

# 近距动态电磁感应装置发射磁场分布的均匀度研究

顾继慧<sup>1</sup>, 恽小华<sup>2</sup>

(1 南京理工大学电子工程与光电技术学院通信工程系, 江苏南京 210094; 2 南京理工大学微波工程研究中心, 江苏南京 210094)

**摘 要:** 近距动态电磁感应装置发射磁场的强度和均匀度直接影响收、发系统间信息传递的有效性和稳定性. 该文以高射炮引信电磁感应装定系统为平台, 依据电磁场理论完成了装备于炮口的有限长疏绕螺旋载流发射线圈内部轴向磁场分布均匀度的理论分析和数值仿真, 提出了给定口径和轴向尺寸下轴向磁场分布均匀度较佳的优化结构, 并对此进行了实验验证, 理论数据与实测结果的良好吻合表明本文设计思想的正确性. 文中的设计及实验方法普遍适用于其他电磁感应装置.

**关键词:** 电磁感应装置; 磁场分布; 均匀度; 数值仿真; 结构优化

**中图分类号:** TN014 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2526-04

## Research on the Uniformity of Magnetic Field Distribution in Electromagnetic Induction Devices in Adjacent Movement

GU Ji hui<sup>1</sup>, YUN Xiao hua<sup>2</sup>

(1. Department of Communication Engineering, School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China; 2. Microwave Engineering Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** Validity and stability of information passed between receiver and transmitter are affected directly by the intensity and uniformity of magnetic field transmitted by electromagnetic induction devices in adjacent movement. Based on the electromagnetic induction fuze setting system in artillery and according to electromagnetic field theory, theoretical analysis and numerical simulation is completed for the uniformity of magnetic field distribution in axial direction for current carrying solenoid of finite length. An optimal structure is proposed for fixed radial and axial size, and the results are verified by experiments. Experimental data is in good agreement with theoretical analysis, which shows that the design is correct. Methods of design and experiment can be applied widely to other electromagnetic induction sets.

**Key words:** electromagnetic induction devices; magnetic field distribution; uniformity; numerical simulation; structure optimization

## 1 引言

近距动态电磁感应装置中收、发系统间的信息传递过程是在十几~几十微秒时间内靠无源接收线圈穿越载流(载频为 $\omega_0$ 、受信息调制的交变电流)发射线圈所产生的交变磁场区时发生电磁感应效应<sup>[1]</sup>而完成的,因此,发射线圈中均匀且集中的磁场分布是确保信息稳定、有效传递的关键之一.本文以装备于炮口受装定信息调制的有限长疏绕螺旋载流发射线圈和弹载无源绕线接收线圈组成的收、发系统为平台,依据电磁场理论对疏绕螺旋载流发射线圈内部轴向磁场分布均匀度与载频 $\omega_0$ 及给定口径下绕组的几何尺寸,如螺线管轴向长度 $H$ 、绕线匝数 $N$ 、疏绕螺间距 $l$ 等参数之间的关系进行了理论分析和数值仿真,给出了工程设计计算公式和仿真计算结果,对相同几何尺寸、同一馈源下单组与多组载流发射线圈结构

轴向磁场分布均匀度进行了仿真和比较,获得了工程设计优化结构,并自行设计实验方案验证了理论分析和仿真结果的一致性.

## 2 有限长疏绕螺旋载流线圈轴向磁场分布均匀度与绕组几何尺寸及载频 $\omega_0$ 的关系

对装备于炮口的有限长疏绕螺旋载流发射线圈,可将电磁场理论的毕奥——萨伐定理<sup>[2]</sup>运用于图1所示的数学模型获得磁场分布计算公式.半径为 $a$ 的载流螺旋线圈上任一点 $P'(r, \varphi, z')$ 处的电流元 $i(t)dl$ 在其内部空间任一点 $P(r, \varphi, z)$ 处的矢量磁位 $dA$ 为:

$$dA = \frac{\mu_0 i(t) dl}{4\pi R} \quad (1)$$

式中: $\mu_0$ 为空气磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ;  $i(t)$ 为馈源电流,

