

CST MWS 软件模拟三维螺旋线慢波结构

韩 博^{1,2}, 苏小保¹

(1. 中国科学院电子学研究所微波器件中心, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 本文介绍了用 CST MWS 软件的周期边界条件计算行波管螺旋线慢波结构的色散和耦合阻抗等冷测特性的方法, 用采取螺旋带模型的理论分析计算结果和实验测试值加以验证, 取得了比较一致的结果; 并应用这种 MWS 的模拟方法和螺旋带模型的计算方法分析了具有扇形和 T 形夹持杆慢波结构的冷测特性, 结果表明, 相速和耦合阻抗都随着扇形角度的增大而减小, 随着 T 形窄端宽度的增加而减小, 随着 T 形窄端高度的增加而增大。

关键词: CST MWS; 螺旋带; 色散; 耦合阻抗; 周期边界条件

中图分类号: TN124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 09-1711-06

Computational Simulation for Helical Slow-Wave Circuit by Using CST MWS Code

HAN Bo^{1,2}, SU Xiao-bao¹

(1. Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences Beijing 100080 China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences Beijing 100039, China)

Abstract The periodic boundary condition in the three-dimensional (3-D) electromagnetic computer code CST MWS is used to the computational simulation for high-frequency characteristics of helical slow-wave circuit. Validated by the analytical method of tape helix model and the experimental data, the agreement is excellent. The computer code CST MWS and tape helix model are also used in this analysis to determine the effect on dispersion and on-axis interaction impedance of the wedge support rod and T-shaped support rod geometry parameter variations. The results show that the phase velocity and interaction impedance will decrease across the bandwidth while the angle of the wedge support rod and the width of T-shape support rod's narrow end increase, and increase while the height of T-shaped support rod's narrow part is longer.

Key words CST MWS; tape helix model; dispersion; interaction impedance; periodic boundary conditions

1 引言

在微波管领域中, 行波管是将带宽和增益结合的最好的器件, 而在宽带大功率器件中, 螺旋线行波管应用最为广泛。其高频电路一般是一根螺旋线型金属丝或金属带, 由三根或更多的介质杆夹持并固定在圆形金属管里。针对螺旋慢波电路高频特性的理论研究持续了几十年, 国内外很多学者做了大量的工作。总体上讲, 对螺旋线本身的处理主要有两种物理模型: 螺旋导电面模型和螺旋带模型^[1]。两者在求解时都作出了相应的理论假设, 前者假设螺旋线作为一个金属导面, 不考虑螺旋线的宽度及带的间隙, 另外, 只计及基波的作用。这种模型推导比较简便, 易于计算, 但也实际结构相比, 近似程度较大。尤其是不能计算出线宽等对色散特性和耦合阻抗的影响。后者考虑螺旋线具有一定的宽度及绕线间距, 把螺旋线作为一个周期慢

波结构处理, 并计及空间谐波的影响。显然, 螺旋带结构更近于实际结构。但不论用什么方法, 由于螺旋慢波结构的复杂性给理论分析带来的麻烦, 任何模型都不可避免的需要引入一些假设, 而且只是在某些特性条件下才有解。

随着计算机软硬件技术的迅速发展, 针对慢波系统高频特性的计算机软件模拟仿真成为可能, 并已成为国内外学者们的研究热点。运用模拟软件计算求解慢波系统高频特性时, 经常使用的方法有: 变分法、有限差分法 (FDM), 有限元法 (FEM), 矩量法 (MoM) 以及 CST 公司的 MAFIA (Solution of Maxwell's Equations by the Finite-Integration-Algorithm) 和 MWS (微波工作室 MICROWAVE STUDIO) 软件所使用的有限积分法 (FM) 等数值算法。在慢波结构的模拟计算方面, 以美国 NASA 的 Lewis 研究中心的 C. L. Kory 和 J. A. Dayton, Jr 等人的研究小组尤为突出, 该课题组成员们使用模拟软件 MAFIA 对螺旋线慢波结构^{[2][3]}

和耦合腔慢波结构^[4]都进行了冷测数据的模拟,得到的模拟计算结果与硬件冷测实验结果非常一致.我国国内也有学者利用 MAFIA 软件对耦合腔^[5]和螺旋慢波结构^[6]做了类似的研究.利用模拟软件对慢波结构进行精确的建模和分析,省去了解析模型中的一些假设条件,提高了解析模型的计算精度,而且避免了昂贵的实验测试,缩短了开发周期,显著节约人力、物力、时间,并可对一些新颖的慢波结构进行设计开发.

