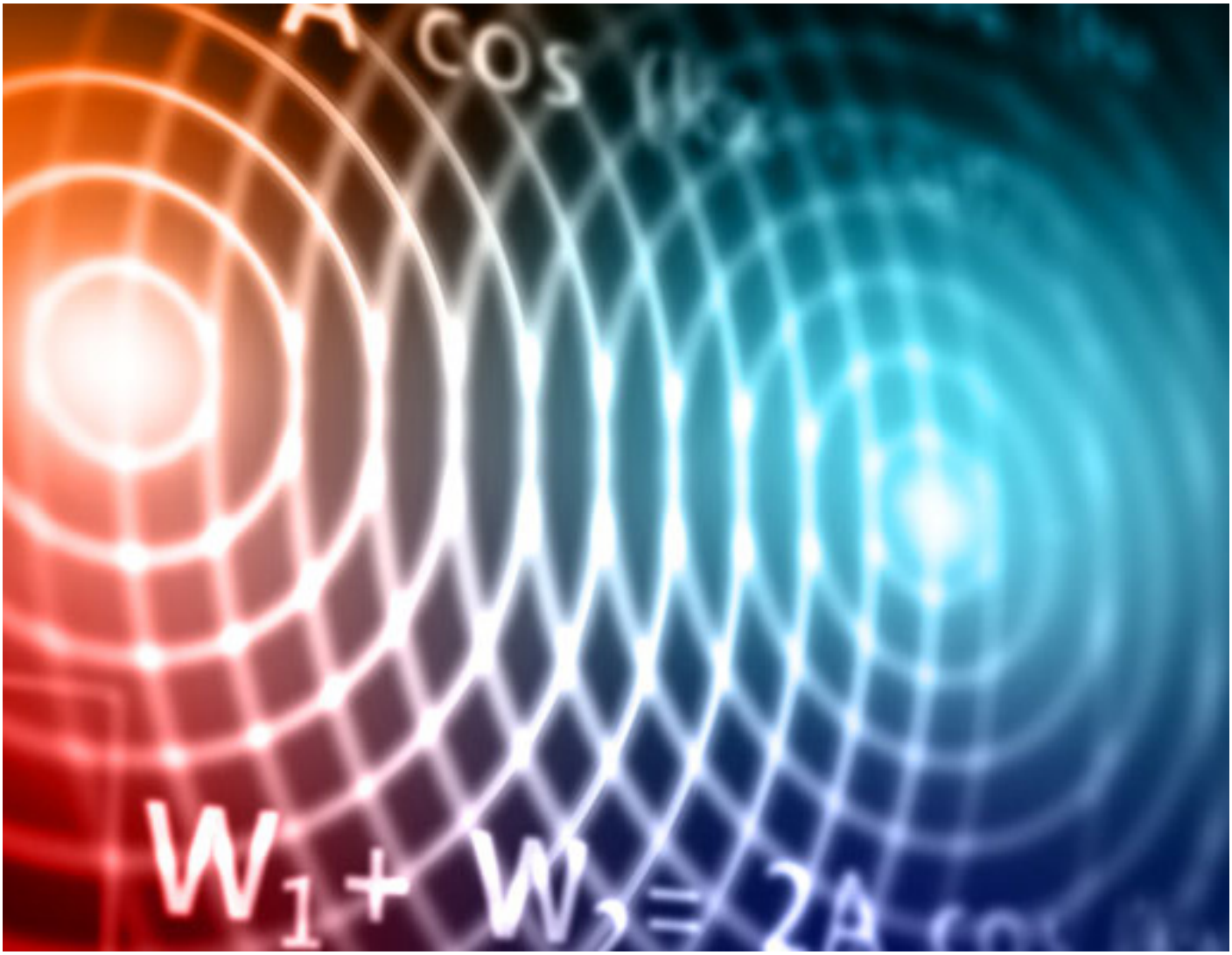
Kemtron
Proven EMC Shielding Solutions
Kemtron Ltd. is now part of
TE connectivity

