

电动汽车谐振式动态无线供 /充电装置设计说明书

设计者：

指导老师：

（华南理工大学电力学院、电信学院，广州 510640）

通过实验设计了一套电动汽车谐振式动态无线供 /充电装置，如图 1（a）和（b）所示，其主要目的是为了克服现有电动汽车续航能力差，充电时间长等缺点，通过利用谐振式无线电能传输技术可以实现对电动汽车无线充电，特别是动态充电，即一边行驶一边充电，可以有效降低电池容量，节省用户充电时间；另外这种无线充电装置的发射部分一般埋在地面以下，节省道路空间，并且安全可靠，可以节省维护成本。通过优化设计，可以使得电能无线传输部分的效率达到 90%以上^[1-2]。整个系统主要发射部分和接收部分，其中发射部分由工频交流输入、整流滤波、高频逆变及功率放大、电能发射线圈等模块组成；接收部分由电能接收线圈、整流稳压模块、电池 /电动机等部分。通常发射部分一般置于地面以下，接收部分一般集成在电动汽车内，如图 2 所示。



(a) (b)
图 1. 电动汽车无线供 /充电

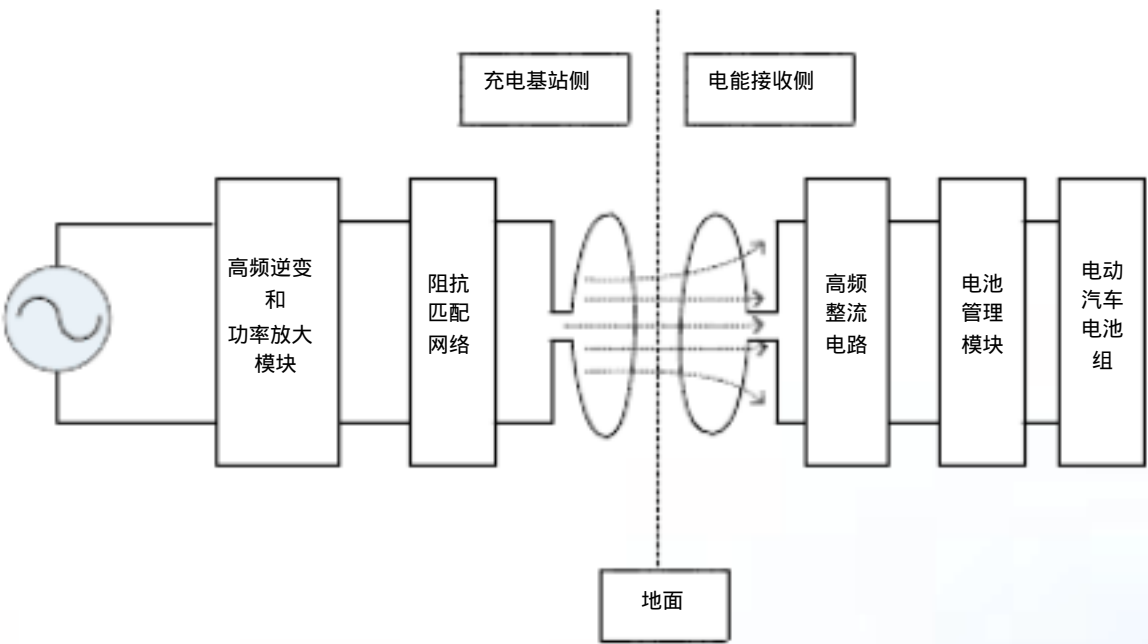


图 2. 电动汽车无线充电系统示意图

首先对整个系统建立了等效电路模型，并对等效电路进行了理论分析，设计最优的传输功率和传输效率条件；根据实际条件设置了仿真参数，借助仿真软件 Ansoft HFSS 对发射线圈和接收线圈之间的高频电磁场进行了仿真；通过前面的理论分析和仿真，设置最佳参数，制作出了一个电动小车的谐振式无线供电装置，小车可以在没有外部电池供电的情况正常转动，从而证明本设计是可行的。

联系人：黄润鸿，手机：， E-mail：huang.

1. 研制背景及意义

电动汽车可以很好的解决机动车污染排放和能源短缺问题，符合国家节能减排的政策需求，因此受到了很多国家和政府的鼓励和支持。传统电动汽车一般采用有线充电方式，但其

要考虑很多问题：如充电安全问题，特别是下雨的时候，可能导致电击触电等意外；另外充电站、插座、电缆等易于损坏，还可能面临被偷的危险；换电站、充电基站等都是建在地面上，占用大量空间，影响视线，夜晚容易造成交通事故；还有充电站的建设和维护成本较高。

