

## 新能源汽车无线充电桩

我为 MI 汽车代言；彭鹏；李可；文艺兴；李中启

### 摘要

随着全球环境和能源问题的日渐凸显，新能源电动汽车得到迅速发展和普及，并成为当前国际汽车行业的研究热点。其中新能源汽车的动力来源于电池，电池的充电分为有线接触式和无线非接触式两种方式。相对于有线接触式充电，非接触式的无线充电技术以其运行安全、灵活便捷和低维护成本等优点，受到越来越多的关注，是未来新能源汽车供电技术的发展趋势之一。

为实现电动汽车无线充电系统，本作品基于 STM32G474，自制无线线圈和三维平台，搭建一套由 DC-DC 变换器组成的电动汽车无线充电桩系统。DC-DC 变换器包括原边逆变器和副边整流桥，原边逆变器采用移相控制和 PI 算法进行调节，副边整流桥采用不控整流方案，贴合实际应用中的低成本和简便性。整个系统采用 SS 补偿结构，并匹配谐振网络参数，实现恒定电流输出。同时本项目还搭建一套三维平台进行 X、Y、Z 三轴移动模拟电动汽车无线充电场景，三维平台上放置发射线圈，采用机器视觉控制，可对接收线圈位置的自动追踪和校准，实现高效率的无线电能传输（WPT），并模拟对电动汽车进行无线充电。

本系统在阻感性负载下进行测试，实现了 600W 非接触式能量传输，整体效率达到 90%。系统应用移相控制，使系统在输入电压和负载大小变化时，输出负载调整率小于 0.5%，稳定 10A 恒流输出。三维平台能根据接收线圈进行自动调整，可实现 1mm 内误差的精准定位。

**关键词：**无线充电；移相控制；PI 算法；SS 拓扑；三维平台

## 第一部分 作品概述

### 1.1 功能与特性

本项目作品实现了一套新能源汽车无线充电桩系统 DC-DC 恒流变换器装置，该系统设计 1KW 裕量，实际在 600W 功率测试中最大传输效率可达 91%，输出电流 10A 恒定，在外界负载大小和输入电压变化情况下，输出电流稳定保持不变，电流变化率小于 0.5%。系统具备输出过压过流保护电路，当电路发生异常状况，使输出电压或电流异常增大，触发保护信号断开主电路。同时该系统还包括一套三维平台装置用于无线线圈发射端的移动，使用机器视觉相机进行精准定位，可实现发射线圈的三轴运动并对接收线圈进行自动校准，模拟汽车进行无线充电场景，实现高效率无线电能传输，线圈定位误差可实现 1mm 以内。

### 1.2 应用领域

新能源汽车无线充电桩系统主要应用于电动汽车的充电领域，可在停车场、私人车库等诸多电动汽车充电场景进行应用。相对与传统有线充电，无线充电技术具备使用方便、安全，电气隔离无触电危险，无机械接触磨损损耗和相应的维护问题，可适应多种恶劣环境和天气。通过三维平台运动技术，可实现电动汽车在车位停车时，无需精准对准车位便可实现无线充电。同时无线充电无需人工操作，可实现汽车充电即停即充、即走即停，具有极大的便捷性。此外电动汽车无线充电技术还可以与可再生能源系统集成，实现车网互动（V2G），即电动汽车不仅可以从电网中获取电能，在电网负荷量较大时还可以将电能反馈到电网中，支持电网的稳定运行，同时获取一定的经济收益。随着新能源汽车领域的不断发展，电动汽车无线充电系统的诸多优势，在未来具备很大的发展前景。

### 1.3 主要技术特点

本项目作品主要技术特点包括电路拓扑结构的选取、无线线圈的设计、谐振网络参数的匹配、移相控制软件算法研究、主控芯片高精度定时器和 ADC 的应用以及三维平台机械结构的设计。电路拓扑结构选取方面，采取 SS 拓扑对称结构，实现电路恒流输出；无线线圈的设计则采用磁耦合式结构，绕制线圈的传输距离可达 10cm 以上，传输效率也比普通结构无线线圈要高；谐振网络参数根据无线线圈的电感参数以及电路中的开关频率进行计算，并对参数进行匹配，实现

无线电能正常传输；软件控制算法方面对移相控制和增量式 PI 算法进行设计，并充分利用 STM32G474 内部资源，包括高精度定时器以及过采样 ADC 的应用。三维运动平台采用 CoreXY 运动结构进行 X、Y 轴的运动控制，采用剪叉式机械结构作为升降平台。

#### 1.4 主要性能指标

本系统在阻感性负载大小为  $6\Omega$  条件下进行测试，在系统功率 600W 时传输效率最大可达 91%，输出电流 10A 恒定，电流变化率小于 0.5%，在不同大小负载下测得的电流变化率如图 1.1 所示。

表 1.1 电流变化率

负载电阻 ( $\Omega$ )	负载改变前电流大小 (A)	负载改变后电流大小 (A)	电流变化率 (%)
4.9	9.998	10.005	0.07
4.5	10.005	10.055	0.5
4	10.055	10.082	0.27
3.5	10.082	10.069	0.13
3	10.069	10.076	0.07

#### 1.5 主要创新点

- (1) 设计了一种磁耦合式无线线圈结构用于无线电能传输，提高了无线电能传输的效率；
- (2) 采用移相控制算法实现恒定电流输出，提高系统效率；
- (3) 使用 WIFI 通讯进行 WPT 原副边的数据传输，实现整体系统的控制；
- (4) 搭建了一套三维运动平台模拟汽车无线充电场景，进行无线线圈的精准定位，实现高效率能量传输。



## 第二部分 系统组成及功能说明

### 2.1 整体介绍

给出系统整体框图，各子模块标注清楚，并进行整体的文字说明，需要表达出各模块之间的关系。

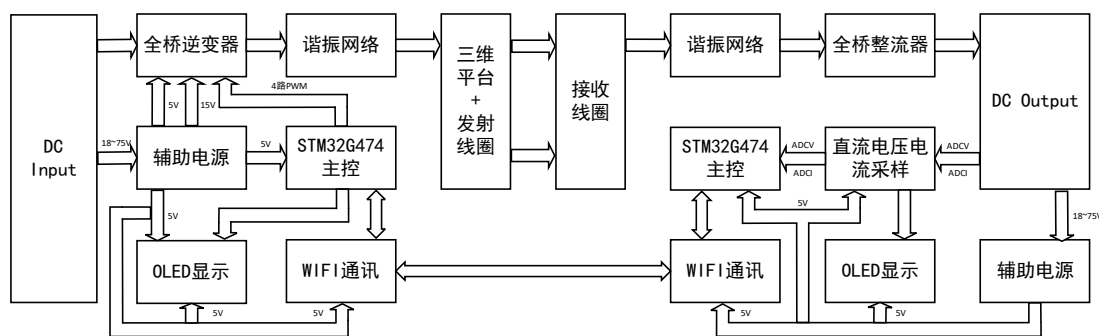


图 2.1 系统整体框图

新能源汽车无线充电系统整体框图如图 2.1 所示，该系统分为主电路和控制电路两部分。WPT 工作原理是通过原边逆变器将输入直流电转化成高频方波，并通过无线线圈传输能量到达副边，再由整流器将高频方波信号转化为直流电输出。主电路通过无线线圈分为原边和副边两部分，原边由全桥逆变器和电容电感组成的谐振网络构成，副边由电感电容组成的谐振网络和二极管不控整流器构成。

控制电路分为 WPT 原边和副边两部分控制。原边控制电路包括 STM32G474 主控、辅助电源模块、OLED 显示模块和 WIFI 通讯模块，副边控制电路包括 STM32G474 主控、辅助电源模块、直流电压电流采样模块、OLED 显示模块和 WIFI 通讯模块。其中辅助电源模块作为控制电路的供电来源，分别给原副边控制电路的每一个模块进行供电。原边 STM32 主控进行移相控制和 PI 算法调节，产生占空比可调的 PWM 波形对逆变器进行控制，通过 OLED 显示实时控制状况，并与 WIFI 模块进行通讯接收来自副边的电压电流采样数据。副边 STM32 主控对直流电压电流采样模块的电压电流进行采样，通过 OLED 显示实时的电压和电流值，并与 WIFI 模块进行通讯发送采集到的电压电流值给原边主控。

