

基于SiC器件的车用电机控制器电磁兼容性优化

王 庚 郭 晨 孙思运

西安智德汽车电子控制系统有限公司 陕西 西安 710065

摘要：随着电动汽车行业的快速发展，车用电机控制器的性能要求日益提高。碳化硅（SiC）器件因其优异的特性在车用电机控制器中得到广泛应用，但同时也带来了电磁兼容性（EMC）方面的挑战。本文深入探讨了基于SiC器件的车用电机控制器电磁兼容性问题，分析了影响电磁兼容性的因素，包括SiC器件自身特性、电路拓扑结构、布线设计等，并从屏蔽技术、滤波技术、接地技术等多个方面提出了针对性的优化策略，旨在提高基于SiC器件的车用电机控制器的电磁兼容性，保障电动汽车的稳定运行和可靠性。

关键词：SiC器件；车用电机控制器；电磁兼容性；优化策略

1 引言

全球能源危机与环境污染加剧，电动汽车因零排放等优势成发展重点。车用电机控制器是核心部件，其性能影响电动汽车多项指标。碳化硅（SiC）作为新型宽禁带半导体材料，相比传统硅（Si）器件，能提高车用电机控制器功率密度和效率。但SiC器件高速开关特性引发更严重电磁干扰（EMI），对电磁兼容性要求更高。而电磁兼容性关乎设备在电磁环境中正常工作且不干扰其他设备，故开展基于SiC器件的车用电机控制器电磁兼容性优化研究意义重大。

2 SiC器件特性及其对电磁兼容性的影响

2.1 SiC器件的特性

SiC器件具有许多优于传统Si器件的特性。首先，SiC的禁带宽度是Si的3倍左右，这使得SiC器件具有更高的击穿电场强度，能够在更高的电压下工作，从而减小器件的尺寸和重量。其次，SiC的电子饱和迁移率比Si高，使得SiC器件具有更快的开关速度，能够实现更高的开关频率，降低开关损耗。此外，SiC的热导率是Si的3倍以上，有利于器件的散热，提高器件的可靠性和工作温度范围。常见的SiC器件包括SiCMOSFET和SiC二极管等。SiCMOSFET具有低导通电阻、高开关速度和良好的耐高温性能等特点，广泛应用于车用电机控制器的功率转换电路中。SiC二极管则具有零反向恢复电流的特性，能够有效减少开关过程中的能量损耗和电磁干扰。

2.2 SiC器件开关过程对电磁兼容性的影响

SiC器件的高速开关特性是其产生电磁干扰的主要原因之一。在开关过程中，SiC器件的电压和电流会发生快速变化，根据麦克斯韦方程组，变化的电场和磁场会相互激发，产生电磁辐射和传导干扰。当SiCMOSFET开通时，栅极电压迅速上升，漏极电流开始增加，同时漏源

电压逐渐下降。在这个过程中，漏极电流的上升沿和漏源电压的下降沿存在重叠区域，会产生较大的开关损耗和电磁干扰^[1]。同样，当SiCMOSFET关断时，漏极电流迅速下降，漏源电压迅速上升，也会产生类似的电磁干扰问题。此外，SiC二极管的反向恢复过程也会对电磁兼容性产生影响。虽然SiC二极管具有零反向恢复电流的特性，但在实际电路中，由于寄生参数的存在，仍然会产生一定的反向恢复电流，从而引起电磁干扰。

2.3 SiC器件寄生参数对电磁兼容性的影响

SiC器件在实际应用中不可避免地存在寄生参数，如寄生电容、寄生电感等。这些寄生参数会对SiC器件的开关性能和电磁兼容性产生重要影响。寄生电容主要包括栅源寄生电容、栅漏寄生电容和漏源寄生电容等。在开关过程中，寄生电容的充放电会导致栅极电压和漏极电流的波动，增加开关损耗和电磁干扰。例如，栅源寄生电容的存在会使栅极驱动信号的上升沿和下降沿变缓，延长开关时间，从而增加开关损耗。寄生电感主要来源于器件的引脚、引线以及电路布局等。在高速开关过程中，寄生电感会产生感应电动势，阻碍电流的变化，导致电压过冲和振荡现象。电压过冲和振荡不仅会增加器件的应力，降低器件的可靠性，还会产生强烈的电磁干扰，影响周围电子设备的正常工作。

3 基于SiC器件的车用电机控制器电磁兼容性问题分析

3.1 车用电机控制器的电磁环境

车用电机控制器工作在一个复杂的电磁环境中，既受到内部电磁干扰的影响，也受到外部电磁干扰的影响。内部电磁干扰主要来自于电机控制器自身的功率转换电路，如逆变器、DC-DC变换器等。这些电路中的功率器件（如SiCMOSFET、IGBT等）在高速开关过程中会

