

# 多功能吉赫兹横电磁波小室设计

赵 阳<sup>1,2</sup>, 颜 伟<sup>1</sup>, 罗永超<sup>1</sup>, 戎 融<sup>1</sup>

(1 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042  
2 东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

[摘要] 目前一般的 GTEM (吉赫兹横电磁波)小室大都用于 EMS(电磁抗扰度)测试,而针对于 EMI(电磁干扰)测试的尚不多见.介绍了一种既可用于 EMS测试又可用于 EMI测试,且还可用于高频电路辐射机理诊断的多功能 GTEM 小室,给出了该 GTEM 小室的结构设计方法和测量原理,阐述了利用该 GTEM 进行高频电路辐射机理诊断的实现方法. GTEM 小室设计方案采用的是“多极矩”模型实现,可将近场测量结果转换为标准远场测量结果(如电波暗室或开域场).此外,利用该 GTEM 小室以及近场电磁场探头和频谱分析仪对被测设备进行近场测量,即可得出被测设备的辐射机理测量结果.

[关键词] 电磁兼容,电磁干扰, GTEM 小室,多功能,设计

[中图分类号] O44.1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010)01-0001-04

## Design of Multifunctional Giga Hertz Transverse Electromagnetic Cell

Zhao Yang<sup>1,2</sup>, Yan Wei<sup>1</sup>, Luo Yongchao<sup>1</sup>, Rong Rong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China  
2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract** Currently, EMS (Electromagnetic Susceptibility) test is mostly used in GTEM (Giga hertz Transverse Electromagnetic) cells are but EMI (Electromagnetic Interference) test is still rarely used there. A multi-functional GTEM cell is presented in this paper, which can not only be used in EMS and EMI measurements, but also can be used in high frequency circuits mechanism analysis. It presents the design method and the measurement principle of the GTEM cell and describes how to use the GTEM cell to implement the mechanism of radiation diagnosis of high-frequency circuits. The GTEM cell is designed by “multi-pole moments” model. The near-field measurement results can be converted into the standard far-field ones (such as anechoic chamber or oats). In addition, the device under test can be tested by the GTEM cell as well as the near-field electromagnetic probe and spectrum analyzer. So the measurement results of radiation mechanism of the device under test can be derived.

**Key words** electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, GTEM cell, multifunction, design

### 1 问题提出

GTEM (Gigahertz Transverse Electromagnetic)小室是一种于 80 年代末期间世的电磁兼容测试设备.相比于开域场以及 3 m 法、5 m 法、10 m 法电波暗室, GTEM 具有工作频率宽、内部场强均匀、频效好、试验中能量利用率高等优点,而且由于其体积小、造价相对较低,能为大多数企业所接受.但目前一般的 GTEM (吉赫兹横电磁波)小室大都用于 EMS(电磁抗扰度)测试<sup>[1,2]</sup>,而针对于 EMI(电磁干扰)测量的尚不多见.因此,对于既可用于 EMS测试,又可用于 EMI测试的横电磁波小室相关研究,即多功能 GTEM 小室的相关研究更具有现实意义.

鉴于此,本文提出了一种多功能 GTEM 小室设计方案.设计方案包括对 GTEM 的结构进行设计,包括容积大小、屏蔽性能、吸波材料选择等.该 GTEM 小室的最大测量尺寸为: 30 cm × 30 cm × 20 cm (L × W

收稿日期: 2009-12-21  
基金项目: 江苏省自然科学基金 (#BK2008429)、毫米波国家重点实验室开放基金 (R200803, R200903).  
通讯联系人: 赵 阳,博士,教授,研究方向: 电磁兼容. E-mail: zhao yang2@njnu.edu.cn

×H)。而且采用本文的多功能 GTEM 小室可对被测高频电路进行辐射 EM I 测试,测量结果可转换为 3 m 法、10 m 法以及开域场等标准测量结果,即基于本文多功能 GTEM 小室电磁干扰测量的结果可与上述标准测量结果进行对比。此外,该多功能 GTEM 小室还可对电子系统的辐射 EM I 噪声进行机理判断(共模噪声为主或差模噪声为主),测量过程快速有效,进而可为制定相应的抑制措施提供指导,如通过改善接地来减小共模辐射噪声,或者通过减小环路面积来减小差模辐射噪声等。

