

任意曲线槽波导色散和损耗特性的高次有限元分析*

徐善驾 张跃江

(中国科学技术大学无线电电子学系,合肥 230027)

摘要 本文用高次有限元法分析了任意形状槽波导的色散和损耗特性。该方法的有效性和可靠性由实验和其它计算结果所证实。文中对诸如矩形、三角形、抛物、椭圆和余弦等形状的槽波导进行了系统的研究。计算结果表明,不同形状槽波导具有相近的色散特性,但损耗相差很大,其中V形槽波导损耗最小,大约是矩形槽波导的一半。文中给出的曲线可供设计槽波导元件和电路时参考。

关键词 曲线槽波导;色散;损耗;高次有限元

1. 引言

槽波导是公认的很有前途的短毫米波传输线形式之一。人们对它的研究一直保持着浓厚的兴趣。分析槽波导的方法很多,其中主要是保角变换法和模匹配法。模匹配法分析矩形槽波导比较有效,能给出相当好的计算结果^[1],但用它计算曲线槽波导就相当繁复。Tischer^[2]基于槽波导与H-波导的类似性,用保角变换法将各向同性均匀介质填充的槽波导变换成等价的各向异性非均匀介质填充的H-波导。Choi^[3]运用这种方法分析了V形槽波导。保角变换法原则上适合于任意形状槽波导。但这种方法无论在理论上,还是计算上都是复杂的,而且因为变换不具有通用性,因此限制了它的实际使用范围。

本文采用以变分原理为基础的高次有限元法来分析任意形状槽波导的色散和损耗特性。由于有限元法在处理复杂边界形状时所固有的灵活性和通用性,使它特别适宜于对各种形状槽波导的传输特性作系统的比较性研究。文中对各种形状槽波导的计算表明,槽形状对色散特性的影响不很灵敏,但对损耗影响较大。其中V形槽波导损耗最小,约为矩形槽波导的一半。这些计算结果对槽波导特性的研究具有明显的实际意义。

2. 分析方法简介

任意形状槽波导的横截面和主模场结构如图1(a)所示。由于电磁场在B区沿 $\pm y$ 方向指数衰减,所以在远离槽的 $y = \pm h$ 处用理想电壁或理想磁壁封闭,不会对主模的传输特性造成太大影响(本文的计算结果表明,当 $y \geq 15a$ 时其影响就可忽略不计);即附加电壁或磁壁的引入不会改变问题的物理实质。这就把半开放的槽波导色散和损耗的

1992.05.03收到,1992.09.14定稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

徐善驾 男,1939年生,教授,博士生导师,现从事电磁场和微波技术专业的教学和研究工作。

张跃江 男,1967年生,硕士研究生,现从事微波和毫米波理论和技术的研究工作。

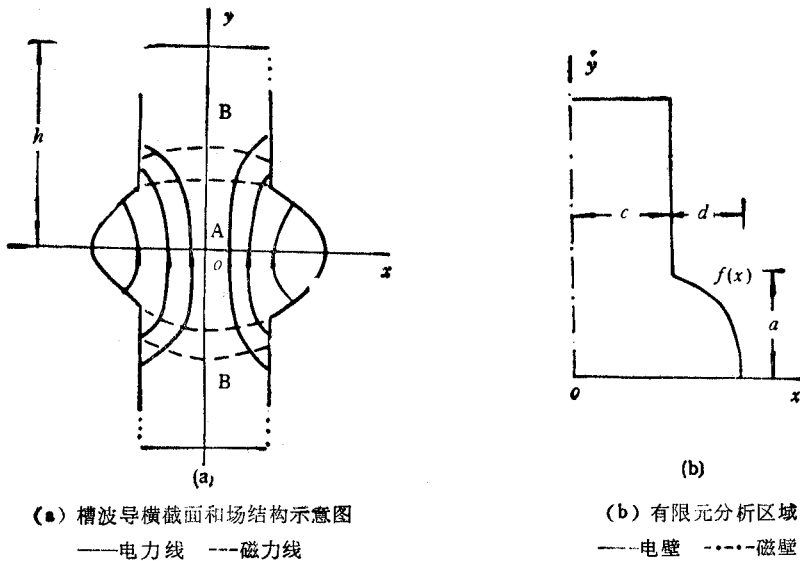


图 1

研究归结为对具有任意横截面形状封闭波导相关特性的研究。由于我们已在文献[4]中对任意横截面形状波导本征值问题的高次有限元分析进行了详细的讨论,这里不再重复。

根据变分极值存在的条件并经过单元分析和总体合成,可得广义代数本征值方程^[4]

$$[A][\phi] - K_c[D][\phi] = 0 \tag{1}$$

式中[A]和[D]为对称方阵, K_c 为本征值, $[\phi]$ 为本征矢。

求解广义代数本征值问题(1)式即可求出本征值 K_c 和相应的本征矢 $[\phi]$ 。我们已经证明,利用下式即可确定槽波导主模的衰减常数

$$\alpha = R_s \frac{\beta^2 \sum_p \frac{L}{\Delta_p^2} [\phi^p][Q_1][\phi^p]^T + K_c \sum_p [\bar{\phi}^p][Q_2][\bar{\phi}^p]^T}{2\beta\omega\mu K_c^2 \sum_{p=1}^{K_f} \Delta_p [\phi^p][Q_3][\phi^p]^T} \tag{2}$$

