

星际探测借力飞行轨道的混合设计方法研究

乔 栋, 崔平远, 徐 瑞

(北京理工大学宇航学院深空探测技术研究所, 北京 100081)

摘 要:以金星借力探测火星为背景,针对传统借力飞行轨道设计方法中存在的问题,提出了一种星际探测借力飞行轨道的混合设计方法。该方法在分析借力天体特性的基础上,采用等高线图给出可能出现借力参数匹配的区域,提出“软匹配”策略进行轨道拼接,采用混合优化设计方法得到轨道优化设计参数,有效地解决了传统方法对一些满足约束条件转移轨道方案的遗漏问题。本文以2017-2018年金星借力探测火星为例给出了设计结果,设计参数与M. Okutsu给出的一致,同时还得到了该参数区域一个新的借力轨道转移方案。此外,本文还对2010-2018年采用金星借力探测火星的转移轨道进行了研究,给出了金星借力探测火星较好的设计参数区域,这些研究对于未来可能的火星探测任务的设计与规划具有重要的参考意义。

关键词:借力飞行;混合设计方法;火星探测;金星借力

中图分类号: A41

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2010)03-0655-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.03.005

0 引言

火星探测对于人类认识地球的长期演化等重大科学问题具有十分重要的意义。美国、俄罗斯等国家和地区已经开展了火星探测,随着我国月球探测工程的深入,中俄联合火星探测计划的开展,我国火星探测也将提上日程。

与传统的近地飞行任务不同,以火星等为目标深空探测任务通常需要巨大的发射能量。借力飞行技术(Gravity Assist 或 Swing-by)因可以有效降低星际探测任务,特别是远程星际探测任务所需的发射能量和总的速度增量,而引起了广泛的关注。

借力飞行技术源于十九世纪,Leverrier和Tisserand在行星与彗星轨道摄动方面的研究工作为借力飞行技术的发展奠定了基础^[1]。二十世纪五十年代,Battin就曾提出在无动力情况下,采用借力飞行使探测器返回地球的方案^[2]。此后,学者们对于借力飞行技术的研究主要集中在借力飞行轨道的设计及方案性能的分析方面^[3-6],给出了一些经典借力飞行方案,如金星-地球-地球^[7]借力,金星-地球-火星-地球借力^[8]等。在借力飞行轨道设计方面,Longuski J.等^[9-10]以火星和外行星为背景,提出

了基于 C_3 匹配的遍历式搜索设计方法,并开发了STOUR的相关模块。该方法目前已经广泛地应用于星际探测借力飞行轨道的方案设计中。Sims J.等^[11]基于STOUR分别研究了采用金星、火星和木星借力探测冥王星的轨道方案。此外,Vasile M.等^[12]将借力飞行轨道的设计问题归结为一个全局优化问题,采用基于系统分支策略的进化算法求解该问题。在国内,张旭辉等^[13]对无动力情形的金星借力进行了研究,分析了Tisserand准则与 C_3 匹配方法的统一性,并采用 C_3 匹配法对金星借力探测火星的轨道进行了仿真计算。

本文以金星借力探测火星为背景,首先分析了传统 C_3 匹配遍历搜索设计方法存在的问题,针对该问题提出一种星际探测借力飞行轨道的混合设计方法。该方法在对借力天体特性分析的基础上,基于等高线图给出借力参数设计的可行域,提出“软匹配”策略进行轨道拼接,采用全局与局部相结合的混合优化算法得到设计参数,有效地解决了传统方法对一些满足约束条件转移轨道方案的遗漏问题。以2017-2018年金星借力探测火星为例,验证了该方法的有效性。此外,本文还对2010-2018年采用金星借力探测火星的转移轨道进行了研究,给出了较

好的设计参数区域。这些研究对于未来火星探测任务的开展具有重要参考意义。

1 基于 C_3 匹配的遍历搜索设计方法

基于 C_3 匹配的遍历搜索设计方法是借力飞行轨道设计中的经典方法,该方法将借力飞行轨道的设计分成三步:(1) 初始转移轨道段的设计;(2) 潜在借力飞行轨道段的搜索;(3) 借力飞行轨道的拼接;

