



引文格式:秦松鹤,黄勇,李培佳,等.木星探测器Juno精密定轨分析及低阶引力场解算[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(1):65-74.DOI:10.13203/j.whugis20200664

Citation: QIN Songhe, HUANG Yong, LI Peijia, et al. Trajectory Estimation Analysis and Low Degree Gravity Field Recovery Based on Juno Tracking Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(1): 65-74. DOI: 10.13203/j.whugis20200664

木星探测器 Juno 精密定轨分析及低阶引力场解算

秦松鹤^{1,2} 黄 勇^{1,2} 李培佳¹ 曹建峰^{3,4}

1 中国科学院上海天文台,上海,200030

2 中国科学院大学,北京,100049

3 航天飞行动力学技术重点实验室,北京,100094

4 北京航天飞行控制中心,北京,100094

摘要:随着中国深空测控技术的进步和深空探测计划的推进,木星探测计划已经进入日程,木星探测器的精密定轨和木星的引力场的解算是木星探测中的重要研究内容。首先给出了木星探测器的坐标系统和动力学模型,并利用已公布的朱诺号木星探测器精密星历数据进行验证,动力学拟合结果与参考星历的位置偏差在 10 m 量级,速度偏差小于 6 mm/s;然后利用深空多普勒测量模型处理已经发布的朱诺号无线电测量数据进行精密定轨,结果与参考星历的差距在数百米量级;最后利用仿真数据验证引力场系数解算的可靠性,并利用朱诺号探测器 4 个近木点附近的实测数据解算引力场系数,得到了截至 8 阶的带谐项系数。

关键词:精密定轨;朱诺号探测器;木星引力场

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2021-05-10

DOI: 10.13203/j.whugis20200664

文章编号:1671-8860(2023)01-0065-10

Trajectory Estimation Analysis and Low Degree Gravity Field Recovery Based on Juno Tracking Data

QIN Songhe^{1,2} HUANG Yong^{1,2} LI Peijia¹ CAO Jianfeng^{3,4}

1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

4 Beijing Aerospace Flight and Control Center, Beijing 100094, China

Abstract: Objectives: With the development of deep-space technology of China, the Jupiter exploration program has been added into the schedule. The precise orbit determination (POD) and gravity field recovery play an important role in Jupiter exploration. **Methods:** This paper focuses on the precise orbit determination of Juno and low degree gravity field recovery of Jupiter. Firstly, the coordinate system and dynamics model of the Jupiter probe are given, and the Juno precision ephemeris of jet propulsion laboratory (JPL) is used for verification. Then, the deep-space Doppler measurement model is presented and the trajectory of Juno is calculated by using the tracking data. **Results:** The dynamical fitting position difference is on the order of 10 m, and the velocity difference is less than 6 mm/s. The difference with the reference orbit given by JPL is better than 1 kilometer. **Conclusions:** The simulation data is used to verify the reliability of gravity field solution, and the measured data near 4 perijove points of the Juno is used to calculate the gravity field coeffi-

基金项目:国家自然科学基金(U1931119);航天飞行动力学技术重点实验室基金(JZX7Y201911SY003001);国防科工局民用航天“十三五”技术预先研究项目(D020303)。

第一作者:秦松鹤,博士,主要从事空间飞行器精密定轨研究。shqin@shao.ac.cn

通讯作者:黄勇,博士,研究员。yongh@shao.ac.cn

cients of Jupiter, obtaining the gravity fieldzonal coefficients up to 8 degrees.

Key words: precise orbit determination (POD); Juno Probe; Jupiter gravity field

木星是太阳系中体积和质量最大的气态巨行星,与地球等类地行星存在很大差异,对木星的探测活动有助于理解太阳系以及大行星的起源、形成和演化过程^[1-2]。迄今为止人类成功的木星探测活动共9次,包括7次飞跃探测和2次专门探测。1973年,美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射先驱者11号,采用无先验引力牵引直接奔向木星进行了飞掠探测,对木星的磁场、辐射带、引力场、温度、大气结构以及4颗伽利略卫星进行了初步的探测^[3-4]。1977年, NASA相继发射旅行者1号和旅行者2号对木星进行飞掠探测,拍摄了大红斑照片,并获取了大量伽利略卫星的数据^[5]。1989年,美国联合德国发射了第一个针对木星的专门探测器——伽利略号,获取了木星引力场和大气层的一些基本信息;2011年NASA发射了朱诺号(Juno)木星探测器,主要目标为探测木星及其卫星的起源、内部结构、大气层和磁层等,至今仍在轨运行^[6-8]。

《2016—2030年空间科学规划研究报告》明确提出了木星探测计划,以带动中国空间技术、科学及科学应用的发展^[9]。精密定轨是深空探测活动的基础,是进行木星探测与相关研究所必需的技术。文献[10]利用中国深空网(Chinese deep space network, CDSN)开展了针对木星探测器Juno的开环测量试验,其中多普勒测量的噪声水平约为10 mHz,验证了中国地基测量设备和技术具备木星探测的条件。

木星等气态行星引力场的研究是当今的科学热点之一。相对于月球、火星来说,木星探测任务极少,木星探测器的跟踪数据较为缺乏,并且由于气态行星具有极其浓厚的大气层以及较为活跃的大气活动,大气的密度分布和变化会对引力场造成影响,给引力场的反演带来了很大困难。基于先驱者10号和先驱者11号的双程多普勒数据,文献[4]计算了6阶带谐项系数;根据最新Juno任务的初步跟踪数据,文献[11-12]发布了木星12阶带谐项系数。引力场信息对于木星的内部结构、大气层和气象活动等科学问题的研究至关重要^[13-15],因此,有必要完善对于木星探测器测量数据的处理能力,并进一步研究利用实测数据解算木星引力场的相关问题。

