

# 单脊金属加载矩形波导的有限差分法分析 Analysis on the Single-Metal-Ridge Rectangle Waveguide Using Finite Difference Method

陈小波

CHEN Xiao-bo

(四川文理学院物理与工程技术系,四川达州 635000)

(Department of Physics and Engineering Technology, Sichuan University of Arts and Science, Dazhou, Sichuan, 635000, China)

**摘要:**采用有限差分法分析单脊金属加载矩形波导的模式特性,得到单脊金属加载矩形波导的基模和第一个高次模均是 TE 模,两个最低模均是 TM 模;基模截止波数  $k_c = 0.20056 \text{ rad/mm}$ ,第一个高次模截止波数  $k_c = 0.46731 \text{ rad/mm}$ ,与 Ansoft HFSS 仿真软件得到的结果基本一致。

**关键词:**脊形波导 有限差分法 场分布 色散特性

**中图分类号:**TN814 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2010)03-0239-03

**Abstract:** Transmission characteristics of the single-metal-ridge rectangle waveguide were analyzed using finite difference method. The field distribution and dispersion characteristics of this waveguide was obtained. The computed results are in good agreement with the HFSS simulation.

**Key words:** ridged waveguide, finite difference method, field distribution, dispersion characteristics

波导问题是电磁波研究中一类有着较强的实际背景和应用前景的数学物理问题,它以麦克斯韦方程作为其理论基础,主要研究波在封闭和开放结构中的传播问题<sup>[1,2]</sup>。脊形金属波导具有工作频带宽、主模截止频率低、波阻抗低等诸多优点,广泛应用于微波、毫米波技术以及电子对抗设备等领域中。人们一直对脊形矩形金属波导的分析给予极大的关注,提出了多种分析方法,如横向谐振法<sup>[3]</sup>、积分方程法<sup>[4]</sup>、模式匹配法<sup>[5]</sup>、有限元法(FEM)<sup>[6]</sup>以及有限差分法<sup>[7,8]</sup>等。有限差分法是以差分原理为基础的一种数值方法,它把电磁场连续域内的问题变为离散系统的问题,即用各离散点上的数值解来逼近连续域内的真实解,因而它是一种近似的计算方法。根据目前计算机的容量和速度,有限差分法对许多问题都可以得到足够高的计算精度<sup>[9]</sup>。本文采用有限差分法处理单脊金属加载矩形波导的模式特性问题,并将所得数值结果和使用 Ansoft HFSS 仿真软件得出的结果进行比较。

## 1 单脊金属加载矩形波导的模场方程

单脊金属加载矩形波导的截面图如图 1 所示。假

设单脊金属加载矩形波导的 TE, TM 两种模式都存在。对于 TM 模和 TE 模,其纵向场分量均满足标量的赫姆霍兹方程。

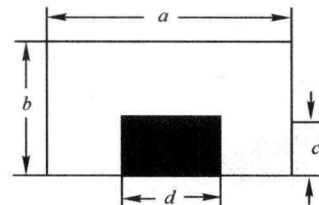


图 1 单脊金属加载矩形波导截面示意

Fig. 1 Cross-sections of single-metal-ridge rectangle waveguide

对于 TM 波,将所有点的有限差分方程写出来并把已知项全部移到等号右边,得

$$[K][\Phi] = -h^2 k_c^2 [\Phi], \quad (1)$$

每个  $k_c$  都对应一个截止波数,即一个 TM 模。特征值对应的特征向量就是该模式的纵向电场。这样微分方程的特征值问题就转化为矩阵的特征值问题,对应的纵向场分布也就可以用数值方法求出。而其对应横向场则可以由纵向场法求出,其有限差分格式为

$$E_x = -j\beta \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2h_x},$$

$$H_x = -j\omega\epsilon \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{2h_y};$$

收稿日期:2009-10-12

修回日期:2010-01-29

作者简介:陈小波(1982-),男,助教,硕士,主要从事理论物理研究。

$$E_y = -j\beta \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{2h_y},$$

$$H_x = -j\omega\epsilon \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2h_x}. \quad (2)$$