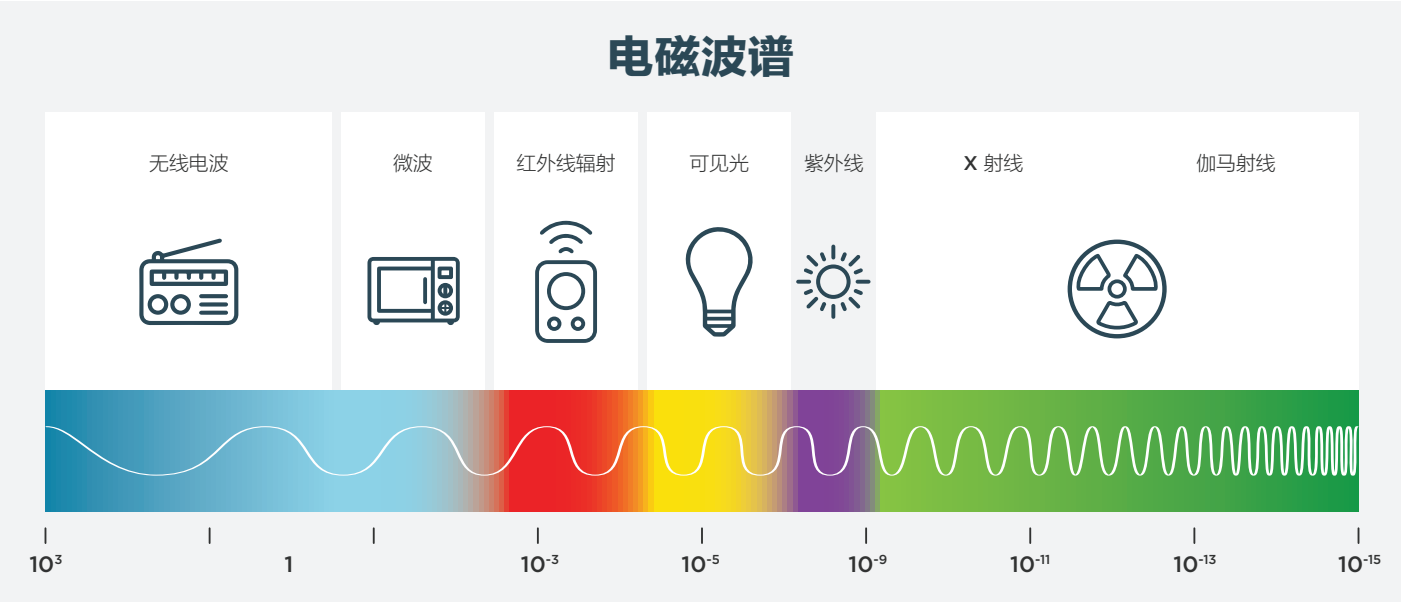
电磁干扰屏蔽

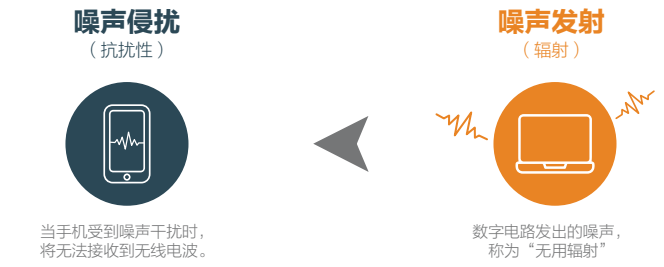
工程设计趋势、见解和设计注意事项的关键部分



简介

当外部电源在电气通路或电路中造成噪声或干扰时，会产生电磁干扰 (EMI)，也称为无线电频率干扰 (RFI)。必须屏蔽此类干扰，以防电子设备因 EMI 而出现故障。此类故障从轻微故障（汽车无线电上的噪音）到严重故障（安全设备故障而导致的相关事故）不等。