考虑到国外对中国行星探测器精密定轨软

件使用的限制,以及未来中国木星探测计划的需求,有必要研制自主的木星探测器精密定轨及动力学参数解算软件平台。目前国际上针对深空探测器跟踪数据高精度处理的软件平台包括喷气推进实验室(jet propulsion laboratory, JPL)的ODP(orbit determination program)及后续更新的MONTE (mission analysis, operations and navigation toolkit environment),哥达德航天中心的GEODYN-II,法国空间局和比利时皇家天文台共通开发的GINS等^[16-18]。国内上海天文台、武汉大学和北京航天飞行控制中心分别研制了针对月球及火星探测器的深空精密定轨软件系统^[19-21]。其中上海天文台自主研发的深空精密定轨软件SODP(SHAO orbit determination program),已经在多期已经顺利进行的嫦娥工程及天问一号火星探测工程中得到了验证,保证计算结果的可靠性^[22-23]。通过在SODP已有的软件平台基础上,拓展开发加入对于木星探测器及动力学参数解算的模块,完成有关Juno的轨道计算。

本文首先给出了针对木星探测器环绕轨道计算需要考虑的动力学模型,并利用动力学拟合进行验证;然后给出了斜坡多普勒测量模型,并利用Juno近木点附近的实测数据进行定轨;最后利用Juno实测数据解算木星低阶引力场并分析。

1 木星概况

木星相比地球具有更复杂的空间环境,具有浓密的大气层、复杂的磁场和辐射带。木星的自转周期小并且有较差自转现象。木星不存在固体表面,大气的密度分布对木星的引力场有很大影响,本文中所提及的木星表面指气压1 bar处。木星的质量是太阳系其他行星质量总和的2.5倍,该特征使得太阳系的质心落在太阳表面之外,也使得探测器和测量信号受到相对论效应的影响更明显^[24-27]。木星拥有众多的卫星,且拥有数个行星环,其中较大的4颗卫星是木卫一(Io)、木卫二(Europa)、木卫三(Ganymede)、木卫四(Callisto)。这4颗卫星是伽利略于1610年首次发现,因此也称为伽利略卫星,其质量的量级与月球接近,在精密定轨中需要考虑其影响。木星的主要轨道参数和物理参数见表1。

Juno于2011年发射,历经5年进入木星轨

道,是美国新疆界计划的第 2 个项目,由 JPL 主导,目前已经成功在轨运行超过 4 年,并公开了前 8 个近木点的测量数据,具体参见文献[12]。Juno 的轨道为近极轨的大偏心率的大椭圆轨道,偏心率约为 0.98,近木点高度约为 1.06 倍木

星半径,轨道周期约为 53 d^[11]。大偏心率的椭圆轨道受中心引力约束较差,定轨精度有限。虽然其近木点高度很低,但是近木点附近弧段的轨道高度上升极快,对非球形引力场敏感的弧段较短。

表 1 木星主要参数

Tab.1 Main Parameters of Jupiter

半长轴	偏心率	轨道倾角/(°)	公转周期/a	平均半径/km	质量/kg	平均密度/(g·cm ⁻³)	自转周期/h
5.20AU	0.05	1.30	11.86	69 911	1.90×10^{27}	1.31	9.925

2 木星探测器动力学模型分析

2.1 木星坐标系与定向参数

由于计算和描述木星引力场在木星固连坐标系中进行,而轨道积分和定轨计算在惯性坐标系中进行,因此需要进行惯性坐标系与木星固连坐标系的转换。本文中采用的惯性坐标系为木星天球坐标系,以木星质心为原点,以地球 J2000 历元平赤道面为参考平面,以 J2000 历元春分点为参考方向,即将地心 J2000 天球参考系原点平移至木星质心形成的木心 J2000 坐标系。

木星固连坐标系采用国际天文学联合会(international astronomical union, IAU)在文献[28]中的定义的 IAU Jupiter 坐标系,其天极方向 α 和转动角度 δ 的计算式分别为:

$$\begin{aligned} \alpha = & 268.056\,595 - 0.006\,499T + \\ & 0.000\,117 \sin(Ja) + 0.000\,938 \sin(Jb) + \\ & 0.001\,432 \sin(Jc) + 0.000\,030 \sin(Jd) + \\ & 0.002\,150 \sin(Je) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \delta = & 64.495\,303 + 0.002\,413T + \\ & 0.000\,050 \cos(Ja) + 0.000\,404 \cos(Jb) + \\ & 0.000\,617 \cos(Jc) - 0.000\,013 \cos(Jd) + \\ & 0.000\,926 \cos(Je) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, T 为从 J2000 时刻起算的儒略世纪数; $Ja \sim Je$ 为中间变量,计算式为:

$$\begin{cases} Ja = 99.360\,714 + 4\,850.404\,6T \\ Jb = 175.895\,369 + 1\,191.960\,5T \\ Jc = 300.323\,162 + 262.547\,5T \\ Jd = 114.012\,305 + 6\,070.247\,6T \\ Je = 49.511\,251 + 64.300\,0T \end{cases} \quad (3)$$

木星固连坐标系和木心 J2000 坐标系间的转换关系可以表示为:

$$\mathbf{r}_{\text{IAU_Jupiter}} = \mathbf{R}_x(90^\circ - \delta) \mathbf{R}_z(90^\circ + \alpha) \mathbf{r}_{\text{J2000}} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{r}_{\text{IAU_Jupiter}}$ 表示木星固连坐标系中的位置矢

