计 算 机 研 究 与 发 展
Journal of Computer Research and Development
https://crad.ict.ac.cn
62(1): 232−255, 2025

磁共振无线充电技术:进展与展望

王馨语　周王球　周　颢　李向阳
(中国科学技术大学计算机科学与技术学院　合肥　230026)
(xinyuwang0306@mail.ustc.edu.cn)

Magnetic Resonant Coupling Wireless Charging Technology: Progress and Prospects

Wang Xinyu, Zhou Wangqiu, Zhou Hao, and Li Xiangyang
(*School of Computer Science and Technology*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026)

Abstract　Wireless charging has the characteristics of no wiring, automation, and ease of maintenance, which can effectively solve the energy supply problem for the future large-scale application of artificial intelligence of things (AIoT). Magnetic resonant coupling wireless charging technology has more balanced technical advantages in terms of spatial freedom and energy transfer efficiency, and has become a research hotspot in the field of wireless charging today, with broader application prospects. In this paper, the development history of magnetic resonant coupling wireless charging technology is reviewed, and the related background concepts are briefly summarized. A systematic review of recent work on magnetic resonant coupling wireless charging technology is carried out, and based on the design motivation and technical realization, the basic principles and implementation methods of the corresponding research are summarized in detail from the four perspectives of feedback communication, optimization scheduling, sensing application and radiation safety guarantee, providing an effective reference for subsequent research. Specifically, feedback communication work is categorized into two main types according to transmission mode, optimization scheduling work is classified into two main types based on system structure, and sensing applications are introduced from three main categories according to application scenario. Finally, based on the aforementioned work, we discuss areas for improvement in the current magnetic resonant coupling wireless charging technology and explore future research directions.

Key words　magnetic resonant coupling; wireless charging; feedback communication; optimization scheduling; sensing application; safety guarantee

摘　要　无线充电技术具有非接触、自动化以及易维护的供能特性,可以有效解决未来智能物联网(AIoT)在大规模应用时的能量供应难题.在现有无线充电技术中,磁共振无线充电技术在能量传输效用与空间自由度上有着更为均衡的技术优势,已成为当今无线充电领域的研究热点,拥有更为广阔的应用前景.为此,大致回顾了磁共振无线充电技术的发展历程并对其相关背景概念进行了简要概述.对近年的磁共振无线充电技术相关研究进行了系统梳理,并基于设计动机和技术实现从反馈通信、优化调度、感知应用、安全保障4个角度出发,详细总结了对应工作的基本原理、实施方法等核心内容,为后续的研究提供了有效参考.其中,根据传输方式将反馈通信方面工作分为两大类,根据系统结构将优化调度方面工作分为两大类,

收稿日期:2024-05-31;**修回日期**:2024-07-18
基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2020B0909050001);国家自然科学基金项目(62172379);中国科学院基础前沿科学研究计划项目(ZDBS-LY-JSC001)
This work was supported by the Major Fields Research and Development Program of Guangdong Province (2020B0909050001), the National Natural Science Foundation of China (62172379), and the Key Research Program of Frontier Sciences, CAS (ZDBS-LY-JSC001).

根据应用场景从三大类介绍感知应用方面工作，根据保障对象将安全保障方面工作分为三大类. 最后在上述工作的基础上，讨论了磁共振无线充电技术现有工作的可改进之处，并对未来研究方向进行了展望.

关键词 磁共振；无线充电；反馈通信；优化调度；感知应用；安全保障

中图法分类号 TP393

DOI: 10.7544/issn1000-1239.202440394 **CSTR:** 32373.14.issn1000-1239.202440394

多年来物联网技术的积累与近年来人工智能的快速发展推动了智能物联网(artificial intelligence of things, AIoT)技术的崛起，成为不可阻挡的新浪潮. 如今，AIoT 技术已在众多应用领域实现了落地，如智能家居、智慧城市、智慧医疗和智能工业等. 根据国际数据公司(international data corporation, IDC)统计数据[1]显示，2022 年全球物联网总支出规模约为 7 300 亿美元，预计到 2027 年将接近 1.2 万亿美元，5 年复合增长率为 10.4%. 聚焦中国市场，IDC 预测 2027 年中国物联网支出规模将趋近 3 000 亿美元，位居全球第一，占全球物联网总投资规模的 1/4 左右.

随着 AIoT 技术的广泛应用，物联网终端设备数量呈现爆发式增长，预计到 2025 年将有近 640 亿台物联网设备相互连接，部署于各种尖端应用[2]. 对于海量的物联网设备而言，采用传统的电池、有线电源进行供能并非长久之计，因为频繁检查及更换电池会造成相当大的人力浪费，同时大量使用电池还会导致环境污染. 有线电源则存在着电缆安装困难、充电线易损坏以及插拔麻烦等问题. 因此，对无线充电(wireless charging, WC)技术的研究成为了健全物联网产业发展的关键一环. 其中，无线充电技术又称为无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术.这项技术摆脱了线缆的限制，实现了设备和电源的完全分离，在安全性、灵活性和便捷性等方面表现出显著优势. 可以预见，无线充电将成为未来信息化、智能化时代的重要基石.

目前，如图 1 所示，无线充电技术主要包括无线电波/微波式、激光式、电容式、磁感应式、磁共振(magnetic resonant coupling, MRC)式等传输方式. 具体来说，远场无线充电技术具有充电距离远(远达数十米及以上)、自由度高的优势，但能量传输效率较低. 其中，无线电波/微波式涉及安全性问题，要实现大功率能量传输不得不考虑其在传输范围内对人类及其他生物的影响；激光式无放射性辐射，但仅可进行点对点传输. 相比之下，近场无线充电技术利用电或磁耦合通过近场共享能量，能够实现更为高效的无线电能传输，引起了人们的极大兴趣. 其中，电容式耦合结构简单灵活，但传输距离十分有限并且对器件有着很高的耐压要求. 磁感应式和磁共振式均基于电磁感应原理，前者要求接收设备与供能装置精准对齐才能有效地进行能量传输，因此尽管这种方式能够达到很高的能量传输效率，但也导致充电系统的自由度与灵活性大大受限(有效充电距离一般仅为毫米量级). 相比之下，后者利用电磁耦合谐振，在提供可观的能量传输效率的同时将有效充电距离提升至数十厘米. 由此可见，在人们的日常生产与生活当中，磁共振无线充电技术有着更为均衡的技术优势，在保证一定系统空间自由度的同时，能够达到不错的能量传输效率，并且支持多设备同时充电. 因此，磁共振无线充电技术在未来有着更为广阔的应用前景.

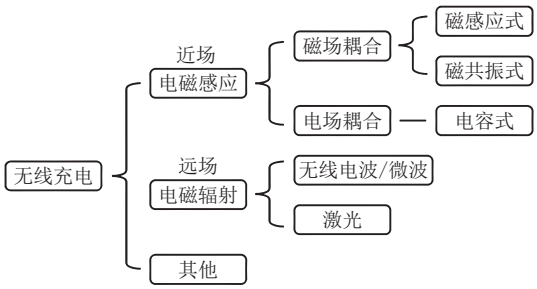


Fig. 1 Wireless charging technology classification

图 1 无线充电技术分类

目前，已有综述文献围绕无线充电技术展开了研究与总结. 考虑到现有的传统磁性材料难以满足无线充电系统的高传输性能要求，Wang 等人[3]对磁性材料在无线充电技术中的应用进行了介绍. 从对无线充电技术的综合分析出发，Liu 等人[4]对磁场耦合式、电场耦合式、微波式及激光式 4 种无线充电技术展开了全面概述，涵盖了其工作原理、性能优化设计、新颖的物理概念以及电磁超材料的应用等方面. Alabsi 等人[5]分别从辐射式及非辐射式 2 个角度介绍了无线充电技术，并回顾了最近用于无线传感器网络的无线充电调度方案. 聚焦于磁共振无线充电技术，Abou 等人[6]从补偿拓扑、错位谐振器结构以及电磁干扰诊断 3 个主要角度对磁共振无线充电系

统进行了深入的比较. 然而, 针对磁共振无线充电技术有关研究工作进行系统性归纳的综述文献仍然欠缺. 为此, 本文对磁共振无线充电技术的发展进行了全面地梳理, 在参考国内外大量文献的基础上, 首先简要概述了磁共振无线充电技术的发展历程以及相关概念, 然后从通信、调度、应用以及安全角度对该技术的相关研究成果进行了分析、归纳和总结, 并讨论该技术的未来发展, 从而为该领域的研究者提供一定的参考和研究思路.

1 基本介绍

本节首先回顾磁共振无线充电技术的发展历程, 然后详细介绍其相关概念背景, 从而为后续章节的深入讨论奠定基础.

1.1 发展历程

磁共振无线充电技术至今已有百余年的发展历史. 早在 19 世纪 90 年代, 被誉为“交流电之父”的科学家尼古拉·特斯拉制作了特斯拉线圈完成了点亮灯泡的壮举, 向人们展示了利用磁共振耦合在 2 个电路之间传递电能的可能性, 划开了人类历史上无线电能传输的序幕. 1978 年, 美国发明家约翰·乔治·博格尔开创了为电动汽车进行无线充电的先例. 2006 年, 麻省理工学院的马林·索尔贾希克团队利用磁共振无线充电技术, 在 2 个相距 2 米的线圈之间成功传输高达 60 瓦的电力. 这一成果不仅表明了该技术的商业化可行性, 也是无线充电技术迈出的重要一步. 随后, 这项技术催生了著名的无线电能传输技术先驱公司 WiTricity. 2014 年, WiTricity 加入 WiPower, 共同制定了目前国际磁共振无线充电技术领域中最为通用的 A4WP 标准. 2012 年, 电气电子工程师协会发布根据 IEEE 标准协会的 PMA 磁感应标准, 组成电力事务联盟 PMA. 2015 年, PMA 与 A4WP 无线充电组织合并, 成为 AirFuel Alliance, 以推动统一的无线充电标准.

1.2 相关概念

磁场耦合式无线充电系统的基本原理如图 2 所示. 其中, 磁感应式无线充电系统由 2 个感应线圈组成, 即发射(transmitter, TX)线圈和接收(receiver, RX)线圈. 根据法拉第电磁感应定律, 当 TX 线圈中有交变电流通过时, 会在近场周围介质中产生一个变化的磁场. 这个变化的磁场扩散到 RX 线圈所在的位置, 由于磁场是动态变化的, 所以会在 RX 线圈中激发感应电动势. 通过将设备连接到 RX 线圈即可获得电能,

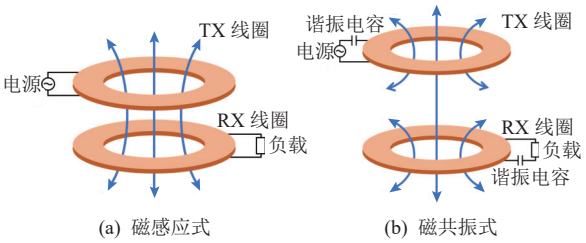


Fig. 2 Schematic diagram of magnetic field coupled WPT system

图 2 磁场耦合式无线充电系统原理图

从而实现无线充电. 然而, 当 TX 线圈与 RX 线圈分离超过几厘米时, 磁通量将迅速下降, 以至于电能传输几乎停止.

为此, 磁共振无线充电技术得以提出. 该技术仍然是感应式的, 因为 TX 线圈产生的变化磁场在 RX 线圈中感应出电流, 但它在磁感应式电路基础上增加了电容器件, 利用 TX 端与 RX 端之间频率共振在两线圈间形成了一种能量通道, 即使相隔数十厘米也是如此.

如图 3 所示, MRC-WPT 系统按照能量传输链路和线圈的组合方式, 可以细分为 4 种基本模型: 单输入单输出(single-input single-output, SISO)、单输入多输出(single-input multiple-output, SIMO)、多输入单输出(multiple-input single-output, MISO)以及多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO).

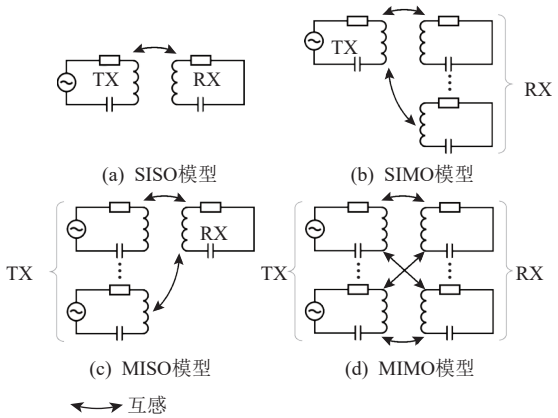


Fig. 3 Four MRC-WPT models

图 3 4 种 MRC-WPT 模型

近年来, 中继谐振器被引入 MRC-WPT 系统构成 TX 端—中继—RX 端结构, 在显著增大电能传输距离的同时保证了系统的电能传输能效. 如图 4 所示, 中继谐振器会接收来自发射器的磁场, 然后将磁场中继到接收器, 从而增强较远距离的磁耦合. 相应地, 类似于传统的 TX 端—RX 端两线圈结构, 三线圈结

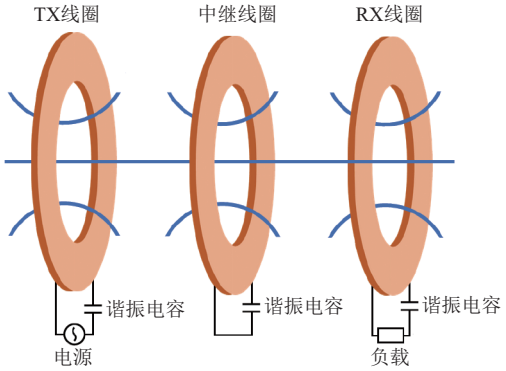


Fig. 4 Principle diagram of MRC-WPT system with relay

图 4 含中继的 MRC-WPT 系统原理图

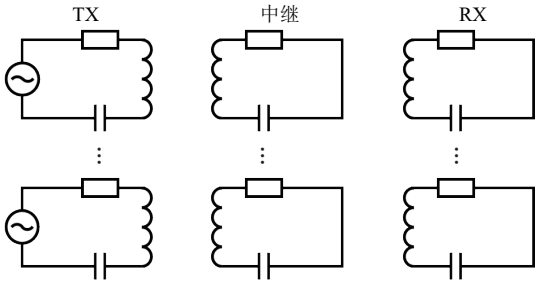


Fig. 5 Multi-input multi-relay multi-output MRC-WPT model

图 5 多输入多中继多输出 MRC-WPT 模型

构的 MRC-WPT 系统同样可以划分为多种模型，如图 5 所示即为多输入多中继多输出模型.

2 反馈通信

对于磁共振无线充电系统来说，为了达到更好的充电性能，往往需要执行优化调度操作. 为此，RX 端设备需通过反馈通信上传其自身状态，诸如自身阻抗、能量需求等信息. 依据 RX 端反馈信息，TX 端能够实时了解 RX 端状态，从而动态调整系统配置以优化系统效用、提升用户体验. 现有关于 RX 端反馈通信的工作可以分为以下 2 类：带外通信和带内通信，具体对比如表 1 所示.

