

无线输电装置发射线圈的磁场分布研究*

徐胜男 任学智 位浩杰 展凯云 陈文娟

[中国石油大学(华东)理学院 山东 青岛 266580]

(收稿日期:2016-03-08)

摘要:根据毕奥-萨伐尔定律推导出发射线圈在空间磁场分布的积分表达式,利用 MATLAB 对发射线圈产生的磁场分布进行仿真,得到磁场在径向和轴向的三维分布图,对定性、定量分析无线输电装置的能量传输介质——磁场有十分重要的作用。

关键词:毕奥-萨伐尔定律 发射线圈 MATLAB 磁感应强度

实现无线输电,能量传输介质是磁场,所以有必要对无线输电装置中的发射线圈产生的磁场分布进行研究.因为目前该装置采用的发射线圈匝数不是足够大,所以不能看做长直螺线管,而是可以简化为研究载流圆环的磁场分布.查阅文献^[1~8],之前未见有人对与发射线圈面平行及垂直的面上磁场分布做过研究,所以,本文将着重研究磁场在发射线圈径向和轴向的三维分布情况。

根据毕奥-萨伐尔定律推导出发射线圈在空间磁场分布的积分表达式,结合分段求和的思想,利用 MATLAB 软件编程,绘制了与发射线圈面平行及垂直的面上磁场分布图,得到了磁场在发射线圈径向和轴向的三维分布,对定性、定量分析无线输电装置的能量传输介质——磁场有十分重要的作用。

1 推导发射线圈产生的磁场分布表达式

设发射线圈的半径为 R ,其中通有电流为 I .如图 1 所示,设发射线圈位于 $y-z$ 平面上,圆心与坐标原点重合,发射线圈中心轴线与 x 轴重合。

在空间任取一点 $P(x_0, y_0, z_0)$,计算 P 处的磁感应强度.在发射线圈上任取电流元 $I d\mathbf{l}$,由毕奥-萨伐尔定律知该电流元在 P 点产生的磁感应强度为

$$d\mathbf{B} = \frac{N\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (1)$$

其中 \mathbf{r} 为电流元到 P 点的位矢, N 为线圈匝数.由磁场的叠加原理,则 P 点的磁感应强度为

$$\mathbf{B} = \oint d\mathbf{B} \quad (2)$$

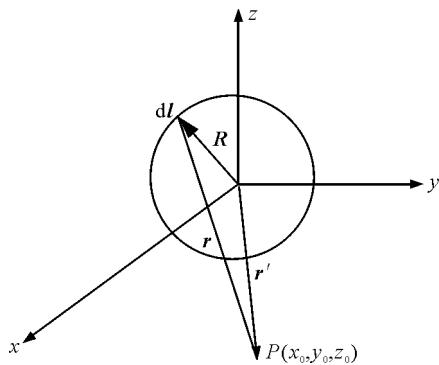


图 1 发射线圈磁场分析图

因为直接求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 x 轴、 y 轴、 z 轴的磁感应强度分量,然后求矢量和得 P 点的磁感应强度,最后绘制磁场分布图,分析发射线圈在全空间的磁场分布特点。

设 (x, y, z) 为电流元的坐标,则电流元 $I d\mathbf{l}$ 和电流元到 P 点的位矢 \mathbf{r} 在空间直角坐标系下的表示

$$d\mathbf{l} = dx\mathbf{i} + dy\mathbf{j} + dz\mathbf{k} \quad (3)$$

$$\mathbf{r} = (x_0 - x)\mathbf{i} + (y_0 - y)\mathbf{j} + (z_0 - z)\mathbf{k} \quad (4)$$

将式(2)、(3)代入式(1),其中

* 中国石油大学(华东)教学研究与实践项目,项目编号:QN201531;中国石油大学(华东)精品实验项目,项目编号:JS201415;中国石油大学(华东)大学生创新创业训练项目,项目编号:20151302

