率评估方法,在Box区域判定的基础上通过随机分析方法实现对障碍物碰撞概率较为准确的判定,为航天器避障轨道规划提供了可靠依据^[84,85].

王涛等^[86]指出目前多航天器避障规划研究主要集中于 2~3 航天器编队任务中,对多航天器复杂构型编队的协同避障研究还较少,并提出了一种基于聚集、驻留、避让行为的多航天器编队避障规划模型,在动态障碍影响下表现出良好的避障规划效果,但该模型仅适用于对称航天器编队. Izzo 等^[87]等分析了多航天器编队通讯受限情况下的避障问题,基于多种行为策略实现了航天器编队分布式避障轨道的智能规划.

可见,学者们对多航天器飞行轨道与避碰轨道规划开展了广泛的研究.在多航天器轨道规划技术的基础上,航天器合理编组、相互协同,实现轨精准与安全飞行,为多航天器任务的智能规划提供了有力保障.

4.2 多航天器任务智能规划

多航天器任务智能规划指在多种约束条件下为各航天器智能分配任务、规避冲突的过程.与无人机群任务规划不同的是,多航天器任务智能规划包含了更多与实际问题有关的特定约束,如航天器连续执行任务的时间间隔、航天器与地面目标可见时间窗口、航天器姿态调整次数和能量限制、航天器信息存储量以及航天器气象环境条件等,具有更大的问题规模和约束复杂性.从问题规模的处理方式上看,多航天器任务智能规划技术可分为集中式任务规划和分布式任务规划两类.

4.2.1 集中式任务规划

集中式任务规划是综合考虑问题模型中的各项因素,在全局范围内搜索最优解的传统规划模式.集中式的规划方法有利于搜寻到全局最优解,在中小规模的任务规划问题中表现出良好的规划效率和规划质量,是多航天器任务智能规划的常用方法.

在传统对地观测系统规划问题中, Wolfe 等^[88]对比了三种方法,研究表明,基于优先级方法可以简单快速产生可行解,前瞻算法在有限的时间内提升结果质量,遗传算法可以产生近似最优结果但求解速度较慢.美国国家航空航天管理局将多航天器协同规划抽象为约束满足问题,设计了多航天器协同规划系统^[89]. Globus 等^[90]认为多航天器任务规划问题的主要特点是需要考虑多种复杂约束且搜索空间巨大,故以执行较多的高优先级任务为优化目标,并比较了遗传算法、爬山法和模拟退火在小规模航天器任务规划问题中的效果.

在充分考虑复杂用户需求和航天器高敏捷性等因素的基础上, Bianchessi 等^[91]构建了多航天器多载荷多圈次联合任务规划模型,考虑了航天器姿态转换时间、用户需求时效性、多用户间公平性等因素,采用改进型禁忌搜索算法进行求解,并用列生成方法得到算例的上限,但该模型忽略了航天器信息存储和能量约

束. Wu 等^[92]针对敏捷卫星多轨成像观测任务, 考虑了星上固存约束和能量约束, 并通过自适应的模拟退火算法和动态任务聚敛策略实现了良好的规划效果. Liu 等^[93]还引入了成像质量和姿态转换间隔约束, 利用一种自适应式的邻域搜索策略有效应对了密集观测任务的规划问题, 但只是预留了 40% 的轨道时间供数传任务规划, 没有进行全局考虑. 经飞等^[94]考虑了卫星数传过程中记录、实传、回放等多种数传任务模式, 建立了成像数传一体化的约束满足模型. 张忠山等^[95]综合考虑了姿态转换时间、固存和电量约束等, 设计了一种基于资源预留的启发式方法, 在大规模成像数传一体化任务规划中保持良好的鲁棒性.

在集中式智能规划的模式下, 多航天器在地面管控中心的统一规划和组织管理下执行任务, 地面管控中心能够在平台信息、数传资源信息的基础上统筹安排、统一规划, 具备了获取任务规划全局最优解的条件. 但是, 随着资源与任务规模不断扩大, 资源约束日益复杂, 地面离线式的集中式任务规划方法已无法应对多航天器在轨任务的各项挑战. 由此, 综合考虑航天器高敏捷性、协同性和自主性特点的分布式任务规划技术成为了未来多航天器任务规划研究的重要方向.

