

# 110 kV 输电线路巡检无人机电磁兼容分析

党世轩<sup>1</sup>, 王 岩<sup>2</sup>, 胡 聪<sup>2</sup>, 梁新福<sup>1</sup>, 罗日成<sup>1</sup>, 张宇飞<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000)

**摘 要:** 高压输电线路周围恶劣的电磁环境会直接影响巡检无人机运行的稳定性, 进而影响地面操作人员对巡检结果的评估。为保障巡检无人机在恶劣电磁环境下巡检作业的可靠性, 对无人机巡检作业的电磁环境进行仿真。根据干扰电磁波的耦合途径分别构造电场耦合模型与磁场耦合模型, 对无人机内部电气结构与高压输电线路之间的耦合进行分析从而确定受扰对象, 从干扰源的产生及电磁耦合途径出发, 对无人机进行电磁兼容优化, 利用电磁屏蔽削弱无人机内部电气结构及敏感元件所受到的电磁干扰, 使无人机的电磁兼容性得到提升, 保障巡检无人机运行的稳定性。

**关 键 词:** 输电线路; 巡检无人机; 电磁干扰; 电磁耦合; 电磁兼容

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.027 中图分类号: TM743 文章编号: 1673-9140(2023)01-0235-08

## Electromagnetic compatibility analysis of patrol UAV applied to 110 kV transmission line

DANG Shixuan<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, HU Cong<sup>2</sup>, LIANG Xinfu<sup>1</sup>, LUO Richeng<sup>1</sup>, ZHANG Yufei<sup>1</sup>

(1.School of Electrical & information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;  
2.Foshan Electric Power Bureau of China Southern Power Grid, Co., Ltd., Foshan 528000, China)

**Abstract:** The complex electromagnetic environment around the high-voltage transmission line affects the steady operation of the patrol UAV directly, and further affects the evaluation results of the patrol inspection by ground operators. In order to ensure the reliability of UAV in the harsh electromagnetic environment, the electromagnetic environment around UAV is simulated. Based on the coupling path of interference electromagnetic wave, the electric field coupling model and the magnetic field coupling model are constructed respectively. The coupling between the internal electrical structure of UAV and the high-voltage transmission line is analyzed to determine the disturbed target. Based on the generation of the interference source and the electromagnetic coupling path, the electromagnetic compatibility optimization of the UAV is carried out. The electromagnetic shielding is used to weaken the electromagnetic interference to the internal electrical structure and sensitive components of the UAV, so that the electromagnetic compatibility performance of the UAV is improved, and the operation stability of the patrol UAV is guaranteed.

**Key words:** transmission lines; patrol UAV; electromagnetic interference; electromagnetic coupling; electromagnetic compatibility

近年来, 无人机巡检作为一种新型的巡检方式 不受地形的限制, 易于操作, 灵活性好, 通过自主飞行或在电力巡检行业中得到迅速推广与应用。无人机电行或人工控制对输电线路进行图像与信息采集, 直

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2021-05-19

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20184782)

通信作者: 罗日成(1969—), 男, 博士后, 副教授, 主要从事电力设备在线监测与故障诊断、阵列信号处理研究; E-mail: luorich@126.com

观地反映了输电线路的运行情况,显著提高了巡检作业的效率<sup>[1]</sup>。

然而,由于高压电力线路周围的电磁环境较为恶劣,无人机在靠近输电线路进行巡检时会受到电磁干扰,造成无人机内部电气结构的损坏,引发“炸机”、“撞塔”等事故的发生,这些事故也随着机巡业务的扩大而与日俱增<sup>[2]</sup>。目前国内外对于电气设备在强电磁场环境下带电作业时受到电磁干扰时所需要采取的措施进行了很多研究。文献[3]通过在机器人内部电源输入口加装电源滤波器使得噪声得到了很大的衰减,但加装滤波器造价较高,而且安装位置受到了机器人内部空间的一些限制;文献[4]选用0.5 mm厚度的表面镀铜冷轧钢板,再通过表面喷漆来增强屏蔽效能,该方法可有效反射电磁波能量但并未将反射的电磁波能量有效转化,因此可能会造成局部场强的再次叠加;文献[5]利用铁氧体磁珠吸收高频信号并将其转化为热能消耗掉,铁氧体磁珠可以在高频下清除高频电磁噪声,但是在低频段由于电感较大反而会引起谐振。因此上述的电磁兼容措施在不同使用条件下具有一定的局限性。

