

三维螺旋慢波电路的精确的冷测模拟

雷文强, 杨中海

(电子科技大学物理电子学院高能电子学研究所, 四川成都 610054)

摘要: 利用 MAFIA 的准周期边界条件对螺旋慢波电路的高频特性进行模拟, 发现模拟结果在一定的网格取值范围内作微小变化, 在此基础上使得色散曲线趋于数值收敛; 并提出利用 MAFIA 后处理模块直接计算耦合阻抗的方法; 将模拟计算结果与实验测试值进行比较, 其平均误差范围达到设计要求, 为软件模拟的精确计算作了一些有益的研究.

关键词: MAFIA; 螺旋慢波电路; 数值收敛; 耦合阻抗

中图分类号: TN124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 03-0512-03

The Accurate Cold Test Simulation of Three Dimensional Helical Slow Wave Circuit

LEI Wenqiang, YANG Zhonghai

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: The high frequency characteristic of helical slow wave circuit is simulated by the quasi-periodic boundary condition of the MAFIA. The simulation result represents a little change when mesh points vary in some ranges, so the dispersion curve reaches the numerical convergence. The method of calculating the impedance is put forward using the post-module of the MAFIA. The simulation results are consistent with the experiment data, in which the average error range meets the design precision. It provides some instructive research for the accurate calculation of the software simulation.

Key words: MAFIA software; helical slow wave circuit; numerical convergence; the impedance

1 引言

螺旋线慢波电路高频特性的研究方向已经由解析模型的理论计算发展到三维实体的计算机模拟计算. 实际工程应用中的螺旋线慢波加载结构千变万化, 光翼片的变化形式就有十几种, 仅靠解析理论求解无法得到满意的计算结果. 于是慢波高频特性的计算机模拟已成为学者们的研究热点^[1~4], 利用模拟软件可对螺旋慢波线的带宽、厚度、夹持杆和翼片的形状等进行精确的建模, 避免了解析模型中的假设条件, 大大提高了求解精度, 为大信号理论的模拟计算提供精确的数值依据.

然而在早期运用模拟软件对高频特性进行研究的过程中, 大都回避了对模拟计算收敛性问题的验证, 只有少数的文献^[5]曾提到模拟计算随网格划分的增加而使结果达到收敛的研究结论, 然而并未对其进行详细的比较和说明.

本文运用大型电磁仿真软件 MAFIA^[6]对模拟计算的收敛性进行了验证, 使得模拟数据具有一定的可靠性; 将模拟数据与实验测试值进行比较, 得到了基本一致的结果, 为精确的计

算机模拟方法做出了一定的基础研究.

2 计算收敛性

运用计算机进行模拟计算时大多先网格离散再在网格单元中运用不同的计算公式加上合适的边界条件进行数值求解所需的数据, 因此网格划分的多少和边界条件拟合的好坏与模拟计算所得到的结果具有很大的关系^[7]. 按照数值计算的规律, 网格划分的越细, 边界条件拟合的越好, 模拟计算的结果将会越准确. 当网格划分数量取某个范围时, 模拟计算的数据不再随网格数的变化而变化, 或只在很小的范围内波动, 此时说明模拟计算已达到一个收敛的结果, 这时模拟计算得到的结果才是准确的.

模拟的螺旋慢波结构为螺旋带、圆形夹持杆和管壳的组合, 螺旋带平均半径 0.7mm, 螺距 0.6mm, 管壳内半径 11.76mm, 夹持杆介电常数 6.5, 其 MAFIA 的建模结构见图 1.

