

电动汽车无线充电产业化当前主要任务及长期目标

随着国内外各车企的量产规划时间逐步临近以及标准化程度的不断完善,电动汽车无线充电产业化将逐步实现。结合无线充电产业状态及未来产业演进过程,仍然存在一些问题需要解决,包括当前的系统充电频率、标准体系、互联互通等问题,也存在一些长期目标需要不断地完善,包括了系统效率、安全、成本以及商业模式等。

1 当前主要任务

1.1 确定充电频率

电动汽车无线充电是通过原、副边线圈产生的高频交变电磁场实现电能的无线传输,因此,需要在原边线圈施加高频电流激励,该电流的频率即为充电频率。根据 ISO 19363、IEC 61980 系列以及国内开展的电动汽车无线充电标准化工作,电动汽车无线充电行业内达成共识,将 79~90 kHz 作为乘用车无线充电的充电频率,该频率段涉及到频率划分问题。

频率划分一般是指把某个特定的频带列入频率划分表,规定该频带可在指定的条件下供一种或多种地面或空间无线电通信业务或射电天文业务使用的过程。一般情况下,频率划分是针对无线电业务展开,而按照 ITU 国际无线电规则频率划分,目前各种无线业务可以使用的频率范围为 9 kHz~275 GHz。因此,电动汽车无线充电的频率也属于频率划分的范围。

频率划分作为管理的核心,是无线电频率管理部门最重要和最基本的频率管理政策文件,由此而形成的《中华人民共和国频率划分规定》是国家进行中长期频率规划的重要依据,是利用无线电频率资源的基础。为加速使中国无线电频率划分适应国际、国内电信新环境,与国际接轨,必须首先保证中国“无线电频率划分规定”与国际电联(ITU)世界无线电通信大会(WRC)确定的国际无线电规则(Radio regulation)相接轨。频率划分的原则包括:

(1) 统筹考虑各类无线电业务的实际需求,在规划新业务、新技术的频谱需求时,充分考虑我国频谱使用的现实状况,尽力做到既鼓励采用新技术又不脱离实际;

(2) 选择技术成熟、先进可靠的标准和体制,积极支持频谱利用率高、协议开放的通信方式,既要保

护民族工业又要鼓励不同厂商、不同体制间的竞争;

(3) 深入研究各类业务之间的电磁兼容特性及频率共用的可能性,以提高频谱利用率,同时还要兼顾长远需求,使同一频段上的新旧业务之间实现平滑过渡。

因此,无线充电频率划分的核心课题为与其他无线电业务之间的共存问题,现有的《中华人民共和国频率划分规定》中,与电动汽车无线充电频率接近的频率段使用情况如下表所示。

电动汽车无线充电系统的频率共存问题可分为同频共存、邻频共存以及倍频共存 3 类情况。

对于同频共存,在 79~90 kHz,目前的主要业务为无线电导航和水上移动业务,我国在 79~90 kHz 无具体业务,因此电动汽车无线充电与同频段业务不存在干扰问题。

对于邻频共存,在 90~120 kHz,存在 LORAN C 导航系统业务,经测试验证,并在 ITU 会议上讨论之后确认,无线充电业务与 LORAN C 导航业务不存在干扰。

对于倍频共存,电动汽车无线充电的 7~19 次谐波与 526.5~1 606.5 kHz 的广播业务频率存在同频或邻频情况,该频率段的广播主要为中波广播业务,目前 ITU 正在组织开展电动汽车无线充电与中波广播业务的共存问题研究。

在 2015 年召开的 WRC 大会中,明确将无线充电的频率划分作为一项重要的研究课题。最终,在 2019 年 10 月召开的 WRC-19(世界无线电大会 2019)上全球范围内就 EV WPT 的频段达成一致意见,在国际电联的建议书中明确提出 EV WPT 使用的两段高功率候选频段 19~25、60 kHz 频段(55~57 kHz 和 63~65 kHz),以及一个中功率候选频段 79~90 kHz,并指出只要 EV WPT 无用发射得到严格控制,在各频段内的操作与现有无线电通信业务,如固定、水上移动、标准频率和时间信号、无线电导航、无线电定位等是可以兼容的,但仍然需要通过进一步研究来确定确切的限值和减缓技术以及潜在的其他问题。WRC-19 大会形成了须保护无线电通信业务不受 EV WPT 干扰,并在 ITU-R 210/1 议题继续开展研究的一致结论。该议题的结论将指导 ITU-R 在 EV WPT 方面的研究工作,并促进 EV WPT 产业进一步健康发展。