针对以上问题,本文对110 kV输电线路无人机巡检作业电磁环境进行仿真分析,研究无人机巡检过程中其内部电气结构与输电线路之间的电场耦合与磁场耦合,并根据耦合原理构造耦合模型进行分析,进一步确定电磁兼容优化的重点。本文依据电磁兼容原理对无人机采取具体的优化措施,通过对无人机内部电子电路及敏感器件采用高磁导率材料屏蔽来削弱电磁干扰,以改善无人机的电磁兼容性。

## 1 无人机巡检作业电磁环境分析

现代无人机外壳材料多采用高分子材料。其中,玻璃纤维是一种性能优异的无机非金属材料。它具有绝缘性好、耐热性强、抗腐蚀性好以及机械强度高特点,因此被广泛用于无人机的外壳材料<sup>[6]</sup>。然而,由于玻璃纤维属于绝缘性材料,当处于电磁场时,这对电磁波无反射或吸收作用。因此处于电磁场的无人机将直接被电磁波穿过外壳并射入内部电子结构,从而对无人机造成电磁干扰,容易引发电气故障<sup>[7]</sup>。

### 1.1 电场仿真分析

由于无人机巡线时,无人机位于线路正上方或斜上方,并且无人机处于线路正上方时,其内部部分电子线路与输电线路之间存在的电容效应容易形成强电线路对弱电线路的串扰。因此,这种情况下的电磁耦合情况最严重,为确保无人机运行的稳定性,在进行仿真时应取电磁量最大值位置。如图1所示,无人机靠近110 kV输电线路时周围的电场分布情况为输电线路周围电场分布随着距离的增加不断衰减。可以看到,由于无人机机顶旋翼和下部支架为金属材料构成,在电场中处于静电平衡。由于其外形为棒状尖端,在尖端处容易发生电荷聚集和场强畸变现象。因此,电场在旋翼和支架附近区域有着一定程度的畸变,在这两点处的场强值较大<sup>[8]</sup>。

一般而言,空气介质的击穿电压也可近似地用30 kV/cm的击穿场强来表示,而110 kV输电线路所产生的最大电场强度约为7.238 2 kV/cm,远小于空气介质的击穿场强,处于输电线路周围的无人机不会产生闪络放电。因此,110 kV输电线路周围的电场强度不足以对无人机的巡检工作造成重大影响。

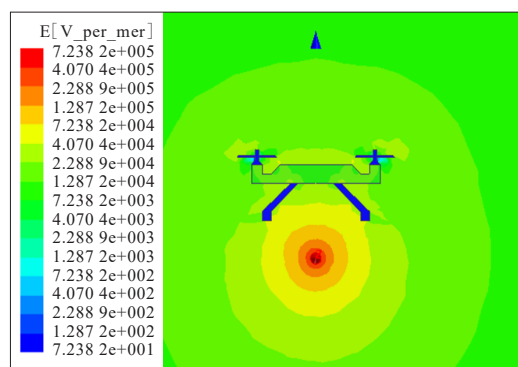


图1 含无人机模型空间电场分布仿真

Figure 1 Electric field distribution simulation for the model containing a UAV

### 1.2 磁场仿真分析

如图2所示,磁场仿真与上述电场仿真所采用的模型相同。无人机靠近110 kV输电线路时周围的磁场分布情况为输电线路周围磁场的分布整体与电场分布情况相似,均是在空间分布上以导线为中心向外环境辐射,并且数值随着距离的增加有着数量级的衰减。由于无人机外壳结构采用高分子碳纤维材料,其机身结构也没有导磁率较大的材

料,不易被磁化,可以看出无人机对输电线路周围的空间磁场分布几乎没有影响。

磁力计在无人机飞行中起着导航作用,一般情况下,磁力计可抵抗 3~4 倍磁场强度的地磁干扰,但由于地球磁场较小,譬如中国地磁感应强度为 50~60  $\mu\text{T}$ ,而通过仿真可以看到巡检线路周围的磁感应强度远大于地球磁场。因此,磁力计对线路产生的磁干扰极为敏感。磁力计通过检测空间中磁感应强度的大小来计算无人机的偏航角。当环境中没有强磁场干扰时,磁力计在传感器内部  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴上感受的磁感应强度是相同的。当三轴方向互相垂直时,磁力计所采集的地球磁场矢量在三维空间构成一个球心在原点的正球体。一旦受到磁场干扰,磁力计所采集的数据矢量将表现为球心偏离原点的椭球,导致无人机偏航甚至失控<sup>[9]</sup>。此外,无人机内部各电路单元间的连接线与信号线难免会构成环形布线,信号环路很容易受到周围交变磁场的干扰,影响信号传输。

