编辑注：本文是一个包含两部分的系列文章，深入探讨了电磁波暗室的设计，可以作为相关主题的参考资料。第一部分介绍了 RF 吸波器在矩形远场区域中的近似。后续杂志将刊出第二部分，介绍紧凑和近场区域。

电磁波暗室设计基本准则（一）：RF吸波器近似

Basic Rules for Anechoic Chamber Design, Part One: RF Absorber Approximations

作者：Vince Rodriguez，MI Technologies；译者：冯鑫

既要全面地确定室内电磁波暗室的性能，又要避免不必要的花费或制定出矛盾的指标，对于这个任务要求的洞察力，规范的制定者并不总是具备。虽然有一些文章和书籍[1-3]讨论了电磁波暗室的设计，但是如果有一份简明扼要的参考信息和设计经验准则就更好了。本文旨在成为该主题的一个有用工具。本文首先建议了不同天线类型和工作频率适合的区域类型。提供了为所需测试和天线类型选择最佳途径的经验准则。本文集中在矩形暗室上。对吸波器的性能进行简单近似生成的一系列图表可以用作确定性能与合适设备尺寸的指南。

测试天线的能力是一个重要的设计要求，即确定能量是否在所需方向上恰当地辐射了，以及有多少能量传向了不想要的方向。测试天线时（就像测试许多其他器件一样），有一个要求是不能让天线被它周围的环境影响。这就是要采用电磁波暗室的原因。电磁波暗室提供了一个没有反射或其他辐射信号的环境，从而减小了不需要的信号的影响。

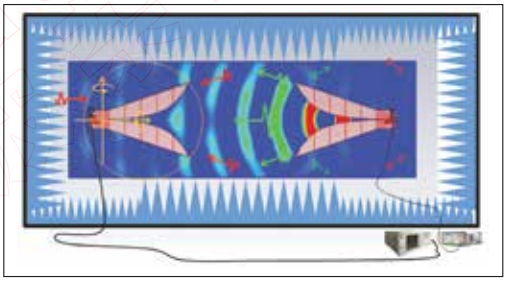

图 1. 一般室内区域的几何形状 - 两个天线置于区域中（一个发射一个接收）。

本文探讨了电磁波暗室的应用，在这些应用中，天线在发射或接收已知信号的时候，其随方向变化的性能被测量了。

区域类型选择

图 1 显示了一般区域的几何关系。有几个方法在室内测试天线的辐射方向图：远场照射、近场测试和紧凑区域。它们各有优劣，没有哪个方法对于所有天线和情形完全适用。对一种给定天线最合适的区域类型主要由两个因素确定：被测天线（AUT）的频率和电尺寸。下式给出的远场条件可作为选择的依据：

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

前面提到的因素包含在远场等式中。D 是天线的最大物理尺寸。波长是 λ，与天线的工作频率有关。对于较小的天线，远场距离 r 可以近似为[4]：

$$r \approx 10\lambda \quad (2)$$

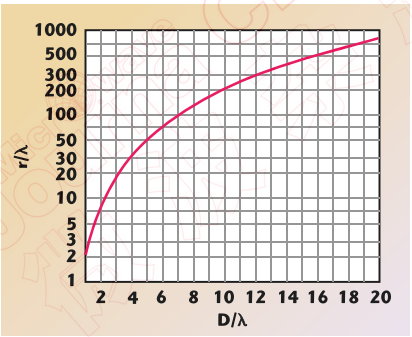

图 2. 远场距离和天线尺寸的关系。

表1

不同室内天线测试方法的频率范围和天线尺寸

室内区域	按波长算的天线尺寸		
频率	远场照射	近场	紧凑区域
100 MHz	<2λ	>2λ	不适用
500 MHz	<2λ	>2λ	不适用
1 GHz	<5λ	>5λ	>5λ
2 GHz	<10λ	>10λ	>10λ
≥ 4 GHz	<10λ	>10λ	>10λ

