

## 苜蓿叶形耦合腔慢波结构的模拟和验证

周华霞<sup>①②</sup> 张兆传<sup>①</sup> 范俊杰<sup>①</sup> 李实<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所微波器件中心 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 苜蓿叶形耦合腔慢波结构是一种高耦合阻抗的慢波线。由于结构复杂,其数学分析及工程设计都非常困难。该文利用三维电磁计算软件 Isfel3d, Mafia, HFSS 对这种结构的色散特性、耦合阻抗进行数值模拟,在分析模拟结果的基础上,对这种结构做了初步的优化。结果表明,数值模拟与实验结果有很好的 consistency,这对改进这种慢波线的工程设计具有重要意义。

**关键词:** 慢波结构; 苜蓿叶形耦合腔; 色散特性; 耦合阻抗

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-2023-03

## Simulation and Verification of Clover-Leaf Coupled Cavity Slow-Wave Structure

Zhou Hua-xia<sup>①②</sup> Zhang Zhao-chuan<sup>①</sup> Fan Jun-jie<sup>①</sup> Li Shi<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate School of Chinese Academy of sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Clover-leaf coupled cavity is a kind of slow-wave structure of high interaction impedance. The mathematic analyse and the engineering design are very difficult for its complex structure. In this paper, three-dimensional simulation codes Isfel3d, Mafia, HFSS are used to determine the dispersion and interaction impedance. Based on analyse of simulate results, the coupled cavity slow-wave structure is optimized primarily. The simulation results is consistent with the measurement results and is significant to design of the slow-wave structure.

**Key words:** Slow-wave structure; Clover-leaf coupled cavity; Dispersion; Interaction impedance

### 1 引言

中小功率的行波管一般采用螺旋线慢波结构。在大功率行波管中,由于散热等问题不能很好地解决,螺旋线及其变态系统的应用受到限制。而耦合腔慢波结构尺寸大,散热性能好,也可以在高电压下工作,能够得到很高的平均功率、脉冲功率及很高的增益,目前被广泛应用于大功率行波管。由Chodorow<sup>[1,2]</sup>等人提出的苜蓿叶形慢波回路,就是一种耦合腔慢波结构,工作于基波,与常用的耦合腔慢波结构相比,具有更高的耦合阻抗。高耦合阻抗,就意味着高效率、高增益。在国内,已有研究工作者将苜蓿叶形耦合腔慢波结构应用于高功率微波放大器件中。

由于苜蓿叶形慢波回路腔体结构的复杂性,很难由场论分析法直接计算得到其高频特性,也难以定量地解决该系统的设计计算问题。利用软件模拟耦合腔慢波结构,计算得到慢波特性数据的方法,称为软件冷测。它避免了解析模型中的假设条件,提高了求解精度,节省了加工和测量时所花费的人力、时间和费用,且对回路的生产设计具有重要的指导意义。

目前,对耦合腔慢波回路高频特性的计算机模拟多选体

斯结构,且采用Mafia软件<sup>[3,4]</sup>。本文运用Isfel3d, Mafia, HFSS等软件对苜蓿叶形慢波回路的色散特性、耦合阻抗进行模拟。对色散特性的模拟,采用测试不同相移角度对应着相应谐振频率的谐振法<sup>[5]</sup>,对耦合阻抗的模拟采用于腔体中置入微扰棒后得到微扰频率变化值的微扰法,最后得到了与实验冷测值十分接近的模拟结果。

### 2 苜蓿叶形慢波结构

苜蓿叶形慢波线是一段周期性加载的圆波导传输线,如图1,为慢波线中两个周期结构的平面图,由4个圆柱形耦合腔体和4个耦合缝隙叶片构成。由图可见,在相邻两腔的公共壁,即图1(d)所示的耦合缝隙叶片上开有8个径向缝隙。而每一个腔体内都有4个金属突出物,如图1(c)所示,此4个突出物的角向位置每相邻两腔均相差45°。

金属突出物的存在,一方面使原来是环形的磁力线出现了径向分量,从而通过径向缝隙耦合到另一腔中去;另一方面由于相邻两腔中金属突出物的角向位置相差45°,这样就使相邻两腔中的磁场穿过同一缝隙的角向分量反向,从而实现了负电感耦合。苜蓿叶形耦合腔慢波结构的第一通带为腔体通带,而且具有正色散前向基波,并且有较高的耦合阻抗。