在巡检作业过程中,当距离输电线路 0.8 m 时,线路电流在此处产生的磁感应强度约为 500  $\mu\text{T}$ ,远大于地磁场强度,磁力计及信号线路的传输将受到干扰,影响无人机正常作业。

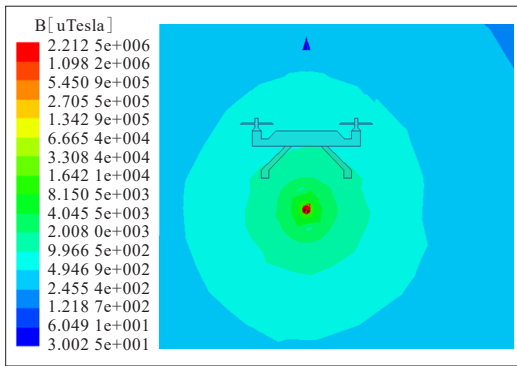


图 2 含无人机模型空间磁场分布仿真

Figure 2 Magnetic field distribution simulation of the model containing a UAV

## 2 无人机巡检过程中电磁干扰分析

通过对无人机在巡检高压线路所面临的电磁环境分析可知:输电线路产生的电磁波通过空气介质向外界辐射的形式对无人机的内部电气结构造成干扰。而具备导航功能的磁力计和信号线构成

的环路对磁干扰极为敏感,导致无人机飞行失控,造成事故。此外,高压线路所产生的电磁场也会对巡检无人机与地面控制之间的视频影像传输造成干扰。当无人机近距离对高压输电线路进行巡检时,电磁波干扰信号所产生的空间电磁场会作用于监控传输线路,使线路两端产生较大的电磁干扰电压,造成传输图像出现较密的斜形网纹,严重时甚至会淹没图像,影响巡检结果的判断<sup>[10]</sup>。

此外,电力线路产生的辐射干扰在空间传输时遇到广播线路、通信线路等系统后,干扰将会通过耦合沿着这种系统传输。由于无人机内部电子器件及电子电路与输电线路之间在强电磁场的环境下也可能存在耦合现象,因此无人机在进行巡检作业的过程中周围的电磁场分布情况并不能完全反映机器人实际所受到的电磁干扰情况。也就是说,无人机内部电气结构所受的电磁干扰更为复杂。因此,要对无人机所受到的电磁干扰进行分析,需要从无人机内部电子电路与输电线路之间的耦合途径出发,通过建立物理模型进行电磁分析<sup>[11]</sup>。由于无人机内部电子电路与输电线路之间的距离  $r < \lambda/2\pi$ ,其中  $\lambda$  为干扰源的波长,因此无人机处于干扰源的近场区(感应场区),二者之间的串扰可以采用电容耦合与电感耦合 2 种形式进行分析研究<sup>[12]</sup>。

### 2.1 电容耦合

电容耦合是由电路之间电场的互电容相互作用造成的,因此也称为电场耦合。当巡检无人机处于输电线路上方时,其内部部分电子线路与输电线路之间存在分布电容。由于分布电容带来的电容效应容易形成强线路对弱线路的串扰,电场干扰通过电缆之间的互电容耦合到受扰线路,其耦合模型如图 3 所示。

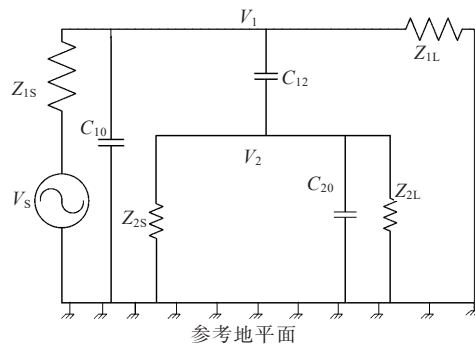


图 3 电容耦合等效模型

Figure 3 Equivalent model of capacitive coupling

图3中,  $V_1$ 、 $V_2$ 分别为干扰电缆(输电线路)、受扰电缆(无人机内部电子线路)与参考地平面之间的电压,  $C_{12}$ 为干扰电缆(输电线路)和受扰电缆(无人机内部电子线路)的互电容,  $Z_s$ 、 $Z_L$ 分别为系统阻抗与负荷阻抗,  $C_{10}$ 、 $C_{20}$ 分别为干扰电缆(输电线路)和受扰电缆(无人机内部电子线路)的对地电容<sup>[13]</sup>。

