

木星磁场及磁场模型的对比分析

费涛, 方美华, 朱基聪, 田鹏宇

(南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016)

摘要: 木星具有太阳系最强的行星磁场, 是木星探测面临的基本环境。首先对磁场环境及其数学模型进行了调研, 并在研究木星磁场模型以及磁场的数学原理的基础上, 使用MATLAB数学工具实现了木星主磁场的计算, 对VIP4、VIT4、O6和V1_17ev (eigenvector, 特征向量) 4个模型与磁测数据进行了对比及分析。研究结果表明这4个模型计算得到的磁场强度范围较为一致, 但在全球磁场分布上存在差异, 尤其是对磁南极位置的识别上, 4个模型的结果都不相同; 在对模型计算结果与探测数据的探讨分析中, 发现4个模型与探测数据的符合较为一致, 偏差均较小。可为木星探测的环境保障提供必要的理论基础和计算模型支撑。

关键词: 木星磁场; 磁场数学模型; 磁场分布; 模型精度

中图分类号: P353

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)02-0150-06

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.02.006

引用格式: 费涛, 方美华, 朱基聪, 等. 木星磁场及磁场模型的对比分析[J]. 深空探测学报, 2019, 6 (2): 150-155.

Reference format: FEI T, FANG M H, ZHU J C, et al. Comparative analysis of Jupiter magnetic field and magnetic field model[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (2): 150-155.

引言

磁场是航天器运行的基本环境因素, 如行星际磁场、各行星磁场等。木星是太阳系最大, 也是最古老的行星, 作为在太阳系历史的早期就诞生的行星, 探测木星对于研究太阳的起源和演变有重要意义。而木星有着太阳系最强的行星磁场, 为了保障木星探测任务的顺利执行, 有必要对木星基本环境要素——磁场进行探究。

到目前为止, 只有美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 进行过木星探测任务, 对木星磁场进行了测量并建立了完整的磁场模型。20世纪70年代发射的“先驱者10号”“先驱者11号” (Pioneer 10, Pioneer 11), “旅行者1号”“旅行者2号” (Voyager 1, Voyager 2) 曾先后近距离飞掠过了木星, 测量了探测器轨迹上的木星磁场。1976年, 在分析Pioneer 11的磁通门传感器 (Fluxgate Magnetometer, FGM) 测量数据的基础上, Acuna和Ness提出了O4模型, Smith等提出了球谐分析模型, 他们都使用了3阶球谐函数来表示木星内源磁场, 并分别给出了外源场的1阶和2阶近似; 1982

年, Connerney等根据Voyager 1的测量数据得到了3阶的V1_17ev模型; 1992年, Connerney等假定木星磁场在Pioneer 11和Voyager 1的2次观测期间没有发生变化的前提下, 使用两者的测量数据计算得到了3阶的O6模型; 1998年, 在“木卫1”磁流管 (Io Flux Tube, IFT) 尾迹区磁场测量数据的约束下, 得到了4阶的VIP4模型; 2015年, 使用Voyager 1的磁场 θ 分量数据 (θ 分量受外源场影响较小), 并在更多IFT尾迹区数据的约束下, 得到了4阶的VIT4模型^[1]。

2016年7月, 最新的木星探测器“朱诺号”成功进入木星轨道。在此次任务中, “朱诺号”以与木星中心 $1.06R_J$ (Radius of Jupiter, 木星半径) 的距离接近木星表面, 获得了更精准的木星磁场数据^[2]。

本文通过对各木星磁场基础理论的分析 and 计算, 掌握各个已有的木星模型特性, 对木星探测磁场环境有了初步的认识, 可为木星探测环境保障提供必要的理论基础和计算模型支撑。

1 木星磁场模型

木星磁场的主要部分是偶极磁场, 其赤道的磁场强度为4.28 Gs, 是地球磁场的10倍; 磁力矩为 $1.58 \times$

$10^{26} \text{ T} \cdot \text{cm}^3$ ，是地球磁力矩的1.8万倍。木星磁场主要分布在液态金属氢中间层，是由涡流通过“磁流体发电机”机制而产生的很强的内部偶极磁场，与自转轴呈 10° 夹角。木星磁场与地球类似，而南北极性则与地球磁场相反，非偶极磁场主要在 $10R_j$ 范围之外由磁层电流产生^[3]。