德国 CST公司的 MWS是该公司在 MAFIA 软件基础上推出的三维高频电磁场仿真软件.它吸收了 MAFIA 软件计算速度快的优点,同时又对软件的人机界面和前、后处理做了根本性的改变.是一种为快速、精确仿真电磁场高频问题而专门开发的 EDA 工具. MWS 提供三个解算器,四种求解方式.它们是时域解算器、频域解算器和本征模解算器.四种求解方式分别为传输问题的频域解、时域解、模式分析解和谐振问题的本征模解.在文献[7]通过对几种慢波结构的比较,可以看出 MWS 相对于 MAFIA 来说,可以用更少的计算时间得到更精确的冷测模拟结果.本文应用了 CST MWS 软件的周期边界条件计算螺旋线慢波结构的色散和耦合阻抗等高频特性的方法,与螺旋带模型的解析解结果以及实验测试结果进行比较,并重点分析了扇形夹持杆和 T 形夹持杆几何参数对其冷测特性的影响.

2 模拟方法

2.1 MWS 与 MAFIA 的比较

首先,MAFIA 和 MWS 都是基于有限积分 (FM) 的数值计算方法,但 MWS 比 MAFIA 有以下几个方面的优势:第一, MWS 是基于 PC 机 Windows 环境下的仿真软件,使得人机交互界面非常友好,相比 MAFIA 更易于建模;第二, MWS 采用完美边界近似 (PBA, Perfect Boundary Approximation),特别是自适应网格生成功能及部份填充正交网格功能从而近似地拟合曲面边界,对复杂多曲面螺旋慢波结构模拟,有较快的计算速度与良好的工程精度;第三, MWS 包含了兼容宏语句的 VB 应用程序 (VBA, Visual Basic Applications),可以使模拟过程自动化,并且允许对用户自定义的函数进行优化.

2.2 色散特性的模拟方法

利用 CST MWS 提供的周期性的边界条件,指定一个周期内的基波相移 φ ,利用 MWS 的本征解模块 (Eigenmode Solver) 计算出相应的谐振频率 f ,可以得到

$$\beta L = \varphi \quad (1)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{\varphi/L} = \frac{2\pi f L}{\varphi} \quad (2)$$

其中, β 是慢波结构中电磁场最低模式基波的传输常数, f 为模拟计算得到的本征频率, L 为螺旋慢波线螺距, φ 为 f 所对应的相移, v_p 是最低传输模式的基波相速,于是得到了该 f 处的色散特性.令 φ 在 $5 \sim 175$ 间每隔 10 度扫描,

得到整个频段内的色散曲线.

2.3 耦合阻抗的模拟方法

耦合阻抗的基本计算公式为:

$$K_n = E_{z_n}^2(0) / 2\beta_n^2 P \quad (3)$$

式中, $E_{z_n}(0)$ 为 n 次空间谐波的纵向电场幅值; RP 为平均功率流的时间平均值; β_n 为 n 次空间谐波的传播常数, $\beta_n = \beta + 2\pi n/L$, 其中, β 为基波的传播常数.

现在利用与实验测试相同的微扰法^[8],在螺旋慢波线的中心轴线处放置一个圆柱形介质棒,模拟计算腔体收到微扰前后的本征频率偏移并通过推导得到的公式进行计算.由文献[9]可以得到微扰前后轴向传播常数变化的公式:

$$\Delta\beta = \omega\epsilon_0(\epsilon_r - 1) \int E' \cdot E^* dw / 4PL \quad (4)$$

式中, ϵ_r 为介质棒的相对介电常数; P 为功率流; E^* 为微扰前的电场复共轭; E' 为微扰后的电场.

再由微扰法理论可知,微扰前后本征频率的改变量与轴向传播常数的变化量相关,其计算公式为

$$\Delta f / f = -(v_g / v_p) / (\Delta\beta / \beta) \quad (5)$$

$$v_g = d\omega / d\beta = 2\pi df / d\beta = 2\pi L df / d\varphi \quad (6)$$

式中, Δf 为微扰前后本征频率的变化量; f 为微扰前模拟得到的本征频率; v_p 为相速; v_g 为群速,可通过求解色散特性曲线的斜率得到.