产生强烈的电磁干扰，通过电源线、信号线等传导到其他电路模块，或者通过空间辐射干扰周围的电子设备。外部电磁干扰则来自于电动汽车的其他电子系统和外部环境。例如，电动汽车的电机在运行过程中会产生电磁场，通过空间辐射或传导的方式干扰电机控制器；车载充电器在充电过程中也会产生电磁干扰；此外，外界的无线电信号、雷电等也可能对电机控制器造成干扰。

3.2 基于SiC器件的车用电机控制器电磁干扰源分析

3.2.1 功率器件开关产生的电磁干扰

如前文所述，SiC器件的高速开关特性使其在开关过程中产生强烈的电压和电流变化，从而产生电磁干扰。这种电磁干扰主要通过电源线和信号线传导，同时也会通过空间辐射传播。

3.2.2 电路寄生参数引起的电磁干扰

车用电机控制器电路中存在各种寄生参数，如引线电感、布线电容等。这些寄生参数会在功率器件开关过程中引起电压和电流的振荡，产生额外的电磁干扰^[2]。例如，逆变器输出端的寄生电感会导致输出电压出现尖峰和振荡，对电机绕组和其他电子设备造成干扰。

3.2.3 电机绕组产生的电磁干扰

车用电机绕组在通电过程中会产生旋转磁场，同时也会产生电磁辐射。此外，电机绕组的不平衡、绝缘损坏等问题也会导致电磁干扰的增加。这些电磁干扰会通过电机与电机控制器之间的连接线传导回电机控制器，影响其正常工作。

3.3 电磁干扰传播途径分析

3.3.1 传导干扰传播途径

传导干扰是指电磁干扰通过导线、金属体等导电介质进行传播的方式。在车用电机控制器中，传导干扰主要通过电源线和信号线传播。例如，功率器件开关产生的电磁干扰会通过电源线传导到电池组和其他电子设备；控制信号线也可能会受到电磁干扰的影响，导致信号失真或错误。

3.3.2 辐射干扰传播途径

辐射干扰是指电磁干扰通过空间以电磁波的形式进行传播的方式。车用电机控制器中的功率器件、电路布线等都可以作为辐射源，向周围空间辐射电磁波。这些电磁波可能会被其他电子设备接收，从而对其造成干扰。例如，电机控制器产生的辐射干扰可能会影响车载无线电、导航系统等的正常工作。

4 基于SiC器件的车用电机控制器电磁兼容性优化策略

4.1 屏蔽技术

4.1.1 电机控制器外壳屏蔽

电机控制器的外壳可以采用金属材料（如铝合金）制作，形成一个封闭的屏蔽腔体。金属外壳能够有效地反射和吸收电磁波，减少电磁辐射对外部设备的干扰，同时也能防止外部电磁干扰进入电机控制器内部。为了提高屏蔽效果，外壳的缝隙和接口处应进行密封处理，避免电磁泄漏。

4.1.2 内部电路屏蔽

对于电机控制器内部的一些敏感电路模块，如控制电路、信号处理电路等，可以采用屏蔽罩进行单独屏蔽。屏蔽罩同样采用金属材料制作，将其覆盖在敏感电路模块上，并通过接地线与外壳相连，形成一个完整的屏蔽系统。这样可以进一步减少内部电路之间的电磁干扰，提高电路的抗干扰能力。

4.1.3 电缆屏蔽

车用电机控制器与电机、电池组等之间的连接电缆是电磁干扰传导和辐射的重要途径之一。因此，采用屏蔽电缆是抑制电磁干扰的有效措施。屏蔽电缆通常在电缆的外层包裹一层金属屏蔽层，如铜箔或编织铜网。屏蔽层可以将电缆上的电磁干扰信号引导到大地，减少其对周围环境的辐射和传导干扰。同时，屏蔽电缆也能有效地防止外部电磁干扰对电缆内信号的干扰。

4.2 滤波技术

4.2.1 电源滤波器

电源滤波器通常安装在电机控制器的电源输入端，用于滤除电源线上的电磁干扰。电源滤波器一般由电感、电容等元件组成，能够有效地抑制高频干扰信号的传导。例如，共模滤波器可以抑制共模干扰信号，差模滤波器可以抑制差模干扰信号^[3]。在选择电源滤波器时，应根据电机控制器的实际工作频率和干扰特性进行合理选型，确保其具有良好的滤波效果。

4.2.2 信号滤波器

对于电机控制器中的控制信号线和通信信号线，也需要采用信号滤波器进行滤波处理。信号滤波器可以根据信号的频率范围和干扰特性进行设计，选择合适的滤波元件和滤波电路结构。例如，对于低频信号，可以采用RC滤波器；对于高频信号，可以采用LC滤波器或陶瓷滤波器等。信号滤波器能够有效地减少信号线上的电磁干扰，保证信号的准确传输。

