



基于“天问一号”数据的自主火星重力场构建

张荣桥¹, 刘山洪^{2,3}, 李海涛⁴, 郝建国^{5*}, 耿言¹

1. 探月与航天工程中心, 北京 100101;
2. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094;
3. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094;
4. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
5. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

*联系人, E-mail: jgyan@whu.edu.cn

收稿日期: 2023-04-29; 接受日期: 2023-07-07; 网络出版日期: 2023-07-20

国家自然科学基金(编号: 12203002, 42030110)和国家重点研发计划(编号: 2022YFF0503202)资助项目

摘要 “天问一号”是中国首次自主火星探测任务, 一次实现了对火星的环绕、着陆、巡视探测. 火星物理场与内部结构研究是“天问一号”任务设定的五大科学目标之一, 本文先回顾了国内外在火星重力场方面研究的新进展. 为探究“天问一号”当前轨道对火星重力场解算贡献, 本文开展了仿真1年的“天问一号”任务轨道跟踪数据对基于3个月300 km圆极轨道跟踪数据解算火星重力场的贡献. 结果表明, 加入“天问一号”数据对极轨道数据解算的火星重力场方面的改进主要表现在2–10阶次和35–45阶次, 另外还发现大偏心率轨道和数据增多有助于降低火星重力场低阶次模型误差. 进一步地, 本文还处理了“天问一号”近4个月的实际射电跟踪数据(2022年07月至2022年11月), 解算得到1个10阶次自主火星重力场模型. 这对后续火星基础模型的研究, 特别是自主火星重力场的构建, 具有一定参考意义.

关键词 火星探测, “天问一号”, 火星重力场, 功率谱, 低阶项

PACS: 96.30.Gc, 96.25.Nc, 96.20.Jz

1 引言

2020年7月23日“天问一号”探测器成功发射, 2021年2月10日“天问一号”探测器实施了近火捕获制动, 进入近火点高度约400 km、周期约10个地球日、倾角约10°的大椭圆环火轨道, 2月24日探测器进入火星停泊轨道, 3个月后成功着陆于火星乌托邦平原南部预选

着陆区, 祝融号火星车开启巡视探测, 标志着我国首次火星探测任务完成绕、着、巡三大目标.

利用我国火星探测任务获得的不同类型的射电跟踪数据, 可以用于改进火星重力场模型精度. 一方面, 对深化我国首个火星探测任务的科学产出具有重要的意义; 另一方面, 自主构建的火星重力场模型、自转定向模型、参考框架以及控制网等测绘产品具有重要意

引用格式: 张荣桥, 刘山洪, 李海涛, 等. 基于“天问一号”数据的自主火星重力场构建. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 289512
Zhang R Q, Liu S H, Li H T, et al. Martian gravity field recovery based on the Tianwen-1 mission data (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 289512, doi: [10.1360/SSPMA-2023-0157](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0157)

义, 将为我国后续火星探测重大任务实施提供基础支撑.

2 发展历程

受限于测量手段, 大规模原位重力测量无法在火星表面开展, 因此火星重力场模型主要依靠火星探测器的射电跟踪数据来获取. 目前对火星探测器的跟踪, 主要是通过地面深空网进行双程测距测速来实现; 火星重力场的解算则依赖于对地面深空站跟踪数据的处理. 通过积累不同时期、不同探测器轨道跟踪数据, 火星重力场模型的精度和分辨率得到不断的提升. 20世纪70年代, 美国和苏联开展了大量的火星探测, Lor-ell等人^[1]、Born^[2]和Reasenber等人^[3]给出了10阶左右火星重力场模型. 美国基于Viking Orbit 1和Viking Orbit 2等探测器的轨道跟踪数据, Christensen等人^[4]和Balmino等人^[5]分别解算得到了12和18阶次的火星重力场模型. 这一时期的火星重力场模型揭示了火星重力场长波段特征, 通过与同期得到的火星地形模型进行相关性分析, 表明两者在长波段具有很强的相关性, 这为火星岩石圈应力状态和火星表面地形的均衡状态分析提供了依据^[6].

