

螺旋线慢波结构的参数变化对其冷测特性的影响

李 实,刘 韦,苏小保,阴和俊

(中科院电子所微波器件中心,北京 100080)

摘 要: 本文介绍了用 MAFIA 软件的准周期边界条件计算螺旋线行波管慢波结构的色散和耦合阻抗等冷测特性的方法,并重点对慢波结构中各参数,特别是矩形螺旋线截面的宽度和厚度对其冷测特性的影响进行了分析.这是目前理论上没有解决的难题.分析结果表明,螺旋线的宽度和厚度对其色散影响不大,而对耦合阻抗有一定影响.对耦合阻抗而言,螺旋带宽度和厚度都存在一个最佳值.

关键词: 行波管;螺旋线慢波结构;色散;耦合阻抗

中图分类号: TN124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 09-1511-04

Effect of Helical Slow-Wave Structure Parameter Variations on TWT Cold-Test Characteristics

LI Shi, LIU Wei, SU Xiao-bao, YIN He-jun

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The quasi-periodic boundary conditions in the computer code MAFIA is used to determine the effect on dispersion and on-axis interaction impedance of helical slow-wave structure parameter variations, including width, thickness and relative dielectric constant of the support rods. This is a difficult problem in theory now. The result is that, with the variations of axial width and height of the helical tape, only a slight decrease in the phase velocity, but more decrease in the interaction impedance. There is an optimum size on both axial width and height of the helical tape for the interaction impedance of a helical slow-wave structure.

Key words: traveling-wave tube; helical slow-wave structure; dispersion; interaction impedance

1 引言

螺旋线行波管(TWT)慢波系统通常是由三根介质杆夹持螺旋金属带(或金属丝)并固定在圆形金属管里而成.因为螺旋线慢波结构有极宽的带宽和一定的功率容量,所以在电子对抗和通讯领域得到了非常广泛的应用.螺旋线慢波结构的色散、耦合阻抗是设计螺旋线行波管的两个关键的参量,对整管的性能有很大的影响. Pierce、Sensiper 和 Rowe 等运用场论或等效电路法对螺旋线慢波结构的色散和耦合阻抗进行了开拓性的研究^[1-3].提出了各种物理模型,其中比较成功的有 J R Pierce 的螺旋导电面模型,他把螺旋线慢波结构简化为一个半径等于螺旋线半径的无限薄圆筒;后来 Sensiper 作了改进,提出螺旋带模型,考虑了螺旋线的不均匀性对场的影响.这些模型与实际螺旋线相差很大,比如没考虑螺旋线导线截面尺寸的影响,因此又进一步发展了其它方法,如场的直接积分、利用特殊的螺旋坐标系、展开螺旋线和用切比雪夫多项式展开螺旋带的面电流等^[4].由于螺旋线慢波结构的复杂性,给理论分析带来了很大困难,往往需要引入一些假设,而且只是

在某些特定条件下才有解;特别是考虑了螺旋线导线截面尺寸,问题变得更加复杂,所以至今没有一个比较成功的模型,也就无法给出令人满意的结果.在行波管的实际应用中发现,螺旋线的宽度和厚度对其冷测特性有一定的影响;特别是在对行波管的增益、效率、带宽以及相位的要求越来越高,这是一个必须考虑的因素之一.以往的经验是螺旋线的宽度一般选为螺距的三分之一到二分之一左右,至于螺旋线的厚度是多少没有要求,为了获得最佳尺寸,还需要做大量的实验.但是这样很费时、成本高,而且往往因为涉及的因素太多而得不到理想的结果.