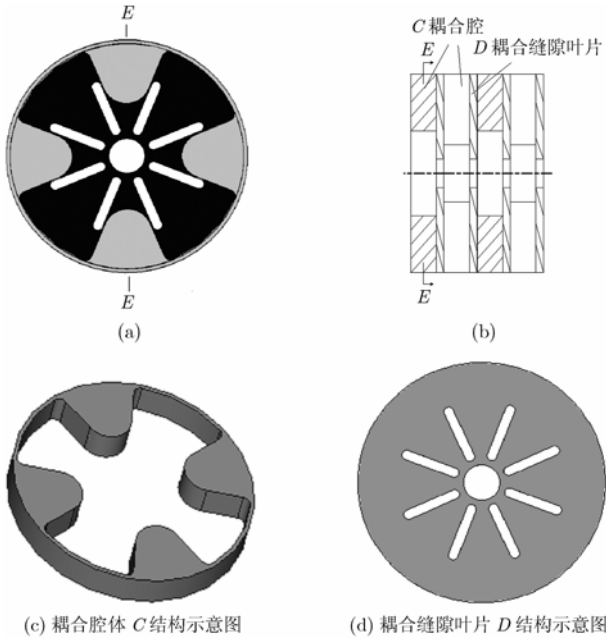


图 1 苜蓿叶形慢波结构的平面图

### 3 模拟方法

#### 3.1 色散特性

运用软件对慢波结构高频特性进行模拟，采用谐振法。对苜蓿叶形慢波回路进行实体建模，在直角坐标系下建立了 3 个耦合腔体结构模型，如图 2 所示。耦合腔体及耦合缝隙叶片的具体尺寸如图 3 所示。

在采用谐振法模拟其色散特性时，分别在腔体的镜像对称面处设置不同的电壁或磁壁，耦合腔的镜像对称面通常就在腔的两个端面处，即图 2 所示的 A-A 面，B-B 面。由谐振法理论可知，当慢波电路的长度为半波长的整数倍时，可得到对应驻波的谐振频率，因此在给定慢波电路的周期数

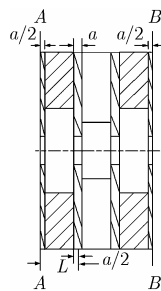


图 2 3 个耦合腔体截面图

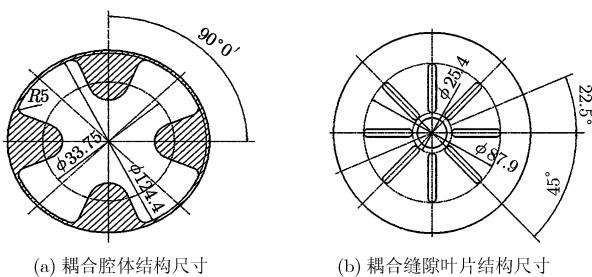


图 3 耦合腔体及耦合缝隙叶片具体尺寸

下，可得到谐振频率与相移角度之间的对应关系。在苜蓿叶形慢波电路中电子注与基波发生相互作用，于是得到腔模下 3 个慢波电路周期数对应的不同边界条件与相移角度之间的关系，见表 1。

表 1 不同边界条件与单腔相移角度之间的关系

边界条件	每腔相移( $\varphi$ )
electric/electric	$\pi/3, 2\pi/3, \pi$
Magnetic/electric	$\pi/6, \pi/2, 5\pi/6$

根据表 1 所示的边界条件进行计算，得到不同边界条件下前 3 个模式的谐振频率，与相应的 3 个相移角度之间有一一对应关系，由此计算电路的色散特性，其计算公式为

$$v_p = \omega / \beta = 2\pi f / \beta = 2\pi fL / \varphi \quad (1)$$

其中  $v_p$  为电磁波的相速度， $\omega$  为慢电磁波的角频率， $\beta$  为电磁波在周期慢波系统中的传播常数， $f$  为模拟计算得到的谐振频率， $L$  为耦合腔单周期长度， $\varphi$  为与  $f$  对应的相移角度。

