

# 可重复使用地火运输空间站火星移民轨道设计

## ——甲题BUAA-CASIC团队解法

团队成员：陆鹏飞 崔书豪 白雪 熊梓岑 陈勇杰

指导教师：王悦 赵书阁 徐明 钟睿 李小玉

报告人：陆鹏飞

2023年03月01日

# 目录

## CONTENTS

01 | 赛题分析

02 | 方案介绍

03 | 设计结果

04 | 总结分析



01

---

# 赛题分析

---

## 复杂深空动力学环境下非线性和多约束的任务规划与轨道优化问题

### □ 行星际飞行（二体模型）

### □ 地月空间飞行（限制性四体问题）

#### ① 单次运输任务

转移阶段多；

#### ② 约束下行星际

转移窗口稀疏；

#### ③ 速度脉冲消耗

限制较为严格；

#### ④ 整体规划复杂。

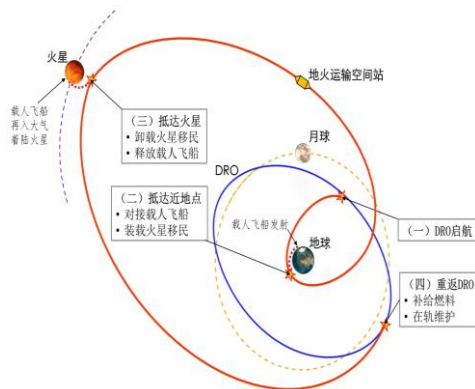
合理分割单次任务

扩展星际转移窗口

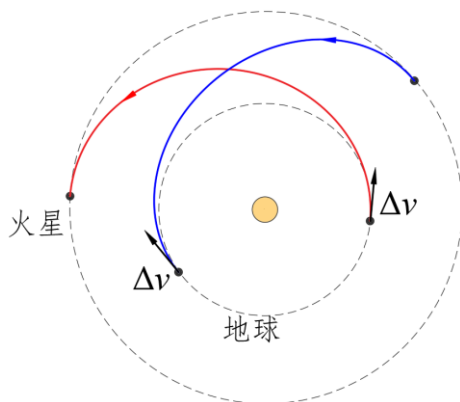
充分利用低能转移

简化任务规划机制

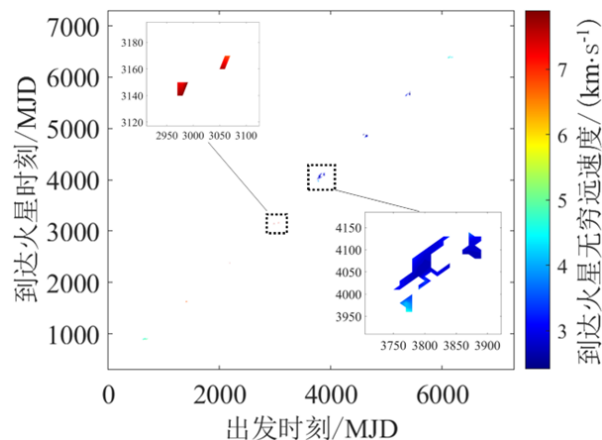
#### DRO—地球—火星—DRO



粗略估计脉冲消耗 $\approx 5.8 \text{ km/s}$



#### 行星际窗口稀疏(无深空机动情况)



#### 整体规划复杂

运输站数量多

时间间隔约束

设计指标多

## 难点

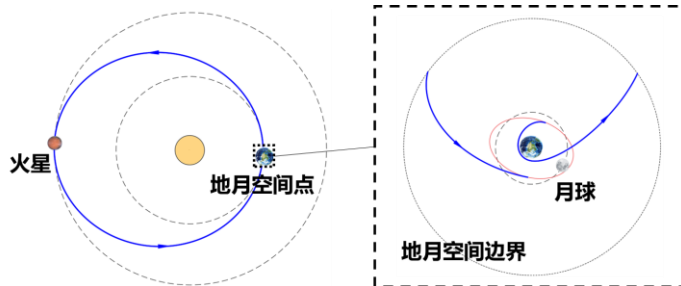
## 策略

### 单次运输任务 转移阶段多

“地月空间点”的抽象( $r_{\text{cislunar}} \ll d_{\text{E-M}}$ )

全局轨迹分段设计

- 地月空间点与火星间**星际转移**
- 地月空间内**转移

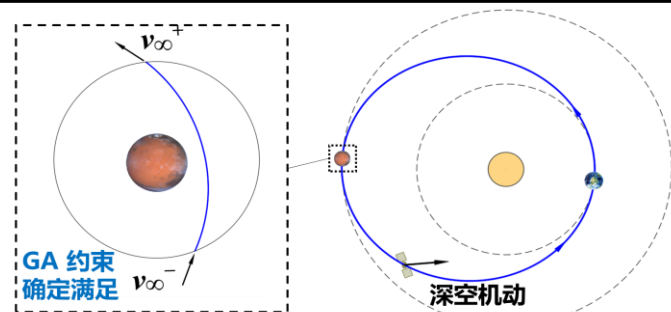


### 约束下行星际 转移窗口稀疏

带**深空机动**的**确定匹配**引力辅助

优化方法

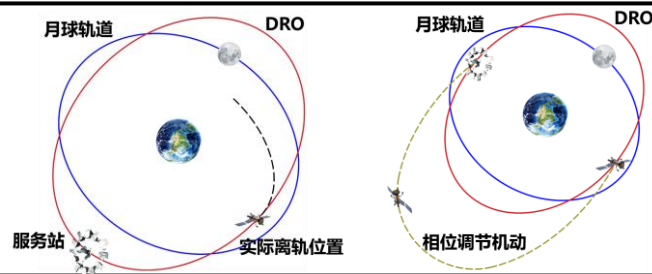
- 满足GA约束的速度构造
- GA参数与深空机动的优化



### 速度脉冲消耗 限制较为严格

地月空间内低能逃逸与捕获设计

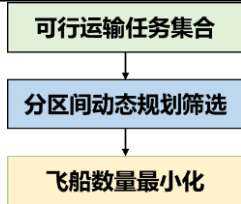
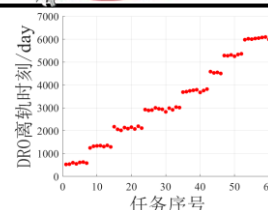
- 时间—相位解耦**优化
- DRO**相位调节机动



