

TEM 小室和 GTEM 用于辐射发射和辐射抗扰度

一致性预测试使用指南

当您正在寻找用于 EMC 一致性预测试的经济高效的台式工具时，没有什么产品可以接近 TEM 小室的实用性。

TEM 小室（或 GTEM）可能仅由[电流探头](#)辅助，提供了一种测量产品发射的低成本方法，并且有助于使您的产品受到辐射场的影响。

在某些情况下，GTEM 甚至被 FCC 接受用于被测设备。

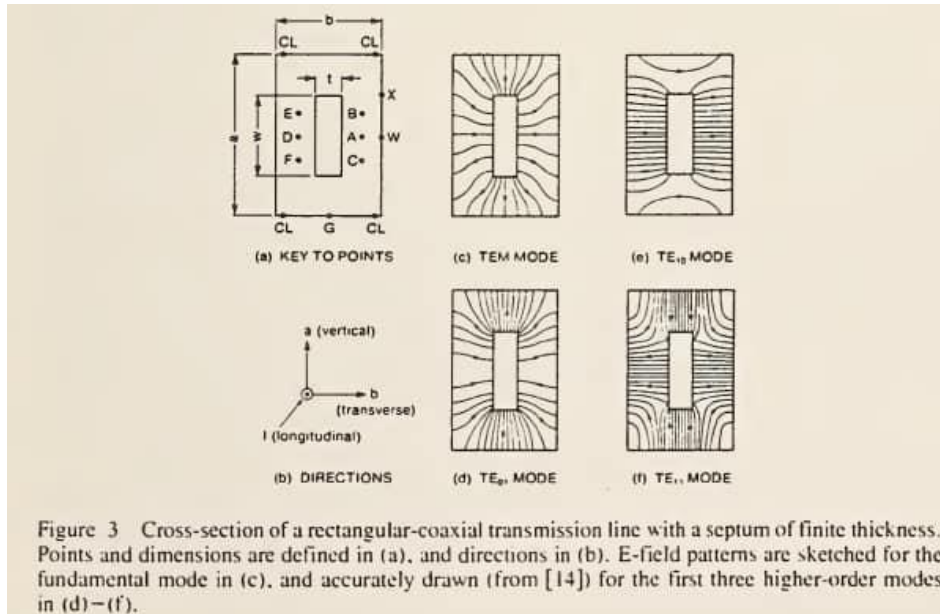
在本文中，我们将介绍：

- 什么是 TEM 小室？
- TEM 小室有什么用？
- 使用 TEM 小室进行辐射发射测试
- 使用 TEM 小室进行辐射抗扰度测试
- 使用 TEM 小室进行 EMI 故障排除
- 不同类型的 TEM 小室
- GTEM 用途
- GTEM 与 OAT 的相关性
- FCC 的 GTEM 规则

什么是 TEM 小室？

“TEM”代表“横向电磁（模式）”。这意味着什么？那么，电磁辐射的横模是垂直于（即横向）辐射传播方向的平面中辐射的特定场模式。TEM 单元是一种矩形同轴传输线，两端逐渐变细，形成一种专门设计用于在给定频率范围（通常为直流到几百 MHz）内创建 TEM 模式的几何形状。

TEM 小室的有用频率范围由其几何形状决定，但通常遵循以下规则：TEM 越大，可用频率上限越低。在某个截止频率之上，会创建更高阶的模式（如下所示），这使得整个测试体积的任何测量都不太稳定。



[TEM 小室因共振而产生的带宽限制] DOUGLAS A. HILL

“也许解释 TEM 的最简单方法是通过它的作用：TEM 允许您测量产品的辐射场强，以及让产品承受给定的场强。”



