



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 天问一号拓展任务对火星低阶重力场解算的潜在贡献分析
作者: 刘山洪, 鄢建国, 杨轩, 叶茂, 郭茜, 王波, 李斐
DOI: 10.13203/j.whugis20210035
收稿日期: 2021-01-24
网络首发日期: 2021-07-13
引用格式: 刘山洪, 鄢建国, 杨轩, 叶茂, 郭茜, 王波, 李斐. 天问一号拓展任务对火星低阶重力场解算的潜在贡献分析. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20210035>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210035

引用格式:

刘山洪, 鄢建国, 杨轩, 等. 天问一号拓展任务对火星低阶重力场解算的潜在贡献分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210035(LIU Shanong, YAN Jianguo, YANG Xuan, et al. Potential Contribution from Tianwen-1 Extended Mission to Mars Low-Order Gravity Field [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210035)

天问一号拓展任务对火星低阶重力场解算的潜在贡献分析

刘山洪¹ 鄢建国¹ 杨轩² 叶茂¹ 郭茜¹ 王波¹ 李斐¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430072

2 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室, 河北 石家庄, 050081

摘要: 天问一号是中国首次独立开展的行星际探测任务, 将实现对火星的环绕、着陆、巡视探测。天问一号正常任务阶段环绕以极轨设计为主与历史火星任务类似, 对当前火星重力场模型精度改进有限, 因此其拓展任务轨道选取至关重要。本文通过对极轨圆轨道和近赤道大偏心率轨道进行仿真模拟, 分析两种典型轨道构型对现有火星重力场模型改进的可能性, 基于不同误差考量仿真解算了对应 6 个重力场模型。借助重力场功率谱分析, 发现在测量噪声为 0.1 mm/s 的情况下, 不论采用极轨还是近赤道轨道, 一个月的跟踪数据均可较好的反演出 42 阶次的火星重力场模型; 考虑综合误差影响之后, 发现两种轨道对于重力场解算精度类似, 其中实施近赤道大偏心率轨道对 35 阶次以上约束略强。

关键词: 火星重力场; GGM-3; 功率谱; 天问一号

中图分类号: P228.1 **文献标识码:** A

火星类似地球, 是地球的邻居, 探测火星对人类理解火星和整个太阳系均具有极其重要的科学意义^[1]。自从 1964 年美国发射 Mariner 4 成功飞掠火星, 至今为止人类探测火星的历史超过半个世纪^[2]。截止到 2020 年, 人类总共探索火星四十余次, 积累了大量的火星探测数据^[3-4]。中国深空探测计划稳步推进, 2016 年中国政府发布火星探测任务具体方案, 提出 2020 年发射自主火星探测器, 完成“绕”、“落”、“巡”三大目标^[5]。2020 年 7 月作为火星探测窗口, 一度成为近十年来人类火星探测器发射的高峰期, 阿联酋希望号、中国天问一号和美国毅力号相继发射^[5-7]。天问一号主要包括三部分: 轨道器, 用于环绕火星观测和跟地球中继通信; 着陆器, 用于登陆火星; 火星车, 进行巡游和就位探测^[5]。天问一号携带约 13

种科学载荷, 将对火星形态、地质、矿物、空间环境(包括太阳风、大气、磁层和电离层)、土壤、水冰分布和内部结构等进行全面测量和观测^[5]。

火星重力场是火星探测中的关键科学问题之一, 也是研究火星壳幔弹性厚度、内部结构、热演化史等必不可少的重要工具^[8-9]。火星探测器射电跟踪数据是火星重力场解算的最佳数据, 火星重力场研究始于 Mariner 系列任务, Smith 等加入 Mariner 9、Viking Orbit 等探测器的数据, 将火星重力场解算阶次提升到 50×50, 得到火星重力场模型 GMM-1^[10]。近圆极轨道探测器 Mars Global Surveyor (MGS) 和 Mars Odyssey (ODY) 成功实施, 获取更加丰富射电跟踪数据, Lemoine 等融入以上历史数据解算了 80×80 阶次的重力场模型 GMM-2B, 其中

收稿日期: 2021-01-24

基金项目: 民用航天预研项目 (D020103), 国家自然科学基金 (42030110, U1831132)