表 1 中华人民共和国频率划分规定(部分)

中华人民共和国无线电频率划分			国际电联 3 区无线电频率划分
中国内地	中国香港	中国澳门	
70~72 无线电导航 5.60 [固定] [水上移动] 5.57	70~90 无线电 导航	70~72 无线电导航 [固定] [水上移动]	70~72 无线电导航 5.60 [固定] [水上移动] 5.57 5.59
72~84 固定 水上移动 5.57 无线电导航 5.60		72~84 固定 水上移动 无线电导航	72~84 固定 水上移动 5.57 无线电导航 5.60
84~86 无线电导航 5.60 [固定] [水上移动] 5.57		84~86 无线电导航 [固定] [水上移动]	84~86 无线电导航 5.60 [固定] [水上移动] 5.57 5.59
86~90 [固定] 水上移动 5.57 无线电导航 5.60		86~90 固定 水上移动 无线电导航	86~90 固定 水上移动 5.57 无线电导航 5.60
90~95 [固定] 水上移动 CHN1 无线电导航 5.62 5.64 CHN2	90~130 无线电导航	90~110 无线电导航 [固定]	90~110 无线电导航 5.62 [固定] 5.64
95~110 无线电导航 5.62 [固定] 5.64 CHN2			
110~112 固定 水上移动 无线电导航 5.60 5.64		110~112 固定 水上移动 无线电导航	110~112 固定 水上移动 无线电导航 5.60 5.64
112—117.6 无线电导航 5.60 [固定] [水上移动] 5.64		112~117.6 无线电导航 [固定] [水上移动]	112~117.6 无线电导航 5.60 [固定] [水上移动] 5.64 5.65
526.5~535 广播 航空无线电导航 [移动] 5.88	526.5~1606.5 广播	526.5~535 广播 [移动]	526.5~535 广播 [移动] 5.88
535~1606.5 广播 [航空无线电导航]		535~1606.5 广播	535~1606.5 广播

2 完善行业标准

电动汽车无线充电系统涉及到充电安全、互操作性、通信协议、功能规范以及系统性能指标等多方面内容。完善的标准体系是支撑产业发展的必要基准，目前正在编制的国家标准为 8 项，其中已报批的 4 项标准分别为：

通用要求：包括分类、测量原则、设备安装方式、环境测试要求、安全要求、结构要求等基础需

求类要求规范。

通信协议：包括充电流程(公共应用、私人应用 2 类)、接口消息定义、参数定义等充电过程中的架构要求规范。

特殊要求：包括性能要求(效率、功率等级、离地间隙、偏移等)、功能要求(充电功能、待机唤醒、故障处理、人机交互等)、技术要求(电磁环境、电击防护、绝缘强度、耐碾压能力等)、测试方法等基

础需求类要求规范。

电磁环境安全：包括电磁环境安全限值、电磁场暴露测试方法、电磁环境安全结果评定等安全要求规范。

另外，在 2018—2019 年启动了 4 项国家标准的编制，分别为电磁兼容性要求及测试方法、互操作性要求及测试方法—地面端、互操作性要求及测试方法—车辆端、商用车应用特殊要求。

结合产业化发展进程，目前正在制定的互操作要求及测试方法的地面端、车辆端 2 部分标准是保证无线充电在公共应用场合应用的基础标准。而对于私人应用场景，满足通用要求、特殊要求、电磁环境安全、电磁兼容性等几项安全类和性能类标准即可，无需进行互操作性的测试。

