

近地空间磁场梯度分布特性及磁力效应研究

刘开磊, 张珩, 李文皓, 肖歆昕, 郭正雄

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要:以国际地磁参考场模型 IGRF11 为基础, 推导出地球磁场梯度分布公式, 并对近地空间磁场分布特点进行了分析。由基本磁力学可知, 带强磁体的航天器在地磁环境中不仅受到磁力矩作用, 还将受到与地磁梯度相关的磁力的影响。根据地磁环境下的磁体受力机理, 文章讨论了以弱磁力改变轨道倾角的方法, 并通过数值仿真验证了其有效性。

关键词: IGRF11 模型; 地磁场; 梯度分布; 弱磁力

中图分类号: V520.1; O441.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)05-0493-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.05.004

0 引言

近年来, 地磁场应用技术得到了飞跃发展, 研究主要集中在利用其具有矢量信息效应的地磁导航技术^[1]、利用磁体磁力矩效应的动量轮饱和卸载技术^[2]以及姿态控制技术^[3-4]。

随着空间技术快速发展, 从当初磁矩仅 $10^2 \sim 10^1 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ 的姿态控制磁力矩器到如今 $10^2 \sim 10^5 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ 的各种大型科学仪器(如空间粒子收集器)和强磁设备(如 EMFF 电磁编队系统^[5-6]), 其所产生的磁矩呈量级增加, 由此, 航天器磁矩与地磁场相互作用的累积效应非常突出。另外, 由于航天器磁矩与地磁场相互作用所产生的磁力无需消耗工质, 因此如何控制航天器的磁矩(大小和方向)用以实现对航天器推进具有重要的研究价值。

与磁矩不同, 航天器在地磁场中所产生的磁力取决于地磁场的磁感应强度梯度 ∇B_e 而非磁感应强度 B_e ^[7-8]。目前还未看到专门报道地磁场的 ∇B_e 对强磁航天器的磁力效应的文献。本文以第 11 版国际地磁参考场(11th International Geomagnetic Reference Field, IGRF11)模型为基础, 深入分析地磁场的 ∇B_e 的分布特性, 并推导空间磁体与地磁场的相互作用机理, 进而讨论了空间磁力的利用。

1 坐标系定义

坐标系定义如图 1 所示。其中: $Ox_my_mz_m$ 为轨道面的地磁分布坐标系, 其原点 O 位于航天器质心, x_m 轴指向正北, y_m 轴指向正东, z_m 轴与其他两轴构成右手螺旋法则垂直向下指向地心; $Ox_0y_0z_0$ 为地心赤道惯性坐标系; $Ox_1y_1z_1$ 为航天器轨道坐标系, 与通常定义相同, 其原点与 $Ox_my_mz_m$ 的原点重合。图 1 中, i 为轨道倾角, α 为赤经, Ω 为升交点赤经, N_i 为升交点, u 为升交点角距(瞬时位置是在轨道面内与 O_iN_i 的夹角, $u = \omega + f$, 其中: ω 为近地点幅角; f 为真近点角)。

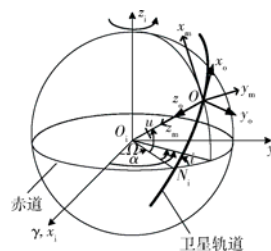


图 1 坐标系定义示意图
Fig. 1 The coordinate system

2 IGRF11 模型与近地空间地磁场磁感应强度梯度分布

2.1 IGRF11 模型

地球磁场分布于地球上空数万 km 高度范围

收稿日期: 2012-04-04; 修回日期: 2012-09-21

基金项目: 国家自然科学基金“低轨航天器磁推进机理研究”(项目编号: 11002143)

作者简介: 刘开磊(1984—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为航天器轨道动力学与控制、新能源发电; E-mail: chinese1kl@163.com。张珩(1961—), 男, 研究员, 主要研究方向为复杂飞行动力学与控制、遥科学与遥操作技术。

内, 高度 1 000 km 以下具有较稳定的分布。IGRF11 模型是地磁场应用研究的主要参考模型, 其描述方式为球谐函数。地球磁场势函数 V 的球谐函数表达为

$$V(r, \theta, \lambda, t) = R_e \sum_{n=1}^N \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n [g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)] P_n^m,$$

