

一、引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 电动汽车发展需求

随着全球汽车产业的深度变革，电动汽车凭借其环保、节能等显著优势，在市场中的份额不断攀升。国际能源署（IEA）数据显示，截至 2022 年底，全球电动汽车保有量突破 1.4 亿辆，仅 2022 年新增销量就达到 1000 万辆。在中国，新能源汽车产业更是蓬勃发展，2023 年新能源汽车的产量和销量分别达到 958.7 万辆和 949.5 万辆，同比增长 35.8% 和 37.9%。电动汽车的广泛普及，使得充电技术成为了制约其进一步发展的关键因素。

车载充电机作为电动汽车的核心部件之一，其性能优劣直接关系到电动汽车的使用体验。高效的车载充电机能够显著缩短充电时间，提升用户的出行便利性。以日产聆风为例，早期配备的充电机功率较低，充满电需要较长时间，这在一定程度上限制了用户的使用范围；而后期升级的高功率充电机，大大缩短了充电时长，增强了用户对电动汽车的接受度。此外，充电效率的提高还能降低充电成本，减少能源消耗，符合可持续发展的理念。从市场需求来看，消费者对于电动汽车的续航里程和充电速度的关注度极高，因此，提升车载充电机的性能是满足市场需求、推动电动汽车产业发展的重要举措。

1.1.2 软开关技术优势

在电力电子领域，软开关技术相较于传统的硬开关技术，具有诸多显著优势。传统硬开关在开通和关断过程中，电压和电流会同时存在，产生较大的开关损耗，尤其在高频工作时，这种损耗更为明显。而软开关技术通过在开关过程中使电压或电流先降为零（零电压开关，ZVS）或先升为零（零电流开关，ZCS），有效避免了电压和电流的重叠，从而显著降低了开关损耗。相关研究表明，采用软开关技术的电源系统，其开关损耗可比硬开关降低 30% - 50%。

软开关技术还能减小电磁干扰（EMI）。硬开关过程中电压和电流的变化率（ dv/dt 和 di/dt ）较大，会产生强烈的电磁干扰，影响其他电子设备的正常运行。软开关技术实现了零电压或零电流开关，使得电压和电流的变化较为平缓，大大减小了电磁干扰，提高了电子设备的电磁兼容性，有助于满足相关的电磁兼容标准和法规要求。

软开关技术能够提高开关频率。由于开关损耗和电磁干扰的降低，开关电源可以在更高的频率下工作。这不仅能减小变压器、电感、电容等磁性元件和储能元件的体积和重量，实现开关电源的小型化和轻量化，还能提高电源的动态响应速度，使输出电压能够更快地跟随负载变化，提高电源的稳定性和可靠性。

在车载充电机中应用软开关技术，能够有效提升充电机的效率和性能。一方面，降低的开关损耗可以减少能量浪费，提高能源利用率，使充电机在相同的输入功率下能够输出更多的电能给电池充电；另一方面，减小的电磁干扰可以避免对车内其他电子设备的干扰，提高整个汽车电子系统的稳定性；而更高的开关频率则有助于实现车载充电机的小型化和轻量化，减轻汽车的重量，提高续航里程。

1.1.3 两级式车载充电机特点

两级式车载充电机是一种经典的电路结构，它结合了交流侧的 **PFC**（功率因数校正）和直流侧的 **DC/DC** 转换器。在交流侧，**PFC** 电路的主要作用是提高输入电流的功率因数，降低电流谐波，使输入电流更加接近正弦波，从而减少对电网的污染，提高电能的利用效率。常见的 **PFC** 电路有有源 **PFC** 和无源 **PFC**，有源 **PFC** 具有更高的功率因数和效率，能够更好地满足现代电动汽车对充电机的要求。

在直流侧，**DC/DC** 转换器负责将 **PFC** 电路输出的直流电压转换为适合电动汽车电池充电的电压，并对充电电流进行精确控制。**DC/DC** 转换器的拓扑结构有多种，如 **Buck**、**Boost**、**Buck - Boost**、**Flyback**、**Forward**、**Full - bridge** 等，不同的拓扑结构具有不同的特点和适用场景。在两级式车载充电机中，通常采用全桥或半桥拓扑的 **DC/DC** 转换器，以实现高效的电压转换和稳定的输出。