Connerney提出的多个木星磁场模型都是使用高斯地磁理论描述的^[1]，这也是国际地磁参考场（International Geomagnetic Reference Field, IGRF）使用的方法^[4-5]。经研究发现两者的计算方法实质上是相同的，因此可参考IGRF来完成木星磁场的计算。

1.1 数学描述

本文中木星磁场建立在S3RH（Jupiter System III - Right Hand）坐标系下，以径向距离、余纬度和东经度 (r, θ, λ) 表示点的空间坐标。木星内部的主磁场以标量磁位 U 的负梯度表示。

U 的球谐函数形式的解为

$$U_i(r, \theta, \lambda) = R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \times (g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)) P_n^m(\cos\theta) \quad (1)$$

其中： r 为径向距离； θ 为余纬度； λ 为东经度； g_n^m 、 h_n^m 为球谐系数； n 和 m 分别是球谐函数的阶和次； $P_n^m(\cos\theta)$ 是 n 阶 m 次施密特半标准化缔合勒让德函数。

令当地磁场强度 \mathbf{B} 在当地北、当地东以及地心矢量反向方向的分量分别为 B_θ^i 、 B_λ^i 、 B_r^i ，由 $\mathbf{B} = -\nabla U$ ，得：

$$\begin{cases} B_\theta^i = -\frac{\partial U_i}{r \partial \theta} = -\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \times (g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)) \frac{\partial P_n^m(\cos\theta)}{\partial \theta} \\ B_\lambda^i = -\frac{\partial \varphi_i}{r \sin\theta \partial \lambda} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \frac{m}{\sin\theta} \times (g_n^m \sin(m\lambda) - h_n^m \cos(m\lambda)) P_n^m(\cos\theta) \\ B_r^i = -\frac{\partial \varphi_i}{\partial r} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (n+1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \times (g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)) P_n^m(\cos\theta) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 球谐系数

球谐系数是将木星磁场测量得到的数据代入磁场的公式(2)求得的。表1是VIP4、VIT4、O6和V1_17ev特征向量（Eigenvector）是4个木星磁场模型的系数。

表1 木星磁场模型球谐系数^[1]
Table 1 Jupiter magnetic field models' coefficient

序号	系数	VIP4	VIT4	O6	V1_17eV
1	g_1^0	420 543	428 077	424 202	420 825
2	g_1^1	-65 920	-75 306	-65 929	-65 980
3	h_1^1	24 992	24 616	24 116	26 122
4	g_2^0	-5 118	-4 283	-2 181	-3 411
5	g_2^1	-61 904	-59 426	-71 106	-75 856
6	h_2^1	-36 052	-50 154	-40 304	-29 424
7	g_2^2	49 690	44 386	48 717	48 321
8	h_2^2	5 250	38 452	7 179	10 704
9	g_3^0	-1 576	8 906	7 565	2 153
10	g_3^1	-52 036	-21 447	-15 493	-3 295
11	h_3^1	-8 804	-17 187	-38 824	8 883
12	g_3^2	24 386	21 130	19 775	26 315
13	h_3^2	40 829	40 667	34 243	69 538
14	g_3^3	-17 597	-1 190	-17 958	-6 905
15	h_3^3	-31 586	-35 263	-22 439	-24 718
16	g_4^0	-16 758	-22 925		
17	g_4^1	22 210	18 940		
18	h_4^1	7 557	16 088		
19	g_4^2	-6 074	-3 851		
20	h_4^2	40 411	11 807		
21	g_4^3	-20 243	9 926		
22	h_4^3	-16 597	6 195		
23	g_4^4	6 643	1 271		
24	h_4^4	3 866	12 641		

2 计算结果分析

MATLAB软件内置有施密特半标准化缔合勒让德函数，因此本研究采用MATLAB数学工具对木星磁场进行计算，计算流程如图1所示。

在研究木星磁场的特征时，需考虑到木星具有一定的扁率（1/15.4）^[6]，木星表面与 $r = R_j$ 的球面不重合，即在不同纬度木星表面到中心的距离不都等于 R_j 。

