

文章编号: 100124322(2004)0921186205

# 螺旋线径向挤压变形对其慢波结构冷测特性的影响<sup>X</sup>

李 实, 刘 韦, 苏小保, 阴和俊

(中国科学院 电子学研究所 微波器件中心, 北京 100080)

**摘 要:** 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, 以及用 ANSYS 软件对螺旋线径向挤压变形建模的方法, 并对螺旋线受挤压径向变形对其冷测特性的影响进行了详细的分析。结果表明: 螺旋线径向挤压变形会导致相速增大, 而在通常的变形范围内耦合阻抗也会增加; 当变形继续增大时耦合阻抗上升到最大值后开始下降。

**关键词:** 行波管; 螺旋线慢波结构; 色散; 耦合阻抗; MAFIA 软件; ANSYS 软件

**中图分类号:** TN124

**文献标识码:** A

螺旋线慢波结构行波管有极宽的带宽和一定的输出功率, 在电子对抗和通讯领域得到了广泛的应用。螺旋线慢波结构的色散、耦合阻抗是设计螺旋线行波管两个关键的冷测参量, 对整管性能有很大的影响。螺旋线行波管(TWT)慢波结构通常是由 3 根介质夹持杆把一个螺旋金属带(或金属线)固定在圆形金属管里而成的。螺旋线受到 3 根夹持杆的挤压就会产生径向变形, 实际上管壳、夹持杆和螺旋线总有加工公差, 由此导致的径向变形也不相同。由于数学工具和仿真方法的局限性, 螺旋线径向变形对螺旋线慢波结构色散、耦合阻抗的影响过去一直没有深入研究。现在对行波管的增益、效率、带宽甚至相位要求越来越高, 螺旋线径向变形就成为一个必须考虑的因素之一。

传统的 Pierce, Sensiper 和 Rowe 等人的场论或等效电路法, 以及后来发展的场直接积分法、利用特殊的螺旋坐标系统法、展开螺旋线和用切比雪夫多项式展开螺旋带的面电流法等<sup>[1~6]</sup>只是在某些特定条件下才有解, 对计算复杂的螺旋线慢波结构十分困难, 对计算受挤压径向变形的螺旋线慢波结构就更困难。用实验的方法虽然直观, 但因为影响色散和耦合阻抗的因素太多, 往往得不到满意的结果, 而且成本很高。计算机模拟技术的发展, 使计算螺旋线受挤压径向变形后对其性能的影响成为可能<sup>[7~13]</sup>。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以及用 ANSYS 软件对螺旋线径向挤压变形建模的方法, 并对螺旋线受挤压径向变形后对其冷测特性的影响进行了分析。

## 1 模拟方法

### 1.1 色散特性

MAFIA 软件提供了一个准周期边界条件(quasi-periodic boundary condition)。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, 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, 可以此求导得到准确的群速度, 为计算耦合阻抗打下了基础。

由谐振频率与对应相位的关系可得到相速的计算公式

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

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; 为计算时给定的一个周期上的微波相移。由公式(1)可模拟计算螺旋慢波线的色散特性。

### 1.2 耦合阻抗

由于使用了准周期边界条件, 所以采用与实际测试方法相同的微扰法计算耦合阻抗。这比用耦合阻抗公式计算的方法方便得多。利用微扰法原理在螺旋慢波线的中心轴线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的变化为

X 收稿日期: 2003211204; 修订日期: 2004204216

基金项目: 中科院电子学研究所知识创新基金资助课题(E3131); 中科院电子学研究所青年创新基金资助课题(E3130207)

作者简介: 李 实(1963—), 男, 山西太原人, 博士, 副研究员, 主要从事大功率微波器件仿真和研制工作; 北京 2652 信箱; E2mail: li2ishi@sohu.com。

$$= [ \int_0^{2\pi} \int_0^b \int_0^L \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E E^3 dV ] / 4 PL \tag{2}$$

式中： $\epsilon_r$  为介质棒的介电常数； $P$  为功率流； $E^3$  为微扰前的电场复共轭； $E$  为微扰后的电场； $\omega$  为角频率； $\epsilon_0$  为真空中的介电常数。

