

控制与决策

Control and Decision

空间碎片主动移除任务规划研究综述

许英杰, 刘晓路, 贺仁杰, 左亚辉, 宋彦杰

引用本文:

许英杰, 刘晓路, 贺仁杰, 左亚辉, 宋彦杰. 空间碎片主动移除任务规划研究综述[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 371–380.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.2206>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

USV&AUV水下目标协同搜索与打击航迹规划

Coordinated path planning of USV&AUV for an underwater target

控制与决策. 2021, 36(4): 825–834 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1038>

移动机器人运动规划中的深度强化学习方法

Deep reinforcement learning for motion planning of mobile robots

控制与决策. 2021, 36(6): 1281–1292 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0470>

基于MCPDDPG的智能车辆路径规划方法及应用

The method and application of intelligent vehicle path planning based on MCPDDPG

控制与决策. 2021, 36(4): 835–846 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0460>

面向多目标侦察任务的无人机航线规划

UAV trajectory planning for multi-target reconnaissance missions

控制与决策. 2021, 36(5): 1191–1198 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1284>

微型无人机集群低时延组网规划方法

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

控制与决策. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

空间碎片主动移除任务规划研究综述

许英杰, 刘晓路[†], 贺仁杰, 左亚辉, 宋彦杰

(国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410073)

摘要: 人类太空探索活动产生的空间碎片已成为太空空间中的主要污染物, 并成为人类航天事业发展的重大障碍和威胁, 因此, 空间碎片主动移除问题引起了国际社会的广泛关注. 对此, 以空间碎片主动移除任务规划为主题, 在对国内外相关文献进行系统分析的基础上, 简要介绍空间碎片主动移除的发展现状; 具体描述低地球轨道和地球同步轨道空间碎片主动移除任务规划问题; 从目标筛选与分组、访问序列规划和转移轨迹规划 3 个层次介绍该问题的模型构建技术; 按照显性枚举方法、隐性枚举方法和元启发式方法将空间碎片主动移除任务规划方法分类, 对当前研究成果进行总结并指出存在的问题; 最后, 对未来空间碎片主动移除任务规划问题的研究方向进行展望.

关键词: 空间碎片; 服务航天器; 主动移除; 任务规划; 建模技术; 规划方法

中图分类号: TP3 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.2206

引用格式: 许英杰, 刘晓路, 贺仁杰, 等. 空间碎片主动移除任务规划研究综述[J]. 控制与决策, 2024, 39(2): 371-380.

Space debris active removal mission planning: A review

XU Ying-jie, LIU Xiao-lu[†], HE Ren-jie, ZUO Ya-hui, SONG Yan-jie

(College of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Space debris generated by human space exploration activities has become a major pollutant in space, and also an obstacle and a threat to the development of human space industry. Active space debris removal problem has attracted widespread attention from the international community. Based on the systematic analysis of related domestic and international literature, we briefly introduce the current status of active space debris removal; describe the low earth orbit (LEO) and geosynchronous orbit (GEO) space debris active removal mission planning problem; introduce the planning model from three levels: target selecting and grouping, visiting sequence planning and transfer trajectory planning; categorize and summarize the current literature by explicit enumeration, implicit enumeration, and meta-heuristic methods and analyze the current drawbacks; and finally address the perspective of the space debris active removal planning problem.

Keywords: space debris; servicing spacecraft; active removal; mission planning; model establishment; planning algorithm

0 引言

自 1957 年苏联发射第一颗卫星, 人类正式进入了太空时代. 近 60 年来, 人类通过火箭、卫星等各类航天器不断地对太空空间进行积极探索和开发, 在航天活动过程中遗留的如运载火箭末级等结构碎片乃至使用寿命结束的废弃卫星本身等人造物体, 作为太空垃圾可以在轨道上停留几十甚至几百年时间, 由此导致了空间碎片的产生. 伴随着人类航天活动的频繁开展, 空间碎片的数量也呈现出明显的增长趋势. 1978 年, Kessler 等^[1]提出的凯斯勒效应 (Kessler syndrome) 理论指出, 空间碎片对在轨以及未来航天

器存在巨大威胁, 引起了全球范围的广泛关注. 特别是近年来, 由空间碎片碰撞引起的航天事故时有发生, 极大地威胁了人类的空间资产安全, 阻碍了人类航天事业的发展, 空间碎片已成为全世界难以避免且亟需解决的重大问题. 为减少已形成的空间碎片, 净化太空环境, 空间碎片主动移除 (active space debris removal, ADR) 作为人类应对空间碎片问题的一大措施, 十分必要. 研究表明, 每年至少需要清除 5 枚大型空间碎片才能从一定程度上稳定太空环境^[2-3]. 但考虑到碎片清理技术的复杂性以及航天器资源的紧缺性, 空间碎片主动移除任务的实施需要系统的、合理

收稿日期: 2022-12-25; 录用日期: 2023-04-15.

[†]通讯作者. E-mail: lx1_sunny@nudt.edu.cn.

的安排与调度,由此引发了学者们对空间碎片主动移除任务规划问题广泛的关注和研究。

本文以空间碎片主动移除为主题,重点聚焦空间碎片主动移除任务规划关键技术,从空间碎片主动移除发展现状、空间碎片主动移除任务规划问题分类、建模技术、规划方法等方面进行综述,并对当前空间碎片主动移除任务规划研究进行总结与展望。

1 空间碎片主动移除

根据机构间空间碎片协调委员会(inter-agency space debris coordination committee, IADC)^[4]的定义,空间碎片是指轨道上的或重返大气层的无功能人造物体,其范围包括废弃的卫星等航天器、航天任务过程中的抛弃物、运载火箭末级、固体火箭发动机的喷射物,以及由于爆炸或撞击产生的航天器碎片等^[5]。

随着人类航天活动的日益频繁,空间碎片的数量呈现出明显的增长趋势,如图1所示,这些形状、大小、材质乃至来源各异的空间碎片遍布于地球周围不同轨道高度的太空空间,极大地威胁着在轨航天器的正常运行以及未来航天器的发射。根据NASA空间碎片项目办公室(orbital debris program office, ODPO)数据,目前,直径大于10 cm的大型碎片数量超过3万颗,直径在1~10 cm间的中型碎片数量超过90万颗,直径小于1 cm的小型碎片超过一亿颗^[6],而只有大约两万枚碎片被美国空间监视网(space surveillance network, SSN)编录在册并持续追踪。空间碎片数量的飞速增长加剧了碰撞、爆炸等航天在轨事故的发生,欧空局目前已经记录了630多起航天事故,其中最著名的是2009年的大型空间物体Cosmos 2251与Iridium 33的相撞。