### 运输站数量多 整体规划复杂

运输任务**筛选**与**飞船数量规划**算法

- 最大化运载总人数
- 满足时间间隔约束





02

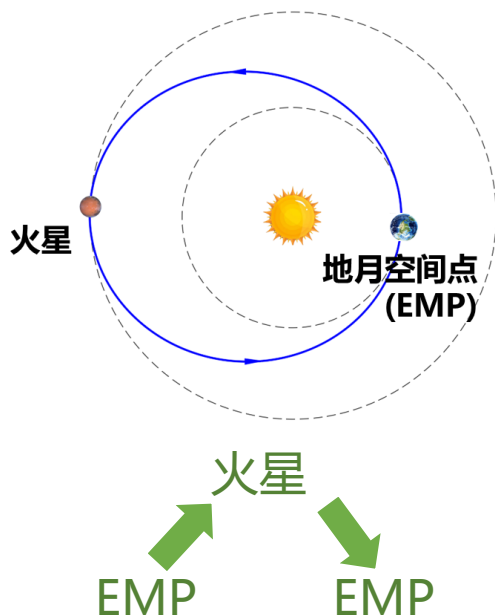
---

# 方案介绍

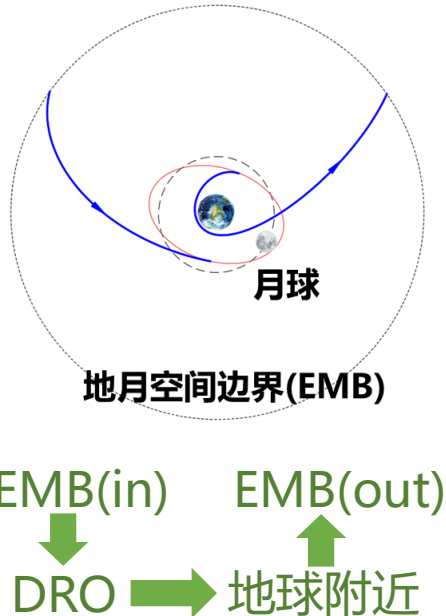
---

## 总体概述

### 行星际转移



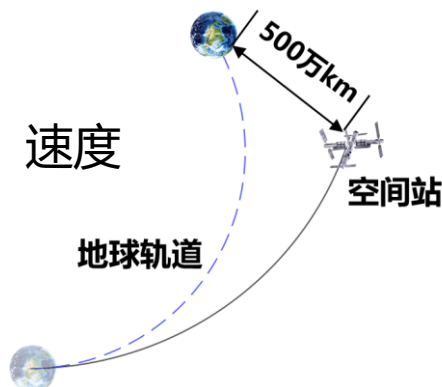
### 地月空间内飞行



### 地月空间边界拼接

□ 确定抵达EMB时刻的位置、速度

- HCI中外推
- HCI→ECI



## 解题设计流程

行星际转移可行窗口搜索



地月空间逃逸设计



运输任务集合筛选



地月空间捕获设计



相位调节机动设计



最小飞船数量规划



## 行星际转移

### 设计目标

确定满足约束的地月空间点出发时刻 $t_0$ 、火星引力辅助时刻 $t_1$ 、返回地月空间点时刻 $t_2$ ，及对应轨迹

#### □ 时间约束

$$0 < t_0 < t_1 < t_2 < 7304 \text{ MJD}$$

$$t_1 - t_0 \leq 300 \text{ day}$$

$$t_2 - t_0 \leq 5 \text{ year}$$

#### □ 能量约束

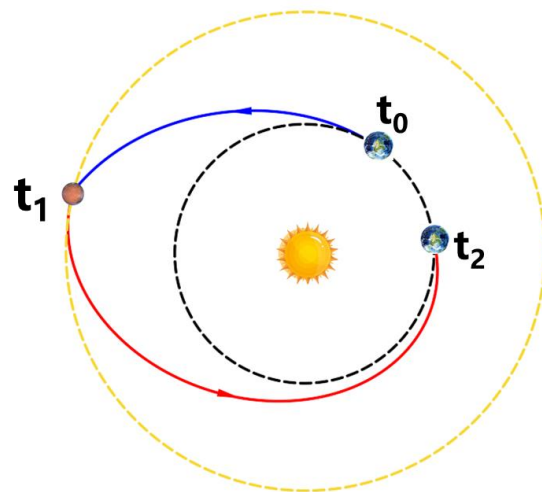
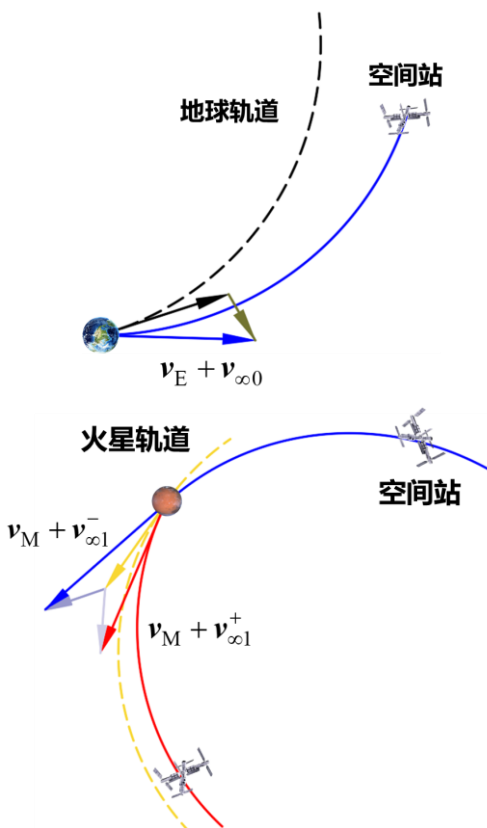
$$v_{\infty 0} \leq 6 \text{ km/s}$$

