

线圈磁场计算与仿真

|  |  |
| --- | --- |
| 院系 | 电子信息与通信 |
| 专业班级 | 电子信息工程信卓2001 |
| 姓名 | 郭嘉豪 |
| 学号 | U202013803 |
| 指导老师 | 田加胜 |

目录

[1 线圈模型与结构尺寸 4](#_Toc6681)

[2 算法表达式与计算步骤 5](#_Toc21071)

[2.1 对载流圆环产生的磁场进行数学建模 5](#_Toc22474)

[3 Matlab程序代码运行结果 8](#_Toc24886)

[3.1 Z=0时的磁场分布 8](#_Toc19143)

[3.2 Z=1mm时的磁场分布 8](#_Toc16963)

[3.3 Z=2mm时的磁场分布 9](#_Toc11826)

[3.4 Z=3mm时的磁场分布 9](#_Toc26222)

[3.5 Z=4mm时的磁场分布 10](#_Toc12309)

[3.6 Z=5mm时的磁场分布 10](#_Toc2238)

[3.7 Z=7mm时的磁场分布 11](#_Toc30682)

[3.8 Z=10mm时的磁场分布 11](#_Toc12657)

[3.9 Z=13mm时的磁场分布 12](#_Toc22873)

[3.10 Z=15mm时的磁场分布 12](#_Toc26441)

[4 Comsol软件仿真结果 13](#_Toc24942)

[4.1 仿真模型建立 13](#_Toc10316)

[4.2 仿真参数设置 15](#_Toc4157)

[4.2.1 磁场线圈方程选择 15](#_Toc19833)

[4.2.2 大气范围设置 16](#_Toc30344)

[4.2.3 铜线范围设置 16](#_Toc22853)

[4.2.4 计算设置 17](#_Toc22211)

[4.2.5 磁通量箭头绘制参数设置 18](#_Toc28377)

[4.3 仿真结果 19](#_Toc12241)

[4.3.1 空间磁场分布图 19](#_Toc24683)

[4.3.2 磁通密度模（T） 20](#_Toc1671)

[4.3.3 磁场模（A/m） 20](#_Toc29989)

[5 结果分析 21](#_Toc11370)

[5.1 与圆环平行的平面分析 21](#_Toc19314)

[5.2 与圆环垂直的平面分析 25](#_Toc30021)

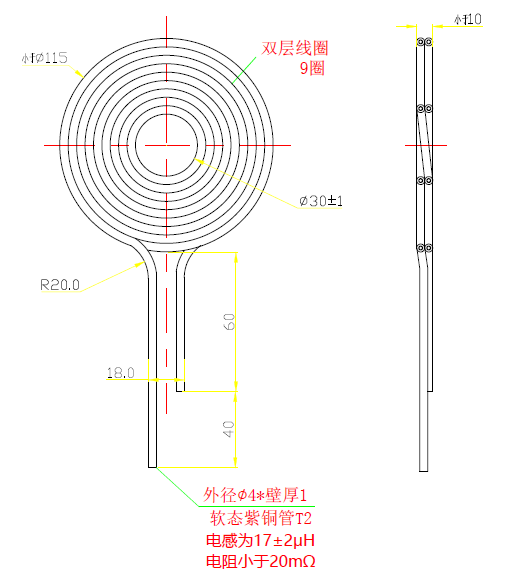
[6 附录Matlab程序代码 28](#_Toc8889)

[6.1.1 一个载流环在真空中的磁场分布函数 28](#_Toc6794)

[6.1.2 叠加原理 29](#_Toc28606)

[7 七、参考文献 35](#_Toc17050)

# 线圈模型与结构尺寸

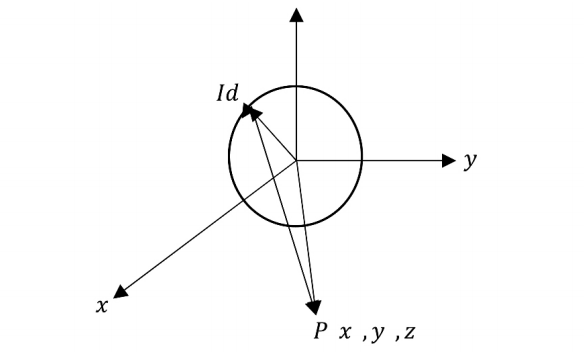


图表 1 线圈模型

# 算法表达式与计算步骤

## 对载流圆环产生的磁场进行数学建模

设载流圆环的半径为 , 其中通有电流为 。 如图 1 所示, 设载流圆环位于 平面上, 圆心 与坐标原点重合, 载流圆环中心轴线与 轴重合。



图表 2 载流圆环磁场分析图

在空间任取一点 , 计算 处的 磁感应强度。在圆环上任取电流元 , 由毕奥 萨伐尔定律知该电流元在 点产生的磁感应 强度为

其中 为电流元到 点的距离。  
由磁场的叠加原理, 则 点的磁感应强度为

因为直接求取该积分计算过程复杂且易出 错, 所以为了简化计算过程, 我们在空间直角坐标 系中, 首先分别求取在 轴, 轴, 轴的磁感应强 度分量, 然后求矢量和得 点的磁感应强度, 最 后绘制磁场分布图, 分析载流圆环在全空间的磁 场分布特点。  
设 为电流元的坐标, 则电流元 和 电流元到 点的距离 在空间直角坐标系下的 表示：

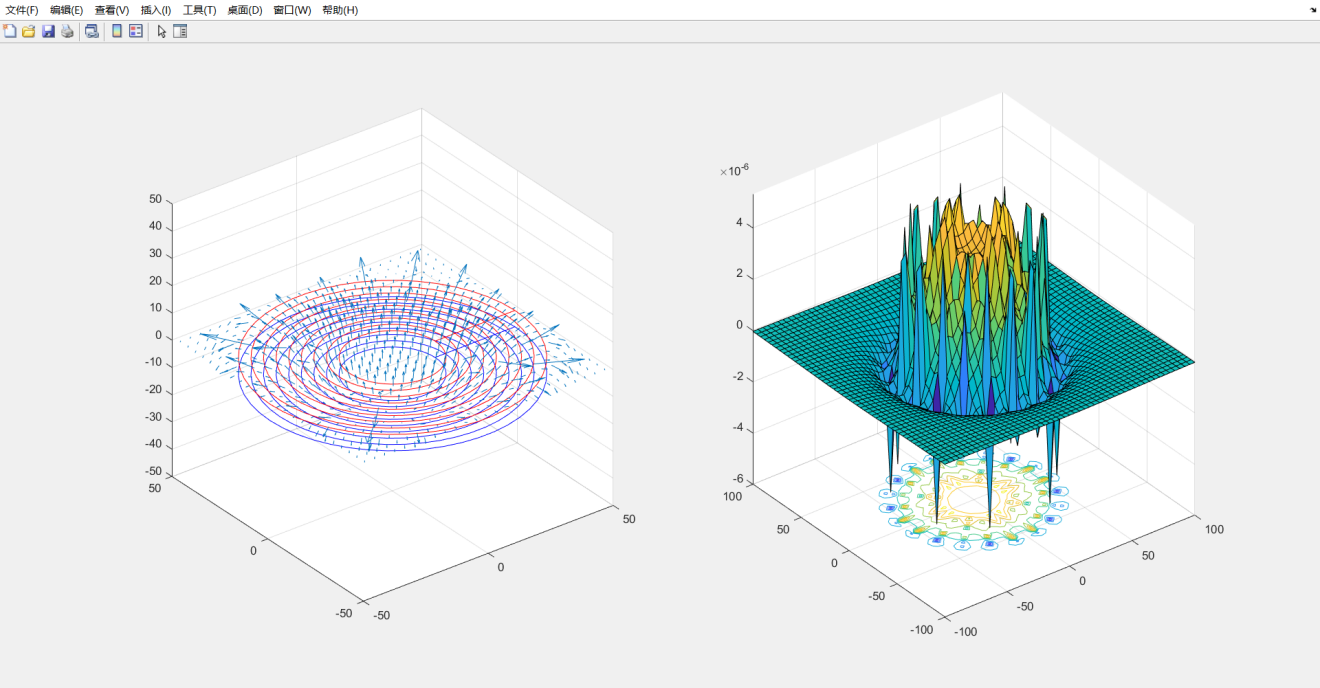
将式（2）（3）代入式（1）, 其中

所以 点的磁感应强度分量为：

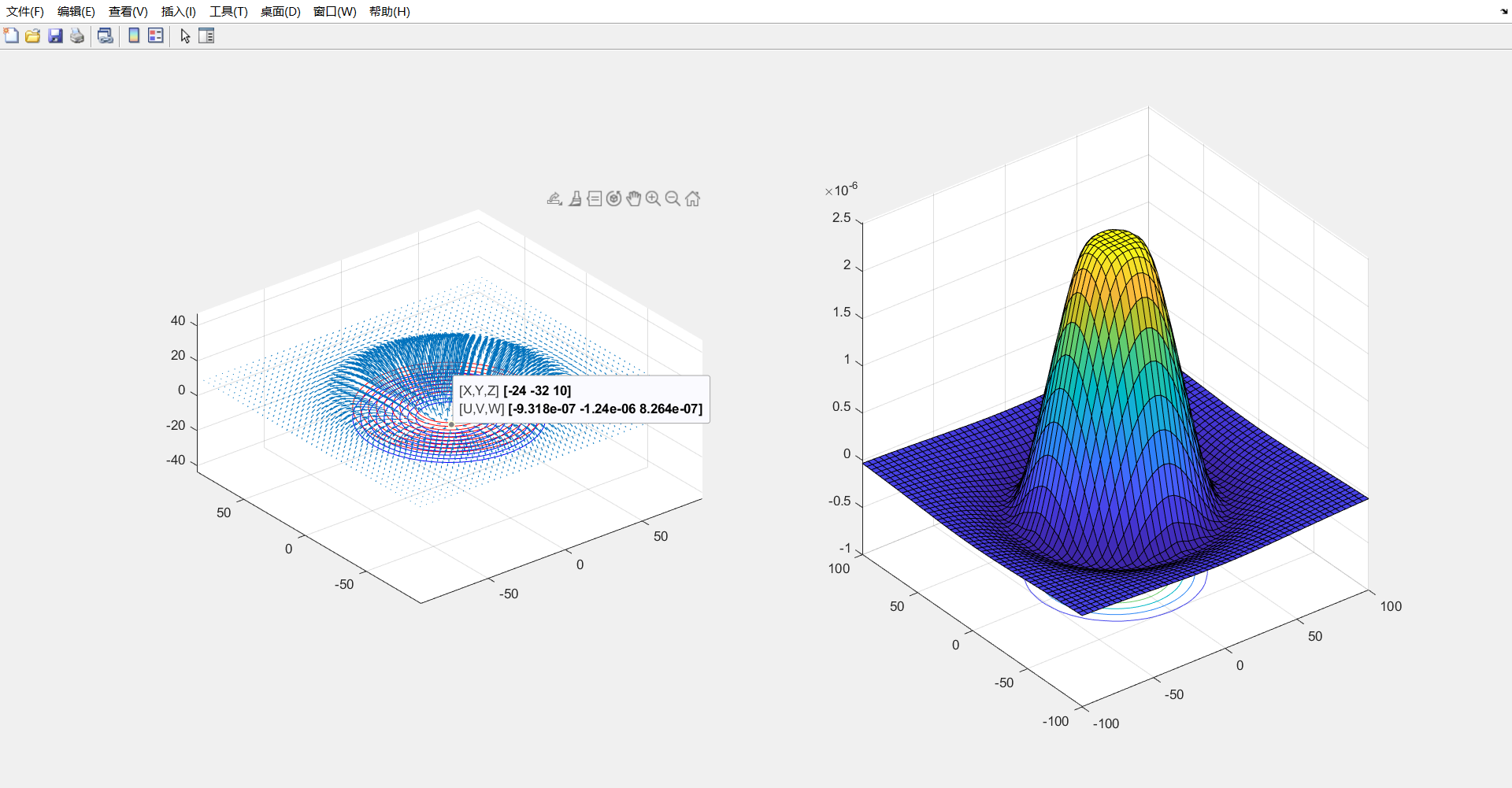
于是得到了一个载流环的磁场分布，对于我们的建模目标仅需要计算18个不同大小，放置空间位置不同的载流圆环分别在真空中产生的磁场，然后运用叠加原理即可得到整个真空中的磁场分布。

