

GigaDevice Semiconductor Inc.

驱动器及电机的 EMC 设计技术

应用笔记

AN142

1.0 版本

(2023 年 8 月)

目录

目录	2
图索引	3
表索引	4
1. 引言	5
2. 电机控制系统 EMC 分析	6
2.1. EMC 概述	6
2.2. 逆变电路	7
2.3. 电机端	8
2.4. 散热器	9
2.5. 总结	9
2.5.1. 共模 EMI 耦合路径	9
2.5.2. 差模 EMI 耦合路径	10
3. EMC 设计	11
3.1. 接地设计	11
3.1.1. 信号和电源接地连接	12
3.1.2. 高电流和高电压（功率）电路接地	12
3.1.3. 敏感电路接地	12
3.2. 功率级的布局及 Layout	12
3.2.1. 常见封装	12
3.2.2. 器件布局	13
3.2.3. 功率级设计	14
3.2.4. 电流采样电路设计	15
3.3. 滤波器设计	16
3.3.1. 无源 EMI 滤波技术	16
3.3.2. 有源 EMI 滤波技术	17
3.4. 屏蔽	18
4. 版本历史	19

图索引

图 1-1. 电磁兼容性示意图	5
图 2-1. 电机控制逆变器框图.....	6
图 2-2. EMI 模型	7
图 2-3. 逆变电路寄生效应	8
图 2-4. 散热器寄生电容	9
图 2-5. 共模 EMI 耦合路径	10
图 2-6. 差模 EMI 耦合路径	10
图 3-1. 星型连接和单点连接.....	11
图 3-2. 常见封装类型	13
图 3-3. 半桥堆叠布局	13
图 3-4. 半桥并排布局	14
图 3-5. 半桥寄生参数	14
图 3-6. 三相半桥布局	15
图 3-7. 电流采样方式	15
图 3-8. 配置差分对及网络连接组件.....	16
图 3-9. 电流采样布线	16
图 3-10. 低通无源滤波器.....	17
图 3-11. 滤波磁环.....	17
图 3-12. X2Y 电容器的应用.....	17
图 3-13. 有源滤波器	18

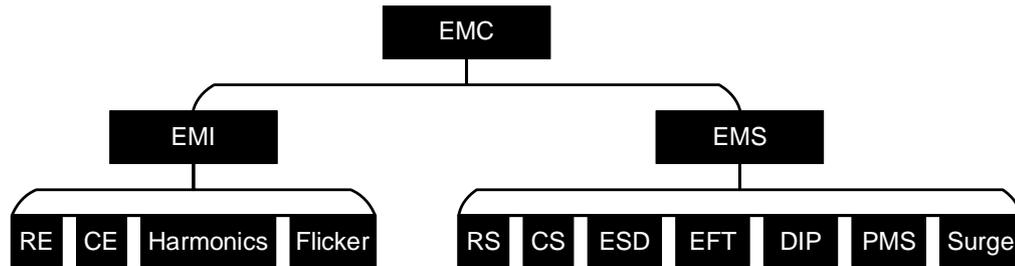
表索引

表 4-1. 版本历史.....	19
------------------	----

1. 引言

电磁兼容性（EMC）是指电子系统、设备在电磁环境中正常运行的能力，包括具有抵抗规定安全裕度内电磁干扰的能力和不会产生超限度电磁干扰的能力，不出现因电磁干扰而导致的故障或性能退化。EMC 分为电磁干扰（EMI）和电磁敏感度（EMS），如[图 1-1. 电磁兼容性示意图](#)所示。

图 1-1. 电磁兼容性示意图



电机由于其高效、低噪音、长寿命等优点，被广泛应用于各种场合。但是，电机的控制系统基本都采用脉宽调制技术（PWM）技术，其固有的脉冲特性会产生较多的 EMI，这给电路系统带来了挑战。因此在设计阶段，必须将满足 EMC 标准作为首要考虑因素，以减少开发时间和成本，避免浪费资源来追溯性地解决 EMC 问题。因此在硬件系统设计实施阶段应采取预防措施，以控制电快速瞬变脉冲群（EFT）、静电放电（ESD）和 EMI 的影响。

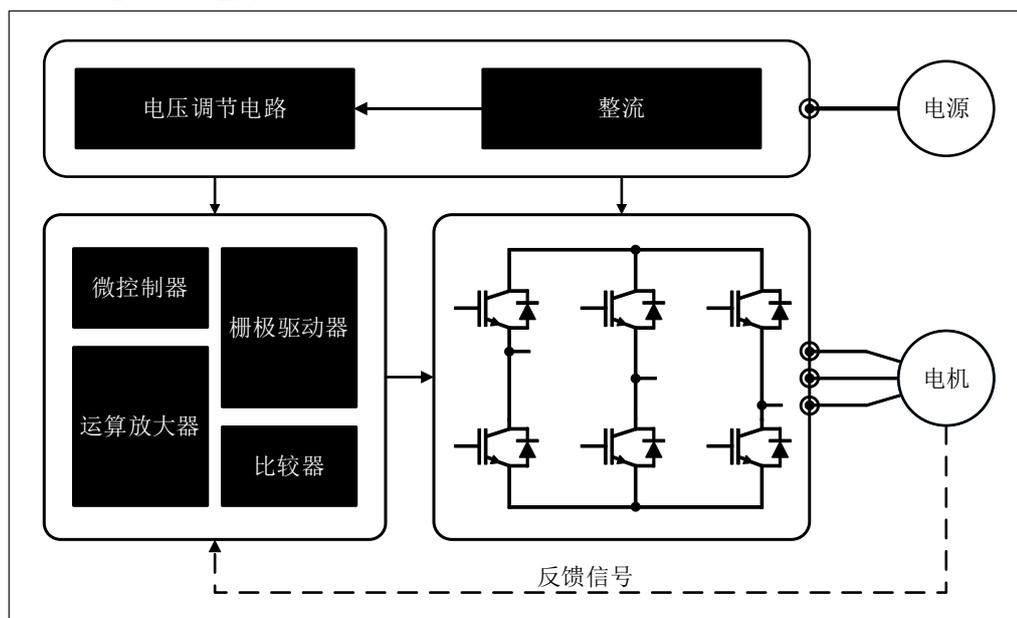
电机及其控制系统按照不同应用范围，受不同的 EMC 标准管辖。当今世界各国普遍采用 CISPR（国际工业科学无线电频率干扰特别小组）制定的相关标准来规范无线电设备的 EMI 特性。在 EMC 设计过程中，应参考以下标准：

