

大的标准 TEM 小室内谐振频率的计算

彭玉华 傅君眉

(西安交通大学信控系 西安 710049)

摘要 本文分别用 FD-TD (时域有限差分) 法和不均匀划分 TLM (传输线矩阵) 法计算标准 TEM 小室的谐振频率。在 FD-TD 法的计算中, 提出一种新的磁边界条件的处理方法, 节省了计算量, 给出了大量未曾发表过的标准 TEM 小室内谐振频率的计量结果。在不均匀划分 TLM 方法的计算中, 按小室的自然结构不均匀的划分小室内的传播空间, 也达到了节省计算量的目的。最后, 对这两种方法和计算结果进行了比较。给出了若干结论。

关键词 横电磁波波导, 时域数值计算, 传输线矩阵法

1 引言

对于矩形同轴线的研究, 早在 60 年代就出现了, 70 年代人们意识到它的内部在一定频带范围内可提供一个标准的、均匀的 TEM 封闭测试环境。1974 年 Crawford^[1] 设计了 TEM 小室的结构(图 1)后, 它获得了日益广泛的应用。在 TEM 小室的使用中, 一个非常关键的问题是可用频带的确定。Hill^[2], Weil 和 Gruner^[3], P. F. Wilson^[4] 分别对小室内的高次模谐振频率进行了研究, 目前, 对于 NBS (National Bureau of Standards, 美国国家标准局) 小室的前 7 种 TE 模的截止频率及少数谐振频率有了较稳定的结果, TE 模的其他谐振频率和 TM 模的所有谐振频率还没有明确的数据结果。本文用数值计算的方法对 TEM 小室进行了分析, 给出了 NBS TEM 小室的 TE, TM 模的前几十个谐振数据, 且同文献上已有的数据进行了分析比较, 提出了作者自己的见解。

本文的第 2 节给出 FD-TD 法, 其思想是由 K. S. Yee^[5] 提出的, 同 TLM 法相比, 它具有运算速度快、节省存储空间等优点。本文考虑到对于标准 TEM 小室, 由于场结构的对称分布, 可以取其 1/8 为研究对象。对计算中出现的一些问题, 如磁边界条件的处理问题提出了自己的建议和有效的处理方法。本文的第 3 节是采用不均匀划分的三维 TLM 法计算小室的谐振频率, 文献[6—8]分别对 TLM 法进行了研究。本文考虑到小室的边缘和拐角处高频量多, 场量变化较快, 均匀划分精度不够容易丢失一些信息, 因此采用不均匀划分的方法, 以求得既节省计算资源又可减少粗糙误差, 得到更精确的结果。本文的最后部分将两种方法进行了比较, 并给出了自己的见解。

2 用 FD-TD 法计算大的 NBS TEM 小室内部的谐振频率

2.1 TEM 小室的对称性分析 本文所有的计算结果都是以大的 NBS TEM 小室

1993-06-14 收到, 1993-10-23 定稿

彭玉华 女, 1967 年生, 博士生, 从事微波技术的研究。

傅君眉 女, 1936 年生, 教授, 从事微波技术专业的教学和研究工作。

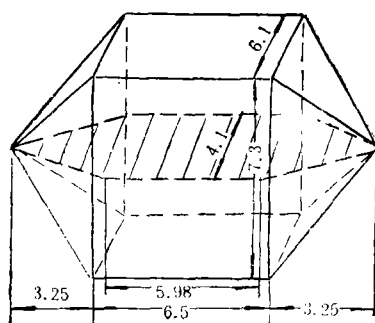


图1 NBS TEM 小室

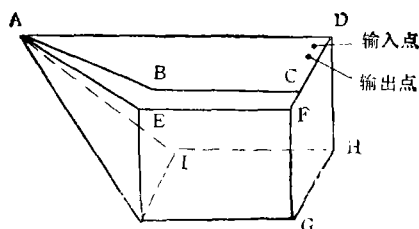


图2 1/8 NBS TEM 小室

为对象, 它的尺寸为 $6.1 \times 7.3 \times 13 \text{ cm}^3$ (图1), 小室的结构沿直角坐标系的三个坐标方向对称, 内部场也应是对称的, 因此 1/8 小室 (图2) 可代表整个 TEM 小室的本质特性。根据对称性, 三个截面 (AEFCB 面、DFGH 面、AIHD 面) 上的边界条件必为电面或磁面, 而且每一截面等效为电面或磁面取决于我们所讨论的振荡模式, 根据各截面的取值不同可把小室中的振荡模式划分为八类 (若把 TE 和 TM 模式分开就有 16 类) 来计算, 见表 1。

