

# 电动汽车无线充电技术概述

## 1 电动汽车无线充电技术基础

当前电动汽车电能补给多采用传导充电方式，在电动汽车传导充电系统中，充电桩与车载接口通过电缆组件连接，进而实现电动汽车能量补充。

无线充电(Wireless Power Transfer, WPT)技术的发展为电动汽车的能量补给带来了一种新方式——电动汽车无线充电(Electric Vehicle Wireless Power Transfer, EV WPT)。电动汽车无线充电系统分为地面发射端(简称地面端)和车载接收端(简称车载端)两部分，地面端和车载端隔空传递能量，如图1所示。



图1 电动汽车无线充电系统的原理示意

地面端采用能量变换单元将电网输入的工频交流电能转换为高频交流电能，进而通过地面端和车载端装置的非接触耦合作用，将电能无线传输到车载端，再由电能转换装置将电能输送到电池，地面端和车载端可以采用无线通信的方式进行信息交互。

### 1.1 无线充电技术分类

WPT的技术方案较多，工作机理各异，但系统结构基本相同，均是通过发射端功率发射单元和接收端功率接收单元进行能量无线传输。无线充电通用的系统结构如图2所示，发射端将供电电源能量通过功率变换电路1转换为功率发射单元需要的形式，如电场、磁场、射频/微波或者激光等，接收端的功率接收单元接收到电场、磁场、射频/微波或者激光等，再通过功率变换电路2转换为负载需要的能量供给负载。

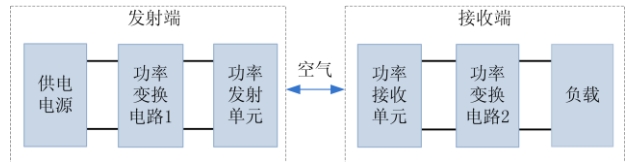


图2 无线充电通用的系统结构

图3是不同能量耦合方式WPT的电磁场频率分布。从能量传输距离角度看，无线充电技术可以分为近距离无线充电和远距离(米级以上)无线充电两大类。磁场耦合方式和电场耦合方式属于近距离无线充电，射频/微波方式、激光方式通常用于远距离无线充电。

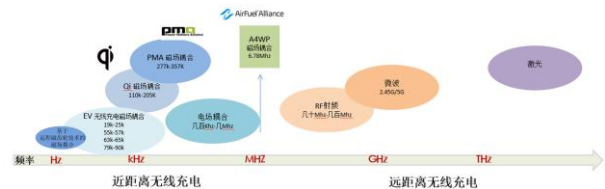


图3 不同能量耦合方式WPT的电磁场频率分布

#### 1.1.1 近距离无线充电

近距离无线充电主要分为磁场耦合式和电场耦合式两种。

##### (1) 磁场耦合式无线充电

磁场耦合式无线电能传输技术利用磁谐振或磁感应原理将能量由发射端传递至接收端，该方式采用的发射线圈和接收线圈类似于分离变压器的原边绕组和副边绕组，如图4所示。发射线圈和接收线圈距离一般在几厘米至几十厘米，线圈间的耦合系数一般为0.1以上。

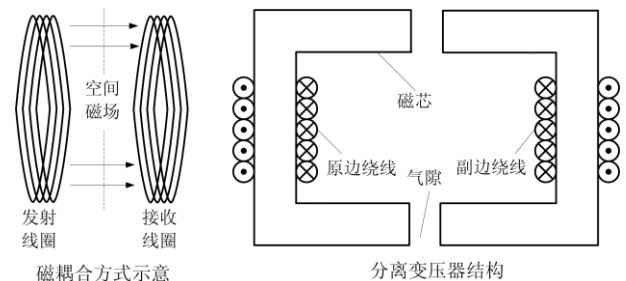
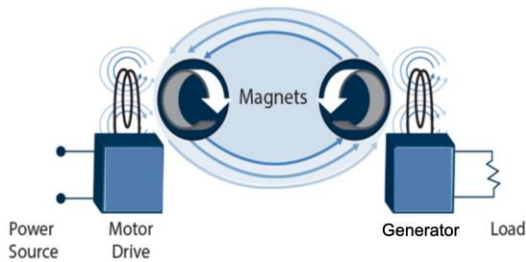