通过重新处理Marine 9, Viking Orbit 1和Viking Orbit 2共计约230000个数据, Smith等人^[7]于1993年解算了50阶次的火星重力场模型GMM-1. 进入20世纪90年代后期, 美国宇航局成功实施了MGS (Mars Global Surveyor); 2005年发射了MRO (Mars Reconnaissance Orbit)探测器; 2013年发射了火星探测器MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution). 火星重力场模型解算主要由戈达德飞行控制中心和喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的研究人员完成. 戈达德飞行控制中心在MGS数据解算过程中除了利用MGS的深空站测速跟踪数据, 还综合了MGS的激光测高数据, 并且采用的是IAU给定的火星坐标参考框架. 基于GEODYN-II软件^[8], 戈达德飞行控制中心相继给出了MGS75B (75阶次)、GMM-2B (80阶次)、GGM1025 (80阶次)和GGM1041C (90阶次)等重力场模型. 而JPL考虑到仅用地面射电跟踪数据已经取得了可靠的轨道精度, 没有采用激光高度计数据约束轨道. 此外JPL没有使用IAU给定的参考框架, 而是利用了基于火星着陆器Pathfinder解算得到的

参考框架模型^[9]. JPL利用ODP软件^[10], 通过处理同样的数据给出了75阶次重力场模型MGS75D和MGS75E, 以及85阶次重力场模型MGS85F和MGS85H2.

MRO的探测器进一步提高了火星重力场模型的精度和分辨率. Konopliv等人^[11]利用MGS探测器8年轨道跟踪数据、Odyssey探测器6年轨道跟踪数据以及MRO探测器2年轨道跟踪数据, 解算得到了110阶次火星重力场模型MRO110B. 利用Odyssey和MRO直至2015年的数据, Konopliv等人^[12]进一步解算了120阶次重力场模型MRO120D, 同时也给出了长时段低阶位系数的时变项. 戈达德飞行控制中心的团队利用同样的数据, 解算了120阶次的重力场模型GMM-3^[13], GMM-3模型与JPL团队用的火星参考框架模型一致. 目前最新的火星重力场模型为JPL团队解算的MRO120F, 与MRO120D相比, MRO120F解算用到的数据时间段更长, 使用了Odyssey和MRO探测器直至2019年8月轨道跟踪数据. 由于MGS, Odyssey和MRO探测器均为低轨极轨道, 受到的大气阻力摄动较为复杂, 并且动量轮卸载较频繁, 导致无法得到精确的低阶带谐项系数时变量^[11,14,15], 由此获取的低阶项时变信息尚不能准确反映火星冰盖质量迁移的过程.

我国火星重力场的研究尚属于起步阶段, 国内火星重力场模型研究主要有如下几项工作. 鄢建国等人^[16]利用GEODYN-II软件解算MGS近2个月轨道跟踪数据提取到约10阶次的主要火星重力场信息. 考虑到我国已经规划了大量的深空探测任务, 但是缺乏重力场解算能力, 鄢建国团队^[17-23]开展了系列工作, 已经针对月球、火星、水星、小行星等取得了初步成果. 刘山洪等人^[24,25]根据“天问一号”任务特征进行初步的仿真、解算和评估.

3 解算理论

3.1 重力场模型

对火星重力场的研究方法与对地球和月球重力场的研究方法类似. 火星重力场的解算主要也是基于大量的地面测站轨道跟踪数据, 结合轨道动力学理论, 在对火星探测器进行精密定轨的同时解算火星重力场模型位系数, 建立相应的火星重力场模型, 火星引力位(U)的球谐函数模型可描述为^[26]

$$U(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)) \times \bar{P}_{nm}(\sin\theta) \left(\frac{R}{r}\right)^n, \quad (1)$$

其中, R 是火星参考椭球体的平均赤道半径, θ 和 λ 分别是航天器在火星大地坐标系中的纬度和经度. GM 为火星引力常数, N_{\max} 和 m 为重力场模型最大截断阶数、次数; 纬度相关函数 $\bar{P}_{nm}(\sin\theta)$ 表示 n 阶 m 次正规化缔合勒让德函数. 对应的 \bar{C}_{nm} 和 \bar{S}_{nm} 为正规化球谐系数项.