# Matlab程序代码运行结果

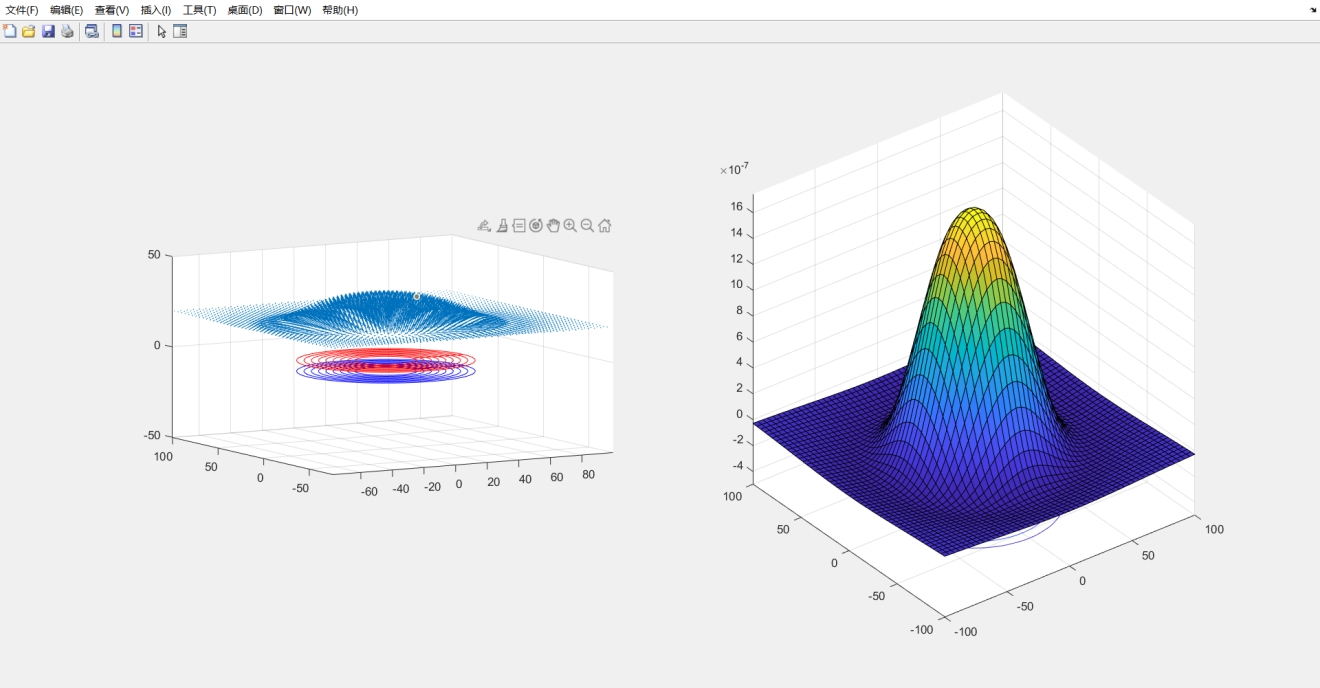
## Z=0时的磁场分布



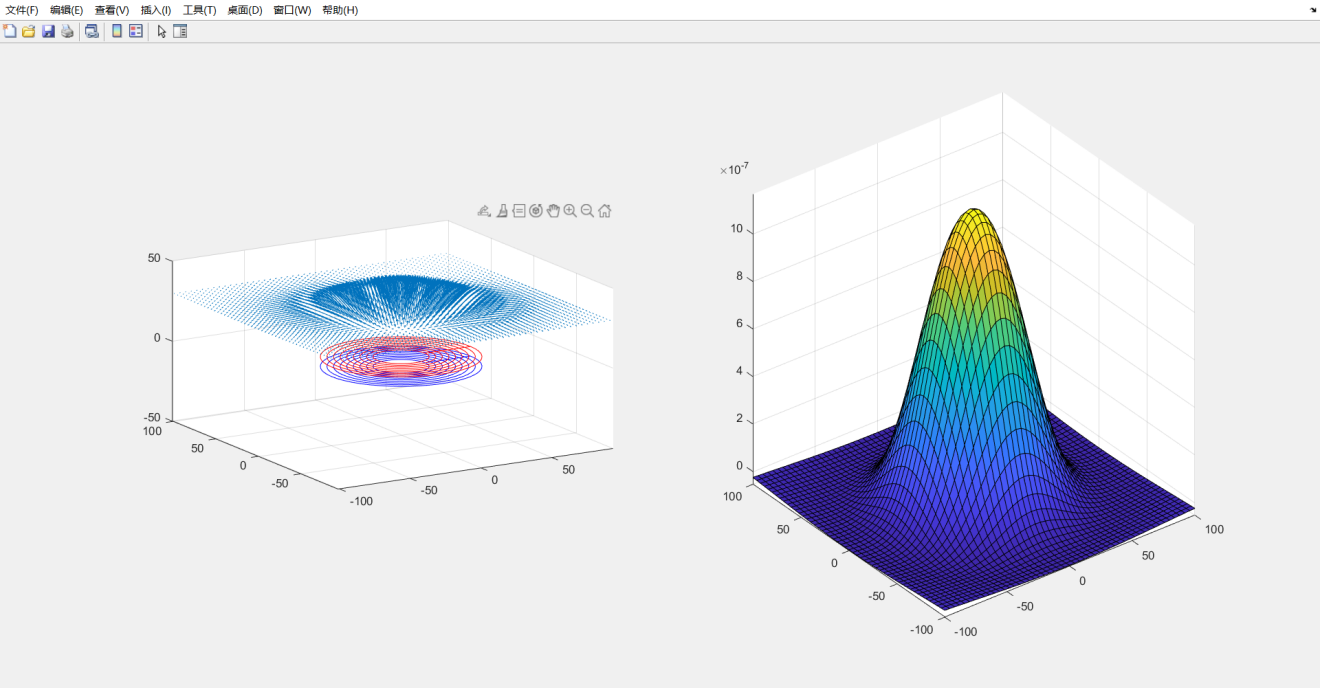
## Z=1mm时的磁场分布



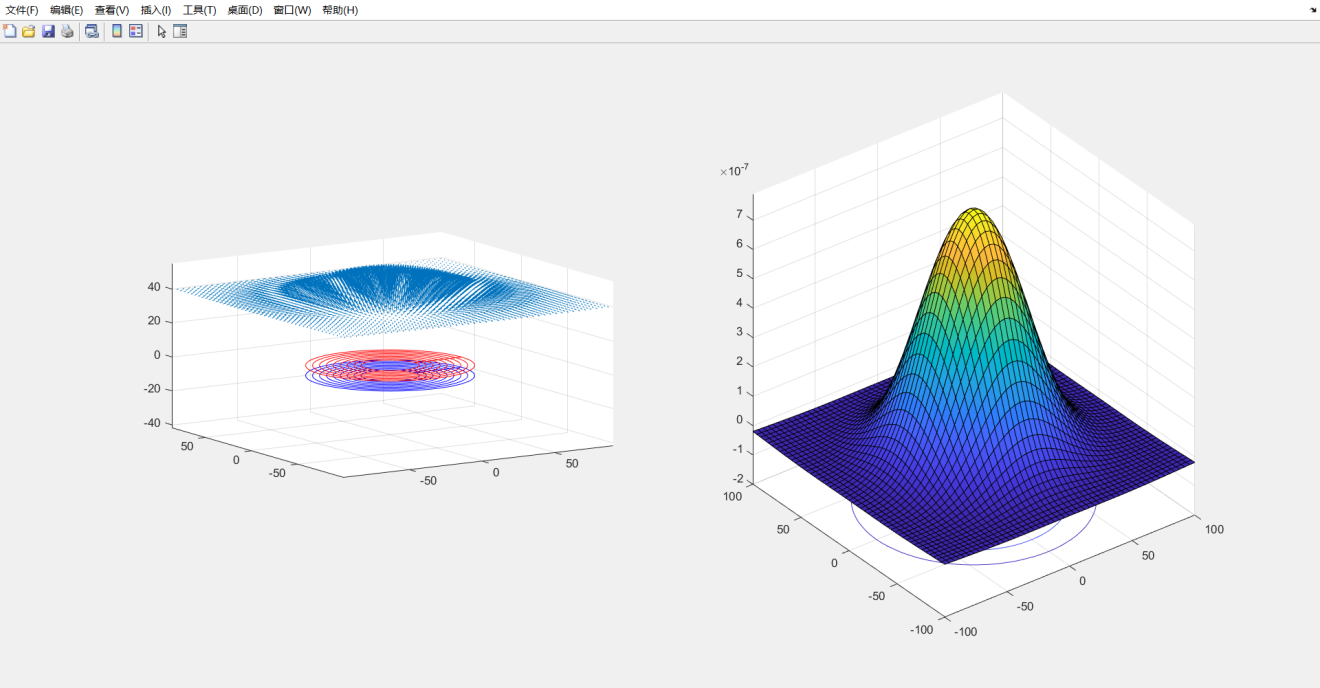
## Z=2mm时的磁场分布



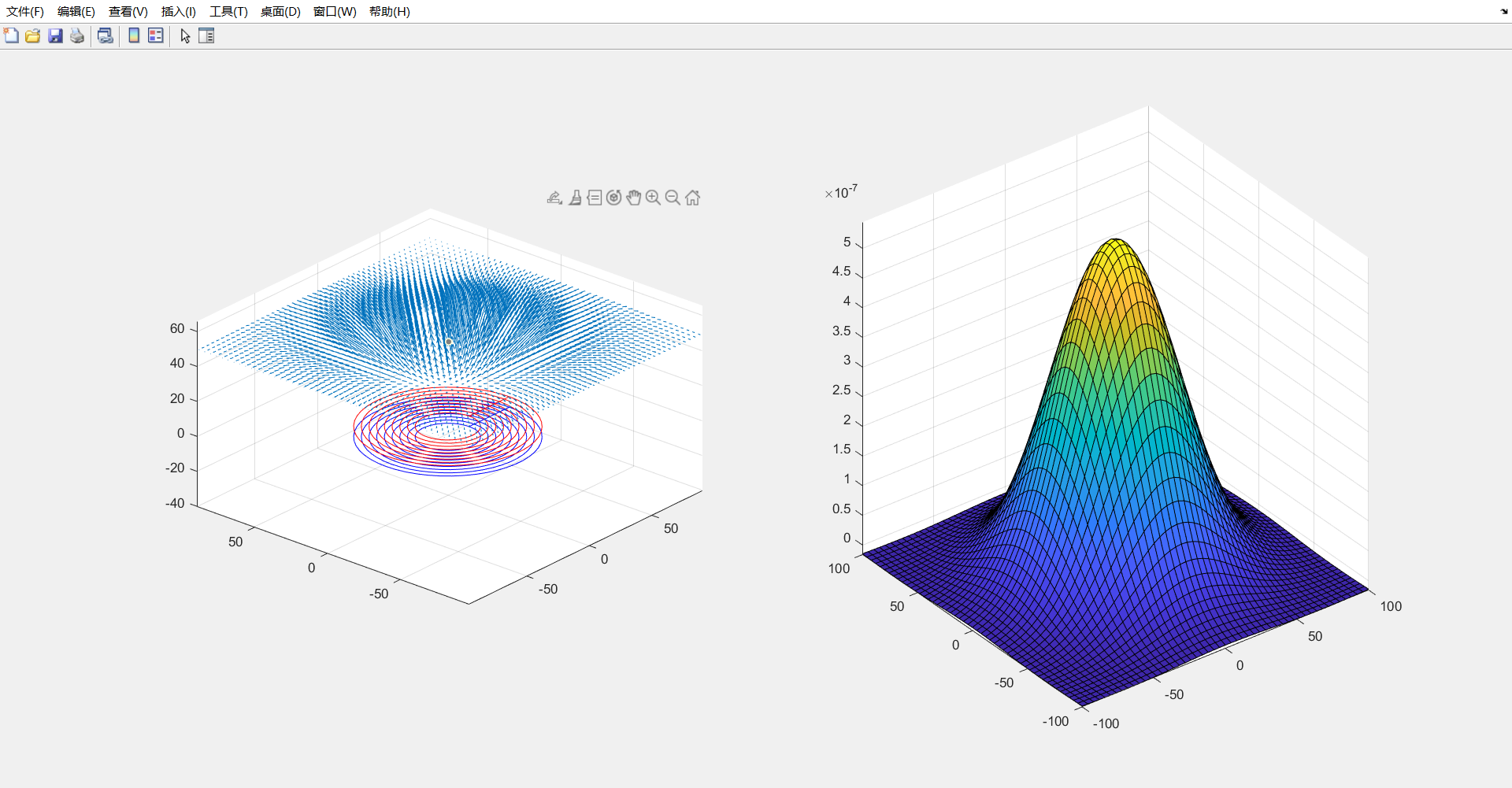
## Z=3mm时的磁场分布



## Z=4mm时的磁场分布



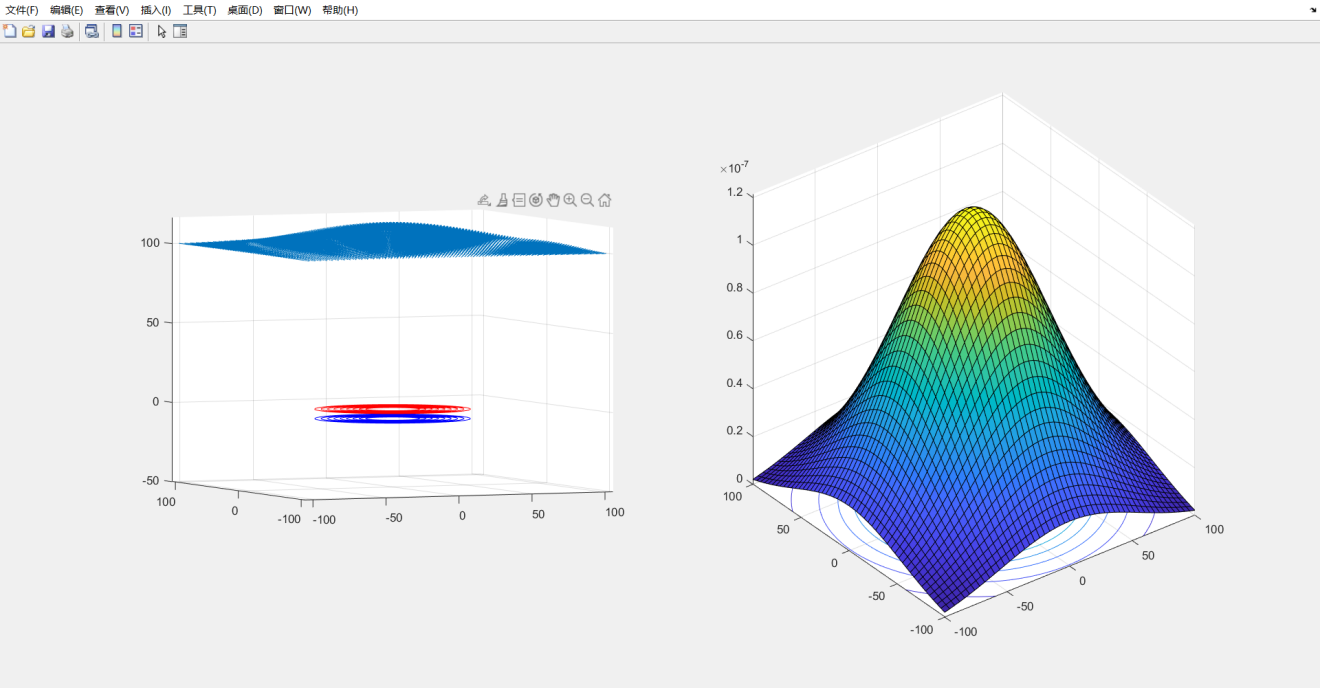