《电动汽车充换电设施标准体系(2019 版)》中提出了关于无线充电标准体系的规划，结合目前已立项的标准，体系共包含 19 项标准，涉及到系统与设备、接口、检测、服务网络、建设运营共 5 大类。我国无线充电标准将按照 4 步走建设：一是优先制定无线充电的基础标准，为产业提供发展环境；二是加快制定无线充电互操作标准，为产业提供应用条件；三是制定无线充电产品标准，为产业提供推广基础；四是制定无线充电运维标准，为产业提供服务准则。目前，基础标准基本建立，正在建立互操作标准，试点产品标准，结合无线充电产业化进程，支撑和推动无线充电技术的推广和应用。完善的标准体系能够有效指导无线充电产品的研制、完善产品设备的测试方法、形成产品建设及运营规范、支撑产品应用推广，因此标准体系的完善是实现电动汽车无线充电产业发展的重要基础。

3 促进互联互通

电动汽车无线充电产业的互联互通包括 2 类，分别是无线充电系统原、副边设备之间的互联互通以及无线充电系统与现有充电运营体系之间的互联互通。

系统原、副边设备之间的互联互通以互操作性相关标准形成的规范为基准，原、副边设备产品研制和测试参照互操作性标准，可保证不同厂商、不同车型原、副边设备的互联互通。原、副边设备之间的互操作性“接口”规范包括电气“接口”、通信互操“接口”、磁场“接口”等，由于原、副边设备之间无物理接触，因此以上“接口”均为非接触接口，需通过标准化约定“接口”定义，进而保证原、副边设备之间的互联互通。

无线充电与现有传导充电运营管理之间的互联

互通需区分无线充电与传导充电的运营管理之间的异同，基于现有的传导充电运营管理平台及规则，兼容无线充电运营管理的相同的功能，包括设备监控、计量计费、用户权限、日志管理、数据库等，增加无线充电运营管理中特有的因素，包括告警信息管理、人机界面管理、系统性能管理、设备配置管理、设备认证鉴权管理等。目前，《电动汽车充换电服务信息交换》中国电力企业联合会系列标准包含 10 个部分，规定了充电设施、充电服务运营平台以及不同运营商间的接口及通信协议标准，是实现充电漫游的基础标准。无线充电与传导充电的运营管理之间的通信协议标准可在《电动汽车充换电服务信息交换 第 6 部分：充换电设备接入服务平台接口规范》进行完善，从而实现无线充电与传导充电都能满足充电服务互联互通目标。

互联互通是无线充电产业能够在公共应用领域销售、运行、经营以及维保的关键，是推动产业规模化应用的核心环节。

4 长期目标

4.1 降低设备成本

不同品牌的不同车型，对无线充电设备的最低成本要求不同，对于售价越低的车型，其对无线充电设备成本要求越高，因此，为扩大无线充电设备的车型配置范围，持续推动产业规模增长式发展，在保证产品质量和安全性的前提下，降低设备成本是整个行业发展过程中需要持续关注重点。

无线充电设备的降成本可分为图 1 所示的三个大阶段。

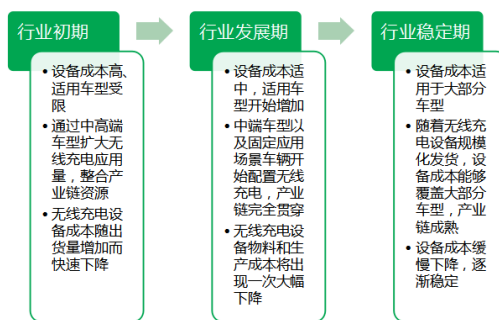


图 1 无线充电设备成本趋势

在行业初期，电动汽车无线充电出货量较少，且自动泊车以及自动驾驶技术未在电动汽车普及应用，无线充电系统设备成本较高，较大地限制了无线充电系统装车对象，仅适用于中高端车型。但随着无线充电设备应用的出现，且出货量到达万级别，无线充电设备的部分成本(如结构件开模成本等)均