初始转移轨道段的设计可以通过等高线图来完成。根据等高线图,选择满足发射能量等约束条件的初始转移轨道段的参数。潜在借力飞行轨道段的搜索是将借力天体的轨道周期分成 n 等份,将起始点到各等份的时间作为飞行时间,求解相应的 Lambert 问题得到潜在借力飞行轨道段的参数。借力飞行轨道的拼接通常采用 C_3 匹配法(C_3 定义为双曲线超速的平方),即飞入借力天体影响球时的双曲线超速 V_{∞}^- 与飞出借力天体影响球时的双曲线超速 V_{∞}^+ 的量相等。

以金星借力探测火星为例,采用 C_3 匹配遍历搜索法设计其在 2017-2018 年的轨道方案。首先设计初始转移轨道段的参数。该参数可由 2017-2018 年从地球到金星的发射时逃逸双曲线超速等高线图得到,如图 1 所示。

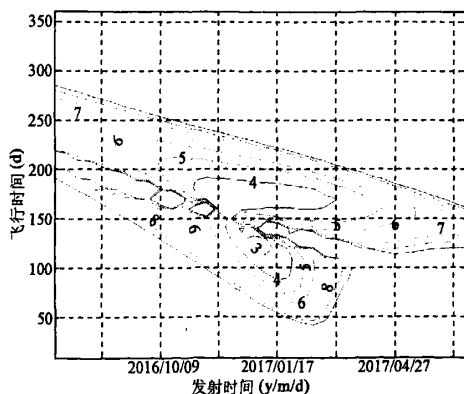


图1 2016-2017 地球-金星发射逃逸双曲线超速等高线图

Fig.1 Contour map of outgoing hyperbolic excess velocity for Earth-Venus in 2016-2017

由图 1 可以看出 2016-2017 年地球-金星转移发射能量 C_3 较小的区域:发射时间约为 2017 年 1 月,飞行时间约为 120 天,逃逸双曲线超速小于 3 km/s。

优化后可得:最小的发射逃逸双曲线超速为 2.67 km/s,对应地球发射日期为 2016 年 12 月 28 日,到达金星日期为 2017 年 5 月 10 日,飞入金星影响球时的双曲线超速为 3.89 km/s,金星借力探测火星 C_3 匹配误差 ($\Delta C_3 = |V_{\infty}^+ - V_{\infty}^-|$) 曲线,如图 2 所示。

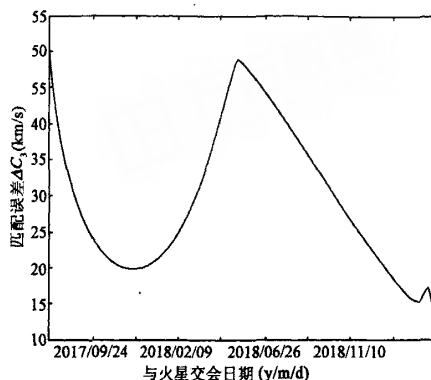


图2 金星借力探测火星 C_3 匹配误差曲线

Fig.2 C_3 curve of matching errors for exploring Mars via Venus gravity-assist

由图 2 可以看出对于 2017-2018 年从地球发射能量最小时,利用金星借力探测火星,没有可以匹配的机会(最小匹配误差大于 10.0 km/s)。这样必须重新进行初始轨道段参数的选择,然后进行匹配,不断尝试直到寻找到满足条件的解。

这里通过筛选确定探测器从地球发射日期为 2017 年 3 月 24 日,到达金星日期为 2017 年 9 月 9 日,发射逃逸双曲线超速为 4.439 km/s 时,存在可以借力匹配的机会,其 C_3 匹配误差曲线如图 3 所示。