## 2.2 硬件系统介绍

### 2.2.1 硬件整体介绍；

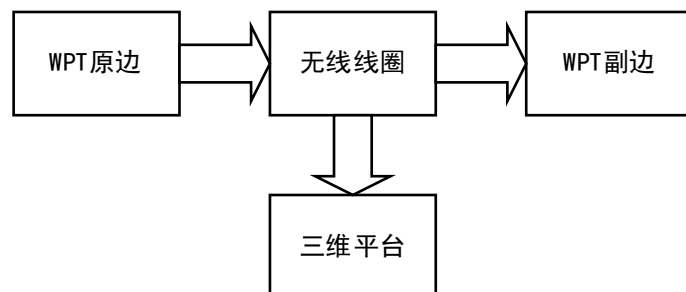


图 2.2 硬件整体系统

硬件整体系统如图 2.2 所示，硬件整体分为四个部分，分别为 WPT 原边、WPT 副边、无线线圈和三维平台四个部分。WPT 原边对输入直流电进行电能变换，然后将变换后的电能输出给无线线圈，通过无线线圈的非接触式电能传输，将能量通过无线传输到 WPT 副边，然后副边再将接收到的电能转换为直流电输出，完成一个能进行无线电能传输的 DC-DC 变换器。而三维平台则是用来放置无线线圈的发射端，通过三维运动实时追踪接收线圈的位置，实现一个模拟电动汽车充电的场景。

### 2.2.2 机械设计介绍

#### (1) 三维平台总体设计

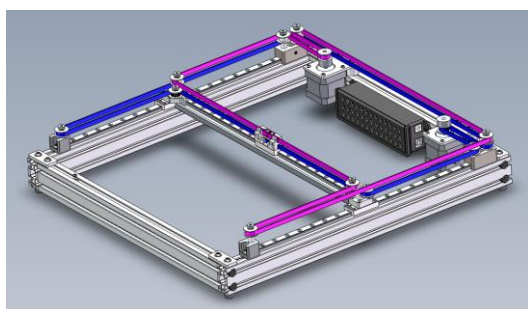


图 2.3 X、Y 轴移动平台

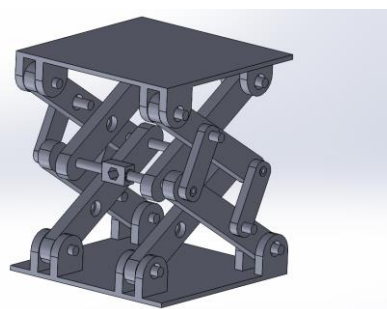


图 2.4 Z 轴升降平台

三维平台总体设计分为两部分如图 2.3 和图 2.4 所示，其中图 2.3 所示为三维平台的 X、Y 轴移动平台，图 2.4 为三维平台的 Z 轴升降平台，将 Z 轴升降平台固定在 X、Y 轴移动平台的中间基座上，便组成了可实现三维运动的平台。

X、Y 轴移动平台使用的是铝型材框架，由欧标 2040 铝型材、线轨、滑块、同步带和电机等结构组成。X、Y 轴的移动采用的是 CoreXY 运动结构，通过控

制两个电机同时运动带动同步带实现 X 或 Y 轴的移动，该运动结构的优点在于比单个电机控制一轴要更加稳定，并且当一个电机运动时，可实现 45 度的角度运动。

Z 轴升降平台采用的是剪叉式升降平台设计，全部结构件都是采用 3D 打印。其工作原理是通过电机带动升降平台中间的螺杆旋转，从而实现平台的升降，可实现 10cm 以上高度升降。系统整体设计采用双层剪叉式结构，并将电机固定在中间的螺帽杆上，其优点在于在有限的面积内比单层剪叉式结构升降高度要多，并且比电机固定在底部的单层剪叉式结构要更省力。

