WLC 50W 发射器的硬件设计指南

适用于WLC1150

关于本文档

范围和目的

本文档为基于 WLC1150 的电力发射器解决方案电路板提供设计指南，用于无线充电器 (WLC) 应用。

目标读者

无线发射器硬件设计人员，他们使用带有集成 USB Type-C PD 控制器的 WLC1150 无线发射器。

适用于 WLC1150

关于 WLC1150

目录

关于本文档 1
目录 2
1 关于 WLC1150 4
1.1 WLC1150 特性和应用 4
1.1.1 典型应用 4
1.1.2 性能 4
1.2 无线发射器应用中的 WLC1150 5
1.3 MP A2 电力发射器电路板 (REF_WLC_TX50W_N1) 8
2 硬件设计 10
2.1 浪涌电流和输入瞬态保护 10
2.2 电流检测电阻选择 11
2.3 逆变器电源阶段 12
2.3.1 一次谐波近似 (FHA) 分析 13
2.3.2 逆变器桥接的去耦电容器 16
2.3.3 发射器线圈选择 16
2.3.3.1 发射器线圈损耗 17
2.3.3.2 发射器线圈器件选择指南 18
2.3.4 谐振电容器选择 18
2.3.4.1 谐振电容器器件选择指南 18
2.3.5 逆变器阶段的 MOSFET 选择 18
2.3.5.1 栅极驱动器电源 20
2.3.5.2 MOSFET 器件选择指南 20
2.3.5.3 用于逆变器 MOSFET 的缓冲电容器 20
2.3.6 自举电路 21
2.4 控制部分 22
2.4.1 使用 WLC1150 进行 Q 因子估计 22
2.4.2 ASK 解调器 24
2.4.3 WLC1150 相关电路 25
2.4.4 NTC 反馈 25
2.4.5 其它电路 26
2.5 用于风扇电源的辅助降压转换器 26
2.6 EMI-EMC 屏蔽 26
3 设计示例 – 50W 发射器电路板 27
4 PCB 布局指南 30
4.1 电源部分 31
4.1.1 逆变器 32
4.1.2 栅极驱动器、BST、旁路电容器 33
4.2 模拟部分 34
4.2.1 解调器 (电压路径和增益阶段) 34
4.2.2 电流检测 35
4.2.3 Q 因子和降压器补偿 36
4.3 数字部分 36
4.4 热管理 37
4.5 封装尺寸设计指南 38
5 原理图和 PCB 布局检查清单 39

适用于 WLC1150

关于 WLC1150

缩略语/缩略词.....42
参考材料 44
文档修订记录.....45
免责声明 46

1 关于 WLC1150

基于松耦合感应电力传输的无线电力传输是一种广泛使用的近场电源转换拓扑。这些电力传输系统在消费电子设备 (如电动牙刷或手机充电器)、医疗设备 (电源和植入式设备)、汽车应用 (车内充电器) 和工业应用中很常见。Qi 无线电力拓扑在无线电力传输系统的发射器和接收器两半上都使用串联 LC 谐振回路。谐振拓扑提供了较低的 EMI 以及发射器侧 FET 和接收器侧整流器 FET 的 ZVS 导通。发射器和接收器部分之间的带内通信为无线充电提供了紧凑的解决方案。

WLC1150 是一款高度集成的无线发射器控制器，并具有集成的 USB Type-C 电力传输 (PD) 功能。这款控制器非常适合采用了英飞凌高功率专有协议的 50W 充电应用，同时 WLC1150 符合最新的 USB Type-C、WPC 1.3.x 和 PD 规范。它支持可变频率和相位角控制，并具有用于逆变器电源阶段 MOSFET 的集成栅极驱动器。WLC1150 还为辅助电源提供集成栅极驱动器和控制，该辅助电源为风扇供电，从而能在高功率传输期间对接口表面进行冷却。单芯片解决方案以最少的外部电路提供了系统控制和带内通信 (FSK 调制和 ASK 解调)。WLC1150 具有一个完全可编程的 MCU 以及模拟和数字外设，因此可以使用这款控制器开发可扩展的无线充电解决方案。

1.1 WLC1150 特性和应用

1.1.1 典型应用

- 工业无线充电应用
- 智能手机
- 便携式配件
- 家具和家居用品
- 坞站
- 电源工具
- 机器人和无人机

1.1.2 性能

- 符合 Qi v1.3.x 标准的发射器 (MP-A2 线圈)
- 集成了 USB-PD 控制器
  - 支持最新的 USB-PD 版本 3.1
  - 可编程电源 (PPS) 模式
  - 可配置电阻 (RP、RD)
  - 支持 USB-PD 传统充电协议，如 QC 2.0/3.0 和 AFC
- 用于风扇的集成降压转换器控制器，该风扇用于支持热管理
- 用于逆变器阶段 MOSFET 的集成栅极驱动器
- 集成了 Q 因子检测
- 集成了 FSK 调制器
- 宽广的输入电压范围：4.5V~24V
- 通讯端口：I^2C、UART
- 保护
  - 过电流保护 (OCP)、过压保护 (OVP)
  - 通过集成的 ADC 电路和内部温度传感器支持过温保护

适用于 WLC1150

关于 WLC1150

- 温度范围：-40 °C 到 105 °C 的扩展工业温度范围
- 封装：68-pin 8.0 x 8.0 x 0.65 mm LD68B 5.7 x 5.7mm E-PAD

Figure 1 以逻辑框图的形式显示了 WLC1150 的内部架构。更多有关信息，请参阅数据手册[2]。

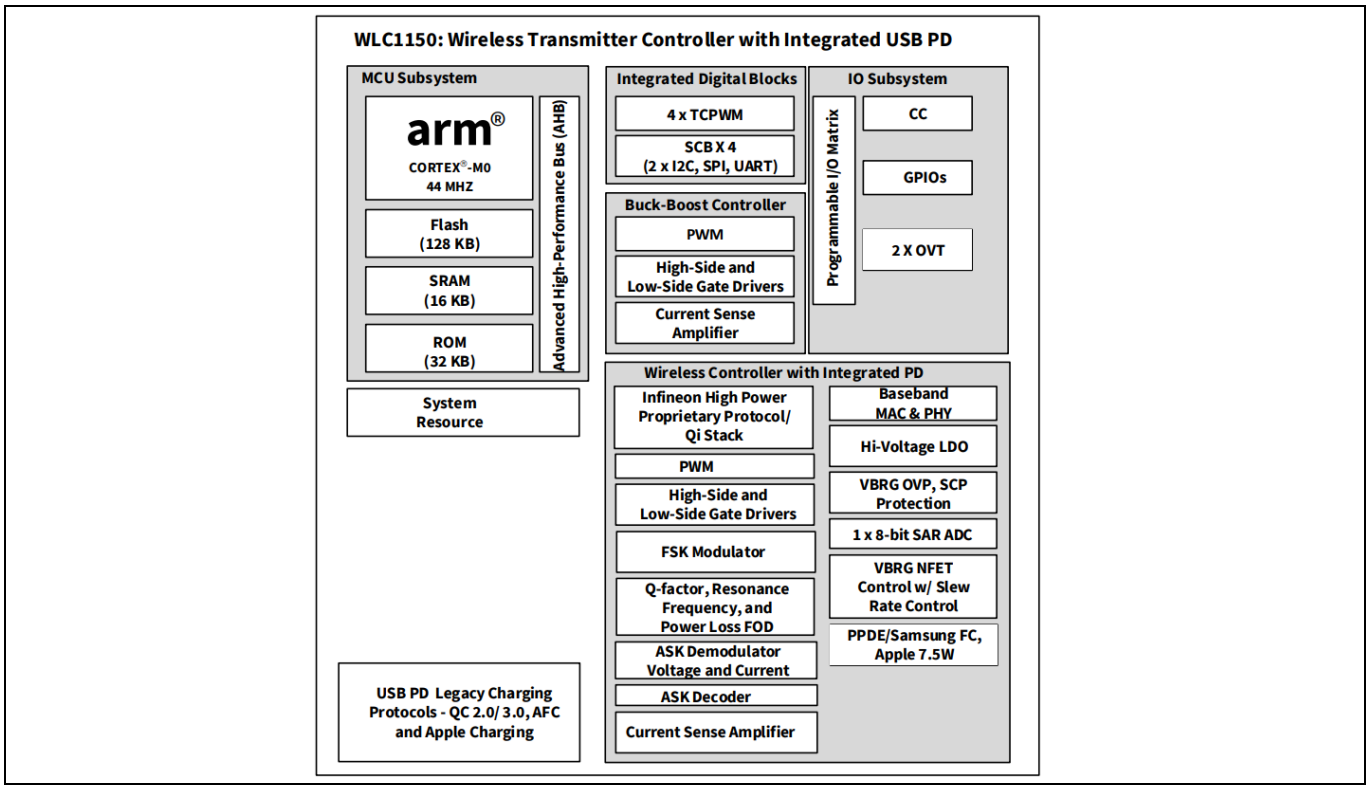

Figure 1　　WLC1150 逻辑框图

1.2　　无线发射器应用中的 WLC1150

Figure 2 显示的是包含 MP-A2 线圈并带有 WLC1150 的单阶段无线电力发射器单元。该单元符合 Qi 标准和英飞凌高功率专有协议。对于逆变器阶段，基于 MP-A2 线圈的发射器系统使用固定输入电压、可变频率和可变相位角控制。单阶段架构具有低损耗和低组件数量的优势。发射器单元的电源是使用一个通过 Type-C 连接器进行连接的 USB-C 电源适配器。对于符合 Qi 标准的操作，发射器与适配器建立 12V 合约。对英飞凌制造的无线接收器进行 50W 电力传输时，合同规定为 20V。通过使用 USB-PD 类型输入，可以在空闲模式下将输入电压设置为 5V，从而降低待机功耗。

VBUS_IN 上的 N 通道接收端 FET 为输入电源提供浪涌电流保护。FET 由 WLC1150 直接驱动，无需任何外部栅极驱动器或打开/关闭速度控制。为了在高功率条件下对发射器接口表面和接收器进行冷却，需要在发射器端强制实现风冷。冷却风扇通常要求 2W 的功率，这样便需要一个辅助电源单元。WLC1150 为风扇电源的低功耗降压转换器提供控制和驱动机制。带有 WLC1150 的发射器电路板只需要最少数量的外部组件进行系统控制。PWM 逻辑和带内通信需要一些信号调理电路和放大器电路。为满足 Qi 1.3.x 标准的要求，该设计使用 I^2C 将一个外部身份验证芯片连接到 WLC1150。

WLC1150 监控各个电源阶段的电流和电压，以实现保护功能。该器件具有一个 32 位 Arm® Cortex®-M0 处理器、128 kB 闪存存储器、16 kB RAM 和 32 kB ROM，因此能够将支持完整 Qi 状态机逻辑或具有高功率的任何其他专有电力传输协议的固件编程到 WLC1150 上。

适用于 WLC1150

关于 WLC1150

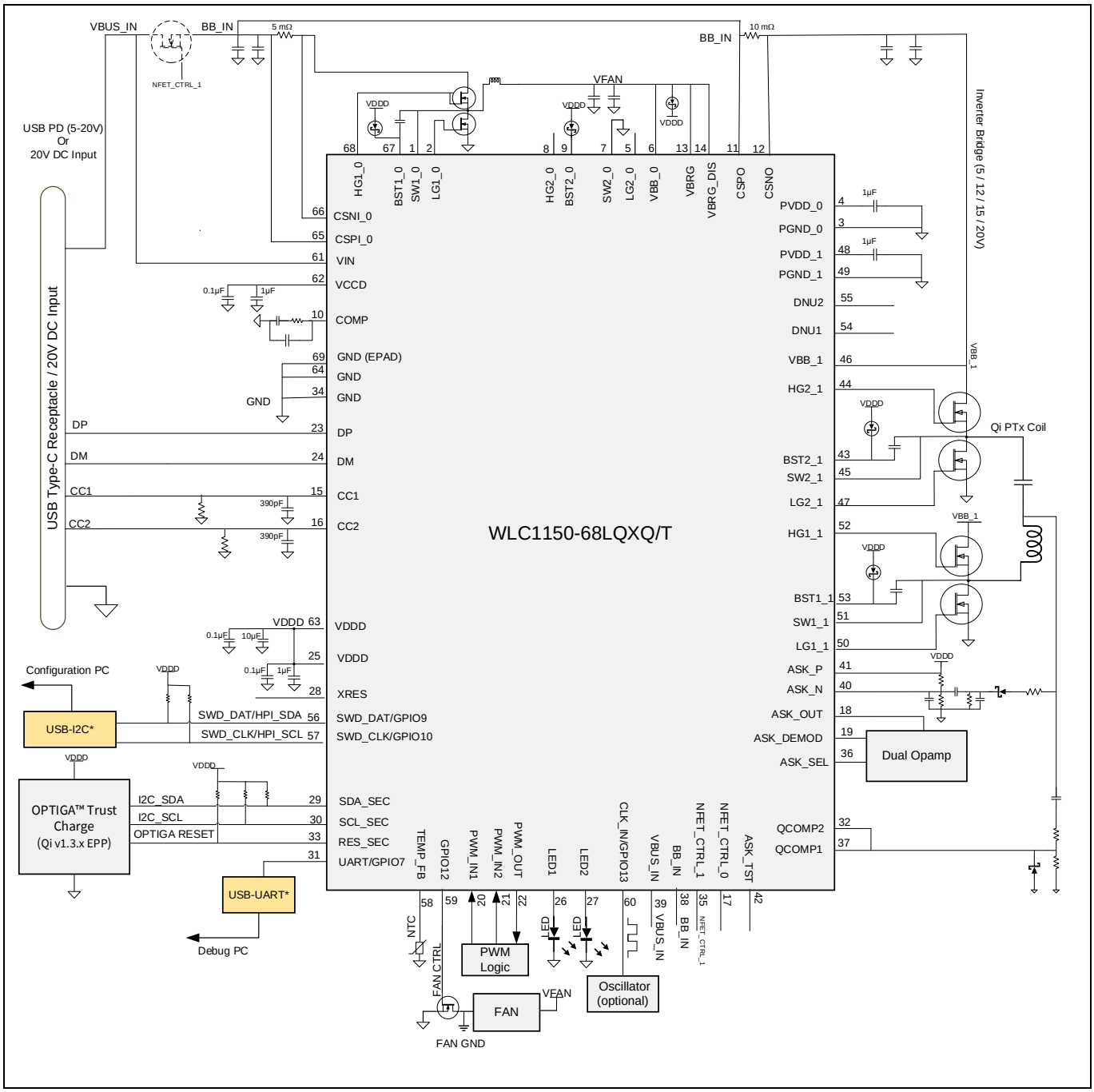

Figure 2　　带有 WLC1150 的单阶段无线电力发射器系统

Figure 3 显示的是用于具有固定直流输入电压的无线发射器的 WLC1150。该配置支持 5V 至 20V 的输入电压范围。降压-升压阶段根据 Ping 相位识别的接收器类型将 VBRG 或逆变器输入电压调节为 12V 或 20V。通过 WLC1150，可以实现对 MP-A2 线圈固定频率和可变相位角控制的要求，从而调节流入接收器的功率。对于这种配置，需要一个外部开关稳压器来为冷却风扇供电。

适用于 WLC1150

关于 WLC1150

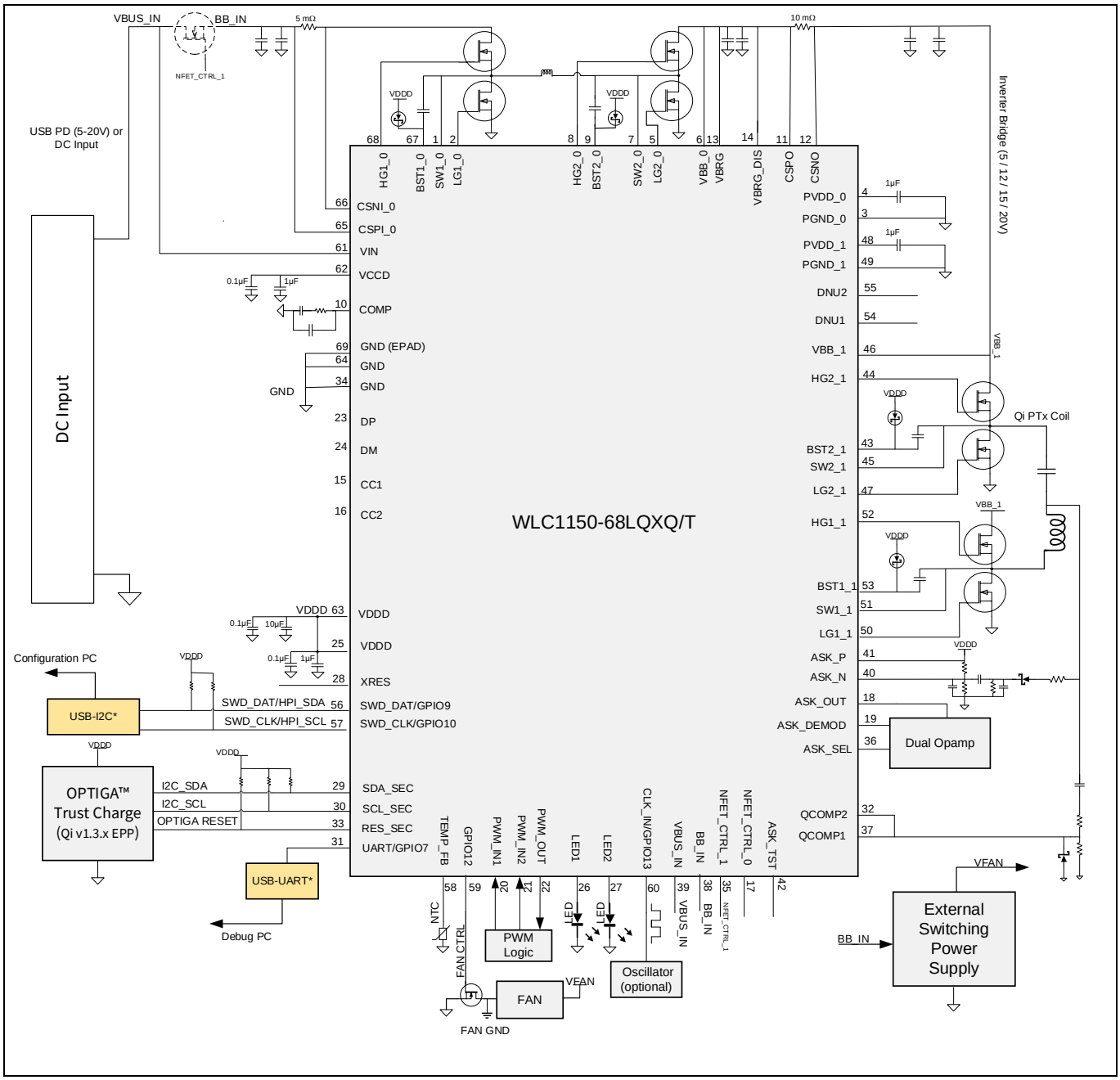

Figure 3　　带有 WLC1150 的双阶段无线电力发射器系统

1.3 MP A2 电力发射器电路板 (REF_WLC_TX50W_N1)

基于 WLC1150 的 REF_WLC_TX50W_N1 电力发射器电路板是一个带有 MP-A2 类型发射器线圈的无线电力发射器设计，具有高功率性能并且符合 Qi 标准。该发射器单元针对 Qi 接收器和英飞凌高功率接收器与来自 Type-C USB-PD 适配器的输入一起工作。固定 20Vdc 输入兼容性仅适用于英飞凌高功率接收器。发射器电路板可提供以下有价值的优势：