4.2.2 分布式任务规划

分布式任务规划是相对集中式规划模式而言, 通过 MAS(multi-agent system)技术和自主协同技术, 分布式完成任务分配的新兴规划模式. 在多航天器智能规划领域, 分布式任务规划方法的优势主要体现在: 1) 自主性, 减少了航天器对地面管控中心的依赖; 2) 并行性, 降低了问题规模和响应层级, 提高了快速服务能力; 3) 实用性, 提升了资源配置的合理性, 增强了系统拓展性和鲁棒性^[96]. 因此, 多航天器分布式任务规划研究近年来得到诸多学者的关注.

开放地理空间联盟提出了传感器网络整合架构, 构建了基于传感器网络“即插即用”的标准平台^[97]. Morris 等^[98]研究了复杂观测需求分解方法和约束关系描述模型, 提出了一种基于分布式规划的多星协同观测方法, 并建立了由环境配置、规划器、需求管理器和规划数据库组成的原型系统. Herold^[99]提出一种异步分布优化的空天协同任务规划框架, 在各子类观测资源与用户间加入协调器, 可以将任务需求分解成具体观测任务并有序地分配给子规划器.

同时, 多航天器分布式任务规划技术的发展离不开航天器自主能力的不断提升. 高黎等^[100]针对分布式多航天器自主协作的运行模式, 通过集覆盖理论将任务规划问题转化为集覆盖问题, 并提出了一种基于合同网的严格启发式优化算法. Bonnet 等^[101]通过敏捷卫星编队分布式的信息交互与自主行为, 建立了一种自适应动态任务规划模型, 并验证了模型的规划效率和鲁棒性. 韩道军等^[102]提出一种多航天器任务规划算法联合使用的单机方案, 搭建了分布式航天器编队环境, 很好解决了大量航天器数据计算资源不足和传统分布式算法同步性差的问题.

虽然分布式任务规划技术具备良好的自主性、并行性、规划效率以及较低的容错率, 但其难点与不足也较为明显: 1) 分布式规划没有全局考虑问题的所有因素, 很难获得全局最优解; 2) 需要多航天器之间以及地面管控中心之间大量信息交互与计算的支持; 3) 规划效果受分布式策略与算法影响显著; 4) 故障诊断与排除的难度大等. 可见, 合理分析多航天器任务规划问题的特点, 选择合适的或组合使用集中式/分布式任务规划策略, 对任务规划质量、效率和稳定性起到不可或缺的作用.

综上, 得益于航天器自主性水平和智能优化算法的快速发展, 多航天器轨道与任务智能规划技术得到不断推进. 面向未来无人系统更高自主性、协同性和敏捷性的需求, 多航天器轨道与任务规划应向着一体化的趋势发展, 形成“任务规划驱动轨道规划, 轨道规划服务任务规划”的高协同无人系统智能规划模式.

5 结束语

以无人机群和多航天器为主的空天无人系统智能规划是一个涉及自动化控制、传感技术、网络通讯、空气/轨道动力学、决策优化等多学科的复杂路径与任务规划问题. 通过对空天无人系统智能规划技术的综

述,可见智能规划技术为无人机群和多航天器带来了:1)更高的资源利用率、任务完成率和多目标的优化质量;2)更快的规划速率;3)更好的并行性、协同性和鲁棒性;4)更强的自主响应、动态响应和自适应能力等。所以,智能规划水平对充分发挥无人系统优势、提升任务执行能力起到了举足轻重的作用。

与此同时,面向未来不断提升的任务需求、任务复杂性和环境复杂性,现有的空天无人系统智能规划研究还存在任务与环境模拟理想化、路径与任务规划分离化、系统模式单一化等问题。因此,未来无人系统智能规划的研究与发展应重视如下方面:

1) 任务与环境模拟复杂化

空天无人系统在真实的任务中,执行任务的方法可能不是简单的点对点的追击问题,执行任务的效果也并非单纯的0-1事件或概率事件。例如:在无人机群执行空中动态目标打击的任务中,除了采用直接追击目标的方式,还可通过“前置追击”、“后滞追击”等有效战术机动来完成。在真实的工作环境中,空天无人系统不仅可能遇到点状或区域性的可预测障碍,还可能面临大量的或离散的难预测障碍,例如无人机群飞行过程中气流和风速扰动,机群飞行过程中鸟群障碍,电磁干扰导致的系统通讯中断等。这些难预测的突发性动态影响,往往不能通过传统的任务与路径规划策略得以有效解决,需要在进一步提升对无人机和航天器飞行动力学与控制技术研究的基础上,结合实际无人机战术机动和航天器姿态调整常用方法,发展无人系统离散化的和自适应的快响式智能规划策略,实现空天无人系统在复杂任务和环境分布式与集中式、协同式与自主式和短期规划与长期规划交替结合的动态智能规划技术。

