DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.217 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

面向旋翼无人机的无线电能传输线圈自对准方法研究

李振杰(中国电源学会会员)，崔 航，袁得春，周 滔，刘一琦(中国电源学会会员)
(东北林业大学计算机与控制工程学院，哈尔滨 150040)

摘要：针对旋翼无人机无线充电系统中磁耦合装置存在横向偏移的问题，提出1种通过移动发射线圈，并同时采集输出电压，根据采集到输出电压的大小调整发射线圈位置的线圈自对准方法。首先，通过建立互感模型，分析无线充电系统的电特性和磁特性，得出输出电压与发射和接收线圈间的横向距离的关系式。其次，根据对准区域的大小，设计磁耦合机构的尺寸并将对准区域进行划分，给出具体的对准流程。最后，搭建实验平台，展开收发线圈自对准实验，从实验结果来看，该方法能够有效实现线圈自对准，对准精度达到1.5 cm以内，满足无人机高效无线充电的需求。

关键词：无线电能传输；线圈对准；无人机；区域划分

Research on Self-alignment Method of Wireless Power Transfer Coils for Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicles

LI Zhenjie, *Member*, *CPSS*, CUI Hang, YUAN Dechun, ZHOU Tao, LIU Yiqi, *Member*, *CPSS*
(College of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Aimed at the problem of lateral offset in the magnetic coupling device of a wireless charging system for rotorcraft unmanned aerial vehicles (UAVs), a self-alignment method of coils is proposed by collecting the output voltage while moving the transmitting coil and adjusting its position according to the value of the collected output voltage. First, a mutual-induction model is established to analyze the electrical and magnetic characteristics of the wireless charging system, thereby deriving the expression of the relationship between the output voltage and the lateral distance between the transmitting and receiving coils. Then, the size of a magnetic coupler is designed based on the size of the alignment region, and the alignment regionis divided. Additionally, a specific alignment process is outlined. Finally, an experimental platform was established to conduct self-alignment experiments on the transmitting and receiving coils. Based on the experimental results, it is evident that the proposed method can effectively achieve self-alignment of coils with an alignment accuracy of less than 1.5 cm, meeting the requirements for efficient wireless charging of UAVs.

Keywords: Wireless power transfer; alignment of coils; unmanned aerial vehicle (UAV); regional division

近年来，旋翼无人机在测绘、农林植保、电力巡线等方面得到了广泛应用，但由于其持续飞行时间较短，续航能力不足，旋翼无人机的作业范围受到了极大的制约[1]。因此，可以在无人机工作范围内铺设自主充电平台，使旋翼无人机在作业过程中检测到电量不足时降落至充电平台，进行自主充电，以解决其携带电能不足的问题。利用无线充电实现电能补给，能够非常好地满足无人机无人值守化的任务需求，具有广阔的应用前景[2-4]。

收稿日期：2024-07-02；**修回日期**：2024-08-16，2024-09-08；
录用日期：2024-09-29；**网络首发日期**：2024-10-21
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2572023CT15)；国家自然科学基金资助项目(52107001)
This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities under the grant 2572023CT15; National Natural Science Foundation of China under the grant 52107001

由于无人机降落时难以保证其降落位置的准确度，使无人机上的接收线圈无法与充电桩内的发射线圈完全对准，从而严重影响无线充电系统的充电功率和效率。因此，减小甚至消除线圈偏移错位对于无人机无线充电的影响，成为无人机进行自主高效无线充电的关键性问题[5]。目前，解决无人机无线充电系统线圈偏移错位的方案主要有 6 种。

(1)使用视觉图像识别处理技术进行精确降落[6]。该方案可以使无人机对充电桩的图像进行分析，帮助无人机实现精准降落，减少降落事故的同时，还可以缩短和平台的对接时间；但该方案在风沙、雨水等复杂环境下停靠精准度还有待提高。

(2)合理设计充电平台结构，使无人机在降落过程中利用形状的约束实现精确降落[7]。该方案无需精确定位，且结构简单；但该方案的充电平台不平整，并且需对无人机进行改造。

(3)增大发射线圈面积[8]。该方案可以在一定范围内提高无人机无线充电系统的抗偏移能力，还可以同时为多个无人机进行充电；但由于发射线圈面积过大，导致大量漏磁现象发生，使系统工作效率较低。

(4)采用多线圈阵列式发射平台[9]，其使用方法为首先检测无人机所在的相对位置，然后启动该相对位置附近的发射线圈，并关闭其他线圈。该方案在增大无人机充电区域的同时，减少了发射线圈磁场作用范围；但增加了系统的复杂度，而且充电过程中仅有一部分线圈工作，资源利用率较低。

(5)使用机械式辅助对准结构将无人机移动至充电基站内的发射线圈中心[10]。该方案无需定位无人机的位置，具有简单、可靠的优势；但需添加额外的机械装置，并且平台上方的机械装置使平台无法完全密封，不便于在潮湿、风沙较大等恶劣工况下使用。