第一作者: 刘山洪, 博士, 主要从事行星探测器精密定轨、行星历表解算。shanhongliu@whu.edu.cn

通讯作者: 鄢建国, 教授。jgyan@whu.edu.cn

截断至 60 阶次的大地水准面误差约为 1.8 m^[11]。归功于近圆轨道探测器 Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) 和大偏心率极轨探测器 Mars Express 积累的数据, Konopliv 等解算了 MGS95J, MRO110B、MRO110B2、MRO110C 和 120 阶次的 MRO120D 模型^[12-14]。此外, 2011 年 Hirt 等借助激光测高数据 (Mars Orbiter Laser Altimeter, MOLA), 进一步解算了 MGM2011 模型^[15], 提高了局部火星重力场分辨率。随着火星探测数据的积累, 最新 Genova 等解算了 120 阶次的 GMM-3 模型以及随着火星环境季节性变化的重力场带谐项^[16], 称之为火星时变重力场。

天问一号着陆器将于 2021 年 5 月着陆, 其中轨道器目前规划了在轨运行一年, 主要负责地球-火星-着陆器之间的通讯以及科学观测。轨道器初步设置为大偏心率极轨, 以 2021 年 8 月任务期间轨道根数为例, 大致为半长轴为 9500 km, 偏心率为 0.6, 轨道倾角为 87°, 升交点赤经 115°, 幅角为 125° (北京跟踪与通信技术研究所, 私人通讯, 2020), 而拓展任务轨道设计暂未确定。根据火星重力场解算的历史经验, 大偏心率极轨轨道对于重力场模型高阶次以及特定阶次位系数精度有限, 因此正常一年任务期间轨道器的射电跟踪数据对于当前火星重力场的解算贡献可能有限。本文仿真天问一号拓展任务可能设计的轨道构型, 分别研究极轨、近赤道轨探测器对火星重力场解算的贡献,

为天问一号轨道器拓展任务的选取提供一定参考。

1 仿真方案

表 1 总结了目前火星重力场 GMM-3 解算中使用的射电跟踪数据以及对应的轨道构型。MGS、ODY 和 MRO 均不涉及近赤道轨道的射电跟踪数据。因此本文为仿真天问一号的射电跟踪数据对火星重力场解算的贡献, 将设置两种解算方案: 仅用天问一号极轨射电跟踪数据进行重力场解算和综合极轨以及近赤道轨道跟踪数据。值得一提的是, 拓展任务若实施近赤道轨道, 则可联合火星历史任务数据进行重力场解算。若单纯采用近赤道轨道的跟踪测量数据, 由于其无法覆盖中高纬度区域, 不便于解算全球性火星重力场模型, 因此不设置单独近赤道探测器射电跟踪数据解算重力场的方案。

2 模型参数和解算

本文仿真计算采用了自主研发的火星探测器精密定轨与重力场参数解算软件^[17-21], 现纳入 WUDOGS (Wuhan University Deep-space Orbit Determination and Gravity Recovery System)^[22-24]。本文仿真计算的模型参数设置列在表 3。火星探测器的力模型包括: 重力场模型、后牛顿效应、太阳系各大天体导致的三体摄动、太阳光压摄动、相对论效应等, 表 2 详细列出了仿真条件。

表 1 解算火星重力场 GMM-3 采用的射电跟踪数据

Tab.1 Radio tracking data in GMM-3

| 任务 | 阶段 | 跟踪时间 | 轨道构型 |
|-----|--------------|----------------------|----------------------|
| MGS | SPO (科学定相轨道) | 1998.3.27-1998.9.17 | 椭圆中高倾角轨道 (170 km) |
| | GCO (重力定标轨道) | 1999.2.4-1999.2.19 | 椭圆中倾角轨道 (378~414 km) |
| | MAP (测图轨道) | 1999.2.20-2006.1.4 | 近圆极轨道 (370 km) |
| ODY | ODYT (转移轨道) | 2002.1.11-2002.1.15 | 椭圆极轨道 (180~510 km) |
| | ODYM (测图轨道) | 2002.2.20-2014.11.5 | 近圆极轨道 (390 km) |
| MRO | MROT (转移轨道) | 2006.8.30-2006.9.23 | 椭圆极轨道 (220~480 km) |
| | MROM (测图轨道) | 2006.12.26-2015.3.28 | 近圆极轨道 (255 km) |

表 2 仿真条件设置

Tab.2 Simulation configures

| 项目 | 详细设置 |
|-----|-----------------------------|
| 力模型 | 非球形引力 GGM-3 ^[25] |

| | | |
|------|--------|-----------------------------------|
| | N 体摄动 | 太阳、各大天体以及火卫一火卫二 |
| | 太阳光压 | 固定面质比, Cr=1.20 |
| | 相对论摄动 | Schwarzschild |
| | 火星固体潮 | $k_2=0.169^{[14]}$ |
| | 火星大气阻力 | Stewart 1987 大气密度模型 |
| 坐标系统 | 惯性系 | J2000 |
| | 火固系 | Pathfinder 火星定向模型 ^[14] |
| 测站改正 | 测站位置改正 | 地球固体潮改正 ^[26] |
| | 对流层延迟 | Hopfield 模型 |