2 多功能 GTEM 小室结构设计

GTEM 小室结构一般由四棱锥形,它由芯板、底板、后盖、吸波材料、N 型接头、上、下盖板、前、后侧板、溃源头、托架、横支撑杆、屏蔽门、转台、近场探头、探头导轨等部分构成<sup>[3]</sup>。

其中,天线是 GTEM 小室的接收设备,主要用于接收由被测试件发出的电磁辐射。目前关于 GTEM 天线设计存在有两种方案,一是采用电磁场天线<sup>[3]</sup>,二是采用 GTEM 小室自身的芯板和底板代替天线接收被测试件的电磁干扰。由于电磁场天线的类型、有效带宽、尺寸、摆放位置等因素在实施过程较为困难,同时上述天线选择因素对辐射 EM I 测量有较大影响。因此,本文采用后者作为 GTEM 小室天线设计方案。其外观结构如图 1 所示。

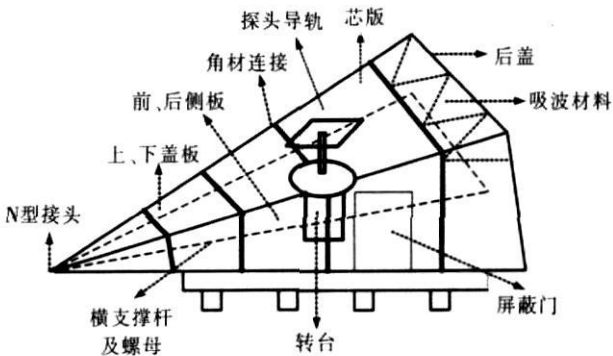


图 1 多功能 GTEM 小室示意图  
Fig.1 The structure of multi-function GTEM cell

芯板和底板采用良好金属导体材质;后盖处为了吸收由端口传来的电磁波,尽可能减小电磁反射从而构造辐射吸收边界;吸波材料采用聚氨酯,其形状为尖劈形,且其尖劈高度  $L$  大于入射波波长  $\lambda$  的一半,并且  $L/\lambda$  越大越好,尖劈顶角应大小合适,以确保有一定的反射次数,通过入射波与反射波的相位差或反相位以起到反射衰减的作用。转台是测量过程所使用的主要部件,采用绝缘材质,测量时要求被测电路或设备可以跟随转台旋转一定角度;近场探头可在探头导轨上自由移动,并可以调节探头与被测设备间的距离;N 型接头连接至频谱分析仪输入端,输出端接计算机。

3 多功能 GTEM 小室的测试方法设计

与远场标准测量方法相同,GTEM 小室在测量过程中同样采用电磁场测量。但为了保证 GTEM 小室的测量结果与远场标准测量结果具有可比性,需要进行相关转化。利用 GTEM 小室的辐射 EM I 测量结果,经过转化即可推算出它在开域场或电波暗室、半电波暗室的辐射场结果。本文采用的是“多极矩”方法对 GTEM 结果进行处理。在自由空间中,对于电小尺寸辐射体而言,可以用偶极子的多极矩来描述辐射场特性,即电偶极矩和磁偶极矩。在三维方向的电偶极子和磁偶极子的电场和磁场如公式(1)所示<sup>[4]</sup>:

$$\begin{aligned} E_x &= K_E \left\{ \left[ -\frac{y^2+z^2}{r^2}g_1(r) + g_2(r) \right] P_x + \frac{xy}{r^2}g_1(r)P_y + \frac{zx}{r^2}g_1(r)P_z + \frac{z}{r}g_3(r)k_0M_y - \frac{y}{r}g_3(r)k_0M_z \right\}, \\ E_y &= K_E \left\{ \frac{xy}{r^2}g_1(r)P_x + \left[ -\frac{z^2+x^2}{r^2}g_1(r) + g_2(r) \right] P_y + \frac{yz}{r^2}g_1(r)P_z - \frac{z}{r}g_3(r)k_0M_x + \frac{x}{r}g_3(r)k_0M_z \right\}, \\ E_z &= K_E \left\{ \frac{zx}{r^2}g_1(r)P_x + \frac{yz}{r^2}g_1(r)P_y + \left[ -\frac{x^2+y^2}{r^2}g_1(r) + g_2(r) \right] P_z + \frac{y}{r}g_3(r)k_0M_x - \frac{x}{r}g_3(r)k_0M_y \right\}, \\ H_x &= K_H \left\{ \left[ -\frac{y^2+z^2}{r^2}g_1(r) + g_2(r) \right] k_0M_x + \frac{xy}{r^2}g_1(r)k_0M_y + \frac{zx}{r^2}g_1(r)k_0M_z + \frac{z}{r}g_3(r)P_y - \frac{y}{r}g_3(r)P_z \right\}, \\ H_y &= K_H \left\{ \frac{xy}{r^2}g_1(r)k_0M_x + \left[ -\frac{z^2+x^2}{r^2}g_1(r) + g_2(r) \right] k_0M_y + \frac{yz}{r^2}g_1(r)k_0M_z - \frac{z}{r}g_3(r)P_x + \frac{x}{r}g_3(r)P_z \right\}, \\ H_z &= K_H \left\{ \frac{zx}{r^2}g_1(r)k_0M_x + \frac{yz}{r^2}g_1(r)k_0M_y + \left[ -\frac{x^2+y^2}{r^2}g_1(r) + g_2(r) \right] k_0M_z + \frac{y}{r}g_3(r)P_x - \frac{x}{r}g_3(r)P_y \right\}. \end{aligned} \tag{1}$$

其中,  $r$  为测试距离;  $x, y, z$  为电偶极子 (或磁偶极子) 在三维空间中的坐标;  $P_x, P_y, P_z$  为电偶极矩分别在  $x, y, z$  3 个方向上的分量;  $M_x, M_y, M_z$  为磁偶极矩分别在  $x, y, z$  3 个方向上的分量. 而

$$f(r) = \frac{e^{-jk_0r}}{r}, \quad K_E = -j \frac{k_0 \mu_0}{4\pi}, \quad K_H = \frac{k_0}{4\pi},$$
$$g_1(r) = \left[ \frac{3}{(k_0r)^2} + j \frac{3}{k_0r} - 1 \right] f(r), \quad g_2(r) = \left[ \frac{2}{(k_0r)^2} + j \frac{2}{k_0r} \right] f(r), \quad g_3(r) = \left[ \frac{1}{k_0r} + j \right] f(r). \quad (2)$$

假设  $z = 0$  的平面置一良导体地平面, 并将电偶极矩  $P$  位于  $z = h$  平面. 因此, 当公式 (1) 中的  $z$  改为  $z - h$  时, 测试距离仍为  $r$ . 根据镜像法原理, 场点  $r$  处的辐射场由“实源” ( $z = h$  平面) 和“虚源” ( $z = -h$  平面), 测试点与“实源”和“虚源”的位移矢量分别为  $r_1$  和  $r_2$ , 其中,

$$r_1 = (x, y, z - h) \text{ magnitude} \quad r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - h)^2},$$
$$r_2 = (x, y, z + h) \text{ magnitude} \quad r_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + h)^2}. \quad (3)$$

则当“实源”的电偶极矩和磁偶极矩分别为  $(P_x, P_y, P_z)$  和  $(M_x, M_y, M_z)$  时, “虚源”的偶极矩分别为  $(-P_x, -P_y, +P_z)$  和  $(+M_x, +M_y, -M_z)$ .