2.1 木星表面磁场分布

采用VIP4模型、VIT4模型、O6模型、V1模型得到的木星表面磁场分布如图2~5所示，而不同的磁场模型计算获得的磁场大小和分布并不完全一致。各模型获得木星表面磁极的位置如表2所示。

由表2可知：磁北极的位置较为一致，都在东经 210° 、北纬 50° 附近，而磁南极位置有不同的结果。VIT4、O6模型的磁南极接近南极点，且VIT4模型在

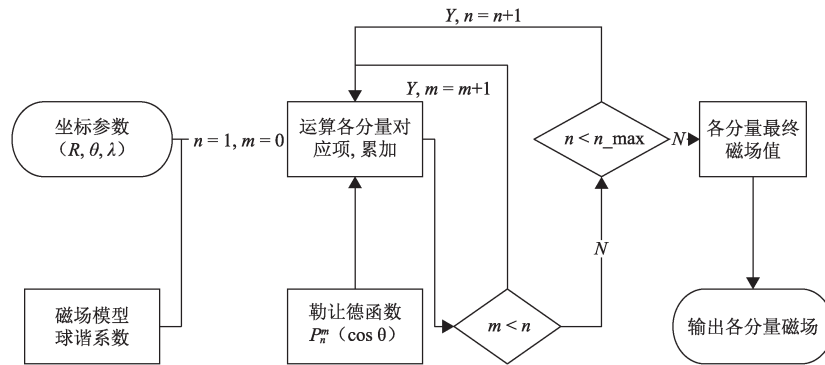


图1 磁场计算流程图

Fig. 1 Magnetic field calculation flow chart

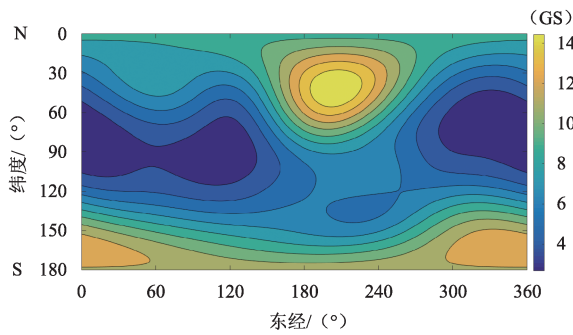


图2 VIP4模型木星表面磁场强度

Fig. 2 VIP4 model's Jupiter surface magnetic field strength

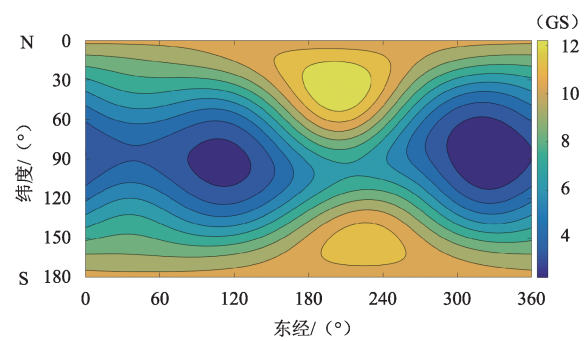


图5 V1模型木星表面磁场强度

Fig. 5 V1 model's Jupiter surface magnetic field strength

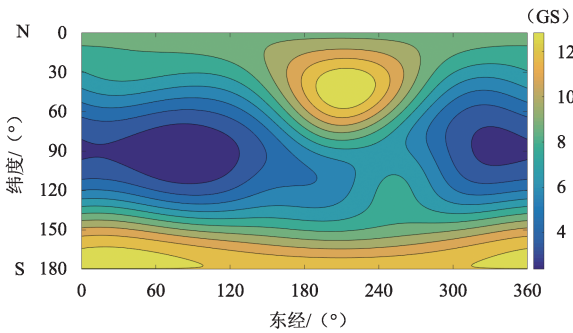


图3 VIT4模型木星表面磁场强度

Fig. 3 VIT4 model's Jupiter surface magnetic field strength

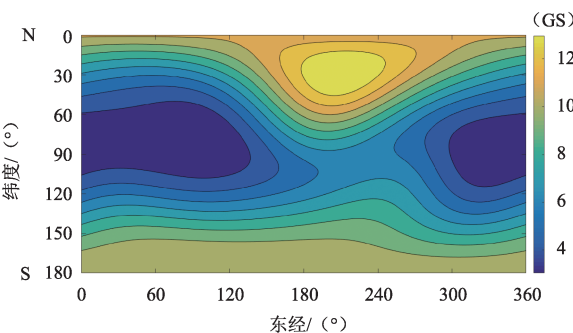


图4 O6模型木星表面磁场强度

Fig. 4 O6 model's Jupiter surface magnetic field strength

表2 VIT4、V1、O6和VIP4 4个模型计算获得的南北磁极位置
Table 2 VIT4, V1, O6 and VIP4 models' magnetic pole position

模型	磁北极	磁南极
VIP4	50°N, 210°E	75°S, 350°E
VIT4	50°N, 210°E	85°S, 20°E
O6	50°N, 210°E	84°S, 108°E
V1	50°N, 210°E	65°S, 225°E

本初子午线，南纬80°附近；VIP4模型的磁南极在东经225°，南纬70°附近；V1模型的磁南极在东经340°，南纬75°附近。这可以看出目前的木星磁场探测数据还不足够确定木星偶极磁场的准确形态。

4个模型计算得到的磁场强度的范围如表3所示，从表3中可以看出，磁场强度计算最大和最小值较为一致，其中VIP4得到的最大值最大。赤道地区的磁场强度平均值都约为4.5Gs。