图4 磁耦合WPT与分离变压器的结构对比

还有一种基于磁齿轮的近距离磁场耦合无线充电技术。在相应系统的发射端用电机带动磁体运动，

利用磁场之间力的相互作用，接收端的磁体会随之运动，再带动接收端的发电机发电，从而实现从发射端到接收端之间的能量无线传递。与基于磁谐振或磁感应原理的技术相比，该方案的工作频率更低，通常是几百赫兹，充电距离二三十厘米，但工作磁场更强。图 5 是基于磁齿轮的无线充电原理以及相关充电装置。



充电系统原理



充电装置

图 5 基于磁齿轮的无线充电技术原理及充电装置

### (2) 电场耦合式无线充电

电场耦合式无线充电系统一般采用分离的两个极板来形成耦合电容，电容值大小与极板正对面积、极板间距离及介电常数的大小相关。由于空气的介电常数很小，为了实现较大的功率传输，需要较大的极板正对面积、较小的传输距离和较高的工作频率，而实际应用场景难以满足这些条件，导致电场耦合式在实际中应用比较少，图 6 是电场耦合式无线充电系统结构。

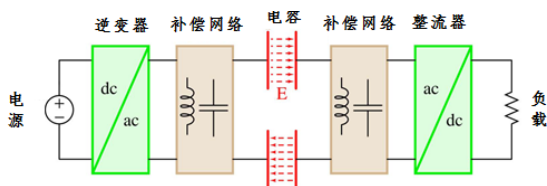
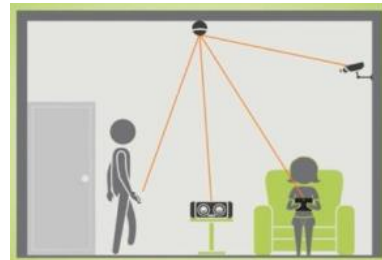


图 6 电场耦合式无线充电系统结构

### 1.1.2 远距离无线充电

利用射频和微波进行远距离无线充电时，发射端和接收端都需要用到天线。天线的发射可以是多

方向的，也可以是定向的，比较容易实现一对多的充电，充电距离达到米级，频率越高充电距离越远。图 7 是采用微波和射频的方式实现远距离无线充电的场景。



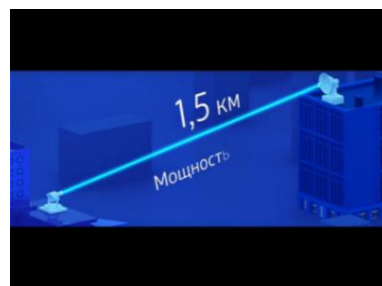
微波方式无线充电



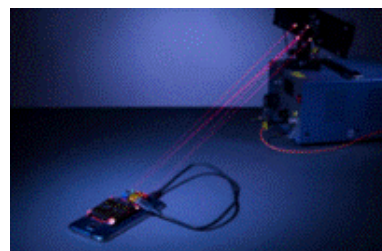
射频方式无线充电

图 7 采用微波和射频方式实现远距离的无线充电场景

激光无线充电是以激光为载体，实现能量无线传输，在发射端将电能转换为激光并发射出去，在接收端通过光电转换再将激光转换为电能。激光无线充电的相关应用如图 8 所示。



基于激光的远距离电能传输



采用激光给手机进行远距离无线充电

图 8 激光无线充电

目前远距离无线充电技术多处于理论研究和验证阶段，在能量传输效率和安全性方面还面临很大的挑战，距真正规模商业应用还有一定的距离。

### 1.2 无线充电技术典型应用

无线充电技术在小功率领域已广泛商用，如手机、手表、电动牙刷、无尾家电、无人机等领域的无线充电。近年来在大功率领域也逐渐开始商用，应用范围越来越广，如乘用车无线充电、公交大巴无线充电、无轨电车移动无线充电等。此外无线充电技术在植入式医疗、特种工业机器人以及军事航天等领域中均逐渐得到应用。图 9 为无线充电在各个领域的应用案例。



(a)



(b)

图 9 无线充电的应用场景

## 2 电动汽车无线充电系统构成

EV WPT 属于近距离无线充电领域，磁耦合方式是目前主流的实现方案，在技术发展初期存在电磁感应和磁共振两类不同概念。随着电动汽车对 WPT 技术需求的明确，规范了工作频率、传能距离、功率等级等系统关键指标以后，两类概念在技术方案上已经融合，统一为“磁耦合”的概念。

