



嫦娥二号卫星飞越探测小行星的目标选择

乔栋^{①②*}, 黄江川^③, 崔平远^{①②}, 饶炜^④, 姜晓军^⑤, 孟林智^④, 黄昊^④, 黄晓峰^④

① 飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081;

② 北京理工大学宇航学院深空探测技术研究所, 北京 100081;

③ 中国空间技术研究院, 北京 100094;

④ 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

⑤ 中国科学院国家天文台, 北京 100012

* E-mail: qiaodong@bit.edu.cn

收稿日期: 2013-01-25; 接受日期: 2013-03-02

国家中长期科技发展规划重大专项、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2012CB720000)和国家自然科学基金(批准号: 11102020)资助项目

摘要 嫦娥二号卫星成功实现日-地拉格朗日 L2 点的飞行探测, 圆满完成多项科学探测和工程试验任务, 计划开展以小行星为背景的飞向更远深空再拓展试验任务. 本文针对该任务的目标选择问题, 基于测控约束、时间约束、推进剂约束及目标星物理特性, 提出了一套满足任务约束的小天体探测目标选择策略. 首先, 基于小行星的轨道特性及高精度递推模型, 筛选出满足测控与通信约束的潜在目标星, 根据卫星在轨寿命的时间约束, 进而划定可选目标星的范围. 然后, 基于嫦娥二号卫星飞越探测成像约束、可选目标星的物理特性及观测定轨精度, 确定潜在备选目标星; 最后, 基于日-地-月系统转移轨道两点边值问题的求解, 分析备选目标星飞越探测的机会与速度增量需求, 得到嫦娥二号再拓展任务飞越探测的目标小行星 4179 Toutatis. 2012 年 12 月 13 日 16:30, 嫦娥二号卫星成功飞越 4179 Toutatis 小行星, 获得大量高质量图像, 从而验证了探测目标选择策略的正确性.

关键词

嫦娥二号
目标选择
小行星
飞越探测

嫦娥二号卫星作为探月工程二期的先导星, 于 2010 年 10 月 1 日在西昌卫星发射中心成功发射. 在圆满完成月球探测任务后, 于 2011 年 6 月 9 日从月球环绕轨道变轨飞向日-地拉格朗日 L2 点附近的 Lissajous 轨道, 2011 年 8 月 25 日捕获入轨, 在目标 Lissajous 轨道飞行 200 余天, 完成了多项科学探测和工程试验任务^[1]. 鉴于卫星飞行状态良好, 工程总体决定开展以小行星为背景的飞向更远深空的再拓展试验任务. 本文主要针对该任务的目标选择问题, 提出了一套满足任务约束的小行星探测目标选择策略.

小行星作为太阳系的重要成员, 普遍被认为是

太阳系演化过程中的残余物质. 目前已发现的小行星约 70 多万颗, 正式编号的已超过 30 万颗, 而且随着观测技术和手段的提高, 该数目还在不断增长. 根据轨道特性和分布情况, 小行星可分为近地小行星 (near earth asteroids)^[2, 3]、主带小行星 (main-belt asteroids)^[4]、特洛伊族小行星 (Trojans/Greeks asteroids)^[5]、柯伊伯带小行星 (Kuiper-belt asteroids)^[6] 等多个群落. 在这些群落中, 近地小行星的轨道许多会穿越地球轨道, 给地球的安全带来潜在的威胁, 因而得到了广泛的关注. 此外, 近地小行星还普遍被认为是主带小行星或彗星的碎片、内核经过长期的动力

学演化而形成的,可能含有太阳系演化的重要信息.因此,探测近地小行星对于了解太阳系的起源、演变历程和现状,进一步认识地球环境的形成与演变过程以及探索生命起源等具有重要的意义.

对于嫦娥二号卫星,在圆满完成月球探测任务及飞向日-地拉格朗日 L2 点探测任务之后所剩推进剂极为有限,而且卫星设计评估寿命 2~3 年,在轨飞行已超过 20 个月,若继续长时间深空飞行,将对卫星可靠性是严峻考验.同时,由于我国大型深空测控站 2012 年 10 月前尚无法提供深空远距离测控能力的支持^[7].