仿真时段为 2020 年 10 月 01 日至 2020 年 10 月 30 日。模拟中天体的位置采用 JPL 行星历表 DE438。仿真观测量包括青岛、昆明和喀什站的双程测速观测量, 观测数据测量噪声设定为 0.1 mm/s 的高斯白噪声。由于本文研究火星重力场低阶次项的解算贡献, 因此在仿真计算时, 采用 GGM-3 截断至 50 阶次的模型为先验真实模型。在位系数加上 3 倍位系数的中误差作为重力场模型解算初次迭代的初始模型。单弧段解算中弧段长度设置为 1 天, 局部参数为初始轨道根数、太阳光压以及测量偏差, 全局参数为 50 阶次的火星重力场模型位系数。由于重力场系数均属于全局参数, 需要借助 SOLVE 子程序进行法方程组合和解算, 法方程的组合方法可参照 Richard^[27]。在单弧段定轨后, 输出法方程矩阵可以划分为对应全局参数和局

部参数的形式, 对于 n 个单弧可形成 n 个法方程, 如下形式:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11}^{(1)} & \mathbf{A}_{12}^{(1)} \\ \mathbf{A}_{21}^{(1)} & \mathbf{A}_{22}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^{(1)} \\ \mathbf{X}_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1^{(1)} \\ \mathbf{b}_2^{(1)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11}^{(2)} & \mathbf{A}_{12}^{(2)} \\ \mathbf{A}_{21}^{(2)} & \mathbf{A}_{22}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^{(2)} \\ \mathbf{X}_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1^{(2)} \\ \mathbf{b}_2^{(2)} \end{bmatrix} \\ \dots \\ \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11}^{(n)} & \mathbf{A}_{12}^{(n)} \\ \mathbf{A}_{21}^{(n)} & \mathbf{A}_{22}^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^{(n)} \\ \mathbf{X}_2^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1^{(n)} \\ \mathbf{b}_2^{(n)} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

其中 \mathbf{A} 矩阵中下标均为 1 对应局部参数, 下标均为 2 对应全局参数, \mathbf{X} 为待求参数, \mathbf{b} 为残差信息阵。将上述 n 个法方程按照 Richard (2010) 规定融合成一个大型法方程矩阵:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11}^{(1)} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{12}^{(1)} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{11}^{(2)} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{12}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{A}_{11}^{(n)} & \mathbf{A}_{12}^{(n)} \\ \mathbf{A}_{21}^{(1)} & \mathbf{A}_{21}^{(2)} & \dots & \mathbf{A}_{21}^{(n)} & \mathbf{A}_{22}^{(1)} + \mathbf{A}_{22}^{(2)} + \dots + \mathbf{A}_{22}^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^{(1)} \\ \mathbf{X}_1^{(2)} \\ \dots \\ \mathbf{X}_1^{(n)} \\ \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1^{(1)} \\ \mathbf{b}_1^{(2)} \\ \dots \\ \mathbf{b}_1^{(n)} \\ \mathbf{b}_2^{(1)} + \mathbf{b}_2^{(2)} + \dots + \mathbf{b}_2^{(n)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

表 3 给出了实验中首个初始弧段极轨和近赤道轨道对应的轨道根数, 其它弧段根据轨道积分获得。表 4 总结仿真解算方案以及

对应的重力场模型名称。在仿真实验中, 除了测量噪声, 还考虑了 10% 的光压误差和 1% 的自转模型误差。

表 3 火星探测器轨道设置

Tab.3 Kepler orbit elements of Mars spacecraft

| | | | | | |
|-----|-----|----------|-------|----------------|----------|
| 半长轴 | 偏心率 | 轨道倾角 i | 升交点赤经 | 近地点幅角 ω | 平近点角 M |
|-----|-----|----------|-------|----------------|----------|

| | a (km) | e | (°) | (°) | (°) | (°) |
|--------|----------|-------|--------|---------|---------|--------|
| 极轨近圆 | 3797 | 0.005 | 89.000 | 30.040 | 323.181 | 87.152 |
| 近赤道大椭圆 | 7618 | 0.495 | 15.666 | 119.478 | 323.181 | 87.152 |

表 4 解算重力场名称

Tab.4 Solution Schemes

| 误差源 | 极轨 (1 个月) | 极轨 (15 天) + 近赤道 (15 天) 组合 |
|----------------|-----------|---------------------------|
| 测量噪声 | MGP1 | MGPE1 |
| 测量噪声+光压误差 | MGP2 | MGPE2 |
| 测量噪声+光压和自转模型误差 | MGP3 | MGPE3 |

