

横电磁波传输室电场纵向不均匀性分析*

蔡 小 丁

(电子科技大学, 成都)

摘要 本文导出了横电磁波传输室 (TEM Cell) 电场的纵向不均匀性表达式。数值结果与 M. L. Crawford(1977) 的实验值吻合较好。该结果可用于校正测量探头位置偏差带来的测量误差, 从而提高用 TEM Cell 进行电磁兼容性试验和天线探头校准的测量精度。

关键词 传输线; 横电磁波传输室; 电磁兼容性测量

1. 引言

电子设备的电磁兼容性 (EMC) 正日益受到电气、电子科技领域的重视。在较低频段中, 电子设备的电磁兼容性测量分为电场和磁场测量两类, 可以采纳一些新的测量技术, 譬如, 横电磁波传输室 (TEM Cell) (500MHz 以下电场测量)^[1~4], 正交载流环路导板 (TOSCL) (1MHz 以下磁场测量)^[5] 等测量装置。

横电磁波传输室的一些重要特性, 如特性阻抗、电场分布和高次模截止频率等已经得到详细的、有工程实用价值的分析结果^[2~3]。然而, 这些分析都是关于 TEM Cell 的“横向”特性。实际上, 由于终端匹配的不完善以及结构等因素, TEM Cell 的阻抗和内部电场的纵向分布并非均匀。实测已经表明, 当探头沿纵向 (即 TEM Cell 的长度方向) 移动时, 所测得的电场值并不处处等于理论预测值, 而呈波动型变化^[6]。这个变化如不经修正, 将导致探头测量和探头校准的较大误差。本文借助传输线理论并结合已经得到的横向场解析结果, 分析了 TEM Cell 的阻抗与电场的纵向分布特性。分析中考虑了传输损耗影响。

2. 阻抗与电场的纵向分布表达式

当工作频率低于 TEM Cell 的截止频率时, 横向电场以垂直分量 E_V 为主要场分量。因此以下讨论 E_V 的纵向分布规律。 E_V 为^[1]

$$E_V = \sqrt{P_{in} R_c} / b \quad (1)$$

式中, P_{in} 为输入功率, R_c 为 TEM Cell 特性阻抗实部, b 为芯板与上板之间的距离。令 E_V 的纵向分布为

$$E_V(z) = \sqrt{P_{in} Z_r(z)} / b \quad (2)$$

式中, $Z_r(z) = \text{Re}[Z(z)]$ 是 TEM Cell 复数阻抗 $Z(z)$ 的实部, z 为纵向坐标。

内部中空的 TEM Cell 可以视作均匀的传输线, 它有如下参数: 传播常数 $\gamma = \alpha + j\beta$, 相位常数 β , 衰减常数 α , 特性阻抗 Z_0 , 任一点反射系数 $\Gamma(z)$, 电压驻波比系数 (VSWR) ρ 。设 TEM Cell 长度为 l , 有新坐标 $z' = l - z$ 。在实际应用中, TEM Cell 属低耗传输线, 且终端负载为纯阻负载, 则

1989年8月26日收到, 1990年3月22日修改定稿。

* 电子科技大学青年教师科研基金资助课题。

$$Z_r(z) = [(\rho^2 + 1)\text{sh}2\alpha(l-z) + 2\rho\text{ch}2\alpha(l-z)]Z_0 / \left\{ (\rho^2 + 1)\text{ch}2\alpha(l-z) + 2\rho\text{sh}2\alpha(l-z) - (\rho^2 - 1) \right. \\ \left. \times \cos \left[\frac{4\pi f(l-z)}{c} \right] \right\} \quad (3)$$

式中, c 为光速. 对(3)式的讨论如下:

(1) 当驻波比系数 $\rho = 1$, 则 $Z_r(z) = Z_0$, 说明在完全的匹配终端情况下, TEM Cell 为纯行波传输, $Z_r(z)$ 处处等于特性阻抗 Z_0 .

(2) 当频率 $f = 0$, 则 $Z_r(z) = Z_0$, 说明在静态场下 ($\rho = 1$), $Z_r(z)$ 处处等于特性阻抗 Z_0 ,

(3) 当忽略损耗, $\alpha = 0$, 可以得到如下简化公式^[3]:

$$Z_r(z) = \frac{2\rho Z_0}{1 + \rho^2 - (\rho^2 - 1) \cos \left[\frac{4\pi f(l-z)}{c} \right]} \quad (4)$$

将(3)式代入(2)式得到电场的纵向分布表达式为

$$E_v(z) = \sqrt{\frac{[(\rho^2 + 1)\text{sh}2\alpha(l-z) + 2\rho\text{ch}2\alpha(l-z)]P_{in}Z_0b^{-2}}{(\rho^2 + 1)\text{ch}2\alpha(l-z) + 2\rho\text{sh}2\alpha(l-z) - (\rho^2 - 1) \cos \left[\frac{4\pi f(l-z)}{c} \right]}} \quad (5)$$