(6)通过机械辅助装置将充电基站内的发射线圈移动至无人机接收线圈中心[11]。该方案充电平台可完全密封，并且可以从根本上解决无人机无线充电系统线圈错位问题；但需要添加额外的机械装置，会使成本增加。本文采用该方案，目前，采用机械式辅助对准结构移动发射线圈的对准技术大致分为 2 种：

(1)需先定位无人机的位置，然后根据位置信息将发射线圈移动至无人机上的接收线圈正下方。目前，用于无线充电线圈的定位方法可分为 2 类，其一是利用磁阻传感器、红外、视觉等外部传感器进行定位[12-14]，其二是使用辅助线圈通过磁感应定位无人机上的接收线圈[15]。由于需要添加外部传感器或辅助线圈等检测元件来定位无人机的位置，对准的成本进一步增高。

(2)无需先定位无人机的位置，该方法是通过辅助机械结构移动发射线圈在对准区域内扫描，扫描的同时，检测电参量，根据电参量的大小推算互感，从而判断接收线圈的位置。文献[16]通过辅助机械结构移动发射线圈在着陆区域扫描，检测一次侧阻抗，从而定位接收线圈的位置，但未对对准算法进行深入分析；文献[17]提出了使用扰动观测法的区域扫描对准技术，首先通过扰动发射线圈位置后检测电参量，根据多个电参量推算出互感，然后比较发射线圈不同位置的互感，来调整扰动方向，最终使发射线圈扰动至接收线圈正下方，该方法需检测多个交流量，且扰动的步长直接影响对准精度，步长越小，精度越高，但所需对准时间越长。

本文提出 1 种通过移动发射线圈位置，同时检测输出电压，实现发射线圈和接收线圈自对准的方法，该方案无需定位无人机的位置，仅在原有的无线充电系统的整流电路中添加 1 个直流电压采样电路，通过采集到的直流电压的大小来判断接收线圈的中心位置。此方法避免了通过增大线圈尺寸来扩大对准区域的问题，通过区域划分和选择磁耦合机构尺寸，在使用较小的线圈尺寸的情况下，实现大范围内的对准。最后，本文给出了具体的对准流程，通过实验验证了该方案的可行性，并根据实验结果分析了该方案的对准精度。

1 电路拓扑与理论分析

1.1 LCC-S 型补偿拓扑输出特性分析

在不计半导体器件所带来的损耗的情况下，本

文采用的 LCC-S 型无线电能传输 WPT(wireless power transfer)系统电路如图 1 所示。图中：U_{bus} 为电源电压，直流电经 Q_1~Q_4 逆变电路转换为交流电；u_p 和 i_1 分别为交流电压和电流；C_{bus} 为母线稳压电容；I_{bus} 为母线输出电流；i_t 为流经辅助电容 C_t 的电流；i_p 为发射线圈电流；i_s 为接收线圈电流；L_t 和 C_t 分别为发射线圈辅助电感和电容；C_p 和 C_s 分别为发射线圈和接收线圈补偿电容；L_p 和 L_s 分别为发射线圈和接收线圈的自感；R_p 和 R_s 分别为发射线圈和接收线圈的内阻；M 为发射线圈和接收线圈之间的互感；R_L 为整流电路的等效负载；u_s 为 R_L 两端的交流电压，通过 D_1~D_4 组成的整流电路变成直流，为负载 R_e 供电；C_0 为整流电路的滤波电容；U_0 为负载两端电压。电池充电是 1 个缓慢的过程，考虑到电池恒流/恒压充电模式期间的充电曲线，可将电池模拟为 1 个由充电电压和充电电流决定的电阻，因此，本文将电池等效为纯电阻负载 R_e[18]。

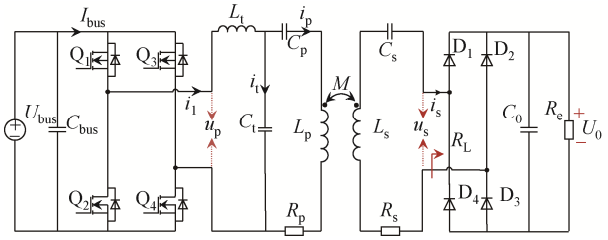


图 1　LCC-S 型 WPT 系统电路

Fig. 1 Circuit of LCC-S type WPT system

根据基尔霍夫电压定律，可列出方程

$$\begin{cases}\left(\mathrm{j}\omega L_t+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_t}\right)\dot{I}_1-\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_t}\dot{I}_p=\dot{U}_p\\ \left(\mathrm{j}\omega L_p+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_t}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_p}+R_p\right)\dot{I}_p-\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_t}\dot{I}_1-\\ \quad \mathrm{j}\omega M\dot{I}_s=0\\ \left(\mathrm{j}\omega L_s+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_s}\right)\dot{I}_s+\dot{I}_s(R_L+R_s)-\mathrm{j}\omega M\dot{I}_p=0\end{cases}\tag{1}$$