摊压力减小，且随出货量不断增加，无线充电设备本将快速下降。

随着行业不断发展，无线充电设备成本将出现一定幅度的降低，且产业链开始逐渐出现规模化订单，将出现较多无线充电设备的器件及模块供应商，设备物料将出现一次较大幅度的降低，且设备生产工艺逐渐成熟，生产成本也将出现较大幅度降低，无线充电将适用于部分中端车辆和固定应用场景车辆应用，如 AVP、共享汽车等车辆的应用。在行业稳定阶段，随着无线充电设备的物料和生产成本降低，无线充电系统设备的成本将覆盖大部分市场中的电动车辆的成本需求，且无线充电行业上下游产业链逐渐成熟，设备成本将比较小的幅度下降至趋于稳定。

具体的，无线充电系统设备主要分为生产成本和物料成本，生产成本随着规模化的展开将逐渐降低，对于物料成本目前系统设备的成本主要集中在以下几方面。

功率器件：包括 SiC 开关器件、整流二极管、滤波电感等；

磁芯：包括原、副边线圈的磁芯；

线圈绕组：包括原、副边线圈的利兹线绕组；

补偿电容：包括原、副边补偿网络中的补偿电容；

结构件相关：包括设备壳体、接插件、灌胶胶水等。

在规模化应用之前，结构件相关材料、线圈绕组、磁芯、补偿电容以及 SiC 器件等几部分材料的成本较高，随着设备的规模化销售，这几部分设备材料的成本将呈现较大幅度的降低。

4.2 提高充电效率

作为系统的核心指标，系统充电效率的提升是无线充电理论技术研究和工程技术研究不断追求的目标。足够高的系统效率将具备以下优势：

用户充电成本低；

系统热损低，部件体积降低；

漏磁减小，电磁环境污染降低。

电动汽车无线充电系统的充电效率是指系统输出侧(一般是指车辆动力电池或电气设备)的输出功率与系统输入侧(一般是指 AV 50 Hz 的电网输出)输入功率的比值。

在设定系统效率指标时，一般会分为两类场景，一类为私人应用场景，即同一个设备厂商提供的固定功率等级、离地间隙的地面设备和车载设备；另一类为公共应用场景，即不同设备厂商提供的不同功率等级、离地间隙的地面设备和车载设备。在相关国家标准中规定的系统效率为公共应用场景下

的系统效率，即需考虑互操作性的系统效率。

2019年6月，在中国电力企业联合会的组织下，由中国电力科学研究院牵头完成了国内两个设备厂商之间互操作性测试，即地面设备、车载设备为两个不同厂商生产。本次测试的结论是，在任意偏移条件下，输出功率为满载、50%载、75%载的情况下，系统效率均在 89%~93%，且在满载输出状态下，任意偏移条件下，系统效率平稳，可保持在 90%以上。以上测试说明，在公共应用场景下，无线充电系统的效率可最大可达到 93%，正常充电状态下的效率可超过 90%，效率逼近传导充电。

无线充电系统效率的提升需关乎系统各个层面设计，具体如图 2 所示。



图 2 与系统效率提升的相关技术

4.3 确保充电安全

无线充电系统安全包括图 3 所示的 6 个部分。



图 3 无线充电安全分类

(1) 热安全

热安全是电动汽车充电设施的核心安全问题，相对于传导充电，无线充电在供电电源和用电设备直接无直接的物理连接，因此，无线充电充电接口的热安全问题相对更能够得到有效保障。

无线充电的热安全问题主要在于解决各个功率环节的升温问题，主要包括功率转换部件和电磁耦合机构部件，通过系统参数及结构设计，设置各部

件的输入输出电流大小限值，并在地面设备附加风冷和自然冷、在车载设备附加液冷或自然冷的散热措施，能够有效保证无线充电的热安全。

(2) 电气安全

无线充电的电气安全主要包括电击防护、安规等方面，具体包括直接接触防护、能量存储(电容)、保护导体、漏电流、绝缘电阻、绝缘强度、防雷击等方面。无线充电该部分安全要求与常用的充电设备相同，遵循相关标准进行设计即可保障。

