

新能源汽车磁耦合谐振式无线充电装置的关键技术研究

刘胜杰

周口职业技术学院 河南周口

【摘要】随着新能源汽车产业的迅猛发展，无线充电技术受到广泛关注。本文系统回顾了国内外磁耦合谐振式无线充电技术的研究进展，深入探讨了该技术的工作原理及实践中的关键技术问题，包括耦合结构优化、谐振补偿结构设计、传输功率与效率提升以及提高系统安全性与可靠性的策略。进一步分析了技术发展面临的挑战，为未来的研究方向和技术突破提出可能的解决途径。研究表明，磁耦合谐振式无线充电技术作为解决电动汽车充电问题的有力方案，具备了较高的研究价值和产业化前景。

【关键词】电动汽车；无线充电技术；磁耦合谐振；耦合结构；谐振补偿；传输效率

【基金项目】周口职业技术学院重点科研课题项目“新能源汽车无线充电装置的关键技术研究”（2022KYKT03）；河南省科技攻关项目“电动汽车谐振式无线充电系统磁耦合关键技术的设计与实现”（242102240109）

【收稿日期】2024 年 8 月 12 日

【出刊日期】2024 年 9 月 27 日

【DOI】10.12208/j.jer.20240025

Research on magnetic coupling resonant wireless charging technology for new energy vehicles

Shengjie Liu

ZhouKou Vocational and Technical College, Zhoukou, Henan

【Abstract】 With the rapid development of the electric vehicle industry, wireless charging technology has attracted widespread attention due to its convenience and safety. This paper systematically reviews the research progress of magnetic resonant coupling wireless charging technology at home and abroad, clearly pointing out the current research focus and application status of the technology. The paper delves into the working principle of the technology and the key technical issues in practice, including the optimization of coupling structures, design of resonant compensation structures, improvement of transmission power and efficiency, as well as strategies to enhance system safety and reliability. Furthermore, this paper analyzes challenges facing the development of the technology and proposes potential solutions for future research directions and technological breakthroughs. The study demonstrates that magnetic resonant coupling wireless charging technology, as an effective solution to electric vehicle charging issues, possesses high research value and industrial prospects.

【Keywords】Electric vehicles; Wireless charging technology; Magnetic resonant coupling; Coupling structures; Resonant compensation; Transmission efficiency

1 新能源汽车无线充电技术国内外研究现状

近年无线充电技术，尤其是磁耦合谐振式（Magnetic Resonance Coupling, MRC）无线充电技术的发展，吸引了诸多研究者的广泛关注。国外美国麻省理工学院（MIT）在 2007 年率先在实验室环境下通过两个相同频率的谐振器成功地实现了距离

达数米的中等功率级别无线电能传输^{[3][4]}。奥克兰大学研究集中在优化谐振器设计、降低飞行高度对传输效率的影响以及多环耦合体结构的探索上^[5]。公司 WiTricity 与汽车制造商如丰田、奥迪等合作开发，推进无线充电技术的商业化应用^[6]。国外的 SAE 制定了一个针对轻型车辆无线充电系统的全球 J2954

标准,其建立了无线充电系统性能参数、系统架构、测试方法等方面的指导规范^[7]。

国内众多科研机构 and 高校开展了一系列关于磁耦合谐振式无线充电技术的研究工作,并取得了一定的成果。如中国科学院、清华大学、上海交通大学等科研院所和高等学府,大多关注于提升充电效率、优化耦合结构设计、增强系统稳定性、安全性和兼容性等方面^[8]。国内企业比亚迪和宇通客车为代表的新能源汽车生产商,已开始将无线充电技术应用于公交车和出租车领域,并在某些城市开展了试点项目^[9]。从标准制定到推广应用,国家相关部门正与国际组织联合推动无线充电技术标准的国际化和统一化,以促进技术的全球普及和应用^[10]。尽管国内关于磁耦合谐振式无线充电技术的研究取得了一些

进展,但仍然面临着标准不统一、提高充电效率和充电功率、成本与安全问题、充电设施的大规模铺设和市场接受度提升等方面,都需要做进一步的技术研发和市场探索^[11]。

2 磁耦合谐振式无线充电技术的基本原理

磁耦合谐振式无线充电技术 (Magnetic Resonance Coupling Wireless Charging, MRCWC) 是通过利用磁共振现象以非接触方式实现能量的传递,是基于尼古拉·特斯拉所提出的共振感应理论^[12]。也就是电能经电网接入后先经整流升压电路,得到直流电,然后将直流电逆变为高频交流电,再经双 LCC 谐振补偿网络将能量传输到副边电路,最后经整流电路给动力电池充电,具体流程示意图如图 1 所示^[13]。