这个等式可以用于天线电尺寸小于一个波长的情形。根据式 1 可以画出远场距离随天线电尺寸变化的关系，如图 2 所示。

对于室内区域的一个经验准则是，远场照射技术更适合尺寸小于 10λ 的天线。这个准则与天线的电尺寸有关。工作频率增加了另一个影响区域类型的因素。一个大小为 10λ 的天线的远场距离是 200λ，这使得测试距离是天线尺寸的 20 倍。在某些微波频率，测试距离可能为 5 米，所以室内区域是可实现的。然而请注意一个 20λ 的天线将使测试距离达到 800λ。

例如，考虑一个用于常见卫星电视服务的 18 英寸圆盘天线。卫星服务工作于 18.55GHz。圆盘天线大小为 28.29λ。远场大约是 1600λ 或 25.86 米。显然，对于这样一个电大天线，室内远场照射方法不太划算。对于这个天线，紧凑区域或者近场方法更适合。相反，一个工作在 300MHz 的 10λ 的天线，尺寸为 10 米，要在 200 米的距离进行测试是极为困难的。这个情况最好的方法是室外区域。

一般来说，频率小于 100MHz，室外区域是更好的途径。在这样低的频率，电流吸收技术不支持某些室内

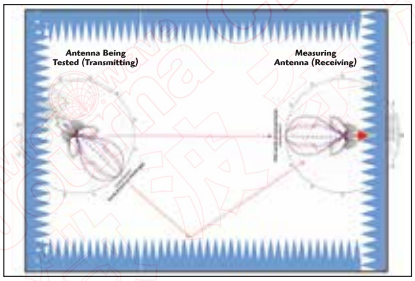

图 3. 一个展示了 AUT 和测试天线间反射路径和直接路径的室内区域。

测试。室内区域能够建立，但是天线尺寸必须小于 2λ；从而将远场距离限制在 8λ（24 米）。这个距离很接近式 2 给出的 10λ。表 1 提供了不同天线尺寸和工作频率的近似准则。

表 1 中的值是通用的指南。球形近场区域最小可以测试 λ/2 的天线。但是对如此小的一个天线，也许采用远场照射区域更好，因为它与 AUT 的典型电尺寸有关。

建造一个电磁波暗室的目标是在暗室内获得一个区域，在该区域中任何从墙壁（包括顶面和地面）反射回的能量远远低于待测辐射方向的特征能量。这个区域就是静默区域（QZ）。图 1 显示了当一个天线发射时，照射接收天线和区域内的所有墙壁和表面。能量入射到这些表面上将会被反射至 QZ[1,3]。反射的能量大小必须比发射和接收天线之间的直接路径上的能量低某个分贝数。

当被测天线旋转时（见图 3），它的主瓣将照射到暗室的不同表面。测试天线将测试 AUT 沿着两天线之间的直接路径辐射而来的场强。然而，测试天线也会接收来自侧壁、顶面和地面的反射能量。如果反射能量高于沿着两天线间直接路径辐射来的能量，那么在该方向的辐射方向图就不能被准确测量。在图 3 中，测试天线指向零点，但它也接收 AUT 主瓣照射侧壁的反射信号。该测试天线接收反射信号的角度是 30°。在那个方向，测试天线的增益比直接对着 AUT 方向（主瓣）的增益小。反射能量小一些，例如 20dB。我们假设 30° 方向的增益比主瓣方向小 10dB。那么天线在那个方向接收到的信号就比 AUT 主瓣方向对准测试天线时小 30dB。如果零点的衰减不足 30dB，则测试方向图将出现错误[5]。

RF吸波器

电磁波暗室的一个关键设计项是 RF 吸波器。对吸波器的处理必须使得反射能量只对测试数据产生少量或可忽略的影响。典型的 RF 吸波器是一种做成特定形状的耗散材料，以使入射电磁波进入且反射很小。一旦电磁（EM）能量传输进材料，RF 能量转换成热能，进而耗散在临近空气中[6]。材料的电厚度决定了有多少能量被吸收。垂直入射的反射大小可以用下面的等式来近似：

$$R_o(t) = -13.374\ln(t) - 26.515 \quad (3)$$

其中 t 是用波长表示的厚度。式子的有效范围是 $0.25 \le t \le 20$。这个近似能够用于对一个给定厚度的吸波器的反射值进行保守估计。大多数生产商在数据手册中提供了相关信息。

