

同行专家业内评价意见书编号: 20250858219

附件1

**浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）
同行专家业内评价意见书**

姓名: 许珂瑞

学号: 22260069

申报工程师职称专业类别（领域）: 能源动力

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2025年03月14日

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院(浙江大学工程师学院)工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

作为一名电气工程专业电力电子方向的硕士生，我深入掌握了本专业的基础理论知识和专业技术知识。在基础理论方面，我系统学习了电路理论、电磁场理论、信号与系统、自动控制原理等核心课程，为后续的专业研究奠定了坚实的理论基础。在专业技术知识方面，我专注于电力电子技术、无线电能传输技术以及电动汽车无线充电系统的研究，深入理解了功率电子器件的特性与应用、高频电力电子变换器的设计与控制、电磁耦合机构的优化设计等关键技术。特别是在无线电能传输领域，我掌握了磁共振耦合、电磁感应耦合等基本原理，并能够运用这些原理分析和解决电动汽车无线充电系统中的抗偏移性能和功率控制问题。此外，我还熟练运用MATLAB/Simulink、PSIM等仿真工具进行系统建模与仿真分析，并通过实验验证理论设计的可行性和有效性。通过不断的学习和实践，我具备了扎实的专业知识储备和较强的科研能力，能够独立开展相关领域的研究工作。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

在工程实践方面，我于浙江省电力实业总公司参与了“高抗偏移性电动汽车无线电能传输系统”的研发工作。针对传统无线充电系统因线圈偏移导致输出功率大幅波动的问题，我创新性地提出了一种基于多频谐振网络的频率切换控制方案。通过理论分析，我发现系统谐振频率与线圈耦合状态存在强关联性，因此设计了可重构的多频谐振网络硬件架构，并开发了基于动态频率跟踪的控制算法。当检测到线圈偏移时，系统自动切换至预设的谐振频率点，利用不同频率下阻抗特性的差异重构输出功率曲线，从而有效补偿因耦合系数变化带来的效率损失。在实现过程中，我结合ANSYS

Maxwell对多频谐振网络的磁场分布进行仿真优化，确定了频率切换阈值与线圈偏移量的对应关系；同时基于PSIM搭建了多频谐振变换器的系统级模型，验证了频率切换策略对功率稳定性的提升效果。硬件开发阶段，我主导了高频谐振逆变器、可调电容阵列及数字控制模块的设计，通过STM32微控制器实现频率切换逻辑，并利用LabVIEW开发了实时监控与参数标定平台。实验结果表明，在 $\pm 15\text{cm}$ 的横向偏移范围内，该系统通过多频切换可将传输效率稳定在86%以上，功率波动率控制在4%以内，较传统单频方案提升约30%。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例(不少于1000字)

在实际工作中，我参与研发的“高抗偏移性电动汽车无线电能传输系统”项目，是一个综合运用专业知识解决复杂工程问题的典型案例。该项目旨在解决电动汽车无线充电过程中因线圈偏移导致的传输效率下降和功率波动问题，这是无线电能传输领域的一项关键技术难题。项目初期，我通过对传统无线充电系统的深入分析，发现固定频率谐振网络在应对线圈偏移时存在明显不足。当充电线圈与车载接收线圈因停车误差或车辆振动发生偏移时，耦合系数会显著降低，导致系统传输效率急剧下降，甚至无法满足充电需求。针对这一问题，我结合电磁场理论和电路理论，建立了无线电能传输系统的数学模型，分析了线圈偏移对耦合系数、谐振频率和输出功率的影响规律。通过理论推导，我发现系统输出功率与谐振频率之间存在非线性关系，且不同频率下系统的阻抗特性差异显著。基于这一发现，我提出了利用多频谐振网络重构输出特性的技术思路，即通过动态切换工作频率来补偿因线圈偏移引起的功率波动。

在理论分析的基础上，我设计了多频谐振网络的硬件架构。该网络由高频逆变器、可调电容阵列和数字控制模块组成，能够根据线圈偏移状态自动切换至预设的谐振频率点。为了优化

网络性能，我利用有限元仿真软件ANSYS

Maxwell对线圈磁场分布进行了建模分析，确定了不同频率下线圈耦合系数的变化规律。同时，我结合PSIM搭建了多频谐振变换器的系统级仿真模型，验证了频率切换策略对功率稳定性的提升效果。仿真结果表明，在 $\pm 15\text{cm}$ 的横向偏移范围内，通过频率切换可将系统传输效率提升至86%以上，功率波动率控制在4%以内。