如图 10 所示为 EV WPT 系统示意图，地面端和车载端无电缆连接，地面端包括整流和电压调整电路、逆变电路、发射补偿网络、发射线圈、控制器和通讯模块，车载端包括车载接收线圈、接收补偿网络、整流电路、负载、控制器和通讯模块。

地面端的整流和电压调整电路将工频交流电转换为直流电；逆变电路将直流电转换为高频交流电；地面端补偿网络对发射线圈提供补偿；发射线圈将高频交流电转化为高频交变磁场。



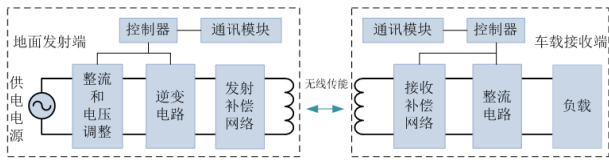


图 10 EV WPT 系统示意图

车载端的接收线圈通过磁耦合的方式接收磁场能量，并将其还原为高频电能；车载端的补偿网络对接收线圈提供补偿；整流电路将高频交流电转换为稳定的直流电供给负载。

此外，地面端和车载端间的控制信号通过无线通信进行交互，常用的无线通信方式有 WiFi、蓝牙、Zigbee 等。目前国内和国际的标准中，无线通信方式均采用 WiFi 方式(IEEE 802.11™)。

### 3 电动汽车无线充电核心技术

电动汽车无线充电系统的首要任务是实现高效的电动汽车无线能量补给，因此高效、安全的功率变换和传输是无线充电系统的核心。功率变换电路方面主要存在高频逆变和高频整流电路设计技术、谐振器优化设计技术以及补偿电路优化设计技术等，以上核心技术直接影响电动汽车无线充电系统的功率、效率、电磁环境等整体特性。

电动汽车无线充电相关的控制是实现系统正常运行的重要保障，在系统控制方面的核心技术主要包括功率控制技术、效率优化技术、频率跟踪技术、阻抗匹配技术及安全控制技术等。

此外，为了能在全天候场景下实现自动能量补给，电动汽车无线充电系统实现高效率充电只是基础功能要求，同时还需要具备多项辅助功能以实现安全保障及协助车辆准确泊车。电动汽车无线充电系统主要辅助功能包括异物检测(Foreign Object Detection, FOD)、活物检测(Living Object Detection, LOD)、引导对齐(Position Detection, PD)和偏移检测等。

在 EV WPT 系统，地面端和车载端设备可能由不同的设备厂家生产(特别是在公共应用场景下)，且车辆根据功率等级和离地间隙存在多种情形，地面端和车载端设备除满足性能、安全要求外，还需要满足互操作性要求。互操作涉及硬件结构兼容、系统参数兼容、软件架构兼容、通信流程兼容、认证鉴权管理等方面。须由统一的标准或者协议来规范，这是当前国内和国际电动汽车无线充电标准制定中的重要工作。

根据上述描述，电动汽车无线充电的核心技术

进行如下分类。

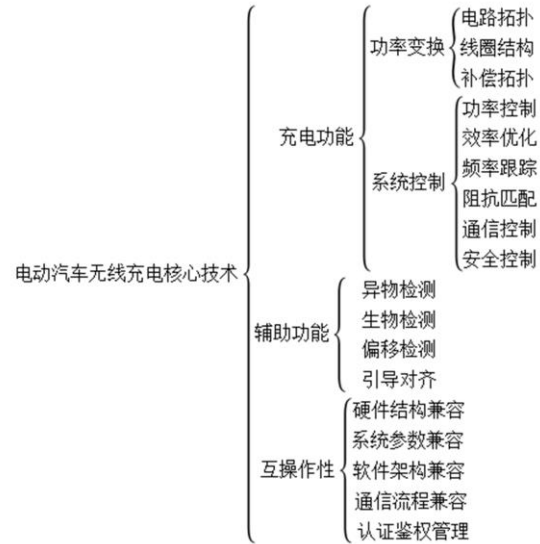


图 11 电动汽车无线充电核心技术分类

### 4 电动汽车无线充电系统关键环节

按照系统设备功能模块划分，EV WPT 系统关键环节可分为功率变换电路、系统控制以及辅助功能三个环节。

#### 4.1 功率变换电路环节

EV WPT 系统的功率变换电路包括地面端和车载端两部分。地面端功率变换电路部分包括输入电源、整流调压电路、逆变电路、地面端补偿网络和发射线圈，车载端功率变换电路包括接收线圈、车载端补偿网络、整流电路，其中发射线圈、接收线圈及其附件统称为磁耦合机构。车载端安装在车上，对设备的体积和重量较敏感。在系统功率变换电路中，高频电力电子电路(高频逆变、高频整流)、磁耦合机构以及补偿电路是其中的关键环节。