TEM 小室的主要方面如是上图所示（从技术上讲，这是一条“三板线”或“三板开放式 TEM 小室”，因为它在顶部包含一个额外的接地板），它们包括：

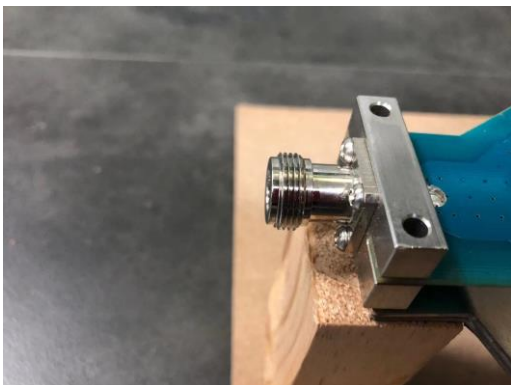
- RF 连接器：用于连接到同轴电缆，同轴电缆又连接到频谱分析仪或信号发生器/功率放大器，具体取决于它是用于发射测试还是抗扰度测试。
- 外屏蔽层：连接到所附同轴电缆的屏蔽层。在所示的这个三板模型上，有两个接地板。从技术上讲，TEM 小室只需要一块接地板。
- DC 直流隔离器：用于保护分析仪的敏感输入，以防隔垫意外施加直流电压。
- 隔膜：中心导体。
- 50 欧姆负载：这是传输线的终端。与任何传输线一样，如果没有适当的端接（即大的不匹配负载），您将得到信号反射。

TEM 小室构建

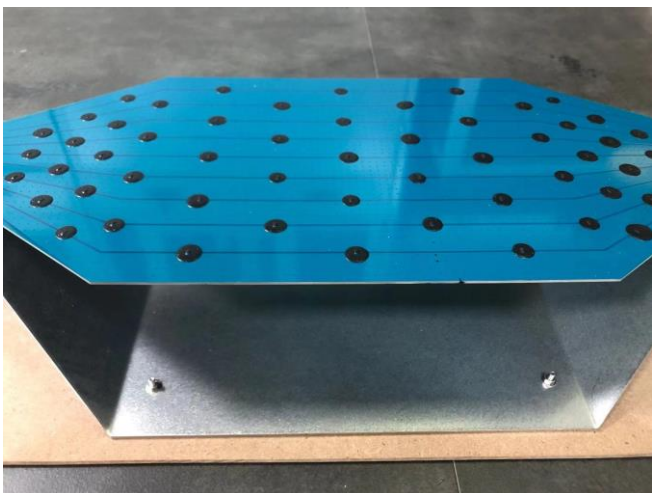
下面详细介绍了 TEM 小室的制作方法。为此，我拆开了我的 TekBox TBTCx 单元并拍了几张照片：



TEKBOX TBTC1



标准 50Ω 同轴电缆连接到 TEM 一个端口上的 N 型连接器
及同轴电缆的屏蔽层展开到 TEM 小室的外板中

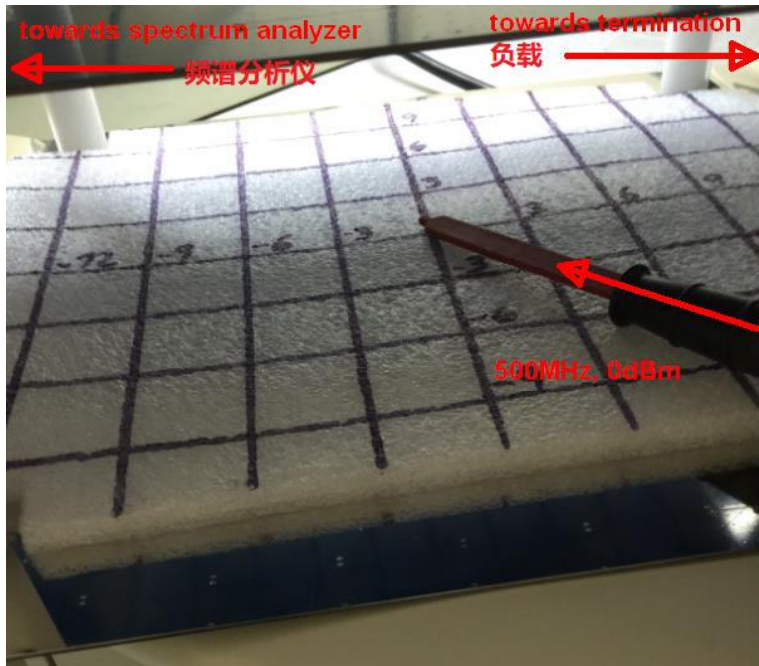


电缆的中心导体也张开到电路板上的浸铜区域，形成 TEM 的“隔膜”

该设计使得电场线在隔膜和外板之间相当均匀。

在外屏蔽和被测产品所在的隔膜之间创建了一个“测试体积”。在此测试体积内，测量结果相当均匀，误差在几个 dB 以内。

TekBox 的数据显示，在 12 x 12 x 9cm 的体积内，500 MHz 测试信号的测量值变化大约为 -4dB 至 +5dB。在 EMC 的世界里，这是相当稳定的。