3. TEM Cell 的衰减常数分析

(5)式中的衰减常数 α 分为传导衰减 α_c 和介质衰减 α_d 两部分. 对于未加有吸波材料的 TEM Cell, α_d 可以不计. 传导衰减常数可导得为^[7]

$$\alpha_c = \frac{R_s \oint_{s_1+s_2} |\mathbf{E}_t|^2 dl}{2z_0 \left[\oint_{s_1} |\mathbf{E}_t|^2 dl \right]^2} \quad (\text{Nep/m}) \quad (6)$$

式中, $R_s = \sqrt{\omega\mu_0/2\sigma_c}$ 为表面电阻; 内外导体为铝板, $\sigma_c = 3.82 \times 10^7 \text{S/m}$. (6) 式中 s_1 和 s_2 分别表示外导体和内导体的周界, $\mathbf{E}_t$ 为 TEM Cell 横向电场分布. 按一阶近似分析方法, $\mathbf{E}_t$ 可取未受损耗扰动的无耗场分布^[3]:

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{e}(x, y)V \quad (7)$$

式中, V 为芯板电压, $\mathbf{e}(x, y)$ 为归一化的模矢量电场:

$$\mathbf{e}(x, y) = \begin{cases} -\frac{\sqrt{\pi}}{a \text{Re}} \sum_{n=1}^{\infty} F'_{n1} \left[\cos\left(\frac{\Delta_n}{2}x\right) \text{sh}\left(\frac{\Delta_n}{2}y\right) \mathbf{a}_x \right. \\ \left. + \sin\left(\frac{\Delta_n}{2}x\right) \text{ch}\left(\frac{\Delta_n}{2}y\right) \mathbf{a}_y \right], & (0 \leq y \leq b_2) \end{cases} \quad (8a)$$

$$\begin{cases} -\frac{\sqrt{\pi}}{a \text{Re}} \sum_{n=1}^{\infty} F'_{n2} \left[\cos\left(\frac{\Delta_n}{2}x\right) \text{sh}\left(\frac{\Delta_n}{2}(2b-y)\right) \mathbf{a}_x \right. \\ \left. - \sin\left(\frac{\Delta_n}{2}x\right) \text{ch}\left(\frac{\Delta_n}{2}(2b-y)\right) \right] \mathbf{a}_y, \\ (b_2 \leq y \leq 2b) \end{cases} \quad (8b)$$

式中

$$Re = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{F'_{n1}{}^2 \text{sh}(\Delta_n b_2) + F'_{n2}{}^2 \text{sh}(\Delta_n (2b - b_2))}{n} \right)} \quad (9)$$

$$F'_{n1} = \text{sh} \left(\frac{\Delta_n}{2} (2b - b_2) \right) [d_1(n) + B d_2(n)] / \text{sh}(\Delta_n b) \quad (10)$$

$$F'_{n2} = \text{sh} \left(\frac{\Delta_n}{2} b_2 \right) [d_1(n) + B d_2(n)] / \text{sh}(\Delta_n b) \quad (11)$$

$$R = \frac{-\sum_{n=1}^{\infty} G'_{n1}(b_2) [A_m d_1(n) - d_2(n)] d_1(n)}{\sum_{n=1}^{\infty} G'_{n1}(b_2) [A_m d_1(n) - d_2(n)] d_2(n)} \quad (12)$$

$$d_1(n) = 4 \sin(\Delta_n a/2) \sin(\Delta_n w/2) / \Delta_n \quad (13)$$

$$\begin{aligned} d_2(n) = & \frac{2}{(2w)^m} \sin \left(\frac{\Delta_n}{2} a \right) \left[\sin \left(\frac{\Delta_n}{2} w \right) \cdot \sum_{r=0}^{(m/2)} (-1)^r \frac{m!}{(m-2r)!} \right. \\ & \times \frac{w^{m-2r}}{\left(\frac{\Delta_n}{2} \right)^{2r+1}} + \cos \left(\frac{\Delta_n}{2} w \right) \cdot \sum_{r=0}^{(m-1)/2} (-1)^r \\ & \left. \times \frac{m!}{(m-2r-1)!} \cdot \frac{w^{m-2r-1}}{\left(\frac{\Delta_n}{2} \right)^{2r+2}} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

$$G'_{n1}(b_2) = \text{sh} \left(\frac{\Delta_n}{2} (2b - b_2) \right) \text{sh} \left(\frac{\Delta_n}{2} b_2 \right) / n \text{sh}(\Delta_n b) \quad (15)$$

$$A_m = 1/[2^m(m+1)], \Delta_n = n\pi/a \quad (16)$$

(8)~(16)式中的各几何参数见图 1.

