

应用重力场模型二阶位系数及新近岁差率
约束火星内核大小及密度组成^{*}钟振[†] 文麒麟 梁金福

(贵州师范大学物理与电子科学学院, 贵阳 550025)

(2022 年 6 月 13 日收到; 2022 年 10 月 27 日收到修改稿)

针对当前 InSight 数据无法检测火星固态内核是否存在的问题, 提出利用火星平均密度和平均惯性矩因子估算火星固态内核的大小及其密度组成. 根据火星高阶重力场模型 JGMRO120f 和 GMM3-120 以及最新火星岁差率, 推导了观测数据下的火星平均密度和平均惯性矩因子; 参考火星内部结构的 4 层模型以及不同自由参数 (壳层密度、幔层密度、外核密度、内核大小和内核密度), 求解了火星平均密度和平均惯性矩因子的模型值. 利用观测值与模型值最小残差平方和作为约束条件, 大批量统计结果表明: 1) 两个重力场模型求解的自由参数具有相同的分布特征, 自由参数的最优值基本一致; 2) 火星壳层密度、幔层密度和外核密度接近其他研究结果, 表明统计结果有一定的参考价值; 3) 火星可能存在 840 km 左右的固态内核, 其密度约为 $6950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 内核密度大小表明火星内核不由纯铁物质组成, 该结果与火星核富集轻元素物质的近期研究一致, 计算结果具有一定的参考价值. 由于反演结果的非唯一性, 未来随着 InSight 火星震数据处理技术的提高, 有望进一步约束火星内核的大小及其组成.

关键词: InSight, 岁差变化率, 平均惯性矩因子, 火星内核大小, 火星内核密度

PACS: 96.30.Gc, 96.25.Nc, 96.25.Hs

DOI: 10.7498/aps.72.20221170

1 引言

作为岩石质天体的火星, 其南半球高地火星壳内存在的剩磁, 揭示了火星核早期存在发电机效应^[1]. 通过研究火星核的大小及密度组成, 可以探究岩石质行星自吸积形成后的早期分异、行星核发电机效应和行星幔热演化模式等, 进而从比较行星学的角度推测岩石质天体的演化历程^[2]. 由于早期缺乏直接观测数据, 特别是全球性的火星物理数据, 火星核的大小及组成在早期主要由陨石成分间接进行估算^[3]. 通过陨石分析, 结合火星物理模型, 特别是黏弹性热动力学模型, 推测火星存在液态核的可能性较大, 火星核的大小在 1730—1840 km 之间^[4,5]. 类似地,

Bagheri 等^[6]利用流体模型仿真火星内部的黏弹性潮汐响应, 发现火星核可能为液态, 其大小在 1750—1890 km 之间. 随着越来越多火星探测器的成功发射, 利用众多探测器 (例如, 海盗号 (Viking), 火星探路者号 (Mars Pathfinder), 火星全球勘测探测器 (Mars global surveyor, MGS), 火星奥德赛探测器 (Mars Odyssey, ODY) 和火星勘测轨道器 (Mars reconnaissance orbiter, MRO)) 轨道跟踪数据反演火星核的大小及密度组成也成为可能^[7,8]. Rivoldini 等^[9]利用火星探测器轨道跟踪估算的平均惯量矩和平均密度, 发现火星核为液态的可能性较大, 火星核的大小在 1794 km 左右. Konopliv 等^[10]利用火星探测器多年的轨道跟踪数据, 发现火星存在类似地球的钱德勒摆动 (Chandler wobble), 并利用钱德

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 41864001, 42030110) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zzhong@gznu.edu.cn

勒摆动推测火星核的大小约为 1790 km.

无论从陨石数据着手的热动力学模型, 还是基于火星探测器轨道跟踪数据的力学模型, 尽管推测火星液态核的大小在 1800 km 左右, 但还不能最终确定火星核的大小和状态. 随着火星洞察号 InSight (the interior exploration using seismic investigations, geodesy, and heat transport) 任务的成功实施, Stähler 等^[11]利用 InSight 任务期间积累的火星星震数据, 最终确定液态火星核的大小在 1830 km 左右, 但还不能确定火星内核的大小. 利用平均惯性矩因子, 结合火星平均密度, 为估算火星内核大小及密度组成提供了一条有效的解决之路, Sohl 等^[12]曾利用这种办法估算了火星核的大小及密度分布. 随着众多火星探测器轨道跟踪数据的加入, 火星平均惯性矩因子的可靠性不断增强, Kahan 等^[13]结合以往探测器和 InSight 轨道跟踪数据, 推算了最新的火星岁差变化率. 参考文献^[12, 14]的方法, 可以通过火星岁差变化率推算较新的平均惯性矩因子, 结合火星平均密度, 可以推测火星内核大小及密度组成, 进而为火星内部结构研究提供一定的参考.