量; $\mathbf{r}_{\text{J2000}}$ 表示木心 J2000 坐标系中的位置矢量; \mathbf{R}_x 、 \mathbf{R}_z 分别为绕 x 轴、 z 轴的旋转矩阵。

2.2 动力学模型分析

木星探测器的轨道计算是一个受摄二体问题,探测器受到的主要作用力是木星产生的质点引力,其余各类作用力都可视为小量,采用摄动方法处理。探测器运动方程可表示为:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} + \mathbf{p} \quad (5)$$

式中, $\ddot{\mathbf{r}}$ 为探测器加速度; \mathbf{r} 为探测器位置矢量; r 为位置矢量的长度; μ 为中心天体引力常数; \mathbf{p} 表示摄动加速度。

木星探测器的主要摄动力包括非球形引力、第三体摄动、太阳辐射压、潮汐响应及相对论效应摄动,具体说明见表 2。虽然木星大气延伸超过 5 000 km,但是由于大气密度随高度下降极快,高层大气非常稀薄,本文所涉及的轨道高度均在 3 000 km 以上,故不考虑大气阻力^[11]。

表 2 木星探测器所受主要摄动力

Tab.2 Main Perturbations on Jupiter Probe

项目	说明
第三体摄动	考虑太阳、太阳系大行星及 4 颗木星的伽利略卫星,天体位置由 DE438 历表及 JUP310 历表获取
非球形引力	文献[11]结果,截至 12 阶带谐项
太阳辐射压	本文采用固定面质比模型
潮汐响应	只考虑勒夫数 k_2 ($k_2 = 0.6^{[11]}$)
相对论效应	后牛顿近似,仅考虑史瓦西项

以 Juno 的第 6 个近木点(简称近木点 6)附近的轨道为例,摄动力造成的加速度量级变化如图 1 所示,其中横坐标为 2017-05-19T00:00:00 起算的小时数,纵坐标为摄动加速度量级(取对数)。

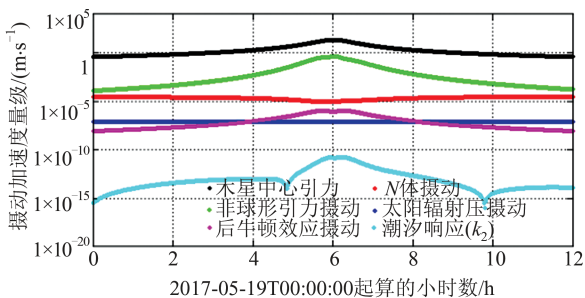


图1 木星探测器主要摄动加速度量级
Fig.1 Perturbation Acceleration on Jovian Probe

2.3 动力学拟合分析

为了验证力模型的正确性,选用 JPL 公布的 Juno 探测器的星历数据进行动力学拟合。Juno 的轨道为近极轨的大椭圆轨道,半长径约为 400 万 km,偏心率约为 0.98,轨道倾角约为 91°^[11]。由于轨道特性,木星探测器在近木点附近距离木星表面高度下降极快,同时速度极高。图 2 给出了 Juno 在近木点 6 附近的高度与速度变化,近木点高度为 3 400 km,速度约为 58 km/s。

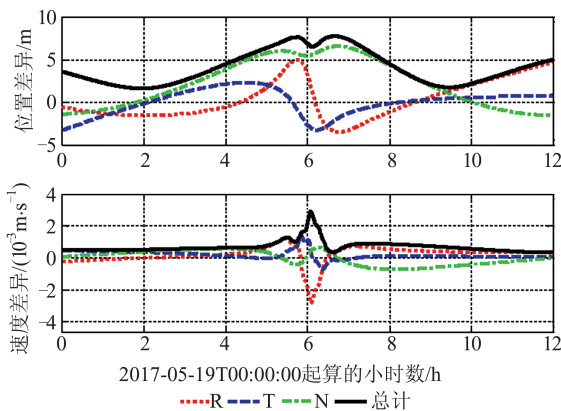


图2 Juno 在近木点 6 附近的动力学拟合结果
与 JPL 星历的差异
Fig.2 Orbit Differences of Juno Between Dynamic Fitting
Results and JPL Reference Ephemeris near Perijove 6

采用 JPL 公布的参考星历数据 (<https://naif.jpl.nasa.gov/>),对 JPL 已公布跟踪数据的 8 个近木点附近 12 h 轨道进行动力学拟合,惯性系下初始轨道参数见表 3。

表 3 动力学拟合初值
Tab.3 Initial Parameters Used in Dynamic Fitting

近木点 序号	历元时刻	x 方向		y 方向		z 方向	
		位置/km	速度/(m·s ⁻¹)	位置/km	速度/(m·s ⁻¹)	位置/km	速度/(m·s ⁻¹)
1	2016-08-27T06:00:00	-10 847.790	297.783	-612 669.753	19 047.513	112 703.720	3 582.717
2	2016-10-19T12:00:00	-10 962.765	326.478	-567 989.021	19 811.479	112 086.701	3 734.017
3	2016-12-11T11:00:00	-12 371.321	353.727	-561 147.423	19 907.499	104 430.396	4 029.349
4	2017-02-02T07:00:00	-14 334.869	389.691	-554 734.602	19 995.071	97 502.241	4 315.191
5	2017-03-27T03:00:00	-16 756.890	425.683	-550 994.517	20 021.917	87 088.239	4 668.105
6	2017-05-19T00:00:00	-20 294.105	466.321	-562 806.658	19 734.193	75 639.172	5 016.993
7	2017-07-10T20:00:00	-23 671.020	516.962	-556 680.951	19 789.779	68 144.430	5 325.711
8	2017-09-01T16:00:00	-26 910.209	562.372	-550 637.806	19 840.373	60 901.814	5 632.515

