

越野车车门控制模块电磁兼容问题的分析与解决

王鲁蛟

北京汽车研究总院，北京 100176

摘要：汽车电子设备工作在行驶环境不断变化的汽车上，环境中电磁能量构成的复杂性和多变性，意味着系统所受到的电磁干扰来源比较广泛。汽车电子设备的电磁兼容性能在国内日益受到重视，它对提高国内汽车产品的竞争力也相当重要。电子设备干扰源是车内电磁干扰是主要干扰。解决电磁兼容问题非常复杂，本文为解决门控制模块的辐射超标问题提供了参考。

关键词：电磁能量；干扰源；辐射超标

作者简介：姓名：王鲁蛟（1982-） 民族：汉 学位：硕士 职称：汽车高级工程师 研究方向：车身控制系统研究

中图分类号： U472.7

文献标识码：A

1 论文目的

汽车世界中，电磁兼容非常重要，它如同一座坚固的桥梁，连接着车辆与生活环境的和谐共存。电磁兼容安全旨在确保汽车在复杂电磁环境中稳定运行，同时避免对其他设备产生干扰。随着汽车技术的飞速发展，电子元件的密集集成使得电磁兼容成为汽车设计的重要要素。解决电磁兼容问题非常复杂，本文提供了解决门控制模块解决辐射超标的理论方法和实际的解决办法，为解决汽车电子模块的辐射超标问题提供了参考。

2 故障描述

电磁兼容试验是汽车设计中必须要过的项目，在做越野车的门控制模块的电磁兼容试验时，门控制模块的辐射发射试验没能通过检测，试验过程中发现门控制模块在频率为 10.5M 频段的地方出现辐射发射指标超标的现象。

3 方法分析

（1）首先要找到问题的根源，从超标频率的来源，看看电路设计中有哪些信号与超标信号有关联性。门控制模块使用的晶振频率为 16MHz，高于超出限值的频率点，10.5MHz 不是晶振直接辐射出的频率。在门控制模块中，低速 CAN 的频率为 125KHz，10.5MHz 是

低速 CAN 通信频率 125K 的倍频数。很有可能是低速 CAN 的频率经过倍频产生的辐射发射超标。

（2）我们需要查看一下控制器电路板的具体设计，门控制模块电路板 CAN 走线的下方地平面被两条导线切割开，下方的地平面呈现出不完整。同时发现 SPI 走线下方的地也被切割开。（见图 1 整改前电路板）



图 1 整改前电路板

4. 理论分析

信号电流必须经由一个先前定义好的路径或其它路径，回到电流源；简言之，这个回传路径就是一种映像平面。映像平面可能是原先的走线的镜像，或位于附近的另一个路径，映像平面也许就是电源平面、接地平面，或者自由空间。信号电流会以电容或电感的形式与任何传输线耦合，只要此传输线的阻抗比先前定义好的路径的阻抗小。不过，为了符合 EMC 标准，必须避免让自由空间成为回传路径。

在两条导线之间，会有共同的部份电感存在。共

同的部份电感 M_p 是以平行走线，或导线区段之间的间距（s）为基础。 M_p 是「第一条导线内的电流所产生的磁通量（通过第二条导线至很远的地方）」和「第一条导线所产生的电流」之比值。电路的数学表述式如下图 2 所示，等效电路如图 3 所示。

$$V_1 = L_{p1} \frac{dI_1}{dt} + M_p \frac{dI_2}{dt}$$

$$V_2 = M_p \frac{dI_1}{dt} + L_{p2} \frac{dI_2}{dt}$$

图 2 电路数学表达式

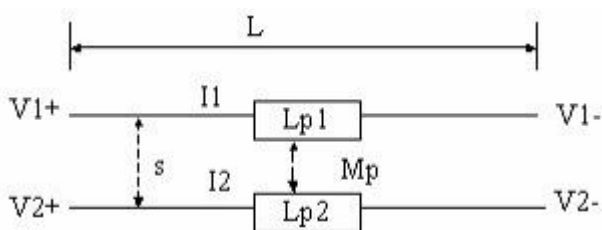


图 3 两导线之间的共同的部份电感

现在以共同的部份电感之观念，来考虑在附图三的电路上传送信号，譬如：频率信号。 V_1 是在信号路径上， V_2 是在信号电流回传路径上。假设此两导线构成一个讯号路径和它的回传路径，因此 $I_1 = I$ 且 $I_2 = -I$ 。要不是有共同的部份电感存在，此两导线将无法互相耦合，此电路也无法正常工作，也不会形成一个封闭回路。在附图 2 中的电压降将变成图 4 的电压表达式：

$$V_1 = (L_{p1} - M_p) \frac{dI}{dt}$$

$$V_2 = -(L_{p2} - M_p) \frac{dI}{dt}$$

图 4 电压表达式

由图 4 中可以知道，若要使电压降变小，必须增加共同的部份电感值（ M_p ）。而增加共同的部份电感之最简单方法是：将信号回传电流的路径尽量和讯号走线靠近。最佳的设计方法是：在接近信号走线的附近，使用一个射频回传平面，它们之间的距离在可实现的能力范围之内，应该尽量的小。