针对电动汽车有线充电存在的种种弊端，电动汽车无线充电技术可以有效地解决上述问题。使得电动汽车的充电更加快捷、方便、安全，这有助于电动汽车的进一步推广和普及。

目前无线充电技术（或无线电能传输技术，Wireless Power Transfer, WPT）主要有三种：谐振式，感应式和辐射式。其中感应式无线充电技术在上世纪 70 年代就已经出现，最早使用在电动牙刷充电上，最近 20 多年已经在电动汽车（主要包括轿车和公共汽车）领域得到了实验和使用，其充电功率和效率都比较高，其缺点是需要精确对位，传输距离小，一般在厘米级别^[3-4]；辐射式无线充电主要包括微波和激光两种形式，但其频率很高，一般在 GHz 以上，容易对人体和生物产生危害，而且电能发射和接收难度很大，电能传输效率很低^[5]；谐振式无线充电技术在 2007 年由 MIT 的学者提出^[6]，它是一种新型的无线电能传输技术，具有传输距离远（一般可达几米），效率相对较高，频率一般为几 MHz，对人体没有辐射危害，空间自由度大等优点。

将谐振式无线电能传输技术使用在电动汽车的无线充电中，可以实现电能高效、清洁、安全、便捷的利用，示意图如图 1 所示；另外谐振式无线电能传输对空间位置不敏感，在一定范围内可以较为稳定为系统供电，因此在理论上讲，通过设置多个充电装置，可以实现电动汽车的动态充电（在线充电 online-charge）^[7]。

2. 设计方案

电动汽车谐振式无线充电系统主要包括以下几个部分：工频 220V 交流输入，高频功率源，发射线圈，接收线圈，高频整流电路，反馈控制电路，汽车电池，如图 3 所示。其基本工作原理为：系统从电网吸收电能，经整流滤波和高频逆变后产生高频交流电，再经功率放大电路和阻抗匹配电路送至发射线圈，当发射线圈的自谐振频率和系统频率相同时，发射线圈的电流最大，产生的磁场最强；此时接收线圈若有相同的自谐振频率，则会通过磁场产生很强的耦合，从而实现电能的高效传输。接收线圈中的电能经整流滤波和稳压调节电路给负载电池进行充电。同时整个系统通过反馈控制环节来保证系统的稳定性和高效性。

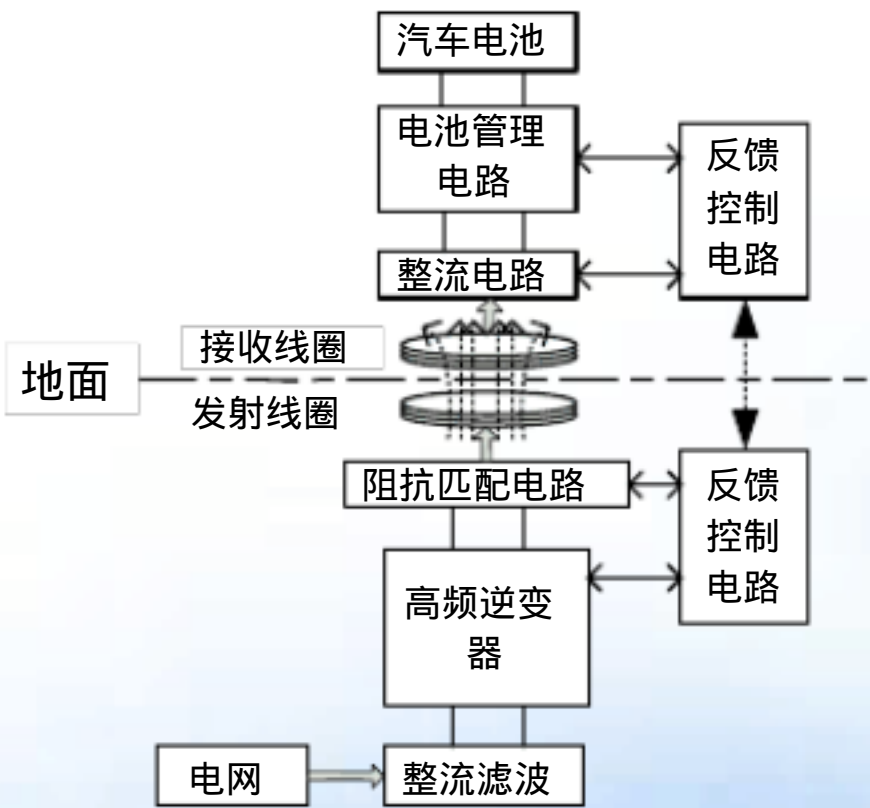


图 3. 电动汽车谐振式无线充电系统框图

2.1 谐振耦合无线电能传输原理

谐振耦合无线电能传输利用电磁近场共振耦合，把能量以“隧道”的形式从一个谐振线圈高效地传输到另外一个谐振线圈，而不和或很少和非谐振物体发生能量交换。理论分析表明未被负载吸收部分的能量会返回发射端，从而不会对效率造成影响^[8]。

