

# 西安电子科技大学

## 综合训练项目 课程实验报告

实验名称 地磁场模型仿真实验

空间科学与技术 学院 2016029 班

姓名 学号

同作者 无

实验日期 2022 年 9 月 27 日

成绩

指导教师评语：

指导教师：孙文方

年 月 日

### 实验报告内容基本要求及参考格式

一、实验目的

二、实验所用仪器（或实验环境）

三、实验基本原理及步骤（或方案设计及理论计算）

四、实验数据记录（或仿真及软件设计）

五、实验结果分析及回答问题（或测试环境及测试结果）

## 目录

一、实验目的.....	3
二、实验器材与环境.....	3
三、实验背景.....	3
四、实验原理.....	3
4.1 基础知识.....	3
4.2 地磁场计算模型.....	4
五、实验内容和步骤.....	7
5.1 地磁场参数计算程序.....	7
5.2 地磁总强度随海拔高度变化分析.....	10
5.3 全球地磁总强度二维图绘制与分析.....	11
5.4 地磁总强度/矢量随轨道变化分析.....	13
六、课程学习心得.....	14
七、源代码.....	14
八、引用文献.....	16

## 一、实验目的

- (1) 掌握空间地磁场模型。
- (2) 熟悉模型中主要参数与含义。
- (3) 掌握模型仿真与分析方法。

## 二、实验器材与环境

- (1) 电脑，型号为 Magicbook16Pro,CPU 的型号为 AMD Ryzen 7 5800H with Radeon Graphics，基本满足本实验的性能使用。
- (2) 所有操作均在西安电子科技大学南校区 G220 实验室完成。

## 三、实验背景

作为空间科学与技术的学生，能够完整的仿真模拟卫星轨道，成为了基本要求，同时为之后搭建完整行星轨道模拟及卫星实践奠定基础。

## 四、实验原理

### 4.1 基础知识

地磁场作为地球的固有资源，为航空、航天、航海提供了天然的坐标，可应用于航天器、航空飞行器和舰船等载体的定位、定向及姿态控制。

如下图所示，地磁场近似于一个置于地心的磁偶极子的磁场，这个磁偶极子称为地心磁偶极子，地心磁偶极子的磁轴称为地球的磁轴，它与地轴斜交近似  $11.5^\circ$ 。磁轴与地球表面的交点称为地磁北极和地磁南极。

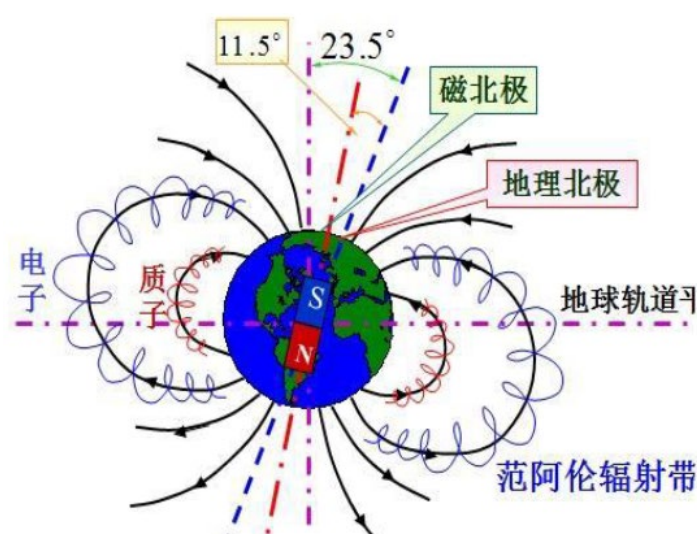


图 1 地球磁场示意图

由于太阳不断地向外辐射带电粒子，所形成的太阳风影响着地磁场的空间

分布，使地磁场在向阳面与背阳面极不对称。向阳面的地磁场被局限在距离地球约 10 个地球半径的范围内，最远处强度为 50~100nT。背阳面的地磁场可以延伸到很远，达到约 60 个地球半径。但是在近地空间的地磁场分布是较为规则的。地磁场是一个弱磁场，通常采用纳特（为基本单位来度量地磁场强度，在地面上的平均强度约为  $5 \times 10^4 \text{ nT}$ ，最强的两磁极处也只约为  $7 \times 10^4 \text{ nT}$ 。

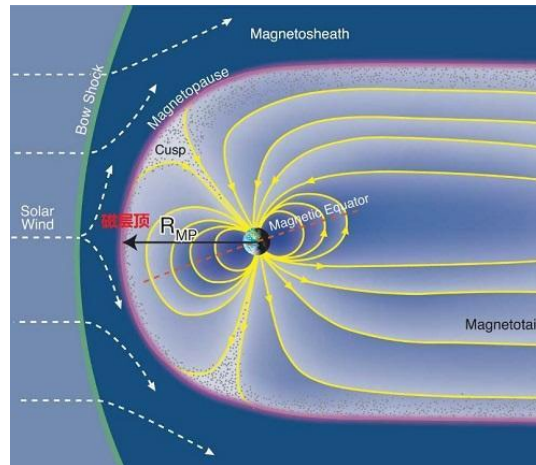


图 2 地磁场磁力线分布

地磁场是由多种不同来源磁场的叠加，但地磁场是一个相对稳定磁场：

（1）地球主磁场：是由处于地幔之下、地核外层的高温液态铁镍环流引起的，又称为地磁正常场。主磁场的地表处的强度为  $5 \times 10^4 \text{ nT} \sim 7 \times 10^4 \text{ nT}$ ，占地磁场总量 95% 以上。主磁场的时间变化周期以千年尺度计，逐渐向西漂移。