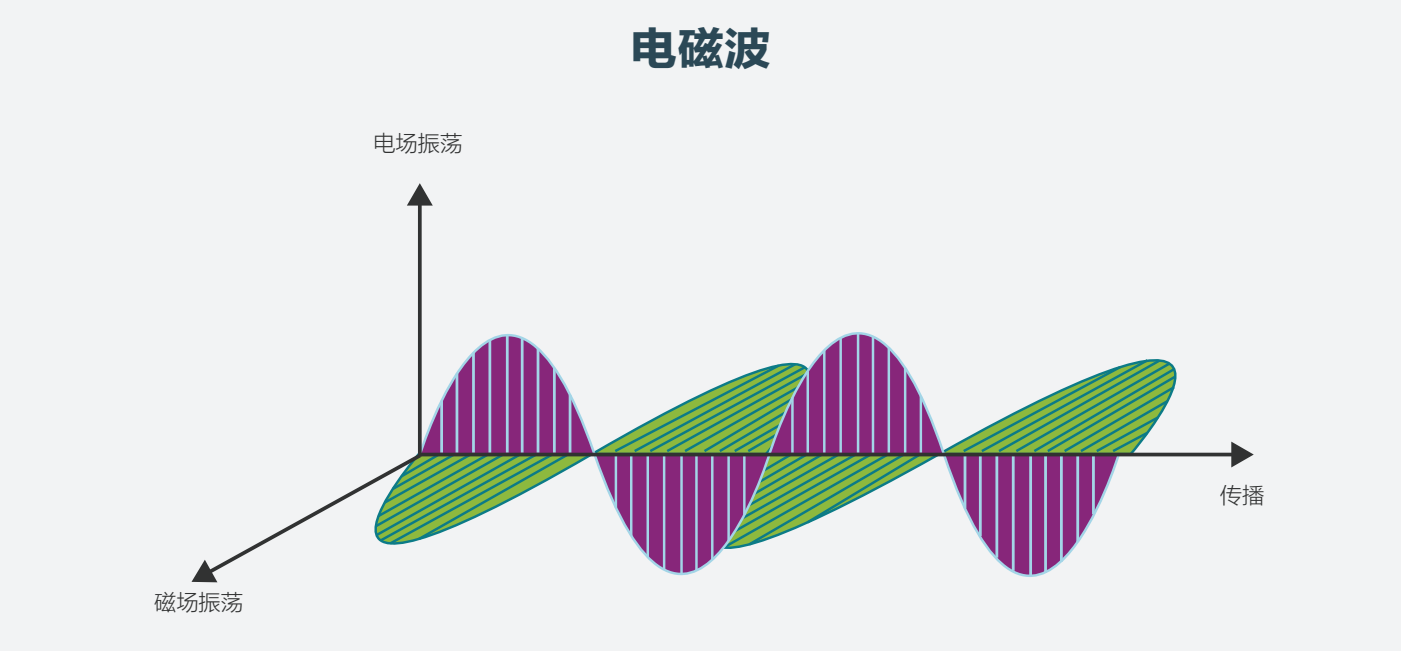




(a) 当电脑成为噪声源时

(b) 当电脑受噪声影响时

随着技术的发展，EMI 屏蔽变得越来越重要。迫在眉睫的第五代无线技术 (5G)、物联网 (IoT) 覆盖范围的扩大、以及电气化运动的不断发展都对 EMI 屏蔽产生了影响。EMI 屏蔽是工程设计的关键部分，从 PCB 布局到结构设计的所有层面都应加以考虑。无论是商用、能源、国防还是其他应用，为满足需求，工程师们在设计阶段都会面临一系列的屏蔽选项。本白皮书旨在让工程师们了解技术进步将如何挑战现有的 EMI 屏蔽方法，并详细介绍市场上已有的材料。



市场动态和趋势

物联网和 5G

Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG) 将物联网定义为：更多的“事物或对象”被接入互联网，而不仅仅是与人连接[i]。据 IBSG 估计，物联网诞生于 2010 年左右，当时的全球人口数量达到了 68 亿，人均联网设备数量为 1.84 台[ii]。此后，物联网就在个人和专业领域稳步融入我们的世界。在我们的家中，通过智能手机控制照明和暖通空调 (HVAC) 或查看前门监控视频变得越来越普遍。同样，在我们的工作地点，物联网实现了机器、车辆和系统的连接。

一些人认为 5G 是物联网技术的关键推动因素[iii]。随着 5G 技术的诞生，数据传输速度有望更快，且连接性有望更强。将 5G 技术引入工业将极大地推动物联网的发展。作为无线网络，物联网环境中没有电缆，十分适合应用 5G 技术，提高了灵活性并改善了生产布局。5G 技术极高的速度将有望消除滞后并提高生产率。

与前几代的频率相比，5G 网络的频率有所增加。在美国的四大移动运营商中，5G 推广第二阶段的频率在 2.5GHz 至 3.7GHz 的中频范围内[iv]。在欧洲，监管机构确定了 5G 适用的频段为 3.4-3.8GHz，这也是 5G 的主频段。24GHz 至 86GHz 毫米波段的高频传输，需要更高的数据速率。随着 5G 的推进，预计还会使用更高的频率。与 4G 相比，5G 频率和数据速率高，因此需要更多基站。

数据速度提高会导致噪声和热量同步增加。更好的连接性可支持更多的无线设备，从而产生更多的信号，并使得连接器热量增加。所有这些与 5G 相关的变化都更加强调适当的 EMI 屏蔽的重要性，随着 5G 的发展，工程师们将面临速度更快、连接能力更强和频率更高的设计挑战。

电气化

除了 5G 技术和物联网带来的挑战外，电气化的发展趋势也为工程师们带来了 EMI 相关挑战。政府对内燃机替代品的倡议推动了车辆电气化进程 — 从个人车辆到长途卡车、厢式货车、农用设备和飞机[v]。

通过设计，电动车辆的大量电子元件被限制在了某一空间中。电动汽车中的电池是 EMI 的潜在来源。全电动汽车的两个电池组（牵引和辅助电池）、直流/直流 (DC/DC) 转换器和其他系统组件之间存在电磁场。其他类型的电动汽车，即混合动力电动汽车、插电式混合动力电动车和燃料电池电动车，带有辅助电池，因此对 EMI 也很敏感。关于电动车的 EMI 屏蔽，工程师还必须关注与电池相关的热量和可燃物。与日益增多的非电动车一样，电动车可以容纳导航系统和安全应用，如高级驾驶员辅助系统，该系统也依赖于不间断的射频信号，因此也会产生 EMI[v]。

除了电动车自身的 EMI 问题。由于存在交流 (AC) 和直流磁场，充电站 (ECS) 是 EMI 的一种来源。ECS 的板载电子设备也需要屏蔽 EMI。此外，电动汽车易受外部 EMI 来源的影响，包括车库门开启器和手机等常见家用物品，以及太阳风暴和高压输电线等不太常见的来源[v]。

信号完整性和电磁兼容性

信号完整性和电磁兼容性 (EMC) 可视为工程设计中独立但相关的两部分，每个部分都具有一套独特的要求。信号完整性用来衡量驱动端和接收端之间的信号传输质量。为了保持信号完整性，必须确保符合时限，并且信号保持在电压阈值范围内，以免损伤发送和接收设备。与 EMC 不同，信号完整性没有标准。恰当的信号完整性的主要要求是最终产品在其预期应用中正确运行[vi]。