在螺旋线慢波电路中,电子注通常与基波同步并进行能量互换,由文献[9]以及公式(3)~(5)通过一定的推导可得到基波耦合阻抗的计算公式

$$K_0 = \frac{2}{\omega\beta(\epsilon_r - 1)\epsilon_0\pi b^2} \frac{v_p \Delta f}{v_g f} \quad (7)$$

式中, K_0 为基波的耦合阻抗; b 为介质棒的半径.

同色散特性一样,令 φ 在 $5 \sim 175$ 间每隔 10 度扫描,得到整个频段内的耦合阻抗曲线.

3 模拟结果与分析

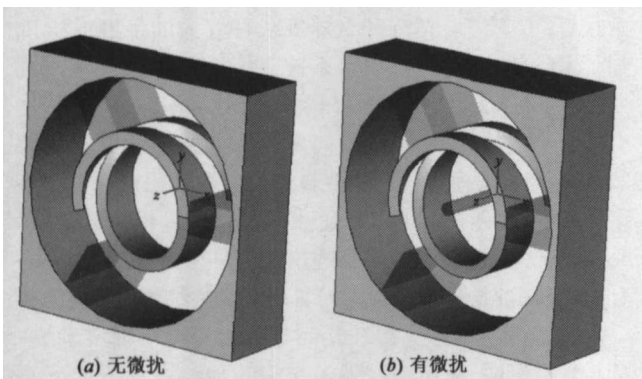
3.1 结构建模

CST MWS 软件可对螺旋线的带宽、带厚、夹持杆的尺寸、材料以及翼片的形状等进行精确地建模,因此避免了解析求解过程中的一些理论假设.

本文采用文献[10]中的一只行波管螺旋慢波结构进行建模,其结构尺寸如表 1 为了采用 CST MWS 的周期性边界条件,只对单一螺距螺旋线慢波结构进行建模,无微扰和有微扰两种慢波结构的模型分别如图 1(a)和图 1(b)所示.用 CST MWS 分别算出此慢波结构的色散曲线和耦合阻抗曲线,在计算中,定义金属管壳和螺旋线是理想导体,介质夹持杆是无损耗的和各向同性的.

3.2 解析法求解

“宽带大功率行波管 CAD 集成环境” (TWTCAD) 是一个开放式的 CAD 应用框架,通过统一的数据接口集成了快速综合设计、结构设计、电子枪设计、PIM 聚焦系统设计、



(a) 无微扰 (b) 有微扰
图 1 螺旋慢波结构一个周期模型图

磁场静态电子轨迹模拟、高频系统设计、注波互作用的一维与二维模拟、多级降压收集极以及输入输出部件的设计^[1]。在其最新的版本 TWT CAD 中,对高频系统的计算采用螺旋带模型,计算螺旋慢波结构的色散特性和耦合阻抗。同样计算表 1 所示慢波结构的高频特性。

表 1 螺旋慢波结构尺寸表

螺旋线结构尺寸 /mm				夹持杆结构尺寸 /mm			管壳尺寸 /mm	
平均半径	厚度	宽度	螺距	形状	宽度	介电常数	管壳内径	
0.889	0.178	0.635	1.16	矩形	0.457	5.1	1.714	