测试体积内场均匀性的表征

TEM 小室有什么用？

在下面的部分中，我将深入探讨 TEM 单元的所有各种用例。

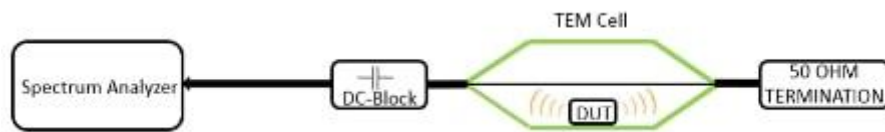
使用 TEM 小室进行辐射发射预一致性测试

TEM 小室的主要功能之一是测试从 DUT（被测设备）发出的辐射场。工程师们一直在寻找这种虚幻的方法来确定他们的产品是否会在测试实验室通过或失败。近场探头不会这样做，因为没有相位信息就不可能从近场准确地推断到远场。

穿过 TEM 单元的波具有大约 377Ω 的自由空间阻抗（最高频率边界），这恰好是在自由空间中传播的远场平面波的阻抗。在 OATS（open area test site）或半电波暗室中，测量天线放置在 3m 或 10m 的间距，分别对应放置在 100MHz 和 30MHz 对应频率的远场。因此，使用 TEM 小室进行的测量与在完全合规测试实验室进行的测量有密切关系。

顺便说一句，这个 377Ω 的自由空间阻抗描述了电场 (V/m) 和磁场 (A/m) 之间的关系，其方式类似于 377Ω 的电阻将电压 (V) 与根据欧姆定律的电流 (I)。对于完全合规的辐射发射测试，测量传感器通常是对数周期、双锥形或喇叭天线，它们都对电场敏感。由于这种自由空间阻抗，我们可以同样地测量我们的 EUT 的磁场，但就天线的尺寸和形状等实用性而言，使用电场天线对我们来说要方便得多。

辐射发射测试设置



辐射发射 TEM 小室测试装置

TEM 小室的优点之一是它的简单性。通过可选的 DC 模块将一个端口连接到频谱分析仪，将另一个端口连接到终端电阻，并将您的产品放在隔膜和外导体之间，然后您就可以开始测量了。

将您的频谱分析仪调谐到感兴趣的频率范围，您很快就会看到是否有任何可疑的发射。

环境噪音

如果您使用的是开放式 TEM 小室，那么您可能还会看到环境噪声信号，例如 FM、Wi-Fi 和手机无线电传输。开放区域测试站点也存在此问题。要确定排放是“环境”还是来自 EUT，您可以使用多种技术：

- 关闭 EUT。如果发射消失，则它来自 EUT。
- 移动/旋转 EUT 并查看发射幅度是增加还是减少。
- 降低分析仪的跨度以仅关注一个峰值 (eh 跨度 = 1 MHz) 并将分辨率带宽 (RBW) 降低至 10 kHz 或更低。这通常会揭示隐藏在较高 RBW 环境后面的发射。

本底噪声

TEM 的一个常见问题是来自 EUT 的发射可能不够强，无法在频谱分析仪屏幕上显示的本底噪声之上检测到。有几个选项可以提高测量灵敏度：

- 如果您的 EUT 尺寸允许，请使用更小（更灵敏）的 TEM。
- 在 TEM 和频谱分析仪之间插入一个前置放大器。常见的前置放大器增益为 20dB 或 40dB。采用更高增益的风险是频谱分析仪输入级饱和或损坏。
- 将频谱分析仪中的内部填充衰减减少到零。
- 降低频谱分析仪的 RBW 设置。
- 使用屏蔽 TEM（有关详细信息，请参阅下面的部分）。