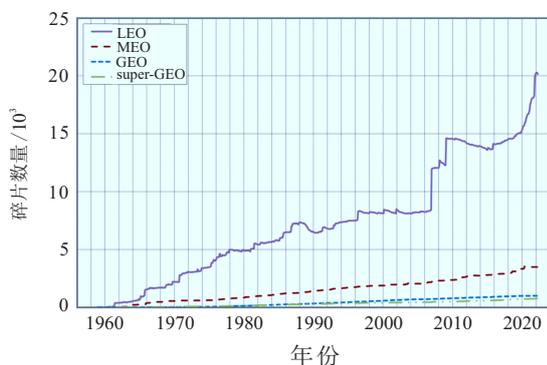


图1 各轨道高度空间碎片分布情况

目前,空间碎片碰撞风险的应对措施主要集中在3个方面:1)空间碎片减缓措施,即控制和减少碎片的产生,从而达到抑制空间环境恶化、保护空间资源的目的,目前世界各国或组织都颁布了相应的空间碎片减缓指南或标准,主要包括NASA碎片减缓

标准、IADC空间碎片减缓指南、ESA碎片减缓标准、NASDA碎片减缓标准、RSA标准以及CNES标准^[7];2)防护与碰撞规避措施,其中小型碎片可通过为卫星等航天器加装防护罩^[8]来规避伤害,而中型和大型碎片主要通过太空交通管理^[9]和及时避免碰撞措施^[10]进行处理;3)空间碎片主动移除(ADR)措施,即借助碎片移除技术对已形成的空间碎片进行主动清理,达到减少碎片数量、维持空间环境长期稳定的目的,ADR也是目前国际上公认的彻底治理和保护空间环境的必然选择。ADR任务涉及的空间碎片移除技术主要可分为接触式碎片移除技术和非接触式碎片移除技术两类。

1) 接触式碎片移除技术。①通过机械臂^[11-12]及末端抓捕工具对碎片进行捕获,如基于单机械臂捕获的德国宇航局开展的DEOS计划(deutsche orbital serving mission)^[13-14]、ESA开展的e. Deorbit mission项目^[15-16]、NASA开展的Restore-L任务^[17]等,基于多机械臂捕获的美国FRIEND(front-end robotics enabling near-term demonstration)演示计划^[18]等;②通过飞网对碎片进行捕获^[19-20],如西班牙GMV公司提出的PATENDER计划^[21]、欧盟第七框架计划(ECFP7)下的RemoveDEBRIS飞网演示实验项目^[22]等;③通过绳系抓捕装置对碎片进行捕获^[23-24],如黄攀峰等^[25-26]研制的空间绳系机器人(space tethered robot, TSR)等。

2) 非接触式碎片移除技术。①离子束推移离轨,通过服务航天器发射离子束对空间碎片进行持续跟踪喷射,改变其轨道速度,以实现碎片的升轨或降轨^[27];②激光推移离轨,通过发射脉冲激光来减小空间碎片速度和高度^[28],如Phipps^[29]提出的LODR(laser orbital debris removal)系统;③电磁波推移离轨,通过电磁波磁场作用改变碎片的速度,以实现碎片的降轨^[30-31];④静电增阻离轨,利用空间等离子体特性使碎片带电,使其在空间电场库仑力的作用下降轨^[32-34]等。非接触式碎片移除方法由于不与碎片目标产生接触力,任务不稳定的风险相对较小。

上述空间碎片移除技术的研究为实现ADR任务提供了技术支撑,而空间碎片主动移除任务规划作为ADR任务的前序阶段和执行基础,将为ADR任务确定任务对象并制定空间碎片移除方案。

2 空间碎片主动移除任务规划问题

根据IADC的空间碎片相关准则,近地空间有两块具有重大实际意义、需要规避空间碎片威胁的重点保护区域,分别是低地球轨道(low earth orbit, LEO)

区域和地球同步轨道(geosynchronous orbit, GEO)区域.下面针对这两块重点关注区域的ADR任务规划问题进行简述.

1) LEO空间碎片主动移除任务规划问题.

王伟林^[35]总结了LEO空间碎片移除任务的两种模式:一种名为“Phoenix”,由服务航天器将目标碎片拖拽至目标轨道,然后再返回原轨道;另一种名为“Revolver”,也是目前研究中最常用到的模式,服务航天器不亲自实施目标碎片降轨,而是通过降轨推进系统(thruster de-orbiting kit, TDK)来实现.

LEO空间碎片主动移除任务场景如图2所示,服务航天器需要依次与各空间碎片交会并实施清除操作,直至完成该ADR任务. LEO空间碎片主动移除任务规划是指在考虑多种复杂的约束条件下,优化服务航天器与LEO空间碎片目标的交会顺序和轨道转移时间,形成最优碎片清除方案的过程.

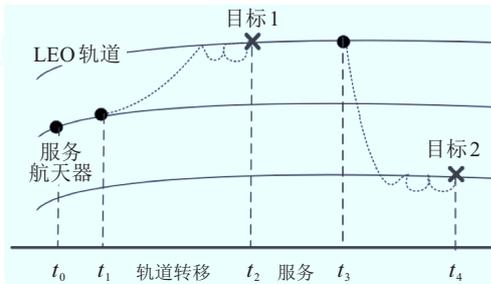


图2 LEO空间碎片主动移除任务场景

2) GEO空间碎片主动移除任务规划问题.

目前,GEO轨道上的空间碎片主要是结束航天任务后的废弃卫星及运载火箭的末级等,体积和质量较大,对在轨卫星的正常运行和人类未来在地球同步轨道的太空任务造成严重的阻碍和威胁.

GEO空间碎片主动移除任务场景如图3所示,需将服务航天器发射至GEO轨道,使其依次与碎片目

标进行交会与接近(rendezvous proximity operations, RPO),并在对目标抓捕后轨道机动至墓场轨道将其释放,直至该ADR任务结束. GEO空间碎片主动移除任务规划将在考虑多种复杂的约束条件下,重点关注服务航天器与GEO空间碎片目标的交会顺序及交会时间,以形成最优碎片清除方案.

