

无线充电设备电磁兼容性设计与硬件调试技术

徐 帅 任 伟

杭州萧山技师学院 浙江杭州 311201

摘 要: 无线充电技术广泛应用于消费电子领域, 该电磁兼容性能直接关乎产品质量和市场竞争力, 本文聚焦无线充电设备的EMC问题, 提出一套系统化的电磁兼容设计与调试手段, 制定了由电路拓扑优化、PCB布局布线优化以及屏蔽滤波设计构成的多层次EMC解决办法, 研究建立起一套完整的硬件调试技术体系, 囊括EMC预测测试、关键指标测量和EMC问题定位解决的相关技术, 这些方法可显著提升无线充电设备电磁兼容性能, 为相关产品开发提供技术支持。

关键词: 无线充电; 电磁兼容; 拓扑优化; PCB设计; EMC测试; 干扰抑制

引言

无线充电技术作为能源传输的创新方式, 正迅猛地渗透入智能手机、穿戴设备和电动汽车等领域, 其工作原理导致电磁场辐射问题不可避免, 如何保障电磁兼容性成了制约技术应用的核心要素^[1]。目前国内外的研究大多集中在提升效率和增加功率密度中, 然而对EMC系统设计的重视程度不足, 特别是缺少完整的设计与调试方法论^[2]。现有方案一般采用“头痛治头”式的局部改进手段, 引起设计反复与成本上扬, 本文针对这一现存技术痛点, 提出了包含电路拓扑、PCB设计以及屏蔽滤波方面的全方位EMC优化方案, 进而建立起一套系统化的硬件调试技术体系, 研究意在提供实操性强的无线充电设备EMC设计指引, 减少产品研发阶段的风险, 加速产品上市周期, 提升市场竞争力, 为无线充电技术的批量应用提供技术后盾。

一、无线充电技术原理

无线充电主要基于电磁感应原理实现能量传输。典型的无线充电系统包括发射端和接收端两部分:

发射端: 由AC-DC转换器、DC-AC变换器和发射线圈组成, 将电源输入转换为高频交变磁场

接收端: 由接收线圈、整流电路和调压电路组成, 将感应电流转换为稳定直流电为设备充电

主流无线充电标准包括Qi标准(6.78MHz、100-200kHz)、AirFuel标准(6.78MHz)等, 不同标准工作频率和传输功率各异, 对EMC设计要求也有所不同。电磁耦合方式主要有电感耦合(短距离)和磁共振耦合(中

等距离)两种^[3]。

二、无线充电设备EMC设计技术

(一) 电路拓扑EMC优化设计

无线充电设备的电路拓扑设计对EMC性能有着决定性影响, 优化设计可从功率转换电路入手。本设计选用软开关技术如零电压切换(ZVS)拓扑来降低谐振波形上升沿的斜率, 将 dv/dt 控制在 $35V/\mu s$ 以下。谐振网络参数设计中, 发射线圈品质因数 Q 设定在25-35范围内。功率管驱动电路采用独立隔离电源供电并引入20-50ns死区时间, 结合栅极驱动电阻选择(上升沿10-15 Ω , 下降沿4-6 Ω), 电流回路设计中形成低阻抗路径, 磁珠阻抗在工作频率处设计为50-100 Ω ^[4]。全桥拓扑中采用交错开关时序控制策略, 将功率开关管对角导通时间错开5-10%, 降低电流尖峰。反馈环路设计中引入带阻滤波器, 其中心频率与开关频率一致, 带宽设计为开关频率的 $\pm 10\%$ 。

(二) PCB布局与布线设计

无线充电设备PCB设计采用四层板结构并遵循明确的分区原则, 将高频驱动电路、控制电路与电源管理电路物理隔离。层叠结构设计为信号层-电源层-接地层-信号层配置, 确保高频信号线有完整参考平面。功率回路面积设计控制在 $100mm^2$ 以下, 走线宽度按电流密度4-5A/ mm^2 设计, 拐角采用45°斜角或圆弧过渡。关键信号线如功率管驱动信号设计走线长度不超过30mm, 并与功率线间距离设计为5mm以上^[5]。接地策略上, 功率地、数字地和模拟地采用单点汇接, 接地铜皮覆盖率设计为85%以上。线圈区域下方避免布置敏感电路, 发射线圈与电路板边缘距离设计为8-10mm, 在关键信号线下方设