图 1 显示了区域内有些吸波器不是被放置在垂直入射波方向而是有一定的倾角。对于斜入射，吸波器主要的反射是在等角方向。后向散射在相邻小金字塔尖端的距离≥ λ 时发生[7]。Hemming 提供了在斜入射时吸波器的等角反射估计图。一系列多项式近似，连同式 3，提供了关于不同厚度的和在不同入射角度时的金字塔状吸波器的性能的基本描述。这些都是保守的近似。留下一定的误差余量应对其他干扰如光、门、指向设备和吸波器的不连续性带来的边缘衍射。

吸波器的效果（单位 dB）由下面这个多项式给出：

$$R_\theta(t,\theta) = R_o(t) + A_1(t)\cdot\theta + A_2(t)\cdot\theta^2 + A_3(t)\cdot\theta^3 + A_4(t)\cdot\theta^4 + A_5(t)\cdot\theta^5 \quad (4)$$

多项式的系数是厚度的函数。当吸波器的厚度为 $0.25\lambda \le t \le 2\lambda$ 时，式 4 的系数由下列多项式给出：

$$A_1(t) = 1.5252 - 4.8243t + 6.9479t^2 - 3.8332t^3 + 0.7333t^4 \quad (4a)$$

$$A_2(t) = -0.0754 + 0.24782t - 0.3984t^2 + 0.2285 - 0.0442t^4 \quad (4b)$$

$$A_3(t) = 0.0016 - 0.00502t + 0.00938t^2 - 0.00577t^3 + 0.001155t^4 \quad (4c)$$

$$A_4(t) = -1.58\cdot10^{-5} + 4.91\cdot10^{-5}t - 1.015\cdot10^{-4}t^2 + 6.58\cdot10^{-5}t^3 - 1.35\cdot10^{-5}t^4 \quad (4d)$$

$$A_5(t) = 5.84\cdot10^{-8} - 1.78\cdot10^{-7}t + 4.02\cdot10^{-7}t^2 - 2.71\cdot10^{-7}t^3 + 5.7\cdot10^{-8}t^4 \quad (4e)$$

当厚度为 $2\lambda \le t \le 20\lambda$ 时，系数由下列多项式给出：

$$A_1(t) = 0.1751 + 0.149t - 0.0119t^2 + 0.00028t^3 \quad (4f)$$

$$A_2(t) = -0.0105 - 0.00824t + 0.0007t^2 - 1.61\cdot10^{-5}t^3 \quad (4g)$$

$$A_3(t) = 0.00029 + 0.000123t - 1.13\cdot10^{-5}t^2 + 2.57\cdot10^{-7}t^3 \quad (4h)$$

$$A_4(t) = -1.69\cdot10^{-6} - 4.77\cdot10^{-7}t + 5.08\cdot10^{-8}10^{-8}t^2 - 1.14\cdot10^{-9}t^3 \quad (4i)$$

$$A_5(t) = 0 \quad (4j)$$

式 4 的值域由 θ 限定了，$0° \le \theta \le 85°$，其中 θ=0° 是垂直入射。另外，值域还由多项式系数的值域确定。因此式 4 在 $0.25\lambda \le t \le 20\lambda$ 有效。式 4 的值域还要限定为 $-55 \ge R(dB) \ge 0$。当吸波器厚度大于 20λ 时，反射的大小可以用 20λ 厚的吸波器来估算。图 4 给出了一系列不同电厚度的吸波器的等角反射大小随着角度的变化。