式中：ω 为系统工作角频率；$\dot{I}_1$ 为 i_1 的相量；$\dot{I}_p$ 为 i_p 的相量；$\dot{U}_p$ 为 u_p 的相量；$\dot{I}_s$ 为 i_s 的相量。

根据谐振条件，即

$$\omega=\sqrt{\frac{1}{L_tC_t}}=\sqrt{\frac{1}{(L_p-L_t)C_p}}=\sqrt{\frac{1}{L_sC_s}}\tag{2}$$

联立(1)式和式(2)，可得出

$$I_s=\frac{u_pM}{(R_L+R_s)L_t}\tag{3}$$

R_s 相对于 R_L 较小，忽略 R_s 可得

$$u_s=I_sR_L=\frac{u_pM}{L_t}\tag{4}$$

直流电压相较于交流电压的有效值更易于检测和获取，并且无线充电系统二次侧本就有整流电路，因此本文通过检测直流电压来获取互感信息，根据基波分量法分析可得

$$U_0=\frac{\sqrt{2}\pi}{4}u_s=\frac{\sqrt{2}\pi Mu_p}{4L_t}\tag{5}$$

1.2　无线充电系统线圈中互感的计算

三维坐标系中 2 个平行线圈位置如图 2 所示。O_p 和 O_s 分别为发射线圈和接收线圈；d 为同一水平面上 2 个线圈中心之间的横向距离；g 为 2 个线圈中心之间的垂直距离；$\boldsymbol{dl}_p$ 和 $\boldsymbol{dl}_s$ 为环路积分的线元；r 为 $\boldsymbol{dl}_p$ 和 $\boldsymbol{dl}_s$ 之间的距离；r_p 和 r_s 为 2 个线圈的半径；φ 和 θ 分别为积分变量 r_p 和 r_s 的角度。

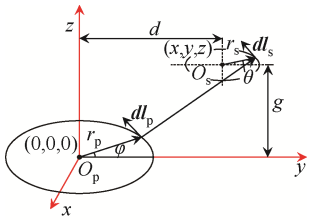


图 2　线圈在三维空间中的位置

Fig. 2 Position of coils in three-dimensional space

根据 Neumann 方程，发射线圈和接收线圈之间的互感计算式为

$$M=\sum_1^{n_p}\sum_1^{n_s}\frac{\mu_0}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi}r_pr_s\cos(\varphi-\theta)\mathrm{d}\varphi\mathrm{d}\theta\Big/\sqrt{r_p^2+r_s^2+d^2+g^2-2r_pr_s\cos(\varphi-\theta)-2d(r_p\cos\varphi-r_s\cos\theta)}\tag{6}$$

式中：n_p 和 n_s 为 2 个线圈的匝数；μ_0 为真空磁导率，其值为 $4\pi\times10^{-7}$ T·m/A。

联立式(5)和式(6)，可得电压 U_0 与互感 M 的关系，式(5)可推广为

$$U_0=\frac{\sqrt{2}\mu_0 u_p}{16L_t}\sum_{1}^{n_p}\sum_{1}^{n_s}\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi} r_p r_s\cos(\varphi-\theta)\mathrm{d}\varphi\mathrm{d}\theta\Big/\sqrt{r_p^2+r_s^2+d^2+g^2-2r_p r_s\cos(\varphi-\theta)-2d(r_p\cos\varphi-r_s\cos\theta)} \tag{7}$$

根据式(7)可得，在设置好无线充电内部系统参数后，输出电压 U_0 仅与输入电压 u_p、线圈间的横向距离 d 和纵向距离 g 有关。在无人机降落至充电平台后，线圈间的纵向距离 g 是固定的，如果再恒定输入电压 u_p，无人机无线充电系统的输出电压 U_0 就仅与横向距离 d 有关，因此，可通过测量 U_0 得出收发线圈间的横向距离 d。测量 U_0 可通过如图 3 所示并联在负载 R_e 两端的分压电路，电阻 R_2 两端的电压接入 STM32 的 ADC 接口进行电压采样。