由微扰法理论可知，微扰前后频率的变化量与轴向传播常数  $\beta$  的变化量有关，计算公式为

$$f/f_0 = (v_g/v) (\beta/\beta_0) \tag{3}$$

式中： $f$  为微扰前后谐振频率的变化量； $f_0$  为微扰前模拟得到的谐振频率； $v_g$  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

$$Z_0 = \frac{2}{(\epsilon_r - 1) \epsilon_0 b^2 v_g f} \tag{4}$$

式中： $Z_0$  为基波的耦合阻抗； $b$  为介质棒的半径。

### 1.3 螺旋线慢波结构建模

MAFIA 软件可对螺旋线的带宽、带厚、夹持杆尺寸、材料以及翼片的形状等进行精确的建模，避免了解析求解过程中不必要的理论假设。然而 MAFIA 没有提供直接生成螺旋线模型的命令，对螺旋线建模需要多个命令的组合使用。文献[10]中提到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的方法非常繁琐，灵活性差，而且为了得到各种慢波结构，要变换一些参数，所以使用起来很不方便；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，应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，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 提供的建模命令对管壳、夹持杆和翼片等进行精确的建模，为高频特性的精确分析提供模型基础。本文采用 (UBB1 helix，均匀夹持杆) 螺旋线慢波结构进行建模，其结构尺寸如表 1 所示。

表 1 螺旋线慢波结构尺寸表

Table 1 Structure dimension table of helical slow wave circuit

tape model of helix				rod		inner radius of tubes	
mean radius	thickness	width	pitch	shape	width	dielectric	
0.800 1mm	0.177 9mm	0.635mm	1.160 8mm	rectangle	0.457 2mm	5.1	1.714 5mm

### 1.4 用 ANSYS 作静力学分析

ANSYS 程序是一个功能强大的大型通用有限元分析软件，作静力分析是它的基本功能之一。本文定义螺旋线的杨氏模量为  $30 \times 10^6$  Pa，泊松比为 0.25。在 3 个夹持杆位置沿径向施加压力，螺旋线产生径向变形；随着压力的增大，径向形变越严重。表 2 列出了不同的力所对应的螺旋线径向位移及其相对于直径 (1.6mm) 的形变。

表 2 螺旋线径向受力变形表

Table 2 Radial deformation table of helical slow wave circuit

extrusion force/ N	0	5	10	15	20	25	30	35	40
deformation/ $\mu$ m	0	5.167	10.315	16.099	21.401	27.879	33.351	39.683	46.272
relative deformation/ %	0	0.322 9	0.644 6	1.006 1	1.337 4	1.742 2	2.084 2	2.479 9	2.891 7

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)。在其它参数不变的前提下，对夹持杆沿径向施加 40N 的挤压力，螺旋线产生相对于直径为 2.891 7% 的变形，如图 1 所示。在表 2 中分别取不同的相对位移，然后用 MAFIA 分别算出它们的色散曲线和耦合阻抗曲线，从而得出挤压变形对螺旋慢波结构冷测特性的影响。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。

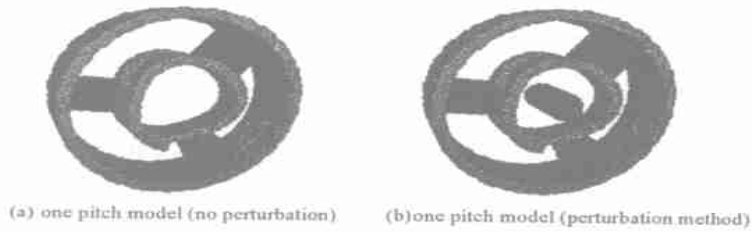


Fig. 1 One pitch model of helical slow wave circuit with 2.8917% relative deformation

图1 螺旋线相对形变为2.8917%的螺旋慢波结构一个周期模型图

## 2 结果与分析

### 2.1 螺旋线挤压变形对色散特性的影响

在表2中分别取不同的相对形变,然后用MAFIA分别算出它们的色散曲线,如图2所示。由图2(a)不同径向形变对应的色散可以看到,随着径向相对形变的增加,其相速也近乎线性地单调增加。在行波管的生产中,螺旋线的相对形变一般不超过1%,所以列出相对形变小于1%的色散曲线如图2(b)所示。