## Z=5mm时的磁场分布



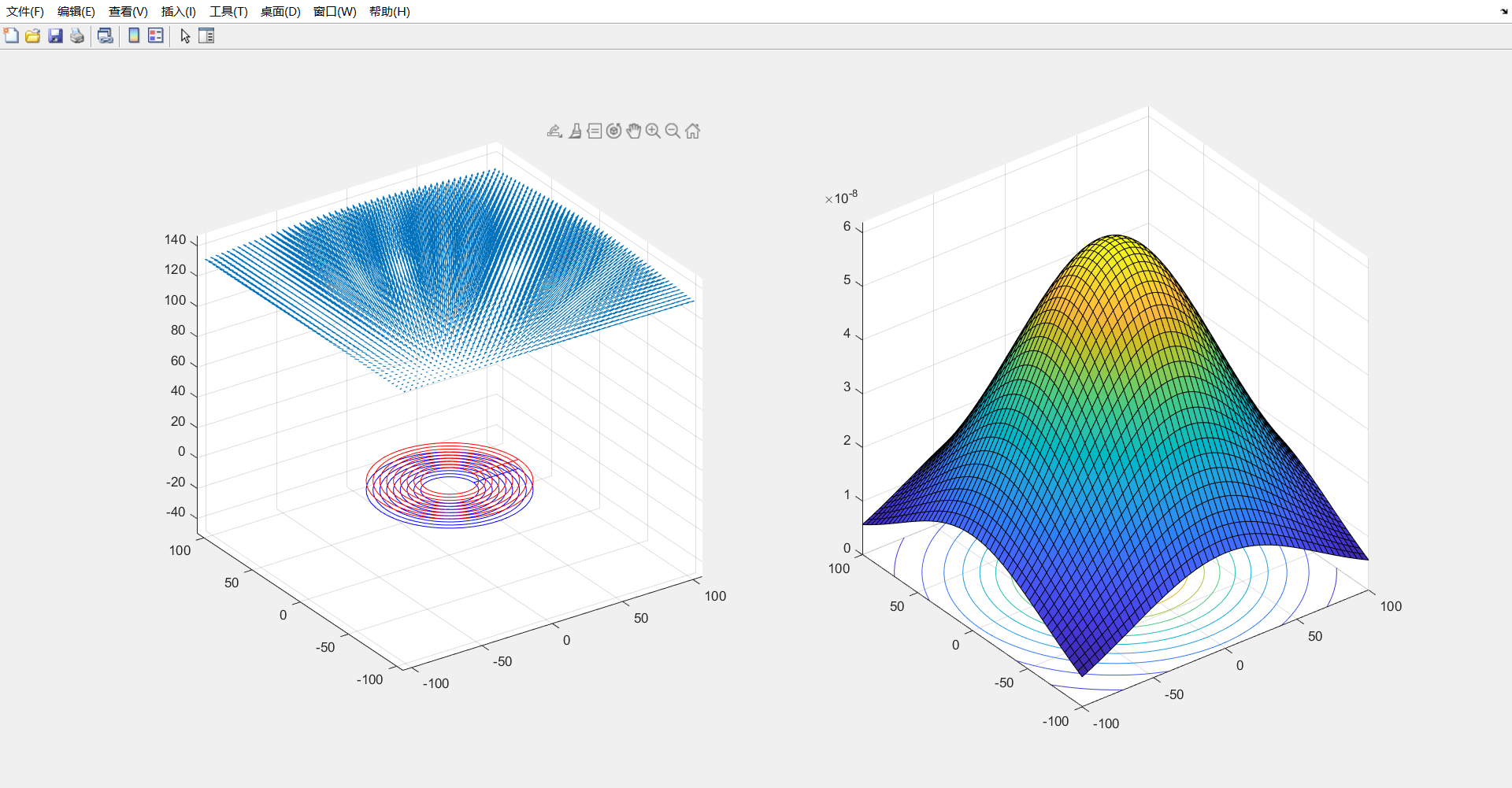
## Z=7mm时的磁场分布



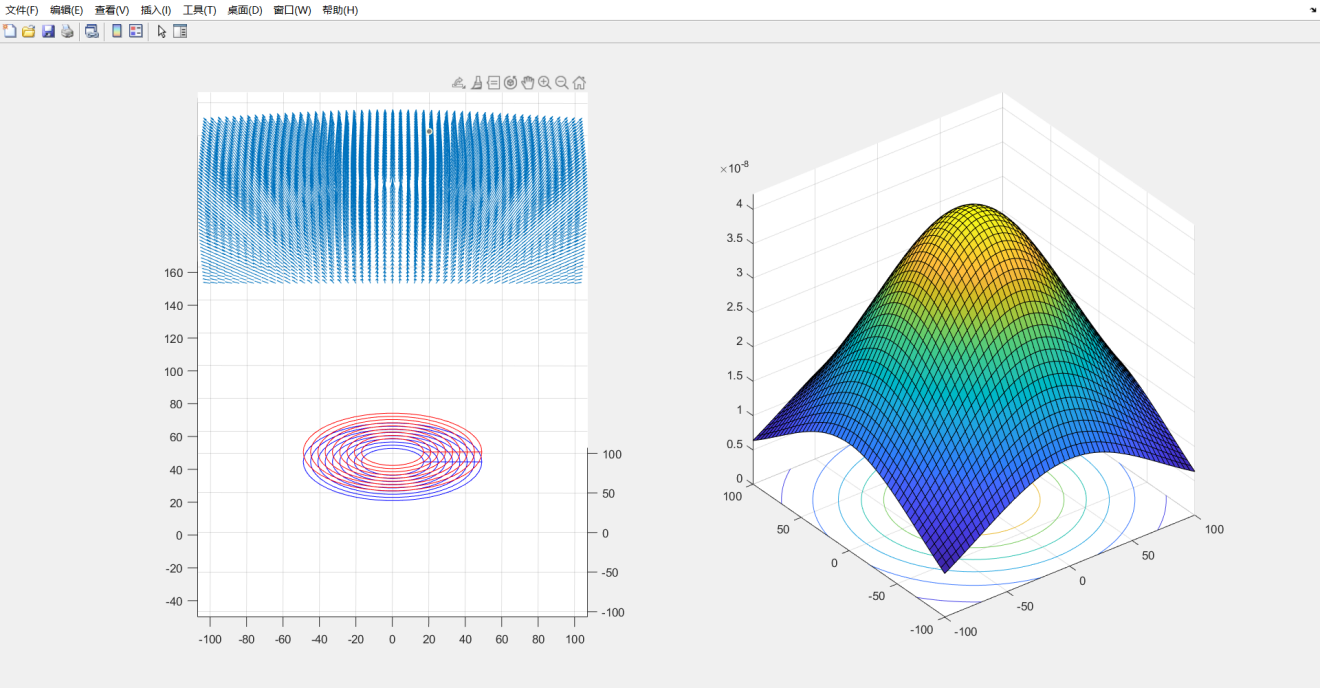
## Z=10mm时的磁场分布



## Z=13mm时的磁场分布



## Z=15mm时的磁场分布



# Comsol软件仿真结果

## 仿真模型建立

由于双层模型建立发现运算量在本机的15G内存下不足支持运算如下图，于是只建立了单层9圈的仿真模型，简化版本，尽管如此COMSOL软件内的内存依然跑满，仿真用时30min。