式中: R_e 为地球平均半径 (6 371.2 km); r 为地心距; θ 为地心余纬 (地心纬度为 φ , $\theta = 90^\circ - \varphi$); λ 为经度; $g_n^m(t)$ 、 $h_n^m(t)$ 为随时间变化的 IGRF11 高斯系数; P_n^m 为 $\cos \theta$ 的 n 阶 m 次关联勒让德函数。

将地磁场势函数在地磁分布坐标系中分解得到 3 个方向上的地磁场磁感应强度 B_e 分量表达式^[9]为

$$\begin{cases} B_x(r, \theta, \lambda) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+2} [g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)] \frac{dP_n^m}{d\theta} \\ B_y(r, \theta, \lambda) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+2} [g_n^m \sin(m\lambda) - h_n^m \cos(m\lambda)] \frac{mP_n^m}{\sin\theta} \\ B_z(r, \theta, \lambda) = -\sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (n+1) \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+2} [g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)] P_n^m \end{cases} \quad (1)$$

2.2 近地空间地磁场磁感应强度梯度分布

在地磁坐标系中, 哈密顿算子^[10]为

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k} = -\frac{\partial}{r\partial\theta} \mathbf{i} + \frac{\partial}{r\sin\theta\partial\lambda} \mathbf{j} - \frac{\partial}{\partial r} \mathbf{k} \quad (2)$$

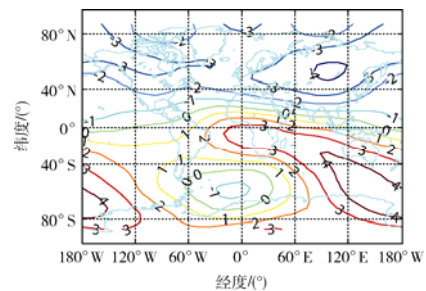
由张量知识可知, 矢量的梯度为二阶张量, 即矩阵^[11]。则地磁场磁感应强度梯度 ∇B_e 有 9 个分量:

$$\nabla B_e = \begin{pmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} = -\frac{\partial B_x}{r\partial\theta} & \frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\partial B_x}{r\sin\theta\partial\lambda} & \frac{\partial B_x}{\partial z} = -\frac{\partial B_x}{\partial r} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_y}{r\partial\theta} & \frac{\partial B_y}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{r\sin\theta\partial\lambda} & \frac{\partial B_y}{\partial z} = -\frac{\partial B_y}{\partial r} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{r\partial\theta} & \frac{\partial B_z}{\partial y} = \frac{\partial B_z}{r\sin\theta\partial\lambda} & \frac{\partial B_z}{\partial z} = -\frac{\partial B_z}{\partial r} \end{pmatrix} \quad (3)$$

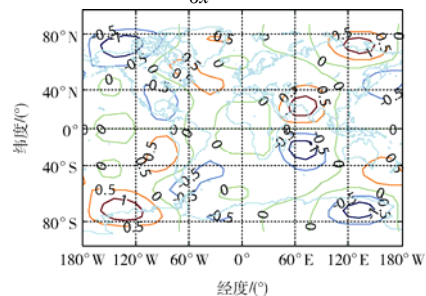
令 $C = g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)$ 、 $D = g_n^m \sin(m\lambda) - h_n^m \cos(m\lambda)$, 并结合关联勒让德多项式及其导数的递推关系, 将式(1)代入式(3), 可得 9 个梯度分量式如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial B_x}{\partial x} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \frac{-1}{R} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+3} C \cdot \left[\frac{-nP_n^m}{\sin^2\theta} + \frac{n \cos\theta}{\sin\theta} \frac{dP_n^m}{d\theta} + \frac{\sqrt{n^2 - m^2}}{\sin^2\theta} (\cos\theta P_{n-1}^m - \sin\theta \frac{dP_{n-1}^m}{d\theta}) \right] \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \frac{-1}{R} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+3} D \cdot \frac{m^2 P_n^m}{\sin^3\theta} \left(-\cos\theta P_n^m + \sin\theta \frac{dP_n^m}{d\theta} \right) \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \frac{n+1}{R} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+3} C \cdot \frac{dP_n^m}{d\theta} \\ \frac{\partial B_x}{\partial y} = -\sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} D \cdot \frac{m}{r \sin\theta} \frac{dP_n^m}{d\theta} \\ \frac{\partial B_y}{\partial y} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \frac{m^2}{r \sin^2\theta} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} C \cdot P_n^m \\ \frac{\partial B_z}{\partial y} = -\sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \frac{-m(n+1)}{r \sin\theta} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} D \cdot P_n^m \\ \frac{\partial B_x}{\partial z} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \frac{n+2}{r} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} C \cdot \frac{dP_n^m}{d\theta} \\ \frac{\partial B_y}{\partial z} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \frac{m(n+2)}{r \sin\theta} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} D \cdot P_n^m \\ \frac{\partial B_z}{\partial z} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \frac{m(n+1)(n+2)}{r \sin\theta} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} D \cdot P_n^m \end{cases} \quad (4)$$