2) 路径与任务规划一体化

无人机群的航迹规划和多航天器的轨道规划均属于路径规划范围,而路径规划的目的本质上是为任务规划提供有效的执行环境。目前大部分研究都将空天无人系统的路径与任务规划分开进行,这样虽可大幅减少系统计算量,提升规划速率,但很难获取规划的全局最优解,造成了一定程度的资源和任务可执行窗口的浪费。因此,在传感技术、网络技术和计算机技术的牵引下,未来空天无人系统路径与任务规划应向着一体化的趋势发展,通过滚动式、交替式和协商式的规划方法,逐步形成“任务规划驱动路径规划,路径规划服务任务规划”动态智能规划格局。

3) 空天无人系统与体系多元化

发展空天无人系统的初衷是单一无人机和航天器执行任务的能力有限,故通过无人机群和航天器编组的方式来提高任务能力、范围和效率。同时,在空天无人系统中,单一类型的无人机群或多航天器可能也无法很好满足未来日益复杂的任务需求。例如,以预警机、侦察机、攻击机和加油机组成的无人机混合作战编队能够实现单一机群无法完成的远距离侦察、打击和保障任务。此外,无人机群与多航天器系统也具备一体化的发展前景,如遥感卫星与无人机群相互辅助开展测绘任务^[103],无人机承担星地链路中动态中继任务^[104],卫星承担机群通讯任务等。由此,发挥系统成员的独有优势,实现成员间优势互补,发展多元化、一体化的空天无人系统具有非常重要价值。进而,在系统协同性和智能规划技术发展的基础上,设计多角度的动态评价与组合评价方法^[105],构建由多系统组成的空天无人体系可以最大程度地提升任务执行能力,解决未来任务的复杂性与多元性问题。未来,遥感卫星与导航卫星、侦察机与轰炸机和攻击梯队与保障梯队相互协同的无人体系智能规划将成为现实。

参考文献:

- [1] Zhang T, Li Q, Zhang C S, et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems. *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, 2017, 18(1): 68–85.
- [2] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92(2): 79–97.
- [3] Kim B O, Yun K H, Chang T S, et al. A preliminary study on UAV photogrammetry for the hyanhocoast near the military reservation zone, eastern coast of Korea. *Ocean and Polar Research*, 2017, 39(2): 159–168.