表1 PCB电磁保护结构设计参数与抑制效果数据表

保护结构参数	推荐值	抑制效果	适用频率范围
线圈-板边缘距离	8-10mm	降低边缘辐射 30-40%	全频段
埋地过孔间距	4-6mm	抑制噪声传播 15-20dB	30MHz-1GHz
保护环宽度	2-3mm	降低干扰耦合 12-18dB	10-500MHz
敏感电路隔离带宽度	≥ 2.5mm	降低电场耦合 18-25dB	全频段
地平面切割宽度	0.3-0.5mm	控制高频电流路径	>300MHz

置埋地过孔阵列，间距控制在4-6mm，形成电磁屏障，敏感模拟电路周围设计保护环，宽度为2-3mm的接地铜环与主地通过多点连接，如表1所示。

(三) 屏蔽与滤波设计

无线充电设备的屏蔽与滤波设计采用多层防护策略。磁屏蔽方面，使用初始磁导率为2000-4000的铁氧体材料，屏蔽层厚度设计为3-5mm，导电屏蔽设计采用厚度0.1-0.2mm的铝或铜片，与磁屏蔽结合使用。滤波电路设计中，输入端EMI滤波器采用π型结构，共模电感值设计为1-2mH，电容值设计为2200-4700pF。功率变换电路关键节点配置多层陶瓷电容，总容值设计在1-10μF，等效串联电阻设计控制在10mΩ以下。对于传导干扰潜在严重的部分，在电源输入端增加铁氧体磁环（材料选用43或61材质），绕制5-8匝^[6]。屏蔽罩接地点设计采用多点接地方式，间距控制在波长的1/20以内，提高高频接地效果，滤波组件布局采用梯级布置策略，输入滤波器与主功率电路间距设计为30-50mm，避免磁场耦合干扰。

三、无线充电设备硬件调试技术

(一) EMC 预测与诊断技术

无线充电设备EMC预测与诊断技术试图在研发阶段提前找寻潜在电磁兼容性问题，近场探测技术凭借电磁场近区特性开展，采用电场或磁场探头检测设备表面处的电磁场分布，将复杂系统问题剖析为具体元器件或线路的局部问题，该技术的优势是定位精准且无需复杂测试环境，能直观显示辐射热点的频率特性和空间分布^[7]。电流注入测试依托逆向思维展开，向系统关键节点灌入外部干扰信号，评估系统面对不同频率干扰时的稳定性及功能完整性，查找系统抗干扰能力的薄弱地带，扫频分析技术借助对系统在宽频带范围响应特性的分析，鉴定系统的谐振点与敏感频率，为开展针对性优化提供指引。

(二) 关键指标测量与分析技术

测量与分析无线充电设备关键指标的技术是评价系统性能和可靠性的核心手段，传输效率测量分析不只是

着眼于效率数值，还需要评估在不同负载条件以及耦合状态时效率的变化趋势，探究能量损耗的分布和热管理的实际效能，找出系统设计的边界条件。辐射发射测量分析凭借电磁波远场传播特性开展，评价设备于各频段的辐射水平，经由频谱特征分析可追踪辐射源的电气特性与物理机制，为实施抑制措施提供理论性的支撑，电源质量分析技术按照电能转换质量角度评估系统，涉及谐波畸变、功率因数、转换效率与动态响应等维度，展现电源设计的合理性和器件选型的匹配程度，这些分析技术彼此达成关联、彼此实施验证，构成一套完备的性能评估体系。

(三) EMC问题定位与解决技术

无线充电设备EMC问题定位及解决的相关技术是一种系统性分析优化方式，系统性故障树分析技术把EMC问题进行结构化拆解，分成不同层次和类别，建立问题因果对应关系图谱，从现象追溯至根源，避免头痛医头式的片面解决方案。频谱特征分析技术从频域方面剖析干扰信号的特性，依靠频率、幅度和相位等特征推断干扰的形成机理，区分基波、谐波、调制与自激振荡等不一样的干扰类型，为提出针对性解决方案筑牢理论基础。电磁干扰抑制技术分为源头抑制、传输路径的把控以及敏感设备的防护三个层次，针对共模和差模干扰采用不一样的应对办法。共模干扰抑制聚焦于平衡与对称设计，差模干扰抑制强调的是阻抗匹配与滤波，迭代优化策略借助控制变量法逐个检验改进措施的有效性，在保证系统功能恒定的前提下，将修改成本压缩到最小，兼顾EMC性能与其他设计目标，实现整体最优的方案而非局部最优，该系统性分析及解决方式可有效提高研发效率和设计成熟度。

四、实验验证与效果分析

针对提出的无线充电设备EMC设计与调试技术进行系统性验证，选取Qi标准5W无线充电器作为测试对象，采用对比测试法评估优化效果，结果显示经过综合优化后，传导发射在150-500kHz频段平均降低14.5dB，