$$v_{\infty 1} \leq 8 \text{ km/s}$$

#### □ 引力辅助约束

$$v_{\infty 1}^- = v_{\infty 1}^+$$

$$200 \text{ km} \leq h_{\text{GA}} \leq 10000 \text{ km}$$



二体能量公式  $\frac{v_{\infty}^2}{2} = \frac{v_p^2}{2} - \frac{\mu}{r_p}$

800 km近地点高度

近地点速度 $\leq 12 \text{ km/s}$



逃逸地球 $v_{\infty} \approx 5.74 \text{ km/s}$

因此取值6 km/s

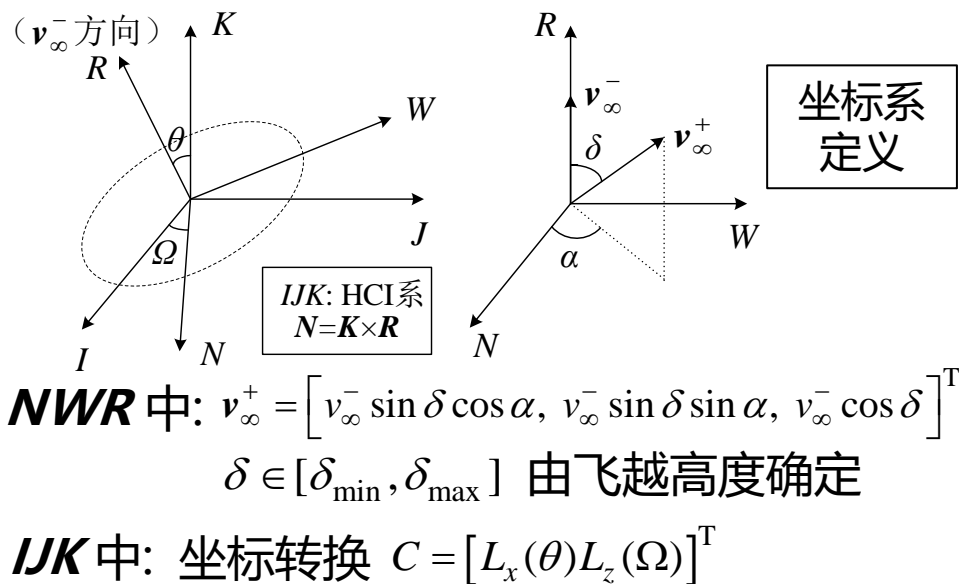


## 行星际转移

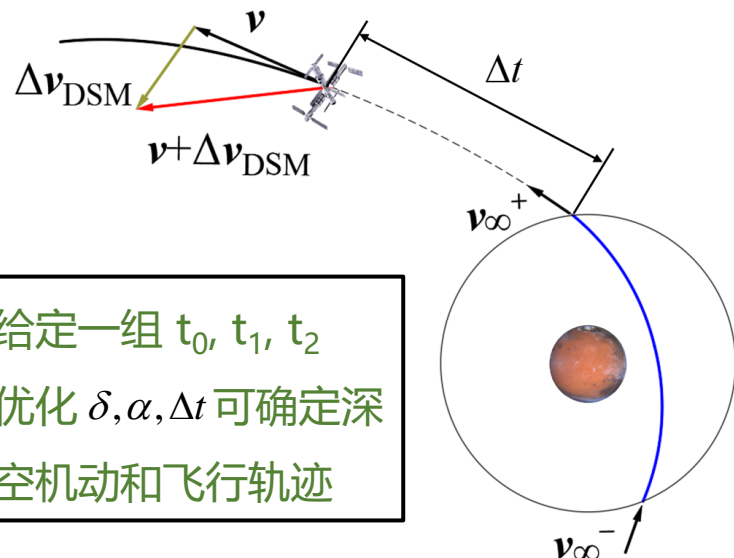
### 带深空机动的确定匹配引力辅助优化方法

- $v_{\infty}^+$  矢量必定满足引力辅助条件
  - 模值相等
  - 转角范围（由飞越高度限制确定）
- 火地返回段一次深空机动

#### ① 确定匹配引力辅助后速度的构造



#### ② 带深空机动的引力辅助参数优化



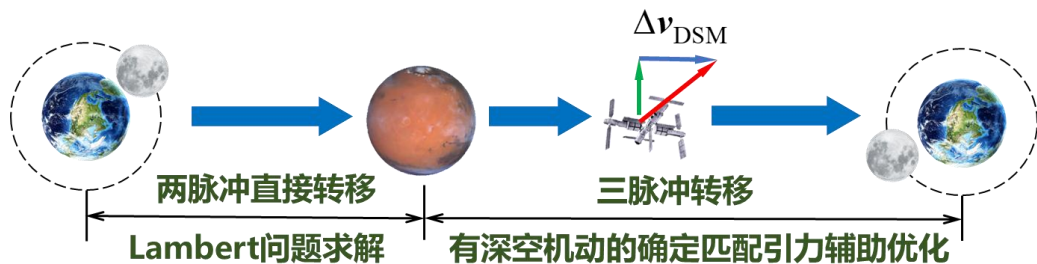
- 优化变量**  $\chi = [\delta \quad \alpha \quad \Delta t]^T$
- 优化目标**  $\Delta v_{DSM} + \left( \sqrt{v_{\infty 2}^2 + 2\mu_E/r_{p,E}} - v_{p,E} \right)$
- 深空机动消耗      火地返回制动消耗
- 6778km      10.6km/s
- 约束条件** • GA偏转角约束  
• DSM时刻约束

## 行星际转移

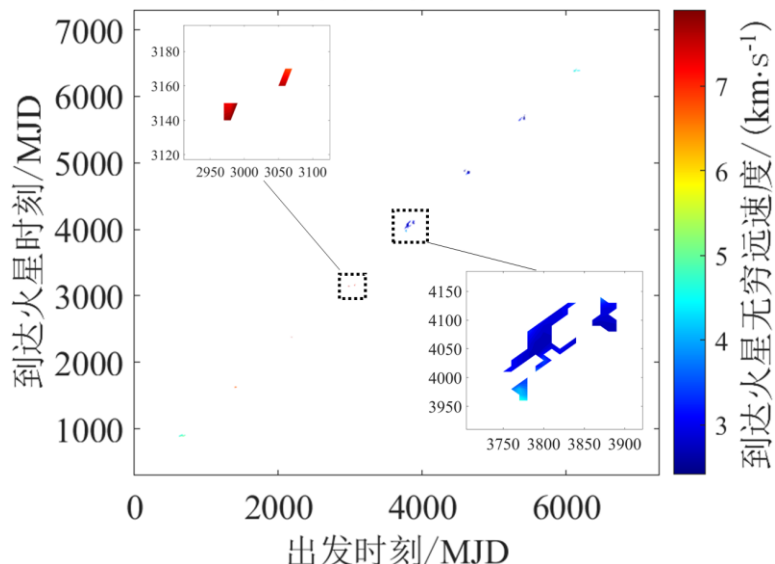
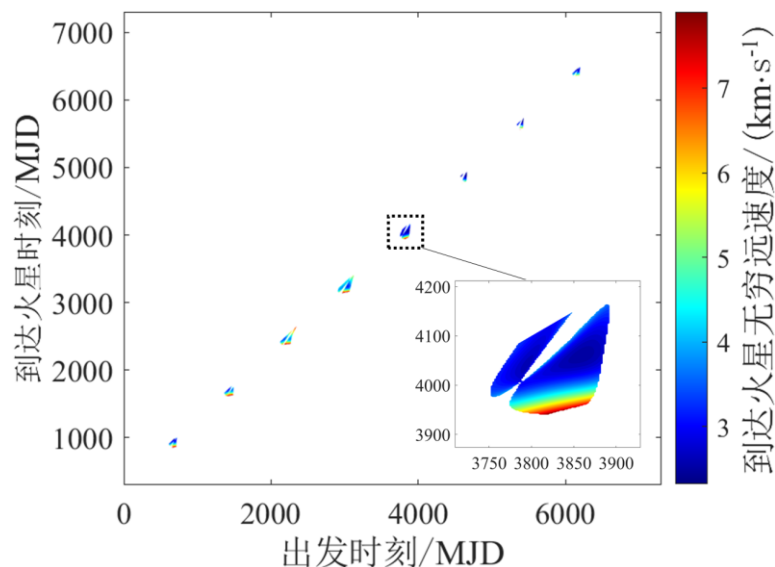
### 窗口搜索

符合约束的**地月空间点出发时刻 $t_0$** 、**火星引力辅助时刻 $t_1$** 、**返回地月空间点时刻 $t_2$**

- 地月空间点至火星转移段
  - 求解Lambert问题确定
- 火星至地月空间点返回段：
  - 带深空机动的确定匹配引力辅助优化



- **时间约束** 起止时刻、飞行时间
- **能量约束**  $v_\infty$  约束；补充  $J_{GA} \leq 1.8 \text{ km/s}$
- **GA 约束** 确定匹配引力辅助保证成立



## 地月空间内逃逸与捕获

### 边界条件

行星际转移  
搜索结果

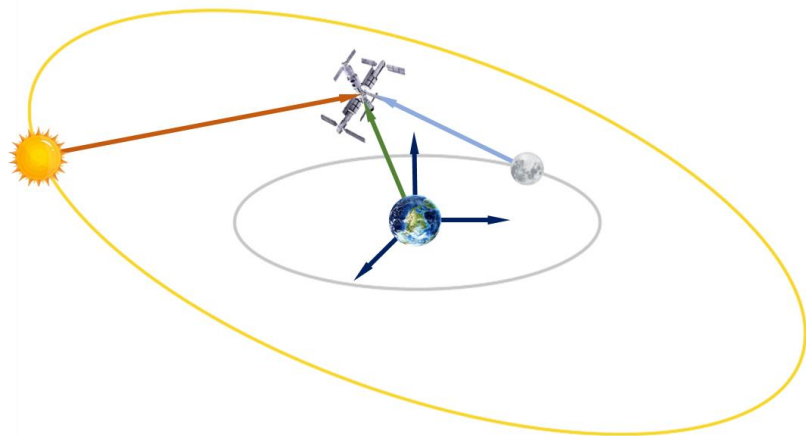
HCI中外推  
HCI → ECI

地月空间边界上  
 $\{t_{in}, R_{in}, V_{in}\}$   
 $\{t_{out}, R_{out}, V_{out}\}$

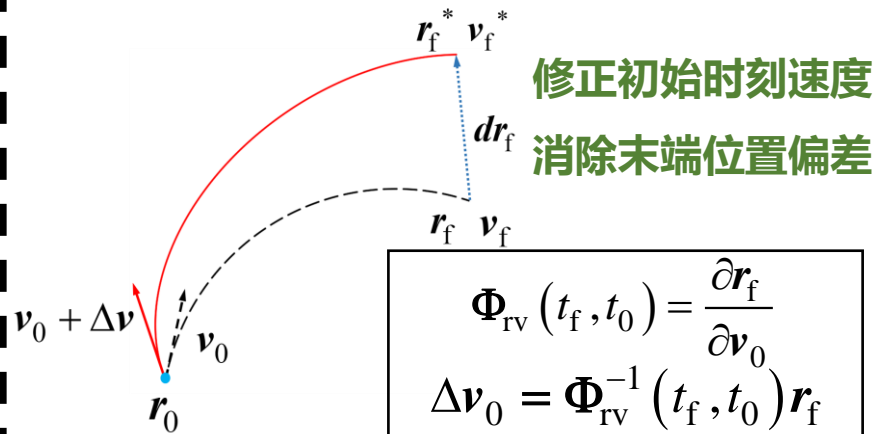
### 设计目标

- 设计**DRO至地月空间边界的逃逸轨迹**；  
以及**地月空间边界至DRO的捕获轨迹**；
- 满足**速度增量消耗**和**时间**等约束；
- 在给定时刻 $t_{in}$ ，位于地月空间边界上给定位置 $R_{in}$ 且速度为 $V_{in}$  (**逃逸边界条件**)；
- 在 $t_{out}$ 时刻，位于地月空间边界上给定位置 $R_{out}$ 且速度为 $V_{out}$  (**进入边界条件**)。