- CISPR 25: 适用于车辆电子设备的无线电干扰测试标准
- CISPR 32: 针对信息技术设备的辐射和传导发射限值测试标准
- IEC 61000-4-2: 静电放电（ESD）抗扰度测试标准
- IEC 61000-4-4: 电快速瞬变脉冲群（EFT）抗扰度测试标准
- IEC 61000-4-5: 浪涌（Surge）抗扰度测试标准
- IEC 61000-6-2: 适用于工业环境下的抗扰度测试标准
- EN55014-1: 欧洲家用电器、电动工具的发射限值测试标准
- EN55014-2: 欧洲家用电器、电动工具的抗扰度测试标准

2. 电机控制系统 EMC 分析

基于逆变器的电机控制系统通常由控制部分（微控制器、IC 栅极驱动器、用于电流采样的运算放大器及用于保护的比较器）、功率级（IGBT 或 MOSFET 器件）、电源和电压调节部分构成，如 [图 2-1. 电机控制逆变器框图](#) 所示。

图 2-1. 电机控制逆变器框图



由于系统中存在高电压、高电流以及电压调节电路（例如 BUCK 电路、BOOST 电路），因此 PCB 设计过程中必须考虑以下几个方面，包括走线长度和宽度、回路面积、以及不同区域中各功能电路的布置。

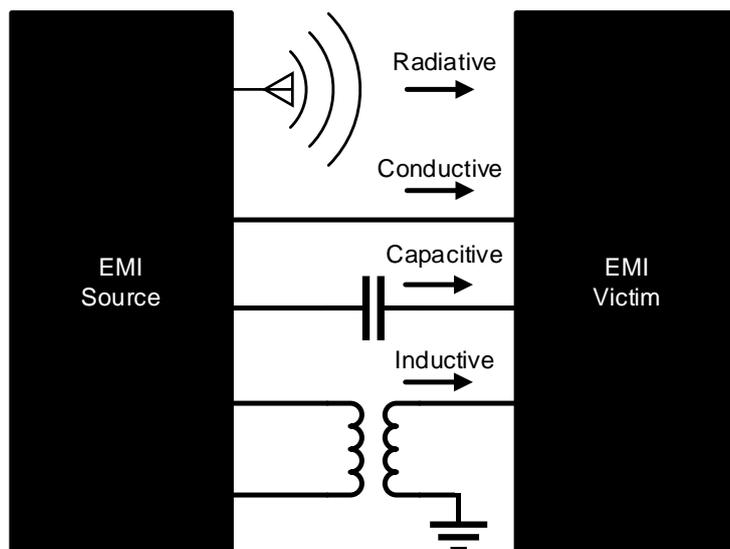
设计人员必须首先考虑走线寄生电感引起的 EMI 问题和过电压尖峰。其次，确保通过系统电源线注入的 EFT 噪声可以经过外部接地或电源电压正确传导，远离微控制器和 IC 栅极驱动器等敏感器件，因为它会导致 PWM 信号异常、电流采样错误以及故障信号异常等问题，这些问题都可能导致不可预期的系统损坏。

因此，在电机控制方案设计之初就将满足 EMC 标准作为关键，并根据 EMC 的要求完成电路设计、器件选型和 PCB 布局等工作。

2.1. EMC 概述

EMI 模型通常由 EMI 源、EMI 耦合路径、EMI 受体构成，由 [图 2-2. EMI 模型](#) 所示。

图 2-2. EMI 模型



EMI 源包括微控制器、开关电源、快速开关功率器件（如 IGBT、MOSFET）、自举电路和电荷泵等。

- 微控制器电路中，时钟电路会产生较多的噪声。
- 为了向微控制器、IC 栅极驱动器及其他 IC 芯片供电，控制系统通常集成多个电源，其中开关电源最为常见，其开关频率范围从 150kHz 至 30MHz 或更高。开关电源与功率开关器件相比，噪声频谱显示的能量更少，但覆盖的频率范围要宽的多。
- 快速开关功率器件的频率理论上在 20kHz 以内，而使用基于 MOSFET 的逆变电路可以轻松实现 20kHz 及以上的开关频率，其快速开关会导致 EMI 问题。同时，MOSFET 栅极信号的上升时间可短至纳秒量级，压摆率为 50-200V/ns，为了实现这种快速特性，栅极驱动器配备了短的高峰值脉冲电流特性，这也可能导致 EMI 问题。