本作品以两谐振线圈系统为模型，分析谐振耦合无线电能传输的基本原理。完整的两谐振线圈模型如图 4 所示。

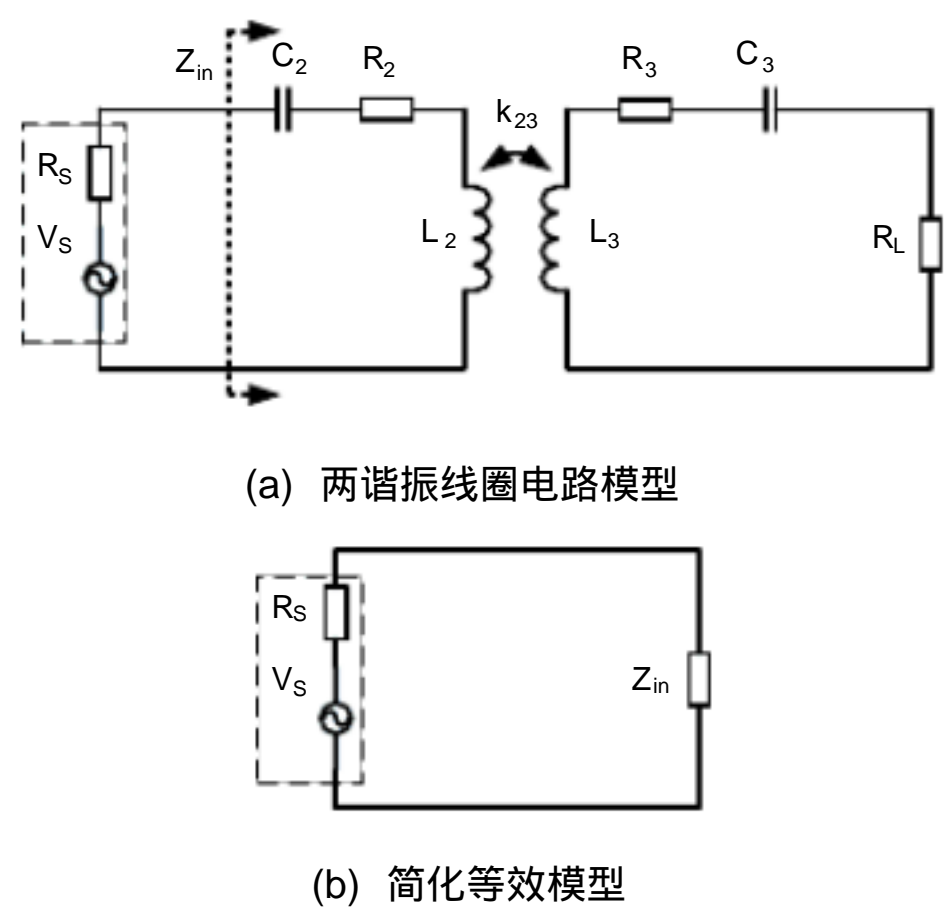


图 4. 考虑电源内阻的两谐振线圈模型

定义 S 参数^[9]：（ S_{21} 代表系统传输功率的能力）

$$S_{21} = 2 \frac{V_L}{V_s} \sqrt{\frac{R_s}{R_L}} \tag{1}$$

根据 KVL ，可得系统的方程：

$$\begin{bmatrix} V_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_2 & j M_{23} \\ j M_{23} & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中， $Z_2 = R_s + R_2 + j \omega L_2 - \frac{1}{j \omega C_2}$ ， $Z_3 = R_3 + j \omega L_3 - \frac{1}{j \omega C_3} + R_L$ 。

解得负载电压 V_L 和电源电压 V_s 比值为：

$$\frac{V_L}{V_s} = \frac{j \omega k_{23} \sqrt{L_2 L_3} R_L}{Z_2 Z_3 + \omega^2 k_{23}^2 L_2 L_3} \tag{3}$$

则两谐振线圈模型的 S_{21} 和耦合系数 k 、频率 f 之间的关系如图 5 所示。由图中可见，谐振耦合无线电能传输系统存在过耦合、临界耦合和欠耦合三个区域。在过耦合区域， S_{21} 会出现频率分裂现象，过了临界耦合区域， S_{21} 随着 k 的减小而指数衰减。

因此，电动汽车无线供 / 充电的距离应该设计在临界耦合点处，此时保证电动汽车得到最大的输出功率。或者根据电动汽车底盘和地面距离的需要，设计发射和接收线圈的尺寸，同样实现电动汽车最佳的输出功率。

