

吉赫横电磁波传输室传输特性的宽频带分析¹

季 飞 张 国 基 崔 美 蓉 赖 声 礼

(华南理工大学电子与通信工程系 广州 510641)

摘 要 吉赫横电磁波传输室 (GTEM cell) 上限工作频率可达几个吉赫, 因而在电磁兼容测量中得到越来越广泛的重视和应用. 本文在非正交坐标系下采用 FDTD (时域有限差分) 法求解电磁波在 GTEM cell 中的传输特性, 给出了 GTEM cell 中 TEM 模的横向分布和纵向分布, 分析了高阶模对场分布均匀性的影响, 由此确定了 GTEM cell 的上限工作频率范围. 计算及分析结果对 GTEM cell 的设计和使用具有重要意义.

关键词 GTEM cell, 非正交坐标系, 时域有限差分法, 传输特性

中图分类号 TN811

1 引 言

横电磁波传输室 (Transverse ElectroMagnetic transmission cells, TEM cells) 是电磁干扰、电磁兼容性测量及电磁场生物学效应实验中必不可少的重要设备之一^[1,2]。但传统的 TEM cells 的上限工作频率难以突破吉赫, 因而其应用范围受到了一定的限制. D. Konigstein 等在 1987 年提出了吉赫横电磁波传输室 (Gigahertz Transverse ElectroMagnetic transmission cell, GTEM cell), 其上限工作频率可达几个吉赫^[3], 因而近几年来得到越来越广泛的重视和应用. 限于 GTEM cell 边界条件的复杂性, 人们对 GTEM cell 的理论分析研究尚显不足. 文献 [4] 运用横向谐振绕射法结合局部模式展开分析了 GTEM cell 的传输特性, 给出了各种传播模式间的功率分布, 但此方法分析过程十分复杂繁琐, 且随着 GTEM cell 的体积增大, 会导致寄生模的出现. Y. Liu 等人基于 GTEM cell 传输的主模是球面 TEM 模的认识, 在球坐标系下采用边界积分方程技术结合多局部模式展开法分析了 GTEM cell 中的球面波的波特特性^[5], 但该方法不能很好地处理外壁导体边界条件, 给分析结果带来很大的误差. 文献 [6] 在准静态近似条件下, 采用保角变换法计算了 GTEM cell 的场分布, 但结果仅适用于低频情况. 鉴于解析法分析 GTEM cell 的困难, 本文提出了采用非正交坐标系下的时域有限差分 (FDTD) 法求解电磁波在 GTEM cell 中的传输特性. 因为采用了非正交坐标系, 坐标系的四个坐标面分别与 GTEM cell 的四个外导体壁重合, 从而可以精确而方便地处理导体边界. 本文首先求解了 GTEM cell 中 TEM 模的横向和纵向分布, 然后分析了高阶模对场分布均匀性的影响, 并由此确定了上限工作频率范围.

2 GTEM cell 的 FDTD 法模型

图 1 给出了 GTEM cell 的三维视图. 图中, OD' 与 OB' 的夹角为 β , 内导体板的张角为 α , OE' 与 OA' 的夹角为 γ , OE' 与 OC' 的夹角为 δ , OA' 与 OC' 的夹角为 $\eta = \delta + \gamma$. GTEM cell 的长度为 $OO' = R$.

¹ 1999-02-03 收到, 1999-08-22 定稿

广东省自然科学基金博士启动项目资助 (994263) 和华南理工大学自然科学基金资助项目 (E5-106-038)

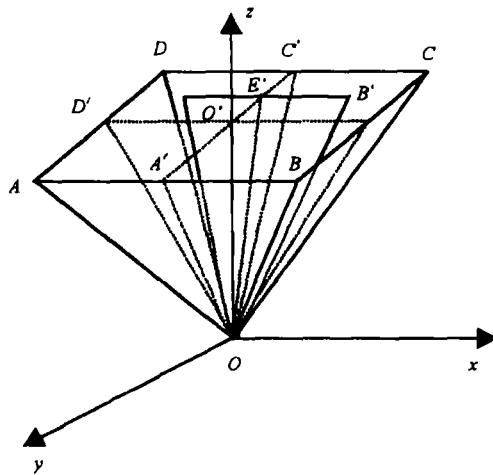


图 1 GTEM cell 的三维视图

下面我们采用非正交曲线坐标系下的 FDTD 法求解电磁波在 GTEM cell 中的传输特性。首先要建立一曲线坐标系。由于 GTEM cell 中传播的主模是 TEM 球面波, 其波阵面为一球面, 因此我们可以选取波阵面所在的球面为一坐标面, 同时为了使外导体边界易处理, 我们选取两个相邻外导体面为两个坐标面, 由此我们可得到一曲线坐标系 (r, θ, φ) , 其与直角坐标系 (x, y, z) 的相互关系为