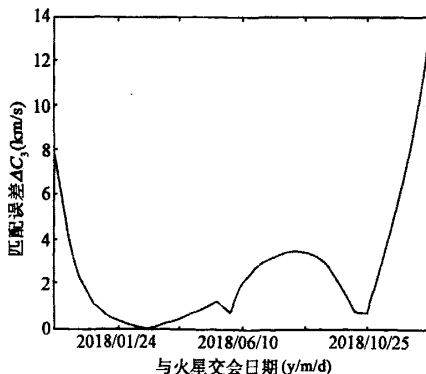


图3 金星借力 C_3 匹配误差曲线

Fig.3 C_3 curve of matching errors of Venus gravity-assist

由图 3 可以看出:在该时间段内有一次借力飞

行匹配的机会。采用牛顿迭代法可以求得借力匹配的参数,具体参数如表 1 所示。

表 1 2017–2018 年金星借力探测火星转移轨道设计结果
Table 1 Design results of transfer trajectory with Venus gravity-assist for exploring Mars Mission in 2017–2018

参数	本文工作	M. Okutsu ^[14]
T_L (年/月/日/时)	2017/03/24/1.20	2017/03/24/-
T_S (年/月/日/时)	2017/09/09/15.8	2017/09/09/-
T_A (年/月/日/时)	2018/03/08/22.8	2018/03/09/-
$V_{L\infty}$ (km/s)	4.439	4.43
$V_{S\infty}$ (km/s)	9.819	9.81
$V_{A\infty}$ (km/s)	6.018	5.98

表 1 中, T_L 表示从地球发射的时间, T_S 表示金星借力飞行的时间, T_A 表示到达火星的时间, $V_{L\infty}$ 、 $V_{S\infty}$ 和 $V_{A\infty}$ 分别表示探测器发射逃逸、借力飞行和到达火星时的双曲线超速。由表 1 可以看出本文设计结果与 M. Okutsu^[14] 采用 STOUR 的设计结果一致,对应的飞行轨迹如图 4 所示。

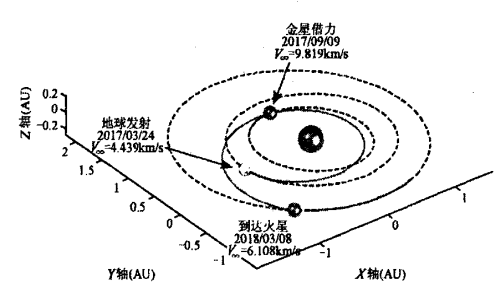


图 4 2017–2018 年金星借力探测火星的转移轨道
Fig.4 Flight path with Venus gravity-assist for exploring Mars mission in 2017–2018

2 基于混合法的借力飞行轨道设计方法

基于 C_3 匹配遍历搜索设计方法是解决星际探测借力飞行轨道设计问题的有效方法,但从该方法的设计与计算过程可以看出:该方法是在初始转移轨道段假设确定的基础上给出的,是否存在借力飞行匹配的机会主要取决于初始转移轨道段参数的假设或选取,在这样的假设条件下进行借力飞行轨道的设计,就不可避免地遗漏了一些合适的转移轨道方案。

针对以上问题,本节提出一种星际探测借力飞行轨道的混合设计方法。该方法通过对借力天体特性的分析,给出借力飞行高度与双曲线超速的变化关

系,采用等高线图给出借力飞行轨道设计参数选择的可行域,避免了对初始轨道段参数的假定,采用允许借力时增加深空机动和考虑借力飞行高度约束的“软匹配”策略解决了单纯 C_3 匹配方法容易遗漏一些满足约束条件转移轨道方案的问题,最后采用全局与局部相结合的混合优化算法寻找最优设计参数。

2.1 借力天体特性分析

这里定义借力飞行前后,探测器相对于中心引力体的速度变化量为 ΔV , 即

$$\Delta V = V^+ - V^- \tag{1}$$

根据借力飞行的基本原理,可得:

$$\Delta V = |V^+ - V^-| = |V_{\infty}^+ - V_{\infty}^-| = 2V_{\infty} \sin \frac{\delta}{2} \tag{2}$$

式中, V_{∞} 是 V_{∞} 的量(或称模), δ 为借力飞行的转角。由双曲线轨道的特性可得

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{1}{1 + (r_p/a)} \tag{3}$$

其中, r_p 和 a 分别是双曲线轨道的近心点半径和半长轴。根据双曲线轨道的能量方程,则有

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{1}{1 + (r_p V_{\infty}^2 / \mu_B)} \tag{4}$$