针对这些问题,本文基于测控约束、速度增量约束及目标星物理特性等,提出了一套满足任务约束的小行星探测目标选择策略.该策略首先基于不同群落小行星的轨道特征及高精度小行星轨道递推动力学模型,并结合嫦娥二号卫星在轨寿命时间约束,筛选出满足测控与通信约束的潜在目标星;然后,根据卫星飞越探测成像约束及潜在目标星的轨道和物理特性,确定出嫦娥二号再拓展试验任务的备选目标;最后,基于日-地-月系统转移轨道两点边值问题的求解及飞越探测目标的速度增量需求,得到嫦娥二号再拓展任务飞越探测的目标小行星.

1 嫦娥二号飞越探测小行星目标的初选

嫦娥二号飞越探测小行星目标的初选主要从两个方面展开:1) 测控与通信约束的分析;2) 小行星的轨道特征.

1.1 嫦娥二号测控与通信约束分析

从测控角度分析,嫦娥二号卫星进行更远距离飞行探测,主要受测控与通信距离的制约.根据嫦娥二号在日-地拉格朗日 L2 点附近的 Lissajous 轨道(距离地球约 170 万千米)飞行条件下测控下行状态,具有 35 m 天线的测控站, S 频段测控全向下行可支持约 1200 万千米; S 频段测控定向下行可支持约 3000 万千米; X 频段测控可支持约 1300 万千米,而具有 64 m 天线的测控站, S 频段测控全向下行可支持约 2000 万千米; S 频段测控定向下行可支持约 5000 万千米; X 频段测控可支持约 2100 万千米.

从通信数传的角度分析,根据嫦娥二号在日-地拉格朗日 L2 点附近的 Lissajous 轨道(距离地球约 170

万千米)飞行的状态,若码速率采用 750 kbps,则具有 50 m 天线的测控站可支持约 240 万千米;若码速率采用 23.4375 bps,则具有 40 m 的测控站可支持约 1200 万千米;具有 50 m 天线的测控站可支持约 1500 万千米,而具有 64 m 天线的测控站可支持约 2500 万千米.

根据以上分析,嫦娥二号若执行飞越小行星探测任务,则飞越时小行星距离地球应小于 1500 万千米,且飞越时间在 2012 年 10 月后才能提供支持.

1.2 小行星轨道特征分析

目前已发现的 70 多万颗小行星主要集中在近地、主带、特洛伊族、柯伊柏带,其中多数近地小行星的轨道会穿越地球的轨道;主带小行星的轨道介于火星轨道和木星轨道之间,大约距离太阳 2~4 个天文单位(AU,即 $1 \text{ AU}=149597870.691 \text{ km}$)这也是小行星密集的区域;特洛伊族小行星主要聚集在太阳-木星的 L4/L5 点附近;柯伊柏带小行星主要分布在海王星轨道外侧.

近地小行星距离地球较近,是嫦娥二号飞越目标选择的主要小行星群落.根据轨道半长轴 a , 近日点距离 q 和远日点距离 Q , 近地小行星可分为 4 种类型^[8,9]: 1) Aten 型,其轨道半长轴小于 1 AU,且穿越地球轨道,即 $a < 1.0 \text{ AU}$ 且 $Q > 0.983 \text{ AU}$ (0.983 AU 为地球轨道的近日点距离); 2) Apollo 型,其轨道半长轴大于 1AU,且穿越地球轨道,即 $a > 1.0 \text{ AU}$ 且 $q < 1.017 \text{ AU}$ (1.017 AU 为地球轨道的远日点距离); 3) Amor 型,其轨道在地球轨道的外侧,近日点距离 q 大于地球轨道的远日点距离(1.017 AU)且小于 1.3 AU,即 $1.017 \text{ AU} < q < 1.3 \text{ AU}$; 4) Atira 型或 Apohele 型,其轨道在地球轨道的内侧,远日点距离 Q 小于地球轨道的近日点距离(0.983 AU),即 $Q < 0.983 \text{ AU}$. 这里值得注意的是 Aten 型和 Apollo 型的小行星轨道会穿越地球轨道,从而使得它们产生撞击地球的威胁,而 Amor 型和 Atira 型虽然不穿越地球轨道,但有时可能距离地球非常近.目前发现的 9441 颗近地小行星中, Aten 型有 742 颗, Amor 型有 3569 颗, Apollo 型有 5118 颗, Atira 型有 12 颗.