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}\theta = y/z, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = x/z. \quad (3)$$

若设定 $-\pi/2 < \theta < \pi/2$, $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$, $r > 0$, 则上式为单调连续可微函数, (r, θ, φ) 可确定一空间曲线坐标系, 此曲线坐标系的三个坐标面分别为以顶点为球心的球面, 绕 x 轴旋转的平面, 绕 y 轴旋转的平面。 $r = \text{常数}$ 的坐标平面与 $\theta = \text{常数}$ 、 $\varphi = \text{常数}$ 两个坐标平面是相互正交, 但 $\theta = \text{常数}$ 、 $\varphi = \text{常数}$ 两个坐标平面却不相互正交。在非正交坐标系下对 GTEM cell 进行网格剖分, 剖分视图如图 2 所示。非正交坐标系下 FDTD 法的差分格式可参阅文献 [7, 8]。

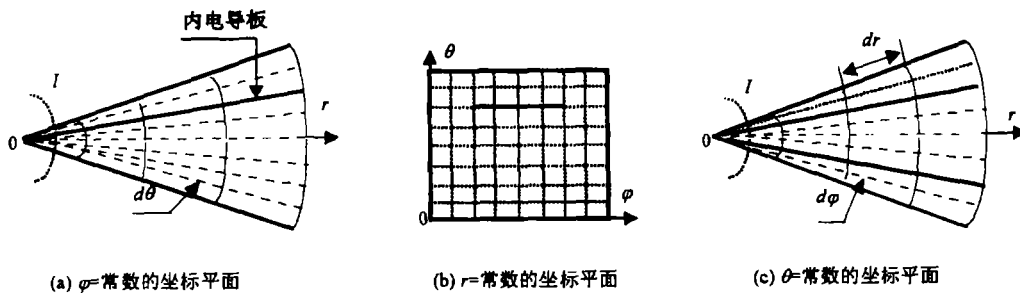


图 2 GTEM cell 在非正交坐标系下的网格划分

在 GTEM cell 的输入端, 定义球面 I 为输入激励源所在球面, 给定一电场激励, 则在 GTEM cell 中形成向前传输的电磁波。在 FDTD 算法中, 为了模拟终端匹配, 必须人为设置吸收边界条件以吸收外行波, 防止波的反射。同时在 GTEM cell 的输入端也应加上吸收

边界条件以防止波的二次反射。这里,我们在 GTEM cell 的终端和输入端加一损耗媒质,其导磁率为 μ_0 ,介电率为 ϵ_0 ,导电率为 σ ,等效磁阻率为 σ^* ,当角频率为 ω 时,媒质波阻抗为

$$z = \sqrt{(j\omega\mu_0 + \sigma^*) / (j\omega\epsilon_0 + \sigma)}. \quad (4)$$

如果我们选择 $\sigma^* = \sigma\mu_0/\epsilon_0$,波阻抗可简化为 $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$,表明该有耗媒质与自由空间具有良好的阻抗匹配,从而保证了垂直入射到此媒质的波全部被吸收而无反射^[9]。一般取 σ 为渐变值,即取有耗媒质内距界面距离为 ρ 处的导电率为^[10]

$$\sigma(\rho) = \sigma_m(\rho/\delta)^n, \quad (5)$$

其中 δ 为有耗媒质层的厚度,至少取 16 个网格。 n 一般取 2, σ_m 为媒质终端最大电导率。

3 数值结果及讨论

3.1 TEM 模场分布

GTEM cell 的主要特征是能产生均匀的 TEM 波,因此分析场分布是设计和使用 GTEM cell 的一个重要方面。考虑结构参数为 $\gamma = 18^\circ, \delta = 6^\circ, \alpha = 14^\circ, \beta = 24^\circ, R = 1.5\text{m}$ 的 GTEM cell,取电场 E_φ 、 E_θ 作为激励源,激励源随时间变化设为高斯脉冲,高斯脉冲的 1% 频带宽度为 1.6GHz,激励源的球面分布取为相应横截面 TEM 平面波的准静态分布。计算结果表明,在 GTEM cell 内任一点的场 E_φ 、 E_θ 、 H_φ 、 H_θ 的时域波形与高斯脉冲的波形几乎完全相同,表明高斯脉冲完全没有失真地在 GTEM cell 内传播。而沿传播方向的电场和磁场分量 E_r 、 H_r 虽不完全等于零(这是由于数值计算误差的存在),但与其它分量相比则接近于零,可见此时在 GTEM cell 中传输的模式为 TEM 球面波。图 3 给出了电场分量 E_φ 、 E_θ 在球面上的分布,图中的电场均已对点 $(\theta = \gamma/2, \varphi = \beta/2)$ 处 E_θ 值归一化。由图 3 可看出,在内导电板下的中心区域主要是垂直于内导电板的电场分量 E_θ 极化,且有较好的分布均匀性,而两侧主要是平行于内导电板的电场分量 E_φ 极化。为了更好地观察电场分布的均匀性,图 4 给出了以分贝数表示的电场分量 E_θ 的横向分布特性。通过图 4,人们可根据对场分布均匀性的不同要求而选择不同的测试区域。

