

多碎片移除过程中的路径优化

周秀华^{1,2} 于锡峥¹ 王荣兰¹ 周炳红¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 101408)

摘 要 采用蚁群优化算法对多碎片移除过程中的路径优化问题进行研究, 然后采用改进的最速下降法对移除每块碎片的时间进行合理优化, 进一步降低总的速度增量需求. 对比轨道高度、轨道倾角或者升交点赤经的顺序后发现, 采用蚁群算法优化之后的顺序移除碎片可以大大节省轨道转移所需要的速度增量. 选取中国空间活动产生的三组碎片进行优化计算, 结果显示在相同的任务时间内, 优化后的顺序可能不同于轨道高度、倾角和赤经的顺序, 并且优化顺序可以节省更多的速度增量. 另外, 任务时间也会对碎片的最佳移除顺序产生影响.

关键词 空间碎片, 移除, 路径优化, 蚁群算法

中图分类号 V 412

Path Optimization in the Removal Progress of Multi-debris

ZHOU Xiuhua^{1,2} YU Xizheng¹

WANG Ronglan¹ ZHOU Binghong¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408)

Abstract In this paper, ant colony optimization algorithm is used to study the path optimization in the removal progress of multi-debris. The modified steepest descent method is used to optimize the time of removing each piece of debris reasonably which further reduces the aggregate requirements of velocity increment. The comparisons with the order of orbit height, inclination or RAAN (Right Ascension of the Ascending Node) indicate that using the order after the optimization of the ant colony algorithm can greatly save the velocity increment. Three groups of debris produced in Chinese activities are chosen for optimization. Results show that the optimized order may be different from three kinds of order mentioned above, and the optimized order can save more velocity increment in the same task time. In addition, the task time also has an impact on the best removal order of debris.

Key words Space debris, Removal, Path optimization, Ant colony algorithm

0 引言

随着空间技术的发展以及通信、遥感、导航等方面的研究需要, 人类空间活动日益频繁, 导致空间碎片数量日益增多, 碎片发生碰撞的风险越来越高. 由于空间碎片与飞行器的撞击速度可达 $15 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 因此一旦发生撞击, 将给飞行器带来毁灭性的灾难. 例如, 2009 年美俄卫星相撞, 造成卫星解体, 瞬间产生 2000 多块碎片. 空间碎片数量的逐步增加, 极有可能发生被称为凯斯勒效应的碰撞级联效应^[1]. 碎片的级联式撞击会导致自身数量急剧增加, 进一步使空间环境恶化. 空间碎片已经开始妨碍飞行器的正常在轨运行, 影响人类空间活动的安全^[2].

机构间空间碎片协调委员会 (IADC) 的研究表明, 在保持航天器年发射数量的情况下, 每年需要移除 5~10 块大尺寸碎片才能维持空间碎片数量相对不变^[3]. 由于移除器自身成本和发射成本都非常高, 为保证效益最大化, 单次任务中需要移除多块碎片. 因此找出航天器移除碎片时的最优顺序十分关键.

针对单次任务中多块碎片的移除顺序问题, 国际上已有相关研究. 例如, Wadsley 等^[4] 研究了航天器访问一系列服务卫星的问题, 以 20 颗卫星为例, 采用动态规划算法, 给出了燃料消耗最低的最佳服务顺序. Stodgell 等^[5] 以总燃料消耗和总任务时间为优化目标, 对多个小卫星的交会问题进行了研究, 采用多目标遗传算法处理 6 目标问题并给出了非支配向量集合. Murakami 等^[6] 针对位于 LEO 轨道上的 3 个具有强烈周期约束的碎片, 采用兰伯特策略和分枝界限法探索碎片移除过程中的潜在规律. Madakat 等^[7] 将碎片移除过程中的路径规划问题视为基于时间的双目标旅行商问题进行研究. Braun 等^[8] 针对单次任务中多碎片移除的效率问题进行研究, 发现采用化学推进方式移除从 Zenit-2 上面级中选出的 5 块质量大、碰撞概率高的碎片最少需要速度增量为 $1.2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 中国也开展过相关研究. Yu 等^[9] 将混合最优控制理论应用到多碎片移除过程中的路径优化问题, 并得出在速度增量方面, 一些次优的碎片移除顺序与最优顺序几乎等价的结论. Liu 等^[10] 利用遗传算法求解多目标碎片的路径优化问题, 分别给出了碎片移除效率最优、能量消耗最优、移除器数量最优时的碎片移除顺序.

采用不同的碎片移除顺序需要的速度增量不同, 有必要深入研究造成这些差异的原因, 揭示其内在规律. 与已有研究的不同之处在于, 这里以总速度增量和总任务时间为优化目标, 采用蚁群算法和最速下降法优化碎片的移除顺序, 对不同移除顺序的速度增量结构进行分析研究, 探讨不同移除顺序导致速度增量差异的原因和规律, 并且对任务时间在碎片清除顺序中产生的影响进行探讨.

