

应用边界元法计算 TEM 小室 中高次模的截止频率

宋 斌 傅君眉

(西安交通大学, 西安 710049)

摘要 本文提出了应用边界元法求解 TEM 小室中高次模截止频率的方法, 求出了多个 TE 和 TM 模式的截止频率值。对于一对称小室, 由于利用了电壁和磁壁, 所以仅研究横截面的四分之一部分就可以得到满意的结果, 并且很容易判断其模式。文中列出了一些计算结果并与其它方法的数据进行了比较。

关键词 TEM 小室; 边界元法; 高次模截止频率

1. 引言

TEM 小室是 Crawford^[1] 在 1974 年提出的, 它是由一段两端锥形的矩形同轴线构成的, 其中间部分可提供一个完全与外界隔离的横电磁波测试环境。在 TEM 小室的使用中, 一个非常关键的问题就是确定可用频带范围。TEM 小室具有很宽的频带, 其可用频率范围取决于 TE 和 TM 高次模式的截止频率和锥端反射引起的谐振。关于小室中高次模截止频率的求解, 迄今已出现了多种方法^[2-5], 但它们得到的结果差异比较大, 且所得模式较少。本文采用边界元法计算了 TEM 小室中高次模的截止频率。

2. 二次元的边界元法

本文在计算高次模截止频率时, 与其它方法类似, 忽略了小室两端锥形部分的影响。图 1 示出了一矩形对称 TEM 小室的横截面。

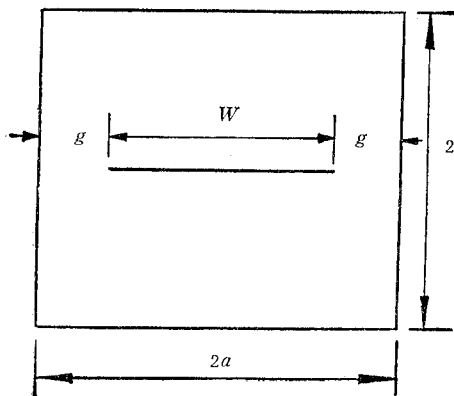


图1 矩形对称 TEM 小室的横截面

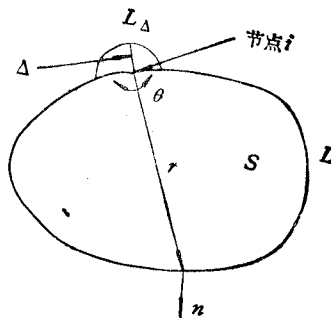


图2 被边界 L 包围的三维区域

小室内的纵向场分量满足 Helmholtz 方程

$$\nabla_{\perp}^2 u + k_c u = 0 \quad (1)$$

这里 $\nabla_{\perp}^2$ 为横向 Laplace 算子, k_c 为截止波数; 对于 TM 模, $u = E_z$, 对于 TE 波, $u = H_z$.

设被边界 L 包围的区域如图 2 所示. 利用基本解和格林函数^[6], 由(1)式可得

$$u_i + \int_L u q^* dl = \int_L u^* q dl \quad (2)$$

其中

$$u^* = -(j/4) H_0^{(2)}(k_c r) \quad (3)$$

$$q^* = (j/4) k_c H_1^{(2)}(k_c r) \cos \alpha \quad (4)$$

这里, u_i 为节点 i 的 u 值, q 和 q^* 分别为 u 和 u^* 的外法向导数, $H_0^{(2)}$ 和 $H_1^{(2)}$ 分别是 0 阶和 1 阶第二类 Hankel 函数, α 为矢量 r 与外法向单位矢量 n 的夹角.

将节点 i 移至边界 L 上, 并选择积分路径 L_{Δ} 围绕节点 i , 参见图 2, 同时利用柯西积分主值定律, 得到

$$c_i u_i + \int_L u q^* dl = \int_L u^* q dl \quad (5)$$

这里, $c_i = 1 - \theta/(2\pi)$, 对于光滑边界 $c_i = 1/2$.

将边界 L 划分成二次元素, (5) 式可离散化为代数方程组

$$c_i u_i + \sum_{e=1}^N \int_{l_e} u q^* dl = \sum_{e=1}^N \int_{l_e} u^* q dl \quad (6)$$

上式中, N 为划分元素的总数, l_e 为元素 e 的长度.

对于每个元素, 节点 $j (j = 1, 2, 3)$ 上的 u, q 分别被定义为 u_j 和 q_j , 则(6)式可改写为

$$c_i u_i + \sum_{e=1}^N [h_{i,e}^1 h_{i,e}^2 h_{i,e}^3] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \sum_{e=1}^N [g_{i,e}^1 g_{i,e}^2 g_{i,e}^3] \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

上式可写成矩阵形式

$$[H][U] = [G][Q] \quad (8)$$

3. TEM 小室中高次模截止频率的求解

对于一对称小室, 仅研究其横截面的四分之一部分即可(取图 1 中右下部分); 为了区分其模式, 截面边界由电壁和磁壁的不同组合来表示, 参见图 3.