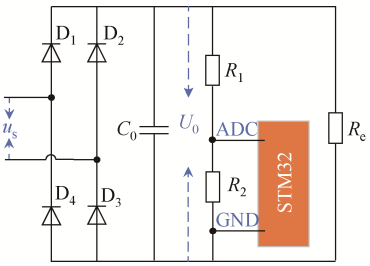


图 3 输出电压采样电路

Fig. 3 Sampling circuit of the output voltage

1.3 *X*-*Y* 轴机械辅助对准结构

本文使用的机械式辅助对准结构的行程为 50 cm×50 cm，如图 4 所示。机械式辅助对准结构包括步进电机、线性运动导轨、皮带、滑块、步进电机驱动器和微控制器。控制器发出控制信号，经步进驱动器放大信号后，控制步进电机转动，电机转动带动皮带运动，皮带再带动滑块运动，*Y* 轴的 2 个滑块带动 *X* 轴及发射线圈一起运动，*X* 轴滑块则单独带动发射线圈运动，确保发射线圈可以移动至 50 cm×50 cm 的二维平面内的任意一点，从而与接收线圈对齐。

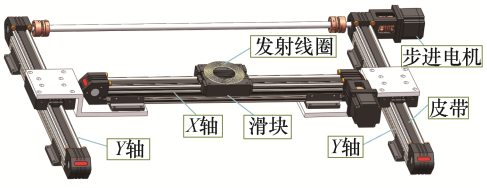


图 4 机械式辅助对准结构

Fig. 4 Mechanical auxiliary alignment structure

2 线圈设计和对准区域划分

2.1 线圈设计

使用 Ansys Maxwell 软件建立的线圈仿真模型及尺寸如图 5 所示，基于无人机无线充电系统接收端轻量化的思想，对接收线圈的尺寸进行分析，但由于式(7)中包含双重环路积分，计算过于复杂，使用 Ansys Maxwell 有限元仿真可以为电磁场求解提供快捷的计算方式，因此本文通过有限元仿真不同接收线圈外径下，互感 M 与横向距离 d 的关系，并通过 Origin 绘图软件绘制出 M 随 d 的变化曲线，如图 6(a)所示。

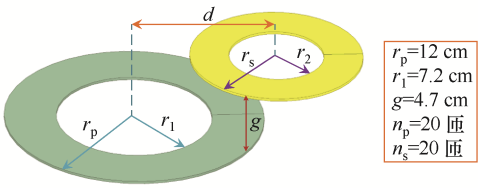
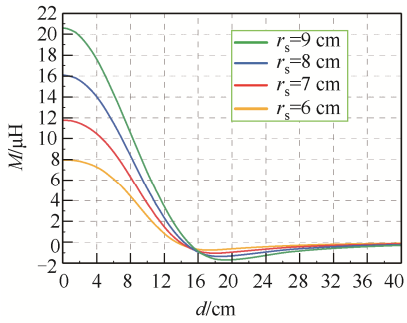


图 5 线圈仿真模型及尺寸

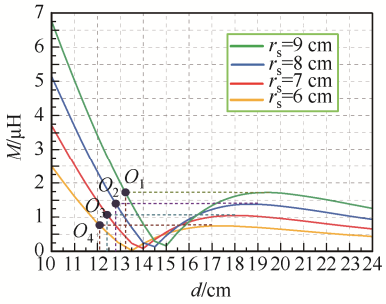
Fig. 5 Simulation model and size of coils

由图6(a)可见，接收线圈外半径 r_s=6、7、8、9 cm 的互感 M 关于横向距离 d 的 4 条曲线变化趋势相同，均为互感 M 随着横向距离 d 的增加先减小至 0，然后再继续减小至最小值，最后开始增大至无限接近于 0。其中互感变为负值的原因是线圈偏移一定距离后，通过接收线圈磁场的方向发生变化，导致接收线圈内的电流反向，2 个线圈的电流变为了从异名端流入，因此互感取值变为了负值。由于本文测量直流输出电压 U_0，互感 M 的正负不会影响直流输出电压 U_0 的大小，因此线圈在横向偏移一定距离后采集到的 U_0 对应的 d 有多个解。

为解决上述多解问题，将互感 M 的绝对值与 d 唯一对应关系的偏移范围定义为单解区域，在单解区域内互感 M 随着横向距离 d 的增大而减小；综合 1.2 节无线充电系统线圈中互感的计算可得，在设置好无线充电内部系统参数且纵向距离 g 不变



(a) 互感M关于横向距离d的变化曲线



(b) 互感M的绝对值关于横向距离d的变化曲线

图 6　互感 *M* 及其绝对值关于横向距离 *d* 的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of mutual inductance *M* and its absolute value with lateral distance *d*

的前提下，再恒定输入电压 u_p，则无人机无线充电系统的输出电压 U_0 在单解区域内与横向距离 d 成反比；因此在单解范围内 U_0 可以唯一确定 d，但是确定出横向距离 d 后，仅能判断出接收线圈位于以发射线圈中心为圆心、d 为半径的圆上，仍然无法得出接收线圈的确切位置。具体确定接收线圈确切位置的方法将在第 3 节线圈自对准方案中详细说明。为更直观地看出 4 条曲线单解区域的范围，将图 6(a)中部分区域放大，并对互感取绝对值，如图 6(b)所示，O_1、O_2、O_3、O_4 分别为接收线圈外半径 r_s=9、8、7、6 cm 时单解区域对应的临界点，因此根据图 6(b)可得出，接收线圈外半径为 r_s=6、7、8、9 cm 时，其单解区域分别约为 0~12.1 cm、0~12.4 cm、0~12.8 cm、0~13.2 cm，本文选取接收线圈外半径 r_s=8 cm，单解区域为 0~12.8 cm。

