

直升机航空电磁发射线圈的设计与仿真

刘卫杰,张一鸣,崔龙飞,张栋,王旭红

(北京工业大学 信息学部,北京 100124)

摘要:以航空电磁发射系统中的发射线圈为研究对象,考虑发射线圈参数对发射电流峰值的影响,采用有限元软件,建立线圈模型。重点分析交变电流引起的趋肤效应与邻近效应对线圈参数的影响规律,得知铝管替代相同外径的实心导线可以提高材料利用率。同时为节约空间提出了空心多匝的线圈结构,并且通过仿真得到了不同的匝间距离下线圈的交流电阻与电感的变化趋势,验证了该线圈结构能够通过合适的匝间距离有效减小线圈的交流电阻与电感,从而减小在交变电流下产生的交流损耗,增大发射电流峰值。在工程实践中制作完成发射线圈并进行实验,得到满足发射要求的电流峰值,提高对深部资源的探测能力。

关键词:航空电磁;发射线圈;交流电阻;趋肤效应;邻近效应

中图分类号:TM154 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23631

Design and Simulation of Helicopter Aviation Electromagnetic Transmitting Coil

LIU Weijie, ZHANG Yiming, CUI Longfei, ZHANG Dong, WANG Xuhong

(Department of Informatics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The transmitting coil in the aviation electromagnetic transmitting system was took as the research object, considered the influence of the parameters of the transmitting coil on the peak value of the transmitting current, used finite element software, the coil model was established. The skin effect and proximity effect caused by the alternating current on the coil parameters were focused on the analysis. When aluminum tubes are replaced with practical conductors of the same outer diameter, material utilization can be improved. At the same time, a hollow multi-turn coil structure was proposed to save space, and the change trend of AC resistance and inductance of the coil at different turn-to-turn distances were obtained through simulation. It verified that the coil structure can effectively reduce the AC resistance and inductance of the coil through the appropriate turn-to-turn distance, thereby reducing the AC loss generated under the alternating current and increasing the peak value of the transmitting current. In engineering practice, the transmitting coil was manufactured and the experiment was performed to obtain the current peak value that meets the launch requirements, which improves the ability to detect deep resources.

Key words: aviation electromagnetic; transmitting coil; AC resistance; skin effect; proximity effect

矿产资源是人类生活、生存与生产的基本保障。近年来,为应对我国复杂地质条件下的资源勘探需求,相关技术人员研究了很多勘探方法。航空电磁法是以飞机为测量仪器搭载平台,以地下不同地层、目标地质体等的电性差异为前提条件,以电磁感应为基本原理的一种地球物理探测技术方法^[1]。其中,直升机航空电磁发射系统具有机动灵活、易于改装、收发距小、地形适应能力强等优点,可以克服探测地区地形复杂、环境恶

劣等问题,已经逐渐成为航空电磁勘查领域的主流系统。发射线圈作为直升机航空电磁发射系统的重要组成部分,对探测结果有很大的影响,因此,对其进行合理的设计是不可或缺的。

1 发射线圈工作原理

根据电磁感应原理,利用发射源向地下发射脉冲磁场,经过地下介质激发产生涡流场,接收线圈接收来自地下返回的二次场信号的同时,接

基金项目:北京市自然科学基金(3214058)

作者简介:刘卫杰(1997—),女,硕士,Email:18839135380@163.com

通讯作者:王旭红(1987—),女,博士,讲师,Email:wangxuhong@bjut.edu.cn

收从空气中直接传回的一次场信号^[2-4],其原理如图1所示。

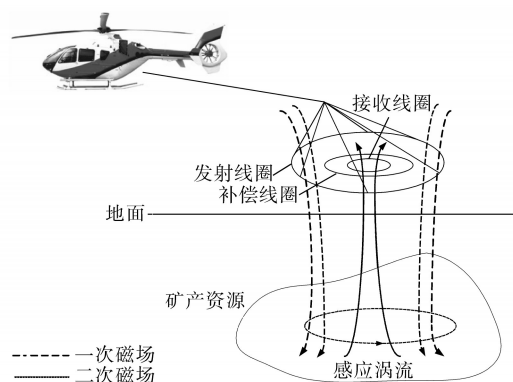


图1 直升机瞬变电磁探测系统原理

Fig.1 Principle of helicopter transient electromagnetic detection system

根据勘探要求,由于发射频率较低,线圈可以等效为电感串联上线圈内阻,忽略线圈的匝间电容^[5],线圈的工作原理可以等效为RLC串联电路的零输入响应,工作原理如图2所示。