无线充电设备优化前后辐射发射对比图

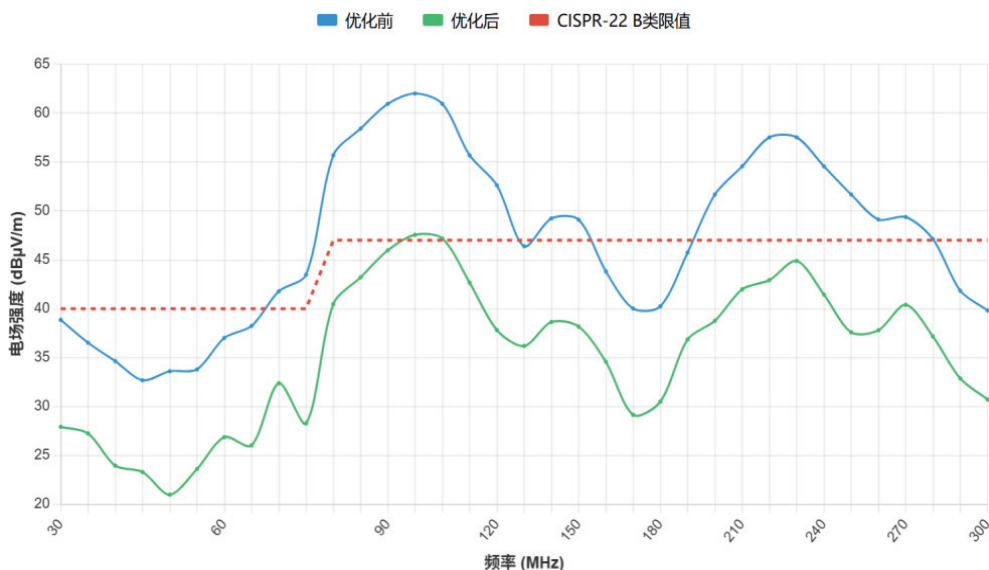


图1 无线充电设备优化前后辐射发射对比图

辐射发射在30–300MHz频段平均降低10.7dB。如图1所示，优化后设计在全频段辐射水平显著降低，完全满足CISPR-22 B类限值要求。系统性能同步提升，传输效率从68%提高至74%，温升从58℃降低至42℃，满载条件下8小时连续工作稳定可靠。

进一步分析显示，不同优化措施对EMC性能改善的贡献度各不相同。磁屏蔽材料的应用对高频辐射抑制效果最为显著，平均降低辐射9.8dB；优化的接地设计有效降低了共模噪声，在30–100MHz频段平均降低7.5dB；软开关技术明显减少了电源纹波和EMI，传导发射平均降低12.8dB；PCB布局优化降低了电磁耦合干扰，在100–200MHz频段降低辐射约8.6dB。多种优化措施的组合效果优于单项措施效果的简单叠加，说明系统级EMC设计比单点优化更具价值。

结论

无线充电技术在电子设备应用中日益普及，其EMC问题已成为制约产业发展的关键因素。本研究系统分析了无线充电设备EMC设计与调试技术，提出了从电路拓扑优化、PCB设计到屏蔽滤波的全方位解决方案，并建立了完整的硬件调试方法体系，研究成果不仅提高了无线充电设备的电磁兼容性能，也为相关产品研发提供了设计指南。未来研究将聚焦于高功率无线充电系统EMC

优化、多设备共存干扰抑制技术以及国际标准体系建设，进一步推动无线充电技术的规范化发展和广泛应用。

参考文献

- [1] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1547–1568.
- [2] 齐万明, 陈小琳, 穆晓彤. 复杂电磁环境下轨道交通车辆整车抗电磁干扰设计[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 26–34.
- [3] 沈剑韬, 刘伟, 姚彦良, 等. 一种无源无线型配电变压器在线监测装置[J]. 电气技术, 2024, 25(11): 76–80.
- [4] 赵军, 赵毅航, 武志军, 等. 电动汽车无线充电系统对心脏起搏器的电磁兼容与热效应影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(zk1): 1–10.
- [5] 黄新颖. 新能源汽车充电设备安全性能检测标准体系探析[J]. 商用汽车, 2025(2): 22–24.
- [6] 刘嵘, 陈金刚. 基于无线传感器网络的低功耗目标探测系统设计与实现[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(2): 218–223.
- [7] 胡青云, 张波. 高压杆塔设备无线供电技术剖析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6257–6269.