2.2 磁场强度随高度变化

磁场强度随高度变化随高度变化的仿真结果如表4所示。由表4可知，2R_J区域的木星磁场比木星表面小一个量级；3R_J区域磁场强度已经小于地球表面的磁场；4R_J区域比木星表面小2个量级；其后木星磁

场强度随高度衰减的速度变慢，且其总强度维持在较低的千纳特水平。

表3 VIP4、VIF4、O6和V1 4个模型计算获得的全球磁场强度范围
Table 3 VIP4, VIF4, O6 and V1 models' magnetic field ranges

模型	强度最小值/Gs	强度最大值/Gs
VIP4	2.670 40	15.610 00
VIT4	2.374 50	13.882 20
O6	3.033 10	13.970 70
V1	2.364 60	13.209 90

2.3 各模型精度对比

NASA 空间物理数据平台提供了1974年12月3日 Pioneer 11 进入木星 $6R_j$ 区域到离开木星 $6R_j$ 区域过程中，由FGM传感器记录下的磁场强度的1分钟平均值 (ftp: //spdf. gsfc. nasa. gov/pub/data/pioneer/pio-

表5 Pioneer 11 FGM数据格式
Table 5 Pioneer 11 FGM data

时间/s	坐标参数			磁场强度/Gs		
	轨道高度 R_j	纬度/(°)	西经度/(°)	径向分量	西向分量	北向分量
4780.8	6.007	-35.668	77.068	-0.030 27	0.014 00	-0.000 26
4817.6	5.996	-35.707	77.476	-0.030 26	0.014 02	-0.000 29
4853.3	5.985	-35.746	77.891	-0.030 24	0.014 05	-0.000 32
4889.2	5.973	-35.787	78.315	-0.030 24	0.014 07	-0.000 35

此外，本文还使用了Pioneer11HVM传感器数据以及Pioneer10HVM的数据。为与磁场的数学方程使用的坐标系一致，在计算过程中需要将坐标参数从S3LH (1957) 坐标系 $(r_L, \theta_L, \lambda_L)$ 转化为S3RH (1965) 坐标系 $(r_R, \theta_R, \lambda_R)$ ，这一过程满足 $r_R=r_L$ ， $\theta_R=90-\theta_L$ ， $\lambda_R=360-(\lambda_L-30.133)$ 。将 $6R_j$ 区域内数据的坐标参数代入各模型的磁场计算函数，计算这些坐标磁场强度计算值与测量值的偏差，并求出平均值与标准差，如表6所示。