以 700 km 的近地空间等高层为例, 计算时间取为 2012 年 1 月 1 日, 通过对经度、纬度的遍历数值计算, 得到地磁场磁感应强度梯度各分量等值线分布如图 2 所示 (单位: 10^{-12} T/m)。



(a) $\frac{\partial B_x}{\partial x}$ 等值线图



(b) $\frac{\partial B_y}{\partial x}$ 等值线图

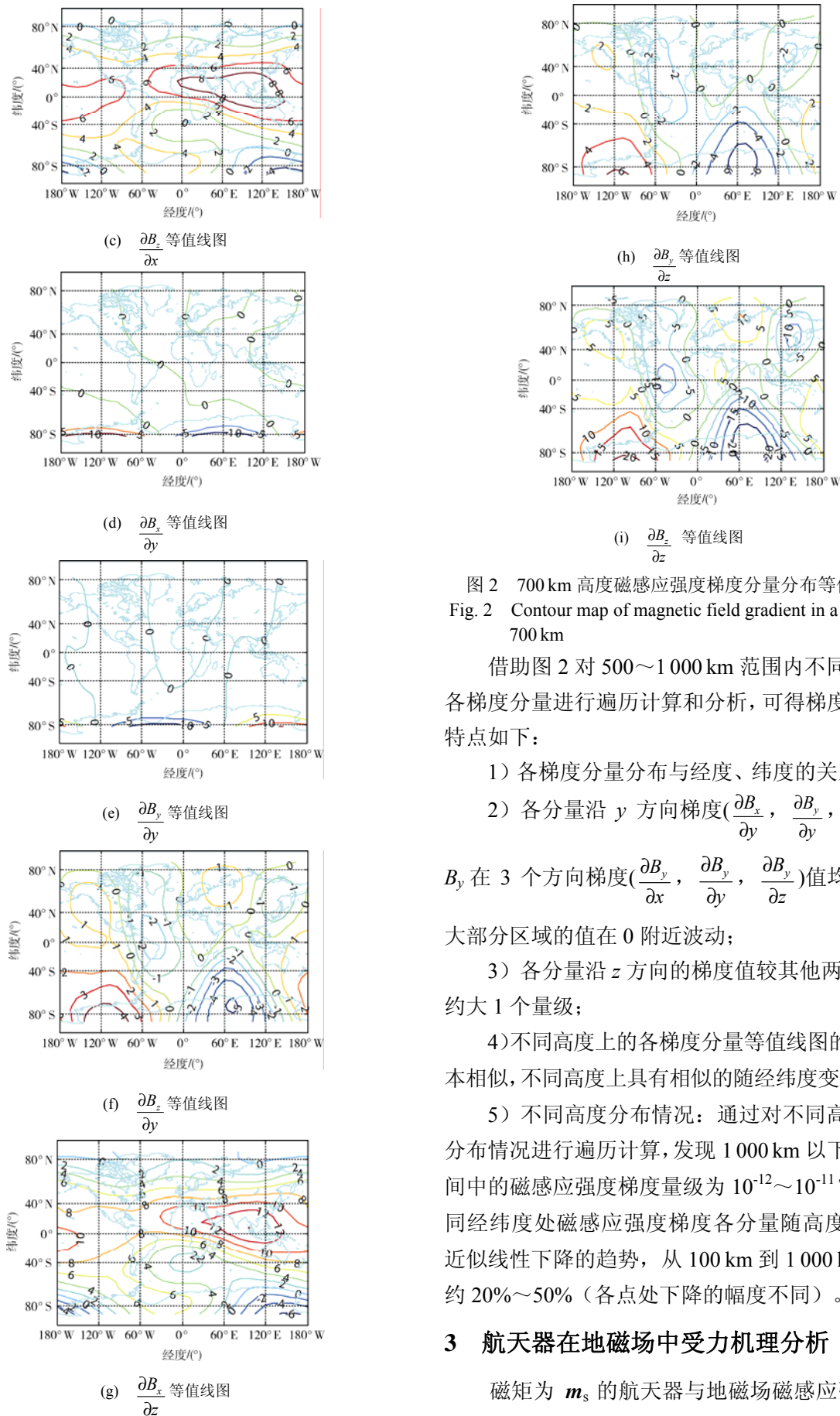


图 2 700 km 高度磁感应强度梯度分量分布等值线图
 Fig. 2 Contour map of magnetic field gradient in a height of 700 km

借助图 2 对 500~1 000 km 范围内不同高度上各梯度分量进行遍历计算和分析, 可得梯度分布的特点如下:

- 1) 各梯度分量分布与经度、纬度的关系密切;
- 2) 各分量沿 y 方向梯度($\frac{\partial B_x}{\partial y}$, $\frac{\partial B_y}{\partial y}$, $\frac{\partial B_z}{\partial y}$)及

B_y 在 3 个方向梯度($\frac{\partial B_x}{\partial x}$, $\frac{\partial B_y}{\partial y}$, $\frac{\partial B_z}{\partial z}$)值均较小,

大部分区域的值在 0 附近波动;

- 3) 各分量沿 z 方向的梯度值较其他两个方向约大 1 个量级;

4) 不同高度上的各梯度分量等值线图的图形基本相似, 不同高度上具有相似的随经纬度变化趋势;

5) 不同高度分布情况: 通过对不同高度上的分布情况进行遍历计算, 发现 1 000 km 以下近地空间中的磁感应强度梯度量级为 $10^{-12} \sim 10^{-11}$ T/m; 相同经纬度处磁感应强度梯度各分量随高度增加呈近似线性下降的趋势, 从 100 km 到 1 000 km 下降约 20%~50% (各点处下降的幅度不同)。