## (2) Z 轴升降平台的各组件设计

Z 轴升降平台的各组件模型设计如图 2.5~图 2.10 所示。

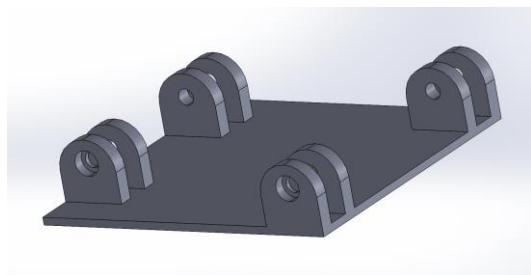


图 2.5 底座模型

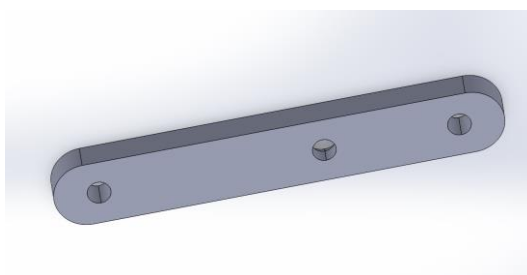


图 2.6 长杆模型

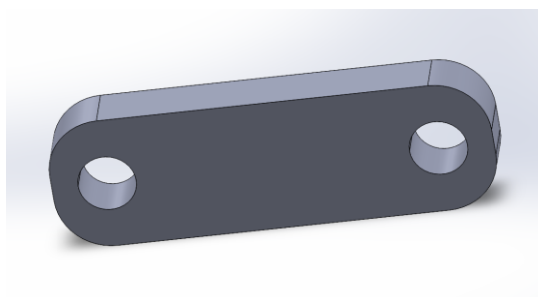


图 2.7 短杆模型

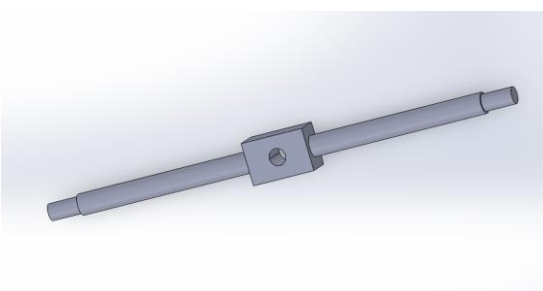


图 2.8 螺帽杆模型

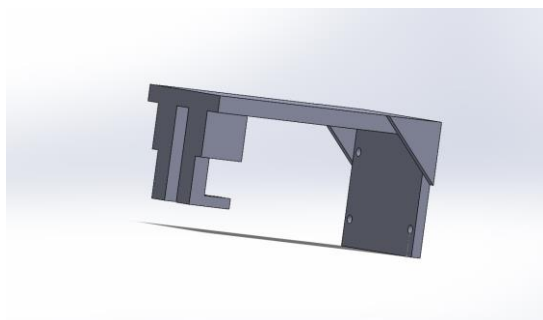


图 2.9 电机固定座模型

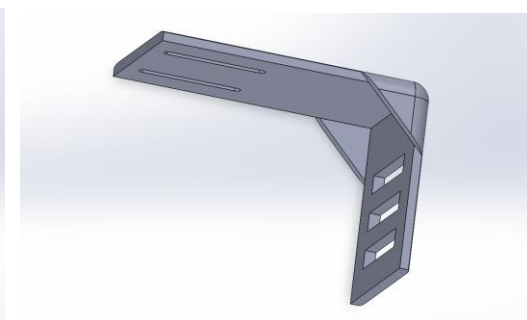


图 2.10 相机固定座模型



### 2.2.3 电路各模块介绍

#### (1) WPT 原边电路设计

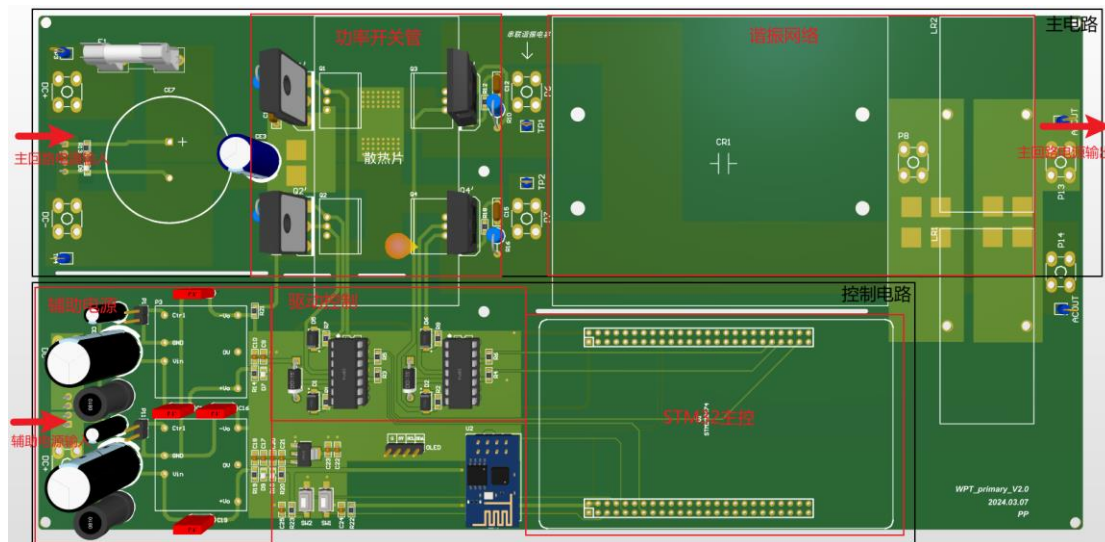


图 2.11 WPT 原边电路

WPT 原边电路如图 2.11 所示，整个电路设计分为两部分，上半部分为主电路，下半部分为控制电路，同时两部分电路中间做开槽分开，尽量减少电路工作中主电路对控制电路的影响。

主电路的电源从电路板左边输入首先经过较大的电容进行滤波，然后再经过开关管以及谐振网络进行电能变换后输出。由于电路中流经的电流较大，因此主回路的走线采用铺铜，并且都在底部开窗处理。功率开关管使用的是英飞凌的 IRFP4668 器件，该开关管耐压值 200V，最大平均电流可达 130A，导通电阻仅有 9.7mΩ，可以尽量减少主电路的功率损耗。

控制电路主要分为辅助电源、驱动控制和主控三大部分，辅助电源用来给其余各模块进行供电，可直接从主电路电源输入侧取电。驱动芯片使用的是 IR2110，接收来自自主控的 PWM 信号，去驱动功率开关管的通断。STM32 主控作为最核心的部分，一方面使用高精度定时器产生 PWM 信号驱动开关管，另一方面可与其他模块进行拓展，驱动 OLED 模块显示实时电压电流值和工作状态，与 WIFI 模块进行通讯接收副边发送的信息进行算法控制。



## (2) WPT 副边电路设计

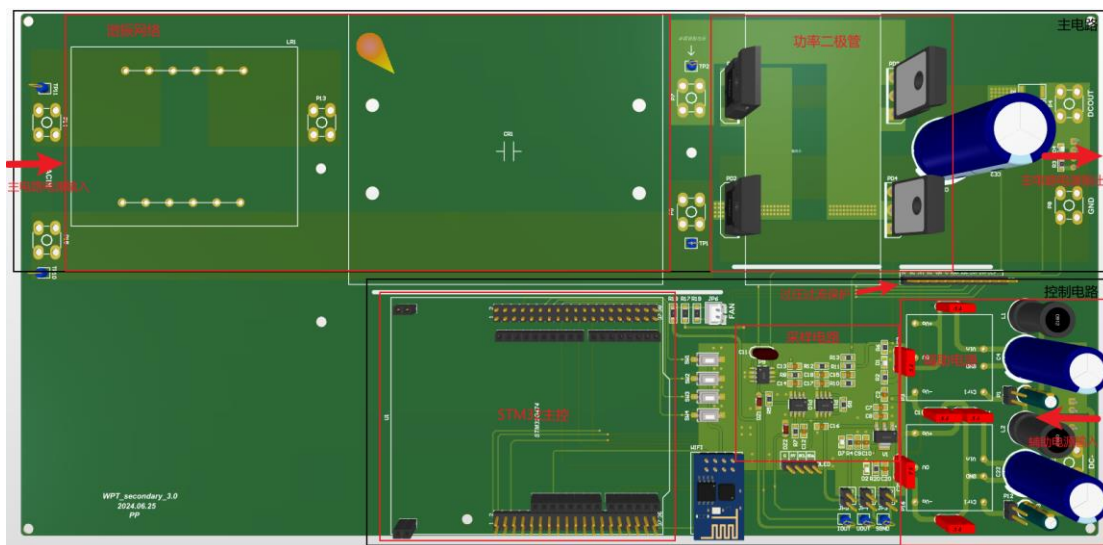


图 2.12 WPT 副边电路

WPT 副边电路如图 2.12 所示，电路总体布局与原边电路大致相同，上半部分为主电路，下半部分为控制电路，同时两部分电路中间做开槽分开，减少电路工作中主电路对控制电路的影响。

主电路的电源从左侧输入，先经过谐振网络，再通过不控整流桥进行电能变换，经过滤波电容滤波后输出。同样，由于主电路中需要流经较大的电流，因此主电路的走线采用铺铜，并在底部开窗处理。

控制电路主要分为主控、采样电路和辅助电源三个部分。STM32 主控的主要功能是进行对输出电压电流进行 ADC 采样，同时与 WIFI 模块进行通讯，将采样得到的电压电流数据发送给原边主控，主控另外还驱动了一个 OLED 显示实时的采样数据。采样电路主要是对主电路的输出电压电流进行采样，将采集到的电压电流值通过转化后，将合适的电压值送给主控进行 ADC 采样。辅助电源则是用来对主控及各个模块部分进行供电，可直接从主电路输出进行取电。

## (3) 无线线圈设计

无线线圈作为本系统中的核心部分，其传输效率决定了整个变换器的传输效率，因此在线圈结构的设计上采用磁耦合谐振式无线线圈设计，线圈采用单线圈结构绕制，并使用磁芯约束磁感线，提高无线线圈的传输效率。

无线线圈的工作频率按照 20kHz 进行设计，根据下列公式：

$$K = \frac{M_{ab}}{\sqrt{L_a L_b}}$$

$$M_{ab} = \frac{1}{4\pi^2 I} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (C_x + C_z) \cdot \frac{e^{j(b_{1d}+b_1)\xi} - e^{j(b_{1d}-b_1)\xi}}{j\xi} \cdot \frac{e^{j(b_{2d}+b_2)\eta} - e^{j(b_{2d}-b_2)\eta}}{j\eta} \cdot e^{-qs_2} d\xi d\eta$$

$$L_a = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-a_1}^{a_1} \int_{-a_2}^{a_2} \frac{-2\mu_0 q \sin(\xi a_1) \sin(\eta a_2)}{\xi \eta} \cdot e^{j(x\xi+y\eta)} dx dy d\xi d\eta$$

可计算得到无线线圈的耦合系数 K 为 0.846，互感  $M_{ab}$  为 40.535uH，线圈原边自感为 47.946uH，副边自感为 47.884uH。实际绕制的线圈电感值测量的原边电感值为 46.12uH，副边电感值为 45.8uH。

在实际应用中，实际的实验现象电流波形发生畸变，后经过多试验，得出线圈电感值过小导致的原因，因此在原副边的谐振网络中分别串联了 170uH 电感，最终得到正确实验结果。

