

ANDREAS UNTERREITMEIER

1 简介

随着无线电力传输在智能手机和充电站等消费电子产品中日益普及，工业和医疗技术制造商也愈加关注这项技术及其优势。这项技术很有吸引力，特别是在工业，以及如建筑机械、易爆环境（ATEX）、农业等工作条件较为恶劣的领域。例如，它可以取代昂贵且易损的集电环，从而降低维护需求，延长产品的生命周期。

在医疗技术领域，非接触式能量转移也有许多优势。医疗设备和系统不仅要适用卫生和消毒的特殊要求，还必须能够耐受强腐蚀性清洁剂和化学品。非接触式能量传输不需要使用特殊连接器，例如密封特别出色的连接器。由于越来越多的数据都通过 WiFi、蓝牙等无线方式来进行传输，因此，无线传输所需的能量也变得有意义了。本应用笔记旨在向开发人员展示如何简单有效地设计一套额定功率数百瓦（含数据传输）的独特的非接触式电力传输系统。

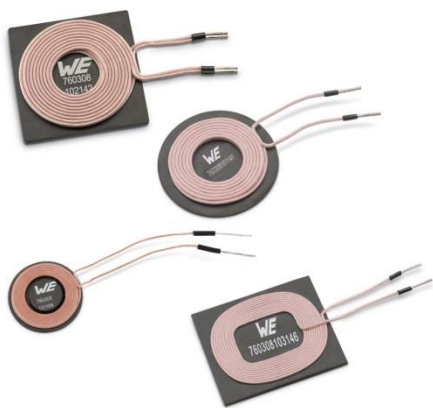


图 1：Würth Elektronik 无线充电线圈

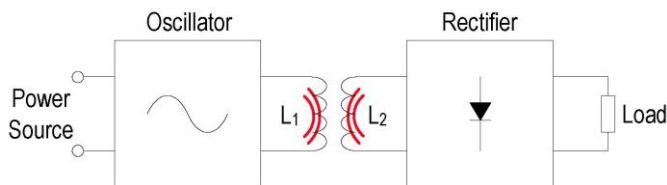


图 2：无线电力传输的原理

2 感应式无线电力传输的工作原理

我们只使用近场能量传输。这种类型的传输涉及到基于两个线圈之间磁通量的电感耦合。如图 2 所示，传输路径由四个主要器件组成。在发射侧，有一个发射线圈和振荡器，振荡器用作逆变器；在接收侧，有一个线圈和整流器，整流器的作用是将交流输入转换成直流输出。振荡器将输入的直流电压转换成交流电流，然后在发射线圈（L1）中产生交变场。由于两个线圈之间的互感，能量可以在发射线圈（L1）和接收线圈（L2）之间传输。发射线圈中的交流电流在接收线圈中感应出交流电压（根据法拉第电磁感应定律），经整流后传递至负载。

若发射线圈和接收线圈之间的距离较大，杂散磁通量会急剧增加，从而导致能量传输效率降低，这与松耦合变压器的功能相对应。不过，我们可以通过谐振式耦合来解决这个问题。

谐振式耦合可以增加传输距离，增大传输效率。其是纯电感耦合的扩展，它利用发射线圈和接收线圈，以及彼此的串联电容，共同组成 LC 串联谐振电路（又称“谐振腔”），从而实现能量的无线传输。。为了达到最佳能量传输效率，必须调整振荡电路的谐振频率。将电容与 WPT 线圈串联，几乎可以完全补偿极高的杂散电感。两个振荡电路之间的谐振可以改善所选谐振频率下发射和接收线圈之间的磁耦合。