这样对单脊金属加载矩形波导中任意 TM 模式的电场与磁场分布可知。

对于 TE 波,将所有点的有限差分方程写出来,并把已知项全部移到等号右边,同样得

$$[K][\Phi] = -h^2 k_c^2 [\Phi], \quad (3)$$

每个  $k_c$  都对应一个截止波数,即一个 TE 模。特征值对应的特征向量就是该模式的纵向磁场。对应横向场可以由纵向场法求出,其有限差分格式为

$$E_x = -j\omega\mu \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{2h_y},$$

$$H_x = -j\beta \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2h_x};$$

$$E_y = j\omega\mu \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2h_x},$$

$$H_y = -j\beta \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{2h_y}. \quad (4)$$

这样对单脊金属加载矩形波导中任意 TE 模式的电场与磁场分布可知。

## 2 模场分布与色散特性的数值结果与分析

### 2.1 模场分布

由图 2~图 4 的场分布图可知单脊金属加载矩形波导中基模和第一个高次模均是 TE 模。由图 5~图 7 的场分布图可知单脊金属加载矩形波导中的两个最低模式均为 TM 模。

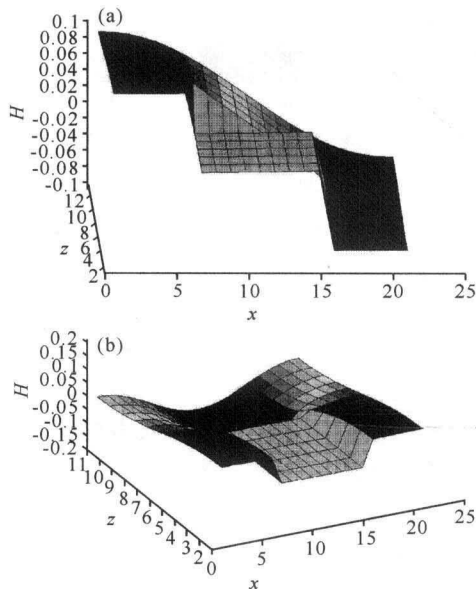


图 2 基模(a)和第一个高次模(b)的纵向磁场分布

Fig. 2 Vertical magnetic field distribution of fundamental mode (a) and the first high order mode (b)

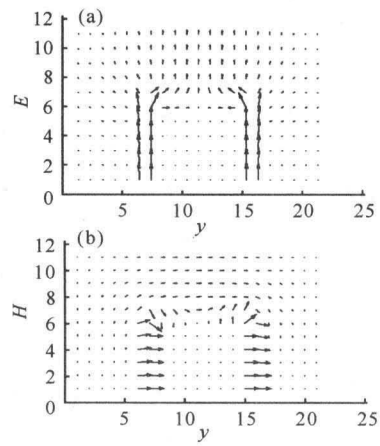


图 3 基模横向电场(a)和磁场(b)分布

Fig. 3 Transverse electric field (a) and transverse magnetic field (b) of fundamental mode

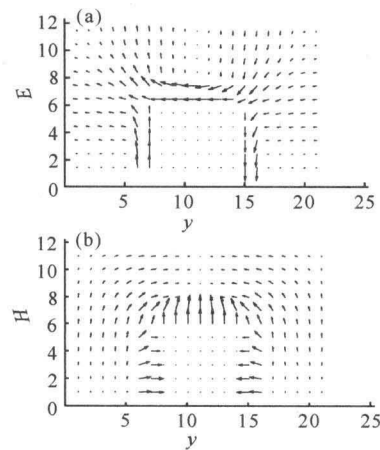


图 4 第一个高次模的横向电场(a)和磁场(b)分布

Fig. 4 Transverse electric field (a) and transverse magnetic field (b) of the first high order mode

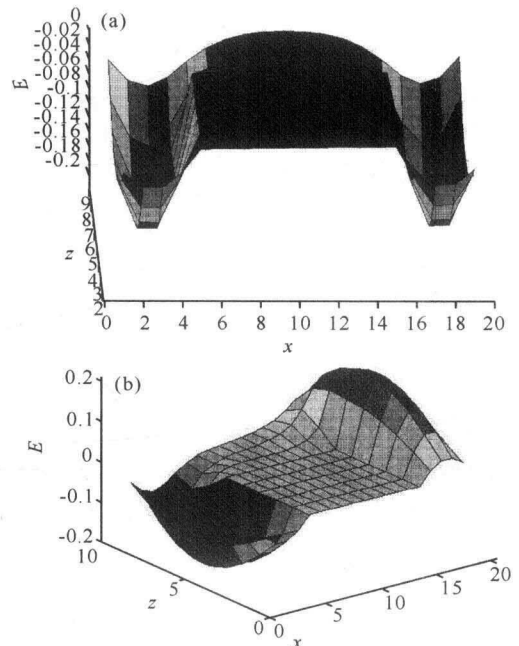


图 5 最低模式(a)和次低模式(b)的纵向电场分布

Fig. 5 Vertical electric field distribution of lowest mode (a) and subharmonic mode (b) of TM mode