针对一特定的对称结构 TEM Cell ($a = b = 0.5\text{m}$, $w/a = 0.85$), 取 $f = 150\text{MHz}$, 由 (6) 式算得 $\alpha_c = 0.088\text{dB/m} \approx 0.1\text{dB/m}$. 对常规 TEM Cell (无吸波材料), $\alpha \approx \alpha_c$. 对加有吸波材料的 TEM Cell, $\alpha = \alpha_c + \alpha_d$, 其中 α_d 介质衰减常数, 对其分析, 因问题复杂, 将另文讨论. 根据文献 [6] 提供的实测数据可以推断, 常规 TEM Cell 的 $\alpha \leq 0.3\text{dB/m}$.

4. 电场的纵向不均匀度

实用中的 TEM Cell 因尺寸、输入功率不同而使电场纵向分布不同. 这里为考虑一般性, 特

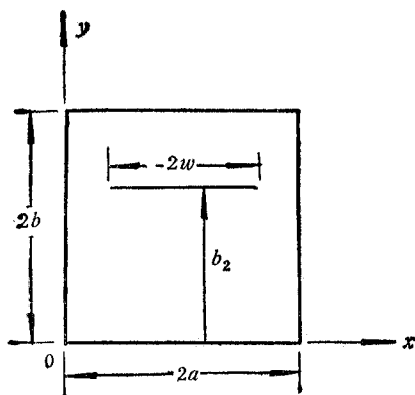


图 1 TEM Cell 横截面

定义归一化电场纵向分布为

$$\bar{E}_V(z) = E_V(z)/E_0 \quad (17)$$

式中

$$E_0 = \sqrt{P_{in} Z_0 / b} \quad (18)$$

又定义电场纵向不匀度为

$$\Delta \bar{E}_V = (\bar{E}_V(z)_{\max} - \bar{E}_V(z)_{\min}) \times 100\% \quad (19)$$

$$(l/2 - l'/2 \leq z \leq l/2 + l'/2)$$

式中 l' 为 TEM Cell 主段中沿 z 方向的有效测量段长度, 可依需要而确定其大小。

将(5)式代入(19)式, 可以获得一系列有用的数值结果。现以文献[6]中的 TEM Cell 为计算对象, 其参数如下: $2a = 2b = 3\text{m}$, $l = 6\text{m}$, $w/a = 0.83$, $l' = 1.5\text{m}$ 。图 2 给出了当 α 分别取值为 0.0, 0.1, 0.3 和 0.5 dB/m 时,

$\Delta \bar{E}_V$ 随频率变化的曲线 ($\rho = 1.10$)。

$\Delta \bar{E}_V$ 所揭示的物理意义是: 置于 TEM Cell 中的测量探头, 在距芯板的同样高度上, 沿长度方向任意两点测得的电场值的最大相对误差(在给定测量长度 l' 范围内, 相对误差的比较基准是理论预测的横向电场值 E_0)。

上述分析结果还与文献[6]给出的实测数据作了比较, 在一些频率上(如 $f = 80$, 90MHz) 有较好的吻合, 见表 1。表中 λ_{Va} 见下节定义。

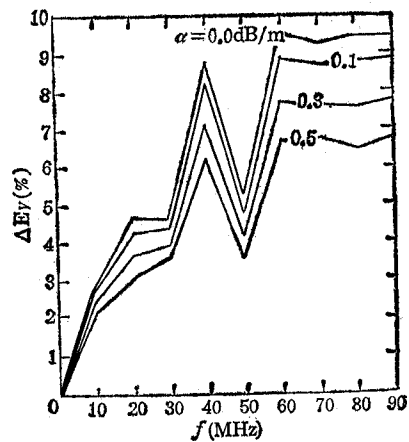


图 2 电场纵向不匀度 $\Delta E_V(\%)$
VSWR = 1.10

5. 关于(5)式的讨论

(5) 式不仅揭示了横向电场沿纵向变化的振幅信息, 而且还给出这种变化的周期和相位信息。数值结果说明, $E_V(z)$ 沿 z 方向呈近似正弦波型变化。这个变化形式已为文献[6]给出的实测数据曲线图所证实。表 1 还给了 $E_V(z)$ 变化周期的实测值与计算值的比较。表 1 中 λ_{Va} 定义为纵向半波长, 其含意是 $E_V(z)$ 最大值(波峰)与 $E_V(z)$ 最小值(波谷)之间沿 z 方向的最近距离。对(5)式求极值, 可导出 λ_{Va} 的表达式为

$$\lambda_{Va} = c/(4f) \quad (20)$$

表 1 电场实测值与计算值的比较 ($2a = 2b = 3\text{m}$, $l = 6\text{m}$, $w/a = 0.83$, $l' = 1.5\text{m}$)