计算机模拟技术的发展,使计算慢波结构各参数的改变对其性能的影响成为可能.近些年,有很多相关仿真软件开发出来.上世纪末,国外报道了用计算机程序 MAFIA 实现了慢波结构传输特性的精确仿真^[5-9],国内文献也作了比较详细的论述^[10-13].在此基础上,我们也在用 MAFIA 三维计算程序计算螺旋线行波管慢波结构的色散和耦合阻抗方面积累了大量的实际经验.这使得用 MAFIA 三维计算程序计算慢波结构中各参数对其传输特性的影响成为可能.本文介绍了用

MAFIA 软件的准周期边界条件计算螺旋线行波管慢波结构的色散和耦合阻抗等传输特性的方法,并重点对慢波结构中各参数,特别是矩形螺旋线截面的宽度和厚度对其传输特性的影响进行了分析。

2 模拟方法

2.1 色散特性

MAFIA 软件提供了一个准周期边界条件 (Quasi-periodic boundary conditions). 在这种边界条件下,可以在一个慢波线结构周期的轴向指定一个固定的相移,相应的谐振频率就可以计算出来. 特别是使用周期边界条件时,所计算的场为纯行波场,这与行波管中传播行波的实际情况非常接近,可以得到与实际情况较一致的结果. 所以用准周期边界条件对螺旋慢波线进行计算,在相同网格数下提高了计算精度,缩短了计算时间. 而且用这种方法计算得到的色散曲线比较光滑规则,可以此求得准确的群速度,为计算耦合阻抗打下了基础。

由谐振频率与对应相位之间的关系可得到计算相速的公式

$$v_p = 2 fL / \quad (1)$$

式中, f 为模拟计算得到的谐振频率; L 为螺旋线慢波线螺距; ϕ 为计算时给定的一个周期上的微波相移. 根据公式 (1) 可模拟计算螺旋慢波线的色散特性。

2.2 耦合阻抗

由于使用了准周期边界条件,所以采用与实验测试相同的方法-微扰法计算耦合阻抗. 这比以往用耦合阻抗公式计算的方法方便很多. 利用微扰法原理在螺旋慢波线的中心轴线处放置一个圆柱形介质棒,模拟计算腔体受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. 微扰前后轴向传播常数变化的公式为

$$\Delta \beta = \frac{P}{4 \pi \epsilon_0 \epsilon_r} \frac{E \cdot E^*}{V} \quad (2)$$

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

$$\Delta f / f = - (\Delta \beta / \beta) \quad (3)$$

式中, Δf 为微扰前后谐振频率的变化量; f 为微扰前模拟得到的谐振频率; v_p 为相速; v_g 为群速,它可通过求解色散特性曲线的斜率得到。

在螺旋线慢波结构中,电子注通常与基波同步并进行能量交换,通过一定的推导可得到基波耦合阻抗的计算公式

$$K_0 = - \frac{2 \beta_p}{(\epsilon_r - 1) \omega^2 \beta_g^2} \quad (4)$$

式中, K_0 为基波的耦合阻抗, b 为介质棒的半径,并取 b 是比较小的值。

2.3 螺旋线慢波结构建模

MAFIA 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. 然而 MAFIA 没有提供直接生成螺旋

线模型的命令,对螺旋线进行建模需要多个命令的组合使用. 文献 [10] 中提到了在圆柱坐标系下按照螺旋线的生成方程不断变换方位角和轴向坐标生成模型,这种方法非常繁琐,灵活性差;而为了得到各种慢波结构,要变换很多参数,所以很不方便;另外模型精度也不高,影响了计算精度。

为此我们利用 CAD 建模软件 PROE 提供的螺旋线建模命令进行精确建模,然后运用该软件提供的模型输出功能将螺旋线模型转换为 MAFIA 软件可识别的 ASCII 格式的 STL 文件 [14],再利用 MAFIA 的 CAD 输入/输出功能将 STL 文件读入到建模生成器中生成螺旋线模型. 生成螺旋线之后,可直接使用 MAFIA 所提供的建模命令对夹持杆和翼片等进行精确地建模,为高频特性的精确分析奠定模型基础. 本文采用文献 [13] 中提供的螺旋线慢波结构 (UBB1 helix, 均匀夹持杆) 进行建模,其结构尺寸如表 1 所示。