由表6可知，整体上各个模型的计算值与测量值的偏差较小，均小于8%；且在计算过程中发现偏差

表6 磁场模型与实测值的偏差

Table 6 Deviation of the magnetic field model from the measured value

偏差	%					
	P10		P11-HVM		P11-FGM	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
VIP4	5.41	5.54	0.45	1.11	-4.38	6.64
VIT4	6.15	6.37	3.25	3.61	-1.80	5.60
O6	7.24	7.30	2.80	3.51	-2.17	5.67
V1	6.67	6.79	0.91	2.87	-3.91	6.72

表4 VIT4模型在不同高度的磁场强度范围

Table 4 VIT4 model's magnetic field ranges at different heights

高度	强度最小值/Gs	强度最大值/Gs	平均值/Gs
R_j	2.374 5	13.882 2	7.794 7
$2 R_j$	0.455 6	1.174 9	0.841 8
$3 R_j$	0.144 5	0.333 9	0.248 5
$4 R_j$	0.062 7	0.139 0	0.104 7
$5 R_j$	0.032 6	0.070 7	0.053 6
$6 R_j$	0.019 1	0.040 8	0.031 0

neer11/mag/jupiter_lmin_ascii/fgm/)。数据格式如表5所示，其中第1列是以秒表示的当日的时；第2、3、4列是S3LH (1957) 坐标系^[7]中的坐标参数 $(r_L, \theta_L, \lambda_L)$ ，分别为探测器到木心的距离（以 R_j 表示）、纬度、西经度；第5、6、7列是磁场测量值，分别为磁场径向分量、西向分量、北向分量。

较大的数据都处于离木星较远的位置，所有模型大于10%的偏差基本都出现在 $(4\sim5) R_j$ 以外，可见这几个木星磁场模型在接近木星的空间内对内源磁场的吻合较好。这是因为探测器实际测得的磁场值是内源场与外源场的叠加，而随着与木星距离更接近，外源场减小^[8]，主磁场增大，使得内源场的主导作用更大，体现为测得的总磁场强度与模型计算值的偏差减小。但在这些区域中外源磁场对总体磁场的影响程度尚未明确；此外考虑到距木星较远处磁场强度较小，接近仪器的分辨率^[9]，导致测量值的相对误差增大，这也会在一定程度上影响结果的精确度。

2.4 最新探测结果

图6是Connerney等根据2016年“朱诺号”探测器的前9个轨道周期中获得的磁场数据反演的木星表面磁场^[10]。可以看到磁北极的纬度比之前的模型较低,且磁北极区域磁场强度远超之前的模型。这是上世纪的探测数据缺失之处,以这些数据为基础模型也有进一步完善的必要。

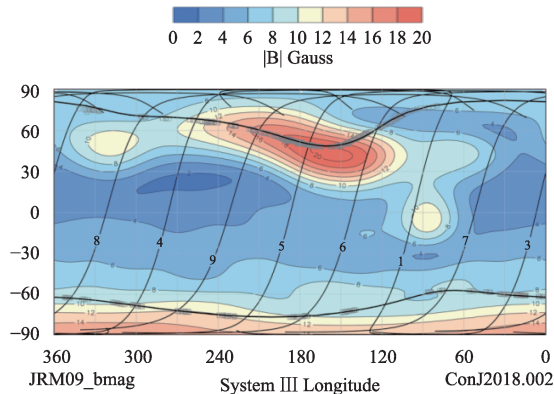


图6 基于“朱诺号”数据的木星表面磁场

Fig. 6 Jupiter surface magnetic field based on Juno data

3 结束语

本文简要介绍了木星磁场的数学表示方法以及现有的木星磁场模型。使用MATLAB数学工具对磁场的计算式进行了编程计算,并分析了各模型特点。计算了磁场的测量数据与对应坐标各模型计算值的偏差并进行了分析对比,结果表明各模型计算的磁场值与探测数据偏差都在8%以内,在可接受范围内。

经过调研分析,发现这些木星磁场模型计算出的磁场值比较粗放,对磁场分布的描述也不够精准,能对一个范围内的磁场强度进行估算,研究磁场对探测器表面充放电、动生电势等影响,但不能与地磁场模型IGRF一样,用作导航等用途。这是由以下两方面的原因造成的。

