

文章编号: 1001-4322(2003)04-0367-06

幅相一致行波管非线性理论与计算机模拟^{*}

李 斌, 杨中海, 莫元龙

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 采用谐波互作用的行波管二维大信号非线性理论, 建立了高频电路结构和外部工作条件零散模型, 对影响增益、相位频率特性的主要因素进行了理论分析和数值计算, 开发了可动态实时显示行波管工作状态的可视化科学计算软件, 并利用该软件全面地分析了某管型的幅相一致特性, 为新近研制的幅相一致行波管提供了很有价值的计算结果。

关键词: 行波管; 幅相一致性; CAD; 零散

中图分类号: TN124.2 **文献标识码:** A

现在电子战、超宽频带高功率相控阵雷达、强力干扰机、微波能武器等的快速发展对高功率微波源提出了更高的要求, 宽频带高功率器件成为主要研究对象。由于宽频带和高功率不可克服的矛盾, 采用大功率连续波宽带行波管作为阵列单元末级放大器, 通过功率合成技术成为获得宽频带高功率微波源的主要手段。功率合成技术对阵列单元末级放大器的幅相一致特性有很高的要求, 末级放大器的幅相一致性成为功率合成中最关键的技术问题。如果阵列天线的各发射单元输出相位和增益不一致、匹配, 将导致合成波束指向混乱、合成效率下降。为了获得较高的功率合成效率, 一般要求功率行波管的相位不一致性优于 $\pm 200^\circ$, 增益不一致性优于 $\pm 1.5\text{dB}$ 。

国内外一些作者采用解析理论^[1]、实验^[2]、数值计算^[3~5]等方法, 初步研究了高频电路结构参数零散对行波管色散特性和轴向互作用耦合阻抗的影响。本文进一步采用了谐波互作用的行波管二维大信号非线性理论, 研究了导致行波管输出信号幅度相位不一致的各种因素; 开发了可动态实时显示行波管工作状态的可视化科学计算软件, 并利用该软件分析了各种影响因素的大小, 为新近研制的幅相一致行波管提供了很有价值的计算结果。

1 谐波互作用的行波管二维大信号非线性理论

在进行一维螺旋线行波管的大信号计算时, 注波相互作用一般采用等效线路模型, 计算空间电荷力时则采用圆盘模型或谐波分析法。由于空间电荷力与电子注本身的运动状态密切相关, 电子注的运动又与线路场密切相关, 因而空间电荷力的计算尤其困难。

在计算空间电荷力时, 田炳耕等人提出的圆盘模型本质上是一维宏粒子概念。它把注波长内的电子注分成 M 个电子层, 假定每个电子层是一个圆盘, 其中电子没有横向运动, 每个电子的行为都是一致的, 犹如圆盘是个刚体。“电子圆盘”直径有限, 电场当然是不均匀的, 因此圆盘之间的作用力与距离有关。当两个圆盘无限接近时, 电场近于均匀场, 作用力保持常数而与距离无关, 所以超越是可能的。超越时圆盘又可以视为一个透明的栅网, 不妨碍其他“电子圆盘”从其内部通过。二维情况下, 则既把注波长内的电子注分成 M 个圆盘, 又把每个圆盘分成 N 个等电荷的圆环。运动过程中圆环的轴向厚度不变, 而在径向可以膨胀和压缩, 圆环在径向和轴向均可相互穿透。在计算各种作用力时, 只有计算空间电荷力才考虑圆环的轴向和径向厚度, 对于其他情况, 假定圆环的电荷和质量集中在圆环的中心处。

在宽带大功率行波管中, 注波非线性相互作用将导致谐波的产生以及基波与谐波互作用现象的出现。谐波对于大信号相互作用计算结果有较大的影响, 尤其在低频端影响最大。因此在下面建立方程时以相位 $\phi = \omega t + kz$ 展开高频电压和电流, 同时考虑了周期有限聚焦磁场。在进行行波管大信号理论分析时, 首先从电荷守恒方程出发建立起由电子激励起来的传输线电路方程, 再从洛伦兹力方程出发, 建立起电子运动方程组, 这样

* 收稿日期: 2002-06-24; 修订日期: 2002-11-11

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 李 斌 (1974-), 男, 博士生, 主要从事宽带大功率行波管理论和 CAD 研究; E-mail: libin@uestc.edu.cn。

行波管大信号工作方程组就确定了。通过方程的联立自治求解及空间电荷场的计算可以解出方程。这里略去繁琐的数学推导^[6~13]。电路方程

$$\frac{d^2 A_{1k}}{dy^2} - k^2 A_{1k} \left[\frac{1}{C_1^2} - \left(\frac{1 + C_1 b_k}{C_1} \right)^2 \right] + \frac{2k}{C_1} \frac{dA_{2k}}{dy} + 2kd_k A_{2k} \frac{(1 + C_1 b_k)^2}{C_1} = - \frac{Z_{0k}}{Z_{01}} \frac{2(1 + C_1 b_k)}{C_1 x_b^2} k^2 \left[\int_0^{x_b} \int_0^{x_0} \frac{k \cos(k e_0) x_0}{1 + 2C_1 u_y} dx_0 d e_0 + 2 \frac{C_1}{k} \int_0^{x_b} \int_0^{x_0} \frac{k \sin(k e_0) x_0}{1 + 2C_1 u_y} dx_0 d e_0 \right] \quad (1)$$