- [4] Goodbody T R H, Coops N C, Marshall P L, et al. Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. *Forestry Chronicle*, 2017, 93(1): 71–81.
- [5] Department of Defense. The Unmanned System Integrated Roadmap. Washington: Department of Defense, FY 2011–2036, 2011.
- [6] 祁圣君, 张立丰. 美国军用无人系统综述. *飞航导弹*, 2015, 45(7): 21–24.
Li S J, Zhang L F. Reviews on military unmanned systems in the United States. *Aerodynamic Missile Journal*, 2015, 45(7): 21–24. (in Chinese)
- [7] Stolba M, Komenda A. The MADLA planner: Multi-agent planning by combination of distributed and local heuristic search. *Artificial Intelligence*, 2017, 252: 175–210.
- [8] Guo W L, Luo W Q. Pinning adaptive-impulsive consensus of the multi-agent systems with uncertain perturbation. *Neurocomputing*, 2018, 275: 2329–2340.
- [9] 张民强, 宋建梅, 薛瑞彬. 通信距离受限下多无人机分布式协同搜索. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(11): 2980–2986.
Zhang M Q, Song J M, Xue R B. Multiple UAVs cooperative search under limited communication range. *Systems Engineering: Theory and Practice*, 2015, 35(11): 2980–2986. (in Chinese)
- [10] She Y C, Li S, Zhao Y B. Onboard mission planning for agile satellite using modified mixed-integer linear programming. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 72: 204–216.
- [11] Ramirez-Atencia C, Bello-Orgaz G, R-Moreno M D, et al. Solving complex multi-UAV mission planning problems using multi-objective genetic algorithms. *Soft Computing*, 2017, 21(17): 4883–4900.
- [12] 王国强, 罗 贺, 胡笑旋, 等. 无人机编队管理的研究综述. *电光与控制*, 2013, 20(8): 48–53.
Wang G Q, Luo H, Hu X X, et al. A survey on coordinated UAV formation management. *Electronics Optics and Control*, 2013, 20(8): 48–53. (in Chinese)
- [13] Yu X, Zhang Y M. Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 2015, 74(4): 152–166.
- [14] Techy L, Woolsey C A. Minimum-time path planning for unmanned aerial vehicle in steady uniform winds. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2009, 32(6): 1736–1746.
- [15] Kothari M, Postlethwaite I. A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees. *Journal of Intelligent and Robotic System*, 2013, 71(2): 231–253.
- [16] Yu H, Beard R, Byrne J. Vision-based navigation frame mapping and planning for collision avoidance for miniature air vehicles. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(7): 824–836.
- [17] Kim J, Morrison J R. On the concerted design and scheduling of multiple resources for persistent UAV operations. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2014, 74(1/2): 479–498.
- [18] Radmanesh M, Kumar M. Flight formation of UAVs in presence of moving obstacles using fast-dynamic mixed integer linear programming. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 50: 149–160.
- [19] Tisdale J, Kim Z, Hedrick J K. Autonomous UAV path planning and estimation. *Robotics and Automation Magazine*, 2009, 16(2): 35–42.
- [20] Zhang Z, Wang J, Li J. Lossless convexification of nonconvex MINLP on the UAV path-planning problem. *Optimal Control Applications and Methods*, 2017, 39(2): 845–859.
- [21] Helbig M, Engelbrecht A P. Population-based metaheuristics for continuous boundary-constrained dynamic multi-objective optimisation problems. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2014, 14(1): 31–47.
- [22] Jung D, Tsiotras P. On-line path generation for unmanned aerial vehicles using B-spline path templates. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2013, 36(6): 1642–1653.
- [23] Pehlivanoglu Y V. A new vibrational generic algorithm enhanced with a voronoidiagram for path planning of autonomous UAV. *Aerospace Science and Technology*, 2012, 16(1): 47–55.
- [24] Karimi J, Pourtakdoust S H. Optimal maneuver-based motion planning over terrain and threats using a dynamic hybrid PSO algorithm. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 26(1): 60–71.
- [25] Liu Y, Zhang X J, Guan X M, et al. Adaptive sensitivity decision based path planning algorithm for unmanned aerial vehicle with improved particle swarm optimization. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 58: 92–102.
- [26] Xu C, Duan H B, Liu F. Chaotic artificial bee colony approach to uninhabited combat air vehicle (UCAV) path planning. *Aerospace Science and Technology*, 2010, 18(4): 535–541.