EMI 耦合路径可以是：

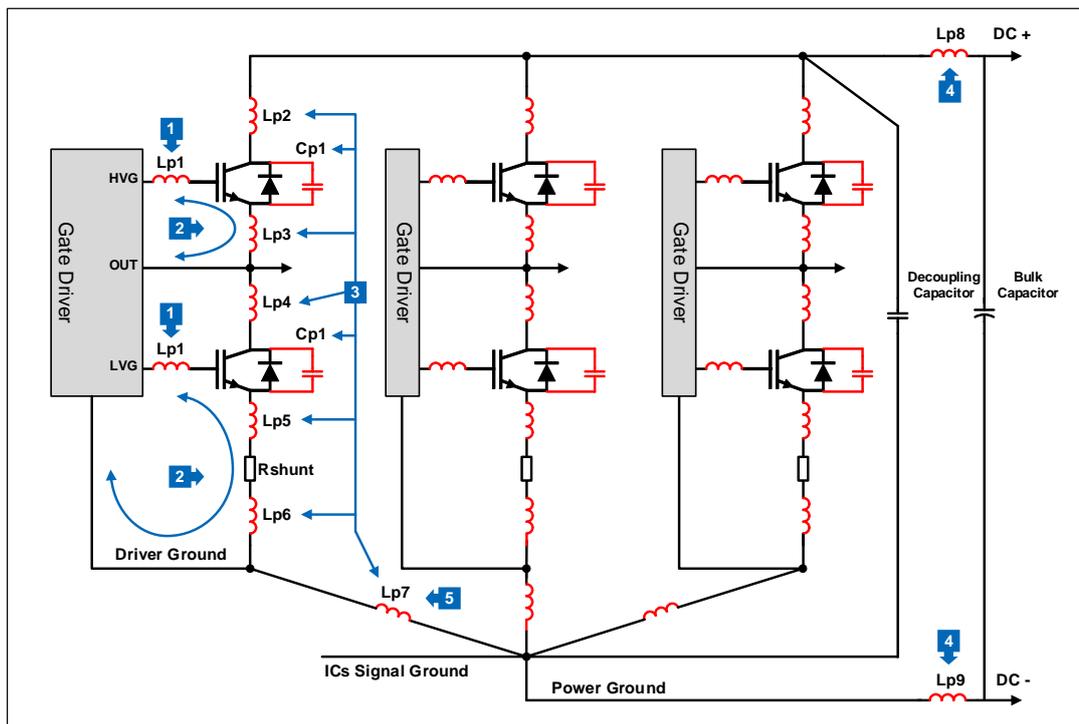
- 传导——源和受体之间通过直接连接形成，如电线、电缆等。
- 电容性——在两个相邻导体间存在寄生电容，通常相距不到一个波长，噪声通过寄生电容进行传导。
- 感应或磁性——在两个平行导体间存在变化的磁场，通常相距不到一个波长，噪声通过感应进行传导。
- 辐射——源和受体相隔较远的距离，通常超过一个波长，源和受体充当无线电天线，源发射或辐射电磁波进行传导。

所有的电子电路都是 EMI 受体，但通常只关注关键的信号及电路。最关键的信号是复位、中断、故障、保护和控制信号。关键的电路有模拟信号放大电路、控制电路。

2.2. 逆变电路

由快速开关功率器件构成的逆变电路如 [图 2-3. 逆变电路寄生效应](#) 所示，图中显示了三相半桥电路中的寄生参数，需注意图中功率器件内部的寄生电容只表示了一部分。设计人员应当注意各位置寄生电感和寄生电容的影响。

图 2-3. 逆变电路寄生效应



- 栅极信号为矩形波，会产生较大的 dv/dt 。在栅极驱动的 PCB 走线和功率管中存在杂散电感和杂散电容（Lp1 等），这些寄生参数会由于较大的 dv/dt 而引起开关信号的震荡，即开关时的过冲和下冲电压，这些值会可能超过功率器件的额定安全范围，并降低功率级的效率。虽然在高频范围内震荡波形在整个干扰信号所占比重较小，但仍需防止 dv/dt 引起的错误导通。
- 栅极驱动的 PCB 走线环路应最小化，以避免这种结构对周围噪声的敏感性。
- 功率管 IGBT 集电极与发射极两端（MOSFET 为源极和漏极两端）电压不断转换，产生较大的 dv/dt 和 di/dt ，同时伴随大量高次谐波。在栅极驱动的 PCB 走线和功率管中存在杂散电感和杂散电容（Lp2, Lp3, Lp4, Lp5, Lp6, Lp7 以及 Cp1 等），而由于较大的 di/dt ，这些杂散电感的存在会在电路中产生传导差模干扰；同时，存在的杂散电容由于较大的 dv/dt 会在电路中产生传导共模干扰；传导共模干扰的存在也是引起电路辐射干扰的重要因素。
- 直流侧的杂散电感（Lp8 和 Lp9）会引起母线的电压瞬变，而较大的电压瞬变会损坏器件，降低电路的可靠性。
- 直流回路中的杂散电感 Lp7 是栅极驱动器的接地连接（功率地）和控制电路的接地（信号地）之间的寄生电感。这种寄生电感在输入逻辑信号和运算放大器输出模拟信号中引入噪声。

2.3. 电机端

电机端的共模干扰电流主要由静电放电、磁不对称（由不平衡的三相绕组引起）以及高开关速率的共模电压引起。

逆变电路的三相输出电压不平衡，会产生高频的共模电压作用在电机上，由于电机内部寄生电

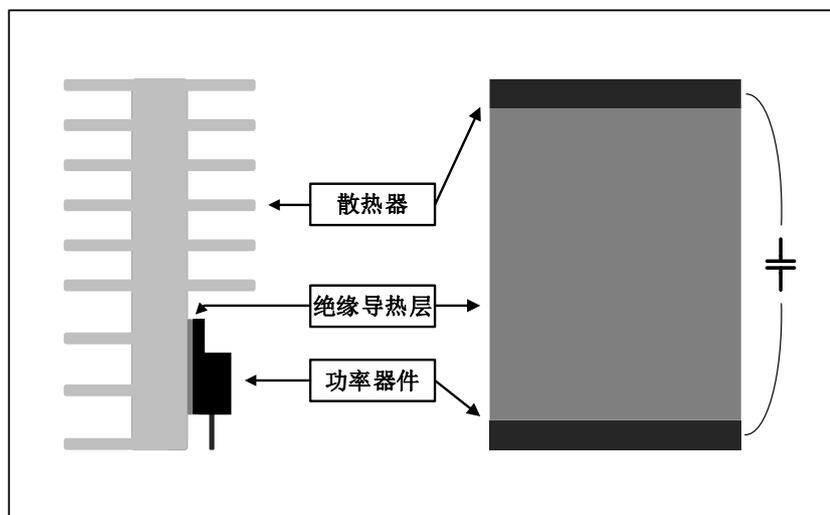
容的耦合作用，电机转轴上会耦合出轴电压。这个轴电压会通过转子绕组和电机外壳间的耦合电容形成共模干扰电流。