其中 R_s 为金属表面阻抗,

$$[Q_1] = \begin{bmatrix} \frac{S_1^2}{4} & -\frac{S_1 S_2}{4} & -\frac{S_1 S_3}{4} & -\frac{S_1^2}{2} & -\frac{(S_3 + S_2)S_1}{2} & -\frac{S_1^2}{2} \\ \frac{7S_2^2}{12} & -\frac{S_2 S_3}{12} & \frac{5S_1 S_2}{6} & \frac{(5S_3 + S_2)S_2}{6} & \frac{S_1 S_2}{6} \\ \frac{7S_3^2}{12} & \frac{S_1 S_3}{6} & \frac{(5S_2 + S_3)S_3}{6} & \frac{5S_1 S_3}{6} \\ \text{对} & \frac{4S_1^2}{3} & \frac{2(2S_3 + S_2)}{3} & \frac{2S_1^2}{3} \\ \text{称} & \frac{4(S_1^2 + S_2 S_3 + S_3^2)}{3} & \frac{2S_1(S_3 + S_2)}{3} & \frac{4S_1^2}{3} \end{bmatrix}$$

$$[Q_2] = \frac{L}{15} \begin{bmatrix} 2 & -0.5 & 1 \\ \text{对} & 2 & 1 \\ & \text{称} & 8 \end{bmatrix} \quad [Q_3] = \frac{1}{180} \begin{bmatrix} 6 & -1 & -1 & 0 & -4 & 0 \\ & 6 & -1 & 0 & 0 & -4 \\ & & 6 & -4 & 0 & 0 \\ \text{对} & & & 32 & 16 & 16 \\ & & & & 32 & 16 \\ & & \text{称} & & & 32 \end{bmatrix}$$

$$S_i = b'_i + c'_i, \quad i = 1, 2, 3$$

$$b'_i = b_i \frac{x_3^{(p)} - x_2^{(p)}}{L}, \quad c'_i = c_i \frac{y_3^{(p)} - y_2^{(p)}}{L}$$

$$L = \sqrt{(x_3^{(p)} - x_2^{(p)})^2 + (y_3^{(p)} - y_2^{(p)})^2}$$

$$[\phi^p] = (\phi_1^p, \phi_2^p, \phi_3^p, \phi_4^p, \phi_5^p, \phi_6^p)$$

$$[\bar{\phi}^p] = (\phi_2^p, \phi_3^p, \phi_4^p)$$

p 为落在金属边界上的面元编号; Δ_p 为面元 p 的面积; $[Q_1], [Q_2], [Q_3]$ 为对称矩阵; $[\phi^p]^T, [\bar{\phi}^p]^T$ 为 $[\phi^p], [\bar{\phi}^p]$ 的转置; b_i, c_i 为基函数展开系数; ϕ_i^p 为第 p 个面元第 i 个节点的场值; L 为第 p 个单元之内金属边界上的边界线段; $(x_2^{(p)}, y_2^{(p)}), (x_3^{(p)}, y_3^{(p)})$ 为 L 上的节点坐标; β 为传输常数; K_i 为横截面内的总面元数。

3. 计算实例

由主模场结构可知, $y = 0$ 平面为理想电壁, $x = 0$ 平面为理想磁壁, 所以在有限元剖分中只需考虑波导的四分之一区域, 如图 1(b) 所示。

为了检验本文方法和所给公式的正确性, 首先按照(2)式计算有严格理论值的圆波导 TE_{11} 模的损耗特性。由表 1 可见, 计算值与理论值吻合得很好, 证实了本文方法的可靠性。

表 1 圆波导损耗特性的理论值与本文计算值的比较

($R = 25.4\text{mm}$, 电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7\text{S/m}$)

频率 GHz	理论值 10^{-2}dB/m	本文计算值 10^{-2}dB/m	误差 %
5.0	2.0896	2.0973	0.37
7.0	1.5160	1.5183	0.15
9.0	1.3830	1.3842	0.12
11.0	1.3587	1.3594	0.05
13.0	1.3756	1.3760	0.03

表 2 用不同方法计算的矩形槽波导波导波长计算值与实验值的比较

($c = 5.0\text{mm}$, $d = 3.33\text{mm}$, $\lambda_0 = 2.990\text{mm}$)

a (mm)	λ_g (mm)			误差 %
	模匹配法 ^[2]	有限元法	实验值 ^[3]	
2.0	3.0106	3.0105	3.0173	0.23
3.0	3.0082	3.0081	3.0039	0.14
4.0	3.0067	3.0067	2.9955	0.37