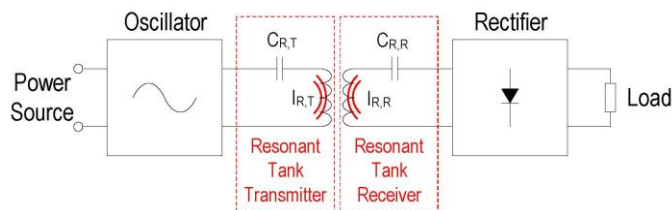


图 3：谐振感应能量传输的原理

感应谐振能量传输的原理可以非常容易地应用于实践。以下章节介绍了一种专有解决方案。

3 谐振式能量传输的实际应用

3.1. 全桥谐振转换器的设计

图 4 为全桥谐振转换器的框图。电路图可分为以下几个部分：

- 固定占空比 (50 %) 振荡器和全桥 MOSFET 驱动器
- 具有 4 个开关元件(MOSFET)的全桥电路
- 谐振电容和 WPT 发射线圈组成的串联谐振电路
- 谐振电容和 WPT 接收线圈组成的串联谐振电路
- 整流器（桥式整流器或同步整流器）

该电路不是自激振荡电路，开关频率由振荡器确定，并调谐为串联谐振电路的谐振频率。

此概念的优点：

- 可从低功率灵活扩展至超高功率（十瓦至数十千瓦）
- 谐振电路和整流器中的电流为正弦电流，具有良好的 EMC 特性
- MOSFET 在零电压下开关，效率非常高，超过 90%
- 可轻松扩展适配多种不同的电压/电流
- 可通过改变开关频率使输出电压高于或低于输入电压
- 可调节输出电压
- 可在接收器和发射器之间传输数据

3.2. 全桥谐振转换器的操作

图 5a 和 5b 为发射器和接收器之间的能量传递示意图。发射线圈中的电流（谐振电流）是在零点附近振荡的正弦电流。能量在谐振电流 $I_{CR/LR}$ 的两个半波中传递。