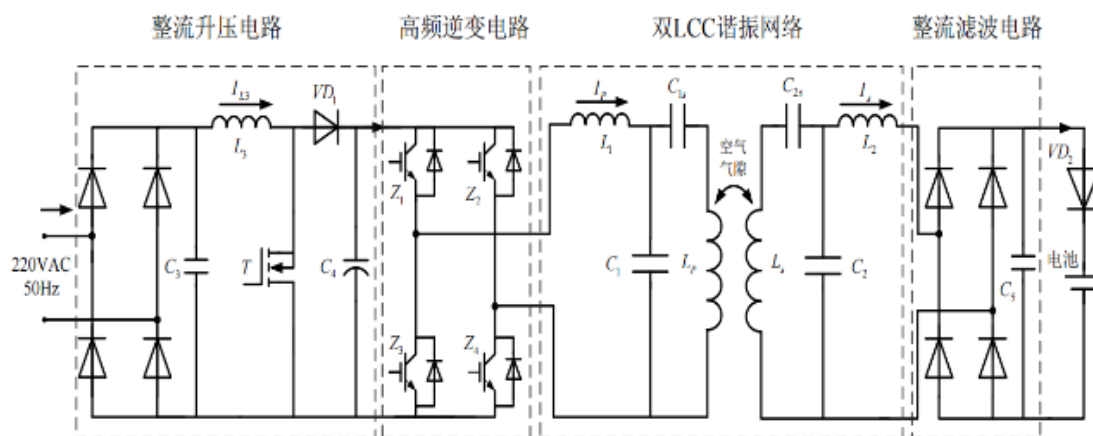


图 1 新能源电动汽车无线充电系统示意图

磁耦合谐振式无线充电装置的原理涉及的核心是“磁共振耦合”,当两个具有相同或相近自然频率的振荡系统,即发射线圈和接收线圈,通过磁场相连接,从而使得能量可在两者之间以较小的损耗进行高效传递。当发射线圈通入交流电,便会产生交变磁场。这个磁场在达到一定的频率和强度时,可以与接收线圈中的磁场共振,从而形成强烈的磁场耦合效果,使能量在两个线圈之间转移。

3 新能源汽车无线充电装置的关键技术

3.1 耦合结构

耦合结构通常由初级侧与次级侧的磁性材料及其配套的线圈构成,两侧通过磁场实现能量的无线传输,直接决定了充电能量的传输效率和系统的稳定性。

在设计耦合结构时,一方面需要考虑线圈的几何结构。由于线圈的形状、尺寸以及线圈间相对位置关系会直接影响到系统的耦合系数和电磁场分布。圆形和矩形线圈是研究中常见的设计选择,由于圆形线圈其几何对称性能够提供比较均匀的磁场分布^[14]。所以,一般选择圆形线圈,提高电磁耦合效率,进一步提升充电效率和充电距离。但是,高频电路中随着频率的不断提高,高频电流流过导线时会产生严重的集肤效应,加上寄生电感、电容等参数的影响,将导致电路性能下降损耗增加,造成导线发热问题。因此,我们采取措施在线圈缝隙中添加液冷管达到降温作用。

另一方面,线圈的绕制方法、匝数、线径、绝缘和绕制紧密度也会影响其品质因数 (Q 因子)、整

个系统的谐振性质和效率。根据线圈的绕制方式将磁耦合结构分为环形线圈,螺线管线圈和 8 字形线圈(DD 线圈)。环形线圈是最早采用的磁耦合结构,其绕制方便,分析简单,且铁损和铜损也很小,耦合系数高,高 Q 因子的线圈能存储更多的能量,减少能量损耗。其次是系统的稳定性问题,充电环境中会存在的多种干扰因素,如金属异物的接近、温度的变化以及线圈姿态的偏移等,都可能影响耦合结构的性能。因此,需要通过设计提高系统的鲁棒性,使其对环境变化具有一定的适应性。

3.2 谐振补偿网络结构

磁耦合谐振无线充电系统组成如图 2 所示,包括电能转换、补偿网络、能量传输以及负载,通过控制器实现并保持系统电能稳定输出。充电时常出现位置对不准的情况,原付双边能量传输线圈的补偿拓扑结构通过滤波与平衡无功功率以保证输出电能符合负载要求和较高的系统效率。所以,谐振补偿网络结构的设计对提高传输效率以及系统的稳定性具有决定性作用。

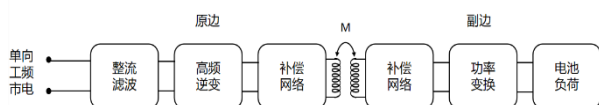


图2 磁耦合谐振式无线充电系统结构示意图

谐振网络结构通常采用 LC (电感—电容) 组合构成,其工作频率主要受到电感线圈的电感值和电容器的电容值的共同影响。电感线圈产生交变磁场实现电能的无线传输,而电容器用于调谐系统的谐振频率至共振点。当系统处于谐振状态,实现最小的反射损耗和最大的系统效率^[15]。

3.3 传输功率和效率

传输功率和充电效率是衡量磁耦合谐振式无线充电系统绩效的关键参数。传输功率决定了无线充电系统能够为电动汽车电池提供多少能量。在实际的系统设计中,一般会根据电动汽车电池的容量和充电需求来确定所需的传输功率。充电效率是指从功率发送端到接收端实际存储在电池中的能量所占的比例,它反映了无线充电系统在能量转换和传输过程中的损耗水平。所以,高效率意味着较少的能量损失。同时,效率还受多种因素影响,包括耦合结构的设计、传输距离、系统的谐振补偿机制以及环

