



主小行星带对火星轨道长期动力学影响评估

刘山洪^{1,2*}, 吴正楷³, 曹建峰^{1,2}, 鄢建国⁴, 李颢^{1,2}

1. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094;

2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094;

3. 武汉大学数学与统计学院, 武汉 430072;

4. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430072

*联系人, E-mail: shanhongliu@whu.edu.cn

收稿日期: 2022-03-29; 接受日期: 2022-07-12; 网络出版日期: 2022-11-14

国家自然科学基金(编号: 12203002, 11973015, U1831132)、航天飞行动力学技术重点实验室基金(编号: KJW6142210210201)和武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金(编号: 21-01-01)资助项目

摘要 “天问一号”任务的成功实施标志着我国正迈向月球以外更远的深空, 面临着更为复杂的空间动力学环境, 探测难度将不断增大. 小行星带毗邻火星, 不完全考虑其产生的摄动会严重影响火星轨道动力学参数解算精度, 进而间接影响太阳系历表构建和高精度火星探测任务实施. 为研究主带小行星动力学影响, 本文先分析了主带小行星的分布特性, 建立了太阳系动力学积分环境, 结果表明: 除火星外的内太阳系行星轨道积分10年与DE421的差异小于15 m, 火星轨道积分差异约百米量级. 基于点质量模型、单环模型和最新六环模型估算了其对火星轨道的影响, 积分10年误差分别约为2 km, 31.3 m, 2 m. 最后讨论了环模型与太阳系行星轨道参数共同解算情况, 证实了环模型参数修正后火星距离观测量残差理论上可进一步降低至亚米级, 同时发现仅利用距离观测量行星初始轨道根数在Z轴方向上解算误差较大.

关键词 主带小行星, 火星历表, 太阳系动力学模型

PACS: 95.55.Pe, 96.12.Uv, 96.15.De, 96.30.Ys

1 引言

火星毗邻地球, 火星探测是继我国探月任务之后的又一重要任务. 2020年7月, 我国自主发射了首个火星探测器“天问一号”; 2021年2月, “天问一号”进入环绕火星轨道; 2022年6月完成“绕”“落”和“巡”三项任务, 之后轨道器和着陆器配合完成对火星的科学探测. 此外, 我国还规划了探月四期、小行星探测和木星系

探测等任务^[1].

深空探测中高精度数值行星历表是关乎探测任务成败的重要基础数据. 在探测任务之初, 任务规划、轨道设计和观测纲要制定等离不开行星历表; 在任务实施中, 行星历表对探测器导航定位、制导控制等发挥着重要的作用; 在任务完成之后, 高精度历表将直接有助于应用在星载数据解译、行星制图、行星轨道演化、内部结构反演, 甚至宇宙常数解算和广义相对论

引用格式: 刘山洪, 吴正楷, 曹建峰, 等. 主小行星带对火星轨道长期动力学影响评估. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 229511
Liu S H, Wu Z K, Cao J F, et al. Impact analysis of the main asteroid belt on the long-term dynamics of Mars orbit (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 229511, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0119

验证等诸多研究领域^[2-7].

主带小行星(Main Belt Asteroids, MBAs)产生的摄动力对现代数值历表中火星和木星轨道的影响最显著. 考虑到当前无线电跟踪测量的精度, MBAs摄动对于月球、水星和金星等轨道以及相关探测任务精密定轨影响甚微^[8]. 虽然工程上对于月球探测器初轨确定甚至精密定轨往往可不考虑MBAs的动力学影响, 但利用无线电跟踪数据对火星历表、气态行星和小行星历表以及相关动力学参数高精度解算时, 必要考虑MBAs的动力学影响^[6,7].

小行星带建模是现代数值行星历表中一个难点问题. 由于小行星数目众多, 在太阳系动力学中精确考虑数十万小行星扰动将面临极高的算法与时间复杂度. 在现代数值行星历表解算中, 一般采用点质量方法纳入数百颗质量较大的小行星, INPOP19a, EPM2017, DE421分别考虑了343, 341, 342颗主带小行星^[4,8,9]. 此外, Fienga等人^[8]发现在INPOP19a历表解算中加入了14099颗小行星的扰动矩阵信息, 火星轨道精度可以提高25%, 但为了节省太阳系天体积分时间, 历表解算中未积分14099颗小行星.

EPM历表解算中除了考虑300颗大质量小行星之外, Krasinsky等人^[10]提出在黄道面中采用实心环拟合并估算了MBAs剩余小行星质量^[11]. INPOP历表解算中, Fienga等人^[3]则提出采用中心位于太阳系质心的圆形环. Kuchynka等人^[12]提出了单环模型, 并证实了从主带中取出约300个较大质量的小行星后可以拟合其他剩余小行星摄动影响, 但这一研究未考虑大量未知小行星的影响. Liu等人^[7]针对这一问题初步提出了六环模型.