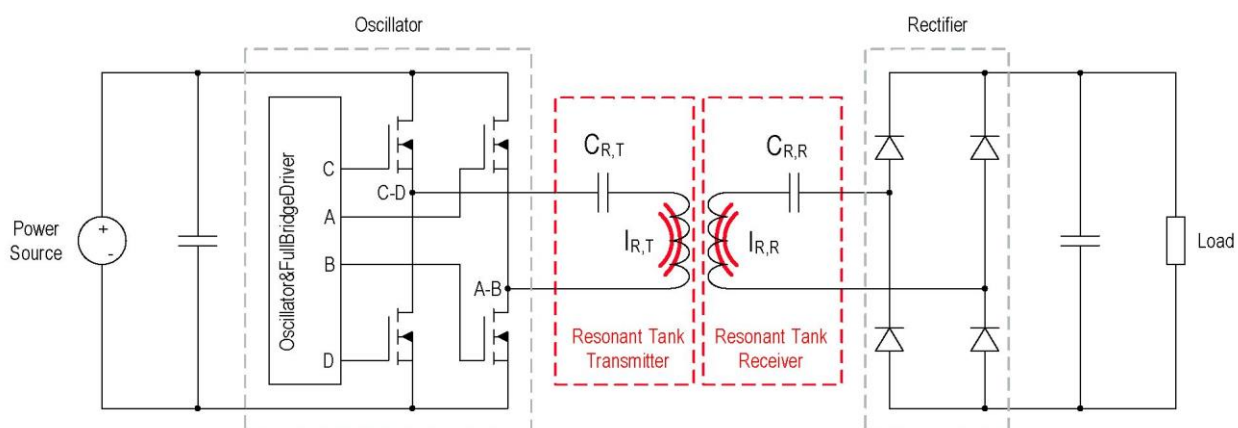


图 4：全桥谐振转换器框图

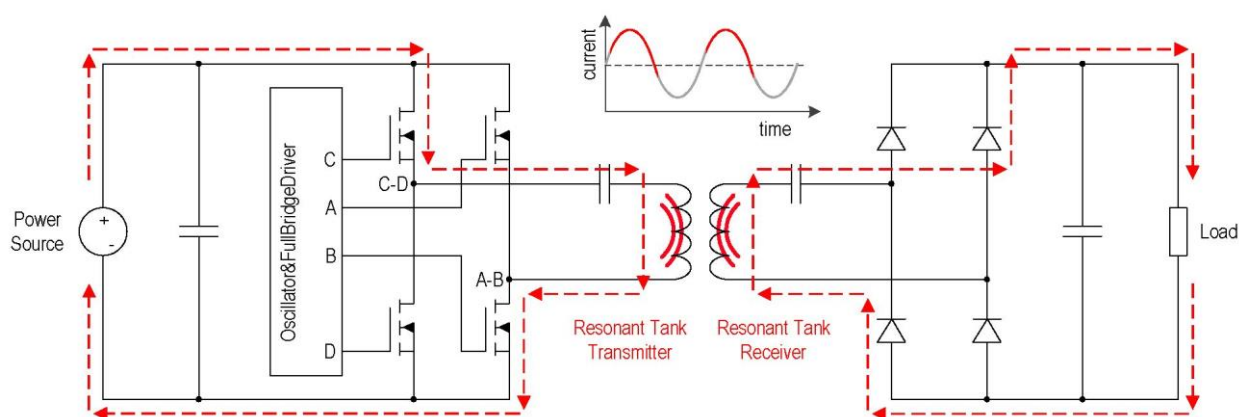


图 5a：谐振电路中正半波（ $I_{CR/LR}$ ）期间的能量传递原理

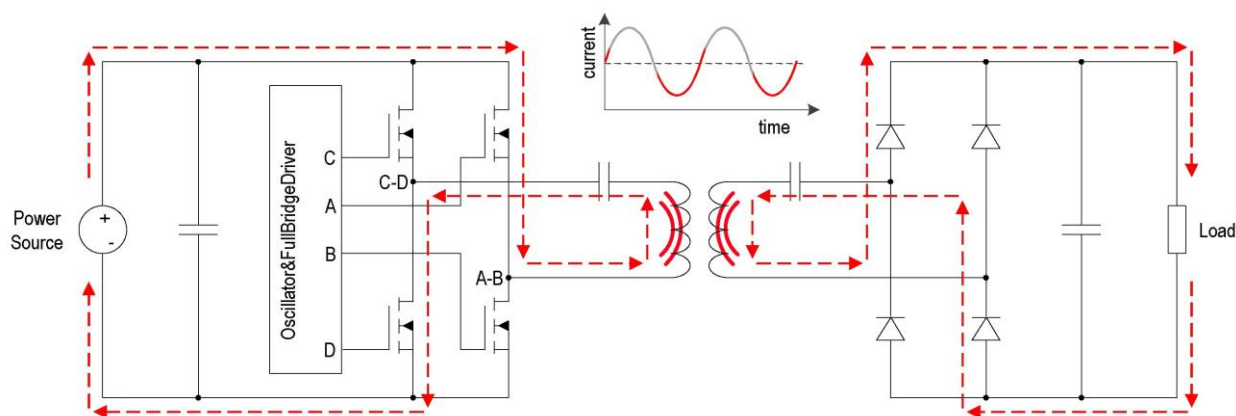
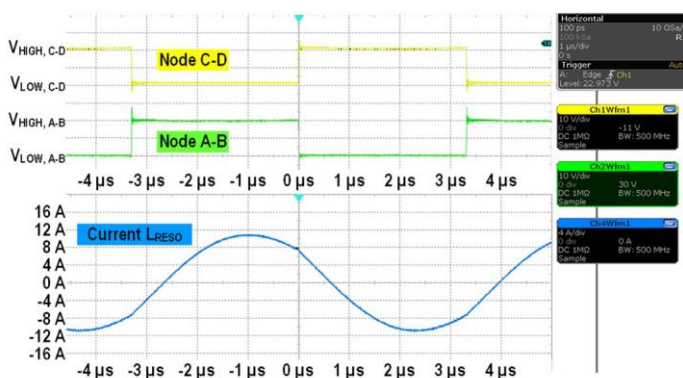
图 5b: 谐振电路中负半波 (I_{cr}/L_r) 期间的能量传递原理

图 6: 波形图漏极信号 A-B、C-D 和线圈电流

($U_{in} = 20\text{ V}$, $U_{out} = 17\text{ V}$, $I_{out} = 6\text{ A}$, $P_{out} = 100\text{ W}$)