由(4)式可以讨论不同天体借力飞行时的一些轨道特性。这里以金星借力为例,讨论不同借力飞行高度的情况下,借力飞行时的双曲线超速与借力飞行转角之间的关系,如图 5 所示。

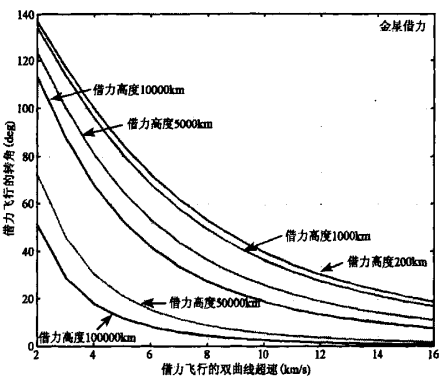


图 5 借力飞行时双曲线超速与转角之间的关系
Fig.5 Relations between hyperbolic excess velocity and turn angle in gravity assist

由图 5 可以看出:(1) 随着借力飞行高度的增加,借力天体对借力飞行转角的影响逐渐变小,例如,当借力时的双曲线超速为 10 km/s 时,若飞越高

度为 200 km, 则转角约为 40°, 飞越高度为 100000 km, 则转角小于 5°; (2) 随着借力时双曲线超速的增加, 借力天体对借力飞行转角的影响也逐渐变小, 例如, 当借力飞行高度为 200 km 时, 若借力双曲线超速为 4 km/s, 则转角可达到 100°, 若双曲线超速为 16 km/s, 则转角只有 20°。

由于金星借力飞入时的双曲线超速多数在 4 km/s 至 12 km/s 之间, 考虑到金星借力飞行的最小安全高度为 200 km, 则借力飞行转角的主要范围为 30°~100°。以上的这些讨论为借力飞行高度、飞入借力天体时的双曲线超速和借力飞行转角参数的选择提供了一个重要的范围和变化关系。

2.2 借力飞行设计参数选择

根据以上讨论, 这里选择金星借力飞行时的双曲线超速匹配范围为 4 km/s 至 12 km/s, 最小飞行高度为距离金星表面 200 km。探测器飞行的序列为地球-金星-火星, 考察 2010-2018 年采用金星借力探测火星可能出现的借力机会, 借力飞行参数匹配范围变化如图 6(a)、(b) 和 (c) 所示。

图 6(a)、(b) 和 (c) 所示为 2010 年 1 月-2018 年 12 月金星借力探测火星可能出现的借力参数匹配范围, 其中 x 轴为金星借力的时间, y 轴分别表示从地球到金星的飞行时间(左侧)和从金星到火星的飞行时间(右侧)。

这些可能的参数匹配区域总结如表 2 所示。

表 2 2010-2018 年金星借力探测火星可能的匹配区域
Table 2 The possible matching parameters fields for Mars exploring via Venus gravity-assist in 2010-2018

	T_s (年/月)	$T_{EV} \& T_{VM}$ (day)
1	2010 年 4 月-7 月	300-420
2	2011 年 2 月-5 月	100-240
3	2011 年 4 月-7 月	430-540
4	2012 年 1 月-4 月	240-380
5	2013 年 1 月-4 月	380-500
6	2013 年 10 月-2014 年 1 月	100-350
7	2014 年 12 月-2015 年 2 月	350-460
8	2015 年 9 月-12 月	110-300
9	2016 年 1 月-2 月	450-540
10	2016 年 9 月-11 月	280-420
11	2017 年 7 月-10 月	110-250
12	2017 年 9 月-12 月	420-540
13	2018 年 6 月-9 月	210-370