3.2 偏导数推导

引力位非球形部分($n \geq 2$ 部分)的一阶导数 ∇U 是卫星受到的主要摄动力, 二阶导数 $\nabla \nabla U$ 是精密定轨中求解状态转移矩阵的重要组成部分, 解算重力场中还需要非球形引力对位系数的偏导数 $\frac{\partial \nabla U}{\partial (\bar{C}_{nm}; \bar{S}_{nm})}$. 最终的非球形摄动力 f_{NS} 及其对位置、位系数的偏导数表达式为

$$\begin{cases} f_{NS} = M^T \cdot \nabla U, \\ \text{dadr} = M^T \cdot \nabla \nabla U \cdot M, \\ \text{dadp} = M^T \cdot \frac{\partial \nabla U}{\partial (\bar{C}_{nm}; \bar{S}_{nm})}. \end{cases} \quad (2)$$

上式中位函数 U 只取非球形部分. 值得一提的是, 上述讨论均是在星固系中计算的, 计算完毕需要转换到中心天体惯性系中, 矩阵 M 就表示中心天体惯性系到星固系的转换矩阵. 关于引力位及其一阶、二阶导数的计算, 可以采用传统Legendre方法^[27]、Cunningham直角坐标递推方法. 需要指出, 张传定和吴晓平^[28]引入了新的球函数定义, 给出一套简洁的公式, 极大地提高了计算效率, 便于软件实现.

3.3 功率谱分析方法

为了评估火星重力场模型的有效性和准确性, 对重力场系数进行了功率谱分析.

功率谱分析包括位系数阶方差(σ_n)和误差阶方差(δ_n). 阶方差的计算公式为

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2)}{2n+1}}, \quad (3)$$

其中, \bar{C}_{nm} 是 \bar{S}_{nm} 正则化球谐系数, n 是阶数, m 是级数. 误差阶方差的计算公式为

$$\delta_n = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^n (\sigma_{\bar{C}_{nm}}^2 + \sigma_{\bar{S}_{nm}}^2)}{2n+1}}, \quad (4)$$

其中, $\sigma_{\bar{C}_{nm}}$, $\sigma_{\bar{S}_{nm}}$ 是系数误差. 阶方差信息可以与Kaula判据进行比较, 即正则化球谐系数的均值为零, 计算式如 $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm} \sim 0 \pm \frac{\text{const}}{n^2}$, 对于火星, Kaula约束常数const设为 15×10^{-5} .

4 仿真分析与实测解算

2022年12月“天问一号”完成了火星表面成图任务, 轨道器的近火点约为210 km, 远火点约为8900 km, 偏心率约为0.59, 轨道倾角约为90°. 轨道器的测控数据主要由中国深空网跟踪、收集, 包括3个(喀什、佳木斯以及阿根廷)测控站, 分别拥有35、66和35 m口径天线. 整套系统已在嫦娥任务期间得到充分验证, 深空站不仅具有强大的数据传输能力, 而且在信号接收方面非常敏感. 尚未有详细定量地分析“天问一号”对火星重力场解算的贡献, 因此本工作将全面评估“天问一号”当前轨道状态对自主火星重力场解算的贡献. 鉴于国外火星任务中重力场解算轨道包括MGS任务380 km轨道、ODY任务400 km轨道、MRO任务255 km轨道, 偏心率均接近于0, 因此本文将仿真1年的“天问一号”任务轨道对于300 km圆极轨道的重力场解算贡献.

4.1 解算配置

仿真和后续计算中采用的模型参数设置, 均列在表1中. 探测器的力模型包括: 火星最新重力场模型JGMRO120、太阳系主要天体引起的N体扰动、太阳辐射压力(SRP)扰动以及相对论效应等. 仿真计算和解算均基于内部自研软件MAGREAS, 此软件已经通过GEODYN-II软件的验证^[21]. “天问一号”仿真时段为2023年1月1日到2024年1月1日, 共历时12个月. 300 km圆轨道数据仿真时长为3个月, 解算弧长设为1天. 天体位置由JPL行星星历表DE430提供. 仿真观测量包括喀什站、佳木斯站和阿根廷站的双程速率测量, 测量噪声设置为0.1 mm/s的高斯白噪声. 采用截断