3 航天器在地磁场中受力机理分析

磁矩为 m_s 的航天器与地磁场磁感应强度 B_e

相互作用所产生的磁矩^[8]为

$$\mathbf{L} = \mathbf{m}_s \times \mathbf{B}_e; \quad (5)$$

同时, 在地磁分布坐标系中, 其所产生的磁力^[8]为

$$\mathbf{F}^m = \nabla(\mathbf{m}_s \cdot \mathbf{B}_e). \quad (6)$$

由矢量性质公式^[8]可得

$$\nabla(\mathbf{m}_s \cdot \mathbf{B}_e) = \mathbf{m}_s \times (\nabla \times \mathbf{B}_e) + \mathbf{B}_e \times (\nabla \times \mathbf{m}_s) + (\mathbf{m}_s \cdot \nabla) \mathbf{B}_e + (\mathbf{B}_e \cdot \nabla) \mathbf{m}_s. \quad (7)$$

考虑到近地空间中电流密度 \mathbf{j} 和电场 \mathbf{E} 随时间的变化几乎为 0, 根据 Maxwell 方程, 地磁场磁感应强度的旋度满足^[12]

$$\nabla \times \mathbf{B}_e = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; ϵ_0 为真空介电常数。由于磁矩 \mathbf{m}_s 可视为恒值, 其旋度、散度为 0。则公式(6)还可表示为

$$\mathbf{F}^m = \nabla(\mathbf{m}_s \cdot \mathbf{B}_e) = (\mathbf{m}_s \cdot \nabla) \mathbf{B}_e = \begin{pmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{pmatrix} \cdot (m_x \ m_y \ m_z)^T = \nabla \mathbf{B}_e \cdot \mathbf{m}^T. \quad (9)$$