两级式车载充电机在实现高效、高功率、低成本充电方面具有明显优势。通过 **PFC** 电路和 **DC/DC** 转换器的协同工作，能够实现对输入电能的高效处理和转换，满足电动汽车不同充电阶段的需求。在充电初期，电池电压较低，需要较大的充电电流，两级式充电机可以通过调整 **PFC** 电路和 **DC/DC** 转换器的工作状态，提供合适的电压和电流；在充电后期，电池电压逐渐升高，需要减小充电电流，以避免过充，两级式充电机同样能够灵活调整输出，确保充电过程的安全和高效。

两级式结构还便于实现模块化设计，降低成本和提高可靠性。不同功能模块可以独立设计和优化，便于生产和维护。当某个模块出现故障时，只需更换相应的模块，而无需更换整个充电机，降低了维修成本和时间。

1.2 国内外研究现状

在车载充电机的研究领域，国外起步较早，积累了丰富的经验和成果。美国、日本和欧洲等国家和地区在电动汽车技术研发方面投入巨大，推动了车载充电机技术的快速发展。美国的特斯拉公司在其电动汽车产品中，采用了高效的车载充电机技术，不断提升充电速度和效率。特斯拉的第三代车载充电机在软开关技术的应用上取得了显著进展，采用了先进的零电压开关 (ZVS) 技术，有效降低了开关损耗，提高了充电效率。其充电功率可达 **11kW**，能够在较短时间内为车辆补充大量电能，大大提升了用户的使用体验。

日本的丰田、本田等汽车制造商也在车载充电机技术方面进行了深入研究。丰田公司研发的车载充电机采用了两级式结构，结合软开关技术，实现了高效的功率因数校正和稳定的直流电压输出。该充电机在控制策略上采用了先进的数字控制算法，能够根据电池的状态和充电需求，精确调整充电参数，确保充电过程的安全和高效。同时，日本在电力电子器件的研发上具有优势，为车载充电机的高性能发展提供了有力支持。

欧洲的宝马、奔驰等汽车企业同样高度重视车载充电机技术的研发。宝马公司在其电动汽车中应用的车载充电机，采用了软开关技术和智能控制策略，实现了充电过程的智能化管理。该充电机能够与车辆的电池管理系统 (BMS) 进行实时通信，根据电池的剩余电量、温度等参数，动态调整充电功率和电流，有效延长了电池的使用寿命。奔驰公司则在车载充电机的设计中，注重提高功率密度和可靠性，采用了先进的散热技术和冗余设计，确保充电机在各种复杂工况下都能稳定运行。

国内在车载充电机领域的研究虽然起步相对较晚，但近年来发展迅速。随着国家对新能源汽车产业的大力支持，众多高校、科研机构和企业纷纷加大了在车载充电机技术研发方面的投入。清华大学、浙江大学等高校在软开关技术在车载充电机中的应用研究方面取得了一系列成果。清华大学研究团队提出了一种基于软开关技术的新型两级式车载充电机拓扑结构，通过优化电路参数和控制策略，实现了充电机的高效运行。实验结果表明，该充电机的效率在额定工况下可达 **95%** 以上，具有较高的实用价值。

国内企业如比亚迪、华为等也在车载充电机技术领域取得了重要突破。比亚迪在其电动汽车产品中，采用了自主研发的车载充电机技术，结合软开关技术和先进的控制算法，实现了充电效率的大幅提升。比亚迪的车载充电机在功率密度、可靠性和安全性等方面都达到了较高水平，为其电动汽车的市场竞争力提供了有力支撑。华为则凭借其在通信和电力电子技术方面的优势，研发出了具有智能化、高效化特点的车载充电机。该充电机采用了先进的软开关技术和数字化控制方案，能够实现远程监控和智能管理，提高了充电的便捷性和可靠性。

尽管国内外在基于软开关技术的两级式车载充电机研究方面取得了诸多成果，但仍存在一些不足之处。在软开关技术的应用中，谐振参数的优化设计仍然是一个挑战。不同的车载充电机拓扑结构和工作条件对谐振参数的要求不同，如何准确地确定和优化这些参数，以实现最佳的软开关效果，还需要进一步深入研究。