- 用于 50W 的电力传输，符合 Qi v1.3.2 标准的低物料清单 (BOM) 计数和成本
- 用于处理 USB-PD、逆变器控制和 Qi 状态机的单个 MCU 系统
- 外形尺寸与现成的充电器相同
- 符合 CE/RE 标准的设计；即将上市的布局
- 可以使用实用程序对关键系统级参数 (异物检测 (FOD) 功率损耗阈值、逆变器开关频率等) 进行配置

在紧凑的四层 PCB 上开发发射器电路板。发射器线圈下方的 PCB 区域装有一个冷却风扇。线圈周围和接口表面上的亚克力设计用于将空气引流到发射器线圈的顶部。这样可以对接收器和接口表面进行冷却。Figure 4 显示了带有关键部分的电路板顶部放置部分。Table 2 列出了无线充电器发射器电路板的主要规格。

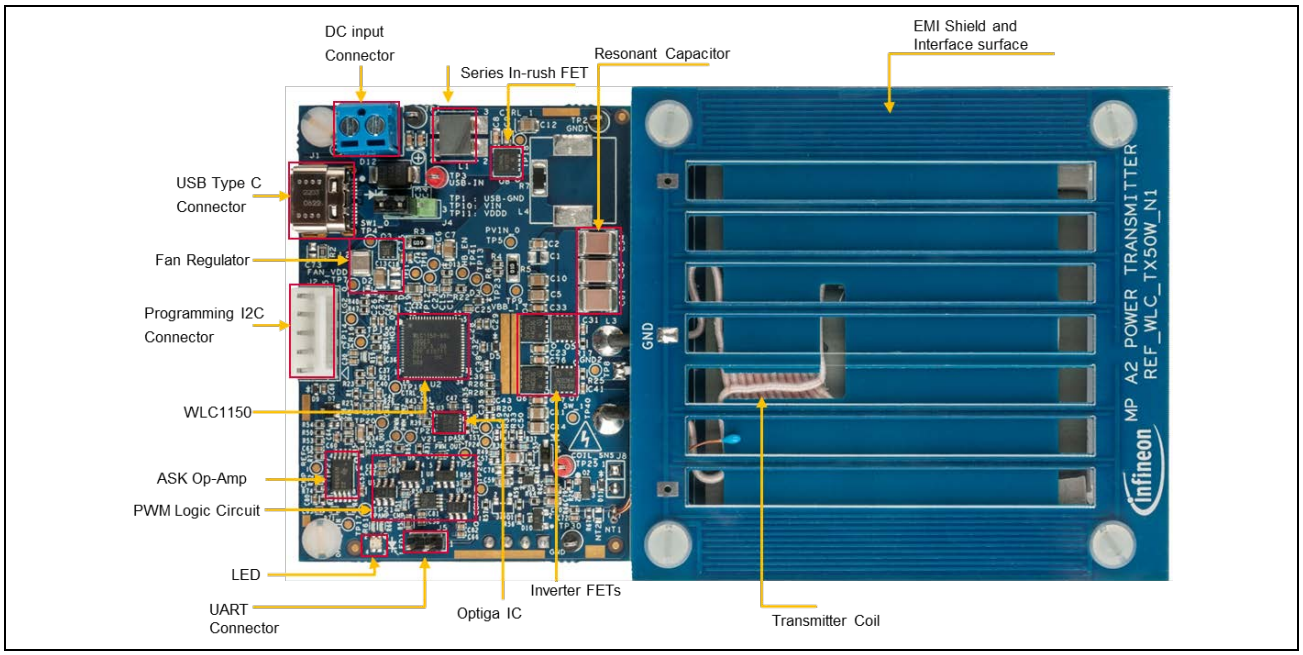

Figure 4 REF_WLC_TX50W_N1 MP-A2 50W 发射器电路板的关键部分

Table 1 REF_WLC_TX50W_N1 的操作模式

模式	输入适配器/电源	Rx 最大输出	Qi/专有
#1	20V 固定直流 (65W)	50W (20V、2.5A)	专有
#2	20V PDO 或 PPS (65W)	50W (20V、2.5A)	专有
#3	15V PDO (30W)	15W	符合 Qi EPP
#4	12V PPS (30W)	15W	符合 Qi EPP
#5	5V – 16V PPS	7.5W	iPhone 7.5W 充电

适用于 WLC1150

关于 WLC1150

Table 2 REF_WLC_TX50W_N1 电力发射器电路板的简要规格 (TBD)

参数	数值
特性列表	
兼容的发射器线圈	单线圈 MP-A2
输入类型/连接器	USB Type-C，电源 20V
输入 PDO 电压 固定电源	15V/20V 20 V
典型输出功率	50W 用于高功率协议模式 15W 用于 Qi 协议
峰值系统效率	>89% (使用英飞凌高功率接收器 (REF_WLC_RX50W_N1))。 >83% (使用测试接收器 WRM483265-10F5-12V-G)
逆变器开关频率	110kHz 至 145kHz
待机功耗	对于 PDO：电流为 8mA、电压为 5V，即功率为 40mW 对于供电电源：电流为 8mA、电压为 20V，即功率为 160mW
ASK 解调器	基于交流电压 (线圈电压) 和基于直流电流
FSK 调制器	满足 Qiv1.3.2 要求
异物检测	基于功率损耗、Q 因子和谐振频率
其它保护	OVP、UVP、OCP、短路保护 (SCP)、OTP
身份验证	符合 Qiv1.3.2 要求
PCB 的详细信息	64 x 47 毫米/4 层/2-1-1-2 盎司铜
工作温度范围	0°C ~ +85°C
存放温度	–40°C 至+125°C
其它特性	三星私有协议，能够为 iPhone 充电的功率高达 7.5W
合规/认证	
USB 认证	USB-PD 版本 3.1
Qi 预合规	Qi 1.3.2
传导和辐射发射预合规性	CISPR 32 B 类或同等认证

2 硬件设计

本节介绍了单段无线发射器电路板关键组件的要求和设计或选择标准，如 Figure 5 所示。灰色模块表示电源阶段组件。绿色模块表示基于 WLC1150 的无线发射器设计中控制部分的电路模块。

本节不包含用于带有 WLC1150 的双阶段发射器的降压-升压转换器设计。欲了解有关双阶段无线发射器中降压-升压转换器以及连接到 WLC1150 的信息，请与英飞凌联系。

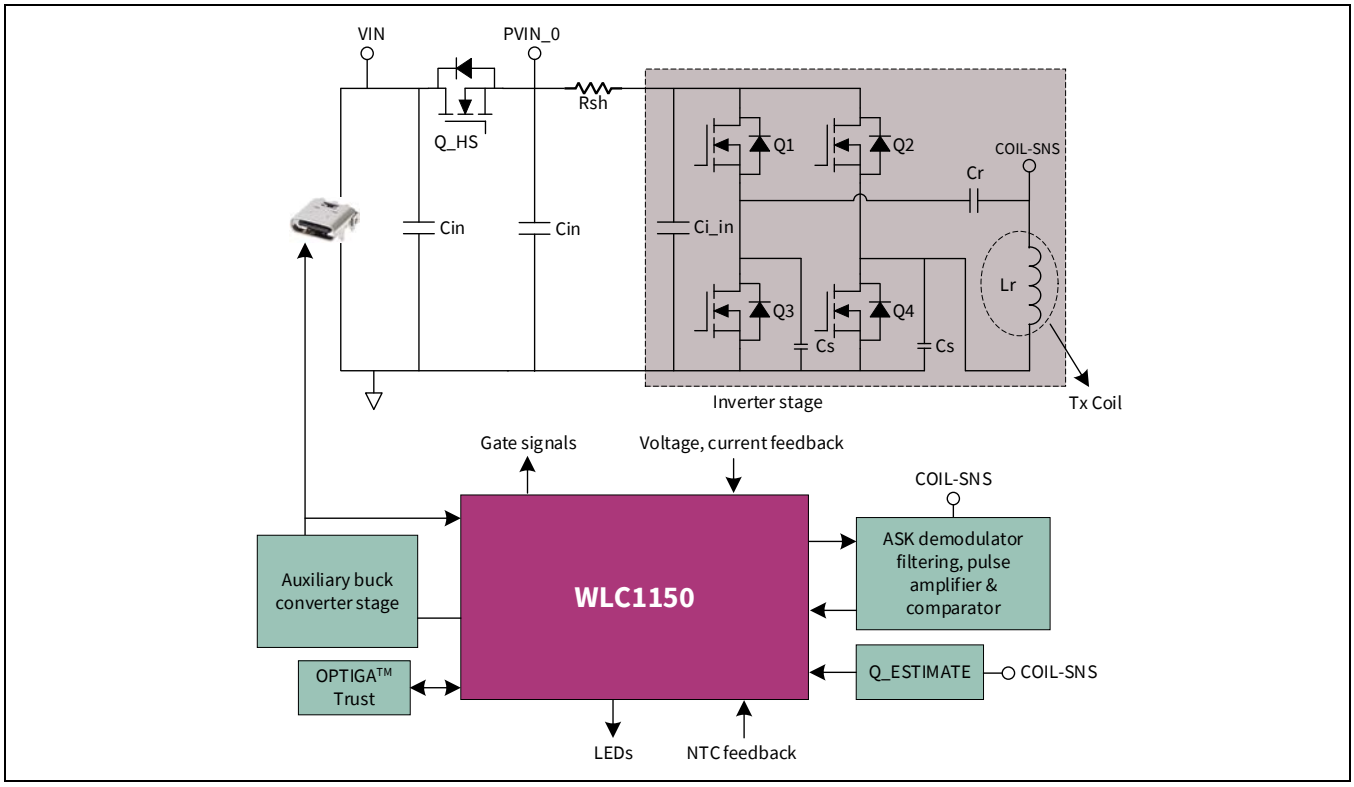

Figure 5 基于 WLC1150 的单段无线发射器电路板的关键组件

2.1 浪涌电流和输入瞬态保护

发射器电路板在电源输入端需要保护元素，以满足输入浪涌/浪涌电流的需要。该设计还可以包括基于辐射测量的 EMI 滤波器。

在持续发生过压事件的情况下，接收端 NFET 可以将发射器电路板电子组件与输入解耦。然而，对于瞬态浪涌的过电压情况，则需要采用瞬态电压抑制器 (TVS) 二极管等被动方法进行保护。

选择用于浪涌保护的 TVS 二极管

1. 二极管的反向工作电压或关断电压额定值应大于系统的最大工作输入电压。最大反向漏电流也应为较低值 (<0.5mA)，这样 TVS 二极管对待机功率的影响则可以忽略不计。
2. 峰值脉冲电流额定应值大于要保护的浪涌电流。
3. 钳位电压应低于系统耐压。

WLC1150 具有一个集成的 USB Type-C PD 控制器，并要符合最新的 USB Type-C 和 PD 规范。USB 输入 (常称为 VBUS) 和接地之间的大电容会引起较大的浪涌电流。USB-PD 规范要求接收源限制连接时输入浪涌电流的值。需要使用大容量电容，以便使由逆变器开关产生的开关纹波降至最低值，并且不能最小化该电容，这样可以降低浪涌电流。为满足发射器单元的浪涌电流要求，WLC1150 集成了一个高电压栅极驱动

器，用于驱动 VBUS 上的接收端 NFET。该栅极驱动器具有打开速度慢的特性，从而能够防止发生电流突然涌入的情况。

接收端 NFET 选择以及 WLC1150 接口

1. MOSFET 的额定电压应大于最大工作输入电压。额定电流则应大于过载期间的最大输入电流。
2. 为得到低导通损耗，请选择一个低 $R_{DS(on)}$MOSFET。该 MOSFET 作为负载开关使用，并且没有任何开关损耗。
3. 使用 WLC1150 的 NFET_CTRL_1 引脚 (引脚 35) 驱动接收端 NFET。该 FET 不需要栅极电阻或栅极至源极下拉电阻。

除了这些组件外，输入部分还可以使用 EMI 滤波器。请注意，位于接收端 FET 前面的有效输入电容不应超过 USB-PD 的要求，否则会导致浪涌电流超过规格要求。

2.2 电流检测电阻选择

对于输入电流测量，WLC1150 使用了一个内部高侧电流检测放大器 (CSA)。该放大器可在高达 21.5V 的高共模电压条件下运行。无线充电中的电流反馈用于逆变器功率测量，从而进行功率损耗校准和 FOD、过电流保护以及短路保护。该反馈还通过电流路径用于 ASK 解调器。

对于 CS 电阻器R_{sh}，WLC1150 则需要一个 10mΩ 的 CS 电阻器，以获得良好的检测范围和 ADC 分辨率。

检测电阻器件选择

检测电阻器损耗和布线的便利性决定了电阻器封装的选择。电阻器损耗为：

$$P_{Rsh} = {I_{Rs}}^2 R_{Rsh}$$

$$I_{Rsh} = I_{in-avg}$$

电阻器封装的额定值应能够处理至少两倍于 P_{Rsh}值的功耗。此外，建议将检测电阻的反馈走线作为开尔文连接使用，以确保反馈的准确性。考虑到走线和焊盘之间的距离，0805 或 1206 封装最适合 CS 电阻器。

2.3 逆变器电源阶段

Figure 6 显示了 REF_WLC_TX50W_N1 中的逆变器阶段。该电源阶段由输入端的滤波电容器和一个全桥逆变器电源阶段组成，该全桥逆变器电源阶段将为发射器线圈 (Lr) 和谐振电容器 (Cr) 所组成的谐振槽供电。按推荐设计，四个 MOSFET 为 MP-A2 线圈组成了一个全桥逆变器。当 Q2 保持为关闭状态，Q4 保持打开状态，同时 Q1 和 Q3 处于切换状态时，逆变器阶段作为一个半桥逆变器运行。缓冲电容器 C_S 有助于降低每个开关节点上 MOSFET 导通和关断期间的 dV/dt。通过适当调整缓冲电容器和死区时间，可以在通过 ZVS 打开 FET 时引起最小的体二极管导通。

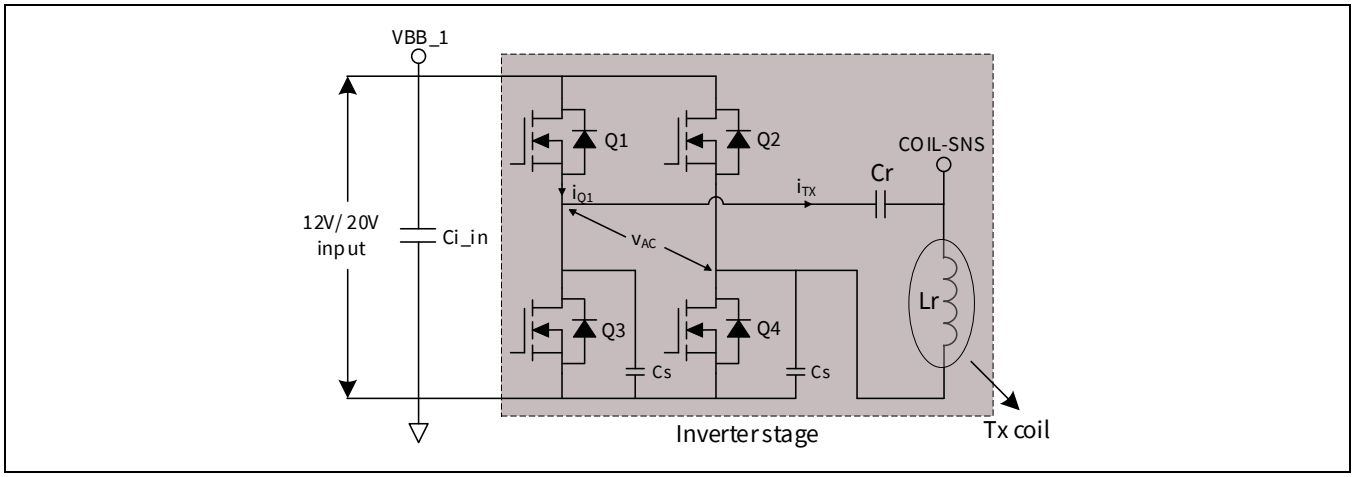

Figure 6 REF_WLC_TX50W_N1 中的逆变器阶段

Figure 7 显示了 180°相位的全桥操作中逆变器阶段的稳态波形。该波形表示正常工作范围内的转换器状态，即达到频率特性谐振峰值后的状态。桥接检测到的阻抗为感性阻抗，因此槽电流 (iTX) 将滞后于槽电压 (VAC)。

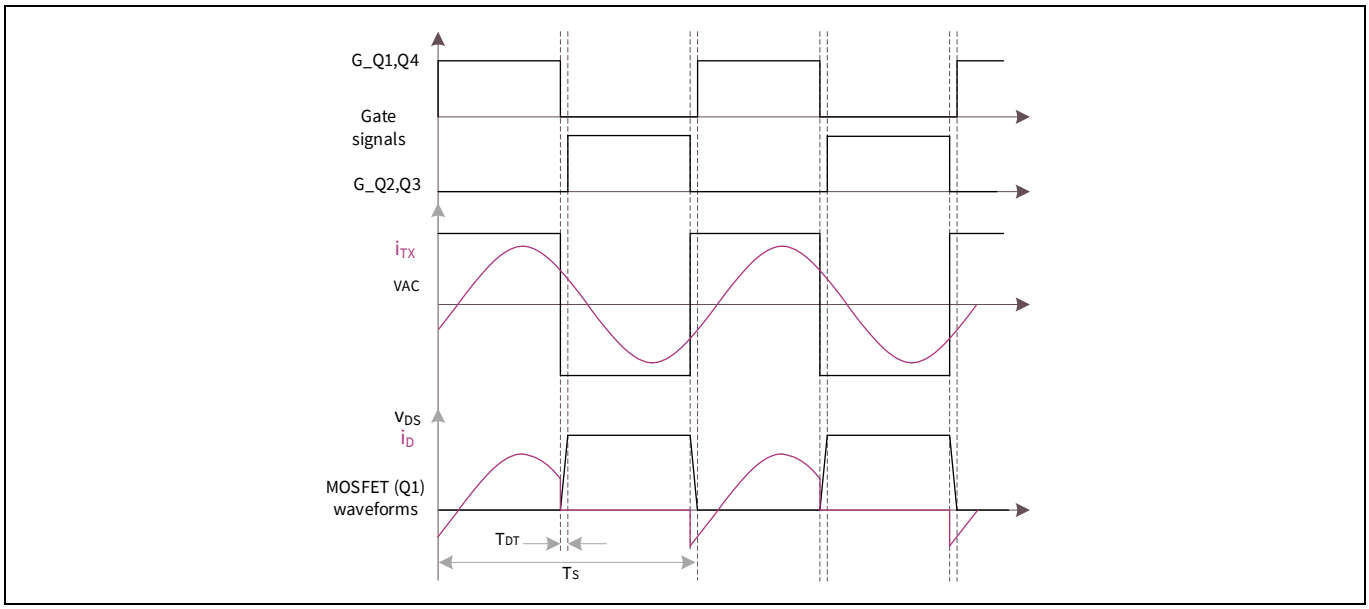

Figure 7 全桥操作模式下的逆变器稳态波形

对于调节操作，WLC1150 在全桥模式下采用相位角控制，并在半桥模式下使用占空比控制。对于相位角控制，栅极脉冲具有 50%的固定占空比，而相邻 MOSFET 栅极脉冲之间的重叠可以调节流入接收器的功率。