### 日—地—月—空间站限制性四体问题



### 固定时间单段打靶法



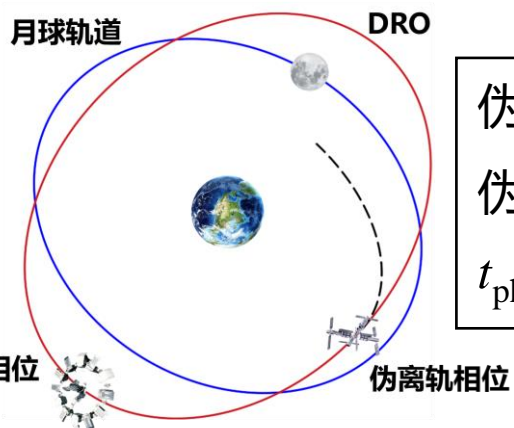
## 地月空间内逃逸与捕获

### 时间—相位解耦优化

**真实离(入)轨约束：**离(入)轨时刻空间站与DRO服务站的位置速度相同  
(离开DRO的时刻和相位耦合)

#### ‘伪离轨’(‘伪入轨’)事件定义

伪离(入)轨时刻于DRO上相位 $\varphi$ 处离(入)轨  
而服务站不必位于相位 $\varphi$ 处

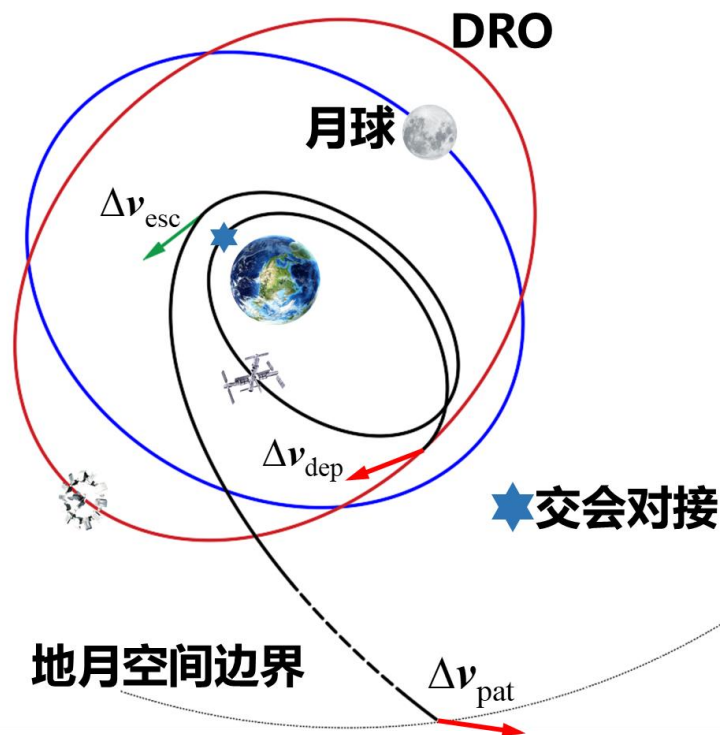


伪离轨时刻  $t_{\text{dep}}$   
伪离轨相位  $t_{\text{phase}}$   
 $t_{\text{phase}} \in [0, T_{\text{DRO}}]$

**捕获几乎是逃逸的逆过程**

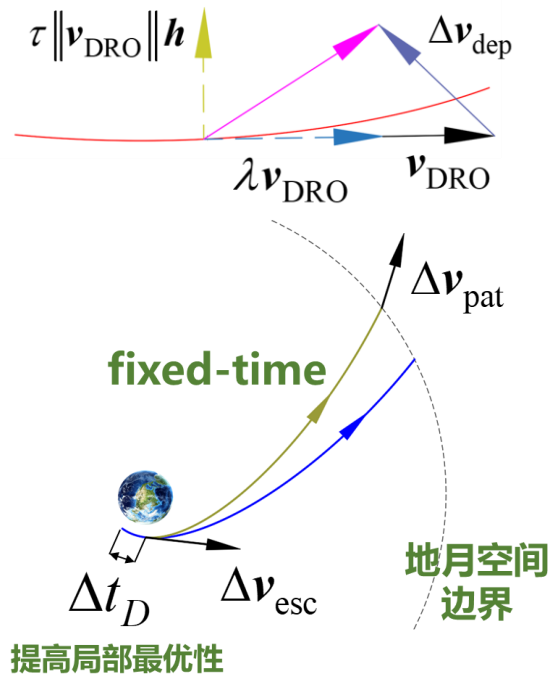
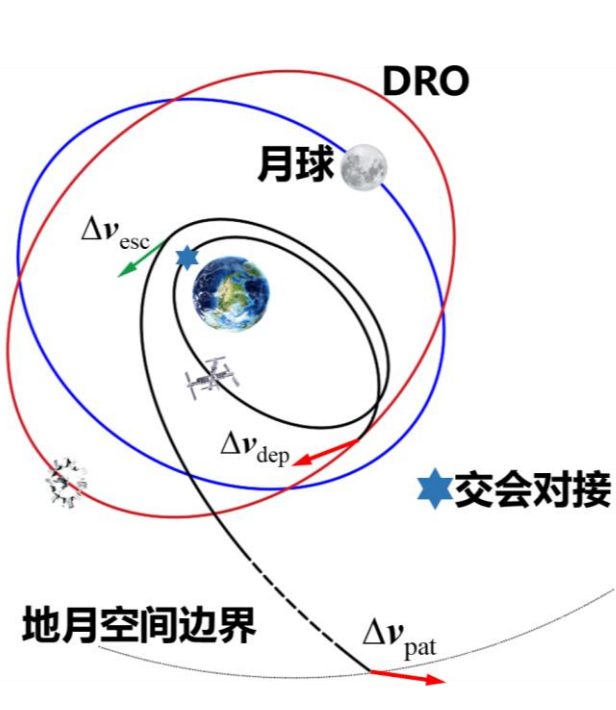
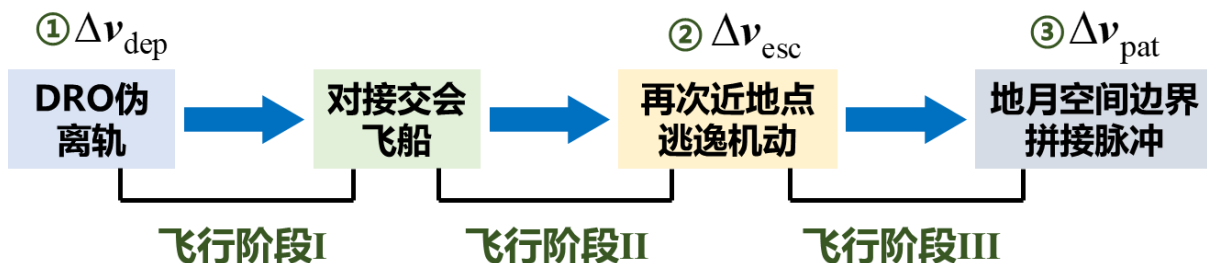
**逃逸优化设计为例**

□ 对接后一次近地点逃逸机动



## 地月空间内逃逸与捕获

### 时间—相位解耦优化



### 优化变量 (5维)

伪离轨时刻、伪离轨相位、切向速度系数、法向速度系数、逃逸脉冲延时间隔

### 优化目标

3次脉冲速度增量总消耗  
 $\Delta v_{\text{dep}} + 1.33(\Delta v_{\text{esc}} + \Delta v_{\text{pat}})$