1 模型描述

在碎片移除任务中, 航天器通过轨道机动与碎片交会, 将移除装置安装到碎片上后, 实施下一次轨道转移机动. 在任务过程中, 假设需要移除的碎片个数及初始轨道参数已知, 航天器与碎片的交会时间为一个确定的常数. 飞行轨迹的优化目标为: (1) 任务过程中移除器消耗的燃料最少并且处于合理的范围内; (2) 消耗的任务时间不超过规定的任务时间. 这可以视为一个基于时间的具有多优化目标的旅行商问题. 对于地球轨道卫星而言, 最重要的摄动力来自于地球的非同质性. 由于地球是个扁球体, 其质量不是均匀分布的, 这一物理特性造成了对于移动物体的摄动加速^[11]. 这里将利用这一自然特性减小捕获器与目标碎片之间升交点赤经的差距, 节省能量的供应.

2 目标选择

首先确定移除目标. 这里选择太阳同步轨道上的碎片, 主要考虑到以下两方面问题. 第一, 太阳同步轨道上的碎片非常多. 典型的太阳同步轨道的轨道倾角约为 98° , 轨道高度为 500~1200 km. 图 1 是根据北美防空联合司令部 (NORAD) 于 2015 年 4 月 1 日发布的两行轨道根数 (TLEs)*绘制的柱状图, 图中红色区域表示太阳同步轨道上的碎片数目. 第二, 太阳同步轨道非常重要. 许多气象卫星、资源卫星、侦察卫星都分布在这一轨道, 2015 年底发射的暗物质卫星以及 2016 年 8 月中旬发射的量子卫星均处于太阳同步轨道上. 从全球范围内的碎片中挑选出中国空间活动产生的碎片, 并记录 2015 年 4 月 1 日之后一个月与中国碎片交会距离小于 5 km 的交会次数, 如图 2 所示.

*www.space-track.org

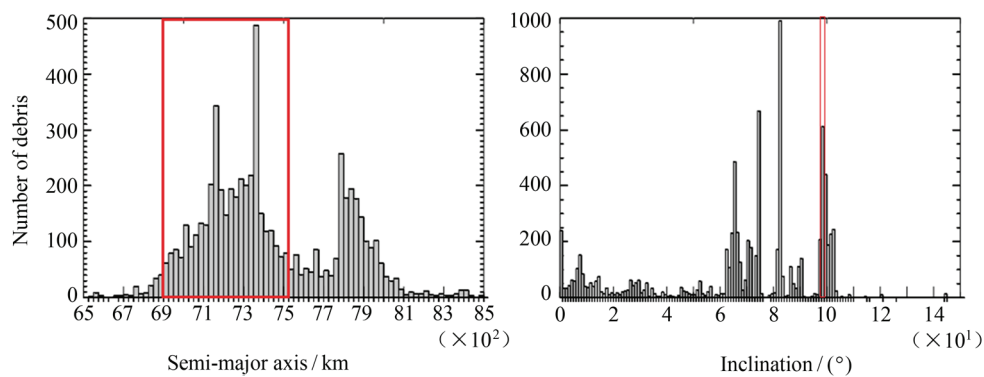


图 1 空间碎片在半长轴和轨道倾角方向的分布

Fig. 1 Distribution of space debris in the direction of semi-major axis and orbit inclination

表 1 目标碎片的轨道参数

Table 1 Orbit parameters of target debris

编号	碎片名称	交会次数	轨道高度/km	倾角/(°)	升交点赤经/(°)	轨道寿命/a	面质比/(m ² ·kg ⁻¹)
20887	CZ-4 DEB	150	773.45	98.51	118.0709	57.8	0.010 82
20798	CZ-4 DEB	148	836.51	98.774	124.013	100.1	0.007 033
20793	CZ-4 DEB	134	840.28	98.803	124.665	100.2	0.006 867
20969	CZ-4 DEB	130	782.73	98.56	120.344	58	0.011 368
20797	CZ-4 DEB	128	846.79	98.76	130.8964	100.3	0.005 294
20852	CZ-4 DEB	126	830.288	98.7	131.6222	100.1	0.004 68
20870	CZ-4 DEB	113	859.938	98.871	123.804	100.3	0.005 47
20876	CZ-4 DEB	110	798.45	98.737	119.172	85.1	0.010 207
20881	CZ-4 DEB	106	794.564	98.6	121.4668	63.2	0.014 09
20883	CZ-4 DEB	104	802.65	98.652	120.274	100.1	0.008 806
20878	CZ-4 DEB	84	736.078	98.438	123.071	27.2	0.019 045