2.1 带外通信

对于基于带外通信的方式，通常假设系统中存在某种带外通信链路，例如，蓝牙[7] 等. AirFuel 共振系统规范[13] 配备蓝牙无线电模块，旨在为一个能量发射单元（power transmitting unit, PTU）与相应的能量接收单元（power receiving unit, PRU）之间提供通信. 相应通信机制被设计为双向且半双工架构，PRU 向 PTU 上报自身特性，PTU 进行响应调整，以实现效率优化、过/欠电压保护和异物检测. 然而，这种方式不仅增加了硬件成本，还会造成额外的能量消耗与频谱占用，无法很好地适用于 AIoT 设备的无线充电应用场景，例如，无源物联网、低功耗物联网等.

2.2 带内通信

基于带内通信方式的好处在于其完全工作在 MRC-WPT 系统自身预期的频段内（如 6.78 MHz[13]），可以实现 MRC-WPT 系统供能通信一体化服务，有效隔绝了外界频段信号的干扰.

Jadidian 等人[8] 提出的 MagMIMO 系统巧妙地利用了 TX 端与 RX 端之间的耦合实现带内反馈通信. 具体来说，由于 TX 端与 RX 端之间耦合的存在，RX 端电路阻抗的变化会导致 TX 端反射阻抗的相应变化. MagMIMO 采用通断键控（on-off keying, OOK）调制方式，即接收器通过切换自身开关状态来改变反射阻抗，并将反馈信息编码于脉冲宽度中. TX 端通过解码与测量脉冲宽度即可获取反馈信息. 此外，Liang 等人[9] 设计的 Onion 通信机制考虑了 MIMO MRC-WPT 系统中通信链路存在的中继现象以扩展系统的通信距离. 首先，考虑到接收器接通与否将改变其在 TX 端的等效阻抗进而影响 TX 电流，Onion 提出通过监测 TX 电流来解码 RX 反馈信息. 此外，由于依赖性 RX 的反馈通信取决于相应的中继，因此提出分层式依赖性检测机制及对应的通信方案，以避免复杂的 RX 协作. 当某一依赖性 RX 进行反馈通信时，相应依赖层涉及的 RX 均会保持接入状态，从而

Table 1 Comparison of Feedback Communication Work

表 1 反馈通信工作对比

通道利用方式	物理传输方式	来源	RX 端调制方式	TX 端解码方式	要点	缺陷
带外	串行	文献 [7]	高斯频移	键控	额外配置蓝牙无线电模块	硬件成本增加，造成额外的能量消耗及频谱占用
带内	串行	文献 [8]	OOK	基于脉冲宽带	将 OOK 调制方式用于 MRC-WPT 系统进行反馈通信	同时仅支持单个 RX 进行反馈通信
		文献 [9]	OOK	基于电流	利用通信中继现象扩展通信距离	
	并行	文献 [10]	OOK	基于电流聚类	最多支持 5 个设备的并行反馈通信	需预先观测大量不同 RX 开关通断组合状态
		文献 [11]	OOK	基于电流	支持数十个设备的并行反馈通信	忽略了 RX 间互感
		文献 [12]	高低阻抗+OOK	基于信道矩阵	综合考虑强耦合干扰及通信中继现象	未考虑保障通信的可靠性

确保该 RX 能够在其相应中继 RX 的协助下完成信息反馈. 然而, 要注意的是, 文献 [8−9] 提出的设计在同一时段仅支持单个 RX 进行反馈通信, 无法满足涉及较多 RX 场景下的通信需求.

为此, Hua 等人[10] 提出了一种基于 TX 电流聚类的并行通信机制. 该机制的提出来源于他们所观察到的聚类现象, 即 TX 电流形成与 RX 通断组合状态相对应的聚类. 但是该机制在解码前需要观测大量的不同 RX 开关通断组合状态, 且最多只能同时支持 5 个设备的并行反馈通信. 进一步地, Zhou 等人[11] 提出的 Camel 系统设计了一种基于充电信道估计的带内并行反馈通信机制, 可以同时支持数十个设备进行反馈通信. 该机制考虑到 RX 端开关电路转换频率的有限性, 从碰撞低秩状态而非仅含单个接通 RX 的状态中进行信道估计, 并利用 RX 级信道可分解性进行分解, 有效避免了 RX 间的复杂协同. 完成信道估计后, RX 通过 OOK 调制方式反馈信息, TX 端基于 TX 电流进行解码从而避免了对高秩状态进行信道矩阵恢复的过程. 然而, 该机制有一个潜在的应用前提, 即忽略 RX 间互感, 这意味着该机制无法很好地适用于存在强 RX-RX 耦合的情景. 针对这一缺陷, Zhou 等人[12] 设计了一种鲁棒并发的带内层级并行反馈通信机制 Roland, 综合考虑了 RX-RX 耦合带来的影响, 即强耦合干扰以及通信中继现象. 他们设计了一种全新的 RX 双模态开关电路, 结合基于 RX 高低阻抗和基于 RX 开关通断 2 种调制方式, 不仅加速了 RX 设备的识别过程, 同时完成了 RX 间通信依赖关系的初步检测. 另外, 他们基于文献 [11] 进一步提出 RX 分组级信道可分解性, 并基于该特性构建了不同 RX 分组间的信道关系图, 以实现 TX 端基于信道矩阵匹配的并行解码. 然后, 推广此方法以进一步处理 RX 间的通信依赖, 从而支持层级反馈通信.

2.3 小 结

本节介绍了磁共振无线充电系统中的反馈通信相关工作. 反馈通信技术的发展经历了从带外通信到带内通信的显著转变. 最初的研究利用独立的通信链路实现带外通信技术, 尽管有效, 但增加了硬件成本和能耗, 不适合低功耗设备. 因此, 研究逐渐转向带内通信技术, 旨在克服带外通信的缺点. 初期的带内通信技术仅支持单个 RX 进行反馈通信. 随着多设备通信需求的增加, 带内通信技术发展到并行通信, 支持多个设备同时进行反馈, 从 5 个设备扩展到数十个设备, 进一步提升了系统在复杂场景下的通信性能. 总体来看, 反馈通信技术经历了不断改进和优化, 为无线充电系统的高效运行提供了重要保障, 并将在未来研究和应用中继续发挥关键作用.

3 优化调度

毫无疑问, 拥有高效的充电性能是无线充电系统的核心目标之一, 如今已有许多工作关注于充电性能优化设计, 以满足各种使用场景的多样化需求. 本节从两线圈/三线圈结构 2 个方面组织相关工作, 并依次进行详细介绍.

3.1 基于两线圈结构

针对两线圈结构 MRC-WPT 系统, 已有多种优化调度方式被提出以提升系统性能, 表 2 对相关工作进行了对比与总结.

3.1.1 针对 TX 电流/电压

显然, 通过调节 TX 端电流/电压实现系统优化调度是一种十分自然且直观的方式.

通过将无线电能传输与无线通信相关联, Jadidian 等人[8] 提出了一种针对 MRC-WPT 系统的磁波束成形技术. 具体来说, 他们借鉴无线通信领域 MIMO 波束成形的概念, 设计了 MagMIMO 系统. 通过调控 TX 端电流, 对非辐射磁场进行波束成形并将其导向接收设备以进行无线充电. 实验结果表明, 该技术在 0.5 cm 近距离范围内的能量传输效率高达 89%, 并将充电范围增加到了 40 cm, 同时不受接收设备方位的影响. 但是, MagMIMO 系统同时只能为一个设备充电.

为了支持多设备同时充电, Shi 等人[14] 基于 MagMIMO 系统进行了改进, 提出 MultiSpot 系统, 通过调整 TX 端电流能够同时将磁场导向至多个接收设备. 他们对多接收器磁充电问题进行了公式化, 并推导出相应解决方案, 其方程考虑了接收器之间的耦合作用. 实验结果表明, MultiSpot 系统在 2 cm 距离下能够为单个设备提供 90% 的能量传输效率, 并且可以在最多 50 cm 的范围内同时给 6 个智能设备充电. 考虑到互感信息存在误差, Zhang 等人[15] 提出了一个鲁棒的波束成形优化方案. 通过建立范数边界误差模型, 旨在通过优化 TX 电流以最小化 TX 端总功率, 同时保证对每个接收器的可靠供能. 在互感信息偏差不超过 35% 的情况下, 相较于非鲁棒方案, 该方案可提升 37.7% 的能量传输效率.

然而, 实现上述系统需要获取 TX 端和 RX 端间互感信息, 这涉及额外的电路及通信协议等设计. 为此, Zhao 等人[16] 针对 MRC-WPT 系统提出了一种基

Table 2 Comparison of Optimization Scheduling Work for Two-Coil MRC-WPT System

表 2 两线圈结构 MRC-WPT 系统优化调度工作对比

调整对象		来源	模型	研究动机	能量传输距离/cm	最佳传输效率或功率	实验原型接收设备数
TX 电流/电压		文献 [8]	MISO	引入无线通信领域 MIMO 波束成形技术	40	89%	1
		文献 [14]	MIMO	为支持多设备同时充电	50	90%	6
		文献 [15]	MIMO	考虑互感信息存在误差以提升波束成形鲁棒性	10	69.6%	4
		文献 [16]	MIMO	避免获取互感信息以降低实施成本	30	4.4 W	1
		文献 [17]	MIMO	应对不同接收设备具有不同能量需求的情况	20	34%	4
		文献 [7]	MIMO	考虑 TX 端电路约束并权衡多个用户间性能	10	77.3%	4
系统频率		文献 [18]	SIMO /MISO	研究 TX 间或 RX 间耦合对系统性能的影响	31	57%	1 或 2
		文献 [19]	SISO	研究 TX 与 RX 不同耦合状态下频率的影响	70	70%	1
		文献 [20]	MIMO	进行 MIMO 场景下频率调节以优化系统性能	30	2.5 W	6
TX 线圈	几何结构	文献 [21]	SISO	减少线圈间寄生耦合	4	2.5 W	1
		文献 [22]	MISO	非耦合线圈模式以降低波束成形实现复杂度		96%	1
		文献 [23]	MIMO	在 TX 端周围整个空间中提供准均匀充电效率	15	70.53%	8
		文献 [24]	MIMO	设计大小可调线圈以调节 TX-RX 间耦合	50	80.78 W	8
	方位	文献 [25]	MIMO	考虑 TX 方位自适应调整	60	15 W	6
	位置	文献 [26]	MISO	部署 TX 位置以实现均匀的能量覆盖	20	25.54 W	1
阻抗	TX 阻抗	文献 [27]	MIMO	构建使用电容阵列的自动阻抗匹配网络	20	90.6%	1
	RX 阻抗	文献 [28]	SISO	推导优化系统能量传输的最佳负载条件	77.4	94%	1
		文献 [29]	MISO	结合 RX 端负载阻抗优化及 TX 端电压调度		91%	1
		文献 [30]	SIMO	进行集中式/分布式 RX 端负载阻抗优化	160	60%	3
		文献 [24]	MIMO	观察到强耦合 RX 对难以获取到足够能量	50	80.78 W	8
		文献 [31]	MIMO	RX 分组方案影响系统负载获能总量	5	14 W	12

于蒙特卡洛的随机能量波束成形技术. 该技术对 TX 端电压进行调度, 并且仅需利用有限的反馈信息. 相比于为各 TX 端分配相同权重进行能量波束成形, 该方式能够提升系统负载获能达 69%. 这表明, 通过该方式能够以极低的计算成本极大提升系统能量传输效用.

值得一提的是, 这些工作并不能灵活调整 RX 端的能量分配, 因而无法应对不同接收设备具有不同能量需求的情况. 为了弥补这一缺陷, Cao 等人[17] 提出了一种用户需求驱动的自适应充电优化方案. 其中, 每个接收设备的功率需求表示为相应的正权重因子, 并通过反馈通信上报给 TX 端. TX 端在收到接收设备不同的功率需求因子后, 在系统总功率及电流/电压峰值限制下, 求解加权功率和最大化问题, 通过电流调度实现系统自适应充电. 通过性能评估和收敛特性分析, 得出该方案能够达到与常用的半正定松弛算法几乎相同的性能(能量传输效率相差在 1.07% 以内), 并且相较于其所需的上千次迭代, 该方案可在几百次迭代内收敛, 因此具有更高的效率. 除此之外, Yang 等人[7] 引入并表征多用户功率区域, 它构成了针对全部接收设备的所有可实现功率元组, 受给定的 TX 端总功率约束以及各 TX 的峰值电压及电流约束. 通过调节 TX 端电流能够在 RX 之间实现最佳的性能权衡, 在具有 TX 电压/电流约束的情况下, 该机制能够以 70% 的传输效率将高达 56 W 的功率传输至 RX 端.

3.1.2 针对系统频率

一些工作研究了系统工作频率变化对 MRC-WPT 系统充电性能所带来的影响, 并通过调节频率以提升系统能量传输效率或负载获能总量.

Ahn 等人[18] 对最大能量传输效率及最大负载获能总量对应的频率条件进行了理论分析得出: 为了达到最大效率, TX 端驱动频率应设置为 RX 端谐振频率; 达到最大效率无法保证负载获能最大化. 基于此结论, 表示谐振和/或驱动频率应根据 TX 间或 RX 间的耦合进行调整. 采用所提出的频率调整, 即使在 TX 端与 RX 端间耦合关系非常弱的情况下, 仍能使 51~65 W 的功率以 45%~57% 的效率得到传输. 而如果未经调整, 传输效率最高不超过 33%. Sample 等人[19] 进一步研究了 SISO MRC-WPT 系统出现的频

率分裂现象, 即当 TX 端与 RX 端呈过耦合状态时, 系统在谐振频率下不会达到最大能量传输效率, 但在其附近形成 2 个峰值. 针对这一现象, 提出一种自适应频率调谐技术, 能够消除 TX 端到 RX 端的距离和/或方向变化时对系统效率造成的影响. 该技术能够在 70 cm 范围内达到超过 70% 的能量传输效率, 几乎不受接收器位置或方位的影响. 通过将 SISO 场景中对频率分裂现象的处理进一步引入到 MIMO 场景下, Cui 等人[20] 提出了一种基于系统工作频率调节的 MIMO MRC-WPT 系统负载获能总量最大化方案, 通过联合考虑频率调整及 TX 电压自适应以提升系统性能. 与能量传输效率最大化方案相比, 该方案以牺牲较小的能量传输效率为代价以提升负载获能总量, 如当 TX 端与 RX 端间垂直距离为 10 cm 时, 相较于 26% 的效率损失, 负载获能得到了 361% 的提升.

3.1.3 针对 TX 线圈

一些工作对 TX 线圈的几何结构进行了精心设计. Ghotbi 等人[21] 提出了一种使用三谐波无线电力传输以提高负载获能总量的方式. TX 端由 3 个电感链路组成, 每个链路都以工作频率的谐波调谐, 对应的 3 个线圈处于同一平面并且同轴. 他们设计了一种垂直的 8 形线圈结构以减少线圈之间的寄生耦合, 相较于传统单线圈设计, 实现了负载获能总量从 1.93 W 到 2.5 W 的提升. Kim 等人[22] 基于 MIMO WPT 系统提出了一种采用由异质多极环组成的非耦合线圈模式作为 TX 线圈阵列的增强型波束成形方案, 该方案能够在更远的距离内获得更高的能量传输效率, 且有效降低了计算复杂度. 实验结果表明, 该方案能够通过简单的计算实现比传统波束成形方案高出约 20% 的能量传输效率. 为了保证多个用户设备能够有效地获取能量而不受设备位置的影响, Wang 等人[23] 采用一组平衡磁线圈, 在 TX 端以相移电流激励, 具有全方向性. 只要线圈以相同的距离指向 TX 端球体的中心, 该系统便可产生准均匀的磁场大小, 而与接收线圈的位置无关. 其中, 与由 90 度相移电路驱动的两发射线圈结构相比, 120 度相移电路驱动的三发射线圈结构平均提高了 6.8% 的能量传输效率, 效率差异减少了 88.7%. Zhou 等人[24] 观察到能量传输效率与负载获能总量冲突现象: 当 TX 端和 RX 端处于紧耦合状态时, 系统能量传输效率很高但实际的负载获能总量却非常低. 为此, 他们对传统的平面圆形螺旋型线圈进行了改进, 设计了大小可调的多状态 TX 线圈来调节 TX-RX 间耦合. 与 MultiSpot 系统[14] 提出的能量传输效率最大化方案相比, 所提出的方案平均实现了 74.7 倍的负载获能总量提升.