当前, INPOP19a, DE430和DE440等历表中以2000年为时间起点, 前后递推20年火星轨道标称精度可达百米级^[8,13,14]. 在同等递推时间尺度, INPOP19a和DE430历表中月球轨道标称精度均为亚米级^[8,13], INPOP19a水星和金星轨道的不确定度均约为十米^[8]. 气态行星轨道精度不高主要由于跟踪测量数据稀少, 但火星轨道精度远低于月球和类地行星轨道精度的主要原因之一在于不精确的小行星带模型. MBAs摄动力不完全建模导致历表解算中含有未知扰动, 难以准确挖掘出测量数据的真实约束. 本文对MBAs轨道特征进行分析, 以我国火星探测和历表科学产品构建等潜在需求为牵引, 全面评估当前小行星带对火星轨道精

度的影响, 对当前存在的小行星带摄动力建模方案进行对比分析.

2 小行星带分布与摄动力计算

2.1 基本情况

MBAs中直径大于1 km的小行星约110万–190万颗, 小于1 km的据估算有数百万颗^[15]. Nesvorný等人^[16,17]提供的小行星数据集包含约137000颗小行星, 根据层次聚类方法分出了122个家族. 按照长半轴MBAs又可以分为内主带、中央主带和外主带, 如图1所示.

2.2 分布情况

对主带小行星按照绝对星等进行分类, 统计出小行星绝对星等分布, 绘制在图2 (Y轴计数值取10为底

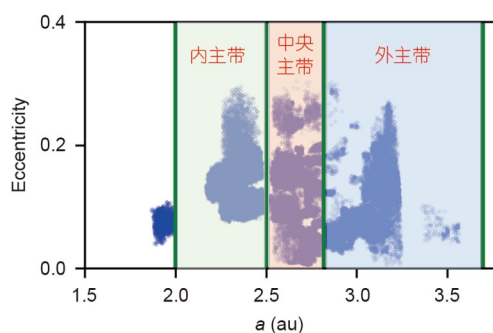


图1 (网络版彩图) MBAs半长轴-偏心率统计图以及环带区域划分

Figure 1 (Color online) a - e statistics and division of MBAs.

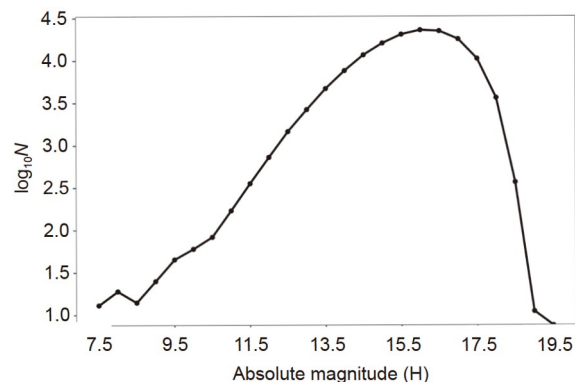


图2 主带小行星统计分布

Figure 2 Statistical distribution of main belt asteroids.

的对数). 可以看到, 小行星数量基本随着绝对星等递增, 绝对星等为8.5和11时, 斜率存在抬升, 直到绝对星等大于15 (即小行星直径小于5 km), 小行星数量迅速降低. 该趋势表明主带中还存在大量未知的、尺寸较小的小行星. 因此单纯采用点质量方法来处理小行星主带的摄动, 远不够精确. 小行星带动力学建模是建立在详尽分布模型的基础上, Liu等人^[7]从家族分类的角度对已知小行星进行了初步分析, 其采用正态分布理论.

本文按照外带、中央和内带小行星进行偏心率分布分析, Plummer^[18]发现其基本符合瑞利分布, 为小行星带形成与太阳系早期动力学事件提供了约束. 图3按照内、中、外主带, 分析了小行星偏心率分布情况. 需要说明 $F(e)$ 为标准瑞利分布累积函数, $-\ln(1-F(e))$ 与 e^2 成直线则说明符合瑞利分布. 可以看到偏心率小于0.07与符合瑞利分布拟合较好, 外主带比中央和内主带与瑞利分布更接近. 初步分析结果与Malhotra和Wang^[19]结论类似, 但瑞利分布的整体趋势性有所减弱, 这表明了主带小行星带演化趋势和不断变化的性质, 在长尺度演化的小行星带精确建模和维系中需要加以考虑, 值得进一步研究. 因此在建模中也可以适当考虑瑞利分布的情况. 本文对此不做深入研究, 将借助当前最新研究模型评估其对火星轨道的影响.

由于目前对主带小行星的掌握并不全面, 且主带一直处在演化中, 建立起完整的动力学模型的难度较大. 针对小行星主带, 当前高精度数值行星历表中有两种处理策略. 一种是考虑三百余颗大质量小行星或建立小行星带单环模型(图4(a))亦或是两者结合来拟合小行星动力学影响, 另一种是六环模型(图4(b))^[7,20].