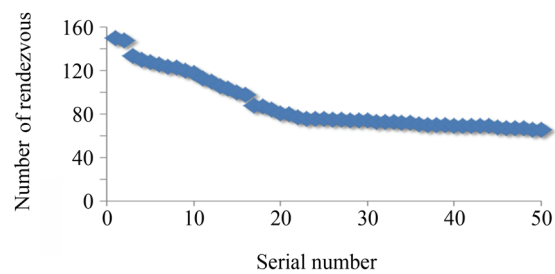


图 2 30 天内与中国碎片交会距离小于 5 km 的交会次数统计 (前 50 个)

Fig. 2 Statistics of the number (the first 50) of rendezvous as the distance between the debris of China and others is less than 5 km within 30 days

按照交会次数进行排序, 前 11 块碎片的部分参数列于表 1. 利用 AGI 软件仿真得到上述碎片的轨道分布情况, 如图 3 所示.

3 移除方案

航天器移除空间碎片的过程如下. 航天器发射升空进入预定轨道与目标碎片进行交会对接, 航天器将离轨装置安装到碎片上, 离轨装置与碎片脱离原轨道, 进入大气层烧毁, 同时航天器转移到下一块目标碎片附近. 移除过程如图 4 所示. 本文的目的是导出总体性参数——总的速度增量和任务持续时间. 对接

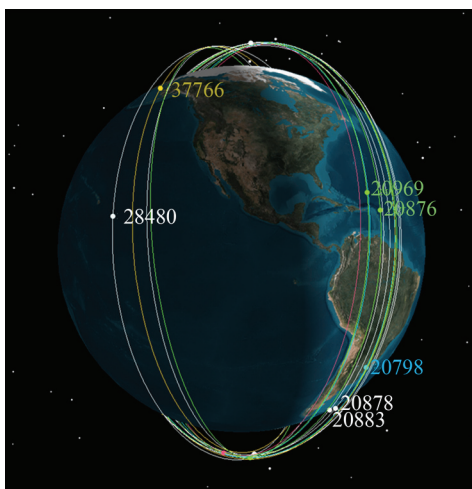


图3 目标碎片的轨道分布

Fig. 3 Orbit distribution of target debris

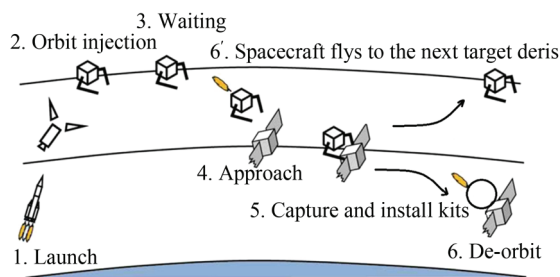


图4 碎片移除过程

Fig. 4 Sketch of debris removal progress

程序或者目标的稳定性对这些参数的影响并不大^[12].

由表1可以看出,待移除碎片轨道倾角非常接近,分布在 98.5° 附近.目标碎片轨道的不同主要体现在升交点赤经和轨道高度上.因此,移除方案设定逐步改变轨道参数,具体如下.

(1) 如果移除器所在轨道的升交点赤经大于目标碎片所在轨道的升交点赤经,则抬高移除器轨道的远地点,降低其轨道的进动速度,需要的速度增量

$$\Delta v = \sqrt{\mu \frac{(1+e_i) + 2\Delta k_i}{a_i(1-e_i)(1+\Delta k_i)}} - \sqrt{\mu \frac{(1+e_i)}{a_i(1-e_i)}}.$$

其中: $\mu = GM$, G 为引力常数, M 为地球质量; e_i 为第 i 块碎片的轨道倾角; a_i 为第 i 块碎片的轨道高度; $\Delta k_i = \Delta h_i / (2a_i)$; Δh_i 为调整的轨道高度.反之,降低移除器轨道的近地点,加快轨道的进动速度,需

要的速度增量

$$\Delta v = \sqrt{\mu \frac{(1-e_i)}{a_i(1+e_i)}} - \sqrt{\mu \frac{(1-e_i) - 2\Delta k_i}{a_i(1+e_i)(1-\Delta k_i)}}.$$

升交点赤经进动率

$$\dot{\Omega} = -\frac{3\sqrt{\mu}J_2R_e^2\cos i}{(1-e^2)^2a^{7/2}}\theta,$$

用以计算轨道转移时间,其中 J_2 为摄动系数, R_e 为地球的平均半径, a 为轨道半长轴, e 为轨道偏心率, i 为碎片所在轨道的轨道倾角, θ 为真近点角.