现有工作很少考虑过动态的 TX 端部署问题, 这在很多场景下是十分需要的. 例如, 无人机结束巡检后回来的位置分布是不固定的, 这就要求动态改变 TX 端部署. 然而以上工作通过设计各种线圈结构以优化系统充电性能, 却忽视了 TX 方位调整这一简单、高效的方法. 为此, Guo 等人[25] 提出了一个分布式概率自适应的 TX 转向调整方案. 在硬件层面, 他们设计了一个基于舵机的机械系统来支持 TX 转向自适应调整. 在软件层面, 他们提出了一个广泛应用于无线通信领域的随机波束成形分布式控制算法. 不仅避免了 TX-TX 以及 TX-RX 之间的协同, 还使用了一个动态的角度控制函数来保证算法的快速收敛. 与文献 [20] 所提出的频率调整方案相比, 在 TX-RX 水平偏差较大的情况下, 该 TX 转向调整方案可以实现平均 1.98 倍的负载获能总量提升.

除此之外, 为了实现均匀的能量覆盖, 可以对 TX 放置位置进行调整, 以保证无论 RX 的位置如何, 都可以满足其最低充电功率需求. 为此, Moghadam 等人[26] 首先针对 TX 与 RX 均处于固定位置的分布式 MISO MRC-WPT 系统推导出了最佳磁波束成形方案, 以在给定的 TX 端总功率约束下最大限度地提高 RX 端所获功率, 接着基于对应最优解联合优化所有 TX 的位置, 以最大限度地提高可传输给 RX 的最小功率. 其中, 仅进行 TX 位置优化或最优磁波束成形的 2 种方案可实现的最小可传输功率分别为 8.93 W、5.91 W, 而该联合方案能够显著提升其至 20.05 W.

3.1.4 针对 TX/RX 阻抗

根据最大能量传输定理, 当 RX 端阻抗与 TX 端阻抗呈共轭匹配状态时, 能够实现负载获能总量最大化.

站在 TX 端的角度来看, Zhao 等人[27] 构建了一个使用电容阵列的自动阻抗匹配网络用于 MIMO MRC-WPT 系统. 一旦 RX 在无线充电过程中发生移动导致等效阻抗发生变化, TX 端将自动调整自身阻抗以与其匹配. 实验结果表明, 在没有阻抗匹配网络的情况下, 即使接收器靠近发射器, 效率也仅有 60.1%, 而使用阻抗匹配网络能够实现 90.6% 的能量传输效率.

从 RX 端的角度出发, Seo 等人[28] 针对 SISO MRC-WPT 系统使用双端口网络的 Z 参数推导出了优化系统能量传输的最佳负载条件, 并分别在强耦合与弱耦合情况下进行了验证. 其中, 在强耦合系统中的最大

能量传输效率约为 94%，而在弱耦合系统中为 86%. Kim 等人[29]针对 MISO MRC-WPT 系统提出了一种基于 RX 端负载阻抗优化的增强型波束成形方案，并结合 TX 端电压调度以最大化系统能量传输效率. 该方案基于非耦合线圈模式，以避免多个 TX 线圈之间相互耦合对能量传输造成的干扰. Moghadam 等人[30]针对 SIMO 系统提出了一种联合优化 RX 端负载阻抗的集中式控制算法，以在满足每个独立负载的给定功率要求的同时，最大限度地减少所消耗的 TX 端总功率. 为了便于实现，还进一步设计了一种分布式算法，以迭代的方式独立调整各 RX 负载阻抗.

此外，RX 分组机制是一种能够同时影响 TX-RX 与 RX-RX 间耦合进而改变 RX 等效阻抗以进行阻抗匹配的有效技术. Zhou 等人[24]观察到“孤立”RX 对现象：当 RX 间存在强 RX-RX 耦合时，这一对 RX 会形成一个“孤岛”，能量无法传输进去，此时系统的能量传输效率和负载获能总量都会很低. 针对这一现象，他们提出一种 RX 分组机制，通过将强耦合的 RX 对分离到不同组中，并采用时分多路技术避免对它们同时充电. 在存在 2 个紧密耦合的 RX 对的实验场景下，采用该机制能够达到 80.78 W 的负载获能总量，而 MultiSpot 系统[14]所设计的机制仅达 1.21 W 的负载获能总量. Tang 等人[31]进一步观察发现，即使在没有强耦合 RX 对存在的情况下，合理的 RX 分组分时充电仍然可以显著提升系统负载获能总量. 基于这一发现，他们聚焦于最优 RX 分组问题求解，旨在兼顾公平性的前提下最大化系统负载获能总量. 与同时对所有 RX 充电以及分别对单个 RX 充电这 2 种方案相比，该分组机制分别提高了 78.5% 和 28.9% 的系统负载获能总量.

3.2 基于三线圈结构

为了提升能量传输距离，许多学者已对 MRC-WPT 系统的中继装置展开了研究. Zhang 等人[32]通过理论分析以及实验验证，证实了引入中继的有效性. 结果表明，使用 1 个或多个中继装置可以在 TX 端和 RX 端间的远距离范围内显著提高能量传输效率. 如表 3 所示，我们将详细探讨 TX 端—中继—RX 端结构无线充电系统优化的 3 种主要方式：参数优化、硬件设计及能量路由.

Table 3 Comparison of Optimization Scheduling Work for Three-Coil MRC-WPT System

表 3 三线圈结构 MRC-WPT 系统优化调度工作对比

角度	来源	研究对象	场景	具体内容	能量传输距离/cm	最佳传输效率/功率	实验原型接收设备数
参数优化	文献 [33]	系统频率及 TX 端与中继间互感	SI-单中继-SO	分析三线圈结构优于两线圈结构的理论条件	3	65%	1
	文献 [34]	中继方位	SI-单中继-SO	探讨中继方位对能量传输效率的影响	200	90%	
	文献 [35]	中继位置	SI-单中继-SO	研究 TX 端和 RX 端之间一个中继的最佳位置	5.5	53%	
	文献 [36]	中继数量及位置	SI-多中继-SO	优化继电器数量与位置以最大化能量传输效率	80	63%/1 W	
	文献 [37]	中继电容	SI-多中继-SO	调整中继电容以在系统频率下提升能量传输效率	120	51.6%	
	文献 [38]	中继位置	SI-多中继-SO	在中继非对称情况下优化中继位置	90	98%	
	文献 [39]	中继电容及位置	SI-多中继-SO	确定最佳中继电容及位置以实现非对称中继下能量传输效率最大化	75	80%	
硬件设计	文献 [40]	可重构 2D 平面	SI-多中继-MO	利用多跳中继实现水平方向上的充电距离扩展	130	46.7%	2
	文献 [41]	超表面	SI-多中继-SO	利用超材料以提升系统能量传输效率	50	47%/40 W	1
	文献 [42]	能量模式可重配置超表面	SI-多中继-MO	设计双层架构实现高粒度塑造能量场	45	92.8%	2
	文献 [43]	可重构超表面	MI-多中继-MO	调控超表面特定线圈阵列单元中的电容器和电阻实现波束成形	40	91%	2
	文献 [44]	可调谐超表面	SI-多中继-SO	固定频率下调谐系统电容以实现最佳耦合	8	2.6%	1
能量路由	文献 [45]	能量路由及电流调度	MI-多中继-MO	联合中继能量路由和 TX 端电流调度以最大化能量传输效率	60	74%	6

3.2.1 参数优化

一些工作通过精心设计三线圈结构 MRC-WPT 系统在实际部署时所涉及的相关参数以提升系统效用.

Zhong 等人[33]提出只要系统频率与 TX 端-中继间互感足够大，即可确保所设计的三线圈结构无线充电系统比两线圈结构系统更为节能. 该设计的关键在于利用了 TX 端和中继间的磁耦合，使得 TX 端中只需要小电流就可以在中继中感应出大电流，从而增强磁通量以向 RX 端传输能量. 其中，中继上的

大电流不流经 TX 端电阻, 能量损耗大大减少, 继而有效降低了驱动电路的成本, 提高了系统能效. 实验表明, 在相同的条件下三线圈结构系统可以传输更高的功率. 当输入功率为 12.7 W 时, 二线圈结构系统的输出功率为 2.92 W, 即 23% 的能量传输效率. 而对于 5.61 W 的输出功率, 三线圈结构系统的输入功率仅为 9.14 W, 因此能量传输效率为 61.4%.

Kim 等人[34]对包含中继的 MRC-WPT 系统进行了详细的理论分析. 他们对比了 2 种中继部署方式, 即中继线圈与 TX 线圈、RX 线圈同轴/垂直部署, 以观察中继部署方位对效率的影响. 分析结果表明, 引入中继可以适当地提高效率并延长 TX 端和 RX 端间距离, 如在 160 cm 范围内仍可达到 60% 以上的能量传输效率. Zhang 等人[35]对中继的作用进行了批判性研究, 表明在无线充电系统中部署中继并不总是可取的, 不当的中继部署反而可能降低系统整体效用. 研究结果还表明, 存在一个最佳位置来放置中继以最大限度地提高系统能量传输效率. 实验表明, 当 TX 端与 RX 端相距 55 mm 时能量传输效率低于 2%, 而将中继线圈放置于距 TX 线圈 33 mm 的位置后, 有效地将能量传输效率提高到 27%.

进一步地, Ahn 等人[36]分别研究了包含偶数和奇数个中继的 MRC-WPT 系统的共振频率分裂现象, 并对每种中继器配置下的传输功率及效率等进行了评估, 从而为最佳中继器位置和数量的确定提供了具体指导. 由于非相邻中继间的磁耦合会导致 WPT 系统中最大效率对应频率发生偏移, 因此系统在谐振频率下的效率相对低于在偏移频率下的效率. 实验发现, 以负载获能为优化目标时, 当 TX 端与 RX 端间距离低于 30 cm 时, 无需部署中继; 在 40~60 cm 范围内, 仅部署 1 个中继是实现传输功率最大化的最佳选择; 在超过 60 cm 的范围内, 双中继系统性能更优.

为解决这一问题, Kim 等人[37]在中继配置对称的情况下对中继器电容进行优化, 通过解析计算, 利用遗传算法求解最佳电容值. 实例表明, 在无中继情况下, TX 端与 RX 端间距离为 40 cm 时, 能量传输效率为 48.4%; 而当距离增长至 50 cm 时, 效率迅速下降到 0%. 在进行该优化设计后, 任意距离下的效率均提高了 3 个百分点以上, 在 40 cm 时效率为 51.6%, 特别是在 50 cm 距离下实现了 39.5% 的巨大增长. Kim 等人[38]基于 ABCD 矩阵推导出了具有多个中继的 MRC-WPT 系统的一般最大效率方程, 并适用该方程确定最佳中继部署位置, 即使这些中继是非对称的.

然而, 由于每个中继的电容设计不理想, 非对称情况下系统能量传输效率没有实现最大化. 为此, Choi 等人[39]首先通过扫描中继位置以找到最佳位置, 接着使用遗传算法求解最佳电容, 以实现非对称中继下的能量传输效率最大化.

3.2.2 硬件设计

现有一些工作针对中继硬件结构进行设计, 为三线圈结构无线充电系统优化提供了新的思路和技术路径. Sumiya 等人[40]设计了一个端到端的可重构 2D 平面无线充电系统 Alvus, 实现了在水平方向上的充电距离扩展. 在单个 TX 端的驱动下, Alvus 系统利用多跳中继, 能够在 19.6 m^2 的范围内实现效率超过 25% 的无线电能传输. 同时, Alvus 系统能够简单地构建和重新配置无线充电表面, 并根据感测到的信息(例如, 接收器位置、模块放置以及障碍物)自动调整能量传输路由.

超表面, 即由人工原子按照一定的排列方式组成的二维平面结构, 由于具有电磁场操控能力, 被自然地应用于无线充电系统设计当中. Wang 等人[41]通过在系统 TX 端和 RX 端之间部署一层由超材料制成的中继, 有效地增加了系统在垂直方向上的充电距离. 实验表明, 当 TX 端与 RX 端距离为 50 cm 时, 采用该超材料中继能够将能量传输效率从 17% 提高到 47%. Li 等人[42]搭建了一个能量模式完全可重配置的超表面无线充电系统, 除了可以扩大水平充电距离之外, 还能够以高粒度塑造能量场, 并根据需要进行功率放大、直通和阻断. 该系统设计为 2 层架构, 底层是能量分配层, 顶层是元共振控制层. 具体来说, 底层由一组相同的发射线圈谐振器构成, 能量经跳变传播到不同的谐振器. 该系统仅含 1 个功率放大器, 称为源发射器, 将连接到一个 TX 端线圈. 其余 TX 端线圈通过相邻间的磁共振互耦从源发射器获得能量. 顶层由可配置的元线圈阵列组成, 能够重塑通过它的能量场. 该系统能够提供具有安全保证的高功率传输、高端到端效率以及三维定制的能量分布. 结果表明, 通过波束成形, 能够以 95% 以上的效率将磁场重塑在 2 cm 范围内, 同时能量传输效率可以提高到 92.8%. 考虑到 MRC-WPT 系统中传统的磁波束成形技术通常需要精确的磁通道估计以及对能量源幅度和相位的控制, 在极端环境下是无法实现的, Li 等人[43]提出了一种基于可重构超表面的 MIMO WPT 系统中的新型波束成形方案. 利用该可重构超表面, 无需操纵 TX 端配置, 只需调整超表面特定线圈阵列单元中

的电容器及电阻即可实现近场波束成形. 该方案相较于传统波束成形方案能够在 40 cm 的充电范围内有效提升能量传输效率高达 2 倍. Li 等人[44] 提出了一种专为植入式医疗设备定制的基于可调谐超表面的 MRC-WPT 系统, 通过在固定频率下调谐系统电容实现最佳耦合. 与上述工作不同之处在于, 该系统兼顾了超表面的设计, 提出了近场场景下准确反演超表面有效渗透率的方法. 实际验证表明, 该系统能够在 8 cm 的植入深度处实现 2.6% 的能量传输效率.

3.2.3 能量路由

除了对系统参数或硬件结构进行设计优化之外, 还有一些工作考虑了三线圈结构无线充电系统中的最佳中继能量路由问题. 为此, Zhou 等人[45] 提出了一种近似最优的联合中继能量路由和 TX 端电流调度的优化方案, 并且无需依赖 RX 端的任何反馈. 对于最佳中继能量路由决策, 他们设计了一个近似比为 1/2 的贪婪算法, 并利用基于深度 Q 网络的方法进一步提升其效果. 相较于文献 [14] 及文献 [33] 中优化机制, 该方案能够实现 3.2 倍与 1.43 倍的能量传输效率提升.