2.2　区域划分

由于接收线圈外半径 r_s=8 cm 单解区域为半径 12.8 cm 的圆形区域，不能完全覆盖 50 cm×50 cm 的对准区域，因此将对准区域进行划分。首先，以 O 为原点，图 4 中机械式辅助对准结构的运动方向分别为 X 轴和 Y 轴，建立直角坐标系，G 点坐标为(50, 0)，表示 X 轴最大移动距离为 50 cm，M 点的坐标为(0, 50)，表示 Y 轴的最大移动距离为 50 cm。因此，发射线圈与接收线圈的对准区域在 $OGNM$ 这个正方形以内。然后，以 OM 和 GN 的中点 E 和 F 之间的连接线为界划分为上半区($OGFE$)和下半区($EFNM$)。最后,将线段 OE、GF、FN 和 EM 的中点定义为 A、B、C 和 D 点，则 A 点的坐标为(0, 12.5)，B 点的坐标为(50, 12.5)，C 点的坐标为(50, 37.5)，D 点的坐标为(0, 37.5)。

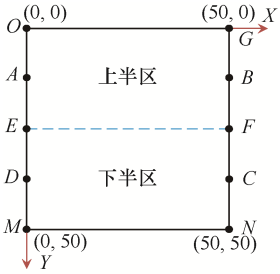


图 7　对准区域的区域划分

Fig. 7 Regional division for alignment region

根据分区，接收线圈的中心位置可在上半区或下半区。如果在上半区，接收线圈的中心与线段 AB 之间的垂直距离小于等于 12.5 cm；如果在下半区，接收线圈的中心与线段 CD 之间的垂直距离小于等于 12.5 cm。直线 AB 和 CD 分别表示上半区和下半区发射线圈的运动轨迹。因此，在发射线圈沿 AB 或 CD 方向运动时，接收线圈与发射线圈在某一时刻具有相同的横坐标，此时接收线圈与发射线圈的距离小于等于 12.5 cm，为避免多解问题，单解区域的范围应大于等于 12.5 cm，基于接收端轻量化的思想，选择外半径尺寸为 8 cm 的接收线圈，其单解区域为 12.8 cm。如果对准区域为 48 cm×48 cm，则可选用外半径尺寸为 6 cm 的接收线圈，因此，可进一步推广为：磁耦合机构的单解范围的半径大于 Y 轴方向范围的 1/4 即可。

3　线圈自对准方案

3.1　自对准方案

首先，设置机械辅助对准结构的运动速度，根

据该结构的行程范围计算出发射线圈从 A 点移动到 B 点所需的时间，记为 T，则从 B 点移动到 C 点所需的时间为 $T/2$；然后，设置二次控制模块的电压采样频率 f_1；最后，根据式(7)和图 3 的分压电路计算出发射线圈与接收线圈横向距离为 12.5 cm 时的采样电压 V_a，并将 V_a 记入无线充电系统内部程序中。

线圈自对准流程如图 8 所示，X 轴方向的返回距离 X_1=50−i/C×50 cm，其中 C 为 T 时间内的采样总数，C= f_1T，X 轴方向最大采样值为第 i 个采样值；同理可得 Y 轴方向的返回距离 Y_1=25−j/f_1/T×2×25 cm，其中，Y 轴方向最大采样值为第 j 个采样值。为保证发射线圈运动和输出电压采样可以同时进行，一、二次侧需要进行无线通信，并且二次侧控制器可以通过分析采样数据向一次侧控制器发送不同的运动命令，从而引导发射线圈对齐接收线圈。