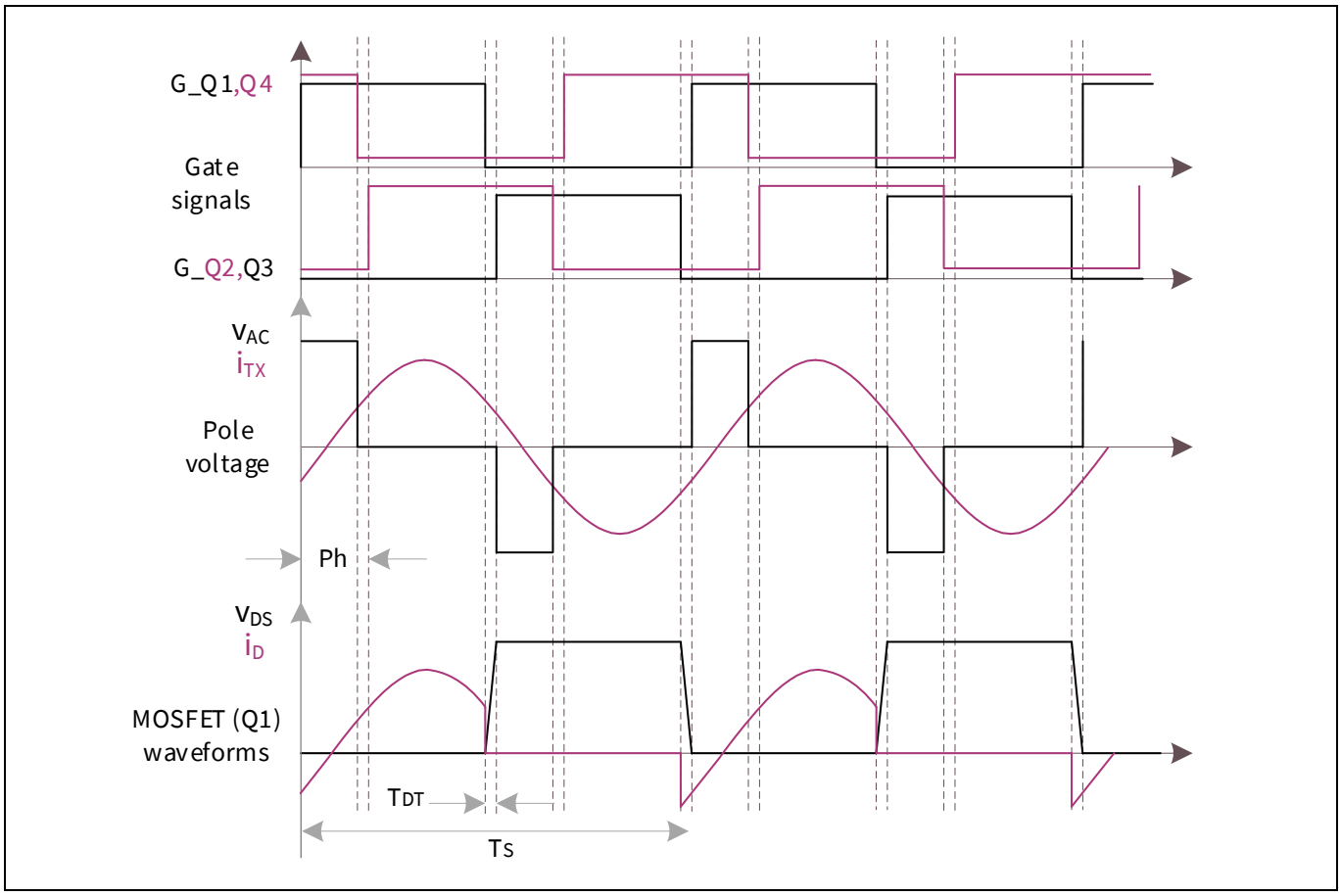

Figure 8　全桥、相位角控制操作模式下的逆变器稳态波形

2.3.1　一次谐波近似 (FHA) 分析

在设计计算器工作表中，FHA 分析用于计算工作频率范围内与频率相关的谐振回路性能。

它根据输入电压、输出电压、O/P 功率、Rx 线圈对齐和 TX 线圈对齐的设计输入计算工作频率、初级侧电流 (均方根和峰值) 和输入电流相位。

Figure 9 显示了松散耦合 WPT 系统的等效电路图。

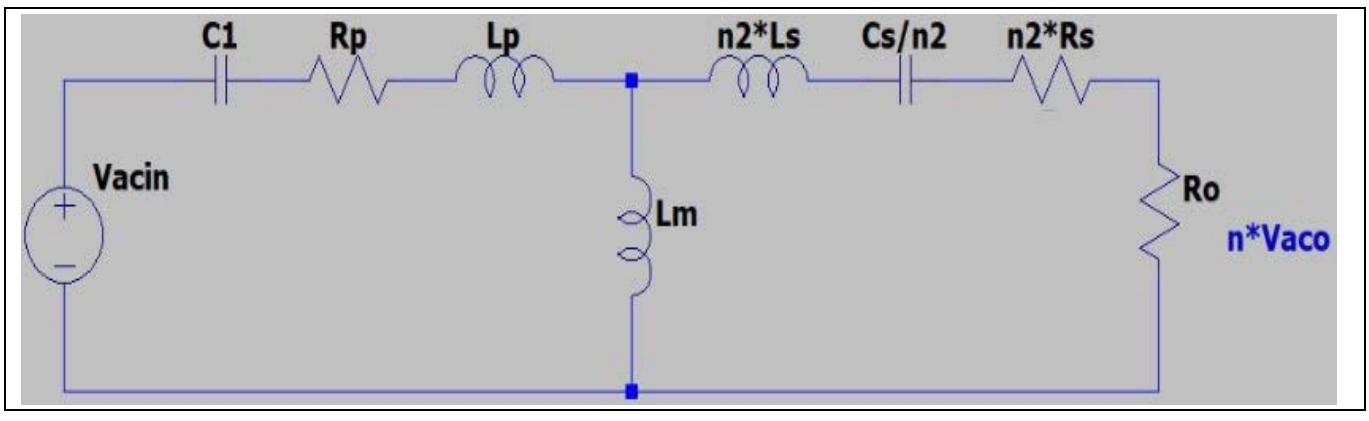

Figure 9　松散耦合 WPT 系统的等效电路图

其中：

C1：Tx 谐振电容器

Cs：Rx 谐振电容器

$Lp = L'_{TX}(1-k)$

L'_{TX}：Tx 线圈与 Rx 线圈配对时的 Tx 线圈电感

k：耦合因子

$Ls = L'_{RX}(1-k)$

L'_{RX}：Rx 线圈与 Tx 线圈配对时的 Rx 线圈电感

N：Tx 线圈和 Rx 线圈的匝数比

$Lm = L'_{TX} - Lp$

Rp：Tx 端线圈交流电阻 (Rac)

Rs：Rx 端线圈交流电阻 (Rac)

$$Ro = \frac{8 * n^2}{\pi^2} * R_L$$

其中，R_L 为接收器的电阻负载。

系统增益的计算公式为

$$V_{gain}(s) = \frac{Zm(s) * Ro}{\big(Zp(s) * Zs(s)\big) + \big(Zm(s) * (Zp(s) + Zs(s) + Ro)\big) + (Zp(s) * Ro)} * R_L$$

其中：

$$Zs(s) = Rs * n^2 + (s * Ls) + \left(\frac{1}{s * Cs}\right)$$

$$Zp(s) = Rp + (s * Lp) + \left(\frac{1}{s * C1}\right)$$

$$Zm(s) = s * Lm$$

Rx 的输出功率为系统增益、输入电压和 RL 的函数。

$$Pout_{Rx(freq)} = \frac{|Vgain(s)|^2}{Ro} * |V_{acin}|^2$$

其中，V_{acin} 为输入 Tx 电源电压的一次谐波。

$$V_{acin} = \frac{4 * V_{dc}}{\pi}$$

V_{dc}：Tx 的输入直流电源电压。

通过使用固定输入、R_L和耦合系数以及功率与频率曲线 (参见 Figure 10)，可以计算给定功率的 Tx 工作频率 (fop)。

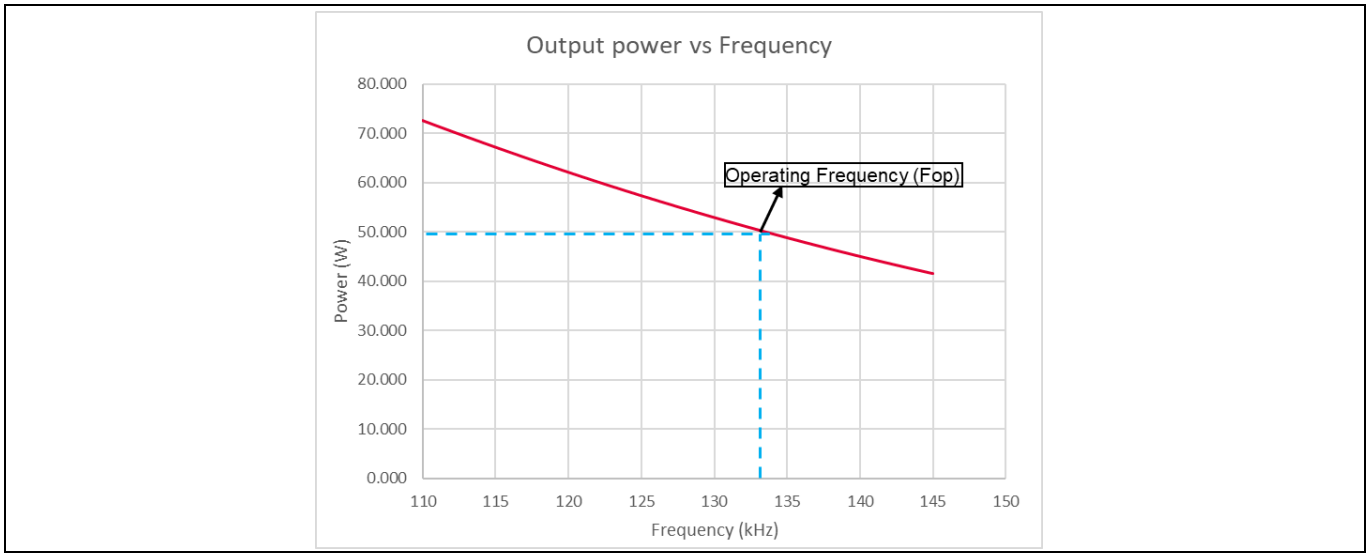

Figure 10　接收器功率 (Pout_rx) 与频率曲线

得到 Tx 工作频率 (fop) 后，便可以计算其他参数。

工作频率 (Fop) 条件下 Tx 线圈峰值电流的计算公式如下：

$$I_{TX_pk}(Fop) = \left|\frac{V_{acin}(s)}{Z_{in}(s)}\right|$$

其中，Z_{in} 为 Tx 端的总输入阻抗，其计算公式为：

$$Z_{in}(s) = Zp(s) + \frac{Zm(s) * (Ro + Zs(s))}{Zm(s) + Ro + Zs(s)}$$

工作频率条件下的 Tx 输入直流电流可按下面公式进行计算：

$$I_{IN}(Fop) = \frac{2}{\pi} * \left|Re\left(\frac{V_{acin}(s)}{Z_{in}(s)}\right)\right|$$

输入电流相位角的计算公式为

$$\Phi_{in}\,(F_{op}) = \,(\pi - \measuredangle Z_{in}\,(F_{op}))$$

Note: *FHA 是一种建模技术，用于分析谐振电源转换器的性能。假设电力传输只使用一次谐波信号。特别是对于常用的 LLC 谐振转换器，当转换器的工作频率远低于串联谐振的频率时，FHA 建模技术便会变得不准确。该情况主要是由输出整流器的非线性引起的，而 FHA 中则没有考虑这一点。*

2.3.2 逆变器桥接的去耦电容器

逆变器阶段在每个半桥桥臂上都有去耦电容器，用于降低开关电源环路电感和逆变器阶段 MOSFET 中因关闭相关 Vds 而引起的过冲和振铃。此外，还在降压输出 CS 电阻器后面放置了大容量电容，并且在逆变器桥接旁边安装了高频噪声去耦电容器。

大电容器可确保逆变器阶段内包含逆变器桥接的无功电流，并且降压输出电容器不会检测到该电流。这样，逆变器桥接 CS 电阻器只能检测到由逆变器接收的有功电流。电容器均方根电流的计算公式如下

$$I_{C_{INrms}} = \sqrt{{I_{TXrms}}^2 - {I_{IN}}^2}$$

其中I_{TXrms}为线圈 RMS 电流，I_{IN}为平均输入电流。当发射器在耦合度最低时传输电力，将获得最坏情况的值。

2.3.3 发射器线圈选择

用于 MP-A2 线圈的发射器线圈参数 (电感和铁氧体屏蔽结构) 都来自 Qi 规范。Table 3 总结了[1]中 MP-A2 线圈的参数。

Table 3 MP-A2 发射器线圈参数

参数	数值	容差
自电感	10 µH	±10%
线圈外径	48 mm	± 0.5 mm
线圈内径	19 mm	± 0.5 mm
匝数	12	–
层数	1	–
铁氧体屏蔽厚度	1.5 mm	–
线圈和屏蔽之间的最小间隙	1.0 mm	–
线圈顶层表面到界面表面的间隙 (dz)	3.0 mm	+0.5/–0.25mm
超出线圈的屏蔽扩展	2.5 mm	–

虽然制造商已经考虑到了发射器线圈的大多数参数，但必须通过正确的垫片和亚克力组合来调整 dz 间隙。Figure 11 显示了 REF_WLC_TX50W_N1 中使用的线圈组装情况。通过使用双面胶带将线圈组装贴装在线圈 PCB 上。界面表面为亚克力片材。使用四个尼龙垫片可调整片材与线圈之间的间隙。通过选择垫片高度使 dz 间隙接近于 Qi 推荐的额定值。

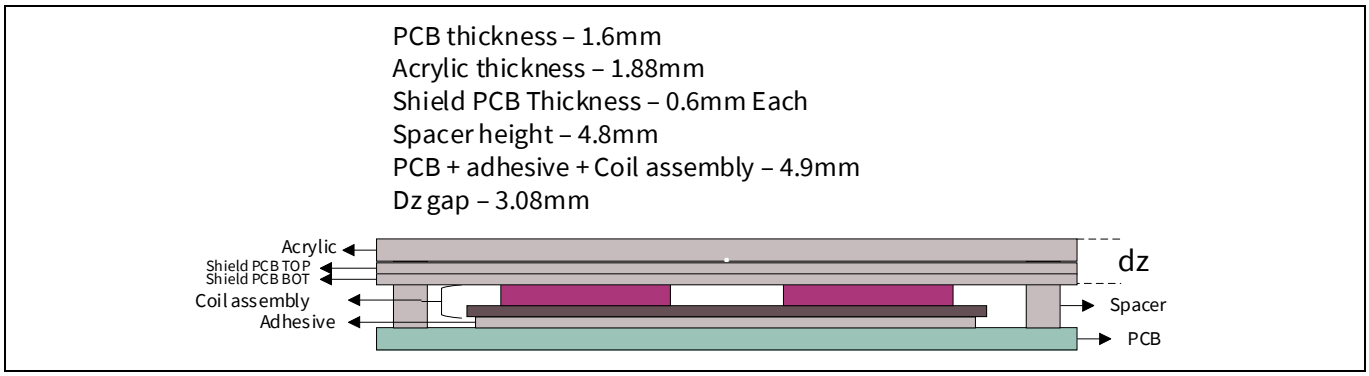

Figure 11 REF_WLC_TX50W_N1 中 MP-A2 线圈组装和相关测量

2.3.3.1 发射器线圈损耗

线圈损耗包括绕组中的传导损耗和铁氧体屏蔽中的磁芯损耗。对于传导损耗，线圈电阻 (包括直流电阻和集肤效应引起的交流电阻) 都会出现。要精确预测传导损耗，请使用制造商所提供的 Q 因子曲线并计算出工作频率条件下的总电阻。或者，使用阻抗分析仪获得工作频率条件下的总线圈电阻 (Figure 12)。

$$P_{coil-cond} = {I_{TXrms}}^2 R_{total}$$

$$R_{total} = \frac{Q_{Fs-inv}}{2\pi F_{Sinv} L_{tx}}$$

其中I_{TXrms}为线圈 RMS 电流，R_{total}为线圈的交流和直流电阻之和。通过 FHA 分析或实际测量，可以估算最坏情况下的线圈电流。在低耦合情况下进行全功率传输时，将观察到最大的线圈电流。由于线圈中有较大的无功电流组件，因此电流幅度较高。