## 2.2 色散特性

如表 1 和表 2 所示,由  $[K]$  矩阵计算出单脊金属加载矩形波导的 TE 模和 TM 模的所有特征值,从而得到所对应的截止波数。

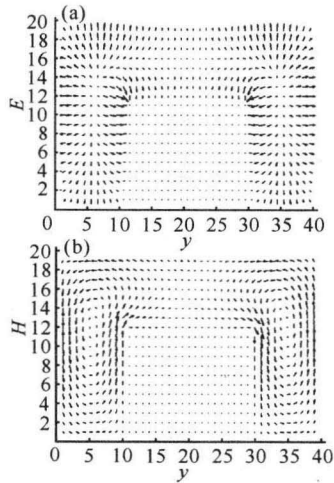


图 6 最低模式的横向电场(a)和磁场(b)分布

Fig. 6 Transverse electric field (a) and transverse magnetic field (b) of the lowest mode of TM mode

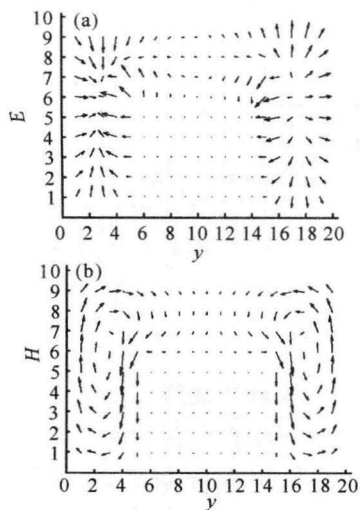


图 7 次低模式的横向电场(a)和磁场(b)分布

Fig. 7 Transverse electric field (a) and transverse magnetic field (b) of subharmonic mode of TM mode

从表 1 和表 2 中  $k_c$  值可以看出,单脊金属加载矩形波导中传输的基模与第一个高次模均为 TE 模, TM 模的截止波数远大于 TE 模。基模的截止波数  $k_c = 0.20056 \text{ rad/mm}$ ,与 AnsoftHFSS 仿真软件仿真得出的结果  $k_c = 0.20083 \text{ rad/mm}$  基本一致;第一个高次模的截止波数  $k_c = 0.46731 \text{ rad/mm}$ ,与 AnsoftHFSS 仿真软件仿真得出的结果  $k_c = 0.45806 \text{ rad/mm}$  基本一致。

表 1 TE 模的特征值和截止波数

Table 1 Eigenvalue and cutoff wavelength of TE mode

$[K]$ 矩阵特征值 Eigenvalue of TE mode	$k_c$ (rad/mm)
-0.0025141	0.20056
-0.013648	0.46731
-0.025077	0.63342
-0.03517	0.75014
-0.061414	0.99127

表 2 TM 模的特征值和截止波数

Table 2 Eigenvalue and cutoff wavelength of TM mode

$[K]$ 矩阵特征值 Eigenvalue of TM mode	$k_c$ (rad/mm)
-0.11181	1.3375
-0.11213	1.3394
-0.15959	1.5979
-0.16982	1.6484
-0.18621	1.7261

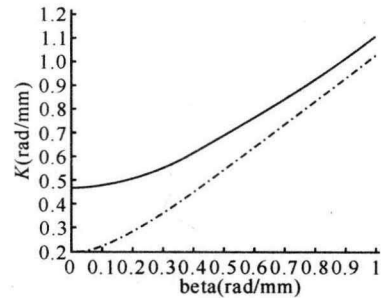


图 8 色散曲线

Fig. 8 Dispersion curves

- - - :基模; — :第一个高次模。

- - - :Fundamental mode; — :The first high order mode.