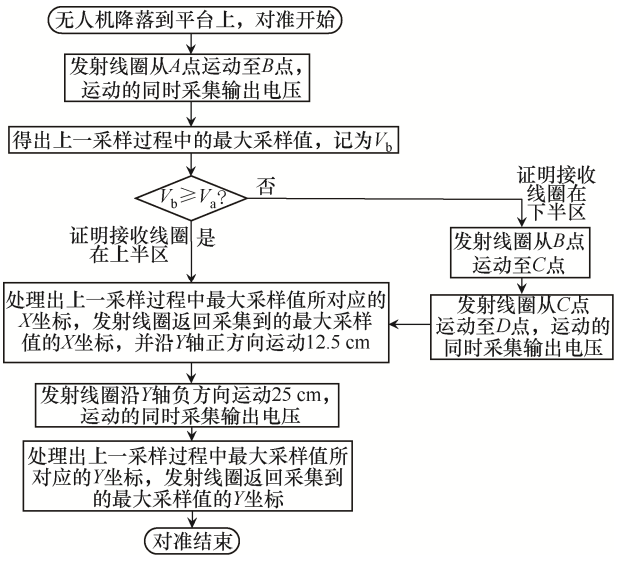


图 8 线圈自对准流程

Fig. 8 Flow chart of self-alignment of coils

3.2 发射线圈运动轨迹示例

为更直观表示对准流程，发射线圈运动轨迹示例如图 9 所示。图中：S_1 和 S_2 为接收线圈在上半区和下半区的中心位置，上半区对准 S_1 点的发射线圈运动轨迹为：发射线圈从 A 点运动至 B 点，根据采样结果判断出接收线圈在上半区，并返回 S 点，此时 X 轴方向对齐；然后发射线圈沿 Y 轴负方向运动 25 cm，根据采样结果，返回至 S_1 点，此时线圈完成对准。下半区对准 S_2 点的发射线圈运动轨迹为：发射线圈从 A 点运动至 B 点，根据采样结果判断出发射线圈中心在下半区，运动至 C 点；然后从 C 点运动至 D 点，根据采样结果返回 S 点，此时 X 轴方向对齐；最后发射线圈沿 Y 轴负方向运动 25 cm，并根据采样结果，返回至 S_2 点，此时线圈完成对准。

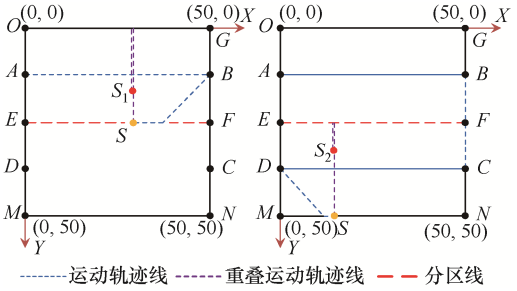


图 9 发射线圈运动轨迹示例

Fig. 9 Example of motion trajectory of transmitting coil

4 实验验证

4.1 实验装置

根据图 1 所示的电路拓扑及图 4 的机械结构搭建实验装置，如图 10 所示，系统参数见表 1。系统一、二次侧采用 NRF24L01 模块无线通信，一次侧控制器输出逆变器的控制信号，并控制步进电机的运动，二次侧控制器采集输出电压数据并对数据进行分析，根据数据分析结果通过无线通信向一

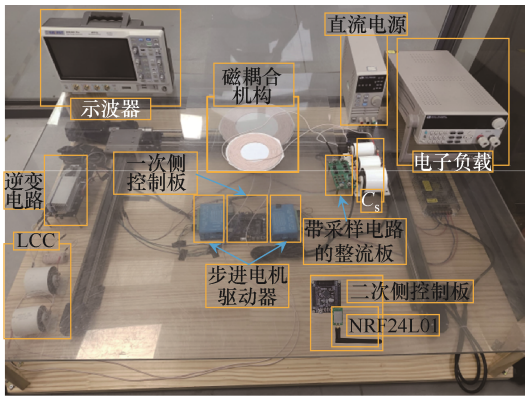


图 10 实验装置

Fig. 10 Experimental device

表 1　系统主要参数

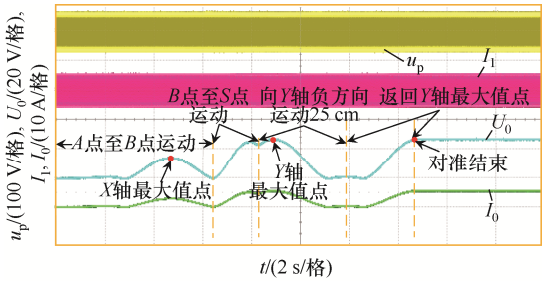
Tab. 1 Main parameters of system

参数	数值或型号
一次侧控制器	STM32F103VET6
直流母线电压 U_{bus}/V	80
发射线圈自感 L_p/μH	109.7
接收线圈自感 L_s/μH	36.9
发射和接收线圈内阻 R_p、R_s/mΩ	140、70
原二次侧补偿电容 C_p、C_s/nF	47、95
一次侧辅助电感 L_t/μH	35.1
一次侧辅助电容 C_t/μF	100
二次侧控制器	STM32F405RGT6
发射线圈从 A 点移动至 B 点所需时间 T/s	7
单片机内部临界电压 V_a/V	0.097
采样电路分压电阻 R_1、R_2/kΩ	7.5、1.0
采样频率 f_1/kHz	14
T 时间内采样总数	700
系统工作频率 f_2/kHz	85
负载 R_e/Ω	5