2 火星平均密度和平均惯性矩因子

当前, 火星主要高阶重力场是 JGMRO120d^[8]和 GMM3-120^[7], 这两个模型的最大展开阶次均为 120 阶次. 其中, JGMRO120d 主要依据 MRO 以及部分 MGS 的轨道跟踪数据求解而来, 被广泛应用于后续科学研究中^[15,16], 目前数据更新后的模型为 JGMRO120f^[17]. GMM3-120 除了参考 MRO 和 MGS 的轨道跟踪数据外, 还参考了 ODY 的轨道跟踪数据. 在 GMM3-120 基础上, 结合火星地形

数据 MarsTopo2600^[18], 还产生了新的火星重力场模型 GMM3-rm1-lambda-100^[19]. 由于 GMM3-rm1-lambda-100 参考了地形数据, 其高阶系数与模型 GMM3-120 存在差异, 而低阶系数没有变化. 鉴于上述缘由, 本文只对 JGMRO120f 和 GMM3-120 的低阶系数进行研究分析, 这两个模型规格化的低阶系数见表 1. 根据重力场模型提供的火星常数 GM , 同时参考引力常数 G 的最新结果^[20], 可以得到火星的平均质量 M . 依据求解的火星总质量 M 以及火星平均参考半径 R , 可以求解火星的平均密度 $\bar{\rho}$. 不同重力场模型求解的火星总质量 M 略有差别, 以致估算的平均密度 $\bar{\rho}$ 也略有差别, 但不同模型估算值的偏差不超过 10^{-3} kg. 火星平均密度偏差在 10^{-1} kg 内对火星内核估算的影响几乎可以忽略不计^[12], 考虑 2 个重力场模型求解的平均密度在 10^{-3} kg 内完全一致, 表 1 给出了该范围内的火星平均密度.

为了约束火星核的大小及其密度组成, 需要估算火星的平均惯性矩 I . 平均惯性矩 I 和极轴惯性矩 C 之间的关系为^[12]

$$\frac{I}{MR^2} = \frac{C}{MR^2} + \frac{2\sqrt{5}}{3}C_{20}, \quad (1)$$

其中, M 和 R 分别表示火星总质量和火星平均参考半径, C_{20} 表示重力场模型规格化的二阶位系数, 如表 1 所列. 为了方便, 这里称 $I/(MR^2)$ 为平均惯性矩因子, 称 $C/(MR^2)$ 为极轴惯性矩因子. 在计算平均惯性矩时, 需考虑火星塔尔西斯山群 (Tharsis) 对平均惯性矩的改正^[12,21]. 考虑 Tharsis 改正的火星平均惯性矩 C 有如下关系^[12]:

$$\frac{I}{MR^2} = \frac{C}{MR^2} + \frac{2\sqrt{5}}{3}C_{20} - \frac{4}{3}\sqrt{\frac{5}{3}C_{22}^2 + \frac{5}{3}S_{22}^2}. \quad (2)$$

表 1 参数取值

Table 1. Values of the parameters used in calculation.

| 序号 | 参数 | 取值及范围 |
|----|--|--|
| 1 | JGMRO120f模型的火星质量 M/kg 与二阶位系数 | $M = 6.417120511584593 \times 10^{23}$, $C_{20} = -0.8750219819894 \times 10^{-3}$, $C_{22} = -0.8463283575906 \times 10^{-4}$, $S_{22} = 0.4893975901192 \times 10^{-4}$ |
| 2 | GMM3-120模型的火星质量 M/kg 与二阶位系数 | $M = 6.417120090587431 \times 10^{23}$, $C_{20} = -0.87502113235452894 \times 10^{-3}$, $C_{22} = -0.84635903869414677 \times 10^{-4}$, $S_{22} = 0.48934625860229178 \times 10^{-4}$ |
| 3 | 平均半径 R/km | 3389.5 |
| 4 | 平均密度 $\bar{\rho}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 3934.093 |
| 5 | InSight数据的火星最新岁差率 $\dot{\psi}/(\text{ms}\cdot\text{a}^{-1})$ ^[13] | -7605 |
| 6 | 平均惯性矩因子 $I/(MR^2)$ | 0.3637801121 (JGMRO120f), 0.3637797586 (GMM3-120) |

火星岁差变化率 $\dot{\psi}$ ($\text{ms}\cdot\text{a}^{-1}$) 与极轴惯性矩 C 存在如下关系 [14]:

$$\dot{\psi} = \frac{3\sqrt{5}}{2} \frac{n_0^2}{\omega} \frac{MR^2}{C} (1-e^2)^{-1.5} C_{20} \cos \varepsilon + \dot{\psi}_g + \dot{\psi}_p, \quad (3)$$