对于 TE 模, 纵向磁场分量在边界上满足

$$\left. \begin{array}{l} \text{电壁上: } \partial H_z / \partial n = 0 \\ \text{磁壁上: } H_z = 0 \end{array} \right\} \quad (9)$$

对于 TM 模, 纵向电场分量在边界上满足

$$\left. \begin{array}{l} \text{电壁上: } E_z = 0 \\ \text{磁壁上: } \partial E_z / \partial n = 0 \end{array} \right\} \quad (10)$$

考虑到边界条件(9)式或(10)式, 则(8)式就可写为下面形式的齐次方程组:

$$[A][X] = 0 \quad (11)$$

为使此方程组有解,则 A 矩阵的行列式 $|A|$ 必须等于 0,即

$$|A| = 0 \quad (12)$$

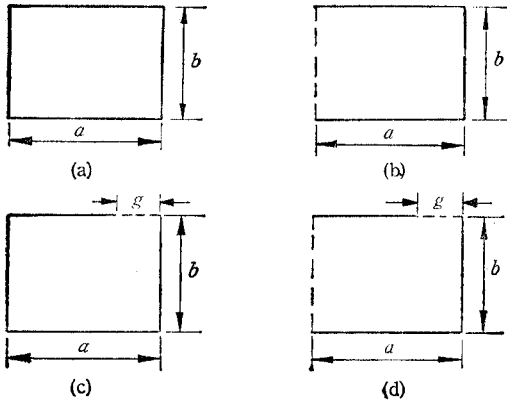


图3 TEM 小室四分之一横截面部分的边界选取
——电壁-----磁壁
(a) $TE_{偶,偶}$ 模和 $TM_{偶,偶}$ 模; (b) $TE_{奇,偶}$ 模和 $TM_{奇,偶}$ 模; (c) $TE_{偶,奇}$ 模和 $TM_{偶,奇}$ 模; (d) $TE_{奇,奇}$ 模和 $TM_{奇,奇}$ 模。

因为 $[A]$ 中的元素均为截止波数 k_c 的函数,将这个行列式展开,就成为以 k_c 为变量的复系数的超越方程,可用牛顿法或谬勒法求解。

求出小室中高次模的截止频率后,即可利用文献[3]中所述方法求出高次模的谐振频率。

4. 结果分析

为了验证上述分析过程的有效性,我们对一典型的 TEM 小室进行了研究。小室的尺寸为(参见图1):

$$a = 3.05\text{m}, b = 3.65\text{m}, g = 1.02\text{m}.$$

本文方法得到的结果与其它方法的数据进行了比较,参见表1。由于本文方法

考虑到了对称性,并利用了电壁和磁壁作为截面的边界,所以很容易判断小室中高次模的模式。

表1 TEM 小室中高次模的截止频率

$f_c(\text{MHz})$ 方法	模式	TE_{01}	TE_{10}	TE_{11}	TE_{02}	TE_{21}	TE_{12}	TE_{20}	TE_{03}	TE_{13}	TE_{22}
本文方法		15.32	24.55	31.27	40.75	45.58	47.07	48.52	54.96	63.02	63.40
文献[3]		15.2	24.6	31.3	41.1	45.4	47.8	49.2	—	—	—
文献[4]		15.5	24.6	31.9	41.1	52.9	47.8	49.2	—	—	—
文献[5]		15.1	24.6	31.0	41.1	45.4	47.8	49.2	—	—	—

$f_c(\text{MHz})$ 方法	模式	TE_{23}	TE_{30}	TE_{31}	TE_{32}	TE_{33}	TM_{11}	TM_{12}	TM_{21}	TM_{22}
本文方法		75.78	72.91	76.44	83.74	90.10	47.71	47.78	63.82	64.01
文献[3]		—	—	—	—	—	47.5	47.8	—	—
文献[4]		—	—	—	—	—	52.2	47.8	—	—
文献[5]		—	—	—	—	—	47.6	47.8	—	—

从表 1 的比较可以发现, 本文方法得到的 TE_{21} 模和 TM_{11} 模的数据与文献 [3] 和 [5] 中的结果相符, 而与文献 [4] 中的有比较大的差异。 TM_{11} 和 TM_{12} 的结果与文献 [4] 中的均不相同。我们曾取不同的小室尺寸进行计算, 发现 TM_{11} 的截止频率总是稍小于 TM_{12} 的。这一点与文献 [5] 中的结果比较类似, 但与文献 [5] 不同之处在于, 本文方法计算出的 TM_{11} 和 TM_{12} 的截止频率非常接近 (尤其是在 g/a 比较小的时候)。另外, TM_{21} 与 TM_{22} 的截止频率也有类似的特性。

5. 结论

应用边界元法计算 TEM 小室中高次模的截止频率是非常有效的。对于一对称小室, 由于利用了电壁和磁壁, 所以仅研究横截面的四分之一部分就可得到满意的结果, 并且很容易判断其模式。另外, 又由于边界元法本身固有的结果精确、计算量小等特点, 使它相对于其它方法具有明显的优越性。

参 考 文 献

- [1] Myron L. Crawford, *IEEE Trans. on EMC*, **EMC-16**(1974)2, 189—193.
- [2] C. M. Weil, L. Gruner, *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-32**(1984)6, 638—641.
- [3] D. A. Hill, *J. Microwave Power*, **18**(1983)2, 181—195.
- [4] P. F. Wilson, M. T. Ma, *IEEE Trans. on EMC*, **EMC-28**(1986)2, 125—130.
- [5] J. Zhang, Junmei Fu, *IEEE Trans. on EMC*, **EMC-30**(1988)6, 563—567.
- [6] C. A. Brebbia et al., *Boundary Element Techniques in Engineering*, London: Butterworth, (1980), pp. 36—65.

COMPUTATION OF HIGHER-ORDER MODE CUT-OFF FREQUENCIES IN TEM CELLS USING BOUNDARY- ELEMENT METHOD

Song Bin Fu Junmei

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract The boundary-element method is proposed to investigate the higher-order mode cut-off frequencies in TEM cells. Both TE and TM modes are considered. For symmetry, only one quarter of the cross-section is analyzed, and electric and magnetic walls are employed in the cross-section. With this method, mode identification can easily be made by using an eigenvector solution. The obtained results are compared with data available in literatures.

Key words Higher-order mode cut-off frequency; TEM cell; Boundary-element method