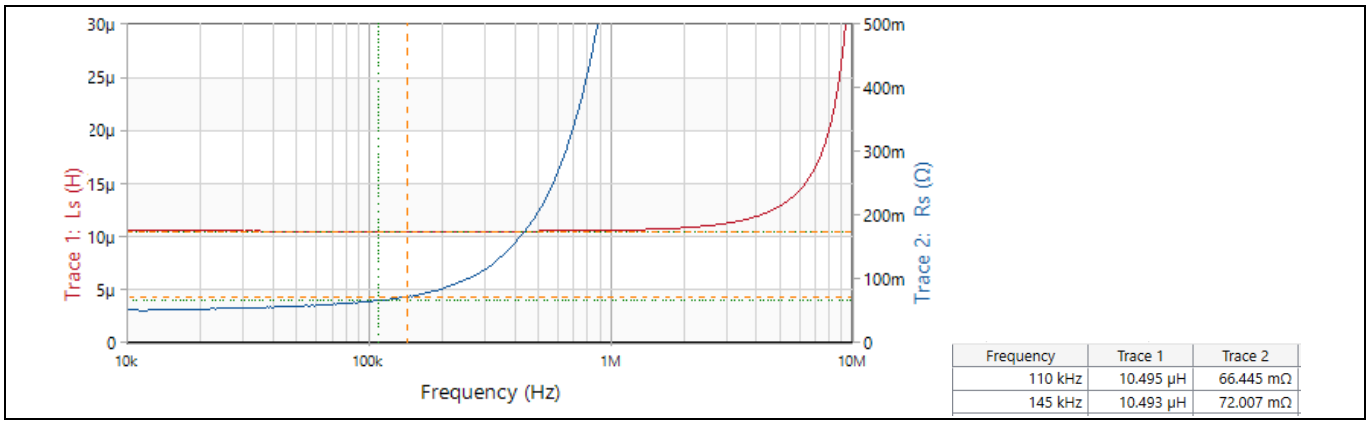

Figure 12 REF_WLC_TX50W_N1 中使用的 MP-A2 线圈的电感和电阻测量

Qi 建议使用镍锌或锰锌铁氧体磁芯屏蔽线圈。铁氧体磁芯具有交变磁化，从而导致磁芯损耗。铁芯损耗的计算与降压器电感的计算相似：

$$P_{内核} = C {F_{S-inv}}^{\alpha} {B_{pk}}^{\beta} V_e$$

$$B_{pk} = \frac{L_r I_{TX_pk}}{N A_C}$$

其中常数C、α和β均由制造商指定：

V_e为磁芯材料体积

B_{pk}为磁芯中的峰值通量。

A_C为磁芯横截面积 (铁氧体宽度和厚度的乘积)。

2.3.3.2 发射器线圈器件选择指南

1. 所选器件应符合 MP-A2 线圈的 Qi 要求 (电气设计、铁氧体屏蔽设计等)。
2. 电感值容差不应该超过±10%。
3. 优先使用高 Q 因子线圈 (110 kHz 至 145 kHz 范围内的较低总电阻)，从而降低损耗。

2.3.4 谐振电容器选择

由 Qi 推荐与 MP-A2 线圈一起使用的谐振电容值为 247nF ±5%。可以将单个电容器或电容器组作为谐振电容器使用。谐振槽是一个串联 LC 槽，且电容器电流与线圈电流相同。电容器中的损耗主要是单独由电容器 rms 引起的。

谐振电容器或电容器组的损耗来自等效串联电阻 (ESR) 电容器：

$$P_{Cr} = {I_{TXrms}}^2 \frac{R_{Cr}}{N_{Cr}}$$

其中，R_{Cr}为单个电容器的 ESR，N_{Cr}为组中电容器的数量。

2.3.4.1 谐振电容器器件选择指南

1. 所选器件应符合 Qi 数值和容差要求。电容值不应在整个工作频率和电压范围内发生变化。应使用具有 C0G 型电介质或同等产品的电容器。
2. 电容器组 RMS 电流额定值不应导致温度升高超过电容器额定值。
3. 谐振电容器的额定电压必须确保 Qi 状态机中所有相位的故障安全操作。在电力传输期间，电容器电压较低。然而，在某些工作情况下，可能会导致谐振电容器两端产生高电压。
   a) 当向负载供电时，耦合的突然变化会瞬间增加负载电压、槽电流，从而提高电容器电压。尽管控制回路最终会降低电流，但电容器不应该在电压的瞬时升高时而失败。
   b) 发射器的最低工作频率接近于主要 LC 槽的谐振频率。如果在以最低工作频率传输电力时将接收器从界面表面移除，则主要 LC 槽将保持通电状态，并且其频率会接近于谐振频率，直到数据包超时使逆变器关闭为止。接近于谐振频率的操作会引起较大的电容器电压。电容器需要确保在不引起发生故障的条件下处理该电压。可以使用 FHA 单独为主要槽估算该电压，并且需要考虑 20V 输入情况下的值。

为防止电容器因受电压影响而失效，建议额定电压为 200V。该值与 Qi 规范中的数据一致，其中电容器电压预计达到 200V 的峰-峰值。

2.3.5 逆变器阶段的 MOSFET 选择

MOSFET 额定电压应超过输入电压的最大值，其中包括输入 OVP 电平。电流额定值应大于峰值发射器线圈电流值。为保证可靠运行，应考虑最高外壳温度额定值情况下的 MOSFET 电流额定值。

$$V_{ds-pk} = \max\left((1.5\ \mathrm{x}V_{in}), \text{输入 OVP 电平}\right)$$

$$I_{ds-pk} = I_{TX-pk}$$

适用于 WLC1150

硬件设计

MOSFET 中的功率损耗是决定 MOSFET 器件选择的另一个关键参数。在使用引起 ZVS 打开的栅极脉冲前，在打开期间 MOSFET 电流将为负值，如 Figure 7 所示。然而，MOSFET 需要进行硬关闭，该操作会引起主要的开关损耗。此外，每个 MOSFET 在半个开关周期内被导通。根据该情况，MOSFET 的损耗参数如下：

$$I_{Qrms} = \frac{I_{TX-pk}}{2}$$

$$P_{cond} = {I_{Qrms}}^2 R_{ds(on)}$$

$$P_{SW} = P_{SW-OFF} = \frac{1}{2} V_{in} I_{SW,off} t_{OFF} F_{op}$$

$$t_{OFF} = \left(R_{GOFF} C_{iss} \frac{V_{gp}}{V_{gth}}\right) + \left(\frac{R_{GOFF}}{V_{gp}} V_{in} C_{rss}\right)$$

其中：

R_{GOFF}为下降栅极电压的栅极电阻 (MOSFET 内部栅极电阻、驱动器下拉电阻和外部栅极电阻 (若有) 之和)

C_{iss}和C_{gd}分别为 MOSFET 输入电容和反向传输电容。

V_{gth}和V_{gp}分别为数据手册[2]中指定的 MOSFET 栅极阈值和栅极台阶电压。

MOSFET 电容C_{gd}是非线性的，并且很难将非线性包含在损耗计算中。包含非线性的一种方法是对[4]中的C_{rss}求平均值。

$$C_{gd} = \frac{C_{rss}@0V + C_{rss}@V_{in}}{2}$$

关闭电流$I_{SW,off}$是桥接电压极性更改瞬间的线圈电流。请参见 Figure 13，根据线圈电流在打开和关闭期间识别 MOSFET 电流。此外，还可以根据使用槽电流幅度和输入电流相位角的 FHA 模型来预测该电流。

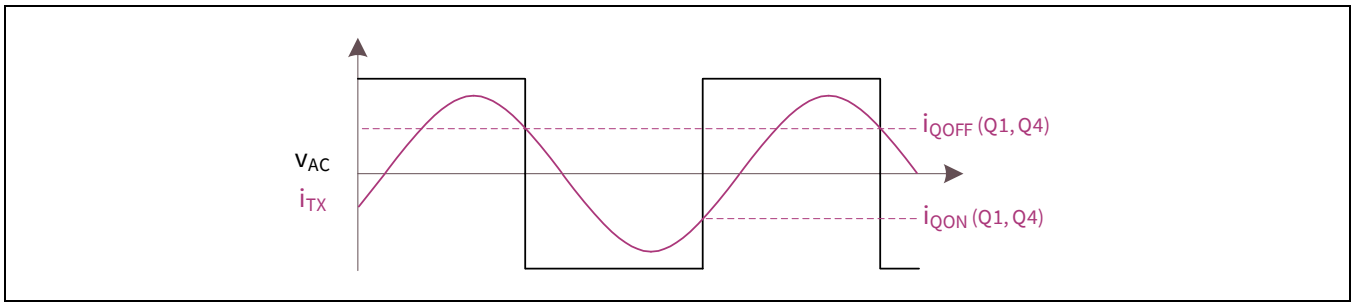

Figure 13　根据线圈电压和电流波形识别 MOSFET 打开和关闭情况

2.3.5.1 栅极驱动器电源

栅极充电和放电会消耗一定的功率，该功率由栅极驱动器电源提供。栅极功率与总栅极电荷和开关频率的函数关系：

$$P_{GATE} = Q_G V_{DDD} F_S$$

其中：

V_{DDD}为驱动器供电电压。

Q_G为栅极电荷。数据手册[2]中提供了该值，并且必须为V_{DDD}选择该值。

2.3.5.2 MOSFET 器件选择指南

1. 应针对V_{ds-pk}和I_{ds-pk}的处理提供所选器件的额定值。该值适用于数据手册中指定的整个工作温度范围。
2. 选择具有低 $R_{DS(on)}$的器件，以降低传导损耗。对于低耦合操作，即使在轻载条件下也会产生较大的循环电流。通过低 $R_{DS(on)}$可以降低轻功率损耗。
3. WLC1150 中的集成栅极驱动器以 5V 电压驱动 MOSFET 栅极。所选的 MOSFET 器件应由逻辑电平驱动(在栅极电压为 4.5 V 条件下应有指定的 $R_{DS(on)}$)。
4. 优先选用具有低C_{rss}和Q_G的 MOSFET，从而使开关损耗降至最低。
5. WLC1150 集成了栅极电阻，可以通过固件将该电阻配置为高达 33 Ω 的值。此外，该器件还具有内部下拉电阻器，并且无需外部栅极电阻器。
6. 优先使用 SMD 封装的 MOSFET。避免使用通孔器件，因为引线电感会增加开关损耗和辐射。
7. 对 MOSFET 封装的要求是，可以通过自然冷却进行热管理，而不占用太多 PCB 面积。有关 MOSFET 的热管理，请参阅 4.4 部分。

2.3.5.3 用于逆变器 MOSFET 的缓冲电容器

由于 ZVS 操作，打开开关损耗和 C_{OSS} 损耗均为零。MOSFET C_{OSS} 放电所需要的时间取决于互补 MOSFET 关闭瞬间发射器线圈的电流大小。dV/dt 则取决于关闭电流和 C_{OSS} 值。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{I_{SW,off}}{C_{OSS}}$$

当死区时间为一个固定数值时，$I_{SW,off}$将快速对器件 C_{OSS} 电容进行放电，并且 MOSFET 体二极管将开始导通。使用栅极信号时，MOSFET 将通过 ZVS 打开。栅极信号之间的死区时间应足够长，从而可以确保漏极电压已将 C_{OSS} 完全放电并启动了体二极管的导通。

如果与 dV/dt 相比，可设置的最小死区时间更长，则会有一段时间体二极管在短时间内进行导通，直到相应的栅极信号被置为有效为止。四个 MOSFET 都存在死区时间损失，对于 50W 这样的功率，死区时间损失会对效率产生影响。与一个半桥器件并联的缓冲电容器 (C_S) 将减慢 dV/dt 并确保体二极管导通降至最小值，如 Figure 14 所示。

使用 C_S 时有两个好处。它减慢了 MOSFET 的 dV/dt，从而减少了辐射。它还确保了最短的体二极管导通时间，并获得良好的效率。

为得到关闭电流的最大幅度，请计算缓冲电容器的值，从而能够在最短的可设置死区时间内使开关电压变为零。

$$C_S = \frac{I_{SW,off-max} T_{DT}}{V_{IN}}$$

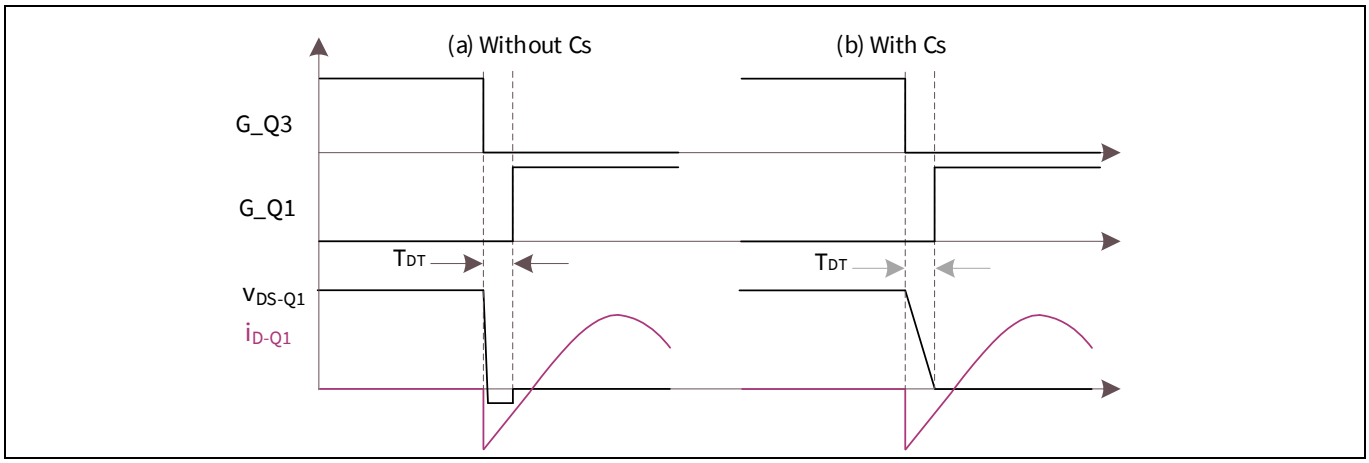

Figure 14　缓冲电容器 (CS) 对开关性能的影响

2.3.6　自举电路

降压器阶段 FET 由 WLC1150 的内置栅极驱动器驱动。高侧 MOSFET 需要一个以开关节点或 Q_HS 发送源为参考的供电电压。使用由C_{boot}和D_{boot}构建的自举电路 (参见 Figure 15) 作为 Q_HS 的电源。

C_{boot}必须能够提供一个电荷 (= 2*栅极电荷) 并保持其全电压。如果该条件得不到满足，则 Q_HS 栅极驱动电源上会出现大量纹波。

$$C_{boot} \gg 20C_g$$

$$C_g = \frac{Q_g}{\mathrm{VDDD} - V_{F-Dboot}}$$

$\mathrm{VDDD} = V_{dr}$为供电电压，并与 Q_LS 栅极驱动电源相同。

Q_g为 MOSFET 的栅极电荷。

$V_{F-Dboot}$为自举二极管D_{boot}的正向压降。

选定的自举电容 (C_{boot}) 要能够承受开关节点电压 (SW1_0) + VDDD。

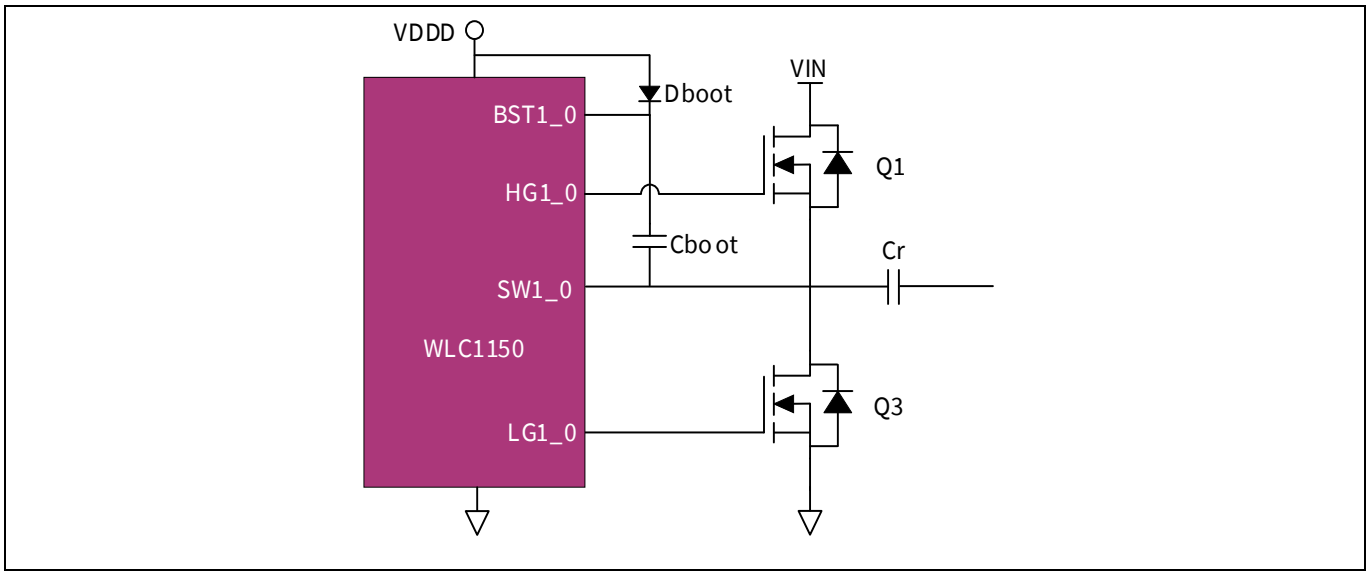

Figure 15 自举电路

自举二极管 (D_{boot}) 要能够阻断全功率轨电压。在高侧 MOSFET (S1) 打开时可以查看该情况。必须使用一个快速恢复二极管，以便以最大程度减少从自举电容器 (C_{boot}) 反馈到 VDDD 电源的电荷量，同样，如果电容器必须长时间存储电荷，则高温反向漏电流将起着重要作用。自举二极管的额定电流为平均栅极电流：

$$I_{Dboot} = \frac{P_{GATE}}{\mathrm{VDDD}} = Q_G F_S$$

2.4 控制部分

用于 MP-A2 的无线发射器应用中的 WLC1150 需要最少的外部电路。在控制部分中，Q 因子估计、ASK 解调器以及线圈温度测量都需要信号调理电路。WLC1150 需要标准去耦电容网络和自举电路组件来驱动电源阶段。

2.4.1 使用 WLC1150 进行 Q 因子估计

WLC1150 使用线圈电压信息计算线圈 Q 因子。较低的 Q 因子和谐振频率变化表示电力传输前出现了 Rx、FO 或两者的组合。主要谐振回路以少量脉冲激励，并且通过衰减的线圈电压波形可以计算 Q 因子和谐振频率，如 Figure 16 所示。与界面表面上存在 Rx 或 FO 的情况相比，励磁后的线圈电压在没有 Rx 的情况下衰减得更慢。