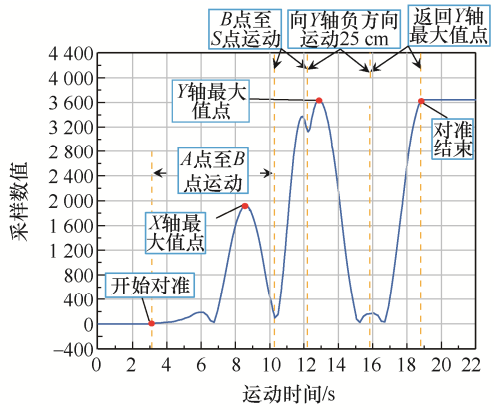
次侧控制器发送命令，从而引导发射线圈对齐接收线圈。

4.2　实验结果

本文以图 10 中接收线圈中心在上半区和下半区各取一点进行实验验证。S_1 坐标为(37，20.5)，S_2 坐标为(13，35.5)，其中上半区 S_1 点的对准过程采集到的波形如图 11(a)所示，将接收端控制板内部采样到的电压数据使用 Origin 绘图软件生成采样数据曲线，采样数据最大值 4 095 对应 3.3 V 电压。同时，为清晰表示发射线圈运动过程中采样数据的变化，ADC 将在运动开始后全程采样，如图 11(b)所示。二次侧控制板内有滤波程序，在 T 时间内，



(a) 上半区对准过程波形

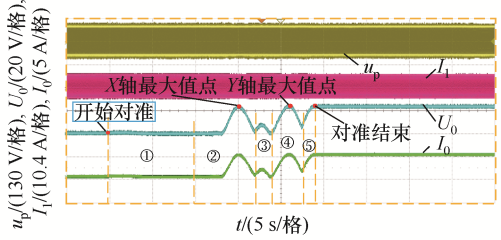


(b) 上半区对准采样数据示意

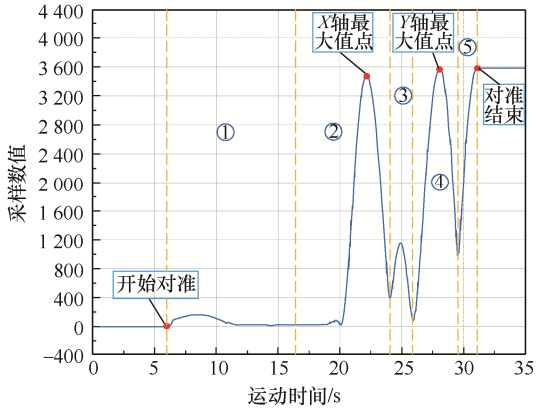
图 11　上半区对准过程波形和对准采样数据示意

Fig. 11 Waveforms during alignment process in upper half region, and schematic of aligned sampling data in upper half region

以 14 kHz 的采样频率，得出 700 个采样数据。下半区 S_2 点对准过程采集到的波形与 S_1 同理，如图 12 所示。



(a) 下半区对准过程波形



① A点至B点，B点至C点运动　② C点至D点运动　③ D点至S点运动
④ 向Y轴负方向运动25 cm　⑤ 返回Y轴最大值点

(b) 下半区对准采样数据示意

图 12　下半区对准过程波形和对准采样数据示意

Fig. 12 Waveforms during alignment process in lower half region, and schematic of aligned sampling data in lower half region

线圈对准后，测得 S_1 和 S_2 的对准误差约为 1.0 cm 和 1.2 cm，为判断系统的稳定性，对准实验进行了 100 次，每次均成功实现了线圈的自对准，对准精度在 1.5 cm 以内，并从图 6 中得出，线圈偏移 1.5 cm 时，互感下降约为 1.8%。

5 结论

本文为解决无人机无线充电系统中磁耦合装置存在横向偏移的问题，提出了 1 种发射线圈和接收线圈自对准的方法。首先，通过分析无线充电系统和线圈的互感模型，得出输出电压和线圈间横向距离在单解范围内成反比；其次，以 50 cm×50 cm 的对准区域为例，为兼顾线圈尺寸大小和对准时间，将对准区域二分后，选择了单解区域为 12.8 cm 的磁耦合机构；最后，根据先对准 X 轴方向，再对准 Y 轴方向的自对准方案，进行实验验证，实验结果表明该对准方法精度在 1.5 cm 以内，且互感下降仅有 1.8%，满足无人机高效率和高功率无线充电的需求。

本文将电池等效为纯电阻负载，忽略了实际电池充电过程中电池的钳位电压的影响。在实际工程中可使用分阶段切换负载的方法避免电池钳位的影响。在对准阶段通过开关电路直接切入纯电阻负载进行对准；对准后，再切回电池支路开始充电。该方法需要增加额外的开关器件和控制电路，同时不利于接收端的轻量化，因此需要后续更多研究。

参考文献：

[1] 李阳, 安张磊, 孟航, 等. 基于双耦合线圈的无人机轻量化无线充电耦合机构设计[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 168-175.
Li Yang, An Zhanglei, Meng Hang, et al. Design of lightweight wireless charging coupling mechanism for UAVs based on dual coupling coils [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 168-175. (in Chinese)

[2] Chittoor P K, Bharatiraja C. Wireless-sensor communication based wireless-charging coil positioning system for UAVs with maximum power point tracking [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(8): 8175-8182.