验证计算收敛性问题时使用文献[8]中论述的方法, 即利用 MAFIA 软件提供的准周期边界条件比较在相同相位下不同网格数所计算得到的谐振频率的变化情况, 以此来检测网

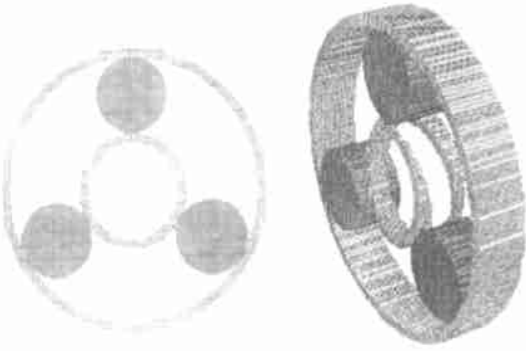


图1 螺旋慢波结构 MAFIA 建模

格数量与谐振频率变化之间的关系. 本文分别对两种相位角度 100° 和 80° 进行模拟计算, 得到谐振频率与网格数量之间的变化曲线见图 2, 直观地看出计算的收敛情况, 两种相位下模拟的谐振频率曲线其趋势基本一致.

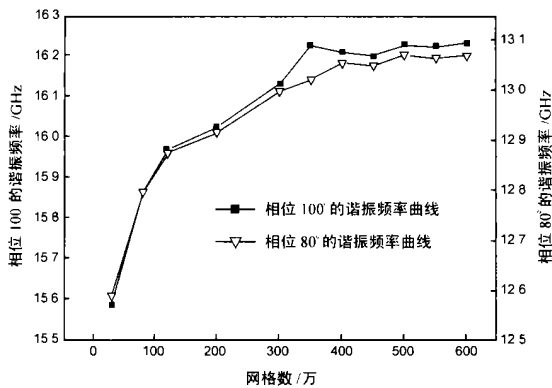


图2 不同相位下谐振频率与网格数量之间的变化曲线

由图 2 可知, 在 400 万网格数以下, 相邻间隔之间的谐振频率变化范围都比较大, 而在 400 万网格数以上时, 相邻间隔之间的谐振频率变化只在一个很小的范围内波动; 当划分的网格数在 400 万到 600 万之间取值时, 其相邻间隔的频率波动幅度只在 0.003 到 0.02 之间变化, 由此判断此时所取的网格数量可使数值计算得到的模拟结果基本达到收敛, 验证了 MAFIA 软件在数值模拟计算上的收敛性和准确性.

由收敛性验证的结论可得到一个大致网格数量取值范围, 根据该数量计算得到的结果具有收敛的特性, 利用这一结果可对螺旋慢波高频特性进行精确的模拟计算.

3 模拟方法

利用 MAFIA 软件提供的准周期边界条件只需模拟一个周期的螺旋慢波线, 并任意指定一个相移角度以计算与此相对应的频点, 由模拟计算得到的谐振频率与对应相位之间的关系计算得到慢波相速, 其公式为:

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

式中 f 为模拟计算得到的谐振频率, L 为螺旋慢波线的螺距, U 为 f 对应的相移, 是准周期边界条件下的指定相移. 根据这种方法计算得到的色散曲线比较规则, 可得到准确的

群速度, 为后面计算耦合阻抗打下了基础.

耦合阻抗的模拟方法大多利用微扰理论根据其基本计算公式推导计算求解的, 尽管也取得了与实验值相符的计算数据, 然而计算结果与所选取的微扰介质棒的直径大小有关, 人为因素仍然很大, 而且需要计算微扰前后的频率偏移, 计算效率不高. 现在根据耦合阻抗的基本计算公式直接计算, 其中的各个参数利用 MAFIA 的后处理模块求解得到, 尽量减少人为因素的影响.

耦合阻抗的计算公式:

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

其中 $E_{z,n}$ 为 n 次空间谐波的纵向电场幅值, P_{RF} 为时间平均 RF 功率流, B_n 为 n 次空间谐波的传播常数, 可表示为: $B_n = B_0 + 2\pi n/L$, 其中 B_0 为基波的传播常数.