1.3 小行星轨道递推与目标初选

根据以上分析,选取近地小行星,进行轨道递推,搜索满足 2012 年 10 月~2013 年 6 月与地球最近距离

小于 1500 万千米的目标. 小行星的星历采用美国 JPL 公布的观测定轨星历. 轨道递推的动力学模型为

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mathbf{r}}{r^3} - \sum_{i=1}^{11} \mu_i \left(\frac{\mathbf{A}_i}{\Delta_i^3} + \frac{\mathbf{r}_i}{r_i^3} \right)_{PN}, \quad i = 1, 2, \dots, 11, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{A}_i = \mathbf{r} - \mathbf{r}_i$, $\mathbf{r}_i$ 为积分过程中摄动天体的位置矢量, 由 DE405 行星星历得到, 摄动天体主要考虑八大行星、月球、冥王星及谷神星. 递推算法选择龙格库塔 78 法. 递推时间为观测定轨星历的历元时刻至 2013 年 6 月 30 日.

递推后, 满足测控与通信约束和时间约束的目标有 51 颗, 其中 2012 年 10 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日期间, 距离地球小于 500 万千米的目标有 7 颗, 如表 1 所示.

在 2012 年 10 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日期间距离地球大于 500 万千米且小于 1000 万千米的目标有 22 颗, 如表 2 所示.

在 2012 年 10 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日期间距离地球大于 1000 万千米且小于 1500 万千米的目标有 22 颗, 如表 3 所示.

2 基于嫦娥二号成像约束及小行星物理特性的选择目标

根据嫦娥二号卫星再拓展试验任务的要求, 综合考虑星载各相机的性能指标, 选择星上配置的太阳翼监视相机作为嫦娥二号飞越探测小行星的主要载荷^[10]. 考虑到成像质量, 任务要求飞越的目标小行星直径大于 1 km, 且轨道参数确定, 即有明确的编号.

基于以上约束, 探测目标的进一步选择主要从

表 1 距离地球小于 500 万千米的目标(小于 0.03342 AU)

序号	小行星名称	距离地球最近的时间 (年/月/日)	最近的距离 (AU)
1	2008 UU95	2012/10/11	0.02012
2	2010 JK1	2012/11/25	0.02373
3	2009 BS5	2012/12/11	0.02141
4	2012 DA14	2013/02/05	0.00031
5	2010 GM23	2013/04/11	0.02813
6	2009 FE	2013/06/04	0.02434
7	2010 NY65	2013/06/24	0.02650

表 2 距离地球大于 500 万千米且小于 1000 万千米的目标(小于 0.06685 AU, 大于 0.03342 AU)

序号	小行星名称	距离地球最近的时间 (年/月/日)	最近的距离 (AU)
1	2007 PA8	2012/11/05	0.04329
2	1999 SF10	2012/11/09	0.03496
3	2009 WB105	2012/11/25	0.04024
4	1994 XD	2012/11/27	0.05184
5	Toutatis	2012/12/12	0.04633
6	2010 BB	2012/12/26	0.05536
7	2003 UC20	2012/12/29	0.06593
8	2002 AY1	2013/01/07	0.03814
9	2009 WD54	2013/01/15	0.06627
10	2011 BY10	2013/01/28	0.05009
11	2010 LK34	2013/01/31	0.06513
12	2011 EN51	2013/02/26	0.05088
13	1998 DK36	2013/03/06	0.05867
14	2005 ES70	2013/03/14	0.05688
15	2011 EE51	2013/03/16	0.05414
16	2008 SE85	2013/03/22	0.04873
17	2003 FY6	2013/03/23	0.05391
18	2005 NZ6	2013/04/29	0.06404
19	1988 TA	2013/05/10	0.03357
20	1998 QE2	2013/05/31	0.03917
21	2002 LT24	2013/06/25	0.05921
22	2007 RQ17	2013/06/28	0.03575

