Space Postman and ATLAS：助力初创企业参与轨道物流经济

Omer Burak Iskender[1,*], **Kaan Göktürk**[2]

[1]南洋理工大学，新加坡。电子邮箱：iske0001@e.ntu.edu.sg[2]伊斯坦布尔技术大学，土耳其。电子邮箱：gokturkk19@itu.edu.tr

[*]通讯作者

拟在第77届国际宇航大会（*IAC 2026*）上发表的论文预印本，大会将于*2026*年*10*月*5*日至*9*日在土耳其安塔利亚举行。

arXiv:2611.32814v1 [eess.SY] 24 Nov 2026

摘要

碎片清除、在轨服务与加注燃料、最后一公里交付、在轨回收和星座部署，虽然是彼此独立的业务，却都建立在同一个规划问题之上：一艘航天器必须在推进剂箱容量和截止期限的限制内访问多个目标，而地球扁率会使这些目标的轨道平面逐渐漂移分离。要妥善解决这一问题，需要轨道动力学和优化方面的专业知识，而这通常不是载荷、拖船或星座公司的核心业务；因此，初创运营商难以进入轨道物流领域，或只能依赖成本高昂的手工排程。本文介绍了 Space Postman，这项规划服务可将目标清单、航天器和时间预算转化为定价后的任务计划；对于交会巡访，还会对计划进行验证。本文还介绍了 ATLAS，一种拖船概念，其载荷舱可搭载碎片处理套件、客户航天器或推进剂。由于大多数初创企业会在资金耗尽时倒闭，这项业务首先提供软件，之后再推出运载器。两个案例研究展示了它所带来的变化。针对 DEXTER项目的一个设想后续任务——该项目旨在开发将废铝转化为推进剂的方法——规划器为共享同一轨道壳层的十个高风险上面级规划了一次巡访：仅靠等待无法完成巡访，均分时间会使推进剂消耗增加三分之一，而时间就是任务的货币。对于一艘通过一次拼车发射释放八个客户航天器的拖船，交付顺序决定推进剂箱是否够用；方案则根据每次交付必须抵达的轨道平面为其定价。规划引擎以已发表获胜方案的保真度，复现了公开碎片清除基准测试中的该方案；在发射条件相同的情况下，它还能为大多数任务规划出成本更低的轨迹，为运营商和投资者提供独立检查。经过校准的规划器与载荷无关型拖船相结合，可为新的运营商提供切实可行的轨道物流入门途径，前提是按照数据生成时所达到的保真度来解读这些数字。

关键词： 轨道物流、在轨服务、太空拖船、碎片回收利用、多目标任务规划、软件即服务

缩略语

ATLAS 自主物流与服务拖船**DEXTER** 地外回收碎片提取工具（地平线欧洲项目）**ESA** 欧洲航天局 **LEO** 近地轨道**LTAN** 地方时升交点赤经**MEUR** 百万欧元**SSO** 太阳同步轨道**TRL** 技术成熟度等级**VC** 风险投资

1 引言

近地轨道（LEO）中的多家企业，其中许多是初创企业，都依赖同一类任务：将搭载客户释放到各自目标轨道的拖船、为多个客户卫星提供服务的在轨服务飞行器或加注飞行器、收集失效空间物体的清除飞行器、将其回收为原材料的回收飞行器，以及将一次发射分布到多个轨道平面，并在推进剂箱容量和截止期限 [1–6] 内，依次将一艘航天器送往多个目的地。上述企业的共同点，也是本文的主题，是它们背后的规划问题。

图 1 描绘了这一问题。在近地轨道中，多目标任务的主要成本是目标之间的轨道平面变更：在 800 千米高度进行十度的轨道平面变更，代价约为 1.3 千米/秒 [7]。地球扁率使每个轨道平面以不同速率变化，因此两个轨道平面之间的夹角会随时间改变。等待，或在一个以另一速率变化的漂移轨道上暂时停留，可以用很少的推进剂缩小这一差距，但需要付出时间代价。因此，每个航段的代价都取决于其执行时间；在一个航段上花费的时间会改变后续每个航段的几何关系，访问顺序很重要，而贮箱容量和截止期限则限制了整个巡游。在运筹学语言中，这是一个移动目标的时间相关路径规划问题 [8,9]。利用轨道平面的漂移已是成熟做法，从多碎片巡游设计和星座部署，到近期的服务任务研究，均有应用 [10–14]。

要把它做好本身就是一道进入门槛。这需要轨道动力学、组合搜索和轨迹优化，

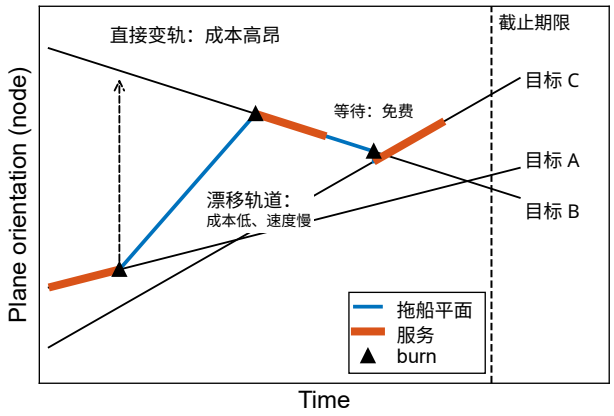

图1：许多轨道物流企业背后的规划问题（示意图）。目标A、B和C所在的轨道平面以不同速率转动。立即改变轨道平面的成本很高；漂移轨道只需少量推进剂，就能使拖船的轨道平面缓慢转动；当目标的轨道平面来到拖船所在位置时，等待无需成本。每种选择都会付出时间代价，而交会巡访必须在截止期限前结束，并且推进剂必须装在一个贮箱中。

而这些技能很少是 Payload、拖船或星座公司的核心业务。相关方法虽已存在于研究文献 [13, 15–17], 中，但要将其转化为运营商能够报价、执行并据理维护的计划，仍需要专业人员投入。新入局者可以自行建立这项能力，也可以将其作为咨询服务外包，或手动安排计划。我们的案例研究展示了最后一种选择的代价：在碎片巡游中，均分时间预算会多消耗三分之一的推进剂；在拖船任务中，手动排序的交付顺序会多消耗将近四分之一的推进剂；而任务清单碰巧采用的书写顺序甚至根本无法装入贮箱（第7–9节）。

本文介绍了两款旨在突破这一障碍的产品。**SpacePostman**是一项正在开发中的规划服务：运营商上传其目标、航天器和时间预算后，即可获得一份任务计划，其中列出每个航段的顺序、日期、速度增量（ΔV）和推进剂用量；对于交会巡访，还会提供一次更高保真度的检查。**ATLAS**是一种拖船概念，其载荷舱可装载碎片处理套件、客户航天器或推进剂，从而让一艘运载器和一个规划器服务于上述多个企业。规划引擎及其证据将在本次大会上的一篇配套技术论文 [7] 和一篇期刊论文稿 [18]中介绍。配套论文在三个案例上测试了该规划器：欧洲航天局第九届全球轨迹优化竞赛（GTOC9）的碎片清除基准测试；一次对废弃火箭箭体的设想巡访，该任务将把DEXTER回收项目开发的采集技术应用于轨道；以及一艘多客户拖船。本文从业务角度讨论后两个案例，并仅将第一个案例作为可信度检查；文中不重复配套论文中的任何表格或图示。

第2节梳理市场，第3节则介绍初创企业的约束条件；第4至第6节介绍产品方案及其可信度，第7至第9节介绍案例研究及其价值，第10节介绍路线图。

2 一个问题，多种商业模式

潜在客户群规模庞大：欧洲航天局统计显示，目前轨道上约有15,900颗正常运行的卫星，以及约47,000个定期跟踪的目标（2026年7月） [19]。表1按照细分市场，列出了其运载器或任务符合图1所示问题的运营商，依据的是截至2026年9月公布的信息。三点观察构成了商业案例的基础。