（2）地磁异常场：产生于磁化的地壳岩石，又称为地壳场。强度占地磁总量的 4% 以上，在地球表面呈区域分布，随地面高度的增加而衰减。

（3）扰动磁场：源于磁场和电离层，大小为 5-500nT，时间变化比较剧烈，与太阳活动有关。

由于全球范围的地磁分布数据采集主要来自于卫星磁测的结果，卫星的平均测量高度约 400km。卫星磁测数据中主要包含地球主磁场信息，而来源于地壳的中小尺度磁异常已被滤除掉。

## 4.2 地磁场计算模型

地磁学的基本问题之一就是用数学表达式将地磁要素的地面分布表示成地理坐标的函数。1839 年 Gauss 提出了地磁场的球谐分析方法，1885 年 Schmidt 又发展了这一方法，形成了地磁学的高斯理论。国际地磁场随之建立起来，从而就有了全球统一的地磁场数学模型—球谐模型。

使用国际地磁和高空物理协会（IAGA）推荐的国际地磁场（IGRF）球谐系数，并借助于高斯级数表达式，就可以计算出地心球坐标系下的地磁三分量 X, Y 和 Z。IGRF 三分量 X, Y 和 Z 的高斯级数表达式：

$$\begin{aligned}
X &= \sum_{n=1}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^{n+2} \left( g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda) \right) \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \\
Y &= \sum_{n=1}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^{n+2} \left( g_n^m \sin(m\lambda) - h_n^m \cos(m\lambda) \right) \frac{mP_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta} \\
Z &= - \sum_{n=1}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^n (n+1) \left( \frac{R}{r} \right)^{n+2} \left( g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda) \right) P_n^m(\cos\theta)
\end{aligned}$$

式中， $R$  为地球半径(6371.2km)， $r$  为地心到计算点的径向距离(km)， $\theta$  为地心余纬(即  $\theta = 90^\circ - \varphi$ )， $\varphi$  为地心纬度， $\lambda$  为地心或地理经度， $P_n^m$  为 Schmidt-Legendre 函数， $g_n^m$  和  $h_n^m$  为球谐系数(nT)。

#### (1) 球谐系数

$$\begin{aligned}
g_n^m &= g_n^m(y_{ear}) + Sv_{g_n^m}(t - y_{ear}) \\
h_n^m &= h_n^m(y_{ear}) + Sv_{h_n^m}(t - y_{ear})
\end{aligned}$$

式中， $g_n^m(y_{ear})$  和  $h_n^m(y_{ear})$  是  $y_{ear}$  年的球谐系数 (nT)， $Sv_{g_n^m}$  和  $Sv_{h_n^m}$  是球谐系数的年变率 (nT/年)， $g_n^m$  和  $h_n^m$  是  $t$  年的球谐系数 (nT)。

#### (2) 大地坐标和地心球坐标的坐标转换

由于 IGRF 的球谐系数是在半径为 6371.2km 的参考球中推导出来的，实际上，地球并非是理想的球体，而是椭球体。为了提高地磁计算的精度，需要考虑地球的扁率。

假设地球某一测点的大地坐标为  $(\phi, \lambda, h)$ ，其中  $\phi$  为大地(地理)纬度、 $\lambda$  为经度、 $h$  为海拔高度；则该点的地心坐标为  $(\varphi, \lambda, r)$ ，其中  $\varphi$  为地心纬度、 $\lambda$  为地心经度、 $r$  为测点离开地心的距离。则大地坐标和地心球坐标有如下关系：

$$\begin{aligned}
(N+h)\cos\phi\cos\lambda &= r\cos\varphi\cos\lambda \\
(N+h)\cos\phi\sin\lambda &= r\cos\varphi\sin\lambda \\
\left( \frac{b^2}{a^2}N+h \right) \sin\phi &= r\sin\varphi \\
N &= \frac{a^2}{\sqrt{a^2\cos^2\phi + b^2\sin^2\phi}}
\end{aligned}$$

可推导得到：

$$r^2 = h \left( h + 2\sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi} \right) + \frac{a^4 \cos^2 \phi + b^4 \sin^2 \phi}{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}$$

$$\cos \sigma = \frac{h + \sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}}{r}$$

$$\sin \sigma = \frac{(a^2 - b^2) \cos \phi \sin \phi}{r \sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}}$$

$$\varphi = \phi - \sigma$$

上式中,  $a$  为地球长半轴(6378.137km),  $b$  为地球短半轴 6356.7523km

### (3) Schmidt-Legendre (勒让德) 函数求解

根据定义

$$P_{n,m}(\cos \theta) = (\sin \theta)^m \frac{d^m P_n(\cos \theta)}{d(\cos \theta)^m}$$

$$P_n^m(\cos \theta) = \sqrt{\frac{k(n-m)!}{(n+m)!}} P_{n,m}(\cos \theta), k = \begin{cases} 1 & m = 0 \\ 2 & m \neq 0 \end{cases}$$