表 3 距离地球大于 1000 万千米且小于 1500 万千米的目标(小于 0.10027 AU, 大于 0.06685 AU)

序号	小行星名称	距离地球最近的时间 (年/月/日)	最近的距离 (AU)
1	2004 RX10	2012/10/15	0.08185
2	1998 ST49	2012/10/18	0.07368
3	2008 CT1	2012/10/22	0.06785
4	1991 VE	2012/10/26	0.08737
5	2000 EA14	2012/10/29	0.09956
6	2009 SB15	2012/11/03	0.07770
7	2011 EL51	2012/11/04	0.08334
8	2008 UA92	2012/11/16	0.09021
9	1996 AW1	2012/11/24	0.06735
10	Apophis	2013/01/09	0.09666
11	2011 TO	2013/01/21	0.08653
12	2003 BN4	2013/02/04	0.07133
13	2008 DG17	2013/02/16	0.09371
14	2009 SC15	2013/03/13	0.08118
15	2008 EY5	2013/03/20	0.08324
16	2010 SE	2013/03/20	0.07206
17	2008 EG9	2013/03/21	0.08477
18	2011 SC25	2013/04/07	0.07602
19	2009 SQ104	2013/04/22	0.07137
20	2010 LF14	2013/05/18	0.09022
21	2011 BM45	2013/06/02	0.07413
22	2004 KH17	2013/06/03	0.09787

两个方面展开: 1) 绝对星等与小行星直径的分析;
2) 基于小行星直径与目标编号的筛选.

2.1 绝对星等与小行星直径的分析

如果绝对星等 H 和反照率 p_v 给定, 则小行星的直径可由如下关系估算:

$$D = 1329 \times 10^{-H/5} p_v^{-1/2}. \quad (2)$$

由(2)式可以看出绝对星等的偏差和反照率的不确定度都可能使得小行星直径的估算出现较大的误差. 近地小行星的这些参数可参见文献[11].

根据以上分析, 2012 年 10 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日期间, 距离地球小于 500 万千米目标的绝对星等和直径, 如表 4 所示.

在 2012 年 10 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日期间距离地球大于 500 万千米且小于 1000 万千米目标的绝对星等和直径, 如表 5 所示.

在 2012 年 10 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日期间距离地球大于 1000 万千米且小于 1500 万千米目标的绝对星等和直径, 如表 6 所示.

2.2 基于小行星直径与目标编号的筛选

根据成像要求小行星尺寸大于 1 km, 且探测目标有明确的编号, 则:

1) 表 4 中最大直径的小行星为 2009 FE, 其直径约为 150~350 m, 且无明确的小行星编号, 不能满足任务的要求;

2) 表 5 中直径接近或超过 1 km 的目标有 6 颗, 分别为 2007 PA8, 1994 XD, Toutatis, 2003UC20, 2005NZ6, 1998QE2. 有编号的小行星有 5 颗, 分别为 214869, 4179, 242643, 285263 和 293726, 同时满足这两项约束的目标有 4 颗, 如表 7 所示.