将 1/8 TEM 小室内部均匀划分, 在输入点 (见图2) 给一个 δ 冲激, 用差分方程^[5]和确定的边界条件, 可交错得到每相差半个时间步长的电场和磁场, 电场和磁场的时间序列代表了小室的瞬态响应特征。其傅氏变换的每一个峰值对应于小室的一个谐振频率, 由此可得到小室的谐振特性。

2.2 磁壁边界条件的处理 FD-TD 法单元网格上的场量分布如图3所示。将小

室分别沿三个直角坐标方向整数划分, 则边界面必将同单元网格的一个面重叠, 因此边界面上在迭代过程中涉及到的场量为切向电场和法向磁场。对于理想电壁边界条件, 可直接令边界上的切向电场和法向磁场为零, 但对于磁壁, 就不能简单的赋值。根据差分迭代公式^[5], 每一时刻的电场分量是由前半时刻的周围磁场值决定的, 而每一时刻的磁场分量是由前半时刻的周围电场值决定的。对于边界面上的场量来说, 由于边界外侧的电场值和磁场值不存在, 所以边界面上的场量不能直接应用迭代算式进行计算。我们知道: 理想磁壁上的切向电场和法向磁场应在最大位置, 且变化最平坦, 因此, 将边界外侧的场量值用边界内对应点上的对应场量值来代替, 代入迭代算式, 就可得到磁壁上切向电场和法向磁场的表达式。

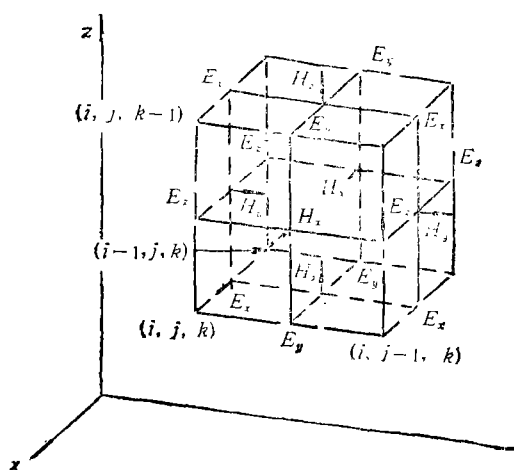


图3 三维 FD-TD 法划分单元上的场量分布

表 1 TEM 小室中高阶模式的分类

AIHD	AEFCB	DFGH	对应 TE、TM 模式
M	E	M	$TE(M)_{2m-1, 2n, 2p-1}$
M	E	E	$TE(M)_{2m-1, 2n, 2p}$
M	M	E	$TE(M)_{2m-1, 2n-1, 2p}$
M	M	M	$TE(M)_{2m-1, 2n-1, 2p-1}$
E	E	E	$TE(M)_{2m, 2n, 2p}$
E	E	M	$TE(M)_{2m, 2n, 2p-1}$
E	M	E	$TE(M)_{2m, 2n-1, 2p}$
E	M	M	$TE(M)_{2m, 2n-1, 2p-1}$

注: (E——电面; M——磁面)

2.3 结果分析和误差处理 将 $1/8$ TEM 小室均匀划分, 每个单元中心取在 $(m + 1/2, n + 1/2, k + 1/2)$, 输出和输入点的位置如图 2 所示, 表 2 和表 3 给出了计算结果。

表 2 大的 NBS TEM 小室中 TE 模的谐振频率 (MHz)