在硬件开发阶段，我主导了高频谐振逆变器、可调电容阵列及数字控制模块的设计与实现。高频谐振逆变器采用全桥拓扑结构，能够输出稳定的高频交流电；可调电容阵列由多个电容和MOSFET开关组成，通过控制开关状态实现谐振频率的动态调整；数字控制模块基于STM32微控制器开发，负责实时检测线圈偏移量并执行频率切换逻辑。在系统集成过程中，我利用LabVIEW开发了实时监控与参数标定平台，实现了对系统运行状态的实时监测和关键参数的在线调整。通过反复调试和优化，我成功将多频谐振网络与无线电能传输系统进行了无缝集成。

在系统集成完成后，我设计了一系列实验来验证多频谐振网络的抗偏移性能。实验分为静态测试和动态测试两部分：静态测试主要评估系统在不同偏移量下的传输效率和功率稳定性；动态测试则模拟实际充电场景，评估系统在车辆振动和停车误差等复杂工况下的性能表现。实验结果表明，在 $\pm 15\text{cm}$ 的横向偏移范围内，系统通过频率切换可将传输效率稳定在86%以上，功率波动率控制在4%以内，较传统单频方案提升约30%。此外，我还对系统进行了长时间运行测试，验证了其可靠性和稳定性。

在项目实施过程中，我遇到了多个技术难点，并通过综合运用所学知识逐一解决。例如，在频率切换瞬间，系统输出功率会出现短暂波动，影响充电稳定性。为解决这一问题，我设计了基于动态阻抗匹配的闭环控制策略，利用高频逆变器与整流电路协同调节，实现了频率切换过程中的功率平滑过渡。此外，可调电容阵列的响应速度直接影响频率切换的实时性。通过优化MOSFET驱动电路和控制算法，我将电容阵列的切换时间缩短至10ms以内，满足了系统实时性要求。同时，多频谐振网络在工作过程中会产生较强的电磁干扰。我通过优化PCB布局、增加屏蔽措施和改进接地设计，有效降低了电磁干扰水平，确保了系统的电磁兼容性。通过本项目的实施，我成功开发了一套高抗偏移性电动汽车无线电能传输系统，解决了传统无线充电系统因线圈偏移导致的效率下降和功率波动问题。该系统具有高抗偏移性能、动态频率切换和高可靠性等技术优势。目前，相关技术已申请发明专利，并进入小批量试产阶段，未来有望在电动汽车充电基础设施领域实现广泛应用。

通过参与该项目，我深刻体会到理论知识与工程实践相结合的重要性。在解决复杂工程问题的过程中，我不仅运用了电磁场理论、电路理论、控制理论等专业知识，还掌握了有限元仿真、硬件设计、系统集成等实践技能。同时，我也认识到团队协作和跨学科交流的重要性，通过与机械、软件等领域专家的合作，我进一步拓宽了技术视野，提升了综合解决问题的能力。未来，我将继续深耕无线电能传输领域，探索更多创新技术，为行业发展贡献力量。

(二)取得的业绩(代表作)【限填3项,须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实,并提供复印件一份】					
1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】					
成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/ 授权或申请时间等	刊物名称/ 专利授权或申请号等	本人排名/ 总人数	备注
A dual-excitation inductive power transfer system with decoupled transformer for high misalignment tolerance	国际期刊	2024年11月10日	IET Power Electronics	1/7	SCI期刊收录
Reconfigurable Detuned Dual-Frequency Series-Series Compensated WPT System for High Anti-Misalignment Tolerance 翻译题目	国际期刊	2024年03月29日	IET Power Electronics	1/4	SCI期刊收录
电动汽车双向无线电能传输系统功率控制方法与抗偏移策略研究	学位论文	2025年03月05日		1/1	

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 86 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 82 分
本人承诺	
个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！	
申报人签名：李列端	

二、日常表现考核评价及申报材料审核公示结果

日常表现考核评价	非定向生由德育导师考核评价、定向生由所在工作单位考核评价： ☒优秀 ☐良好 ☐合格 ☐不合格 德育导师/定向生所在工作单位分管领导签字（公章）：周品 2024年3月14日
申报材料审核公示	根据评审条件，工程师学院已对申报人员进行材料审核（学位课程成绩、专业实践训练时间及考核、学位论文、代表作等情况），并将符合要求的申报材料在学院网站公示不少于5个工作日，具体公示结果如下： ☐通过 ☐不通过（具体原因： ） 工程师学院教学管理办公室审核签字（公章）： 年 月 日