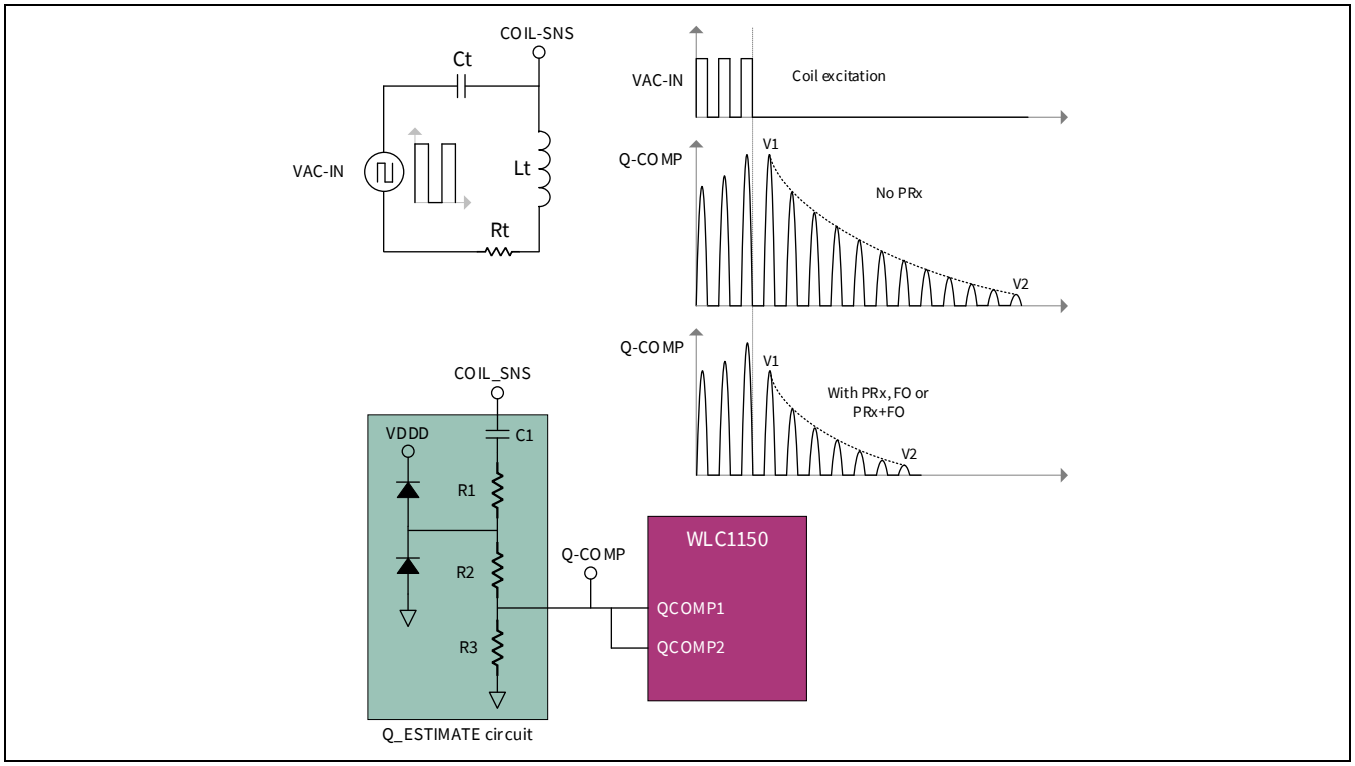

Figure 16　使用 WLC1150 进行 Q 因子估计

通过衰减的电压波形计算 Q 因子，具体方法如下：

$$Q = \frac{\pi\,(t_2 - t_1)F_r}{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} = \frac{\pi\,N}{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}$$

N 为t_1和t_2间隔之间衰减波形的周期数，其中捕获了V_1和V_2，F_r为接收器或 FO 或两者影响下主槽的谐振频率。

请参阅 REF_WLC_TX50W_N1 原理图，了解推荐的与 WLC1150 一起使用的 Q 因子估计电路。Q 因子估计电路的组件选择标准如下：

1. 钳位二极管应该为低漏和低正向压降类型。在最高工作环境温度下，理想的漏电流不能超过 100nA。超过 100V 的标准恢复型二极管额定电压适合该应用。
2. 二极管钳位对线圈电压的整个负半部分进行钳位。钳位电流通过二极管和 R1。对 R1 进行设置，以便在最高工作线圈电压条件下，电流仍小于 1mA，这样可以实现低损耗电路。
3. WLC1150 有一个内部下拉电阻器，只在模拟 Ping 期间禁用该电阻器，并在其余时间启用它。
4. R3 值应为 (R1 + R2) 的一半左右
5. R2 值应略低于 (R3 || RD)。
6. C1 与 R1、R2 和 (R3 || RD) 组成一个高通滤波器。滤波器带宽应小于主要 LC 槽的自然谐振频率。

2.4.2 ASK 解调器

ASK 解调器电路使用线圈电压和逆变器桥接输入电流对来自接收器的数据进行解调。将桥接输入电流反馈路由到 WLC1150，以进行电流测量。通过某些信号调制可以得到来自线圈电压的信息，这些信息将被发送到 WLC1150。先使用一个比较器，再使用一个栅极阶段对来自两条路径的解调信息进行处理，从而生成数字数据。Figure 17 显示了 REF_WLC_TX50W_N1 中使用的配置。

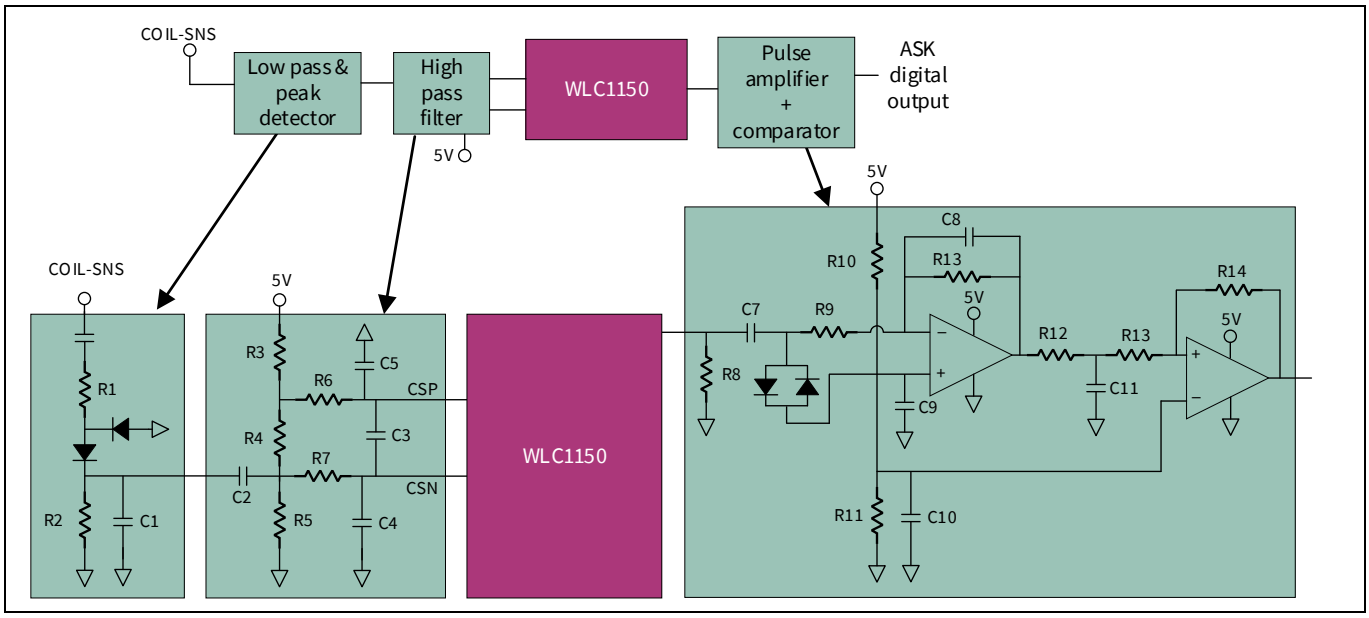

Figure 17 使用 WLC1150 的 ASK 解调器电路

根据以下 REF_WLC_TX50W_N1 注意事项对组件值进行调整，并建议将该值与 WLC1150 一起使用：

1. 前端低通滤波器和峰值检测器
   a) 负阻断二极管的额定电压应与电容器额定电压相同；另外，二极管应为快速恢复类型
   b) 直流阻断和峰值电荷保持电容器的额定电压应为 100V。
2. 高通滤波器
   a) 直流阻断电容器 C2 与 R5|| (R3+R4)构成一个高通滤波器。该滤波器带宽应远低于 ASK 通信速率 (2 kHz)。
   b) 选择梯形电阻 R3、R4 和 R5，以确保 CSP 和 CSN 引脚上的电压大于 3V。
   c) R4 上的差分电压应超过 5mV。
   d) 由 (R6 + R7) 和 C3 组成的差分滤波器的带宽应低于开关频率。
3. WLC1150 增益设置
   a) 对于桥接电流，增益被设置为 100。
   b) 对于电压路径，增益的可选范围为 40 到 110； 设置增益大小，使放大器阶段的输入等于 (VDDD/2)，这样可以为 ASK 相关的摆动提供足够的余量。
4. 脉冲放大器和比较器阶段
   a) R8 和 C6 组成一个低通滤波器； 带宽应小于逆变器开关频率，但要大于 ASK 通信频率。
   b) 放大器增益通过 R9 和 R13 进行设置。
   c) 通过使用 R10 和 R11，可以在 C9 上设置增益输出的偏移； 该偏移值应处于运算放大器的共模范围内。

d) R12 和 C11 组成一个放大器输出的低通滤波器。将带宽设置为略大于 2kHz 并远低于最低逆变器开关频率的某个值。

e) 也可以通过 R10 和 R11 在 C10 上设置比较器的参考； 该参考应略低于添加到增益阶段输出中的偏移量，这样在没有发生 ASK 调制的情况下可以减少比较器输出中的切换。

f) 使用 R14 和 R13 对比较器迟滞进行设置，以便尽可能减少数据包之间比较器输出端的抖动。

2.4.3 WLC1150 相关电路

WLC1150 是一款高度集成的控制器，该器件具有内置外设和编程灵活性的特点。它可以实现 Qi 无线电力发射器设计以及 USB-PD 兼容性。该控制器还具有一个内置低压差 (LDO) 调节器，无需辅助电源单元也能够用于生成逻辑电源 (VDDD) 和内核电源 (VCCD)。

数据手册[2]中列出了每个引脚的详细引脚说明和外部要求。

2.4.4 NTC 反馈

NTC 监控变送器单元温度，并被放置在线圈附近。将 NTC 安装在界面表面上时，可以使用它检测界面表面上因 FO 辐射的热量而引起的升温。与 WLC1150 ADC 连接的 NTC 反馈界面是一个带有滤波器的简单的分压器网络，如 Figure 18 所示。NTC 电阻是温度的一个函数。制造商提供了准确的 NTC 电阻温度特性 (也可以从 NTC 参数生成这些特性，但制造商提供的值考虑了非线性影响)。Figure 18 显示了 REF_WLC_TX50W_N1 中对 WLC1150 的反馈。

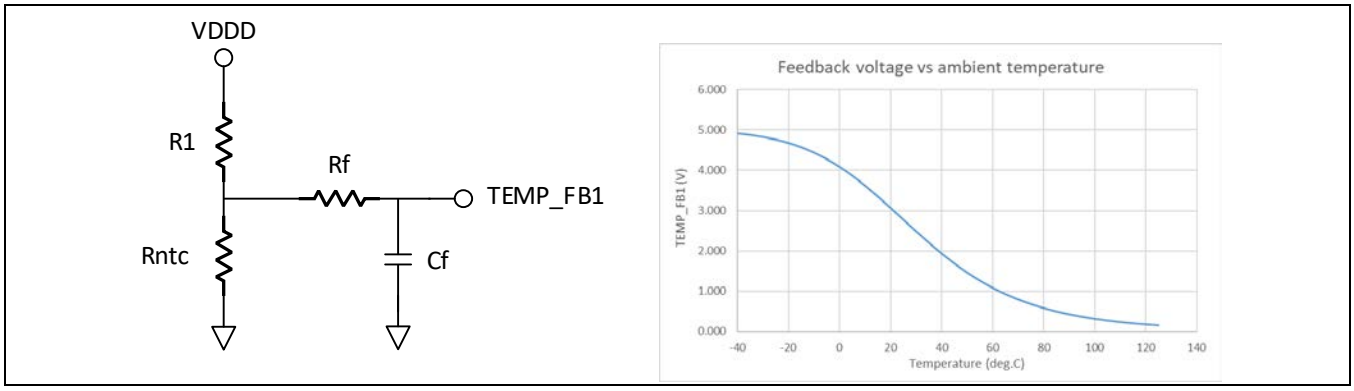

Figure 18 与 WLC1150 连接的 NTC 界面和 REF_WLC_TX50W_N1 中与温度相对应的 NTC 反馈值

设计中注意事项：

1. 串联电阻应确保 NTC 中的电流在任何温度条件下都不会引起功率损耗超过 NTC 规定值
2. 反馈路径中低通滤波器的宽带应该足够低，从而可以滤除开关噪声和 ASK 调制器频率。
3. 所需触发和恢复点附近的反馈具有良好的分辨率。

2.4.5 其它电路

通过使用英飞凌的安全控制器可以满足 Qi v1.3.2 的身份验证要求。OPTIGA™ Trust 具有完整的系统集成，可实现简单且经济高效的身份验证部署。OPTIGA™ Trust (U2) 通过 I²C 协议与 WLC1150 连接 (Figure 19)，并具有一个用于 OPTIGA™芯片复位的控制线。 SCL 和 SDA 具有用于 I²C 线的上拉电阻。

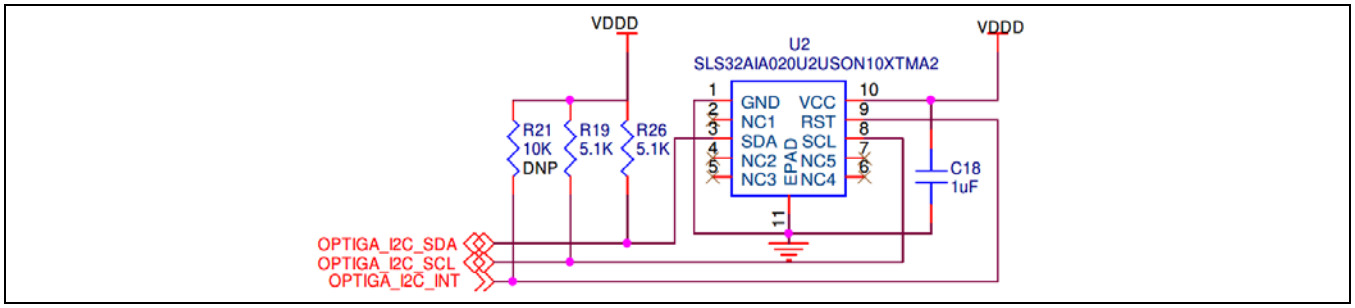

Figure 19 身份验证 IC 界面

2.5 用于风扇电源的辅助降压转换器

WLC1150 提供了辅助降压转换器所需要的驱动器和控制功能，该转换器由输入供电。辅助电源转换器用于为冷却风扇供电。冷却风扇对热管理起着至关重要的作用，尤其是在高功率情况下。该辅助降压转换器需要降压功率阶段 (MOSFET、一个电感器和一个电容器)。在 WLC1150 中，对该转换器的控制采用峰值电流模式控制 (PCMC)，因此，它使用了一个电流检测电阻器。

WLC1150 的辅助降压转换器设计指南

1. 辅助降压阶段的电流检测电阻应为 5mΩ。WLC1150 具有一个用于放大检测信号的内部高侧 CSA，并且它很适合与 5mΩ 检测电阻器一起使用。
2. 该转换器以 400 kHz 的频率进行切换。降压阶段推荐的电感为 10µH，输出电容为 22µF。
3. 高侧 FET 的栅极驱动器需要一个带有二极管和 100nF 电容器的自举电源。
4. 建议使用一个具有低 $R_{SD(on)}$和 5V 驱动的半桥式 MOSFET 阵列。半桥封装产生一个较小的电源回路。
5. 在靠近半桥的地方放置一个低值去耦电容，从而可能保持开关环路面积为最小值。

2.6 EMI-EMC 屏蔽

EMI-EMC 是高功率传输应用的无线电力传输 (WPT) 功能需要面临的一项挑战。因此，需要采取屏蔽措施来屏蔽较强的 EMF。

更多有关 EMI-EMC 屏蔽的详细信息，请联系英飞凌技术支持。

3 设计示例 – 50W 发射器电路板

本节介绍了一个 50W 无线充电器发射器电路板的设计示例，其规范与 REF_WLC_TX50W_N1 相匹配。

该设计是针对 50W 电力传输进行的。电源阶段的主要规范如下：

- 输入电压：在电力传输期间，电压为 20V；在 ping 阶段，电压则为 5V
- 辅助降压转换器功率：最高 2W
- 接收器输出功率：50W (使用英飞凌高功率接收器)
- 逆变器阶段的开关频率范围：120kHz 至 145kHz
- Rx 和 TX 线圈对齐：3mm Z 轴偏移

系统变压器参数取决于 Rx 和 Tx 线圈的对齐情况，该对齐情况是针对 3mm Z 轴偏移测量的。这些参数如下：

当 PTx 线圈与 PRx 线圈耦合时，其电感L'_{TX}为 12.07。

当 PRx 线圈与 PTx 线圈耦合时，其电感L'_{RX}为 9.84.。

Tx 和 Rx 线圈之间的耦合系数，k = 0.523。

根据第 2.3.1 节中的 FHA 分析，对于给定的操作输入，计算出的逆变器工作频率为$F_{op=}$ $124.5kHz$。

在工作频率$F_{op} = 124.5kHz$的情况下，计算出的输入电流参数为：

- Tx 输入峰值电流，$I_{TX-pk} = 7.16A$
- Tx 平均输入直流电流，$I_{IN} = 2.71A$
- Tx 输入电流相位角，$\Phi_{in}\left(F_{op}\right) = 53.5°$

Table 4 列出了逆变器电源阶段组件的计算方法。根据计算得到的值，Table 6 列出了关键组件的 BOM。有关 Q 因子估计和 ASK 解调器电路的信息，请参见[2]中 REF_WLC_TX50W_N1 原理图内的组件值。

Table 4 逆变器电源阶段参数值及组件选择计算

参数	公式	计算出的值	备注
Tx 线圈均方根电流	$I_{Txrms} = \frac{I_{TX-pk}}{\sqrt{2}}$	5.06A	
关断时的 MOSFET 电流	$I_{SW,off} = I_{TX-pk} * Sin(\Phi_{in}(F_{op})$	5.76A	
逆变器桥接电容器	$I_{C_{INrms}} = \sqrt{{I_{TXrms}}^2 - {I_{IN}}^2}$	4.27A	该值为逆变器桥接电容器中的总电流。如果并联 N 个电容，则一个电容中的电流将为 $\frac{I_{CIN_{rms}}}{N}$。
输入 CS 分流	$R_{sh_{in}} = 0.010\ \Omega$ $P_{Rsh_{in}} = {I_{IN}}^2 R_{sh_{in}}$	$P_{Rsh_{in}} = 0.074\ W$	根据 WLC1150 要求的分流值 所计算的损耗为整个操作点的最坏情况下的值

适用于 WLC1150

设计示例 – 50W 发射器电路板

参数	公式	计算出的值	备注
发射器线圈	$L_{tx} = 10uH$	I_{TXrms} =7.07A	符合 Qi 标准的电感和电容值[1]
谐振电容	$C_r = 247nF$	Vcr_{pk_pk} =76V	
逆变器阶段 MOSFET	$V_{ds-pk} = (1.5 \text{ x } V_{in})$ $I_{ds-pk} = I_{TX-pk}$	$V_{ds-pk} = 30$ V $I_{ds-pk} = 7.16\ A$	
缓冲电容器	$C_S = \frac{I_{SW,off-max} T_{DT}}{V_{in}}$	$C_S = 11.5\ nF$	