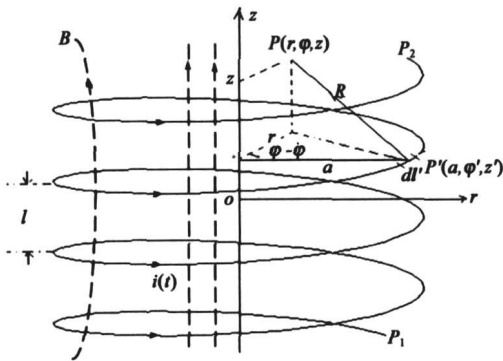


图1 有限长疏绕螺旋线圈数学模型

$i(t) = I_0 \sin \omega_0 t$ ;  $dl'$  为螺旋线有向单位长度, 其方向与载流方向一致, 参见图 1:

$$dl' = a d\phi a_\phi + dz' a_z$$

$R$  为源点  $P'(r, \phi', z')$  至场点  $P(r, \phi, z)$  的距离:

$$R = [(z - z')^2 + a^2 + r^2 - 2ar \cos(\phi - \phi')]^{1/2}$$

运用叠加原理可得  $N$  匝疏绕线圈在  $P$  点产生的矢量磁位  $A$  为:

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{p_1}^{p_2} \frac{i(t) dl'}{R} \quad (2)$$

式中  $p_1, p_2$  分别为螺旋绕线的起点和终点。据疏绕线圈螺距  $l$  与坐标变量  $\phi$  及  $z$  的关系:

$$z' = \frac{l}{2\pi} \phi$$

可将积分式(2)统归为对变量  $\phi$  的计算:

$$A = \frac{\mu_0 i(t)}{4\pi} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{a d\phi a_\phi + \frac{l}{2\pi} d\phi a_z}{\left[ \left( z - \frac{l}{2\pi} \phi \right)^2 + a^2 + r^2 - 2ar \cos(\phi - \phi') \right]^{1/2}} \quad (3)$$

式中  $\phi_1 = -N\pi$ , 对应于  $p_1$  点的螺旋角,  $N$  为绕线匝数;  $\phi_2 = N\pi$ , 对应于  $p_2$  点的螺旋角。

对式(3)取旋度可得有限长疏绕螺旋载流发射线圈内部空间任一点处磁感应强度  $B$  的表达式为

$$B = \nabla \times A = a_r B_r + a_\phi B_\phi + a_z B_z \quad (4)$$

在式(4)所示  $B$  的三个分量  $B_r, B_\phi, B_z$  中,  $B_r$  为径向分量,  $B_\phi$  为周向分量,  $B_z$  为轴向分量, 其中  $B_z$  是收、发系统间信息传递的媒体。由电磁理论中的右手螺旋法可判断: 环向绕行电流主要产生轴向磁场。由能量守恒定理可进一步判断:  $B$  的三个分量中,  $B_r$  和  $B_\phi$  将明显弱于  $B_z$ 。本文对  $B_r$  和  $B_\phi$  不作过多讨论, 重点研究  $B_z$  的均匀度。

由数学推导易得式(4)中的  $B_z$  为:

$$B_z = \frac{\mu_0 i(t)}{4\pi} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{a \left[ \left( z - \frac{l}{2\pi} \phi \right)^2 + a^2 - ar \cos(\phi - \phi') \right]}{r \left[ \left( z - \frac{l}{2\pi} \phi \right)^2 + a^2 + r^2 - 2ar \cos(\phi - \phi') \right]^{3/2}} d\phi \quad (5)$$

在式(5)的众多参数中,  $a, l, \phi_1, \phi_2$  属线圈的结构参数, 它们将影响线圈所产生的磁场分布。其中线圈内径  $a$  由炮管型号确定, 为固定值;  $\phi_1, \phi_2$  由绕线匝数  $N$  确定;  $l$  为疏绕螺距, 由螺线管总轴向长度  $H$  和绕线匝数  $N$  共同确定,  $l =$

$H/N$ ;  $H$  值取决于感应装置载体在发射线圈中的飞行速度  $v$  和收、发线圈间的信息感应所需时间  $t, H = vt$ ; 匝数  $N$  的确定一方面取决于发射场强的要求,  $N$  越大, 相同馈源幅度  $I_0$  下所产生的磁场越强, 另一方面, 匝数  $N$  的选取受载频  $\omega_0$  的制约, 工程中希望线圈自谐振频率  $\omega_{\text{自}}$  接近于  $\omega_0$  以达谐振发射状态, 发射效率最高。  $\omega_{\text{自}}$  的计算公式为:

$$\omega_{\text{自}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{自}} C_{\text{自}}}} \quad (6)$$

式中:  $C_{\text{自}} = k_0 \pi a N / 60 \omega_0$

$(\ln 2\pi N - 1)^{1/3}$ ,  $k_0$  为自由空间波数,  $k_0 = \omega_0$

$\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ ,  $\epsilon_0$  为自由空间介电常数,  $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi \text{ F/m}$ ;  $L_{\text{自}} = \mu_0 N^2 \pi a^2 K / l^{1/3}$ ,