##### (1) 高频电力电子电路

EV WPT 系统电力电子电路主要涉及发射端的功率因数校正(Power Factor Correction, PFC)模块、高频逆变模块以及接收端的高频整流模块、调压模块。各电路模块的高效稳定电能变换是整体系统高效安全运行的重要基础，电力电子电路的设计也是电动汽车无线充电系统整体效率突破的重点方向之一。新型电路拓扑和软开关技术的不断发展有利于提升各模块的电能变换效率，这也是目前电动汽车无线充电系统在电力电子电路方面的重点攻关方向。

此外，由常规半导体材料(如 Si、GaAs 等)制成的功率半导体器件在许多方面已接近材料自身的本征极限，开关频率和功率水平关系的局限性如图 12 所示。

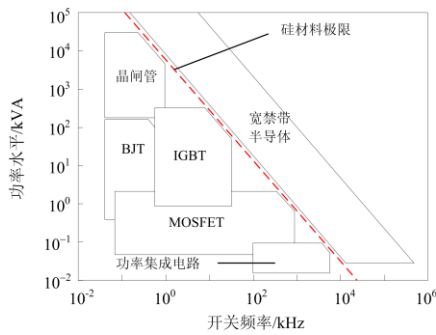
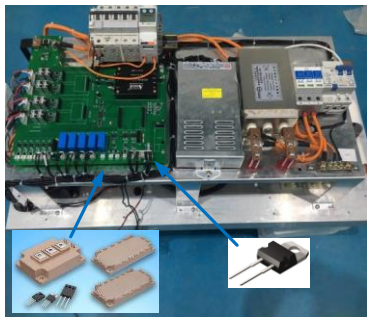


图 12 半导体材料的开关频率和功率水平关系

由于电动汽车无线充电系统工作频段较高，因此对大功率高频逆变和高频整流等电力电子电路提出了较高的要求，未来新型高频电力电子开关器件的应用也为进一步提升系统效率提供了新的思路。如图 13 所示，为了降低高频开关下的器件损耗，包括 SiC、GaN 等高开关频率低开关损耗的电力电子器件在电动汽车无线充电系统中逐渐得到应用。



发射端高频逆变装置



发射端高频逆变电路

图 13 新型高频电力电子开关器件在电动汽车无线充电系统中的应用

以 SiC 材料为例，与目前应用广泛的 Si 材料相比，SiC 材料具有耐高温工作、高阻断电压、低开关损耗、高开关频率等优点，因此在未来电动汽车无线充电应用中极具潜力，如图 14 所示为基于 SiC 材料的整流二极管和 MOSFET。



图 14 基于 SiC 材料的整流二极管和 MOSFET

SiC MOSFET 器件特性不同于 IGBT，SiC MOSFET 对回路参数更敏感，易产生波形的振荡过冲，栅极电压的安全阈值比 IGBT 要小，栅极氧化层容易击穿，在驱动保护电路设计上比 IGBT 更加困难，因此相关器件驱动电路设计也是电动汽车无线充电系统高频电力电子电路设计的关键。

(2) 磁耦合机构

发射线圈、接收线圈及其附件组成了无线充电系统的磁耦合机构，除了实现磁场的能量传递外，磁耦合机构的性能还关系到电磁环境的优劣、磁耦合机构本体发热程度、散热设计、不同系统兼容性以及经济成本等。

常见的磁耦合机构线圈结构存在圆形和双 D(DD)等，其绕线方式如图 15 所示。此外，根据应用场景的需求，如需要较大的偏移量、需要较均匀的磁场分布等，线圈结构也可采用其他的绕线方式。