在所有这些方法之间，您应该能够看到所有感兴趣的窄带和宽带发射。

TEM 用于辐射发射测量的局限性

如果 TEM 能够准确地告诉我们的产品是否符合法规限制（如 FCC 的辐射发射限制），那就太好了。

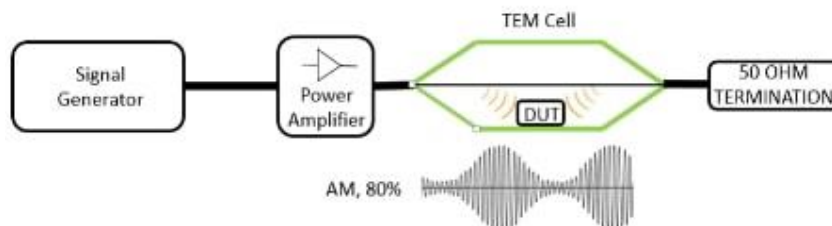
有一些问题使这有点挑战（但并非不可能！）：

- 导致 RE 故障的辐射元件（尤其是低于几百 MHz 的频率）通常是连接到 EUT 的电缆。在小型甚至较大的 TEM 中，电缆布局对测量幅度起着重要作用。这就是我建议将 TEM 小室与电流探头配对的原因。
- 发射往往是定向的（与各向同性相反），这意味着 EUT 在 TEM 中的方向可以极大地影响测量。在某些 GTEM 中，制造商试图通过自动化测量过程来解决这个问题。他们在 X、Y 和 Z 方向上对 EUT 进行测量，并将测量结果组合起来产生一个值，他们声称该值与远场测量具有良好的相关性。有关 GTEM 和相关性的更多详细信息，请参见下文。

使用 TEM 小室进行辐射抗扰度测试

TEM 小室的另一个常见用例是辐射抗扰度测试。

信号发生器和功率放大器连接到一个端口，50Ω 终端电阻同样放置在第二个端口。



辐射抗扰度 TEM 小室测试装置

在这种配置中，在隔膜和外屏蔽之间建立了一个非常稳定的场。

在 TEM 的隔膜和屏蔽之间以伏特每米 (V/m) 测量的电场由以下简单方程式给出：

E = V/d 其中 V 是所施加信号的 RMS 电压，d 是隔膜与下（或上）导电平面之间的距离。这是基于电场完全均匀（即均匀分布）的简化假设。

一个更实用的公式是：

E = V*Cor/d，其中 Cor 是 EUT 体积内平均场强的校正因子，该校正因子源自对横截面上场分布的分析。

特别是对于 TekBox TBTC1，假设 EUT 放置在小室的中心以及底板和隔膜之间的中间，可以使用以下公式来获得足够的精度。

d = 5cm E = (√(P*50Ω))*20

d = 10cm E = (√(P*50Ω))*10

d = 15cm E = (√(P*50Ω))*6.66

这会产生以下场强：

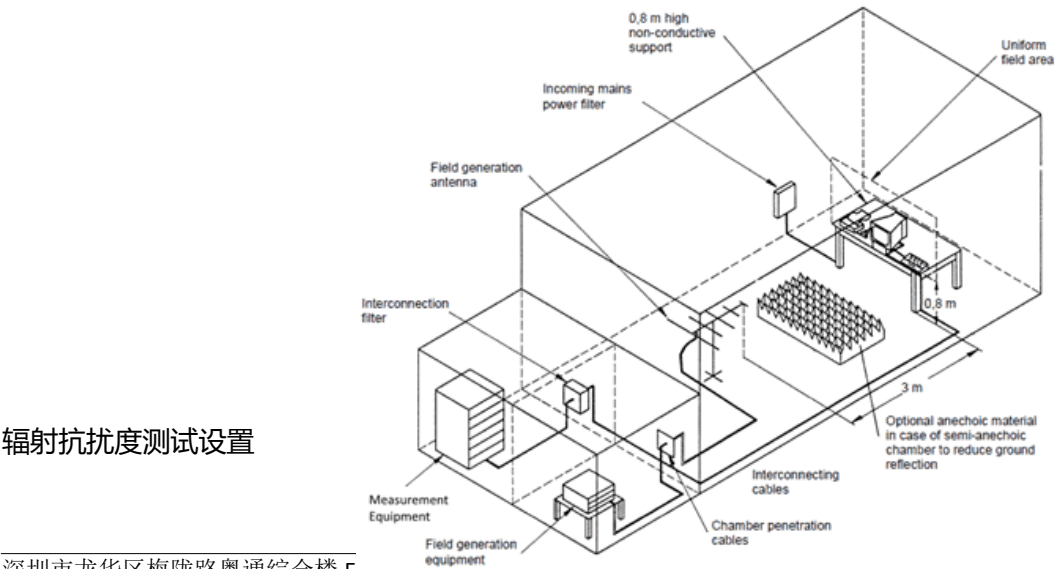
TBTC1, applied RF power	Maximum field strength between septum and wall
10W (40 dBm)	447 V/m
1 W (30 dBm)	141 V/m
0.1 W (20 dBm)	44 V/m
0.01 W (10dBm)	14 V/m