表 1 螺旋线慢波结构尺寸表

螺旋线结构尺寸/mm				夹持杆结构尺寸/mm			管壳尺寸/mm
半径	厚度	宽度	螺距	形状	宽度	介电常数	管壳内径
0.8001	0.1779	0.635	1.1608	矩形	0.4572	5.1	1.7145

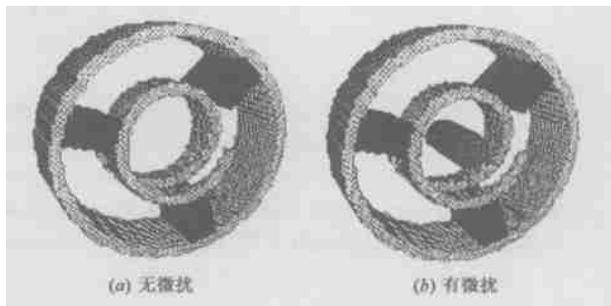


图 1 直角坐标系下螺旋慢波结构一个周期模型图

为了采用准周期边界条件的模拟方法,我们只对单一螺距螺旋线慢波结构进行建模. 模拟过程中用相同数量的网格在直角坐标系下分别对无微扰和有微扰两种螺旋慢波结构进行建模,如图 1 (a) 和 (b). 由于 UBB1 helix 行波管是一个相当成熟的管型,其各项指标都很好,所以我们以它为参考. 在其它参数不变的前提下,将其中某一个参数在其参考值附近变化,然后用 MAFIA 分别算出它们的色散曲线和耦合阻抗曲线,从而得出该参数对螺旋慢波结构传输特性的影响. 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 分析与结果

3.1 计算结果与实测结果的比较

首先我们用以上介绍的方法计算了色散特性和耦合阻抗曲线,并与文献 [13] 中给出的实验结果比较. 如图 2 (a) 色散特性计算结果与实测结果比较, (b) 耦合阻抗计算结果与实测结果比较. 可以看出计算曲线和实验曲线符合得较好,说明我们采用的计算方法能够反映实际的色散和耦合阻抗,并具有一定精度,给下面的进一步分析打下基础。

3.2 夹持杆介电常数的影响

关于夹持杆介电常数的影响,以往的理论分析表明 [5], 由

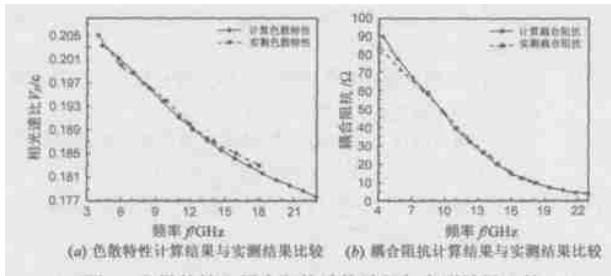


图 2 色散特性和耦合阻抗计算结果与实测结果比较

于介质杆的存在增加了系统的分布电容,使得系统上传播的相速下降,而且介电常数越大,相速下降得越多;介质杆中有一部分储能,使得沿轴线方向的电场强度下降,所以耦合阻抗下降,而且介电常数越大,耦合阻抗下降得越多.图 3 (a) 和 (b) 给出了不同介电常数的夹持杆的色散曲线和耦合阻抗曲线.从图 3 中可以看到,用 MAFIA 模拟的结果和理论分析是相一致的.