在功率管开关时产生的较高 dv/dt 对耦合电容充放电而产生共模干扰电流。由于耦合电容分布并不均匀，偶尔出现电气击穿，即随机的高电流尖峰。这种随机击穿会导致非常高的随机峰值电流，从而在 EMI 扫描中产生高准峰值噪声。当共模干扰电流的频率达到 30MHz 以上时，就会以电磁波的形式在空间中进行传播，从而产生辐射干扰。

2.4. 散热器

开关功率器件与散热器之间存在类似平板电容器的寄生电容，如[图 2-4. 散热器寄生电容](#)所示。为了确保功率管不因过热而失效，功率管与金属散热器紧密连接，中间会填充导热硅脂。这样就在功率管的两极（IGBT 为集电极和发射极，MOSFET 为源极和漏极）与散热器之间形成了很大的分布寄生电容。在功率管高速开关时，会频繁地产生很大的 dv/dt ，这个 dv/dt 会不断地对寄生电容充放电，从而形成共模干扰电流。

图 2-4. 散热器寄生电容

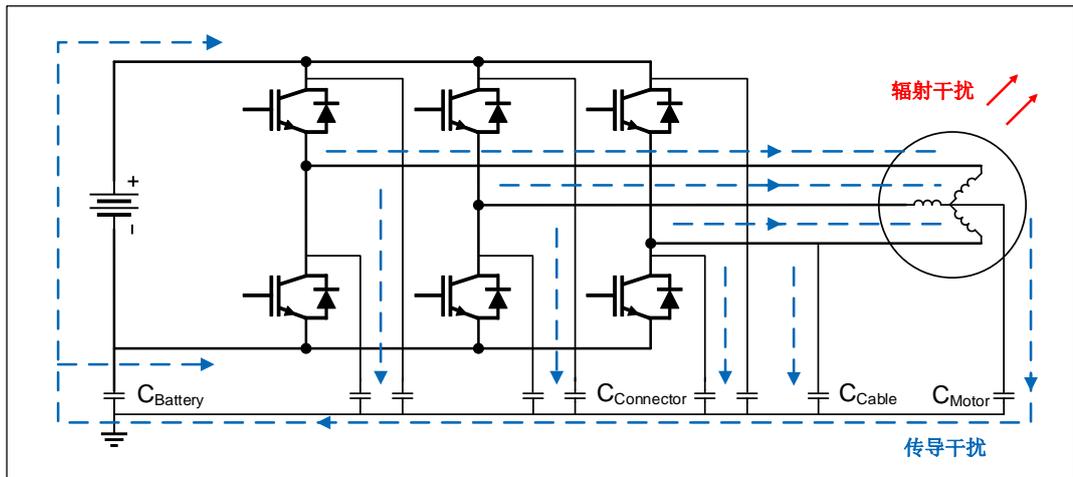


2.5. 总结

2.5.1. 共模 EMI 耦合路径

电机控制系统的共模 EMI 干扰主要是由开关过程中的高 dv/dt 和系统内部的寄生电容相互作用形成的。其耦合路径如[图 2-5. 共模 EMI 耦合路径](#)所示。

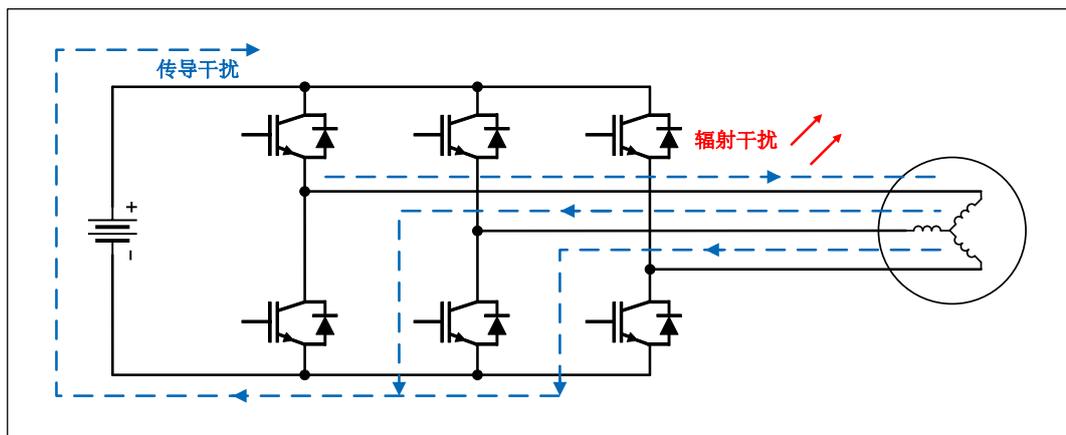
图 2-5. 共模 EMI 耦合路径



2.5.2. 差模 EMI 耦合路径

电机控制系统的差模 EMI 干扰主要是由开关过程中的高 di/dt 和系统内部的杂散电感相互作用形成的。其耦合路径如 [图 2-6. 差模 EMI 耦合路径](#) 所示。

图 2-6. 差模 EMI 耦合路径



3. EMC 设计

对 EMI 有重要影响的设计有：

- PCB: PCB 的类型、叠层设计、尺寸。
- 接地设计: 确定合适的接地策略。
- 信号: 区分不同类型信号, 对关键信号重点布局及 Layout。
- 滤波器设计: 针对系统中固有的干扰信号, 提前设计滤波器电路进行消除。
- 屏蔽设计: 对于无法消除或减弱的干扰信号, 提前设计应用于 PCB 的屏蔽。