将动力学拟合轨道与 JPL 给出的参考轨道进行比对,以近木点 6 为例,径向(R)、横向(T)、法向(N)以及总计的位置和速度差异如图 2 所示。由于各近木点的位置速度差异对比图比较相似,此处仅以近木点 6 为例,其他不再一一列举。近木点附近轨道的动力学拟合结果与 JPL 星历的差异统计见表 4,包括位置和速度差异的最大值及均方根(root mean square, RMS)。由表 4 可以看出,近木点附近短弧轨道的动力学拟合的位置精度约为 10 m 量级,速度偏差最大值低于 6 mm/s, RMS 低于 2 mm/s。

表 4 Juno 近木点附近轨道的动力学拟合结果
与 JPL 星历的差异

Tab.4 Orbit Differences Between Dynamic Fitting Results and JPL Reference Ephemeris near Perijoves

近木点序号	位置差异/m		速度差异/(mm·s ⁻¹)	
	最大值	RMS	最大值	RMS
1	13.50	8.22	6.07	1.55
2	18.29	9.33	3.38	1.57
3	9.47	5.74	4.65	1.32
4	15.58	7.66	3.62	1.67
5	6.18	2.78	3.07	0.85
6	7.17	4.48	2.81	0.79
7	10.93	5.45	2.79	1.30
8	12.66	6.11	2.44	0.96

3 深空多普勒测量模型及 Juno 实测数据分析

3.1 仿真数据定轨分析

为了验证木星探测器对实测数据的处理能力 & 轨道可靠性,需要进行仿真分析。首先根据初轨条件生成包含误差的仿真观测数据,然后利用生成的仿真数据进行定轨,并与原始轨道进行比对确定精度。空间探测器的精密定轨(precise orbit determination, POD)是利用含有误差的测量数据,通过数学方法迭代滤波计算得到卫星状态的最佳估值。

本文采用近似 Juno 的大椭圆轨道和绕木星圆轨道进行仿真分析,轨道参数见表 5,其中仿真轨道 1 为近似 Juno 轨道的大偏心率轨道,仿真轨道 2 为绕木星极轨圆轨道。

表 5 仿真轨道信息				
Tab.5 Orbit Elements for Simulation				
仿真轨道	半长径/m	偏心率	轨道倾角/(°)	轨道周期
1	4 077 019 041.989	0.982	91.830	53.1 d
2	75 492 000.202	0.001	91.830	3.2 h

仿真产生多普勒测速数据,生成仿真数据噪声为 0.3 mm/s,使用仿真数据进行定轨并与参考轨道进行比较以验证定轨精度,定轨弧长均为 24 h,仿真轨道定轨结果与参考轨道差异分别如图 3、图 4 所示,定轨结果统计见表 6。

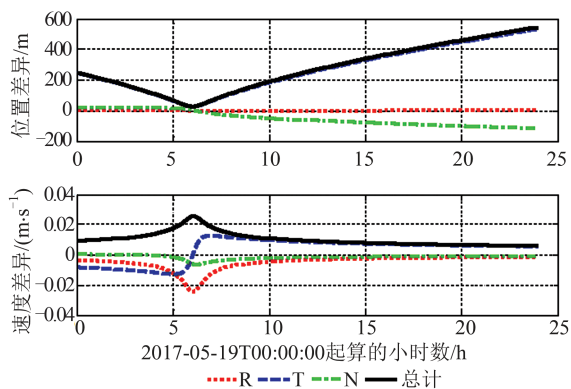


图 3 仿真轨道 1 定轨结果与参考轨道差异
Fig.3 Orbit Differences Between POD Result of Simulation Data 1 and Reference Ephemeris

仿真分析表明了定轨软件的可靠性。仿真结果表明,对于绕行圆轨道(仿真轨道 2),定轨精度优于 1 m。但是对于大偏心率的椭圆轨道(仿真轨道 1),由于中心引力约束较差,定轨精度在

数百米的量级,并且根据木面距离的变化发生精度的变化,即在近木点附近具有较好的位置精度,但是速度精度较差;随着木面距离的提升,位置精度变差,速度精度变好。

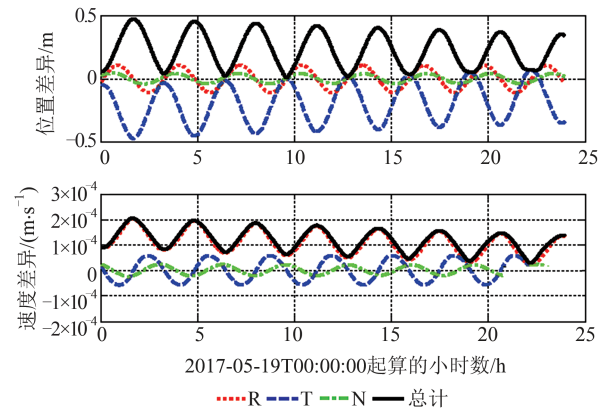


图 4 仿真轨道 2 定轨结果与参考轨道差异
Fig.4 Orbit Differences Between POD Result of Simulation Data 2 and Reference Ephemeris