电容耦合的一个决定性因素为线间电容。处于介质  $\epsilon_r$  中的两平行线间的分布电容为

$$C_{12} = l\epsilon_r\pi\epsilon_0 / \text{arch}(d/r) \quad (1)$$

式中,  $l$ 为线路耦合长度;  $d$ 为线路间的距离;  $r$ 为线路的直径;  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ;  $\epsilon_r$ 为相对电容率。

因为电缆之间的分布电容与线路耦合长度有关, 当电缆之间距离与线径之比大于3, 且  $C_{12}$  发生在空气中时, 相对长度的分布电容<sup>[14]</sup>为

$$C_{12}/l = 27.8 \times 10^{-12} / \lg(2d/r) \quad (2)$$

根据无人机在输电线路上方巡检时的距离及内部线径参数可知, 分布电容的值大约为  $7.6 \times 10^{-11} \text{F}$ 。电缆之间的分布电容会对受扰网络也就是无人机内部电子电路产生一个感应电流  $I$ , 该电流的大小正比于干扰网络(输电线路)上电压的变化率, 分布电容  $C_{12}$  产生的噪声计算公式为

$$I = C_{12} \frac{dV_1}{dt} \quad (3)$$

式中,  $V_1$ 为输电线路上的电压;  $C_{12}$ 为线间电容。

由于分布电容  $C_{12}$  极小, 在无人机电子线路上所产生的感应电流基本为零, 因此电场耦合基本不影响无人机的正常工作。

## 2.2 电感耦合

电感耦合是由电缆之间磁场的互感相互作用造成的, 因此也称为磁场耦合。根据法拉第定理, 输电线路中流通的交变电流在无人机周围空间中产生交变磁场, 而交变磁场则会在受扰电缆(无人机内部电子线路)中产生一个感应电势, 从而形成干扰电压<sup>[15]</sup>。磁场耦合等效模型如图4所示。

图4中,  $I_1$ 、 $I_2$ 分别为干扰电缆(输电线路)中的电流和受扰电缆(无人机内部电子线路)中的电流,  $L_1$ 、 $L_2$ 分别为干扰电缆(输电线路)和受扰电缆(无人机内部电子线路)的自电感,  $M_{12}$ 为干扰电缆(输电线路)和受扰电缆(无人机内部电子线路)之间的互电感。

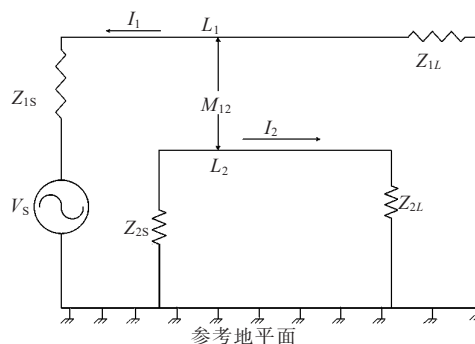


图4 磁场耦合等效模型

Figure 4 Equivalent model of magnetic field coupling

由于磁场耦合, 根据法拉第定理, 受扰电缆(无人机内部电子线路)中产生的干扰电压  $V_2$  为

$$V_2 = \frac{d}{dt} \int_A B \cdot AdA \quad (4)$$

式中,  $A$ 为闭合回路的有效面积;  $B$ 为磁通密度。

干扰磁场产生的磁通量为

$$\Phi = M_{12} I_1 \quad (5)$$

式中,  $M_{12}$ 为干扰电缆和受扰电缆之间的互电感;  $I_1$ 为干扰电缆上流过的电流。

由式(4)、(5)可得:

$$V_2 = M_{12} \frac{dI_1}{dt} \quad (6)$$

由式(6)可以得出结论: 被干扰电路中感应出的干扰电压  $V_2$ , 正比于干扰源角频率  $\omega$ 、互感系数  $M_{12}$  和干扰源电流  $I_1$ , 并且互感系数  $M_{12}$  与电路的几何特性及电路间的磁特性有关。由于电感性耦合形成的干扰电压只与上述3个因素有关, 因此降低接收电路的输入阻抗, 并不会减小干扰。此外, 电感性耦合干扰电压是与受扰电路导线相串联的, 这不同于电容性耦合干扰。由于无人机内部电子电路多为弱电系统, 此干扰电压会对弱电系统造成损害, 也会对信号线路造成干扰, 影响无人机视频图像的采集与传输。尤其是具有导航功能的磁力计对磁干扰极为敏感, 甚至会导致故障的产生。

巡检无人机的图像视频采集主要由机体上搭载的微型摄像机和视频服务器对作业现场进行视频图像采集并通过以太网传递到地面基站, 以便地面基站做出相应控制决策。但由于无人机进行高压输电线路巡检时的电磁环境比较恶劣, 尤其是周围的磁场强度远大于地磁场强度, 磁场干扰会通过耦合沿着图像视频系统内部的电子线路传输, 导致