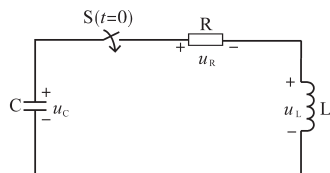


图2 RLC串联电路模型

Fig.2 RLC series circuit model

应用KVL方程和电容的VCR得到:

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad (1)$$

式(1)是以 u_C 为未知量的RLC串联电路放电过程的微分方程,令电路工作于振荡放电过程,谐振电容完成储能后,对线圈进行充电。发射电流表达式为

$$i = \frac{u_C}{\omega_a L} e^{-\alpha t} \sin(\omega_a t) \quad (2)$$

其中

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\omega_a = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

式中: α 为振荡电路的衰减系数; ω_a 为振荡电路的衰减角频率。

课题需求的激励源为如图3所示的半正弦电流波形,峰值至少为800 A,脉宽为4 ms。由式(2)可知,发射电流峰值由电容电压和电路参数 R, L, C 决定,由文献[6]可知参数 R, L 对电流峰值起阻碍作用。线圈在通以交流电流时,受趋肤效

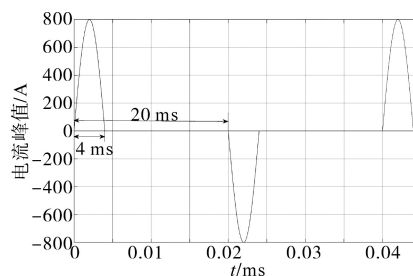


图3 发射电流波形

Fig.3 Emission current waveform

应和邻近效应影响,线圈的电阻会增加,从而导致欧姆损耗增加。

2 趋肤效应

当交变电流流过导线时,导线截面上的电流分布不再是均匀的,此时电流密度主要集中在导线表面,且中间小、表面大,此即为趋肤效应。趋肤效应使导线中通过电流时的有效截面积减小,从而使其有效电阻变大。向半径为 a 、截面为圆形的导线中通入交流电,导线中的电流密度^[7]可以表示为

$$J(r) = J_0 e^{-a(a-r)} \quad (3)$$

式中: J_0 为表面电流密度; r 为距导线中心的距离。

趋肤效应可用趋肤深度 d_s 来表示,其与电流频率、导线电导率和磁导率相关^[8-9],表达式为

$$d_s = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (4)$$

式中: ω 为系统的角频率; σ 为导线的电导率; μ 为材料的相对磁导率。

由于趋肤效应的影响,当高频电流通过导线时会使导线的交流电阻变大,系统损耗增加^[10-11]。若直导线长度为 l ,其直流电阻和交流电阻如下:

1)直流情况下:

$$R_{DC} = \frac{\rho l}{\pi a^2} \quad (5)$$

式中: ρ 为导线的电阻率,与电导率 σ 互为倒数。

2)交流情况下:

$$R_{AC} = \frac{\rho l}{\pi a^2 - \pi(a - d_s)^2} \quad (6)$$

如果 $a \gg d_s$,则式(6)近似为

$$R_{AC} = \frac{\rho l}{2\pi a d_s} \quad (7)$$

截面为圆形的导线趋肤效应的功率损耗计算公式^[12]为

$$P_E = \frac{\xi I^2}{4\pi \rho R_0^2} \Gamma_E \quad (8)$$

其中

$$\Gamma_E = \frac{b_{er0}(\xi)b'_{er0}(\xi) - b_{ei0}(\xi)b'_{ei0}(\xi)}{b_{er0}^2(\xi) + b_{ei0}^2(\xi)} \quad (9)$$

$$\xi = kR_0$$

$$k = \sqrt{2\pi f \rho \mu_0}$$

式中: R_0 为圆导线截面半径; f 为正弦电流的频率; μ_0 为真空磁导率; $b_{er0}(\xi), b_{ei0}(\xi)$ 均为 Kelvin 函数; $b'_{er0}(\xi), b'_{ei0}(\xi)$ 为 Kelvin 函数的导数。

在交变电流激励下,使用实心导线浪费了材料,在工程实现中,可采用空心管,不仅节约材料,而且降低了线圈重量和成本。从式(4)可以看出,当频率一定时,影响趋肤深度的因素为电导率和相对磁导率,线圈常用金属材料特性如表 1 所示。