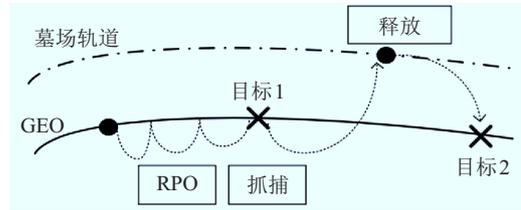


图3 GEO空间碎片主动移除任务场景

综上所述,无论是LEO还是GEO空间碎片主动移除任务规划问题,其本质上都是一个考虑多种约束条件的多空间目标交会的复杂组合优化问题.

3 空间碎片主动移除任务规划问题建模

总结当前学者们对空间碎片主动移除任务规划问题的研究^[36-37],可将该问题分解为3个子问题:

- 1) 目标筛选与分组问题:确定需移除的空间碎片集合并将ADR任务分配到具体的服务航天器;
- 2) 访问序列规划问题:确定服务航天器对空间碎片的移除顺序及移除时间;
- 3) 轨迹转移优化问题:确定在两次目标碎片移除作业之间的最优转移轨迹.

如图4所示,朱阅詠^[38]采用一个3层嵌套模型来描述大规模目标访问任务规划问题,该模型也是适用于ADR任务规划问题的通用模型.该模型外层为目标筛选与分组模型,中层为访问序列规划模型,内层为转移轨迹规划模型.下面分别介绍3层问题建模的研究现状.

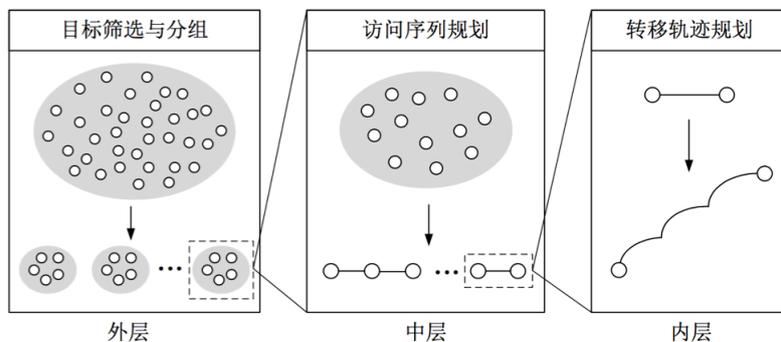


图4 ADR任务规划问题的3层嵌套模型框架

1) 目标筛选与分组问题建模.

据目前的文献研究,涉及外层优化即目标筛选与

分组问题的ADR任务规划问题往往考虑多个服务航天器,这类研究相对较少.余婧^[5]和Daneshjou等^[39]

考虑了多个服务航天器的任务分配问题,但由于航天器和空间碎片目标的数量较少,通过排列组合的方式便可确定服务航天器的ADR任务集合,并未对该目标筛选和分组问题进行具体的建模和算法设计; Federici等^[40]将服务航天器视为车辆,将其建模为车辆路径规划问题(vehicle routing problem, VRP),并在此基础上考虑空间碎片清除收益,将问题扩展为VRPP问题(vehicle routing problem with profits)并建立了VRPP模型;朱阅誅^[38]参照经典背包问题和装箱问题模型,对外层目标筛选与分组问题进行了建模。

2) 访问序列规划问题建模.

针对单个服务航天器的ADR任务规划问题,即模型框架中的中层访问序列规划问题,是当前学者们研究的重点,根据问题特性,学者们常常将其类比于TSP问题并进行建模. Federici等^[40]依据访问序列规划问题时间依赖的属性,引入了时间依赖的旅行商(time-dependent traveling salesman problem, TDTSP)问题模型,以最大化清除空间碎片目标集、最小化轨道机动燃耗为目标开展优化过程. Bérend等^[41]通过设计特定的轨道转移燃耗估计模型将碎片间的燃耗变为固定值,以及两条访问的启发式规则,将动态ADR任务图转化为静态,从而提出了带有时间约束的有限长度TSP模型(limited length TSP with time constraint, LLTC-TSP). Cerf^[42-43]以最小化推进剂消耗和时间损耗为优化目标,设计了多目标具有时间依赖特性的旅行商问题模型(bi-objective time dependent traveling salesman problem, Bi-TDTSP),并在两种碎片处理模式下验证了模型的有效性. Izzo等^[44]在考虑空间碎片的位置是否受扰动影响的情况下,提出了静态和动态两种建模方式,分别是城市选择TSP模型(TSP city selection, TSP-CS)和动态城市选择TSP模型(dynamic TSP city selection, TSP-DCS). Zhang等^[45]以Iridium-33碎片清除任务和第9届全球轨迹优化竞赛(the 9th global trajectory optimization competition, GTOC9)为任务场景,分别构建了具体的TDTSP模型.除了上述TSP模型,Stuart等^[46]提出可将ADR任务规划视为一个在一定燃料约束条件下航天器与多空间碎片交会的VRP问题.

3) 转移轨迹规划问题建模.

转移轨迹规划问题是空间碎片主动移除任务规划问题的内层问题,作为轨道设计与优化领域的经典问题,自20世纪50年代起就有大批学者对该问题展开了研究^[47].根据服务航天器的机动方式不同,该问题可分为脉冲转移轨迹规划问题和小(连续)推力转

移轨迹优化问题.在近地空间转移轨迹规划问题中,服务航天器多采用可近似为瞬时脉冲的基于脉冲的大推力变轨方式.基于脉冲的转移轨迹规划模型构建可分为二体交会模型^[47-50]和摄动交会模型^[51-52],二体模型是相对理想的情况,但航天器运行中会受到各种摄动力影响,其中影响最大的是J2摄动^[53-55].

4 空间碎片主动移除任务规划方法

目前,空间碎片主动移除任务规划方法主要分为3类:显性枚举方法、隐式枚举方法和元启发式方法.

1) 显性枚举方法.

显性枚举方法致力于通过列举出所有可能的组合来寻找精确的全局最优解,这种方法只有在解空间非常小的情况下才适用. Zuiani等^[56]通过构建简化的ADR任务规划模型研究了在小(连续)推力轨迹转移条件下的5枚空间碎片移除任务,只需要考虑120种可能的碎片移除顺序即可. Braun等^[57]根据航天器携带的推进系统的不同提出了4种空间碎片清除模式,并通过暴力搜索的方式获取4~6个碎片的最佳清理序列,然而当碎片数量大于10时,列举出所有可行的组合方案的计算时间是不可接受的.