当仅受磁力时, 同时可给出惯性坐标系中的动力学方程^[13]为

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{\mu}{r^3} x = F_x^i / M \\ \ddot{y} + \frac{\mu}{r^3} y = F_y^i / M, \\ \ddot{z} + \frac{\mu}{r^3} z = F_z^i / M \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{F}^i = \mathbf{R}_{im} \mathbf{F}^m$, \mathbf{R}_{im} 为地磁坐标系到赤道惯性坐标系的转换矩阵; $[x, y, z]$ 为赤道惯性坐标系下的瞬时位置坐标; r 为地心距; M 为航天器质量。

4 空间磁力的应用研究

由 2.2 节分析可知, 近地空间中的地球磁场梯度分量为 $10^{-12} \sim 10^{-11}$ T/m 量级; 再由式(9)可知, 当航天器磁矩为 $10^6 \sim 10^7$ A·m² 量级时便可产生 μN 级磁力; 若再对磁矩的朝向施加一定的控制策略, 则可产生具有一定大小和方向的磁推进力, 可用于轨道保持或机动。而磁矩的产生可借鉴美国麻省理工学院 (MIT) 的空间电磁编队飞行 (EMFF) 系

统^[5-6], 采用超导通电螺线环的方式产生磁矩: 对于横截面积为 S 、匝数为 N 的螺线环, 当通以电流 I 时其磁矩为 $N \cdot I \cdot S$ ^[6]。MIT 设计采用了超导电磁系统 (超导线圈半径 1 m, 线圈质量 10 kg, 线圈电阻仅 0.02 Ω), 能产生的最大磁矩为 10^4 A·m² 量级。虽然 EMFF 系统仅用于星间电磁编队, 但可以设想, 随着空间超导技术研究的深入, 超导磁矩可进一步增加。有关磁推进器的研究不是本文的研究重点, 此处不做进一步展开。

本文以改变轨道倾角为例, 探讨弱磁力的轨道机动方法。磁力为弱作用力, 可视作为摄动力处理。由轨道倾角摄动力的微分方程^[13]

$$\frac{di}{dt} = -\frac{r \cos u}{na^2 \sqrt{1-e^2}} \frac{F_y^o}{M} \quad (11)$$

可知: 在 $u \in (0^\circ, 90^\circ) \cup (270^\circ, 360^\circ)$ 、 $F_y^o > 0$ 或者 $u \in (90^\circ, 270^\circ)$ 、 $F_y^o < 0$ 时, 整个轨道周期内均有 $(di/dt) > 0$, 可实现轨道倾角的增加。若施力方向相反, 则轨道倾角减小。

由于地磁场可近似看作是位于地心、磁北极指向地理南极的磁矩 \mathbf{m}_e 产生 ($m_e = 8.0 \times 10^{22}$ A·m²), 因此, 根据“同性相斥, 异性相吸”作用原理, 可通过设置如表 1 的磁矩朝向策略以获得增加轨道倾角的 F_y^o 指向需求。以 $u \in (0^\circ, 90^\circ)$ 为例 (如图 3 所示): 利用磁体间吸力, 航天器磁矩矢量平行于当地经度线且 N 极指向地磁场 S 极, 则磁力在轨道坐标系中 y 方向的投影 $F_y^o < 0$ 。

表 1 地磁坐标系下磁矩 \mathbf{m}_s 的分量值

Table 1 Component values of \mathbf{m}_s in geomagnetic frame

u	磁力类型	m_x	m_y	m_z	F_y^o	di/dt
$(0^\circ, 90^\circ)$	吸力	$+m_s$	0	0	< 0	> 0
$(90^\circ, 180^\circ)$	斥力	$-m_s$	0	0	> 0	> 0
$(180^\circ, 270^\circ)$	吸力	$+m_s$	0	0	> 0	> 0
$(270^\circ, 360^\circ)$	斥力	$-m_s$	0	0	< 0	> 0