表 2 中 T_s 表示金星借力的时间, $T_{EV} \& T_{VM}$ 表示从地球到金星和从金星到火星的飞行时间。

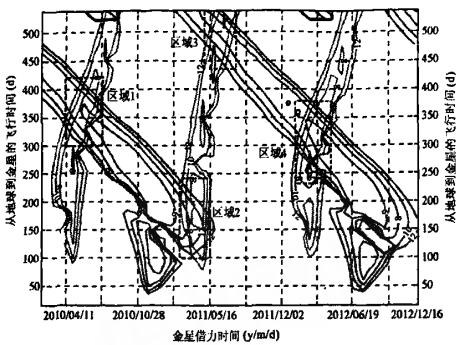


图 6(a) 金星借力探测火星借力参数匹配范围
(2010 年 1 月-2012 年 12 月)

Fig.6(a) The matching fields of gravity-assisted parameters for exploring Mars via Venus gravity assist (Jan. 2010-Dec.2012)

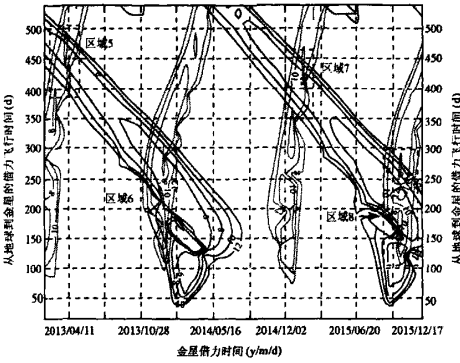


图 6(b) 金星借力探测火星借力参数匹配范围
(2013 年 1 月-2015 年 12 月)

Fig.6(b) The matching fields of gravity-assisted parameters for exploring Mars via Venus gravity assist (Jan. 2013-Dec.2015)

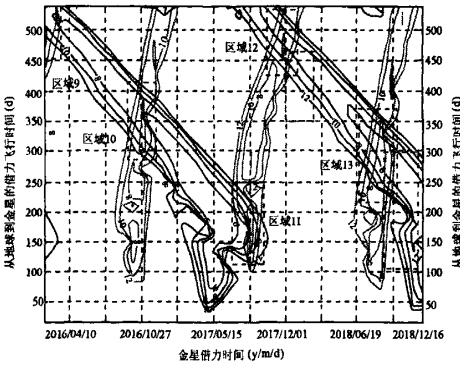


图 6(c) 金星借力探测火星借力参数匹配范围
(2016 年 1 月-2018 年 12 月)

Fig.6(c) The matching fields of gravity-assisted parameters for exploring Mars via Venus gravity assist (Jan. 2016-Dec.2018)

以上给出的是 2010 年-2018 年采用金星借力探测火星可能出现的借力参数匹配区域及相关参数变

化,具体的借力机会或方案还需进一步考察从地球的发射能量以及到达火星时的双曲线超速等约束。

2.3 借力飞行轨道参数的优化设计

借力飞行轨道的设计问题可以归结为一个非线性多约束多变量的搜索寻优问题。以上的分析和讨论已经给出了该问题可能出现解的参数选择区域。对于该问题的初始参数给出可通过群体搜索策略和群体中个体之间信息交换,不需要初值信息的全局性智能优化算法(例如遗传算法、进化算法、蚁群算法等)来完成,而精确优化设计与搜索可通过梯度下降法等得到。

2.3.1 问题描述

基于金星借力探测火星轨道设计参数优化的目标函数可以定义为:

$$J = (\sqrt{\|V_L - V_E\|^2 + v_{e\infty}^2} - v_{ep}) + (\sqrt{\|V_a - V_M\|^2 + v_{m\infty}^2} - v_{mp}) \in R \quad (5)$$

满足的约束条件为:

$$\begin{cases} \Omega_1 = |V_{\infty}^+ - V_{\infty}^-| < \epsilon \\ \Omega_2 = \frac{\mu_B}{V_{\infty}^2} \left(\frac{1}{\sin \delta / 2} - 1 \right) > R_{pmin} \end{cases} \quad (6)$$