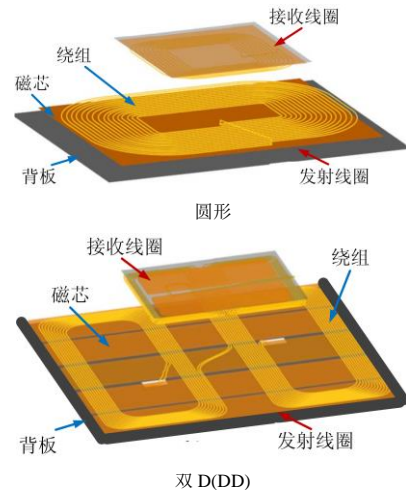


图 15 不同磁耦合机构结构示意图

考虑到高频情形下导体的集肤效应和邻近效应，常用铜制实芯导线一般难以满足 EV WPT 系统高频工作的需求，为了降低磁耦合机构中的损耗、提升系统整体工作性能、降低磁耦合机构散热需求，空心铜管以及利兹线陆续被应用于电动汽车无线充电系统的磁耦合机构中，并逐渐成为业界共识。

磁芯材料有多种类型，如铁氧体、非晶材料等。铁氧体容易定制各种不同形状，与其他类型的磁材相比成本更低，是制作线圈的主流磁材，不同结构

的磁芯用铁氧体材料如图 16 所示。磁芯结构的设计和排布也是磁耦合机构设计的关键，它涉及到整体磁耦合机构的耦合性能、电磁环境水平、重量和成本等技术经济参数。

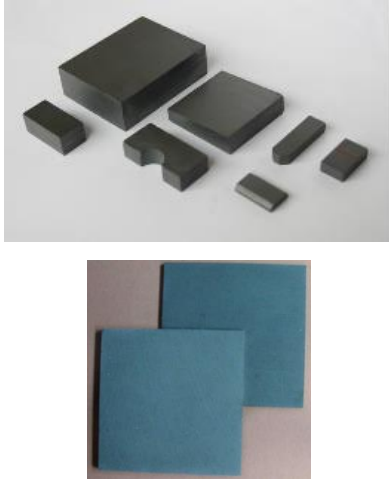


图 16 不同结构的磁芯用铁氧体材料

在磁耦合机构设计中，为了实现更好的电磁环境特性，还需要考虑屏蔽材料的选择和安装结构。目前铝板为较常用的磁耦合机构电磁屏蔽材料，线圈、磁芯和铝板等部件的协同组合式设计是实现高性能磁耦合机构的关键。

### (3) 补偿电路

EV WPT 系统中收发端的补偿电路主要用于实现收发线圈的频率补偿，保证收发端谐振频率接近，提升系统性能。不同的补偿拓扑具有不同的系统特性，如图 17 所示为电动汽车无线充电系统典型补偿电路拓扑。此外不同类型的补偿电容或补偿电感电压电流应力存在很大差异，因此补偿电路的拓扑选择和器件选型是该环节的设计重点。

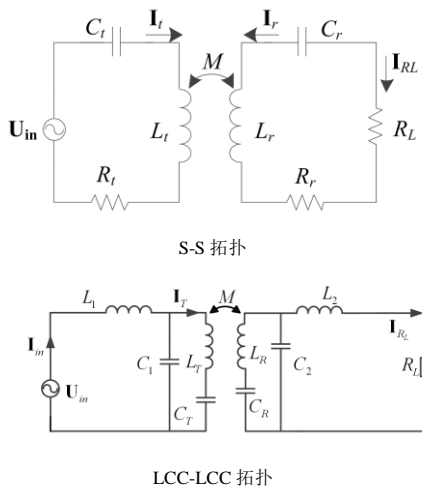


图 17 电动汽车无线充电系统典型补偿电路拓扑

## 4.2 系统控制环节

系统控制包括功率控制、效率优化、频率跟踪、阻抗匹配、通信控制、安全控制等，其中地面端控制实现了对发射端整流调压电路、逆变电路、地面磁耦合机构等环节的控制和保护，车载端控制实现了对接收端磁耦合机构、整流电路和负载等环节的控制和保护。

地面端和车载端的控制主要有两种方式：单边控制和双边控制。所谓的单边控制是指系统输出功率等关键参数的调节由地面端或者车载端单独完成，另一端不参与调节。双边控制是指地面端和车载端同时参与系统整体调节。

双边控制把地面端和车载端的控制相对解耦，便于实现互操作。图 18 给出一种双边控制方法的结构示意图。图中车载端可实现对输出电流(或输出电压)的控制，地面端可实现对地面线圈电流(或逆变器输出电压)的控制。双边控制一般通过无线通信(WiFi)方式实现数据交互。