指导教师:陈文娟(1969-),女,硕士,高级实验师,主要从事仪器管理与制作研究工作。

$$d\mathbf{l} \times \mathbf{r} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ dx & dy & dz \\ x_0 - x & y_0 - y & z_0 - z \end{vmatrix} =$$

$$[(z_0 - z) dy - (y_0 - y) dz] \mathbf{i} +$$

$$[(x_0 - x) dz - (z_0 - z) dx] \mathbf{j} +$$

$$[(y_0 - y) dx - (x_0 - x) dy] \mathbf{k} \quad (5)$$

所以 P 点的磁感应强度分量为

$$B_x = \oint dB \cos \alpha =$$

$$\frac{N\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{(z_0 - z)}{r^3} dy - \frac{(y_0 - y)}{r^3} dz \quad (6)$$

$$B_y = \oint dB \cos \beta =$$

$$\frac{N\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{(x_0 - x)}{r^3} dz - \frac{(z_0 - z)}{r^3} dx \quad (7)$$

$$B_z = \oint dB \cos \gamma =$$

$$\frac{N\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{(y_0 - y)}{r^3} dx - \frac{(x_0 - x)}{r^3} dy \quad (8)$$

2 编写发射线圈产生磁场的 MATLAB 仿真程序

在推导出了发射线圈产生的磁场分布表达式^[9]后,根据上述分析建立的数学表达式,利用 MATLAB 软件编写可仿真、可执行的仿真程序.仿真程序^[10]如下.

2.1 初始化 求 P 点磁感应强度

输入设置线圈半径、匝数、电流、真空磁导率等相关变量参数.利用分段求和的思想,求空间任意一点 P 的磁感应强度:

```
Nh = 20; % 发射线圈分段数
```

```
theta0 = linspace(0, 2 * pi, Nh + 1); % 发射线圈的圆周角分段
```

```
theta1 = theta0(1:Nh);
```

```
y1 = Rh * cos(theta1); z1 = Rh * sin(theta1);
```

% 发射线圈各段的向量的起点坐标 y_1, z_1

```
theta2 = theta0(2:Nh + 1);
```

```
y2 = Rh * cos(theta2); z2 = Rh * sin(theta2);
```

% 发射线圈各段的向量的终点坐标 y_2, z_2

```
dlx = 0; dly = y2 - y1; dlz = z2 - z1; % 计算发射线圈各段向量 dl 的三个长度分量
```

```
xc = 0; yc = (y2 + y1) / 2; zc = (z2 + z1) / 2; % 计算发射线圈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 = 0 - zc; %
```

观测点在 $z = 0$ 平面上

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

```
dlXr_x = dly .* rz - dlz .* ry; % 计算叉乘积
```

```
dlXr_y = dlz .* rx - dlx .* rz;
```

$B_x(i, j) = \text{sum}(C0 * dlXr_x ./ r3)$; % 把发射线圈各段产生的磁场分量累加

```
By(i, j) = sum(C0 * dlXr_y ./ r3);
```

```
end
```

```
end
```

2.2 绘制与发射线圈平行的平面磁场分布图

在与发射线圈平行的平面 $x = 0, 0.2, 0.5, 0.8, 1.2, 4$ 上的磁场(包括 B_x, B_y)分布:

```
surf(y, z, Bx); xlabel('y 轴', 'FontSize', 12); ylabel('z 轴', 'FontSize', 12); zlabel('磁场 x 方向分量 Bx');
```

```
title('发射线圈所在平面 x=0 上磁场 x 方向分量 Bx 分布图', 'FontSize', 16); % y-z 面上 Bx 分布
```

```
surf(y, z, By); xlabel('y 轴', 'FontSize', 12); ylabel('z 轴', 'FontSize', 12); zlabel('磁场 y 方向分量 By');
```

```
title('发射线圈所在平面 x=0 上磁场 y 方向分量 By 分布图', 'FontSize', 16); % y-z 面上 By 分布
```

2.3 绘制与发射线圈垂直的平面磁场分布图

```
subplot(1, 2, 1); surf(x, y, Bx); xlabel('x 轴', 'FontSize', 12); ylabel('y 轴', 'FontSize', 12); zlabel('磁场 x 方向分量 Bx');
```

```
title('与发射线圈垂直 z=0 面上磁场 x 方向分量 Bx 分布三维图', 'FontSize', 12);
```

```
subplot(1, 2, 2); plot(x, Bx); xlabel('x 轴', 'FontSize', 12); ylabel('磁场 x 方向分量 Bx');
```

```
title('与发射线圈垂直 z=0 面上磁场 x 方向分
```