2.3 计算方法

通常计算主带大小行星对太阳系天体的影响可采用点质量方法, 与 N 体摄动计算公式类似. 小行星带对大行星的总摄动即计算MBAs单个小行星引起的摄动和, 当前历表中考虑三百余颗大质量小行星的摄动计算即采用此方法. 第 i 个小行星对行星(例如火星)加速度 $\mathbf{a}_M$ 计算公式为

$$\mathbf{a}_M = \sum_{i=1}^n G \frac{m_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_M)}{|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}_i|^3}, \quad (1)$$

其中 G 为万有引力常数, m_i 为第 i 颗小行星的质量参数,

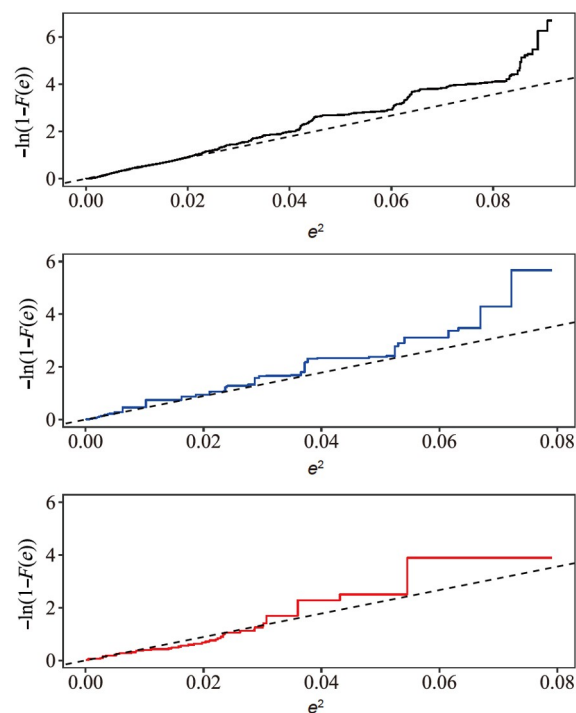


图3 (网络版彩图)外带、中央和内带小行星偏心率分布检验
Figure 3 (Color online) Eccentricity distribution of outer, central and inner main belt.

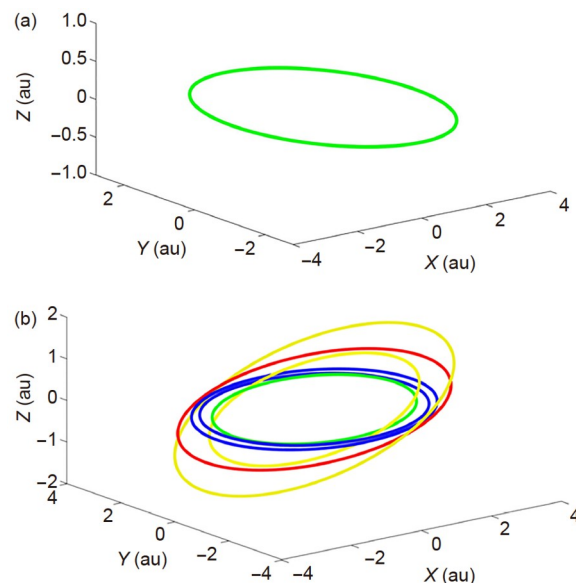


图4 (网络版彩图)主带模型. (a) 单环模型; (b) 六环模型^[20]
Figure 4 (Color online) MBAs models. (a) One-ring model; (b) six-ring model [20].

$\mathbf{r}_i$ 为小行星位置向量, $\mathbf{r}_M$ 为火星位置向量, 计算均在太阳系质心天球参考系中. 点质量计算方法简单, 但长时间尺度递推时计算效率无法保证, 此外无法将未知小

行星纳入主带小行星计算. 在主带模型方面, 本文验证单环模型和六环模型, 具体参数列在表1^[6,20]. 需要指出, 基于平均轨道效应, Liu^[20]并未给出升交点赤经, 本文按照提供的合成模型在主带各个区域的占比进行抽样, 采用正态分布对数据进行拟合, 求解了模型升交点赤经, 列在表1. 选取时间点为JD 2459600.5, 小行星升交点数据由MPC (Minor Planet Center)获取. 由于单一模型代表的小行星轨道众多, 求解时升交点存在较

大不确定度. 值得一提, 平均效应可以很大程度消除升交点甚至轨道倾角不准确带来的影响. 在实测数据处理中, 有充足多元观测值时可把升交点作为一个待求参数, 初始升交点假定为任意起算数据即可.

环模型加速度计算算法要兼具快速和高精度的性能, Liu^[20]初步提出了六环模型并给出了太阳系内任一点 (x,y,z) 环模型产生的加速度($\mathbf{a}$)算法, 对环内、外行星均有效, 普适性较强.