$K$  为有限长螺旋线圈自感减小系数<sup>[1]</sup>,  $K$  的大小取决于线圈内径  $a$  与轴向长度  $H$  之间的比值  $a/H$ , 其工程拟合曲线见图 2 所示。

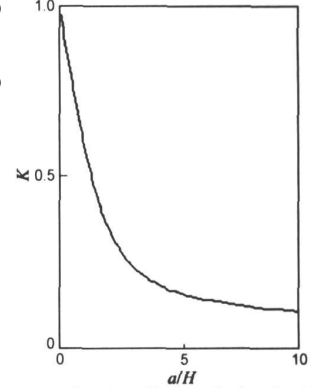


图2 有限长螺旋线圈自感减小系数

一般情况下  $\omega_{\text{自}} \gg \omega_0$ , 可通过外并适量的电容  $C_{\text{并}}$  使之接近, 即达到

$$\frac{1}{\sqrt{L_{\text{自}}(C_{\text{自}} + C_{\text{并}})}} \approx \omega_0 \quad (7)$$

由以上分析可见, 影响线圈磁场分布的主要结构参数为轴向长度  $H$  和绕线匝数  $N$ 。当近距动态平台及信号处理电路板选定后, 参数  $a, v, t$  便确定, 此时影响发射线圈轴向磁场分布均匀度的关键结构参数为匝数  $N$ 。

在  $a$  和  $H$  给定,  $N$  取不同值时, 式(5)中线圈轴向磁场分布  $B_z$  随轴向距离  $z$  变化的仿真曲线如图 3 所示。图中  $z=0$  选在线圈轴向中心处。由图 3 可见,  $B_z$  随  $z$  的变化类似于高斯曲线分布。定义  $B_z$  从轴中心处的最大值  $B_{z, \text{max}}$  降至某一选定值  $B_{z, c}$  (本文取  $B_{z, c} = B_{z, \text{max}} \times 10\%$ ) 时的轴向跨距  $\Delta z$  ( $\Delta z = z_2 - z_1$ ) 为均匀区长度。

给定线圈内径  $a = 30 \text{ mm}$ , 轴向总长度  $H = 60 \text{ mm}$ , 馈源  $I_0 = 10 \text{ mA}$ , 不同匝数  $N$  下  $B_{z, \text{max}}$  和  $\Delta z$  的计算结果见表 1 所示。

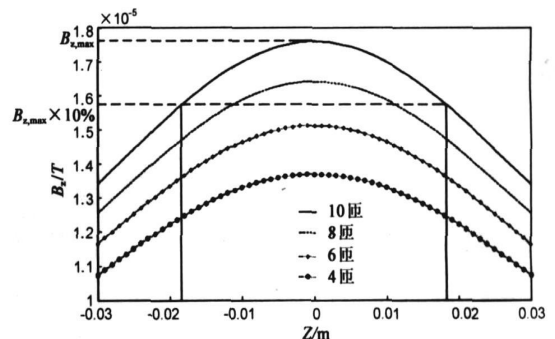
图3 相同线圈尺寸及馈源下不同匝数  $N$  对均匀区长度  $\Delta z$  及场强  $B_z$  影响的仿真曲线

表 1 给定  $a, H, I_0$ , 取不同  $N$  时  $B_{z, \max}$  和  $\Delta z$  的计算结果

$a = 30\text{mm}, H = 60\text{mm}, I_0 = 10\text{mA}$	$B_{z, \max}/T$	$z_1/m$	$z_2/m$	$\Delta z/m$
$N/\text{匝}$				
10	$1.76 \times 10^{-5}$	-0.018	0.018	0.036
8	$1.64 \times 10^{-5}$	-0.018	0.018	0.036
6	$1.51 \times 10^{-5}$	-0.018	0.018	0.036
4	$1.37 \times 10^{-5}$	-0.019	0.019	0.038

由表 1 和图 3 可见, 给定  $a, H, I_0$  下不同  $N$  的线圈所产生的轴向场强随  $N$  的减小而减弱, 均匀区长度几乎不变. 因此工程设计中发射线圈的绕线匝数  $N$  主要依据感应场强需求选取, 同时兼顾考虑式(7)使发射装置工作于谐振状态.