可推导得到  $P_n^m(\cos \theta)$  和  $\frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta}$  的递推关系:

$$P_0^0(\cos \theta) = 1$$

$$P_0^1(\cos \theta) = 0$$

$$P_1^0(\cos \theta) = \cos \theta$$

$$P_1^1(\cos \theta) = \sin \theta$$

$$P_n^m(\cos \theta) = \frac{2n-1}{\sqrt{n^2-m^2}} \cos \theta P_{n-1}^m(\cos \theta) - \sqrt{\frac{(n-1)^2-m^2}{n^2-m^2}} P_{n-2}^m(\cos \theta), m \neq n, n > 1$$

$$P_n^m(\cos \theta) = \frac{2n-1}{\sqrt{(n+m)(n+m-1)}} \sin \theta P_{n-1}^{m-1}(\cos \theta), m = n > 1$$

$$\frac{dP_0^0(\cos \theta)}{d\theta} = 0$$

$$\frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} = \frac{n \cos \theta}{\sin \theta} P_n^m(\cos \theta) - \frac{\sqrt{n^2-m^2}}{\sin \theta} P_{n-1}^m(\cos \theta)$$

### (4) 地磁分量变换

为了描述地磁向量场的空间分布特征, 经常将地磁场  $F$  在北—东—地地理坐标系中表示为 7 个地磁要素 ( $F, H, X_{\text{大地}}, Y_{\text{大地}}, Z_{\text{大地}}, D, I$ )。下图给出了地理坐标

系中各要素的定义和符号, 其中  $XOY$  面为水平面,  $OZ$  为向下的铅垂方向,  $HOZ$  为当地磁子午面,  $XOZ$  为当地地理子午面,  $F$  为地磁场总强度,  $H$  为地磁场水平强度,  $X_{\text{大地}}$  为地磁场北向分量,  $Y_{\text{大地}}$  为地磁场东向分量,  $Z_{\text{大地}}$  为地磁场垂直分量,  $D$  为磁偏角,  $I$  为磁倾角。

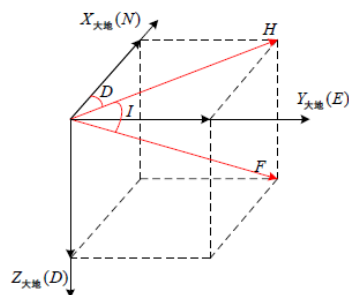


图 3 地理坐标系中地磁各要素

地心坐标系中的地磁分量转换为大地坐标系中的地磁分量

$$X_{\text{大地}} = X \cos \sigma + Z \sin \sigma$$

$$Y_{\text{大地}} = Y$$

$$Z_{\text{大地}} = -X \sin \sigma + Z \cos \sigma$$

## 五、实验内容和步骤

### 5.1 地磁场参数计算程序

在 [https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf\\_old\\_models.html](https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf_old_models.html) 下载 IGRF-12 模型数据 <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/IGRF12coeffs.xls>，按照下图流程采用 Matlab 软件编写地磁场参数计算程序。

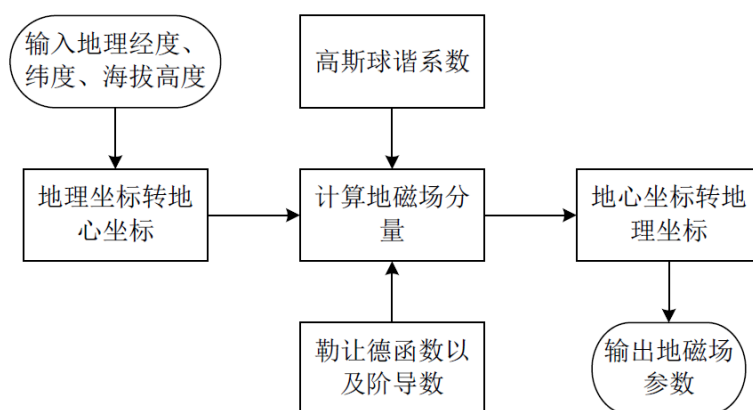


图 4 地磁场参数计算流程

程序要求：

1) 输入

输入参数包括地理经度、地理纬度、海拔高度、年、月、日。

本实验定义 `get_out` 函数实现地磁场参数计算，在 `get_out` 中调用不同函数实现不同的子功能，具体为：`WGS2GCS` 实现地理坐标转地心坐标，`LGD` 函数求解勒让德函数，`Calculation` 计算地磁场分量，`GCS2WGS` 实现地心坐标转换地理坐标。

(1)球谐系数的提取:

1839 年 Gauss 提出了地磁场的球谐分析方法, 1885 年 Schmidt 又发展了这一方法, 形成了地磁学的高斯理论。国际地磁场随之建立起来, 从而就有了全球统一的地磁场数学模型—球谐模型, 球谐系数是球谐模型中的关键参数, 它是一个随时间变化的量, 不同年份有不同的球谐系数。国际地磁和高空物理协会 (IAGA) 每隔五年提供一组球谐系数数据, 计算特定年份特定时间的球谐系数, 依据以下公式计算球谐系数:

$$g_n^m(t) = g_n^m(2015) + Sv_{g_n^m}(t - 2015)$$

$$h_n^m(t) = h_n^m(2015) + Sv_{h_n^m}(t - 2015)$$

(2)地理坐标转地心坐标:

假设地球某一测点的大地坐标为 $(\phi, \lambda, h)$ , 其中  $\phi$  为大地(地理)纬度、 $\lambda$  为经度、 $h$  为海拔高度; 则该点的地心坐标为 $(\varphi, \lambda, \gamma)$ , 其中  $\varphi$  为地心纬度、 $\lambda$  为地心经度、 $\gamma$  为测点离开地心的距离。则大地坐标和地心球坐标有如下关系:

$$r^2 = h(h + 2j\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}) + \frac{a^4 \cos^2 \varphi + b^4 \sin^2 \varphi}{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}$$

$$\cos \sigma = \frac{h + \sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}}{r}$$

$$\sin \sigma = \frac{(a^2 - b^2) \cos \varphi \sin \varphi}{r\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$\phi = \varphi - \sigma$$