MAFIA 后处理模块可直接得到的只是轴线上的纵向总电场幅值 $E_{z, total}$, 为了得到纵向电场的空间谐波幅值, 就要对 $E_{z, total}$ 进行傅立叶分析. 采用 MAFIA 的准周期边界条件进行本征模块的求解后, 分别得到的是纵向总电场实部幅值和虚部幅值, 这需要分别对它们进行傅立叶变换, 其计算公式为^[9]:

$$E_{z,n} = \frac{1}{L} \left| \int_0^L E_{z, total}(0) e^{jB_n z} dz + \int_0^L E_{z, total}(0) e^{jB_n^* z} dz \right| \quad (3)$$

其中 $E_{z, total}(0)$ 为轴线上的纵向总电场实部幅值, $E_{z, total}(0)$ 为轴线上的纵向总电场虚部幅值. 无论是通过数值计算方法或者是已有的数值计算软件对式(3)进行求解, 总存在很大的误差. 现在利用 MAFIA 后处理模块提供的 # 1dintegral 函数就可直接计算得到.

MAFIA 的后处理模块无法直接求解得到时间平均 RF 功率流 P_{RF} , 通过公式:

$$P_{RF} = w v_g \quad (4)$$

其中 v_g 为群速, 可通过求解色散特性曲线的斜率计算得到. w 为单位长度的时间平均电磁储能, MAFIA 的后处理模块也无法直接求解, 通过公式:

$$w = W_T / NL \quad (5)$$

其中 W_T 为慢波电路总的电磁储能, 通过 MAFIA 提供的 # energy 函数直接计算得到. N 为慢波电路的周期数, 采用 MAFIA 的准周期边界条件进行计算时, N 通常取 1.

最后式(2)变换为式(6):

$$K_n = E_{z,n}^2 / 2B_n^2 W_T v_g \quad (6)$$

利用 MAFIA 的后处理模块直接求解耦合阻抗计算公式中的各个参数, 不但提高了耦合阻抗的计算精度, 减少了人为因素对计算结果的影响, 并且提高了计算效率.

4 计算结果

根据计算收敛性的结论, 对螺旋慢波系统进行模拟时直接取 500 万个网格点计算得到的数据, 其中在 x, y, z 三个坐标方向上的网格数分别为 312, 312, 51. 使用 HP 工作站 x2100 电脑计算一个频率点用时 3 小时 11 分 43 秒.

根据相位与模拟得到的频点之间的关系代入公式(1)可计算得到色散特性. 将模拟计算得到的色散特性与实验结果进行对比见图 3, 发现模拟结果与实验结果其平均误差在 2%

以内,其误差基本满足设计要求。

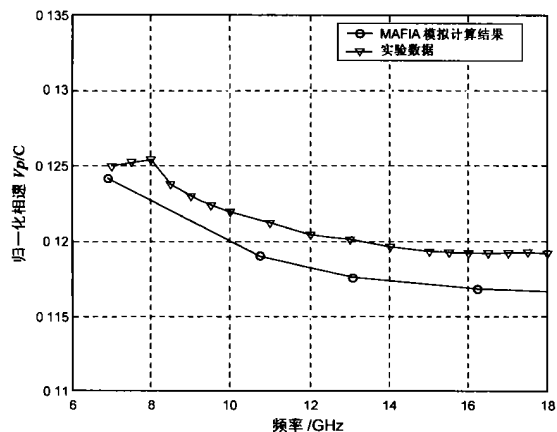


图3 色散特性曲线模拟结果与实验值比较

在色散特性曲线模拟结果的基础上,根据式(3)和(5)分别得到指定相位下的 n 次谐波纵向电场幅值 E_{zn} 和总电磁储能 W_t ,然后代入式(6)就可计算得到螺旋慢波系统的耦合阻抗。将模拟计算得到的耦合阻抗数据与实验数据进行对比见图4,发现在6GHz到12GHz范围内,模拟结果与实验结果其平均误差在10%以内,而在12GHz到18GHz范围内,模拟结果与实验结果其平均误差在1%以内,其误差基本满足设计要求。这种方法与微扰法相比,避免了人为因素的影响,提高了模拟计算的精度。然而在低频端的误差仍然比较大,这需要进行大量的模拟数据与实验数据的对比,最后再对模拟数据进行一定范围的修正,使其达到设计精度的要求。