综上所述, 我们提供了总体的 EMC 设计思路, 下文将对各部分展开描述。

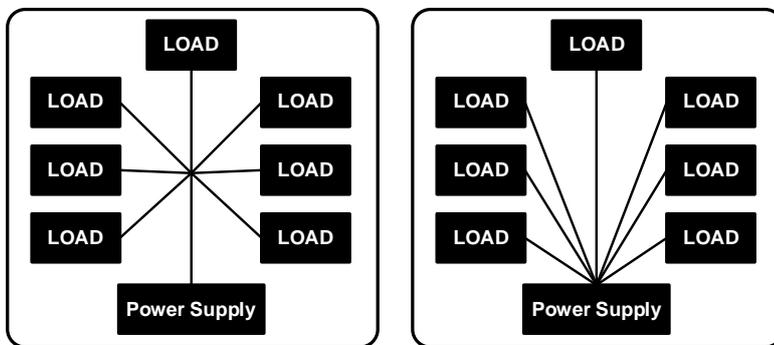
由于 PCB 受成本、结构等因素影响, 叠层设计、尺寸等参数根据实际情况进行设计。

3.1. 接地设计

通过良好的接地策略, 可以很容易地管理 EMI 源和 EMI 受体。

设计人员需要首先确定 PCB 上各功能电路的位置, 以确定所有信号的最终接地参考。这个参考通常是板上的一个物理点, 因此有两种常见的连接方式如 [图 3-1. 星型连接和单点连接](#) 所示。在单点连接中, 所有负载都自带不间断的接地路径。在星型连接中, 所有负载都集中在一个源上, 而来源于参考地, 该方法会平衡所有负载之间的公共阻抗。

图 3-1. 星型连接和单点连接



无论如何, 重要的是要确保接地路径尽可能短。

- 在单面板或双面板中没有专用的接地层, 因此可以考虑对 PCB 进行分区, 将数字信号、模拟信号和功率信号具有相对独立的区域。对 PCB 进行网格化, 根据实际电路对各个网格进行互连, 这样可以创建一个类似的接地平面, 以降低噪声以及电源和负载之间的阻抗。
- 在四层或更多层的 PCB 设计中, 建议使用接地平面。通过将 PCB 的一层作为连续的接地平面, 可让每个信号具有最短的返回路径并减少耦合和干扰。同时建议过孔彼此远离以防止接地平面断裂。

应当注意的是, 电路参考地不一定与 EMC 参考地相同。例如设备外壳为 EMC 接地, 而电路以 0V 为参考地。在设计中将机壳与 0V 直接相连来降低 EMI。

3.1.1. 信号和电源接地连接

建议信号接地与电源接地单点连接，避免由于开关电源中电感的高 di/dt 引起的瞬态压降。如果信号处理电路回路连接到电源接地多个点，则这些瞬变表现为信号处理电路中不同点处的回路电压差。

对于电源电路，确保接地平面上高电流路径不会穿过同一平面上的敏感信号接地区域。

3.1.2. 高电流和高电压（功率）电路接地

建议将高电流和高电压（功率）电路尽可能靠近参考地。

高电流和高电压也必须通过接地路径流到实际接地点，因此也是接地信号。在实际布局中，务必将这些高功率电路的接地信号与低功率或敏感电路中存在的接地电流物理分离，将高功率电路布置在输入电源（参考地）附近，减小回路面积。

3.1.3. 敏感电路接地

敏感电路是放置到参考地附近的下一个优先事项，但要远离电源电路（元件）以及高功率电路。

避免将敏感电路放置在 PCB 板边缘，可以将地平面布置在电路与板的边缘之间，以降低 EMI 的干扰。

敏感信号通常为：

- 低电平模拟信号，如电流采样信号。
- 低电平直流信号，如保护信号、故障信号。
- 高速数字信号。

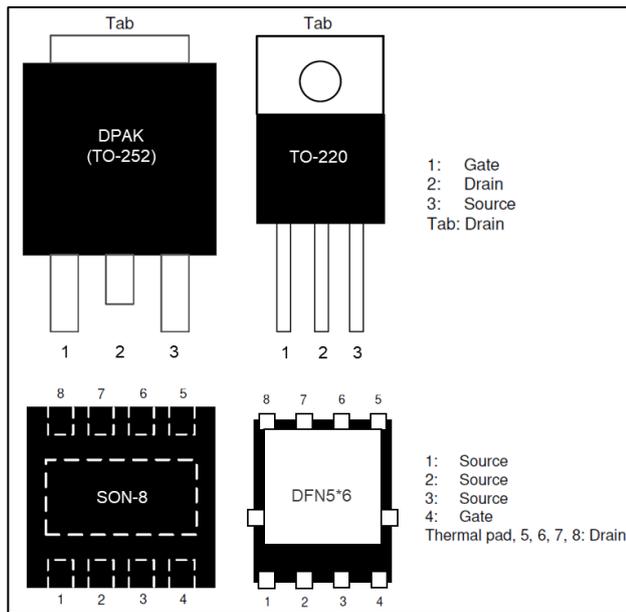
3.2. 功率级的布局及 Layout

栅极驱动器和功率器件（IGBT、MOSFET）的放置对于 EMI 的优化至关重要。对于具有集成 MOSFET 的电机驱动器，例如 GD30DR8413x，其内部已经完成连接，并优化了内部走线的寄生参数。对于 GD30DR8306x，需要仔细规划 PCB 的布局和功率器件的放置方式。以下部分会介绍常见的 MOSFET 拓扑。

3.2.1. 常见封装

目前常见的封装类型有 DPAK(TO-252)、D2PAK(TO-263)、TO-220、SON-8(DFN5*6-8)等，如 [图 3-2. 常见封装类型](#) 所示。

图 3-2. 常见封装类型



不同封装与功率级和热耗散之间有着直接关系，不同封装也有着不同的布线规则。通常 TO-220 等插件封装比标贴封装需要更多的空间，这种封装更方便安装散热器，因此布局时还需要考虑散热器大小位置等因素的影响。