(2) 微调移除器所在轨道的轨道倾角,

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{na\sqrt{1-e^2}} \frac{r}{a} \cos(\theta + \omega) f_h,$$

$$\Delta v_h = f_h \Delta t,$$

其中 θ 为真近点角, ω 为近地点俯角, f_h 为垂直于轨道面由外力产生的加速度, Δv_h 为垂直于轨道面的速度增量, r 为矢径.

(3) 等到合适的时机,对移除器实施面内机动,调整轨道高度和相位.

该方案充分利用了地球的摄动影响因素,节省了调整轨道时所需要的速度增量,有助于在单次任务中移除更多的碎片.但是这种方案或许需要更长的调整周期.

地球的摄动力导致碎片轨道参数发生变化,但是由高斯摄动方程可知,由于不同碎片的轨道高度、偏心率、轨道倾角相差不大,轨道参数的相对变化量很小^[11].因此在计算多块碎片的移除排序问题时,可以忽略地球摄动力等因素的影响.

4 优化方案

这里有两个优化目标:速度增量和时间.速度增量和时间是两个相互制约的变量,二者不可能同时达到最小.因此先在限定时间内优化总速度增量,得到最佳的碎片移除顺序,然后对最佳移除顺序下的轨道转移时间分配进行优化,进一步减少总的速度增量.

待求解问题属于旅行商问题,目前没有找到精确的有效算法^[13,14].首先采用蚁群算法优化碎片移除过程中移除器的路径.碎片移除过程中移除器轨道转移消耗的速度增量是蚁群算法的优化目标.然后采用改进的最速下降法,进一步优化总转移时间限定条件下各段时间的分配.

虽然蚁群算法是近似算法, 属于启发式搜索方法范畴, 在最优解的搜索过程中可能只找到局部最优解, 但是由于启发式因子 (速度增量和时间) 和信息素同时发挥作用, 蚁群算法不仅具有记忆功能, 而且保证了搜索解的范围. 相比于最近邻点法和动态规划法, 蚁群算法不限定解的搜索方向, 获得最优解的可能性更高; 相比于遗传算法, 蚁群算法在并行计算方面更具优势. 同时, 蚁群算法具有很强的包容性, 可以结合其他算法的优势, 形成组合优化算法, 便于进一步改进优化性能. 此外, 相对于其他算法, 蚁群算法的计算量更小. 假设有 n 块碎片需要移除, 那么排序需要的计算量为 $k \times n^2$ (其中 k 为提前设定的迭代次数, 由任务而定). 相比于穷举法, 蚁群算法的计算量只是平方量级, 在碎片数量非常多的情况下有很大的优势.

4.1 优化目标: 速度增量

采用蚁群算法优化碎片移除顺序时, 将移除器看作是以碎片为食的蚂蚁. 蚂蚁在搬运食物过程中释放信息素, 其他蚂蚁在信息素的指引下向着食物方向移动. 蚂蚁在多次搬运食物过程中不断优化搬运路线, 最终找出最短的路线^[13]. 移除器移除碎片的路径优化原理与之相同, 也是在启发式因子 (消耗的速度增量) 和信息素 (记忆元素) 的共同影响下发挥作用.

将蚁群算法应用到碎片移除过程的路径优化中, 根据问题的优化指标, 提出如下假设.

(1) 移除器 (蚂蚁) 每次只能访问一块碎片, 且每块碎片只能访问一次.

(2) 完成一次周游后, 移除器在其访问过的每一条边上留下相应的信息素.

(3) 移除器根据某一概率选择下一个需要移除的碎片, 该概率函数是移除器在碎片之间转移所需速度增量以及轨道间信息素量的函数.

概率函数

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{s \notin T_{\text{tab}}^k} \tau_{is}^\alpha \eta_{is}^\beta}, & j \notin T_{\text{tab}}^k; \\ 0, & j \in T_{\text{tab}}^k. \end{cases}$$

式中, τ_{ij} 为碎片 i 与 j 之间的信息素量; η_{ij} 为在碎片 i 与 j 之间转移时需要的速度增量的倒数; T_{tab}^k 表示移除器 k 已经访问过的碎片的禁忌表 (表中存放的是禁止访问的碎片的编号); α, β 为系数, α 代

表信息素重要程度, β 代表启发式因子的重要程度. α 取值大时, 意味着信息素非常重要; 取值小时, 意味着信息素对路径优化的影响比较小. α 取值较小时, 蚁群算法会变成随机贪婪算法. 随机贪婪算法根据问题本质给出一个最优解导向, 然后不断迭代从而求出最优解. 在信息素影响较小的情况下, 启发式因子占据主导地位, 蚁群算法自动给出了选取速度增量最小的碎片作为下一目标的最优解导向, 这一导向在多数情况下并不准确. 因此合理选择 α, β 的值非常关键, 既要保证蚁群算法的搜索空间尽可能大, 又要使搜索重点集中到具有较高价值解的区间内. 经过多次仿真实验, 这里取 $\alpha = 1, \beta = 5$.