Table 1 – TBTC1, field strength vs. RF power

您在这里会注意到[相对较小的放大器](#)可以产生相对较高的场强。

仅需 0.1W，就有可能在 TBTC1 中产生 44 V/m。

在完全合规性测试实验室，等效测试设置如下所示（根据 IEC 61000-4-3）：



要在测试实验室中生成 44 V/m, 您需要:

- 电波暗室 (50 万美元 – 100 万美元)
- 2 或 3 个高功率天线
- 高功率射频放大器 (>5 万美元)

相比之下, TEM 小室看起来很划算! 这就是为什么许多制造商投资购买 TEM 小室或 GTEM 进行辐射抗扰度预一致性测试和故障排除的原因。

有些甚至使用 TEM 小室进行全面的合规性测试。

使用 TEM 小室进行 EMI 故障排除

TEM 小室对于整改也特别有用。如果您的产品在 EMC 测试实验室失败, 而您想要进行修改并测试修改的效果, TEM 将允许您在办公室进行操作, 而无需使用昂贵的测试实验室。

虽然 TEM 不允许您准确定位电路板上产生发射的位置, 但一套[低成本的近场探头](#)可以解决这个问题。当您想量化 PCB 变化的影响时, TEM 就派上用场了。

由于尺寸, 它主要用于调试 PCB 级问题。



使用 TEM 小室进行组件评估

众所周知, 来自不同供应商的看似相同的组件可能具有截然不同的 EMI 性能。这就是我真真正建议采购一些模型然后在 TEM 小室中评估它们的 EMI 性能的原因之一。您很快就能看到它们的比较情况。

此技术可用于评估组件, 例如:

- 液晶显示器
- 集成电路模组
- 电源模块

.....仅举几例。我在纸上看到具有同等规格的组件在 $\pm 40\text{dB}$ 的 EMI 水平方面有所不同。这是关键的一步。

另一个需要注意的“陷阱”是一些不道德的供应商会在您评估了他们最初提供给您黄金单元后移除“昂贵”的过滤组件。在这些情况下，您第一次批量运行的产品可能具有与您所做的预一致性测试截然不同的 EMI 性能。

使用 TEM 单元对生产单元组件与之前评估的组件进行基准测试将有助于发现这些问题。

使用 TEM 小室监测组件更改后的持续合规性

在去年的 EMC 座谈会上，我有机会请教了 EMC 讲师 Keith Armstrong，他最近注意到的 EMC 最大的趋势是什么。他的反应不是你想象的那样。

他看到的最大挑战之一是 IC 制造商正在转向缩小管芯以节省成本。在缩小芯片的过程中，转换率会降低，峰值 RF 电流需求会增加，因此辐射会增加。可能很少或根本没有提及这些模具更改，但这可能会在制造商不知情的情况下将产品从合规推向不合规。

测试来自新生产批次的单元样本并与基准结果进行比较将再次有助于发现此类问题。

使用 (G)TEM 室进行射频发射机测量



TESCOM TEM 小室

TEM 小室的另一个有用功能是允许对有意发射机进行基波和谐波发射测试。

这篇由在战壕中工作的诺基亚工程师撰写的精彩应用笔记中，Stephen Clay 描述了他在诺基亚所做的努力，将 [GTEM 中进行的测量与在室内和 OATS 中进行的测量](#) 相关联，用于他们的手机。