(3) 机械安全

无线充电的机械安全主要包括设备的 IP 等级、原边设备耐碾压、车载设备耐振动耐冲击等方面。

对于原边的非车载功率组件(壁挂设备)，其 IP 等级要求不低于 IP54，原边设备(线圈部分)IP 等级要求不低于 IP67(公共路段不低于 IP68)，车载设备的 IP 等级要求不低于 IP68。

原边设备(含线缆)的耐碾压按照国家标准规范设计，可保证设备在车辆的碾压下仍不影响整车使用。

车载设备一般安装在车辆底盘，因此需安装车辆部件的标准要求，具备防振动、防冲击以及防溅射等功能。

(4) 通信安全

无线充电的通信安全主要包括设备可信认证、数据交互安全等几部分。

设备可信认证是保证无线充电系统各部件设备“身份可信”的核心方法，在公共应用场合，由于无线充电系统原副边设备无物理接口，因此需要原副边设备均为通过互操作性测试的设备，才可保证系统充电安全。在充电流程过程中，需从原副边设备认证流程、兼容性检测流程两方面，从运营商、设备两个层面，以密钥的方式进行可信认证确保设备身份可信。

无线充电数据交互安全包括原副边充电流程数据交互、车载设备与车辆数据交互以及地面设备与运营平台数据交互安全三个层面，进而避免数据交互过程中被伪造、窃听、拒绝服务以及重放等攻击。其中原副边充电的通信通过 WIFI 进行，车载设备与车辆的通信通过 CAN 进行，地面设备与运营平台的数据可通过 WIFI 或 4G/5G 进行。对于原副边设备通信以及地面设备与运营平台的数据交互，一般可采用传输层安全协议(TLS)保证数据交互的安全性。

(5) 电磁安全

电磁安全主要包括 EMC 和 EMF(电磁场暴露)两部分。

对于 EMC，在传导和高频辐射要求部分依照现

有的充电设备的相关标准设置的限值进行产品设计及测试即可，此外也需考虑本章节的充电频率中与现有业务之间的共存问题。对于 9~50 kHz 的低频段辐射要求，目前 CISPR 11 正在制定相关的限值要求以及测试方法，无线充电系统在低频段的辐射要求需满足该标准设置的限值。

对于 EMF，目的是保证人或者内置医疗器械暴露在电磁环境中的安全，具体 EMF 防护区域分类如图 4 所示。

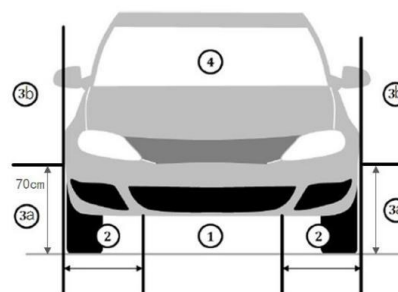


图 4 EMF 防护区域分类

其中保护区域 1、2，制造商宜采取合理措施，可以采取的措施包括：

- (1) 控制主动或被动进入保护区域；
- (2) 在进入可能发生这种暴露的区域之前进行检测和关闭；

- (3) 使暴露符合保护区域 3a 的电磁场限值。

保护区域 3、保护区域 4 和非车载功率组件：电磁场应符合国家标准设置的限值。对于人暴露的限值为 $27 \mu\text{T}$ ，内置医疗器械的暴露限值为 $15 \mu\text{T}$ 。

(4) 功能安全

功能安全功能安全是依赖于系统或设备对输入的正确操作，它是全部安全的一部分。当每一个特定的安全功能获得实现，并且每一个安全功能必需的性能等级被满足的时候，功能安全目标就达到了。无线充电的功能安全主要包括故障防护、FOD、LOD 三个方面。其中故障防护与其他充电基础设施类似，包括短路、开路、空载、过流、过压、过温等方面。FOD 和 LOD 属于无线充电特有的功能防护安全类型。

FOD 是防止在高频电磁场区域内产生温升甚至燃火的物体在传能区域内发生温升、燃火的风险。典型的异物类型在 SAE J2954 和 IEC 61980-3 中已经规定，FOD 功能是无线充电系统必须具备的功能，当检测到由温升或者燃火物体在传能区域内，应采取停机或者降低功率传输的措施。

