

第四届全国空间轨道设计竞赛题目： 太阳系小天体探测飞行轨道优化设计

1 探测任务描述

1.1 任务概述

探测器将于 2015 年 1 月 1 日 ~2025 年 12 月 31 日之间任意时刻从地球出发, 选取太阳系若干小天体开展多种形式探测, 探测任务总时间不超过 15 年 (5478.75 天). 小天体探测目标分为近地小行星、主带小行星、“大”小行星、彗星 4 类; 探测类型分为交会、飞越、撞击、取样返回 4 种. 探测器飞行过程中可在任意时刻利用行星引力辅助, 飞行过程中探测器与太阳的距离不能小于 0.2 倍天文单位 (0.2AU), 探测任务结束时探测器剩余质量不能小于 500 kg. 探测器飞行轨道只受太阳引力影响, 不考虑行星与小天体引力 (行星引力辅助除外). 根据探测任务所包含的探测目标与探测类型, 飞行轨道设计结果将获得相应的得分, 并以此作为评价标准.

1.2 探测目标与探测类型

小天体探测目标分为以下 4 类 (小天体星历以文本文件形式给出):

(1) 近地小行星, 包括 1570 颗目标, 把星历由文件 asteroid_nea.txt 给出

(2) 主带小行星, 包括 2065 颗目标, 星历由文件 asteroid_mb.txt 给出

(3) “大”小行星, 包括 11 颗直径大于 250 km 的小行星, 星历由文件 asteroid_large.txt 给出

(4) 彗星, 包括 653 颗目标, 星历由文件 comet.txt 给出

探测任务中的所有探测目标不得重复, 同一小天体目标只能有 1 种探测类型. 小天体探测类型描述如下:

(1) 交会探测

探测器与小天体交会, 交会后在小天体驻留至少 30 天, 每次交会可释放 1 台 25 kg 探测设备 (不回收, 也可以不释放探测设备). 探测器最多可携带 2 台探测设备. 对于同一小天体目标, 探测器只能释放 1 台探测设备. 无论是否释放探测设备, 同一小天体目标只能交会 1 次, 同一类探测目标的交会次数不超过 2 次. 因此, 交会探测最多有 8 次机会.

(2) 飞越探测

探测器飞越小天体, 飞越时与小天体相对速度不大于 10 km/s. 同一小天体目标只能飞越 1 次. 同一类探测目标的连续飞越次数不超过 2 次 (连续飞越 2 颗同一类探测目标后, 下一次飞越必须是不同类型探测目标, 不考虑飞越探测之间可能存在的其它探测类型), 总飞越次数没有限制.

(3) 撞击探测

探测器在飞越小天体时刻释放撞击器实现小天体撞击. 探测器最多携带 2 枚撞击器, 撞击器质量为 50 kg/枚. 撞击

速度 (探测器与小天体的相对速度) 不小于 20 km/s. 同一小天体目标只能被撞击 1 次, 同一类探测目标的撞击次数不超过 1 次. 因此, 撞击探测最多有 2 次机会.

(4) 取样返回

探测器与小天体交会可进行取样 (无论是否释放探测设备), 样品置于探测器所携带的返回器中 (返回器的质量为 25kg/枚). 此后探测器返回地球时可释放返回器从而回收样品, 返回时与地球的相对速度不大于 5 km/s. 探测器最多可携带 2 枚返回器, 每次返回地球时可以释放 1 枚返回器, 也可以同时释放 2 枚返回器. 所有交会的小天体均可作为取样天体, 取样的小天体样品不计质量. 1 枚返回器获取的样品最多来自 3 颗交会小天体 (必须为返回器释放前的交会探测). 探测器释放返回器之后若还有后续飞行, 飞越地球表面的高度不大于 300 km (或地心飞越半径不大于 6 678 km, 此约束是返回器进入地球大气的条件), 在此情况下, 需考虑地球引力影响. 若飞越地球时不释放返回器, 则无此约束. 引力辅助 (地球或除天王星与海王星的其它行星), 采用无需消耗工质的速度脉冲近似, 行星星历由文件 planet.txt 给出.