使用模拟工具对于开发具有良好信号完整性的产品而言至关重要。信号完整性模拟成本低廉且易于执行，可降低故障风险，在早期设计阶段进行假设分析，并提供信息以证明后期设计变更的合理性。从本质上讲，模拟有助于验证设计变更的有效性，且能缩短上市时间[vi]。

根据定义，EMC 指设备能够在其电磁环境中正常运行，而不会对环境中的其他设备产生无法容忍的电磁干扰[vii]。为了从源头上解决 EMI，电子工程师在设计中将考虑合适的电路板布局、滤波、接地和信号完整性。EMC 要求产品按照政府标准或市场驱动的辐射和抗干扰标准中的规定进行设计。为符合 EMC 规范，电路板布局必须合理排布，以防止不需要的共模电流流向连接到产品的电线。精密测试用于确保这些电流符合既定限值。以 B 类辐射测试为例，5mA 共模电流测量将导致故障[vi]。

与模拟信号完整性相比，模拟 EMC 成本昂贵且难以执行。工程师们并不是通过模拟来测试 EMC 是否合适，而是在设计时考虑到 EMC 并布置电路板实现 EMC[vi]。减少 EMI 的其他技术包括使用正确的接地方式和 EMI 滤波或屏蔽手段[viii]。在相关 EMC 标准中引用的电磁环境下测试产品也很重要[viii]。

符合 EMC 标准

随着技术进步，EMC 设计变得越来越重要。对 5G 而言，所有新系统都需要符合 EMC 法规，且要求机箱和组件具备 RFI 屏蔽功能。EMC 由全球众多机构监管，各个行业部门都有特定的 EMC 标准[viii]。**表 1** 按应用列出了常见 EMC 标准，此表并不详尽[viii]。Interference Technology 发布的更完整的列表见 https://learn.interferencetechnology.com/2022-emc-testing-guide/。设计工程师最好是在开始项目之前先查阅所在地区和行业的相关指导。

表 1： 应用/行业的通用 EMC 标准[viii, ix]

应用/行业	EMC 标准
航空航天、国防和船舶设备	DEF STAN 59-411 MIL-STD-461 MIL-STD-704 MIL-STD-1275 MIL-STD-1399
汽车零部件	IEC CISPR 25 ISO 11451 ISO 11452 ISO 7637 SAE（多个编号）

应用/行业	EMC 标准
商用级设备	FCC 第 15 部分 B 类 IEC 61000-6-1（通用） IEC 61000-6-3（通用）
工业设备	FCC 第 15 部分 A 类 IEC 61000-6-2（通用） IEC 61000-6-4（通用）
医疗设备	IEC 60601-1-2
发电站和变电站设备	IEC 61000-6-5
过程控制和测量设备 （<1000 V AC，1500 V DC）	IEC 61326-1
开关齿轮和控制齿轮（1000 V AC，1500 V DC）	IEC 60947-1
IEC：国际电工委员会；ISO：国际标准组织； SAE：美国汽车工程师学会；FCC：联邦通信委员会	

EMC 测试

无论何种行业或应用，任何电子产品上市前都必须解决 EMC 问题[ix]。EMC 测试测量产品的射频辐射水平及其对射频辐射的抗扰性。测试环境的结果将有助于工程师了解产品在真实世界中是否将产生 EMI[x]。

EMC 测试有三个主要步骤：

1. **确定适当的标准**。如前所述，适用标准因产品、应用和地理位置而异。在开始任何测试活动之前，请联系测试机构，询问哪些标准适用，或者自行充分研究标准。

2. **执行合规前测试**。为确保您的产品在正式测试之前完全不受 EMI 影响并符合能量排放标准，最好在消声室或 RFI 屏蔽罩内进行测试。为此，可租赁完全符合 EMC 要求的测试设备，如 EMI 接收机。室内合规前测试设置的详细说明、必要设备的概述以及供应商指南见 https://learn.interferencetechnology.com/2022-emc-testing-guide/。