Table 4 列出了各电源阶段组件的数值和要求。器件的选择取决于性能、损耗、成本等因素，并且可能还需要几次迭代。例如，Table 5 分别列出了逆变器阶段 MOSFET 的器件选择。根据对其它组件实现类似的方法，Table 6 介绍了设计示例的高级 BOM。

Table 5　　器件选择示例 — 逆变器阶段 MOSFET

对 MOSFET 的要求	电压额定值 – 30V 电流额定值 – 5A
选项 1：	BSZ0910LSATMA1 额定值 – 30V、40A、5.7mΩ 20V 输入和 50W 负载情况下使用英飞凌高功率接收器的接收器输出功率损耗 (来自 2.3.5 部分介绍的公式) MOSFET 损耗 (最坏情况)– 632mW (包括导通、开关和恢复)
选项 2：	IRFHM830PbF 额定值 – 30V、21A、6.0mΩ 20V 输入和 50W 负载情况下使用英飞凌高功率接收器的接收器输出功率损耗 (来自 2.3.5 部分介绍的公式) MOSFET 损耗 – 1008mW (包括导通、开关和恢复)
选择的器件	BSZ0910LSATMA1 – 考虑损耗，它也是系统损耗/效率的一个关键因素

Table 6　　设计示例的关键组件 BOM

功能	数量	说明	器件编号	制造商
无线控制器	1	具有集成 USB Type-C PD 控制器 68-QFN 的无线发射器	WLC1150-68LQXQ	英飞凌科技股份有限公司
逆变器阶段 MOSFET	4	N 通道 30V 18A (T_a)、40A (Tc) 2.1W (T_a)、37W (T_c) 表面贴装 PG-TDSON-8 FL	BSZ0910LSATMA1	英飞凌科技股份有限公司
接收程序 PFET	1	N 通道 40V 21A (T_a)、40A (T_c) 2.1W (T_a)、63W (T_c) 表面贴装 PG-TDSON-8 FL	BSZ028N04LS	英飞凌科技股份有限公司

适用于 WLC1150

设计示例 – 50W 发射器电路板

功能	数量	说明	器件编号	制造商
无线控制器	1	具有集成 USB Type-C PD 控制器 68-QFN 的无线发射器	WLC1150-68LQXQ	英飞凌科技股份有限公司
逆变器阶段 MOSFET	4	N 通道 30V 18A (T_a)、40A (Tc) 2.1W (T_a)、37W (T_c) 表面贴装 PG-TDSON-8 FL	BSZ0910LSATMA1	英飞凌科技股份有限公司
桥接电流感应	1	电阻器 0.01Ω 1% 1W 1206	LVT12R0100FER	欧米特
逆变器输入大容量电容器	4	陶瓷电容器 22µF 25V X5R 0805	CL21A226MAYNNNE	三星电机
发射器线圈	1	1 个线圈，1 层 10µH 无线充电线圈发射器，最大电阻为 55 mΩ。	760308103102	Würth Elektronik
谐振电容器	2	陶瓷电容器 0.1µF 200V C0G 1812	C1812X104J2GACTU	KEMET
谐振电容器	1	陶瓷电容器 0.047µF 200V C0G 1812	C1812X473J2GACTU	KEMET
逆变器 MOSFET 缓冲电容器	2	陶瓷电容器 10000pF 25V X7R 0402	04023C103KAT2A	KYOCERA AVX
放大器和比较器中的运算放大器	1	IC 运算放大器 GP 2 电路 8-VSSOP	LMV358QPWR	德州仪器
受 Qi v1.3.2 支持的身份验证 IC	1	增强型无线充电身份验证解决方案	SLS32AIA020U2USON10XTMA2	英飞凌科技股份有限公司
NTC	1	NTC 热敏电阻 100k	NXFT15WF104FEAB021	村田制作所
辅助降压 MOSFET	1	Mosfet 阵列 2 N 通道 (双) 30V 3.6A 1.5W 表面贴装 6-PQFN (2x2)	IRLHS6376TRPBF	英飞凌科技股份有限公司
辅助降压电感	1	10µH 屏蔽鼓芯，绕线电感 900mA 420mΩ 最大 1210	1277AS-H-100M=P2	村田制作所

4 PCB 布局指南

本节介绍了基于参考电路板 REF_WLC_TX50W_N1 的 WLC1150 解决方案的原理图和布局设计要求。

WLC1150 无线电力发射器由电源电路、数字电路、Arm® Cortex®-M0 CPU 和模拟电路组成。在混合信号系统解决方案中，设计中进行布局和布线时需要特别注意，以便能够最大限度地开发所有功能。在 Figure 20 中，红色虚线圆圈表示电源部分，绿色虚线圆圈表示精密模拟组件，紫色虚线圆圈则表示应用的数字部分。在设计基于英飞凌 WLC1150 的 EPP Tx 时，应按照以下顺序放置模块级组件：

- 电源部分：逆变器辅助降压和栅极驱动器
- 模拟部分：解调器、电流检测和 Q 因子
- 数字部分：USB 通信、OPTIGA™ Trust、GPIO 和外部时钟 (可选)

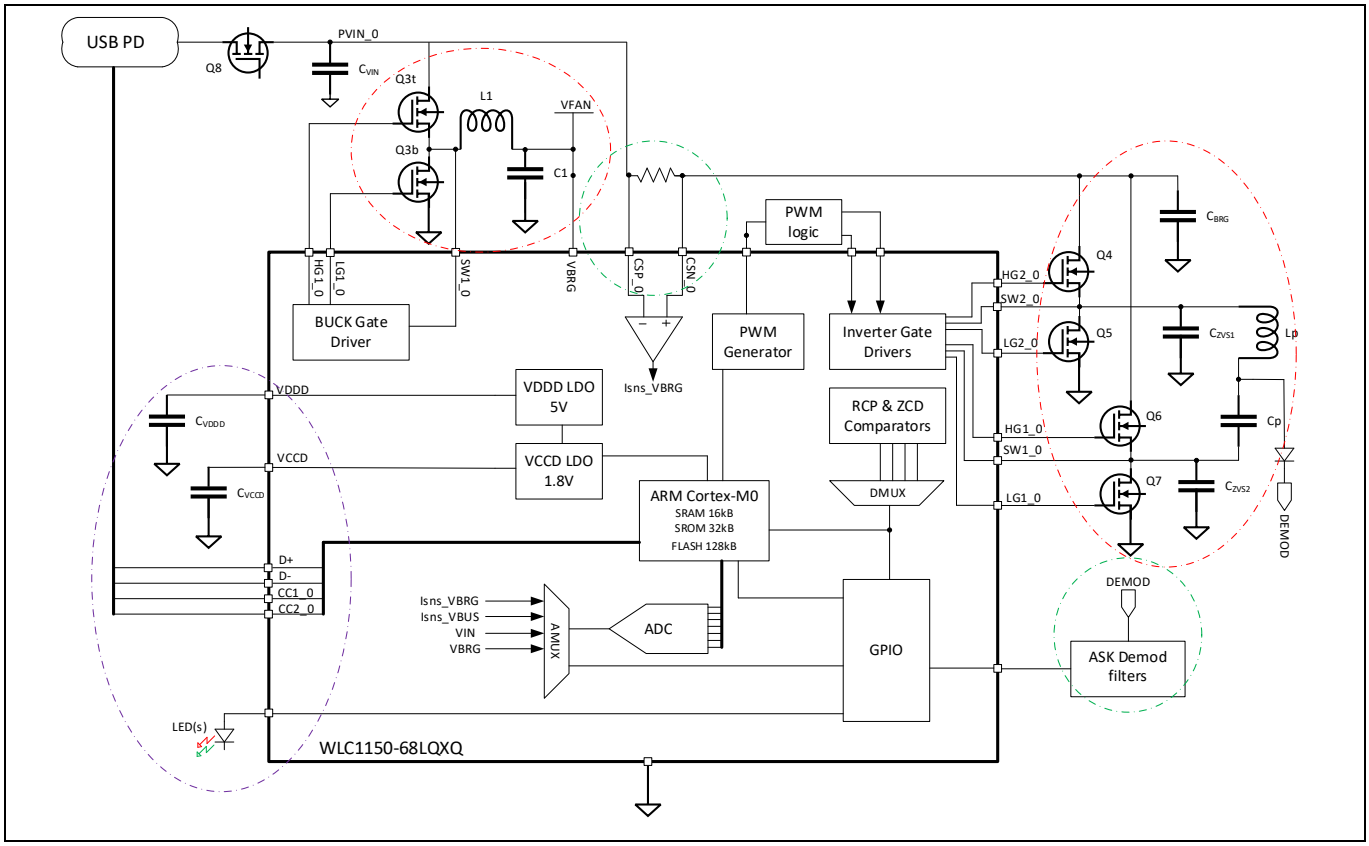

Figure 20 WLC1150 无线电源 Tx 简化图

4.1 电源部分

对于保持高效率、提供足够的热管理并降低 EMI，电源部分起着至关重要的作用。首先应考虑到电源路径，然后是 USB 连接器，Tx 线圈的位置和逆变器 MOSFET。关键的电源电路为逆变器旁路电容器、自举电容器和 ZVS 电容器。

电源路径指的是下面主要电流路径：从输入连接器到 Tx 线圈，以及 GND 返回电流到 USB 连接器。通过最小化该路径的长度来减少传导损耗和电流环路的面积，实现最佳设计。

在 Figure 21 中，正电流路径以蓝色箭头突出显示，并被绘制在 PCB 顶层上而主 GND 返回路径以绿色显示。电源路径经过精心布局和布线，使得大电流无需通过 WLC1150 (U2) 控制器 IC 下方即可为 Tx 线圈供电，并通过该线圈提供电源。为获得控制器静态电流，应存在从 WLC1150 IC 到共模扼流圈输出的第二条路径 (以较细的箭头显示)。

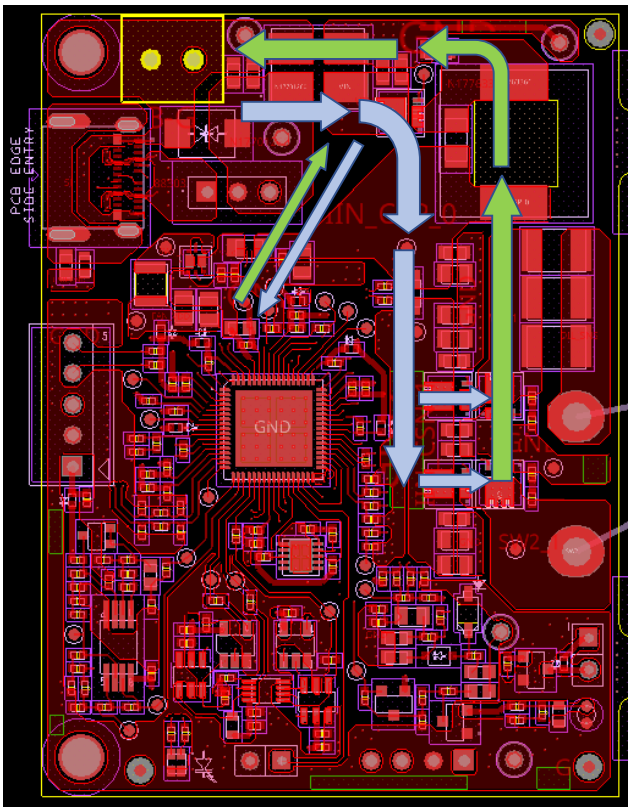

Figure 21 MP-A2 参考设计无线电源电流路径

4.1.1 逆变器

全桥逆变器是下一个详细介绍的电源部分的内容。Figure 22 和 Figure 23 显示了逆变器的原理图和布局内容。

旁路电容器 (C23、C33、C76 和 C77) 的放置对性能至关重要。应为开关节点 (SW2_1 和 SW1_1) 提供较宽的布线，以减少阻抗和集肤效应，并提高散热性能。并且应将 ZVS 组件 (C41、R25、C31 和 R17) 放置在相应的 MOSFET (Q7 和 Q5) 旁边。BST 电容器 (C32 和 C25) 也应放置在 WLC1150 IC (U2) 旁边。所有连接都要使用多个过孔 (至少 6 到 8 个) 进行层连接。

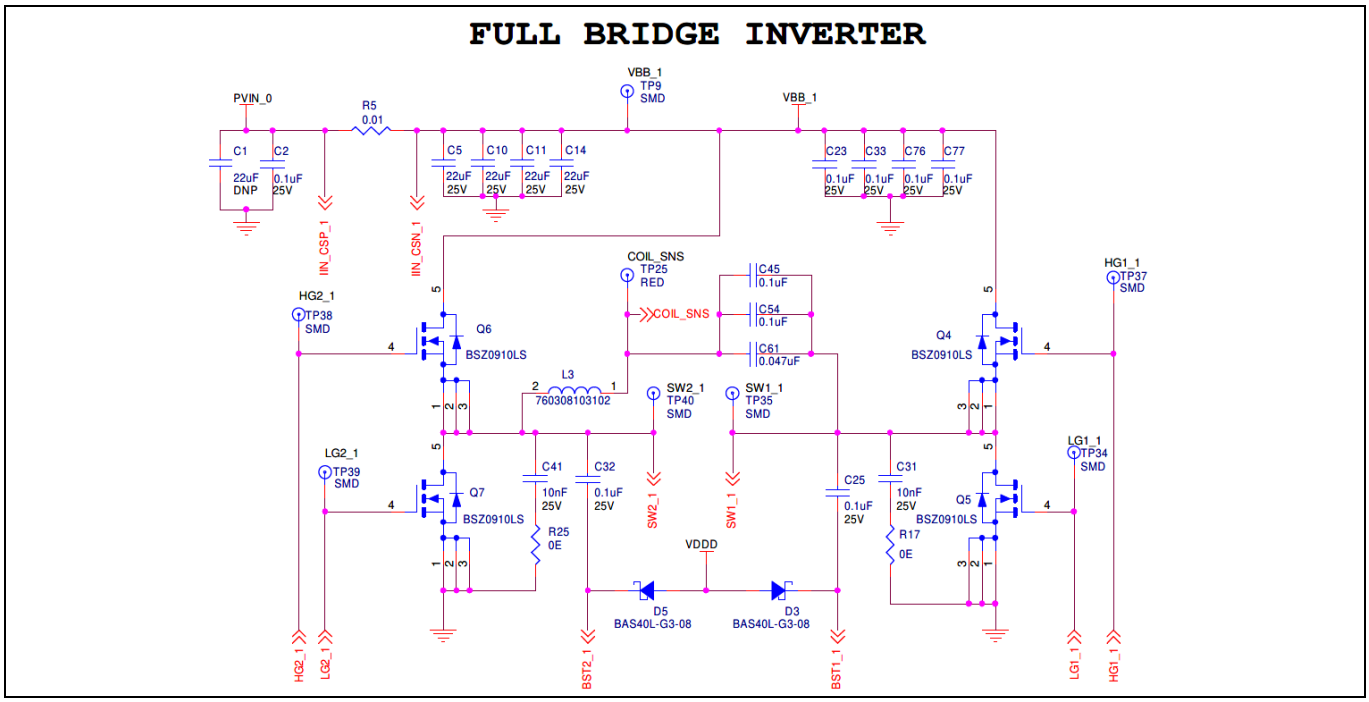

Figure 22 逆变器阶段原理图

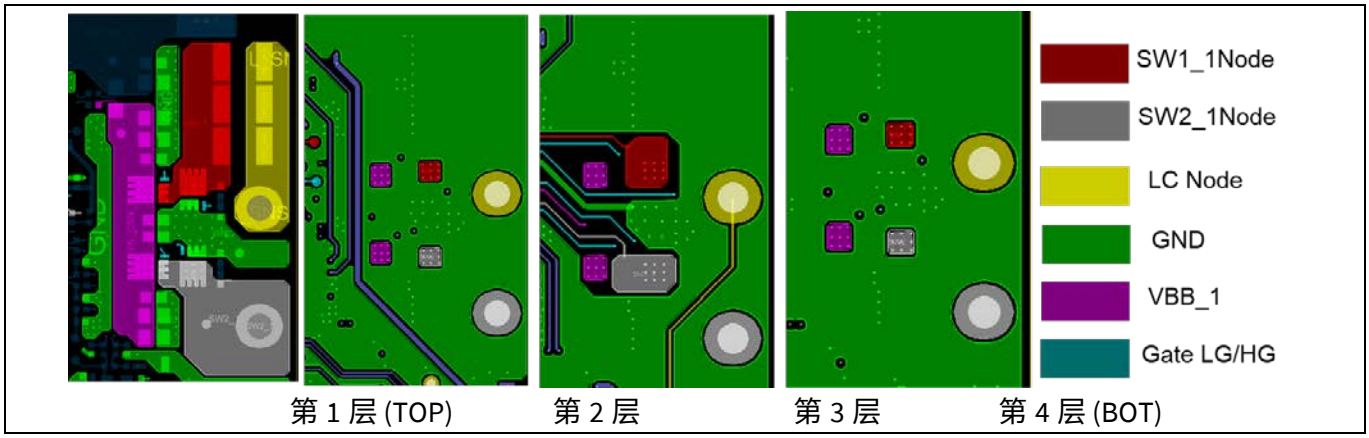

Figure 23 逆变器放置和布局 (顶层和底层)

4.1.2 栅极驱动器、BST、旁路电容器

栅极和开关节点 (SW1_1 和 SW2_1) 与 WLC1150 (见 Figure 24) 的连接宽度至少为 20mil，并且尽可能将该连接直接进行布线。此外，GND 信号会使栅极驱动电流返回到器件。建议为每个连接层转换使用两个过孔。应将 BST 电容器放置在 U2 旁边，所放置的位置应确保这些电容器跨越相应的 SW 和 BST 引脚。

下面是与电源相关各组件的最小数量。WLC1150 IC (U2) 正常运行时需要使用这些组件：应将所有组件放置在 U2 旁边 (见 Figure 25)。

- BST 电容器 (C25、C32)
- 旁路电容器
  - VIN (C15、C17)
  - VDDD (C19、C22、C26、C27、C28、C29)
  - VCCD (C21)
  - VBRG (C37、C40)