其中, V_L 为探测器在日心引力场转移时的发射速度, V_E , $v_{e\infty}$ 和 v_{ep} 分别为发射时刻地球绕太阳的公转速度、探测器逃逸地球引力场所需的速度和探测器在停泊轨道上的运行速度; V_a 为探测器在日心引力场到达火星时的速度, V_M , $v_{m\infty}$ 和 v_{mp} 分别为火星绕太阳的公转速度、逃逸火星引力场所需的速度和探测器在火星绕飞轨道上的运行速度; V_{∞}^+ 和 V_{∞}^- 表示飞入和飞出借力天体影响球的双曲线超速; ϵ 为允许的匹配误差, R_{pmin} 为借力飞行时最小的飞越高度。该问题的自由变量为从地球的发射时间 T_L 、借力飞行的时间 T_s 和与火星的交会时间 T_A 。

借力飞行时采用“软匹配”策略,即在借力飞行匹配时,采用不等式约束 $|V_{\infty}^+ - V_{\infty}^-| < \epsilon$ 代替传统 C_3 匹配的等式约束 $|V_{\infty}^+| = |V_{\infty}^-|$ 或 $|V_{\infty}^+ - V_{\infty}^-| = 0$, 借力飞行的匹配误差 ϵ 为可在借力飞行时施加的深空机动。该匹配策略可将借力飞行从纯借力飞行(或称无动力借力飞行)推广到有动力借力飞行,从而增加了借力飞行可能匹配的机会。

2.3.2 问题优化的步骤

该问题的寻优过程归纳起来可以分为三步:

(1) 根据任务约束条件分析给出借力飞行轨道设计参数选取的可行域,避免盲目的穷举式搜索;(2) 基于“软匹配”策略,采用全局性智能搜索算法,在给定的设计参数选取可行域内搜索得到满足约束的初始设计参数;(3) 采用梯度下降法或序列二次规划算法优化得到借力飞行轨道的设计参数。

以上给出了借力飞行轨道混合优化设计方法的步骤,其中涉及的智能搜索算法和梯度下降法等可参见相关文献,这里不再给出。

3 基于金星借力的火星探测轨道设计与分析

这里仍以 2017 - 2018 年采用金星借力探测火星任务为例,设计其转移轨道方案。根据上节的分析和讨论,并结合图 6(c),由表 2 选取参数区域 11,即金星借力时间约为 2017 年 7 月至 10 月,从地球到金星的飞行时间和从金星到火星的飞行时间约为 110 ~ 250 天,其具体借力参数匹配区域如图 7 所示。

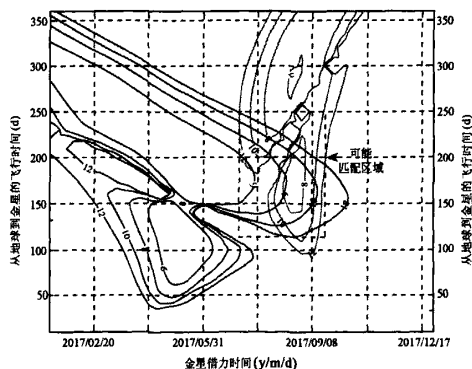


图7 2017年金星借力探测火星的借力参数匹配范围

Fig.7 The matching fields of gravity-assisted parameters for exploring Mars via Venus gravity assist in 2017

由图7可以更清楚的看到采用金星借力飞入和飞出金星的双曲线超速的可能匹配区域。同时,由图7也可以看出本文表1中给出的金星借力探测火星的轨道设计参数(金星借力时间为2017年9月9日;地球发射时间为2017年3月24日,从地球到金星的飞行时间为169天;到达火星时间为2018年3月9日,从金星到火星的飞行时间为181天)就在该区域。

根据图7给出的借力飞行轨道设计参数选取区域,采用基于遗传算法和序列二次规划算法的混合优化算法,并结合本文所提的“软匹配”策略,寻找到

该参数区域另一个金星借力探测火星的轨道方案(即方案 2),参数如表 3 所示。

表 3 2017-2018 年金星借力探测火星转移轨道设计结果

Table 3 Design results of transfer trajectory with Venus gravity-assist for exploring Mars Mission in 2017-2018