表 3 用不同方法计算的 V 形槽波导波波长计算值与实验值的比较
($a = d, \lambda_0 = 3.117\text{mm}$)

$2c$ (mm)	d (mm)	λ_g (mm)			误差 %
		保角变换 ^[3]	有限元	实验值 ^[3]	
12.0	2.0	3.144	3.143	3.146	0.10
	4.0	3.139	3.137	3.138	0.03
	6.0	3.133	3.131	3.130	0.03

表 2 和表 3 分别给出了用不同方法计算的矩形和 V 形槽波导波波长计算值与实验值的比较。由表可见,二者吻合得很好,再次证实了本文方法的有效性。

为了研究不同槽的形状对槽波导色散和损耗特性的影响,本文计算了矩形、三角、抛物、椭圆和余弦形槽波导的传输特性。表 4 给出了在保持槽深 d , 槽宽 $2a$ 和板间距 $2c$ 相同的情况下,各种形状槽波导的色散特性。由表可见,槽形状对波导本征值影响不大,各

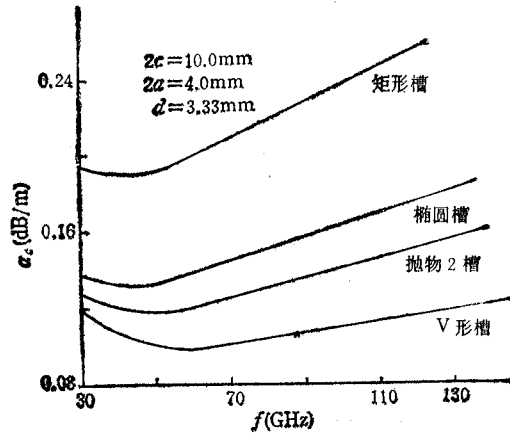


图 2 各种形状槽波导损耗特性的比较

表 4 不同形状槽波导的本征值和截止频率的比较(坐标系见图 1)
($c = 5.0\text{mm } d = 3.33\text{mm } a = 2.0\text{mm}$)

槽形状	$f(x)$	本征值 (mm^{-1})	截止频率 GHz
矩形	$y = u(x - c) - u(x - c - d)$	0.24492	11.69
三角形	$y = -\frac{a}{d}x + a + \frac{ac}{d}$	0.28840	13.77
抛物 1	$y = -\frac{a}{d^2}(x - c)^2 + a$	0.27657	13.21
抛物 2	$x = -\frac{d}{a^2}y^2 + c + d$	0.27772	13.26
椭圆	$\frac{(x - c)^2}{d^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1$	0.26865	12.83
余弦	$x = c + d \cos\left(\frac{\pi y}{2a}\right)$	0.28922	13.81

种形状槽波导具有相近的色散特性。但计算表明, 槽形状对损耗的影响较大, 如图 2 所示; V 形槽损耗最低, 大约是矩形槽的一半; 抛物槽次之; 矩形槽损耗最大。这些数据 and 曲线可供设计槽波导元件和电路时参考。

参 考 文 献

- [1] Xu Shan-jia, Yin Lujun, *Int. J. IR MM Waves*, 12(1991)6, 611—628.
- [2] F. A. Benson, F. J. Fischer, *IEE Proc.-A*, 131(1984)7, 429—449.
- [3] Yat Man Choi, V-shape Groove Guide and Components for 100GHz Operation, 1987 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, (1987), pp. 165—167.
- [4] 徐善驾, 彭松村, 通信学报, 6 (1985)4, 62—69。
- [5] Yat Man Choi, D. J. Harris, *Infrared and Millimeter Waves*, Academic Press Inc. U. S. A., 1984, Vol. 11, Chap. 11

HIGH-ORDER FINITE ELEMENT ANALYSIS OF DISPERSION AND LOSS CHARACTERISTICS OF GROOVE GUIDE WITH ARBITRARY SHAPES

Xu Shanjian Zhang Yuejiang

(University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract The dispersion and loss characteristics of groove guide with arbitrary shapes are analyzed with high-order finite element method. The effectiveness and the reliability of the method are verified by the experiments and the results obtained by other methods. Groove guides with various groove shapes, such as rectangular, triangular, parabolic, elliptic and cosine functions are investigated systematically. The calculating results show that the dispersion of groove guide with different groove shape is almost the same, the loss characteristic is rather different, among them. V-shape groove has the lowest loss, which is about half of the loss of rectangular groove guide. All the curves and the data given in this paper can be used in designing the elements and circuits composed of the groove guide.

Key words Curved groove guide; Dispersion; Loss; High-order finite element