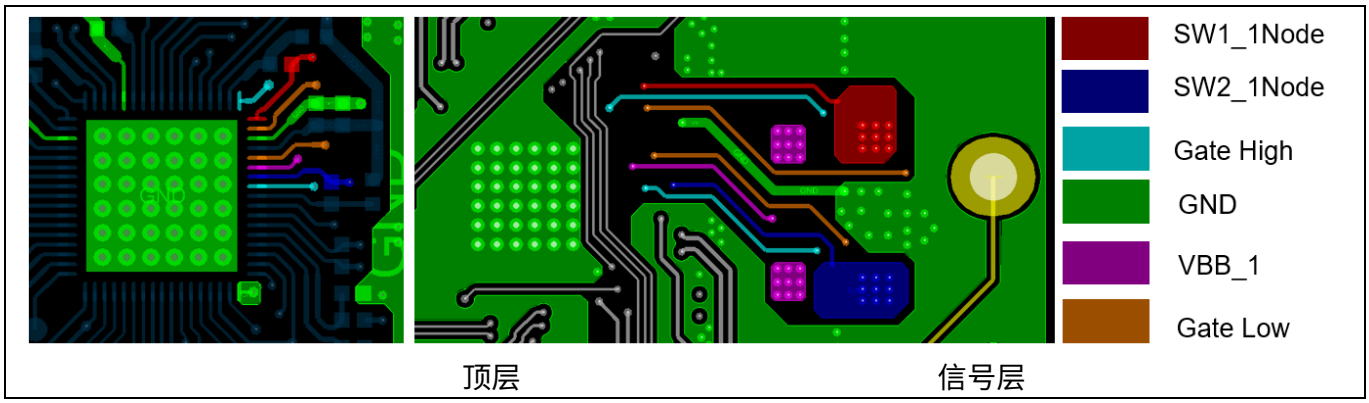

Figure 24 从 WLC1150 器件到逆变器栅极和 SWx 节点的路由

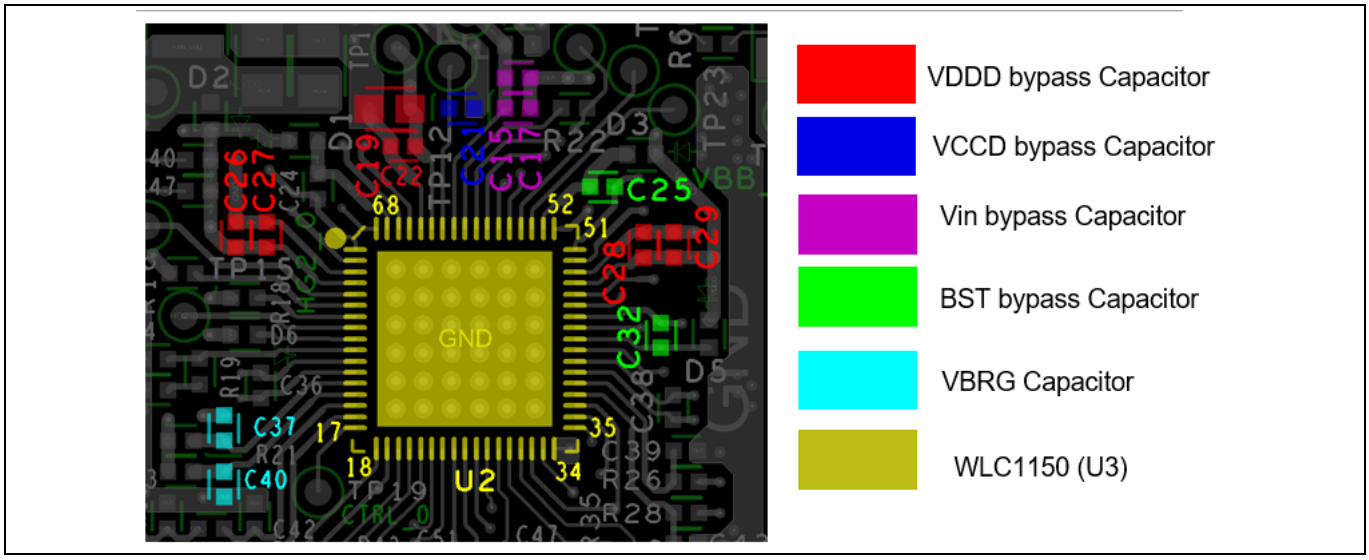

Figure 25 WLC1150 旁路和 BST 电容器放置

4.2 模拟部分

精密模拟电路由 DEMOD 滤波器、降压器补偿网络、CS 滤波器和 Q 因子电路组成。此外，应在模拟域中考虑使用热敏电阻输入，这便要求在通过 ADC 进行数字化前先要进行滤波。

4.2.1 解调器 (电压路径和增益阶段)

如 Figure 26 所示，重要的是要避免每个 DEMOD 组件的接地连接位于主返回路径中。经过组件 D4 和 D8 后，电压检测路径的阻抗变得相对较大， 因此，布线时不应该将该路径与任何一个 AC 节点进行并联路由，除非在各网络之间具有一个 GND 屏蔽层。对于每个参考，电压和电流 DEMOD 检测滤波器都需要将 GND 直接连接到 WLC1150 IC 的 E-PAD 上。

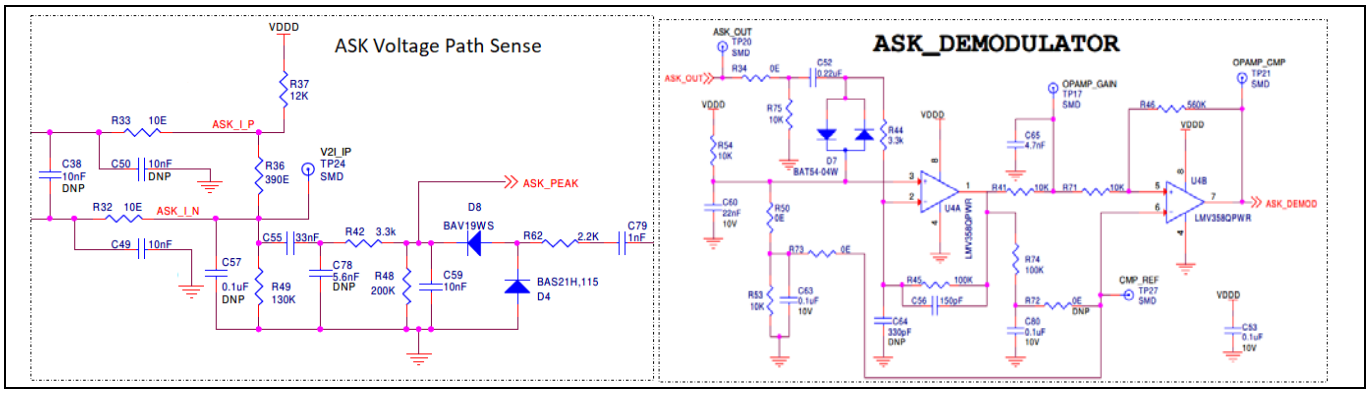

Figure 26 WLC1150 ASK 电压路径和 ASK 解调器

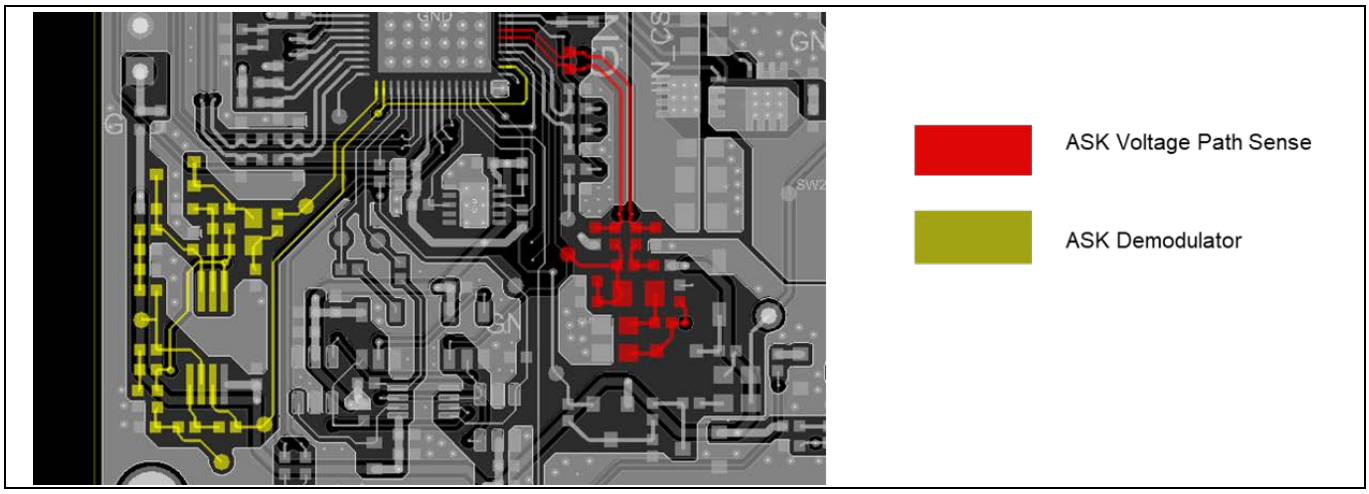

Figure 27 ASK 电压路径检测和 ASK 解调器滤波器组件布局和布线

4.2.2 电流检测

电流检测 (见 Figure 28) 必须使用开尔文接法，以保证正确检测每个 CS 电阻器上的压降。测量逆变器输入电流以进行电流故障保护，并用于 Tx 电源，以进行 FOD 比较。辅助降压输入电流检测用于控制降压控制。

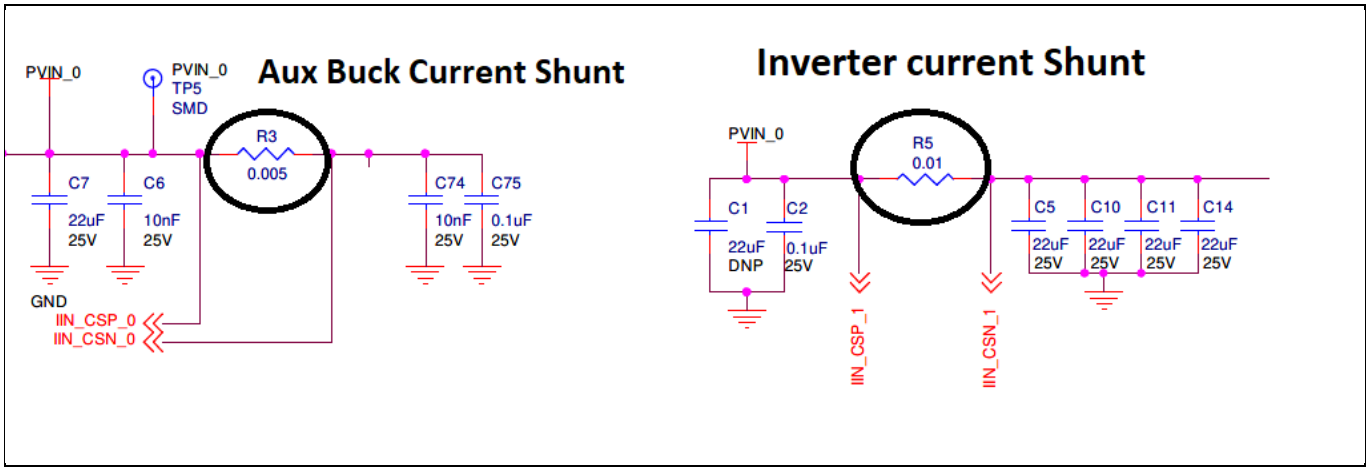

Figure 28 WLC1150 CS 电阻器原理图

请注意，在 Figure 29 中，Aux 降压器输入和逆变器输入 CS 电阻器来自组件焊盘内部的开尔文电阻器。此外，以差分对的形式将 CSN 和 CSP 线从 CS 电阻路由到 WLC1150 IC，这样可以避免产生信号检测到共模噪声。应将电容器 C36 放置在 WLC1150 IC 旁边，该电容器将跨接引脚 11 和 12：

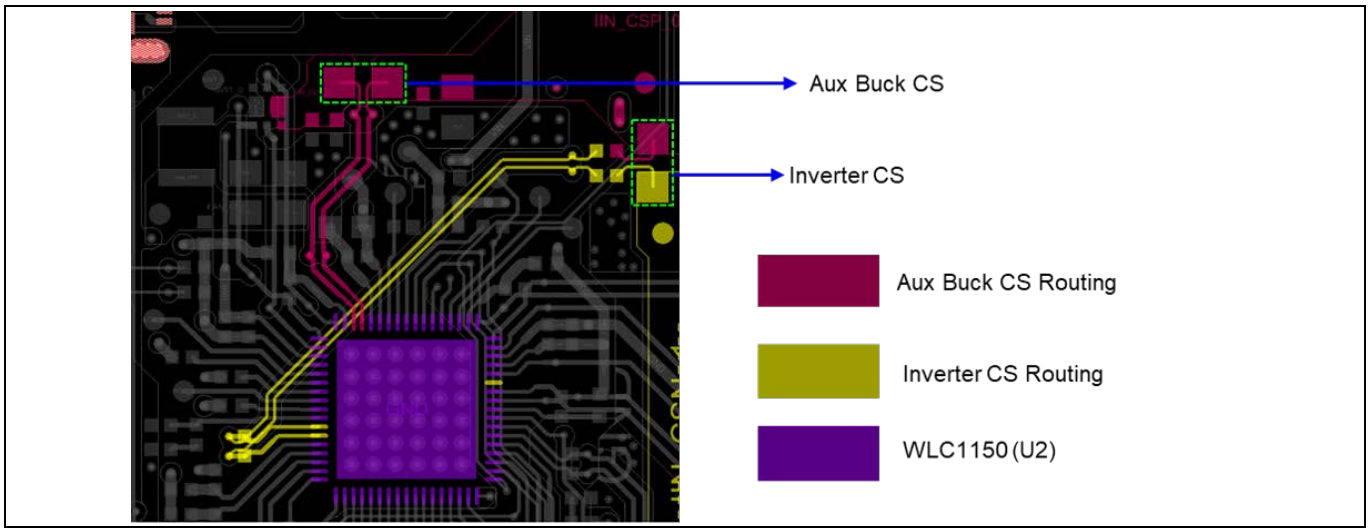

Figure 29 CS 电阻器连接和路由

4.2.3 Q 因子和降压器补偿

符合 EPP 的设计需要使用 Q 因子电路，该电路使用谐振槽的 LC 衰减测量 LC 槽 (无线 Tx 线圈 (L3) 和谐振电容器 (C45、C54、C61))的品质因数。这些组件之间的共同节点通常称为“COIL_SNS”； LC 槽由这些节点组成。应将 Q 因子组件放置在 WLC1150 IC 附近和主电源路径外。应将该组件安装在前面所提的组件后面，并且向 U2 进行的信号布线应该与高频率电源路径间有足够的间隙。

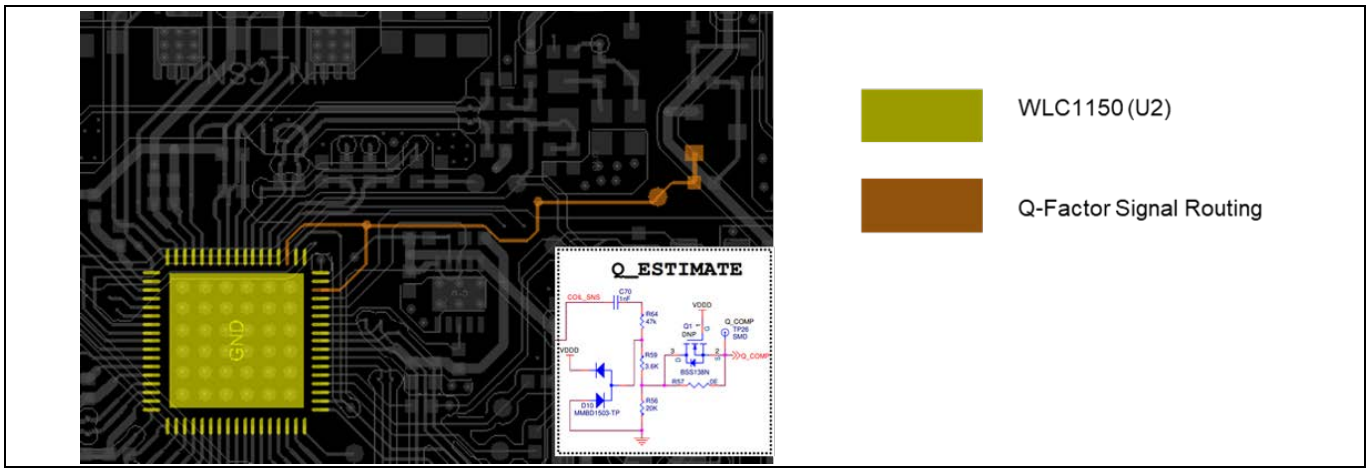

Figure 30 Q 因子测量电路原理图、布局和布线

4.3 数字部分

GPIO、时钟、OPTIGA™ Trust IC 和 USB 通信线 (D+、D-、CC1、CC2) 均被视为数字部分。未在该部分内容中介绍到的所有 GPIO 均为低功耗和相对低频的引脚。这些引脚被视为非关键引脚，因此可以尽可能方便地路由它们。GPIO 由 VDDD 5V 电源以数字逻辑电平参考供电。

Qi v1.3.2 身份验证需要使用 OPTIGA™ Trust IC。建议将该组件放置在 WLC1150 无线控制器 IC 附近，并尽可能在内层布线 I^2C 线。

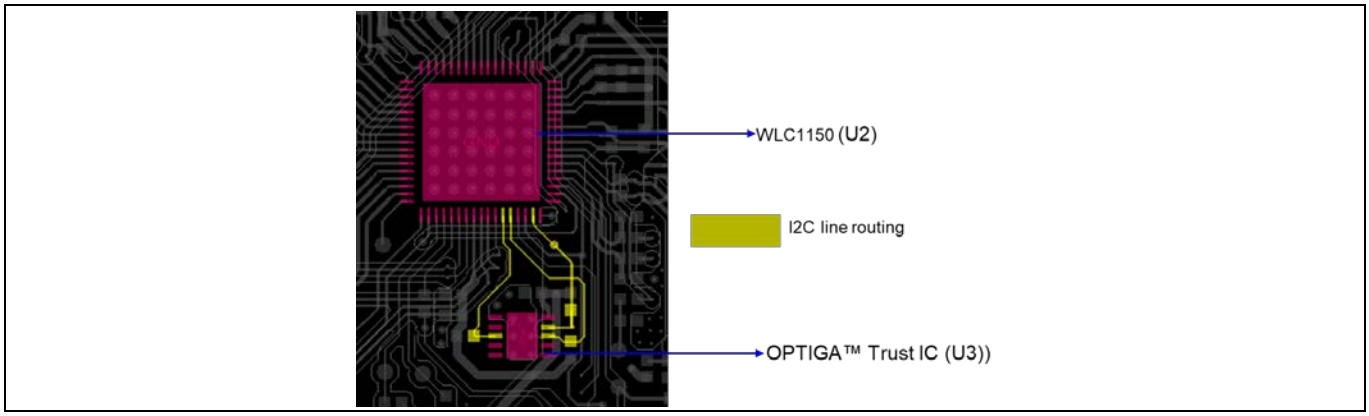

Figure 31 OPTIGA™ Trust 存储器 IC (U3) 放置和 I2C 线路由

应尽可能将 D+_0、D-_0、CC1_0 和 CC2_0 线路直接连接到 USB Type-C 连接器。应以差分对的形式将这些线路路由在一起，从而可以减少耦合或失真所造成的噪声干扰。避免在 PCB 的降压器或逆变器所在位置的下方进行布线 (如有必要，请务必使用一个坚固的 GND 平面将这些走线与所有开关调节器屏蔽开)。D+和 D-以及 CC1 和 CC2 走线应分别并排布置，并且长度应相同，误差不超过 5 mm。路由这些走线时，请避免不必要的层转换和过孔。