- [27] Zhu W R, Duan H B. Chaotic pblueator-prey biogeography-based optimization approach for UCAV path planning. *Aerospace Science and Technology*, 2014, 32(1): 153–161.
- [28] 张明中. 基于粒子群优化算法的多机器人编队控制技术. 长沙: 中南大学, 2011.
Zhang M Z. PSO-based Multi-robot Formation Control. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)
- [29] Kownacki C, Ambroziak L. Local and asymmetrical potential field approach to leader tracking problem in rigid formations of fixed-wing UAVs. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 68: 465–474.
- [30] He L L, Bai P, Liang X L, et al. Feedback formation control of UAV swarm with multiple implicit leaders. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 72: 327–334.
- [31] 邵 壮, 祝小平, 周 洲, 等. 三维动态环境下多无人机编队分布式保持控制. *控制与决策*, 2016, 31(6): 1065–1072.
Shao Z, Zhu X P, Zhou Z, et al. Distributed formation keeping control of UAVs in 3D dynamic. *Control and Decision*, 2016, 31(6): 1065–1072. (in Chinese)
- [32] Chang B L, Ng Q S. A flexible virtual structure Formation keeping control for fixed-wing UAVs // *Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Automation*. Santiago: IEEE, 2012: 621–626.
- [33] Kim S, Kim Y. Optimum design of three-dimensional behavioral decentralized controller for UAV formation flight. *Engineer Optimization*, 2009, 41(3): 199–224.
- [34] Hendrickx J M, Fidan B, Yu C, et al. Formation reconfiguration by primitive operations on directed graphs. *Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(4): 968–979.
- [35] Cao H, Bai Y, Chen J, et al. Control of 2D minimally persistent formations with three co-leaders in a cycle. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 21(10): 1–9.
- [36] 邓 婉, 王新民, 王晓燕, 等. 无人机编队队形保持变换控制器设计. *计算机仿真*, 2011, 28(10): 73–77.
Deng W, Wang X M, Wang X Y, et al. Controller design of UAV's formation keep and change. *Computer Simulation*, 2011, 28(10): 73–77. (in Chinese)
- [37] Zhang X Y, Duan H B. Differential evolution-based receding horizon control design for multi-UAVs formation reconfiguration. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2012, 34(2/3): 165–183.
- [38] Duan H B, Ma G J, Luo D L. Optimal formation reconfiguration control of multiple UCAVs using improved particle swarm optimization. *Journal of Bionic Engineering*, 2008, 5(4): 340–347.
- [39] Alemayehu T S, Kim J H. Efficient nearest neighbor heuristic TSP algorithms for blueuecing data acquisition latency of UAV relay WSN. *Wireless Personal Communications*, 2017, 95(3): 3271–3285.
- [40] 杜于飞, 覃太贵, 邓秀芳, 等. 多无人机协同任务规划问题. *数学的实践和认识*, 2017, 47(14): 52–62.
Du Y F, Qin T G, Deng X F, et al. Mission planning of multiple unmanned aerial vehicles. *Mathematics in Practice and Theory*, 2017, 47(14): 52–62. (in Chinese)
- [41] 侯玉梅, 贾震环, 田 歆, 等. 带软时间窗整车物流配送路径优化研究. *系统工程学报*, 2015, 30(2): 240–250.
Hou Y M, Jia Z H, Tian X, et al. Research on the optimization on the vehicle logistics distribution with soft time windows. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(2): 240–250. (in Chinese)
- [42] Rourke K P O, Carlton W B, Bailey T G, et al. Dynamic routing of unmanned aerial vehicles using reactive tabu search. *Military Operations Research*, 2001, 6(1): 5–30.
- [43] Guerrero J A, Bestaoui Y. UAV path planning for structure inspection in windy environments. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2013, 69(1/4): 297–311.
- [44] 胡中华, 赵 敏. 无人机任务规划系统研究及发展. *航天电子对抗*, 2009, 25(4): 49–54.
Hu Z H, Zhao M. Research and development of UAV mission planning system. *Aerospace Electronic Warfare*, 2009, 25(4): 49–54. (in Chinese)
- [45] 李 炜, 张 伟. 基于粒子群算法的多无人机任务分配方法. *控制与决策*, 2010, 25(9): 1359–1368.
Li W, Zhang W. Method of tasks allocation of multi-UAVs based on particles swarm optimization. *Control and Decision*, 2010, 25(9): 1359–1368. (in Chinese)
- [46] 梁国伟, 王社伟, 赵雪森. 多无人机协同任务分配方法. *火力与指挥控制*, 2014, 39(11): 13–17.
Liang G W, Wang S W, Zhao X L. Method research on cooperative task allocation for multiple UCAVs. *Fire Control and Command Control*, 2014, 39(11): 13–17. (in Chinese)
- [47] Alighanbari M. Task Assignment Algorithms for Teams of UAVs in Dynamic Environments. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