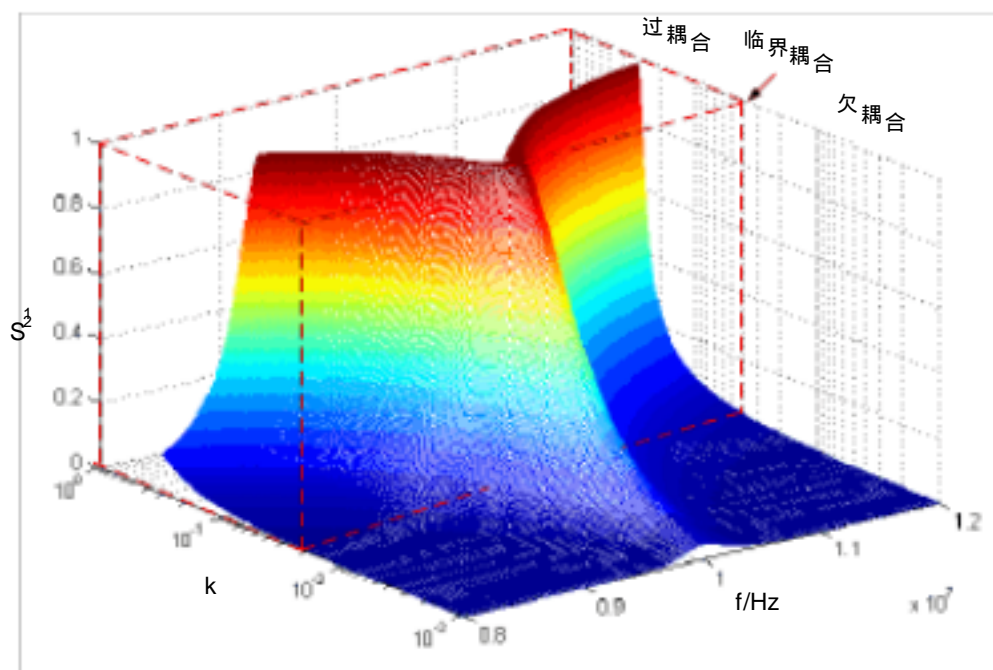


图 5. 两谐振线圈的 S_{21} 曲线图

2.2 电磁场仿真

1) 谐振和非谐振的比较

仿真结果如图 6 所示。当无线发射线圈和接收线圈处于非谐振状态时，由磁场分布可以看出，发射线圈的能量基本不能传输到接收线圈；而当发射线圈和接收线圈处于谐振状态时，传输效率可以达到很高，这和直观的概念相符合，即共振能够高效的传输能量。

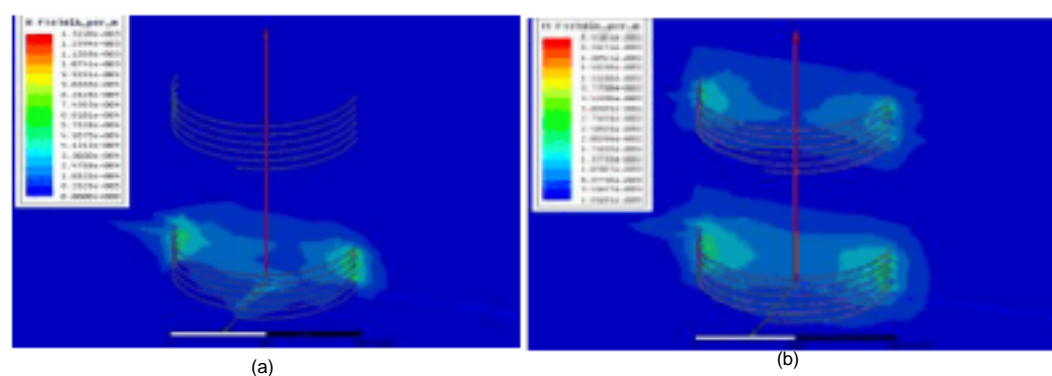


图 6. 磁场分布 . (a)非谐振 ; (b) 谐振 .

2) 谐振线圈谐振频率的确定

谐振线圈谐振频率的确定目前还没有有效的分析方法来确定，有限元分析则提供了很好的方法。以单个螺旋线圈为例，用 HFSS 软件仿真得到的 S 参数曲线如图 7 所示，根据图 7 的 S 参数幅值的最大值可以确定线圈的固有频率。此方法可为本作品线圈的设计提供指导，避免通过实验的方法反复测量和设计造成时间的浪费。

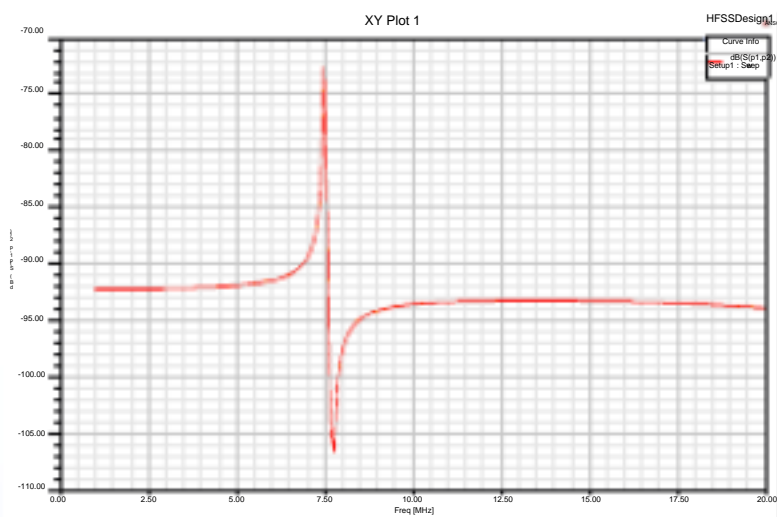


图 7. S 参数曲线

2.3 高频逆变器设计

1) 拓扑结构及工作原理

图 8 为典型的 E 类高频逆变器，结构简单，理论转换效率为 100%，实际可以做到 96% 左右。开关管 T 采用 MOS 管，正常工作时能工作在软开关状态。 L_0 为大电感，为负载网络提供恒流； C_0 为包括 MOS 管的结电容和外加电容，辅助实现谐振，使 MOS 管零电压开通；C、L 和 R 构成谐振负载网络。

