

# 纯电重卡电机控制器电磁兼容性分析与优化

李 静 杨明明 拓朝辉

西安智德汽车电子控制系统有限公司 陕西 西安 713702

**摘 要：**随着汽车行业电动化的加速发展，纯电汽车得到了越来越多的关注，而电机控制器作为纯电动汽车上的重要部件，其性能的优劣对整车的动力性、经济性、安全性等有至关重要的影响。电机控制器是纯电动汽车上的核心部件，其工作状态决定了整车动力性能和经济性。在实际应用中，电机控制器受到外部电磁干扰是常见问题之一。本文以某款纯电重卡电机控制器为研究对象，通过分析其电磁兼容性问题，并针对性提出改进措施，以保证其正常工作。

**关键词：**纯电重卡电机；控制器；电磁兼容性

**引言：**随着电动化的快速发展，纯电动重卡已经成为未来物流运输的主流。然而，随着电机控制器技术的不断提升，纯电动重卡在运行过程中存在的电磁兼容性问题日益突出。由于电机控制器工作在强电磁场中，工作环境较为恶劣，且受车辆行驶工况及行驶环境的影响，电机控制器很容易受到外界电磁干扰。如果这些电磁干扰超过了相应的限值标准，就会导致电机控制器故障，从而影响整车的安全运行。因此，对纯电动重卡电机控制器进行电磁兼容性分析与优化研究具有重要意义。

## 1 电磁兼容性 (EMC) 概述

电磁兼容性 (EMC) 是保障电气设备在预期的电磁环境中正常工作的关键因素。对于纯电重卡而言，电机控制器的EMC不仅关系到其自身的性能和可靠性，也直接影响到整车的安全性和稳定性。因此，在设计和优化电机控制器时，需要特别关注其电磁干扰 (EMI) 和抗干扰能力 (EMS)。在电机控制器的设计过程中，首先应对电磁干扰源进行识别，包括开关频率、功率器件的开关特性及电流波动等。通过采用适当的电路拓扑结构和滤波器设计，可以有效降低由于高频开关产生的电磁干扰。此外，合理的PCB布局和走线设计也是实现良好EMC的重要手段。对信号线和电源线的适当分离、合理布置，以及对接地系统的优化，能够显著提升电机控制器的抗干扰性能。此外，电机控制器的测试和验证同样不可忽视。在开发过程中，应进行充分的EMC测试，确保控制器在各种工作状态下都能保持良好的电磁兼容性。通过标准化测试，如辐射发射测试和抗扰度测试，可以发现潜在的设计缺陷，并进行相应的改进。

## 2 电机控制器的基本结构与工作原理

### 2.1 电机控制器的组成部分

电机控制器通常由多个关键组成部分构成，包括但

不限于主控单元、功率驱动模块、传感器接口以及通信模块。主控单元是整个控制器的核心，负责接收传感器数据并进行实时计算，以控制电机的运行状态。功率驱动模块通过开关元件调节电流，以实现电机的高效控制。传感器接口则与电机及其周边环境的各类传感器连接，确保控制器能够获取必要的运行参数，如电流、电压和温度等。

### 2.2 开环与闭环控制

在电机控制器的设计中，开环与闭环控制各有其适用场景与优缺点。开环控制系统因其结构简单、成本低廉，通常应用于对精度要求不高的场合，然而其对外部干扰的抗扰能力较弱，易受到电磁干扰的影响。而闭环控制系统则通过实时反馈机制，能够动态调整控制信号，以确保电机在各种工况下的稳定运行，显著提高了系统的抗干扰能力和响应速度，这在纯电重卡的应用中尤为重要。为进一步提升电磁兼容性，闭环控制系统中的传感器选择与布置显得尤为关键。高质量的传感器可有效减少信号噪声，提高反馈精度<sup>[1]</sup>。此外，合理的电缆布局和屏蔽设计也能显著降低电磁干扰对系统的影响。在此基础上，采用先进的滤波技术和信号处理算法，能够进一步提升控制系统在复杂电磁环境中的稳定性。

## 3 电磁兼容性分析

### 3.1 电机控制器的EMI源分析

在电机控制器的EMI源分析中，除了开关频率外，开关方式和拓扑结构也对电磁干扰 (EMI) 产生显著影响。不同的开关方式，如PWM (脉宽调制) 和PDM (脉冲密度调制)，在频率上可能产生不同的谐波分布，这将直接影响到辐射和传导干扰的特性。高频开关操作往往伴随着快速的电流和电压变化，导致尖峰噪声的产生，这些尖峰噪声不仅对电机控制器的工作有影响，也可能对