其中, e 表示火星公转轨道的偏心率, $e = 0.09341$ [8]; ε 表示火星自转轴的倾角; ω 表示火星自转角速度; n_0 表示火星公转角速度. 相关物理量的取值具体为 $n_0 = 191.408$ ($^\circ/\text{a}$), $\varepsilon = 25.18938228^\circ$, $\omega = 350.8919825$ ($^\circ/\text{d}$) [8,13]. $\dot{\psi}_g$ 表示相对论效应引入的大地测量岁差改正, $\dot{\psi}_p$ 表示其他行星 (如木星) 及火星卫星产生的岁差改正, 取值为 $\dot{\psi}_g = 6.75$ ms/a , $\dot{\psi}_p = -0.77$ ms/a [22]. 通过 (3) 式求出火星的极轴惯性矩因子为

$$\frac{C}{MR^2} = \frac{\dot{\psi} - \dot{\psi}_g - \dot{\psi}_p}{\frac{3\sqrt{5}}{2} \frac{n_0^2}{\omega} (1-e^2)^{-1.5} C_{20} \cos \varepsilon}. \quad (4)$$

结合 (2) 式和 (4) 式, 可以求解不同重力场模型的平均惯性矩因子 (表 1).

3 火星内部圈层结构与控制方程

Stähler 等 [11] 利用最新的 InSight 火星星震数据, 最终确定火星液态外核的大小为 1830 km, 该研究进一步表明火星不存在相当稠密且绝热的下火星幔. Knapmeyer-Endrun 等 [23] 利用 InSight 数据, 发现火星壳存在 2 层或 3 层结构, 平均厚度在 24—72 km 之间. 研究表明利用惯性矩因子和平均密度约束内核结构而言, 内核结构对火星壳厚度不敏感 [12,24]. 取文献 [15] 的火星壳平均厚度 50 km 作为固定值, 整个火星内部圈层结构如图 1 所示.

假设图 1 模型的平均惯性矩为 I_{mod} , 则模型平均惯性矩因子为 $I_{\text{mod}}/(MR^2)$. 由图 1 可推导出该模型平均密度 ρ_{mod} 和平均惯性矩因子 $I_{\text{mod}}/(MR^2)$ 分别为

$$\begin{aligned} \rho_{\text{mod}} = & \rho_c + (\rho_m - \rho_c) \left(\frac{r_m}{R} \right)^3 + (\rho_{\text{co}} - \rho_m) \left(\frac{r_{\text{co}}}{R} \right)^3 \\ & + (\rho_{\text{ci}} - \rho_{\text{co}}) \left(\frac{r_{\text{ci}}}{R} \right)^3, \end{aligned} \quad (5)$$

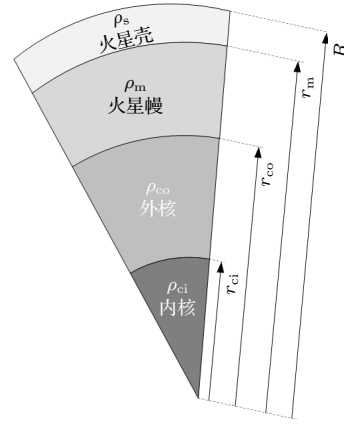


图 1 火星内部圈层结构

Fig. 1. Sketch of Martian internal structure with various layers.

$$\begin{aligned} \frac{I_{\text{mod}}}{MR^2} = & \frac{2}{5\bar{\rho}} \left[\rho_c + (\rho_m - \rho_c) \left(\frac{r_m}{R} \right)^5 + (\rho_{\text{co}} - \rho_m) \right. \\ & \left. \times \left(\frac{r_{\text{co}}}{R} \right)^5 + (\rho_{\text{ci}} - \rho_{\text{co}}) \left(\frac{r_{\text{ci}}}{R} \right)^5 \right], \end{aligned} \quad (6)$$

式中, r_m 和 ρ_m 分别表示火星幔顶部参考半径和火星幔密度, r_{co} 和 ρ_{co} 分别表示火星外核顶部参考半径和火星外核密度, r_{ci} 和 ρ_{ci} 分别表示火星内核顶部参考半径和火星内核密度. 由 (5) 式和 (6) 式可以求解得到不同待估参数的平均密度 ρ_{mod} 和平均惯性矩因子乘数 $\frac{5}{2} \frac{I_{\text{mod}}}{MR^2} \bar{\rho}$, 将这两个模型值分别与表 1 平均密度测量值 $\bar{\rho}$ 及平均惯性矩因子测量值 $\frac{5}{2} \frac{I}{MR^2} \bar{\rho}$ 做差, 以它们的最小平方和 f 作为判据, 即可以得到待估参数的最优值. 该反演问题的目标函数 f 的表达式为 [25]

$$f = \sqrt{(\rho_{\text{mod}} - \bar{\rho})^2 + \left(\frac{5}{2} \frac{I_{\text{mod}}}{MR^2} \bar{\rho} - \frac{5}{2} \frac{I}{MR^2} \bar{\rho} \right)^2}. \quad (7)$$