## 3 结束语

本文采用有限差分法,对单脊金属加载矩形波导的模式特性进行了分析,得到单脊金属加载矩形波导的基模和第一个高次模场分布情况及对应的色散特性曲线,所得数值结果和采用 AnsoftHFSS 仿真软件得出的结果基本一致。与其他方法相比,采用有限差分法的物理计算模型比较直观,不需要复杂的物理模型,但是使用此方法不足之处在于计算过程中所需要内存较大。

## 参考文献:

- [1] 杨春艳,姚斌,郑勤红.波导截止特性和衰减常数的有限差分分析[J].云南师范大学学报,2005,5(3):35-40.
- [2] 李玲,姚斌,郑勤红.正N边形同轴传输线特性阻抗的近似计算[J].云南师范大学学报,2006,26(1):42-45.

(下转第 246 页 Continue on page 246)

### 2.3 样品回收率

由直接竞争 ELISA 标准曲线推导出的线性回归方程为  $Y = -0.6299x + 4.6027$ , 相关系数  $R^2 = 0.995$  (图 3), 依据方程计算得到样品回收率为 94.8%。

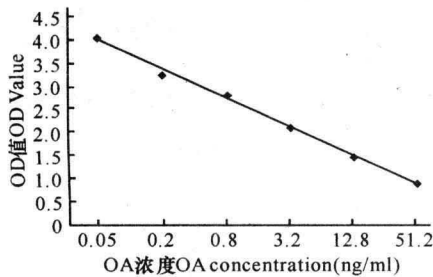


图 3 线性回归方程

Fig. 3 Linear regression equation

### 3 结束语

本实验利用 OA-KLH 免疫兔子后, 产生了良好的免疫效果, 获得了高效价的血清抗体。经亲和色谱提纯多克隆抗体后建立的 OA 直接竞争酶联免疫吸附分析方法, 其检测下限为 0.05ng/ml, 线性范围为 0.05~51.2ng/ml, 具有较高的敏感度和良好的线性范围。将 OA 添加到玉米粉样品中, 用直接竞争酶联

免疫吸附分析方法检测经萃取后的上清液, 样品 OA 的回收率高达 94.8%。这些实验结果为下一步试剂盒的研发奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] Krogh P, Hald B, Pedersen E J. Causal association of mycotoxic nephropathy[J]. Acta path microbiol scand, 1978, 269(Suppl):1-28.
- [2] 高翔, 李梅, 张立实. 赭曲霉毒素 A 的毒性研究进展[J]. 国外医学: 卫生学分册, 2005, 32(1): 51-55.
- [3] GB/T5009.96-2003. 谷物和大豆中赭曲霉毒素 A 的测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [4] Kawamura O, Sato S, Kajii H, et al. A sensitive enzyme-linked immunosorbent assay of ochratoxin A based on monoclonal antibodies[J]. Toxicon, 1989, 27: 887-97.
- [5] 阳传和, 罗雪云, 李业鹏, 等. 抗赭曲霉毒素 A 单克隆杂交瘤细胞系的建立及特性[J]. 细胞与分子免疫学杂志, 1992, 8(2): 17-21.
- [6] 刘仁荣, 余宙, 何庆华, 等. 以赭曲霉毒素 A 单克隆抗体建立竞争酶联免疫吸附分析方法的研究[J]. 食品科学, 2005, 26(11): 174-177.

(责任编辑: 韦廷宗)

(上接第 241 页 Continue on page 241)

- [3] Utsumi Y. Variational analysis of ridged waveguide modes[J]. IEEE trans microwave theory tech, 1985, 33(2): 111-120.
- [4] Sun W, Balanis C A. Analysis and design of quadruple ridged waveguides[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1994, 42(12): 2201-2207.
- [5] Balaji, Vahldieck U. Radial mode matching analysis of ridged circular waveguides[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1996, 44(7): 1183-1186.
- [6] Hellszajn J, McKay M. Voltage-current definition of impedance of double ridge waveguide using the finite

element method[J]. IEEE Proc Microwaves, antennas and propagation, 1998, 145(1): 39-44.

- [7] 金永兴, 徐江峰, 王剑锋. 脊形波导有限差分法分析[J]. 中国计量学院学报, 2003, 14(2): 114-116.
- [8] 牛家晓, 张祺, 周希朗, 等. 梯形脊形金属波导传输特性的二维频域有限差分法分析[J]. 应用科学学报, 2006, 24(6): 569-572.
- [9] 何红雨. 电磁场数值计算与 MATLAB 实现[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 18-20.

(责任编辑: 韦廷宗)