量 B_x 沿 x 方向分布图', 'FontSize', 12); % $x-y$ 面上 B_x 分布

```
subplot(1,2,1);surfc(x,y,By);
```

```
xlabel('x轴','FontSize',12');ylabel('y轴','
```

```
FontSize',12');zlabel('磁场y方向分量By');
```

```
title('与发射线圈垂直z=0面上磁场y方向分
```

```
量By分布三维图','FontSize',12);
```

```
subplot(1,2,2);plot(x,By);
```

```
xlabel('x轴','FontSize',12');ylabel('磁场y
```

```
方向分量By');
```

```
title('与发射线圈垂直z=0面上磁场y方向分
```

```
量By沿x方向分布图','FontSize',12);
```

```
%  $x-y$  面上  $B_y$  分布
```

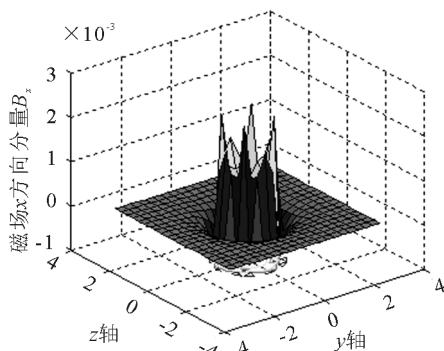
在程序 % 后面是程序的说明部分, 仿真程序编写完成后保存为 zlyhcc.m.

3 发射线圈产生磁场的仿真结果和分析

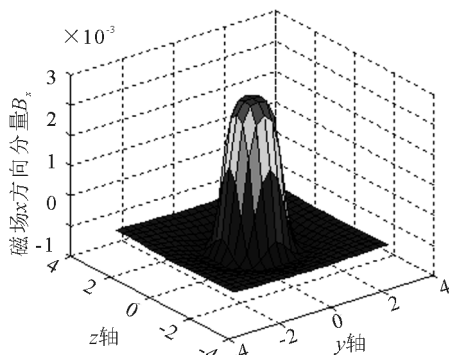
运行 zlyhcc.m 仿真程序不同部分后, 得到仿真结果如下所示.

3.1 与发射线圈平行的平面磁场分布

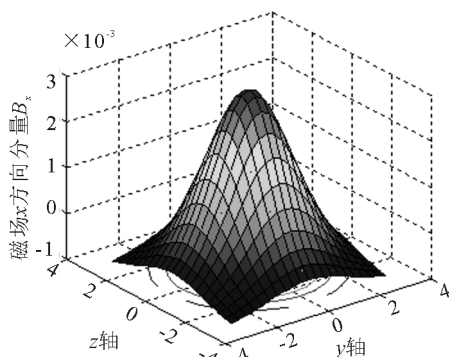
分析: 由图 2 和图 3 看出, 发射线圈在与发射线圈面平行的面上的磁感应强度, 无论与发射线圈面平行的面距离发射线圈面远近, 中心轴线上磁感应强度 B_y 分量都为零, 只有 B_x 分量, 且与发射线圈面平行的面离发射线圈面距离很近时, 发射线圈周围磁感应强度大, 大于中心轴线上磁感应强度; 而离发射线圈平面距离稍远, 大于发射线圈半径时, 与发射线圈面平行的面其中心轴线上磁感应强度最大, 大于该面上其他任意位置处的磁感应强度, 且随着距离增大, 磁感应强度减小.