首先，飞行履历位于这一问题的两端。能够将每个搭载客户分别送入其目标轨道的运载服务商会定期执行发射任务 [22], ；而在地球静止轨道，一艘在轨服务飞行器已经先后与两名客户完成对接 [28]。在近地轨道，多目标在轨服务、清除和回收任务仍处于演示阶段或停留在方案层面；表中的清除任务也都各自只有一个目标，唯有CLEAR设计方案涉及两个目标。其次，只要一项任务必须在近地轨道抵达多个轨道平面，每个细分市场都会遇到图1所示的问题：客户需要不同地方时的拖船、服务多个客户或废弃航天器的在轨服务飞行器或清除飞行器、收集多个火箭级的回收飞行器，以及通过一次发射填充多个轨道平面的星座。第三，各细分市场在每个停靠点所执行的操作不同，且目标有时必须真正抵达，有时只需到达其轨道；这会改变质量核算和所需的保真度，但不会改变方案的核心，因此可以由同一个规划引擎处理。配套论文展示了这一点在清除、回收利用和交付方面的应用 [7]；至于在轨服务和加注燃料，包括推进剂转移与返程航段，目前尚未得到演示。

通用任务分析工具，包括免费的通用任务分析工具（GMAT） [42], 模型，会针对分析师指定的转移进行建模；据我们所知，多目标巡游的顺序和时机仍由分析师决定。SpacePostman正是为填补这一空白而设计的。

披露声明。 第一作者供职于 Final Proximity Space Systems，该公司开发制导和多次交会优化软件及 ATLAS 概念，并支持本项工作 [41]。Magdrive 是 DEXTER 的合作伙伴 [39] ，并聘用了配套技术论文的两位合著者 [7]。DEXTER 被作为案例研究对待，而非客户；文中也未将其或 Magdrive 描述为客户；未使用 DEXTER 或 Magdrive 的任何性能数据。

表1：运营商及项目在具有多目标规划问题的细分领域中开展项目，截至目前公布的情况如下。2026年9月29日。几位？：一项任务是否会访问、服务于或部署至多个目标或轨道。

运营商（国家）	运载器或任务	状态，2026年9月	几家?
最后一公里交付与轨道转移			
D-Orbit（意大利） [20–22]	ION卫星运输器	自2020年起飞行；2026年7月执行第23次任务	是的，单独的轨道每位客户
Exotrail（FR） [23]	spacevan	自2023年11月起飞行	未说明
Impulse Space（美国） [24, 25]	Mira；Helios	Mira：自2023年以来执行了三次任务；Helios：首次计划于2027年发射	未说明
Momentus（美国） [26, 27]	Vigoride	首次飞行于2022年；Vigoride-7自此进入轨道	未说明
		2026年3月	
在轨服务、寿命延长和加注燃料			
诺斯罗普·格鲁曼（美国） [28, 29]	MEV-1、MEV-2；机器人运载器和舱体	MEV于2020年至2021年对接，MEV-1对接第二个客户于2025年；机器人飞行器于2026年7月发射（全部位于地球同步轨道）	是的，按顺序
Starfish Space（美国） [30, 31]	Otter	首个 Otter，用于检查多个废弃航天器并进行发射	计划中的
		自2026年10月起	
Orbit Fab（美国） [32, 33]	Tenzing；RAVEN、NEST	轨道加注站于2021年发射；RAVEN航天飞机和NEST计划于2030年建成的轨道加注站	计划中
碎片检查与清除			
Astroscale（日本、英国） [34–36]	ADRAS-J；ADRAS-J2	2024年接近废弃火箭级至15米，自2026年3月起进行离轨；捕获ADRAS-J2捕获任务正在开发中	不，是各一个
ClearSpace（瑞士，英国） [37, 38]	ClearSpace-1；CLEAR	ClearSpace-1（欧洲航天局）：计划于2029年发射；CLEAR（英国）：设计阶段	CLEAR：两个
在轨回收和推进			
DEXTER（欧盟） [39]	EIC Pathfinder项目	实验室和地面工作，2025–2029	案例研究：第7节
Magdrive（英国）* [40]	金属推进剂推力器	首次在轨演示 2025年–26年；DEXTER 合作伙伴	–
星座部署			
SpaceX（美国） [11]	Starlink	批次保持在低位 35 天和 70 天，以达到相隔 20° 和 40° 的轨道平面	是的，通过进动
规划软件和拖船概念			
Final Proximity（TR, SG）* [41]	制导软件；ATLAS	概念	–

*作者在文中披露了与相关方的关系。状态信息依据引用页面所述，其中大多数来自运营商页面；仅在未找到一手来源时采用行业媒体报道。GEO：地球同步轨道。该表展示的是各细分领域的分布图，并非完整普查。

3 初创企业为何需要精益进入策略

大多数年轻企业并非因缺乏产品而失败，而是因缺乏资金。在从2023年到2026年初停业且能够确定停业原因的385家风险投资支持的初创企业中，70%耗尽了资本（图2a），其最后一次融资后的中位时间为22个月 [43]；耗尽资本通常是最终原因，而非根本原因，但它是导致企业终结的因素。在所有行业中，2015年3月开业的美国私营部门企业约有一半在五年后仍在运营，十年后仍在运营的约有三分之一 [44]。

太空领域资本密集，且具有周期性。2016年至2025年，太空初创企业的投资总额达738亿美元；该市场规模于2021年达到155亿美元的峰值，随后几乎腰斩（图2b） [45]。资金停止流入后，硬件公司措手不及：Vector Launch在2019年一名投资者撤回支持后申请破产 [46], Virgin Orbit在2023年未能获得新融资 [47], 拖船运营商Momentus在2024年末仅有160万美元现金，并存在持续经营疑虑 [48], Orbex则在2026年因募资和合并努力失败而进入接管程序 [49]。长期以来，投资者更青睐数据和影像初创企业，而不是火箭制造商和硬件供应商，因为前者能更快实现收入；不过，到2024年，流向资本密集型企业的资金有所增加 [50]。对于轨道物流领域的新进入者而言，这表明应选择一种在需要运载器之前就能产生收入的切入方式；第9节将回到这一点。

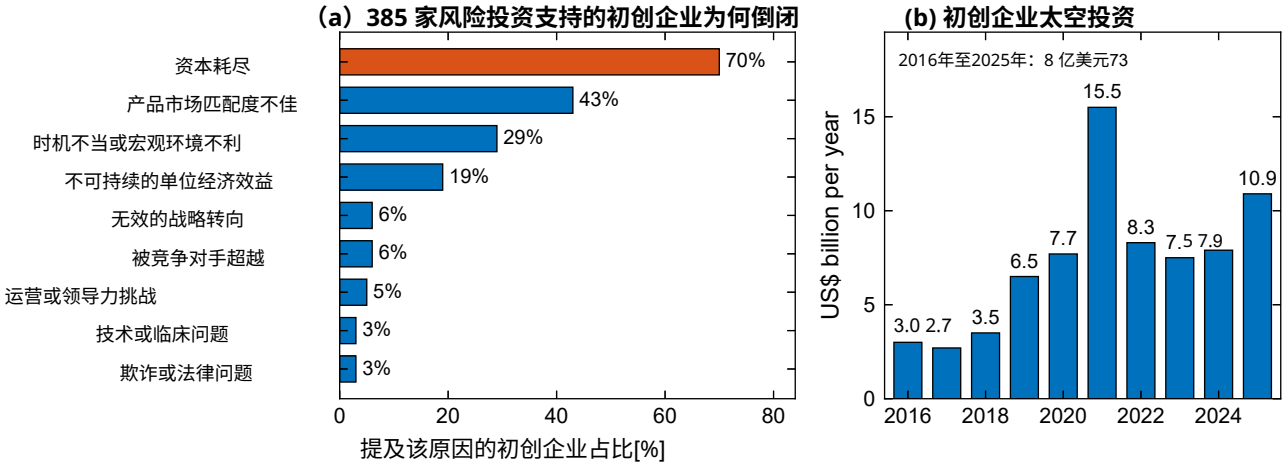

图 2：初创企业为何需要精益入市。(a) 对2023年至2026年初倒闭的385家风险投资支持的初创企业给出的倒闭原因，每家公司可有多个原因 [43]。(b) 太空初创企业（硬件、发射和卫星运营）每年的投资额 [45]。

4 Space Postman：规划即服务

4.1 客户提供什么以及接收什么

图3从客户视角展示了这项服务。客户提供目标（目录对象、客户航天器或客户轨道）、航天器（干质量、比冲 I_{sp}、贮箱）、每个停靠点的服务时间，以及截止期限或发射窗口。该服务返回访问顺序、每个航段的抵达和离开日期、 ΔV 以及推进剂用量、贮箱中剩余的余量，以及带有历元的点火表；每次假设变更都会生成一份新方案。对于十目标巡访，该设计在一个处理器核心上只需几秒到几分钟 [7], ，而第8节的完整拖船研究——包括三次独立搜索和每个基线方案——约十分钟即可完成。在与已发表的最佳参考结果相当的保真度下，对十目标交会巡访进行验证（包括一次有限推力飞行），在六核工作站上耗时不到一小时 [7]。