浙江大学研究生院
攻读硕士学位研究生成绩表

学号：22260069	姓名：许珂瑞	性别：男	学院：工程师学院	专业：电气工程				学制：2.5年			
毕业时最低应获：26.0学分			已获得：28.0学分			入学年月：2022-09			毕业年月：		
学位证书号：				毕业证书号：				授予学位：			
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	86	专业学位课	2022-2023学年春季学期	研究生英语		2.0	免修	专业学位课
2022-2023学年秋季学期	“四史”专题		1.0	88	跨专业课	2022-2023学年春季学期	研究生英语基础技能		1.0	免修	公共学位课
2022-2023学年秋季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	89	专业学位课	2022-2023学年春季学期	数学建模		2.0	94	专业选修课
2022-2023学年冬季学期	车辆控制理论与技术		3.0	92	专业学位课	2022-2023学年春夏学期	高阶工程认知实践		3.0	87	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	80	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	自然辩证法概论		1.0	72	专业学位课
2022-2023学年秋冬学期	研究生论文写作指导		1.0	88	专业选修课	2022-2023学年春夏学期	工程伦理		2.0	92	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	车辆信息传感与通信技术		3.0	91	专业选修课		硕士生读书报告		2.0	通过	
2022-2023学年春季学期	电气装备健康管理		2.0	87	专业选修课						

说明：1. 研究生课程按三种方法计分：百分制，两级制（通过、不通过），五级制（优、良、中、及格、不及格）。

2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章：

成绩校核人：张梦依

打印日期：2025-03-20

ORIGINAL RESEARCH

A dual-excitation inductive power transfer system with decoupled transformer for high misalignment tolerance

Kerui Xu^{1,2}  | Jing Zhou^{1,2}  | Yuchao Che² | Rui He² | Yuankui Wang² | Bo Wang² | Haocai Huang¹

¹ Hainan Institute, Zhejiang University, Sanya, China

² College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China

Correspondence

Jing Zhou, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China.

Email: jingzhou@zju.edu.cn

Funding information

China Natural Science Foundation, Grant/Award Number: 52271352; Ministry of Education Equipment Pre research Project, Grant/Award Number: 8091B03052405

Abstract

This study delves into the design and optimization of a 4 kW dual-excitation inductive power transfer system designed to accommodate large misalignments. The system utilizes a bipolar-solenoid inductive coupled transformer as its coupling mechanism. Detailed simulation and analysis of this coupling mechanism are conducted. Additionally, the system employs a control strategy aimed at optimizing the coordination between output power and efficiency. This control strategy dynamically adjusts the power of the two transmitters, aiming to enhance system efficiency to the maximum extent possible under favourable coupling conditions. Moreover, it ensures that the system's output power remains at or above the rated value even when coupling conditions deteriorate. During the experiment, the system can optimize the output power and efficiency at the same time by using a suitable control strategy when the coils are misaligned. Meanwhile, the system can achieve a minimum efficiency of 81.5% even when the misalignment distance reaches 300 mm (60% of per transmitting coil size). The system and control strategy proposed in this paper can effectively overcome the deterioration of the output characteristics of the wireless power transfer system when misalignment occurs.

1 | INTRODUCTION

Wireless power transmission (WPT) technology enables the transfer of energy through electromagnetic fields, thereby eliminating the need for wired connections in energy transmission systems. This innovation significantly enhances security and reliability [1, 2]. Numerous researchers have conducted relevant studies in this field [3, 4]. Besides its application in low-power contexts such as wearable and communication devices, WPT technology shows substantial promise for high-power applications, particularly in the rapidly growing sector of electric vehicles.

In the practical application of WPT, coil misalignment is very easy to occur. This situation often leads to a decrease in the coupling coefficient between the transmission coils, which in turn leads to fluctuations in the system output characteristics. For high-power applications such as electric vehicles, these adverse effects are more likely to occur due to random parking locations.

Many scholars have conducted research on this issue. It is an effective way to add additional DC–DC converters to the WPT system to stabilize the output characteristics [5–7], which increase the cost, volume and loss. At the same time, when the coupling coefficient fluctuation is too large, it may exceed the limit of the converter's adjustment ability, and the adjustment ability is limited. There are also studies to improve the characteristics of the transmission coil itself [8–10], and reduce the fluctuation degree of the coupling coefficient when the transmission coil is wrong by targeted design. But they tend to add extra space and weight, and the improvement is limited.