在搜索过程中, 有移除器经过的路线上信息素会增强, 没有移除器经过的路线上信息素逐渐挥发掉. 其挥发系数

$$\rho(k) = 1 - \frac{\ln k}{\ln(k+1)},$$

其中 k 为迭代次数.

第 $k+1$ 次迭代时, 某条路线上没有移除器经过, 其上信息素量变为

$$\tau_{ij}^{k+1} = [1 - \rho(k)]\tau_{ij}^k,$$

信息素量减少. 如果有移除器经过, 信息素量变为

$$\tau_{ij}^{k+1} = [1 - \rho(k)]\tau_{ij}^k + Q/L,$$

Q 为移除器携带的信息素总量, L 为移除器轨道转移需要的总的速度增量. 如此定义信息素的挥发和增强以及路径的选择有助于算法收敛到最佳解. 需要指出的是, 蚁群算法在搜索过程中可能会出现停滞现象, 也就是在蚂蚁搜索解的过程中, 所有蚂蚁都选择同样的路径, 即系统不会再搜索更好的解^[14]. 改变算法的初值或者多次重复实验可以降低这种现象出现的概率.

4.2 优化目标: 时间

轨道转移时, 速度增量的消耗与转移时间成反比, 其曲线斜率与轨道高度、偏心率、轨道倾角以及改变进动率时调整的轨道高度有关, 二者关系不能用一个简单函数关系式表示. 首先根据经验 (轨道转移时, 速度增量与转移时间关系) 设置时间间隔, 即

$$\Delta t = \frac{T}{\sum_{i=1}^{n-1} |\Omega_{i+1} - \Omega_i|},$$

其表示碎片之间升交点赤经差值决定了时限的长短. 其中, T 为任务中规定的总时间, n 为碎片总数.

利用蚁群算法, 计算出最佳排序后, 重新调整移除每块碎片的时间分配, 进一步优化任务中消耗的总的速度增量. 碎片移除过程中, 移除器的轨道转移时间主要消耗在通过改变移除器的进动率来改变移除器与目标碎片升交点赤经的差距. 轨道转移时间和速度增量满足:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i \leq T, \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^{n-1} \Delta V_i \min. \\ \Delta t_i = f(a_i, e_i, I_i, a_{i+1}, e_{i+1}, I_{i+1}, \Delta h_i), \\ \Delta v_i = g(a_i, e_i, a_{i+1}, e_{i+1}, \Delta h_i). \end{cases}$$

由于每块碎片的轨道参数已知, 所以轨道转移时间和所需的速度增量都仅是轨道高度改变量 Δh_i 的函数, 即

$$\begin{cases} \Delta t_i = f(\Delta h_i), \\ \Delta v_i = g(\Delta h_i). \end{cases}$$

上述问题是一个典型的求条件极值的问题. 拉格朗日乘数法是求解该问题最经典的算法, 但是此算法涉及多元非线性方程组求解, 由于变量个数多, 方程非线性, 不论是采用解析法还是数值法, 求解难度都比较大. 本文对最速下降法进行了部分改进, 将一元算法推广到多元来求解上述问题.

$\Delta t_i = f(\Delta h_i)$ 是单调递减的函数, $\Delta v_i = g(\Delta h_i)$ 是单调递增的函数. 由反函数与原函数的单调性一致可知, $\Delta v_i = g[f^{-1}(\Delta t_i)]$ 是单调递减的函数. 因此还可以得出, 轨道转移总时间等于最大值 T 时, 移除器消耗的速度增量总和最小. 采用蚁群算法优化碎片移除路径的过程中, 可以得到该移除顺序下的一组轨道高度改变量 $(\Delta h_1^0, \Delta h_2^0, \dots, \Delta h_{n-1}^0)$ 及轨道转移时间 $(\Delta t_1^0, \Delta t_2^0, \dots, \Delta t_{n-1}^0)$, 将其作为迭代的初值. 计算 Δv_i 在初值附近的斜率 k_i , 如果 $k_i < k_j$, 说明增加相同的时间, 移除器由第 i 块碎片转移到第 $i+1$ 块碎片的过程中消耗更少的速度增量. 将 $n-1$ 个函数在初值附近的斜率从小到大排序, 对应的时间序列为 $(\Delta t_{1'}^0, \Delta t_{2'}^0, \dots, \Delta t_{(n-1)'}^0)$. 为了保证总时间不变: 当 n 为偶数时,

$$\Delta t_{i'}^p = \Delta t_{i'}^{p-1} + \lambda \left(i - \frac{n}{2} \right);$$

当 n 为奇数时,

$$\Delta t_{i'}^p = \Delta t_{i'}^{p-1} + \lambda \left(i - \frac{n-1}{2} \right).$$

这里 p 为迭代次数, λ 为迭代步长, 其值与收敛速度有关 ($i = 1, 2, \dots, n; p = 1, 2, \dots, n; \lambda > 0$). 当某次迭代的总速度增量大于前一次迭代的总速度增量时, 迭代结束. 可以证明, 移除所有碎片需要的速度增量对时间的斜率一致时, 迭代结束.