4.2 引擎的工作原理

该引擎遵循已发表的最佳多目标解所采用的多保真度模式 [51]。闭式筛选模型以两种方式为每个航段定价：等待各轨道平面交会，或停泊在一条通过高度、偏心率和倾角塑造的漂移轨道上；并取成本较低者。由于完整巡游的定价可在毫秒级完成，因此可以同时确定一次巡游的所有分段时间，并在此基础上搜索访问顺序 [7, 18]。对于必须实现交会而不只是抵达目标轨道的任务，方案随后会针对轨道相位调整重新安排时间，在完整的扁率动力学下求解精确交会，通过独立的轨道传播器进行检查，并使用有限推力变轨在开源 Basilisk 模拟器中执行，并再次在 NASA 的 GMAT 中执行 [7, 42, 52]。下文将筛选模型的结果称为胜过设计保真度，而后续步骤的结果称为经验证。筛选模型能够可靠地对航段进行排序，但一旦计入相位调整，其方案成本可能上下浮动几个百分点；因此，该服务会针对交会巡游报价经验证数值，并将筛选结果中相差几个百分点的情况视为并列 [7]。当无法访问所有目标时，该引擎不会选择应访问哪些目标，也不提供最优性证明，这一点不同于针对该问题类别的精确方法 [14, 17], ；此外，它建模的是脉冲变轨，而多家同类方案则采用低推力 [12, 13]。

4.3 商业模式

Space Postman 计划采用按研究计费的服务，分为三个层级，对应图3所示的保真度：按设计保真度提供快速报价、经过验证的方案，以及后续结合客户的推进和导航模型制定的适于飞行的方案。席位费可涵盖设计保真度下的假设性运行，其边际计算成本较低；经过验证的层级则涵盖高保真度运行和分析师审核的成本。价格尚未确定；第9节说明了用于将这些价格与内部自建方案进行比较的假设。

5 ATLAS：一辆母舰，三种载荷

ATLAS 是该服务方案的执行部分：一种尚未建造的拖船概念，其载荷舱可搭载三类货物，而母舰几乎无需改动：用于碎片清除和回收利用的离轨套件或捕获工具、配备释放适配器以进行最后一公里交付的客户航天器，以及配备转移接口以进行加注燃料的推进剂。对于规划器而言，这三者的区别仅在于每次停靠时发生的情况：是套件或

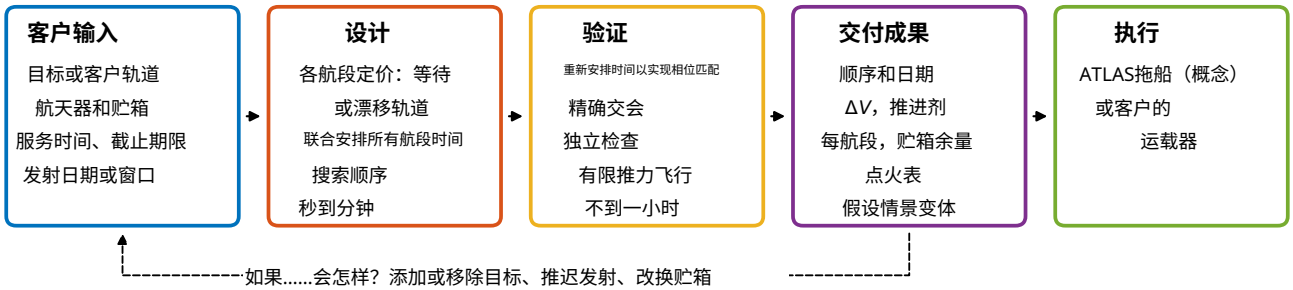

图3：客户视角下的 Space Postman。运行时间采用配套论文 [7]中十目标巡访的结果：设计在一个核心上完成，验证在六个核心上完成。送入某一轨道无需沿轨相位，报价时采用设计保真度；交会巡游则须经过验证后再报价。

客户离开拖船、推进剂离开拖船，还是回收的材料并入拖船 [7]。一艘采用货物无关方案的母舰意味着只需一个飞行器项目和鉴定路径，而不是每项业务各需要一个；我们认为，这正是将该服务与运载器配套的原因，而不是已经证实的成本优势。

三个运行衔接点将方案与运载器联系起来。首先，拖船需要具备足够的自主能力，无需地面在每个航段进行干预，就能飞行多段计划；每个目标处的末端交会与对接是另一个问题，已在第一作者先前的研究中探讨 [53]。其次，推进系统必须适用于漂移转移：当前的引擎规划的是脉冲变轨，采用可贮存推进剂的化学系统即可执行；而电推进器（可能包括 DEXTER 正在研发的可加注推进器 [39], ）则需要低推力分段模型 [12]。第三，若错过变轨操作或目标发生变化，运营商需要重新规划。从当前状态重新运行设计阶段很快（图3），但在轨重新规划尚未得到验证，仍是路线图中的一项（第10节）。

6 为什么运营商可以信任这些方案

只有当规划服务的数值在任务实际执行时仍然成立，购买它才有价值，因此我们将该引擎与公开基准测试中已发表的最佳方案进行了对照。GTOC9要求通过一系列任务清除处于太阳同步轨道上的123个碎片，每次发射搭载一艘航天器，并使总成本最低；总成本会随发射次数及其质量增加而上升 [54, 55]。由NASA喷气推进实验室（JPL）一支二十多人团队提出的获胜方案使用了十次发射，其任务表以全保真度给出了每个航段 [51]。表 2总结了配套论文中进行的两部分检查 [7]。第一部分是校准：在获胜方案公布的时刻表上，我们的求解器复现了其第十个任务，误差在0.3%以内，并将每个航段的误差控制在 7 m/s以内。第二部分是规划器自行求解该基准测试：它采用与获胜方案相同的发射、碎片和发射日期，按随机顺序接收每次发射所对应的碎片，并提出访问顺序、所有分段时间和每次变轨操作。

在全保真度下验证后，其方案在十次发射中的总需求比获胜方案低3.5% ΔV 。十个任务中有八个需求更低，最多低15.6%；拥有21个碎片、规模最大的任务 3则高出5.3%，任务 9则高出0.4%。在三次发射中，规划器的序列恰好与获胜方案一致。在任务 10中，规划器按44、111、56、17、78、0、109、103、42、21的顺序，在143.0天内访问十个碎片；获胜方案则需148.2天，各航段的速度增量为51至299 m/s：拖船在服务每个碎片时沿着其节点线飞行，并在下一条节点线距离较近处跳转。碎片在各次发射之间的分配以及发射日期，是获胜方案贡献的重要组成部分，因此这只是对规划器的检验，而不是排名；JPL在竞赛后提出的方案采用了部分不同的分配，仍然更便宜 [51], ；此外，team XSCC在竞赛后报告的最大单次发射基础成本下，一个不带验证的十次发射方案成本为698百万欧元 [56]。全部十个任务还分别在Basilisk中使用有限推力变轨执行了一遍，并在GMAT这一采用独立航天器模型和积分器的第二款模拟器中再次执行：与脉冲变轨相比，它们所需成本高出 0.50% ΔV，两款模拟器在每个任务上的结果一致到 12 mm/s以内。任务 10的方案在首次有限推力飞行中需要1 416.9 m/s，比其脉冲变轨成本高出0.25%。规则检查采用的是我们的实现。

7 案例研究1：DEXTER，碎片变为推进剂

7.1 案例与问题

DEXTER（地外回收碎片提取工具）是地平线欧洲框架下的EIC Pathfinder挑战项目，项目周期为2025年10月1日至2029年9月30日，欧盟经费支持约为4百万欧元，由克兰菲尔德大学协调，合作伙伴包括阿利坎特大学、SENER、Moliri、Magdrive和Vimotek [39]。该项目开发机器人工具，从废弃硬件中采集铝

表 2：对基准测试进行可信度检查（配套论文 [7]）：已发表的获胜方案 [51]与我们求解器在其时刻表上的结果（校准）进行比较，并与 Space Postman 规划器针对相同发射提出的方案进行比较，所有方案的保真度均相同。

检查	获胜者	本研究	差异
校准，任务 10	1 422.8	1 419.0	–0.3%
规划器的计划，任务 10	1 422.8	1 413.4	–0.7%
十项任务	25 136	24 267	–3.5%
较少的任务 ΔV	–	8/10	–
成本指数 [百万欧元]	731.5	718.7	−1。8%