图 5 显示了对于一个厚度等于

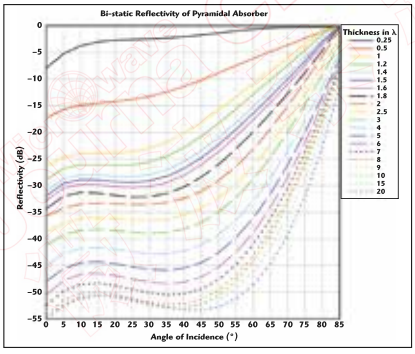

图 4. 估计的 RF 吸波器的反射随入射角的变化。

λ 到 2λ 的材料用三种方法得出的结果的比较，包括用文献[8]中的方法计算的结果、由生产商给出的指标和使用式 4 计算出的结果。如果多项式给出的结果和数值计算结果进行比较，多项式给出的反射显得更保守——大约高 10dB。生产商的指标只提供了从 45° 到 80° 以及垂直入射的结果。计算结果只给出了几个独立角度。对于这个 1λ 厚的吸波器，不同的方法趋势相似，且多项式给出的结果最保守。计算和多项式结果最大的差别在 35° 时。但是，那个差别最大的点可能会随着吸波器所附着的材料不同而偏移[9]。总之，多项式可以用作对不同角度 RF 入射的性能的一个保守近似。

目前可用最大的典型吸波器的尺寸为 1.82 米。这个尺寸对于室内区域的采用有一个频率限制。在 100MHz，这个吸波器的厚度是 1.64λ，垂直入射的反射性能为 -33dB。对于布置这种材料的室内区域，方向图比最大值小 20dB 的地方就难以准确测试。有些混合吸波器融合了铁氧体块和耗散基片楔形金字塔，能够工作在低至 30MHz 甚至 20MHz。这些更适合 EMC 应用场合，因为他们的垂直入射吸收效果一般被限制在 25 到 35dB 之间。

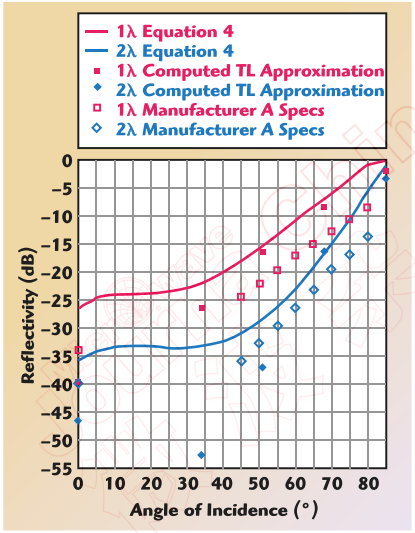

图 5. 由计算方法、厂家指标和式 4 得到的等角反射的结果对比。

矩形远场暗室

确定区域大小从确定矩形远场区域的大小开始，其测试距离由式 1 确定。对于确定一个用于远场照射的矩形电磁波暗室的大小来说，惯例是寻找各种经验准则。一般来说，电磁波暗室的宽度和高度应为包含最大 AUT 的最小球形的直径的三倍。还有一点很重要，就是保证 AUT 和吸波器尖端之间至少要有 2λ，以免 AUT 被加载。远场距离由下式给出：

$$\frac{r}{\lambda} = 2n^2 \tag{5}$$

其中 n 是 AUT 尺寸的波长数。QZ 必须足够大以包含 AUT。因此 QZ 大于 nλ。图 6 显示了典型的矩形区域的几何形状。由这个形状可以推出距离 x 的等式，x 是区域的中间线到吸波器尖端的距离。

$$\frac{x}{\lambda} = n^2 \cdot \cot\theta \tag{6}$$

式 6 以波长的形式给出了距离。在图 3 中，θ 的值可以根据需要的反射来选择。图 4 中的曲线也将给出吸波器的厚度值。因此，如果 AUT 的特性需要在 -25dB 级别进行测量，则吸波器的等角反射必须超过此级别。厚度为 2λ 的吸波器将在宽至

从产品
到解决方案
RF 微波
毫米波
在标准及定制毫米波放大器产品的设计，测试和制造方面，Ducommun 积累了45年的经验
Ducommun
• 大功率，单一直流供电/内部偏置电路