5 仿真分析

对于同一个目标碎片群, 采用不同的移除顺序消耗的速度增量不尽相同, 甚至可能有很大差距. 为了证明路径优化可以在很大程度上节约航天器速度增量的消耗, 随机选取几十组碎片进行计算仿真, 然后从中挑选出 3 组比较有代表性的碎片进行解释说明, 选出的碎片参数列于表 2.

航天器轨道转移时利用地球摄动力引起的轨道参数漂移来改变升交点赤经, 从而节省速度增量, 与此同时, 转移时间显著增加^[12]. 碎片移除工程中消耗的速度增量与轨道转移时间成反比. 图 5 给出了利用 Matlab 模拟移除选中的 6 块碎片时需要的轨道转移时间与消耗的速度增量的关系. 从图 5 中可以看出, 移除碎片的总时间超过 1000 天时, 消耗的速度增量随时间的变化很小. 本次实验中, 按照升交点赤经的顺序依次移除第 1 组中的 6 块碎片, 消耗的速度增量极限值 $\Delta v \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0.1281 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 这部分速度增量主要由调整移除器的轨道倾角及调整相位

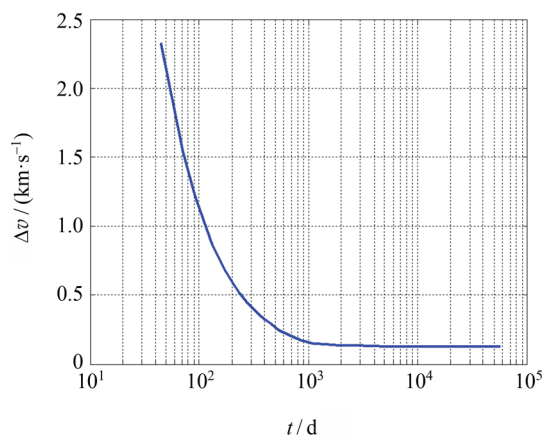


图 5 转移时间与速度增量的关系

Fig. 5 Relation between transfer time and velocity increment

时消耗的速度增量组成, 利用轨道高度的变化改变升交点赤经进动率消耗的速度增量非常少, 只有 $0.021\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 任务时间只要设置合理, 对速度增量产生的影响就会比较小. 本文的目的就是在转移周期允许的情况下, 最大限度地节省速度增量.

5.1 移除顺序对比

表 3 给出了轨道转移时间为 360 天时利用不同

方式移除第一组碎片需要的速度增量. 经过蚁群算法优化后的碎片排序, 相比按升交点赤经顺序的碎片排序, 速度增量节省约 2.5%; 相比轨道倾角顺序, 速度增量节省约 15%; 相比轨道高度顺序, 速度增量节省约 21%. 以赤经降序为例, 优化后的排序比赤经升序在速度增量方面优化了 2.75%. 究其原因可以发现, 两种移除方式中 4 号碎片和 5 号碎片的移除顺

表 2 三组碎片的轨道参数
Table 2 Orbit parameters of three sets of debris

组别	序号	编号	轨道高度/km	轨道倾角/(°)	升交点赤经/(°)
第 1 组	1	20876	798.45	98.737	119.172
	2	20883	802.65	98.652	120.274
	3	20878	736.078	98.438	123.071
	4	20870	859.938	98.871	123.804
	5	20798	836.51	98.774	124.013
	6	20793	840.28	98.803	124.665
第 2 组	1	20876	798.45	98.737	119.172
	2	20883	802.65	98.652	120.274
	3	20881	794.564	98.6	121.4668
	4	20878	736.078	98.438	123.071
	5	20793	840.28	98.803	124.665
	6	20798	836.51	98.774	124.013
第 3 组	1	20887	773.45	98.51	118.0709
	2	20969	782.73	98.56	120.344
	3	20870	859.938	98.871	123.804
	4	20793	840.28	98.803	124.665
	5	20797	846.79	98.76	130.8964
	6	20852	830.288	98.7	131.6222

表 3 各种多碎片移除排序方式的速度增量和时间消耗
Table 3 Velocity increment and time-consuming for multi-debris with different removing order