ΔV 单位为 m/s：在完整 J_2 动力学条件下执行带精确交会的脉冲变轨，并独立重新传播。校准：使用获胜者公布的时刻表运行我们的求解器。规划器：使用与获胜者相同的发射、碎片和发射日期；规划器提出每个序列、航段时间和变轨操作。成本指数：采用统一的 55 百万欧元发射基准的竞赛发射质量成本（按官方基准成本计算分别为 718.4 和 731.3 百万欧元）。

，并将废料加工成可加注推进器所需的推进剂；相关技术将在实验室和地面完成验证。该项目本身不包含飞行阶段。在轨回收另有独立的商业案例 [57],，而且还研究了按照可回收铝含量选择碎片，以便将其交付至月球 [5]。一项在轨应用此类工具的任务——可视为DEXTER的后续任务概念——会提出资助方或运营商在建造任何硬件之前都会考虑的问题：选择哪些目标、每项任务处理多少个、需要多长时间、需要多少推进剂，以及采集工作能够提供多少帮助。下面的演示以设计保真度回答这些问题，并针对一艘作为替代体而非DEXTER设计方案的航天器，在完整的扁率动力学条件下以精确交会的方式核验结果。

7.2 为什么选择这十个对象

候选对象是已公布名单中近地轨道（LEO）统计上最令人担忧的五十个废弃航天器 [58,59]。火箭体在这些名单中占据主导，其中最重的是 Zenit-2 二级（SL-16），每个约重九吨；其中十八个共享一个轨道壳层，其 71° 倾角和平均高度为810–860千米，这是欧洲航天局（ESA）环境报告特别指出的高碰撞风险集中区域 [60]。该轨道壳层位于欧洲航天局研制的地球观测卫星轨道之上方不远处，例如 Sentinel-5P、MetOp 和 FLEX [7]；那里发生碰撞产生的碎片会扩散到整个轨道带。对于回收飞行器而言，这一集群还有三个优点：据估计，每个火箭级含有4.2至7.5吨铝合金，这一范围介于上面级的平均铝含量 [61] 与扣除发动机后的干质量之间；十八个火箭级均采用同一种设计，因此一套捕获与切割工具即可适用于所有目标；而且它们的进动速率相同。最后一点同时也是难题：它们的升交点偏移是固定的，因此没有任何目标会向另一个目标漂移，拖船必须横向漂移穿过它们。在2028年1月1日升交点连续的十个火箭级可能组成的集合中，选定的集合具有按估算的 ΔV计算的最高单位碰撞风险总和；它横跨135° ，并包括2021年和2025年名单中排名第一的火箭级 [7]；其他火箭体集群中的同类集合成本将高出两到三倍 ΔV。

7.3 方案及其带来的变化

拖船于2028年1月1日抵达第一级，在每一级停留30天进行检查、捕获和采集（这是一项假设：采集尚无飞行先例），并且必须在三年内完成任务。替代航天器采用第6节中的基准测试所用型号：干重2 000千克，配备一个5 000千克的贮箱、I_{sp} = 340 s，并在每一级留下一个30千克的套件 [7]。图4a展示了由此得出的日程表。整个巡游耗时1 096天，访问全部十个火箭级，所需速度增量为1 098米/秒，推进剂消耗为844千克，仅为替代航天器贮箱容量的六分之一。除一段航段外，其余航段都会进入轨道壳层下方50至200千米的漂移轨道；该轨道进动更快，使拖船的升交点能够在整个集群中向后移动。剩下的一段航段则是在两个火箭级之间进行短距离转移；届时，它们的升交点已漂移到彼此靠近。行进方向很重要：以相反方向依次访问相同的十个火箭级，成本会增加8%。

与运营商可能手工拟定的时间表相比，方案改变的是业务内容。单靠等待无法弥合任何一个缺口，因为各级共用同一速度：如果没有漂移轨道，这趟行程需要约 16 km/s。将时间预算平均分配到各航段，需耗费 1398 m/s，比 ΔV 将各航段时间一并优化多 27%，并多消耗约 290 kg 推进剂。若让前几个航段各自占用所需的全部时间，再把剩余时间留给其余航段，则会超出贮箱容量。

最重要的是，时间是这项任务的货币（图4b）。两年的预算会使成本升至 2 142 m/s，并消耗 1 935 kg 推进剂；四年的预算则会将成本降至 774 m/s，并消耗 565 kg。每级服务时间每增加 15 天，就会增加 240 至 380 m/s 的成本，因为这会占用漂移时间；这两种敏感性与剩余转移时间的关系几乎落在同一条曲线上。因此，资助方可以依据具体数字而非经验法则，在任务持续时间与推进剂用量之间权衡；采收团队也能了解加快服务速度的价值。漂移轨道的高度影响不大：将其降至 400 km 或升至 600 km，成本变化约为百分之一。

7.4 采集的推进剂，作为参数化变体

如果拖船在服务期间将每个级的一部分铝转化为可用推进剂，并优先燃烧这些推进剂，那么发射时装载的推进剂会迅速减少（图4c）。在 I_{sp} = 1 000 s、每个级使用 10 kg 时，推进剂会从 844 kg 降至 526 kg；在相同比冲下、每个级使用 50 kg 时，则降至 14 kg；即使在类似化学推进的 300 s 比冲下，每个级使用 50 kg 仍可减少一半以上。每个级 50 kg 的产率

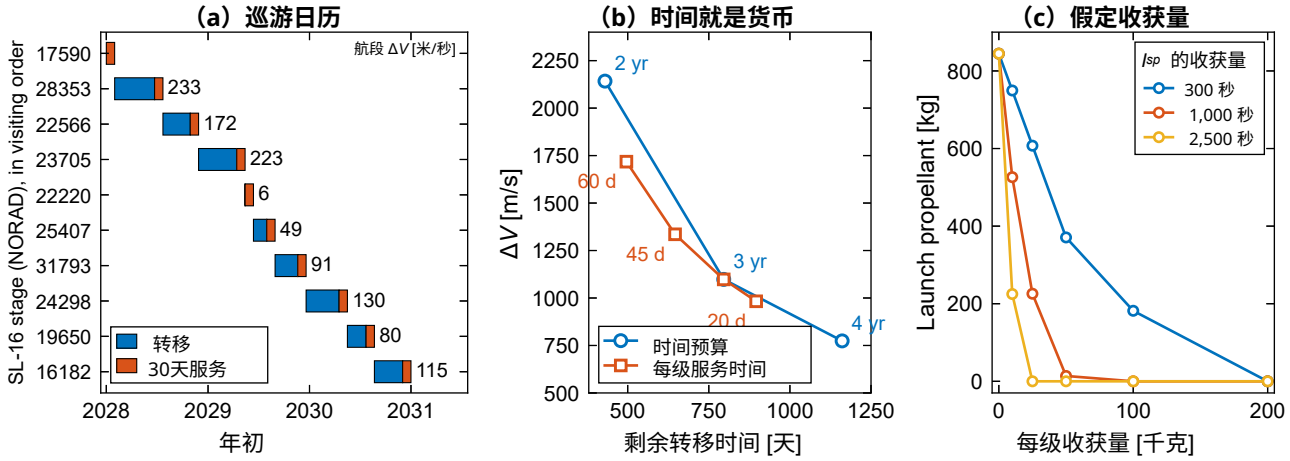

图 4：DEXTER 案例研究：一项设想中的后续任务，计划巡游十个 SL-16 级（设计保真度、采用替代航天器）。（a）从 2028年1月1日 开始的计划巡游日程表：转移（蓝色）和 30天服务（橙色），并标出每个航段的 ΔV。（b）当时间预算（2、3、4 年）或每级服务时间（20–60 天）变化时，巡游的 ΔV 与服务完成后剩余转移时间之间的关系。（c）如果拖船将每级的一部分铝转化为可用推进剂并优先燃烧这些推进剂，在假设的三种比冲下，发射时装载的推进剂量；产率和比冲均为参数假设，并非 DEXTER 的性能数据。

约占一个级估算铝含量的百分之一，但这些产率是假设，并非 DEXTER 或 Magdrive 的性能数据：转化率、推进剂的比冲和推进器才是该项目正在开发的内容。它们表明，巡游的后勤安排有足够余地让适度的采集产生影响，也告诉采收团队哪些产率会改变任务。