32-36 GHz 3-W 功率放大器
• AHP-34043530-01
• 增益：30 dB (最小值)
• 增益平坦度：+/- 2.0 dB (最大值)
• 功率：34 dBm (P1dB)，35 dBm (Psat)

26-40 GHz 低噪声放大器
• ALN-33144030-01
• 增益：30 dB (最小值)
• 增益平坦度：+/- 1.0 dB (最大值)
• 噪声系数：4.0 dB (典型值)
欲了解更多信息，
请联系我们的销售团队
+1 (310) 513-7256
rfsales@ducommun.com
微信号: rfsalesducommun
联系方式

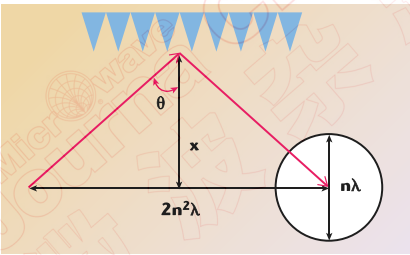

图 6. 远场区域的几何示意。

50° 的角度超过 -25dB。因此暗室的宽度是

$$2x = \left(2n^2(0.84)+4\right)\lambda \qquad (7)$$

其中加 4 是因为吸波器的厚度为 2λ。如果吸波器厚度改变，式 7 将改变。一般地，暗室宽度可以写为：

$$W = \left(2n^2\cot(\theta)+2t\right)\lambda \qquad (8)$$

参数 θ 和 t 必须根据需要的反射来选择。在 QZ 和吸波器之间保持最小 2λ 的距离很重要。矩形远场暗室的长度主要由远场距离和 QZ 尺寸大小加上吸波器厚度来确定。考虑了测试天线及其后面的吸波器后还需要增加空间。

暗室或区域的总长度（L）由下式给出：

$$L = \left(2n^2+n+2+t+K\right)\lambda \qquad (9)$$

其中 K 是一个足够大的因子，能够包含测试天线、2λ 距离和测试天线后的吸波器。需要注意，这些等式给出的是最低要求。测试过程必须在暗室内进行——包括安装和连接天线、替换测试天线等等。需要保证在无反射区域内有足够空间方便人工完成这些任务。

预期的暗室尺寸能够通过将值代入前面的等式中进行检验。我们将假设测试天线具有足够的前后比，测试天线后面的吸波器为一个波长的厚度，因子 K 为 4。

图 7 中根据最低工作频率给出了一系列矩形暗室的长度和宽度。此外，由画出的每个暗室尺寸的 n 的值指示了 AUT 在最低频率处的电尺寸。

如果一个暗室被设计用于测试一个已知在最低频率处电尺寸为 nλ 的天线，那么同样的暗室就足够用来测试在更高频率具有相同电尺寸的天线。相似的，暗室的大小必须随着频率减小而增加。在 500MHz，用于大小为 2λ 的天线的暗室大约有 10×5 米。如果天线尺寸增加至 4λ，暗室将为 18×10 米。在这些较低的频率需要使用渐变的电磁波暗室[1,10-12]。渐变暗室的几何形状将侧壁上的镜面反射用于 AUT 照射，而不是像矩形暗室一样进行衰减。这将使得暗室的物理尺寸更小。

暗室的高度与宽度一样。这样做顶面和地面的反射大小就差不多。保持顶面和地面反射能量相当是很重要的，这样区域对于与极化相关的参数如交叉极化和轴比的影响就会被最小化。

式 8 和式 9 给出了一个确定室内区域的空间要求的好办法。大多数情况下，暗室大小是可调的。例如，顶面和地面的吸波器的厚度可以增加来保证在更倾斜的入射角（更大的 θ）时有足够反射。吸波器的切比雪夫布局 13 也能够用于提高反射。

图 3 也揭示了提高反射的另一个线索。选择到达测试天线的反射射线的角度，使得天线在该方向的增益小于主瓣方向。使用更高方向性的天线作为测试天线可以减小从侧壁、顶面和地面接收到的能量。因此，更短的吸波器就可以减小暗室尺寸。