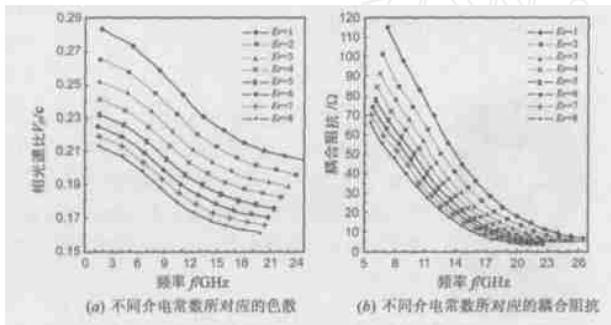


图 3 不同介电常数的计算结果

3.3 慢波线的宽度的影响

为了得到慢波线宽度对慢波系统传输特性的影响,在不变慢波结构其它参数的情况下,在慢波线的宽度的某个值(如表 1 中的慢波线宽度 0.635mm)附近每隔 0.01mm 选取一值,用上述方法分别算出其色散曲线和耦合阻抗曲线如图 4 (a) 和 (b). 为了便于观察,图中只显示了每隔 0.1mm 的值.从图 4 中可以看出,慢波线宽度的变化对色散影响不大,但对耦合阻抗有一定影响.如图 4 (b) 中,耦合阻抗在 0.635mm 附近达到最大,宽度大于或小于它耦合阻抗都会下降.

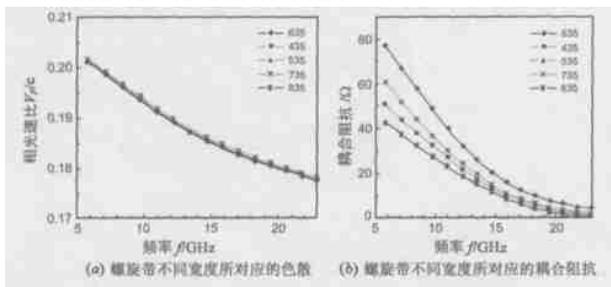


图 4 螺旋带不同宽度的计算结果

3.4 慢波线的厚度的影响

为了得到慢波线厚度对慢波系统传输特性的影响,在尽量不改变其它参数的情况下(因为厚度变化,不可避免地会带

来螺旋线平均半径和慢波结构的一系列径向变化,本方法是保持螺旋线内径和管壳内径不变,适当调整夹持杆的高度,尽量减少其它因素的影响),在慢波线的厚度的某个值(如表 1 中的慢波线厚度 0.1779mm)附近每隔 0.001mm 选取一值,用上述方法分别算出其色散曲线和耦合阻抗曲线如图 5 (a) 和 (b).

为了便于观察,图中只显示了每隔 0.01mm 的值.从图 5 (a) 中可以看出慢波线厚度的变化对色散的影响比图 4 (a) 中慢波线宽度对色散的影响大,这是由于厚度的变化导致慢波线的平均半径和夹持杆的高度的变化造成的.慢波线的厚度对耦合阻抗也有一定影响,如图 5 (b) 中耦合阻抗在 0.1779mm 附近达到最大,大于或小于它耦合阻抗都会下降.

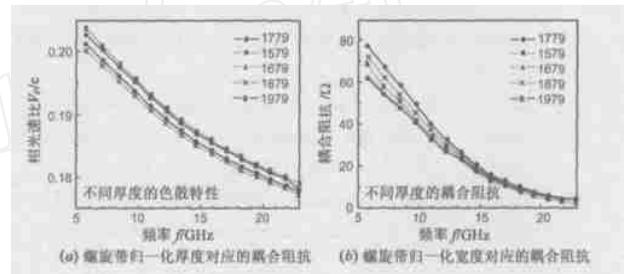


图 5 螺旋带不同厚度的计算结果

4 结论

通过以上的结果和分析可以看出,慢波系统随着夹持杆的介电常数增加相速降低,耦合阻抗也随之降低,这和以往的理论分析结果一致;螺旋线的宽度和厚度的变化对色散影响不大,但对耦合阻抗有一定的影响.为了更直观地观察螺旋线宽度和厚度对耦合阻抗的影响,将该行波管中心工作频率附近(10G左右)上的耦合阻抗随归一化厚度和归一化宽度的变化曲线分别示于图 6 (a) 和 (b).

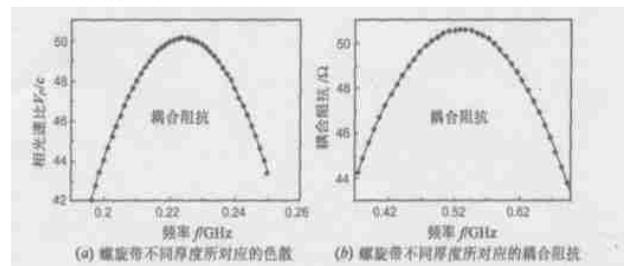


图 6 螺旋带归一化宽度和厚度的对耦合阻抗的影响

归一化宽度和归一化厚度分别是指对螺旋线的螺距和平均半径归一化.图 6 中的曲线是在大量原始数据基础上用二次曲线拟合的结果,并没有改变曲线的变化趋势.