在本文参数估算中, 以目标函数 $f < 0.1$ 作为最优参数选取的判断条件. 如图 1 所示, R 表示火星平均半径 [11,12], 取值见表 1, 火星外核顶部半径和火星壳的厚度设为固定值, 其余参数为待估值, 固定值与待估值范围见表 2. 为了评估待求参数 x 对目标函数 (7) 式的敏感度 S , 将 S 定义为 [24]

$$S = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{x}{f} = \frac{(\rho_{\text{mod}} - \bar{\rho}) \frac{\partial \rho_{\text{mod}}}{\partial x} + \left(\frac{5}{2} \frac{I_{\text{mod}}}{MR^2} \bar{\rho} - \frac{5}{2} \frac{I}{MR^2} \bar{\rho} \right)^2 \frac{\partial \frac{5}{2} \frac{I_{\text{mod}}}{MR^2} \bar{\rho}}{\partial x}}{(\rho_{\text{mod}} - \bar{\rho})^2 + \left(\frac{5}{2} \frac{I_{\text{mod}}}{MR^2} \bar{\rho} - \frac{5}{2} \frac{I}{MR^2} \bar{\rho} \right)^2} x, \quad (8)$$

其中, x 表示包括火星内核半径、火星壳密度、火星幔密度、火星外核密度以及火星内核密度的待求参数. 相关参数的偏导数可由 (5) 式和 (6) 式求出.

表 2 火星内部结构固定参数与待求参数
Table 2. Fixed and free parameters of the Martian inner structure.

| 参数 | 取值或取值范围 |
|--|--------------|
| 火星壳厚度 $b_c/\text{km}^{[15]}$ | 50.0 |
| 火星幔半径 $r_m = R - b_c$, r_m/km | 3339.5 |
| 火星外核半径 $r_{co}/\text{km}^{[11]}$ | 1830.0 |
| 火星内核半径 r_{ci}/km | [50, 1600] |
| 火星壳密度 $\rho_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | [2500, 3300] |
| 火星幔密度 $\rho_m/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | [3000, 3600] |
| 火星外核密度 $\rho_{co}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | [3400, 7000] |
| 火星内核密度 $\rho_{ci}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | [4000, 7500] |

4 结果与分析

为了估算火星内核大小及其密度的组成, 以 (7) 式作为最优值的判据, 使用粒子群算法^[25] 对表 2 中 5 个自由参数进行反演. 这 5 个自由参数分别为火星内核半径 r_{ci} , 火星壳密度 ρ_s , 火星幔密度 ρ_m , 火星外核密度 ρ_{co} , 火星内核密度 ρ_{ci} . 在计算过程中, 选取粒子种群规模 $m_p = 1500$ 个粒子, 每次迭代次数 $n_{\max} = 500$ 次. 由于只有 (5) 式和 (6) 式

作为约束条件, 而自由参数个数高于约束方程的数量, 对此类欠定问题而言, 反演结果存在非唯一性. 为了降低反演结果的不稳定性, 使用粒子群估算 10000 次, 类似大批量的估算结果不但稳定, 而且还具有一定的统计意义. 表 2 待估参数的分布如图 2 和图 3 所示, 图 2 表示 (6) 式平均惯性矩因子参考重力场模型 JGMRO120f 的结果 (表 1), 图 3 表示平均惯性矩因子参考重力场模型 GMM3-120 的结果. 图 2(a) 和图 3(a) 显示极大概率下的火星内核密度 ρ_{ci} 约为 $6950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 表明火星内核不由纯铁物质组成, 应该包含其他轻元素物质. 该结果与文献 [3,26] 的结果较一致, 文献 [3] 认为火星核富集硫元素, 文献 [26] 认为除硫元素外, 火星核可能存在一定量的碳和硅等轻元素物质. 图 2(b) 和图 3(b) 表明火星内核大小在 840 km 左右, 其大小不到整个火星核体积的 10%, 这可能是当前 InSight 数据无法检测出火星固态内核的原因^[11].