表 1 不同金属材料特性

Tab.1 Characteristics of different metal materials

材料	电导率	相对磁导率	质量密度/(g·cm ⁻³)
铜	5.8×10 ⁷	1	63.54
铝	3.13×10 ⁷	1	2.69
锌	1.7×10 ⁷	1	58.90

在线圈材料的选择方面,首先考虑到线圈电阻对发射电流峰值的影响,根据式(7)可知,当导线长度与横截面积确定时,电阻与 ρ 成正比,所以应选择电阻率小(即电导率大)的材料;再者考虑到重量对直升机悬挂难度的影响,应选择质量密度小的材料。综合考虑,选择线圈的材料为铝,此时根据式(4)计算,当频率为 125 Hz 时,趋肤深度为 8 mm,但为了减轻线圈重量,设计铝管厚度为 4 mm。

3 邻近效应

在航空瞬变电磁领域,由于受到环境的限制,一般不能布置直径过长的单匝大线圈,为了满足发射磁矩,可以采取增加线圈匝数的方法,因此引入多匝线圈负载的概念,此时线圈同时会受到邻近效应的影响。根据法拉第电磁感应定律,交变电流在相邻的导线中感应出变化的磁场,磁场感应出电流,感应电流与主电流共同作用表现出邻近效应,交流电流流向导体一侧,致使导线的有效截面积减小,故使其交流电阻增加。截面为圆形的导线由于邻近效应产生的电阻^[13]为

$$R_p = 4\pi\omega\mu\mu_0r^2f_{prox}(\xi) \quad (10)$$

其中

$$f_{prox}(\xi) = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{b_{er}(\xi)b'_{er}(\xi) + b_{ei}(\xi)b'_{ei}(\xi)}{b_{er}^2(\xi) + b_{ei}^2(\xi)} \quad (11)$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{d}{d_s} \quad (12)$$

式中: d 为导线直径; $f_{prox}(\xi)$ 为邻近效应函数。

邻近效应函数如图 4 所示。

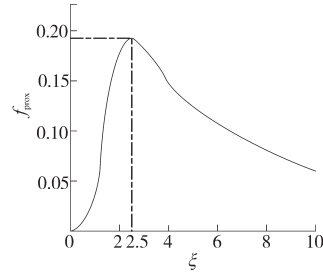


图 4 邻近效应函数

Fig.4 Proximity effect function

4 仿真结果分析

为了验证铝管能够满足发射线圈的工作需求,在 ANSYS Maxwell 软件中分别对实心铝管和空心铝管进行仿真分析,图 5 展示了不同频率下截面为圆形导线的横截面上电流密度分布情况,其中,导线直径为 29 mm,通入电流幅值为 100 A。

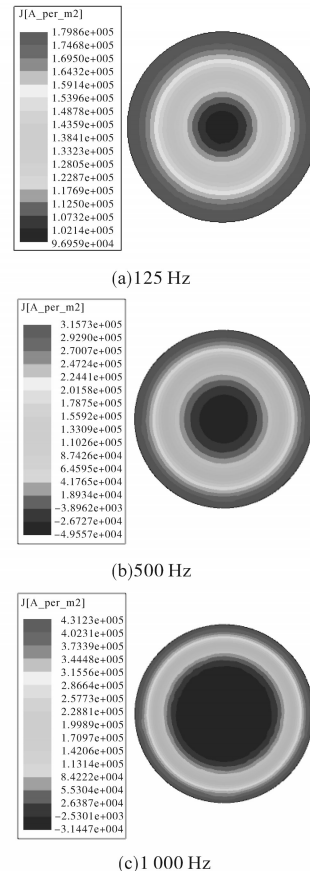


图 5 不同频率的趋肤效应对比

Fig.5 Comparison of skin effects at different frequencies

由仿真结果可以看出,在趋肤效应的影响下,电流分布在导线表面,越靠近导线表面电流密度越大,而且随着频率的升高,电流密度的有效面积越小,等效交流电阻越大,导线的损耗就越大。可利用铝管代替普通导线减少交流电阻带来的损耗,交流电流频率为 125 Hz 时,电流密度的仿真结果如图 6 所示。