表 4 距离地球小于 500 万千米目标的绝对星等与直径

序号	小行星名称	轨道类型	绝对星等	直径 (m)
1	2008 UU95	Apollo	23.40	60~140
2	2010 JK1	Apollo	24.40	30~80
3	2009 BS5	Apollo	27.40	0~20
4	2012 DA14	Apollo	24.40	30~80
5	2010 GM23	Apollo	24.70	30~70
6	2009 FE	Apollo	21.40	150~350
7	2010 NY65	Aten	21.70	130~300

注: 绝对星等和直径估算参见 <http://earn.dlr.de/nea/database.htm>

表 5 距离地球大于 500 万千米且小于 1000 万千米目标的绝对星等与直径

序号	小行星名称	轨道类型	绝对星等	直径
1	2007 PA8 (214869)	Apollo	16.47	1.6 km
2	1999 SF10	Apollo	24.00	0.06 km
3	2009 WB105	Aten	23.30	60~140 m
4	1994 XD	Apollo	19.10	0.5~1.0 km
5	Toutatis (4179)	Apollo	15.30	2.8 km
6	2010 BB	Aten	20.30	260~580 m
7	2003 UC20	Aten	18.10	0.7~1.6 km
8	2002 AY1	Aten	20.80	200~460 m
9	2009 WD54	Aten	28.50	0~10 m
10	2011 BY10	Apollo	27.10	10~20 m
11	2010 LK34	Apollo	21.90	120~280 m
12	2011 EN51	Apollo	22.20	100~240 m
13	1998 DK36	Aten	25.00	20~60 m
14	2005 ES70	Aten	23.60	50~120 m
15	2011 EE51	Apollo	24.30	40~90 m
16	2008 SE85	Apollo	19.50	370~840 m
17	2003 FY6	Aten	22.40	90~220 m
18	2005 NZ6 (242643)	Apollo	17.60	0.9~2.0 km
19	1988 TA	Apollo	20.90	400 m
20	1998 QE2 (285263)	Amor	16.50	2.75 km
21	2002 LT24	Aten	22.00	110~260 m
22	2007 RQ17 (293726)	Apollo	22.60	90~200 m

注: 绝对星等和直径估算参见 <http://earn.dlr.de/nea/database.htm>

表 6 距离地球大于 1000 万千米且小于 1500 万千米目标的绝对星等与直径

序号	小行星名称	轨道类型	绝对星等	直径
1	2004 RX10	Aten	21.30	160~370 m
2	1998 ST49 (136993)	Apollo	17.81	900 m
3	2008 CT1	Aten	27.70	0~10 m
4	1991 VE (162004)	Aten	18.20	0.7~1.5 km
5	2000 EA14	Apollo	21.00	190~420 m
6	2009 SB15	Apollo	20.60	220~510 m
7	2011 EL51	Apollo	21.90	120~280 m
8	2008 UA92	Amor	27.40	0~20 m
9	1996 AW1	Apollo	19.40	390~880 m
10	Apophis (99942)	Aten	19.70	270 m
11	2011 TO	Aten	26.30	10~30 m
12	2003 BN4	Amor	24.40	30~80 m
13	2008 DG17	Amor	19.80	330~730 m
14	2009 SC15	Amor	21.40	150~350 m
15	2008 EY5 (325102)	Aten	20.10	280~640 m
16	2010 SE	Apollo	24.30	40~90 m
17	2008 EG9	Apollo	25.20	20~60 m
18	2011 SC25	Apollo	25.20	20~60 m
19	2009 SQ104	Apollo	20.80	200~460 m
20	2010 LF14	Amor	24.00	40~100 m
21	2011 BM45	Apollo	21.40	150~350 m
22	2004 KH17	Aten	22.00	110~260 m

注: 绝对星等和直径估算参见 <http://earn.dlr.de/nea/database.htm>

表 7 距离地球大于 500 万千米且小于 1000 万千米, 有确定编号同时直径接近或大于 1 km 的目标

序号	小行星名称	轨道类型	绝对星等	直径 (km)
1	(214869)007 PA8	Apollo	16.47	1.6
2	(4179)Toutatis	Apollo	15.30	2.8
3	(242643)2005 NZ6	Apollo	17.60	0.9~2.0
4	(285263)1998 QE2	Amor	16.50	2.75

3) 表 6 中直径接近或超过 1 km 的目标有 2 颗, 分别为 1998 ST49, 1991 VE. 确定编号的小行星有 4 颗, 分别为 136993, 162004, 99942 和 325102, 同时满足这两项约束的目标有 2 颗, 如表 8 所示.