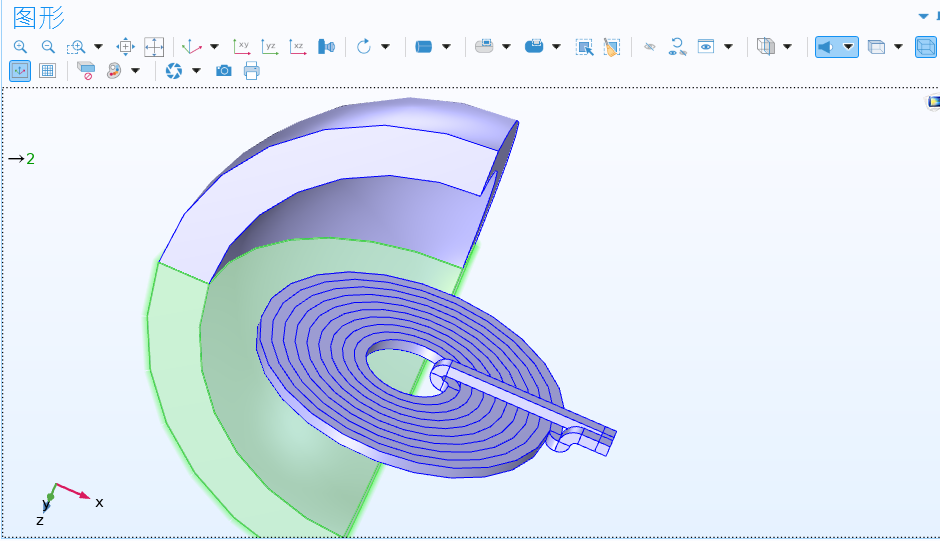
图表 3 内存爆满



图表 4 仿真求解器的分配

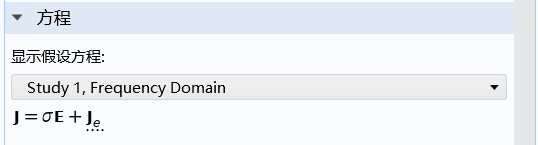
仿真实际使用9圈单层的线圈模型，依然验证了最终结果



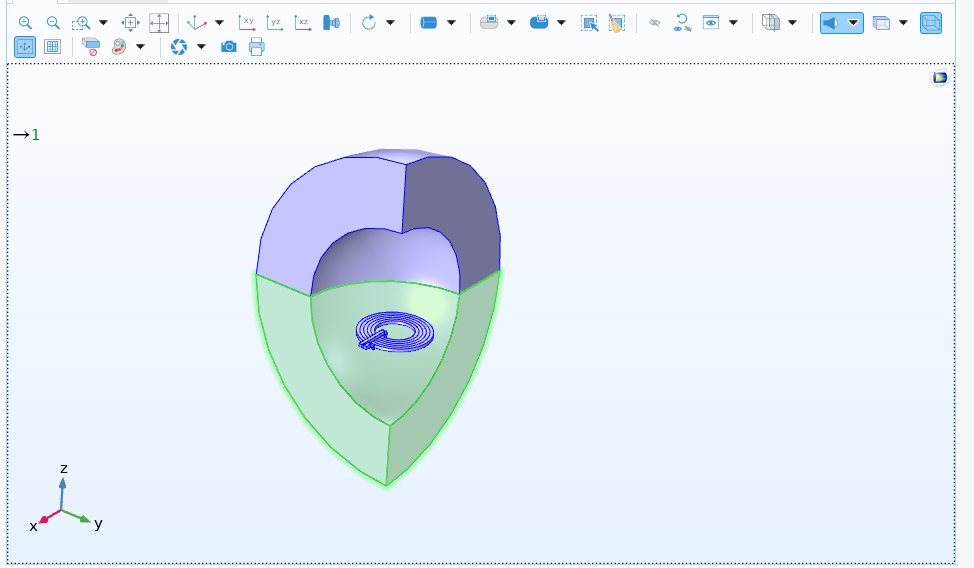


## 仿真参数设置

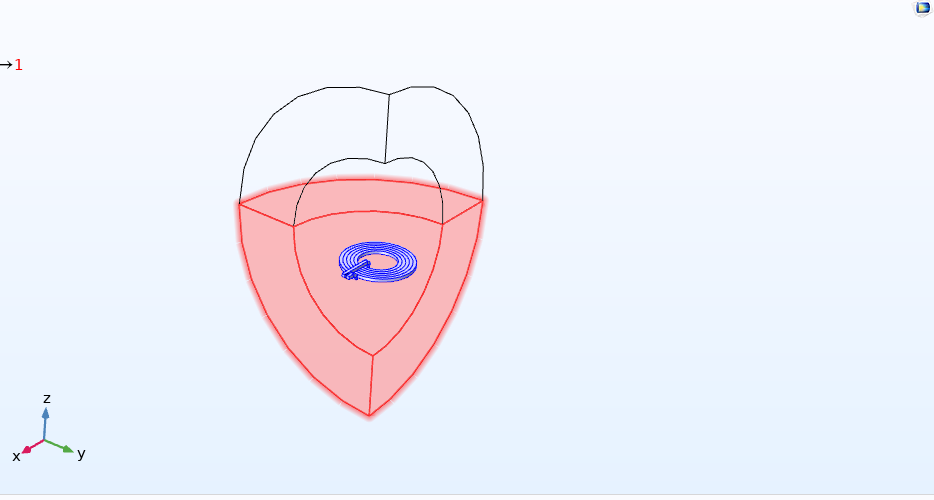
### 磁场线圈方程选择



### 大气范围设置



### 铜线范围设置



### 计算设置

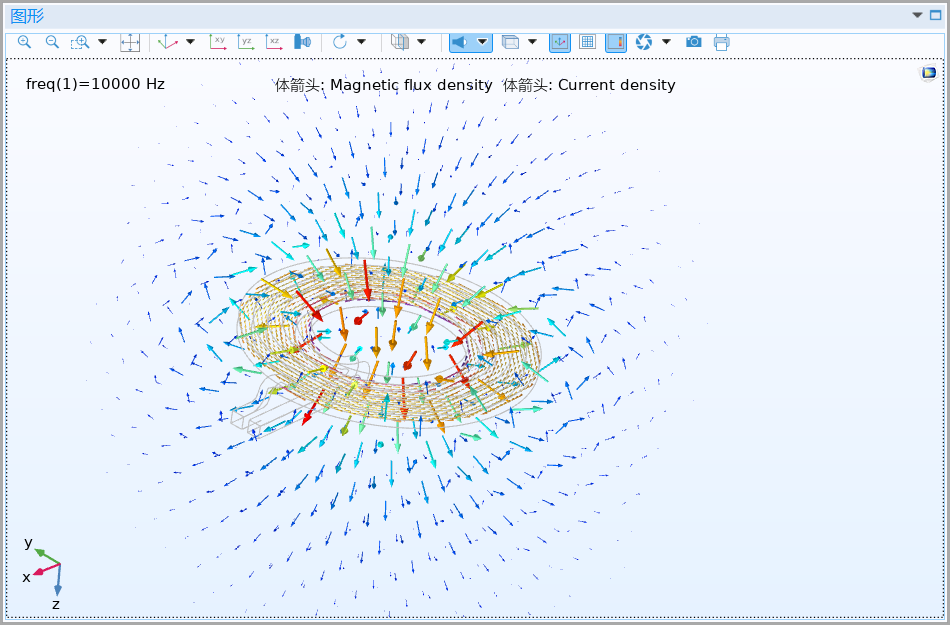


### 磁通量箭头绘制参数设置



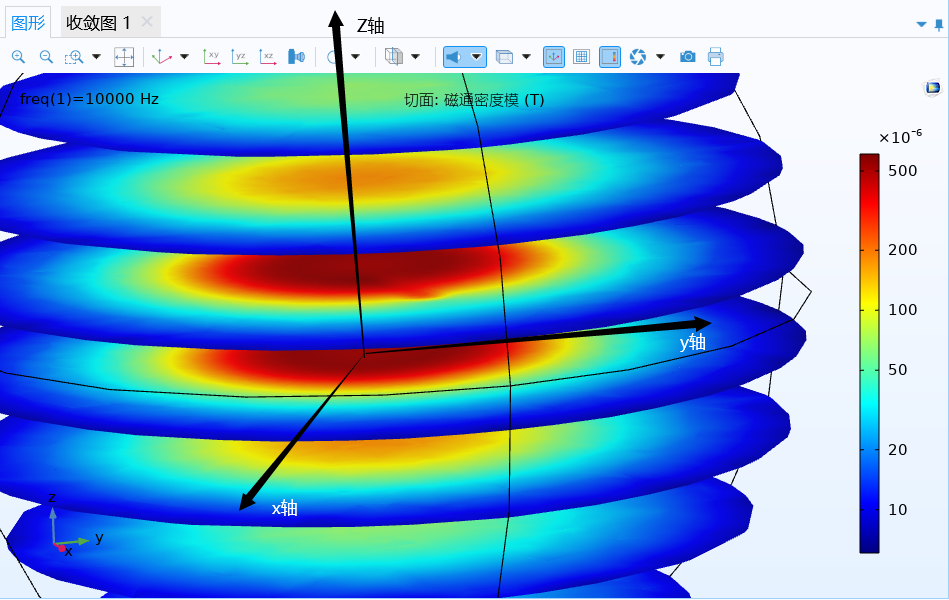
## 仿真结果

### 空间磁场分布图



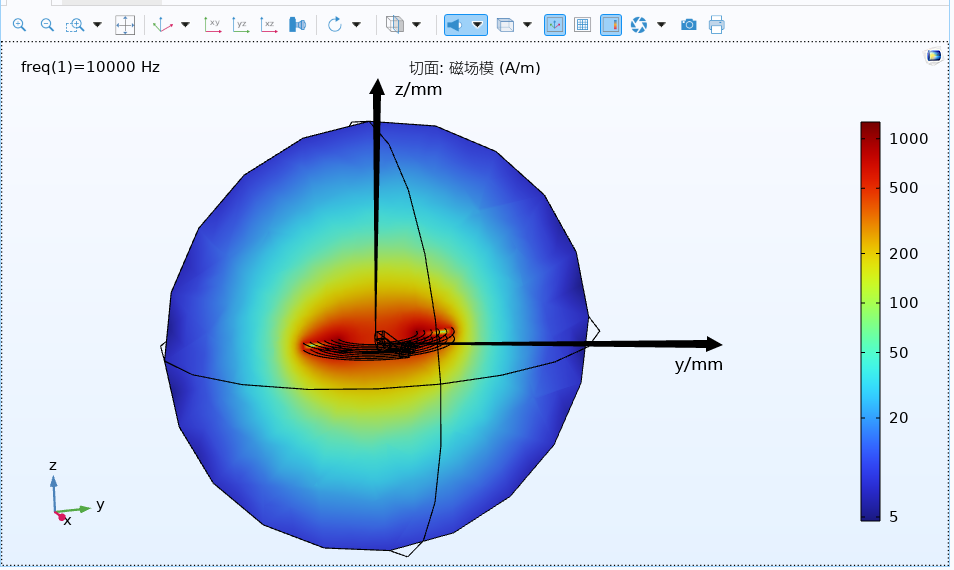
图表 5 圆形双匝线圈磁场空间分布图

### 磁通密度模（T）



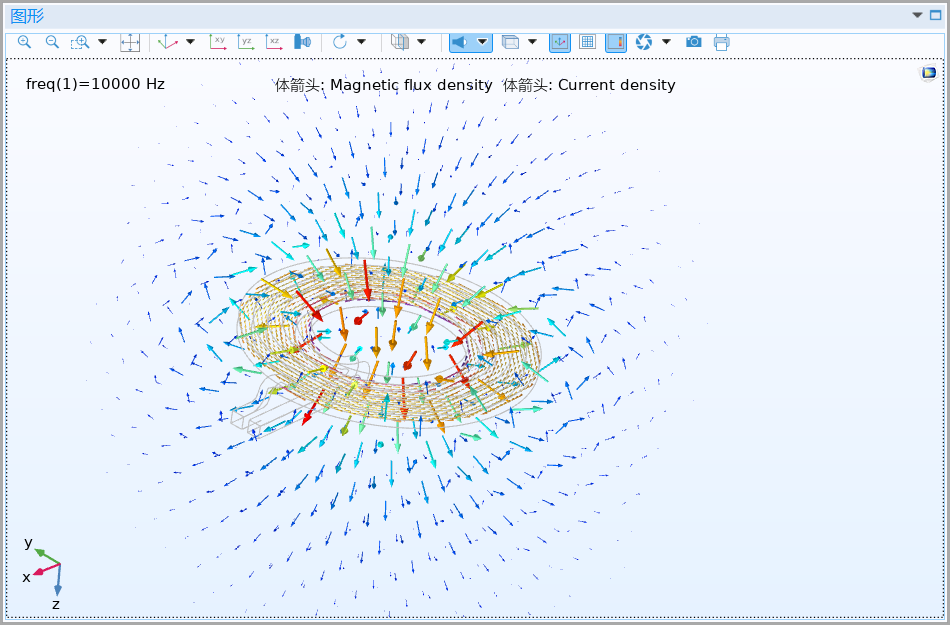