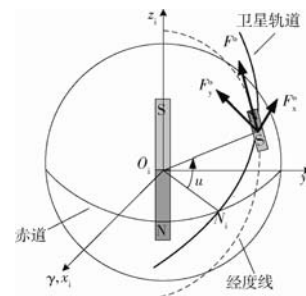


图 3 改变轨道倾角的磁矩 \mathbf{m}_s 指向策略

Fig. 3 Orientation strategy of \mathbf{m}_s for changing inclination

以轨道高度 $h=600\text{ km}$ 、倾角 $i=45^\circ$ 、升交点赤经 $\Omega=0^\circ$ 的圆轨道为例, 航天器磁矩 $m_s=10^7\text{ A}\cdot\text{m}^2$ 。将表 1 所述磁矩施加方式代入式(9), 并转换到惯性坐标系, 利用 Runge-Kuta 法对式(10)进行 30 d 的数值仿真。其 1 个周期内的 F_y° 和轨道倾角改变量 ($di(t)=i(t)-i(0)$) 演化过程如图 4(a)、(b)所示, 运行 30 d 的轨道倾角演化如图 4(c)所示。

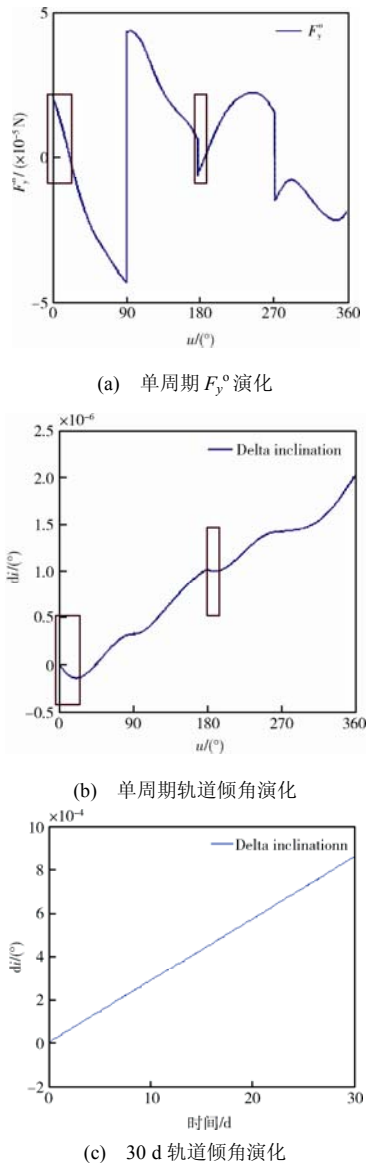


图 4 磁力改变轨道倾角仿真结果

Fig. 4 Simulation results of changing the orbital inclination by magnetic force

从图 4 可以看出:

1) $10^7\text{ A}\cdot\text{m}^2$ 磁矩能在轨道坐标系 y 方向产生 10^5 N 量级的推力, 且在一个周期内的 F_y° 推力方向基本满足如表 1 所述增加轨道倾角的方向要求 (见图 4(a)) ;

2) 一个周期内的轨道倾角基本呈增加趋势 (见图 4(b)) ;

3) 30 d 的轨道倾角增加了约 8.3×10^{-4} (°), 且呈近似线性增加 (见图 4(c)) ;

4) 图 4(a)和图 4(b)中, 部分区域 (红色方框区域) 的推力方向和倾角变化趋势与表 1 存在误差, 原因是实际地球磁场的不均匀性以及地球磁轴与地球自转轴存在约 11.5° 的偏角所致。

5 结束语

本文基于 IGRF11 模型, 分析了近地空间地磁场磁感应强度及其梯度的分布特点, 探究了携带强磁体的航天器在地磁场中的相互作用机理。同时, 本文初步探讨了通过改变磁矩指向来控制磁力方向, 以实现航天器磁力推进、改变轨道倾角的方法。虽然短时间内的轨道改变有限, 但由于磁力推进无需工质消耗, 且随着空间超导技术的发展, 磁矩和磁推力量级可得到极大提高, 可实现航天器的长期推进。

参考文献 (References)