无人机所摄录的图像面出现扭曲、雪花等现象,严重时使地面操作人员无法得出巡检结果。此外,磁场变化还会干扰磁力计造成无人机悬停不稳或者返航位置偏移。当无人机突然受到磁场干扰时,磁力计会判定无人机改变了航向与姿态,立即为陀螺仪提供校准信号。此时无人机就会不受控制地朝某个方向偏移飞行,严重时甚至会导致“撞塔”等事故的发生<sup>[16]</sup>。

### 3 巡检无人机电磁兼容优化分析

对于处于恶劣电磁环境的电气设备,所受的电磁环境效应涉及系统内和系统外两大部分的研究内容。而无人机进行线路巡检时,其内部电子系统的电磁兼容性往往会由于外部电磁干扰遭到破坏。为了实现系统内、外的电磁兼容,保障电气设备的正常运转,需要从分析干扰源、耦合途经和敏感设备入手,采取有效的技术手段消除或减弱干扰耦合<sup>[17]</sup>。

对于巡检无人机而言,通过上文中电磁耦合分析可知:无人机受到的干扰主要来自于输电线路产生的低频磁场对其产生的磁场耦合。因此,对无人机的电磁兼容进行优化处理的重点是如何消除或削弱磁场耦合。

#### 3.1 无人机的电磁兼容优化

输电线路产生的低频磁场干扰主要影响的是具备导航功能的磁力计、信号线路构成的环路以及其他敏感器件。为了削弱干扰影响,可以从2个方面着手,其中一个方面就是尽可能地减小信号线路构成的环路面积。这是因为变化的磁通量穿过闭合回路时将会在环路内感应出电流,并且电流的大小与磁通量成正比。为了减弱感应电流的影响,必须尽可能地减小环路面积。而另一重要方面则是从耦合途径出发,进行电磁兼容的优化。其主要方法是对这些敏感器件及线路施加磁场屏蔽措施。

##### 3.1.1 基于旁路原理的磁屏蔽方法

磁场屏蔽是用于抑制磁场耦合实现磁隔离的技术措施。由于输电线路所产生磁场主要为低频磁场,因此采取低频磁屏蔽措施。低频(100 kHz以下)磁场屏蔽常用的屏蔽材料是高磁导率的铁磁材

料(如铁、硅钢片、坡莫合金等),其屏蔽原理是利用铁磁材料的高磁导率对于干扰磁场进行分路。

如图5(a)所示,为一高磁导率材料制成的屏蔽体(空心方筒)置于低频磁场中的示意图,由于屏蔽体磁阻远小于空气磁阻,大部分磁力线将沿着屏蔽体流过,只有少部分磁力线通过屏蔽体进入内部。对图5(b)中旁路原理的等效模型进行分析:磁力线射入屏蔽罩内后,罩内的磁场强度为

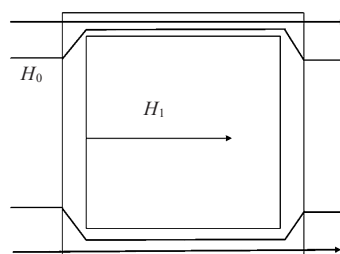
$$H_1 = H_0 R_1 / (R_1 + R_0) \quad (7)$$

该屏蔽结构的屏蔽效能为

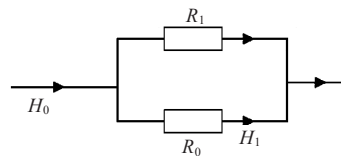
$$S_E = 20 \log(H_0/H_1) = 20 \log(1 + R_0/R_1) \quad (8)$$

式(7)~(8)中, $R_0$ 为空气磁阻; $R_1$ 为屏蔽体磁阻; $H_1$ 、 $H_0$ 分别为屏蔽体内外的磁场强度。

可以看到减小屏蔽体磁阻 $R_1$ 可以有效地提高屏蔽效能 $S_E$ ,对于截面积为单位1的屏蔽体来说,磁阻与磁导率互为倒数。因此为了减小屏蔽体磁阻得到更好的屏蔽效果,磁屏蔽体的材料应选用高磁导率材料<sup>[18]</sup>。



(a) 高磁导率材料对磁通的分流



(b) 旁路原理的等效模型

图5 高磁导率材料对磁通的分流及等效模型

Figure 5 Distributorization and equivalent model of high permeability materials to magnetic flux