排序方式	速度增量/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度增量对比/(%)	时间/d	移除顺序排列序号
算法优化	0.3091	0.00	360	6, 4, 5, 3, 2, 1
赤经升序	0.3165	2.39	360	1, 2, 3, 4, 5, 6
赤经降序	0.3176	2.75	360	6, 5, 4, 3, 2, 1
倾角升序	0.3558	15.11	360	3, 2, 1, 5, 6, 4
倾角降序	0.3532	14.27	360	4, 6, 5, 1, 2, 3
高度升序	0.3739	20.96	360	1, 2, 4, 3, 6, 5
高度降序	0.3746	21.19	360	4, 6, 5, 2, 1, 3

序不同. 按照赤经顺序 6, 5, 4, 3, 轨道高度改变量为 151.058 km, 轨道倾角改变量为 0.559° , 升交点赤经改变量为 1.594° ; 按照优化的顺序 6, 4, 5, 3, 轨道高度改变量为 143.218 km, 轨道倾角改变量为 0.501° , 升交点赤经改变量为 2.012° . 对比三个参数的变化量, 可以看出, 相对于赤经顺序, 算法优化顺序在轨道高度和轨道倾角方面有一定的优化, 从而降低了速度增量的消耗.

得到优化之后的碎片移除顺序后, 采用改进的最速下降法对移除每块碎片的轨道转移时间进行优化. 在保持转移时间 (360 d) 不增加的情况下, 消耗的总速度增量可以降低到 $0.3013 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

5.2 遍历

对表格中碎片的移除顺序进行遍历, 利用 Matlab 软件获得 6 块碎片所有可能的排列组合, 共 720 种. 第 679 个序列是速度增量消耗最少的碎片移除顺序, 与蚁群算法得到的结果一致. 各种排序方式需要的速度增量如图 6 所示.

5.3 任务时间对移除顺序的影响

这里的移除方案主要利用地球摄动力改变移除器轨道, 对任务时间有很大的依赖性. 仿真结果表明, 缩短总任务时间, 最佳的碎片移除顺序可能发生变化. 表 4 列出了第 1 组碎片在不同任务时间下最佳移除顺序以及按照最佳顺序移除碎片时需要的速度增量.

5.4 结果分析

将蚁群优化算法应用于碎片移除过程中移除器的路径优化, 速度增量和时间的消耗量是判别路径优

化质量的两大标准. 速度增量和时间消耗越少, 移除器的路径优化效果越好. 由于不同碎片之间升交点赤经、轨道倾角、轨道高度的差异导致移除器在捕获碎片时实施轨道机动, 消耗速度增量和时间. 由于不同碎片之间轨道倾角相差较小, 升交点赤经的差异更明显, 因此按照升交点赤经顺序移除碎片时, 消耗的速度增量更少. 对于选定的第 1 组目标碎片, 升交点赤经和轨道高度的差异是导致移除器轨道机动消耗速度增量的两大因素. 此外, 轨道倾角的差异也会对碎片移除顺序的选择产生一定影响. 表 5 中第 2 组目标碎片经过蚁群算法优化之后的排列顺序恰好与轨道倾角由大到小的排列顺序相同. 第 3 组目标碎片经过蚁群算法优化之后的排列顺序恰好与升交点赤经由小到大的排列顺序相同. 对于某些碎片群, 航天器按照某一种轨道参数顺序移除空间碎片最优, 因此, 优化之前可以根据碎片轨道参数之间的差异粗略估计最佳的碎片清除顺序.

6 结论

选择由中国空间活动产生的位于太阳同步轨道上碰撞次数比较多的碎片作为目标碎片进行研究, 并为解决具有潜在威胁的空间碎片问题提供了一种新的移除方案. 优化对象包括速度增量和轨道转移时间. 碎片的最佳移除顺序是由碎片之间轨道参数的差异决定的, 不同碎片的轨道参数相差不大, 只有一项参数差异比较明显时, 按照该参数从小到大或者从大到小的顺序移除碎片时最优. 例如, 按照升交点赤经顺序执行空间任务或者移除空间碎片可以节省航