(3)勒让德函数及阶导数计算:

Schmidt-Legendre (勒让德) 函数定义如下:

$$P_{n,m}(\cos \theta) = (\sin \theta)^m \frac{d^m P_n(\cos \theta)}{d(\cos \theta)^m}$$

$$P_n^m(\cos \theta) = \sqrt{\frac{k(n-m)!}{(n+m)!}} P_{n,m}(\cos \theta), k = \begin{cases} 1 & m = 0 \\ 2 & m \neq 0 \end{cases}$$

通过以上公式, 我们可以推导得出  $P_{n,m}(\cos \theta)$  和  $\frac{d^m P_n(\cos \theta)}{d(\cos \theta)^m}$  递推关系式。

用国际地磁和高空物理协会 (IAGA) 推荐的国际地磁场 (IGRF) 球谐系数, 并借助于高斯级数表达式, 就可以计算出地心球坐标系下的地磁三分量。三分量的高斯级数表达式为:



$$X = \sum_{n=1}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta}$$

$$Y = \sum_{n=1}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} (g_n^m \sin m\lambda - h_n^m \cos m\lambda) \frac{mP_n^m(\cos \theta)}{d\theta}$$

$$Z = -\sum_{n=1}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^n (n+1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta)$$

#### (4) 转换到大地坐标系中

最后将地心球坐标系中的地磁分量转换为大地坐标系中的地磁分量，同时求的其他 4 个地磁要素。

#### 2) 输出

输出包括地磁场北向分量、东向分量、垂直分量、总强度、水平强度、磁偏角、磁倾角。

#### 3) 计算结果比对

计算结果与参考程序 (Matlab 自带程序 `igrfmagm.m`) 进行比较和分析，对 20 种不同输入列表比较。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	北向分量标准值	北向分量计算值	东向分量标准值	东向分量计算值	垂直分量标准值	垂直分量计算值	磁场总强度标准值	磁场总强度计算值	水平强度标准值	水平强度计算值	磁偏角标准值	磁偏角计算值
2	24372.94842	24297.22582	3375.110567	3300.764669	10822.36095	10810.7279	26880.39216	26797.79968	24605.52755	24520.40436	7.884049563	7.736240922
3	22634.252	22635.54924	1994.658146	1981.16978	29638.90715	29640.26662	37346.38995	37347.53711	22721.97229	22722.08448	5.036217335	5.002049358
4	16068.19206	15833.79292	3251.606314	3244.10526	-23186.90028	-23377.93648	28397.04358	28421.13881	16393.89337	16162.7107	11.44005151	11.57879793
5	17748.59109	17383.1183	-8582.743879	-8614.864838	-39087.35474	-39428.75258	43777.8172	43943.31835	19714.86693	19400.73963	-25.8071685	26.36246332
6	11220.95828	10937.2791	-14250.83759	-14411.01878	-33913.53796	-34164.26333	38459.38551	38658.74319	18138.25451	18091.4769	-51.7834799	52.80322773
7	9292.18789	9137.010116	-3569.584189	-3609.262891	-20845.30538	-20833.68598	23100.07453	23033.76226	9954.229607	9824.038502	-21.0142264	21.55480046
8	14401.31791	14213.06961	-5815.452997	-5776.466959	-18722.40693	-18851.26274	24325.82932	24305.32915	15531.17674	15342.06369	-21.9895432	22.11777791
9	20897.89448	20838.78654	-2125.872257	-2229.610515	14273.94843	14034.80997	25396.59289	25223.04657	21005.74508	20957.72382	-5.80852509	6.107031624
10	12247.58361	12154.80763	-6169.656057	-6196.099275	-34983.80161	-35043.04385	37575.7147	37605.13152	13713.78723	13642.98335	-26.7364411	27.01090939
11	36738.04097	36810.01469	-644.1668776	-645.8636997	3127.559932	3377.854149	36876.55402	36970.31539	36743.88796	36815.68037	-1.00452449	1.005201103
12	14401.31791	14213.06961	-5815.452997	-5776.466959	-18722.40693	-18851.26274	24325.82932	24305.32915	15531.17674	15342.06369	-21.9895432	22.11777791
13	9923.707848	9798.648675	-7039.458229	-7158.655063	-22431.39232	-22535.25917	25518.64634	25594.87769	12166.9203	12135.06729	-35.3502759	36.15058511
14	12247.58361	12154.80763	-6169.656057	-6196.099275	-34983.80161	-35043.04385	37575.7147	37605.13152	13713.78723	13642.98335	-26.7364411	27.01090939
15	7456.634578	7202.211329	-11134.68446	-11199.25375	-32203.90485	-32345.35524	34880.85557	34978.80984	13400.84316	13315.22184	-56.1907162	57.25503312
16	1521.523756	1668.645293	339.8529442	246.2824825	56371.2656	56351.12462	56392.81976	56376.36276	1559.017179	1686.722317	12.59110844	8.395913157
17	6436.611418	6431.729679	-178.9403391	-154.0396075	48602.93758	48616.40585	49027.62005	49040.24666	6439.098244	6433.574035	-1.59243514	1.371968803
18	11497.19595	11641.2047	-4440.896526	-4329.215309	44774.15411	44668.86605	46439.5516	46363.42682	12325.05889	12420.13494	-21.1195073	20.39952477
19	18846.18151	18823.96692	4406.145724	4355.750528	32693.40256	32629.0047	37992.7789	37920.52532	19354.39685	19321.34294	13.15911335	13.02859169
20	13072.99174	12722.60427	9877.920718	9909.511098	-37537.57742	-37551.20583	40957.85822	40867.54371	16385.25041	16126.47108	37.07460551	37.91467344
21	21379.94193	21189.34853	5227.497502	5208.891431	-13902.21924	-14141.60353	26032.67844	26002.03822	22009.73982	21820.19801	13.73952906	13.81093509