控制策略的智能化和自适应能力有待提高。目前的控制策略虽然能够实现基本的充电功能，但在面对复杂的工况和电池状态变化时，其自适应调整能力还不够强。例如，在电池老化、温度变化等情况下，充电机的控制策略不能及时、准确地调整充电参数，可能会影响充电效率和电池寿命。

在车载充电机的集成度和可靠性方面，仍有提升空间。随着电动汽车对充电机功率密度和可靠性要求的不断提高，如何进一步减小充电机的体积和重量，提高其集成度，同时保证其在各种恶劣环境下的可靠运行，是未来研究需要解决的重要问题。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本研究聚焦于基于软开关技术的两级式车载充电机，旨在提升其性能和效率，满足电动汽车快速发展的需求。具体研究内容涵盖以下几个关键方面：

- 软开关技术原理深入剖析：**对软开关技术的工作原理进行全面且深入的研究，详细分析零电压开关（ZVS）和零电流开关（ZCS）的实现机制。研究不同软开关拓扑结构，如准谐振变换器（QRC）、多谐振变换器（MRC）和谐振极变换器（RSC）等，比较它们在车载充电机应用中的优缺点。通过理论分析和数学建模，明确软开关技术在降低开关损耗、减小电磁干扰以及提高开关频率等方面的作用机制，为后续的电路设计和优化提供坚实的理论基础。

- **两级式车载充电机电路结构与优化**：设计基于软开关技术的两级式车载充电机的电路结构，包括交流侧的 **PFC** 电路和直流侧的 **DC/DC** 变换器。在 **PFC** 电路设计中，采用先进的谐振电路和电容耦合结构，提高功率因数，降低电流谐波，增强电路的稳定性和效率。对于直流侧的 **DC/DC** 变换器，选用合适的拓扑结构，如全桥 **LLC** 谐振变换器，利用软开关技术实现高效的电压转换。通过优化电路参数，如谐振电感、电容和变压器匝数比等，提高充电机的整体性能。研究电路中功率器件的选型和布局，降低导通损耗和寄生参数的影响，进一步提升充电机的效率和可靠性。
- **控制策略研究与实现**：开发适用于基于软开关技术的两级式车载充电机的控制策略，实现对充电机的精确控制和高效运行。在 **PFC** 电路控制方面，采用先进的控制算法，如平均电流控制法、峰值电流控制法和滞环电流控制法等，结合软开关技术，实现功率因数的优化和电流谐波的抑制。对于 **DC/DC** 变换器的控制，采用脉冲频率调制（**PFM**）或脉冲宽度调制（**PWM**）技术，根据电池的充电状态和需求，动态调整输出电压和电流。引入智能控制算法，如模糊控制、神经网络控制等，提高控制策略的自适应能力和鲁棒性，使充电机能够在不同的工况下稳定运行，确保充电过程的安全、高效和可靠。
- **仿真与实验研究**：利用专业的仿真软件，如 **MATLAB/Simulink**、**PSIM** 等，搭建基于软开关技术的两级式车载充电机的仿真模型。通过仿真分析，研究充电机在不同工况下的性能，如充电效率、功率因数、输出电压和电流的稳定性等。对比不同软开关拓扑结构和控制策略的仿真结果，优化电路设计和控制算法。在仿真研究的基础上，搭建充电机实验平台，进行实验验证。制作基于软开关技术的两级式车载充电机样机，对其进行性能测试和分析。通过实验数据，验证仿真模型的准确性和控制策略的有效性，评估充电机的实际性能，为进一步改进和优化提供依据。

1.3.2 研究方法

为了全面、深入地开展基于软开关技术的两级式车载充电机的研究，本研究将综合运用多种研究方法，确保研究的科学性、可靠性和有效性。具体研究方法如下：

- **文献研究法**：广泛收集和查阅国内外关于软开关技术、两级式车载充电机以及相关领域的学术文献、专利、技术报告等资料。了解该领域的研究现状、发展趋势和关键技术，分析已有研究成果的优点和不足，为本研究提供理论基础和研究思路。通过对文献的梳理和总结，明确研究的重点和难点，避免重复研究，确保研究的创新性和前沿性。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/838121034027007033>

•