图 2(c) 和图 3(c) 表明极大概率下的火星幔 $\rho_m = 3477 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 该密度的大小在近期研究结果的范围内 ($3100\text{—}3650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)^[27], 接近于矿物学研究结果 $3550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[28]. 若考虑火星幔氧化铁的低含量特征^[29], 本文所估算的火星幔密度具有一定的合理性. 图 2(d) 和图 3(d) 表明极大概率下的

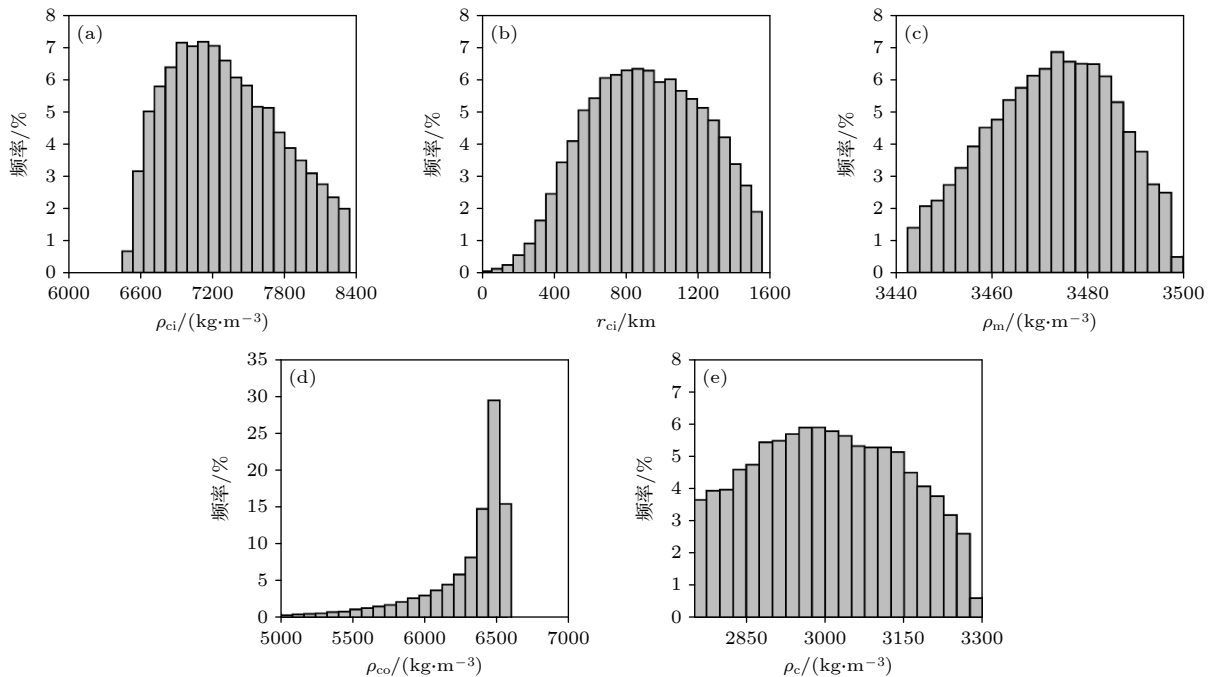


图 2 由重力场模型 JGMRO120f 推算的质量、平均惯性矩因子和二阶位系数反演的相关参数

Fig. 2. Parameters estimated from the calculated Martian mass, mean moment of inertia factor and gravitation coefficient of degree 2 of the gravity field model JGMRO120f.