图 5 各分量标准值和计算值对比

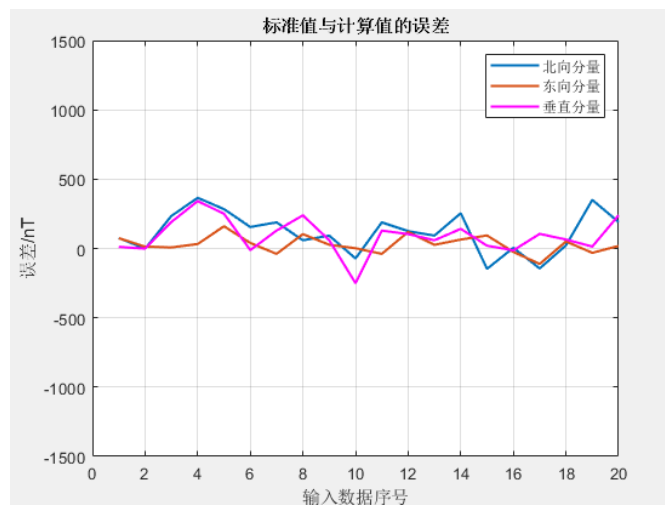


图 6 北、东、垂直分量标准与计算值的误差

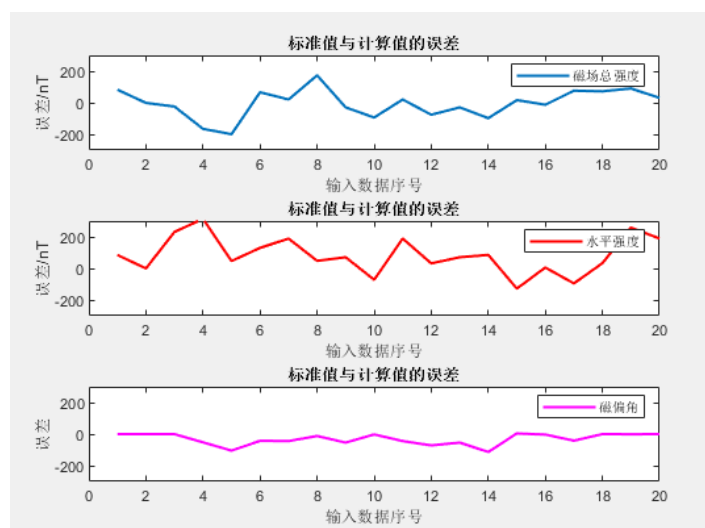


图 7 磁场总强度、水平强度和磁偏角标准值和计算值

从对比数据中可以看出，除个别数值的偏差在百位外，其他大部分的数值都相差很小。在大部分地理条件下，两个函数计算得到的地磁场几乎相同。

## 5.2 地磁总强度随海拔高度变化分析

自由选定某一地理经纬度（如西安、北京、海南岛等地），画出海拔在 $[0, 36000\text{km}]$ 范围内地磁总强度曲线，分析变化趋势。

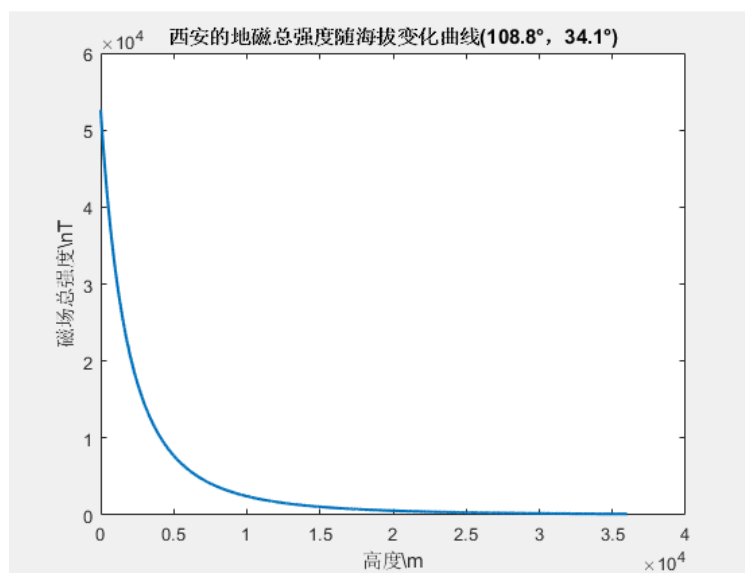


图 8 西安处地磁总强度随海拔变化的曲线

图 8 是我选定地点陕西西安（东经  $108.8^\circ$ ，北纬  $34.1^\circ$ ）为分析点，画出的海拔在 $[0, 36000\text{km}]$ 范围内地磁总强度曲线。从上图我们可以看到，随着海拔高度的增加地磁场强度急剧减弱。因此我们分析得到，不同轨道类型的卫星所受地磁场影响差异很大，卫星轨道高度变化较大时，所受影响差异也会很大。