参数	本文工作		M. Okutsu
	方案 2	方案 1	
$T_L(Y/M/D)$	2017/02/09	2017/03/24	2017/03/24
$T_S(Y/M/D)$	2017/08/01	2017/09/09	2017/09/09
$T_A(Y/M/D)$	2018/04/13	2018/03/09	2018/03/09
$V_{L\infty}$ (km/s)	3.690	4.440	4.43
$V_{S\infty}$ (km/s)	7.044	9.817	9.81
$V_{A\infty}$ (km/s)	4.964	5.984	5.98
ϵ (km/s)	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-5}	—
R_p (km)	1.776×10^3	9.27×10^4	—

表 3 中 ϵ 表示借力飞行的匹配误差, R_p 表示借力飞行的高度,其它的参数与表 1 相同。由表 3 可以看出方案 1 中的 ϵ 为 1.0×10^{-5} km/s 可以认为是完全匹配,即 C_3 匹配;而方案 2 中的 ϵ 为 1.0×10^{-2} km/s,这种属于“软匹配”,这个误差可通过借力飞行时增加深空机动来补偿。由表 3 还可以看出采用混合设计方法给出的方案 2 的发射双曲线超速 $V_{L\infty}$ 比方案 1 小 0.75 km/s,即发射能量节省 $6.0975 \text{ km}^2/\text{s}^2$,到达火星时的双曲线超速比方案 1 小 1.02 km/s,更有利于与火星的交会。方案 2 的飞行轨迹如图 8 所示。

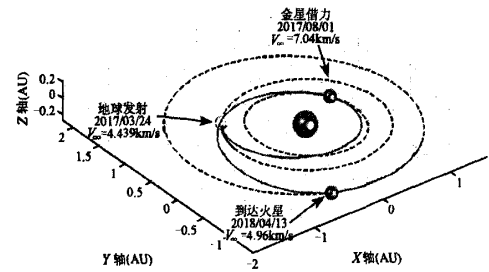


图 8 采用混合设计方法得到金星借力探测火星转移的飞行轨道

Fig.8 Flight path with Venus gravity-assist for exploring Mars mission by using hybrid method

这里值得注意的是采用这种基于“软匹配”策略的混合优化设计方法,通过调节匹配误差和借力飞行的高度,可以搜索得到更多满足任务约束的转移轨道设计方案。

这里,在考虑发射能量约束的条件下,本文对

2010-2018 年采用金星借力探测火星可能出现借力匹配区域进行考察,较好的机会会有:

- (1) 从地球的发射日期约为 2010 年 11 月,金星借力日期约为 2011 年 5 月,到达火星的时间约为 2011 年 9 月,发射时的双曲线超速约为 5 km/s;
- (2) 从地球的发射日期约为 2013 年 5 月,金星借力日期约为 2013 年 12 月,到达火星的时间约为 2014 年 10 月,发射时的双曲线超速约为 6 km/s;
- (3) 从地球的发射日期约为 2015 年 5 月,金星借力日期约为 2015 年 10 月,到达火星的时间约为 2016 年 7 月,发射时的双曲线超速约为 3~4 km/s;
- (4) 从地球发射日期约为 2017 年 2~3 月,金星借力日期约为 2017 年 8~9 月,到达火星时间约为 2018 年 3~4 月,发射时的双曲线超速约为 4 km/s。

以上的研究结果可为我国未来可能的火星探测任务的设计与规划提供重要的借鉴。

4 结论

针对传统 C_3 匹配遍历搜索设计方法存在的问题,提出一种星际探测借力飞行轨道的混合设计方法。该方法在分析借力天体特性的基础上,采用等高线图给出可能出现借力参数匹配的区域,提出“软匹配”策略进行轨道拼接,有效地解决了因对初始轨道段参数的假定和单纯 C_3 匹配方法而导致的对一些满足约束条件的转移轨道方案的遗漏问题。最后采用全局与局部相结合的混合优化设计方法寻找最优设计参数。

本文以 2017-2018 年金星借力探测火星为例,给出了采用混合法设计的结果。结果表明与 M. Okutsu 采用 STOUR 设计的结果一致,并且在该参数区域寻找到了一个新的转移方案,同时,本文还对 2010-2018 年采用金星借力探测火星的机会进行考察,给出可能出现借力的较好的参数区域。

参考文献:

[1] Broucke R A. The celestial mechanics of gravity assist[J]. AIAA Paper 88-4220, Aug. 1988.