表 6 仿真轨道定轨结果			
Tab.6 Orbit Determination Results of Simulation Data			
统计项目		仿真轨道 1	仿真轨道 2
定轨弧长/h		24.000	24.000
位置差异/m	最大值	544.566	0.473
	RMS	316.465	0.265
速度差异/(mm·s ⁻¹)	最大值	25.161	0.206
	RMS	11.114	0.127
定轨残差/(mm·s ⁻¹)		0.290	0.290

Juno 的任务轨道为偏心率约 0.98 的大椭圆轨道,由于轨道特性,较难在全弧段得到较高的定轨精度,但是在近木点附近的弧段仍然能够得到较为理想的位置精度。

3.2 斜坡多普勒测量模型

Juno 探测器主要采用斜坡积分多普勒测量的方式进行测轨,本质上是一种针对深空测控条件进行改进的无线电测速技术,对探测器到测站的距离变化率进行测量^[29]。对于积分多普勒测量模式,上行信号频率即发射频率 $f_T(t)$ 可以是常数或斜坡函数。在 Juno 等深空探测中一般采用斜坡函数的发射频率,即一系列随时间线性变化的值。在数据附带的斜坡表中可以查询到每一个斜坡的开始时刻、结束时刻、开始时刻的频率 f_0 以及在当前斜坡中采用的频率的变化率 \dot{f} (斜坡速率,为常数);在处理斜坡多普勒数据时,需要利用斜坡表对发射频率进行插值,计算得到上行信号发射时刻的发

射频率。求得斜坡多普勒发射频率之后,即可将频率测量值转换为速度测量值,采用积分多普勒的测量模型进行处理。斜坡多普勒处理流程如图5所示。

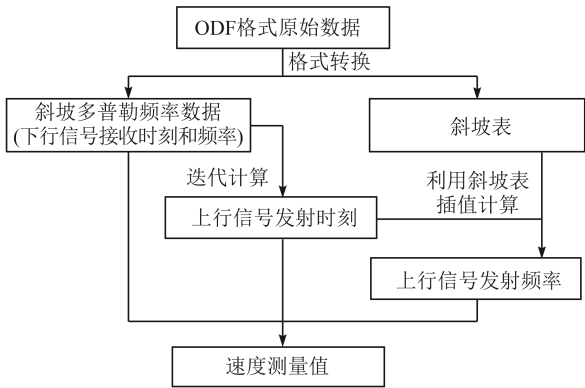


图5 斜坡多普勒数据处理流程
Fig.5 Scheme of Ramp Doppler Data Processing

3.3 Juno 实测数据分析

JPL 通过网站公开了 Juno 前 8 个近木点的深空无线电测量数据,可以进行下载。由于 Juno 轨道特性,本文仅选用近木点附近的轨道进行分析。根据文献[12]的描述,近木点 2、4、5、7 的数据存在异常,无法使用,故本文仅选用近木点 1、3、6、8 附近的实测数据。测量数据为 ODF 格式的斜坡多普勒数据,近木点附近的测量数据积分时间为 1 s,地面测站为美国深空网(deep space network, DSN)位于加利福尼亚州的 Goldenstone 测站。近木点 1 仅有 X 波段测量,其余近木点为 X 波段(约 7.2 GHz)和 Ka 波段(约 34 GHz)双频测量。

轨道计算软件基于上海天文台自主研发的深空探测器定轨软件研发,轨道计算软件在多期已经顺利进行的月球探测工程及火星探测工程中得到了验证^[19-20,22-23]。在已有程序的基础上加入了适配木星环绕探测器的相关模块。定轨选

取 JPL 公布的星历作为初轨,动力学模型考虑非球形引力场、第三体摄动、太阳辐射压、潮汐响应以及相对论效应(具体见§2.2)。在定轨之前使用实测数据计算 O-C 检验测量模型,残差在 mm/s 的量级,验证了测量模型的可靠性。4 个近木点的实测数据定轨残差如图 6 所示,统计残差见表 7。

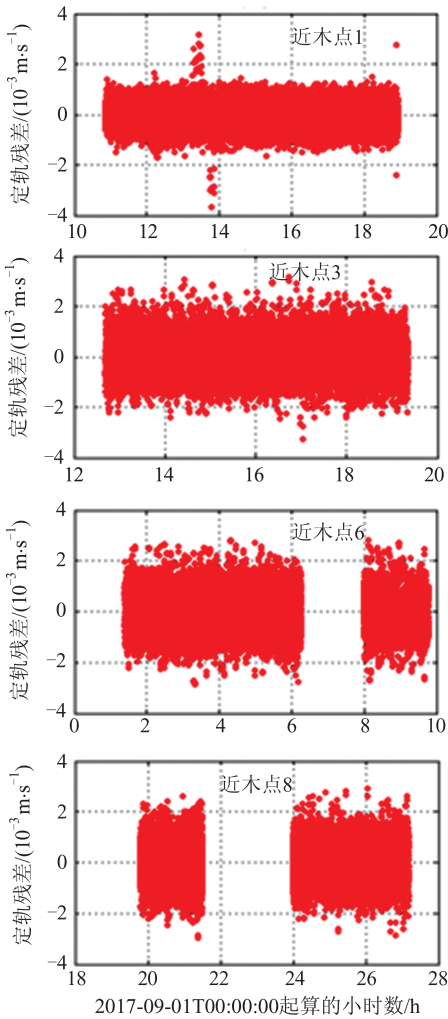


图6 Juno 近木点附近实测数据定轨后残差
Fig.6 Residuals of Juno Data near Perijoves

表7 Juno 近木点附近实测数据定轨后残差统计
Tab.7 Residuals Statistics of Juno Data near Perijoves

近木点序号	近木点时刻	实测数据时间跨度/h	定轨残差/(mm·s ⁻¹)
1	2016-08-27T12:50:44	8.10	0.40
3	2016-12-11T17:03:41	7.00	0.59
6	2017-05-19T06:00:45	8.40	0.64
8	2017-09-01T21:48:57	7.40	0.63