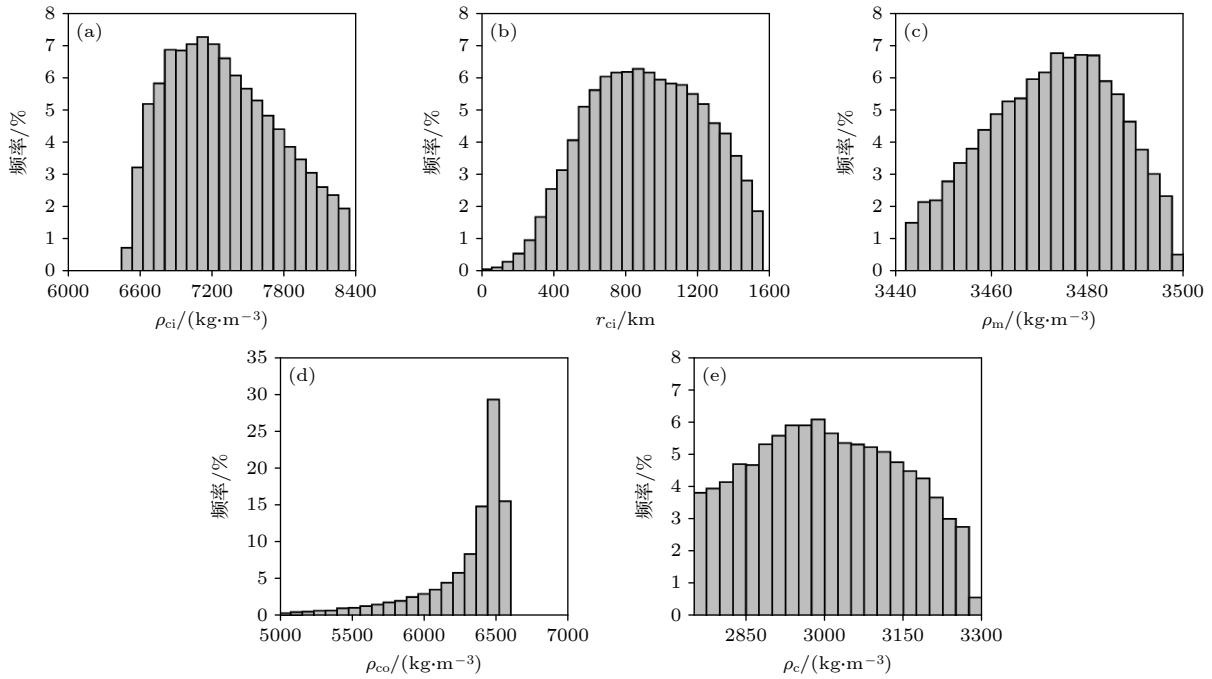


图 3 由重力场模型 GMM3-120 推算的质量、平均惯性矩因子和二阶位系数反演的相关参数

Fig. 3. Parameters estimated from the calculated Martian mass, mean moment of inertia factor and gravitation coefficient of degree 2 of the gravity field model GMM3-120.

火星液态外核密度 $\rho_{co} = 6400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 大于文献 [11] 所给范围的最大值 $6200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Stähler 等 [11] 在估算火星液态外核密度范围时, 没有考虑火星固态内核的情况, 若顾及文献 [11] 不考虑火星固态内核产生的差异, 本文反演结果具有一定的参考价值. 图 2(e) 和图 3(e) 表明极大概率下的火星壳密度 $\rho_c = 3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 在 Wieczorek 等 [30] 所给出的范围内 ($2700\text{--}3100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 接近该范围的平均值 $2900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 文献 [31] 利用 InSight 数据, 约束了火星北半球低地和南半球高地的火星壳密度范围 ($2850\text{--}3100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). 根据图 1 模型, 可知本文估算的火星壳密度为壳层密度的全球平均值, 很显然本研究结果 ($3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 接近最新火星壳密度范围 ($2850\text{--}3100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 的平均值 ($2950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 表明本研究结果具有一定的参考价值.

为了进一步确保估算结果的有效性, 有必要分析目标函数 f 对不同待求参数的敏感度 S . 通过 (5) 式和 (6) 式可以求得平均密度和平均惯性矩因子参数对不同待求参数的偏导数, 结合本文估算的待求参数最优值, 以及 (8) 式可以估算出目标函数对不同待求参数的敏感度. 根据前文对图 2 和图 3 的分析, 取不同待求参数的最优值: $\rho_{ci} = 6950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $r_{ci} = 840 \text{ km}$, $\rho_m = 3477 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho_{co} = 6400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

和 $\rho_c = 3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 目标函数 f 对不同待求参数的敏感度见表 3. 表 3 表明两个高阶重力场模型下, 目标函数 f 对同一待求参数的敏感度几乎一致, 这与两个重力场模型平均惯性矩因子的差异较小有关 (平均惯性矩因子见表 1). 目标函数 f 对火星幔 ρ_m 的敏感度最大, 对火星外核密度 ρ_{co} 的敏感度次之, 对火星壳密度 ρ_c 和火星内核密度 ρ_{ci} 的敏感度类似, 而对火星内核大小 r_{ci} 的敏感度较小. 参考表 3 目标函数 f 对火星内核大小的敏感度 (约为 -2.65) 以及 (8) 式敏感度的定义, 可知火星内核大小变化 1% 时, 会导致目标函数减小 2.65%, 火星内核大小的变化对目标函数的影响将不能忽略. 因此, 本文估算的火星内核大小仍然具有一定的参考价值.

表 3 目标函数 f 对不同待求参数的敏感度 S

Table 3. Sensitivity of various parameters S to the objective function f .

| 敏感度 S | JGMRO120f | GMM3-120 |
|-------------------|-----------|-----------|
| $S(f, \rho_{ci})$ | -11.1404 | -11.1404 |
| $S(f, r_{ci})$ | -2.6496 | -2.6496 |
| $S(f, \rho_m)$ | -305.8501 | -305.8642 |
| $S(f, \rho_{co})$ | -96.8772 | -96.8782 |
| $S(f, \rho_c)$ | -14.7235 | -14.7245 |