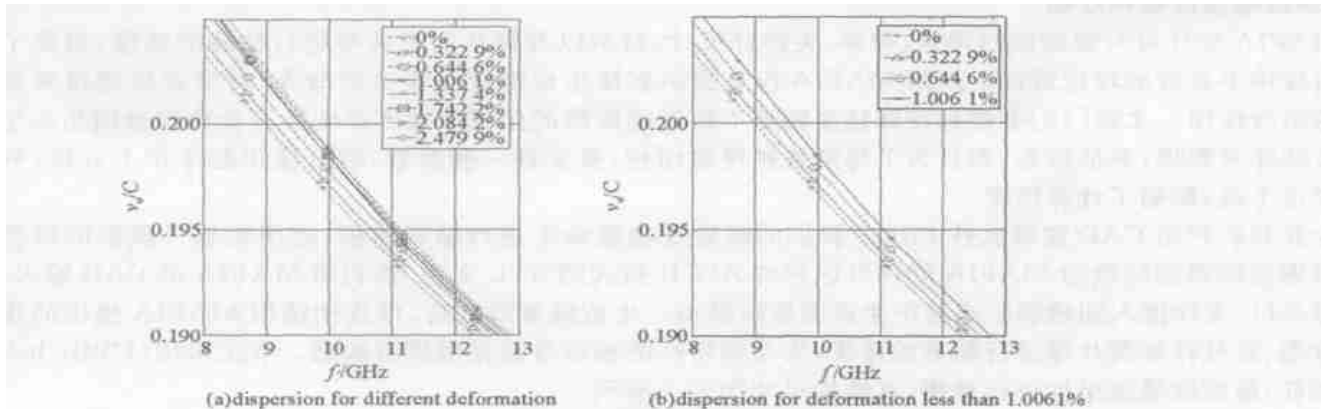


Fig. 2 Dispersion for different radial deformation

图2 径向形变对应的色散

### 2.2 螺旋线挤压变形对耦合阻抗的影响

在表2中取不同的相对形变,用MAFIA软件分别算出它们的耦合阻抗,如图3所示。由图3(a)可以看到,随着径向相对形变的增加,其耦合阻抗也增加,当形变增加到1.0061%,耦合阻抗达到最大值。相对形变小于1%的耦合阻抗如图3(b)所示,从图3(b)可以看出,耦合阻抗是随螺旋线径向相对形变的增加而单调增加的。

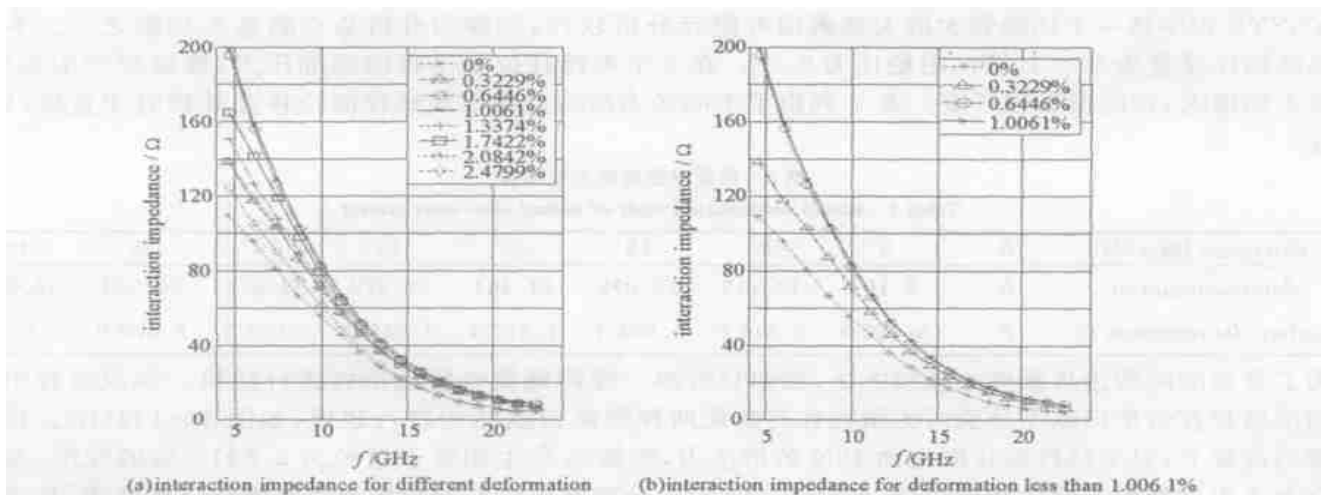


Fig. 3 Interaction impedance for different radial deformation

图3 径向形变对应的耦合阻抗

通过以上的结果和分析可以看出,当螺旋线的径向相对形变不大于1%时,慢波系统的色散和耦合阻抗都单调增加。为了更直观地观察螺旋线径向相对形变对色散和耦合阻抗的影响,给出该行波管中心工作频率附近(10GHz左右)上的色散和耦合阻抗随径向相对形变的变化曲线,如图4(a)和(b)。图4中的曲线是在大量原始数据基础上用10次曲线拟合的结果,并没有改变曲线的变化趋势。