周围的电子设备造成干扰。在电磁兼容性优化过程中,应考虑采用适当的滤波器和屏蔽设计,以降低开关频率带来的EMI影响。例如,使用LC滤波器可有效抑制高频噪声,而合理的屏蔽材料和结构设计则能够减少辐射干扰的传播。此外,优化PCB布局,缩短高频信号路径和增强接地设计,也是降低EMI的重要手段。随着电机控制技术的不断进步,开关频率的提升已经成为提高电机效率和动态响应的重要手段。然而,随之而来的EMI问题不可忽视。

### 3.2 影响电磁兼容性的因素

在电磁兼容性分析中,电路设计的合理性直接影响到系统的抗干扰能力和信号完整性。首先,布线与接地是电路设计中不可忽视的关键因素。优良的布线策略能够减少电磁辐射和传导干扰,建议采用短距离、低阻抗的走线方式,尽量避免形成环路。同时,布线时应确保信号线与地线的合理分离,以降低电磁耦合的风险。对于高频信号,采用差分信号传输可以有效地抑制外部噪声的影响。接地设计方面,需选择合适的接地方式,如星形接地或平面接地,以降低地电位差引起的干扰。此外,接地回路的设计应确保最小化的接地阻抗,避免形成共模干扰。组件选择也是影响电磁兼容性的重要环节。选择具备良好电磁兼容性能的元器件,如低噪声电源、具备EMI滤波功能的元器件和抗干扰能力强的传感器,能够显著提升系统的整体性能。同时,应定期评估组件在工作环境中的表现,以确保其在各种电磁环境下均能稳定运行<sup>[2]</sup>。最后,需通过仿真与测试手段,验证电路设计与组件选择的有效性,确保在实际应用中达到预期的电磁兼容性标准。整体而言,从布线、接地到组件选择,均需系统考虑,以实现最佳的电磁兼容设计。

## 4 电磁兼容性优化对策

### 4.1 硬件设计优化

#### 4.1.1 选择合适的电子元器件

在选择合适的电子元器件时,应优先考虑其电磁性能和可靠性。高频率下工作的元器件,例如开关电源和驱动芯片,必须具备良好的抗干扰能力和低辐射特性。具体而言,电容器应选择低等效串联电阻(ESR)和低等效串联电感(ESL)的类型,以减少高频噪声的产生。同时,应采用屏蔽技术和滤波器设计来抑制电磁干扰(EMI)。此外,选择具有良好温度特性的元器件也是至关重要的,确保在不同工作环境下保持稳定的电性能。

#### 4.1.2 改进PCB设计

在改进PCB设计方面,首先需要对电路板的布局进行合理规划,以减少电磁干扰。建议采用分区设计,将高

频信号与低频信号的电路模块分开,避免信号间的相互干扰。同时,合理安排接地层和电源层的结构,以降低地回路的阻抗。通过使用多层PCB设计,可以有效减小信号回路的面积,从而降低电磁辐射的可能性。此外,在PCB的走线设计中,应尽量缩短信号线的长度,减少不必要的拐角,维持信号的完整性和降低信号延迟。其次,选择合适的元器件和材料也是优化PCB设计的重要环节。高性能的滤波器和电源管理芯片能够有效地抑制电磁干扰的传播,提升系统的抗干扰能力。同时,使用低损耗的材料和适当的表面处理技术,可以提高电路板的高频性能。考虑到电机控制器的工作环境,采用具备良好热管理性能的材料,有助于设备在高温条件下仍然保持稳定的工作状态。最后,进行电磁兼容性测试时,应结合实际工作环境进行模拟,确保在各种负载和工况下,电机控制器的电磁兼容性能够达到预期标准。通过不断优化PCB设计,提升其在电磁兼容性方面的表现,将为纯电重卡的安全与性能提供更为坚实的保障。

### 4.1.3 优化布局与布线

在电磁兼容性优化过程中,硬件设计的布局与布线至关重要。有效的布局可以显著降低电磁干扰的产生和传播。在优化布局时,应优先考虑电源和信号线的分离,确保电源线与敏感信号线之间保持一定的距离,以减少电源噪声对信号线的影响。同时,采用星形接地方式可以有效避免地回路引起的干扰,确保信号的完整性和稳定性。在布线方面,选择适当的走线方式同样重要。对于高频信号,应采用差分信号传输,以提高抗干扰能力。此外,布线时应尽量缩短走线长度,避免形成过长的环路,这样可以减少电磁辐射和感应干扰的风险。使用屏蔽线缆和合理的屏蔽设计,能够进一步增强信号的抗干扰能力。

## 4.2 软件控制策略优化

### 4.2.1 频率调制与功率管理

在纯电重卡电机控制器的电磁兼容性优化中,频率调制与功率管理是关键的控制策略。通过优化频率调制,可以显著降低电磁干扰的产生。在实际应用中,采用动态频率调制技术能够根据电机负载变化及时调整工作频率,避免在特定频率下产生共振现象,从而有效减少电磁辐射<sup>[3]</sup>。此外,功率管理策略的优化同样至关重要。合理的功率分配和调度不仅能够提高系统的整体效率,还能降低电机控制器在运行过程中的电磁干扰。通过对电机的功率需求进行实时监测,可以实现智能化的功率管理,确保控制器在低干扰状态下运行。例如,利用模糊控制算法,根据实时电流和电压数据自动调整输