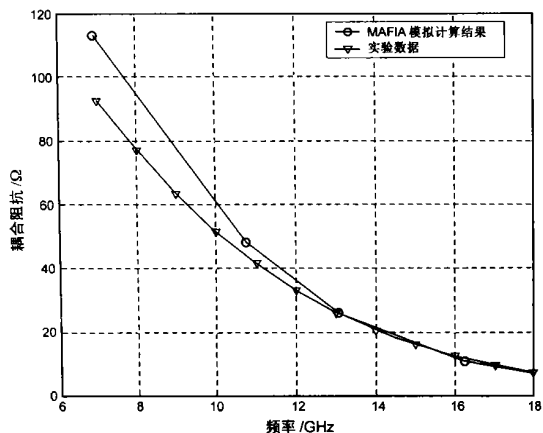


图4 耦合阻抗曲线模拟结果与实验值比较

5 结论

使用大型电磁仿真软件MAFIA对螺旋慢波加载结构的高频特性进行模拟计算,当网格数取在400万到600万之间时,其模拟计算得到的数据开始在某个小范围内上下波动,验证了数值计算的收敛性问题,使得模拟结果具有一定的可靠性。

使用MAFIA的准周期边界条件对螺旋慢波结构的色散特性进行模拟计算,与实验测试值进行比较其平均误差在

2%以内;利用MAFIA后处理模块自带的一些求解函数可以直接获得耦合阻抗计算公式中的各个参数,计算耦合阻抗的结果与实验测试值进行比较其平均误差在5%以内。由此证明,考虑了数值计算的收敛性问题可以提高数值模拟的计算精度,减少了人为因素对计算结果的影响,提高了计算效率。

致谢 在本文的研究工作中,对国营776厂高工赵柏甲提供的实验数据表示感谢!

参考文献:

- [1] Kory C L. Three dimensional simulation of helix traveling wave tube cold test characteristics using MAFIA [J]. IEEE Trans, 1996, E1243 (8): 1317- 1319.
- [2] Kory C L, Dayton J A. Accurate cold test model of helical TWT slow wave circuits [J]. IEEE Trans, 1998, E1245 (4): 966- 971.
- [3] Kory C L. Validation of an Accurate Three Dimensional Helical Slow Wave Circuit Model [R]. USA: NASA Technical Paper 4766, 1997.
- [4] Kory C L. Computational Investigation of Experimental Interaction Impedance Obtained by Perturbation for Helical Traveling Wave Tube Structures [R]. USA: NASA Technical Paper 4615, 1999.
- [5] Cooke S J, Mondelli A A, Levush B, et al. CTLSS: An advanced electromagnetic simulation tool for designing high power microwave sources [J]. IEEE Trans, 2000, PS28 (3): 841- 866.
- [6] The Mafia Collaboration. Mafia User Manual (Version 4. 0. 25) [M]. Germany: CST Inc. 2000.
- [7] 盛剑霓,等. 电磁场数值分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [8] 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.
- [9] Wang Jingsong, Dai Lufu, Yan Tie Chang, et al. Simulation of traveling wave tube cold test characteristics using MAFIA [A]. Infrared and Millimeter Waves 2000 Conference Digest [C]. Beijing: CIE, 2000. 285 - 286.

作者简介:



雷文强 男, 1972 年 3 月出生于四川绵阳, 1999 年于四川大学获得硕士学位, 2000 年在电子科技大学攻读物理电子学博士学位, 研究兴趣为微波电子学与微波管 CAD 技术等。

杨中海 男, 1942 年 3 月出生于四川成都, 1966 年毕业于在成都电讯工程学院, 1981、1984 年在该校获得硕士、博士学位, 1986- 1989 年在美国加州大学洛杉矶分校作博士后研究, 现为电子科技大学教授, 博士生导师, 物理电子学院院长, 主要研究领域为相对论电子学、微波电子学、等离子体电子学、真空微电子与微波管 CAD 技术等。