3 重力场评价与分析

本文为评价重力场模型恢复的有效性和精度，主要对重力场进行谱分析，首先基

于球谐函数展开的火星重力场位 (U) 为：

$$U = \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{N_{\max}} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\overline{C_{nm}} \cos m \lambda + \overline{S_{nm}} \sin m \lambda) \overline{P_{nm}}(\cos \theta) \quad (3)$$

其中， G 为万有引力常数， M 为火星质量，

R 为火星参考椭球的平均赤道半径， r 、 θ 、

λ 分别为卫星在火星球坐标系中的高程、余

纬、经度^[28]。 $\overline{C_{nm}}$ 、 $\overline{S_{nm}}$ 是正则化的位系数，

$\overline{P_{nm}}$ 为正则化连带勒让德函数。 N_{\max} 为最高阶次数。重力场模型位系数的功率谱分析包括阶方差 (σ_n) 和误差阶方差 (δ_n)，阶方差的计算公式为：

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^n (\overline{C_{nm}}^2 + \overline{S_{nm}}^2)}{2n+1}} \quad (4)$$

其中， n 表示阶数， m 表示次数。误差阶方差的计算公式为：

$$\delta_n = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^n (\sigma_{\overline{C_{nm}}}^2 + \sigma_{\overline{S_{nm}}}^2)}{2n+1}} \quad (5)$$

其中 $\sigma_{\overline{C_{nm}}}$ 、 $\sigma_{\overline{S_{nm}}}$ 为系数相应误差^[28]。对于

阶方差信息进行分析判断的常用工具是

Kaula 准则，简而言之正则化的位系数具有

零均值特性，标准差与阶数 n 的平方成反比，

它是重力场模型系数统计规律的一个近似

描述，其数学表示为：

$$\overline{C_{nm}}, \overline{S_{nm}} \sim 0 \pm \frac{const}{n^2} \quad (6)$$

其中对于火星 $const$ 取 15×10^{-5} ^[26]。在火星

重力场模型确定中引入 Kaula 准则的目的是

作为一个正则化因子来克服求解重力场的

不稳定性，同时对高阶位系数的计算具有平

滑作用^[28]。图 1 绘制出了各个重力场模型位

系数阶方差 (红色) 和误差阶方差 (蓝色)，

以及 Kaula 曲线 (紫红色)。图 1 中(a)~(f)

分别对应 MGP1、MGP2、MGP3、MGPE1、

MGPE2 和 MGPE3。

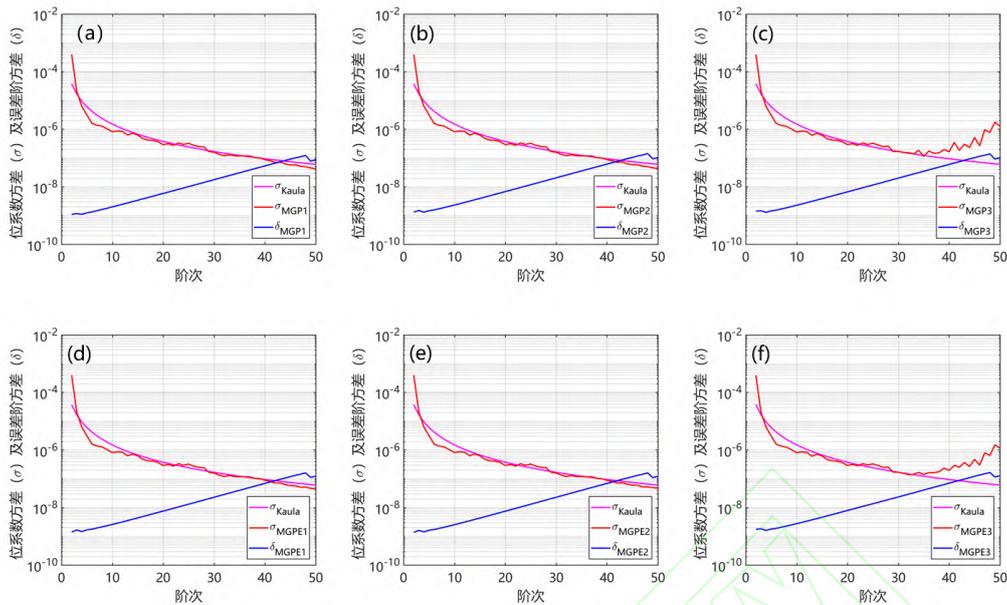


图 1 不同重力场模型功率谱

Fig.1 Power spectrum of various gravity field models

图 1 所有子图中均可看到 Kaula 约束在 5 阶之前约束较强, 5 阶至 25 阶约束下降较快, 25 阶之后保持平稳。加入 10% 的光压误差解算的 MGP1 和 MGPE2 模型, 在重力场模型功率谱分析中体现不出其影响; 加入火星自转模型误差, 可以看到对 MGP3 和 MGPE3 模型解算较大, 在 35 阶次之后位系数方差影响显著。其中, MGPE3 模型位系数方差曲线上升幅度低于 MGP3。