#### 3.2 耦合阻抗

耦合阻抗基本计算公式为

$$K_n = E_{z,n}^2 / 2\beta_n^2 P_{RF} \quad (2)$$

其中  $E_{z,n}$  为  $n$  次空间谐波的纵向电场幅值， $P_{RF}$  为平均功率流， $\beta_n$  为  $n$  次空间谐波的传播常数，可表示为： $\beta_n = \beta_0 + 2\pi n/L$ 。其中  $\beta_0$  为基波相位常数。

对耦合阻抗的模拟采用微扰法。在腔体的中心轴线处放置一个圆柱形介质棒，然后计算腔体受到微扰后本征频率的偏移，并通过一定的计算公式<sup>[5]</sup>得到耦合阻抗的值。 $n = 0$ ，基波耦合阻抗公式为

$$K_0 = \frac{2}{\epsilon_0(\epsilon_r - 1)F\beta_0^2 v_g} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (3)$$

式中  $\epsilon_0$  为真空中介电常数， $\epsilon_r$  为介质棒介电常数， $F$  为微扰杆横截面面积， $\beta_0$  为基波的传播常数， $\Delta f$  为微扰前后谐振频率的偏移值， $v_g$  为群速，可由色散曲线的斜率求得。

### 4 模拟结果与讨论

#### 4.1 色散特性

运用 Isfel3d, Mafia, HFSS 等软件采用谐振法模拟苜蓿叶形慢波结构的色散特性。利用理想边界条件来计算其色散特性，在耦合腔两端面处设置理想的电壁和磁壁，分别计算得到前 3 个模式的的谐振频率，对应着相应的相移角度，由式(1)可求解耦合腔慢波结构腔模的色散特性。

对色散特性的实验测试采用与模拟相同的谐振法。将

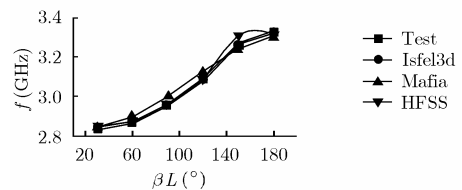


图 4 实验结果与模拟结果的色散特性对比图

Isfel3d 模拟值，Mafia 模拟值，HFSS 模拟值与实验测

试值相比较, 对比结果见如图 4。由图可知, 模拟值与实验值很接近, 有着相同的变化趋势, 且 Isfel3d 模拟值更接近实验值, 色散特性的平均误差小于 0.03%。

#### 4.2 耦合阻抗

采用 Isfel3d 软件计算出微扰前后的频率变化值, 将其和由色散特性模拟计算得到的群速值代入式(3)计算得到耦合阻抗。改变微扰杆的直径, 分别将杆半径设为 2.5mm, 3.5mm, 微扰杆选用介电常数  $\epsilon_r$  为 2.1 的聚四氟乙烯杆, 得到不同的耦合阻抗曲线。对耦合阻抗的实验测试采用与模拟相同的微扰法, 微扰杆半径取 2.5mm。最后, 将模拟值与实验结果相比较, 见图 5。

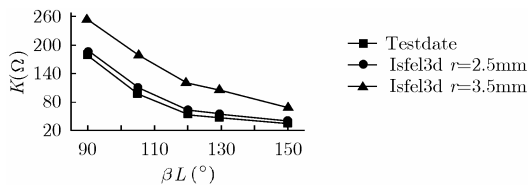


图 5 模拟结果与实验结果的耦合阻抗对比图

由图可知, 微扰杆直径越小, 得到的耦合阻抗模拟结果越接近实验测试值, 当微扰杆半径取为 2.5mm 时, 其平均误差小于 8%。

#### 5 场分析及结构优化

用 Isfel3d 软件对苜蓿叶形耦合腔回路进行模拟, 从后处理模块分辨出腔模各低次模式, 其磁场分布结构如图 6 所示。其场分布与文献[6]中给出的苜蓿叶腔模磁场分布理论图十分吻合。由图可见, 对于基波,  $TM_{010}$  模, 在 8 个隙缝上磁场耦合均是负的, 具有最大的负电感耦合, 所以这种主模式的通带最宽, 苜蓿叶形慢波结构工作于此模式。对于  $TM_{110}$  模, 耦合很小, 通带较窄。对于  $TM_{210}$  模, 由图可见, 8 个隙缝上的耦合均是相抵消的, 因而只有极其微小的耦合, 所以通带很窄。而如图所示的 5H 模, 则有较大的耦合。5H 模的振荡频率大约为基本模式的两倍, 因此 5H 模式很容易引起自激, 是应设法予以抑止的模式。