### 约束条件

$$0 \leq t_{\text{pha}} \leq T_{\text{DRO}}$$

$$t_{\text{out}} - dT_1 \leq t_{\text{dep}} \leq t_{\text{out}} - dT_2$$

$$\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$$

$$\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$$

$$0 \leq \Delta t_D \leq 0.1 \text{ day}$$

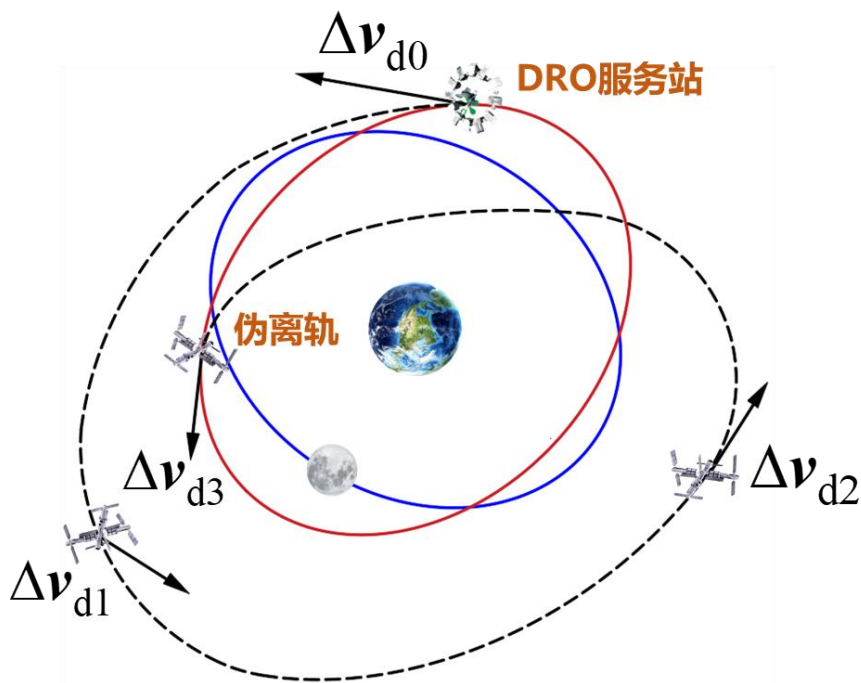


## 地月空间内逃逸与捕获

### DRO相位调节机动

- 确保在真实DRO离轨时刻空间站的状态与DRO服务站的状态相同

### 四脉冲变轨机动优化



优化变量  $[t_{d0} \quad t_{d1} \quad t_{d2} \quad \lambda_0 \quad \tau_0 \quad \lambda_1 \quad \tau_1]^T$

- 前3次机动时刻
- 前2次机动速度增量 (切向与法向)
- 后两次机动速度增量由固定时间单段打靶法确定

优化目标  $\Delta v_{d0} + \Delta v_{d1} + \Delta v_{d2} + \Delta v_{d3}$

- 4次机动脉冲速度增量总消耗

### 约束条件

$$t_{\text{dep}} - dT_{\text{phase}} \leq t_{d0} \leq t_{d1} \leq t_{d2} \leq t_{\text{dep}}$$

$$0.9 \leq \lambda_0 \leq 1.1$$

$$-0.1 \leq \tau_0 \leq 0.1$$

$$0.9 \leq \lambda_1 \leq 1.1$$

$$-0.1 \leq \tau_1 \leq 0.1$$

$dT_{\text{phase}}$  的值可灵活设置  
以满足运输任务间DRO启  
航10天间隔约束

## 任务规划

### 运输任务筛选

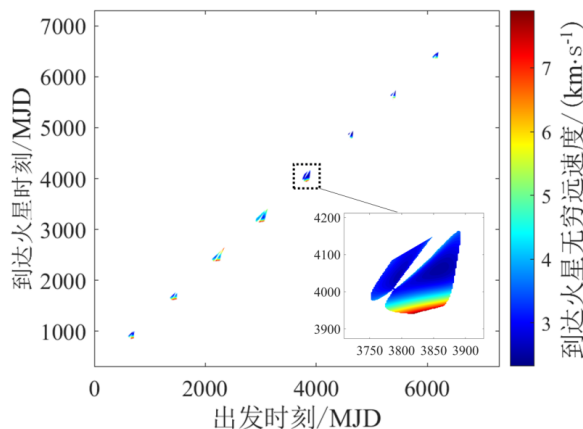
#### 需求

- DRO离轨、近地点对接飞船、  
近火点释放飞船间隔10天约束

#### 目的

- 满足时间间隔约束
- 总运输人数最大化

#### 分时间区间进行筛选



### 地月空间伪离轨逃逸优化后进行

#### □ 地火转移段真实脉冲消耗

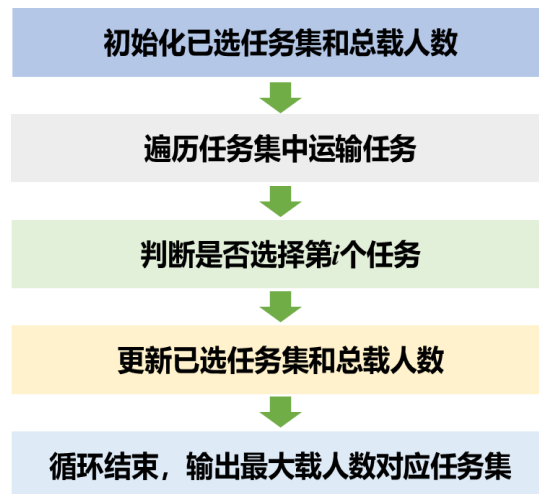
$$J_{\text{esc}} = \Delta v_{\text{dep}} + 1.33(\Delta v_{\text{esc}} + \Delta v_{\text{pat}})$$

#### □ 火地返回段脉冲消耗估计

$$J_{\text{GA}} = \Delta v_{\text{DSM}} + \left( \sqrt{v_{\infty 2}^2 + 2\mu_E/r_{\text{p,E}}} - v_{\text{p,E}} \right)$$