3.2.2. 器件布局

常见的器件布局方式如 [图 3-3. 半桥堆叠布局](#) 和 [图 3-4. 半桥并排布局](#) 所示，适用于贴片封装。

图 3-3. 半桥堆叠布局

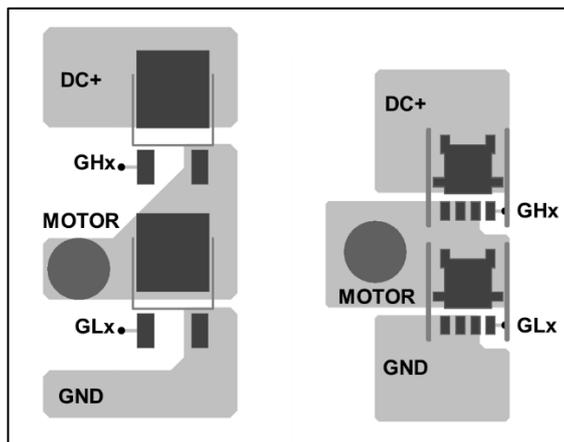
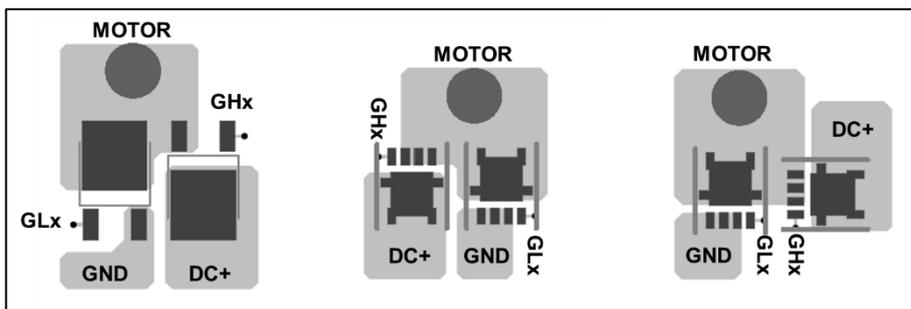


图 3-4. 半桥并排布局

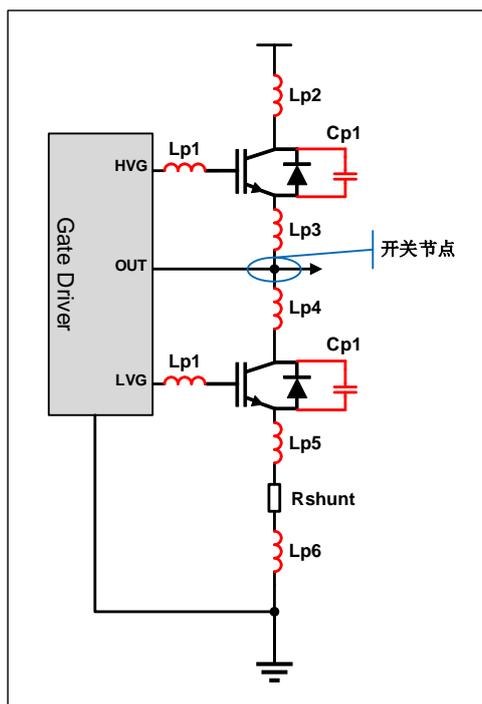


这些半桥布局可重复用于多种半桥拓扑，包括 H 桥（两个半桥）、逆变器（三个半桥）和双 H 桥（四个半桥）。

3.2.3. 功率级设计

功率器件放置完成后，接下来是确保布线正确。根据之前的分析，功率器件的开关会引起较多的 EMI，因此布线时要注意其中的寄生参数，如 [图 3-5. 半桥寄生参数](#)。

图 3-5. 半桥寄生参数



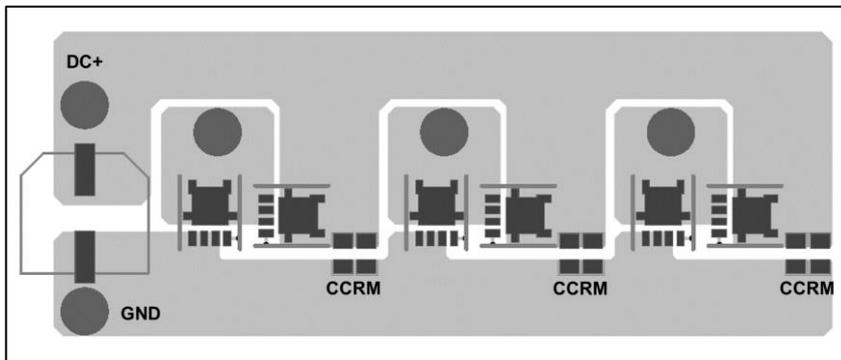
开关节点是高侧功率管和低侧功率管的连接处，该节点最终连接到电机。因为该点的信号具有高频、高电压、高电流的特性，所以布线时需要格外注意。较好的做法是尽可能缩短覆铜平面连接的长度并增加其宽度，并且采用具有较小寄生电感的器件。

高电流路径的环路电感也至关重要，最大限度地降低该电感可将电压纹波和噪声尽可能降低，并可减少对额外旁路电容的需求。[图 3-6. 三相半桥布局](#)所示为参考布局，布线时要注意以下几点：

- 对完整的大电流环路使用正确的布线宽度。增加布线宽度会降低寄生电感。

- 通过正确放置来尽量减小元件之间的距离。减小布线长度会降低寄生电感。
- 最大限度地减少大电流路径中的跳层次数，并在通过大电流布线进行跳层时使用正确的过孔尺寸和数量。
- 使用小型陶瓷电容器 (<10uF) 来衰减由功率器件开关操作引起的高频电流以及其他寄生电容。