$TF_{2m+2n-1, 2p-1}$	19.63	42.00	48.47	58.21	66.10	72.89	82.62
$TE_{2m-1, 2n, 2p-1}$	29.78	48.79	55.44	64.99	84.80	94.48	118.1
$TE_{2m+2n-1, 2p}$	31.04	54.33	56.55	64.96	80.30	84.54	98.73
$TE_{2m-1, 2n-1, 2p-1}$	36.02	48.61	63.34	74.63	80.56	94.79	112.0
$TE_{2m-1, 2n, 2p}$	39.64	48.77	64.92	71.63	76.57	103.4	
$TE_{2m+2n, 2p-1}$	44.77	50.37	56.35	68.94	74.31	81.42	95.34
$TE_{2m-1, 2n-1, 2p}$	47.08	60.54	78.85	81.15	91.78	97.00	110.5
$TE_{2m, 2n, 2p}$	54.77	68.26	75.25	82.90	96.85	101.2	115.5

表 3 大的 NBS TEM 小室中 TM 模谐振频率 (MHz)

$TM_{2m-1, 2n-1, 2p-1}$	48.07	65.27	78.68	82.23	90.56	115.3
$TM_{2m-1, 2n, 2p-1}$	50.33	61.00	75.74	81.25	84.00	95.02
$TM_{2m+2n-1, 2p}$	50.95	65.49	73.33	96.58	99.78	106.8
$TM_{2m, 2n, 2p-1}$	51.11	60.13	66.81	83.53	91.75	100.2
$TM_{2m+2n-1, 2p-1}$	59.97	55.22	66.59	72.98	82.62	89.82
$TM_{2m-1, 2n-1, 2p}$	53.70	66.10	72.98	88.13	97.77	107.4
$TM_{2m-1, 2n, 2p}$	53.70	65.21	79.08	86.16	97.97	106.0
$TM_{2m, 2n, 2p}$	51.56	65.58	72.46	77.11	98.93	105.0

在 FD-TD 的实际计算中, 有两种主要误差: 粗糙误差和截断误差。我们采用 Hanning 窗减小截断误差, 用线性外推法减小粗糙误差以得到较精确的结果。

3 用三维不均匀划分 TLM 法计算小室内部的谐振频率

3.1 不均匀划分 TLM 法的基本原理 TLM 法的基本原理是用空间分布的网络

结构代替电磁场的空间分布,用网络上的电压和电流等效空间的电场和磁场,用波动方程等效 Maxwell 方程,进而通过分析网络解得波动方程。TLM 法在三维的应用中存在一个显著的问题就是计算量和存储空间比较大,为此,本文在 TEM 小室的谐振频率计算中首次引入了不均匀划分 TLM 法,既保证了精度又节约了计算时间。

不均匀划分 TLM 法需要解决的关键问题是时间同步的问题。本文采用分支负载矩阵法,即对所有的分支都假设它们有相同的总电感和总电容,因此所有的分支都有相同的特性阻抗和时间步长,然后在需要的地方加入附加电感(在分支中间串入短路分支)和附加电容(在节点处并联开路分支),使最后的叠加值等于实际值,这样不均匀划分网格就变成均匀划分的网格进行计算了^[9]。

3.2 不均匀划分 TEM 小室及其计算结果和误差修正 由 TEM 小室的结构分析,在外导体拐角处和内部理想导体体周围场量比较集中,高次模分量比较丰富,根据这个特点,将小室按图 4 进行划分。为了同实际应用对应,将输入输出点分别取在小室的两端(见图 4),在输入点给一个 δ 脉冲,得到了小室内部的谐振频率特性见表 4。

不均匀划分 TLM 法存在三种误差,即截断误差、粗糙误差和相速误差。对于截断误差的处理,我们仍采用 Hanning 窗函数法,找到峰值点的大体位置,然后用一维搜索法搜索其精确值。对于粗糙误差的影响,由于不均匀划分 TLM 法本身就是一种减小粗糙误差的方法,可认为此时的粗糙误差已经很小,本文不再处理。本文中 $\Delta l/\lambda \leq 0.1$,所以相速误差也可忽略。