#### 初筛 $J_{\text{GA}} + J_{\text{esc}} \leq \Delta v_{\text{lim}}$ 脉冲消耗筛选

#### 复筛 考虑时间间隔约束和最大化运输人数

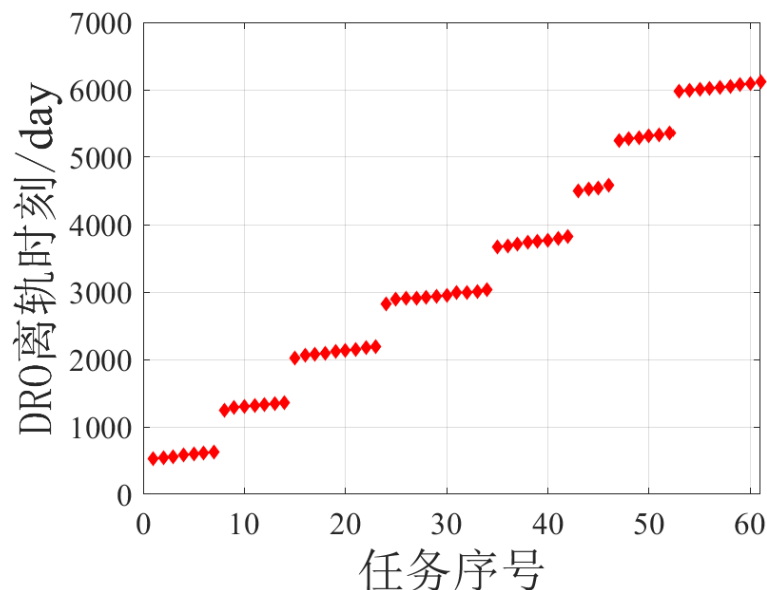




## 任务规划

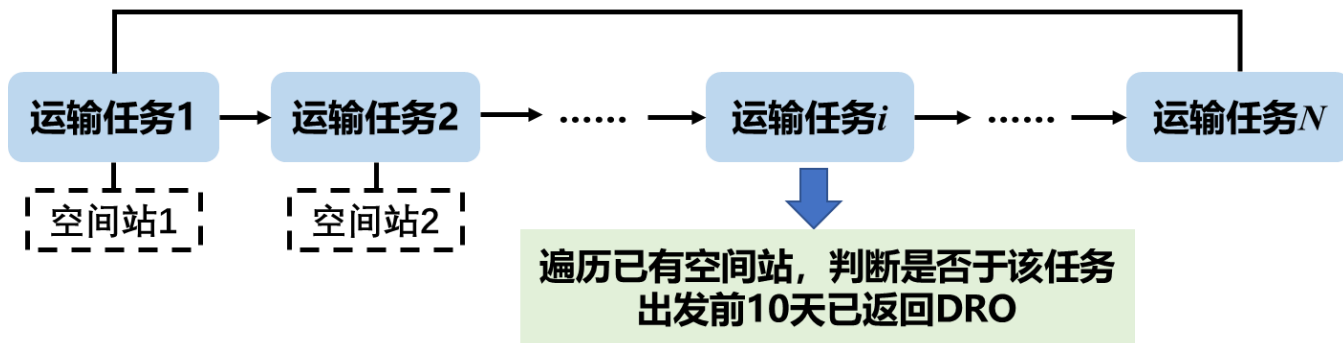
### 空间站数量规划

- ① 将所有运输任务按**DRO离轨时刻升序**排列；
- ② 对第1个任务创建1艘新空间站；
- ③ 对每个运输任务，遍历已有空间站：
  - 若**存在空间站**于该任务**离轨时刻10天前返回**，则选择该空间站；
  - 否则**新创建**1艘空间站
- ④ 获得空间站数量与对应运输任务。



各运输任务离轨时刻升序排列

遍历所有运输任务





03

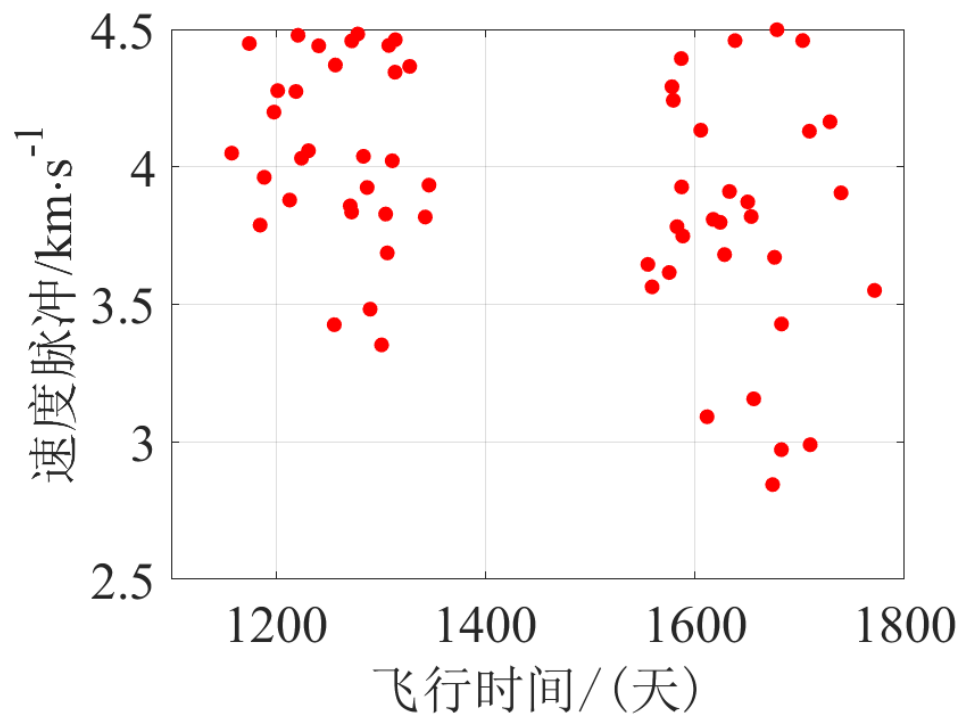
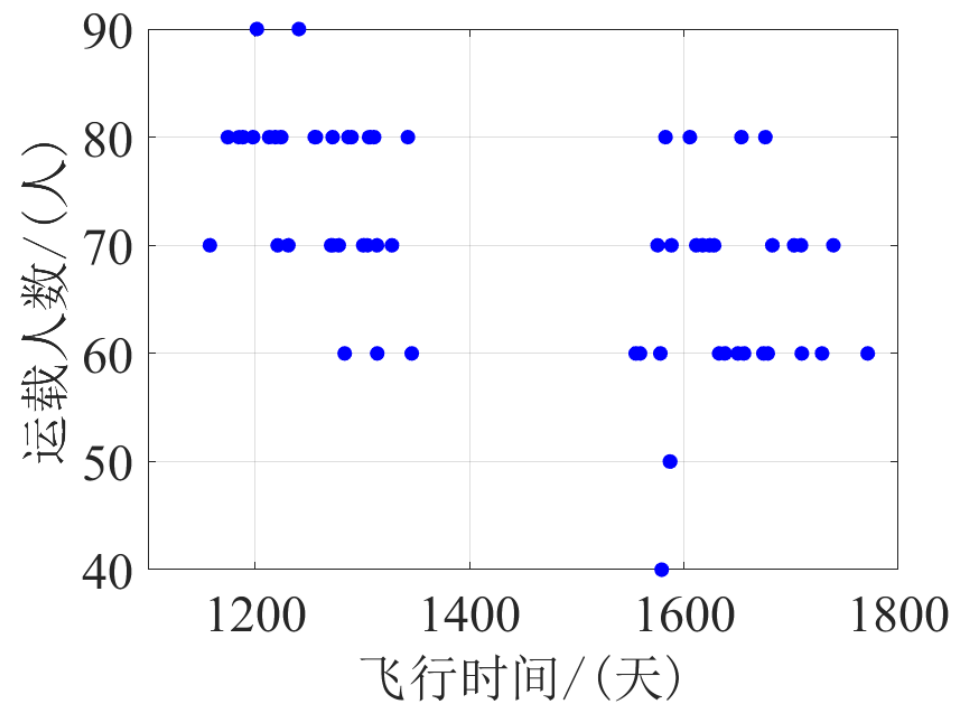
---

# 设计结果

---

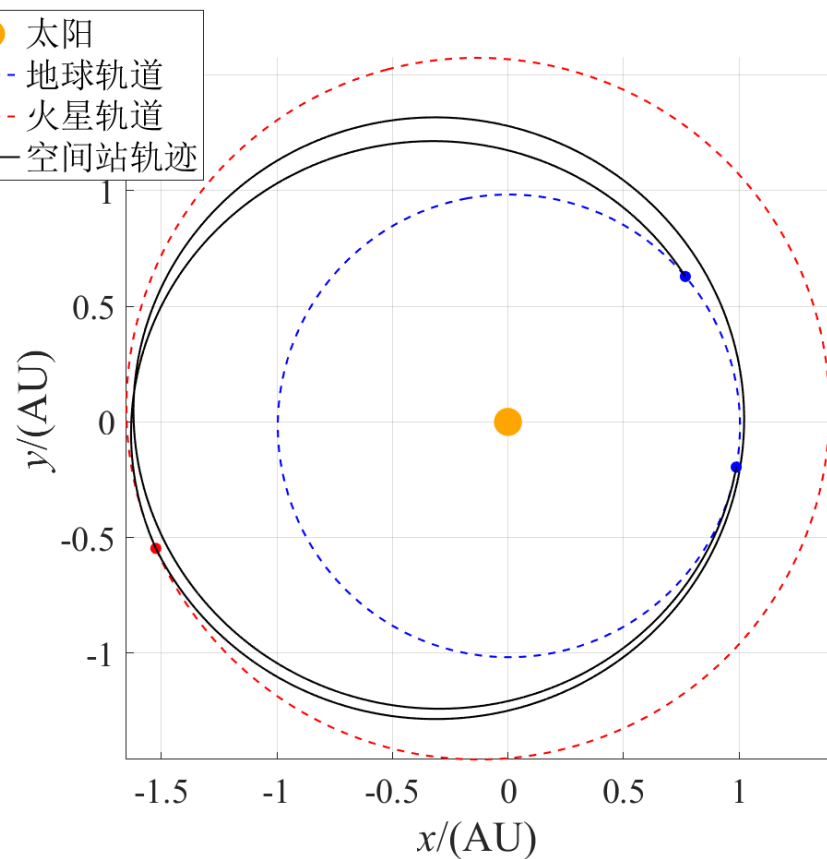
## 设计指标情况

移民人数 (第一指标)	空间站数量 (第二指标)	总速度脉冲消耗 (第三指标)/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	运输任务 次数	单次任务 平均消耗/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
4290+30	24	239.57	61	3.93