- [48] 李大东, 孙秀霞, 孙彪, 等. 基于混合整数线性规划的无人机任务规划. 飞行力学, 2010, 28(5): 88–91.
Li D D, Sun X X, Sun B, et al. Mission planning for UAVs based on MILP. *Flight Dynamics*, 2010, 28(5): 88–91. (in Chinese)
- [49] Cekmez U, Ozsiginan M, Sahingoz O K. A UAV path planning with parallel ACO algorithm on CUDA platform // *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Florida: IEEE, 2014: 347–354.
- [50] 黄伟民, 王亚刚. 一种基于蚁群算法的无人机协同任务规划优化算法. 软件导刊, 2017, 16(7): 131–134.
Wang W M, Wang Y G. Cooperative task allocation for multiple UAVs using ACO. *Software Guide*, 2017, 16(7): 131–134. (in Chinese)
- [51] Perez-Carabaza S, Besada-Portas E, Lopez-Orozco J A, et al. Ant colony optimization for multi-UAV minimum time search in uncertain domains. *Applied Soft Computing*, 2018, 62: 789–806.
- [52] 马华伟, 朱益民, 胡笑旋. 基于粒子群算法的无人机舰机协同任务规划. 系统工程与电子技术, 2016, 38(7): 1583–1588.
Ma H W, Zhu Y M, Hu X X. Cooperative task planning for ship and UAVs based on particle swarm optimization algorithm. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(7): 1583–1588. (in Chinese)
- [53] 杜继永, 张凤鸣, 杨骥, 等. 多UCAV协同任务分配模型及粒子群算法求解. 控制与决策, 2012, 27(11): 1752–1755.
Du J Y, Zhang F M, Yang J, et al. Cooperative task assignment for multiple UCAV using particle swarm optimization. *Control and Decision*, 2012, 27(11): 1752–1755. (in Chinese)
- [54] Tan H, Li Y, Wang J, et al. AC-PSO algorithm for UAV mission planning. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 22(3): 264–270.
- [55] Senthilnath J, Omkar S N, Mani V, et al. Cooperative communication of UAV to perform multi-task using nature inspired techniques // *Proceedings of the IEEE Symposium Series on Computational Intelligence*. Singapore: IEEE, 2013: 45–50.
- [56] Choi H, Kim Y, Kim H. Genetic algorithm based decentralized task assignment for multiple unmanned aerial vehicles in dynamic environments. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2011, 12(12): 163–174.
- [57] Roberge V, Tarbouchi M, Labonte G. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning. *Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 9(1): 132–141.
- [58] 杨尚君, 孙永维, 庞宇. 基于改进鱼群算法的多无人机任务分配研究. 计算机仿真, 2015, 32(1): 69–72.
Yang S J, Sun Y W, Fang Y. Research on multi-UAV cooperative task allocation based on improved fish swarm algorithm. *Computer Simulation*, 2015, 32(1): 69–72. (in Chinese)
- [59] Wang Z, Liu L, Long T, et al. Multi-UAV reconnaissance task allocation for heterogeneous targets using an opposition: Based genetic algorithm with double-chromosome encoding. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(2): 339–350.
- [60] Liu Y F, Zou J, Sun H J. Task allocation method of manned/unmanned aerial vehicle formation based on extended CNP // *Proceedings of the IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*. Nanjing: IEEE, 2016: 1975–1979.
- [61] 刘宏强, 魏贤智, 付昭旺, 等. 有人机/无人机编队协同攻击任务分配方法研究. 电光与控制, 2013, 20(6): 16–19.
Liu H Q, Wei X Z, Fu Z W, et al. Cooperative task assignment of manned/unmanned aerial vehicle formation in air combat. *Electronics Optics and Control*, 2013, 20(6): 16–19. (in Chinese)
- [62] Meng W, He Z R, Teo R, et al. Integrated multi-agent system framework: Decentralized search, tasking and tracking. *Control Theory and Applications*, 2014, 9(3): 493–502.
- [63] 姜雪, 全雄文, 陈秋双, 等. 基于真实吐露贪婪机制的多Agent单机调度问题. 系统工程学报, 2016, 31(3): 423–430.
Jiang X, Quan X W, Chen Q S, et al. Multi-agent single machine scheduling based on truthful greedy mechanism. *Journal of Systems Engineering*, 2016, 31(3): 423–430. (in Chinese)
- [64] Kingston D B, Beard R W, Holt R S. Decentralized perimeter surveillance using a team of UAVs. *Transactions on Robotics*, 2008, 24(6): 1394–1404.
- [65] Johnson L, Ponda S, Choi H, et al. Improving the efficiency of a decentralized tasking algorithm for UAV teams with asynchronous communications // *Proceedings of the Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences*. Toronto: AIAA, 2010: 1–22.
- [66] 曹攀峰, 崔升. 考虑信息延迟的无人机分布式协同搜索算法. 电光与控制, 2010, 17(3): 27–29.
Cao P F, Cui S. A cooperative search algorithm for multi-UAV with time-delays. *Electronics Optics and Control*, 2010, 17(3): 27–29. (in Chinese)
- [67] 晋一宁, 吴炎烜, 范宁军. 群无人机动态环境分布式持续覆盖算法. 北京理工大学学报, 2016, 36(6): 588–592.
Jin Y L, Wu Y X, Fan N J. Distributed cooperative control of swarm UAVs for dynamic environment persistent coverage. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(6): 588–592. (in Chinese)