3.3 结果分析与比较

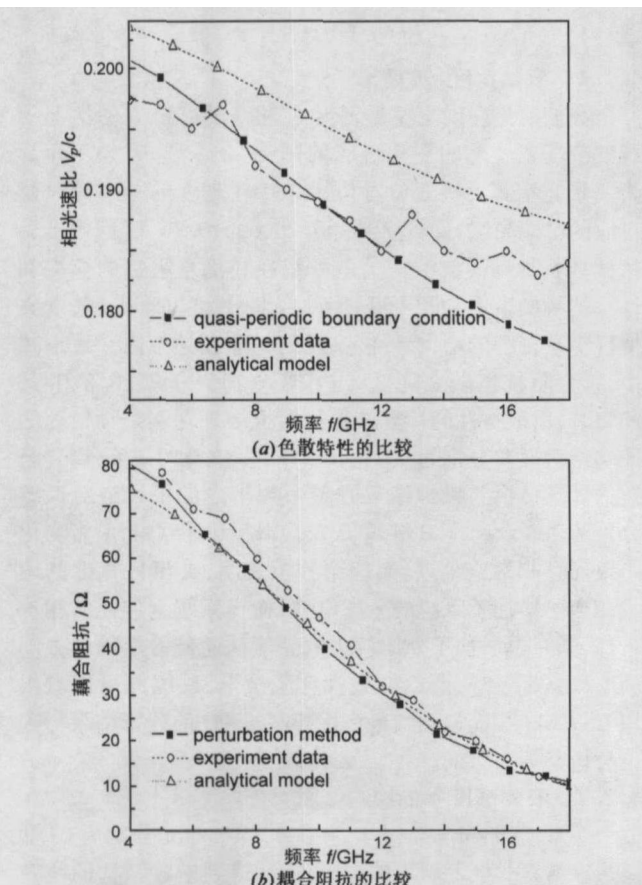
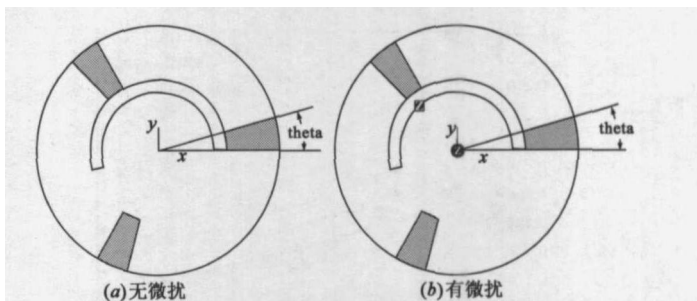


图 2 慢波结构色散特性和耦合阻抗的结果比较图

在图 2 中绘制出使用 CST MWS 的模拟结果、TWT CAD



(a) 无微扰 (b) 有微扰
图 3 扇形夹持杆螺旋慢波结构一个周期模型图

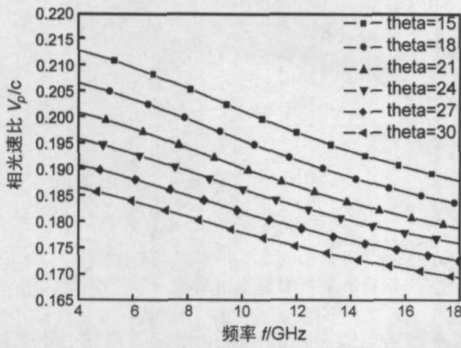
的计算结果以及实验结果(为方便观察,耦合阻抗曲线采用对数坐标)。从图 2(a)的色散曲线中可以看出,使用 CST MWS 的模拟结果和实验数据符合得较好,整个频带内的平均绝对误差为 0.2%,而使用 TWT CAD 计算的解析结果在整个频带内都比实验结果稍大些,平均绝对误差为 0.5%,同时也可以看出解析结果在低频段更接近模拟结果,从整个频带来看,解析结果与模拟结果的平均绝对误差为 0.7%。从图 2(b)的耦合阻抗曲线中可以看出,使用 CST MWS 的模拟结果与使用 TWT CAD 的计算结果在整个频带内很一致,且与实验结果都符合得较好,其中模拟结果与实验结果的平均绝对误差为 3.7 欧姆,解析结果与实验结果的平均绝对误差为 2.9 欧姆,从整个频带来看,解析结果与模拟结果的平均绝对误差为 0.8 欧姆。从比较中可以看出,我们采用的模拟方法和计算方法都能反映实际的色散和耦合阻抗,并具有一定的精度,给下面的进一步分析打下良好的基础。

4 模拟计算方法在扇形和 T 形夹持杆慢波电路中的应用

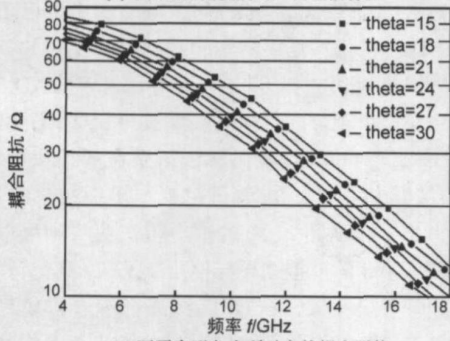
4.1 扇形夹持杆几何参数对其冷测特性的影响

在几种常见形状的夹持杆中,由于扇形夹持杆与金属螺旋线和金属管壳有着最大的接触面积,更利于行波管在工作状态时的散热,因此得到了广泛的应用。而目前关于扇形夹持杆的几何尺寸即扇形角度对慢波结构高频特性的影响还没有做过研究。为了得到扇形夹持杆角度的变化对慢波系统冷测特性的影响,在不改变慢波结构其他参数的情况下,将表 1 中的矩形夹持杆换成扇形夹持杆,如图 3 所示,令角度 θ 从 15degree ~ 30degree 每隔 3degree 递增,用上述方法分别模拟计算出其色散曲线和耦合阻抗曲线,分别如下图 4 和图 5 所示。