结论

这个包含两部分的系列文章的第一部分主要介绍了 RF 吸波器的等角反射的近似以及矩形 RF 电磁波暗室的设计。设计多项式在其结果中包含了“安全余量”。这将帮助考虑二次反射和边缘散射以及轻固定物、通风孔、门和吸波器的其他干扰。第二部分将提供设计公式用于紧凑区域和近场到远场的区域。■

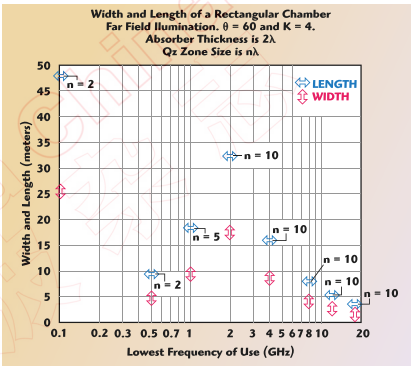

图 7. 对于不同最低工作频率的和在最低频率处不同最大尺寸的天线可用的矩形远场电磁波暗室

致谢

作者感谢 Zhong Chen 提供基于 NIST 算法的计算结果[8]。

参考文献

1. L. Hemming, “Electromagnetic Anechoic Chambers: A Fundamental Design and Specification Guide,” IEEE Press/Wiley Interscience: Piscataway, N.J., 2002.
2. G. Sanchez and P. Connor, “How Much is a dB Worth?” 23rd Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA), Denver, Colo., October 2001.
3. J. Hansen and V. Rodriguez, “Evaluate Antenna Measurement Methods,” Microwave and RF, October 2010, pp. 62–67.
4. W. Stutzma and G Thiele, “Antenna Theory and Design,” 2nd Ed., Wiley 1997 ANSI/IEEE STD 149-1979 149-1979 - IEEE Standard Test Procedures for Antennas, 1979, reaffirmed 2008.
5. D. Wayne, J. Fordham and J. McKenna, “Effects of a Non-Ideal Plane Wave on Compact Range Measurements,” 36th Annual Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA), Tucson, Ariz., October 2014.
6. V. Rodriguez, G. d’ Abreu and K. Liu, “Measurements of the Power Handling of RF Absorber Materials: Creation of a Medium Power Absorber by Mechanical Means,” 31st Annual Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA), Salt Lake City, Utah, October 2009.
7. W. Sun and C. Balanis, “Analysis and Design of Periodic Absorbers by Finite-Difference Frequency-Domain Method,” Report No. TRC-EM-WS-9301 Telecommunications Research Center, Arizona State University, Tempe, Ariz., 1993.
8. E. Kuester and C. Holloway, “A Low-Frequency Model for Wedge or Pyramid Absorber Arrays-I: Theory,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 36, No. 4, November 1994.
9. V. Rodriguez, “A Study of the Effect of Placing Microwave Pyramidal Absorber on Top of Ferrite Tile Absorber on the Performance of the Ferrite Absorber,” 19th Annual Review of Progress in Computational Electromagnetics (ACES) Symposium, Monterey, Calif., March 2003.
10. W. Emerson and H. Sefton, “An Improved Design for Indoor Ranges,” Proceedings of the IEEE, Vol. 53, No. 8, pp. 107921081, 1965.
11. H. King, F. Shiukuro and J. Wong, “Characteristics of a Tapered Anechoic Chamber,” IEEE Transactions on Antennas Propagation, Vol. 15, No. 3, pp. 4882490, 1967.
12. V. Rodriguez, “Using Tapered Chambers to Test Antennas,” Evaluation Engineering, Vol. 43, No. 5, pp. 62268, 2004.
13. J-R J. Gau, D. Burnside and M. Gilreath, “Chebyshev Multilevel Absorber Design Concept,” IEEE Transactions on Antennas Propagation, Vol. 45, No. 8, pp. 128621293, 1997.