文献[10-11]的实测数据积分时长为 60 s,定轨残差约为 0.02 mm/s。但是公开的测量数据积分时长为 1 s,无法通过后期的处理得到 60 s 积分

时间的多普勒测量数据,故本文处理数据的定轨残差大于文献[11]结果。定轨结果与 JPL 轨道对比如图 7 所示,轨道差异和 RMS 见表 8。

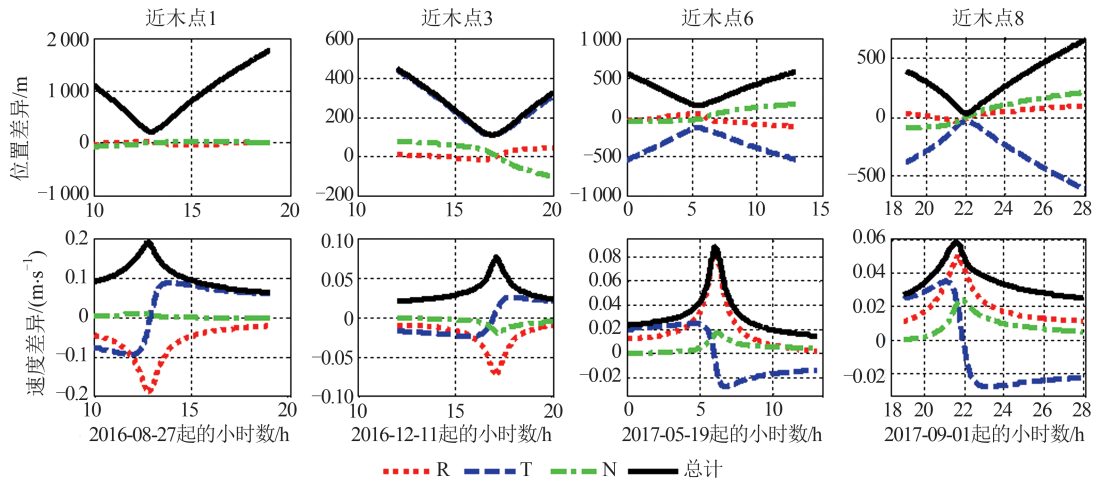


图 7 Juno 实测数据定轨结果与 JPL 星历差异

Fig.7 Orbit Differences Between POD Results and JPL Reference Ephemeris

表 8 Juno 实测数据定轨结果与 JPL 星历差异统计

Tab.8 Orbit Differences Statistics Between POD Results and JPL Reference Ephemeris

近木点 序号	位置差异/m		速度差异/(m·s ⁻¹)	
	最大值	RMS	最大值	RMS
1	1 767.884	1 012.507	0.190 835	0.108 901
3	448.765	268.039	0.076 239	0.036 075
6	575.875	377.117	0.088 578	0.035 146
8	649.171	357.912	0.059 004	0.036 603

由定轨结果可以看出,由于近木点 1 仅有 X 波段多普勒测量,缺少 Ka 波段,受行星际等离子体影响较大,故定轨结果相对较差。由以上结果得到,对于 Juno 的大椭圆轨道,定轨位置精度在千米量级;在近木点附近短时间内有较大速度差异约为 10 cm/s,其余时间速度差异低于 3 cm/s,

$$U(r_J, \theta_J, \delta_J) = \frac{GM_J}{r_J} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{R_J^n}{r_J^n} [\bar{C}_{nm} \cos(m\delta_J) + \bar{S}_{nm} \sin(m\delta_J)] \bar{P}_{nm}(\sin \theta_J) \quad (6)$$

式中, r_J, θ_J 及 δ_J 为木星固连坐标系下的球坐标; GM_J 为木星引力常数; R_J 为木星赤道处的参考半径; \bar{C}_{nm} 和 \bar{S}_{nm} 为规格化的球谐系数; \bar{P}_{nm} 为 n 阶 m 次的缔合勒让德函数。本文使用 J_n 表示 n 阶动量,其满足:

$$J_n = -C_{n0} \quad (7)$$

使用仿真数据定轨并解算引力场系数,迭代初值加入 10^{-7} 量级的随机误差。生成仿真数据采用 12 阶重力场,解算至 8 阶。解算结果与仿真选用的数据对比见表 9。仿真分析结果表明,引力场系数解算结果与生成仿真数据采用的系数吻合程度较好,在低阶带谐项解算中能得到较好的精度。

定轨结果与仿真计算结果相吻合。

4 基于 Juno 数据的木星引力场模型

4.1 引力场解算仿真分析

采用最佳估值方法对木星的低阶带谐项引力场进行解算,为了验证引力场解算方法及软件的可靠性,使用仿真数据解算低阶引力场。仿真轨道选取低轨圆轨道,生成 2 个月(60 天)仿真多普勒测速数据,仿真噪声为 0.1 mm/s 和 1.0 mm/s,轨道高度为 3 400 km,偏心率为 0.01,轨道倾角为 91° ,轨道周期为 3.2 h,仿真测站为 Goldenstone 测站。

根据文献[13]推导的引力场球谐展开公式,木星的引力场在木星固连坐标系中表示为:

4.2 引力场实测数据解算

由于 Juno 的轨道特性,大多数弧段对非球形引力场不敏感,仅采用每个近木点附近的实测数据解算。解算采用已公布且数据有效的近木点 1、3、6、8 共 4 个弧段联合解算。由于公开的实测数据较少,星下点覆盖不足,对引力场的约束较差,仅解算低阶带谐项引力场系数(截至 J_8)。

在解算过程中,组合单弧段矩阵输出形成全局多弧解。具体而言,以卫星初轨作为局部参数、以引力场系数作为全局参数进行解算,引力场迭代计算采用文献[11]的引力场系数作为初值,加入 10^{-7} 量级的随机误差。由于仅采用了近木点附近弧段,并且 Juno 大椭圆轨道的中心引力约束差,为防止轨道整体偏离,引力场系

数按量级进行约束。木星引力场的奇数阶相对于偶数阶较小,如果不加约束会导致奇数阶有较大偏离,而对偶数阶影响不大。经过比较加

入不同量级约束的计算结果后,选取约束量级为 10^{-7} 。单弧段解算结果和多弧段联合解算结果见表 10。

表 9 仿真解算引力场结果

Tab.9 Gravity Field Model Solution for Jupiter Using Simulation Data

阶数/ 10^{-6}	产生仿真数据的系数	仿真噪声 0.1 mm/s		仿真噪声 1.0 mm/s	
		解算结果	不确定度	解算结果	不确定度
J_2	-6 572.506 8	-6 572.506 7	0.004 3	-6 572.506 2	0.043 2
J_3	0.015 8	0.015 8	0.003 8	0.015 5	0.038 3
J_4	195.536 3	195.536 3	0.004 6	195.536 2	0.045 4
J_5	0.020 8	0.020 8	0.004 5	0.021 0	0.044 5
J_6	-9.484 8	-9.484 8	0.004 8	-9.484 9	0.047 5
J_7	-0.032 0	-0.031 9	0.004 8	-0.032 1	0.043 6
J_8	0.588 4	0.588 3	0.005 1	0.588 1	0.050 8

表 10 实测数据解算引力场结果

Tab.10 Gravity Field Model Solution for Jupiter Using Juno Data

阶数/ 10^{-6}	文献[11]结果 (规格化)	单个近木点数据解算结果				4 个近木点数据联合解算	
		近木点 1	近木点 3	近木点 6	近木点 8	解算结果	不确定度
J_2	-6 572.506 8	-6 572.650 0	-6 572.498 2	-6 572.530 9	-6 572.483 7	-6 572.513 7	0.009 19
J_3	0.015 8	0.021 3	0.014 5	0.050 7	-0.018 6	0.017 7	0.009 73
J_4	195.536 3	195.503 1	195.513 8	195.532 7	195.546 6	195.533 0	0.009 85
J_5	0.020 8	0.018 0	0.030 4	0.025 3	-0.006 1	0.021 2	0.009 94
J_6	-9.484 8	-9.529 9	-9.516 1	-9.478 2	-9.476 2	-9.486 8	0.009 96
J_7	-0.032 0	-0.073 4	-0.007 4	-0.023 8	-0.057 8	-0.033 4	0.009 98
J_8	0.588 4	0.594 4	0.544 6	0.604 3	0.599 5	0.587 5	0.010 00

解算结果的阶方差(σ_n)和误差阶方差(δ_n)如图 8 所示,二者计算式为:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_n &= \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2)}{2n+1}} \\ \delta_n &= \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^n (\sigma_{\bar{C}_{nm}}^2 + \sigma_{\bar{S}_{nm}}^2)}{2n+1}} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

其中, $\sigma_{\bar{C}_{nm}}^2$ 和 $\sigma_{\bar{S}_{nm}}^2$ 分别表示相应阶系数的方差。

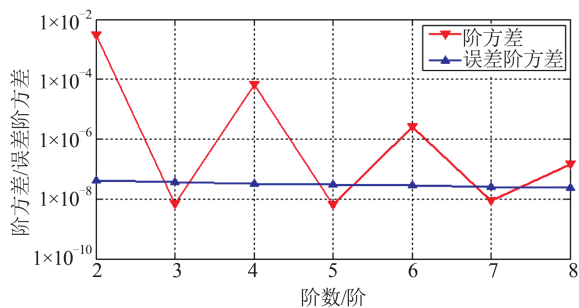


图 8 引力场解算结果阶方差与误差阶方差

Fig.8 Signal Degree-RMS and Formal Error Degree-RMS of Recovered Gravity Field

实际解算过程中求解至 12 阶带谐项,但是由于 8 阶以后的系数不确定度较大,此处仅选取前 8 阶次。结果表明,对于低阶带谐项,联合多弧段实测数据解算结果与文献[11]结果吻合;偶数阶及较高阶次本身具有较大的不确定度,但总体符合误差范围。结果总体上验证了解算的可靠性。

5 结 语

本文对木星探测器定轨的坐标系统和力模型进行了分析,并利用 Juno 探测器的星历数据进行检验,近木点拟合位置偏差在 10 m 量级,速度偏差小于 6 mm/s。分析 Juno 已公布的实测数据,给出了斜坡多普勒的测量模型,并使用实测数据进行定轨,在近木点附近的弧段定轨结果与 JPL 星历差距在数百米量级。利用实测数据求解木星低阶引力场系数,给出了截至 8 阶的带谐项系数。本文中采用的数据受限于 JPL 的数据公开进度,使用数据较少,且没有考虑信号传播过