这项设想有两点注意事项。替代航天器所用的 30 千克套件并非用于移除九吨级火箭级的移除装置；真正的移除方案而非巡游任务，将成为发射质量的主要决定因素。按照完整的扁率动力学，将其精确求解为脉冲交会，并使用第 6 节中经过验证的工具进行检查后，巡游任务的代价为 1 118.9 米/秒，比设计估算高 1.9%，且九次交会的误差均控制在毫米以内。漂移轨道上的阻力和有限推力飞行尚待纳入；如果巡游任务本身由电推进器执行，还需建立低推力分段模型。

8 案例研究2：多客户拖船

8.1 任务清单

一次拼车发射将一艘拖船送入高度525千米、升交点地方时为10:30的太阳同步轨道（SSO）。该拖船搭载8艘客户航天器，单艘质量为25至150千克，总质量为605千克，并将每艘航天器分别释放到其目标太阳同步轨道，即高度450至650千米、升交点地方时（LTAN）介于09:30和11:30之间的轨道。任务清单仅用于示例，并非真实客户名单。该拖船是一种小型可贮存推进剂运载器（干重500千克、一个600千克贮箱、$I_{sp} = 300\,\mathrm{s}$）；它在每位客户处停留一天，执行最长90天的转移任务，并且必须在一年内完成 [7]。

漂移轨道的高度保持在400至1,200千米之间，高于阻力会在数月内使其衰减的高度范围。将航天器交付至某一轨道需要确定轨道平面、高度和偏心率，但不需要沿轨相位，因此这里相关的是设计保真度。

8.2 为什么等待在太阳同步轨道中行不通

每个客户的轨道平面都是太阳同步的，因此每个轨道平面都以太阳运动速率进动，客户之间的偏移量始终不变。等待无法解决任何问题：仅仅等待，或立即改变轨道平面的拖船，需要超过 6 km/s 的速度增量，这几乎是其贮箱所能容纳推进剂量的九倍。只有漂移轨道——即暂时采用不同的高度或倾角——才能使拖船的轨道平面相对于客户发生移动。

8.3 运营商看到的内容

该方案在 365 天内将全部八个客户送入五个太阳同步轨道平面，所需速度增量为 1 008 m/s，推进剂用量为 327 kg，即贮箱容量的 55%，发射质量为 1 432 kg。图5a显示了航线：拖船首先升至较高高度（约 720 km）进行漂移，在 90 天内使地方时升交点赤经回退一小时；随后在较低高度的漂移轨道（438 至 486 km）上依次穿过其他轨道平面，并在一天内逐个释放共享同一轨道平面的客户。三次独立搜索得出了相同的顺序。从商业角度看，有四个杠杆因素至关重要。

交付顺序。 按照任务清单恰好列出的顺序交付客户，需要 2 385 m/s 和 938 kg，超过贮箱容量。一个按地方时升交点赤经排序、再按高度排序的自然手工顺序虽然可行，但需要 403 kg 推进剂，比搜索顺序多 23%。在这里

顺序而非时间安排才是价值所在：在这份任务清单中，将所有航段时间一并选择几乎没有增加任何价值，因为各轨道平面同步进动，而某一航段的延迟不会改变下一个 [7]。

每次交付的推进剂。图5b将每个航段消耗的推进剂计入其交付对象的客户名下。对于位于拖船当前所在轨道平面的客户，成本为9至18千克，仅涉及高度变化；对于地方时升交点赤经相差半小时至一小时的客户，成本为30至121千克，而在任务初期拖船仍较重时，成本还会更高。这构成了按轨道平面偏移和客户在任务清单中的位置制定价目表的基础，而非仅按质量计价。

每个贮箱搭载的客户数。方案留下了273千克未使用的推进剂。剩余量可以作为应急储备出售，也可以用来搭载更多客户；第九或第十个客户是否能加入，以及加入后的位置如何，只需进行一次假设分析即可确定。

入轨时间。推进剂消耗最优方案要到发射近一年后才释放最后几个客户。若客户希望更早进入轨道，就需要为此多支付推进剂费用；第10节所述规划器扩展之一，是为每个客户设置交付期限，以便服务方对此类需求定价。

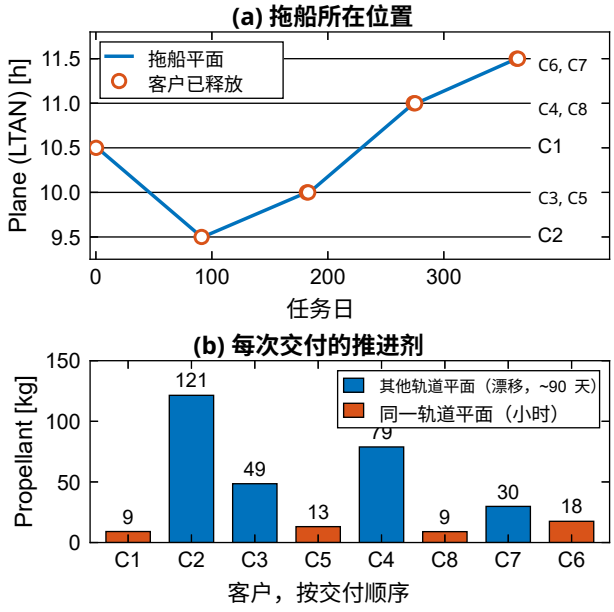

图5：多客户拖船（代表性任务清单）。(a) 拖船轨道平面：以任务日为横轴，显示其升交点的地方时升交点赤经；细黑线表示客户轨道平面，圆圈表示释放时刻。倾斜线段表示漂移轨道。(b) 按交付顺序，运送每个客户的航段所消耗的推进剂：总计消耗600千克贮箱中的327千克。

8.4 变体：部署星座轨道平面

同样的物理规律也适用于星座运营商。在 53°350 公里的停泊轨道中同时释放的卫星，其进动速度比在550 公里轨道壳层中的卫星快约 0.485 度/天，因此，一批卫星等待 41 天后再升轨，抵达时将位于与第一批相距 20° 的轨道平面内；第三批若等待两倍时间，则会位于相距 40° 的轨道平面内。每次升轨约需 112 米/秒，而直接将轨道壳层的轨道平面转动 20° 则约需 2.1 千米/秒。本示例采用长期 J_2 漂移、圆轨道和瞬时升轨。利用差分进动进行部署已是成熟的实践 [6, 62], ，实际运行记录也与该示例相符：Starlink 的批次曾在 350 公里高度停留 35 天和 70 天，以到达彼此相隔 20° 和 40° 的轨道平面 [11]。在存在多个轨道平面、一个贮箱以及整个星座的截止期限时，决定每批卫星应等待多久，正是 Space Postman 致力于解答的问题；我们尚未对此运行规划器。

9 价值分析

9.1 对比现实基线

表 3 将每个方案与运营商无需优化器即可制定的时间表进行了比较：均分时间预算、等待轨道平面而不是使用漂移轨道、采用另一种自然的行进方向、按照任务清单顺序，以及采用手工排序顺序。我们有意省略了配套论文中的另外两个基准方案——同时飞行所有航段，以及依次贪心地选择每个航段的时间——因为谨慎的运营商不会采用它们；它们展示的是物理规律，而不是规划器的价值。与均分时间预算或采用手工排序顺序相比，该方案可节省五分之一到四分之一的推进剂；在六次比较中的三次里，这决定了一项任务究竟能否装入其贮箱。

表 3：两个案例研究的方案与运营商可手工制定的调度计划的对比（设计保真度，相同约束条件）。

Plan	ΔV [米/秒]	m_p [kg]	与方案对比 [m_p]
DEXTER 演示之旅，*5,000* 千克贮箱			
Space Postman	**1 098**	**844**	–
预算均分	1 398	1 134	+34%
其他步行方向	1 181	910	+8%
仅等待	16 108	$> 10^5$	在坦克上方
多客户拖船，*600*千克坦克			
Space Postman	**1 008**	**327**	–
手工排序顺序	1 175	403	+23%
任务清单顺序	2 385	938	在贮箱上方
仅等待	6 169	5 391	在坦克上方

m_p：发射时装载的推进剂。手动排序：先按地方时升交点赤经，再按高度排序。除行进方向外，DEXTER 的其他替代方案均保持计划顺序；拖船的替代顺序采用相同的优化器进行计时。来源：配套论文 [7] 及其案例数据。