The efficiency of the WPT system is a crucial factor linked to system losses and economic benefits [11–12]. Most conventional WPT systems employ a “single-send single-receive” configuration, featuring only one transmitting coil and one receiving coil [13–15]. Some studies have used different control methods for this configuration to achieve the optimal efficiency point tracking and reduce the loss of the system [16, 17], but

This is an open access article under the terms of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

© 2024 The Author(s). *IET Power Electronics* published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of The Institution of Engineering and Technology.

经检索《Web of Science》的《Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)》数据库，下述论文被《SCI-EXPANDED》收录。（检索时间：2024 年 12 月 11 日）

第 1 条，共 2 条

标题:Reconfigurable detuned dual-frequency series-series compensated WPT system for high anti-misalignment tolerance

作者:Xu, KR(Xu, Kerui);Zhou, J(Zhou, Jing);Wang, B(Wang, Bo);Wang, YK(Wang, Yuankui);

来源出版物:IET POWER ELECTRONICS 卷:17 期:15 页:2192-2205 提前访问日期:MAR 2024

DOI:10.1049/pel2.12686 出版年:NOV 2024

入藏号:WOS:001193144800001

文献类型:Article

地址:

[Xu, Kerui; Zhou, Jing; Wang, Bo; Wang, Yuankui] Zhejiang Univ Hangzhou, Hangzhou 310027, Peoples R China.

[Zhou, Jing] Zhejiang Univ, Hainan Inst, Sanya, Peoples R China.

通讯作者地址:

Zhou, J (corresponding author), Zhejiang Univ Hangzhou, Hangzhou 310027, Peoples R China.

电子邮件地址:jingzhou@zju.edu.cn

IDS 号:M3F6H

ISSN:1755-4535

eISSN:1755-4543

第 2 条，共 2 条

标题:A dual-excitation inductive power transfer system with decoupled transformer for high misalignment tolerance

作者:Xu, KR(Xu, Kerui);Zhou, J(Zhou, Jing);Che, YC(Che, Yuchao);He, R(He, Rui);Wang, YK(Wang, Yuankui);Wang, B(Wang, Bo);Huang, HC(Huang, Haocai);

来源出版物:IET POWER ELECTRONICS 提前访问日期:NOV 2024 DOI:10.1049/pel2.12817 出版年:2024 NOV 10 2024

入藏号:WOS:001354181100001

文献类型:Article; Early Access

地址:

[Xu, Kerui; Zhou, Jing; Huang, Haocai] Zhejiang Univ, Hainan Inst, Sanya, Peoples R China.

[Xu, Kerui; Zhou, Jing; Che, Yuchao; He, Rui; Wang, Yuankui; Wang, Bo] Zhejiang Univ, Coll Elect Engn, Hangzhou, Peoples R China.

通讯作者地址:

Zhou, J (corresponding author), Zhejiang Univ, Hangzhou 310027, Peoples R China.

电子邮件地址:jingzhou@zju.edu.cn

IDS 号:L9X5W

ISSN:1755-4535

eISSN:1755-4543

注:

1. 以上检索结果来自 CALIS 查收查引系统。
2. 以上检索结果均得到委托人及被检索作者的确认。



学号: 22260069

姓名: 许珂瑜

论文题目: 电动汽车双向无线电能传输系统功率控制方法与抗偏移策略研究

英文题目: Research on Power Control Method and Anti-Misalignment Strategy for Bidirectional Wireless Power Transfer System in Electric Vehicles

评论内容:

论文存在若干问题，主要有：
1.个别存在格式和排版不规范，如论文的部分用词或表述口语化，不够严谨，第二章有部分公式符号拼写错误等，124页版面不一致，表格大小等问题。
2.第三章尽管遵循了自协调在功率控制，但是主要研究内容重复制衡问题，然而本章题目无法突出研究重点。
3.基于问题，在研究现状中，可以建立一小节介绍该策略，除此，然而第二章写了建模，那么研究现状中应该——对应，分析而前建模的发展技术。
4.建议将第三章的3.4.1小节和3.4.2小节并入3.3节，使文章结构更清晰合理。
5.关于提出功率控制方法2.2节，如果是由DPSM、PFA、DPA等方法综合而来，应该通过实验或仿真来验证这些方法对比哪种更有效。
6.然而偏移校正策略应用中存在的问题，本文也相应提出了解决办法，但是作为一种学位论文，应该考虑鲁棒性之间的逻辑关系，首先偏移校正的目的是什么？鲁棒性设计，首先更关注什么输出特性？追求输出效率最高还是输出精度最高？在此基础上，应该分析鲁棒性提出的功率控制策略与鲁棒偏移策略之间的关系是否存在系统关系？如何能达到输出功率与抗偏移之间的最佳工作点？
7.第五章实验验证部分，图5.17和图5.18的ZVS有极点的电压电流并不重合，请对此处的ZVS现象进行解释，如何算是ZVS，并做出调整。

总体评价: A (优秀)

评语结果: 同意修改后直接答辩

学号: 22260069

姓名: 许珂瑜

论文题目: 电动汽车双向无线电能传输系统功率控制方法与抗偏移策略研究

英文题目: Research on Power Control Method and Anti-Misalignment Strategy for Bidirectional Wireless Power Transfer System in Electric Vehicles

评论内容:

本文针对电动汽车双向无线电能传输中的系统功率控制方法和抗偏移策略进行研究，对BAPT系统控制策略、工作特性、开关频率等方面进行详细的描述，结合脉冲宽度调制和脉冲频率调制提出了一种基于密度频率相位混合调制的功率控制方法，同时引入全桥/半桥模式切换，解决该策略中的效率问题。针对双向和单向的能量传输策略问题，基于功率和频率的工作点分析，提出一种可调节多频率传输策略，结合鲁棒性设计，以及一种基于频率分段的混合策略设计方法。整体上，论文文字表述清晰，书写较为规范，图片标注规范，作者具备良好的科研写作能力；在策略为理论化的策略研究内容即鲁棒性策略工程应用问题，具有一定的研究价值，论文不足之处在于论文整体篇幅较长的问题，评论人认为论文中不会对非自己研究内容以及结论进行详细阐述，相关内容可以简略描述或结论中，综上所述，同意进行答辩。

不足之处及修改意见:

1. 论文第二章2.2节，作者旨在提出系统选择S型补偿的原因，而论文中两种补偿的机理进行详细分析，存在本章前置的情况，同时论文中后面对S型的BAPT系统进行了详细分析，行文方法没有详细得到，针对前馈，请作者对该部分进行部分删减以及调整，以突出本文的主要研究对象。
2. 论文第三章3.2节以及3.4.1、3.4.2节中，主要是对之前已经得到研究的方法进行分析，并非本文中新提出的密度频率相位混合调制的功率控制方法，而作者对此进行了较大篇幅的描述，请除了本文介绍的控制方法，针对此问题，请作者对第三章的部分进行内容上的删减，在保证内容完整的基础上重点介绍所提出的功率控制方法及其实现方法。
3. 论文第四章中部分图片内容模糊，如图4.3和图4.4，以及图4.5中的（b）和（c）等，建议对图片进行合并，其所不清晰的地方应放大到清晰率下的状态，提高文章质量。
4. 论文第五章为实验验证部分，重点实验的是对提出的控制方法以及抗偏移策略的实验验证部分，实验平台的设计只需要保留必要的介绍和连接的部分以及其应力即可，无需对其具体实现原理进行详细介绍，在验证结果的说明方面，可以采用表格的形式对实验结果进行汇总对比，辅以表格的实验波形即可。
5. 正文部分页面下方空白较多，如图P10、P19等；图2.6以及公式（1-5）中的频率符号应该为 ω 而非 ω ；文中部分行距存在过大的情况，需要对论文的排版和格式进行进一步规范；部分图片大小过大，所占页面篇幅过大，建议调整图片大小或置于附录中。

总体评价: A (优秀)

评语结果: 同意答辩

学号: 22260069

姓名: 许珂瑜

论文题目: 电动汽车双向无线电能传输系统功率控制方法与抗偏移策略研究

英文题目: Research on Power Control Method and Anti-Misalignment Strategy for Bidirectional Wireless Power Transfer System in Electric Vehicles

评论内容:

论文对电动汽车双向无线电能传输系统进行了初步建模分析，确定了以单半桥拓扑机构，及全桥整流器及双向能量转换单元的主体结构；针对电动汽车充电桩存在的功率波动需求，提出了密度频率相位混合调制策略，运用无功功率实现了软开关，提高了系统整体的性能指标；针对耦合系数和电动汽车充电时存在偏移问题，借鉴部分文献提出了一种可调节多频率传输抗偏移策略，提高了系统的稳定性和可靠性，最后实验验证了所提的功率控制方法和抗偏移策略，论文撰写规范，逻辑结构清晰，文字表述清晰，图表清晰，同意答辩。

不足之处及修改意见:

论文结构完整，文字表述清晰，虽无大问题，但仍存在以下格式和排版上的小问题：
1) 第12页，一些PVC中文为汉字直接改正，较少称为修正；
2) 正文中的错别字较多，建议一些少用不可用词；再者，编写在正文中只需要写一次全称，如BAPT，分别在第2页和第13页写全了全称，请修改；
3) 论文中的图表虽然清晰，但部分图中的字体偏小或偏大，请统一图中的字体大小；
4) 图2-8，原基于作者自拟，请增加，如原图后介绍参数，请参照表2-6之前；
5) 附录中有部分页面空白较多，如图2.1、2.7、4.8、7.2、7.7、9.4等，请调整；
6) 公式符号与错误，第二章用了（1-X），第三章用了（2-X），请修改；
7) 部分图表未加标题，请增加。

总体评价: A (优秀)

评语结果: 同意修改后直接答辩

返回

返回

分类号: TM724

单位代码: 10335

密 级: 无

学 号: 22260069

浙江大学

硕士学位论文
(专业学位)



中文论文题目: 电动汽车双向无线电能传输系统功率控制方法
与抗偏移策略研究

英文论文题目: Research on Power Control Method and Anti-
Misalignment Strategy for Bidirectional Wireless
Power Transfer System in Electric Vehicles

申请人姓名: 许珂瑞

校内导师: 周晶

行业导师: 陈忠华

专业学位类别、领域: 电气工程

研究方向: 电力电子与电力传动

培养类型: 全日制非定向

所在学院: 工程师学院

论文提交日期: 2024 年 3 月

摘要

“双碳”背景下，以低碳绿色为主旋律的产业转型贯穿于各个领域，伴随着电动汽车保有量的逐年增高，车网互联（V2G, Vehicle to Grid）技术得到了广泛的关注。在 V2G 技术的车网能量互通需求下，电动汽车双向无线电能传输（Bidirectional Wireless Power Transmission, BWPT）系统具备重要的研究价值。本文从该背景出发，以电动汽车双向无线电能传输系统为主要研究对象，针对功率控制方法和抗偏移策略两个关键问题展开研究。

本文首先对研究对象进行理论分析，采用互感耦合模型对 BWPT 系统磁耦合机构进行建模，选择 SS 型补偿网络作为补偿拓扑，同时对 BWPT 系统中双向变换器的工作特性、开关模态以及软开关条件等进行了详细的阐述。在理论模型的基础上，本文对 BWPT 系统的整体输出功率特性和传输效率特性进行了完整分析。

接着，本文针对 BWPT 系统的功率控制方法展开研究。首先对双移相控制和三移相控制两种经典功率控制方法进行分析，明确其存在的主要缺陷。在此基础上，结合脉冲密度调制和脉冲频率调制提出了一种基于密度频率相位（Density-Frequency-Phase, DFP）混合调制的功率控制方法，该方法采用密度频率混合控制作为调控功率流大小的核心，配合内、外移相角的调控，能够实现精准的功率流调控，并具备良好的软开关特性以及较低的无功环流。此外，为了提升系统在轻载工况的工作性能，提出的方法对轻载模态进行了特殊设计，引入了全桥/半桥模式切换，能有效缓解轻载时的电流脉动问题。

然后，本文针对电动汽车 BWPT 系统的线圈偏移痛点问题，展开抗偏移策略研究。本文提出一种可重构多频补偿网络，该补偿网络能够在不同工作频率处重构为不同参数的 SS 型补偿网络，这使得系统能够在耦合条件变化时可以通过改变工作频率的方式来切换输出特性，以提高抗偏移性能。本文对于可重构多频补偿网络的基本特性和参数设计方法、基于该补偿网络的抗偏移策略原理及实现方法进行了详细分析。此外，为了精确、快速地获取到系统的耦合系数，以实现抗偏移策略，本文还提出了一种基于频率分裂的耦合系数估计方法。该方法仅需要获取分裂谐振频率，结合少量系统元件参数即可估算耦合系数。