(a) 圆环所在平面 $x=0$ 上磁场 x 方向分量 B_x 分布图

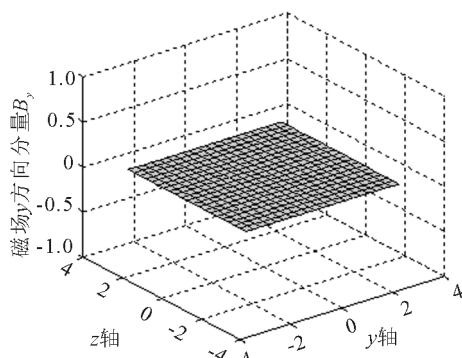


(b) 与圆环平行的平面 $x=0.5$ 上磁场 x 方向分量 B_x 分布图

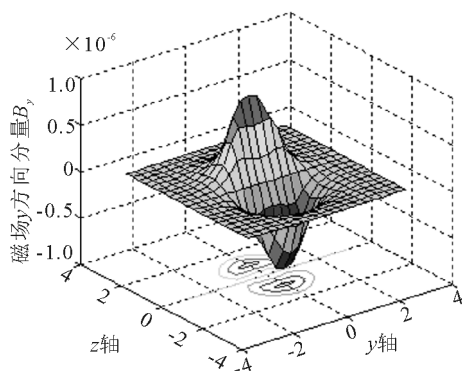


(c) 与圆环平行的平面 $x=3$ 上磁场 x 方向分量 B_x 分布图

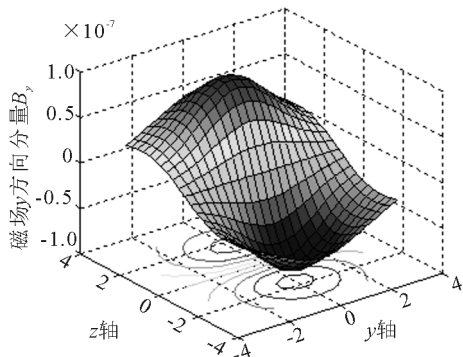
图 2 发射线圈在 $y-z$ 面上磁场 x 方向分量 B_x 分布图



(a) 圆环所在平面 $x=0$ 上磁场 y 方向分量 B_y 分布图

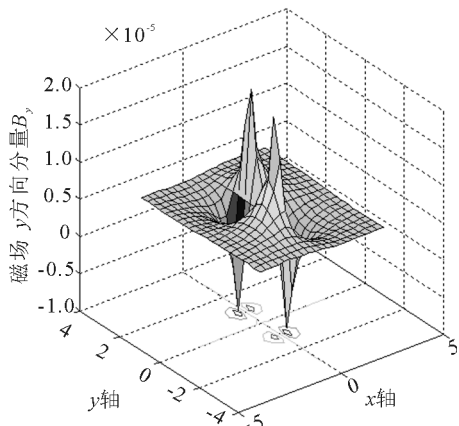


(b) 与圆环平行的平面 $x=0.5$ 上磁场 y 方向分量 B_y 分布图



(c) 与圆环平行的平面 $x = 3$ 上磁场 y 方向分量 B_y 分布图

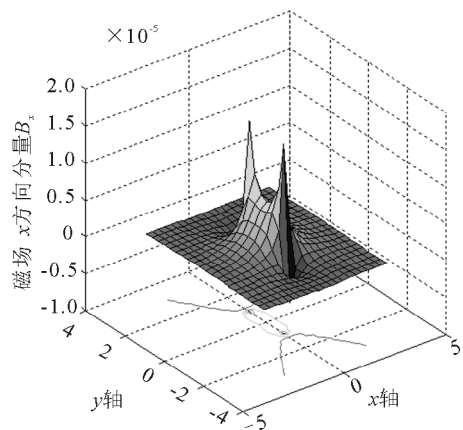
图3 发射线圈在 $y-z$ 面上磁场 y 方向分量 B_y 分布图



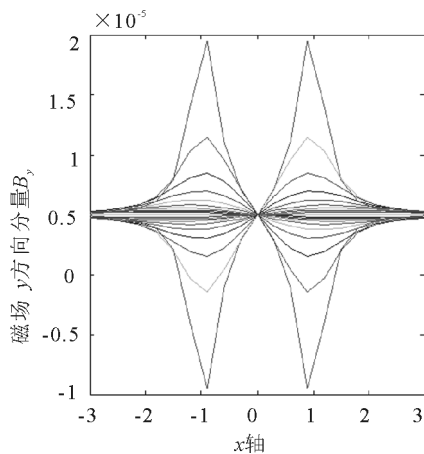
(a) 与圆环垂直平面 $z = 0$ 上磁场 y 方向分量 B_y 分布三维图

3.2 与发射线圈垂直的平面磁场分布

分析:由图4和图5看出,发射线圈在与发射线圈面垂直的面上的磁感应强度,无论与发射线圈面垂直的面距离发射线圈面远近,中心轴线上磁感应强度 B_y 分量都为零,只有 B_x 分量,且随着距离增大,磁感应强度减小;越靠近发射线圈,磁感应强度越大。