程中的行星际等离子体散射等效应,解算引力场阶数较低,不确定度较高。后续工作将进一步处理 Juno 实测跟踪数据,并关注 JPL 数据发布,进一步完善深空定轨软件,并尝试解算更高阶引力场。

参 考 文 献

- [1] Kaspi Y, Galanti E, Hubbard W B, et al. Jupiter's Atmospheric Jet Streams Extend Thousands of Kilometres Deep [J]. *Nature*, 2018, 555 (7695) : 223-226.
- [2] Parisi M, Galanti E, Finocchiaro S, et al. Probing the Depth of Jupiter's Great Red Spot with the Juno Gravity Experiment [J]. *Icarus*, 2016, 267: 232-242.
- [3] Turyshev S G, Toth V T, Kinsella G, et al. Support for the Thermal Origin of the Pioneer Anomaly [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108 (24) : 241101.
- [4] Null G W. Gravity Field of Jupiter and Its Satellite from Pioneer 10 and Pioneer 11 Tracking Data [J]. *The Astronomical Journal*, 1976, 81: 1153.
- [5] Burlaga L F, Ness N F, Stone E C, et al. Search for the Heliosheath with Voyager 1 Magnetic Field Measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(20): 2003GL018291.
- [6] Folkner W M, Iess L, Anderson J D, et al. Jupiter Gravity Field Estimated from the First Two Juno Orbits [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44 (10): 4694-4700.
- [7] Bolton S J, Adriani A, Adumitroaie V, et al. Jupiter's Interior and Deep Atmosphere: The Initial Pole-to-Pole Passes with the Juno Spacecraft [J]. *Science*, 2017, 356(6340): 821-825.
- [8] Connerney J E P, Adriani A, Allegrini F, et al. Jupiter's Magnetosphere and Aurorae Observed by the Juno Spacecraft During Its First Polar Orbits [J]. *Science*, 2017, 356(6340): 826-832.
- [9] Wu Ji. Research Report on Space Science Planning 2016-2030 [M]. Beijing: Science Press, 2016. (吴季. 2016-2030 年空间科学规划研究报告[M]. 北京: 科学出版社, 2016.)
- [10] Chen Lue, Ping Jinsong, Li Wenxiao, et al. Juno Radio Open Loop Measurement Experiment Based on China's Deep Space Stations [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(4): 382-386. (陈略, 平劲松, 李文潇, 等. 基于中国深空站的木星探测器开环测量试验[J]. 深空探测学报, 2018, 5(4): 382-386.)
- [11] Iess L, Folkner W M, Durante D, et al. Measurement of Jupiter's Asymmetric Gravity Field [J]. *Nature*, 2018, 555(7695): 220-222.
- [12] Durante D, Parisi M, Serra D, et al. Jupiter's Gravity Field Halfway Through the Juno Mission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47 (4) : e2019GL086572.
- [13] Kaula W M, Street R E. Theory of Satellite Geodesy: Applications of Satellites to Geodesy [J]. *Physics Today*, 1967, 20(10): 101.
- [14] Kong D, Zhang K, Schubert G, et al. Origin of Jupiter's Cloud-Level Zonal Winds Remains a Puzzle even After Juno [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(34): 8499-8504.
- [15] Tommei G, Dimare L, Serra D, et al. On the Juno Radio Science Experiment: Models, Algorithms and Sensitivity Analysis [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 446(3): 3089-3099.
- [16] 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.
- [17] Marty J C, Balmino G, Duron J, et al. Martian Gravity Field Model and Its Time Variations from MGS and Odyssey Data [J]. *Planetary and Space Science*, 2009, 57(3): 350-363.
- [18] 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.
- [19] Huang Yong, Hu Xiaogong, Cao Jianfeng, et al. The Mars Satellite Orbit Determination Software at Shanghai Astronomical Observatory [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2009, 28 (6) : 83-89. (黄勇, 胡小工, 曹建峰, 等. 上海天文台火星卫星定轨软件系统[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28 (6): 83-89.)
- [20] Chen Ming, Tang Geshe, Cao Jianfeng, et al. Precision Orbit Determination of CE-1 Lunar Satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 212-217. (陈明, 唐歌实, 曹建峰, 等. 嫦娥一号绕月探测卫星精密定轨实现[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36 (2): 212-217.)
- [21] Yang Xuan, Yan Jianguo, Ye Mao, et al. Development of Precise Orbit Determination Software for Mars Probe and Data Processing for MEX [J]. *Geo-*

- matics 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.)
- [22] Huang Y, Chang S Q, Li P J, et al. Orbit Determination of Chang'E-3 and Positioning of the Lander and the Rover[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(29): 3858-3867.
- [23] Zheng X, Wang G L, Hu X G, et al. Positioning for the Chang'E-3 Lander and Rover Using Earth-Based Observations[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(32): 3162-3173.
- [24] Hubbard W B, Militzer B. A Preliminary Jupiter Model[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, 820(1): 80.
- [25] Allen C W, Arthur N C. Allen's Astrophysical Quantities[M]. New York: Springer, 2000.
- [26] Wei Qiang, Hu Yongyun. Spacecraft Missions to Jupiter[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(4): 890-901. (魏强, 胡永云. 木星大气探测综述[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 890-901.)
- [27] 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.)
- [28] Archinal B A, A'Hearn M F, Bowell E, et al. Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2011, 109(2): 101-135.
- [29] Cao Jianfeng, Huang Yong, Hu Xiaogong, et al. Modeling and Application of Doppler Data in Deep Space Exploration[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(7): 1583-1589. (曹建峰, 黄勇, 胡小工, 等. 深空探测中多普勒的建模与应用[J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1583-1589.)