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \frac{-2\mu R}{p} \begin{pmatrix} \left(\left(\frac{B(m)(d_{OH}^2 + z^2 - R^2)}{q^2} \right) + \left(1 - \frac{2R(d_{OH} + R)}{p^2} \right) S(m) \right) \frac{4x}{p^2} \\ \left(\left(\frac{B(m)(d_{OH}^2 + z^2 - R^2)}{q^2} \right) + \left(1 - \frac{2R(d_{OH} + R)}{p^2} \right) S(m) \right) \frac{4y}{p^2} \\ \left(\frac{2E(m)}{q^2} \right) z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 d_{OH} 为某点到太阳系质心坐标系中Z轴的距离, z 为该点到X-Y平面的距离, μ 是环密度, R 是环半径, $p = \left((d_{OH} + R)^2 + z^2 \right)^{0.5}$ 为该点到环最远边界处的距离^[6]. $E(m)$ 为第二类椭圆积分, $m = 4Rd_{OH}/p^2$ 是一个无量纲量^[21]. 引入了特殊第二类椭圆积分 $S(m)$, 并结合了第二类完全椭圆辅助积分 $B(m)$ ^[22,23].

$$\begin{cases} S(m) = \frac{-1}{m} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2 \sigma d\sigma}{\sqrt{1 - m \sin^2 \sigma}}, \\ B(m) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos 2\sigma d\sigma}{\sqrt{1 - m \sin^2 \sigma}}. \end{cases} \quad (3)$$

该算法对位于环模型内部或外部的行星均适用,

由于引入组合第二类椭圆积分可以提高计算的精度并避免了靠近环中心区域可能存在发散的问题.

3 动力学环境建立

为了主带小行星对火星历表精度的影响, 需要构建整个太阳系动力学积分. 太阳系动力学积分系统中考虑太阳、八大行星、冥王星和月球, 质量参数列在表2^[4,24-29], 均采用参数化后牛顿N体运动方程来描述太阳系天体的运动, 这与DE历表、INPOP历表, 以及EPM历表类似. 除了把天体当成点质量计算外, 本文不涉及观测数据的分析, 因此暂未考虑地球、月球和其他天体的自转定向参数以及潮汐和低阶重力场影响. 对于小行星带的考虑, 主要采用两种方式: (1) 在牛顿

表1 主带小行星六环模型参数^[6,20]

Table 1 Parameters of six-ring model for MBAs ^[6,20]

环	半径 (au)	倾角 (°)	占比 (%)	密度 (kg/m)	升交点赤经 (°)
R1	2.784	5.040	18.798	1.21	164.3±100.9
R2	2.383	19.094	18.595	1.40	200.8±95.9
R3	2.316	5.991	25.086	1.95	107.0±49.1
R4	3.165	23.841	5.986	0.34	159.3±100.1
R5	2.601	3.762	15.247	1.05	164.7±104.2
R6	3.098	13.319	16.288	0.94	164.6±101.0

表 2 天体质量参数选取

Table 2 Selection of celestial bodies mass parameters

天体	$GM_{\text{sun}}/GM_{\text{planet}}$	参考文献
太阳	1	—
水星	6023597.400017	[24]
金星	408523.718655	[25]
地球	332946.048166	—
火星	3098703.590267	[26]
木星	1047.348625	[4]
土星	3497.901768	[27]
天王星	22902.981613	[28]
海王星	19412.237346	[29]
冥王星	135836683.767599	[4]
月球	27068703.185436	[4]

力学框架下采用点质量方法考虑300颗质量较大的小行星^[30]; (2) 在点质量的基础上, 采用环模型来等效剩余的小行星摄动.

积分器采用Adams-Cowell, 连续积分10年, 积分步长为2天. 由于DE421中考虑了三百颗质量较大的小行星, 在此采用同样的策略. 基于参数化后牛顿 N 体运动

方程的太阳系行星积分模块, 初步积分结果与DE421进行了比较, 如图5所示. 可以看到, 除火星外对于内太阳系行星, 自积分10年的轨道与DE421历表差异小于15 m, 但火星轨道积分的差异在百米量级. 木星和土星轨道差异在千米量级, 土星以远行星的轨道差异不超过0.5 km. 本文积分中特洛伊群暂不考虑, 可能会增大土星轨道误差.

4 结果分析

4.1 大小行星摄动影响

为评估大质量主带小行星影响对各大行星的影响, 在积分计算中分别加入和不加入约300颗大质量主带小行星, 积分后天体轨道差异绘制在图6. 可以看到, 大质量主带小行星对水星和冥王星的影响在米级, 对金星、地球、天王星和海王星的影响在百米级, 对火星、木星和土星的影响最大达到千米级别. 值得一提, Ceres, Pallas, Vesta三颗最大主带小行星在太阳系动力学模型中通常单独考虑.