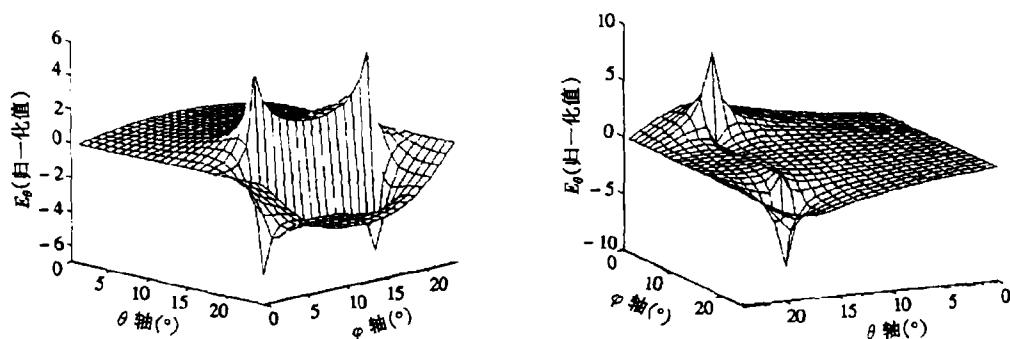


图 3 TEM 模电场分量 E_θ 、 E_φ 在球面上的分布

图 5 则给出了 E_θ 沿 r 轴的分布,由图 5 可见,沿 r 轴方向,越靠近终端,则电场分布的均匀性越好,因此,测试物应放在接近终端的空间。

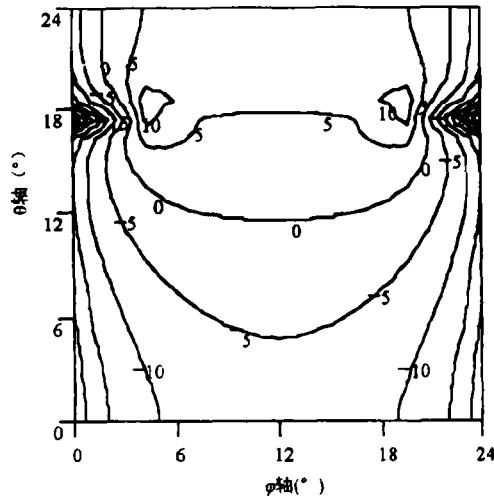


图 4 以分贝数表示的电场分量 E_θ 的横向分布特性

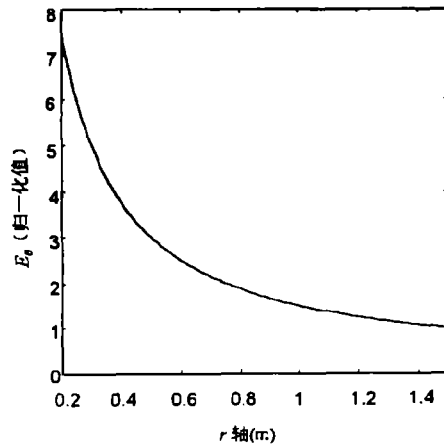


图 5 电场分量 E_θ 沿 r 轴的分布

3.2 高阶模对 TEM 球面波的影响

虽然诸多学者均认为 GTEM cell 能工作于几个吉赫^[3-6], 但并未有学者从理论上分析 GTEM cell 的上限可用频率范围, 因此本节研究高阶模对 TEM 球面波的影响, 以确定 GTEM cell 的上限可用工作频率范围. 以结构参数为 $\gamma = 18^\circ$, $\delta = 6^\circ$, $\alpha = 24^\circ$, $\beta = 32^\circ$, $R = 1.5\text{m}$ 的 GTEM cell 为例, 为了得到 GTEM cell 宽频带传输特性, 选取激励源的高斯脉冲的脉宽足够窄, 使其 1% 频带宽度为 6GHz. 激励源的球面分布取为相应横截面 TEM 平面波的准静态分布. 图 6 给出了 GTEM cell 中点 ($r = 1\text{m}$, $\theta = 12^\circ$, $\varphi = 12^\circ$) 处 E_θ 时域波形及其频谱. 由图 6 可见, 时域波形已发生色散, 表明了高阶模的存在. 但观察电场分量 E_θ 在整个频带内的分布, 可以发现, E_θ 在球面上的分布在整个有效频带内仍能保持不