表 1 重力场解算参数设置

Table 1 Gravity field solution parameter settings

| 参数类型 | 设置 | |
|------|-----------|---------------------------------------|
| 力模型 | 中心质量引力 | 点质量法 |
| | 中心天体非球形引力 | JGMRO120d ^[12] |
| | 大气阻力 | Stewart 1987年大气密度模型 ^[29] |
| | 自然卫星引力 | Phobos & Deimos |
| | SRP | 固定面积与质量比 $C_r=1.20$, 柱状阴影模型 |
| | N体扰动 | Sun, planets (DE430 ^[30]) |
| | 固体潮汐扰动 | $K_2=0.169$ ^[12] |
| | 相对论效应 | Schwarzschild |
| 计算基准 | 进动章动模型 | IAU1978岁差模型和IAU1980章动模型 |
| | 火星惯性系统 | 火星J2000.0天体坐标系 |
| | 火星固定坐标系 | Pathfinder火星定向模型 |
| 测量校正 | 测站坐标校正 | 地球固体潮汐修正 |
| | 对流层延迟 | Hopfield model |
| 数据权重 | 双程测速 | 0.1 mm/s |

到80阶的JGMRO120d模型作为先验模型, 以3倍方差的球谐系数作为重力场模型解算第1次迭代的初始模型. 局部参数为初始轨道根数、SRP和测量偏差. 全局参数为50阶的火星重力场模型. 解算策略如下: (1) 3个月300 km圆极轨道单独解算重力场模型; (2) 3个月300 km圆极轨道叠加12个月“天问一号”轨道跟踪数据联合解算重力场模型.

4.2 仿真结果一

获得的50阶次重力场模型主要采用功率谱方法进行评估, 基本理论梳理在3.3节, 功率谱绘制在图1. 图中紫线为Kaula约束曲线, 红线为对照重力场模型JGMRO120d. 绿线为3个月300 km圆极轨道单独解算重力场模型, 记作Polar模型, 蓝线为3个月300 km圆极轨道叠加12个月“天问一号”轨道跟踪数据联合解算重力场模型, 记作Polar+TW模型.

从图1中可以看出, 仿真解算的2个重力场模型均和对照模型JGMRO120d功率谱值达到较好的重合. 差异主要体现在误差阶方差上, JGMRO120d误差最小, Polar+TW模型次之, Polar模型误差最大, 但是“天问一号”数据的加入对极轨道数据的改进主要在于2-10阶次和35-45阶次. 需要指出, 一方面是由于“天问一号”轨道构型, 近火点约为200 km, 偏心率又较大, 对于低

阶项有一定贡献; 另一方面累积1年的数据, 丰富的数据量有助于降低低阶次模型误差. 从图1(b)可以看到加入“天问一号”数据之后, 误差功率谱有着较为明显的降低, 印证了数据量的重要性, 同时也说明加入了“天问一号”数据后, 有望改进现有火星重力场模型低阶项精度.

4.3 实测数据解算

进一步, 通过处理“天问一号”新近约4个月射电跟踪数据, 2022-07-02至2022-11-02, 解算得到了1个10阶次的火星重力场模型, 解算过程中参数设置与表1相同, 其功率谱绘制在图2. 图2(a)绘制了120阶次完整图, 图2(b)为图2(a)红色阴影区域放大图, 即绘制8阶次对比图. 图2中还绘制了Liu等人^[25]的结果, 其最新处理了2021年5-7月间“天问一号”轨道器环绕初期2个月的数据, 首次解算了1个8阶次重力场模型TGM01.

从图2可以看出, 随着阶数增加, 解算模型与最新JGMRO120d之间的功率谱差异增加. 形式误差随着阶次增加有明显增加, 且远大于JGMRO120d的形式误差, 这主要是由于“天问一号”累积数据量较少导致. 需要说明, Liu等人^[25]最新处理了2021年环绕初期2个月的数据, 也获得了1个8阶次的重力场模型, 与本研