此外, 42 阶次之后所有模型阶方差均高于 Kaula 线, 表示解算的重力场系数不可靠, 这说明了仿真采用的这两种轨道对应收集

的一个月的观测对于火星重力场 42 以上阶次的解算贡献有限。但未来联合火星历史探测数据和更长时间段的天问一号拓展任务数据, 将有克服这一问题的潜力, 解算阶次的有效性预期可以达到与 GGM-3 一致的水平。进一步地, 图 2 绘制了各模型与 GGM-3 模型之间的位系数误差阶方差, 这可以反映解算重力场模型与 GMM-3 模型之间的接近程度。图 2 中, 实线代表只采用极轨道探测器的射电跟踪数据, 点线代表极轨道和近赤道轨道的射电跟踪数据各占一半。

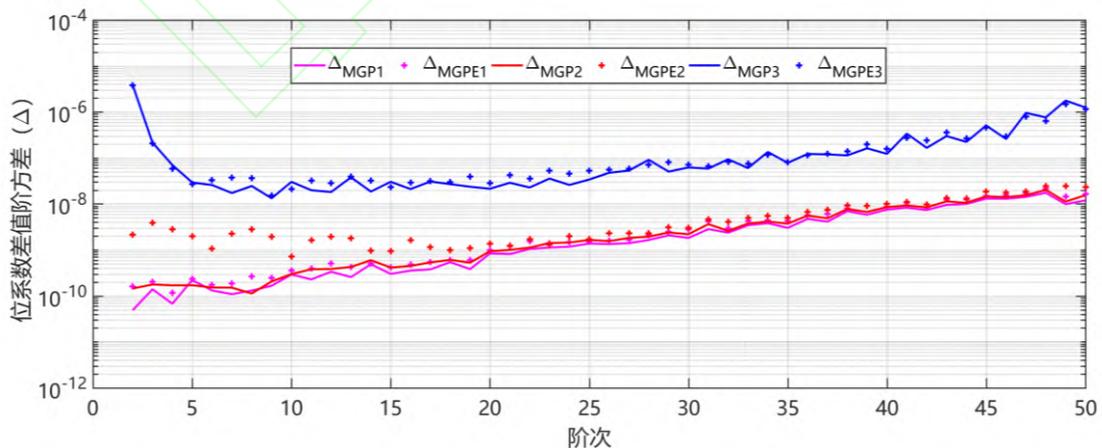


图 2 位系数误差阶方差

Fig.2 Error degree variances between GGM-3 and other gravity field solutions

从图 2 中可以看出, 除了 MGP3 和 MGPE3 模型, 其他理想情况仿真解算的重

力场模型和真实模型之间的误差阶方差较为接近, 说明了解算流程的可靠性。MGP3 和 MGPE3 模型的位系数误差阶方差也均远低于位系数阶方差; 20 阶次以下的位系数误差阶方差大于图 1 中的误差阶方差, 20 阶次以上与图 1 中的误差阶方差曲线较为一致, 这反映了添加的自转模型误差信号对重力场低阶位系数的影响。

在相对理想仿真实验中(图中紫红色), 采用相同模拟时间长度, 相对于近赤道探测器, 极轨探测器恢复的 20 阶次重力场模型系数与 GGM-3 模型系数较为接近, 这主要是因为极轨道覆盖率的优越性; 当考虑太阳光压之后(图中红色), 可以看到采用近赤道轨道解算的 20 阶次以下的低阶次项与 GGM-3 模型差异更明显, 这是由于其对光压误差信号感知更为敏感。进一步地, 当考虑自转模型误差之后(图中蓝色), 这时不论是极轨探测器还是近赤道探测器解算结

果和 GGM-3 模型均有类似量级的差异。值得一提的是, 在当前真实火星任务的射电跟踪数据处理中, 除了太阳光压摄动、广义相对论摄动、潮汐摄动等建模存在较小的影响外, 还存在自转模型误差、大气阻力(低轨道火星探测器面临的)、火星历表误差等较大的长期影响, 因此 MGP3 和 MGPE3 模型解算更加符合真实情况。