- [68] 李 亮, 王 洪, 刘良玉, 等. 微小卫星星座与编队技术发展. 空间电子技术, 2017, 14(1): 1–3.
Li L, Wang H, Liu L Y, et al. Development of micro-satellite constellation and formation technologies. Space Electronic Technology, 2017, 14(1): 1–3. (in Chinese)
- [69] 林来兴, 张小琳. 星群、星座与编队飞行的概念辨析. 航天器工程, 2012, 21(5): 97–102.
Lin L X, Zhang X L. Discussion on conception of cluster, constellation and formation flying. Spacecraft Engineering, 2012, 21(5): 97–102. (in Chinese)
- [70] Mazur S. A description of current and planned location strategies within the ORBCOMM network. International Journal of Satellite Communications, 1999, 17(4): 209–223.
- [71] Sheard B S, Heinzel G, Danzmann K, et al. Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission. Journal of Geodesy, 2012, 86(12): 1083–1095.
- [72] Hong S H, Wdowinski S, Kim S W, et al. Evaluation of TerraSAR-X observations for wetland in SAR application. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 48(2): 864–873.
- [73] 鲁建全. 天宫二号伴飞小卫星的几种伴随模式分析. 物理教学, 2017, 39(3): 54–57.
Lu J Q. Analysis on accompanying models of the small satellite of Tiangong II. Physics Teaching, 2017, 39(3): 54–57. (in Chinese)
- [74] 张 伟, 杜耀珂, 李东俊, 等. 基于星间测距增强的卫星编队 GPS 相对导航研究. 上海航天, 2017, 34(3): 95–101.
Zhang W, Du Y K, Li D J, et al. Inter-satellite ranging augmented GPS relative navigation for satellite formation flying. Aerospace Shanghai, 2017, 34(3): 95–101. (in Chinese)
- [75] 李今飞, 王园园, 元朝鹏. 基于 CW 方程的卫星编队飞行相对运动分析. 测绘科学与工程, 2017, 37(2): 62–66.
Li J F, Wang Y Y, Yuan Z P. Relative movement analysis of satellite formation flying based on CW equations. Geomatics Science and Engineering, 2017, 37(2): 62–66. (in Chinese)
- [76] Gaías G, Amico S D. Impulsive maneuvers for formation reconfiguration using relative orbital elements. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2015, 38(6): 1036–1049.
- [77] 林来兴, 张洪华, 车汝才. 编队飞行区域性导航卫星和位置保持. 宇航学报, 2004, 25(1): 82–88.
Lin L X, Zhang H H, Che R C. The formation flying satellites for the regional navigation and their station-keeping. Journal of Astronautics, 2004, 25(1): 82–88. (in Chinese)
- [78] Bevilacqua R, Romano M. Rendezvous maneuvers of multiple spacecraft using differential drag under J2 perturbation. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2008, 31(6): 1595–1607.
- [79] 王 辉, 顾学迈. 编队卫星防碰撞规避路径规划方法与控制研究. 中国空间科学技术, 2009, 29(5): 67–74.
Wang H, Gu X M. Autonomous determination of relative orbit for satellite formation flying using radio-only measurement. Chinese Space Science and Technology, 2009, 29(5): 67–74. (in Chinese)
- [80] Amico S D, Montenbruck O. Proximity operations of formation-flying spacecraft using an eccentricity/inclination vector separation. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2005, 29(3): 554–563.
- [81] Amico S D, Montenbruck O. Relative orbit control design for the PRISMA formation flying mission // Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Colorado: AIAA, 2006: 21–24.
- [82] Izzo D, Simoes L F, Croon G D. An evolutionary robotics approach for the distributed control of satellite formations. Evolutionary Intelligence, 2014, 7(2): 107–118.
- [83] Foster J L. A 160 Days Simulation of Space Station Debris Avoidance Operation with the United States Space Command. JSC-DM-3-95-2. Washington: NASA, 2006.
- [84] Jones B A, Doostan A. Satellite collision probability estimation using polynomial chaos expansions. Advances in Space Research, 2013, 52(11): 1860–1875.
- [85] Chobotov V A, Johnson C G. Effects of satellite bunching on the probability of collision in geosynchronous orbit. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 31(5): 895–899.
- [86] 王 涛, 许永生, 张迎春, 等. 基于行为的非合作目标多航天器编队轨道控制. 中国空间科学技术, 2017, 37(1): 19–25.
Wang T, Xu Y S, Zhang Y C, et al. Trajectory planning for non-cooperative target multi-spacecraft formation based on behavior strategy. Chinese Space Science and Technology, 2017, 37(1): 19–25. (in Chinese)
- [87] Izzo D, Pettazzi L. Autonomous and distributed motion planning for satellite swarm. Journal of Guidance Control and Dynamic, 2007, 30(2): 449–459.
- [88] Wolfe W J, Sorensen S E. Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain. Management Science, 2000, 46(1): 148–166.