3 单组与多组绕线结构轴向磁场分布均匀度的比较

从亥姆霍兹线圈<sup>[1]</sup>可获得轴向均匀场的原理出发, 将  $N$  匝单组绕线线圈拆分为多组绕线结构可改善轴向磁场分布均匀度, 以两组为例所进行的仿真计算曲线见图 4 所示. 仿真中所取螺线管内径  $a = 30\text{mm}$ , 轴向总长度  $H = 60\text{mm}$ , 单组绕线匝数  $N = 10$  匝, 双组中每组绕线匝数为 5 匝, 组间距  $p = 4\text{mm}$ , 各绕组馈源幅度均为  $I_0 = 10\text{mA}$ . 由仿真结果显见, 相同馈源下的双组绕线结构所获得的  $B_{z, \max}$  和  $\Delta z$  均优于单组绕线结构.

按照亥姆霍兹线圈的思想, 组间距  $p$  取为线圈半径  $a$  时其均匀度最好, 但双组结构不同组间距  $p$  下轴向磁场分布强度和均匀度的仿真结果表明, 组间距加宽可适当延长轴向磁场分布均匀区的长度但同时会带来轴向场强的减弱, 其计算结果如图 5 和表 2 所示, 故工程设计中应折中考虑. 对多于两组的多组结构的仿真未得到组数增加会进一步改善  $B_{z, \max}$  和

$\Delta z$  两项指标的结论.

表 2 双组结构不同组间距  $p$  下  $B_{z, \max}$  和  $\Delta z$  的计算结果

$H = 60\text{mm}$ , 每组 5 匝, $p = 4\text{mm}, I_0 = 10\text{mA}$	$B_{z, \max}/T$	$z_1/m$	$z_2/m$	$\Delta z/m$
$p/\text{mm}$				
4	$2.26 \times 10^{-5}$	-0.019	0.019	0.038
8	$2.19 \times 10^{-5}$	-0.0195	0.0195	0.039
12	$2.11 \times 10^{-5}$	-0.020	0.020	0.040
20	$1.93 \times 10^{-5}$	-0.022	0.022	0.044

4 实验验证

为了验证和比较相同口径  $a$ 、相同轴向总长度  $H$ 、相同馈源幅度  $I_0$  下单、双组绕线结构对轴向磁场分布强度和均匀度的影响, 我们采用木质材料制作了  $a = 30\text{mm}, H = 60\text{mm}$  的空心圆柱架, 分别用  $\phi = 1\text{mm}$  的漆包线绕制了 10 匝线间距均等的单组线圈和组间距  $p = 4\text{mm}$ 、线间距均等的双组线圈, 其原理图见图 6 所示, 图 6 中各外并电容  $C_{\text{并}}$  按式(7)估算, 以确保发射线圈处于谐振发射状态. 感应装置的制作是在半径小于  $30\text{mm}$  的实心铝质圆柱体表面周向旋转对称开凿凹槽, 槽体填充介质, 介质表面密绕 10 匝  $\phi = 1\text{mm}$  的漆包线, 绕线两端接于示波器输入端以观测感应电压值.

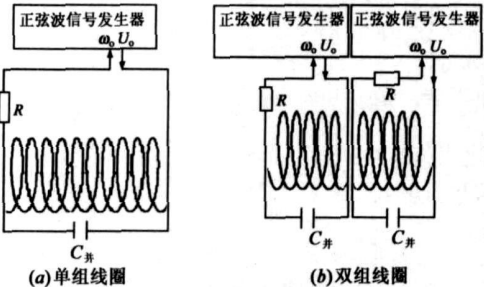


图 6 实验原理图

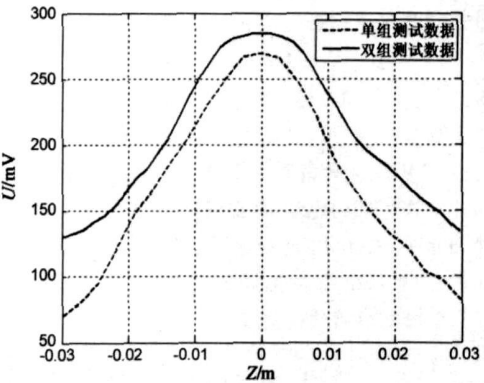


图 7 单、双组发射线圈下感应电压  $U$  随轴向坐标  $z$  变化的测试曲线

按图 6 所示原理图将幅值为  $U_0(V)$ 、频率为  $15\text{MHz}$  的电压馈于发射线圈, 调节  $U_0$  及串联阻值  $R$ , 通过测  $R$  的端电压  $U_R$  计算馈流  $I_R = U_R/R$ , 以确保单、双组绕线中的馈流相等. 让感应装置在发射线圈中按一定步长(本实验取为  $1\text{mm}$ )同轴移动, 每移一步长, 从示波器上记录下此时的感应电压值并绘