出功率,从而实现电磁兼容性目标。进一步地,结合频率调制与功率管理的综合策略,可以形成一个闭环控制系统,使电机控制器在不同工况下均能保持良好的电磁兼容性。这不仅有助于提升电动重卡的安全性和可靠性,还能在长时间的运行中降低故障率,延长设备的使用寿命。

#### 4.2.2 动态调整控制参数

在电动重卡电机控制器的电磁兼容性优化中,动态调整控制参数是提升系统抗干扰能力的重要策略之一。通过实时监测电机运行状态和环境条件,控制系统能够根据电流、电压和温度等信息,动态调整控制参数以适应不同的工况。例如,当系统检测到电磁干扰信号时,可以自动降低电流控制增益,减小系统对干扰的敏感性。此外,可以引入自适应算法,依据历史数据和实时反馈,优化调节过程,以实现更快速的响应和更稳定的性能。在具体实施中,动态调整控制参数需要考虑多个因素,包括电机的负载变化、工作温度及外部电磁环境的变化。为此,控制器可以集成多种传感器,如电流传感器、温度传感器及电磁干扰传感器,实时获取系统状态信息。通过高效的数据处理算法,控制器可以在微秒级别内完成参数调节,提高系统的适应能力和抗干扰能力。此外,为了进一步提升电机控制器的电磁兼容性,可以结合模糊控制和PID控制策略,构建复合控制策略。模糊控制能够处理非线性和不确定性问题,而PID控制则可以提供精确的反馈调节,这种结合方式将使得控制系统在面对复杂的电磁环境时,能够保持稳定的性能表现。

### 4.3 其他优化手段

#### 4.3.1 加强屏蔽与滤波

在电磁兼容性优化中,加强屏蔽与滤波是提升纯电动重卡电机控制器EMC性能的重要手段。首先,屏蔽材料的选择至关重要。常用的屏蔽材料包括铜、铝以及镀锌钢等,这些材料具备良好的导电性和磁屏蔽能力。通过合理设计屏蔽结构,并确保屏蔽层与地线良好连接,可以有效减少电磁干扰的传播。此外,屏蔽的覆盖范围应尽量扩大,包括电机控制器的所有关键部件,以确保整体电磁环境的稳定。其次,滤波技术的应用同样不可

忽视。通过在电源输入和信号传输路径中引入滤波器,可以显著降低高频噪声的影响。常见的滤波器包括LC滤波器和RC滤波器,能够针对不同频段的噪声进行有效抑制。在设计过程中,应根据系统的工作频率特性和实际干扰源的频谱进行针对性设计,从而提高滤波器的性能。

#### 4.3.2 设计合适的接地方案

在设计合适的接地方案时,首先应考虑接地系统的类型和布局。根据电磁兼容性要求,接地系统可分为单点接地和多点接地。对于纯电动重卡电机控制器而言,采用单点接地可以有效减少接地回路中可能产生的地环路电流,从而降低干扰信号的耦合。在布局时,应确保接地线尽量短,并与电源线和信号线分开布置,以减少电磁干扰。此外,接地方案的材料选择同样重要。通常,采用高导电性的材料如铜或铝,有助于降低接地电阻,提高接地系统的整体性能<sup>[4]</sup>。同时,在接地接口处,为了避免因连接不良导致的接地失效,建议使用螺栓连接或焊接等方式,确保良好的电气接触<sup>[5]</sup>。在接地方案中,还应考虑到环境因素的影响。例如,在潮湿或腐蚀性环境中,应采用防腐蚀措施,比如镀锌或涂覆绝缘材料,以延长接地系统的使用寿命。

结语:综上所述,随着电动汽车技术的快速发展,其电机控制器(VCU)在整车中的应用越来越多。在整车开发过程中,如何保障整车电磁兼容性(EMC)符合整车系统开发要求,是纯电动重卡开发过程中需要重点关注的问题。

#### 参考文献

- [1]樊韬.一体化高压大功率电推进系统的电磁兼容性研究[D].西安工业大学,2024.
- [2]支永健,朱柄全,袁科亮,等.轨道交通牵引系统电磁兼容技术研究及应用[J].安全与电磁兼容,2024,(03):25-38.
- [3]沈立人.电子衡器电磁兼容性试验的几个问题探讨[J].衡器,2024,53(06):20-24.
- [4]辜江淋.基于辐射发射测试技术的汽车电驱动系统电磁兼容性研究[J].环境技术,2024,42(05):152-156.
- [5]刘辉.信号传输电缆低频下电磁兼容性设计[J].光纤与电缆及其应用技术,2024,(03):20-23.