图 6 显示了谐振电路上的信号。信号“节点 CD”和“节点 AB”是全桥内的电压曲线。在节点 AB 的高电平阶段，节点 CD 上的电压较低，反之亦然。

如前所述，谐振电路中的电流是正弦电流，并且可以看到电压信号和电流信号之间有相移。出现这一相移是因为全桥的开关频率高于串联谐振电路的谐振频率。操作点位于串联谐振电路的感性范围内，电流将滞后电压。

这对于操作非常重要，因为只有通过这一相移进入感性范围，才能实现 ZVS（零电压开关）操作，这样可以达到最高效率。如果相移进入容性范围，即电流超前电压，则转换器不会在 ZVS 模式下工作，而是在 ZCS（零电流开关）模式下工作。

ZCS 操作的损耗较高，因为电流很难换向流入 MOSFET 的体二极管。在不利情况下，这可能会导致 MOSFET 损坏。

3.3. 开关频率与谐振频率之间的关系

以下仿真左侧为该电路的简化模型。此处仅显示发射器和接收器的谐振电路，就本文内容而言已经足够。

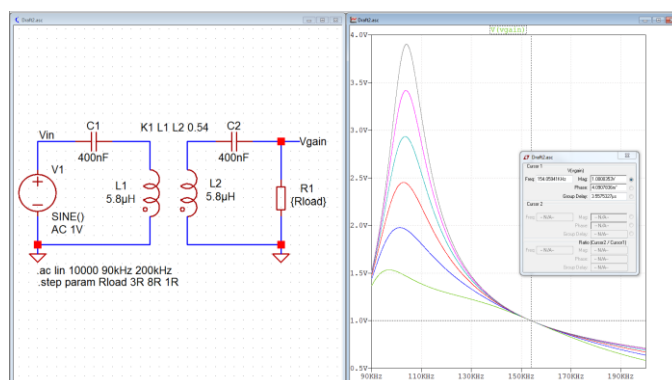


图 7: 不同负载条件下的谐振行为仿真

左侧电路为两个串联谐振电路，分别位于发射侧和接收侧。它们代表着图 4 中的两个谐振电路。每侧各有一个 400 nF 的电感和一个电感为 $5.8\text{ }\mu\text{H}$ 的 WPT 线圈 (760 308 102 142)。两个振荡电路彼此调谐。为进行仿真，我们需要确定发射和接收线圈的耦合系数，该耦合系数取决于两个线圈之间的距离。本例中的距离设置为 6 mm ，因此耦合系数为 0.537 (0.54)，该值通过测量确定。由发射和接收线圈组成的系统谐振频率约为 100 kHz 。

右侧波特图的 X 轴为频率，Y 轴为放大倍率。放大倍率 = 1 ($V_{gain} - V_{in}$) 时，不同负载条件下的所有曲线都经过同一个点。本例中这个点在 155 kHz 处，对应电路的开关频率。如上所述，开关频率高于谐振电路的谐振频率，从此处可以看出原因。以下波形图（图 8）显示了开关频率和谐振电流。

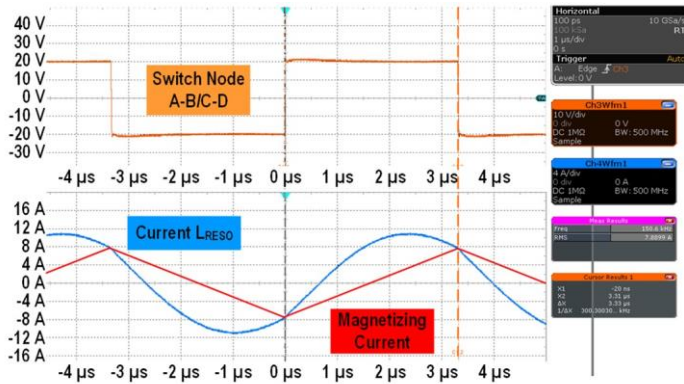


图 8：开关频率和磁化电流

($U_{In} = 20 \text{ V}$, $U_{Out} = 17 \text{ V}$, $I_{Out} = 6 \text{ A}$, $P_{Out} = 100 \text{ W}$)