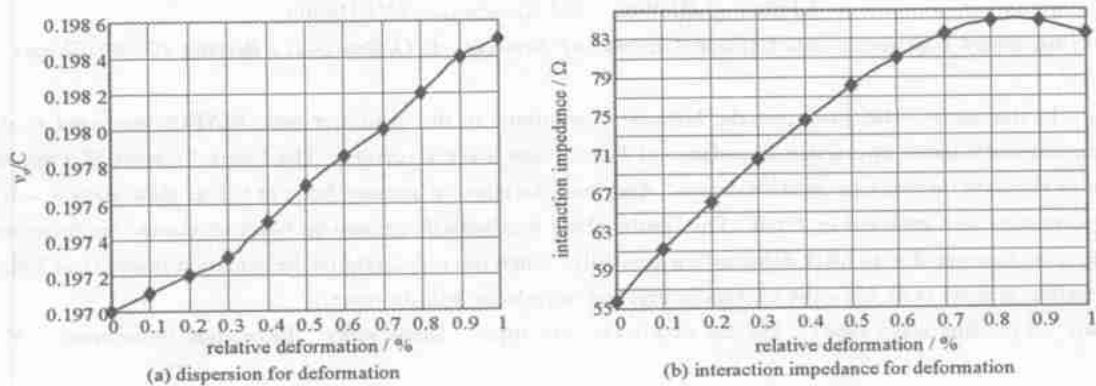


Fig. 4 Dispersion and interaction impedance for different radial deformation

图4 径向相对形变所对应的色散和耦合阻抗

从图4(a)中可以看出,对色散来说,径向相对形变改变1%,则相速、光速比增加 $(0.1986 - 0.197) / 0.197 = 0.81\%$ ,即相速增加了0.81%,也就是行波每走原来一个波长相位都要比原来超前 $360^\circ \times 0.81\% = 2.91^\circ$ 。对于一个30cm长的行波管,其累计相位超前达 $29.1^\circ$ 。对相位一致性要求比较高的行波管,这个相位变化是不容忽视的。从图4(b)中可以看出,在径向相对形变为0.8%之前,耦合阻抗从56上升到85,上升幅度比较大。

综上所述,适当挤压螺旋线使其产生小于1%的径向变形,对提高行波管的效率很有意义,但是对相位要求较高时,则必须考虑相对形变的一致性。否则,即使径向变形相差很小,也会导致相位变化很大。

#### 参考文献:

- [1] Pierce J R. Traveling wave tubes[M]. Princeton N J: Van Nostrand, 1950.
- [2] Sensiper S. Electromagnetic wave propagation on helical conductors[D]. USA: Dept of Electrical Engineering MIT, 1951.
- [3] Sensiper S. Electromagnetic wave propagation on helical structures (A review and survey of recent progress) [A]. IRE[C]. 1955, 43:149—161.
- [4] Rowe J E. Nonlinear electron-wave interaction phenomenon[M]. New York: Academic Press, 1965.
- [5] 刘盛纲, 李宏福, 王文祥, 等. 微波电子学导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985. (Liu S G, Li H F, Wang W X, et al. Introduction to microwave electronics. Beijing: National Defence Industry Press, 1985)
- [6] Chermin 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 Electron Devices*, 1999, 46:1472—1483.
- [7] Kory C L, Dayton J A. Accurate cold-test model of helical TWT slow-wave circuits[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1998, 45(4): 966—971.
- [8] Kory C L, Dayton J A. Effect of helical slow-wave circuits [J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1998, 45(4): 972—976.
- [9] Kory C L. Validation of an accurate three-dimensional helical slow-wave circuits model[R]. NASA Technical Paper, 1997. 4766.
- [10] Kory C L. Three-dimensional simulation of helical traveling-wave tube cold-test characteristics using MAFIA[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1996, 43(8): 1317—1319.
- [11] 张国兴, 戴卢富, 刘准, 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. (Zhang G X, Dai L F, Liu Z, et al. Numerical simulation for coupled-cavity slow-wave structure using MAFIA code. *Acta Electronica Sinica*, 1997, 25(6): 1—5)
- [12] 刘涛, 杨风鹏. 精通 ANSYS[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. (Liu Tao, Yang F P. Conversance of ANSYS. Beijing: Tsinghua University Press, 2002)
- [13] 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—895. (Lei W Q, Yang Z H, Liao L, et al. Three-dimensional computational simulation for high-frequency characteristic of helical slow-wave circuit. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(6): 892—896)

## Effect of pressed helix in helical slowwave structure on TWT coldtest characteristics

LI Shi, LIU Wei, SU Xiaobao, YIN Hejun

(Institute of Electronics, the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 2652, Beijing 100080, China)

**Abstract:** In this paper, the quasi-periodic boundary conditions in the computer code MAFIA was used to determine the effect on dispersion and on-axis interaction impedance of helical slowwave structure. The Finite Element Method software ANSYS was used to simulate the helix pressed distortion. And then the effect of pressed helix in helical slowwave structure on TWT coldtest characteristics was analysed in detail. The results show that both dispersion and on-axis interaction impedance of helical slowwave structure increase due to helix deformation generally, when the radial relative deformation is less than 1%. While radial relative deformation is more than 1%, the on-axis interaction impedance will decrease.

**Key words:** Traveling-wave tube; Helical slowwave structure; Dispersion; Interaction impedance; MAFIA; ANSYS