由此可见, 只要有电偶极矩和磁偶极矩分量, 就可根据式 (1)、(2) 得出待测电路在 GTEM 小室中的 EM I 辐射电磁场大小. 而电偶极矩和磁偶极矩可通过测量芯板和底板上的感应电压得到, 关系式如下:

$$|b_0(\alpha)|^2 = |P_y^2 + k_0^2 M_x^2 \sin^2 \alpha + k_0^2 M_z^2 \cos^2 \alpha + k_0^2 M_x M_z \sin 2\alpha|, \quad (4)$$

其中,  $b_0(\alpha)$  为所测电压.

由式 (4) 可知, 为得到电偶极矩和磁偶极矩, 可将被测电路在 GTEM 小室中旋转一定角度, 每次旋转获得一组三维方向上的感应电压参数, 本文设计的 GTEM 小室的被测电路旋转角度为:  $0 \pm \pi/4 \pm \pi/2$ . 通过式 (4) 所得感应电压大小可计算出辐射体的等效电偶极矩和等效磁偶极矩, 进而由式 (1) 可推算出被测电路在开阔场中任意距离、任意极化方向的辐射场强和自由空间中的 EM I 辐射场强大小.

4 多功能 GTEM 辐射机理诊断方法设计

辐射机理诊断可以通过近场电磁场探头测量和波阻抗计算得到<sup>[5-7]</sup>. 本文利用 GTEM 小室进行测量, 测量过程中, 测试平面应位于被测电路上方的矩形区域内, 并根据测试频率上限以及被测电路尺寸来计算和确定近场区域中的测试点位置. 例如设最高测量频率 1 GHz, 则当测试点距离小于 4.7 cm 时, 测试区域为近场区域; 当最高测量频率减小为 500 MHz 时, 则此时测试距离小于 9.5 cm 时的区域为近场区域. 并且被测电路为高频数字电路, 因此, 为进一步简化测试过程, 在测试辐射场的电场和磁场分量时, 只考虑天线的垂直极化方向而忽略水平极化. 此外, 为避免信号的相干性, 需保留测试点间的最小间距, 根据电磁场及天线理论, 一般可取最小波长作为测试点间的最小间距. 在多功能 GTEM 室中采用近场测试进行辐射机理诊断如图 2 所示.

首先, 将被测电路放置在 GTEM 小室的转台上, 并且要将其平面区域划分为若干个辐射干扰单元. 其次要调节频谱分析仪的扫描频段, 将近场电磁场探头连接至探头导轨, 移动探头导轨依次对各辐射干扰单元进行测量. 通过观察近场波阻抗随距离的变化规律来判断待测电路在近场中以何种辐射占主要地位, 如果测得的波阻抗有随着距离增大而减小的趋势, 则说明该被测电路以共模辐射为主; 反之, 如果波阻抗的变化趋势为随距离增大而增大, 则说明被测电路以差模辐射为主.

以某商用无线数字扩音器为例, 采用该多功能 GTEM 小室对进行辐射机理诊断测量. 首先, 将 DWS 分成  $3 \times 5$  区域; 然后, 利用 GTEM 小室对上述 15 个区域依次测量, 得到相应的辐射电磁场分布图. 然后, 改变测试距离, 重复上述实验, 根据测得的辐射电场与辐射磁场, 计算得到近场波阻抗与测试距离关系. GTEM 内近场探头距离无线数字扩音器 1 cm 处的电磁场分布如图 3 (a) 和 (b) 所示.

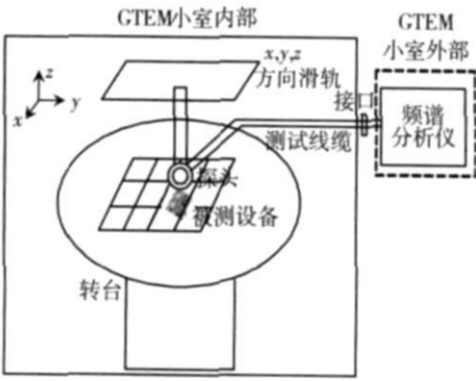


图 2 多功能 GTEM 小室中采用近场测试示意图  
Fig.2 The near-field measurement in multi-function GTEM cell