- [1] 郭才发, 胡正东. 地磁导航综述[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1314-1319
Guo Caifa, Hu Zhengdong. A survey of geomagnetic navigation[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4): 1314-1319
- [2] 李太玉, 张育林. 利用地磁场给飞轮卸载的新方法[J]. 中国空间科学技术, 2001, 21(6): 56-61
Li Taiyu, Zhang Yulin. A new method of momentum unloading utilizing geomagnetic field[J]. China Space Science and Technology, 2001, 21(6): 56-61
- [3] Silani E, Lovera M. Magnetic spacecraft attitude control: a survey and some new results[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13: 357-371
- [4] 徐福祥. 用地球磁场和重力场成功换就风云一号 (B) 卫星的姿控技术[J]. 宇航学报, 2001, 22(2): 1-11
Xu Fuxiang. Technique of successful rescue of FY-1B meteorological satellite by using the geomagnetic field and the cravitational field[J]. Journal of Astronautics, 2001, 22(2): 1-11
- [5] Kwon D W, Miller D W. Electromagnetic formation flight of satellite arrays[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2005: 49-54; 75-77
- [6] Miller D W, Sedwick R J. Electromagnetic formation flight[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2005: 14-16; 20-24

- [7] 尹真. 电动力学[M]. 南京大学出版社, 1999: 109-110
- [8] Reitz J R, Milford F J, Christy R W. Foundation of electromagnetic theory[M]. Addison-Wesley Publishing Company, 1979: 19; 180; 255-263
- [9] IGRF-11 coefficients[EB/OL]. [2012-01-10]. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>
- [10] 冯潮清, 赵愉深. 矢量与张量分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986: 115-118
- [11] 黄祖良, 陈强顺. 矢量分析与张量分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989: 320-357
- [12] 谢处方, 饶可谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980: 235-244
- [13] Sidi M J. Spacecraft dynamics and control[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000: 28-41

The characteristics of geomagnetic field's gradient distribution and the magnetic force effects in near-earth space

Liu Kailei, Zhang Heng, Li Wenhao, Xiao Xinxin, Guo Zhengxiong
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the 11th international geomagnetic reference field (IGRF11) model, the gradient distribution characteristics of the geomagnetic field in the near-Earth space are analyzed. From magnetics, it is known that the spacecraft with a strong magnet moment is not only affected by the magnetic moment, but also by a magnetic force related to the geomagnetic gradient. This paper discusses how to change the orbital inclination angle by the weak magnetic force, based on the force analysis for a magnet interaction with the geomagnetic field in the IGRF11 model. Numerical simulations are carried out to test the effectiveness of this idea.

Key words: IGRF11 model; geomagnetic field; gradient distribution; weak magnetic force

发射喜讯

我国一箭双星成功发射“实践九号”卫星

10月14日11时25分,我国在太原卫星发射中心用“长征二号丙”运载火箭,采用一箭双星模式,成功将“实践九号”卫星送入预定轨道。

“实践九号”卫星是国防科技工业局“十一五”重点支持的民用航天科研工程,由A、B两颗星组成,将在轨验证我国卫星发展急需的新原理、新技术、新设备和新材料,对于提高我国卫星研制基础能力、推进我国卫星技术水平快速提升具有重要意义。

“实践九号”卫星紧紧把握我国空间技术发展的迫切需求,以系统级创新为牵引,在轨进行星间编队飞行技术试验;坚持卫星平台型谱化、公用化发展方向,进行微小型卫星平台技术的在轨集成验证,提升我国微小卫星平台总体技术水平;以提高关键核心产品性能指标和自主化为目标,对多种新产品进行在轨试验,提升我国卫星能源、推进等关键分系统的性能和可靠性,推动产品升级换代;以高端元器件、原材料自主化为突破口,进行多种国产核心元器件和原材料考核评价,提升我国宇航级核心元器件的技术水平。

“实践九号”卫星和“长征二号丙”运载火箭分别由中国航天科技集团公司所属中国空间技术研究院和中国运载火箭技术研究院研制。

据悉,国防科工局在“十二五”期间,将继续加大民用航天科研研发力度,强化卫星公用平台、关键宇航产品型谱化工作,充分利用技术试验卫星,开展新技术集成验证,提高我国航天自主创新能力,不断提升民用航天在国民经济各领域的服务水平。

(摘自2012-10-15中国科技网)