2) 隐式枚举法.

隐式枚举法是一种通过寻找那些有较大概率成为最优解的序列,并对其他序列进行剪枝操作来探索优化过程的方法. 树形搜索算法(tree search algorithm)可视为一种典型的隐式枚举,树的节点代表着在某次轨道转移中关联的空间碎片,而剪枝策略对树形搜索算法至关重要^[42]. Li等^[58]提出的集束搜索算法(beam search algorithm)中,只有第1束节点可以扩展向下一级,其他的节点均不可扩展. 分支定界(branch & bound)是另一种有效的剪枝策略. Olympio等^[59]研究了考虑J2摄动的太阳同步轨道空间碎片清除问题,并利用剪枝的思想设计了分支修剪算法(branch & prune algorithm)用于加速碎片移除序列规划的搜索过程. Barea等^[60]提出了一个基于分支定界思想的算法,将ADR任务规划问题划分为两层,上层构建线性整数模型,下层构建非线性混合整数模型. Covello^[34]采用分支定界算法同步优化碎片移除序列规划与转移轨迹规划,得到总推进剂消耗最小的碎片移除方案. Madakat等^[61]进一步考虑了任务的完成时间,将问题建模为以最小化总任务时间和总推进剂消耗为优化目标的多目标TDTSP问题,并用分支定界算法求得LEO空间碎片移除问题的最优解. Wilson等^[33]在此基础上进一步搭建了以分

支定界算法为核心的TOPAS平台(tool for optimal planning of ADR sequence),适用于多达10枚空间碎片的复杂ADR场景。

3) 元启发式方法。

元启发式方法在可接受时间内能够找到近优解,为求解空间碎片主动移除任务规划问题提供了另一种解决途径。在目前的研究中,遗传算法(genetic algorithm, GA)、模拟退火算法(simulated annealing, SA)、黏菌算法(physarum algorithm)、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)以及蚁群算法(ant colony optimization, ACO)均适用良好。

针对遗传算法(GA)^[62], Kanazaki等^[63]以最大化碎片移除数量和最小化总推进剂消耗为目标构建了多目标TSP模型,并用GA算法优化了清除2~5块碎片任务的轨迹方案。Murakami等^[64]提出了两条转移轨迹选择规则来简化转移轨迹优化问题,并将碎片移除顺序和轨迹转移时间一同编码进染色体中,使用GA算法求解。Liu等^[65]提出了动态多目标TSP策略,旨在优化3个目标:目标碎片移除优先级、轨道转移能耗以及服务航天器数量,以1天为时间离散精度,用GA优化了碎片移除序列和轨迹转移时间两个关键变量。Chen等^[66]以位于太阳同步轨道(sun-synchronous orbit, SSO)上具有相同轨道高度和倾角的一组空间碎片为研究对象,采用GA算法来优化碎片序列,并采用PSO算法来寻找最佳转移轨道。Missel等^[67]基于GA算法研究了空间清扫器4S(space sweeper with sling-sat)任务场景下的碎片移除问题,并验证了4S模式下碎片移除任务执行的低成本和有效性。Zhao等^[68]研究了GEO轨道空间碎片清理问题,并提出了双层问题求解框架。其中:底层为航天器轨迹优化问题,采用加速粒子群优化算法(accelerated particle swarm optimization, APSO)求解;外层为任务序列规划问题,采用免疫遗传算法(immune genetic algorithm, IGA)求解。

针对模拟退火算法(SA),Luo等^[48]设计了有效的编码模式和变异算子,同时优化碎片目标序列和ADR任务交会时间,该算法可实现对20枚空间碎片目标的移除任务规划。

针对黏菌算法^[69-70],Di Carlo等^[71]提出了两种可分别建模为TSP问题和VRP问题的LEO空间碎片移除策略,为实现以最小化推进剂消耗达到碎片移除目的,在考虑J2摄动和大气阻力扰动的情况下,使用基于Physarum算法的增量自动规划和离散优化算法来确定最佳移除目标序列。

针对粒子群优化算法(PSO)^[72],Jing等^[73]面向多服务航天器的GEO碎片移除任务规划问题,研究了任务目标分配、序列规划、轨迹转移3个关键子问题,以混合最优控制模型建模,通过改进的多目标PSO算法求解,并比较了在推进剂储量相同的情况下多服务航天器和单个服务航天器执行任务的效果。实验表明,多服务航天器的参与有助于提高任务的安全性和稳健性。Daneshjou等^[39]以最小化推进剂总消耗和任务完成时间为优化目标,设计了多目标PSO算法,并通过实验表明服务航天器的初始轨道位置对碎片移除规划问题的能耗和时间消耗有较大影响,若多个服务航天器的偏心率与相位相差较大,则对降低任务代价有较大的帮助。

蚁群算法(ACO)^[74]因具有收敛速度快、鲁棒性较强、采用分布式并行计算结构、易与其他算法结合等优点^[75],目前已成功地应用于TSP问题中^[76-77],而ADR任务规划问题与TSP问题有一定的共通性。Stuart等^[46]采用ACO算法生成初步的碎片移除序列并确定清除特定空间碎片集所需要的服务航天器数量,然后通过拍卖协调策略重新规划ACO算法生成的初步方案,以应对碰撞事件高概率发生的紧急情况。在考虑J2摄动影响的基础上,Shen等^[78]采用ACO算法优化动态ADR任务规划问题中的序列规划模型,成功得到了10枚碎片的最优移除序列。Li等^[79]结合进化算法与种群智能算法的优点,以ACO算法为框架并添加GA算法算子,提出了进化精英算法(evolutionary elitist club algorithm, EECA)来优化多碎片移除任务。朱阅誅^[38]在蚁群系统框架下设计了动态序列规划蚁群算法,引入信息素张量的概念来表征碎片目标之间的动态转移偏好,并基于时间轴离散的方法提出了ADR任务分步规划策略。与通过时间轴离散的方法^[38,79]将时间维度添加进ACO信息素矩阵中不同,Zhang等^[45]在ACO算法框架下将时间线粒子分布在相应的时间轴上而非离散的时间点,通过一种名为时间线集合(timeline club)的新结构来解决ADR任务规划问题的时间依赖特性。