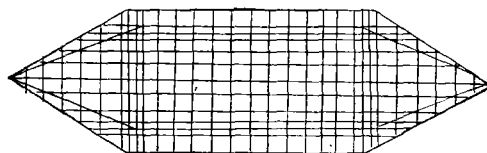


图 4 不均匀划分的 NBS TEM 小室

表 4 不均匀划分 TLM 法计算结果同 Hill 测试数据的比较

模	TE ₀₁₁	TE ₁₀₁	TE ₀₁₂	TE ₁₁₁	TE ₁₀₂
Hill	20.70	30.01	31.51	36.08	40.98
TLM	21.15	30.49	32.21	36.15	41.38
相对误差	2.17%	1.60%	2.22%	0.19%	0.98%

4 结论

使用 FD-TD 将 TEM 小室的谐振频率划分为 16 类来计算,节省了计算量和存储空间,且很容易判断任意谐振频率的所属模式。Hill^[2] 文中,对于实验测得的 48.9 这个谐振点究竟归于 TM₁₁₁ 还是 TM₁₁₀ 尚有疑问,由本文的计算结果可知: TM_{2m-1,2n-1,2p-1}

表 5 FD-TD 法计算结果同 Hill 测试数据的比较

模	TE ₀₁₁	TE ₁₀₁	TE ₀₁₂	TE ₁₁₁	TE ₁₀₂	TE ₀₁₃	TE ₀₂₁	TE ₁₁₂
FD-TD	19.63	29.78	31.04	36.02	39.64	42.00	44.77	47.06
Hill	20.70	30.01	31.51	36.08	40.98	42.06	44.77	47.20
相对误差	-5.17%	-0.77%	-1.49%	-0.17%	-3.27%	-0.14%	-0.00%	-0.25%

的第一个峰值点 48.07, 与实验值 48.9 比较接近, 而 $TM_{2m-1, 2n-1, 2p}$ 的第一个峰值点为 53.70, 与实验值相差较大, 所以可以断定, Hill 文中 48.9 这个谐振点是 TM_{111} 谐振模式, 而 TM_{110} 谐振模不存在。

将 FD-TD 和不均匀划分 TLM 法所得结果同 Hill 的实验数据进行比较 (表 4 和表 5) 可见, FD-TD 方法所得结果比实验结果小, 相反, 不均匀划分 TLM 法所得结果比 Hill 的实验数据偏大, 我们将在以后的文章中对数值计算的误差进行进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Crawford M L. IEEE Trans. on EMC, 1974, EMC-16(4): 189—193.
- [2] Hill D A. J. Microwave Power. 1983, 18(6):181—195.
- [3] Weil C M, Gruner L. IEEE Trans. on MTT, 1984, MTT-32 (1984)6, 631—648.
- [4] Wilson P F, Ma M T. IEEE Trans. on EMC, 1986, EMC-28 (3):125—135.
- [5] Yee K S. IEEE Trans. on AP, 1966, AP-14 (3): 302—307.
- [6] Jonhs P B, Beurle R L. Proc. IEE, 1985, 118 (9): 1203—1208.
- [7] Jonhs Peter B. IEEE Trans. on MTT, 1987, MTT-35 (4): 370—377.
- [8] Al-Mukhtar D A, Sith J E. IEE Proc.-H, 1981, 128 (6): 299—305.

THE CALCULATION OF RESONANT FREQUENCIES IN THE LARGE NBS TEM CELL

Peng Yuhua Fu Junmei

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

Abstract The resonant frequencies of the NBS TEM cell have been calculated by the Finite-Difference Time-Domain (FD-TD) and irregularly graded Transmission-Line Matrix (TLM) methods. In the calculating process by the FD-TD method a novel processing method for the magnetic wall boundary conditions is developed with which it is possible to treat only one eighth of the whole cell domain to calculate the resonant frequencies. As a result, additional useful resonant frequency data are listed. In the TLM method, the propagation space of the TEM cell is irregularly graded according to the nature of it. The results show that the coarseness error is reduced. Finally, a comparison between the results of two methods is given, which shows good agreement with each other.

Key words TEM waveguide, Finite-difference time-domain method, Transmission line matrix method