可以说明主带小行星对内太阳系行星火星轨道的影响较大. 值得一提, 除了较为精确的已知质量的小行

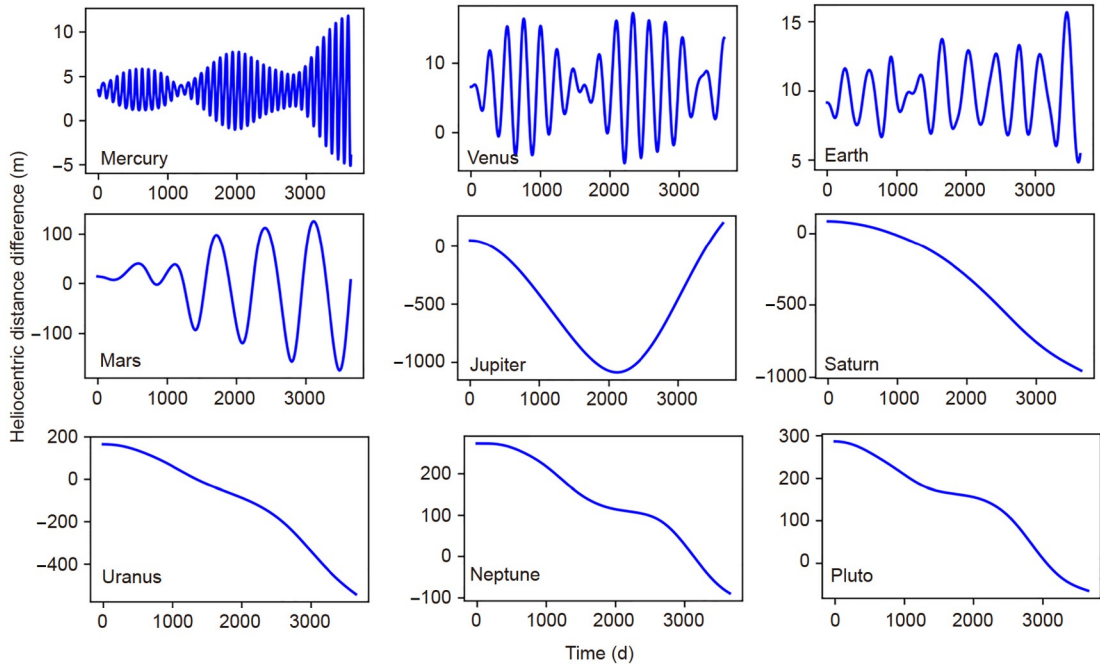


图 5 (网络版彩图)太阳系动力学模型积分与DE421差异(10年)

Figure 5 (Color online) Gap between integral of solar system dynamics model and DE421 (10 years).

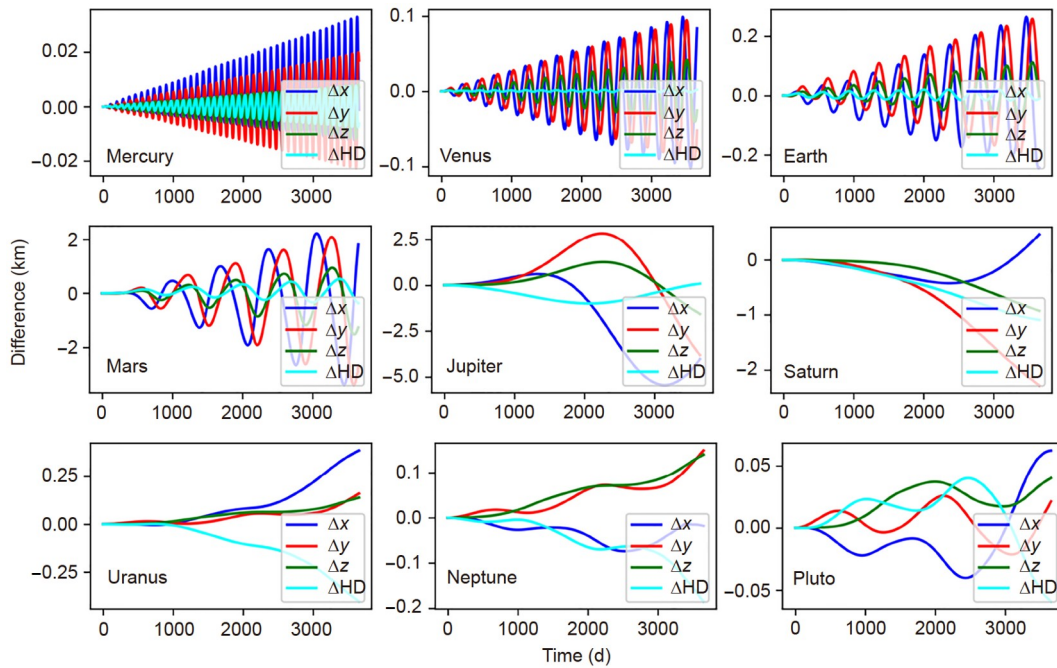


图 6 (网络版彩图) 300颗大质量小行星对太阳系行星轨道的影响(10年)

Figure 6 (Color online) Influence of 300 massive asteroids on the orbits of planets in the solar system (10 years).