LOD 是防止活物特别是人进入 EMF 保护区域

1、2 的功能,是无线充电推广过程中宜具备的功能,但建议系统需具备的功能。当检测到有活物进入 EMF 超过限值的区域,应采取停机或者降低功率传输的措施。

另一个方面,对于车载设备,应由设备制造商和车企共同协商,基于 ISO 26262《道路车辆功能安全》的规范,开展功能安全设计相关工作。

5 探索商业模式

在行业初期,无线充电系统的成本较高,需探索合适的商业模式推动无线充电的市场推动。

在电动汽车无线充电产业化逐渐完善,形成规模之后,可能存在的商业模式包括以下几个方面:

(1) 无线充电设备销售

在行业初期可能存在两类设备销售模式,第一类为私人应用场景下地面设备和车载设备绑定销售,另一类为公共应用场景下地面设备和车载设备分别销售。对于设备销售模式,参与者为设备制造商、车厂、4S 店以及用户,瓶颈在于产业化前期设备成本较高。

(2) 无线充电设备运营

对于公共应用场景,地面设备需进行局部统一运营。而在行业初期,无线充电地面设备成本较高,且充电功率较小,该模式的盈利方法需要进一步探索。

(3) 专用场合定制

在 AVP、共享汽车等车辆运营领域,对无线充电的需求较为明确,且存在运营统一、需求一致、车型相对统一、充电集中等特征,可对无线充电进行定制,部分无线充电系统功能可简化,无线充电设备的成本可降低,是无线充电行业初期能够规模推动的一种模式。

(4) 知识产权运营

该商业模式仅对于行业内少数基础知识产权积累丰富的公司适用,该模式下,有两种盈利模式,第一类为技术方案的销售,第二类为设备销售时收取专利费用。

技术方案销售模式的成立,这是由电动汽车无线充电系统较庞大且技术门槛较高决定的。对于一个需要快速进入无线充电行业,且没有无线充电技术开发经验的公司,为降低技术开发周期,提高产业开发成熟度,将对成熟的无线充电技术方案形成

较大的需求,因此行业内可形成技术方案销售商的公司模式。

对于第二类专利费用收取的盈利模式,需要运营主体具备强大的专利积累,且运营主体的专利技术是市场中销售的产品必然会用到的技术。此外运营主体还需要强大的技术支撑团队以及法规团队负责知识产权的持续运营。

(5) 充电设备租赁及共享

对于车载设备和地面设备分开销售的场景,由于地面设备的成本较高,用户可通过地面设备租赁或共享的方式进行使用。

在地面设备租赁模式下,用户可分期承担部分设备费用,也可通过充电量抵扣设备租赁费用的模式降低用户的租赁费用。而对于地面设备租赁和充电运营企业,可通过以上模式增加车辆采用无线充电的充电量,可将地面设备部分费用压力向用户转移,且设备所有权仍保留。

在地面设备共享模式下,多个用户共同承担地面设备的购买费用,共同享有设备所有权,对于地面设备销售及运营企业,需做好共享人群的规划(如按地域规划、按工作场所规划等),并做好设备的运营。

(6) 发展支撑领域

电动汽车无线充电系统是电网、整车紧关联的系统,其系统较庞大,涉及功能较多,产业链相对较长。除设备整机的生产、销售之外,还存在标准化、模块化的功能产品支撑的应用,如引导对齐功能可与自动泊车功能模块相互支撑,异物/生物检测模块可形成标准化模块生产销售等。

此外,系统的测试也需要较多的支撑设备,如互操作性测试需要自动化数字化的测试台架、线圈损耗部分需特定频率段的高精度功率分析仪、异物/生物检测需要智能测试台架等,以上的支撑设备也具有较大的市场需求。

在电动汽车无线充电产业化前期,车辆、地面设备布局完善需要较长的周期、系统设备成本较高等问题,需要探索更多的商业模式,保障消费者的利益,降低设备生产、销售及运营商的投资风险,进一步推动消费者购买无线充电车辆的意愿,促进更多企业加入无线充电行业,有效加速产业化进程。