[3] 刘宇鑫, 高飞, 刘鑫, 等. 深海无人航行器双向无线充电系统的涡流损耗分析与效率优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5599-5609.
Liu Yuxin, Gao Fei, Liu Xin, et al. Analysis of eddy current loss and efficiency optimization for bidirectional underwater wireless power transfer of AUVs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5599-5609. (in Chinese)

[4] 许非凡, 魏曙光, 袁东, 等. 无人平台野外无线充电线圈设计与优化分析[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 184-194.
Xu Feifan, Wei Shuguang, Yuan Dong, et al. Design and optimization analysis of coils for wireless charging of unmanned platforms in desolate places [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 184-194. (in Chinese)

[5] Zhang Ruihong, Yao Huawen, Li Jinyu, et al. A coordinate positioning technique based on region partitioning for EV wireless charging system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 2443-2453.

[6] 吴文秀, 关志全, 汪磊, 等. 基于 openmv 的无人机定点降落视觉识别技术研究[J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(1): 41-45.
Wu Wenxiu, Guan Zhiquan, Wang Lei, et al. Research on UAV fixed-point landing visual recognition technology based on openmv [J]. Intelligent Computer and Applications, 2021, 11(1): 41-45. (in Chinese)

[7] Obayashi S, Kanekiyo Y, Shijo T. UAV/drone fast wireless charging FRP frustum port for 85-kHz 50-V 10-A inductive power transfer [C]// 2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). Seoul, Korea, 2020: 219-222.

[8] Arteaga J M, Aldhaher S, Kkelis G, et al. Dynamic capabilities of multi-MHz inductive power transfer systems demonstrated with batteryless drones [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5093-5104.

[9] Cai Changsong, Wang Junhua, Nie Hui, et al. Effective-configuration WPT systems for drones charging area extension featuring quasi-uniform magnetic coupling [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3): 920-934.

[10] Wu Shuai, Cai Chunwei, Jiang Longyun, et al. Unmanned

aerial vehicle wireless charging system with orthogonal magnetic structure and position correction aid device [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7564-7575.

[11] Rohan A, Rabah M, Talha M, et al. Development of intelligent drone battery charging system based on wireless power transmission using hill climbing algorithm [J]. Applied System Innovation, 2018, 1(4): 44.

[12] 程泽乾. 基于数据驱动技术的无线充电系统定位/异物检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Cheng Zeqian. Research on positioning/foreign object detection for wireless charging system based on data-driven technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)

[13] 田勇, 杨昊, 胡超, 等. 基于毫米波雷达的电动汽车无线充电运动异物检测与跟踪[J]. 电工技术学报, 2023, 38(2): 297-308.
Tian Yong, Yang Hao, Hu Chao, et al. Moving foreign object detection and track for electric vehicle wireless charging based on millimeter-wave radar [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2): 297-308. (in Chinese)

[14] Wang Ke, He Dai, Li Yongqiang, et al. Research on wireless charging position sensing method based on visual parameters [C]// 2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia (ECCE-Asia). Singapore, Singapore, 2021: 1277-1280.

[15] Cortes I, Kim W J. Automated alignment with respect to a moving inductive wireless charger [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(1): 605- 614.

[16] Campi T, Cruciani S, Feliziani M, et al. High efficiency and lightweight wireless charging system for drone batteries [C]// 2017 AEIT International Annual Conference. Cagliari, Italy, 2017: 1-6.

[17] Li Zhenjie, Dong Shuai, Song Kai, et al. Adaptive position alignment for wireless charging system with mutual inductance estimation and P&O algorithms employ only primary-side electrical parameters [J]. IET Power Electronics, 2019, 12(10): 2493-2500.

[18] Huang Zhicong, Lam C S, Mak P I, et al. A single-stage inductive-power-transfer converter for constant-power and maximum-efficiency battery charging [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8973-8984.



李振杰

作者简介：

李振杰(1988—)，男，中国电源学会会员，博士，副教授。研究方向：多场景无线电能传输技术及其应用。E-mail：lizhenjie0725@nefu.edu.cn。

崔航(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：无线充电技术。E-mail：hangcui0512@163.com。

袁得春(1985—)，男，通信作者，博士，讲师。研究方向：林业工程自动化及无线充电技术。E-mail：ydch229@gmail.com。

周滔(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：无线充电技术。E-mail：taozhounefu@163.com。

刘一琦(1984—)，男，中国电源学会会员，博士，教授。研究方向：电力系统。E-mail：ee_617@nefu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)