综上所述,空间碎片主动移除任务规划问题已经得到了广泛的关注,学者们相继设计或采用了各种优化算法求解该问题并取得了一定的研究成果,但目前的研究仍存在一些缺陷。

首先,在针对ADR任务规划问题的相关研究中,显性枚举法和隐性枚举法求解效率较低,而基于元启发式的空间碎片主动移除任务规划方法虽然有不错的效果,但大多数文献研究的空间碎片数量都较少,

仅有几枚^[56-57,63]到十几枚^[40]。面对未来大规模空间碎片清理场景仍然存在一定的局限性,难以应对由碎片数量增加引起的解空间爆炸难题,在短时间内难以快速生成高质量的碎片移除方案,这也源于ADR任务规划问题的复杂组合特性。而人类航天事业的不断发展要求长期稳定的太空环境,未来将更加需要能够高效处理大规模空间碎片清理任务的规划方法。

其次,针对ADR任务规划问题的优化目标,当前研究大多以最小化航天器能耗^[38,42,45,48,56-61,64,66,68]为单一优化目标,较少涉及任务时间以及碎片清理数量等方面的优化目标。为生成全面、高质量的空间碎片移除方案,考虑多目标优化的空间碎片主动移除任务规划研究具有一定的必要性。

再次,目前多数研究主要集中于“一对多”的ADR任务模式^[40,42,61,65-66],即使用一个服务航天器依序移除一系列空间碎片;而“多对多”模式下的规划问题^[39,45-46,73]将涉及多服务航天器资源分配问题,使得问题需要优化更多的变量,从而愈加复杂,当前的研究也相对较少涉及。未来多服务航天器合作完成空间碎片移除任务已成为趋势,多航天器任务规划问题也值得进一步深入研究。

最后,由于空间碎片主动移除任务规划问题是具有时间依赖特性的复杂组合优化问题,目前研究常常以分层优化的思想来简化问题模型,将ADR任务规划问题构建为目标选择、序列规划与转移轨迹规划3层优化模型^[38]或者序列规划与转移轨迹规划两层优化模型^[60,68],这样的优化方法虽然降低了问题复杂程度,但实际上子问题间相互关联、紧紧耦合。若各优化层间缺少必要的信息交互,则难以获得该规划问题的全局最优解;若进行整体优化,则面临着沉重的计算负担,难以在短时间内生成碎片清除方案。所以,当前的任务规划方法缺乏能够有效平衡问题嵌套优化属性和求解运行效率高且全局性强的优化策略和机制。

5 总结与展望

空间碎片的数量随着人类探索太空的步伐逐年增加,对目前在轨卫星等航天器的正常运行存在极大的潜在威胁,也将影响各国未来的航空事业发展,因此,空间碎片主动移除(ADR)的重要性也愈加突显,逐渐成为国内外学者研究的热点。鉴于此背景,本文以空间碎片主动移除任务规划为主题,具体介绍了空间碎片主动移除的发展现状,并具体阐述了LEO和GEO碎片主动移除任务规划问题。对ADR任务规划问题进行了逐层分解,从目标筛选与分组、访问序列规划、转移轨迹规划3个方面介绍了问题建模情况,

并从显性枚举方法、隐式枚举方法和元启发式方法3个角度介绍了目前学者们对ADR任务规划问题的求解思路与规划算法。

近年来,虽然面向空间碎片主动移除任务规划的研究取得了一定的成果,但随着人类航天技术的不断发展,对空间碎片移除任务的要求也不断提高。针对一些多样性和复杂性的碎片任务,现有的ADR任务规划研究仍有很大的发展空间。结合基于ADR任务规划的国内外研究进展,针对其中有待进一步思考和解决的问题,从以下3个方面对未来的研究工作进行分析 and 展望,并给出一些潜在的解决方案。

1) 引入机器学习方法,实现空间碎片主动移除任务规划问题的高效求解。随着人工智能技术的发展,国内外一些学者开始将机器学习方法引入规划问题中并取得了较好的效果^[80-81]。ADR任务规划问题的求解同样可尝试引入机器学习方法,对其中涉及的子问题进行相应学习与模型训练,以提高ADR任务规划问题求解效率,特别是应对将来大规模空间碎片主动移除任务场景,快速度、高质量的ADR任务规划方法将是关注的重点。根据目前机器学习方法的发展情况,可从以下几个方面引入:

① 考虑有监督的学习方法,如神经网络(neural networks)方法^[82],将其应用到ADR任务规划问题的底层优化问题——航天器转移轨迹规划问题中,对航天器在碎片间转移的最优能耗(速度增量)进行估计和预测,替代复杂的轨迹优化过程,从而减轻问题的嵌套优化属性,解决当前研究中分层优化的弊端,达到提高求解质量、保障规划效率的目的;

② 考虑无监督的学习方法,如聚类(clustering)方法^[83],可设计相应的量化指标,对空间碎片进行聚类、分组,以分布密集的空间碎片作为任务规划目标,确定航天器清除对象,从一定程度上降低航天器能耗,使其能够利用有限的燃料清除尽可能多的空间碎片,提高航天器的利用效率和空间碎片移除任务效益

③ 考虑强化学习方法,如actor-critic方法^[84]、深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)^[85]等,将其应用到ADR任务规划问题的序列规划问题中,类比于经典TSP问题,通过大量的学习和训练生成序列规划模型,实现高质量航天器移除碎片方案的快速输出,解决ADR任务规划问题中难以通过传统优化方法高效处理的复杂时间依赖特性。

2) 面向多航天器空间碎片主动移除任务规划问题,重点关注多航天器任务分配问题,并进一步考虑航天器协同作业模式。

目前,ADR任务规划问题重点研究单航天器的空间碎片移除序列规划问题和转移轨迹优化问题,较少涉及到多服务航天器。而多服务航天器的参与可以提高任务完成的效率和稳健性^[75],且这也是未来实现对大规模空间碎片移除的一种必然发展趋势。因此,在单航天器模式的基础上研究多航天器ADR任务规划问题,聚焦如何合理分配服务航天器资源,也是未来ADR任务规划中值得研究的问题。

另外,目前ADR任务都限于航天器单独作业,然而某些空间碎片可能无法靠单一航天器进行清理操作,需要多航天器的协同合作,例如当空间碎片处于翻滚状态时,测量、状态估计、参数识别、消旋以及捕获后的控制都尤为复杂^[86],进一步考虑多服务航天器协同规划^[87-88],研究多模式下的多服务航天器协同任务规划方法也是极具价值的。