2 探测器系统参数

2.1 运载发射

探测器由运载火箭发射从而直接逃逸地球引力, 探测器逃逸速度大小 (v_{∞}) 与初始质量 (m_0) 相关, 如表 1 所示. 设计结果只能取该 4 组值中任意 1 组. 逃逸速度方向没有限制.

表 1 逃逸速度与初始质量

$v_{\infty}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	m_0/kg
1.0	4 500
2.0	3 500
3.0	3 000
3.5	2 500

2.2 推进系统

(1) 电推进发动机比冲为恒定的 2 500 s, 电推进推力方向任意选取, 开关时刻与开关次数没有限制. 电推进推力幅值有两种模式:

模式 1: 在一个天文单位 (太阳 - 地球平均距离, AU) 处, 电推进发动机推力幅值为 $T_0 = 0.2N$, 设 r 为探测器与太阳的距离 (单位: AU), 电推进发动机的实际推力幅值为:

$$T = \begin{cases} 0.3N & (T_0/r^2) > 0.3N \\ T_0/r^2 & 0.015N \leq (T_0/r^2) \leq 0.3N \\ 0N & (T_0/r^2) < 0.015N \end{cases}$$

模式 2: $0N \leq T \leq 0.2N$, 不依赖于探测器与太阳的距离.

若采用电推进, 两种模式只能选择其中一种 (模式 1 为优先选用模式), 选择模式 2 的设计结果排在所有选择模式 1 的有效设计结果之后。

(2) 化学推进比冲为 350 s, 每次推进过程近似为一个速度脉冲, 速度脉冲大小和方向任意选取, 施加速度脉冲的时间间隔没有限制。

探测器可单独采用电推进或化学推进, 也可以采用电推进/化学推进混合形式, 即混合利用连续小推力与速度脉冲。若采用混合推进形式, 电推进两种模式也只能选其一 (模式 1 仍为优先选用模式, 选择模式 2 的设计结果排在所有选择模式 1 的有效设计结果之后)。电推进或化学推进的使用时序、时间间隔均无限制。

2.3 探测器质量分配

探测器的质量分配情况如下:

$$m_{SC} + m_{PL} = m_0 - k \cdot m_{FUEL} - n_E \cdot m_{ENTRY} - n_{EX} \cdot m_{EXP} - n_I \cdot m_{IMP}$$

m_0 为探测器初始质量, 与逃逸速度相关 (见表 1); m_{FUEL} 为电推进/化学推进消耗工质质量总和, $k = 1.1$ (考虑工质储罐质量); m_{ENTRY} 为返回器质量, 25 kg/枚, $0 \leq n_E \leq 2$; m_{EXP} 为探测设备质量, 25 kg/台, $0 \leq n_{EX} \leq 2$; m_{IMP} 为撞击器质量, 50 kg/枚, $0 \leq n_I \leq 2$; $m_{SC} + m_{PL}$ 为卫星平台质量 + 有效载荷质量, 不小于 500 kg。

3 设计结果评价标准

设计结果中的每次探测均获得相应得分, 按照不同探测目标与探测类型, 每次探测得分见表 2。

表 2 探测得分表

探测目标	探测类型			
	交会探测 + 探测设备	交会探测 无探测设备	撞击探测	飞越探测
近地小行星	8a	6a	6b	1c
主带小行星	10a	8a	8b	1c
“大”小行星	N/A	10a	10b	2c
彗星	N/A	12a	12b	2c

表 2 中的 a, b, c 为得分的加权系数, 定义如下:

$$a = \begin{cases} 0, & T_{stay} < 30 \text{ 天} \\ 1 + (T_{stay} - 30)/300, & 30 \text{ 天} \leq T_{stay} \leq 330 \text{ 天} \\ 2, & T_{stay} > 330 \text{ 天} \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} 0, & v_{imp} < 20 \text{ km/s} \\ 1 + (v_{imp} - 20)/150, & 20 \text{ km/s} \leq v_{imp} \leq 170 \text{ km/s} \\ 2, & v_{imp} > 170 \text{ km/s} \end{cases}$$

$$c = \begin{cases} 0, & v_{flyby} > 10 \text{ km/s} \\ 1 + (10 v_{flyby})/10, & v_{flyby} \leq 10 \text{ km/s} \end{cases}$$