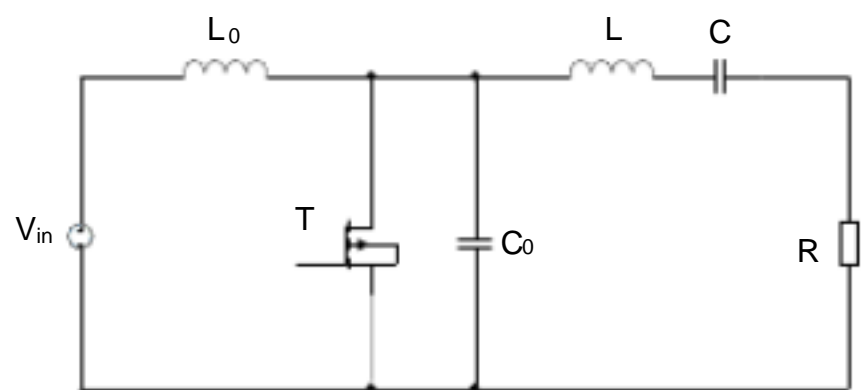


图 8. E 类高频逆变器

该变换器在稳态下工作时，其工作模态可以分为四个阶段，如图 9 所示。

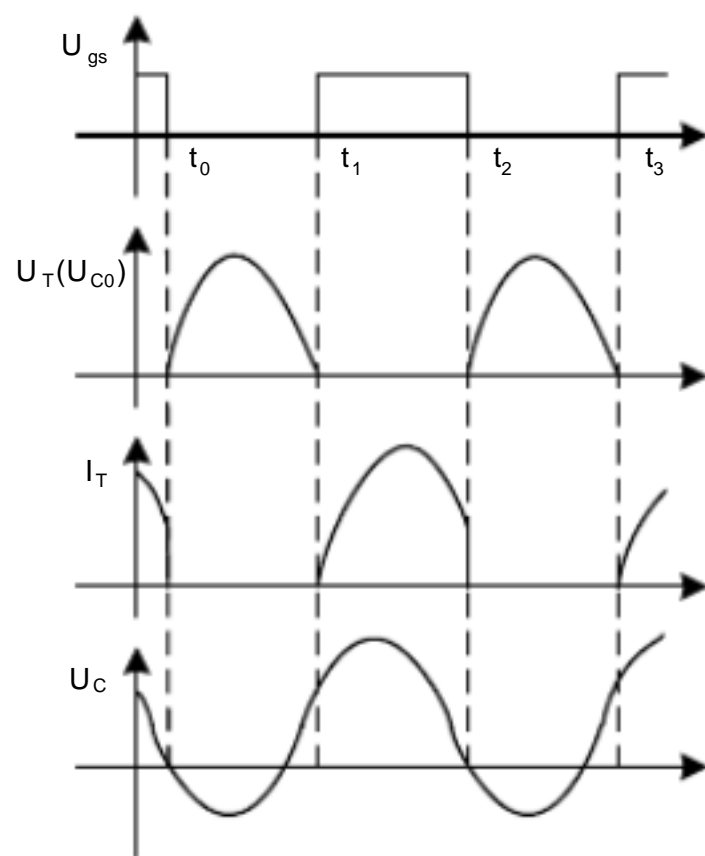


图 9. E 类高频逆变器工作模态

2) 参数设计

开关管 T 从关断到开通的过程中，它的漏极电压会随着电容 C_0 和负载网络的瞬变响应而变化。因此定义一个负载阻尼系数 $Q_L = L/R$ ，当 Q_L 过低时，开关管的漏极电压会在关断时刻还没下降到零，从而会出现大电流和大电压的情况，从而烧坏开关管；当 Q_L 过高时，由于负载网络是一个二阶的系统，会使开关管的漏极电压下摆到负值，从而可能会造成开关管反向击穿。根据文献^[10]， Q_L 应取 5~10，其他参数的设计为：

$$L = \frac{Q_L R}{2 f} \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{2 f Q_L R} \left(1 - \frac{1.110}{Q_L - 1.7879} \right) \quad (5)$$

$$C_0 = \frac{0.1836}{2 f R} \left(1 - \frac{0.81 Q_L}{Q_L^2 - 4} \right) \quad (6)$$

根据以上关系，可以设计本作品高频逆变器的参数如表 1 所示。

表 1 高频逆变器参数

参数	数值	参数	数值
V_{in}	12V	L	12.0 μ H
L_0	128 μ H	C	2.18nF
C_0	3.77nF	R	7

2.4 线圈形状设计

无线充电当中最常用的有两种线圈，一种是平面盘式的，一种是空间螺旋式的，如图所示。考虑到实际情况，我们一般采用平面盘式结构（节省空间，便于安装）。

10

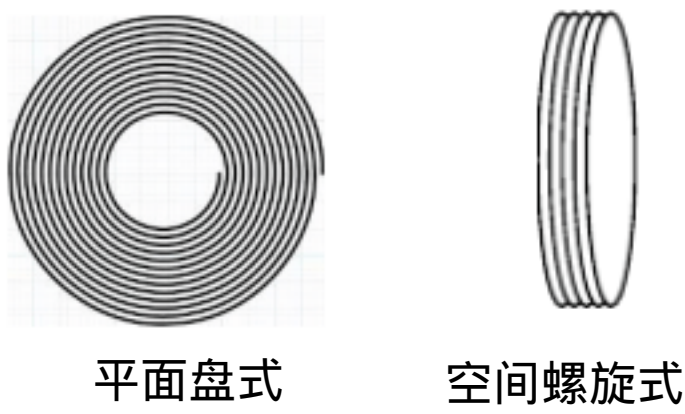


图 10. 无线充电线圈形状

实际实验中的线圈和电动小汽车大小相当，尺寸约为 20*10（单位：cm），为了增强发射线圈和接收线圈之间的耦合且便于后面计算，我们采用两片相同的印刷电路板线圈。印制电路板线圈实物如图 11 所示。