5 结 论

利用火星 120 阶次高阶重力场模型 JGMRO120f 和 GMM3-120 的二阶位系数, 结合 InSight 数据求解的火星最新岁差率, 基于火星 5 层内部结构模型以及火星平均密度和平均惯性矩因子, 应用非线性粒子群算法对火星核的大小和组成进行了估算. 统计结果表明: 1) 尽管重力场模型 JGMRO120f 和 GMM3-120 求解的平均惯性矩因子存在一定差别, 但依据两个模型推导的平均惯性矩因子, 结合火星平均密度反演的待估参数具有类似的分布特征, 大概率情况下自由参数的最优值基本一致; 2) 火星壳密度 ρ_c 的全球平均值约为 $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 接近 InSight 数据求解的平均值 $2950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 3) 火星幔密度 ρ_m 的极大概率分布值约为 $3477 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 约小于矿物学研究结果 $3550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 4) 以 InSight 数据估算的火星外核大小 ($r_{\text{co}} = 1840 \text{ km}$) 作为约束条件, 最优反演的火星外核密度 ρ_{co} 约为 $6400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 约大于近期不考虑固态内核的估算值 $6200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 5) 火星可能存在 840 km 的固态内核, 最优估算的内核密度 ρ_{ci} 约为 $6950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 表明火星内核不由纯铁物质组成, 该结果与火星核富集轻元素物质的近期研究一致. 综合考虑最优估算的火星壳密度、火星幔密度和火星外核密度, 研究得出的火星内核大小及其密度组成具有一定的参考价值. 鉴于约束方程较少以及反演结果的非唯一性, 未来随着 InSight 火星震数据处理技术的提高, 有望进一步约束火星内核的大小及其组成.

参考文献

- [1] Mittelholz A, Johnson C L, Feinberg J M, Langlais B, Phillips R J 2020 *Sci. Adv.* **6** eaba0513
- [2] Stevenson D J 2001 *Nature* **412** 214
- [3] Taylor G J 2013 *Geochemistry* **73** 401
- [4] Plesa A C, Tosi N, Grott M, Breuer D 2015 *J. Geophys. Res. Planet* **120** 995
- [5] Khan A, Liebske C, Rozel A, Rivoldini A, Nimmo F, Connolly J A D, Plesa A C, Giardini D A 2018 *J. Geophys. Res. Planet* **123** 575
- [6] Bagheri A, Khan A, Al - Attar D, Crawford O, Giardini D 2019 *J. Geophys. Res. Planet* **124** 2703
- [7] Genova A, Goossens S, Lemoine F G, Mazarico E, Neumann G A, Smith D E, Zuber M T 2016 *Icarus* **272** 228
- [8] Konopliv A S, Park R S, Folkner W M 2016 *Icarus* **274** 253
- [9] Rivoldini A, Van Hoolst T, Verhoeven O, Mocquet A, Dehant V 2011 *Icarus* **213** 451
- [10] Konopliv A S, Park R S, Rivoldini A, Baland R M, Maistre S L, Hoolst T V, Yseboodt M, Dehant V 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** e2020GL090568
- [11] Stähler S C, Khan A, Banerdt W B, et al. 2021 *Science* **373** 443
- [12] Sohl F, Schubert G, Spohn T 2005 *J. Geophys. Res. Planet* **110** E12008
- [13] Kahan D S, Folkner W M, Buccino D R, Dehant V, Maistre S L, Rivoldini A, Hoolst T V, Yseboodt M, Marty J C 2021 *Planet. Space Sci.* **199** 105208
- [14] Konopliv A S, Asmar S W, Folkner W M, Karatekin Ö, Nunes D C, Smrekar S E, Yoder C F, Zuber M T 2011 *Icarus* **211** 401
- [15] Ding M, Lin J, Gu C, Huang Q H, Zuber M T 2019 *J. Geophys. Res. Planet* **124** 3095
- [16] Zhong Z, Yan J, Liu X, Chen S, Fan G, Yang C, Pang L, Barriot J P 2022 *Icarus* **374** 114741
- [17] Planetary Data System <https://pds-geosciences.wustl.edu/default.htm> [2020.10.23]
- [18] Gerald S 2015 *Treatise on Geophysics* (Oxford: Elsevier) pp153–193
- [19] Goossen S, Sabaka T J, Genova A, Mazarico E, Nicholas J B, Neumann G A 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 7686
- [20] Tiesinga E, Mohr P J, Newell D B, Taylor B N 2021 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **50** 033105
- [21] Zuber M T, Smith D E 1997 *J. Geophys. Res. Planet* **102** 28673
- [22] Baland R M, Yseboodt M, Maistre S L, Rivoldini A, Hoolst T V, Dehant V 2020 *Celest. Mech. Dyn. Astr.* **132** 1
- [23] Knapmeyer-Endrun B, Panning M P, Bissig F, et al. 2021 *Science* **373** 438
- [24] Yan J, Xu L, Li F, Matsumoto K, Rodriguez J A P, Miyamoto H, Dohm J M 2015 *Adv. Space Res.* **55** 1721
- [25] Zhong Z, Zhang T, Duan L, Li Y, Zhu H Q 2021 *Geomat. Inform. Sci. Wuhan Univ.* **46** 238 (in Chinese) [钟振, 张腾, 段炼, 李毅, 朱化强 2021 武汉大学学报-信息科学版 **46** 238]
- [26] Steenstra E S, Westrenen W V 2018 *Icarus* **315** 69
- [27] Semprich J, Filiberto J 2020 *Meteorit. Planet. Sci.* **55** 1600
- [28] McGetchin T R, Smith J R 1978 *Icarus* **34** 512
- [29] Khan A, Sossi P A, Liebske C, Rivoldini A, Giardini D 2022 *Earth Planet. Sc. Lett.* **578** 117330
- [30] Wiczeorek M A, Zuber M T 2004 *J. Geophys. Res. Planet* **109** E01009
- [31] Wiczeorek M A, Broquet A, McLennan S M, et al. 2022 *J. Geophys. Res. Planet* **127** e2022JE007298