从图 6 中可以看出对耦合阻抗来说,螺旋带宽度和厚度在通常尺寸下都存在一个最佳值(本例中归一化宽度是 0.547,归一化厚度是 0.2223),偏离了最佳值就会导致耦合阻抗的下降,降低行波管的放大能力.在对其它管型慢波系统的模拟中,也得到同样的结论.

同样可以看到运用 MAFIA 软件模拟螺旋慢波结构传输特性的方法避免了解析理论的假设处理,提高了求解精度;也

可以解决至今某些理论上一直没有解决的难题,比如本例中慢波线横截面尺寸的影响,还有计算任意截面形状介质杆的螺旋线慢波结构的色散和耦合阻抗等.同时,由于该方法可以在模型中其它参数不变的情况下针对其中某一参数进行模拟,这是用实验的方法无法实现的.

参考文献:

- [1] Pierce J R. Traveling Wave Tubes[M]. Princeton NJ :Van Nostrand , 1950.
- [2] Sensiper S. Electromagnetic Wave Propagation on Helical Conductors [D]. USA :Dept of Electrical Engineering MIT,1951.
- [3] Rowe J E. Nonlinear Electron-Wave Interaction Phenomenon[M]. New York :Academic Press ,1965.
- [4] 刘盛纲,等.微波电子学导论[M].北京:国防工业出版社,1985. 161 - 185.
- [5] Chermín D. Exact treatment of the dispersion and beam interaction impedance of a thin tape helix surrounded by a radially stratified dielectric[J]. IEEE Trans on ED ,1999 ,46 :1472 - 1483.
- [6] Kory C L ,Dayton J A. Accurate cold-test model of helical TWT slow-wave circuits[J]. IEEE Trans Electron Devices ,1998 ,45 (4) :966 - 971.
- [7] Kory C L ,Dayton J A. Effect of helical slow-wave circuits[J]. IEEE Trans Electron Devices ,1998 ,45(4) :972 - 976.
- [8] Kory C L. Validation of an Accurate Three-Dimensional Helical Slow-Wave Circuits Model[R]. USA :NASA Technical Paper ,1997. 4766.
- [9] Kory C L. Three-dimensional simulation of helical traveling-wave tube cold-test characteristics using MAFIA[J]. IEEE Trans Electron Devices ,1996 ,43(8) :1317 - 1319.
- [10] 张国兴,等. MAFIA 软件模拟三维耦合腔慢波结构[J]. 电子学报 ,1997 ,25(6) :1 - 5.
- [11] 雷文强,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 - 895.
- [12] 王劲松. 用 MAFIA 软件对行波管慢波电路冷测特性的模拟与应用[D]. 北京:北京真空电子技术研究所,2001.
- [13] 黄生杰,张益三,洪立群. Proe2001 高级开发实例[M]. 北京:电子工业出版社,2002. 73 - 76.

作者简介:



李实男,1963年11月生于山西太原,博士,副教授,1986年毕业于山西大学固体物理专业,获理学学士学位,1995年毕业于西安交通大学物理电子学专业,获工学硕士学位;2000年毕业于西安交通大学电磁场与微波技术专业,获工学博士学位,2001年起在中国科学院电子学研究所做博士后工作,主要从事大功率微波电真空器件研究及其计算机模拟仿真工作。



刘韦男,1976年5月生于新疆乌鲁木齐,在读博士生,1999年毕业于清华大学机械工程系,获工学学士学位,1999起年保送到中国科学院电子学研究所微波器件中心直读博士学位,主要从事大功率微波电真空器件计算机模拟仿真工作。