图表 6 磁通密度模（T）

### 磁场模（A/m）



图表 7 磁场模（A/m）

# 结果分析

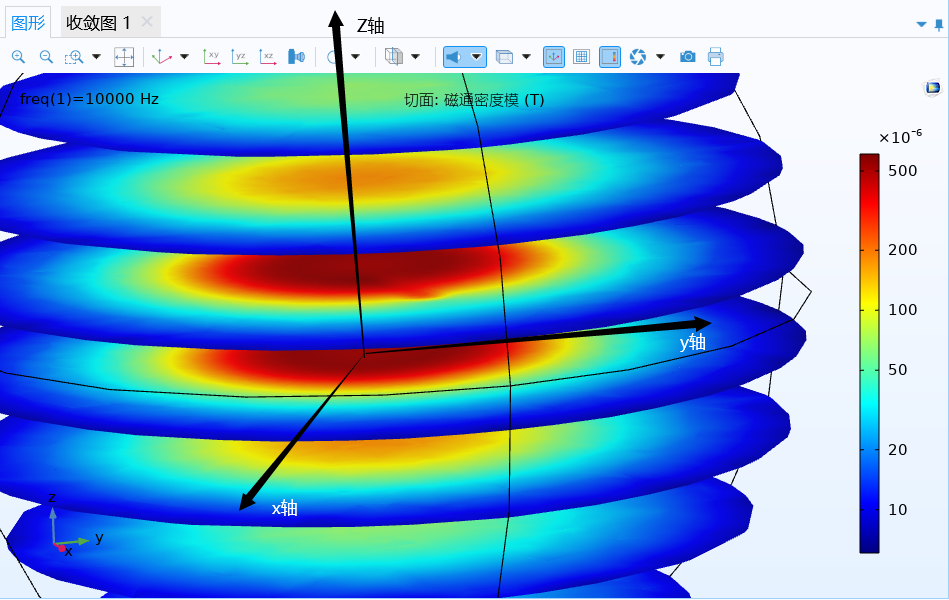


图表 8 圆形双匝线圈磁场空间分布图

综上，如图8当电流逆时针流动时，磁场的方向如图由上到下，我们可以验证了右手定则。

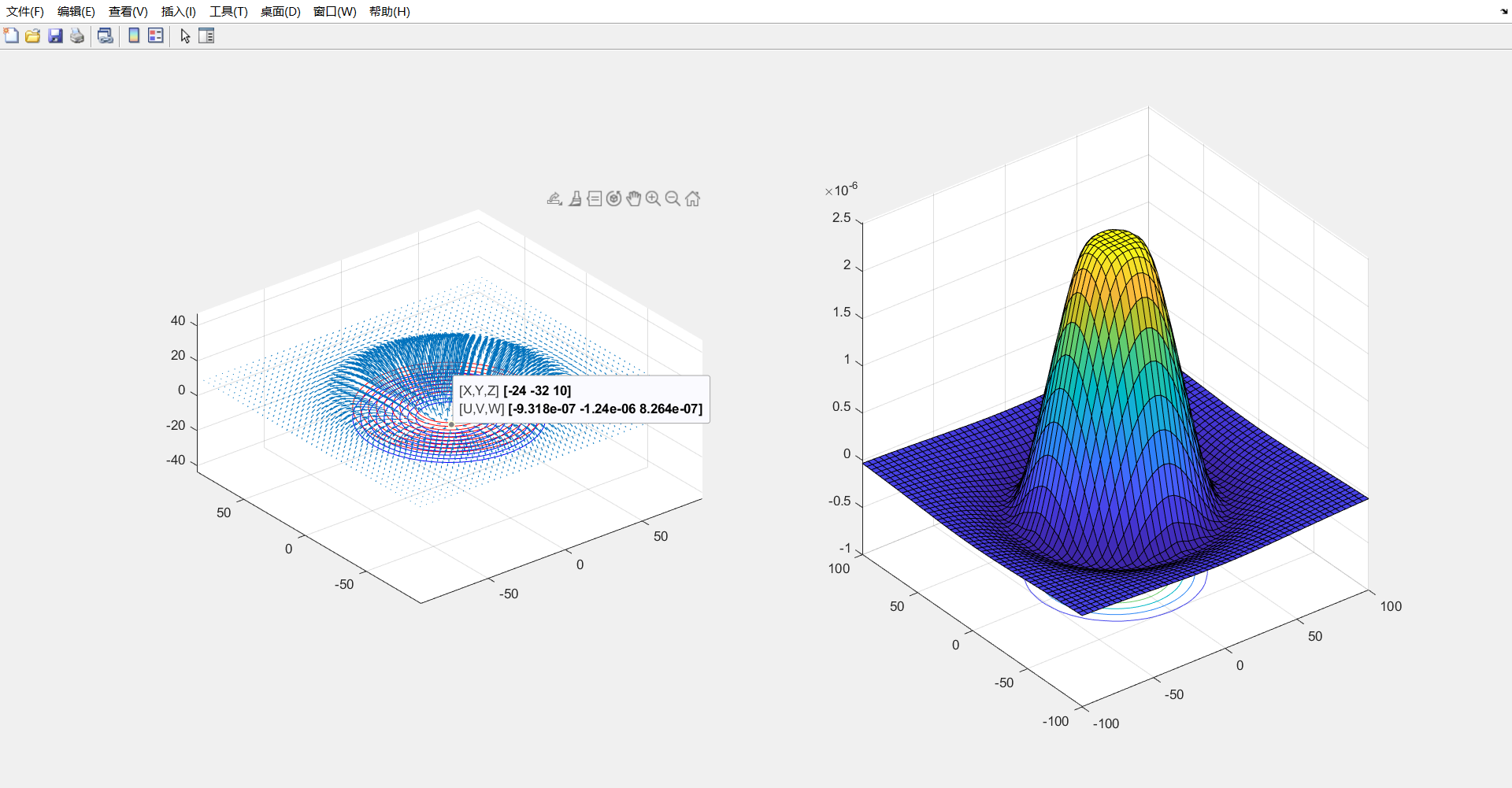
## 与圆环平行的平面分析

我们可以发现随着Z=Cmm平面，当C从0到15越大，Z轴与平面交点的B的模越小，而且从下图9可以显然发现平面平均磁通密度模在减小（红色区域缩小）



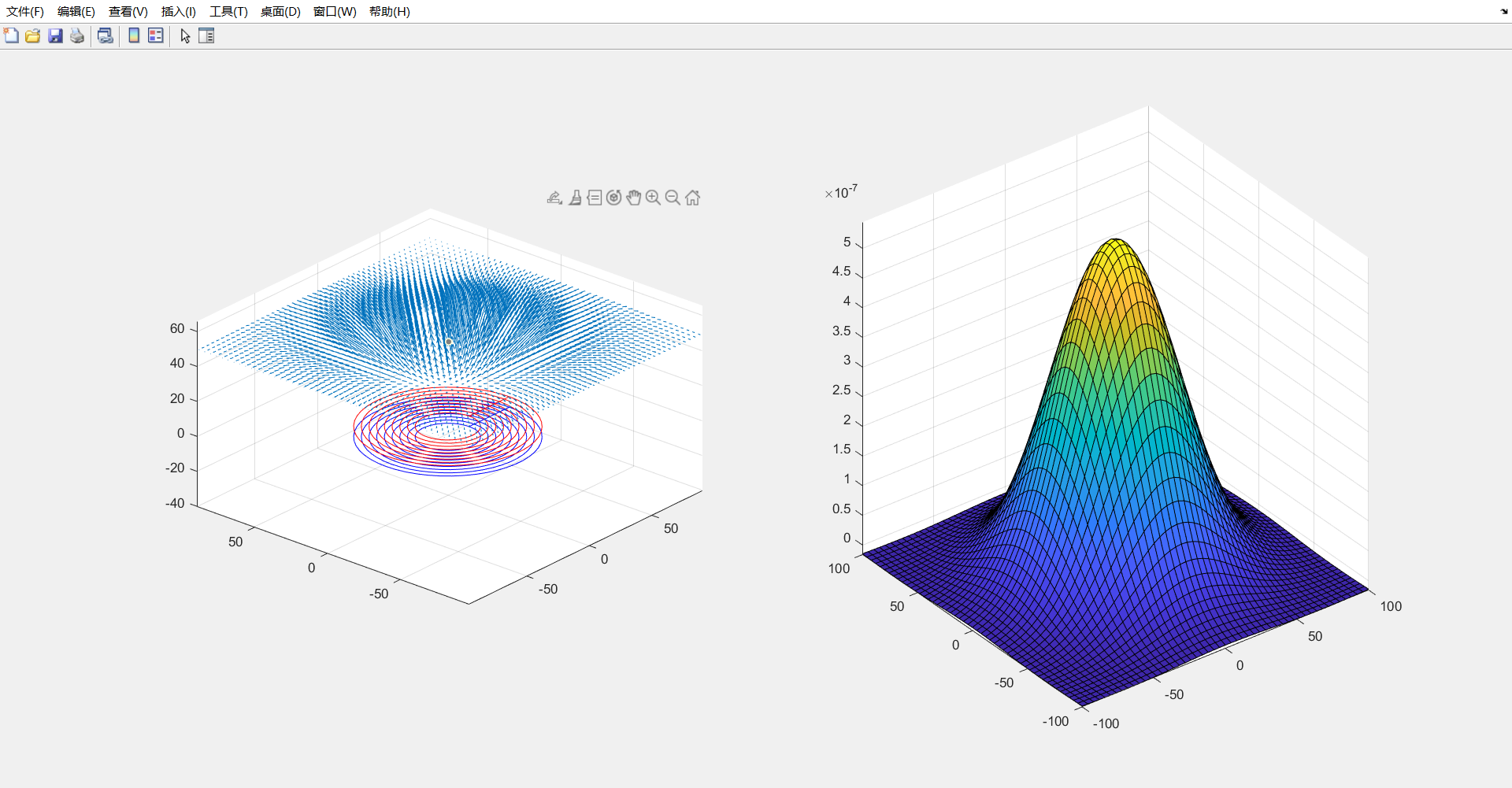
图表 9 磁通密度模（T）

由图 9和下图10看出，圆环电流轴线上磁感应强度关于圆环所在平面对称，大小、方均相同; 而且轴线上圆环中心处磁感应强度最强，随距离圆环中线越远，磁感应强度越弱。

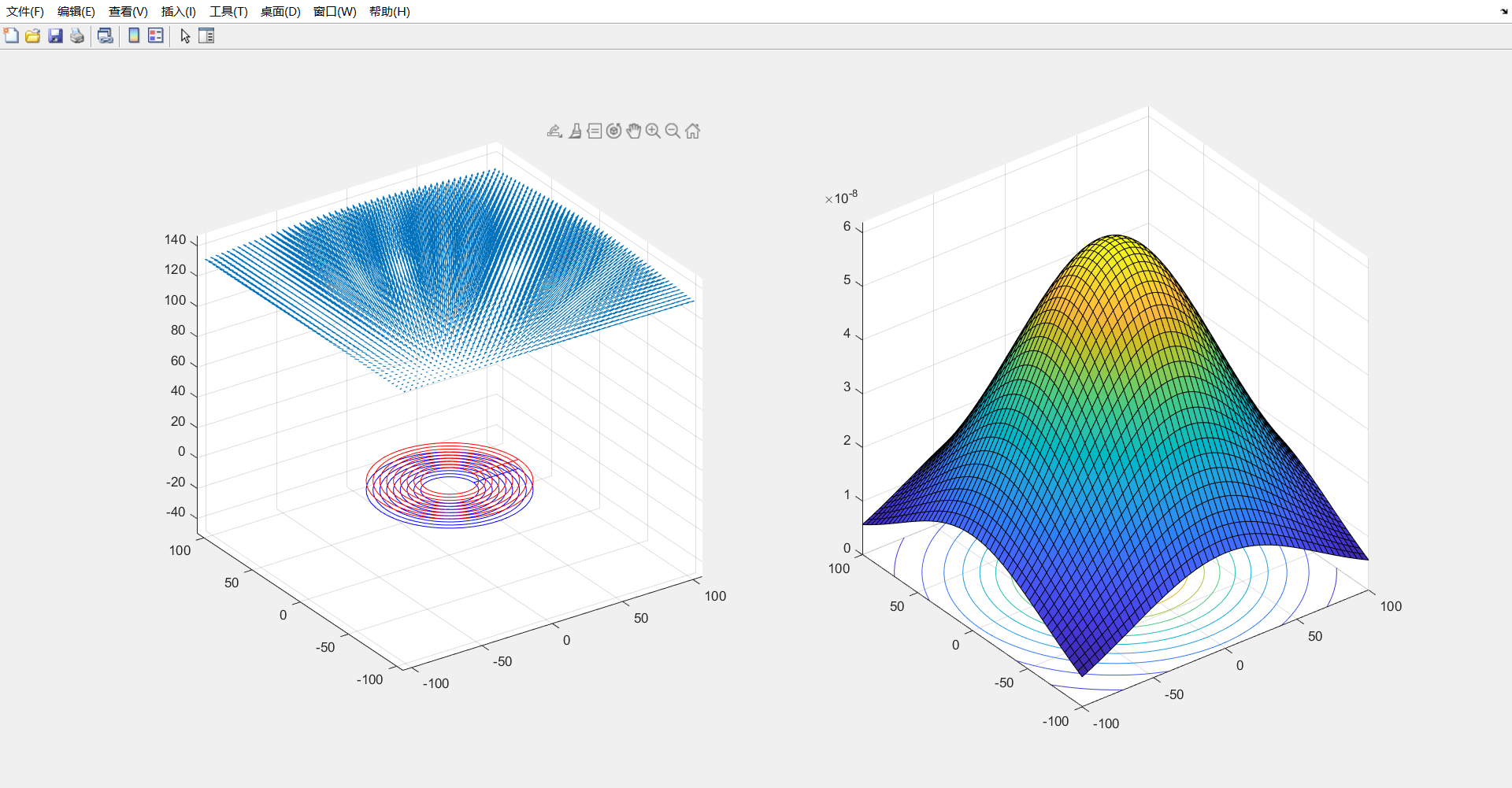


图表 10 Z=1mm时的磁场分布图