3.3 小 结

本节介绍了磁共振无线充电系统中的优化调度相关工作, 分别探讨了两线圈结构和三线圈结构的优化策略. 在基于两线圈结构的优化中, 通过调整 TX 电流/电压、系统频率以及 TX/RX 阻抗等参数, 达到了提升系统充电性能的目的. 具体方法包括利用谐振频率调谐、阻抗匹配以及优化电流分布等技术. 对于三线圈结构, 通过在 TX 端和 RX 端之间引入中继线圈, 进一步增加了传输距离和系统效率. 优化策略包括设计能量路由方案、硬件结构改进, 以及通过调节中继线圈的参数实现最佳能量传输. 总的来说, 本节所述的优化调度方法有效提升了磁共振无线充电系统的性能, 提供了不同应用场景下的技术解决方案, 为未来的研究和应用奠定了扎实基础.

4 感知应用

随着无线充电技术在消费电子、汽车充电和工业自动化等多个领域的迅速发展和广泛落地, 各类感知应用应运而生, 旨在利用非侵入式感知技术捕捉并分析无线充电系统状态. 本节从识别认证、异物检测以及追踪定位 3 个方面对磁共振无线充电技术相关感知应用进行梳理介绍.

4.1 识别认证

随着智能设备以及物联网设备在数量及种类上的激增, 设备管理和安全维护的难度也随之加大. 最明显的威胁之一是能量窃取——非预期设备只需简单地接近无线充电器即可. 此外, 还可能发生更为严重的非预期设备攻击. 攻击者可以通过异常谐振攻击引起高电压/高电流, 从而造成充电器损坏. 他们还可能窃听充电设备, 或通过注入恶意消息劫持通信信道, 以控制整个充电过程. 因此, 对于磁共振无线充电系统来说, 实现设备精准识别认证对于确保整个系统的稳定运行至关重要.

设备指纹识别作为一种典型的身份验证方案, 它为每个设备构建指纹(即唯一标识符), 以防御设备伪装攻击. 在现有的设备指纹识别机制中, 设备指纹往往来自以下因素: 密码[46]、身份(ID)[47]、位置[48](例如, 接收信号强度、信道状态信息)和硬件差异(例如, 加速器、陀螺仪)[49-51]. 在 Qi 标准[52] 中, RX 端设备基于通信协议上传其 ID. 然而, 由于电磁信号的开放传播特性以及非加密的 Qi 通信信道, 该身份验证信息容易被伪造[53]. Zhang 等人[54] 等人利用底层电路元件的固有非线性失真特性为无线设备构建指纹, 在充电开始前收集并处理无线信号以提取指纹特征来验证设备是否预期. 然而该系统针对发射器进行识别, 没有考虑对移动电子设备的识别.

不可忽视的是, 密码和 ID 可以被攻击者伪造, 其他方案如位置和硬件差异, 要么要求用户主动执行与充电无关的操作, 要么需要在充电系统内部署专用设备以收集数据, 无疑增加了实现成本. 相比之下, 基于磁信号能够实现非侵入性且用户友好的设备指纹识别, 不仅能够自然地融入无线充电过程中, 还能保持无线充电系统的正常工作. 为此, Li 等人[55] 根据“由于制造误差使得不同的智能设备之间存在微小的硬件差异, 这种差异使得设备进行无线充电时, 磁信号变化具有与设备固有硬件属性相关的独特特性”这一见解, 提出了一种使用现成的商用磁传感器采集磁场变化特征作为唯一指纹来识别设备的方案.

4.2 异物检测

在无线充电系统的高效和安全运营中, 不仅需要准确辨认设备, 而且必须灵敏地识别和处理充电过程中无意引入的异物. 在 MRC-WPT 系统中, TX 端与 RX 端之间总会存在一定气隙(空间间隙), 这个气隙内的交变磁场是实现能量传输的关键. 然而, 任何非预期的物体进入这一气隙都可能对系统造成干扰. 根据其物理特性, 这些异物主要分为 2 类: 金属物体

(metal object, MO)以及 LO(living object, LO), 其中常见金属异物如图 6 所示. 当 MO 处于 MRC-WPT 系统的耦合磁场时, 其温度会因涡流损耗而迅速升高, 仅需几分钟即可达到大多数可燃物的着火点, 存在致人烫伤甚至引发火灾的潜在隐患. 同时, 系统能量传输将受到严重影响, 甚至无法正常工作. 此外, 对于误入耦合磁场内的 LO, 可能出现恶心、休克等不良反应, 严重情况下甚至危及生命.

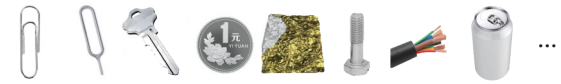


Fig. 6 Common metal foreign objects

图 6 常见金属异物

毋庸置疑地, 在 MRC-WPT 系统中执行异物检测对保障充电能效、避免设备损害、维护充电环境安全有着重要意义. 接下来, 如表 4 所示, 本文将对基于参数变化、基于传感器和基于辅助线圈这 3 种主要检测方法的相关工作进行介绍总结.

4.2.1 基于参数变化

当 MO 进入 TX 端与 RX 端之间的气隙时, 将会与 WPT 系统产生耦合, 导致 TX 和 RX 线圈之间的磁通量分布出现显著变化, 通过观测这些电气特性的变化能够进行 MO 检测.

Pucci 等人[56] 认为导电异物的存在将改变 TX 端电压, 而考虑到直接对 TX 线圈电流或电压进行测量可能导致电路品质因数降低而影响系统性能, 因此仅基于对输入电流以及电压信号的基频振幅的测量实现感应电压的实时估计, 能够有效检测到距收发端 20 cm 处半径 7.5 cm 铝盘及距收发端 5 cm 处半径 1.5 cm 铝盘等. Huang 等人[57] 通过监测全桥逆变器输出电压与输出电流间的相位差实现了对位于收发端 20 cm 气隙间的易拉罐、铁杯等大尺寸金属异物的检测.

Jafari 等人[58] 进一步考虑异物尺寸. 他们认为导电异物的存在以及 TX 端与 RX 端间对准情况的变化均会使谐振频率发生偏差. 其中, 对诸如易拉罐这样的大尺寸异物的检测根据谐振频率偏差即可完成, 而仅仅依据谐振频率偏差无法很好地区分回形针、硬币等微小异物与错位. 为此, 他们通过综合监测 TX 端谐振频率偏差并实时测量 TX 端电流以判别 MO 的存在. 实验针对收发端 20 cm 气隙间的 5 美分硬币及易拉罐进行. 结果表明, 硬币可能引起的最大频率偏差为 24 Hz, 而易拉罐为 660 Hz. 具有 200 ms 采样时长的异物检测控制器可以在 TX 端上占比 49% 的可能位置检测出 5 美分硬币. 而对于易拉罐来说, 具有 10 ms 采样时长的控制器的最大可检测区域

Table 4 Comparison of Foreign Object Detection Work

表 4 异物检测工作对比

方式	对象	来源	依据	具体内容	可检测对象
基于参数变化	MO	文献 [56]	MO 影响 TX 端电压	测量输入电流及电压基频振幅以实时估计感应电压	距收发线圈 5 cm 处半径 1.5 cm 铝盘
		文献 [57]	MO 影响 TX 端电压与电流相位差	监测全桥逆变器输出电压与输出电流间的相位差	收发端 20 cm 气隙间易拉罐/铁杯/锅
		文献 [58]	MO 影响谐振频率	综合监测 TX 端谐振频率偏差及电流	收发端 20 cm 气隙间硬币/易拉罐
		文献 [59]	MO 影响 RX 端品质因数	测量 RX 端品质因数	收发端 1 cm 气隙间硬币/回形针
		文献 [60]	MO 影响 TX 端逆变器电流	采集 TX 端逆变器电流并设计特征提取分类器	收发端 15 cm 气隙间易拉罐
		文献 [61]	MO 影响反射系数参数	构建基于反射系数参数检测异物的神经网络	收发端 18 cm 气隙间铜板/装水塑料瓶
基于传感器	LO	文献 [62]	LO 存在微小运动	基于雷达传感器并应用二维信号处理技术	1.5 m×1.5 m 范围内 LO
	道路异物	文献 [63]	道路异物视觉可见	配备相机并采用实时图像处理技术	道路异物
	LO	文献 [64]	LO 影响电容传感器电容	利用电容传感器检测 LO 引起的电容变化	10 cm 范围内 LO
	MO+LO	文献 [65]	MO、LO 发热	使用实时热成像仪采集充电区域图像	铝罐/硬币/螺丝/模拟手
	MO+LO	文献 [66]	物体高光谱特性高度依赖于其材料	基于高光谱成像技术及支持向量机模型	半径 0.3 cm 金属垫圈
	MO	文献 [67]	MO 导致磁场偏移	利用隧道磁阻传感器测量磁场分布	收发端 8 cm 气隙间 3 cm 螺栓
基于辅助线圈	MO	文献 [68]	MO 影响辅助线圈电压	采集辅助线圈交流电压信号峰值	收发端 10 cm 气隙间直径和高度 3.5 cm 铝圆柱
		文献 [69]		检测辅助线圈感应电压是否超出阈值	收发端 5 cm 气隙间 3 cm×3 cm×0.5 mm 铜片
		文献 [70]		基于辅助线圈电压向量分解	收发端 10 cm 气隙间 1.3 cm×1.3 cm×4 mm 硬币
		文献 [71]	MO 造成电磁模型异常	量化电磁模型偏差	收发端 20 cm 气隙间约 128 g 铝罐

占比为 82%. 由此可见，易拉罐的检测速率是硬币的 20 倍，并且检测概率更高. 实验测试进一步表明，检测速率越低、检测面积越大，就能够实现更小的异物检测. 此外，相较于微小异物，TX 端电流受错位影响更为显著，因此结合谐振频率偏差与 TX 端电流能够有效将微小异物与错位区分开来. Fukuda 等人[59]认识到 MO 将会降低 RX 端线圈的品质因数，因而对其进行测量以进行检测. 实验表明通过该方式可以实现收发端 1 cm 气隙间各种硬币以及 2.5 cm×0.7 cm 大小的回形针的检测.

然而，诸如 TX 和 RX 电流和功率损耗之类的参数明显受到 TX 和 RX 线圈之间错位的影响. 因此，将导电异物存在导致的系统电气参数变化与线圈间未对准引起的变化区分开来成为一项具有挑战性的任务. 为此，一些研究者利用机器学习或深度学习算法来实现异物检测，旨在减少由功率波动或线圈错位引起的干扰. 他们首先从 TX 端或 RX 端收集系统参数，随后训练神经网络以做出更为明智的决策. 其中，Li 等人[60]采集 TX 端逆变器电流，并提出了一种基于长短期记忆递归神经网络的特征提取分类器，能够在不同的传输距离以及错位情况下判断是否有异物存在. 实验完成了对收发端最大 15 cm 气隙间半径为 3 cm、高度为 9 cm 的易拉罐的检测，并在 0~15 cm 错位情况下达到了约 95% 的准确率. Ote 等人[61]构建了一个基于神经网络的异物检测系统，仅需采集反射系数参数，并且对线圈排列的变化具有鲁棒性. 实验表明，针对 23 cm×15 cm×0.12 cm 的铜板以及用以模仿人体的装有 15mL 或 30 mL 水的塑料瓶，该方法在 12~18 cm 气隙范围内实现了约 98% 的检测精度. 虽然这种检测方法简单易行，不需要额外的安装空间，成本效益高，但其应用受到 WPT 系统功率水平的限制. 对于高功率系统，通过监测电气特性的变化进行异物检测可能很困难[72]. 此外，TX 线圈与 RX 线圈间的错位、气隙变化以及电池状态（如充电状态、温度和老化）改变会影响 WPT 系统的电气特性，不可避免地会影响该方法的检测精度.

4.2.2 基于传感器

基于传感器的检测方法的明显优势在于其对 LO 的检测能力. 由于 LO 与磁场之间的相互作用较弱，若无辅助性传感器的加持，对其实现准确检测则比较困难. 毫无疑问，当 LO 出现在充电空间时，必然会对无线充电系统的一些非电气特性产生影响. 比如，异物落在 TX 线圈上将导致其表面变形，这意味着使用压力传感器能够检测异物的存在. 此外，雷达传感器[62]能够通过测量雷达发射信号与接收信号之间的距离相关信息实现生命体识别，图像相机[63]为异物识别提供直观的视觉检测. Poguntke 等人[62]基于雷达传感器，应用二维信号处理技术能够检测到 LO 极其微小的运动从而实现生命体检测. Azad 等人[63]配备相机并通过实时图像处理技术，选取图像的关注区域并进行十字形划分. 利用一维 Haar 小波变换，检测该区域内是否存在异物. 利用电容传感器也是一种可行方案. 充电区域上存在 LO 将导致电容传感器的电容发生变化. Jeong 等人[64]通过添加电感网络以放大电容变化并将其转换为易于检测的电压信号，以准确检测由 LO 的存在引起的任何最小电容变化. 结果表明，当存在 LO 时，该传感模式所测电容与无 LO 时相比增加了 27.5%.

另外，除了考虑 LO 所造成的非电气特性变化，导电异物将在电磁场的作用下不可避免地出现涡流效应进而导致温度持续增加，这一物理现象为导电异物的检测提供了新的途径. 热像仪（例如红外传感器）、温度传感器和热敏电阻能够感应温升以指示金属异物的存在，并且独立于 MO 大小. Sonnenberg 等人[65]设计了一种使用实时热成像仪的导电材料与生命体联合检测系统，在对充电区域图像信息采集之后，使用去噪卷积自动编码器的深度学习算法检测异物. 在实际测试中，对于大至 12.27 cm×6.6 cm 的铝罐，小至 0.018 cm×2.45 cm 的硬币，均可在安全温度范围内被检测出，通常为 35~40℃.

此外，Tian 等人[66]基于高光谱成像技术，构建了一个使用支持向量机对高光谱图像中的异物进行自动分类与检测的模型，该模型只对异物的材料敏感，不受异物大小和形状的影响，具有优异的泛化能力. 实验表明，基于像素的铁磁性金属和非铁磁性金属检测精度分别达到 93.4% 和 94.2%，基于对象的 MO 检测准确率可达 100%.

Liu 等人[67]提出一种多功能的隧道磁阻传感器阵列，通过测量线圈之间的磁场分布，在监测充电性能的同时，基于测量的磁场偏移检测 MO 并获取线圈错位情况. 实验验证了检测位于收发端 8 cm 气隙间约 3 cm 长的螺栓的可行性.

基于传感器方法的优势在于其检测异物的高度敏感性，并且其性能不受 WPT 系统工作频率与功率水平的限制，还不会因为线圈错位而受到影响. 即便如此，该技术在实际应用中仍面临着多种限制，包括成本高昂、部署复杂以及对环境变化的敏感度高等因素. 另外，在涉及为移动设备充电的场景中，往往

难以找到合适的空间用来部署这些传感器. 因此，基于传感器的检测技术通常应用于传输距离从数十到数百厘米不等的静态 WPT 场景下，比如电动汽车和工业物联网场景中的 WPT 系统.

4.2.3 基于辅助线圈

为了克服 4.2.1 节和 4.2.2 节所述的 2 种方法的局限性，研究人员还提出了一种新思路，即在设备充电过程中利用辅助线圈完成异物检测. 当异物进入无线充电系统时，特制的辅助线圈相较于原有的 TX 端或 RX 端电路将表现出更快的响应速度. 具体而言，辅助线圈中的电压和电流变化直接反映了其与异物之间的耦合关系，相比之下，TX 端或 RX 端电路中的电压和电流变化则因复杂的耦合机理而难以直观解读.