他发现，考虑到正确设置测试并通过在 4 个方向上进行测量，他可以获得非常好的相关性。

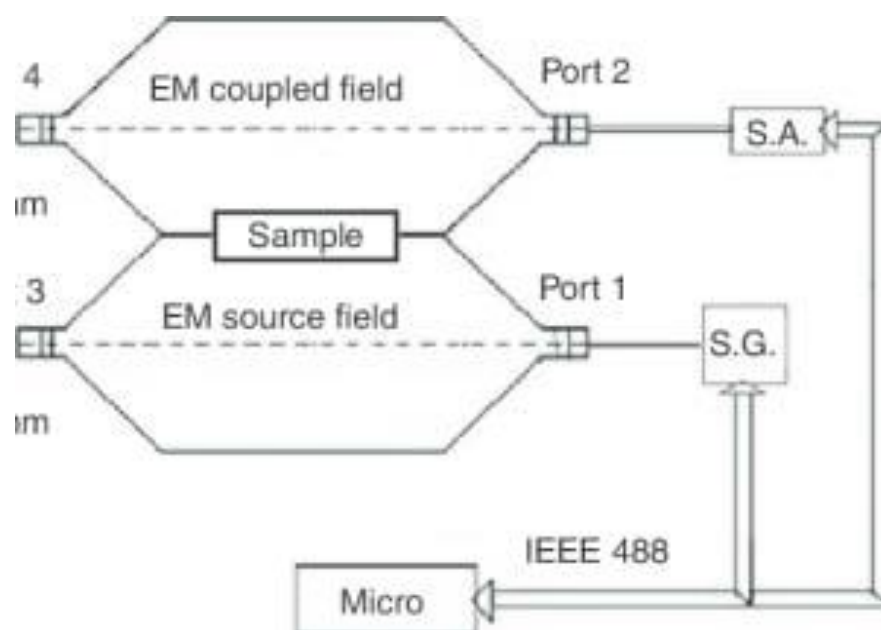
使用 TEM 小室进行各向同性场探头校准

TEM 的主要优势之一是在隔膜和外板之间产生非常稳定且数学上可预测的场强。

此属性可用于在广泛的频率范围内准确校准各向同性场探头。[K. Matloubi 的论文 “ A method for calibration of isotropic E-field probes ”](#) 描述了其中一种方法。

校准后，具有讽刺意味的是，探头随后可用于校准场，以在半消声室中进行辐射抗扰度测试。

使用 TEM 小室进行屏蔽效能测试



使用两个 TEM 小室测量材料的屏蔽效能

使用罕见的双 TEM 小室，可以在一个 TEM 中生成已知场并在另一个 TEM 中准确测量衰减场。

通过将被测材料放置在两个 TEM 之间的孔中，可以精确表征材料的屏蔽效能。

不同类型的 TEM 小室

您现在可能已经注意到，TEM 小室有多种不同类型。请阅读下文，了解每种方法的一些用途、优缺点。

打开 TEM 小室



TEKBOX TEM 小室

像图中所示的开放式 TEM 小室是一种不错的低成本选择。

优点：

- 低成本
- 重量轻，易于存放
- 大型 EUT 可以从侧面滑入
- 如果 EUT 很长，可以在其长度上的多个点进行测试
- 进/出 TEM 的电缆不需要过滤器

缺点：

- 打开以接收环境噪音
- 除非在屏蔽室或帐篷中使用，否则辐射抗扰度测试可能是非法的。
- 上限频率限制在几百 MHz，具体取决于 TEM 尺寸

封闭（屏蔽）TEM 小室



封闭（屏蔽）TEM 小室

优点:

- 减少/消除窄带环境噪声的测量
- 无需担心法律问题即可完成辐射抗扰度测试
- 整体本底噪声降低

缺点:

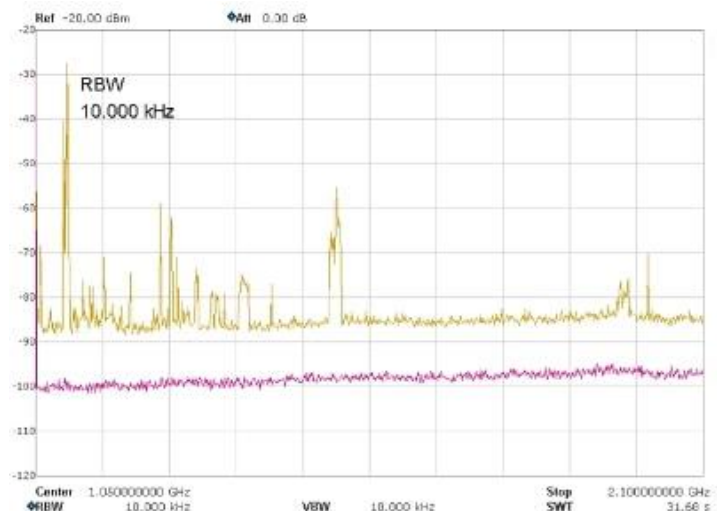
- EUT 尺寸受限于门尺寸
- 从 TEM 中取出电缆是一项挑战。未经过滤的电缆会将噪声传输到腔室内/外，因此通常需要定制滤波器面板

也可以在屏蔽罩内使用开放式 TEM。这不需要是一个屏蔽室——它可以是一个小得多的屏蔽帐篷结构，如下图所示。

下面的图是使用（粉红色）和不使用（黄色）屏蔽帐篷拍摄的。如您所见，环境音消失了，整体本底噪声降低了 10-13 dB。这使您更容易辨别您正在测试的产品的来源，以及可能暴露的辐射，否则这些辐射将被掩埋在您的测试设置的本底噪声中。