上述定义中, T_{stay} 为小天体驻留时间 (单位: 天), 即交会小天体时刻与飞离小天体时刻之间的时间段; v_{imp} 为小天体撞

击速度 (单位: km/s), v_{flyby} 为飞越小天体相对速度 (单位: km/s)。 v_{imp} 与 v_{flyby} 的定义如下

$$v_{imp} = \|\mathbf{v}_{sc}(t_{imp}) - \mathbf{v}_{body}(t_{imp})\|$$

$$v_{flyby} = \|\mathbf{v}_{sc}(t_{flyby}) - \mathbf{v}_{body}(t_{flyby})\|$$

式中, t_{imp} 为小天体撞击时刻, $\mathbf{v}_{sc}(t_{imp})$ 为 t_{imp} 时刻探测器速度矢量, $\mathbf{v}_{body}(t_{imp})$ 为 t_{imp} 时刻小天体速度矢量; t_{flyby} 为小天体飞越时刻, $\mathbf{v}_{sc}(t_{flyby})$ 为 t_{flyby} 时刻探测器速度矢量, $\mathbf{v}_{body}(t_{flyby})$ 为 t_{flyby} 时刻小天体速度矢量; $\|\cdot\|$ 表示矢量求模。若 $v_{flyby} = 0$ 但保持不到 30 天, 按照飞越探测计分 (至少计 2 分); 若 $v_{flyby} = 0$ 且保持 30 天以上, 可按照交会探测计分 (若超过 8 次交会探测, 仍按照飞越探测计分)。

若探测器成功实现取样返回, 取样返回所得分数为相应取样目标的交会探测所得分数 (实际上为相应交会探测所得分数加倍计算, 包括释放与不释放探测设备两种类型)。1 枚返回器的取样目标不能超过 3 个, 取样目标总共不超过 6 个。

设探测器总共探测了 n 颗小天体, 每次探测的得分计为 α_i ; 设探测器总共成功取样了 m 颗小天体 ($m \leq 6$), 每个取样目标得分为 β_j ; 设计结果的最终得分为:

$$J = \text{INT} \left(\sum_{i=1, n} \alpha_i + \sum_{j=1, m} \beta_j \right), \text{INT 为四舍五入取整}$$

设计结果性能指标为最终得分最多, 即 J 最大化; 若得分相同, 探测任务总时间短者为优。如 3.2 节所述, 若采用电推进 (无论是单独使用还是混合使用), 两种模式只能选择其中一种, 选择模式 2 的设计结果排在所有选择模式 1 的有效设计结果之后。

若设计结果违反任务约束条件, 计分规则如下:

(1) 所有探测目标不得重复, 且同一目标只能有一种探测类型。若发生重复, 只计发生时间最早的探测得分, 后续重复探测均不计分。

(2) 针对同一类探测目标, 交会次数不超过 2 次, 连续飞越次数不超过 2 次, 撞击次数不超过 1 次。超过 8 次的交会探测可按照飞越探测计分。若超过规定次数, 按发生的时间顺序排列, 超过规定次数的多余探测不计分, 也不计对其取样返回的分数。

(3) 若探测器取样返回地球时与地球的相对速度大于 5 km/s, 认为返回器返回失败。若探测器还有后续飞行, 地球飞越高度大于 300 km (或地心飞越半径大于 6 678 km), 也认为返回器返回失败。返回失败的返回器取样目标对应的交会探测分数不加倍计算。

(4) 若探测器在飞行过程中与太阳的距离小于 0.2AU, 其首次发生时刻及之后的探测均不计分, 且认为该发生时刻任务结束; 飞行过程中 $m_{SC} + m_{PL}$ 小于 500 kg 的发生时刻及之后的探测均不计分, 且认为该发生时刻任务结束。

(5) 其它未能说明的约束所引出的计分问题由竞赛组委会进行最终仲裁。