基于辅助线圈的异物检测方法主要分为两大步骤进行：首先，设计线圈结构以获取数据；其次，构建异物检测机制. 由于检测性能极大程度上依赖于辅助线圈的电气属性，因此精心特制的线圈组对于提升检测效果和减少盲点至关重要. 从这一角度出发，具有各种结构的线圈已被广泛研究和设计，例如，非重叠线圈组[73-74]、多层线圈[75]、对称线圈组[72,76-78]、缠绕在 TX 线圈周围的传感器线圈[79]、线圈阵列[80-82]、多重四极线圈[83]. 在利用辅助线圈收集数据后，研究者们提出了多种机制进行异物检测. 其中，一些研究通过分析辅助线圈的电压变化来判断异物的存在，并为此专门设计了电路来收集必要的数据. Gong 等人[68]构造了一个精确的半波整流器来获得线圈上交流电压信号的峰值，并使用低通滤波器消除 TX 线圈产生的谐波噪声，最后利用电压偏差来判定导电异物的存在. 实验表明，该方式检测位于收发端 5~10 cm 气隙间的直径为 3.5 cm、高度为 3.5 cm 的铝圆柱体时具有 90% 以上的准确率. Zhong 等人[69]通过设计的检测电路，对辅助线圈的感应电压进行连续扫描. 一旦检测到的电压明显超过预设的阈值，就表明存在异物. 实验表明，在 TX 端与 RX 端存在 3 cm 错位的情况下，该设计能够检测到位于收发端 5 cm 气隙间的 30 mm×30 mm×0.5 mm 大小的铜板. 另外一些工作则深入研究了异物与线圈间的耦合机制，以构建高效的检测模型. Niu 等人[70]提出一种基于辅助线圈电压向量分解的异物检测策略，以避免线圈错位所造成的异物检测精度的下降. 实际测试中，铝罐、钥匙和硬币导致由高到低的感应电压差. 对于硬币这种灵敏度低的微小异物来说，凭借辅助线圈的 5 匝设计，其感应电压相较于单匝线圈增强了 2.5~2.7 倍，从而保证其感应电压差能够超过所设阈值. 此外，在 10 cm 错位范围内的金属异物检测总体准确率达到 94.75%. Chu 等人[71]利用辅助线圈电压的线性组合重构发射线圈电流这一常态模型，并通过包含来自异物的电磁耦合将其扩展到异态模型，以两者的偏差指示异物对电磁场扰动的程度. 这一方法基本不受功率波动以及错位的影响. 实际表明，对于位于收发端 20 cm 气隙间的铝罐来说，它位于充电系统边界内时所引起的电流误差至少为 40 倍，位于 TX 线圈外时误差约 5 倍，并且该误差在错位情况下几乎保持一致.

此外，鉴于深度学习算法在特征学习方面的高效性，它也被应用于异物检测的研究中. Gong 等人[68]将辅助线圈的差分电压和发射线圈的输入电压作为输入，训练神经网络从而同时预测 MO 的存在以及线圈间的错位距离.

基于辅助线圈的检测已然是一种可行的 MO 检测方式，尤其是在高功率应用(如电动汽车充电)场景中. 然而，额外的功率损耗以及专用的系统结构限制了该方法在中低功率水平场景中(例如便携式电子产品)的部署.

表 5 进一步总结了 3 种异物检测方法各自的优劣.

Table 5 Comparison of Three Foreign Object Detection Methods

表 5 3 种异物检测方法对比

方法	优势	劣势
基于参数变化	简单易行、成本低、不占用额外空间	受系统功率、TX 端与 RX 端错位、充电状态等因素影响
基于传感器	高度敏感，独立于 WPT 系统功率水平、工作频率等，不受错位影响	高成本，安装难度较高，受环境影响，占用空间
基于辅助线圈	高度敏感，高精度，可避免错位影响，独立于 WPT 系统功率水平	辅助线圈需精心设计在系统通电时才有效

4.3 追踪定位

对于追踪应用，定位是实现位置和方向感知的必要条件. 这在许多应用中都是必不可少的，包括体内医疗设备导航、移动机器人、运动跟踪、虚拟现实等. 对于这些应用，磁定位技术凭借其在短距离内快速且准确的优势大受欢迎[84]. 如表 6 所示，我们依据应用场景对相关工作进行了梳理，并简单阐述了相应设计依据.

一些工作针对常规的 MRC-WPT 系统提出了各种定位 RX 线圈的方式. 在 Ranganathan 等人[85]所提出的定位技术中，利用 2 个 TX 实现对 RX 在二维空间内的定位. 他们保持 2 个 TX 上的功率大小恒定，检测并记录各个可能位置上 2 个 TX 上正向/反射功

Table 6 Comparison of Tracking and Positioning Work

表 6 追踪定位工作对比

场景	定位维度	来源	系统结构	依据
常规MRC-WPT系统	二维	文献[85]	2-TXs 1-RX	RX位置变化影响2个TX正向/反射功率的相位与幅度差异
		文献[86]	1-TX 1-中继 1-RX	RX位置变化影响其与TX和中继间耦合进而改变相应电流
	三维	文献[87]	TX阵列 1-RX	给定高度下耦合仅受TX和RX线圈之间横向错位影响
电动汽车错位避免	三维	文献[88]	1-TX 1-RX 4-辅助线圈	RX位置变化影响耦合进而改变4个辅助线圈电压
人体运动跟踪	二维	文献[89]	1-TX RX阵列 1-目标谐振线圈	谐振线圈将导致对应RX线圈与TX线圈间耦合增强进而影响RX线圈阵列感应电压
	三维	文献[90]	1-TX（3线圈） 1-RX（3线圈）	RX不同位置对应着不同的3×3维接收矩阵
		文献[91]	1-驱动线圈 15-调谐线圈 拾波线圈阵列	每个调谐线圈具有特定谐振频率经拾波线圈采集信号并进行反演求解
医疗设备定位	二维	文献[92]	体内定位器（2线圈） 体外 1-TX 1-RX	TX发送信号至定位器，经频率偏移后传送回RX，记录并对比各可能位置接收光谱峰平均值以定位坐标
		文献[93]	体外TX阵列 体内 1-RX	RX位置变化影响耦合系数进而改变TX电压
	三维	文献[94]	体内标签（1线圈） 体外 2-TXs 2-RXs	标签位置变化影响耦合进而改变RX线圈接收信号强度
		文献[95]	体外 2-TXs 体内 1-RX（3线圈）	RX位置变化影响耦合进而改变RX电流强度

率的相位与幅度差异作为参考，以实现对RX的近似定位. Wen等人[86]设计了一个简单的三线圈结构MRC-WPT系统，仅需测量TX线圈和中继线圈上的电流，即可实现RX线圈的二维定位. 具体来说，在RX线圈与中继线圈垂直距离恒定的情况下，可以根据互感值推算RX线圈相对于中继线圈的水平偏移量. 根据三点定位原理，通过改变中继线圈的位置或方向并测量3次电流值即可推导出RX线圈的位置. Chen等人[87]基于TX线圈阵列对RX线圈进行定位. 考虑到在给定高度下耦合系数仅受TX线圈和RX线圈之间横向错位影响，首先对三维空间进行网格划分并预先建立所有网格对应的耦合系数表，在给定TX与RX间高度情况下利用3个TX线圈与RX间的横向错位距离即可确定RX位置.

针对电动汽车MRC-WPT系统，Gao等人[88]考虑TX端与RX端错位将影响充电性能，提出了一种三维线圈定位技术，利用现有主站以及安装在接收器上的4个辅助线圈来引导驾驶员停车，以实现高效的无线电能传输. 他们测量辅助线圈的输出电压并对其进行建模以将电压转换为互感，接着由互感推导位置，再进行由辅助线圈到RX线圈的坐标转换，最终进行校准及定位估计. 实验结果表明，92%以上的样本定位误差在2 cm以内.

在人体运动跟踪应用方面，Srivastava等人[89]提出了一种用于感知指尖运动方向的MRC-WPT系统. 该系统由TX线圈、RX线圈阵列以及谐振线圈构成. 由9个线圈组成的RX线圈阵列及TX线圈分别部署于双面印刷电路板的顶层与底层，谐振线圈置于指尖. 一旦指尖在电路板上方移动，由于谐振线圈的存在，其对应下方RX线圈与TX线圈之间的耦合将增加，进而导致RX线圈阵列的感应电压发生变化. 因此通过监测RX线圈阵列电压变化即可实现指尖运动追踪. Pirkl等人[90]提出了用于跟踪身体部位相对位置和方向的MRC-WPT系统. 该系统由一个发射器和任意数量的接收器构成，且均包含3个正交线圈. 发射器的3个线圈依次接入信号，接收器的3个线圈相应地感应出电压，进而得到3×3维接收矩阵. 由于该接收矩阵表征对于不同的相对位置和方向是不同的并且对于相同的相对位置和方向是相同的，因此可直接用于活动识别而无需确定实际位置和方向值. Huang等人[91]提出了一种用于手势交互识别的六自由度多标记运动跟踪系统. 该系统包括拾波线圈阵列、驱动线圈以及最多15个调谐线圈，每个手指佩戴一个环形标记并且有3个调谐线圈以不同方向固定在环上，拾波线圈阵列用于跟踪标记，驱动线圈与拾波线圈阵列位于同一平面. 具有不同频率的调制信号被施加到驱动线圈以产生交变磁场，并在对应频率的调谐线圈中产生磁通量. 然后，几个不同位置的拾波线圈从谐振线圈中选择磁场，通过测量信号求解反演问题，计算出调谐线圈的五自由度姿态. 此外，通过2个调谐线圈之间已知的空间关系获取第六自由度. 其中，每个调谐线圈特有的谐振频率巧妙地避免了彼此间的相互干扰.

针对体内可植入/可食用医疗设备，已有的定位方式(如基于射频、X射线、核磁共振成像和超声波)，要么过于繁琐昂贵，要么对人类有害，或者经过人体组织会出现严重衰减. 相比之下，磁定位更具优势. Ray等人[92]设计了一种全无线、无电池定位系统，其由体内定位器、体外TX线圈及RX线圈构成. 他们将40.68 MHz正弦信号传送至TX线圈，由定位器接收后生成13.56 MHz信号并传回RX线圈，接着通过记录并对比各可能位置接收光谱的峰平均值来确定定位器坐标. 其中，发射信号与接收信号使用2个独立的频率能够避免相互干扰，最终能够达到小于1 cm的定位精度. Yamamoto等人[93]提出了一种利用

小型扁平阵列 TX 线圈进行 RX 线圈二维定位的方案. TX 线圈与 RX 线圈间距离的改变将影响 2 线圈间耦合系数进而改变 TX 线圈上电压，而更接近 RX 线圈的 TX 线圈上的电压变化会更为明显. 基于这一关系，他们利用每个 TX 线圈上的电压变化差异来检测 RX 线圈的位置. Tao 等人[94] 提出了一种用于体内定位的磁反向散射系统，其由体内标签、体外 TX 线圈及 RX 线圈构成. 随着标签位置发生变化，耦合系数同步改变，进而导致 RX 线圈所接收到的信号强度发生变化. 基于此，他们通过理论推导提出了一个分析模型有效地将接收信号强度与标签位置关联起来，能够以 5 mm 的精度进行定位. Khan 等人[95] 对线圈结构进行了精心设计. TX 端由 2 个正交平面螺旋型线圈组成，RX 端由 3 个相互正交放置的三维螺旋形线圈组成. 通过将 3 个 RX 线圈上的电流强度转换为耦合系数，并基于查找表的算法确定其在三维空间中的位置及方向.

4.4 小 结

本节介绍了磁共振无线充电系统中的感知应用，涵盖了识别认证、异物检测和追踪定位 3 个方面. 识别认证部分讨论了设备指纹识别技术，用于确保系统的安全性. 异物检测部分介绍了基于参数变化、基于传感器和基于辅助线圈 3 种主要方式及其相关工作，并对各自的优缺点进行了对比. 追踪定位部分探讨了基于 MRC-WPT 系统如何实现对设备位置和方向的感知. 总的来说，本节总结了感知技术在无线充电系统中的多种实际应用部署，为提高系统安全性、拓展系统适用性提供了重要的技术支持.

5 安全保障

在磁共振无线充电技术的发展过程中，各类安全问题日益凸显. 由于电磁信号的开放传播特性，电力安全、隐私安全以及辐射安全等方面的隐患不断涌现. 本节从这 3 个隐患角度出发，对具体的安全威胁以及相应的安全保障机制进行详细探讨.

5.1 电力安全

在磁共振无线充电系统当中，电能传输通道易受到攻击，威胁设备的安全或中断其运行. 例如，被动反向散射标签可能会被充电系统的不良泄漏误唤醒从而干扰其他设备，一些非预期设备可能有意地窃取能量而无需支付任何费用. 为了解决这些问题，系统应保证能量只会传输给预期接收方，同时防止能量泄漏给非预期接收方，这在文献 [96] 中被称为“电力安全”.

Sun 等人[96] 考虑了一个具有多个发射器、一个预期接收器和一个非预期接收器的 MRC-WPT 系统. 该系统通过控制 TX 端电流，在最大限度提高预期设备所获功率的同时，限制非预期设备接收的功率. Xu 等人[97] 针对类似的系统构成，提出了一种基于迫零波束成形技术的优化机制，通过调节 TX 端电压以最大化能量传输效率，同时约束 TX 端总功率、预期设备所获功率以及频谱效率. 进一步地，Sun 等人[98] 考虑了一个具有多个非预期接收器的 MRC-WPT 系统，在假设非预期接收器的互感测量值存在误差的情况下，设计了一种鲁棒的波束成形方案，能够在满足预期/非预期接收功率约束及单个发射器功率约束的前提下，通过调整 TX 端电流最大限度降低 TX 端总功率. 然而，文献 [96, 98] 所提出的系统模型忽略了 RX 间耦合，导致其在实际中的适用性十分有限. 为此，Jung 等人[99] 提出了一种同时进行磁聚集和零点调向的 TX 端电压调度方案，使 WPT 系统能够更好地进行能量分配，即，关注预期接收方同时抑制向非预期接收方的能量泄漏. 他们不仅弥补了文献 [96, 98] 中的设计缺陷，还考虑了更为通用的场景，即同时存在多个预期设备和多个非预期设备.

此外，一些工作通过采取能量加密的方式来避免非预期设备窃取能量. 在 Zhang 等人[100] 所提出的 MRC-WPT 系统中，通过混沌调节 TX 端频率实现了能量的加密. 预期设备能够基于从 TX 端获取的安全密钥同步调整电路，从而对加密能量进行解密以此来接收能量，而非预期设备在不知道安全密钥的情况下无法接收能量. Liu 等人[101] 进一步改进了加密系统，通过调节频率和持续时间生成了二维混沌安全密钥. 在知道密钥的情况下，预期设备能够解密并获取几乎所有加密的无线能量，而非预期设备无法进行解密以窃取能量.

5.2 隐私安全

由于磁场的开放性和电磁感应效应的普遍性，无线充电不可避免地会引起隐私安全问题. 显然，借助无线充电进行攻击正成为一种巨大的威胁，因为它不需要与被攻击设备发生物理连接，并且可以在没有用户许可或复杂设备协作的条件下发生.