图 3-6. 三相半桥布局

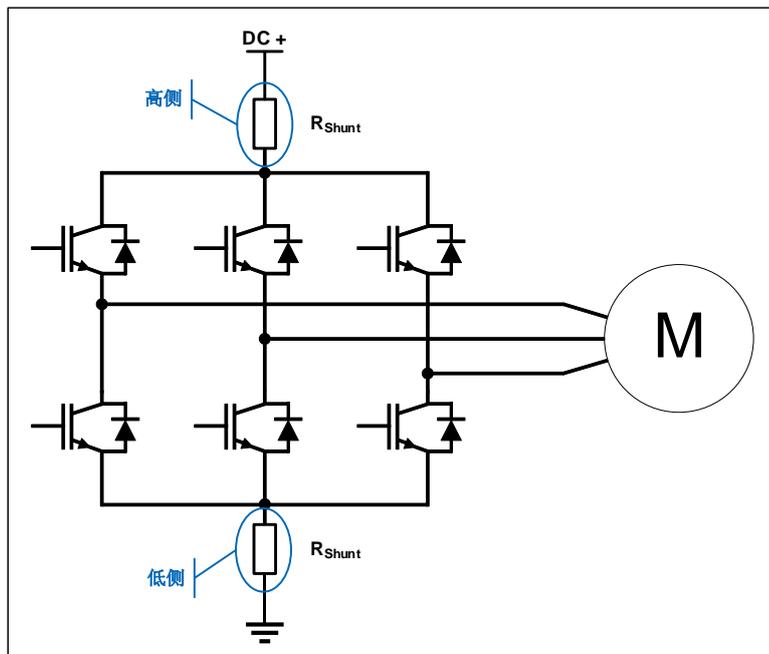


3.2.4. 电流采样电路设计

根据不同的电流采样方式可分为以下两种（见 [图 3-7. 电流采样方式](#)）：

- 高侧电流采样：具有抗接地干扰、可检测负载短路，但需要后级放大电路有较高的共模电压。
- 低侧电流采样：共模电压低、可检测负载短路，但接地噪声明显。

图 3-7. 电流采样方式



为了减小采样电阻引起的寄生电感及布线阻抗，采样电阻应靠近功率级放置。对于高侧电流采样，采样电阻应靠近电源与高侧功率管之间的星点。对于低侧电流采样，采样电阻应靠近低侧功率管与星点接地之间。

为了降低耦合到 PCB 板上其他布线的可能性，放大电路应靠近采样电阻布置。为了提高采样精度，建议使用差分对来完成采样信号的布线。在一个差分对中，两个信号在布局中紧密耦合，布线必须从分流电阻并联到运放输入端。

由于低侧采样电阻负输入端接地，而正输入端接到低侧功率管的源极（或发射极），在布线时 EDA 软件无法准确区分差分对。为了避免这种情况，可以在采样电阻与放大电路之间放置网络连接组件，如 [图 3-8. 配置差分对及网络连接组件](#) 所示。

图 3-8. 配置差分对及网络连接组件

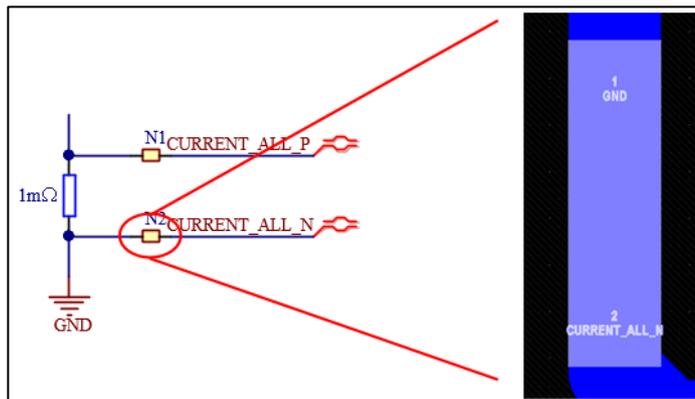
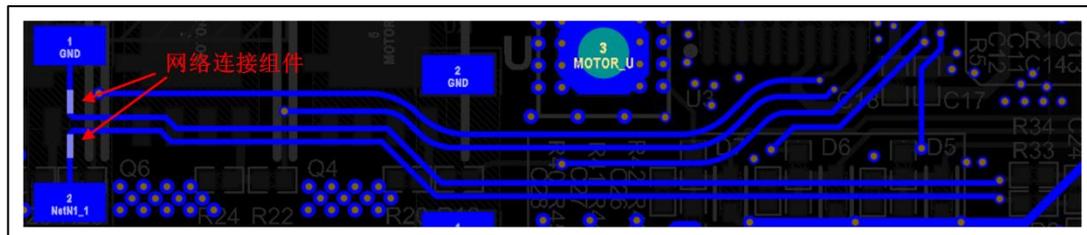


图 3-9. 电流采样布线



通过网络连接组件可以方便进行差分走线，以降低共模噪声。并且差分放大电路的输入和输出滤波器尽可能靠近放大电路放置，以确保电路接收到的不良噪声被限制在滤波器和放大电路之间。

3.3. 滤波器设计

通过滤波器的设计可以切断 EMI 的传导，目前有无源 EMI 滤波技术、有源 EMI 滤波技术。

3.3.1. 无源 EMI 滤波技术

无源 EMI 滤波器一般由电阻、电容、电感等器件组成，可对一次或高次谐波形成低阻抗通路，以达到抑制高次谐波的作用。

- 低通三相输出无源滤波器结构如 [图 3-10. 低通无源滤波器](#) 所示，可以同时减小电机侧的传导共模电流和传导差模电流。
- 使用滤波磁环，如 [图 3-11. 滤波磁环](#) 所示。在逆变电路输入和输出电缆上安装磁环，消除或减弱电缆内的高次谐波。
- X2Y 电容器可以提供出色的 EMI 滤波。两个电容器被平衡分流，以消除互感，并且还提

供屏蔽效果，如 [图 3-12. X2Y 电容器的应用](#) 中的(a)；X2Y 电容器可以配置为具有超低电感的去耦电容，如 [图 3-12. X2Y 电容器的应用](#) 中的(b)。