图 4(a)和图 5(a),图 4(b)和图 5(b)分别给出了不同角度的扇形夹持杆的色散曲线和耦合阻抗曲线的模拟结果(使用 CST MWS)和计算结果(使用 TWT CAD)。当 θ 分别为 15degree, 18degree, 21degree, 24degree, 27degree 和 30degree 时,色散特性的计算结果与模拟结果在整个频带内的平均绝对误差分别为 0.4%、0.5%、0.6%、0.6%、0.6% 和 0.7%;耦合阻抗的计算结果与模拟结果在整个频带内的平均绝对误差分别为 3.3 欧姆、2.0 欧姆、1.2 欧姆、1.

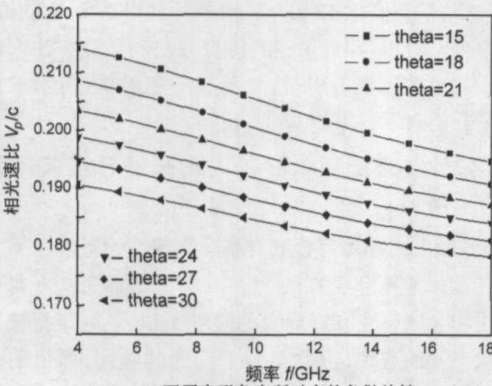


(a)不同扇形角度所对应的色散特性

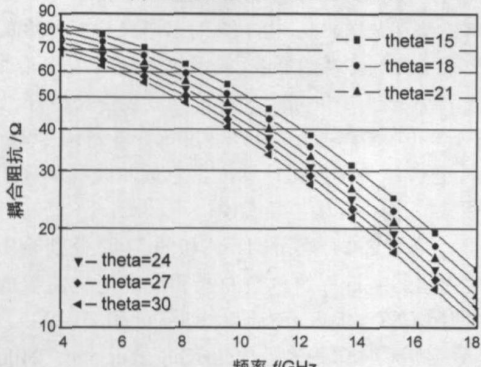


(b)不同扇形角度所对应的耦合阻抗

图4 不同扇形角度的模拟结果MWS



(a)不同扇形角度所对应的色散特性



(b)不同扇形角度所对应的耦合阻抗

图5 不同扇形角度的计算结果TETCAD

7欧姆、1.5欧姆和1.1欧姆。可以看出两者随扇形角度变化的趋势不但是一致的,而且结果也非常接近。由于扇形夹持杆与螺旋线有较大的接触面积,增加了系统的分布电

容,使得系统上传播的相速下降,而且角度 θ 越大,相速下降得越多;同时扇形夹持杆增加了介质杆中的储能,使得沿轴向方向的电场强度下降,所以耦合阻抗下降,而且角度 θ 越大,耦合阻抗下降得越多。从图4和图5中可以看到,用 CST MWS模拟的结果和用 TWT CAD的计算结果与理论分析是相一致的。

4.2 T形夹持杆几何参数对其冷测特性的影响

为了得到 T形夹持杆几何参数的变化对慢波系统冷测特性的影响,在不改变慢波结构其他参数的情况下,再将表1中的矩形夹持杆换成 T形夹持杆,如图6所示,用上述方法进行模拟计算。