TEKBOX 屏蔽帐篷



另外, 像这样的屏蔽帐篷对汽车模块测试可能需要的**电流探头**测量的本底噪声有类似的影响。对于某些标准中指定的下限线, 在本底噪声和限制线之间获得足够的余量可能是一个真正的挑战。屏蔽室或帐篷可以帮助解决这个问题。

GTEM

如果您买不起半消声室，但仍想在内部进行发射和抗扰度测试，那么 GTEM 可能是下一个最佳选择。

我过去曾写过有关 GTEM 的文章，例如“EMC 预一致性测试指南”和“EMC 测试初学者指南”排放预一致性章节。它们是非常有用的工具，但也有其局限性。请阅读下面的一些优缺点。



优点：

- 可以容纳相当大的 EUT
- 在某些情况下可用于“完全合规”发射和抗扰度测试（见下文）
- 如果安装了“操纵器”，则可以获得与腔室/OAT 测量的良好相关性
- 测量范围可扩展至 20 GHz 左右，具体取决于型号

缺点：

- EUT 尺寸受限于门尺寸
- 电缆管理可能是一个真正的问题
- 将所有电缆进出 GTEM 所需的过滤面板
- 低频响应差会降低与低于几百 MHz 的 OATS 测量的相关性

ARCell 放大器研究

GTEM 的一个变体是来自 Amplifier Research 的 ARCell。它们不再制造，但您可能看到在外看到一个。



ARCELL 放大器研究

这些是半电波暗室和 TEM 室的混合体。ARcell 外壳的内部衬有 RF 吸收材料，形成一个独立的半消声外壳。它包括两个外发射和接收装置。内部对数周期天线用作较高频率的发射/接收设备，可选的蝴蝶结天线可用于较低频率。它允许垂直和水平极化。

优点：

- 进化设计——在细胞内产生部分 FAC
- 通过使用吸收器限制反射实现场均匀性
- 非常适合辐射抗扰度测试

缺点：

- 一般有限的排放精度
- 吸收器降低了 RF 输入效率，需要更多功率来产生必要的场强（在 80% 调制时通常高达 10 V/m)

其他的

多年来，TEM 小室/GTEM 出现了其他变体。其中包括 LaplaCell、Eurotem 和 WTEM。每个都有自己的优点和缺点。

TEM 小室与 OATS/小室的相关性

我收到的最常见问题之一是，是否可以使用近场探头或 TEM 小室来确定您的产品在 EMC 测试实验室中是否通过测试。在我上面描述的用例中，这个被称为“辐射发射预合规测试”。幸运的是，有一些关于 GTEM 与 OAT 和腔室测量相关性的良好数据。

我发现关于该主题的最详尽的论文是 “ The Use of GTEM Cells for EMC

Measurements ” ， 作者是英国国家物理实验室的 Angela Nothofer 和 Martin

Alexander 以及约克 EMC Services 的 Didier Bozec、Andy Marvin 和 Les

McCormack 有限公司

在下面从论文中截取的图表中， 您可以看到在使用 CNE 参考源的 GTEM 中从 32 MHz 到 6 GHz 测得的相关性相当不错。请注意， 要获得这些结果， 他们必须非常小心地使用测量方法。