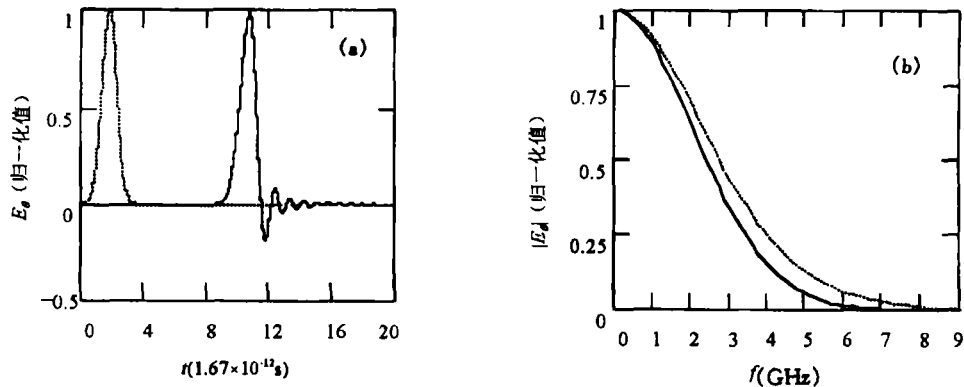


图 6 激励源及传播过程中某点的 E_θ 时域波形与频谱

(a) 激励源和传播过程中某点的 E_θ 时域波形 ... 激励源 — 点 ($r=1\text{m}$, $\theta = 12^\circ$, $\varphi = 12^\circ$)

(b) 激励源和传播过程中某点的 E_θ 频谱 ... 激励源 — 点 ($r=1\text{m}$, $\theta = 12^\circ$, $\varphi = 12^\circ$)

变, 说明高阶模的能量很小, 不足以影响 TEM 模场的分布. 可见, 此结构的 GTEM cell 可工作于 5GHz 以上, 这应该归因于 GTEM cell 结构没有锐角转折, 其横截面缓慢变化.

实际上, 经我们研究发现, 只要维持激励源的分布与 TEM 球面波分布相近, 则 GTEM cell 可工作在 5GHz 以上. 但若激励源的分布与 TEM 球面波相差较远, 则在较低频率下, 高阶模就占有较大的能量. 以结构参数为 $\gamma = 24^\circ$, $\delta = 8^\circ$, $\alpha = 24^\circ$, $\beta = 32^\circ$, $R = 1.5\text{m}$ 的

GTEM cell 为例, 取内导电板下部区域的均匀分布作为激励源 E_θ 的球面分布, 且此分布相对 φ 轴是对称的。计算结果表明, 在 2.5GHz 左右, 高阶模已开始占有一定的比例, 但比例很小, 随着频率的增大, 高阶模的能量逐渐增大, 到 4GHz 时高阶模已占有相当大的比例, 如图 7 所示。若取内导电板下部区域的均匀分布作为激励源 E_θ 的球面分布, 且此分布沿 φ 轴是非对称的, 则从频率 1.5GHz 左右开始, 电场分量 E_θ 沿 φ 轴出现轻微不对称, 表明存在 TE_{01} 模。随着频率的增大, 电场 E_θ 沿 φ 轴出现不对称性越来越明显, 如图 8 所示。同时, 我们发现电场 E_θ 沿 r 轴方向的分布随频率的变化不明显。

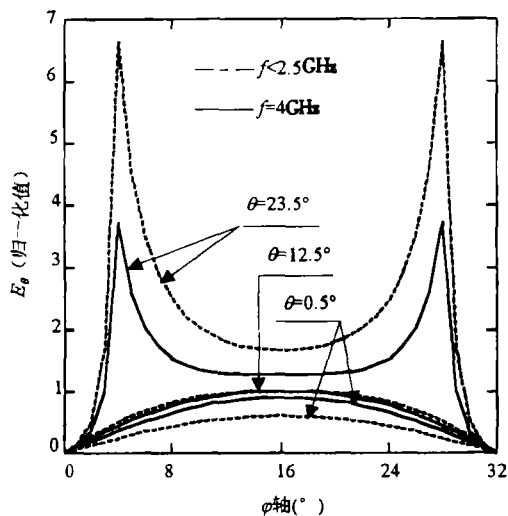


图 7 E_θ 沿 φ 轴的分布
(激励源球面分布取其均匀分布, 且分布对称)