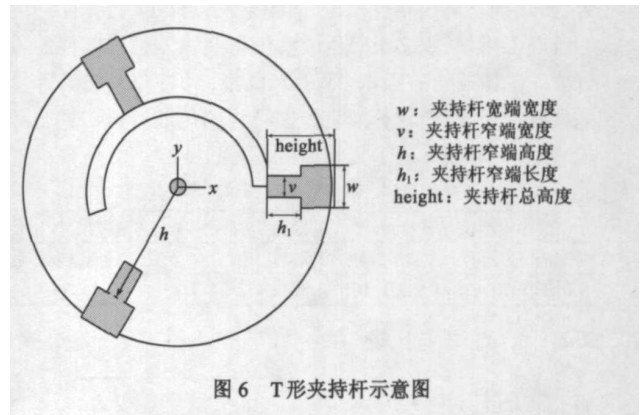


图6 T形夹持杆示意图

4.2.1 窄端宽度 v 的影响

我们首先在确定宽端宽度 w 和窄端高度 h 的情况下观察窄端宽度 v 的变化造成的影响。令 w 为 0.457mm, h 为 T形窄端宽度跳变位置位于夹持杆高度的一半的时候对应的窄端高度, v/h 分别为 0.25、0.5、0.75、1 (即矩形夹持杆)时,得到慢波结构的色散特性和耦合阻抗的模拟和计算结果如下图7和图8所示。从图中可以看出,随着夹持杆窄端宽度的增大,慢波系统的相速在频带内一致地减小,耦合阻抗也随之降低。当 v/h 分别为 0.25、0.5、0.75和1时,色散特性的计算结果与模拟结果在整个频带内的平均绝对误差分别为 0.4%、0.3%、0.3%和0.7%;耦合阻抗的计算结果与模拟结果在整个频带内的平均绝对误差分别为 2.3欧姆、1.8欧姆、0.5欧姆和0.8欧姆,两者变化一致而且非常地接近。而理论分析表明,夹持杆宽度的增大相当于增加了系统的分布电容,使得系统上传播的相速下降,同时也增加了介质杆中的储能从而使得沿轴向方向的电场强度下降,所以导致耦合阻抗下降,因此可以看出用 CST MWS模拟的结果和用 TWT CAD的计算结果与理论分析是相一致的。

4.2.2 窄端高度 h 的影响

令 w 为 0.457mm, v/h 为 0.5, $h_1/height$ 分别为 0 (即矩形夹持杆)、0.2、0.4、0.6、0.8时,得到慢波结构的色散特性和耦合阻抗的模拟和计算结果分别如下图9和图10所示。从图中可以看出,随着夹持杆窄端高度的增大,慢波