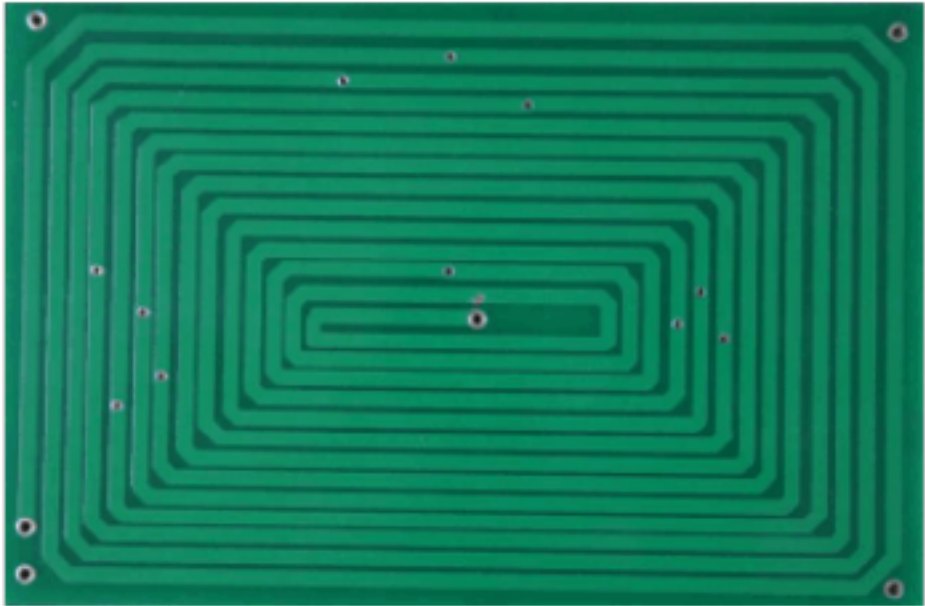


图 11. 印制电路板线圈

用精密阻抗分析仪测得线圈内阻为 1.2 Ω ，自谐振频率为 25MHz，考虑到系统频率为 1MHz，因此在线圈一端串联一陶瓷电容，将其谐振频率调到 1MHz 左右。

2.5 整流稳压电路设计

由于在动态充电过程中接收线圈的电压波动较大，因此应选用较宽范围的稳压模块，本装置中采用美国国家半导体公司（NI）生产的稳压器 LM22676-5.0，该芯片输入电压范围较大（8V-42V），输出稳压 5.0V，输入电流最大可达 3A。具体整流和稳压电路如图 12 所示。