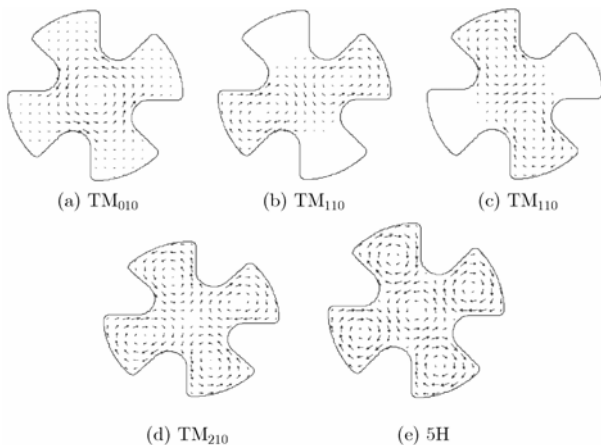


图 6 Isfel3d 模拟的腔模各低次模式的磁场分布图

由对基模  $TM_{010}$  的磁场结构分析可知, 耦合腔金属突出

物和耦合缝隙的形状及尺寸对慢波特性有着直接的影响。本文运用 isfel3d 软件对不同缝隙长度的苜蓿叶形慢波结构进行了模拟计算, 得到如图 7 所示的色散特性曲线图。根据带宽公式  $\frac{2(f_\pi - f_0)}{f_\pi + f_0} \times 100\%$ , 其中  $f_0$  为与 0 模所对应的频率,  $f_\pi$  为与  $\pi$  模所对应的频率, 可计算得, 耦合缝隙长为 31.25mm 时, 带宽为 15.7%, 缝隙长为 35.25mm 时, 带宽为 19.5%, 缝隙长为 40.25mm 时, 带宽为 21.1%。由此可见, 在模拟结果没有出现畸形曲线的范围内, 耦合缝隙越长, 慢波结构的带宽越宽。

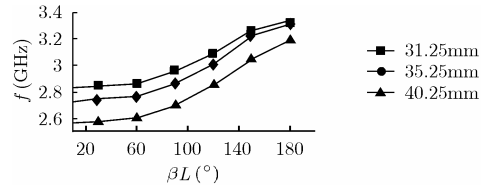


图 7 Isfel3d 模拟的不同长度缝隙的回路色散特性图

#### 6 结束语

利用模拟软件对复杂的苜蓿叶形耦合腔慢波结构的高频特性进行软件冷测, 其模拟结果与实验测试值相比较, 色散特性的平均误差小于 0.03%, 耦合阻抗的平均误差小于 8%, 说明用计算机软件对其进行研究具有可行性。

本文通过对不同长度耦合缝隙的苜蓿叶形慢波结构的模拟发现, 在慢波特性曲线没有出现畸变的范围内, 缝隙长的慢波结构具有更宽的带宽。同样, 可改变腔体内金属突出物的尺寸来满足具体的设计要求, 优化结构。

#### 参考文献

- [1] Chodorow M and Craig R A. Some new circuits for high-power traveling-wave tubes. *Proc.IRE*, 1957, 45(8): 1106-1118.
- [2] Chodorow M and Nalos E J. The design of high-power traveling-wave tubes. *Proc.IRE*, 1956, 44(5): 649-659.
- [3] Lei W Q and Zhong H Y. Software cold test simulation of coupled cavity slow-wave structure in millimeter wave twt. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 24(1): 71-77.
- [4] 张国兴, 戴卢富, 刘准, 等. MAFIA 软件模拟三维耦合腔慢波结构. *电子学报*, 1997, 25(6): 1-5.
- [5] 张兆镗. 微波管高频系统的测量. 北京: 国防工业出版社, 1982, 第四章.
- [6] 刘盛纲. 微波电子学导论. 北京: 国防工业出版社, 1985, 第十章.

周华霞: 女, 1979 年生, 硕士生, 从事电磁场理论与大功率微波器件仿真和研制工作。

张兆传: 男, 1965 年生, 研究员, 长期从事大功率微波器件的研究工作。

范俊杰: 男, 1975 年生, 高级工程师, 主要从事微波电子学和大功率微波器件的研究。

李 实: 男, 1963 年生, 博士, 副研究员, 主要从事大功率微波器件仿真和研制工作。