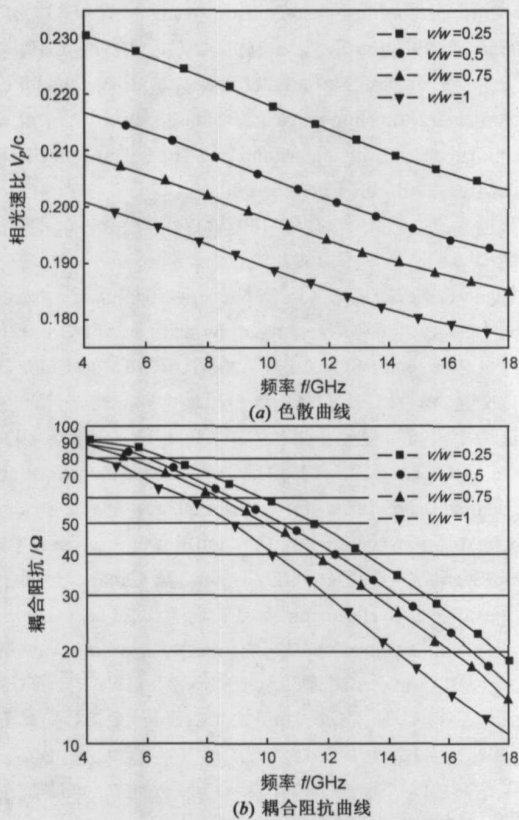


图 7 不同窄端宽度的模拟结果 MWS

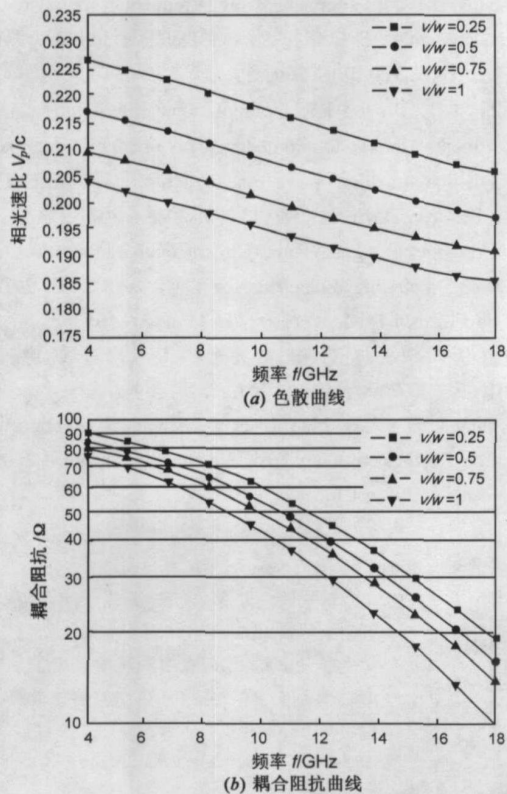


图 8 不同窄端宽度的模拟结果 TWTCAD

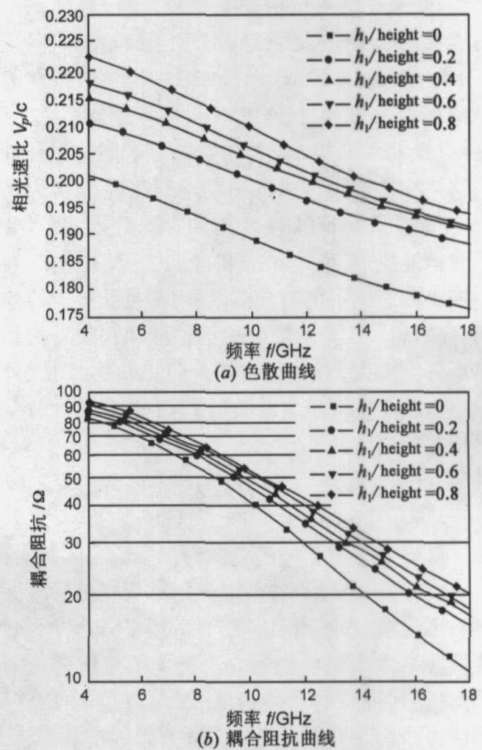


图 9 不同窄端高度的模拟结果 MWS

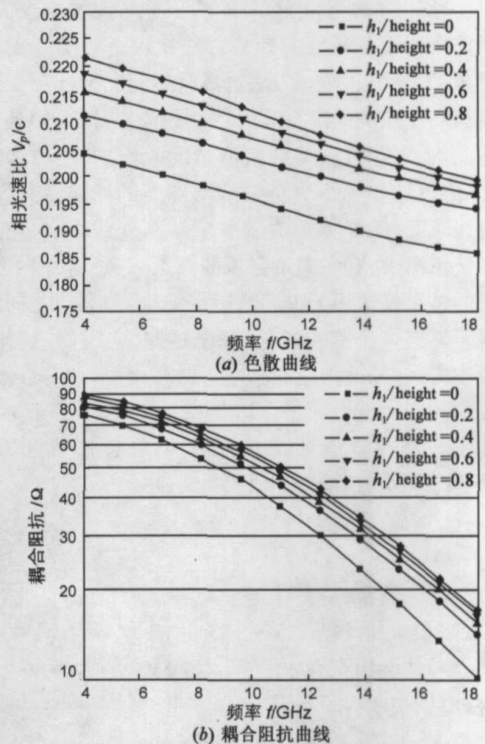


图 10 不同窄端高度的计算结果 TWTCAD

系统的相速在频带内一致地增大, 耦合阻抗也随之增加. 同时从图 9(a)中可以看到, 当 h_1/height 从 0 变到 0.8 时, 色散曲线有一个较明显的先变平坦再变陡的过程, 这是由

于 h_1 增加意味着慢波结构加载变轻, 当加载轻到一定程度后可能会对相速的变化趋势产生轻微的影响。当 h_1/height 分别为 0.2、0.4、0.6 和 0.8 时, 色散特性的计算结果与模拟结果在整个频带内的平均绝对误差分别为 0.7%、0.3%、0.4% 和 0.4%; 耦合阻抗的计算结果与模拟结果在整个频带内的平均绝对误差分别为 0.8 欧姆、1.7 欧姆、2.7 欧姆和 1.6 欧姆, 两者变化一致而且非常地接近。而理论分析表明, 夹持杆窄端高度的增大相当于减小了系统的分布电容, 使得系统上传播的相速上升, 同时也减少了介质杆中的储能从而使得沿轴向方向的电场强度增大, 所以导致耦合阻抗增加, 因此可以看出用 CST MWS 模拟的结果和用 TWT CAD 的计算结果与理论分析是相一致的。