##### 3.1.2 磁屏蔽措施的具体实施

铁磁材料的磁导率 $\mu$ 越高,屏蔽罩越厚,则磁阻越小,屏蔽效果越好。但随之成本增高、重量增大,并且由于高磁导材料容易出现磁饱和情况引起谐波畸变。因此,考虑采用双层磁屏蔽措施,既可以提高屏蔽效能,又可以不再增加屏蔽罩厚度与成本。

采用双层磁屏蔽措施时,外层屏蔽先用磁导率较低且不易饱和的屏蔽体将磁场强度衰减到较低的程度,使得内层高磁导率材料不易磁饱和,能够充分发挥磁屏蔽效能。

磁屏蔽措施具体实施时,是将无人机内部电路及敏感元件用双层磁屏蔽罩加以屏蔽,使其不受外部磁干扰。值得注意的是,在对无人机内部受扰电缆(包括伸出磁屏蔽罩外的线缆)进行屏蔽时,应使用高磁导率材料制成空心导管,并将屏蔽层采用双端接地,使得屏蔽层与参考地平面构成电路回路,从而达到屏蔽效果。其加有屏蔽后的仿真模型如图6所示。

如图7所示,为高磁导率材料(硅钢片)制成的空心导管对受扰线缆进行屏蔽后的磁场仿真云图,可以看到硅钢制成的空心导管对于磁力线具有一定的导流作用,其管身上的磁场强度明显高于周围磁场强度,从而削弱了入射磁场强度。通过仿真时在线缆屏蔽层内部放置测量点可知,线缆屏蔽层内部的磁场强度减小至 $10\ \mu\text{T}$ ,不足以对线缆造成干扰。

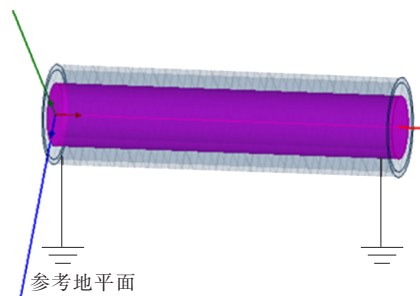


图6 加有屏蔽层的线缆模型

Figure 6 Cable model with shielding layer

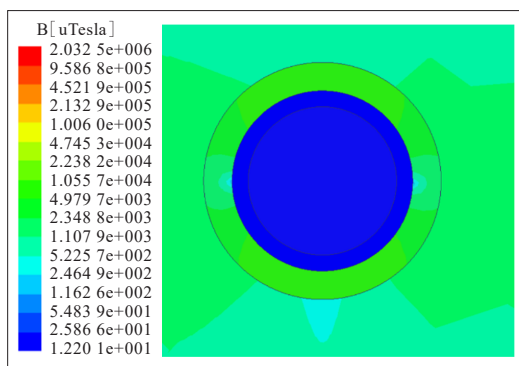


图7 含高磁导率屏蔽导管的线缆截面二维磁场仿真

Figure 7 Two-dimensional magnetic field simulation of a cable with a high permeability shielded conduit

此外,在进行屏蔽体的布置时,受扰物体不要紧挨在屏蔽体上,以减少被感应物体内的磁通<sup>[19]</sup>。

### 3.2 磁力计的抗交变磁场干扰措施

与上述对一般敏感元件及信号环路所采取的磁屏蔽措施不同,对磁力计进行抗交变磁场干扰措施的同时,还要考虑到磁力计的工作原理。由于磁力计是通过测量地球磁场强度来进行导航定位,而地磁场是指地球内部存在的天然磁性现象,其主要部分是基本磁场,比较稳定,属于静磁场部分。地磁场属于弱磁场,当巡检无人机靠近 $110\ \text{kV}$ 输电线路时,磁力计易受到交变磁场的干扰而造成精度下降,因此需要保证磁力计准确测得地磁场的同时,削弱来自输电线路的交变磁场的干扰。

对于交变磁场干扰,一般采用基于涡流原理的良好导体屏蔽措施。当交变磁场通过导体表面时,导体表面会因感应电势形成涡流。而涡流所产生的磁场与原来的磁场方向相反,即涡流的磁场可以抵消掉大部分原磁场,从而起到屏蔽作用。导体材料的电导率越高,产生的涡流越大,屏蔽作用越好。此外,由于导体材料都具有一定的电阻,涡流所产生的焦耳热也消耗了交变电磁场的能量,同样又可起到屏蔽作用。