#### (4) 谐振参数设计

本项目作品 DC-DC 变换器系统采用的是 SS 补偿拓扑结构，该拓扑结构如图 2.13 所示。

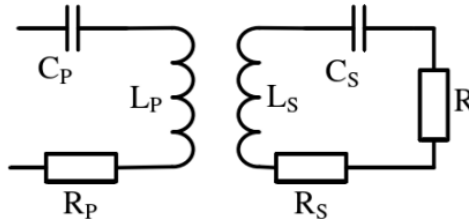


图 2.13 SS 补偿拓扑结构

图中  $L_p$  表示电磁耦合机构原边线圈自感， $C_p$  表示原边谐振补偿电容， $R_p$  表示原边线圈等效串联电阻， $L_s$  表示电磁耦合机构副边线圈自感， $C_s$  表示副边谐振补偿电容， $R_s$  表示副边线圈等效串联电阻， $R$  表示等效负载电阻值。

当副边谐振频率和系统工作频率  $\omega$  相等时，即：

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_s C_s}}$$

将谐振电感值  $L_s$  和开关频率带入上式中，便可得到系统谐振网络所需要的谐振电容大小。因在实际实验过程中，谐振电容使用的是实验室已有的 0.47uF 电容，计算出来实际使用的开关频率为 16kHz。

## (5) 辅助电源电路设计

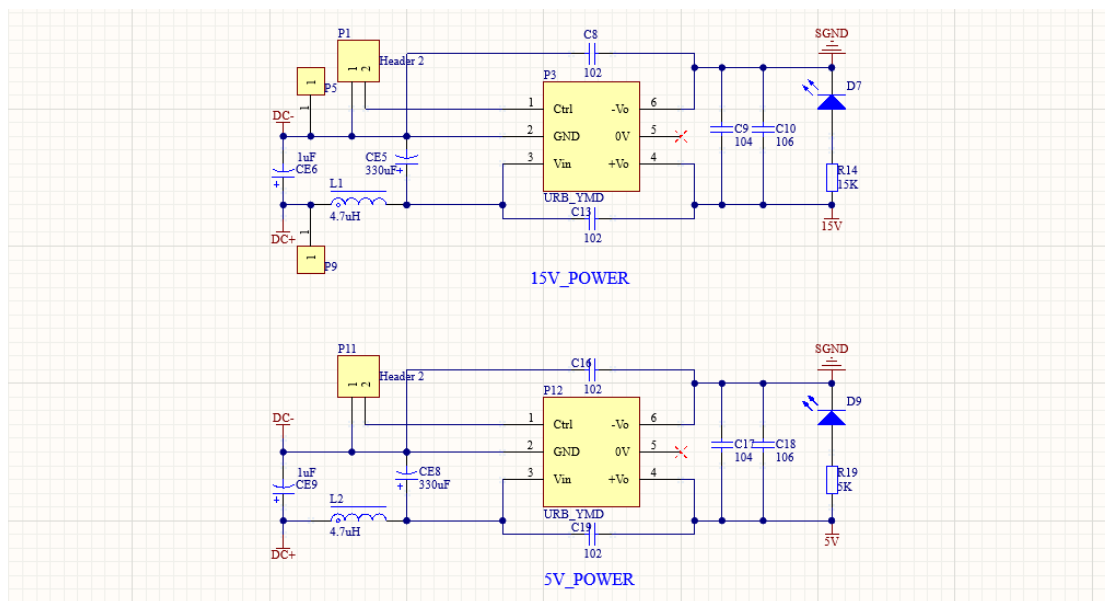


图 2.14 辅助电源电路原理图

辅助电源电路原理图如图 2.14 所示。辅助电源采用的金升阳 URB48xxYMD 系列的 DC/DC 隔离电源模块，该电源模块输入直流电压 18~75V，隔离电压可达 1500VDC。在设计中使用了 URB4805YMD 和 URB4815YMD 两种型号电源模块分别产生+5V 和+15V 电压，用于控制电路中各个模块的供电。

## (6) 采样调理电路设计

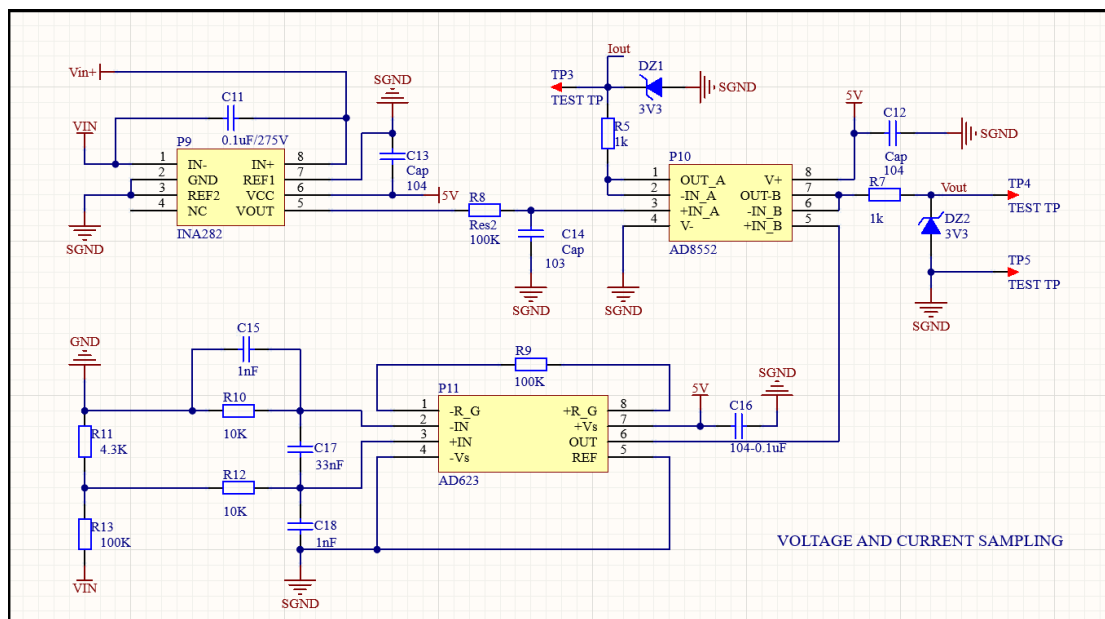


图 2.15 采样调理电路

采样调理电路如图 2.15 所示，原理图中的采样部分包括电压和电流采样，电压采样部分使用了 ADI 的 AD623 高精度仪表放大器芯片，可提供轨到轨的输出摆幅和高精度直流性能。电流采样部分使用了 TI 的 INA282 高精度电流检测放大器芯片，该芯片具有高精度、宽共模范围和零漂移架构，常用于电流检测电路中。