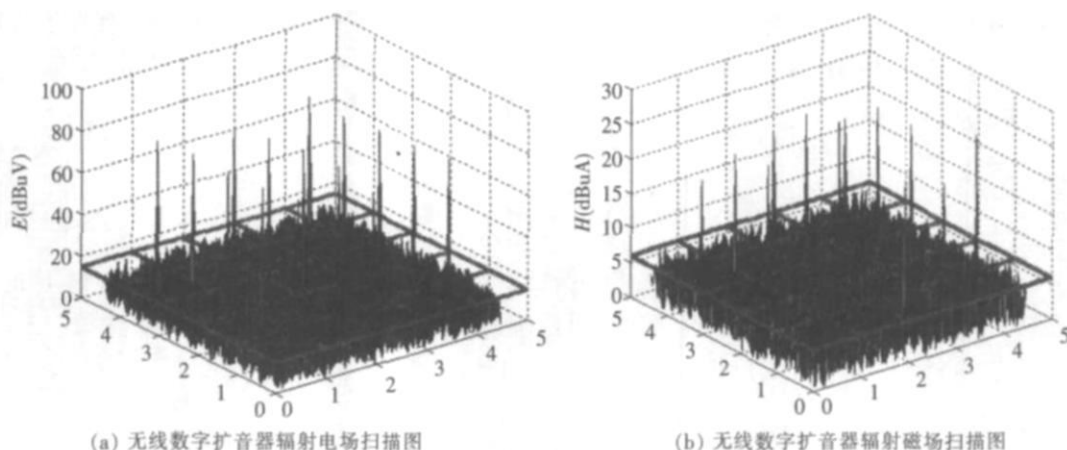


图 3 多功能 GTEM 小室的无线数字扩音器测试图

Fig.3 2D radiated EH field distributed for digital wireless speaker by using GTEM cell

## 5 结论

本文提出了一种多功能 GTEM 小室的设计方法,该方法通过自由空间辐射场多极矩模型将被测高频电路辐射电磁场测量结果推算至远场的标准测量结果.因此,利用本文的 GTEM 小室可以对被测高频电路进行辐射 EM I 测量.此外,本文还给出了针对高频电路的辐射机理 GTEM 小室诊断方法.实验结果表明,本文提出的多功能 GTEM 小室可以对高频电路辐射 EM I 进行有效测量和机理诊断.

## [参考文献] (References)

- [1] 余绍斌,方志坚.用于电磁兼容测量的 GTEM 小室[J].电子质量,2007(10):76-78  
Yu Shaobin Fang Zhijian GTEM chamber used for EMC measurement[J]. Electronics Quality, 2007(10): 76-78 (in Chinese)
- [2] 任烈辉,陈志雨.GTEM 室与开阔场的辐射发射相关研究[J].电波科学学报,2002,17(1):74-77,82  
Ren Liehui Chen Zhiyu Investigation on correlation of radiated emission tests of GTEM cell and open area test sites[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(1): 74-77, 82 (in Chinese)
- [3] 蒋全兴,吕仁清.吉赫横电磁波室的结构设计[J].东南大学学报:自然科学版,1993,23(6):107-113  
Jiang Quanxing Lv Renqing The structure design of GTEM cell[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 1993, 23(6): 107-113 (in Chinese)
- [4] Wilson P. Simple approximate expressions for higher order mode cutoff and resonant frequencies in TEM cells[J]. IEEE transactions on Electromagnetic Compact, 1986, 28(3): 125-130
- [5] Yan Wei Zhao Yang Luo Yongchao et al. An efficient characterization approach of radiated electromagnetic field analysis for PCBs[J]. Elsevier Procedia Earth and Planetary Science, Netherland, 2009(1): 1587-1592
- [6] Zhao Yang Yan Wei Feng Zhiming et al. Investigation on radiated EM I noise identification for high speed digital PCB [C] // The Fifth Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics Proceedings, Xi'an, 2009, 297-300
- [7] 赵阳, See Kye Yak. 电磁兼容基础与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007:68-78  
Zhao Yang See K Y. Fundamental of Electromagnetic Compatibility and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 68-78 (in Chinese)

[责任编辑:刘健]