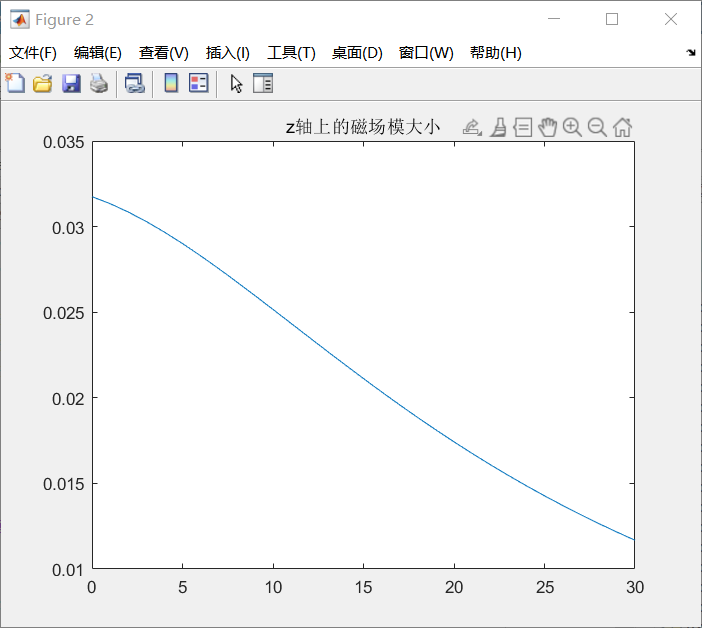
如下图11和12，与圆环面平行的面离圆环面距离很近时，圆环周围磁感应强度大，大于中心轴线上磁感应强度; 而离圆环面距离稍远，大于圆环半径时，与圆环面平行的面上中心线上磁感应强度最大，大于该面上其他任意位置处的磁感应强度，且随着距离增大，磁感应强度减小



图表 11 Z=5mm时的磁场分布图



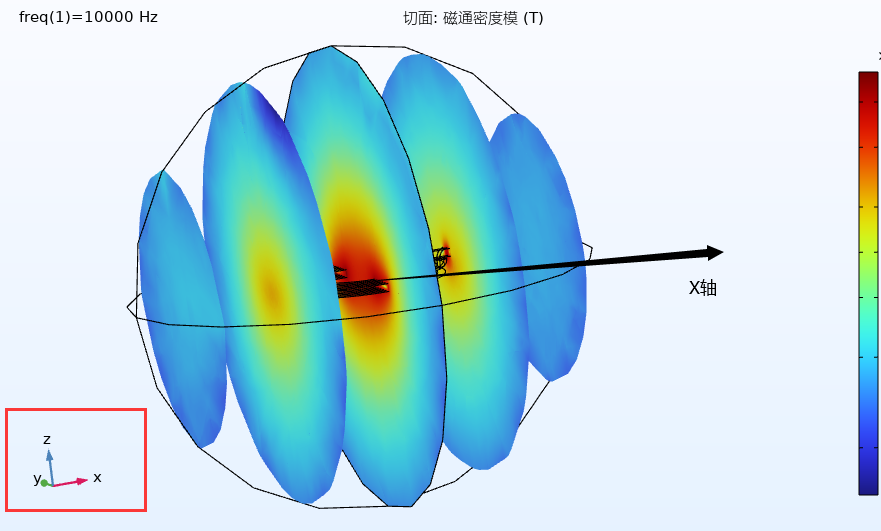
图表 12 Z=13mm时的磁场分布图



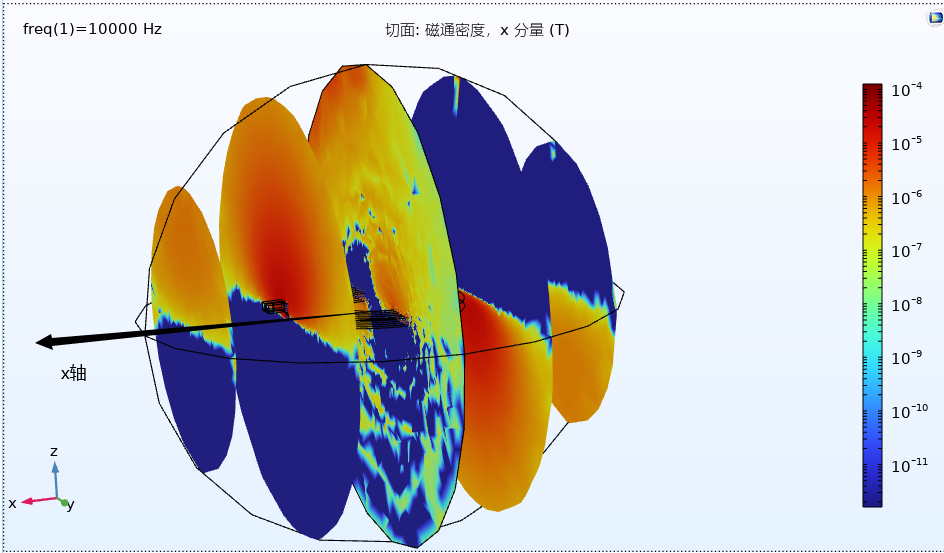
图表 13 Z轴上B的模大小变化

最后由matlab精确仿真绘制了沿着Z轴变化时的B模的大小变化（线圈放置在Z=0的平面上，原点和圆心重合）

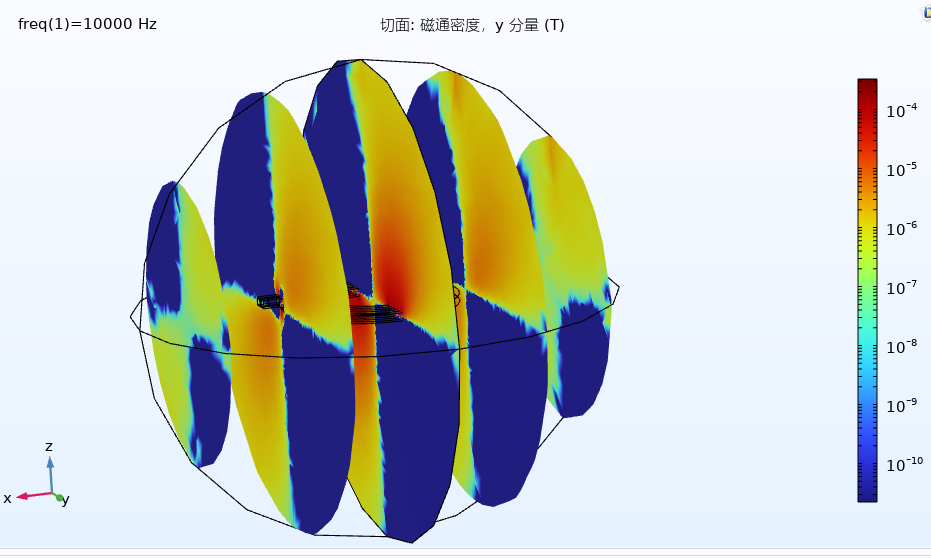
## 与圆环垂直的平面分析



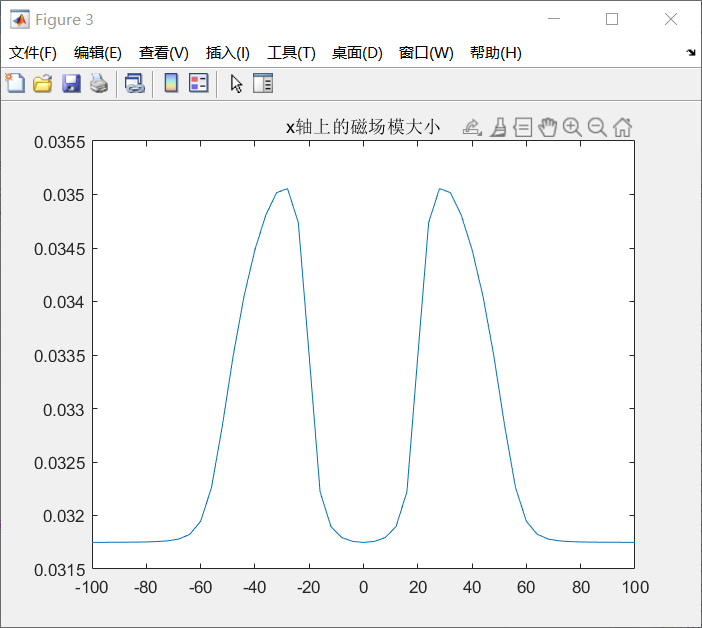
图表 14 沿x轴平面的磁通密度模的变化



图表 15 沿x轴平面的磁通密度x分量的变化



图表 16 沿x轴平面的磁通密度y分量的变化



图表 17 沿x轴平面的B的模的变化

分析: 由图 13、图 14、图15 看出，圆环电流在与圆环面垂直的面上的磁感应强度: 无论与圆环面平行的面距离圆环面远近，中心轴线上磁感应强度 By分量都为 0，只有 Bx 分量，且随着距离增大，磁感应强度减小; 越靠近圆环，磁感应强度越大。

Matlab上绘制出的沿着x轴的By分量也都是零，仿真结果一致。

# 附录Matlab程序代码

### 一个载流环在真空中的磁场分布函数

输入载流圆环的半径、载流线圈Z平面中心坐标、观察者平面，函数返回得到该平面的磁场值

function [Bx,By,Bz]=loop(Rh,zc,zm)

mu0 = 4\* pi\* 1e-7; % 真空磁导率

I0 = 10.0; %Rh = 30; % 圆环半径、电流

C0 = mu0 /( 4\* pi) \* I0; % 组合常数

NGx = 51; NGy = 51; % 设定观测点网格数

x = linspace( -100,100,51) ; % 设定观测点范围

y = x; z = y;