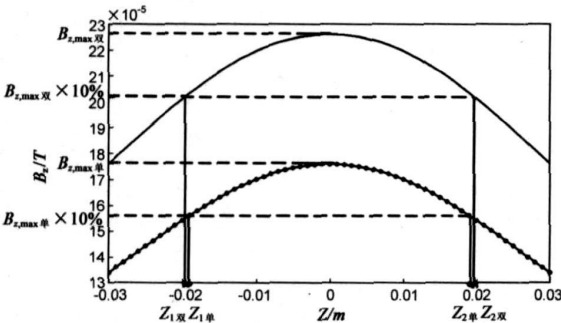


图 4 单组与双组载流线圈轴向磁场分布强度和均匀度的仿真曲线比较

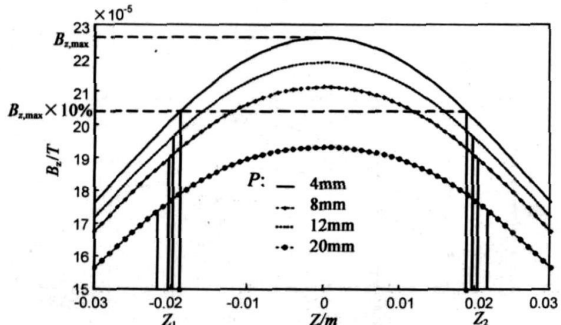


图 5 不同组间距  $p$  下轴向磁场分布强度和均匀度的比较  
 $a=30\text{mm}, H=60\text{mm}$ , 每组 5 匝,  $p = 4\text{mm}, I_0 = 10\text{mA}$

制成曲线. 同一感应装置分别在单、双组发射线圈中所测得的感应电压  $U$  随轴向坐标  $z$  的变化曲线如图 7 所示, 从图 7 中可见, 双组线圈的轴向磁场强度和平坦度均优于单组线圈, 与理论分析及仿真结果相符.

## 5 结论

对于给定口径  $a$ 、给定轴向总长度  $H$  的疏绕载流螺旋线圈, 其绕线螺间距  $l$  的大小对场强影响较大, 间距越宽场强越弱, 但对轴向磁场分布均匀度几乎无影响; 线圈轴向总长度  $H$  可据感应装置载体在发射线圈中的飞行速度  $v$  和收、发线圈间的信息感应所需时间  $t$  确定,  $H = vt$ , 考虑到发射磁场的边缘效应,  $H$  的实际工程取值应稍大于理论计算值; 发射线圈绕线匝数  $N$  可据所需感应电压幅度及载流信号频率确定, 以线圈自谐振频率接近载频为佳;  $l = H/N$ . 双组绕线结构较单组绕线结构在相同馈源条件下更可获得强而平坦的轴向磁场分布, 这将有利于收、发装置间的信息有效感应, 组间距  $p$  的大小可据工程所需轴向场分布均匀区长度  $\Delta z$  及轴向场强  $B_{z, \max}$  两项指标要求折中考虑. 论文中所提供的理论公式和仿真曲线为其他电磁感应装置的工程设计和应用提供了帮助.

## 参考文献:

- [1] (美)P 劳兰, D R 考森. 电磁学原理与应用[M]. 安徽: 安徽教育出版社, 1984. 262– 263. 285– 286. 213– 214.
- [2] 陈秉乾, 舒幼生, 胡望雨. 电磁学专题研究[M]. 北京: 高

等教育出版社, 2001. 630– 644.

- [3] 陈锦贤, 张正泓. 移动电话天线发射与接收时的极低频磁场铁磁屏蔽测量与分析[D]. 台湾: 逢甲大学电机工程学士学位论文, 2005. 20– 25.

## 作者简介:



顾继慧 女, 南京理工大学电子工程与光电技术学院通信工程系副教授, 在读博士, 硕士生导师, 从事电磁场与微波通信的教学和科研. 主要研究方向: 电磁场理论与工程应用.  
E mail: gujihui@mail.njust.edu.cn



恽小华 男, 教授, 现任南京理工大学微波工程研究中心主任. 主要研究方向: 微波毫米波射频技术、射频仿真技术、微波毫米波通信技术、频率合成技术、多芯片微组装技术等.  
E mail: xhyun@188.com