### (7) 过压过流保护电路设计

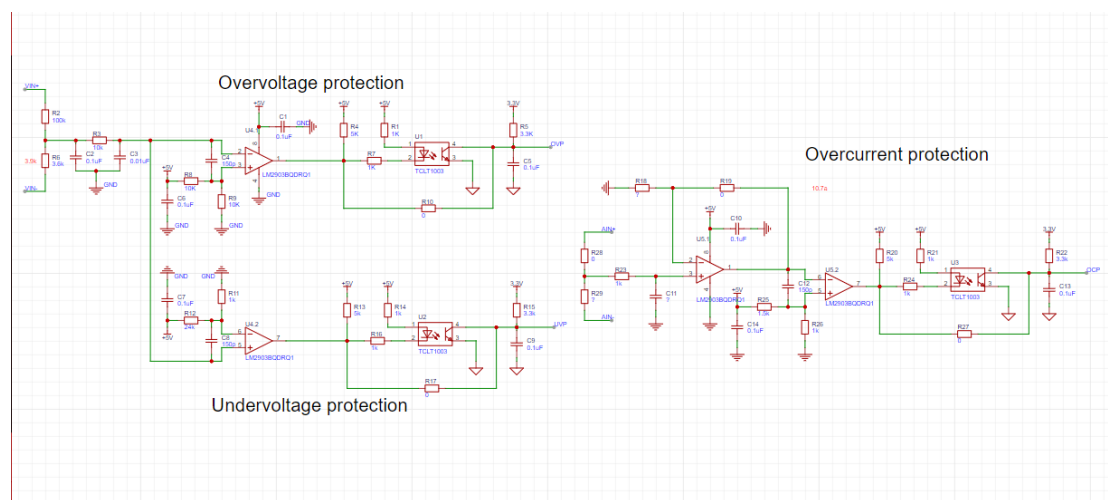


图 2.16 过压过流保护电路原理图

过压过流保护电路如图 2.16 所示，原理图中出去过压保护和过流保护电路外，还包括欠压保护电路，用于双向系统中电池电压过低时断电保护电池寿命。由于本系统是在阻感性负载下进行测试，未对电池进行充电，因此未使用欠压保护电路。所有保护电路的工作原理都是通过采集主电路的电压信号，经过分压后与比较器另一端的参考电压值进行比较，输出低电平有效信号。过压过流保护的电压阈值可通过改变比较器一端的参考电压大小来实现，同时保护电路中使用了光耦将主电路和控制电路隔离，实现电气隔离。

## 2.3 软件系统介绍

### 2.3.1 软件整体介绍

如图 2.17 所示为软件总体框架，地面原边和副边的主控分别执行不同任务。原边为主要控制器，负责进行逆变器的移相控制、PI 控制、发出驱动信号、建立 WIFI 通信并且接收 ADC 采样数据。副边主要负责采集 ADC 数据并通过 WIFI 模块传输给原边控制器。

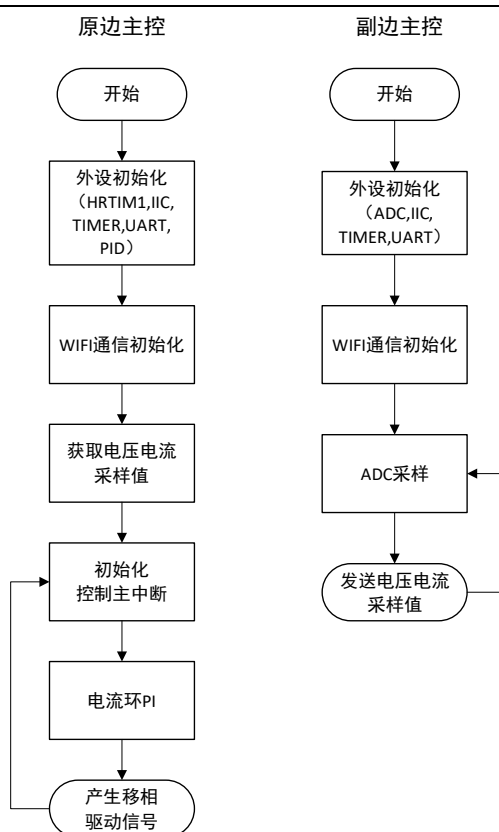


图 2.17 软件总体框架

2.3.2 软件各模块介绍（根据总体框图，给出各模块的具体设计说明。从顶层到底层逐次给出各函数的流程图及其关键输入、输出变量）；

#### （1）移相控制软件设计

移相功能通过 PWM 输出比较功能实现，如图 2.18 所示，其中 CNT 为计数器计数值，ARR 为自动重装载寄存器，CCR 为比较寄存器，Phase 为相位比较值，T 为定时器的一个时钟周期。CNT 计数值会不断自增，当 CNT 计数值达到 ARR 值时会从 0 开始重新计数。

本项目使用 STM32G474 的高精度定时器，通过主定时器 Master Time 给两个定时器 Timer D 和 Timer E 提供同步时钟信号，根据系统的谐振频率设定定时器的周期值为 10625，设置比较寄存器的值为 5312，以保证占空比为 50%，从而不会引入直流分量，避免烧毁线圈。根据改变主定时器和 Timer E 的比较值，可以保证再不改变占空比的情况下，让 Timer E 的输出滞后于 Timer D 的输出，从而实现移相控制。

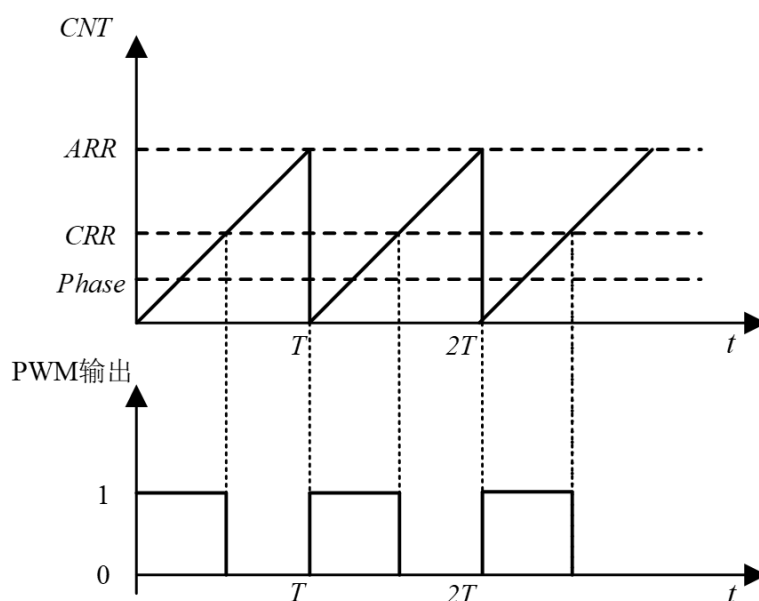


图 2.18 定时器与输出电平时序图

## (2) PI 控制软件设计

先定义 PI 运算所需变量的结构体，包括实际采样值 **Actual**、设定值 **Set**、当前时刻误差  $e(k)$ 、上一个时刻误差  $e(k-1)$ 、上两个时刻误差  $e(k-2)$ 、输出增量  $\Delta U(k)$ 、输出值  $U(k)$ 、KP 系数和 KI 系数。然后定义增量式 PI 运算函数，如图 2.19 所示为增量式 PI 计算框图，输出结果进行限幅，输出结果即为移相角度，限制移相角度为  $180^\circ$ 。

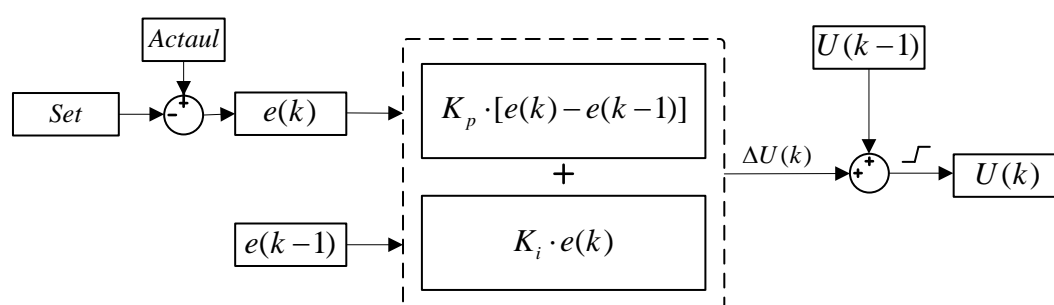


图 2.19 增量式 PI 计算框图

## (3) WIFI 通讯软件设计

副边主控同过串口发送 AT 指令集控制 ESP-01S 模块建立 WIFI 信号，原边接收端主控也同样使用 AT 指令集控制 ESP-01S 模块连接发射端的 WIFI。建立 WIFI 通讯后，副边主控将采样数据通过数据包形式通过串口发送给副边 ESP-01S