3) 赋予在轨航天器自主能力,实现航天器碎片移除任务的在线协调。

太空环境复杂且多变,为了能够有效应对在轨突发情况,实现航天器清理任务的在线协调与调整是一个解决思路,这需要依赖当前具备一定自主能力的航天器。因此,研究多航天器的实时在线自主协同规划技术,为空间碎片清理任务的完成提供保障,也是今后需要考虑的内容。

总之,空间碎片主动移除任务规划目前已经取得了一定的研究成果,但仍有很多难点和挑战需要解决。在空间碎片主动移除任务实施技术层面上,目前虽有大量的空间碎片清除方法被提出,但大部分还处于理论研究和地面验证阶段,即使有些技术(例如美国空间拖船)得到了实际飞行验证,但成本较高,仅适合于清除亟待解决的大型空间碎片,因此,相关碎片清除关键技术还有待于进一步研究和实践。随着新一代信息技术和航天技术的高速发展,空间碎片主动移除的技术难题最终也将逐渐解开,而空间碎片主动移除任务规划重点关注于空间碎片主动移除任务分配、序列规划以及航天器转移轨迹规划等优化问题,作为任务执行的规划方案和行动设计方案的提供者,为空间碎片主动移除事业的开展提供方案支撑,与空间碎片主动移除技术相辅相成,可扩大任务效益,保障任务经济性。未来空间碎片主动移除任务规划问题将展现出更加重要的研究价值。

参考文献(References)

- [1] Kessler D J, Cour-Palais B G. Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, 83(A6): 2637-2646.
- [2] Bonnal C, Ruault J M, Desjean M C. Active debris removal: Recent progress and current trends[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 85: 51-60.
- [3] Liou J C, Johnson N L, Hill N M. Controlling the growth of future LEO debris populations with active debris removal[J]. *Acta Astronautica*, 2010, 66(5/6): 648-653.
- [4] Yakovlev M. The iadc space debris mitigation guide lines and supporting documents[C]. *Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris*. Darmstadt: IEEE, 2005: 591-597.
- [5] 余婧. 航天器在轨服务任务规划技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015: 2-3.
(Yu J. Research on mission planning technology of spacecraft on-orbit service[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015: 2-3.)
- [6] 汤靖师, 程昊文. 空间碎片问题的起源、现状和发展[J]. *物理*, 2021, 50(5): 317-323.
(Tang J S, Cheng H W. The origin, status and future of space debris[J]. *Physics*, 2021, 50(5): 317-323.)
- [7] 张景瑞, 杨科莹, 李林澄. 空间碎片研究导论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021: 1-40.
(Zhang J R, Yang K Y, Li L C. Introduction to space debris research[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021: 1-40.)
- [8] Dobritsa D B, Pashkov S V, Khristenko Y F. Study of the efficiency of corrugated mesh shields for spacecraft protection against meteoroids and manmade space debris[J]. *Cosmic Research*, 2020, 58(2): 105-110.
- [9] Bonnal C, Francillout L, Moury M, et al. CNES technical considerations on space traffic management[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 167: 296-301.
- [10] O'Reilly D, Herdrich G, Kavanagh D F. Electric propulsion methods for small satellites: A review[J]. *Aerospace*, 2021, 8(1): 22-52.
- [11] Grissom M D, Chitrakaran V, Dienno D, et al. Design and experimental testing of the OctArm soft robot manipulator[C]. *Proceedings of SPIE 6230, Unmanned Systems Technology VIII*. Orlando, 2006, 6230: 491-500.
- [12] Lanni C, Ceccarelli M. An optimization problem algorithm for kinematic design of mechanisms for two-finger grippers[J]. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2009, 3(1): 49-62.
- [13] 贾平, 刘海印, 李辉. 德国轨道任务服务系统发展分析[J]. *中国航天*, 2016(6): 24-29.
(Jia P, Liu H Y, Li H. Analysis on the development of German orbital mission service system[J]. *Aerospace China*, 2016(6): 24-29.)
- [14] Reintsema D, Thaeter J, Rathke A, et al. DEOS — The German robotics approach to secure and de-orbit malfunctioned satellites from low earth orbits[C]. *Proceedings of the 63rd International Astronautical Congress*. Naples: IEEE, 2010: 244-251.
- [15] Fauré M, Henry D, Cieslak J, et al. An H_∞ control solution for space debris removal missions using robot