境因素等。

无线电能传输过程中,发射端与接收端气隙之间存在的漏磁现象。漏磁越严重,传输效率越低,由涡流损耗引起的温升问题和电磁辐射,存在一定磁场影响的安全隐患。所以,通过对发射、接受线圈增加电磁屏蔽材料磁芯以衰减电磁波,减少漏磁,降低漏磁引起的附加损耗和局部发热,提高线圈耦合系数和传输效率。为了进一步提高传输效率和功率水平,常常需要对系统进行多维度的优化,如系统的控制策略、电源变换器设计和线圈布局等。所以,如何在保证安全、可靠、稳定充电的同时进一步提升无线充电技术的传输功率和效率,依然是业界需要面对的重要挑战。后续持续进行线圈设计、谐振频率匹配、补偿拓扑选择以及干扰管理等方面的深入研究和优化,有效提升无线充电系统的整体性能。

3.4 安全性与可靠性

在磁耦合谐振式无线充电技术的研究与应用中,安全性与可靠性问题是保障技术成功实施的重要环节。国际电工委员会(IEC)和其他相关组织已对无线充电系统的电磁场限值做出了规定,现阶段的无线充电设备产生的非电离辐射远低于国际标准。但是,随着充电功率的提升,加之汽车应用环境复杂性,安全边界可能受到挑战。另外,设备的隔离及防护措施也是保障安全的关键。充电板与接受板间的误差和异物检测系统,也能够预防由于金属异物引起的过热等潜在危险。

在可靠性方面,无线充电装置的稳定性是衡量其成功的又一关键指标。稳定性不仅包括传输效率的长期保持,还涉及系统在各种环境条件下的适应能力。系统的自我保护机制在提升可靠性方面扮演着举足轻重的角色,电路中只需要嵌入适当的保护组件,比如过压、过流保护以及误操作保护电路,确保在异常情况下迅速断开电源或隔离故障点。在软件控制层面,先进的监测算法能够有效地预测故障和寿命,从而实现主动维护,减少因系统故障而突然中断的风险。此外,充电系统的寿命也是决定其可靠性的重要因素。传统的接触式充电方式由于物理接触磨损而导致充电效率降低,而无线充电则因缺乏物理接触而具有更长的寿命。

4 结论

磁耦合谐振式无线充电技术,虽然已经取得了

一系列的进展,但在推向市场应用的过程中仍面临着诸多挑战。但是智能化和集成化是未来磁耦合谐振式无线充电技术的重要发展方向。磁耦合谐振式无线充电技术虽然前景广阔,但在实现广泛市场应用前,需要解决包括效率、传输距离、安全性、可靠性和成本在内的一系列问题。据此,行业界与学术界需共同努力,持续开展深入研究并推进创新解决方案,以推动技术突破和产业发展。

参考文献

- [1] 徐宝秋,李冀,刘伟霞,等.磁耦合谐振式无线充电系统的串串补偿拓扑研究[J].重型汽车,2023,(06):9-10+20.
- [2] 唐自强.基于旋转磁场的 MISO 无线充电技术研究[D].西南科技大学,2022.
- [3] 郭军.井下谐振式无线电能传输系统的线圈优化[D].长江大学,2023.
- [4] 黄学良,王维,谭林林.磁耦合谐振式无线电能传输技术研究动态与应用展望[J].电力系统自动化,2017,41(02):2-14+141.
- [5] 李克喆.基于两开关单级AC/DC脉冲激励源的电场耦合式无线电能传输系统[D].华南理工大学,2023.
- [6] 熊萌.车用无线电能传输的磁芯优化及系统调节研究[D].同济大学,2022.
- [7] 李江南,李锐华,马艺林,等.一种磁耦合电动汽车无线充电系统设计与实现[J].电力电子技术,2024,58(01):53-56.
- [8] 陆升阳.基于锯齿电源的磁耦合 WPT 调谐测控系统设计[D].南京信息工程大学,2022.
- [9] 郑志聪.电动汽车无线充电技术研究[J].汽车测试报告,2023,(14):148-151.
- [10] 赵禹.无线电能传输系统关键理论与技术研究[D].浙江大学,2023.
- [11] 王馨语,周王球,周颢,等.磁共振无线充电技术:进展与展望[J/OL].计算机研究与发展,1-25[2024-09-04]
- [12] 刘耀,肖晋宇,赵小令,等.无线电能传输技术发展与应用综述[J].电工电能新技术,2023,42(02):48-67.
- [13] 吴淼斌.电动汽车恒流恒压无线充电拓扑与控制技术研究[D].浙江大学,2022.
- [14] 夏晓雪.基于有限元分析的电动汽车无线电能传输线圈的研究与设计[D].西南科技大学,2020.
- [15] 王懿杰,孙熙来,麦建伟等.电磁感应式无线电能传输系统变参数条件下补偿网络研究综述[J].中国电机工程学报,2022,42(20):7288-7306.