模块，副边 ESP-01S 再将数据发送给原边 ESP-01S，原边 ESP-01S 通过串口发送给原边主控。

#### （4）ADC 采样软件设计

副边主控通过 STM32G474ADC 模块的过采样模式采集系统输出电压电流，过采样模式相比较于普通 ADC 采样，过采样模式能 0~3.3V 的模拟量电压信号映射到 0~8192 的数字量中，因此过采样模式具有更高的采样分辨率。同时采用 DMA 的方式读取 ADC 采样的值，减少 CPU 负载，提高数据传输的效率。

## 第三部分 完成情况及性能参数

### 3.1 整体介绍

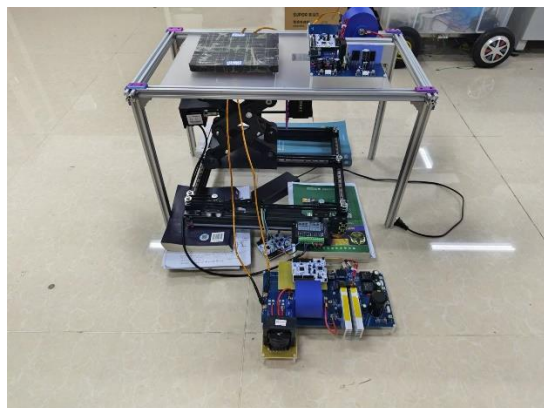


图 3.1 整体系统正面图



图 3.2 整体系统侧面图

如图 3.1 和图 3.2 分别为新能源汽车无线充电系统的两个方向的视图。在整个系统中，使用铝型材和亚克力板搭建了一个简易的平台，模拟汽车底盘高度。平台上方放置接收线圈和 WPT 副边电路，用于汽车端的电能接收。平台下方为三维平台和 WPT 原边电路，发射线圈放置于三维平台上，用于模拟充电端的无线电能传输。当电路系统工作时，机器视觉相机通过定位标签纸，使三维平台实时自动校准接收线圈位置。

### 3.2 工程成果（分硬件实物、软件界面等设计结果）

#### 3.2.1 机械成果：

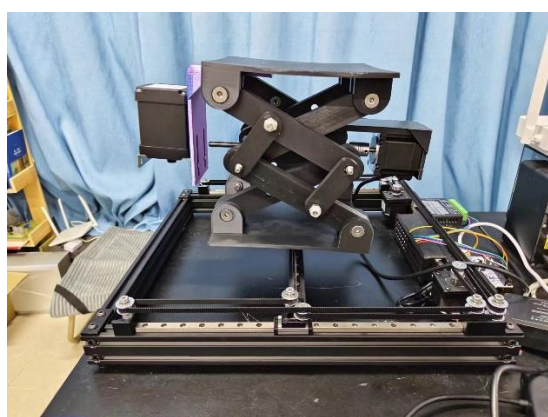


图 3.3 三维平台正面图

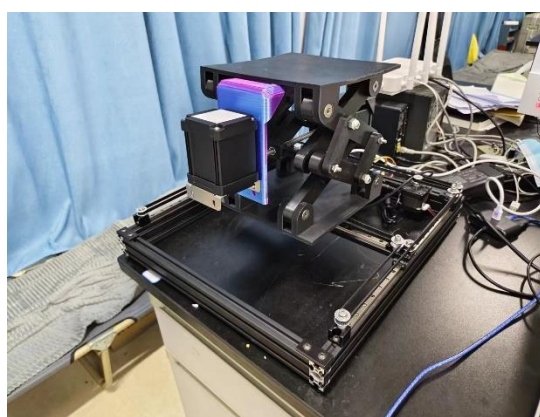


图 3.4 三维平台侧面图

如图 3.3 和图 3.4 分别为三维平台的两个方向视图。该三维平台分为两部分，上半部分为 3D 打印结构件组装的剪叉式升降机，在其左边固定了一个机器视觉相机，用于进行线圈的定位。剪叉式升降机右边是 Z 轴运动控制电机，通过电机

的旋转带动中间螺杆实现平台的升降。下半部分为 X、Y 轴方向移动平台，移动控制方式采用 CoreXY 运动结构，通过两个电机带动同步带实现 X 或 Y 方向的移动。

### 3.2.2 电路成果：

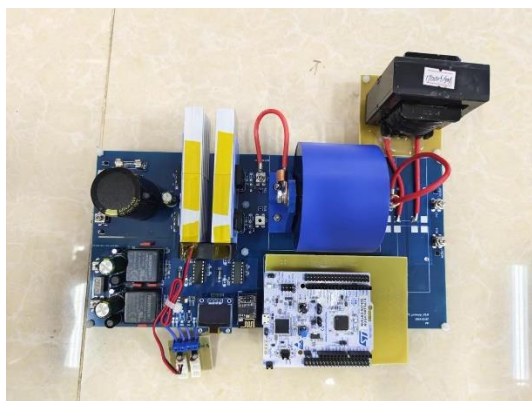


图 3.5 WPT 原边电路实物图



图 3.6 WPT 副边电路实物图

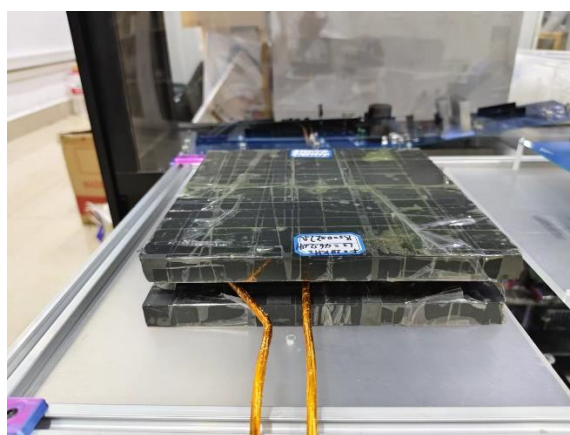


图 3.7 无线线圈实物图

实物电路成果如图 3.5、图 3.6 和图 3.7 所示。图 3.5 为 WPT 原边电路实物图，上半部分为主电路，下半部分为控制电路。右侧蓝色器件为谐振电容，黑色器件为谐振补偿电感。由于电路中电流较大，开关管器件的发热量较大，因此散热片使用横向背鳍放置并加装风扇进行散热，使热功耗能够迅速消散，放置器件过热损坏。图 3.6 为 WPT 副边电路实物图，PCB 排版布局与原边大致一样，不同的是副边电源从谐振网络输入后，再进行电能变换。功率器件散热也与原边一致，使用风扇进行辅助散热。图 3.7 为自制的无线线圈实物图，该线圈实物大小为 20cm\*20cm，实际使用传输距离为 1cm。