- icarms: The ESA e. Deorbit case[C]. Proceedings of the 13th UKACC International Conference on Control. Plymouth: IEEE, 2022: 122-129.
- [16] Jaeckel S, Lampariello R, Rackl W, et al. Design and operational elements of the robotic subsystem for the e. Deorbit debris removal mission[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2018, 5: 1-20.
- [17] Ashmore M S. Robotic gripper for autonomous rendezvous and capture of satellites[P]. US: 10414053. 2019-09-17.
- [18] 蔡洪亮, 高永明, 邴启军, 等. 国外空间非合作目标抓捕系统研究现状与关键技术分析[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2010(6): 71-77.
(Cai H L, Gao Y M, Bing Q J, et al. The research status and key technology analysis of foreign non-cooperative target in space capture system[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2010(6): 71-77.)
- [19] Shan M H, Guo J, Gill E. An analysis of the flexibility modeling of a net for space debris removal[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(3): 1083-1094.
- [20] Sharf I, Thomsen B, Botta E M, et al. Experiments and simulation of a net closing mechanism for tether-net capture of space debris[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 139: 332-343.
- [21] Benvenuto R, Lavagna M. Flexible capture devices for medium to large debris active removal: Simulations results to drive experiments[C]. Proceedings of the 12th Symposium on Advanced Space Technologies in Automation and Robotics. Montreal: IEEE, 2013: 1-8.
- [22] Forshaw J L, Aglietti G S, Navarathinam N, et al. RemoveDEBRIS: An in-orbit active debris removal demonstration mission[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 127: 448-463.
- [23] Yu B S, Wen H, Jin D P. Review of deployment technology for tethered satellite systems[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2018, 34(4): 754-768.
- [24] Zhao Y K, Huang P F, Zhang F. Dynamic modeling and super-twisting sliding mode control for tethered space robot[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 143: 310-321.
- [25] 黄攀峰, 胡永新, 王东科, 等. 空间绳系机器人目标抓捕鲁棒自适应控制器设计[J]. *自动化学报*, 2017, 43(4): 538-547.
(Huang P F, Hu Y X, Wang D K, et al. Capturing the target for a tethered space robot using robust adaptive controller[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(4): 538-547.)
- [26] 王东科, 黄攀峰, 孟中杰, 等. 空间绳系机器人目标逼近姿态协调控制[J]. *宇航学报*, 2014, 35(5): 545-553.
(Wang D K, Huang P F, Meng Z J, et al. Coordinated attitude control of tethered space robot during target approaching phase[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(5): 545-553.)
- [27] Ricci F, Rokach L, Shapira B. Recommender systems handbook[M]. Berlin: Springer, 2011: 1-35.
- [28] Scharring S, Eisert L, Lorbeer R-A, et al. Momentum predictability and heat accumulation in laser-based space debris removal[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(1): 1-12.
- [29] Phipps C R. A laser-optical system to re-enter or lower low earth orbit space debris[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 418-429.
- [30] Kadaba P K, Naishadham K. Feasibility of noncontacting electromagnetic despinning of a satellite by inducing eddy currents in its skin. I. Analytical considerations[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, 31(4): 2471-2477.
- [31] Yu Y F, Yang F, Yue H H, et al. Prospects of de-tumbling large space debris using a two-satellite electromagnetic formation[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(6): 1816-1829.
- [32] Hogan E A, Schaub H. Relative motion control for two-spacecraft electrostatic orbit corrections[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, 36(1): 240-249.
- [33] Wilson K, Bengtson M, Schaub H. Hybrid method of remote sensing of electrostatic potential for proximity operations[C]. Proceedings of the 2020 IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE, 2020: 1-9.
- [34] Covello F. Application of electrical propulsion for an active debris removal system: A system engineering approach[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(7): 918-931.
- [35] 王伟林. 空间机动飞行器清除碎片任务规划与制导控制技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017: 29-40.
(Wang W L. Mission planning and guidance control technology for debris removal of space maneuvering aircraft[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017: 29-40.)
- [36] Zhang T J, Shen H X, Yang Y K, et al. Ant colony optimization-based design of multiple-target active debris removal mission[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2018, 61(5): 201-210.
- [37] Yang J N, Hou X L, Liu Y, et al. A two-level scheme for multiobjective multidebris active removal mission planning in low Earth orbits[J]. *Science China Information Sciences*, 2022, 65(5): 1-16.
- [38] 朱阅詠. 面向大规模目标访问任务的飞行序列规划方法[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020: 20-21.
(Zhu Y H. Flight sequence planning method for large-scale target access mission[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020: 20-21.)
- [39] Daneshjou K, Mohammadi-Dehabadi A A, Bakhtiari M. Mission planning for on-orbit servicing through multiple servicing satellites: A new approach[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(6): 1148-1162.
- [40] Federici L, Zavoli A, Colasurdo G. A time-dependent TSP formulation for the design of an active debris removal mission using simulated annealing[J/OL]. 2019, arXiv: 1909.10427.

- [41] Bérend N, Olive X. Bi-objective optimization of a multiple-target active debris removal mission[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 122: 324-335.
- [42] Cerf M. Multiple space debris collecting mission—Debris selection and trajectory optimization[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2013, 156(3): 761-796.
- [43] Cerf M. Multiple space debris collecting mission: Optimal mission planning[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2015, 167(1): 195-218.
- [44] Izzo D, Getzner I, Hennes D, et al. Evolving solutions to TSP variants for active space debris removal[C]. *Proceedings of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. Madrid, 2015: 1207-1214.
- [45] Zhang N, Zhang Z, Baoyin H X. Timeline club: An optimization algorithm for solving multiple debris removal missions of the time-dependent traveling salesman problem model[J]. *Astrodynamics*, 2022, 6(2): 219-234.
- [46] Stuart J, Howell K, Wilson R. Application of multi-agent coordination methods to the design of space debris mitigation tours[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(8): 1680-1697.
- [47] Gross L R, Prussing J E. Optimal multiple-impulse direct ascent fixed-time rendezvous[J]. *AIAA Journal*, 1974, 12(7): 885-889.
- [48] Luo Y Z, Tang G J, Lei Y J, et al. Optimization of multiple-impulse, multiple-revolution, rendezvous-phasing maneuvers[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2007, 30(4): 946-952.
- [49] Oghim S, Mok S H, Leeghim H. Optimal spacecraft rendezvous by minimum velocity change and wait time[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(6): 1188-1200.
- [50] Luo Y Z, Zhang J, Tang G J. Survey of orbital dynamics and control of space rendezvous[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(1): 1-11.
- [51] Luo Y Z, Tang G J, Wang Z G, et al. Optimization of perturbed and constrained fuel-optimal impulsive rendezvous using a hybrid approach[J]. *Engineering Optimization*, 2006, 38(8): 959-973.
- [52] Zhou Y, Yan Y, Huang X. Optimal two-impulse rendezvous on perturbed orbit via genetic algorithm[C]. *The 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. Hangzhou, 2013: 305-309.
- [53] Luo Y Z, Tang G J, Parks G. Multi-objective optimization of perturbed impulsive rendezvous trajectories using physical programming[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(6): 1829-1832.
- [54] Ma H L, Xu S J, Liang Y Y. Global optimization of fuel consumption in J2 rendezvous using interval analysis[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(6): 1577-1598.
- [55] 张进. 空间交会任务解析摄动分析与混合整数多目标规划方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 50-53. (Zhang J. Analytical perturbation analysis and mixed integer multi-objective programming method for space rendezvous mission[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 50-53.)
- [56] Zuiani F, Vasile M. Preliminary design of debris removal missions by means of simplified models for low-thrust, many-revolution transfers[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2012, 2012: 1-22.
- [57] Braun V, Lüpken A, Flegel S, et al. Active debris removal of multiple priority targets[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(9): 1638-1648.
- [58] Li H Y, Chen S Y, Baoyin H X. J2-perturbed multitarget rendezvous optimization with low thrust[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2018, 41(3): 802-808.
- [59] Olympio J T, Frouvelle N. Space debris selection and optimal guidance for removal in the SSO with low-thrust propulsion[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 99: 263-275.
- [60] Barea A, Urrutxua H, Cadarso L. Large-scale object selection and trajectory planning for multi-target space debris removal missions[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 289-301.
- [61] Madakat D, Morio J, Vanderpooten D. Biobjective planning of an active debris removal mission[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 84: 182-188.
- [62] Taylor C E. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence complex adaptive systems[J]. *The Quarterly Review of Biology*, 1994, 69(1): 88-89.
- [63] Kanazaki M, Yamada Y, Nakamiya M. Trajectory optimization of a satellite for multiple active space debris removal based on a method for the traveling serviceman problem[C]. *Proceedings of the 21st Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems (IES)*. Hanoi: IEEE, 2017: 61-66.
- [64] Murakami J, Hokamoto S. Approach for optimal multi-rendezvous trajectory design for active debris removal[C]. *Proceedings of the 61st International Astronautical Congress*. Prague: IEEE, 2010: 6013-6018.
- [65] Liu Y, Yang J N, Wang Y Z, et al. Multi-objective optimal preliminary planning of multi-debris active removal mission in LEO[J]. *Science China Information Sciences*, 2017, 60(7): 072202.
- [66] Chen Y, Bai Y, Zhao Y, et al. Optimal mission planning of active space debris removal based on genetic algorithm[C]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Shanghai: IEEE, 2020: 12-25.
- [67] Missel J, Mortari D. Path optimization for space sweeper with sling-sat: A method of active space debris removal[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(7): 1339-1348.
- [68] Zhao Y, Cao Y, Chen Y, et al. Mission planning of GEO active debris removal based on revolver mode[J].

- Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 1-10.
- [69] Lewis O L, Zhang S, Guy R D, et al. Coordination of contractility, adhesion and flow in migrating *Physarum amoebae*[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2015, 12(106): 20141359.
- [70] Tero A, Yumiki K, Kobayashi R, et al. Flow-network adaptation in *Physarum amoebae*[J]. *Theory in Biosciences*, 2008, 127(2): 89-94.
- [71] Di Carlo M, Romero Martin J M, Vasile M. Automatic trajectory planning for low-thrust active removal mission in low-earth orbit[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(5): 1234-1258.
- [72] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. *Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*. Nagoya, 2002: 39-43.
- [73] Jing Y, Chen X Q, Chen L H. Biobjective planning of GEO debris removal mission with multiple servicing spacecrafts[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105(1): 311-320.
- [74] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics*, 1996, 26(1): 29-41.
- [75] 杜鹏桢, 唐振民, 孙研. 一种面向对象的多角色蚁群算法及其TSP问题求解[J]. *控制与决策*, 2014, 29(10): 1729-1736.
(Du P Z, Tang Z M, Sun Y. An object-oriented multi-role ant colony optimization algorithm for solving TSP problem[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(10): 1729-1736.)
- [76] 张晓霞, 唐立新. 一种求解TSP问题的ACO&SS算法设计[J]. *控制与决策*, 2008, 23(7): 762-766.
(Zhang X X, Tang L X. An ACO & SS algorithm for traveling salesman problem[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(7): 762-766.)
- [77] 刘朝华, 张英杰, 章兢, 等. 蚁群算法与免疫算法的融合及其在TSP中的应用[J]. *控制与决策*, 2010, 25(5): 695-700.
(Liu Z H, Zhang Y J, Zhang J, et al. Using combination of ant algorithm and immune algorithm to solve TSP[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(5): 695-700.)
- [78] Shen H X, Zhang T J, Casalino L, et al. Optimization of active debris removal missions with multiple targets[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2018, 55(1): 181-189.
- [79] Li H, Baoyin H X. Optimization of multiple debris removal missions using an evolving elitist club algorithm[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 56(1): 773-784.
- [80] Bishop C M. Neural networks and their applications[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1994, 65(6): 1803-1832.
- [81] Omran M G, Engelbrecht A P, Salman A. An overview of clustering methods[J]. *Intelligent Data Analysis*, 2007, 11(6): 583-605.
- [82] 王思鹏, 杜昌平, 郑耀. 基于强化学习的扑翼飞行器路径规划算法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(4): 851-860.
(Wang S P, Du C P, Zheng Y. Local planner for flapping wing micro aerial vehicle based on deep reinforcement learning[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(4): 851-860.)
- [83] 赵铭慧, 张雪波, 郭宪, 等. 基于分层强化学习的通用装配序列规划算法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(4): 861-870.
(Zhao M H, Zhang X B, Guo X, et al. A general assembly sequence planning algorithm based on hierarchical reinforcement learning[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(4): 861-870.)
- [84] Grondman I, Busoniu L, Lopes G A D, et al. A survey of actor-critic reinforcement learning: Standard and natural policy gradients[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part C: Applications and Reviews*, 2012, 42(6): 1291-1307.
- [85] Arulkumaran K, Deisenroth M P, Brundage M, et al. Deep reinforcement learning: A brief survey[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2017, 34(6): 26-38.
- [86] 孙永军, 王铃, 刘伊威, 等. 空间非合作目标捕获方法综述[J]. *国防科技大学学报*, 2020, 42(3): 74-90.
(Sun Y J, Wang Q, Liu Y W, et al. A survey of non-cooperative target capturing methods[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, 42(3): 74-90.)
- [87] 王平, 郭继峰, 史晓宁, 等. 基于时间状态的敏捷自主在轨服务航天器协同运动规划方法研究[J]. *控制与决策*, 2011, 26(11): 1699-1705.
(Wang P, Guo J F, Shi X N, et al. Research on cooperative motion planning of agile and autonomous onorbit servicing spacecraft considering time[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(11): 1699-1705.)
- [88] 孙昱, 姚佩阳, 孙鹏, 等. 基于鲁棒多目标优化的智能体群组协同任务规划[J]. *控制与决策*, 2016, 31(11): 2045-2052.
(Sun Y, Yao P Y, Sun P, et al. Cooperative task scheduling method for agent group using robust multi-objective optimization approach[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(11): 2045-2052.)

作者简介

许英杰(1994—), 女, 博士生, 从事空间碎片清理、在轨服务任务规划等研究, E-mail: xvyingjie1@163.com;

刘晓路(1986—), 女, 副教授, 博士, 从事航天智能任务规划的研究, E-mail: lxl_sunny@nudt.edu.cn;

贺仁杰(1976—), 男, 教授, 博士, 从事航天智能任务规划、智能人力资源等研究, E-mail: renjiehe@nudt.edu.cn;

左亚辉(2000—), 男, 硕士生, 从事智能任务规划与调度的研究, E-mail: 1832538491@qq.com;

宋彦杰(1996—), 男, 博士生, 从事智能优化理论与应用的研究, E-mail: songyj_2017@163.com.