星, 小行星带中还存在大量未知的、质量较小的小行星. 这一部分误差大小通常无法精确给出, 在解算历表时通过拟合参数吸收一部分, 另一部分则包含在测量误差中, 这也导致测量数据的高精度优势无法完全挖掘, 尤其对于火星任务.

4.2 剩余小行星摄动影响

为包含剩余未知小行星的摄动力, 一般可以采用点质量模型、单环模型和六环模型, 但点质量模型的计算效率极低, 且仅适用于完全已知轨道信息的小行星. 图7给出了小行星数量和积分时长与计算效率之

间的关系. 基于点质量模型, 根据小行星数量和积分时长, 绘制了时间消耗的热力图. 从小行星数目取1500–8000, 积分时间为10–40年, 积分步长为12 h. 从图中可以看到, 相对于积分时长, 小行星数量显著影响着计算效率.

图8对比了单环模型和六环模型对小行星摄动拟合精度. 精度对比中原始模型为点质量模型, 考虑了8348颗小行星的影响. 三个模型两两对比其对地-火观测测量产生的影响即 ΔEM . 模拟观测量(地-火距离)时, 积分中步长设置为8 h. 值得一提, 仿真距离测量中未添加复杂噪声策略, 如测量系统、传播过程和测站

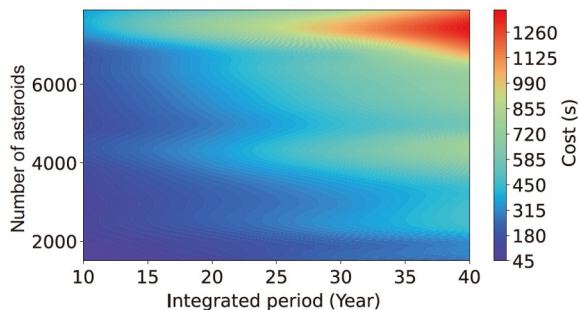


图 7 (网络版彩图) 时间消耗热力图

Figure 7 (Color online) Heat map of time cost.

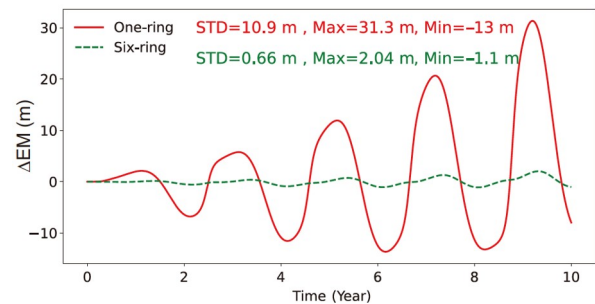


图 8 (网络版彩图) 单环模型和六环模型对地-火距离影响

Figure 8 (Color online) Earth-Mars distance difference between one-ring and six-ring models.

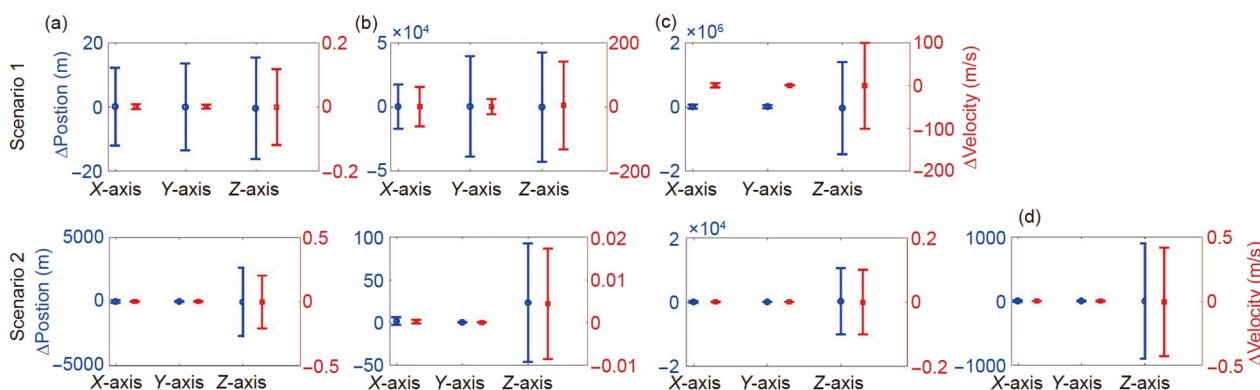


图 9 (网络版彩图)行星轨道参数改正量. (a) 火星; (b) 金星; (c) 木星; (d) 地-月质心
Figure 9 (Color online) Correction of planetary orbit parameters. (a) Mars; (b) Venus; (c) Jupiter; (d) Earth-Moon.