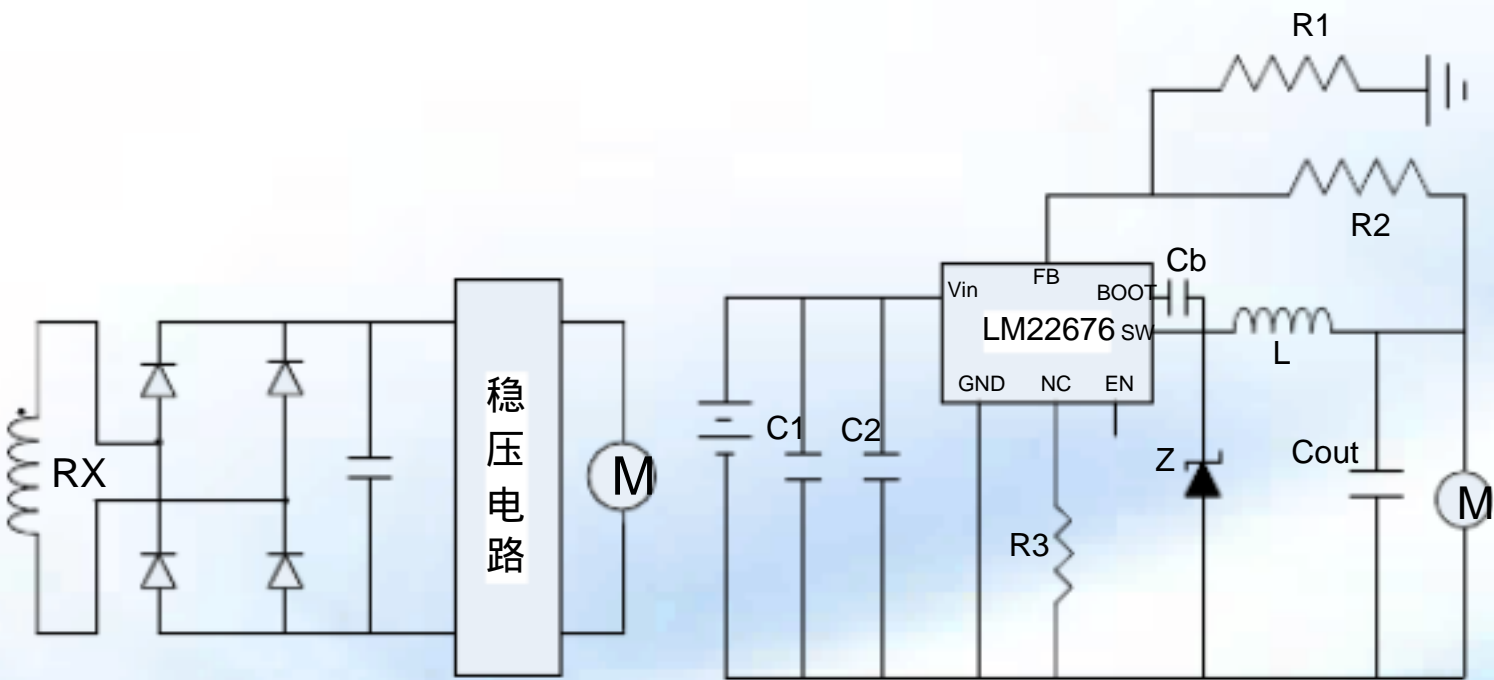


图 12. 整流和稳压电路

其中接收线圈为 RX，采用全桥整流电路，整流二极管型号为 1N5819；稳压电路中具体参数为：输入电压 V_{in} 为 8V-42V，稳压器采用 LM22626-5.0， $C1=150\mu F$ （电解电容）， $C2=1\mu F$ ，电压采样电阻 $R1=1k$ ， $R2=2.87k$ ， $R3=100k$ ，电感 $L=10\mu H$ ，电容 $Cb=10nF$ ，Z 为肖特基稳压二极管，稳压值为 100V，输出滤波电容 $C_{out}=68\mu F$ ，负载为电动小汽车的驱动电机。

根据以上各个模块的参数分析，设计制作的电动小汽车无线充电装置可以正常工作，作品实物照片如图 13 所示。发射线圈在有机玻璃的下层，接收线圈在有机玻璃的上层。左图发射线圈和接收线圈错开，右图发射线圈和接收线圈上下重合。电动汽车模型的电池已经拆除并放置在旁边。电动汽车的工作状态见附件的视频。

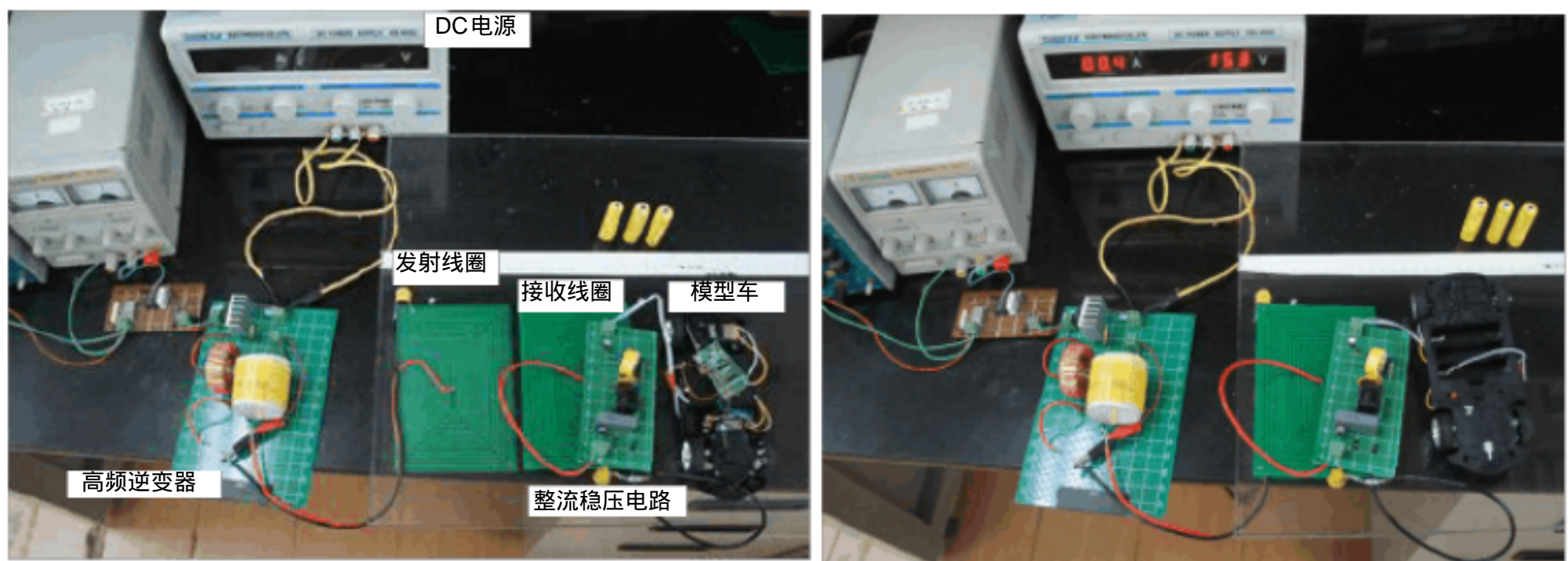


图 13. 作品实物图

3. 创新点及使用

针对电动汽车有线充电存在的种种不足如：电能安全、雨水电击；充电站、插座、电缆易于损坏、被偷等；换电站占用大量空间、影响视线等问题。电动汽车动态谐振式无线充电技术具有一系列的优点，并且有很多创新之处，具体如下：