5.2.1 隐私窃取

已有研究[102] 表明，用户在与智能手机进行交互操作时会在无线充电过程中留下可识别的特征. 攻击者可以通过提取并识别这些特征，推测出手机上运行的应用程序以及其他更为详细的隐私信息，相

关工作对比如表 7 所示.

Table 7 Comparison of Privacy Security Work

表 7 隐私安全工作对比

来源	监测对象	隐私信息	效果
文献[103]	TX 端电流	加载网页	跟踪 5 s 电流准确率可达 98.8%
文献[104]	TX 端电压	密码、按键、应用程序、语音内容	准确率均在 94% 以上
文献[53]	感应线圈电压	呼叫、发送消息、用户手动打开屏幕	识别准确率在 95% 以上
文献[105]	电磁感应声学噪声及磁场扰动	设备界面（熄屏、锁屏、主界面、应用程序界面）、界面内活动（启动应用程序、打开键盘、按键）	准确率在 90.4% 以上
文献[102]	泄露磁场波形	应用程序、空闲状态	识别准确率为 100%

一些工作聚焦于对 TX 端电流/电压进行监测以窃取用户隐私信息. La 等人[103] 观察到当被攻击设备电量充足时, 其功耗几乎直接反映在无线充电器的功率消耗上, 从而揭示了设备上活动. 因此, 通过收集并跟踪无线充电器上的电流, 他们能够推断手机浏览器所加载的网页等私人信息. 实际验证表明, 即使获取的电流轨迹短至 2.5 s, 也可实现这一攻击. Liu 等人[104] 通过研究用户隐私信息与无线充电器发射线圈上电压变化之间的相关性, 实现了对智能手机上输入和显示的隐私数据的窃取. 他们建立了一个基于电磁学原理的理论模型, 证明了手机活动引起的负载变化与无线充电器的电压变化高度相关. 通过监测动态电压, 他们成功获取到了用户的登录密码、键盘输入、应用程序信息以及语音内容, 准确率均在 94% 以上.

Wu 等人[53] 引入感应线圈对充电设备进行攻击. 他们通过监测感应线圈上的感应电压识别充电设备是否接收到消息通知、电话呼叫或打开/关闭屏幕, 乃至识别触发活动的特定应用程序. 具体来说, 与应用程序相关的不同活动对应着可识别的功耗模式, 并进一步反映在攻击线圈所感应到的电压上. 实际验证表明, 所提出的攻击能够以相当高的准确性区分呼叫、发送消息或手动打开屏幕等不同类型的活动, 在 3 款智能手机上的识别准确率至少达到 95%.

Ni 等人[105] 通过捕获无线充电过程中的 2 种物理现象, 即电磁感应声学噪声和磁场扰动, 实现了对用户与智能手机交互操作的推断. 具体来说, 用户在无线充电过程中与智能手机的交互可能改变触摸屏显示内容, 进而改变无线充电器的电流大小. 充电器内部线圈上的电流变化将产生电磁力, 导致线圈发生轻微变形和振动, 因而发出电磁感应声学噪声并产生磁场扰动, 基于这 2 种现象便可揭示用户交互. 评估结果表明, 该机制在推断敏感信息（如屏幕解锁密码和应用程序启动）方面可以达到 90.4% 以上的准确率. 类似地, Ni 等人[106] 利用无线充电器为智能手机充电时发出的电磁感应声学噪声和磁场扰动, 采用了少量学习来识别手机上运行的应用程序和解锁按键, 平均达到了 90% 以上的准确率.

为从泄漏磁场中提取信息, Yang 等人[102] 采用基于铁氧体棒天线的长波无线电接收技术, 将信号检测范围扩展到 1.5 m, 从而在受害者完全不知情的情况下测量泄漏磁场. 基于获取的磁场波形, 该研究表明, 与充电功率相关的信息嵌入在原始波形中. 机器学习技术被用于从这些信息中提取特征并训练深度神经网络模型. 在实验中, 该模型能够根据测得的磁场波形区分手机的空闲状态和运行的 5 种应用程序, 达到 100% 的准确率.

5.2.2 隐私保护

尽管无线充电侧信道攻击可以在没有物理连接的情况下进行, 但这类攻击仍大多依赖于设备功耗与用户交互之间的关联性, 这与传统的功耗侧信道攻击所利用的原理相同. 因此, 现有针对功耗侧信道攻击的防御对策也可以有效抵御无线充电侧信道攻击.

Matovu 等人[107] 所设计的防御机制随机扰动充电过程中设备所消耗的电流, 从而掩盖用户活动的独特模式. Pothukuchi 等人[108] 提出了一种操作系统级别的防御架构, 能够对设备所消耗的功率进行调控, 以混淆运行中的应用程序所留下的指纹. Yan 等人[109] 提出可以将无意义的代码嵌入移动应用程序或者随机更改设备显示参数, 以实现能量模糊处理, 使功耗跟踪中的特征不可预测. Liu 等人[104] 设计了一款防御应用程序对用户在智能手机上的活动进行监控, 当发现有隐私泄露风险时将形成随机负载以扰动侧信道电压信号, 从而干扰动态电压中蕴含的隐私信息.

对于通过监测磁场扰动[102,105,106] 以及电磁感应声学噪声[105,106] 窃取隐私信息的攻击方式来说, 可以通过动态调控 TX 端电压的振幅和频率[110] 或者添加随机噪声（例如高斯白噪声[53]）, 主动向感应电磁场引入额外的失真.

5.3 辐射安全

随着无线充电技术的广泛应用, 人们在享受这项技术带来的极大便利的同时, 对长期接触电磁辐射可能对健康造成潜在危害的担忧逐渐加深. 已有多项研究将高电磁辐射暴露与癌症、神经系统疾病、

生殖障碍、免疫功能障碍和电磁超敏反应等疾病相关联[111]. 因此, 许多国家和地区的官方组织为了加强电磁环境管理、保障公众健康, 都发布了相关指南, 如欧洲的国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)颁布的《限制电磁场暴露的导则》以及中国发布的《电磁环境控制限值》标准 GB 8702—2014[112], 全面规定了无线充电系统中 100 kHz~300 GHz 各个频段下的电磁安全阈值.

一些工作对各类 MRC-WPT 系统的电磁安全性进行了评估, 能够为系统设计提供重要指导. Christ 等人[113] 为评估 MRC-WPT 系统在人体电磁暴露界限方面的合规性提供了指导. 在他们所搭建的系统中, 在人体处于距离线圈 10 mm 且呈最大暴露方位的位置、频率达到 8 MHz、发射线圈电流为 0.5~1.2 A 时, 将达到局部乃至全身比吸收率界限. Wang 等人[114] 评估了暴露于电动汽车 MRC-WPT 系统的成人和儿童的电磁安全性. 结果表明, 站在车后和坐在驾驶座上的成人模型基本可以满足暴露限值, 而在靠近 WPT 系统利兹线的成人和儿童模型的小部分区域, 感应电场超过了界限.

此外, 研究者们针对不同应用场景下的 MRC-WPT 系统提出了相应的电磁辐射安全保障机制.

Hong 等人[115] 提出了一种利用额外屏蔽线圈的频率选择性电磁干扰降低方案, 以有效抑制 WPT 系统的电磁辐射. 所提出的方法依据磁场泄漏的谐波来调整屏蔽线圈的电容值从而改变其谐振频率以最小化磁场泄漏, 不仅能够有效降低特定频率范围内的电磁干扰并且不会对系统能量传输效率造成明显影响. 该方案可以很容易地应用于智能手机、人工耳蜗[116].

Xiu 等人[117] 考虑到无线充电有轨电车利用高频电磁场进行电力传输将不可避免地对周围环境造成电磁辐射, 提出了一种以最小化电磁辐射为目标的具有最低传输功率及效率约束的数学模型, 从而对线圈参数进行设计.

对于一般性的 MRC-WPT 系统, Worgan 等人[118] 对 MagMIMO[8] 和 MultiSpot[14] 系统进行了有限元法磁性模拟, 结果表明两者均违反了 ICNIRP 规定的基本限制. 这一发现表明, 一些研究在进行系统充电性能优化时, 往往忽视了对辐射安全性的考虑. Sato 等人[119] 为实现 MISO MRC-WPT 系统中任意点的泄漏磁场抑制, 基于粒子群优化算法对 TX 端线圈的部署以及 TX 端电压幅值与相位的调控进行了优化. Zhou 等人[120] 为 MIMO MRC-WPT 系统设计了一种保障电磁辐射安全的充电性能优化方案, 不仅给出了整个三维有效充电空间内电磁辐射安全约束兼顾简洁与精度要求的离散化表达, 而且将其与 TX 端电流调度技术相结合实现了系统能量传输效率最大化.

5.4 小 结

本节详细探讨了磁共振无线充电技术在电力安全、隐私安全及辐射安全 3 个方面正面临的具体威胁及相应的保障机制. 在电力安全保障方面, 波束成形、能量加密等技术得以应用以避免非预期设备窃取能量; 隐私安全方面的研究则展示了攻击者如何通过无线充电侧信道窃取用户隐私信息, 并提出了多种防御对策以保障用户隐私安全; 在辐射安全方面, 相关研究提供了评估和保障电磁辐射安全性的技术方案, 确保系统在提供高效能量传输的同时, 将电磁辐射对人体健康的影响降至最低. 总体而言, 本节所述的安全保障机制研究为提升磁共振无线充电系统的安全性和可靠性提供了重要参考和指导.

6 未来展望

磁共振无线充电技术已成为 AIoT 领域的重要研究方向. 然而, 这一技术的研究仍存在一些可改进之处. 因此, 本节将首先归纳总结现有工作在实际应用中可进一步改进和完善的方面, 然后提出我们对未来潜在研究方向的见解.

6.1 可改进之处

尽管近年来磁共振无线充电技术在反馈通信、优化调度、感知应用以及安全保障方面取得了显著进展, 但仍存在一些可改进之处.

6.1.1 反馈通信方面

1)允许更多设备同时进行反馈通信. 现有 MRC-WPT 系统中反馈通信距离约为 0.5 m, 通过提升 TX 端总功率或引入无源中继设备, 可以实现通信范围的扩展. 此外, 现有机制在同一时段内通常只能支持最多数十个设备进行反馈通信. 当并行通信的设备数量超过一定限度后, 通信准确率会显著下降. 为了满足大规模设备同时进行反馈通信的需求, 可以考虑采取分组调度机制, 对通信设备进行分组, 并依次调度各组进行并行反馈通信. 通过这种方式, 不仅可以显著提高系统支持的设备数量, 还能保证每组设备的通信准确率.

2)降低反馈通信预处理时间开销. 现有带内反馈通信机制在正式通信阶段之前, 往往需要开展相关准备工作. 文献 [9] 涉及繁琐耗时的 RX 识别以及

依赖性检测过程；文献 [10] 需要预先对大量不同的 RX 通断状态进行观测；文献 [11] 虽避免了对高秩信道矩阵的直接恢复，但仍需进行多次低秩道矩阵估计；文献 [12] 虽巧妙地利用了组级信道可分解性避免了对各 RX 通断状态对应信道矩阵进行一一测量，但在 RX 数目较多的情况下仍存在着不可忽视的时间开销. 为此，可以考虑引入人工智能模型对所需信息进行估计预测，或进一步挖掘更低成本的可利用信息以加快反馈通信预处理过程.

6.1.2 优化调度方面

1）增强系统应对环境动态变化的鲁棒性. 现有工作在各类场景需求下进行 MRC-WPT 系统性能优化机制设计时，往往假定为特定的固定部署场景，忽略了对工作环境动态变化（如接收设备发生移动）的考虑，可能无法很好保证系统稳定性. 文献 [14] 提出了一种自适应波束成形算法，当任何接收器移动时，将重新估计 RX 端等效阻抗而非再次测量，从而实现快速响应. 然而这一操作将不可避免地引入误差，因此需要在实时响应性与能量传输效率之间进行权衡. 文献 [19] 提出了一种自适应频率调谐机制，以自动应对接收器与发射器间距离/方位的变化. 但对于工作在较窄频带上的 MRC-WPT 系统来说，并不支持该机制的部署. 为此，可以进一步考虑调整 TX-RX 间耦合以响应变化，且该方式能够在单一频率下实现.

2）降低系统实施开销. 一些优化调度方案由于存在着较大的实施开销，无法应用于对实时性要求较高的实际场景，如对移动机器人进行无线充电. 以文献 [40] 为例，该设计无法同时进行供能与检测（发射器/中继部署拓扑生成、接收器接近检测等），因此检测环节所占用的时间将不可避免地影响系统性能. 为此，一个可能的解决方案是基于不同频带进行充电与检测，即以频域复用方式取代当前时域复用的实现方式.

3）分布式部署以提升系统可扩展性. 现有工作大多依赖于 TX 端控制器在多个发射器之间进行协调，从而集中式应用优化机制. 而分布式 MRC-WPT 系统拥有多个独立的发射单元，能够有效提升系统可扩展性，比如便于扩展系统有效充电范围. 如文献 [25] 提出了一种随机波束成形分布式控制算法，有效避免了 TX 之间及 TX 与 RX 之间的复杂协作，有利于算法的快速收敛. 此外，为了便于实际部署，文献 [30] 针对 RX 端提出了一种分布式负载阻抗优化算法，RX 能够基于本地信息以及其他 RX 的反馈迭代调整自身负载.

6.1.3 感知应用方面

1）实现多设备识别认证. 现有工作往往仅考虑对单一设备进行识别认证，当同时有多个设备靠近时，识别准确率将受到极大影响. 在多设备识别场景中，除了要考虑 TX 与 RX 间耦合，还需要处理 RX 之间的相互耦合效应. 为此，可以考虑采用分时调度或频率分割的策略，将识别认证过程分散到不同的时间段或频带上，从而减少设备间干扰，提高识别准确率.

2）拓展异物检测技术适用场景. 当前大部分异物检测技术主要应用于日常生活中的无线充电系统，如电动汽车、智能手机等. 然而，随着磁共振无线充电技术逐渐应用于更为复杂的场景，例如水下、宇宙空间等特殊环境，相应的异物检测技术也需要进一步改进优化.

3）扩大定位跟踪有效范围. 设计更为优良的硬件组件能够降低定位噪声并增强驱动信号，从而获得更大的有效空间. 此外，可以考虑将探测线圈设计为三维结构，以解决类似于文献 [91] 中出现的无法测量位置与方向的死角问题.

6.1.4 安全保障方面

1）引入实时监测与异常检测以保障电力安全. 现有工作往往假定预期设备及非预期设备已经明确，而实际上为区分出非预期设备需进行额外设计. 为此，可以考虑建立正常电力传输的行为模型，设计实时监测和异常检测系统，从而及时发现并响应非预期设备能量窃取行为.

2）识别恶意充电器以避免隐私泄露. 现有的隐私保护机制大多通过设计各种方式来消除无线充电过程中所蕴含的与隐私信息相关的特征. 更为直观地，可以考虑对无线充电器进行识别以直接避免恶意充电器对设备进行充电.

3）提升辐射安全保障机制鲁棒性. 在实际应用中，设备和人体所处位置可能发生动态变化，导致需要关注的安全保障空间随之改变. 以文献 [119] 及文献 [120] 提出的安全保障机制为例，当用户相对于 MRC-WPT 系统的位置发生改变时，文献 [119] 中考虑的磁场抑制区域需要重新规划，并且文献 [120] 定义的安全距离界限值也需进行修正，进而相应调整 TX 端的调控策略. 为此可以考虑引入用户检测机制以粗粒度感知用户位置变化.