根据以上分析, 确定编号其直径接近或大于 1 km, 同时在 2012 年 10 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日期间距离地球小于 1500 万千米的小行星有 6 颗, 如表 9 所示.

反照率是决定成像质量的一个重要参数, 表 9 中 6 颗目标的反照率, 如表 10 所示.

根据以上筛选原则, 得到的 6 颗潜在备选目标中, 在 2012 年 10 月 1 日~2013 年 6 月 30 日, 距离地球小于

表 8 距离地球大于 1000 万千米且小于 1500 万千米, 有确定编号同时直径接近或大于 1 km 的目标

序号	小行星名称	轨道类型	绝对星等	直径 (km)
1	(136993)1998 ST49	Apollo	17.81	0.9
2	(162004)1991 VE	Aten	18.20	0.7~1.5

表 9 距离地球小于 1500 万千米, 有确定编号同时直径接近或大于 1 km 的目标

序号	小行星名称	轨道类型	绝对星等	直径 (km)
1	(214869)2007 PA8	Apollo	16.47	1.6
2	(4179)Toutatis	Apollo	15.30	2.8
3	(242643)2005 NZ6	Apollo	17.60	0.9~2.0
4	(285263)1998 QE2	Amor	16.50	2.75
5	(136993)1998 ST49	Apollo	17.81	0.9
6	(162004)1991 VE	Aten	18.20	0.7~1.5

表 10 潜在备选目标的反照率与光谱类型

序号	小行星名称	距离最近 (万千米)	反照率	直径 (km)
1	(4179)Toutatis	693.09	0.13	2.8
2	(136993)1998 ST49	1102.2	mh*	0.9
3	(285263)1998 QE2	585.97	0.06	2.75
4	(214869)2007 PA8	647.61	—	1.6
5	(242643)2005 NZ6	958.02	—	0.9~2.0
6	(162004)1991 VE	1307.03	—	0.7~1.5

*表示中等, 其反照率通常取值为 0.18

1000 万千米的有 4 颗, 分别为 (4179)Toutatis, (285263)1998QE2, (214869)2007PA8, (242643)2005NZ6; 大于 1000 万千米的 2 颗, 分别为 (136993)1998ST49, (162004)1991VE.

小行星 (136993)1998ST49 距离地球最近为 1102.2 万千米, 时间为 2012 年 10 月 18 日. 小行星 (162004)1991VE 距离地球最近为 1307.03 万千米, 时间为 2012 年 10 月 26 日. 根据任务计划和安排, 深空测控站于 2012 年 10 月中旬才能进行跟踪测试工作, 在此之前尚无法对飞越小行星任务提供支持. 因此, (136993)1998ST49 小行星和 (162004)1991VE 小行星暂被排除在备选飞越目标之列.

表 10 中剩余的 4 颗潜在备选目标, (214869)2007PA8 小行星距离地球最近为 647.61 万千米, 时间为 2012 年 11 月 5 日, 该时间距离大型深空站启用时间较近, 且反照率参数缺乏, 故暂排除在备选飞越目标之列.

(242643)2005NZ6 小行星距离地球最近为 958.02 万千米, 时间为 2013 年 4 月 29 日; (285263)1998QE2 小行星距离地球最近为 585.97 万千米, 时间为 2013 年 5 月 31 日. 这两颗星的反照率参数缺乏, 但由于有较为充足的时间开展观测, 故可暂作为潜在备选目标.

(4179)Toutatis 小行星距离地球最近为 693.09 万千米, 时间为 2012 年 12 月 12 日, 反照率参数为 0.13 较为明确, 其直径约为 2.8 km, 同时也把潜在备选目标中最大的小行星, 列为潜在备选目标.