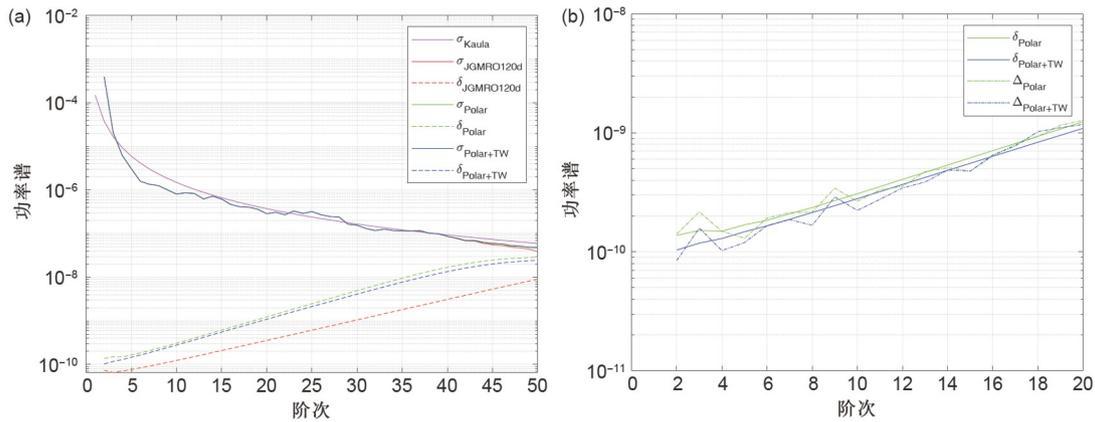


图 1 (网络版彩图) 仿真解算得到的50阶次重力场模型功率谱(a)与前20阶次模型差值功率谱(b)
 Figure 1 (Color online) Power spectrum of the 50-degree gravity field model obtained from simulation solution (a) and difference power spectrum of only the degree 20 (b).

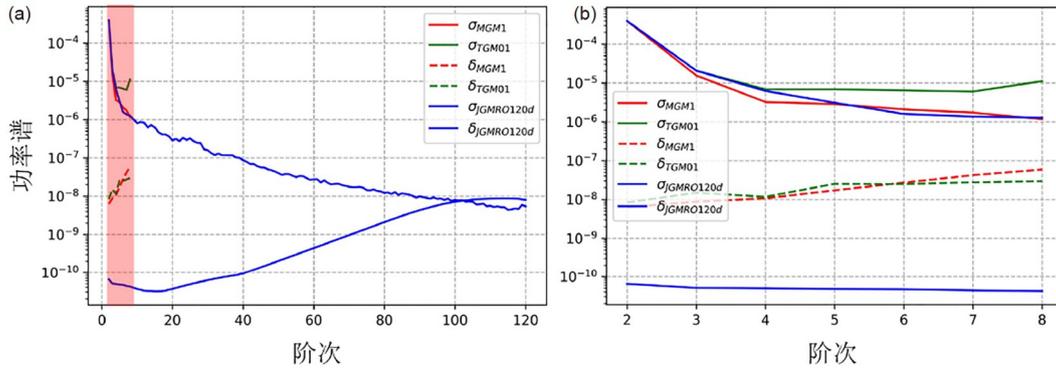


图 2 (网络版彩图) 解算重力场模型功率谱. (a) 120阶次; (b) 8阶次放大图
 Figure 2 (Color online) Power spectra of solved gravity field model. (a) Degree 120; (b) enlarged image of degree 8.

究结果相当. 值得一提的是, 本研究中采用了不同观测时段数据, 且观测时长增加了1-2个月, 但其处理的2021年观测数据量显著多于该文使用的数据量, 这说明增加观测时长有利于高效发挥轨道器的重力场感知效能. 结果还表明现阶段“天问一号”的轨道构型对于高阶重力场解算的贡献有限, 这与Liu等人^[25]结论类似. 定轨后残差和观测量统计绘制在图3.

从图3可以看出, 65个弧段中, 80%弧段的观测量数据少于500个, 超过1000个观测量的弧段仅6个, 说明了观测数据的稀缺性. 大部分弧段的RMS小于1 mm/s, 仅1个弧段RMS大于10 mm/s, 经过证实存在机动. 需要指出, 水手9号获得的6阶重力场模型代表了美国早期火星重力场模型解算水平. 此后, 随着MGS, ODY和MRO等火星任务的顺利实施, 累积了十余年的数据.