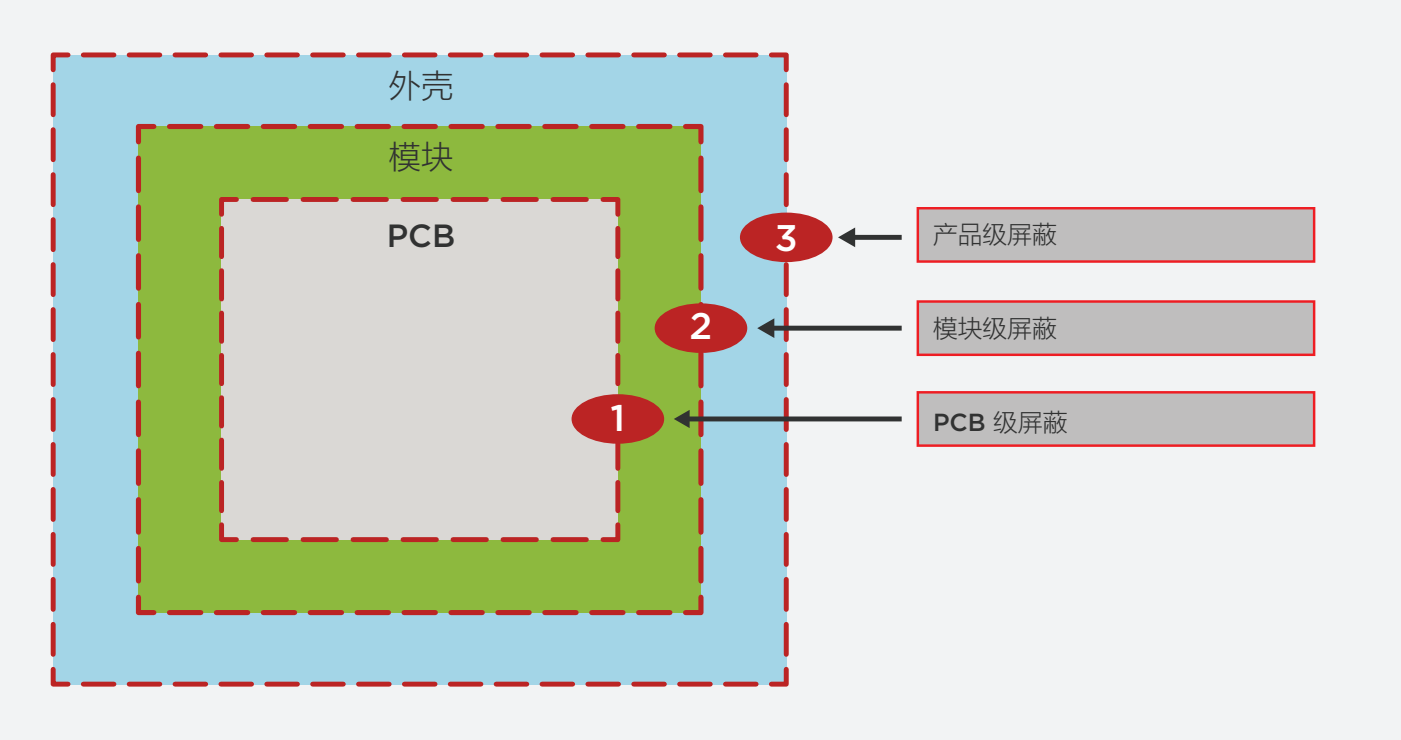
3. **选择 EMC 测试实验室**。确保您选择的实验室经过 A2LA 认证，符合 ISO/IEC 17025 标准。当您的产品投放进市场时，这一认证至关重要，它将验证您的测试结果。预定实验室时，预计至少将有几个月的滞后，请相应地规划您的合规前测试[x]。

几个用来评估产品 EMC 的基本测试。其中包括辐射及其抗扰度和传导抗扰度及传导辐射测试。辐射抗扰度测试可衡量产品在环境中暴露在电磁能量下的性能。辐射测试用于评估产品所产生的电磁干扰量。传导抗扰度测试通过电缆或导体来测量产品对来自其他产品的电磁能量的反应。传导辐射测试分析从测试产品沿着导体传输到另一产品的电磁能量。多种专用设备可供在室内进行上述各项测试。在将产品送至实验室进行 EMC 认证之前，在室内进行这些测试后可进行微调，以防产品无法通过首次认证[x]。

EMI 屏蔽级别

从设计工程的角度来看，从机箱到模块再到 PCB，在所有级别均应考虑 EMI 屏蔽。法拉第笼，或者一个防止电磁辐射进入或离开规定区域的保护装置，是不同级别 EMI 屏蔽的重要元件[xi]。

- **机箱层面**：各级组件的 EMI 屏蔽都涉及法拉第笼对来自机箱内信号的衰减。这能够最大限度地减少信号逸出后干扰环境中的其他设备，还可防止外部干扰穿透机箱。
- **模块层面**：模块级屏蔽可处理电子设备机箱内的有源元件（如驱动器、显示器等）的情况，能保护此类元件免受内部干扰。
- **PCB 层面**：PCB 级别的屏蔽包括带屏蔽罐的单个组件（如集成电路）的屏蔽，例如，为这些组件制造一个小型法拉第笼。