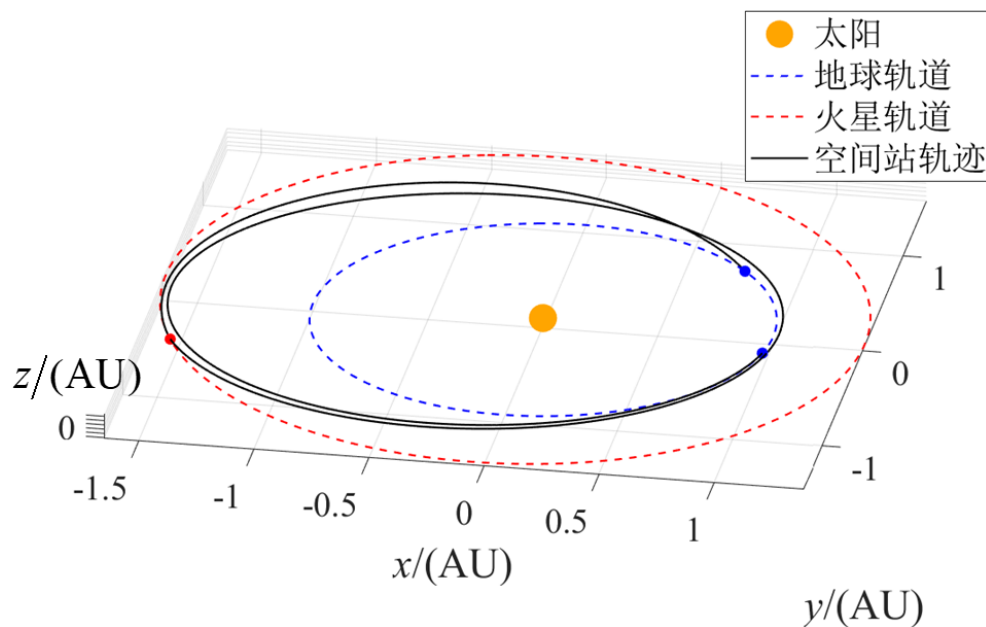


## 典型转移轨道

### 行星际转移



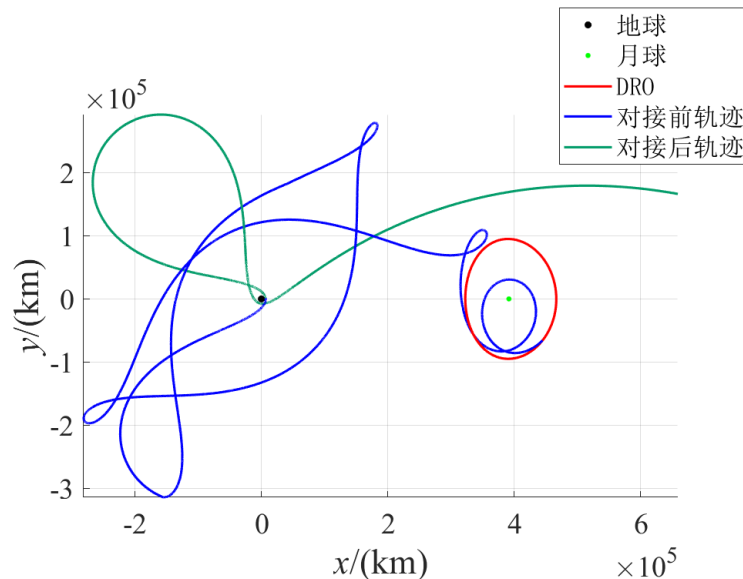
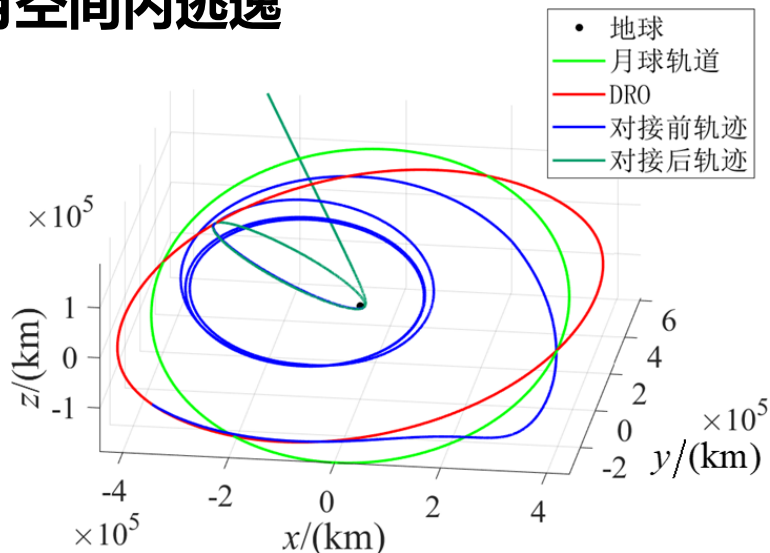
行星际转移黄道面俯视图



行星际转移三维视图

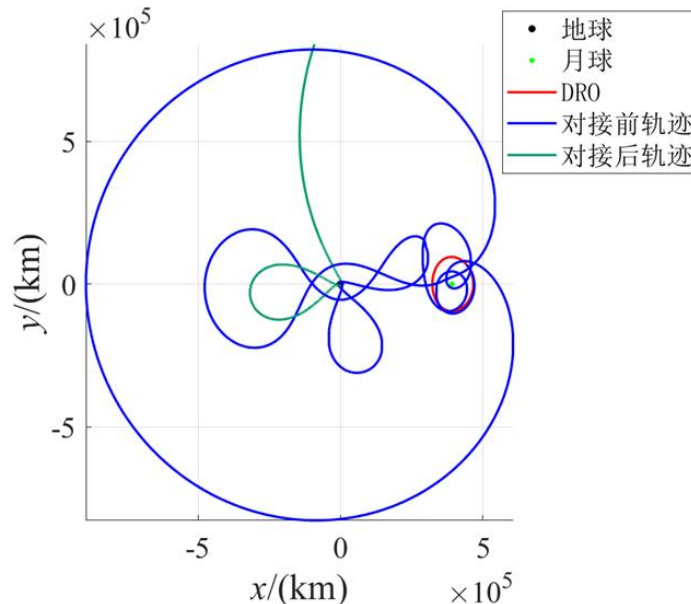
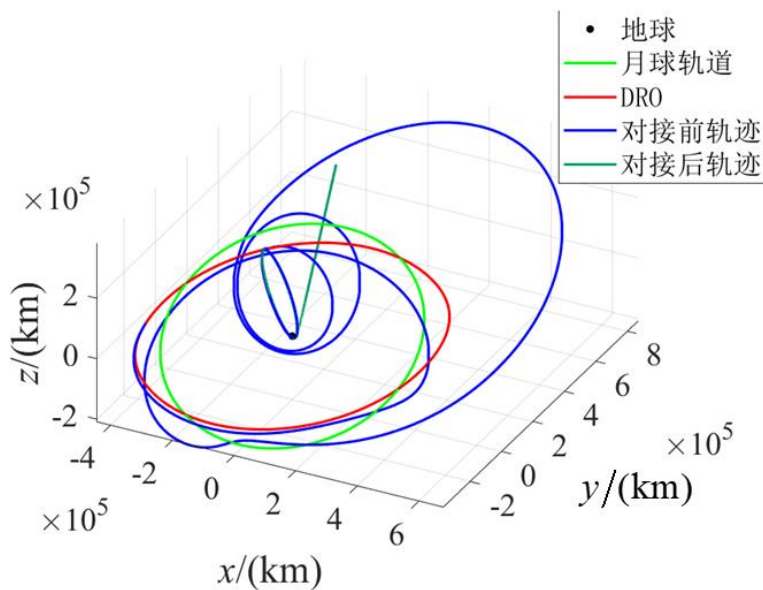
## 地月空间内逃逸