2.3 基于嫦娥二号推进剂约束的目标选择

嫦娥二号 2011 年 8 月 25 日捕获进入日-地拉格朗日 L2 点 Lissajous 轨道. 截止 2011 年 9 月, 卫星剩余推进剂约 115 kg, 除去管道残余、推进剂估计误差及在 Lissajous 轨道的轨控所需速度增量等, 可用于再拓展任务的速度增量约为 120 m/s. 根据该约束对 3 颗潜在备选目标的飞越机会及所需速度增量进行分析, 并进一步筛选和确认飞越目标星. 这 3 颗目标的轨道根数如表 11 所示.

根据以上条件, 基于日-地-月系统求解两点边值问题, 分析嫦娥二号飞越机会及所需速度增量. 假设在 t_0 时刻卫星的状态为 $\mathbf{x}_0 = [\mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0]$, 若沿切向施加速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 使其从 Lissajous 轨道出发, 则可基于日、地、月、卫星四体星历动力学模型, 建立卫星飞越目

表 11 潜在备选目标的轨道根数(2012-09-29 12:00, 即 56200.0MJD)

轨道要素	(4179)Toutatis	(285263)1998 QE2	(242643)2005 NZ6
半长轴 a (AU)	2.52934	2.4215	1.83393
偏心率 e	0.62947	0.57094	0.86452
轨道倾角 i (°)	0.446	12.854	8.496
升交点赤经 Ω (°)	124.508	250.174	39.531
近心点角距 ω (°)	278.564	345.596	48.171
平近点角 M (°)	348.566	299.293	291.934

注: 轨道参数参见 <http://newton.dm.unipi.it/neodys>

标小行星时与小行星的距离 d_f 、飞行时间 t_f 和切向速度增量 Δv 之间的关系. 通过遍历算法或优化算法可得到飞越距离 d_f 最小的轨道初值^[12]. 基于此初值, 选用高精度星历轨道动力学模型, 通过二级微分修正法, 可得到满足两点边值的轨道参数^[13, 14].

由以上求解过程可得嫦娥二号飞越以上目标所需的速度增量及转移机会, 如表 12 所示.

根据嫦娥二号卫星所能提供的速度增量约束 (120 m/s) 并结合表 12 可以看出, (4179)Toutatis 可作为嫦娥二号再拓展任务飞越探测的目标小行星.

小行星(4179)Toutatis 是一颗 Apollo 型的近地小行星, 其轨道远日点接近木星轨道, 近日点处于地球轨道附近, 它的轨道和木星形成 3:1 的轨道共振, 和地球形成 1:4 的轨道共振. 由于轨道倾角非常小($i = 0.446^\circ$), 公转周期大约是 4 年($T = 1469.3$ d), 因此小行星(4179)Toutatis 频繁接近地球, 它接近地球时的距离最近达到 150 万千米. (4179)Toutatis 小行星最近一次靠近地球发生在 2008 年 11 月 9 日, 距离 750 万千米. 地面雷达观测 (4179)Toutatis 小行星直径约为 4.5 km×2.4 km×1.9 km. 嫦娥二号卫星与(4179)Toutatis 小行星的飞行轨道如图 1 所示.

3 结论

本文针对嫦娥二号飞越探测小行星的目标选择问题, 基于测控与通信约束、时间约束、成像约束及卫星推进剂约束等, 提出了一套满足任务约束的小天体探测目标选择策略. 首先, 基于飞越时测控与通