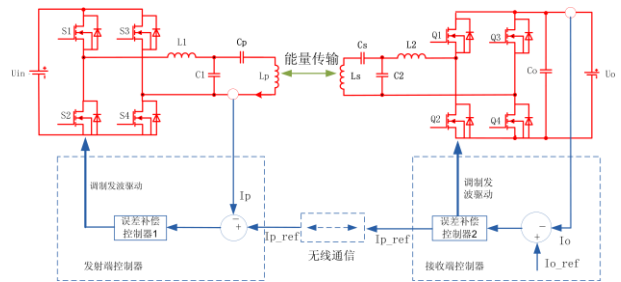
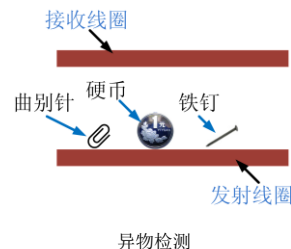


图 18 双边控制无线充电系统的拓扑和控制结构

## 4.3 辅助功能环节

电动汽车无线充电主要的辅助功能主要包括异物检测(FOD)、活物检测(LOD)、引导对齐(PD)以及偏移检测等，如图 19 所示为各辅助功能示意图。

异物检测主要是检测 EV WPT 充电区域内的金属等异物，避免这些物体由于涡流效应引起高温和起火的风险。生物检测是为了避免人或宠物等生命体由于进入充电区域(该区域的电磁环境限值可以适当放宽)引起安全风险。导引入位是为了增加使用的便利性，如导引停车入库，可以为车辆或驾驶者实时提供地面设备和车载设备的相对位置，引导车







生物检测



引导对齐

图 19 不同辅助功能示意图

辆停在可充电区域。位置检测是检测车载线圈和地面线圈的相对位置，保证车辆停在适合充电的位置范围内。以上辅助功能是为了实现 EV WPT 安全高效充电以及充电便捷性而配置的。

电动汽车无线充电系统各环节总结如表 1 所示。

### 5 电动汽车无线充电技术优势及推广应用中面临的挑战

与传导充电方式相比，EV WPT 存在以下优势：

(1) 无连接器和线缆的磨损，更加安全可靠。传导充电设施需要线缆和充电插头，充电插头和线缆在不断拔插使用的过程中容易磨损，为防止老化故障还需要定期更换连接器和线缆。无线充电可以有效避免上述安全隐患，并节约运维成本。

(2) 充电更加便利，无需驾驶人员手动拖拽插拔电缆，用户体验较好。

(3) 可以全天候使用，EV WPT 可适应多种恶劣环境和天气，即使在雷雨天气下使用也无触电危险。

(4) 可实现无人值守的自动充电，可有效支撑自动驾驶的全程无人化操作，是配合自动泊车/自主代客泊车系统(Auto Valet Parking, AVP)的最佳商用充电方案。

(5) 无线充电能量发射装置建设在车位下方，可有效缓解由于大量建设充电站导致的土地和空间资源占用。

表 1 电动汽车无线充电系统关键环节

关键环节	相关问题	要求	解决思路
高频电力电子电路	EV WPT 系统工作频率高，导致电路开关损耗大	优化电路拓扑，降低高频电路器件开关损耗	(1)在 PFC、高频逆变、高频整流等电路中采用新型电路拓扑 (2)应用软开关技术 (3)未来还可以采用具有高频低开关损耗的新型电力电子开关器件进一步降低损耗
磁耦合机构	磁耦合机构设计优劣影响系统功率、效率、抗偏移性、电磁环境、发热、散热、重量和成本等技术经济指标	开发高效、大功率、高抗偏移性、低漏磁、低成本、散热简单的磁耦合机构	(1)采用利兹线绕制线圈 (2)高性能磁芯材料的选用和排布 (3)应用铝板等磁屏蔽材料减少电磁暴露
补偿电路	补偿电路设计优劣影响系统恒压恒流特性、功率、效率、电磁环境以及成本等技术经济指标	在满足 EV WPT 系统性能要求基础上，开发结构简单实用性强的补偿电路，提高系统效率，降低成本	(1)提出高性能低成本的新型复合补偿电路拓扑 (2)采用过流能力大损耗小的补偿电路器件
系统控制	EV WPT 系统收发端没有物理连接，系统控制不方便	提升系统控制灵活性，实现结构简单、稳定、快速、低成本的控制方案	(1)采用高速快响应的芯片器件 (2)开发稳定高速控制算法相关统一控制器
辅助功能	金属等异物进入充电区域可能引起高温或大火；充电区域内的电磁环境限值要求过于严格；生命体进入该区域可能有安全风险；停车时车载线圈和地面线圈不容易对准	避免充电时金属异物、生命体进入充电区域；为驾驶者提供实时的收发端相对位置信息	(1)采用异物检测技术 (2)采用生物体检测技术 (3)采用引导入位技术 (4)采用位置检测技术