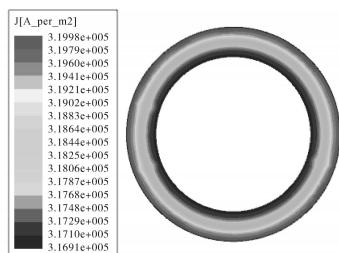


图6 铝管横截面上电流密度分布

Fig.6 Current density distribution on the cross section of aluminum tube

由图 6 可以看出,电流较为均匀地分布在铝管壁内,所以用铝管代替普通导线,有效节约了材料,应用到实际线圈中,减轻了发射线圈重量。

为了验证邻近效应,在线圈中通入幅值为 100 A、频率为 125 Hz 时的交流电,设置线圈为 3 匝,电流方向相同,铝管厚度为 4 mm,电流密度分布如图 7 所示。

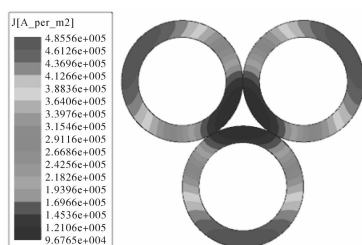


图7 邻近效应影响下电流密度分布

Fig.7 Current density distribution under the influence of proximity effect

由图 7 可以看出,受邻近效应影响,电流密度集中在线圈外侧。与图 6 比较,对于多匝线圈,受趋肤效应和邻近效应的共同影响,线圈中的电流分布更加不均匀,这进一步增加了线圈损耗。

为了减小临近效应带来的损耗,线圈的不同匝之间可以保持一定的间距。为了确定合适的匝间距离,在 ANSYS Maxwell 软件中对不同匝间距离下的线圈进行仿真,计算在趋肤效应和邻近效应的共同影响下线圈的等效电阻和等效电感。为了简化计算,减少计算机仿真时间,仿真模型是线圈的截面图。在柱坐标系中进行建模,即等效的二维模型,如图 8 所示,铝管外径 $D=29$ mm,

内径为 21 mm,故厚度为 4 mm,匝间距离 d 是变量, d 取值 $1D \sim 10D$ 。

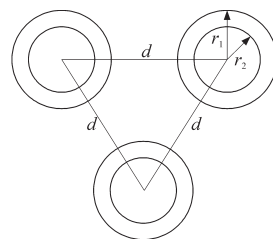


图8 仿真模型

Fig.8 Simulation model

为了更加直观看趋肤效应与邻近效应增加的损耗,首先在线圈中通入直流电流,仿真得到线圈的直流电阻是 28 mΩ。然后在线圈中通入幅值为 100 A、频率为 125 Hz 的交流电,电流方向相同,得到等效交流电阻和电感值。考虑到直升机机载 2.8 kW 的输入功率供给发射系统,半个正弦波的周期是 4 ms,综合计算结果如表 2 所示。

表2 不同匝间距离下线圈的等效电阻和等效电感

Tab.2 Equivalent resistance and equivalent inductance of the coil under different turn-to-turn distances

间距	$R/\text{m}\Omega$	$L/\mu\text{H}$	C/mF	电容电压/V	电流峰值/A
1D	37.9	853	1.90	538	768
2D	31.0	796	2.04	551	850
3D	29.4	762	2.13	542	872
4D	28.8	736	2.20	530	882
5D	28.55	716	2.26	518	886
6D	28.47	697	2.32	506	887
7D	28.36	683	2.37	496	889
8D	28.30	674	2.40	491	890
9D	28.27	662	2.45	483	890
10D	28.22	652	2.48	477	891

根据表 2 的计算结果,可以看出随着线圈匝间距离的增加,等效的交流电阻值越来越小,并且越来越接近直流电阻值。为了更直观地观察交流电阻与电感以及电流峰值与电容电压的变化情况,在 Matlab 中绘制曲线图如图 9 和图 10 所示。