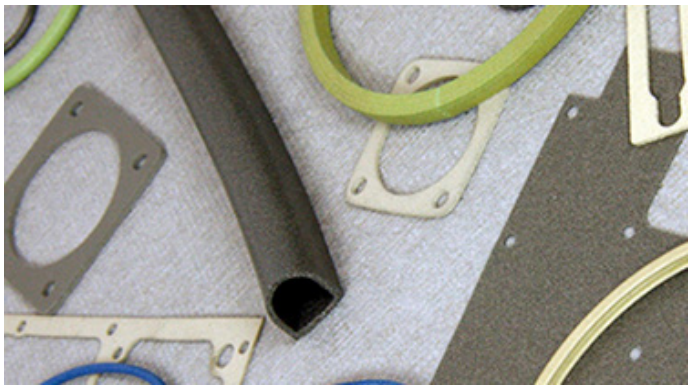


EMI 屏蔽材料类型

EMI 屏蔽有多种材料可供选择，可满足各种应用和行业的广泛需求。不同类型的材料可以应对不同的挑战，实现有效的 EMI 屏蔽。EMI 屏蔽材料的四种主要类型是：

- 纺织铁丝网
- 导电弹性体
- 导电布包覆泡棉
- 金属手指，通常为铍铜或不锈钢

纺织丝网。纺织丝网是 EMI 屏蔽的高性价比解决方案。此类屏蔽由多层导线组成，通常由蒙乃尔合金（镍和铜合金）、镀锡铜包层钢、不锈钢或铝在芯上编织而成。芯材包括硅胶海绵、实心硅胶和闭孔氯丁橡胶海绵。不同丝网材料的可用性可配合凸缘的电流兼容性，从而降低腐蚀的可能性。纺织丝网可制作成复杂形状，并可作为 O 形圈安装到沟槽中。
粘接到支架时，纺织丝网也可安装到表面，实现防尘和防潮密封。此类屏蔽非常适合用于机柜门、盖子和可拆卸盖板。在纺织丝网的屏蔽效果开始下降超过 1GHz 时，需要增加更多层丝网。



导电弹性体。EMI 屏蔽的另一种性价比较高的选择是导电弹性体，其采用多种材料制成，适用于各种应用。此类材料包括硅胶或氟硅酮中的镀银铝、铜或玻璃，以及硅胶或氟硅酮中的镀镍石墨或纯镍。每种材料在所有频率下的性能都很出色。作为最受欢迎的材料，镀镍石墨和镀银铝的比重较低，比铜基或镍基填料性价比更高。但镀镍石墨比镀银铝便宜三到五倍。与纺织丝网相比，导电弹性体还可通过多种导电填料确保电流兼容性。导电弹性体有片状、平垫圈或 O 形圈可供选择。氟硅橡胶具有耐燃油和耐油的特性，是严苛环境中的理想选择。硅树脂产品中的镀镍石墨有经 UL94-V0 文件编号 E344902 批准的阻燃版本。

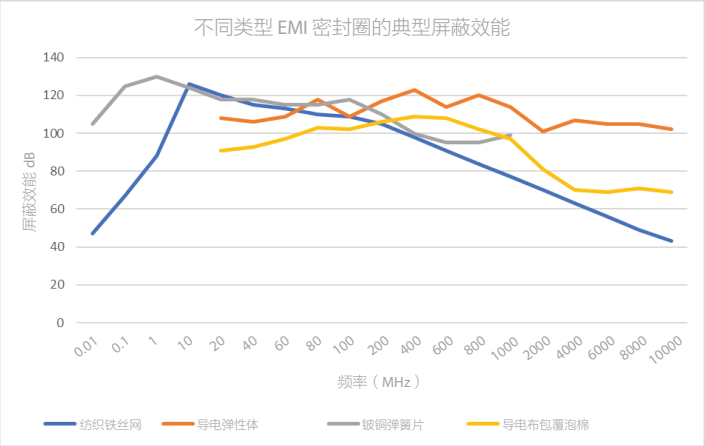
其他两种类型的导电弹性体包括原位成型垫圈和硅树脂中的定向导线。原位成型导电弹性体由液态导电硅树脂制成，可直接用于机箱硬件中。材料包括硅胶和镀银铝、铜或硅胶镍的镀镍石墨。原位成型导电弹性体也可用非导电硅树脂制成。原位成型导电弹性体非常适合垫圈面积最小的小型机箱，可实现防尘和防潮密封。

硅树脂中的定向导线是一种扁平的硅树脂薄片材料，嵌入垂直方向的蒙乃尔合金或铝线中。硅胶定向导线是电磁脉冲的绝佳屏蔽选项，可实现环境密封。变体包括实心闭孔硅树脂、软质实心硅树脂、海绵硅树脂和固态氟硅橡胶以及不同数量的导线。

导电布包覆泡棉。这种 EMI 屏蔽装置由导电镍/铜或镀银聚酯或尼龙导电布包覆着软聚醚聚氨酯泡棉芯组成。导电布包覆泡棉有多种不同的形式，可广泛用于各类应用，包括商业级应用。导电布包覆泡棉可提供高达 10GHz 的有效屏蔽。虽然这种类型的屏蔽无法实现防水密封，但能实现一定程度上的防尘密封。

簧片。由于具有机械弹簧特性和高导电性，大多数由铍铜制成的簧片对于机柜和门或其他经常接触的区域来说是实用的 EMI 屏蔽选择。有多种电镀表面可选，可解决电流兼容性问题。簧片有各种可焊接和不可焊接表面，可选择金、银、亮锡、亮镍、锌和化学镍。簧片。由于具有机械弹簧特性和高导电性，大多数由铍铜制成的簧片对于机柜和门或其他经常接触的区域来说是理想的 EMI 屏蔽选择。有多种电镀表面可选，可解决电流兼容性问题。簧片有各种可焊接和不可焊接表面，可选择金、银、亮锡、亮镍、锌和化学镍。