9.2 节省的价值

对于拖船而言，节省的推进剂就是节省的发射质量。搜索得到的顺序比手工排序顺序轻 76 千克发射，比任务清单顺序轻 611 千克，而后者还需要更大的贮箱。按照 2026 年的拼车发射价格，超过 50 千克基础套餐的部分约为每千克 7,000 美元， [63], 这些质量对应的发射费用大约分别是 50 万美元和 400 万美元。对于一次碎片巡游，相较于均分时间预算所节省的约 290 千克，相当于替代体贮箱的约 6%；采用每级配备现实的移除装置后，巡游所占的发射质量比例会降低，但其可行性仍取决于方案。两个故事中更大的影响都是二元的：方案要么能装入贮箱并赶上截止期限，要么不能；而这一结果会随着顺序、时间安排和时间预算的变化而改变。人们一直将在轨服务的价值表述为灵活性的价值 [64, 65]；对于客户提出的每一种变体，都能在几分钟内给出一个可行且定价明确的方案，就意味着可以对其报价。

9.3 自建还是采购

表4列出了在内部构建该能力的成本。除所引用的薪资基准以及可免费使用 NASA 通用任务分析工具（ GMAT） [42],之外，每个数字都只是用于说明的假设，并非调查结果。根据这些假设，内部能力需要数十万欧元的工资成本，并且要经过一至两年才能形成首份校准计划；而从该服务购买一项研究的成本仅为其一小部分，并且可以立即获得。这一比较并非单方面的：拥有稳定任务来源的运营商可能更倾向于组建内部团队，而单项研究也可以向咨询公司购买。该服务的优势在于表格未体现的内容：获得首份校准计划所需的时间、能够使报价具有说服力的验证，以及足够快速的假设分析循环，从而能在一次对话中回答客户的问题。

表 4：在内部构建多目标规划能力与采购研究的对比。示例性说明；请参见依据列。

Item	价值依据
高级轨道工程师	假设为每年 150–220 千欧元
任务分析工程师	假定为每年90至130千欧元
美国中位数，航空航天工程	引用的年薪为134960美元 [66]
校准规划器所需时间	假定为12至24个月
制定首个方案的工资成本	24万至70万欧元 派生的
轨道传播工具（GMAT）	免费引用 [42]
一项研究，目标价格	5万至20万欧元 假设

工程师：每人按一个全职当量计算；假设成本为欧洲地区的全负担成本（薪资、雇主承担费用、设备）。推算得出：两名工程师工作12至24个月。美国中位数：航空航天工程师2025年5月的基本工资，仅作参考。商业任务分析套件按未公开的价格授权。

9.4 自下而上启动：先做软件，后添资产

该方案计划分四个阶段推进，资本投入和收入实现时间逐步增加，每个阶段为下一阶段提供资金：今天即可提供的、以服务形式为计划报价的软件；利用现有免费验证工具为合作伙伴的任务制定经验证的计划，这些工具如今已用于基准测试和 DEXTER 演示之旅；在合作伙伴的飞行器上执行计划，无需购买硬件；最后是专用飞行器 ATLAS，这需要资本和演示合作伙伴。软件优先的航天公司表明，最初几个阶段就能支撑一项业务。STK 任务分析软件的制造商 Analytical Graphics 以7亿美元于 2020 [67]被收购；Exotrail 在其 spacevan 转移飞行器执行飞行之前，于 2020 [68], 将其云端任务设计软件授权给 Eutelsat（表1）；Kayhan Space 则报告称，约有20家客户使用其服务管理500多颗卫星，并筹集了1100万美元 [69]。

Space Postman 按精益原则设计。使用一台电脑，几分钟即可制定方案；在六核工作站上，不到一小时即可制定并验证方案（第4节）；验证工具 Basilisk 和 GMAT 免费 [42, 52]；合作伙伴负责执行方案，因此在迎来首位客户之前无需购买运载器；每项研究都有报酬。初创企业从最后一轮融资到倒闭的中位间隔为22个月 [43], , 因此本设计的要点是在购置硬件前先通过软件创收：市场反应缓慢，损失的是数月薪资，而非一艘运载器。

9.5 风险

有六项风险影响商业案例的成立。(i)市场：在近地轨道，多目标在轨服务、清除和回收任务仍处于概念或演示阶段（表1）；只有在这些任务获得资金支持后，对任务规划的需求才会增长。(ii) 模型：该引擎仅根据地球扁率规划脉冲变轨；数月漂移期间的阻力、低推力航段以及应访问哪些目标目前尚未纳入其中。(iii)证据：拖船方案已达到设计保真度，并配有代表性任务清单；DEXTER 演示之旅已验证脉冲交会，但尚未使用有限推力变轨执行，只有基准测试规划已使用有限推力变轨执行。(iv)竞争：相关方法已经公开发表，包括近期的漂移轨道服务规划器 [12–14], , 通用任务分析套件也可能加入任务规划功能；真正具有可辩护性的部分是经过校准和验证的工作流程以及案例研究库，而不是算法。(v) 客户：早期客户很可能是由公共资金支持的项目，其时间线较长。(vi) 安全：一枚废弃的 Zenit-2 级可能仍携带约900千克氧化剂和450千克煤油 [70], , 因此采集首先需要进行钝化，这会延长每一级的服务时间，并通过时间预算增加整个任务的推进剂需求。

10 路线图

DEXTER，2025–2029年。 该项目将持续至9月2029 [39]。其实验室结果、采集产率、转换效率以及推进器的比冲和推力，是图4c尚未确定的参数；随着这些参数陆续获得，可使用实测值重新规划第7节的任务，并在全保真度下进行验证；如果推进器采用电推进，还可加入低推力航段。该任务将作为输入，供围绕 DEXTER 展开的任务概念讨论使用；它不是项目交付成果。

产品与技术成熟度。 规划引擎已在仿真中通过已发表的基准测试，并应用于另外两个案例，其中之一是 DEXTER 演示之旅，已验证为脉冲交会。下一步，也是拟议的24个月开发计划的目标，是开发一个原型，能够接收合作伙伴提供的目标列表和推进数据，并在经过仿真且具有现实意义的轨道条件下进行验证，这对应技术成熟度等级4。服务级别以现有证据为依据：目前可以提供设计保真度级别的报价；基准测试已有经验证的计划；在两个仿真器中采用有限推力变轨飞行的计划，以及 DEXTER 脉冲交会的计划也已验证；而适于飞行的方案则需要客户的推进和导航模型。路线图中的模型扩展包括：长时间漂移期间的阻力、低推力航段、无法纳入所有目标时的目标选择、将整个目录拆分为多次发射及其日期、每位客户的交付期限、拖船舰队，以及在导航误差和推进剂晃动等内部扰动下进行闭环执行的在轨重新规划 [71]。ATLAS 本身仍是一个概念；要让其实际飞行，需要在轨演示合作伙伴。

11 结论

碎片清除、在轨服务与加注燃料、最后一公里交付、回收利用和星座部署是不同的业务，但背后共用一个规划问题：一艘航天器、多个目标，这些目标的轨道平面彼此漂移；一个贮箱，以及一个截止期限。妥善解决这一问题需要大多数年轻运营商并不具备的内部专业知识，而缺乏这类能力的代价十分高昂。Space Postman 提供规划服务；ATLAS 提供一艘可处理多种货物类别的拖船。由于大多数初创企业都会在资金耗尽时失败，因此该方案从能够通过首次研究获得收入的软件起步，只有在合作伙伴和收入条件允许时才增加硬件。

对于 DEXTER 的一项假想后续任务，替代航天器需在三年内完成一次对十个 SL-16 火箭级（位于数颗欧洲航天局研制的地球观测卫星上方）的巡访，总变轨速度约为 1.1 km/s；仅靠等待无法填补任何一个单独的间隔，而将时间预算均分则会多消耗三分之一的推进剂；时间预算正是此类任务的货币。对于一艘服务同一批拼车发射中八个客户的拖船，交付顺序决定任务是否能够装入贮箱，而方案则根据每次交付必须到达的轨道平面对其定价。该引擎在该解的保真度下，以不到百分之一的误差复现了公开碎片清除基准测试中已发表的获胜方案；在发射、碎片和发射日期均相同的情况下，它提出的方案所需 ΔV 少 3.5%，并且在两个独立仿真器中采用有限推力变轨飞行时，结果仅高出百分之零点五。

拖船案例已达到设计保真度，而 DEXTER 演示之旅仅验证了脉冲交会；该模型忽略了阻力，在轨重新规划也尚未得到演示。在所获得证据相应的保真度下解读，这些证据支持本文的主张：经过校准的规划器与载荷无关型拖船相结合，降低了阻碍新运营商进入轨道物流领域的门槛。