图 3-10. 低通无源滤波器

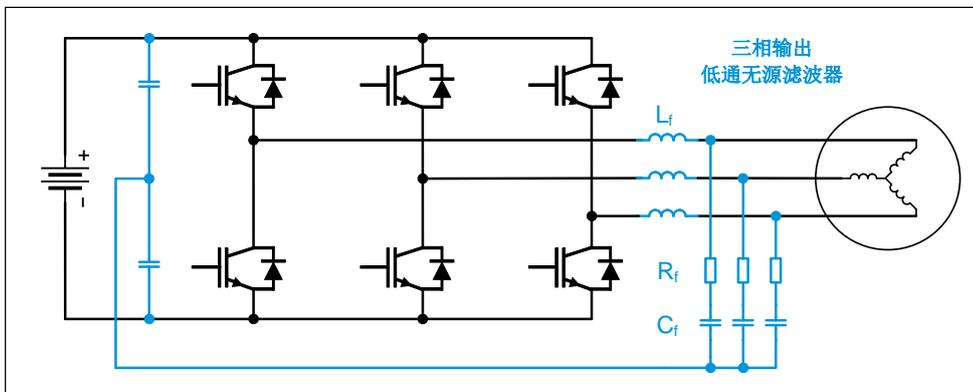
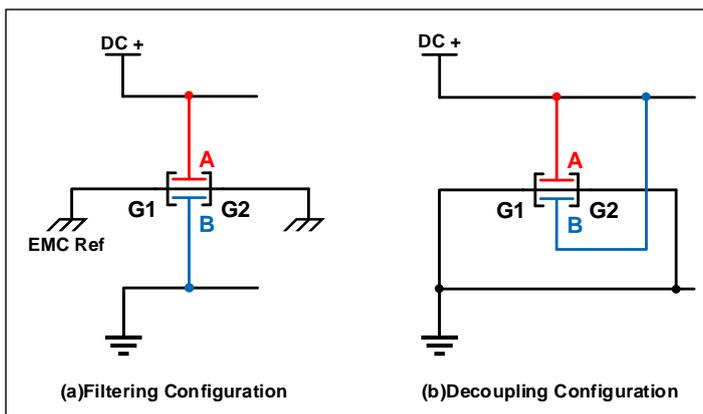


图 3-11. 滤波磁环



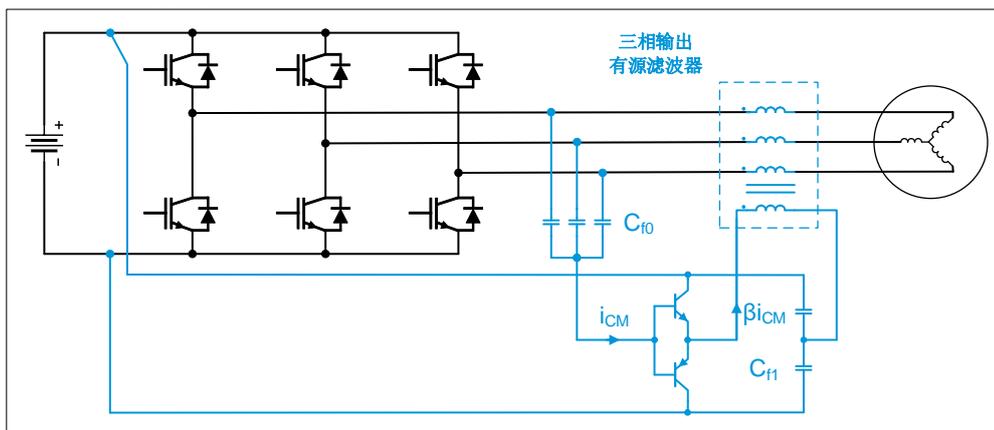
图 3-12. X2Y 电容器的应用



3.3.2. 有源 EMI 滤波技术

有源 EMI 滤波技术是利用有源电路来消除 EMI 传导的噪声能量，基本原理是将检测到的传导 EMI 电压或电流反向回馈到系统，以此抵消系统产生的传导 EMI 电压或电流，达到消除 EMI 的目的。典型的有源共模 EMI 滤波器如 [图 3-13. 有源滤波器](#) 所示，星接电容器 C_{f0} 直接接到逆变器输出端作为共模电压检测器。

图 3-13. 有源滤波器



3.4. 屏蔽

当难以通过接地设计以及滤波器设计来解决 EMC 问题时，可能需要采用离散屏蔽方案，例如法拉第笼等。也可以用金属外壳屏蔽 PCB 板的特定部件或区域。

4. 版本历史

表 4-1. 版本历史

版本号.	说明	日期
1.0	首次发布	2023 年 8 月 31 日

Important Notice

This document is the property of GigaDevice Semiconductor Inc. and its subsidiaries (the "Company"). This document, including any product of the Company described in this document (the "Product"), is owned by the Company under the intellectual property laws and treaties of the People's Republic of China and other jurisdictions worldwide. The Company reserves all rights under such laws and treaties and does not grant any license under its patents, copyrights, trademarks, or other intellectual property rights. The names and brands of third party referred thereto (if any) are the property of their respective owner and referred to for identification purposes only.

The Company makes no warranty of any kind, express or implied, with regard to this document or any Product, including, but not limited to, the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose. The Company does not assume any liability arising out of the application or use of any Product described in this document. Any information provided in this document is provided only for reference purposes. It is the responsibility of the user of this document to properly design, program, and test the functionality and safety of any application made of this information and any resulting product. Except for customized products which has been expressly identified in the applicable agreement, the Products are designed, developed, and/or manufactured for ordinary business, industrial, personal, and/or household applications only. The Products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems designed or intended for the operation of weapons, weapons systems, nuclear installations, atomic energy control instruments, combustion control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, life-support devices or systems, other medical devices or systems (including resuscitation equipment and surgical implants), pollution control or hazardous substances management, or other uses where the failure of the device or Product could cause personal injury, death, property or environmental damage ("Unintended Uses"). Customers shall take any and all actions to ensure using and selling the Products in accordance with the applicable laws and regulations. The Company is not liable, in whole or in part, and customers shall and hereby do release the Company as well as its suppliers and/or distributors from any claim, damage, or other liability arising from or related to all Unintended Uses of the Products. Customers shall indemnify and hold the Company as well as its suppliers and/or distributors harmless from and against all claims, costs, damages, and other liabilities, including claims for personal injury or death, arising from or related to any Unintended Uses of the Products.

Information in this document is provided solely in connection with the Products. The Company reserves the right to make changes, corrections, modifications or improvements to this document and Products and services described herein at any time, without notice.