屏蔽效能



纺织铁丝网
可实现 H 场（磁场）屏蔽 62dB @ 10Khz。SE 在 1GHz 之后下降

导电弹性体
屏蔽频率范围广，>100dB 至 10GHz 电场。

导电布包覆泡棉
屏蔽频率范围广，>100dB 至 10GHz 电场。

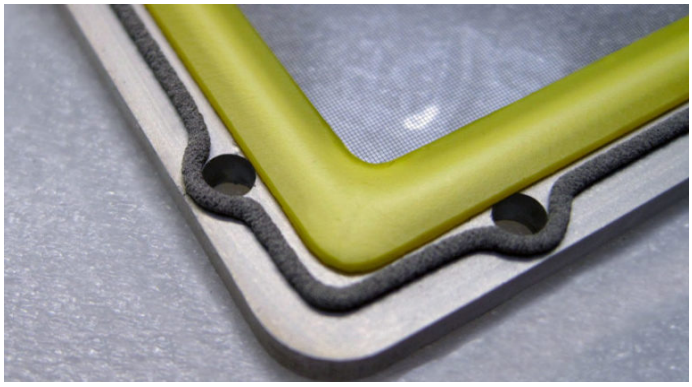
铍铜合金簧片
屏蔽频率范围广，>100dB 至 10GHz 电场。

EMI 屏蔽的几个其他选项包括蜂窝 EMI 通风口、 EMI 屏蔽的光学窗口和 EMI 电缆密封套。

蜂窝 EMI 通风板。蜂窝空气通风板由放置在刚性挤压铝制安装框架中的铝质蜂窝状箔片组成。成型并层压成一系列蜂窝单元（在连接处进行胶粘和穿孔或激光焊接）的箔片确保了每个连接处的导电通路。虽然箔片在各个方向都是导电的，但为了提高 EMI 性能，建议使用两片互相呈 90°极化的蜂窝。

框架可以配备一体式或单独的 EMI/RFI 密封圈，并且可以通过各种表面处理来实现腐蚀保护或提高电导率。原理是“超过截止频率的波导”。蜂窝通风板由一系列小管道组成，它们充当波导，将电磁波导入或导出机箱，但当管道长到一定程度，波会衰减。通常，管道长度至少应是管道直径的三倍，四倍会是更好的选择。因此，直径 3.18mm 的蜂窝应长 12.7mm。之所以使用蜂窝材料，是因为其屏蔽性能强、重量轻且空气流动性良好。

通风面板设计适用于需要良好的空气流动进行冷却和通风的应用，但必须确保符合 EMC 规范的电子设备机箱。典型应用包括电子设备机箱、空调装置、风扇外壳、EMC 机架和通信屏蔽装置。



EMI 屏蔽的光学窗口。EMI 屏蔽窗可为机箱提供高性能 EMI 屏蔽，同时保持最佳的光学透明度。EMI 屏蔽窗作为被屏蔽的机箱的一部分提供 EMI 屏蔽，可实现辐射防护和易感性防护。屏蔽窗为查看显示设备（如 LED 和 LCD）提供了良好的透明度，还可作为机箱的前面板，提供冲击保护、显示屏对比度增强、显示屏颜色匹配、防反射和防眩光表面。屏蔽窗可为笔记本电脑和小型显示屏等各种应用提供 EMI 屏蔽。此外，大型窗口可为建筑（如电脑机房、屏蔽的房间、核磁共振室和安全通信室）提供透明的 EMI 屏蔽。

此类光学窗有两种配置：

- **夹层窗**：夹在两个光学基底之间非常细密的编织丝网，使用聚氨酯夹层将其层压在一起
- **铸件窗**：嵌入铸造基材中的非常精细的丝网

EMI 电缆密封套。电缆密封套可为穿过机箱壁的屏蔽电缆提供出色的 EMI 屏蔽。其由黄铜制成，可适应不同尺寸的电缆。它们还能为电缆提供传统的应力消除。

EMC 电缆密封套由四部分组成：主体、端帽、锁紧螺母和网状橄榄形。电缆入口系统密封套使用丝网状橄榄环，其由硅胶芯上的纺织丝网包覆着硅胶芯组成。当端帽拧紧到主体上时，向电缆和密封套主体提供周向压力，两者之间的导电性因此非常出色，可实现良好的射频和电磁屏蔽。

EMI 屏蔽应用

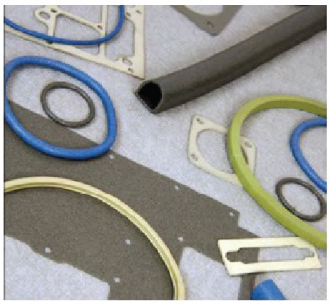
从航空航天和国防到数据通信/物联网、汽车和医疗等广泛的应用和行业，EMI 屏蔽不可或缺。**表 2** 概述了众多应用和行业中使用的 EMI 屏蔽材料，虽然此表并不详尽。

表 2： EMI 屏蔽材料类型（按应用和行业）

材料	应用	行业
纺织丝网	门密封条 检修面板密封 频繁进入的区域	航空航天、国防和船舶 数据通讯 能源 工业 医疗
导电弹性体	工业控制仪器 军用设备 航空电子设备 医疗电子产品 电子设备机箱	航空航天、国防和船舶 汽车 数据通讯 能源 工业和商业级物联网 医疗 运输
导电布包覆泡棉	柜门 面板垫圈 接地端子 卡笼垫圈 连接器和 IO 垫圈	数据通讯 物联网 医疗
簧片	柜门 检修面板 屏蔽室和容器中的工作人员检修门 屏蔽室 接地端子	数据通讯 物联网 医疗