6.2 潜在应用场景

通过结合不同特定物联网应用场景下的特点与需求，现给出磁共振无线充电技术在未来的 3 个潜

在应用研究方向,以供探讨.

1)无源与低功耗物联网.众所周知,无源与低功耗物联网[121-122]的目标是摆脱传统电池供电的限制,以实现设备的长时间运行(一般要求为数年)和自给自足的物联网系统.终端节点设备的获能方式要么通过激励源或者环境信号捕捉无线电磁能量("开源"),要么通过自身携带电池("节流").然而,无论是哪种方式,这都要求终端节点设备以极低功耗(一般为微瓦级)的方式进行系统运行.这大大限制了终端节点设备的能力和应用场景,例如,难以部署深度学习模型(即使是轻量级模型)以增强设备的数据处理能力,以及无法支持摄像头等较高功耗的传感器以扩展设备的感知能力.磁共振无线充电技术有望解决当前这一困境.在供能量级方面,其可以同时为多个终端节点设备提供瓦级的能量供应.在反馈通信方面,其可以利用自带的带内反馈通信机制,避免带外通信手段所带来的额外硬件成本、能量消耗以及频谱占用.在充电距离方面,其可以通过部署中继线圈或移动智能小车的方式实现房间级的有效充电覆盖范围.相信在未来磁共振无线充电技术可以极大程度地助力无源与低功耗物联网的发展.

2)水下物联网.当前,水下物联网技术[123]发展迅速,其主要利用水下传感器、通信设备和数据处理技术,实现对水下环境的实时监测、数据传输和远程控制.然而,水下传感器设备的能量供应是当前面临的一大难题.一方面,水下环境增加了传统电池供能方式更换设备电池的难度,同时更换电池操作也容易破坏设备的防水性.另一方面,传统电磁波信号在水中衰减过大,无法通过基于射频信号的无线充电方式为设备提供足够的能量.幸运的是,相较于传统电磁波信号,磁信号在水中的衰减要小得多.因此,磁共振无线充电技术可以有效解决水下环境中的设备供能难题,例如,可以通过机械臂的方式将能量发射线圈送至水下传感器设备的指定位置进行无线能量传输.

3)库存追踪.随着电子商务的飞速发展,高效的库存追踪已经成为当前大型物流、仓储场景中的关键技术之一.其核心的基本需求,就是快速且准确地自动化获取指定位置区域(例如,货架或者盘货通道)内的全部物品信息.已有基于RFID的库存追踪技术虽然已经在不同领域内都得到了较为成功的应用,但仍然面临着一个难以解决的根本性问题.也就是,高频RFID信号(通常工作频段为860~960 MHz)易受到环境多径效应干扰(由于水和金属等物体的反射作用)而导致物品标签的漏读和误读[124-126].而即使1%的标签读取误差也会造成全球每年几十亿的包裹被错误投递,所造成的直接经济损失可达数十亿美元.即使对于大型的电子商务公司而言,这也是无法承受的.磁共振无线充电技术有望解决当前基于RFID的库存追踪技术在实际应用时遇到的挑战,主要出自以下3点原因.首先,与高频RFID信号不同的是,水和金属等材料对于磁信号更加友好,所造成的信号衰减要小得多,因此可以极大程度地减少环境干扰以降低标签漏读率.然后,磁信号在近场空间中的衰减速度极快(与距离之间成负六次方衰减关系),因此不存在信号的多径干扰问题,且单基站(能量发射线圈)所形成的有效读取范围很好界定,从而有效解决标签误读情况.其次,磁共振无线充电系统中能够实现带内反馈通信机制,以支持标签携带信息的读取.最后,磁共振无线充电技术本身的供能特性可以实现系统对廉价无源标签的支持.

7 总 结

随着AIoT领域的快速发展,对便捷可靠的供能方式的需求变得越来越迫切.幸运的是,无线充电技术很好地满足了这一需求.其中,磁共振无线充电技术凭借其均衡的技术优势,成为眼下研究的热点之一,并逐步走进人们的生活当中.

本文从反馈通信、优化调度、感知应用以及安全保障4个角度介绍了磁共振无线充电技术的代表性研究成果,并从研究背景、理论依据和关键要点等多个方面进行了分析总结.最后,针对这4个方面讨论了未来可改进之处,并探讨了磁共振无线充电技术的未来潜在应用研究方向.

总的来说,磁共振无线充电技术作为一种前沿的供能方式,拥有广阔的发展前景.尽管当前技术已经在多个方面取得了显著进展,但仍有许多需要改进和优化的地方.随着研究的深入,磁共振无线充电技术将逐渐克服现有的瓶颈和挑战,成为AIoT时代的重要支撑力量.未来,我们可以期待这一技术在智能家居、智慧医疗、智能工业等多个领域的广泛应用,成为智能化、便捷化生活的坚实基础.

作者贡献声明: 王馨语负责文献调研及论文撰写;周王球提出论文整体框架并参与撰写;周颢、李向阳提出论文修改意见并指导撰写.王馨语和周王

球为共同第一作者，周颢和李向阳为共同通信作者.

参 考 文 献

[1] International Data Corporation. IDC: China's IoT Market Spending Continues to Rise, Projected to Rank First Globally by 2027 [EB/OL]. (2023-07-17)[2024-05-28].https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prCHC51041723 (in Chinese)
(国际数据公司. IDC: 中国物联网市场支出逐步攀升, 预计 2027 年将位列全球第一[EB/OL]. (2023-07-17)[2024-05-28].https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prCHC51041723)

[2] Riad K, Huang Teng, Ke Lishan. A dynamic and hierarchical access control for IoT in multi-authority cloud storage[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2020, 160: 102633

[3] Wang Dean, Zhang Jiantao, Cui Shumei, et al. Modern advances in magnetic materials of wireless power transfer systems: A review and new perspectives[J]. Nanomaterials, 2022, 12(20): No. 3662

[4] Liu Zhe, Li Tong, Li Siqi, et al. Advancements and challenges in wireless power transfer: A comprehensive review[J/OL]. Nexus, 2024 [2024-07-04]. https://www.cell.com/nexus/fulltext/S2950-1601(24)00012-3

[5] Alabsi A, Hawbani A, Wang Xingfu, et al. Wireless power transfer technologies, applications, and future trends: A review[J/OL]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2024 [2024-07-04]. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10478158

[6] Abou Houran M, Yang Xu, Chen Wenjie. Magnetically coupled resonance WPT: Review of compensation topologies, resonator structures with misalignment, and EMI diagnostics[J]. Electronics, 2018, 7(11): No. 296

[7] Yang Gang, Moghadam M R V, Zhang Rui. Magnetic MIMO signal processing and optimization for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(11): 2860−2874

[8] Jadidian J, Katabi D. Magnetic MIMO: How to charge your phone in your pocket[C]//Proc of the 20th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2014: 495−506

[9] Liang Xiaolun, Zhou Hao, Zhou Wangqiu, et al. Onion: Dependency-aware reliable communication protocol for magnetic mimo wpt system[C]//Proc of 2021 IEEE 27th Int Conf on Parallel and Distributed Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 458−465

[10] Hua Wenxiong, Cui Xiang, Zhou Hao, et al. Parallel feedback communications for magnetic mimo wireless power transfer system[C]//Proc of 2019 16th Annual IEEE Int Conf on Sensing, Communication, and Networking. Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1−9

[11] Zhou Hao, Chen Zhao, Zhou Wangqiu, et al. Camel: Context-aware magnetic MIMO wireless power transfer with in-band communication[C]//Proc of IEEE Conf on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2021). Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 1−10

[12] Zhou Wangqiu, Zhou Hao, Cui Xiang, et al. Roland: Robust in-band parallel communication for magnetic MIMO wireless power transfer system[C]//Proc of IEEE Conf on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2023). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 1−10

[13] Alliance A. Airfuel resonant wireless power transfer (WPT) system baseline system specification (BSS)[R]. Geneva: AirFuel Alliance, 2017

[14] Shi Lixin, Kabelac Z, Katabi D, et al. Wireless power hotspot that charges all of your devices[C]//Proc of the 21st Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2015: 2−13

[15] Zhang Yixin, Chen Da, Jiang Tao. Robust beamforming design for magnetic MIMO wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69: 5066−5077

[16] Zhao Yubin, Li Xiaofan, Xu Chengzhong, et al. Random beamforming for multi-coil magnetic resonance wireless power transfer system[C]//Proc of 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1−4

[17] Cao Guodong, Zhou Hao, Zhang Hangkai, et al. Requirement-driven magnetic beamforming for MIMO wireless power transfer optimization[C]//Proc of 2018 15th Annual IEEE Int Conf on Sensing, Communication, and Networking. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1−9

[18] Ahn D, Hong S. Effect of coupling between multiple transmitters or multiple receivers on wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(7): 2602−2613

[19] Sample A P, Meyer D T, Smith J R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 58(2): 544−554

[20] Cui Xiang, Zhou Hao, Deng Jialin, et al. Mag-E4E: Trade efficiency for energy in magnetic mimo wireless power transfer system[C]// Proc of IEEE Conf on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2022). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 440−449

[21] Ghotbi I, Najjarzadegan M, Sarfaraz H, et al. Enhanced power-delivered-to-load through planar multiple-harmonic wireless power transmission[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(9): 1219−1223

[22] Kim K, Kim H J, Choi J W. Magnetic beamforming with non-coupling coil pattern for high efficiency and long distance wireless power transfer[C]//Proc of 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1−4

[23] Wang N X, Wang Hanwei, Mei Jie, et al. Robust 3-D wireless power transfer system based on rotating fields for multi-user charging[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 36(2): 693−702

[24] Zhou Wangqiu, Zhou Hao, Cui Xiang, et al. IMeP: Impedance matching enhanced power-delivered-to-load optimization for magnetic MIMO wireless power transfer system[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2023, 19(4): 1−25

[25] Guo Weiming, Wang Zhan, Zhou Hao, et al. DPDA: Distributed probability-adaptive direction adjustment for magnetic wireless power transfer[C]//Proc of 2023 20th Annual IEEE Int Conf on Sensing, Communication, and Networking. Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 142−150

[26] Moghadam M R V, Zhang Rui. Node placement and distributed magnetic beamforming optimization for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2017, 4(2): 264−279

[27] Zhao Yubin, Li Xiaofan, Xu Chengzhong, et al. Smart multi-coil-

based magnetic resonance prototype for wireless power transfer[C]// Proc of 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1−4

[28] Seo D W, Lee J H, Lee H S. Study on two-coil and four-coil wireless power transfer systems using Z-parameter approach[J]. Etri Journal, 2016, 38(3): 568−578

[29] Kim K, Kim H J, Choi J W. Load impedance optimization of magnetic beamforming wireless power transfer[C]//Proc of 2017 Int Conf on Information and Communication Technology Convergence. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 190−192

[30] Moghadam M R V, Zhang Rui. Multiuser wireless power transfer via magnetic resonant coupling: Performance analysis, charging control, and power region characterization[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2015, 2(1): 72−83

[31] Tang Lulu, Zhou Hao, Guo Weiming, et al. IMRG: Impedance matching oriented receiver grouping for MIMO WPT system[C]//Proc of 2022 18th Int Conf on Mobility, Sensing and Networking. Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 692−699

[32] Zhang Fei, Hackworth S A, Fu Weinong, et al. Relay effect of wireless power transfer using strongly coupled magnetic resonances[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1478−1481

[33] Zhong Wenxing, Zhang Chenghui, Liu Xun, et al. A methodology for making a three-coil wireless power transfer system more energy efficient than a two-coil counterpart for extended transfer distance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(2): 933−942

[34] Kim J W, Son H C, Kim K H, et al. Efficiency analysis of magnetic resonance wireless power transfer with intermediate resonant coil[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 389−392

[35] Zhang Xiu, Ho S L, Fu Weinong. Quantitative design and analysis of relay resonators in wireless power transfer system[J]. IEEE transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 4026−4029

[36] Ahn D, Hong S. A study on magnetic field repeater in wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(1): 360−371

[37] Kim J H, Park B C, Lee J H. Optimum design of WPT relay system by controlling capacitance[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(7): 1658−1661

[38] Kim J H, Park B C, Lee J H. New analysis method for wireless power transfer system with multiple n resonators[J]. Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2013, 13(3): 173−177

[39] Choi B H, Lee J H. Design of asymmetrical relay resonators for maximum efficiency of wireless power transfer[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2016, 2016(1): 8247476

[40] Sumiya K, Sasatani T, Nishizawa Y, et al. Alvus: A reconfigurable 2-D wireless charging system[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2019, 3(2): 1−29

[41] Wang Bingnan, Teo K H, Nishino T, et al. Experiments on wireless power transfer with metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(25): 254101

[42] Li Kai, Naderi M Y, Muncuk U, et al. MetaResonance—A reconfigurable surface for holographic wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(5): 4682−4692

[43] Li Zhangyu, Sun Zhi. Enabling magnetic beamforming in MIMO wireless power transfer using reconfigurable metasurface[C]//Proc of 2020 IEEE Global Communications Conf (GLOBECOM 2020). Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1−6

[44] Li Maoyuan, Khaleghi A, Hasanvand A, et al. A new design and analysis for metasurface-based near-field magnetic wireless power transfer for deep implants[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(5): 6442−6454

[45] Zhou Hao, Deng Jialin, Hua Wenxiong, et al. PROCS: Power routing and current scheduling in multi-relay magnetic MIMO WPT system[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 22(3): 1702−1716

[46] Meng Weizhi, Li Wenjuan, Jiang Lijun, et al. On multiple password interference of touch screen patterns and text passwords[C]//Proc of the 2016 CHI Conf on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2016: 4818−4822

[47] Seo S H, Gupta A, Sallam A M, et al. Detecting mobile malware threats to homeland security through static analysis[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 38: 43−53

[48] Li Mengyuan, Meng Yan, Liu Junyi, et al. When CSI meets public WiFi: Inferring your mobile phone password via WiFi signals[C]// Proc of the 2016 ACM SIGSAC Conf on Computer and Communications Security. New York: ACM, 2016: 1068−1079

[49] Cheng Yushi, Ji Xiaoyu, Zhang Juchuan, et al. DeMiCPU: Device fingerprinting with magnetic signals radiated by CPU[C]//Proc of the 2019 ACM SIGSAC Conf on Computer and Communications Security. New York: ACM, 2019: 1149−1170

[50] Xu Xiangyu, Yu Jiadi, Chen Yingying, et al. TouchPass: Towards behavior-irrelevant on-touch user authentication on smartphones leveraging vibrations[C]//Proc of the 26th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2020: 1−13

[51] Baldini G, Steri G. A survey of techniques for the identification of mobile phones using the physical fingerprints of the built-in components[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1761−1789

[52] Wireless Power Consortium. Qi: Mobile charging empowered [EB/OL].[2024-05-28].https://www.wirelesspowerconsortium.com/standards/qi-wireless-charging/

[53] Wu Yi, Li Zhuohang, Van Nostrand N, et al. Time to rethink the design of qi standard? security and privacy vulnerability analysis of Qi wireless charging[C]//Proc of the 37th Annual Computer Security Applications Conf. New York: ACM, 2021: 916−929

[54] Zhang Jiayu, Wang Zhiyun, Ji Xiaoyu, et al. Who is charging my phone? identifying wireless chargers via fingerprinting[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 8(4): 2992−2999