1) 至今为止还没有进行过大规模的木星探测活动,获得的磁场数据不能精确描述整个木星磁场,且数据的空间分辨率不足以推测磁场的精细结构。

2) 使用的木星磁场测量数据不是同一时期获得的,对木星磁场随时间变化的认识不足。

参 考 文 献

- [1] GERALD S. Treatise on geophysics (Second Edition) [M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2015(10): 195-237.
- [2] 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(5): 821-825.
- [3] 胡中为. 太阳系的最大行星——木星[J]. 科学(上海), 2013(6): 51-55.
HU Z W. The largest planet of the Solar system - Jupiter[J]. Science (Shanghai), 2013(6): 51-55.
- [4] 高德章. 国际地磁参考场及其计算[J]. 海洋石油, 1999(3): 34-42.
GAO D Z. International geomagnetic reference field and its calculation[J]. Offshore Oil, 1999(3): 34-42.
- [5] 朱文山, 廖瑛, 冯向军. 中低轨道卫星空间磁场分布计算[J]. 上海航天, 2007(6): 61-64.
ZHU W S, LIAO Y, FENG X J. Calculation of space magnetic field distribution of medium-low orbit satellites[J]. Aerospace Shanghai, 2007(6): 61-64.
- [6] CONNERNEY J E P, BENN M, BJARNO J B, et al. The Juno magnetic field investigation[J]. Space Science Reviews, 2017(213): 39-138.
- [7] BAGENAL F, WILSON R J. Jupiter Coordinate Systems[EB/OL]. (2016-5-18)[2018-6-6]http://lasp.colorado.edu/home/mop/files/2015/02/CoOrd_systems7.pdf.
- [8] KIVELSON M G. The current systems of the Jovian magnetosphere and ionosphere and predictions for Saturn[J]. Space Science Reviews, 2005, 116(1-2): 299-318.
- [9] CONNERNEY J E P. Doing more with Jupiter's magnetic field[C]// Planetary Radio Emissions III. Vienna: Austrian Academy of Science, 1992: 13-33.
- [10] CONNERNEY J E P, KOTSIAROS S, OLIVERSEN R J, et al. A new model of Jupiter's Magnetic field from Juno's first nine orbits[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(3): 2590-2596.

作者简介:

费涛(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:空间环境及效应。

通信地址:江苏省南京市秦淮区御道街29号南京航空航天大学明故宫校区(210016)

电话:15850679768

E-mail:498796360@qq.com

方美华(1982-),女,博士,讲师,主要研究方向:人机与环境工程。

本文通讯作者。

E-mail:fmh_medphys@nuaa.edu.cn

通信地址:南京航空航天大学航天学院(210016)

朱基聪(1992-),男,硕士,主要研究方向:人机与环境工程。

通信地址:南京航空航天大学航天学院(210016)

田鹏宇(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:空间环境及效应。

通信地址:南京航空航天大学航天学院(210016)

Comparative Analysis of Jupiter Magnetic Field and Magnetic Field Model

FEI Tao, FANG Meihua, ZHU Jicong, TIAN Pengyu

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Jupiter has the strongest magnetic field among the planet in the Solar system. In this paper, Jovian magnetic field and its' models including VIP4, VIT4, O6 and V1 was investigated. And then the calculated magnetic field results by these models were compared. It was found the range of magnetic filed strength by these four models were consistent. While global magnetic field distribution were not exactly the same, especially the position of magnetic south poles. The deviation were small between the models and magnetic data obtained from spacecraft missions. It can provide necessary theoretical basis and computational model support for environmental protection of Jupiter exploration. VIP4, VIT4, O6 and V1 was investigated. And then the calculated magnetic field results by these models were compared. It was found the range of magnetic filed strength by these four models were consistent. While global magnetic field distribution were not exactly the same, especially the position of magnetic south poles. The deviation were small between the models and magnetic data obtained from spacecraft missions. It can provide necessary theoretical basis and computational model support for environmental protection of Jupiter exploration.

Key words: Jupiter magnetic field; magnetic field mathematical model; magnetic field distribution; model precision

High lights:

- Utilizing Matlab software to realize the calculation and mapping of Jupiter's magnetic field intensity.
- Calculate the variation of magnetic field strength with height.
- Comparing the magnetic field distribution and accuracy of each model.

[责任编辑：高莎，英文审校：朱恬]