### 3.2.3 软件成果：

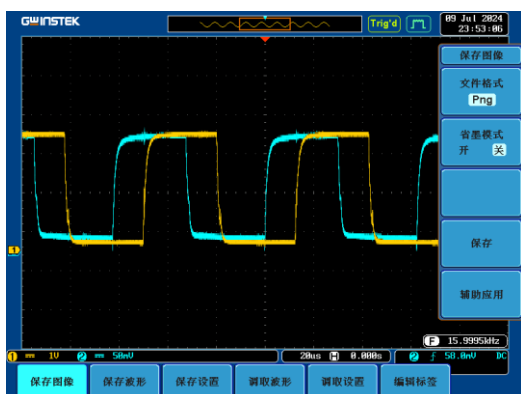


图 3.8 前桥臂和后桥臂的驱动波形

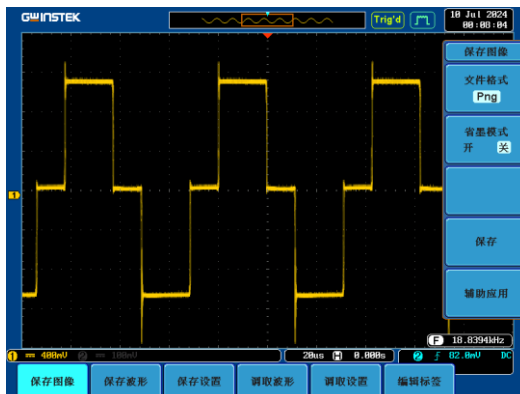


图 3.9 主电路逆变器输出电压波形

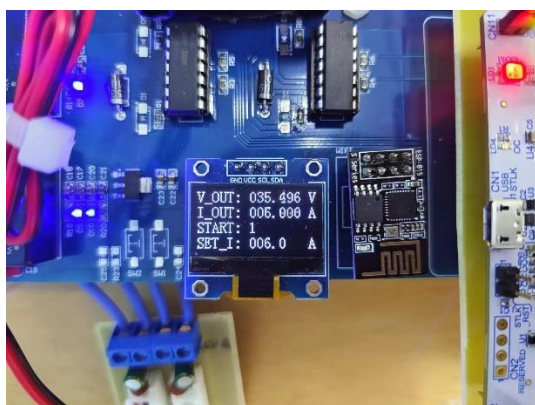


图 3.10 WPT 原边 OLED 显示

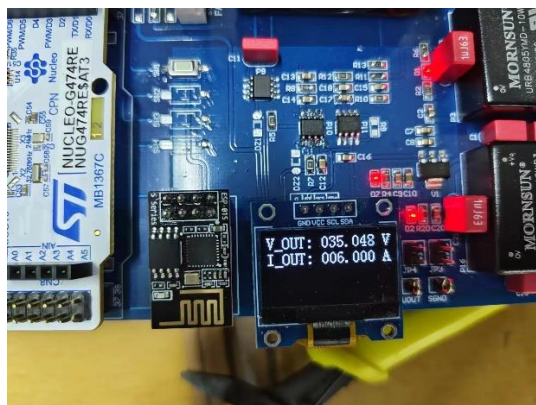


图 3.11 WPT 副边 OLED 显示

如图 3.8 所示为逆变器的前桥臂和后桥臂的驱动波形，蓝色波形为前桥臂高  
管驱动信号，黄色波形为后桥臂低管驱动信号。从驱动波形上可以看出移相控制  
算法效果，在工作过程中使两桥臂之间的相位角发生改变，后桥臂驱动信号滞后  
前桥臂驱动信号，实现移相稳定输出电流大小。图 3.9 所示为主电路逆变器输出  
电压波形，进行移相控制时，逆变器的输出电压波形为三电平方波，实验结果与  
预期一致。

如图 3.10 和图 3.11 分别为 WPT 原边和副边的 OLED 界面显示图，原边的  
OLED 显示的是接收到的采样电压和电流值，系统工作状态以及输出电流设定值。  
而副边 OLED 显示的是输出电压电流实时采样值。在设定值为 6A 的测试情况  
下，OLED 屏幕显示实时的输出电流值 I\_OUT 为 6A，此时的输出电压 V\_OUT  
大小为 35V。



### 3.3 特性成果

#### (1) 系统传输效率测试

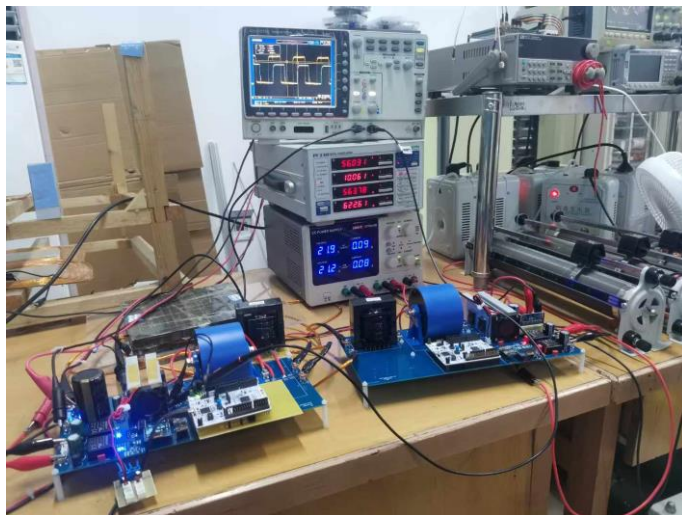


图 3.12 系统功率测量结果

如图 3.12 所示,在输出电流恒定 10A 输出的条件下,测量系统的传输效率。此时的输入功率为 622.61W,输出功率为 563.78W,计算得到的效率为 90.55%。

#### (2) 输出电流随负载大小变化情况

在初始负载电阻大小为  $5.2\Omega$ ,输出电流为 10A 恒定,如图 3.13 所示,其中功率分析仪的第一行显示为输出电压大小,第二行显示为输出电流大小。改变负载电阻大小,输出电流变化如图 3.14~图 3.18 所示。从测量结果可知,该系统实现了很好的恒流效果,在外界负载发生改变的情况下,输出电流也能够保持稳定输出。