Nh = 20; % 电流环分段数

theta0 = linspace( 0,2\* pi,Nh + 1) ; % 环的圆周角分段

theta1 = theta0( 1: Nh) ;

x1 = Rh \* cos ( theta1 ) ; y1 = Rh \* sin( theta1) ; % 环各段的向量的起点坐标 y1，z1

theta2 = theta0( 2: Nh + 1) ;

x2 = Rh \* cos ( theta2 ) ; y2 = Rh \* sin( theta2) ; % 环各段的向量的终点坐标 y2，z2

dlx = x2-x1; dly = y2 - y1; dlz = 0; % 计算环各段向量 dl 的三个长度分量

%xc = 0;

yc = ( y2 + y1) /2; xc = ( x2 + x1) /2; %计算环各段向量中点的三个坐标分量

for i = 1: NGy% 循环计算各网格点上的 B( x，y) 值

for j = 1: NGx

rx = x( j) - xc; ry = y( i) - yc; rz = zm - zc; % 观测点在 z = 0 平面上

%rx =xm - xc; ry = y( i) - yc; rz = z(j) - zc; % 观测点在 x = xm 平面上

r3 = sqrt( rx.^2 + ry.^2 + rz.^2).^3; % 计算 r^3

dlXr\_x = dly.\* rz - dlz.\* ry; % 计算叉乘积

dlXr\_y = dlz.\* rx - dlx.\* rz;

dlXr\_z = dlx.\* ry - dly.\* rx;

Bx(i,j) = sum( C0\* dlXr\_x./r3) ; % 把环各段产生的磁场分量累加

By(i,j) = sum( C0\* dlXr\_y./r3) ;

Bz(i,j) = sum( C0\* dlXr\_z./r3) ;

end

end

end

### 叠加原理

clear all;

M=51;

x1=linspace( -100,100,M);

y1=linspace( -100,100,M);

z1=linspace( -100,100,M);

figure;

%18圆环计算磁场分布

setz=2;

[Bx1,By1,Bz1]=loop(22,-1,setz);[Bx2,By2,Bz2]=loop(26,-1,setz);[Bx3,By3,Bz3]=loop(30,-1,setz);

[Bx4,By4,Bz4]=loop(34,-1,setz);[Bx5,By5,Bz5]=loop(38,-1,setz);[Bx6,By6,Bz6]=loop(42,-1,setz);

[Bx7,By7,Bz7]=loop(46,-1,setz);[Bx8,By8,Bz8]=loop(50,-1,setz);[Bx9,By9,Bz9]=loop(54,-1,setz);

[Bx11,By11,Bz11]=loop(22,-6,setz);[Bx22,By22,Bz22]=loop(26,-6,setz);[Bx33,By33,Bz33]=loop(30,-6,setz);

[Bx44,By44,Bz44]=loop(34,-6,setz);[Bx55,By55,Bz55]=loop(38,-6,setz);[Bx66,By66,Bz66]=loop(42,-6,setz);

[Bx77,By77,Bz77]=loop(46,-6,setz);[Bx88,By88,Bz88]=loop(50,-6,setz);[Bx99,By99,Bz99]=loop(54,-6,setz);

%叠加原理

allBx1=Bx1+Bx2+Bx3+Bx4+Bx5+Bx6+Bx7+Bx8+Bx9+Bx11+Bx22+Bx33+Bx44+Bx55+Bx66+Bx77+Bx88+Bx99;

allBy1=By1+By2+By3+By4+By5+By6+By7+By8+By9+By11+By22+By33+By44+By55+By66+By77+By88+By99;

allBz1=Bz1+Bz2+Bz3+Bz4+Bz5+Bz6+Bz7+Bz8+Bz9+Bz11+Bz22+Bz33+Bz44+Bz55+Bz66+Bz77+Bz88+Bz99;

%绘制磁场分布矢量图

for m=1:M

z1(m,:)=setz;

end

subplot(1,2,1)

quiver3( x1,y1,z1,allBx1,allBy1,allBz1,5) ;

axis equal

hold on

z=rand(1,459);

t=0:2\*pi/50:2\*pi;

z(1,:)=-1;

%绘制线圈

y=[(15+2)\*sin(t),(15+2+4)\*sin(t),(15+2+8)\*sin(t),(15+2+12)\*sin(t),(15+2+16)\*sin(t),(15++2+20)\*sin(t),(15+2+24)\*sin(t),(15+2+28)\*sin(t),(15+2+32)\*sin(t)];

x=[(15+2)\*cos(t),(15+2+4)\*cos(t),(15+2+8)\*cos(t),(15+2+12)\*cos(t),(15+2+16)\*cos(t),(15++2+20)\*cos(t), (15+2+24)\*cos(t),(15+2+28)\*cos(t),(15+2+32)\*cos(t)];

plot3(x,y,z,'r');

xlim([-50,50]);

ylim([-50,50]);

zlim([-50,50]);

t=0:2\*pi/50:2\*pi;

hold on

z(1,:)=-7;

%绘制第二层线圈

y=[(15+2)\*sin(t),(15+2+4)\*sin(t),(15+2+8)\*sin(t),(15+2+12)\*sin(t),(15+2+16)\*sin(t),(15++2+20)\*sin(t),(15+2+24)\*sin(t),(15+2+28)\*sin(t),(15+2+32)\*sin(t)];

x=[(15+2)\*cos(t),(15+2+4)\*cos(t),(15+2+8)\*cos(t),(15+2+12)\*cos(t),(15+2+16)\*cos(t),(15++2+20)\*cos(t), (15+2+24)\*cos(t),(15+2+28)\*cos(t),(15+2+32)\*cos(t)];

plot3(x,y,z,'b');

subplot(1,2,2)

%曲面图

surfc( x1,y1,allBz1) ;

%绘制z轴变化曲线

z\_B=0:1:30;

for i=0:1:30

%18圆环计算磁场分布

setz=i;

[Bx1,By1,Bz1]=loop(22,-1,setz);[Bx2,By2,Bz2]=loop(26,-1,setz);[Bx3,By3,Bz3]=loop(30,-1,setz);

[Bx4,By4,Bz4]=loop(34,-1,setz);[Bx5,By5,Bz5]=loop(38,-1,setz);[Bx6,By6,Bz6]=loop(42,-1,setz);

[Bx7,By7,Bz7]=loop(46,-1,setz);[Bx8,By8,Bz8]=loop(50,-1,setz);[Bx9,By9,Bz9]=loop(54,-1,setz);

[Bx11,By11,Bz11]=loop(22,-7,setz);[Bx22,By22,Bz22]=loop(26,-7,setz);[Bx33,By33,Bz33]=loop(30,-7,setz);

[Bx44,By44,Bz44]=loop(34,-7,setz);[Bx55,By55,Bz55]=loop(38,-7,setz);[Bx66,By66,Bz66]=loop(42,-7,setz);

[Bx77,By77,Bz77]=loop(46,-7,setz);[Bx88,By88,Bz88]=loop(50,-7,setz);[Bx99,By99,Bz99]=loop(54,-7,setz);

%叠加原理

allBx1=Bx1+Bx2+Bx3+Bx4+Bx5+Bx6+Bx7+Bx8+Bx9+Bx11+Bx22+Bx33+Bx44+Bx55+Bx66+Bx77+Bx88+Bx99;

allBy1=By1+By2+By3+By4+By5+By6+By7+By8+By9+By11+By22+By33+By44+By55+By66+By77+By88+By99;

allBz1=Bz1+Bz2+Bz3+Bz4+Bz5+Bz6+Bz7+Bz8+Bz9+Bz11+Bz22+Bz33+Bz44+Bz55+Bz66+Bz77+Bz88+Bz99;

z\_B(i+1) =(allBx1((M+1)/2,(M+1)/2)^2+allBy1((M+1)/2,(M+1)/2)^2+allBz1((M+1)/2,(M+1)/2)^2)^0.5;%z轴上的模长

end

figure;

plot(0:1:30,z\_B);

title("z轴上的磁场模大小");

%18圆环计算磁场分布

setz=0;

[Bx1,By1,Bz1]=loop(22,-1,setz);[Bx2,By2,Bz2]=loop(26,-1,setz);[Bx3,By3,Bz3]=loop(30,-1,setz);

[Bx4,By4,Bz4]=loop(34,-1,setz);[Bx5,By5,Bz5]=loop(38,-1,setz);[Bx6,By6,Bz6]=loop(42,-1,setz);

[Bx7,By7,Bz7]=loop(46,-1,setz);[Bx8,By8,Bz8]=loop(50,-1,setz);[Bx9,By9,Bz9]=loop(54,-1,setz);

[Bx11,By11,Bz11]=loop(22,-7,setz);[Bx22,By22,Bz22]=loop(26,-7,setz);[Bx33,By33,Bz33]=loop(30,-7,setz);

[Bx44,By44,Bz44]=loop(34,-7,setz);[Bx55,By55,Bz55]=loop(38,-7,setz);[Bx66,By66,Bz66]=loop(42,-7,setz);

[Bx77,By77,Bz77]=loop(46,-7,setz);[Bx88,By88,Bz88]=loop(50,-7,setz);[Bx99,By99,Bz99]=loop(54,-7,setz);

%叠加原理

allBx1=Bx1+Bx2+Bx3+Bx4+Bx5+Bx6+Bx7+Bx8+Bx9+Bx11+Bx22+Bx33+Bx44+Bx55+Bx66+Bx77+Bx88+Bx99;

allBy1=By1+By2+By3+By4+By5+By6+By7+By8+By9+By11+By22+By33+By44+By55+By66+By77+By88+By99;

allBz1=Bz1+Bz2+Bz3+Bz4+Bz5+Bz6+Bz7+Bz8+Bz9+Bz11+Bz22+Bz33+Bz44+Bz55+Bz66+Bz77+Bz88+Bz99;

figure;

x\_B = (allBx1((M+1)/2,:).^2+allBy1((M+1)/2,(M+1)/2)^2+allBz1((M+1)/2,(M+1)/2)^2).^0.5;

plot(x1,x\_B);

title("x轴上的磁场模大小");

figure;

x\_ = allBx1((M+1)/2,:);

plot(x1,x\_);

title("x轴上的分量磁场大小");

# 七、参考文献

［1］ 贾瑞皋，薛庆忠． 电磁学［M］． 北京: 高等教育出版 社，2011: 161-164．

［2］ 向裕民． 圆环电流磁场的普遍分布［J］． 大学物理， 1999，01: 16-19．

［3］ 罗宏超，蔡敏． 圆电流全空间磁感应强度 B 的分布 ［J］． 沈阳航空工业学院学报，2006( 1) : 79-80 + 91．

［4］ 朱平． 圆电流空间磁场分布［J］． 大学物理，2005 ( 9) : 13-17．

［5］ 刘保义，张明霞． 圆环电流在全空间形成的磁感应 强度分布［J］． 天水师范学院学报，2009( 2) : 65-66．

［6］ 王晓颖，李武军． 载流圆环空间磁场分布的研究 ［J］． 西安工业学院学报，2004( 3) : 292-295．