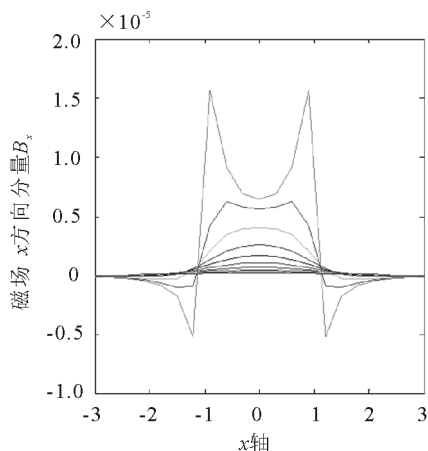


(a) 与圆环垂直平面 $z = 0$ 上磁场 x 方向分量 B_x 分布三维图



(b) 与圆环垂直平面 $z = 0$ 上磁场 y 方向分量 B_y 沿 x 方向分布图

图5 发射线圈在 $x-y$ 面上磁场 y 方向分量 B_y 分布图



(b) 与圆环垂直平面 $z = 0$ 上磁场 x 方向分量 B_x 沿 x 方向分布图

图4 发射线圈在 $x-y$ 面上磁场 x 方向分量 B_x 分布图

4 总结

通过对无线输电装置中的发射线圈产生的磁场分布进行研究,绘制了与发射线圈面平行及垂直的面上磁场分布图,不仅可以定性分析发射线圈在空间产生的磁场分布规律,而且可以通过设置发射线圈的线圈匝数、电流、半径等参数,定量计算磁感应强度具体大小,这在无线输电装置的实际设计调试中有十分重大的意义。

参考文献

- 1 贾瑞泉,薛庆忠. 电磁学. 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. 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. 沈阳航空工业学院学报,2006(01):79 ~ 80,91
- 4 朱平. 圆电流空间磁场分布. 大学物理,2005(09):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. 天水师范学院学报,2009(02):65 ~ 66
- 6 王晓颖,李武军. 载流圆环空间磁场分布的研究. 西安工业学院学报,2004(03):292 ~ 295
- 7 陈丽群. 圆形载流线圈磁场的空间分布. 娄底师专学报,2000(04):77 ~ 79
- 8 王玉梅,孙庆龙. 利用MATLAB分析圆环电流的磁场分布. 长春师范学院学报(自然科学版),2010(02):20 ~ 23
- 9 陈怀琛. Matlab 及其在理工课程中的应用指南. 西安:西安电子科技大学出版社,2004. 292 ~ 295
- 10 司文建,周楠,曹玉松. 基于 MATLAB 的亥姆霍兹线圈轴线磁场均匀分布的动态仿真. 许昌学院学报,2010(05):72 ~ 74

Study on the Magnetic Filed Distribution about Transmitting Coil of the Wireless Transmission Device

Xu Shengnan Ren Xuezhi Wei Haojie Zhan Kaiyun Chen Wenjuan

(Department of Physics, China University of Petroleum, Qingdao, ShanDong 266580)

Abstract: According to Biot - Savart Law, the integral representation of the magnetic field distribution of transmitting coil is derived. By using MATLAB, the distribution of magnetic field produced by transmitting coil is simulated. The three - dimensional distribution of the magnetic field in the radial and axial direction is obtained, which plays a important role in qualitative and quantitative analysis of the energy transfer medium of wireless transmission device - magnetic field.

Key words: Biot - Savart law; transmitting coil; MATLAB; magnetic induction

(上接第 25 页)

Study on Integration of Information Technology and Atomic Physics Teaching

Yang Ningxuan Cao Haibin Sun Maozhu

(Department of Physics, College of Science, Shihezi University, Xinjiang, Shihezi 832003)

Abstract: With the requirement of the modernization of education information, the information technology based on multimedia technology and network technology has been gradually popularized in the teaching of college courses. The paper discusses how to adapt to the great changes of information environment of atomic physics teaching in the information environment. Using MOOC, micro - lecture and other information means to effectively improve the teaching effect of atomic physics. Combining with the teaching practice, the integration of information technology and atomic physics teaching has been carried on, Some methods and suggestions are put forward for reference.

Key words: information technology; teaching integration of atomic physics; educational practice