中存在的误差,也未考虑探测任务中行星、太阳和探测器之间的“合”“冲”现象,其会极大地影响测量数据质量,但这些在处理实际任务数据中需详细考虑.

从图中可以看到,单环模型10年尺度上,对地-火距离影响的标准差约为10.9 m,多环模型约为0.66 m.六环模型加入后,积分十年间由主带引起的火星轨道误差不大于2 m.六环模型可以更好消除小行星分布带来的摄动影响.

4.3 参数解算

在此基础上研究六环模型附加参数解算,即利用观测量对环模型参数同时进行解算,结果表明加入地-火观测值约束,地-火残差可以降低至约亚米级,与Liu^[20]结论一致.

进一步,讨论联合环模型与受小行星带摄动影响较大的火星、木星、金星和地月质心的轨道参数解算.首先在点质量模型的基础上仿真地-火观测链路和地球-行星观测链路获得距离观测量,进而设定两种解算策略,策略1仅修正火星轨道和环模型,策略2修正行星轨道和环模型,分别记作Scenario 1和Scenario 2.需要注意,仿真距离观测量中未添加复杂噪声,但基于点质量模型仿真观测值时本身就未包含隐藏小行星的摄动力,其影响相当于在观测值上添加了真实噪声.实际上,在历表解算中更多采用策略2,在解算环模型参数的同时也加入对其他行星初始轨道的改正,如图9所示.

图9结果表明基于火星距离观测量难以约束除火

星以外其他行星的初始轨道根数.通过增加其他行星的距离约束,其初始轨道根数的解算误差及不确定度可显著降低.仿真实验中均显示了Z轴方向解算存在较大误差,主要由于地球测站获取距离观测量对垂直平面方向的约束较弱,未来加入VLBI观测量提供了角度信息可能会有一定贡献;另一方面,增加观测时间也可能一定程度避免.值得一提,若增加了其他行星的距离观测量,会对地球-月球质心位置产生较强的约束,在解算行星初轨时有必要同时解算^[3,8].

5 讨论和结论

本文主要研究了紧邻火星的主小行星带产生的摄动力影响.根据Nesvorný最新提供小行星库对主带小行星进行的统计分析,验证了主带小行星偏心率大体服从瑞利分布,且外带和中央的瑞利分布拟合不如内带,新数据表明了主带小行星轨道演化的动态性,这对小行星带进一步动力学建模和轨道演化分析提供了一定的分布参考.拟合主小行星带摄动的模型主要有三种:点质量模型、单环模型和六环模型,本文一方面评估了小行星带对火星历表的影响,积分十年误差约为2 km,采用单环模型后小行星带摄动误差降低至约30 m,采用六环模型后小行星带误差降至约2 m.进一步加入探测器仿真测距约束信息,发现加入地火测距观测量,估计环模型参数,可以降低环模型导致的历表误差至亚米级;加入其他行星的测距约束,对火星历表解算不确定度有一定贡献,但可对观测天体自身轨道一定程度约束.