4.2.3 吸收滤波器

吸收滤波器是一种利用磁性材料的磁损耗特性来吸收电磁干扰能量的滤波器。它通常由铁氧体材料制成，可以安装在电缆上或电路板上。吸收滤波器对高频干扰

信号具有良好的吸收效果，能够有效地抑制电磁干扰的辐射和传导。例如，在电机控制器的输出电缆上安装铁氧体磁环，可以吸收电缆上的高频干扰电流，减少电磁辐射。

4.3 接地技术

4.3.1 安全接地

安全接地是为了保障人身安全和设备安全而设置的接地方式。在车用电机控制器中，将金属外壳、机架等与大地可靠连接，当设备出现漏电等故障时，能够将电流迅速导入大地，避免人员触电事故的发生。安全接地应采用低阻抗的接地导体，确保接地电阻符合安全标准要求。

4.3.2 信号接地

信号接地是为信号电路提供一个稳定的参考电位，保证信号的准确传输和处理。在电机控制器中，信号接地应采用单点接地方式，避免形成接地环路，减少地电位差引起的干扰。对于高频信号电路，可以采用多点接地方式，以降低接地阻抗。同时，应将信号地与功率地分开设置，避免功率电路的大电流干扰信号地。

4.3.3 屏蔽接地

屏蔽接地是将屏蔽体与大地可靠连接，使屏蔽体上的感应电荷能够迅速流入大地，提高屏蔽效果。如前文所述，电机控制器的外壳屏蔽、内部电路屏蔽和电缆屏蔽等都需要进行屏蔽接地处理。屏蔽接地应注意接地的连续性和可靠性，避免出现接地不良的情况。

4.4 电路拓扑结构优化

4.4.1 软开关技术

软开关技术是一种通过在开关过程中引入谐振电路，使开关器件在零电压或零电流条件下进行开关操作的技术。采用软开关技术可以有效地减少SiC器件开关过程中的电压和电流应力，降低开关损耗和电磁干扰^[4]。例如，零电压开关（ZVS）技术可以使SiCMOSFET在漏源电压为零时开通，减少了开通时的电压过冲和电流尖峰，从而降低了电磁干扰的产生。

4.4.2 多电平技术

多电平技术是一种通过增加逆变器的电平数来改善输出波形质量的技术。与传统的两电平逆变器相比，多电平逆变器能够输出更接近正弦波的电压和电流波形，减少谐波含量，从而降低电磁干扰。常见的多电平技术包括二极管钳位型多电平技术、飞跨电容型多电平技术和级联H桥型多电平技术等。在车用电机控制器中，采用多电平技术可以有效提高电机的控制性能，同时减少电磁干扰对电机和其他设备的影响。

4.4.3 分布式电源技术

分布式电源技术是将电源模块分散布置在电机控制

器的不同位置，为各个电路模块提供独立的电源供应。采用分布式电源技术可以减少电源线上的电流传输距离，降低电源线的阻抗，从而减少电源线上的电压降和电磁干扰。此外，分布式电源技术还可以提高电源的稳定性和可靠性，有利于提高电机控制器的整体性能。

4.5 布线设计优化

4.5.1 电源线与信号线分开布线

电源线通常承载较大的电流，会产生较强的电磁场，容易对信号线造成干扰。因此，在布线时应将电源线与信号线分开布置，尽量增大它们之间的间距。如果条件允许，可以采用分层布线的方式，将电源线和信号线分别布置在不同的层上，并通过增加绝缘层厚度来进一步减少干扰。

4.5.2 减少布线长度和环路面积

布线长度越长，寄生电感越大；环路面积越大，产生的电磁辐射越强。因此，在布线时应尽量缩短布线长度，减少环路面积。例如，对于高频信号线，应采用直线布线方式，避免弯曲和绕线；对于电源线和地线，应尽量加宽线宽，降低电阻和电感。

4.5.3 采用屏蔽布线

对于一些对电磁干扰敏感的信号线，可以采用屏蔽布线方式。屏蔽布线是将信号线包裹在金属屏蔽层内，屏蔽层通过接地与大地相连。这样可以有效地减少外部电磁干扰对信号线的影响，同时也能防止信号线自身的电磁辐射干扰其他设备。

结语

本文深入研究了基于SiC器件的车用电机控制器电磁兼容性问题，分析SiC器件特性对电磁兼容性的影响，探讨干扰源与传播途径，并提出屏蔽、滤波等一系列优化策略，其能有效降低电磁干扰、提高电磁兼容性，保障电动汽车稳定运行。不过研究仍有不足，部分优化措施会增加成本和体积，新型电磁兼容性问题也需深入研究。未来可探索更高效低成本的优化技术，如新型材料研发、智能控制技术应用，以适应电动汽车行业发展需求。

参考文献

- [1] 李军剑,付国良,蓝贤平,等.电磁兼容数值分析技术在汽车领域的应用[J].汽车电器,2025,(07):81-85.
- [2] 徐雁.汽车电气系统中电磁兼容问题的分析及策略[J].汽车维护与修理,2025,(09):110-111.
- [3] 石星月.汽车电控单元电磁兼容设计[D].内蒙古大学,2024.
- [4] 唐亮.前置后驱汽车前舱电缆电磁兼容仿真研究[D].沈阳工业大学,2023.