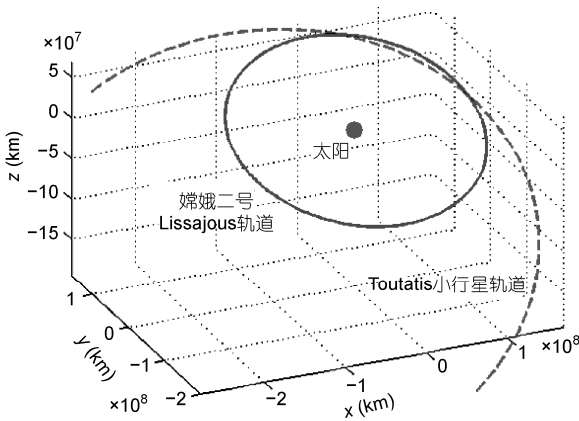


图 1 嫦娥二号卫星与(4179)Toutatis 小行星的轨道

信距离小于 1500 万千米的约束, 并结合小行星的轨道特征, 从近 70 万颗小行星中选取近地小行星群落, 通过高精度轨道递推筛选出 51 颗潜在目标星; 然后, 根据嫦娥二号卫星成像约束及小行星物理特性, 进而划定可选目标星的范围, 得到 3 颗潜在备选目标星; 最后, 基于多体系统转移轨道两点边值问题的求解, 分析潜在备选目标星飞越探测的机会与速度增量需求, 得到嫦娥二号再拓展任务飞越探测的目标小行星(4179)Toutatis.

2012 年 12 月 13 日 16:30, 嫦娥二号成功近距离飞越(4179)Toutatis 小行星, 获得大量高质量图像, 这是国际上首次实现对该小行星的近距离探测, 也是我国首次实现对小行星的飞越探测, 该任务的成功实施也验证了探测目标选择策略的正确性和有效性.

表 12 潜在备选目标的飞越机会与所需速度增量

飞越目标	离轨时间	飞越时间	所需速度增量 (m/s)
(4179)Toutatis	2012/06/07	2012/12/13	87.4
(285263)1998 QE2	2013/03/09	2013/05/31	377.4
(242643)2005 NZ6	2012/07/05	2013/05/04	59.9

参考文献

- 1 吴伟仁, 崔平远, 乔栋, 等. 嫦娥二号日地拉格朗日 L2 点探测轨道设计与实施. 科学通报, 2012, 57: 1987–1991
- 2 Schunova E, Granvik M, Jedicke R, et al. Searching for the first near-Earth object family. *Icarus*, 2012, 220: 1050–1063
- 3 Qiao D, Cui P Y, Cui H T. Proposal for a multiple-asteroid-flyby mission with sample return. *Adv Space Res*, 2012, 50: 327–333
- 4 Christou A A, Wiegert P. A population of main belt Asteroids co-orbiting with ceres and vesta. *Icarus*, 2012, 217: 27–42
- 5 Morbidelli A., Levison H F, Tsiganis K, et al. Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early solar system. *Nature*, 2005, 435: 462–465
- 6 Harold F L, Martin J D. From the kuiper belt to jupiter-family comets: The spatial distribution of ecliptic comets. *Icarus*, 1997, 127: 13–32
- 7 叶培建, 黄江川, 张廷新. 嫦娥二号卫星技术成就与中国深空探测展望. 中国科学: 技术科学, 2013, 43: 467–477
- 8 Brett G, Patrick M, Christiane F. The near-Earth object population. *Icarus*, 2000, 146: 176–189
- 9 Ettore P, Alessandro R, Giovanni B V. Basic targeting strategies for rendezvous and flyby missions to the near-Earth asteroids. *Planet Space Sci*, 2001, 49: 3–22
- 10 黄江川, 王晓磊, 孟林智, 等. 嫦娥二号卫星飞越 4179 小行星逼近策略及成像技术. 中国科学: 技术科学, 2013, 43: 478–486
- 11 Steven R C, Paul W C, Andrea M, et al. Quantifying the risk posed by potential Earth impacts. *Icarus*, 2002, 159: 423–432
- 12 乔栋, 黄江川, 崔平远, 等. 嫦娥二号卫星飞越 Toutatis 小行星转移轨道设计. 中国科学: 技术科学, 2013, 43: 487–492
- 13 Howell K C, Barden B T, Lo M W. Application of dynamical systems theory to trajectory design for a libration point mission. *J Astronaut Sci*, 1997, 45: 161–178
- 14 Belinda G, Marchand, K C, Howell. An improved corrections process for constrained trajectories design in the n-body problem. *J Spacecraft Rockets*, 2007, 44: 884–897