以上测量显示开关频率约为 150 kHz，非常接近仿真结果。图 8 显示了开关节点 A-B/C-D（橙色线）的电压曲线，以及流经发射侧串联谐振电路的谐振电流。

从这两条曲线可以看出，每个半波期间，发射器和接收器之间均会发生完整的能量传递。每次开关节点切换时，谐振电流达到磁化电流。系统在此操作点的运行效率最高。在发射侧，MOSFET 以大约 1 V 的漏极/源极电压关断（ZVS 操作），该电压取决于 MOSFET 中续流二极管的特性。

根据 MOSFET 的数据手册，其典型值介于 0.93 V 和 1.2 V 之间。

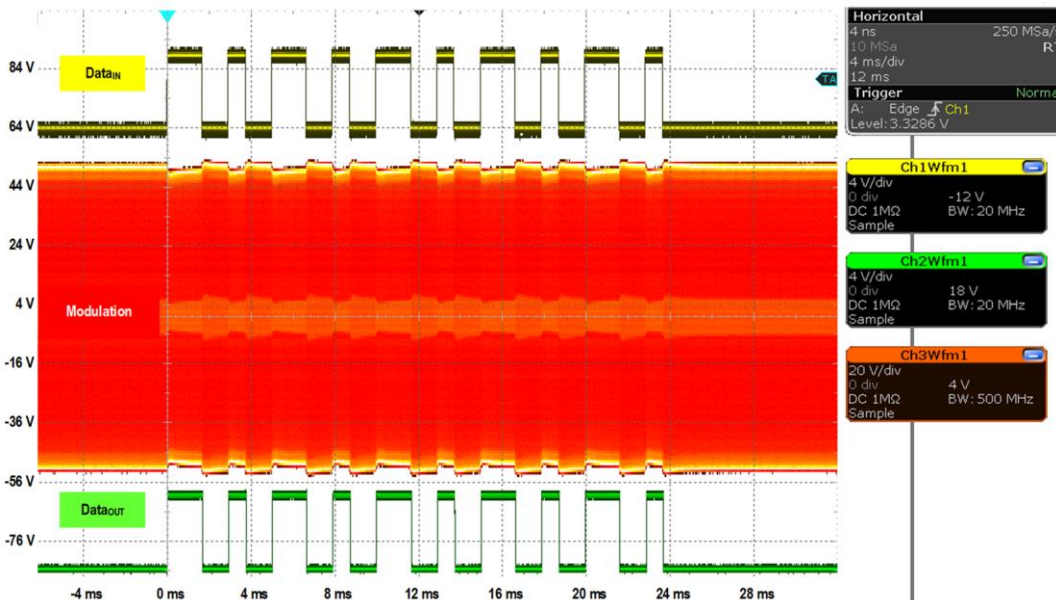
在接收侧，整流二极管或同步整流器在 ZCS（零电流开关）模式下工作。当谐振电路（接收侧）中的电流达到 0A，或者发射侧的谐振电流达到磁化电流时，电流会在整流器中的两个电桥分支之间轻微换向。可以通过改变开关频率来改变输出电压。如果开关频率降低，操作点会靠近谐振频率移动，同时输出电压增加。

如果开关频率增加，操作点会远离谐振频率移动，同时输出电压降低。请参见图 8 中的谐振曲线。

3.4. 发射器和接收器之间的数据传输

这种连接还能通过调制线圈之间的交变场，实现发射器和接收器之间的数据传输。请参见以下波形图（图 9）。

数据以串行方式传输，传输速率约为 9.6 kBaud。黄色线为来自接收器的数据流，绿色线为发射器输出端的解调信号。在本例中，数据从 WPT 接收器传输至 WPT 发射器。一个实际的例子是用于压力、温度，或其他类型应用的传感器。如图 10 所示，连接到 WPT 接收器的传感器通过 WPT 线圈提供能量，而来自传感器的数据通过同一线圈同时传输到 WPT 发射器。