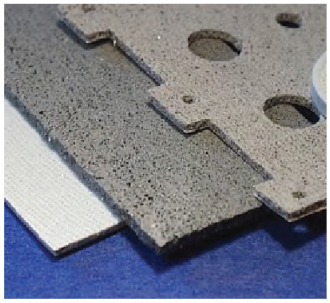
要点回顾

随着技术的进步，包括 5G 的扩大部署和物联网的扩大覆盖范围，对 EMI 屏蔽的需求越来越高。工程师必须在设计初期就考虑到 EMI 屏蔽。从机箱到模块再到 PCB，每个层面都应实现 EMI 屏蔽。在工艺早期考虑屏蔽的优点包括：避免效率低下、避免成本高昂的重新设计，以及防止产品上线延迟。不同的屏蔽材料可用于 (TE) 具体的应用 — 每种都非常适合应对不同的 EMI 挑战。TE Connectivity 拥有广泛的 EMI 屏蔽材料产品组合，我们可以成为您的最理想合作伙伴，为您的项目选定最合适的材料。



导电弹性体

标准硅胶温度范围很广，且抗压缩形变。氟硅橡胶具有出色的耐燃油性和耐溶剂性。



金属定向丝硅胶材料

具有卓越的屏蔽能力和 EMP 存活能力，可实现环境密封。

纺织丝网

用纺织丝网垫圈作为 EMI 垫圈性价比非常高，可在磁场和电场中提供屏蔽。

EMI 屏蔽通风面板

由安装在框架中的铝蜂窝制成。

参考文献

i. Wright, Gavin. What is an Electromagnetic Interference? 网址：**https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/electromagnetic-interference#:~:text=Electromagnetic%20interference%20(EMI)%20is%20unwanted,natural%20or%20human%2Dmade%20sources**。2022 年 12 月 8 日访问。

ii. Evans, Dave. The Internet of Things. 互联网的下一次演变如何改变一切。2011 年 4 月。网址：**https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf**。2022 年 11 月 15 日访问。

iii. Alsulami, Mashael M. and Akkari, Nadine.5G 无线网络在物联网 (IoT) 中的作用。2018 年第一届计算机应用与信息安全国际会议 (ICCAIS)，2018 年，第 1-8 页，doi：10.1109/CAIS.2018.8471687. 网址：**https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8471687**。2022 年 11 月 14 日访问。

iv. Sha, Arjun. 美国 Verizon、AT&T、Spring 和 T-Mobile 的 5G 频段列表。2022 年 9 月 3 日。网址：**https://beebom.com/list-5g-bands-us-verizon-att-sprint-t-mobile/**。2022 年 11 月 27 日访问。

v. Testo, Dominic J. EMI Shielding for Electric Vehicles.Ballston Spa, NY: 特种有机硅产品。

vi. MacArthur, Don. 信号完整性与 EMC 的关系。2022 年 9 月 30 日。

vii. TUV SUD.EMC 与 EMI 测试。网址：**https://www.tuvsud.com/en-us/services/testing/electromagnetic-compatibility-testing#:~:text=EMC%20testing%20measures%20the%20ability,to%20anything%20in%20that%20environment**。2022 年 12 月 8 日访问。

viii. Cadence 系统分析。EMC 标准列表：通用标准及其重要性。网址：**https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-the-emc-standards-list-common-standards-and-their-significance**。2022 年 12 月 7 日访问。

ix. 干扰技术。2022 EMC 测试指南。网址：**https://learn.interferencetechnology.com/2022-emc-testing-guide/**。2022 年 10 月 21 日访问。

x. 高级测试设备公司。什么是 EMI/EMC 测试？网址：**https://www.atecorp.com/solutions/emc-testing**。2022 年 12 月 7 日访问。

xi. O’Callaghan, Jonathan. 什么是法拉第笼？2021 年 12 月 2 日。生命科学。网址：**https://www.livescience.com/what-is-a-faraday-cage**。2022 年 11 月 13 日访问。

te.com

© 2023 TE Connectivity Ltd. 及其下属公司。保留所有权利。

TE Connectivity、TE connectivity（徽标）、TE 和 Kemtron Proven EMC Shielding（徽标）是 TE Connectivity Ltd. 及其下属公司拥有或授权的商标。此处提及的所有其他徽标、产品和/或公司名称可能是其各自所有者的商标。

本手册中的信息，包括为说明产品目的而使用的图纸、插图和图表，据信为准确的信息。但是，TE Connectivity 不对该信息的准确性或完整性做出任何保证，也不对该信息的使用承担任何责任。TE Connectivity 的义务仅限该产品的 TE Connectivity 标准销售条款和条件中所规定的内容，并且在任何情况下，TE Connectivity 均不对产品销售、转售、使用或误用造成的偶然的、间接性的或结果性的损失承担赔偿责任。TE Connectivity 产品用户应自行判断各产品是否适合具体应用。

01/23　初版