### 5.3 全球地磁总强度二维图绘制与分析

按照纬度 $[-80^{\circ}, 80^{\circ}]$ ，经度 $[-180^{\circ}, 180^{\circ}]$ ，间隔 $0.5^{\circ}$ ，选择 $[300\text{km}-3000\text{km}]$ 中任一轨道高度，选择 2015.1.1 至当前任一时刻点，绘制全球地磁总强度二维分布图，同时绘制等强度地磁图。寻找磁场异常区，查阅关于南大西洋磁场异常区资料并进行简要描述，该区域对低轨道航天器飞行会造成什么影响。

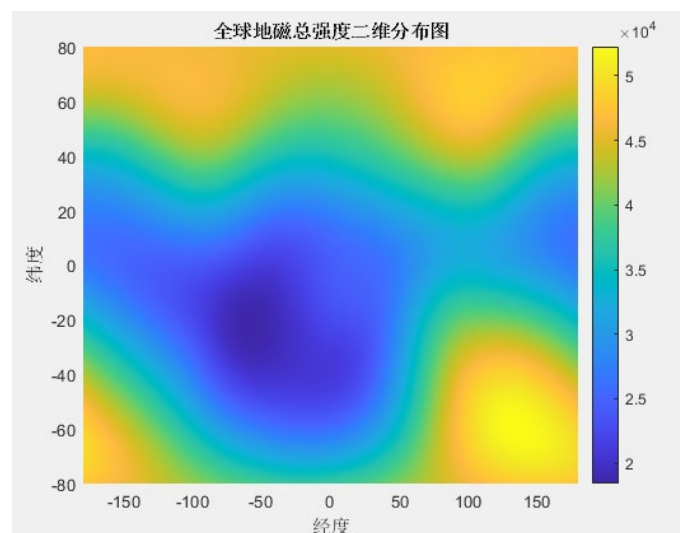


图 9 全球地磁总强度二维分布图

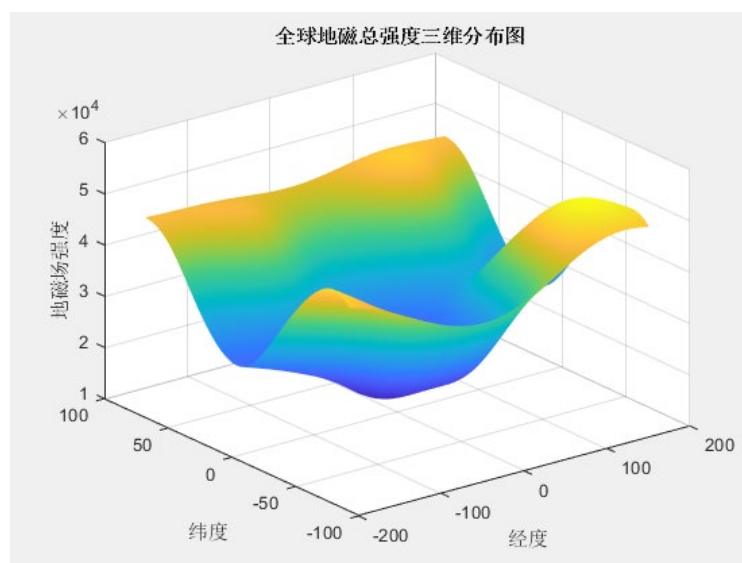


图 10 全球地磁总强度三维分布图

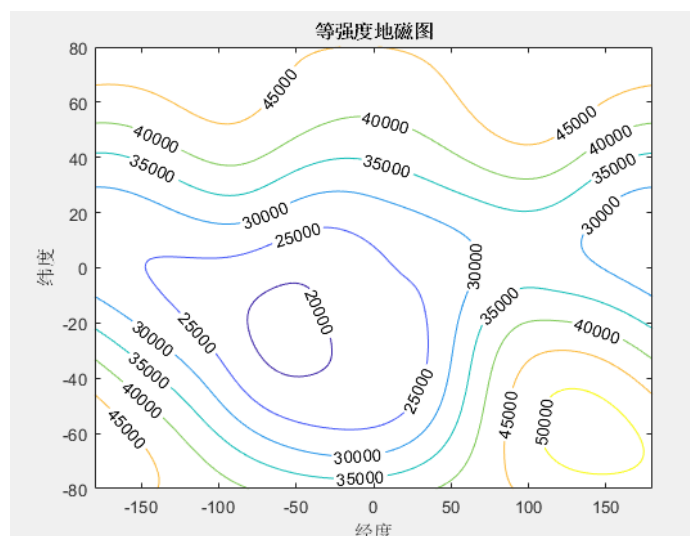


图 11 全球等强度地磁图

图 9 和图 10 分别是我选择海拔高度为 1Km 时，绘制出的全球地磁总强度二维分布图和全球等强度地磁图。从图中可以看出，纬度对地磁强度的影响较大，在高纬度地区磁场较强，低纬度地区磁场较弱。同时，在南纬  $30^{\circ}$ 、西经  $50^{\circ}$  附近的南大西洋和南美洲地区，相较于同纬度的其他地区，磁场异常偏弱。我们可以看到三维分布图中存在异常的下凸，对应图 6 西经约  $30^{\circ}$ ，南纬约  $45^{\circ}$  处存在异常的弱磁场，这正是南大西洋磁场异常区。

南大西洋异常区(South Atlantic Anomaly)是地球上一片地磁最弱的区域，覆盖范围遍及南美洲南部及南大西洋海域。由于该区的地磁较其他地区弱，阻挡太阳粒子的范艾伦辐射带在该区域上空形成一凹陷部分，容让粒子可以到达更接近地球的位置，导致穿越该区域上空的人造卫星受粒子影响而出现运作异常。