图 9：接收器到发射器的数据传输 ($U_{In} = 20 \text{ V}$, $U_{Out} = 17 \text{ V}$, $I_{Out} = 6 \text{ A}$, $P_{Out} = 100 \text{ W}$)

应用指南

专有的高性能无线电力传输（含数据传输）解决方案



在接收器（数据源）侧，通过开关将另一个电容连接到现有谐振电容。该开关连接到微控制器的 UART 输出（参见图 10）。过附加的 RF 模块发送至任何类型的云服务。AM 解调器和 UART 控制器从发射线圈处的调制信号接收数据。

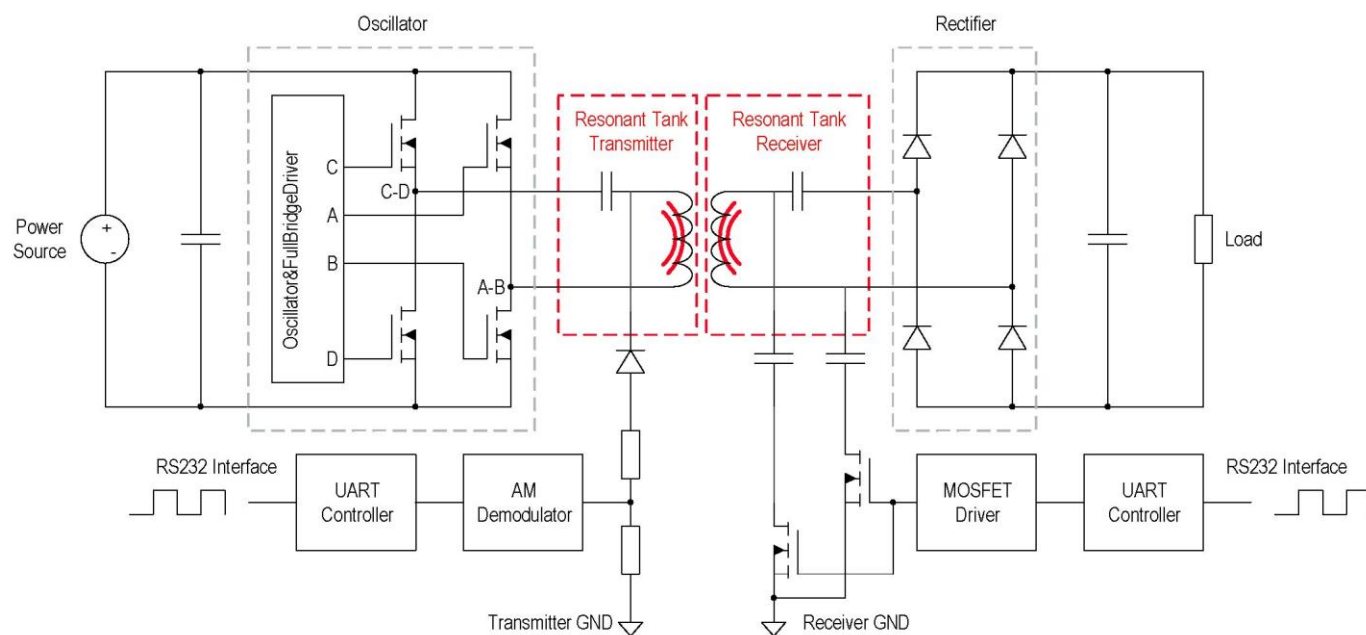


图 10：接收器到发射器的数据传输原理

应用指南

专有的高性能无线电力传输（含数据传输）解决方案



4 总结和测量设置

利用上面介绍的电路拓扑结构，可以实现数十千瓦的超大功率无线能量传输，以及数据传输。硬件开发人员可根据需要修改或扩展电路以适配其应用。由于可以传输数据，因此也可以调节输出电压。

除了电路设计之外，发射和接收线圈对实现高效率 and 极致紧凑的设计也至关重要。Würth Elektronik eiSos 可以提供同类设计中品质因子最高的线圈，以及其广泛的产品。因此，可以实现高电感值，从而可以使用小型谐振电容。