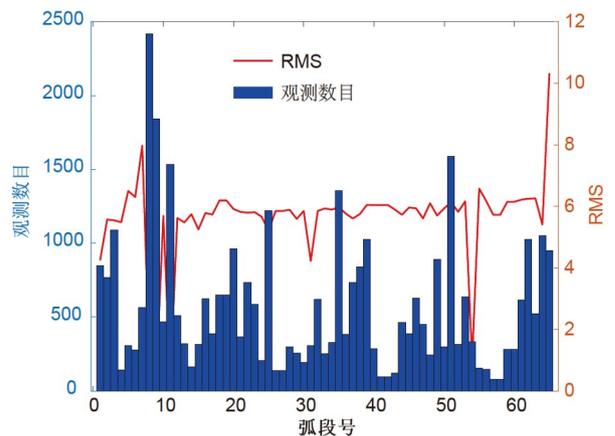


图 3 (网络版彩图) 观测量和定轨后RMS统计
 Figure 3 (Color online) Observation and RMS after precise orbit determination.

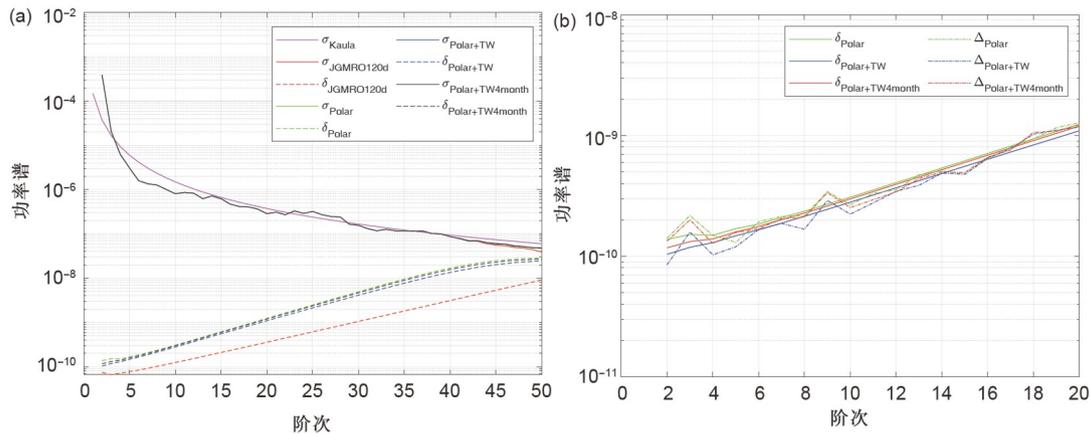


图4 (网络版彩图)增加了“天问一号”4个月数据处理仿真结果, (a)为50阶次重力场模型功率谱, (b)为前20阶次模型差值功率谱, 其中Polar+TW表示仿真了一年的“天问一号”跟踪数据, Polar+TW4month表示仿真了4个月的“天问一号”跟踪数据

Figure 4 (Color online) Simulation results of power spectrum with added 4-month data processing of “Tianwen-1”. (a) is power spectrum of degree 50, (b) is the gravity field model difference power spectrum of only the degree 20. Polar+TW means that we use one year tracking data of the simulated “Tianwen-1” orbit, Polar+TW4month means that we use four months tracking data of the simulated “Tianwen-1” orbit.

基于上述数据, JPL和GSFC两大机构极大提高了火星重力场模型解算的阶数, 如最新GMM-3和JGMRO120d模型, 均达到120阶次. “天问一号”的轨道偏心率也与水手9号相似, 但其近地点高度更接近火星表面. 将来随着观测数据的积累, 火星重力场反演误差以及求解的有效阶数有望得到进一步改善. 此外, 利用地面深空网络跟踪数据建立的高阶重力场模型主要与以下因素有关: (1) 探测器轨道高度和倾角, (2) 不频繁机动, (3) 地面深空网跟踪采样频率, (4) 跟踪数据精度. 因此, 扩展“天问一号”任务轨道值得进一步深入分析和设计, 预期有望能独自求解中等阶数的火星重力场模型.

4.4 仿真结果二

根据上一节解算情况, 再开展4个月的仿真实验, 将仿真得到的“天问一号”对火星重力场反演的改善情况与实测结果比较, 解算的模型功率谱绘制在图4.