致谢

作者感谢 Final Proximity Space Systems 提供支持，并感谢欧洲航天局组织第6节中的基准测试竞赛并公开其数据。DEXTER 候选目标的轨道要素是来自 CelesTrak 的公开要素。Final Proximity Space Systems 和 Magdrive 与本研究的关系已在第2节中披露。

参考文献

[1] F. Barato、E. Toson、F. Milza 和 D. Pavarin。关于小卫星进入指定低地球轨道的不同策略研究。*ActaAstro-nautica*，222：11–28，2024年。[2] M. A. Luu 和 D. E. Hastings。面向扩展型低地球轨道星座的在轨服务系统架构。*Journalof SpacecraftandRockets*，59(6)：1946–1965，2022年。[3] J. Zhang、G. T. Parks、Y.-Z. Luo 和 G.-J. Tang。考虑J_2 摄动和时间窗口约束的多航天器加注优化。*JournalofGuidance, Control, andDynamics*，37(1)：111–122，2014年。[4] J.-C. Liou。低地球轨道环境治理的主动碎片清除参数化研究。*Advancesin SpaceResearch*，47(11)：1865–1876，2011年。[5] R. Palmer、E. G. Lightsey 和 K. Ho。用于月球铝回收利用的碎片选择与运输物流。在*AIAA SciTech 2025*论坛，美国佛罗里达州奥兰多，2025年。美国航空航天学会。AIAA论文2025-1102。[6] C. N. McGrath 和 M. Macdonald。利用节点进动进行卫星星座部署的通用摄动方法。*JournalofGuidance, Con-trol, and Dynamics*，43(4)：814–824，2020年。

[7] O. B. Iskender、L. Felicetti、K. Gokturk、D. Tellett 和 A. Baker。利用自然轨道进动开展具备漂移感知能力的多目标太空拖船物流。在*Proceed-ings of the 77th InternationalAstronautical Congress*，土耳其安塔利亚，2026年。国际宇航联合会。

[8] J.-M. Bourjolly、O. Gurtuna 和 A. Lyngvi。《在轨服务：一个与时间相关、目标移动的旅行商问题》。《国际运筹学汇刊》，13(5):461–481，2006年。

[9] D. Izzo、I. Getzner、D. Hennes 和 L. F. Simões。用于主动空间碎片清除的旅行商问题变体解的演化。载于*2015* 年遗传与进化计算大会（*GECCO*）论文集，第 1207–1214 页，西班牙马德里，2015 年。美国计算机协会。[10] M. Cerf。利用自然进动实现圆轨道之间的低推力转移。*Journal of Guidance, Control, and Dynamics*，39(10)：2232–2239，2016 年。[11] J. C. McDowell。近地轨道卫星数量及 SpaceX 星链星座的影响。《天体物理学杂志快报》，892(2)：L36，2020 年。[12] R. Apa、J. Hudson 和 M. Romano。近地轨道多客户在轨服务任务的低推力推进与漂移轨道优化。《航天科学杂志》，73(2)：36，2026 年。[13] C. Ciccotti、E. M. Leonardi 和 M. Pontani。利用高推力或低推力推进进行基于路径优化的在轨服务。*Acta Astronautica*，246：760–777，2026 年。[14] E. M. Leonardi、F. Curti、L. Federici 和 M. Pontani。通过 A* 搜索算法实现最小燃料在轨服务。《航空航天》，13(7)：604，2026 年。[15] L. F. Simões、D. Izzo、E. Haasdijk 和 A. E. Eiben。利用束搜索 P-ACO 进行多次交会航天器轨迹优化。载于《组合优化中的进化计算》（*EvoCOP 2017*），第 10197 卷《计算机科学讲义》，第 141–156 页，查姆，2017 年。施普林格。[16] Z. Zhang、N. Zhang、Z. Chen、F. Jiang、H. Baoyin 和 J. Li。利用多树搜索进行多航天器连续交会的全局轨迹优化。*JournalofGuidance, Control, andDynamics*，47(3)：503–517，2024 年。[17] M. Bannach、G. Acciarini 和 D. Izzo。开普勒旅行商问题。预印本，2026 年。arXiv：2605.00010。

[18] O. B. Iskender、K. Gokturk、D. Tellett 和 A. Baker。将摄动转化为推进剂：面向在轨服务的漂移感知多目标交会轨迹优化。已投稿，2026 年。

[19] 欧洲航天局。DISCOSweb——空间碎片统计数据。https://sdup.esoc.esa.int/ discosweb/statistics/，2026年。访问于2026年9月12日。

[20] D-Orbit。起源。https://dorbit.space/origi n-september-2020/，2020年。访问于2026年9月29日。

[21] D-Orbit。夏日天空之上。https://dorbit . space/above-the-summer-sky-july-2026/，2026年。访问于2026年9月29日。

[22] D-Orbit。发射与部署。https://dorbit . space/launch-deployment/，2026年。访问于2026年9月29日。[23] Exotrail。小卫星在轨服务。https: // www.exotrail.com/in- orbit- services，2026年。访问于2026年9月29日。[24] Impulse Space。Mira——敏捷航天器。https: // www.impulsespace.com/mira，2026年。访问于2026年9月29日。[25] Impulse Space。Impulse Space 获得 NSSL第1类合同，成为首家上面级主承包商。https://ww w.impulsespace.com/updates/impulse-spa ce-awarded-nssl-lane-1-contract-as-fir st-ever-upper-stage-prime，2026年。访问于2026年9月29日。[26] Momentus公司。我们的任务。https://momentus .space/missions/，2026年。访问于2026年9月29日。[27] Momentus公司。Momentus Vigoride-7轨道服务飞行器任务进展更新。https://www.st ocktitan.net/news/MNTS/mission-update-o n-momentus-vigoride-7-orbital-service - yfhak5dpafpf.html，2026年。2026年3月31日新闻稿。访问于2026年9月29日。[28] 诺斯罗普·格鲁曼。SpaceLogistics。https://ww w.northropgrumman.com/what-we-do/space/ space-logistics-services，2026年。访问于2026年9月29日。

[29] 诺斯罗普·格鲁曼。诺斯罗普·格鲁曼的任务机器人飞行器发射，开启空间在轨服务的新时代。 https://news.northropgru mman.com/launch/northrop-grummans-missi on-robotic-vehicle-launches-ushering-i n-a-new-era-of-in-space-servicing，2026年。访问日期：2026年9月29日。

[30] NASA。开启 SSPICY：NASA 资助轨道碎片检查任务。https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/ames/getting-sspicy-nasa-funds-orbital-debris-inspectio n-mission/，2024年。访问日期：2026年9月29日。

[31] Via Satellite。Starfish Space 的首个 Otter 运载器搭乘 SpaceX 的 Transporter-18 发射任务升空。https://www.satellitetoday.com/sustainability/2026/09/25/starfish-spaces-debut - otter-vehicle-hitches-a-ride-on-space xs-transporter-18-launch/，2026年。访问日期：2026年9月29日。

[32] Orbit Fab。Orbit Fab 将发布卫星加注接口设计。https://www.orbitfab.com/n ews/rafti-press/，2021年。访问日期：2026年9月29日。[33] Orbit Fab。Orbit Fab 推出 RAVEN 航天飞机和 NEST 轨道加注站，构建在轨加注网络。https://www.orbitfab.com/news/orbit-fab-unveils-raven-shuttle-nest-depot-for-in-space-refueling-network/，2026年。访问日期：2026年9月29日。[34] Astroscale。Astroscale 的 ADRAS-J 历史性地接近空间碎片至 15 米范围内。https://www.astroscale.com/en/news/astroscales-adras-j-achieves-historic-15-meter-approach-to-space-debris，2024年。访问日期：2026年9月29日。[35] Astroscale。Astroscale 的 ADRAS-J 任务完成运营，开始离轨。https://www.astroscale.com/en/news/astroscales-adras-j-mission-completes-operations-begin s-deorbit，2026年。访问日期：2026年9月29日。[36] Astroscale。Astroscale Japan 选择 Isar Aerospace 发射 ADRAS-J2。https://www.astroscale .com/en/news/astroscale-japan-selects-isar-aerospace-to-launch-adras-j2，2026年。访问日期：2026年9月29日。[37] 欧洲航天局。ClearSpace-1。https: // www.esa.int/Space_Safety/ClearSpace-1，2026年。访问日期：2026年9月29日。[38] ClearSpace。CLEAR（通过主动清除净化近地轨道环境）。https://clearspace.tod ay/missions/clear，2026年。访问日期：2026年9月29日。[39] 欧盟委员会。DEXTER：用于地外回收的碎片提取工具。CORDIS，地平线欧洲拨款协议 101223360，由克兰菲尔德大学协调，2025年10月1日–2029年9月30日，https://cordis.europa.eu/project/id/101223360，2025年。访问日期：2026年9月29日。