[55] Li Jiachun, Meng Yan, Zhang Le, et al. MagFingerprint: A magnetic based device fingerprinting in wireless charging[C]//Proc of IEEE Conf on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2023). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 1−10

[56] Pucci N, Arteaga J M, Kwan C H, et al. Induced voltage estimation from class ef switching harmonics in HF-IPT systems[J]. IEEE

Transactions on Power Electronics, 2021, 37(4): 4903−4916

[57] Huang S J, Su J L, Dai S H, et al. Enhancement of wireless power transmission with foreign-object detection considerations[C]//Proc of 2017 IEEE 6th Global Conf on Consumer Electronics. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1−2

[58] Jafari H, Moghaddami M, Sarwat A I. Foreign object detection in inductive charging systems based on primary side measurements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 6466−6475

[59] Fukuda S, Nakano H, Murayama Y, et al. A novel metal detector using the quality factor of the secondary coil for wireless power transfer systems[C]//Proc of 2012 IEEE MTT-S Int Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 241−244

[60] Li Sheng, Li Haoze, Wu Zhijun, et al. Foreign object detection for LCC-S wireless power transfer system based on LSTM[C]//Proc of 2021 IEEE Int Conf on Emergency Science and Information Technology. Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 165−169

[61] Ote M, Jeong S, Tentzeris M M. Foreign object detection for wireless power transfer based on machine learning[C]//Proc of 2020 IEEE Wireless Power Transfer Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 476−479

[62] Poguntke T, Schumann P, Ochs K. Radar-based living object protection for inductive charging of electric vehicles using two-dimensional signal processing[J]. Wireless Power Transfer, 2017, 4(2): 88−97

[63] Azad A, Kulyukin V, Pantic Z. Misalignment tolerant DWPT charger for EV roadways with integrated foreign object detection and driver feedback system[C]//Proc of 2019 IEEE Transportation Electrification Conf and Expo. Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1−5

[64] Jeong S Y, Kwak H G, Jang G C, et al. Living object detection system based on comb pattern capacitive sensor for wireless EV chargers[C]//Proc of 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1−6

[65] Sonnenberg T, Stevens A, Dayerizadeh A, et al. Combined foreign object detection and live object protection in wireless power transfer systems via real-time thermal camera analysis[C]//Proc of 2019 IEEE Applied Power Electronics Conf and Exposition. Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1547−1552

[66] Tian Yong, Li Zheng, Lin Yawen, et al. Metal object detection for electric vehicle inductive power transfer systems based on hyperspectral imaging[J]. Measurement, 2021, 168(15): 108493

[67] Liu Xuyang, Liu Chunhua, Han Wei, et al. Design and implementation of a multi-purpose TMR sensor matrix for wireless electric vehicle charging[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 19(5): 1683−1692

[68] Gong Y, Otomo Y, Igarashi H. Neural network for both metal object detection and coil misalignment prediction in wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(9): 1−4

[69] Zhong Wenxing, Xiang Fei, Hu Changsheng. Metal object detection with detection coils perpendicular to power coils for wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(9): 10530−10534

[70] Niu Songyan, Zhang Cheng, Shi Yujun, et al. Foreign object detection considering misalignment effect for wireless EV charging system[J]. ISA transactions, 2022, 130: 655−666

[71] Chu S Y, Zan X, Avestruz A T. Electromagnetic model-based foreign object detection for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(1): 100−113

[72] Thai V X, Jang G C, Jeong S Y, et al. Symmetric sensing coil design for the blind-zone free metal object detection of a stationary wireless electric vehicles charger[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(4): 3466−3477

[73] Jeong S Y, Kwak H G, Jang G C, et al. Dual-purpose nonoverlapping coil sets as metal object and vehicle position detections for wireless stationary EV chargers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(9): 7387−7397

[74] Jang G C, Jeong S Y, Kwak H G, et al. Metal object detection circuit with non-overlapped coils for wireless EV chargers[C]//Proc of 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1−6

[75] Xiao Jing, Guo Xiaoxuan, Shi Haonan, et al. Method of non-blind-zone foreign object detection in wireless power transfer system[C]// Proc of 2022 IEEE 9th Int Conf on Power Electronics Systems and Applications. Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 1−6

[76] Xiang Lijuan, Zhu Ze, Tian Jindong, et al. Foreign object detection in a wireless power transfer system using symmetrical coil sets[J]. IEEE Access, 2019, 7: 44622−44631

[77] Thai V X, Park J H, Jeong S Y, et al. Equivalent-circuit-based design of symmetric sensing coil for self-inductance-based metal object detection[J]. IEEE Access, 2020, 8: 94190−94203

[78] Meng Tao, Tan Linlin, Zhong Ruying, et al. Research on metal foreign object detection of electric vehicle wireless charging system based on detection coil[J]. World Electric Vehicle Journal, 2021, 12(4): No. 203

[79] Son S, Lee S, Rhee J, et al. Foreign object detection of wireless power transfer system using sensor coil[C]//Proc of 2021 IEEE Wireless Power Transfer Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 1−4

[80] Sun Ying, Song Kai, Zhou Tian, et al. A shared method of metal object detection and living object detection based on the quality factor of detection coils for electric vehicle wireless charging[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1−17

[81] Song Huishu, Huang Xiaosheng, Lin Shuyi, et al. A flexible foreign object detection method based on arrayed vertical-decoupled coils for wireless power transfer systems[C]//Proc of Int Conf on Wireless Power Transfer. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 352−363

[82] Niu Songyan, Zhao Qingyu, Chen Haibiao, et al. Noncooperative metal object detection using pole-to-pole EM distribution characteristics for wireless EV charger employing DD coils[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 71(6): 6335−6344

[83] Zhang Yiming, Wang Hui, Shen Zhiwei, et al. A metal object detection system for electric vehicle wireless charging with quadrupole detection coils[J]. Energy Reports, 2023, 9: 601−607

[84] Sheinker A, Ginzburg B, Salomonski N, et al. Localization of a mobile platform equipped with a rotating magnetic dipole source[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(1): 116−128

[85] Ranganathan V, Waters B H, Smith J R. Localization of receivers using phased-array wireless power transfer systems[C]//Proc of 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1−4

[86] Wen Feng, Chu Xiaohu, Li Qiang, et al. Receiver localization and power stabilization for wireless power transfer system[C]//Proc of 2020 IEEE Int Conf on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1−2

[87] Chen Wei, Rickers S, Bruck G H, et al. Localization system using resonant magnetic coupling factor for improving efficiency in wireless power transfer[C]//Proc of 2015 9th European Conf on Antennas and Propagation. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1−2

[88] Gao Yabiao, Duan Chen, Oliveira A A, et al. 3-D coil positioning based on magnetic sensing for wireless EV charging[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(3): 578−588

[89] Srivastava V K, Sharma A, Bharadwaj A. A magnetic resonance coupling based touchless pad for human-computer interfacing[C]// Proc of 2020 IEEE 15th Int Conf on Industrial and Information Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 601−605

[90] Pirkl G, Stockinger K, Kunze K, et al. Adapting magnetic resonant coupling based relative positioning technology for wearable activitiy recogniton[C]//Proc of 2008 12th IEEE Int Symp on Wearable Computers. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 47−54

[91] Huang Jiawei, Mori T, Takashima K, et al. IM6D: Magnetic tracking system with 6-DOF passive markers for dexterous 3D interaction and motion[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): 1−10

[92] Ray A, Habibagahi I, Babakhani A. Fully wireless and batteryless localization and physiological motion detection system for point-of-care biomedical applications[C]//Proc of 2022 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 26−30

[93] Yamamoto T, Koshiji K. Position detection for transcutaneous energy transmission system for capsule endoscope[C]//Proc of 2013 IEEE Wireless Power Transfer. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 210−213

[94] Tao B, Sie E, Shenoy J, et al. Magnetic backscatter for in-body communication and localization[C]//Proc of the 29th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2023: 1−15

[95] Khan S R, Desmulliez M P Y. Investigation of capsule localization using 3-D printed spiral WPT coil[C]//Proc of 2023 17th European Conf on Antennas and Propagation. Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 1−5

[96] Sun Hongru, Lin Hai, Zhu Fengchao, et al. Magnetic resonant beamforming for secured wireless power transfer[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(8): 1173−1177

[97] Xu Zhimeng, Chen Jinyu, Qiu Fenlin, et al. Zero-forcing beam forming energy efficiency optimization for the security control of wireless power transfer system[J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2021, 103: 209−219

[98] Sun Hongru, Zhu Fengchao, Lin Hai, et al. Robust magnetic resonant beamforming for secured wireless power transfer[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018, 25(8): 1226−1230

[99] Jung H, Lee B. Optimization of magnetic field focusing and null steering for selective wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(5): 4622−4633

[100] Zhang Zhen, Chau K T, Qiu Chun, et al. Energy encryption for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(9): 5237−5246

[101] Liu Wei, Chau K T, Lee C H T, et al. Full-range soft-switching pulse frequency modulated wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(6): 6533−6547

[102] Yang Yirui, Zhan Zihao, Yu Honggang, et al. A privacy leakage issue in Qi-compatible cellphone wireless charging by stray magnetic field sniffing[C]//Proc of 2024 IEEE Applied Power Electronics Conf and Exposition. Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 2870−2876

[103] La Cour A S, Afridi K K, Suh G E. Wireless charging power side-channel attacks[C]//Proc of the 2021 ACM SIGSAC Conf on Computer and Communications Security. New York: ACM, 2021: 651−665

[104] Liu Jianwei, Zou Xiang, Zhao Leqi, et al. Privacy leakage in wireless charging[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2022, 21(2): 501−514

[105] Ni Tao, Zhang Xiaokuan, Zuo Chaoshun, et al. Uncovering user interactions on smartphones via contactless wireless charging side channels[C]//Proc of 2023 IEEE Symp on Security and Privacy. Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 3399−3415

[106] Ni Tao, Li Jianfeng, Zhang Xiaokuan, et al. Exploiting contactless side channels in wireless charging power banks for user privacy inference via few-shot learning[C]//Proc of the 29th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2023: 1−15

[107] Matovu R, Serwadda A, Bilbao A V, et al. Defensive charging: Mitigating power side-channel attacks on charging smartphones[C]// Proc of the 10th ACM Conf on Data and Application Security and Privacy. New York: ACM, 2020: 179−190

[108] Pothukuchi R P, Pothukuchi S Y, Voulgaris P, et al. Maya: Falsifying power sidechannels with operating system support[J]. arXiv preprint, arXiv: 1907.09440, 2019

[109] Yan Lin, Guo Yao, Chen Xiangqun, et al. A study on power side channels on mobile devices[C]//Proc of the 7th Asia-Pacific Symp on Internetware. New York: ACM, 2015: 30−38

[110] Yang Shengqi, Wolf W, Vijaykrishnan N, et al. Power attack resistant cryptosystem design: A dynamic voltage and frequency switching approach[C]//Proc of Design, Automation and Test in Europe. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 64−69

[111] Ganatra V, Yadav K, Senjaliya C, et al. Health hazards due to electromagnetic radiation in the workplace[J]. International Journal for Innovative Research in Science and Technology, 2015, 1(8): 138−145

[112] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)[J]. Health Physics, 2020, 118(5): 483−524

[113] Christ A, Douglas M G, Roman J M, et al. Evaluation of wireless resonant power transfer systems with human electromagnetic exposure limits[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 55(2): 265−274

[114] Wang Quandi, Li Wanlu, Kang Jianwei, et al. Electromagnetic safety of magnetic resonant wireless charging system in electric vehicles[C]//Proc of 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1−4

[115] Hong S, Kim Y, Lee S, et al. A frequency-selective EMI reduction method for tightly coupled wireless power transfer systems using resonant frequency control of a shielding coil in smartphone application[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(6): 2031−2039

[116] Hong S, Jeong S, Lee S, et al. Low EMF design of cochlear implant wireless power transfer system using a shielding coil[C]//Proc of 2020 IEEE Int Symp on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity. Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 623−625

[117] Xiu Sanmu, Hao Wenmei, Zhou Ying, et al. Design of coupling coil parameters for wireless charging tram based on electromagnetic safety[J]. Journal of Advanced Transportation, 2022, 2022(1): 5769224

[118] Worgan P, Fraser M. CoilMove: An actuated to-body energy transfer system[C]//Proc of the 2017 Conf on Designing Interactive Systems. New York: ACM, 2017: 791−795

[119] Sato S, Tanaka Y, Tsuruda Y, et al. Basic investigation on wireless power transfer system via magnetic resonant coupling with magnetic field suppression at an any point[C]//Proc of the 46th Annual Conf of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2020). Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1555−1560

[120] Zhou Wangqiu, Zhou Hao, Wang Xiaoyu, et al. Shield: Safety ensured high-efficient scheduling for magnetic MIMO wireless power transfer system[C]//Proc of IEEE Conf on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2022). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 910−919

[121] Zheng Liming, Liu Peiguo, Wang Hongyi, et al. Passive Internet of things: Background, concept, challenges and progress[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2023, 45(7): 2293−2310(in Chinese)
(郑黎明, 刘培国, 王宏义, 等. 无源物联网: 背景、概念、挑战及研究进展[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(7): 2293−2310)

[122] Zhao Renjie, Wang Kejia, Zheng Kai, et al. SlimWiFi: Ultra-low-power IoT radio architecture enabled by asymmetric communication[C]//Proc of 20th USENIX Symp on Networked Systems Design and Implementation. Berkeley, CA: USENIX Association, 2023: 1201−1219

[123] Mary D R K, Ko E, Kim S G, et al. A systematic review on recent trends, challenges, privacy and security issues of underwater internet of things[J]. Sensors, 2021, 21(24): 8262

[124] Zhao Renjie, Wang Purui, Ma Yunfei, et al. Nfc+ breaking nfc networking limits through resonance engineering[C]//Proc of the Annual Conf of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York: ACM, 2020: 694−707

[125] Wang Yang, Wu Haifeng, Zeng Yu. Capture-aware Bayesian tag estimation for dense RFID tags environment[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(6): 1325−1331(in Chinese)
(王阳, 吴海锋, 曾玉. 稠密 RFID 标签环境下捕获感知贝叶斯标签估计[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(6): 1325−1331)

[126] Jin Meng, Li Kexin, Tian Xiaohua, et al. Fast, fine-grained, and robust grouping of RFIDs[C]//Proc of the 29th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2023: 1−14



Wang Xinyu, born in 2001. PhD candidate. Her main research interests include wireless charging, resource scheduling and optimization.
王馨语, 2001 年生. 博士研究生. 主要研究方向为无线充电、资源调度与优化.



Zhou Wangqiu, born in 1996. PhD. His main research interests include IoT and wireless charging.
周王球, 1996 年生. 博士. 主要研究方向为物联网、无线充电.



Zhou Hao, born in 1976. PhD, associate professor. Member of CCF. His main research interests include IoT, wireless charging, and resource scheduling and optimization.
周　颢, 1976 年生. 博士, 副教授. CCF 会员. 主要研究方向为物联网、无线充电、资源调度与优化.



Li Xiangyang, born in 1971. PhD, professor, PhD supervisor. Senior member of CCF. His main research interests include wireless networking, privacy and security, cyber-physical systems and IoT, social computing, and interdisciplinary research.
李向阳, 1971 年生. 博士, 教授, 博士生导师. CCF 高级会员. 主要研究方向为无线网络、隐私安全、信息物理系统和物联网、社会计算、跨学科研究.