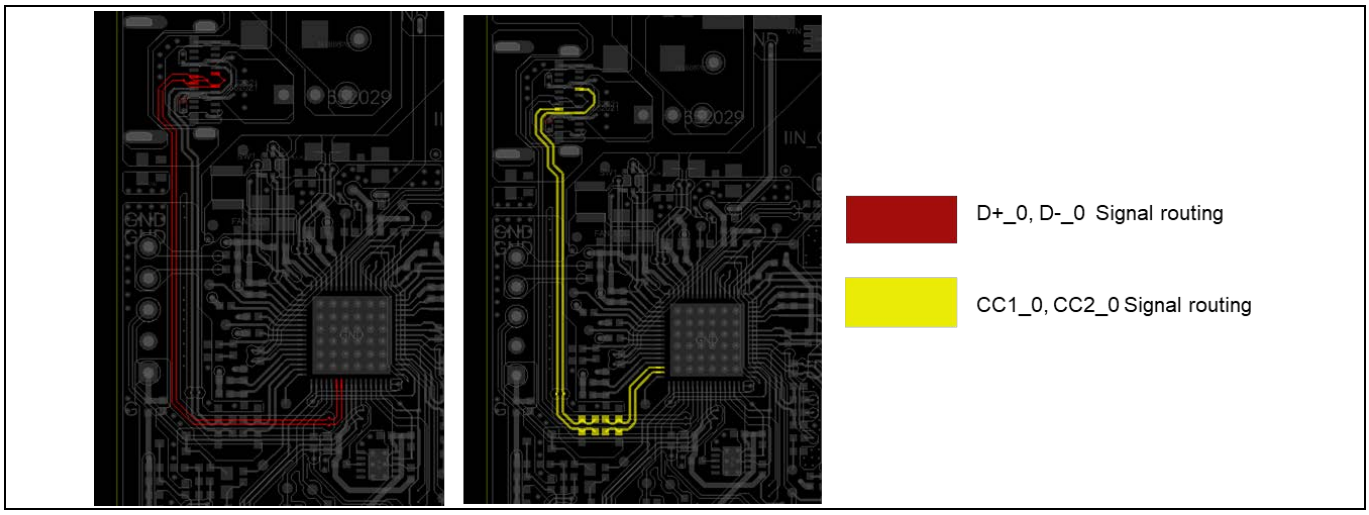

Figure 32 WLC1150 SB 路由 (D+和 D-、CC1 和 CC2)

4.4 热管理

该解决方案的热管理对高性能和合理工作温度起着至关重要的作用。为提高热性能，强烈建议使用多个过孔和大面积铜层的形式。用于热管理性能的关键组件是逆变器 FET (M13、M14、M15 和 M16) 以及 WLC1150 控制器 (U2)。

在 E-PAD 中，WLC1150 IC 至少需要 15 个散热过孔，并要有直接的 GND 层进行访问和提供热传导。通过使用具有多个通孔的多个层以在各层之间传输热量、使用更厚的铜箔和制造更薄的 PCB，可以提高热性能。降低电源管理组件工作温度的最有效方法是将大型连续平面直接连接到热源。

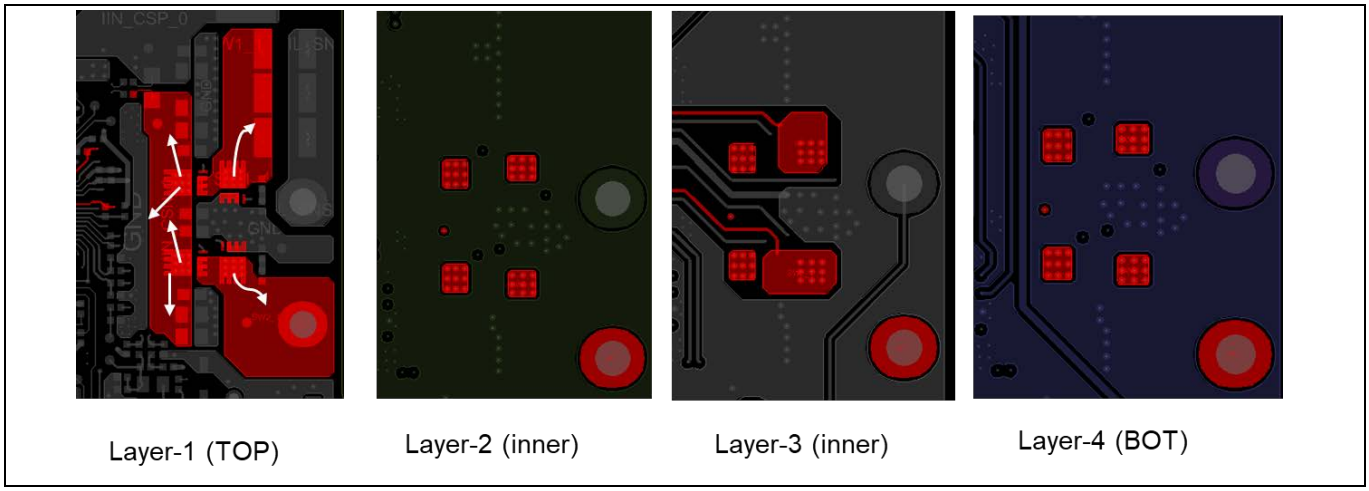

Figure 33 逆变器热平面和热流 (顶层和底层)

当使用平行平面时，在每个表面上以均匀的间隔添加通孔，尽可能将热量传送到每个平面上，从而获得最低工作温度。

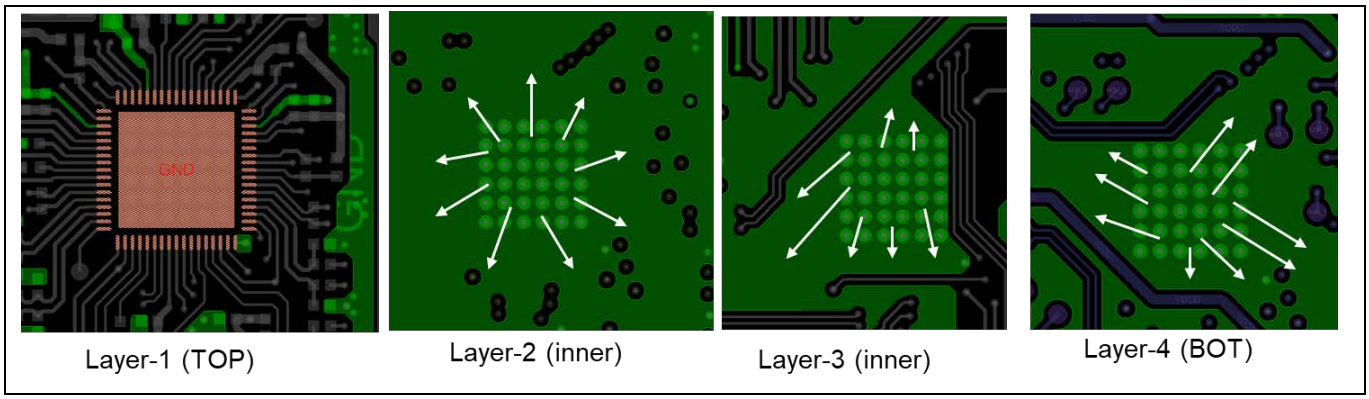

Figure 34 E-PAD 中的 WLC1150 热路径、热流和热过孔

4.5 封装尺寸设计指南

有关准确的封装尺寸，请参阅 WLC1150 数据手册[2]。为保证正常运行，应在 E-PAD 上至少分布 15 个散热过孔。阻焊层距离每个铜焊盘开口的距离要大于 2.5 密耳，并且焊膏掩膜应与每个引脚的尺寸相同。使用典型尺寸进行设计时，能够确保有足够的空间正确贴装。

5 原理图和 PCB 布局检查清单

Table 7 提供了原理图条目清单，包括 2 部分中所介绍的组件选择指南。

Table 7 原理图检查表

优先级	条目	是/否/未确定
1	这些组件已针对所需的工作温度进行了很好的降额	
2	即使在外壳温度为 100°C 时，所选定的 MOSFET 电流额定值仍处于已计算的峰值电流值范围内	
3	MOSFET 为逻辑电平类型，栅极阈值电压低于 5V，通过 5V 栅极驱动可获得较低 $R_{DS(on)}$	
4	发射器线圈部分的电感符合 Qi 规定	
5	发射器线圈 Q 因子较高或逆变器工作频率下的有效线圈电阻小于 80mΩ	
6	逆变器阶段的谐振电容器器件符合 MP-A2 线圈的 Qi 建议	
7	谐振电容器的电容器器件在其工作电压和温度范围内电容值稳定 (C0G 或 NP0 型电介质)	
8	电容器额定电压涵盖 Qi 对峰值电压的建议	
9	输入端的 Type-C USB 连接器具有电源、CC 线以及 D+和 D-线所需的引脚	
10	输入端的任何共模滤波器 (如果使用) 的 DCR 都小于 20mΩ	
11	两条 CC 线路都有 5.1kΩ 的下拉电阻和 330pF 大小的对地电容	
12	CC1、CC2 连接和 D+、D-连接都被准确地映射到 USB 连接器引脚和 WLC1150 引脚上	
13	降压器阶段输入和输出侧的 CS 电阻容差不小于 1%，温度系数不超过 50ppm	
14	在两个逆变器开关桥臂附近放置了低值 (小于 100nF) 低 ESL 型去耦电容器	
15	根据数据手册中的建议，WLC1150 VIN 引脚使用了去耦电容器	
16	根据 WLC1150 的建议，VDDD 和 VCCD 引脚使用了去耦电容器，这些电容器的有效电容在 5V 条件下达到所建议的电容值	
17	WLC1150 引脚电压预计超过最大绝对值 (在瞬态或故障期间) 时，该引脚将实现所需的钳位	
18	用于钳位 QCOMP1 和 QCOMP2 引脚的二极管在 5V 工作条件下具有较低的漏电流 (小于 100nA)	
19	CSPO 和 CSNO 引脚带有滤波器电容器	
20	用于与身份验证 IC 连接的 I^2C 线具有所需的上拉至 VDDD 功能	
21	VBRG、VBRG_DIS 和 VBUS_IN 引脚都带有位于 WLC1150 旁边的 0.1µF 去耦电容器	
22	按照 WLC1150 数据手册中的建议，WLC1150 中未使用的引脚被弃用	
23	编程连接器的 VTARG 引脚通过串联二极管连接到 VDDD，如 REF_WLC_TX50W_N1 原理图所示	
24	ASK 解调器部分中所使用的运算放大器器件为轨到轨输出类型，其压摆率小于 1V/µs	
25	在最大输入电压条件下，自举电容器大小为 0.1µF	

适用于 WLC1150

原理图和 PCB 布局检查清单

优先级	条目	是/否/未确定
26	选择的自举二极管正向电压较小，从而可以确保较低的传导损耗	
27	发射器线圈周围使用的机械附件 (垫片、亚克力、胶带) 不含任何金属元素	
28	线圈安装中所选择的胶带、垫片和亚克力的组合高度为 Qi 推荐的 dz (参见 Figure 11)	
29	所选 NTC 的最小工作范围为-20°C 至+100°C	
30	用于线圈温度测量的选定 NTC 具有较长的引线，这样可以将感应元素放置在线圈附近并将各引线焊接到 PCB 上	
31	对 WLC1150 的 NTC 反馈带有一个带宽低于 ASK 调制频率的低通滤波器	
32	100n 和 10n 的去耦电容应放置在 PWM 逻辑电路中 VSS 和 GND 之间的每个逻辑栅极 IC 上。	
33	带有 NTC 的串联电阻可确保即使在 NTC 的最高额定温度下，NTC 中的电流也会导致低于 NCT 额定值的功率损耗	
35	该原理图与[2]中 REF_WLC_TX50W_N1 的原理图相同	

适用于 WLC1150

原理图和 PCB 布局检查清单

Table 8　　布局检查表

优先级	条目	是/否/未确定
1	电源路径直接从输入电源连接器到 Tx 线圈的路径，并具有较宽铜质和直接的 GND 连接	
7	在每个半桥接旁边都放置了逆变器输入旁路电容器，并使用这些电容器将 VBRG 跨接至 GND	
8	将逆变器 ZVS 电容器放置在 LS MOSFET 和开关节点旁边 (但请勿阻塞电源路径)	
9	为实现散热，在所有 MOSFET 附近和 WLC1150 E-PAD 的下方都添加了额外的铜箔和过孔	
10	将所有 BST 电容器都放置在 WLC1150 器件旁边	
11	将 Figure 25 中显示的所有 PVDD、VDDD、VCCD 和 VBRG 旁路电容器都放置在 WLC1150 器件旁边	
12	将自举电容和二极管放置在靠近 WLC1150 的位置	
13	将 DEMOD 滤波器放置在电源路径外并将其安装在靠近 WLC1150 器件的位置	
14	通过开尔文检测连接 CS 电阻器，并以差分对的形式将它们路由到 WLC1150 器件	
15	在大部分走线长度上对 CC 线和 DP、DM 线进行差分布线。请勿将这些走线与任何高频节点重叠。这些走线在两侧都有 GND 保护	
16	PWM-IN1 和 PWM-IN2 信号到 WLC1150 的布线长度应小于 25mm。	

使用评估电路板对下面网络进行布线时，应参考以下指南。介绍的各个数值均为最小值。如果有足够的空间，建议布线宽度大于所列数值。

Table 9　　最小路由指南

网络名称	最小路由宽度*
VBRG、SW0、SW1_0、SW1_1、SW2_1、COIL_SNS (仅限 Tx 线圈到谐振电容器)	2.54mm (100mil)
VIN	2mm (78mil)
VDDD、VCCD	0.75mm (30mil)
BST 节点、栅极驱动线	0.5mm (20 mil)
COIL_SNS (到 ASK 滤波器和 Q 因子电路)	0.2mm (8 mil)
CS 信号 (CSP_N、CSN_N)，以差分对形式进行路由	0.127mm (5mil)
GPIO、I^2C、中断、ASK DEMOD、时钟	0.127mm (5mil)
PWM_IN1、PWM_IN2	0.127mm (5mil)

*—使用 1 盎司铜质

缩略语/缩略词

Table 10 缩略语/缩略词

缩略语/缩略词	定义
ADC	模数转换器
Arm®	先进的 RISC 机器，即为一种 CPU 架构
ASK	幅移键控
BOM	物料清单
BPP	基线电源配置文件
CC	配置通道
CPU	中央处理单元
CSA	电流检测放大器
CSN	电流检测负值
CSP	电流检测正值
DCR	直流电阻
EMC	电磁兼容性
EMI	电磁干扰
EPP	扩展的电源配置文件
ESR	等效串联电阻
FOD	异物检测
FSK	频移键控
GPIO	通用输入/输出
IC	集成电路
IDE	集成开发环境
I^2C	内部集成电路，即一种通信协议
I/O	输入/输出
LDO	低压差调节器
MCU	微控制器
MOSFET	金属氧化物半导体场效应晶体管
NC	无连接
OCP	过电流保护
OTP	过温保护
OVP	过压保护
PCB	印刷电路板
PD	电力传输
PDO	电力传输对象
PPS	可编程电源
POR	上电复位
PCMC	峰值电流模式控制

适用于 WLC1150

缩略语/缩略词

缩略语/缩略词	定义
PWM	脉宽调制器
QFN	四方扁平、无铅，即一种集成电路封装
Qi	发音为“chee”
RAM	随机存取存储器
ROM	只读存储器
RD	Type-C CC 线上的下拉电阻
RP	Type-C CC 线上的上拉电阻
Rx	接收器
SCB	串行通信模块
SCL	I^2C 串行时钟
SCP	过电流保护
SDA	I^2C 串行数据
SMD	表面贴装器件
SPI	串行外设接口，即为一种通信协议
TA	旅行适配器
TCPWM	定时器/计数器脉宽调制器
Tx	发射器
UART	通用异步接收器/发射器
USB	通用串行总线
ZVS	零电压开关

参考材料

[1] Qi 规范，WPC 知识库；https://www.wirelesspowerconsortium.com/knowledge-base/specifications/download-the-qi-specifications.html

[2] 数据手册，002-36311：WLC1150，无线充电 IC (WLC) — 集成了 USB Type-C PD 控制器的 50W 发射器

[3] REF_WLC_TX50W_N1 设计文件

[4] D. Graovac 等人，使用数据手册中的参数计算 MOSFET 功率损耗/英飞凌应用笔记 2006-07 版本 1.1 – 英飞凌科技股份有限公司

[5] Alan Huang，功率 MOSFET OptiMOS™ FD 200V/250V 的硬换向/英飞凌应用笔记 2014-03 版本 1.0 – 英飞凌科技股份有限公司

[6] SangCheol Moon 等人，“带有中间线圈的高效率无线电力传输系统的分析与设计”，IEEE 工业电子学汇刊，2014 年 11 月，第 11 号，第 61 卷

文档修订记录

版本	提交日期	变更说明
**	2023-03-22	翻译自: 002-37007 Rev. **

Trademarks
All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2023-03-22
Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2023 Infineon Technologies AG. All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?
Go to www.infineon.com/support

Document reference
002-37334 Rev. **

重要提示

本文档所提供的任何信息**绝不应当**被视为针对任何条件或者品质而做出的保证（质量保证）。英飞凌对于本文档中所提及的任何事例、提示或者任何特定数值及/或任何关于产品应用方面的信息均在此明确声明其不承担任何保证或者责任，包括但不限于其不侵犯任何第三方知识产权的保证均在此排除。

此外，本文档所提供的任何信息均取决于客户履行本文档所载明的义务和客户遵守适用于客户产品以及与客户对于英飞凌产品的应用所相关的任何法律要求、规范和标准。
本文档所含的数据仅供经过专业技术培训的人员使用。客户自身的技术部门有义务对于产品是否适宜于其预期的应用和针对该等应用而言本文档中所提供的信息是否充分自行予以评估。

警告事项

由于技术所需产品可能含有危险物质。如需了解该等物质的类型，请向离您最近的英飞凌科技办公室接洽。

除非由经英飞凌科技授权代表签署的书面文件中做出另行明确批准的情况外，英飞凌科技的产品不应当被用于任何一项一旦产品失效或者产品使用的后果可被合理地预料到可能导致人身伤害的任何应用领域。