ECI坐标系中



地月旋转系中

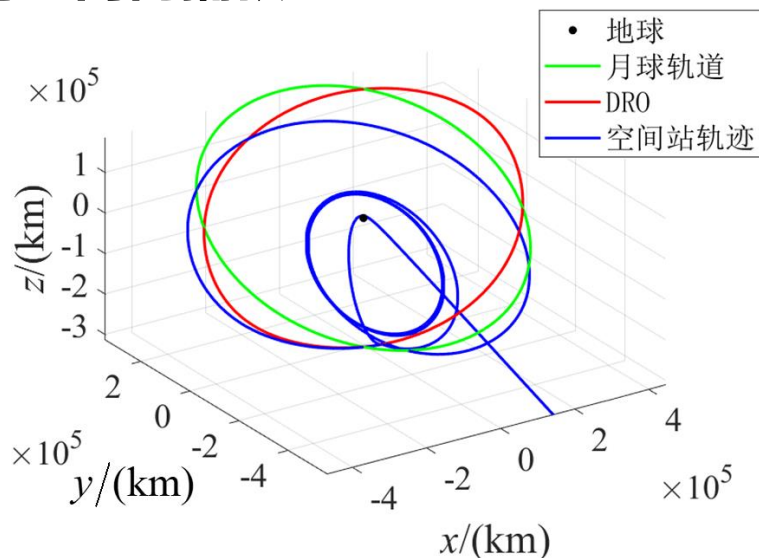
ECI坐标系中



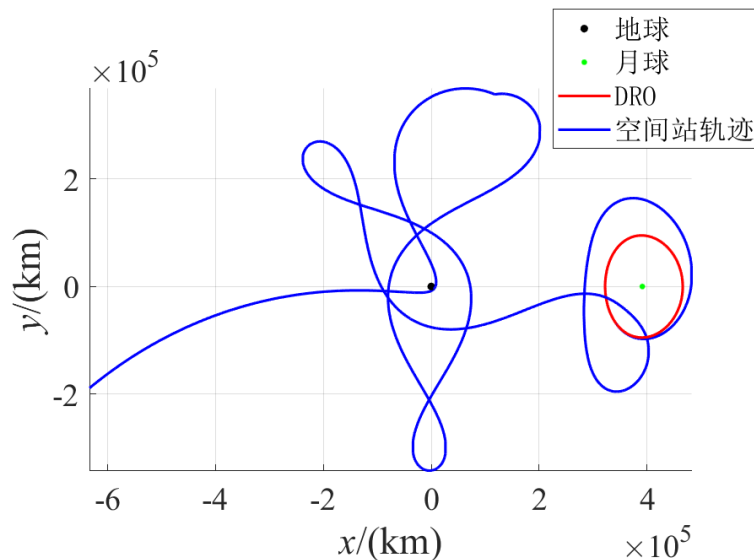
地月旋转系中

## 地月空间内捕获至DRO

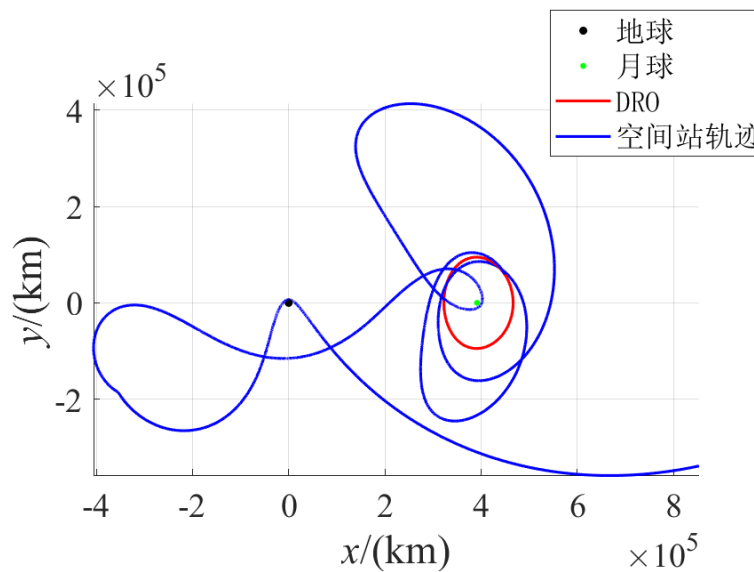
ECI坐标系中



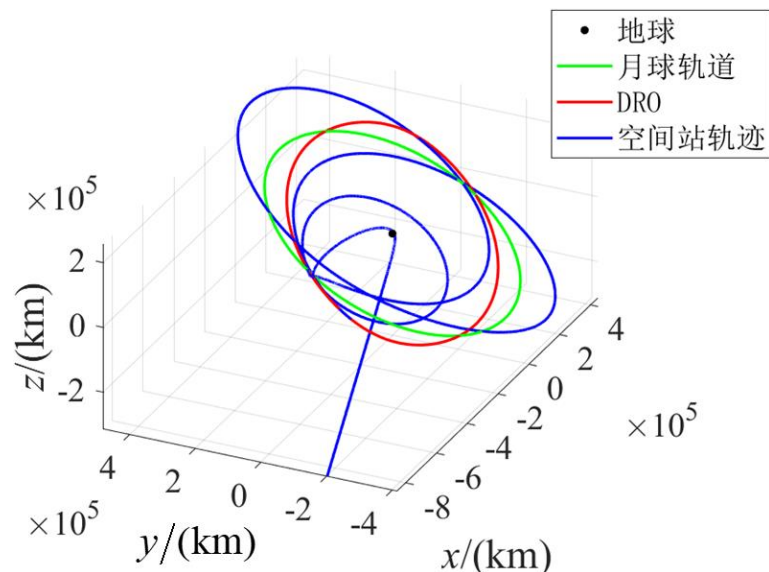
地月旋转系中



地月旋转系中



ECI坐标系中





04

# 总结分析

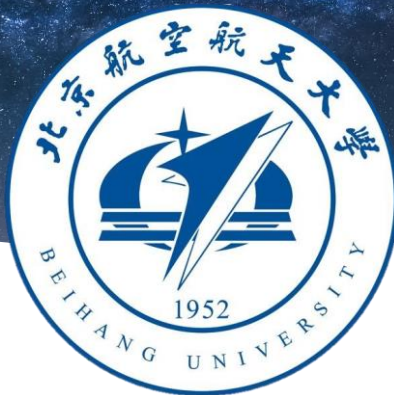


## 总结

- 全局轨迹**分段设计**：行星际转移、地月空间内转移；边界拼接方法；
- 带**深空机动**的**确定匹配引力辅助**优化方法，**拓展转移窗口**；
- 地月空间限制性四体问题下低能逃逸与捕获设计
  - **时间—相位解耦优化**
  - **DRO相位调节**机动
- 动态规划思想下的**任务筛选**与**飞船数量规划**。

## 改进

- 搜索、优化、筛选的参数取值；
- 地火转移阶段深空机动、金星借力的使用；
- 理论上给出辅助设计月球借力、WSB型转移的定性定量准则。



# **请各位专家批评指正**

## **BUAA-CASIC团队**

**团队成员：陆鹏飞 崔书豪 白雪 熊梓岑 陈勇杰**

**指导教师：王悦 赵书阁 徐明 钟睿 李小玉**