从屏蔽交变磁场的角度来看,铝的电导率比一般良导体(如铁、不锈钢等)的电导率大一个数量级,且经济性较好。因此在进行磁力计抗交变磁场干扰措施时,将磁力计用铝合金制成的屏蔽罩加以屏蔽,可以最大限度地削弱交变磁场的干扰。如图8所示,屏蔽罩可以屏蔽掉大部分的磁力线,使得屏

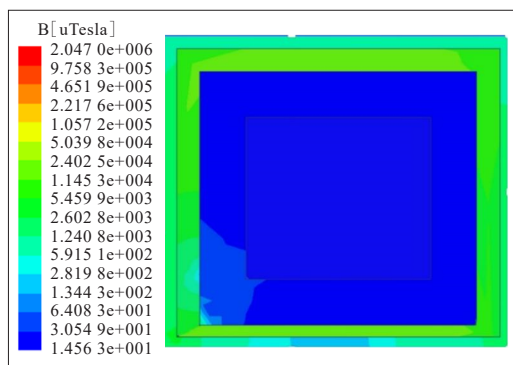


图8 良导体屏蔽罩对交变磁场的屏蔽效果

Figure 8 Shielding effect of good conductor shield case on alternating magnetic field

蔽罩内的最大磁场强度降至  $20 \mu\text{T}$ ,因此屏蔽罩内的磁力计不会受到干扰。此外由于铝合金的相对磁导率为1,对以静磁场为主要部分的地磁场不具备屏蔽效果。因此,该屏蔽罩在削弱交变磁场干扰的同时,不会影响磁力计的正常测量。

### 3.3 孔缝的处理

考虑到上述磁屏蔽措施仿真验证云图是在较理想的状况下所得效果。但是,在无人机机身面板、设备外壳等部位由于线路的布置或其他原因,不可避免地存在接缝、孔洞,而这些接缝、孔洞会造成屏蔽的不完整性,使得外部干扰源产生的电磁波依旧对无人机内部的元件造成一定干扰。因此,应在接缝处使用金属丝网垫,导电布垫等屏蔽垫。而对于设备出于散热、通风需要在外壳上留下的孔洞所采取的主要措施是将金属丝网覆盖在孔洞上,在不影响散热通风的前提下有效提高屏蔽效能<sup>[20]</sup>。

对于用铁磁材料做的屏蔽罩,在垂直于磁力线方向上不应开口或有缝隙。因为这样的开口或缝隙会切断磁力线,使磁阻增大,削弱磁屏蔽效果。因此应对屏蔽罩上的开口和缝隙使用金属丝网垫与导电布垫进行处理<sup>[21]</sup>。

## 4 结语

传统人工巡线方式将逐渐被无人机巡检所取代。然而,巡检无人机会由于电磁场的干扰而影响其正常运行,因而通过构造无人机与输电线路的耦合模型来分析二者之间的电磁耦合。利用高磁导率材料对磁通的分流作用及良导体对交变磁场的屏蔽作用,对无人机内部电气结构及磁力计进行屏蔽以削弱磁场干扰,使其能够在恶劣的电磁环境下稳定运行。通过这些措施提高巡检无人机的电磁兼容性能,保证无人机安全运行的稳定性。

### 参考文献:

[1] 魏业文,李梅,解园琳,等.基于改进 Faster-RCNN 的输电线路巡检图像检测[J].电力工程技术,2022,41(2):171-178.  
WEI Yewen, LI Mei, XIE Yuanlin, et al. Transmission line

inspection image detection based on improved Faster-RCNN[J].Electric Power Engineering Technology,2022,41(2):171-178.