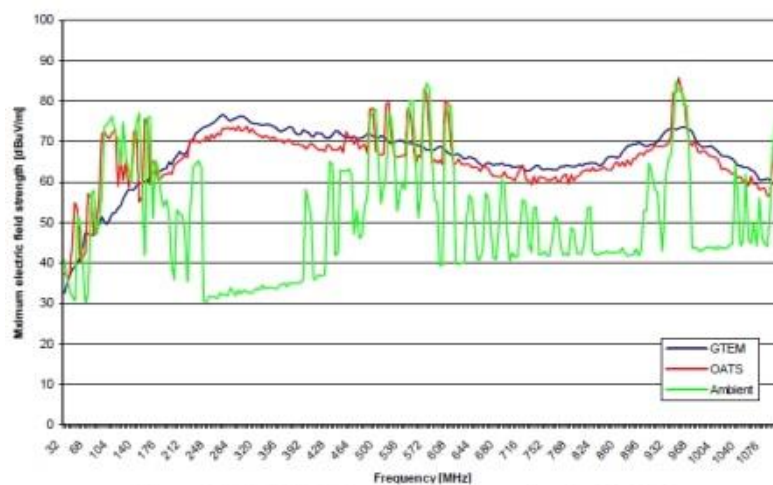


Figure 21: GTEM to 10 m OATS comparison for CNE III

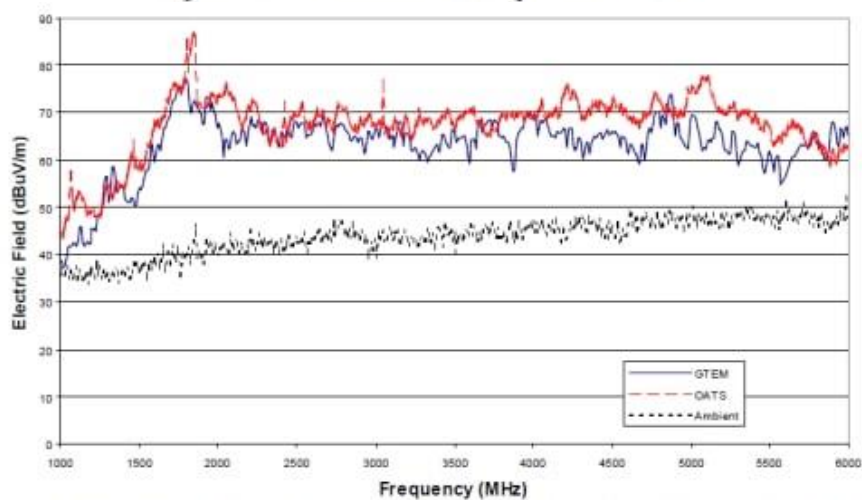


Figure 25: YES GTEM to 10m OATS comparison for the REUTE in the Slot and Gap Mode

使用 TEM 小室进行排放一致性预测试时的主要挑战之一， 主要辐射源通常不是电路板， 而是连接到电路板的电缆。这是较低频率（低于几百 MHz）的问题， 并且随着频率的增加而变得不那么重要。随着频率的增加， 主要发射模式从共模信号转向源自电路板本身的差模信号。

FCC 的 GTEM 规则

GTEM 结果与 OATS/腔室的结果之间的相关性非常好，以至于在某些情况下，FCC 将接受 GTEM 数据。

在 1993 年 12 月 2 日发布的公告 GTEM PN 40830 中，FCC 同意在有限条件下接受辐射发射测试数据，用于第 15 部分设备授权目的。这些条件是：

1. 可接受的比较测量数据必须提交给抽样和测量部门，并附有适当的分析，证明与已被列为符合 C63.4-1992 要求的开放区域试验场等效。必须为未来寻求接受 GTEM 数据的每种一般类型的被测设备（具有相似功能和物理配置的设备，例如手持式发射机、膝上型计算机等）提供比较数据。计算出的相关系数的有效性必须得到统计分析的支持。
2. 接受用于证明符合辐射发射限值的 GTEM 数据将仅限于先前已证明与开放区域测试等效的被测设备的一般类型。任何布线，无论是外部布线还是互连布线，都必须与先前的提交者等效演示相同地排列和端接。
3. 如有不同意见，以符合 ANSI C63.4-1992 第 5.4.1 和 5.4.6 节要求的开放区域测试场地进行的最终辐射发射测试为准。

然后，在 1995 年 7 月 12 日发布的公告 GTEM PN 54796 中，他们再次在有限条件下扩大了 GTEM 结果的接受范围，以包括第 15 部分以外的规则部分。

在您需要使用的测试程序和数据报告指南方面，FCC 规定了“ANSI C63.4-2014 附件 F – TEM 波导 (30 MHz 至 1 GHz) 发射测试的测试程序”和“附件 G – OATS 到 TEM 波导验证电子表格示例”。如果你想探索这条授权路线，我建议购买这个标准。

结论

如您所见，TEM 小室是任何公司都可以在其 EMC 设备库中使用的多功能工具。对于排放预一致性测试、免疫预一致性测试、EMC/EMI 故障排除、组件评估甚至 FCC 测试，TEM 单元是能够解决许多问题的出色传感器。

关于国测

深圳市国测电子有限公司是一家以 EMC 电磁兼容测试和 EMF 电磁环境检测设备及屏蔽防护一体服务供应商