- [89] Frank J, Jonsson A, Morris P, et al. Planning and scheduling for fleets of earth observing satellites // Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. Montreal: ESA, 2002.
- [90] Globus A, Crawford J, Lohn J, et al. A comparison of techniques for scheduling earth observing satellites // Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence and the Sixteenth Conference on Innovative Applications on Artificial Intelligence. California: AAAI, 2004: 836–843.
- [91] Bianchessi N, Cordeau J F, Desrosiers J, et al. A heuristic for the multi-satellite, multi-orbit and multi-user management of earth observation satellites. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(2): 750–762.
- [92] Wu G H, Wang H L, Pedrycz W, et al. Satellite observation scheduling with a novel adaptive simulated annealing algorithm and a dynamic task clustering strategy. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 113: 576–588.
- [93] Liu X L, Laporte G, Chen Y W, et al. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time. *Computers and Operations Research*, 2017, 86(1): 41–53.
- [94] 经 飞, 王 钧, 李 军, 等. 考虑多数传模式组合的卫星数传调度方法. *系统工程学报*, 2012, 27(2): 160–168.
Jing F, Wang J, Li J, et al. Approach considers multiform data transmission mode for satellite data transmission scheduling problem. *Journal of Systems Engineering*, 2012, 27(2): 160–168. (in Chinese)
- [95] 张忠山, 谭跃进, 义余江, 等. 基于资源预留的成像卫星鲁棒性任务规划方法. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(6): 1544–1554.
Zhang Z S, Tan Y J, Yu Y J, et al. A robustness task planning method for imaging satellite based on resources reservation. *Systems Engineering: Theory and Practice*, 2016, 36(6): 1544–1554. (in Chinese)
- [96] 王 凌, 邓 瑾, 王圣尧. 分布式车间调度优化算法研究综述. *控制与决策*, 2016, 31(1): 1–11.
Wang L, Deng J, Wang S Y. Survey on optimization algorithms for distributed shop scheduling. *Control and Decision*, 2016, 31(1): 1–11. (in Chinese)
- [97] Broring A, Echterhoff J, Jirka S, et al. New generation sensor web enablement. *Sensors*, 2011, 11(2): 2652–2699.
- [98] Morris R, Dungan J, Votava P, et al. Coordinated data acquisition on sensor webs // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE, 2008: 1–7.
- [99] Herold T M. Asynchronous, distributed optimization for the coordinated planning of air and space assets. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [100] 高 黎, 周利安, 沙基昌. 分布式卫星系统协作任务分配模型及优化算法. *系统工程学报*, 2009, 24(4): 445–450.
Gao L, Zhou L A, Shang J C. Task allocation model and algorithm for DSS cooperation mechanism. *Journal of Systems Engineering*, 2009, 24(4): 445–450. (in Chinese)
- [101] Bonnet J, Gleizes M P, Kaddoum E, et al. Multi-satellite mission planning using a self-adaptive multi-agent system // Proceedings of the IEEE International Conference on Self-adaptive and Self-organizing Systems. Cambridge: IEEE, 2015: 11–20.
- [102] 韩道军, 吴晓洋, 沈夏炯. 一种分布式遥感卫星对地覆盖仿真分析方案. *河南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(2): 177–184.
Han D J, Wu X Y, Shen X T. A simulation analysis on ground coverage of the distributed remote sensing satellite. *Journal of Henan University(Natural Science Edition)*, 2017, 47(2): 177–184. (in Chinese)
- [103] Mauro B D, Fava F, Ferrero L, et al. Mineral dust impact on snow radiative properties in the European Alps combining ground, UAV, and satellite observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 120(12): 6080–6097.
- [104] Mrema D D, Oh W, Liu J, et al. Long range wireless sensor network employing cooperative relaying-UAVs via LEO satellite. *Journal of Control Science and Engineering*, 2013, 40(1): 46–54.
- [105] 张发明, 刘志平. 组合评价方法研究综述. *系统工程学报*, 2017, 32(4): 557–569.
Zhang F M, Liu Z P. Combined evaluation methods: A literature review. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(4): 557–569. (in Chinese)

作者简介:

杜永浩(1993—), 男, 江苏仪征人, 博士生, 研究方向: 智能优化理论, 方法与应用, Email: duyonghao15@163.com;

王 凌(1972—), 男, 江苏武进人, 博士, 教授, 研究方向: 智能优化理论, 方法与应用, 复杂生产过程建模, 优化与调度, Email: wangling@tsinghua.edu.cn;

邢立宁(1980—), 男, 陕西临潼人, 博士, 研究员, 研究方向: 智能优化理论, 方法与应用, Email: xinglining@gmail.com.