[2] Battin R H. The determination of round-trip planetary reconnaissance trajectories[J]. Journal of the Aerospace Sciences. 1959, 26(9):545-567.

[3] Sedov L I. Orbits of cosmic rockets toward the Moon[J]. ARS Journal, 1960, 30(1):14-21.

- [4] Deerwester J M. Jupiter swingby missions to the outer planets[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1966, 3(10):1564 – 1567.
- [5] Flandro G A. Fast reconnaissance missions to the outer solar system utilizing energy derived from the gravitational field of Jupiter[J]. *Astronautica Acta*, 1966, 12(4): 329 – 337.
- [6] Hollenbeck G R. New flight techniques for outer planet missions[J]. AAS Paper 75 – 087, July 1975.
- [7] Diehl R E, Kaplan D I, Penzo P A. Satellite tour design for the Galileo mission[J]. AIAA Paper 83 – 101, Jan. 1983.
- [8] Petropoulos A E, Longuski J, Bonfiglio E P. Trajectories to Jupiter via gravity assists from Venus, Earth, and Mars[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2000, 37(6):776 – 783.
- [9] Longuski J, Williams S N. Automated design of gravity-assist trajectories to Mars and outer planets[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 1991, 52(3):207 – 220.
- [10] Longuski J, Williams S N. Automated design of multiple encounter gravity-assist trajectories AIAA/AAS Astrodynamics Conference[C]. Portland, Aug. 20 – 22, 1990, TP:985 – 994.
- [11] Sims J, Staugler A, Longuski J. Trajectory options to Pluto via gravity assists from Venus, Mars, and Jupiter[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1997, 34(3):347 – 353.
- [12] Vasile M, Pascale P D. Preliminary design of multiple gravity-assist trajectories[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006, 43(4): 794 – 805.
- [13] 张旭辉,刘竹生. 火星探测无动力借力飞行轨道研究[J]. *宇航学报*, 2008, 29(6): 1739 – 1746. [ZHANG Xu-hui, LIU Zhu-sheng. Unpowered swing-by flight orbit design for Mars exploration [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(6): 1739 – 1746 (in Chinese).]
- [14] Okutsu M, Longuski J M. Mars free returns via gravity assist from Venus[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(1):31 – 36.

作者简介:乔栋(1979 –),男,博士后,研究方向为深空探测轨道设计与优化、飞行器动力学与控制。

通信地址:北京理工大学宇航学院 求是楼 307(100081)

电话:(010)68913550

E-mail:qiaodong@bit.edu.cn

Research on Hybrid Design Method of Gravity-assist Trajectories for Interplanetary Missions

QIAO Dong, CUI Ping-yuan, XU Rui

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Taking the exploring Mars via Venus gravity-assist as the background, a hybrid design method of gravity-assist trajectories for interplanetary missions is proposed to the problems of conventional design method of gravity-assist trajectory. First, based on analysis of characteristics of gravity-assist celestial bodies, we provide the possible parameter matching regions for gravity-assist trajectory by using the contour map of hyperbolic excess velocity. Then, while patching the segments of gravity-assist trajectories, we present the “Soft matching” strategy instead of the classical matching strategy. Finally, the hybrid optimal algorithm is used to optimize the design parameters of gravity-assist trajectories. This method could resolve effectively the problem that conventional method omits gravity-assist opportunities satisfied with constraints. Taking the exploring Mars via Venus gravity-assist in 2017 – 2018 years as an example, we not only provide the design results that agree with that of Okutsu, but also find a new trajectory profile in the same parameter region. In addition, we also analyze the transfer opportunities for exploring Mars with Venus gravity-assist in the period of 2010 – 2018, and provide the better design parameter regions. These researches will present the significant reference for the future Mars mission.

Key words: Gravity assist; Hybrid design method; Exploring Mars; Venus gravity-assist