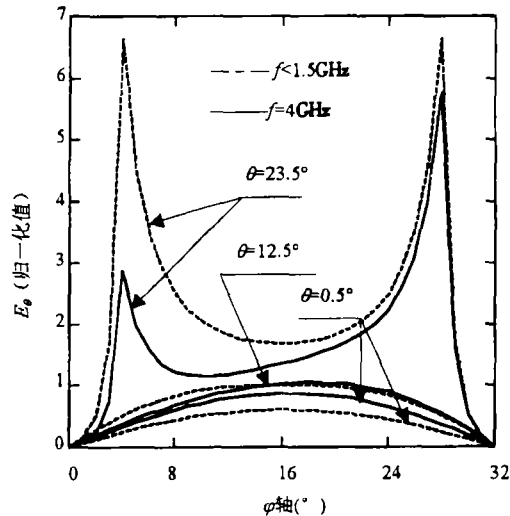


图 8 E_θ 沿 φ 轴的分布
(激励源球面分布取其均匀分布, 且分布不对称)

4 结 论

本文采用非正交坐标系下的 FDTD 法分析了 GTEM cell 的传输特性, 给出了 GTEM cell 中 TEM 模的横向分布和纵向分布, 分析了高阶模对场分布均匀性的影响, 确定了 GTEM cell 的上限工作频率范围。计算结果表明, 若保证激励源分布与 TEM 球面波相近, 则 GTEM cell 上限工作频率可达 5GHz 以上。若激励源场分布与 TEM 模场分布相差较远, 则 GTEM cell 的上限工作频率会大大降低。因此, 我们应保证标准同轴线与 GTEM cell 的良好过渡, 以免在过渡带激发起较强的高阶模, 从而降低 GTEM cell 的工作频率范围。

参 考 文 献

- [1] Crawford Myron L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells. IEEE Trans. on Electromagn. Compat., 1974, EMC-16(4): 189-195.
- [2] Spiegel R J, Joines W T, Blackman C F, Wood A W. A method for calculating electric and magnetic fields in TEM cells at ELF. IEEE Trans. on Electromagn. Compat., 1997, EMC-29(4): 265-272.
- [3] Koenigstein D, Hansen D. A new family of TEM-cells with enlarged bandwidth and optimized working volume. In Proc. 7th Int. Zurich Symp. And Techn. Exh. on EMC, Zurich: 1987. 127-132.
- [4] De Leo R, Rozzi T, Svara C, et al. Rigorous analysis of the GTEM cell. IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 1991. MTT-39(3): 488-499.

- [5] Liu Y, Tang B, Gao Y. Sphere-TEM mode in rectangular top horn offset coaxial transmission line. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, 1994, EMC-36(4): 390-394.
- [6] Kama Huang, Yongqin Liu. A simple method for calculating electric and magnetic fields in GTEM cell. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, 1994, EMC-36(4): 355-358.
- [7] Holland R. Finite-difference solution of Maxwell's equations in generalized nonorthogonal coordinates. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1983, NS-30(6): 4589-4595.
- [8] Jinfa Lee, Palandech R, Mittra R. Modeling three-dimensional discontinuities in waveguides using nonorthogonal FDTD algorithm. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, 1992, MTT-40(2): 346-352.
- [9] Holland R, Williams J W. Total-field versus scattered-field finite-difference codes: A comparative assessment. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1983, NS-30(6): 4583-4588.
- [10] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Comput. Phys.*, 1994, 114(2): 185-200.

WIDE BAND ANALYSIS OF TRANSMISSION CHARACTERISTICS IN GTEM CELL

Ji Fei Zhang Guoji Cui Furong Lai Shengli

(South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract The TEM cell is limited in the upper useful test frequency but GHz TEM (GTEM) cell permits to overcome this restriction. This paper analyzes the transmission characteristics in GTEM cell using FDTD method in the nonorthogonal coordinate. The field distributions have been calculated and the upper useful frequency has been analyzed. The results are of great value to the using and designing of GTEM cells.

Key words GTEM cell, Nonorthogonal coordinates, FDTD method, Field distribution

季 飞: 女, 1970 年生, 博士, 从事电磁场生物学效应、电磁兼容的科研和教学工作。
张国基: 男, 1956 年生, 副教授, 博士, 从事电磁场生物学效应的科研工作。
崔芙蓉: 女, 1973 年生, 博士生, 从事电磁场生物学效应的科研工作。
赖声礼: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 从事电磁场生物学效应的科研工作。