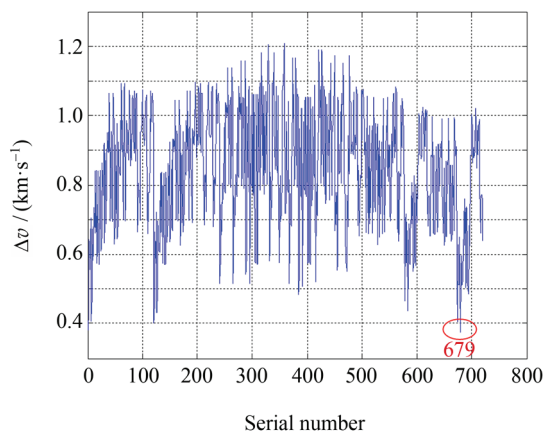


图 6 各种多碎片移除排序方式需要的速度增量

Fig. 6 Velocity increment needed by different removing order of multi-debris

表 4 任务时间对移除顺序的影响

Table 4 Effect of task time on the order of multi-debris removal

任务时间/d	最佳移除顺序	所需速度增量/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)
540	6, 4, 5, 1, 2, 3	0.2484
450	1, 2, 3, 5, 4, 6	0.2751
360	6, 4, 5, 3, 2, 1	0.3091
270	6, 4, 5, 3, 2, 1	0.3688
180	1, 2, 3, 4, 5, 6	0.4782
90	1, 2, 3, 4, 5, 6	0.7953
45	1, 2, 3, 4, 5, 6	1.4032

表 5 两组碎片优化之后的移除顺序和轨道参数

Table 5 Removing order and orbit parameters of two sets of optimized debris

组别	序号	编号	轨道高度/km	轨道倾角/(°)	升交点赤经/(°)
第 2 组	5	20793	840.28	98.803	124.665
	6	20798	836.51	98.774	124.013
	1	20876	798.45	98.737	119.172
	2	20883	802.65	98.652	120.274
	3	20881	794.564	98.6	121.4668
	4	20878	736.078	98.438	123.071
第 3 组	1	20887	773.45	98.51	118.0709
	2	20969	782.73	98.56	120.344
	3	20870	859.938	98.871	123.804
	4	20793	840.28	98.803	124.665
	5	20797	846.79	98.76	130.8964
	6	20852	830.288	98.7	131.6222

天器燃料的消耗. 但是在碎片的多项轨道参数差异对比不明显的情况下, 蚁群算法可以在很大程度上优化碎片的移除顺序. 同时, 采用改进的最速下降法可以进一步优化轨道转移时间和总速度增量. 对于同一组碎片, 任务时间不同, 最佳的碎片移除顺序也可能不同. 因此, 轨道参数、任务时间都会造成最佳碎片移除顺序的变更.

参考文献

- [1] KLINKRAD H. Space Debris: Models and Risk Analysis [M]. Chichester, UK: Springer, 2006: 1-18
- [2] BONNAL C, RUAULT J M, DESJEAN M C. Active debris removal: recent progress and current trends [J]. *Acta Astron.*, 2013, **85**(4): 51-60
- [3] CASTRONUOVO M M. Active space debris removal—A preliminary mission analysis and design [J]. *Acta Astron.*, 2011, **69**(9/10): 848-859
- [4] WADSLEY B J, MELTON R G. Optimal visitation order for spacecraft servicing missions [J]. *Adv. Astron. Sci.*, 2008, **129**: 2705-2723
- [5] STODGELL T R, SPENCER D B. Satellite rendezvous tours using multiobjective evolutionary optimization [J]. *Adv. Astron. Sci.*, 2008, **129**: 2069-2094
- [6] MURAKAMI J, HOKAMOTO S. Approach for optimal multi-rendezvous trajectory design for active debris removal [C]//Proceedings of the 61st International Astronautical Congress. Prague, CZ: IAC, 2010
- [7] MADAKAT D, MORIO J, VANDERPOOTEN D. Biobjective planning of an active debris removal mission [J]. *Acta Astron.*, 2013, **84**: 182-188
- [8] BRAUN V, LÜPKEN A, FLEGEL S, *et al.* Active debris removal of multiple priority targets [J]. *Adv. Space Res.*, 2013, **51**(9): 1638-1648
- [9] YU Jing, CHEN Xiaoqian, CHEN Lihu. Optimal planning of LEO active debris removal based on hybrid optimal control theory [J]. *Adv. Space Res.*, 2015, **55**(11): 2628-2640
- [10] LIU Yong, YANG Jiannan, PAN Quan. Multi-objective optimization in preliminary design of multi-debris active removal mission in LEO based on GA algorithm [J]. 2016: 1-5
- [11] SIDI M J. Spacecraft Dynamics & Control: A Practical Engineering Approach [M]. Cambridge: The Press of the University of Cambridge, 1997: 33-43
- [12] YUAN Jianping, HE Xingsuo. Dynamics of Spacecraft Orbital Maneuvers [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010: 1-16 (袁建平, 和兴锁. 航天器轨道机动动力学 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 1-16)
- [13] YANG Xuefeng. Ant Colony Algorithm for TSP Problem [D]. Changchun: Jilin University, 2010 (杨学峰. 蚁群算法求解 TSP 问题的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010)
- [14] YANG Jianfeng. Ant Colony Algorithm and its Application Research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007 (杨剑锋. 蚁群算法及其应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007)