参考文献

- 1 The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's Space Program: A 2021 Perspective White Paper (in Chinese). 2022 [中华人民共和国国务院新闻办公室.《2021中国的航天》白皮书. 2022]
- 2 Mayo A P, Blackshear W T, Tolson R H, et al. Lander locations, Mars physical ephemeris, and solar system parameters: Determination from Viking lander tracking data. *J Geophys Res*, 1977, 82: 4297–4303
- 3 Fienga A, Manche H, Laskar J, et al. INPOP06: A new numerical planetary ephemeris. *Astron Astrophys*, 2008, 477: 315–327
- 4 Folkner W M, Williams J G, Boggs D H. The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421. IPN Progress Report, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. 2009
- 5 Pitjeva E V, Standish E M. Proposals for the masses of the three largest asteroids, the Moon-Earth mass ratio and the Astronomical Unit. *Celest Mech Dyn Astron*, 2009, 103: 365–372
- 6 Liu S H. Scientific Applications of Radio Tracking Data from Deep Space Probes (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Wuhan University, 2021 [刘山洪. 深空探测器射电跟踪数据应用研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2021]
- 7 Liu S, Fienga A, Yan J. A ring model of the main asteroid belt for planetary ephemerides. *Icarus*, 2022, 376: 114845
- 8 Fienga A, Viswanathan V, Deram P, et al. INPOP new release: INPOP19a. In: Proceedings of the Astrometry, Earth Rotation, and Reference Systems in the GAIA Era. Paris, 2020. 293–297
- 9 Pitjeva E V, Pitjev N P. Masses of the main asteroid belt and the Kuiper belt from the motions of planets and spacecraft. *Astron Lett*, 2018, 44: 554–566, arXiv: [1811.05191](#)
- 10 Krasinsky G A, Pitjeva E V, Vasilyev M V, et al. Hidden mass in the asteroid belt. *Icarus*, 2002, 158: 98–105
- 11 Pitjeva E V. High-precision ephemerides of planets—EPM and determination of some astronomical constants. *Sol Syst Res*, 2005, 39: 176–186
- 12 Kuchynka P, Laskar J, Fienga A, et al. A ring as a model of the main belt in planetary ephemerides. *Astron Astrophys*, 2010, 514: A96, arXiv: [1004.3119](#)
- 13 Folkner W M, Williams J G, Boggs D H, et al. The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431. IPN Progress Report, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. 2014
- 14 Park R S, Folkner W M, Williams J G, et al. The JPL planetary and lunar ephemerides DE440 and DE441. *Astron J*, 2021, 161: 105
- 15 Ryan E L, Mizuno D R, Shenoy S S, et al. The kilometer-sized main belt asteroid population revealed by Spitzer. *Astron Astrophys*, 2015, 578: A42
- 16 Nesvorný D. Nesvorný HCM Asteroid Families V3.0. NASA Planetary Data System. 2015
- 17 Nesvorný D, Brož M, Carruba V. Identification and dynamical properties of asteroid families. arXiv: [1502.01628](#)
- 18 Plummer H C. A note on bright meteors. *Mon Not R Astron Soc*, 1916, 76: 390–395
- 19 Malhotra R, Wang X. Eccentricity distribution in the main asteroid belt. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 465: 4381–4389, arXiv: [1611.05826](#)
- 20 Liu S H. Scientific applications of radio tracking data from deep space probes (in Chinese). Geomat Inform Sci Wuhan Univ, 2022, 47: 323 [刘山洪. 深空探测器射电跟踪数据应用研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2022, 47: 323]
- 21 Byrd P F, Friedman M D. Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientists. Berlin: Springer, 2013
- 22 Fukushima T. Fast computation of incomplete elliptic integral of first kind by half argument transformation. *Numer Math*, 2010, 116: 687–719
- 23 Fukushima T. Precise computation of acceleration due to uniform ring or disk. *Celest Mech Dyn Astron*, 2010, 108: 339–356
- 24 Anderson J D, Colombo G, Esposito P B, et al. The mass, gravity field, and ephemeris of Mercury. *Icarus*, 1987, 71: 337–349
- 25 Konopliv A S, Banerdt W B, Sjogren W L. Venus gravity: 180th degree and order model. *Icarus*, 1999, 139: 3–18
- 26 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
- 27 Jacobson R A, Antreasian P G, Bordi J J, et al. The gravity field of the saturnian system from satellite observations and spacecraft tracking data. *Astron J*, 2006, 132: 2520–2526
- 28 Montenbruck O, Gill E. Satellite Orbits: Models, Methods and Applications. Berlin: Springer, 2012
- 29 Jacobson R A, Riedel J E, Taylor A H. The orbits of Triton and Nereid from spacecraft and earthbased observations. *Astron Astrophys*, 1991, 247: 565–575
- 30 Fienga A, Avdellidou C, Hanuš J. Asteroid masses obtained with INPOP planetary ephemerides. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 492: 589–602

Impact analysis of the main asteroid belt on the long-term dynamics of Mars orbit

LIU ShanHong^{1,2*}, WU ZhengKai³, CAO JianFeng^{1,2}, YAN JianGuo⁴ & LI Xie^{1,2}

¹ *Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics Laboratory, Beijing 100094, China;*

² *Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;*

³ *School of Mathematics and Statistics, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*

⁴ *State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430072, China*

The successful implementation of the Tianwen-1 mission marks that China is moving toward a deeper space beyond the moon, facing a more complex space dynamics environment, and the difficulty of deep space exploration will continue to increase. The main belt asteroids (MBAs) are adjacent to Mars, and the perturbation by MBAs is hard to fully consider, effecting the accuracy of the Mars orbital dynamics parameters. Thus, it will indirectly affect the construction of a high-precision solar system ephemeris and the Mars exploration missions. This paper analyzes the distribution feature of MBAs based on the Nesvorný asteroid library. The dynamic environment of the whole solar system with MBAs was established to evaluate MBA's perturbation influence. The results show that the difference between the ten-year integral orbits of the inner solar system planets and DE421 is less than 15 m, and the integral difference of Mars' orbits reaches 100 m. Based on the point-mass model, the one-ring model and the latest six-ring model, the influence of MBAs on the orbit of Mars is estimated, and the orbit error of 10 years is about 2 km, 31.3 m, and 2 m, respectively. Further, the joint solution of the ring model and the orbital parameters of the planets is discussed, which confirms that the residuals of Mars-Earth distance with the fitted ring model can theoretically be reduced to sub-meters. The error in the Z-axis of the planet's orbit is large if use only the range measurement.

main belt asteroids, Mars ephemeris, solar system dynamical model

PACS: 95.55.Pe, 96.12.Uv, 96.15.De, 96.30.Ys

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0119](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0119)