1) 充电更加安全

适应雨雪等恶劣的天气和环境等，没有电火花和触电危险；一般电能发射装置埋藏于地面以下，电能接收装置位于车体内，不易于损坏或被偷。

2) 充电更方便、快捷，技术更为先进

利用谐振式无线充电技术可以使电动汽车随时随地充电，省去了有线充电繁琐的过程。

3) 降低了各种成本

由于充电装置固定于地面以下，没有凸起的充电站，不影响道路视线，节省了空间；无积尘和接触损耗，无机械磨损，没有相应的维护问题，节省了人力成本；另外动态谐振式无线充电，可以使电动汽车一边行驶一边充电，这样可以使用较小电池容量，减轻了车体的重量以及电池成本。

4) 使用范围广

谐振式无线充电技术可以用于电动轿车和电动公共汽车充电，也可以用于中小功率用电器无线充电，如手机、电脑、机器人等，使用前景光明。

5) 对人体无害

谐振式无线输电属于近场非辐射能量传输，对于人体和周围非谐振体基本上不会产生任何危害，可以保证安全。

本设计方案具体的节能减排效果为：

1) 省去了更换电池的成本：以目前市场的镍氢电池成本为 5 万、电动汽车为 500 万辆，备用电池为 20%为例，可以省去 500 亿在电池上的投资。而且现在电池的标准没有统一，额外的投资将会超过这个数。

2) 无线充电有利于电网的调度, 实现和电网的智能化互动。以调峰调频为例, 对于 100 万辆电动汽车和 722.73 万 kW 的峰谷差的情形, 可以节约 255.01 万 kW 调峰容量, 调峰投资现值节约 56.25 亿。

3) 无需日常人工维护, 节省人工费用。以广州将建 200 个充电桩为例, 每个站需要 5 个人, 人均月薪 4000 元, 一年需要 4800 万。

参考文献

- [1] Krishnan S, Bhuyan S, Kumar V P, et al. Frequency agile resonance-based wireless charging system for electric vehicles[C]. Proc. 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC). IEEE, 2012: 1-4.
- [2] Song C, Kim H, Kong S, et al. Structure of handheld resonant magnetic coupling charger (HH-RMCC) for electric vehicle considering electromagnetic field[C]. Proc. 2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT). IEEE, 2013: 131-134.
- [3] Sall r J, Villa J L, Llombart A, et al. Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2140-2149.
- [4] Wang C S, Stielau O H, Covic G A. Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1308-1314.
- [5] Ahn C, Kamio T, Fujisaka H, et al. Prototype of 5.8 GHz wireless power transmission system for electric vehicle system[C]. Proc. of IEEE International Conference on Environmental Science and Technology (ICEST 2011). 2011: 128-131.
- [6] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [7] J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, et al. Narrow-width inductive power transfer system for online electrical vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3666-3679.
- [8] Will Stewart. The power to set you free[J]. Science, 2007, 317(55): 55-56.
- [9] Sample A P, Meyer D A, Smith J R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 544-554.
- [10] 胡长阳. D 类和 E 类开关模式功率放大器 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985: 79-84.

附录

已取得的和本作品相关的成果:

- [1] 黄润鸿, 王学梅, 张波. 基于有限元分析的自谐振线圈设计及电磁场仿真 [C]. 第七届中国高校电力电子和电力传动学术年会论文集, 上海, 2013.
- [2] Huang R H, Zhang B. Frequency, impedance characteristics and HF converters of two-coil and four-coil wireless power transfer[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, to be published.
- [3] 张波, 黄润鸿. 一种 USB 接口的电子设备无线充电接收装置 [P]. 中国发明专利, 2.8, 2013.10.23.
- [4] 张波, 黄润鸿, 等. 一种具有 PFC 的谐振式无线电能传输发射装置 [P]. 中国发明专利, 2.X, 2013.10.23.
- [5] 张波, 黄润鸿, 等. 一种谐振式无线电能传输发射电路 [P]. 中国发明专利, 2.3, 2013.11.13.
- [6] 张波, 黄润鸿, 等. 一种谐振式无线电能传输系统的高频变换电路 [P]. 中国发明专利, 2.0, 2013.11.28.
- [7] 张波, 黄润鸿, 等. 具有阻抗匹配网络的无线充电系统的高频变换电路 [P]. 中国发明专利, 2.9, 2013.11.28.
- [8] 王振亚, 王学梅, 张波, 等. 电动汽车无线充电技术的研究进展 [J]. 电源学报, 2014, 待出版.
- [9] 王学梅, 王振亚, 等. 一种新型的家用太阳能无线供电系统 [P]. 中国发明专利, 2.1, 2014.01.08.

已完成的相关项目: 南网科研院项目, 已结题; 学校百步梯 “谐振式手机无线充电系统的设计” 二等资助, 已结题。