[40] Magdrive。Magdrive 成功完成其首次在轨推进器演示：“Going Rogue”。ht tps://magdrive.space/news/magdrive-successfully-completes-its-first-in%e2%80%91orbit-thruster-demonstration-going-r ogue/，2026年。访问日期：2026年9月29日。

[41]Final Proximity Space Systems。Final Proximity Space Systems。https://www.finalproximi ty.com/，2026年。访问日期：2026年9月29日。

[42] 美国国家航空航天局戈达德太空飞行中心。通用任务分析工具（*GMAT*）*R2025a*，2025年。软件，可访问 https://software.nasa.gov/software/GSC-17177-1。[43] CB Insights。初创企业失败的9大原因。https: // www.cbinsights.com/research/report/startup-failure-reasons-top/，2026年。2026年3月5日。访问于2026年10月8日。[44] 美国劳工统计局。企业就业动态，表7：按开业年份统计的私营部门企业存续情况。https://www.bls.gov/bdm/us_age_naics_00_table7.txt，2025年。访问于2026年10月8日。[45] BryceTech。2026年初创航天企业：商业航天企业投资情况更新。技术报告，BryceTech，美国弗吉尼亚州亚历山德里亚，2026年。2026年5月19日。https://brycetech.com/reports/report-documents/start_up_space_2026/BryceTech_Start_Up_Space_2026.pdf。访问于2026年10月8日。[46]SoCalTech。Vector Launch提交第11章破产保护申请。https://socaltech.com/vector_launch_files_for_chapter__bankruptcy/s-0079285.html，2019年。2019年12月16日。访问于2026年10月8日。[47]Via Satellite。Virgin Orbit提交第11章破产保护申请。https://www.satellitetoday.com/business/2023/04/04/virgin-orbit-files-for-chapter-11-bankruptcy/，2023年。2023年4月4日。访问于2026年10月8日。[48] Momentus公司。截至2024年12月31日财政年度的年度报告（10-K表格）。美国证券交易委员会，https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1781162/000178116225000008/mnts-20241231.htm，2025年。访问于2026年10月8日。[49] European Spaceflight。Orbex因计划中的收购告吹而失败。https://europeanspacef

light.com/?p=6066，2026年。2026年2月11日。访问于2026年10月8日。

[50] Business Reporter。《太空初创企业融资增长，投资者押注资本支出密集型企业》，报告称。https://business-reporter.co.uk/iot/space-startups-see-funding-growth-as-investors-bet-on-capex-intensive-ventures-report-says-11497，2024年。2024年10月10日。访问于2026年10月8日。

[51] A. Petropoulos、D. Grebow、D. Jones、G. Lantoine、A. Nicholas、J. Roa、J. Senent、J. Stuart、N. Arora、T. Pavlak、T. Lam、T. McElrath、R.Roncoli、D. Garza、N. Bradley、D. Landau、Z. Tarzi、F. Laipert、E. Bonfiglio、M. Wallace 和 J. Sims。《GTOC9：喷气推进实验室（JPL团队）的成果》。*ActaFutura*，11：25–35，2018年。

[52] P. W. Kenneally、S. Piggott 和 H. Schaub。Basilisk：一种灵活、可扩展且模块化的轨道动力学仿真框架。《航空航天信息系统杂志》，17(9):496–507，2020年。

[53] O. B. Iskender、K. V. Ling、V. Dubanchet、L. Si- monini、M. Schlotterer、D. Seelbinder、S. Theil 和 J. M. Maciejowski。基于对偶四元数的自主交会与对接：通过模型预测控制实现。载于第*70*届国际宇航大会论文集，美国华盛顿特区，2019年。国际宇航联合会。

[54] 欧洲航天局。GTOC9：凯斯勒竞赛。https://kelvins.esa.int/gtoc9-kessler-r un/，2017年。

[55] D. Izzo 和 M. Märtens。《凯斯勒竞赛：关于GTOC9挑战赛的设计》。*ActaFutura*，11：11–24，2018年。[56] H.-X. Shen、T.-J. Zhang、A.-Y. Huang 和 Z. Li。《GTOC 9：西安卫星测控中心（XSCC团队）的成果》。*Acta Futura*，11：49–55，2018年。

[57] S. Sinha Roy、Q. Shi、C. Guariniello 和 D. A. DeLaurentis。对在轨空间碎片回收设施商业案例的分析。载于*AIAA SciTech 2023*论坛，美国马里兰州国家港，2023年。美国航空航天学会。

[58] D. McKnight、R. Witner、F. Letizia、S. Lemmens、L. Anselmo、C. Pardini、A. Rossi、C. Kunstadter、S. Kawamoto、V. Aslanov、J.-C. Dolado Perez、V. Ruch、H. Lewis、M. Nicolls、J. Liu、D. Shen、D. Wang、A. Baranov 和 D. Grishko。《识别近地轨道中在统计上最令人担忧的50个失效空间物体》。*ActaAstronautica*，181：282–291，2021年。

[59]D. McKnight、E. Dale、J. Cassady、A. Ratcliffe、S. Kawamoto、A. Rossi 和 D. Grishko。《前50名清单的更新》。载于第*9*届欧洲空间碎片会议论文集，德国波恩，2025年。欧洲航天局空间碎片办公室。[60] 欧洲航天局空间碎片办公室。《欧洲航天局年度空间环境报告》。技术报告 GEN-DB-LOG-00288-OPS-SD，第10.1期，欧洲航天局、欧洲空间操作中心，德国达姆施塔特，2026年9月。

[61]L. Schulz、K.-H. Glassmeier、M. Herberhold、A. Mitchell、D. M. Murphy、J. M. C. Plane 和 F. Plaschke。《空间废弃物：地球大气中人为物质注入情况的最新进展》。空间研究进展，77(9)：9589–9616，2026年。

[62] G. Di Pasquale、M. Sanjurjo-Rivo 和 D. Pérez Grande。利用星载推进和地球节点回归优化星座部署。*Advances in SpaceResearch*，70(11):3281–3300，2022年。

[63] New Space Economy。截至2026年2月的 SpaceX 拼车发射定价：费用、包含项目及买家如何编制任务预算。https://ne wspaceeconomy.ca/2026/02/27/spacex-rideshare-pricing-as-of-february-2026-what-it-costs-whats-included-and-how-buyers-budget-a-mission/，2026年。二手资料。访问于2026年9月29日。

[64] J. H. Saleh、E. S. Lamassoure、D. E. Hastings 和 D. J. Newman。灵活性与在轨服务的价值：以客户为中心的新视角。*Jour-nal ofSpacecraft and Rockets*，40(2):279–291，2003年。

[65] A. M. Long、M. G. Richards 和 D. E. Hastings。在轨服务：卫星设计与运行的新价值主张。《Journal of Spacecraft and Rockets》，44(4)：964–976，2007年。

[66] 美国劳工统计局。航空航天工程师，《职业展望手册》。https://www.bl s.gov/ooh/architecture-and-engineering / aerospace-engineers.htm，2026年。最后修改于2026年8月27日。访问于2026年9月29日。

[67] ANSYS, Inc。当前报告（8-K表格）：收购 Analytical Graphics, Inc. 的协议。美国证券交易委员会，https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1013462/000119312520276233/d38877d8k.htm，2020年。2020年10月。访问于2026年10月8日。

[68] Via Satellite。Eutelsat 与 Exotrail 签订基于云的任务设计软件合同。 https://www.satellitetoday.com/business/2020/03/30/eutelsat-contracts-with-exotrail-f

or-cloud-based-mission-design-software/，2020年。2020年3月30日。访问日期：2026年10月8日。

[69] Payload。Kayhan Space完成700万美元种子轮扩展融资，更新Pathfinder。https://payloadspace.com / kayhan-space-closes-7m-seed-extension - updates-pathfinder，2023年。2023年9月19日。访问日期：2026年10月8日。

[70] NASA轨道碎片项目办公室。国际空间站机动规避潜在的2023年11月碰撞。《轨道碎片季度新闻》，第28卷第1期，2024年2月。

[71] O. B. Iskender 和 J. L. Redondo Gutiérrez。用于航天器近距离操作的滑液增强型管状MPC：耦合动力学与部分鲁棒性保证。*ActaAstronautica*，2026年。即将刊载。