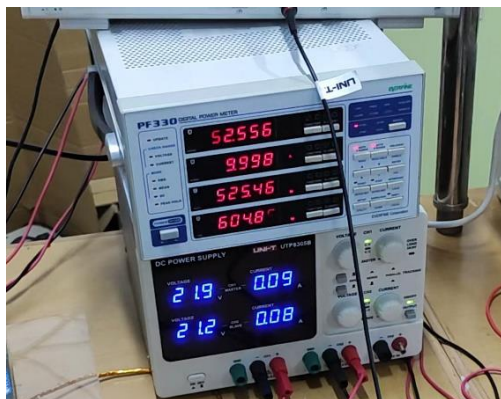


图 3.13 负载电阻大小为  $5.2\Omega$  测量结果

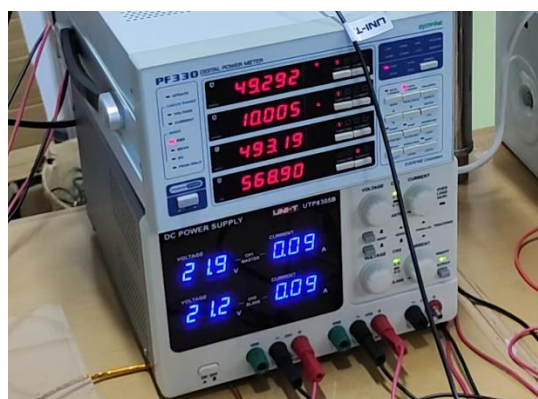


图 3.14 负载电阻大小为  $4.9\Omega$  测量结果

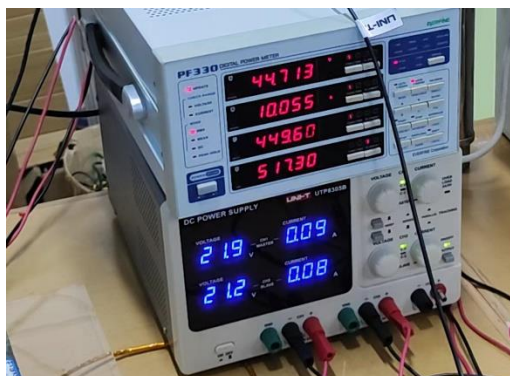


图 3.15 负载电阻大小为  $4.5\Omega$  测量结果

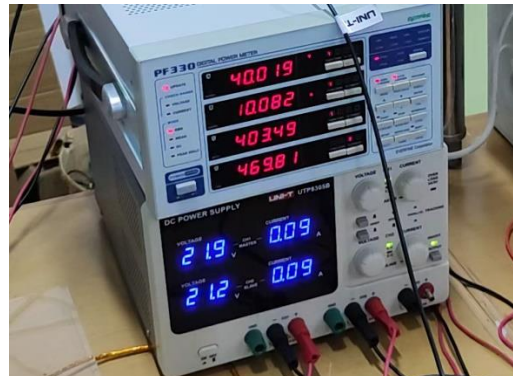


图 3.16 负载电阻大小为  $4\Omega$  测量结果

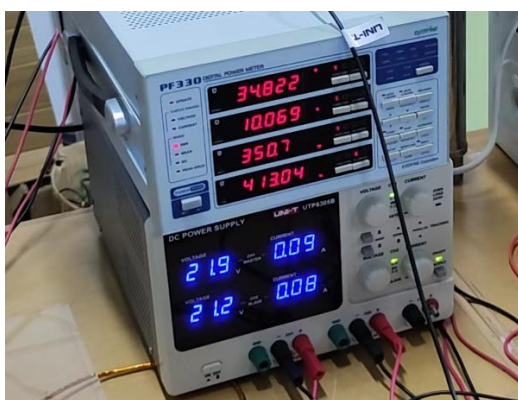


图 3.17 负载电阻大小为  $3.5\Omega$  测量结果

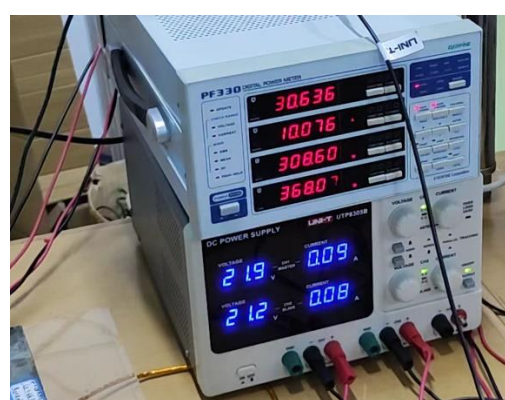


图 3.18 负载电阻大小为  $3\Omega$  测量结果

### (3) 三维平台定位精准度测试

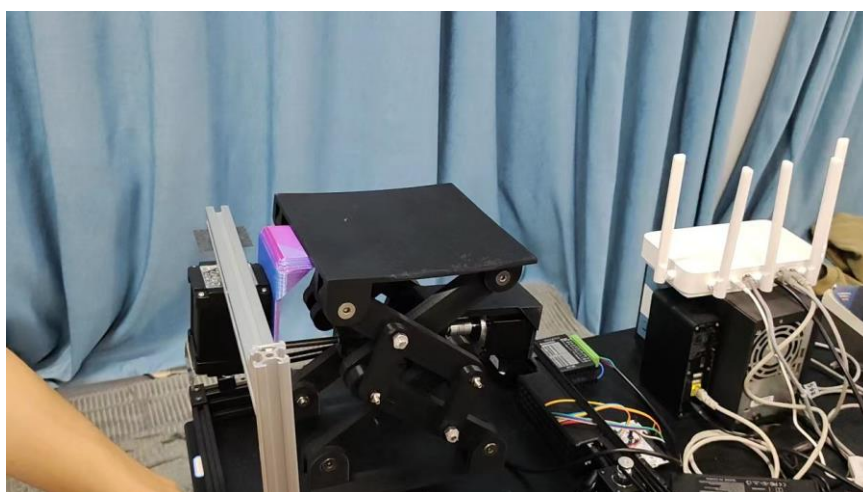


图 3.19 三维平台定位效果图

如图 3.18 所示为三维平台的实际定位效果图，实际测量中三维平台能够精准的跟随标签纸进行移动，相机距离标签纸的 Z 轴距离为预设的 6cm，X、Y 轴定位误差经测量均在 1mm 以内。



---

## 第四部分 总结

### 4.1 可扩展之处

本项目作品基本完成预期功能指标，实现一个新能源汽车无线充电系统，但同时仍然还有许多扩展之处。由于主电路中电流较大，运行时间一长功率器件会发热严重，因此电路中还可以拓展设计一个过温保护电路，放置异常过热导致电路性能出现问题及器件烧毁。同时软件方面可扩展设计一个 UI 界面，并且加入上位机将数据发送至电脑或手机，实现实时汽车充电状况数据的可视化。

### 4.2 心得体会

本项目实现了一个新能源汽车无线充电桩系统，该系统可实现恒定电流输出，自动追踪定位汽车接收线圈实现高效率的电动汽车无线充电。该项目作品在我们团队的分工合作以及老师的耐心指导下，顺利的完成了预期任务和功能。

项目研发的过程中并不是一帆风顺的，前方总是会有未知的各种困难挑战等着我们去解决。我们团队不仅需要承受学业上的压力，还需要面对项目制作过程中的各种奇怪问题并且逐一将它们解决。

项目制作过程中的硬件遇到的问题是最多的。由于我们团队成员未学习过无线线圈相关的知识，因此线圈的制作上花费了不少时间，但好在有老师的指导和帮助，我们成功将无线线圈制作出来并进行实验。但在实际电路实验当中测得的谐振电压电流波形发生畸变，与我们从论文当中了解到的相关知识不符，最初我们认为是电路系统的 PI 参数没调好，因此花费了较多时间去调试，但最终都得出不了结果来。后经过我们的不断实验，大量查找文献资料，同时进行 simulink 仿真联合调试，最终得出是电路中的谐振电感值较小导致的波形畸变。

软件方面遇到过许多大大小小的问题，团队内的软件成员有时会因疏忽大意而导致的代码运行问题，致使我们在很多情况下不明所以的查找问题，其中就在 OLED 屏幕驱动方面和 WIFI 通讯方面遇到过 BUG 问题。但软件最大的难题便是 PI 调试方面，这个几乎花费了我们大部分的研发时间，也在很多情况下因调试问题而导致的心烦意乱。

成功并不是一蹴而就的，而是在平时的训练过程中慢慢积累起来的。此次项目作品的制作过程中，我们团队成员互相帮助、互相鼓励，共同克服各种难关，

---

完成我们的预期任务目标。在此过程中，我们一起开心过，也因项目进展遇到瓶颈和困难而悲伤过，但我们从未退缩过。从项目制作的过程中，我们除学习到了新知识外，更多的收获是学会了团结合作，如何去应对困难并解决困难，最后共同收获成功的果实。

## 第五部分 参考文献

- [1] Z. Li, J. Li, S. Li, Y. Yu and J. Yi, "Design and Optimization of Asymmetric and Reverse Series Coil Structure for Obtaining Quasi-Constant Mutual Inductance in Dynamic Wireless Charging System for Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, no. 3, pp. 2560-2572, March 2022
- [2] X. Zhang, Z. Yuan, Q. Yang, Y. Li, J. Zhu and Y. Li, "Coil Design and Efficiency Analysis for Dynamic Wireless Charging System for Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, July 2016, Art no. 8700404
- [3] Wei, G. and J. Feng, "An efficient power and data synchronous transfer method for wireless power transfer system using double-D coupling coil," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 68, No. 11, 10643–10653, Nov. 2021.
- [4] Wang, Z. and C. Hu, "Design of magnetic coupler for inductive power transfer system based on output power and efficiency," Transactions of China Electrotechnical Society, Vol. 30, No. 19, 26–31, 2015.
- [5] 薛明,杨庆新,章鹏程,等.无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J].电工技术学报,2021,36(08):1547-1568.
- [6] 任晓峰.电动汽车无线充电系统的研制及性能优化[D].哈尔滨工业大学,2014.
- [7] 曲立楠. 磁耦合谐振式无线能量传输机理的研究[D].哈尔滨工业大学,2012.
- [8] 何穆楠.采用 DSP 控制的电动汽车无线充电系统高频电源设计与制作[D].北京交通大学,2018.
- [9] 刘苗苗.电动汽车无线充电 S/SP 补偿拓扑能效特性研究[D].西安理工大学,2018.
- [10] 张坤.电动汽车无线充电关键技术的研究[D].合肥工业大学,2016.
- [11] 王山斌.非车载充电桩升降压式移相全桥 DC/DC 系统的设计[D].武汉理工大学,2018.
- [12] 沈术凯.基于移相控制的磁耦合谐振式无线电能传输系统研究[D].天津理工大学,2020.