由于地球磁轴倾斜于地球自转轴约  $11^{\circ}$ ，范艾伦辐射带并非等距环绕着整个地球，令南太平洋海域一带成为范艾伦辐射带最接近地球表面的区域。异常区的形状及大小随时间不断改变。至发现于 1958 年后，区域的南方边缘位置并无太大改变，并不断的向西北、北、东北及东方扩张。太阳粒子落在异常区的密度亦会每日随时间不同而改变，粒子密度最高的时候为异常区的正午时份。

学界不少文献认为地球磁场不断减弱是异常区不断扩大的原因。当地球磁场持续减弱，范艾伦辐射带的内围亦会越来越靠近地球表面。以目前的扩大速度，异常区有可能于 2240 年覆盖整个南半球。

太阳粒子可以严重影响人造卫星及太空站的运作。低轨度的人造卫星受范艾伦辐射带保护而免受太阳粒子的威胁。但由于异常区的辐射带较接近地球表面，因此人造卫星穿越南大西洋上空时，有可能直接受到太阳粒子撞击而出现运作异常。过去，哈勃太空望远镜亦曾在穿越该区域上空时出现运作异常。现时每当哈伯望远镜穿越该区时都会停止运作。曾在该区域上空执行任务的太空人报称在视野范围内见到流星。国际太空站则需要添加保护层而免受影响。

地球磁场对地球有保护作用，它阻挡了许多来自外太空有害的宇宙射线和带电粒子，像 X 光之类的幅射线，还有带正电的质子或带负电的电子。南大西洋异常区上空的地球磁力保护变得薄弱之后，让更多来自外太空的幅射线得以穿透，到达大气层更低的地方，更接近地球表面，容易干扰到经过异常区的卫

星、飞机和太空船的通信。例如，太空船经过南大西洋异常区时，太空人虽然闭起眼睛，眼前仍会感觉到闪光。而美国的哈勃太空望远镜绕行地球轨道飞过这里时，会出现仪器失灵、通讯错误，因此必须自动关闭感应器以防受损。

5.4 地磁总强度/矢量随轨道变化分析

选择某一卫星 TLE 数据，选择 2015.1.1 至当前任一时刻为起点，描绘该时刻起至之后 90 分钟内地磁总强度矢量随轨道变化曲线，探讨卫星如何利用地磁场进行导航，设计一种卫星地磁导航方案。

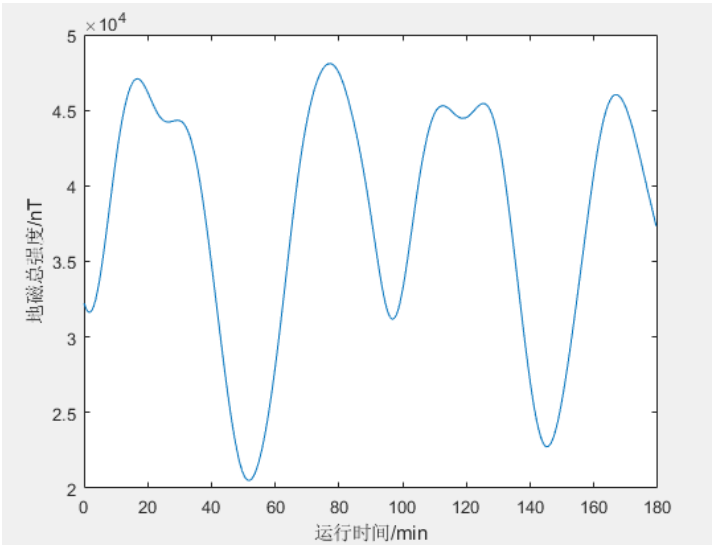


图 12 卫星总强度随轨道变化曲线

卫星轨迹上的磁场矢量图(SPACEBEE-20 )

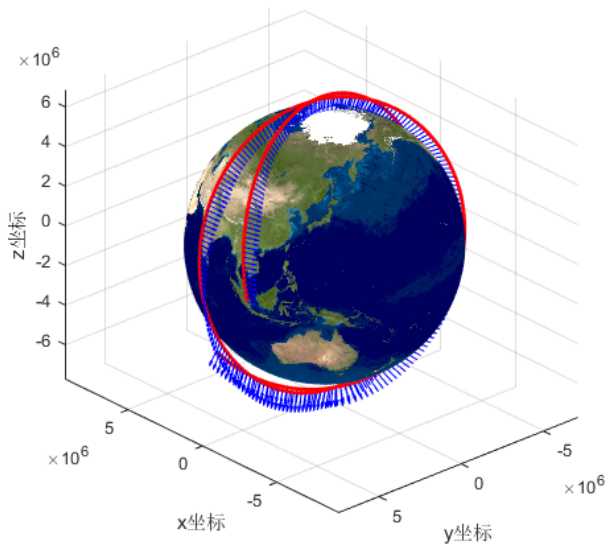


图 13 卫星地磁矢量随轨道变化的三维示意图

从图 13 可以看出，地磁场矢量从地理南极-地磁北极发出，在地理北极-地磁南极收回，与实际相符合。

从上图我们可以看到，当卫星轨迹处于北半球一侧，地磁矢量指向地球，

而卫星处于南半球时，地磁矢量指向地球外侧。

理论上近地空间任意点的地磁特征信息是唯一的，利用地磁场提供的天然坐标系，可以实现无源自主导航定位，具有隐蔽性，不易被侦查，且能消除惯导系统的累积误差。基于此所设想的卫星导航方案如下：