从图4可以看出, 将仿真“天问一号”数据缩短至4个月时, 对模型的改进程度相比1年的数据有明显减弱(图1), 这主要与数据量累积有关, 符合预期情况. 但是4个月仿真数据解算结果也远优于实测4个月的情况(图2), 这是由于实测任务数据主要来自于测图阶段, 近火点跟踪数据较少, 适合重力场解算的跟踪数据极少. 同时, 本团队现仍在收集整理“天问一号”跟踪数

据, 也在系统整理火星快车(MEX)数据. MEX轨道构型与“天问一号”类似, 为大偏心率极轨椭圆轨道, MEX从2003年12月入轨后, 积累了近20年的丰富数据, 这一数据可以和“天问一号”进行有效融合, 将更加明确大偏心率轨道在火星重力场模型解算中的贡献.

5 结论与展望

针对“天问一号”任务现阶段的实施情况, 本文首先详细综述了当前国内外火星重力场的研究进展, 对火星重力场的解算进行了较为系统的梳理. 针对当前任务状态和未来预期扩展任务的准备, 回答了两个关键问题: 基于“天问一号”当前数据对火星重力场的贡献问题和同时充分考虑当前跟踪测量资源火星重力场能够反演的阶次关系问题. 通过仿真计算分析了火星重力场解算的可行性并表明“天问一号”可以改进低阶项, 尤其是20阶次以下的位系数精度. 基于最新“天问一号”3个月的数据, 进行了初步的重力场反演, 初步获得了1个10阶次的火星重力场. 若要进一步解算更高阶的火星重力场模型, 增加观测弧段, 调整轨道构型(比如降低偏心率和轨道高度)十分必要, 但这取决于“天问一号”拓展任务团队的精细布局, 获得中国自主火星重力场具有较为乐观的前景.

参考文献

- 1 Lorell J, Born G H, Christensen E J, et al. Gravity field of Mars from Mariner 9 tracking data. *Icarus*, 1973, 18: 304–316
- 2 Born G H. Mars physical parameters as determined from Mariner 9 observations of the natural satellites and Doppler tracking. *J Geophys Res*, 1974, 79: 4837–4844
- 3 Reasenberg R D, Shapiro I I, White R D. The gravity field of Mars. *Geophys Res Lett*, 1975, 2: 89–92
- 4 Christensen E J, Balmino G. Development and analysis of a twelfth degree and order gravity model for Mars. *J Geophys Res*, 1979, 84: 7943–7953
- 5 Balmino G, Moynot B, Vales N. Gravity field model of mars in spherical harmonics up to degree and order eighteen. *J Geophys Res*, 1982, 87: 9735–9746
- 6 Phillips R J, Lambeck K. Gravity fields of the terrestrial planets: Long-wavelength anomalies and tectonics. *Rev Geophys*, 1980, 18: 27–76
- 7 Smith D E, Lerch F J, Nerem R S, et al. An improved gravity model for Mars: Goddard Mars model 1. *J Geophys Res*, 1993, 98: 20871–20889
- 8 Pavlis D E, Poulou S G, Rowton S C, et al. GEODYN operations manuals. Raytheon ITSS contractor report, 2000
- 9 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. *Icarus*, 2006, 182: 23–50
- 10 Moyer T D. Formulation for Observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation, Monograph 2. Deep Space Communications and Navigations Series, NASA/JPL, Oak Grove, 2005
- 11 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. *Icarus*, 2011, 211: 401–428
- 12 Konopliv A S, Park R S, Folkner W M. An improved JPL Mars gravity field and orientation from Mars orbiter and lander tracking data. *Icarus*, 2016, 274: 253–260
- 13 Genova A, Goossens S, Lemoine F G, et al. Seasonal and static gravity field of Mars from MGS, Mars Odyssey and MRO radio science. *Icarus*, 2016, 272: 228–245
- 14 Smith D E, Zuber M T, Torrence M H, et al. Time variations of Mars' gravitational field and seasonal changes in the masses of the polar ice caps. *J Geophys Res*, 2009, 114: E05002
- 15 Marty J C, Balmino G, Duron J, et al. Martian gravity field model and its time variations from MGS and Odyssey data. *Planet Space Sci*, 2009, 57: 350–363
- 16 Yan J G, Li F, Ping J S. Precision orbit determination of MGS mapping phase arcs and Martian gravity field model solution (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2010, 39: 484 [鄢建国, 李斐, 平劲松. 基于MGS测图段部分弧段的精密定轨及火星重力场模型解算. *测绘学报*, 2010, 39: 484]
- 17 Jin W T, Li F, Yan J G, et al. Determination of mass and bulk density of asteroid (21) Lutetia using Rosetta radio tracking data (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 129501 [金炜桐, 李斐, 鄢建国, 等. 利用Rosetta无线电跟踪数据解算小行星(21)Lutetia质量与体积密度. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48: 129501]
- 18 Liu S H, Yan J G, Yang X, et al. Development of Mercury precise orbit determination software and application (in Chinese). *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2019, 44: 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. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2019, 44: 510–517]
- 19 Yang X, Yan J G, Ye M, et al. Development of precise orbit determination software for Mars probe and data processing for MEX (in Chinese). *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2019, 44: 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. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2019, 44: 385–391]
- 20 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. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 493: 4012–4021
- 21 Yan J, Yang X, Ye M, et al. Independent Mars spacecraft precise orbit determination software development and its applications. *Astrophys Space Sci*, 2017, 362: 123
- 22 Yan J, Liu S, Xiao C, et al. A degree-100 lunar gravity model from the Chang'e 5 T1 mission. *Astron Astrophys*, 2020, 636: A45
- 23 Yang X, Yan J G, Andert T, et al. The second-degree gravity coefficients of Phobos from two Mars Express flybys. *Mon Not R Astron Soc*, 2019,