部份电感永远存在于导线中，它如同默认值一样。

因此，它就等同于一个具有特定的谐振频率的天线。

「共同的部份电感」可以降低「部份电感」的效应。缩小两导线的间距，其个别的部份电感就可以降低，这可以符合 EMC 电磁兼容标准的要求。

为了使共同的部份电感的效应达到最大，在两导线中的电流必须大小相同，但方向相反。这也是为何映像平面（或接地线）能够如此有效的原因。在两条平行的导线之间，有共同的部份电感存在，而这些电感值会随着两导线的间距和长度之不同而变化（可以参考导线的技术规格）。当两平行导线的间距和长度都最小时，它们的共同的部份电感值会最大。此外，须注意的是，如果降低两导线之间的共同的部份电感值，不仅会减损映像平面的效应，而且会使两平面之间的电容值增加。

在 PCB 内的映像平面，它具有共同的部份电感。信号走线的大多数信号电流将回至接地平面，此平面在信号走线的正下方。在这个回传「映像」结构中，信号回传电流将遇到一个有限大的阻抗（电感）。此回传电流会产生一个「电压梯度（斜率）」（每单位路径长度的电压变化率），也称为「接地噪声电压（ground-noise voltage）」。接地噪声电压会导致部份的信号电流通过接地平面的离散电容。

一个稳固的平面会产生共模的辐射。由于共同的部份电感可以降低具辐射性的信号电流的产生，因此，共同的部份电感也会影响到差模电流和共模电流。而利用映像平面是可以将这些电流大幅地降低的。理论上，差模电流应该等于零，但实际上它无法 100% 被消除，而剩下的差模电流会转变成共模电流。此共模电流正是造成电磁干扰的主要来源。因为在回传路径上的剩余的信号电流，被加到在信号路径中的主电流中，造成信号严重干扰。为了降低共模电流，我们必须将走线平面和映像平面之间的共同的部份电感值增加至最大，以补充磁通量，以此消除不需要的射频能量。差模电压和电流会产生共模电流，而减少差

模电流 的方法除了增加共同的部份电感值以外, 走线平面和映像平面之间的距离也做到最小。

在 PCB 内, 当有一个信号回传平面或路径存在时, 若此回传路径被连接至一个参考源, 则可以获得最佳的性能。对 三极管和场效应管 而言, 其芯片内的功率和接地脚位是连接至参考源、 电源、接地平面。只有当信号回传路径有和芯片内的功率和接地脚位连接, 一个真正的映像平面才会存在。通常, 在芯片内会有接地线路, 此线路与 PCB 的接地平面连接, 因此产生良好的映像平面。如果将此映像平面移除, 则在走线和接地平面之间会产生映像平面。由于走线之间的距离很小, 辐射能量会降低, 因此, 射频映像会被抵销。理想的映像平面应该是无限大的, 而且是没有分裂、细缝或割痕。

(4) 门控制模块地平面设计要素对信号辐射的影响:

在门控制模块 PCB 电路设计中, 差分信号走线之间的耦合较小, 只占 10~20% 的耦合度, 更多的还是对地的耦合, 所以差分走线的主要回流路径还是存在于地平面。当地平面发生不连续的时候, 无参考平面的区域, 差分走线之间的耦合才会提供主要的回流通路, 尽管参考平面的不连续对差分走线的影响没有对普通的单端走线来的严重, 但也会增加辐射发射量。由此可以看出, 地平面不完整导致 CAN 线的信号无法通过地平面回流, 只能通过差分线回流, 导致 CAN 线的辐射增大, 产生辐射超标。因此在布线的时候要尽可能的保证地平面的完整性。

4 改进结果

根据以上分析结果, 重新绘制门控制模块的电路板, 我们将模块 CAN 走线严格进行差分布线, 并且保证门控制模块 CAN 线下方地平面的完整性。SPI 线的地平面也经过了优化在, SPI 总线上做一个完整的包地, 图中黑线为地线的走向; 背面除 SPI 的过孔走线外是一个完整的地平面。(见图 5 整改后电路板)。



图 5 整改后的电路板

门控制模块电路板整改完成后, 重新进行电磁兼容辐射发射测试, 测试结果显示, 改进明显, 能够达到检测标准的限值要求, 顺利通过了试验验证(测试结果见图 6 所示)

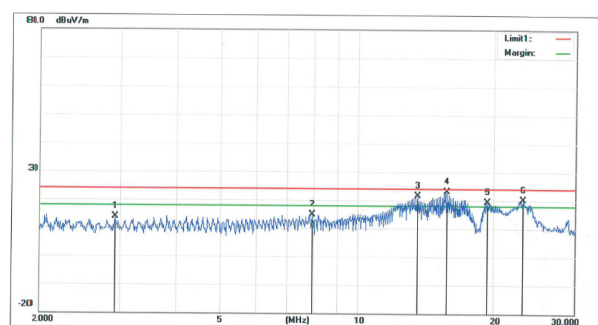


图 6 更改后的电路板测试结果

5 结论

电磁兼容问题问题多且复杂, 具有很多意想不到的情况, 特别是电路中有各种信号线的情况, 更容易出现电磁兼容问题。我们在进行绘制高速的信号线电路时, 要特别注意信号线下方地平面的完整性, 地平面被分割很容易引起电磁兼容的辐射超标, 建议把高速信号线的地平面作为电路板设计的一个重要检查项, 保障电路板的设计质量。

参考文献

- [1] IS011898 控制器局域网 (CAN) 协议
- [2] CISPR25-2021 车辆、船只和内燃机无线电干扰特性、车载接收器和保护用限值和测量方法