此外，对于额定功率较高的产品，只能使用 HF 绞合线（交流损耗更低）和高质量铁氧体材料（磁导率高）。在实践中，这意味着最高的效率和最佳的 EMC 特性。

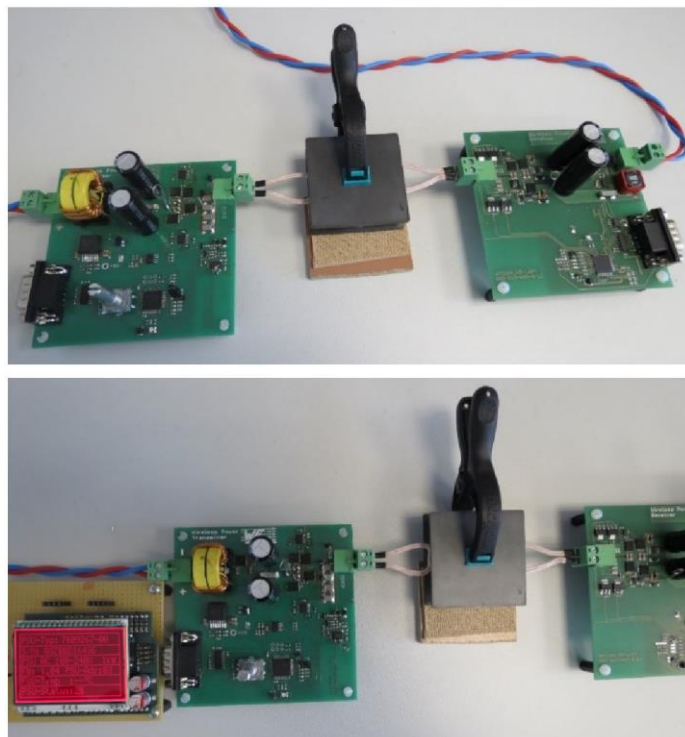


图 12: WPT 发射器和 WPT 接收器

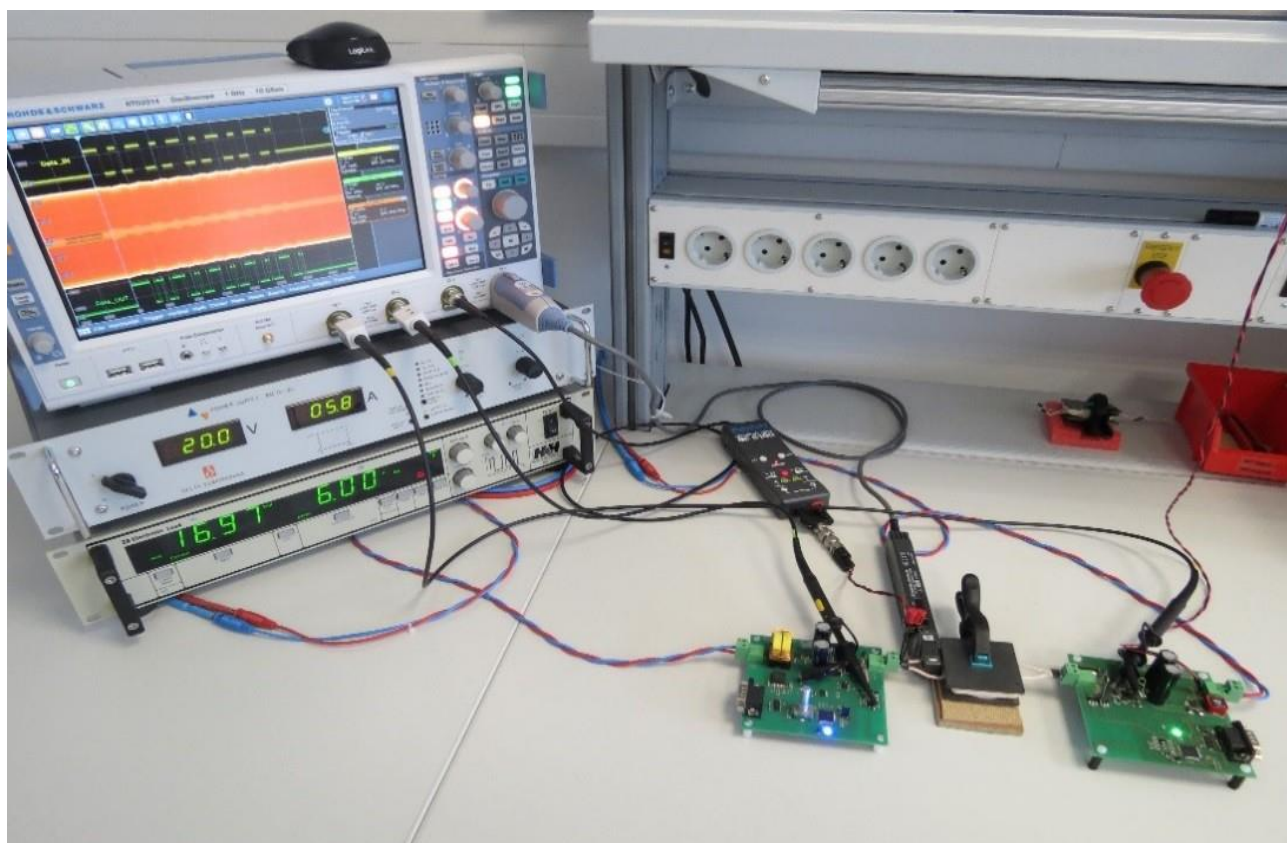


图 11: 测量设置

应用指南

专有的高性能无线电力传输（含数据传输）解决方案



重要提示

本应用笔记是基于我们在这些领域的典型需求方面所积累的知识 and 经验，仅可作为一般性的指导，不应被解释为 Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG 对客户应用的适用性承诺。本应用笔记的内容如有更改，恕不另行通知。未经书面许可，不得复制或拷贝本文档及其部分内容，也不得将本文档内容传播给第三方或用于任何未经授权的目的。

WürthElektronik eiSos GmbH&Co. KG 及其子公司和附属机构 (WE) 不负责提供任何类型的应用协助。客户可以在应用和设计中利用 WE 的协助和产品建议。WE 产品在客户特定设计中的适用性和使用始终由客户全权负责。因此，客户应负责在适当情况下进行评估和调查，并且决定具有产品规格书所述之特定产品特性的设备是否有效并适合于相应的客户应用。

技术规格会在产品的最新数据表中给出。因此，客户应使用数据表，并注意确认数据表是否为最新版本。最新数据表可从 www.we-online.com 下载。客户应严格遵守产品特定的所有说明、注意事项和警告。WE 保留对其产品和服务进行校正、修改、增强、改进和其他更改的权利。

WE 不对任何 WE 专利权、版权、屏蔽作品权或其他与使用了 WE 产品或服务的组合设备、机器或工艺相关的 WE 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。WE 所发布的与第三方产品或服务有关的信息，不能构成从 WE 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。

WE 产品未被授权用于安全关键型应用，以及根据合理预期产品故障会导致严重人身伤害或死亡的应用。此外，WE 产品既不设计用于，也不适用于军事、航空航天、核控制、潜艇、运输（汽车控制、火车控制、船舶控制）、交通信号、防灾、医疗、公共信息网络等领域。客户应在设计阶段开始前将此类使用的意图告知 WE。对于某些需要极高安全水平且电子元件的故障或失效可能会危及人员生命或健康的客户应用，客户必须确保其具备与其应用的安全性和监管后果相关所需的全部专业技术和知识。客户认可并同意，尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 WE 提供，但他们将独立负责满足与其产品及其应用中使用的 WE 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。

客户必须全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 WE 产品而对 WE 造成的任何损失。

一些有用的链接



应用笔记

www.we-online.com/app-notes



REDEXPERT 设计工具

www.we-online.com/redexpert



工具箱

www.we-online.com/toolbox



产品目录

www.we-online.com/products

联系方式

appnotes@we-online.com

电话 +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Max-Eyth-Str. 1 · 74638 Waldenburg · Germany

www.we-online.com