- [2] 王容,史嘉昭,郭璨,等.基于 CVT 的特高压换流站复杂电磁环境下操作过电压测量[J].中国电力,2022,55(10):92-99.  
WANG Rong, SHI Jiashao, GUO Can, et al. CVT-based switching overvoltage measurement of UHV converter station under complex electromagnetic environment[J]. Electric Power,2022,55(10):92-99.
- [3] 周国杨.割草机器人 EMC 要求与设计对策[J].电动工具,2016(4):4-8.  
ZHOU Guoyang. Requirements and design strategy for EMC of robotic lawnmowers[J].Power Tools,2016(4):4-8.
- [4] 文刚,夏宋鹏程,周仿荣,等.面向巡检机器人多源融合鲁棒定位与高逼真仿真方法[J].智慧电力,2022,50(4):110-116.  
WEN Gang, XIA Songpengcheng, ZHOU Fangrong, et al. Multi-source fusion robust positioning and high-fidelity simulation method for inspection robots[J]. Smart Power, 2022,50(4):110-116.
- [5] 史建华,钱振宇.片式铁氧体磁珠及其应用[J].电源技术应用,2009,12(7):17-23.  
SHI Jianhua, QIAN Zhenyu. Chip ferrite bead and its applications[J].Power supply technology application,2009,12(7):17-23.
- [6] 赵凯,陈虹,张婧,等.碳纤维复合材料在无人机上的应用[J].高科技纤维与应用,2015,40(4):39-43.  
ZHAO Kai, CHEN Hong, ZHANG Jing, et al. The application of carbon fiber composite material in UAV[J]. High-tech fiber and applications,2015,40(4):39-43.
- [7] 刘壮,杜勇,陈怡,等. $\pm 500 \text{ kV}$ 直流输电线路直线塔无人机巡检安全距离仿真与试验[J].高电压技术,2019,45(2):96-102.  
LIU Zhuang, DU Yong, CHEN Yi, et al. Simulation and experiment on the safety distance of typical  $\pm 500 \text{ kV}$  DC transmission lines and towers[J]. High Voltage Engineering,2019,45(2):96-102.
- [8] 胡伟涛.声电联合技术检测 GIS 局部放电的试验[J].电力科学与技术学报,2012,27(2):57-64.  
HU Weitao. Experimental on partial discharge detection in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2012,27(2):57-64.
- [9] 卢文政.基于抗外部干扰的四旋翼无人机姿态解算与

- 飞行控制研究[D].武汉:湖北工业大学,2020.
- LU Wenzheng. Research on attitude calculation and flight control of four-rotor UAV based on anti-external interference[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.
- [10] DIAHOVCHENKO I M, Olsen R G. Electromagnetic compatibility and protection of electric energy meters from strong magnetic fields[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 186: 106400.
- [11] WU Y, MA Q S, XU P. Progress of electromagnetic compatibility design for unmanned aerial vehicles[J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 316(11): 04008.
- [12] 吕仁清, 蒋全兴. 电磁兼容性结构设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990: 8.
- LÜ Renqing, JIANG Quanxing. Electromagnetic compatibility structure design[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1990: 8.
- [13] 胡涛春. 磁屏蔽电缆感应耦合干扰抑制机理分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- HU Taochun. Analysis of induction coupling interference suppression mechanism of magnetic shield cable[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [14] 奚鑫泽, 李胜男, 徐志. 基于等值模型的配电网机电—电磁混合仿真接口[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 81-90.
- XI Xinze, LI Shengnan, XU Zhi. Electromechanical—electromagnetic hybrid simulation interface of distribution network based on equivalent model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 81-90.
- [15] 张树欣, 黄晨宏, 郑真, 等. 应用于远程带电作业机械臂的遥操作控制方案研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 11-16+34.
- ZHANG Shuxin, HUANG Chenhong, ZHENG Zhen, et al. Research on the teleoperation control scheme for remote live working manipulators[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 11-16+34.
- [16] 孙利人. 磁场和无线电波对飞行的影响[N]. 中国摄影报, 2020-05-12(7).
- SUN Liren. Effects of magnetic field and radio waves on flight[N]. China Photo News, 2020-05-12(7).
- [17] 汪连栋, 申绪润, 周波. 复杂电磁环境认知研究综述[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(2): 1-6.
- WANG Liandong, SHEN Xujian, ZHOU Bo. Review on cognition of complex electromagnetic environment[J]. Aerospace electronic countermeasures, 2020, 36(2): 1-6.
- [18] 袁雪平, 潘加明, 颀晨. 电磁屏蔽中的难题—磁场屏蔽[J]. 电子质量, 2006(10): 70-72.
- YUAN Xueping, PAN Jiaming, JIE Chen. Magnetic shield the difficulty of electromagnetic shield[J]. Electron Mass, 2006(10): 70-72.
- [19] 李阳. 列车关键电气部件EMC研究与仿真[D]. 大连: 大连交通大学, 2019.
- LI Yang. Research and simulation of EMC for key electrical components of train[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019.
- [20] 许李杰, 杨志华, 王应芬, 等. 基于孔缝箱体屏蔽效能的研究[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(5): 69-74.
- XU Lijie, YANG Zhihua, WANG Yingfen, et al. Research on shielding effectiveness of box with aperture[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 36(5): 69-74.
- [21] 孟洲恬, 淡淑恒. 基于有限元和神经网络方法的电磁斥力机构结构优化设计[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 196-202.
- MENG Zhoutian, DAN Shuheng. Structural optimization design of electromagnetic repulsive mechanism with finite element method and neural network method[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 196-202.