进一步评估 MGP3 和 MGPE3 模型对于极轨和近赤道探测器定轨的性能。采用 GGM-3 模型为理想模型截断至 50 阶次, 分别对 30 个弧段的极轨和近赤道探测器进行轨道积分仿真并生成对应双程测速观测值; 再采用解算的 MGP3 和 MGPE3 作为弧段定轨中的重力场模型, 分别对极轨探测器和近赤道探测进行定轨。定轨之后, 计算重建弧段和基于 GGM-3 模型积分的理想轨道差异, 弧段 RMS 绘制在图 3。

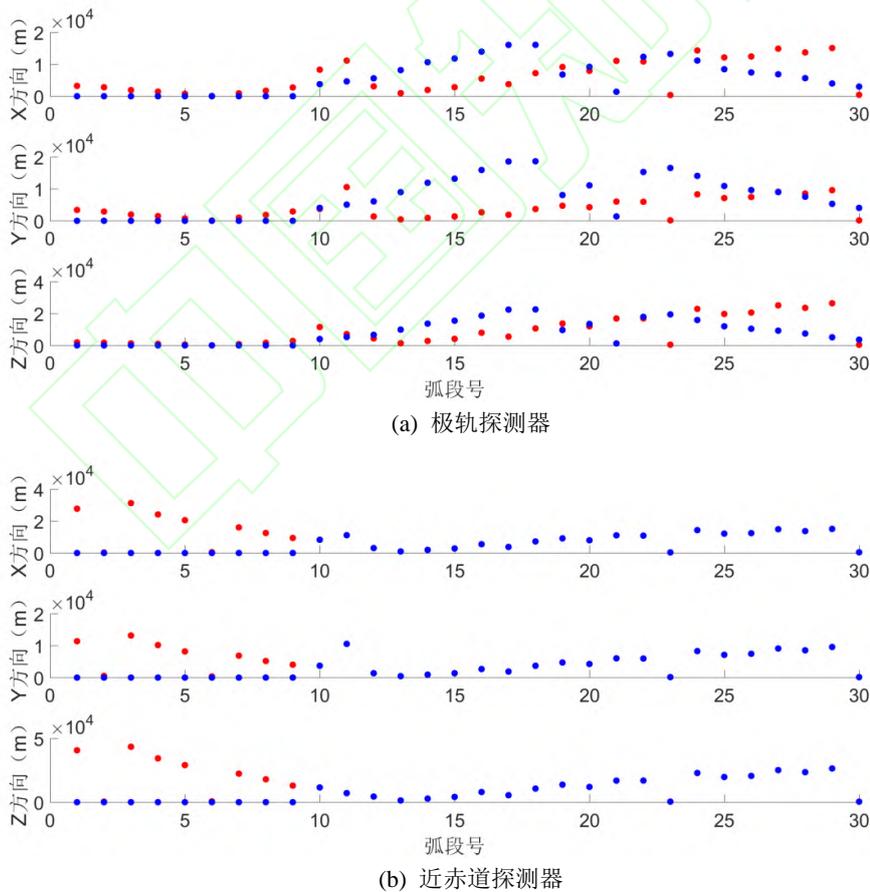


图 3 弧段轨道差异 RMS (红色: MGP3; 蓝色: MGPE3)

Fig.3 Orbital difference RMS(red spot: MGP3; blue spot: MGPE3)

从图 3 中可以看出, 对于极轨探测器, 不论采用 MGP3 还是 MGPE3 进行定轨解算, 定轨性能总体相对较为接近, 部分弧段采用 MGP3 重力场模型定轨精度更高。对于近赤道探测器, 可以明显看出采用 MGPE3 模型的定轨精度均优于 MGP3; 需要注意对于近赤道探测器, 在第 10 个弧段之后数据未列出, 采用 MGP3 模型均无法合理定轨。综上所述体现了在火星重力场模型中加入近赤道轨道跟踪数据的优势, 尤其对于近赤道探测器的定轨性能有较大的贡献。