Constraining the size and density composition of the Martian core by using second-order potential coefficient and recent precession rate of gravity field model^{*}

Zhong Zhen[†] Wen Qi-Lin Liang Jin-Fu

(School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

(Received 13 June 2022; revised manuscript received 27 October 2022)

Abstract

It is still difficult to detect the existence of Martian solid inner core merely based on Mars seismic InSight data. To deal with this problem, our study intends to use the mean density and mean moment of inertia factor to constrain the size and density of Martian solid inner core. Using the Mars high-degree gravity field models: JGMRO120f and GMM3-120, and considering the recent precession rate, we obtain the mean density and mean moment of inertia factor, which are treated as the observed values. Referring to the 4-layers internal structure model of Mars, and considering the 4 parameters, i.e. crustal density, mantle density, density of outer core, size and density of inner core, we calculate the modeled values of the Martian mean density and the mean moment of inertia factor. From the minimum residuals between observed and modeled values of mean density as well as that of mean moment of inertia factor, it is found that the two gravity field models have the same result of distribution of free parameters. As to the optimized values of the free parameters, the two gravity field models even have the same results. Furthermore, the optimized crustal density, mantle density and density of outer core approach other studies, indicating the dependence of our results. Finally, our result demonstrates that Mars likely has a solid inner core with a size close to 840 km, and the density of inner core is nearly $6950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Our result implies that Mars has an inner core not fully composed of pure iron, which is consistent with the recent study that Mars requires a substantial complement of light elements in Martian core. However, it is further needed to constrain the size and composition of Martian inner core due to the non-uniqueness of inversion results. With the improvement of processing technology on the InSight data, it can be further constrained for the size and composition of Martian inner core.

Keywords: InSight, precession rate, mean moment of inertia factor, size of Martian inner core, density of Martian inner core

PACS: 96.30.Gc, 96.25.Nc, 96.25.Hs

DOI: 10.7498/aps.72.20221170

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41864001, 42030110).

[†] Corresponding author. E-mail: zzhong@gznu.edu.cn

应用重力场模型二阶位系数及新近岁差率约束火星内核大小及密度组成

钟振 文麒麟 梁金福

Constraining the size and density composition of the Martian core by using second-order potential coefficient and recent precession rate of gravity field model

Zhong Zhen Wen Qi-Lin Liang Jin-Fu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 029601 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221170

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221170>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

火星大气频散声速剖面建模方法及其对声传播路径的影响

Methods of modelling dispersive sound speed profiles of Martian atmosphere and their effects on sound propagation paths

物理学报. 2022, 71(24): 244304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221531>

火星大气条件下基态CO₂放电简化集合

Numerical study on simplified reaction set of ground state species in CO₂ discharges under Martian atmospheric conditions

物理学报. 2021, 70(21): 215201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210664>

一种沟槽辅助气孔隔离的低串扰高密度异质多芯少模光纤

A low-crosstalk and high-density multi-core few-mode fiber based on heterogeneous core and trench-assisted air-holes isolation

物理学报. 2022, 71(2): 024205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210974>

液滴撞击圆柱内表面的数值研究

Numerical study of droplet impact on the inner surface of a cylinder

物理学报. 2018, 67(18): 184701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180364>

非线性表面波的二阶微扰解及特性分析

Second-order perturbation solution and analysis of nonlinear surface waves

物理学报. 2022, 71(16): 164301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212445>

基于二阶共鸣器单元的宽频消声器研究与设计

Research and design of broadband muffler based on second-order Helmholtz resonators

物理学报. 2022, 71(23): 234301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221377>