$f = 80\text{MHz}$, $\rho = 1.2305$, $\alpha = 0.05\text{dB/m}$		$f = 90\text{MHz}$, $\rho = 1.1737$, $\alpha = 0.05\text{dB/m}$	
实测值[6]	计算值[本文]	实测值[6]	计算值[本文]
$\bar{E}_V(z)_{\max} = 1.1033 \pm 2\%*$	$\bar{E}_V(z)_{\max} = 1.1044$	$\bar{E}_V(z)_{\max} = 1.0799 \pm 2\%$	$\bar{E}_V(z)_{\max} = 1.078$
$\bar{E}_V(z)_{\min} = 0.8967 \pm 2\%$	$\bar{E}_V(z)_{\min} = 0.9061$	$\bar{E}_V(z)_{\min} = 0.9201 \pm 2\%$	$\bar{E}_V(z)_{\min} = 0.9252$
$\Delta \bar{E}_V = 20.67\% \pm 4\%$	$\Delta \bar{E}_V = 19.83\%$	$\Delta \bar{E}_V = 15.98\% \pm 4\%$	$\Delta \bar{E}_V = 15.37\%$
$\lambda_{Va} = 0.833\text{m} \pm 5\%$	$\lambda_{Va} = 0.938\text{m}$	$\lambda_{Va} = 0.796\text{m} \pm 6\%$	$\lambda_{Va} = 0.833\text{m}$

* $\pm\%$ 表示读数误差, 测试仪器和条件详见文献[6]所附参考文献。

式中 f 为测量频率, c 为光速。

$E_V(z)$ 的相位信息与终端负载的性能有关。自制的无感负载可能在高频时呈现电抗效应,使 $E_V(z)$ 的相位随频率而变化。如果对特定的 TEM Cell 及其终端负载,通过测量获得 $E_V(z)$ 的相位变化规律,由此可以对(5)式进行相位修正(必要时还应进行振幅修正)。经修正的 $E_V(z)$ 为

$$E_V(z) = M_e \sqrt{\frac{[(\rho^2 + 1)\text{sh}2\alpha(l-z) + 2\rho\text{ch}2\alpha(l-z)]P_{in}Z_0b^{-2}}{(\rho^2 + 1)\text{ch}2\alpha(l-z) + 2\rho\text{sh}2\alpha(l-z) - (\rho^2 - 1)\cos\left[\frac{4\pi f(P_e l - z)}{c}\right]}} \quad (21)$$

式中, M_e 和 P_e 分别是振幅和相位修正因子。

6. 结论

横电磁波传输室不仅在电磁兼容性测量中有重要用途,而且已被采纳为高频场强(强场)计量标准。在我国国家级的 EMC 测量标准中, TEM Cell 也被推荐为标准测量装置。因此,这就要求 TEM Cell 有较高的测量精度和可靠性。本文导出的电场纵向分布和不匀度表达式,可直接用于上述各类测量的电场精度校正。所给表达式不涉及繁复的数学运算,因而便于工程应用。因(5)式中的衰减常数 α 可含传导和介质衰减两部分,它们可用不同的方法算得(本文已给出传导衰减常数的计算方法),所以本文的分析结果适用于对称、非对称、加有吸波材料等各种横电磁波传输室。

参 考 文 献

- [1] M. L. Crawford, *IEEE Trans. on EMC*, **EMC-16**(1974)4, 189—195.
- [2] 蔡小丁、李家樾,北京邮电学院学报, **11**(1988)2, 77.
- [3] Xiao-Ding Cai, Jia-Yue Li, *Proc. IEE, Part H*, **136**(1989) 3, 191—194.
- [4] 蔡小丁、李家樾,北京邮电学院学报, **12**(1989)3, 17.
- [5] Xiao-Ding Cai, *IEEE Trans. on EMC*, **EMC-31**(1989)3, 209—217.
- [6] M. L. Crawford, J. L. Workman, C. Thomas, *IEEE Trans. on IM*, **IM-26**(1977)3, 225—230.
- [7] R. E. 柯林,微波工程基础,人民邮电出版社,1981年,第82—87页.

ANALYSIS OF LONGITUDINAL NONUNIFORMITY OF ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN TEM CELLS

Cai Xiaoding

(University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu)

Abstract By utilizing transmission line theory, practical expressions for the longitudinal non-uniformity of the electric field distribution in TEM cells are obtained. Numerical results agree well with experimental ones shown by M. L. Crawford (1977) at some frequencies. The results presented can be applied in correcting errors caused by probe location deviation in the longitudinal direction so as to reach higher accuracies in EMC measurements and probe calibration with TEM cells.

Key words Transmission line; TEM cell; EMC measurements