490: 2007–2012

- 24 Liu S H, Yan J G, Yang X, et al. Potential contribution from Tianwen-1 extended mission to Mars low-order gravity field (in Chinese). *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2021 [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. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2021]
- 25 Liu S H, Cao J F, Yan J G, et al. An independent degree-eight Mars gravity field model and the expected results from the Tianwen-1 mission. *Res Astron Astrophys*, 2023, doi: 10.1088/1674-4527/acd52c
- 26 Heiskanen W A. Determination of the geoid from ground anomalies. *Phys Geod*, 1967, 8: 325–330
- 27 Su Y, Fan D M, You W. Fast and stably recursive algorithm for computing second derivative of associated Legendre functions (in Chinese). *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2012, 37: 1409–1412 [苏勇, 范东明, 游为. 综合Legendre函数二阶导数的快速稳定递推算法. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2012, 37: 1409–1412]
- 28 Zhang C P, Wu X P. Fast computation method of non-central perturbation force (in Chinese). *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2003, 28(S1): 87–90 [张传定, 吴晓平. 非心摄动引力的快速计算方法研究. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2003, 28(S1): 87–90]
- 29 Stewart A. Revised Time Dependent Model of the Martian Atmosphere for Use in Orbit Lifetime and Sustainance Studies. Technical Report, LASP-JPL Internal Report. 1987
- 30 Folkner W M, Williams J G, Boggs D H, et al. The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431. Technical Report, Interplanetary Network Progress Report. 2014, 196: 42–196

Martian gravity field recovery based on the Tianwen-1 mission data

ZHANG RongQiao¹, LIU ShanHong^{2,3}, LI HaiTao⁴, YAN JianGuo^{5*} & GENG Yan¹

¹ Lunar Exploration and Space Engineer Center, Beijing 100101, China;

² National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China;

³ Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

⁴ Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;

⁵ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Tianwen-1 is the first independent Chinese interplanetary exploration mission that has realized orbiting, landing, and roving on Mars. Research of the physical field and internal structure of Mars is one of the five major scientific objectives of the Tianwen-1 mission, playing a significant role. Based on the successful orbiting, landing, and roving of Tianwen-1, this paper systematically reviews the domestic as well as international research progress of the Martian gravity field solution and expounds on the relevant theoretical methods of Martian gravity field inversion. With regard to exploring the applicability of the Chinese Martian gravity field solution based on the orbital data obtained from the Tianwen-1 normal mission stage, the question regarding the contribution of the Tianwen-1 mission to the low polar orbit data was addressed for the first time. Moreover, we confirmed that the incorporation of the Tianwen-1 data improved the polar orbit data in the degree of 2–10 and 35–45. Furthermore, a 10-degree Martian gravity field model is solved using the recently obtained three-month data.

Mars exploration, Tianwen-1, Martian gravity field, power spectrum, low-degree coefficient

PACS: 96.30.Gc, 96.25.Nc, 96.20.Jz

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0157](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0157)