4 结 论

本文针对中国火星任务天问一号的实施方案, 分析其拓展任务可能选取的轨道类型对火星重力场解算的贡献, 分别仿真了极轨探测器和近赤道探测器射电跟踪测量, 在火星重力恢复中, 为更加贴近真实情况, 分别考虑太阳光压误差和自转模型误差解算得到对应 6 个 50 阶次的火星重力场模型。一方面对恢复的重力场进行功率谱分析, 证实了在更为贴近真实射电跟踪数据处理的情况下, 相比于仅使用一个月极轨卫星跟踪数据解算的重力场模型, 综合 15 天极轨和 15 天近赤道探测器射电跟踪数据解算得到的低阶火星重力场模型也可达到同等精度水平; 此外, 从位系数方差分析中可以看到近赤道探测器对于 35~50 阶次的信号约束优于极轨探测器。另一方面, 在重力场模型定轨性能评价中, 我们发现加入近赤道探测器的跟踪数据, 对于近赤道探测器的定轨精度贡献较大。考虑到国外历史火星探测中近赤道轨道探测器射电跟踪数据稀少, 天问一号任务的常规任务成功实施之后, 拓展任务不论采用极轨和近赤道轨道对于火星重力场均具有解算火星低阶次重力场的可行性, 若采用近赤道大偏心率轨道对目前火星重力场低阶项位系数的研究意义更大。

参考文献

[1] Wan W, Wang C, Li C, et al. The Payloads of Planetary Physics Research Onboard China's First Mars Mission (Tianwen-1)[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, 4: 331–332.

[2] Leighton R B, Murray B C, Sharp R P, et al. Mariner IV Photography of Mars: Initial Results[J]. *Science*, 1965, 149(3684): 627–630.

[3] Yan Jianguo, Ping Jinsong. A Gravity Field Model for Mars[J]. *Physics*, 2009, 38:707–711 (鄢建国, 平劲松. 火星重力场研究现状及发展趋势[J]. *物理*, 2009, 38(10): 707–711.)

[4] https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/?page=0&per_page=99&order=date+desc&search=&category=167

[5] Zou Y, Zhu Y, Bai Y, et al. Scientific Objectives and Payloads of Tianwen-1, China's First Mars Exploration Mission[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 67(2).

[6] Khan S A. UAE Mars Mission[J]. *Science*, 2020, 369(6500).

[7] Farley K A, Williford K H, Stack K M, et al. Mars 2020 Mission Overview[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(8): 1–41.

[8] Sugano T, Heki K. Isostasy of the Moon from High-Resolution Gravity and Topography Data: Implication for its Thermal History[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(24): 1183–1186.

[9] Lemoine F G, Smith D E, Rowlands D D, et al. An Improved Solution of the Gravity Field of Mars (GMM-2B) from Mars Global Surveyor[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23359–23376.

[10] Smith D E, Lerch F J, Nerem R S, et al. An Improved Gravity Model for Mars: Goddard Mars Model 1[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1993, 98(E11): 20871.

[11] Lemoine F G, Smith D E, Rowlands D D, et al. An Improved Solution of the Gravity Field of Mars (GMM-2B) from Mars Global Surveyor[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23359–23376.

[12] Konopliv A S, Asmar S W, Folkner W M, et al. Mars High Resolution Gravity Fields from MRO, Mars Seasonal Gravity, and other Dynamical Parameters[J]. *Icarus*, 2011, 211(1): 401–428.

[13] Konopliv A S, Yoder C F, Standish E M, et al. A Global Solution for the Mars Static and Seasonal Gravity, Mars orientation, Phobos and Deimos Masses,