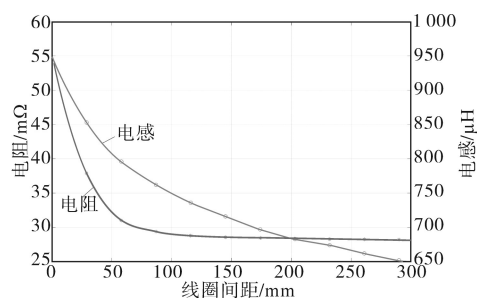


图9 线圈电阻和电感随线圈间距的变化曲线

Fig.9 Coil resistance and inductance change curves with coil spacing

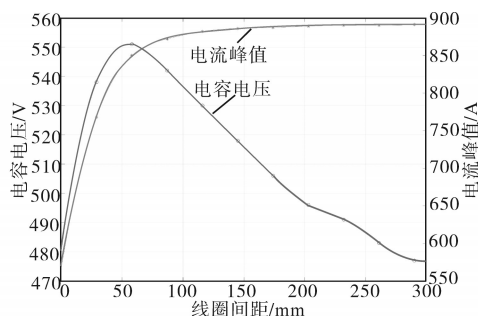


图10 电容电压与电流峰值随线圈间距变化的曲线

Fig.10 Curves of capacitance voltage and current peak value with coil spacing

从图9看出,电阻值呈现下降趋势,但从4D之后下降缓慢;电感值呈现减小趋势,但从即5D之后下降缓慢。从图10看出,电流峰值呈现上升趋势,但从3D之后上升缓慢。综合考虑,选择线圈之间的间距为5D(145 mm)。

5 实验验证与结果

在工程实际中,加工设计出实际的线圈结构,但是考虑到铝合金弯曲的加工难度过大,所以采用正十二边形的方案替代环形方案,根据计算参数要求制作3匝铝管线圈,尺寸要求:铝管外径29 mm、内径21 mm,边长均为6 m。利用软连接结构对铝管进行互连,目的是增大接触面积,减少接触电阻。软连接结构如图11所示。

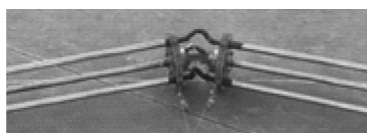


图11 线圈软连接结构

Fig.11 Coil soft connection structure

发射线圈制作并组装完成后,利用LCR仪测量其等效电阻和电感,测量结果为: $R=29\text{ m}\Omega$, $L=750\text{ }\mu\text{H}$ 。发射线圈进行吊装时如图12所示。

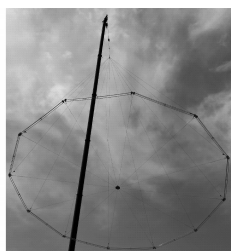


图12 发射线圈吊装图

Fig.12 Transmitting coil hoisting diagram

对发射线圈进行上电实验,发射电流波形如图13所示。根据示波器数据,半正弦波峰值电流为820 A,半波周期为4 ms,满足发射要求。

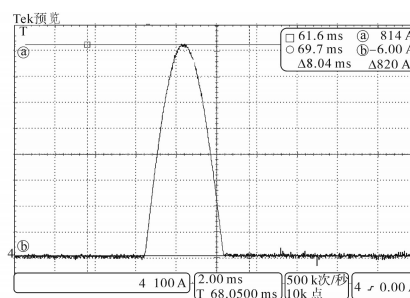


图13 发射电流波形

Fig.13 Emission current waveform

电容电压波形如图14所示,示波器显示峰峰值950 V,所以电容初始电压值约为475 V。实验数据与理论值进行对比,相对误差如表3所示。

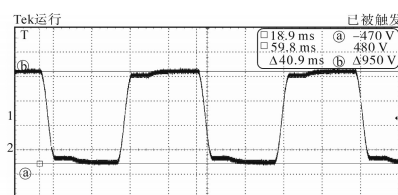


图14 电容电压波形

Fig.14 Capacitor voltage waveform

表3 实验数据与理论数据对比

Tab.3 Comparison of experimental data and theoretical data

	$R/\text{m}\Omega$	$L/\mu\text{H}$	电容电压/V	电流峰值/A
理论值	28.55	716	518	886
实验数值	29	750	475	820
相对误差/%	-1.56	-4.75	8.3	7.45

6 结论

本文首先对发射线圈工作原理进行介绍,然后对线圈受到交变电流引起的趋肤效应、邻近效应进行分析,提出了利用铝管绕制线圈比传统的实心导线可以提高材料利用率,减轻线圈重量,降低直升机吊装难度,并且通过仿真得到:合适的匝间距离可以减小线圈的电阻和电感参数,从而增大电流峰值,满足发射要求。同时根据得到的线圈结构参数,在工程实际中设计出发射线圈,通过实验波形验证了该发射线圈的合理性。

参考文献

- [1] 李飞. 频率域航空电磁数据反演方法与应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
Li Fei. Research on the inversion method and application of airborne electromagnetic data in frequency domain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [2] 裴易峰. 多波发射时间域航空电磁系统数据处理及正反演研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Pei Yifeng. Research on data processing and forward and inver-