最后，为了对提出的方法策略进行进一步验证，搭建了额定功率为 3kW 的实验平台，

对实验平台的软硬件设计进行了详细的阐述。通过实验平台对提出的功率控制方法和抗偏移策略进行实验验证。在功率控制实验中，实验结果显示提出的功率控制方法能够较好地完成基本的功率流调控功能，并能实现稳定的恒压恒流输出控制。在关键性能方面，提出的功率控制方法在 0.15~3kW 负载范围内都能够获得相比经典移相控制方法更高的 DC-DC 效率，最高效率达到 94.5%以上。在抗偏移实验中，实验结果显示提出的耦合系数估计方法能够在 2s 内完成耦合系数估计，估计结果误差率不超过 1.8%，具备较高的快速性和准确性。同时，采用提出的抗偏移策略后 BWPT 系统能够在耦合系数 0.025~0.34 范围内保持 2.1kW 稳定输出，最大误差率为 1.4%，而未采用抗偏移策略时系统输出功率无法稳定，最大误差率超过 50%。整个抗偏移实验过程中系统最高 DC-DC 效率为 93.24%，采用抗偏移策略后系统最低 DC-DC 效率能够提升约 28%。

关键词：双向无线电能传输，电动汽车，功率控制，抗偏移

目录

1	绪论	1
1.1	研究背景与意义	1
1.2	国内外研究现状	2
1.2.1	无线电能传输系统功率控制方法研究现状	2
1.2.2	无线电能传输系统抗偏移策略研究现状	7
1.3	本文主要研究内容	11
2	电动汽车双向无线电能传输系统建模与特性分析	13
2.1	双向无线电能传输系统架构	13
2.2	双向无线电能传输系统建模	15
2.2.1	磁耦合机构建模	15
2.2.2	补偿网络谐振特性分析	17
2.2.3	全桥变换器工作模态分析	21
2.3	SS 型补偿 BWPT 系统功率传输特性分析	26
2.4	SS 型补偿 BWPT 系统整体效率特性分析	35
2.4.1	谐振腔效率特性分析	35
2.4.2	双向变换器效率特性分析	38
2.5	本章小结	43
3	电动汽车双向无线电能传输系统功率控制方法研究	44
3.1	电动汽车负载特性	44
3.2	BWPT 系统功率控制系统架构	45
3.3	基本双侧功率控制方法分析	47
3.3.1	基于双移相调制的功率控制方法	47
3.3.2	基于三移相调制的功率控制方法	49
3.3.3	基于脉冲密度调制的功率控制方法	51
3.3.4	基于变频的功率控制方法	54
3.4	混合调制 BWPT 系统功率控制方法设计	57
3.4.1	基于 DFP 混合调制的功率控制方法	58

3.4.2	移相角调控策略	63
3.4.3	轻载控制模态设计	65
3.4.4	功率控制方法的具体实现	67
3.5	仿真验证	69
3.6	本章小结	76
4	电动汽车双向无线电能传输系统抗偏移策略设计	77
4.1	引言	77
4.2	SS 型补偿 BWPT 系统偏移工作点分析	78
4.3	基于可重构多频补偿网络的抗偏移策略设计	79
4.3.1	可重构多频补偿网络基本特性分析	79
4.3.2	抗偏移策略基本原理	82
4.3.3	抗偏移策略的具体实现	85
4.3.4	可重构多频补偿网络的参数设计方法	86
4.4	耦合系数估计方法	90
4.4.1	频率分裂现象	90
4.4.2	基于频率分裂的耦合系数估计方法原理	92
4.4.3	耦合系数估计方法的具体实现及仿真验证	95
4.5	本章小结	100
5	实验平台设计与实验验证	101
5.1	实验平台设计	101
5.1.1	整体架构	101
5.1.2	磁耦合机构设计及谐振电容选择	102
5.1.3	关键硬件电路设计	106
5.1.4	软件资源配置	111
5.2	功率控制方法实验验证	112
5.2.1	基本功能验证	113
5.2.2	关键性能对比	119
5.3	抗偏移策略实验验证	122
5.3.1	可重构多频补偿网络参数设计	122

5.3.2 基于频率分裂的耦合系数估计方法实验验证 124

5.3.3 系统抗偏移性能验证 125

5.4 本章小结 129

6 总结与展望 130

6.1 全文总结 130

6.2 不足与展望 131

参考文献 132

攻读硕士学位期间科研成果 140