- and Mars Ephemeris[J]. *Icarus*, 2006, 182(1): 23–50.
- [14] Konopliv A S, Park R S, Folkner W M. An Improved JPL Mars Gravity Field and Orientation from Mars Orbiter and Lander Tracking Data[J]. *Icarus*, 2016, 274: 253–260.
- [15] Hirt C, Claessens S J, Kuhn M, et al. Kilometer-resolution Gravity Field of Mars: MGM2011[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 67(1): 147–154.
- [16] Genova A, Goossens S, Lemoine F G, et al. Seasonal and Static Gravity Field of Mars from MGS, Mars Odyssey and MRO radio science[J]. *Icarus*, 2016, 272:228–245.
- [17] Ye Mao. Development of Lunar Spacecraft Precision Orbit Determination Software System and Research on a Four-way Relay Tracking Measurement Mode [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016(叶茂. 月球探测器精密定轨软件研制与四程中继跟踪测量模式研究[D].武汉: 武汉大学, 2016.)
- [18] Yan Jianguo. Lunar Gravity Field Research and Lunar Satellite Precise Orbit Determination[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (鄢建国. 月球重力场研究及绕月卫星精密定轨[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.)
- [19] Yang Xuan, Yan Jianguo, Ye Mao, et al Development of Precise Orbit Determination Software for Mars Probe and Data Processing for MEX[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(3): 385–391. (杨轩, 鄢建国, 叶茂, 等. 火星探测器精密定轨软件研制及实测数据处理[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2019, 44(3): 385-391.)
- [20] Yang X, Yan J G, Andert T, et al. The Second-Degree Gravity Coefficients of Phobos from two Mars Express flybys[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 490(2): 2007–2012.
- [21] Yan J G, Yang X, Ye M, et al. Assessment of Phobos Gravity Field Determination from Both Near Polar and Near Equatorial Orbital Flyby Data[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 481(4): 4361–4371.
- [22] Liu Shanhong, Yan Jianguo, Yang Xuan, et al. Development of Mercury Precise Orbit Determination Software and Application[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4): 510–517. (刘山洪, 鄢建国, 杨轩, 等. 水星探测器精密定轨软件研制及应用[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2019, 44(4): 510–517.)
- [23] Liu Shanhong, Yan Jianguo, Ye Mao, et al. Contributions of Chinese VLBI Network to the Low Degree Coefficients of the Jupiter Gravity Field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(6): 862–869. (刘山洪, 鄢建国, 叶茂, 等. 中国 VLBI 观测网对木星低阶重力场解算的贡献[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2020, 45(6): 862–869.)
- [24] Jin W T, Li F, Yan J G, et al. A Simulated Global GM Estimate of the Asteroid 469219 Kamo ‘Oalewa for China’s Future Asteroid Mission[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 493(3): 4012–4021.
- [25] Genova A, Goossens S, Lemoine F G, et al. Seasonal and Static Gravity Field of Mars from MGS, Mars Odyssey and MRO Radio Science[J]. *Icarus*, 2016, 272:228–245.
- [26] Mathews P M, Dehant V, Gipson J M. Tidal Station Displacements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(20):469–477.
- [27] Richard E. Ullman. SOLVE PROGRAM. 2010.
- [28] Kaula W M. Theory of Satellite Geodesy: Applications of satellites to Geodesy[J]. *Physics Today*, 1966, 20(10): 101–101.

Potential Contribution from Tianwen-1 Extended Mission to Mars Low-Order Gravity Field

LIU Shanhong¹ YAN Jianguo¹ YANG Xuan² YE Mao¹ GUO Xi¹ WANG Bo¹ LI Fei¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430072, China

² The State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: Tianwen-1 is China's first independent interplanetary mission. It will complete orbiting, landing, and roving tasks in one operation. Exploiting tracking data from gathered during this extended mission, this paper explores possible ways to improve the Mars gravity field model through simulations. We designed two types of orbits, a polar and a near equatorial large eccentricity orbit and recovered six gravity solutions considering various error sources. By the power spectrum of these gravity models was analyzed and evaluated, finding that a month of tracking data from the polar orbit or the combined polar and near equatorial orbit could be used to properly reconstruct the Mars gravity field model with orders and degrees of 42 under the 0.1 mm/s measurement noise. The results show that after considering the influence of comprehensive error, the accuracy of gravity field solutions from the two types of orbits was similar. Nevertheless, the orbit with large eccentricity near the equator has a slightly stronger constraint on more than 35 order and degree coefficients.

Keywords: Mars gravity field model; GGM-3; power spectrum; Tianwen-1

First author: LIU Shanhong, PhD student, specializes in planetary spacecraft orbit determination and ephemeris. E-Mail: liushanhong@whu.edu.cn

***Corresponding author:** YAN Jianguo, PhD, professor. E-mail: jgyan@whu.edu.cn

Foundation Support: the Pre-research Project on Civil Aerospace Technologies(D020103); the National Natural Science Foundation of China(42030110, U1831132)

网络首发:

标题: 天问一号拓展任务对火星低阶重力场解算的潜在贡献分析

作者: 刘山洪, 鄢建国, 杨轩, 叶茂, 郭茜, 王波, 李斐

收稿日期: 2021-01-24

DOI:10.13203/j.whugis20210035

引用格式:

刘山洪, 鄢建国, 杨轩, 等. 天问一号拓展任务对火星低阶重力场解算的潜在贡献分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210035(LIU Shanhong, YAN Jianguo, YANG Xuan, et al. Potential Contribution from Tianwen-1 Extended Mission to Mars Low-Order Gravity Field [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210035)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

利用重力场模型 MRO120D 分析火星探测器的轨道演化

陈祎豪, 鄢建国, 李斐, 杨轩

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(6): 880-886

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180506>

火星探测器精密定轨软件研制及实测数据处理

杨轩, 鄢建国, 叶茂, 李斐, 郝卫峰, 金炜桐

武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(3): 385-391

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20160494>

一种新的北斗卫星钟差预处理方法

王旭, 柴洪洲, 王昶, 李金生, 种洋

武汉大学学报·信息科学版, 2021, doi: 10.13203/j.whugis20200232

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200232>