(6) 智能化的无线充电方式可以实现“无感”充电，整个充电过程可以无需人为介入。

(7) 更有利于实现电动汽车和电网的互动，发挥电动汽车的移动储能作用。

目前电动汽车无线充电技术在推广应用中的挑战主要来自以下几个方面：

(1) 目前系统设备成本较高。无线充电同传导充电相比系统更复杂，加上还未实现规模化大批量生产，产业链尚未完善，部分元器件需定制，导致系统设备成本偏高，这给无线充电市场推广带来了一定障碍。但随着无线充电技术的不断发展和规模商

用，产品的成本必将大幅降低。

(2) 系统效率有待进一步提升。无线充电经过电能的多次转换以及磁场空间耦合，目前端到端的效率和传导充电相比有 3% 左右的差异。当前主流技术方案和产品可以做到最大 92% 左右的端到端充电效率，可以满足应用需求。

(3) 互操作性等标准体系还未完成建立。目前电动汽车无线充电的国际国内标准尚在制订中，在线圈形式、电路、控制、通信方案上，各设备厂家采用的技术方案不同，性能各异，不能完全实现互联互通，影响了 EV WPT 技术的推广使用。

(4) 公众对于电动汽车无线充电系统的电磁环境可能会存在担忧，因此如何普及电磁环境相关概念及标准，打消公众对于电磁环境顾虑也是未来电动汽车无线充电技术推广应用中面临的挑战之一。

(5) 由于传导充电方式发展早于无线充电方式，在推广无线充电技术中可能会涉及到充电桩基础设施改造，如何实现两种充电方式兼容并存也是目前面临的挑战之一。

## 6 电动汽车无线充电技术典型应用场景

电动汽车无线充电的应用场景主要有：① 私人充电设备使用；② 公共场所的公共充电设备使用；③ 专用充电设备使用；④ 立体车库无线充电；⑤ 其他应用场景。几种场景根据不同的应用对象，在技术细节方面的要求有所不同。

私人应用场所如自家车库安装无线充电系统，地面端和车载端的匹配要求相对固定，除了必须满足性能要求和安全要求以外，互操作等要求可以适当降低。同时家用电动汽车无线充电系统通常功率

等级不大，因此对于系统设计中的器件选型、电路拓扑、关键部件等要求不苛刻。

公共场所应用场景(如公共充电桩)，地面发射端固定安装在充电位，需满足搭载不同车载端电动汽车的无线充电需求，地面端和车载端可能来自不同供应商，地面端和车载端的功率等级、离地高度等级可能不同，通信和控制方式也可能存在差异，为保证互联互通，必须满足互操作性的要求。同时，在公共场所应用场景下，还涉及充电设备的鉴权、认证、计费管理等过程。

作为专用充电设备使用的时候，例如企业作业场所、工厂厂区、旅游景区、游乐场所、机场、港口或码头等特定区域使用的电动车辆，无线充电的地面端和车载端多采用一一对应的模式，充电设备具有专用属性，不涉及多种设备之间的兼容操作，因此互操作等要求也可以适当降低。该种应用场景下，也可以选择动态无线充电方案。

对于立体停车库应用场景，由于其整体自动化水平高、安全要求较高等特点，电动汽车充电时若采用传导充电方式，势必增加充电难度，因此在立体车库应用场景下无线充电技术是较佳的选择。该场景下的无线充电除满足性能要求和安全要求外，线圈形式可多样化，互操作要求不高，FOD、LOD、PD 要求可简化。

其他应用场景，比如红绿灯路口或公交站台等电动汽车短暂停留场合，可以采用无线充电方式进行短时大功率补电。这种方式属于电动汽车的机会充电(Opportunity Charging)，是增加续航里程的重要手段。