5 结论

在计算螺旋慢波结构的色散特性和耦合阻抗时, 螺旋带模型由于考虑了实际带宽, 因此相对于螺旋导电面模型可以得到更为精确的计算结果。而运用 CST MWS 软件模拟螺旋慢波结构高频特性的方法避免了解析理论的假设处理, 可以达到很高的求解精度。以上通过利用 MWS 中的周期性边界条件模拟一只行波管的螺旋慢波系统, 得到的模拟结果用采用螺旋带模型的解析计算结果和实验测试值进行验证, 取得了很好的吻合, 因此可以看出在 MWS 中采用周期性边界条件的计算方法比较适合实际工程应用的要求。同样用这两种方法对具有扇形夹持杆和 T 形夹持杆的螺旋慢波结构进行高频特性的模拟计算, 得到一致的变化趋势, 即随着夹持杆扇形角度的增加, 相速和耦合阻抗在降低; 随着 T 形夹持杆窄端宽度的增加, 相速和耦合阻抗在降低; 随着 T 形夹持杆窄端高度的增加, 相速和耦合阻抗都增大, 这与理论分析的结果一致。另外指出, 这里给出的结果仅适用于提到的特定结构, 但是对相同结构的器件可以提供借鉴和指导。基于这些信息, 制造者可以对加工中的误差进行有益的分析, 同时也可以在实际制作前根据这些变化进行优化设计。

致谢 在此衷心的感谢 CST 公司提供的 MICRO-WAVE STUDD 软件试用版!

参考文献

- [1] 刘盛纲, 李宏福, 王文祥. 微波电子学导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985. 161-185
Liu S G, Li H F, Wang W X, et al Introduction to microwave electronics [J]. Beijing National Defence Industry Press, 1985. 161-185 (in Chinese)
- [2] Kory C L, Dayton J A Jr Accurate cold-test model of helical TWT slow-wave circuits [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 1998, 45(4): 966-971.
- [3] Kory C L Three-dimensional simulation of helix traveling-

wave tube cold-test characteristics using MAFIA [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 1996, 43(8): 1937-1949.

- [4] Wilson J D Design of high-efficiency widebandwidth coupled-cavity traveling-wave tube phase velocity tapers with simulated annealing algorithms [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 2001, 48(1): 95-100.
- [5] 张国兴, 戴卢富, 刘淮. MAFIA 软件模拟三维耦合腔慢波结构 [J]. 电子学报, 1997, 25(6): 1-5.
Zhang G X, Dai L F, Liu Z Numerical simulation for coupled-cavity slow-wave structure by using MAFIA code [J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(6): 1-5 (in Chinese).
- [6] 雷文强, 杨中海, 廖莉, 等. 螺旋慢波电路高频特性的三维计算模拟 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(6): 892-896.
Lei W Q, Yang ZH, Liao L, et al Three-dimensional computational simulation for high-frequency characteristic of helical slow-wave circuit [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(6): 892-896 (in Chinese).
- [7] Chevalier C T, Hermann K A, Kory C L, et al A comparison of three-dimensional simulations of traveling-wave tube cold-test characteristics using CST MICROWAVE STUDIO and MAFIA [A]. The Third IVEC Proc [C]. CA: IVEC, 2002. 15-16.
- [8] 张兆镛. 微波管高频系统的测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982. 185-220.
Zhang Z T Measurement of high frequency system for microwave tube, Beijing National Defence Industry Press, 1982. 185-220 (in Chinese).
- [9] Kory C L, Dayton J A. Computational investigation of experimental interaction impedance obtained by perturbation for helical traveling-wave tube structures [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 1998, 45(9): 2063-2071.
- [10] Gruning P, Quasi-Three-Dimensional perturbation technique including dielectrics for TWT's [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 1994, 41(3): 445-451.
- [11] 杨中海, 李斌, 廖莉, 等. 微波管 CAD 技术进展 [J]. 真空电子技术, 2002, 1(4): 1-9.
Yang ZH, Li B, Liao L, et al Advances in microwave tube CAD technology [J]. Vacuum electronics, 2002, 1(4): 1-9 (in Chinese).

作者简介:



韩博男, 1980年7月生于陕西西安, 在读硕士生, 2002年毕业于西安交通大学, 获工学学士学位, 2003年起在中国科学院电子学研究所攻读硕士学位, 主要从事微波器件计算机模拟仿真工作。
Email: han_bo@mails.gucas.ac.cn