地磁场是一个矢量场，其强度大小和方向是位置的函数，同时地磁场具有丰富的特征，例如总强度、矢量强度等，为地磁匹配提供了充足的匹配信息。因此，可以把地磁场当作一个天然的坐标系，利用地磁场的测量信息来实现对卫星的导航定位。本次地磁实验，是进行了一个**逆向匹配**的过程：已知一点地磁场参数，要求确定该点的经度、纬度、海拔高度。因此可以通过地磁场参数来确定相应的经度、纬度、海拔高度，从而实现卫星的地磁导航。但是由于地球磁场的数据库很庞大，因此需要对其进行优化。优化放大如下：估计当前时刻太阳活动强度等产生宇宙射线的因素，滤除扰动磁场带来的噪声；测出地磁总强度，与全球等强度地磁图进行比对，估算卫星所处位置的大致区间；在选定的区间内，进一步比对磁场矢量强度，得到更精确的解。

## 六、课程学习心得

本实验进行了地磁场球谐模型的仿真实验，编写程序对任一点任一时刻的地磁场强度进行求解。接着，利用该程序探究了地磁场的分布特点，一是同一地点同一时间随高度变化地磁场强度的变化规律，二是绘制全球地磁强度分布图。最后，结合卫星轨道仿真实验探究了卫星轨道上地磁强度变化规律，并对地磁场导航做了简单分析。

在本次实验中，我收获了很多新知识。

1. 我理解了空间地磁场模型，掌握了地磁场模型的计算方法以及模型中主要参数的含义。
2. 我对 matlab 的使用更加熟练，特别是绘图方面，学会了用 `pcolor` 函数绘制云图以及用 `contour` 函数绘制等高线图。
3. 在学习新知识的同时也巩固了自身 Matlab 编程的基础。此次实验让我收获颇多。

## 七、源代码

以下为分别对应四个要求的核心代码。

### main\_1.m

```
1. x=xlsread('20 组数据');
2. [G0,H0]=Get_GM();
3. for k=1:20
4.     FAI=x(k,1);lambda=x(k,2); h=x(k,3);year=x(k,4);month=x(k,5);day=x(k,6);
5.     [XYZ,H1,D1,I1,F1]=igrfmagm(h,FAI,lambda,decyear(year,month,day),13);
6.
7.     [F,H,XD,YD,ZD,D,I]=get_out(FAI,lambda,h,G0,H0);
```



```

8.
9.     result(k,1)=XYZ(1);result(k,2)=XD;   error(k,1)=XYZ(1)-XD;%北向分量
10.    result(k,3)=XYZ(2);result(k,4)=YD;   error(k,2)=XYZ(2)-YD;%东向分量
11.    result(k,5)=XYZ(3);result(k,6)=ZD;   error(k,3)=XYZ(3)-ZD;%垂直分量
12.    result(k,7)=F1;    result(k,8)=F;    error(k,4)=F1-F;    %磁场总强度
13.    result(k,9)=H1;    result(k,10)=H;    error(k,5)=H1-H;    %水平强度
14.    result(k,11)=D1;   result(k,12)=D;   error(k,6)=D1-D;    %磁偏角
15. end
16.
17. title1={'北向分量标准值','北向分量计算值','东向分量标准值','东向分量计算值','垂直分量标准
    值','垂直分量计算值'...
18.        '磁场总强度标准值','磁场总强度计算值','水平强度标准值','水平强度计算值','磁偏角标准
    值','磁偏角计算值' };
19. xlswrite('compar.xls',title1,'sheet1');
20. xlswrite('compar.xls',result,'sheet1','A2');

```

## main\_2.m

```

1. lati=34+1/60;
2. longi=108+8/60;
3. t=decyear(2022,10,1);
4. [G0,H0]=Get_GM();
5. h=0:10e3:36000e3;
6. for k=1:length(h)
7.     [F,H,XD,YD,ZD,D,I]=get_out(lati,longi,h(k),G0,H0);
8.     f(k)=F;
9. end

```

## main\_3.m

```

1. t=decyear(2022,10,1);
2. [G0,H0]=Get_GM();
3. i=1;j=1;
4. for latitude=-80:0.5:80
5.     for longitude=-180:0.5:180
6.         [F(latitude*2+161,longitude*2+361),H,XD,YD,ZD,D,I]=get_out(latitude,longti
            tude,500e3,G0,H0);
7.     end
8. end

```

## main\_4.m

```

1. [G0,H0]=Get_GM();
2. j=1;

```

```

3. for dt=1:30:10800
4.     [Longitude, Latitude, H, ECEF_x, ECEF_y, ECEF_z] = TLE(dt);
5.     [F, H, XD, YD, ZD, D, I] = get_out(Latitude, Longitude, H, G0, H0);
6.     f(j) = F;
7.     X(j) = ECEF_x; Y(j) = ECEF_y; Z(j) = ECEF_z;
8.     Longitude = Longitude * pi / 180; Latitude = Latitude * pi / 180;
9.     XX(j) = -ZD * cos(Latitude) * cos(Longitude) - XD * sin(Longitude) -
        YD * sin(Latitude) * cos(Longitude);
10.    YY(j) = -ZD * cos(Latitude) * sin(Longitude) + XD * cos(Longitude) -
        YD * sin(Latitude) * sin(Longitude);
11.    ZZ(j) = -ZD * sin(Latitude) + YD * cos(Latitude);
12.    j = j + 1;
13. end

```

## 八、引用文献

[1] 综合实验 1-卫星轨道设计.ppt 孙文方