$$\frac{d^2 A_{2k}}{dy^2} - \frac{2k}{C_1} \frac{dA_{1k}}{dy} - k^2 A_{2k} \left[\frac{1}{C_1^2} - \left(\frac{1 + C_1 b_k}{C_1} \right)^2 \right] - 2kd_k A_{1k} \frac{(1 + C_1 b_k)^2}{C_1} = - \frac{Z_{0k}}{Z_{01}} \frac{2(1 + C_1 b_k)}{C_1 x_b^2} k^2 \left[\int_0^{x_b} \int_0^{x_0} \frac{k \sin(k e_0) x_0}{1 + 2C_1 u_y} dx_0 d e_0 - 2 \frac{C_1}{k} \int_0^{x_b} \int_0^{x_0} \frac{k \cos(k e_0) x_0}{1 + 2C_1 u_y} dx_0 d e_0 \right] \quad (2)$$

轴向运动方程为

$$(1 + 2C_1 u_y) \frac{\partial u_y}{\partial y} = C_1 \left[\left(\frac{dA_{1k}}{dy} + \frac{k}{C_1} A_{2k} \right) \cos(k e - kx) + \left(\frac{dA_{2k}}{dy} - \frac{k}{C_1} A_{1k} \right) \sin(k e - kx) \right] - \frac{x^2}{8C_1^3} \left(\frac{-cl}{y_L} \right)^2 \frac{2}{y_L} \sin\left(\frac{2}{y_L} y + \phi_m\right) \left[\cos\left(\frac{2}{y_L} y + \phi_m\right) - \left(\frac{x_0}{x}\right)^2 K_{01}^{1/2} \right] - \frac{1}{2C_1} \frac{1}{u_0} E_{scz} \quad (3)$$

径向运动方程为

$$(1 + 2C_1 u_y) \frac{\partial u_x}{\partial y} = C_1 \left[\left(A_{1k} \frac{d}{dx} - A_{2k} \frac{d}{dx} \right) \cos(k e - kx) + \left(A_{2k} \frac{d}{dx} + A_{1k} \frac{d}{dx} \right) \sin(k e - kx) \right] - \frac{x^2}{8C_1^3} \left(\frac{-cl}{y_L} \right)^2 \left[\cos^2\left(\frac{2}{y_L} y + \phi_m\right) - \left(\frac{x_0}{x}\right)^4 K_{01} \right] + \frac{1}{4C_1^3} \left(\frac{-p}{x} \right)^2 \frac{x_0^2}{x} - \frac{1}{2C_1} \frac{1}{u_0} E_{scr} \quad (4)$$

速度相位方程为

$$\frac{\partial e}{\partial y} = \frac{2u_y}{1 + 2C_1 u_y} \quad (5)$$

径向坐标方程为

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{2C_1 u_x}{1 + 2C_1 u_y} \quad (6)$$

式(3),(4)中空间电荷场表达式为

$$- \frac{1}{2C_1} \frac{1}{u_0} E_{scz} = \frac{1}{2x_a^2} \left(\frac{-p}{C_1} \right)^2 \int_0^{x_b} \int_0^{x_0} \frac{x_0 d x_0}{d e_0} F_{2-z}(x, x, e_0, e_0) \operatorname{sgn}(y - y) \quad (7)$$

$$- \frac{1}{2C_1} \frac{1}{u_0} E_{scr} = \frac{1}{2x_a^2} \left(\frac{-p}{C_1} \right)^2 \int_0^{x_b} \int_0^{x_0} \frac{x_0 d x_0}{d e_0} F_{2-r}(x, x, e_0, e_0) \quad (8)$$

$$F_{2-z} = \frac{J_0(\mu_l x) J_0(\mu_l x)}{J_1^2(\mu_l x_a)} e^{-\mu_l |y - y|} \quad (9)$$

$$F_{2-r} = \frac{J_1(\mu_l x) J_0(\mu_l x)}{J_1^2(\mu_l x_a)} e^{-\mu_l |y - y|} \quad (10)$$

其中 $\mu_l = \frac{u_0}{C_1} \mu_l$, μ_l 由第一类贝塞尔函数 $J_0(\mu_l a)$ 的 l 阶零点根确定。

以上方程中的 $k=1$ 表示基波, $k=2, 3, \dots$ 表示谐波。以上方程针对周期聚焦磁场, 参量归一化约定同于文献[10]。

2 数值计算与结果讨论

数值计算中相互作用计算部分采用空间步长积分方法, 从相互作用输入端开始, 逐步求解大信号工作方程组, 一直算到输出端, 迭代采用四阶龙格-库塔法, 可以满足精度要求。对于空间电荷场的计算, 通过建立空间电荷场权函数表格, 采用四次线性插值法, 计算出每个电子所受到的合空间电荷力。通过判断每步的能量是否守

恒,计算精度可以得到有效的控制。

行波管幅相一致特性分析软件采用 Microsoft 公司 Visual C++ 6.0 开发环境,开发了可实时动态显示行波管工作状态的可视化科学计算软件。全面计算了行波管的输入功率、工作电压、工作电流,以及各高频电路结构的变化对行波管相位、频率特性曲线和增益-频率特性曲线的影响。

软件的核心计算部分为谐波互作用的行波管二维非线性大信号计算模块及高频电路计算模块,该程序能较准确地实时动态反映行波管的工作状况。输入合理的高频电路结构参数及输入功率、工作电压、工作电流等,能获得和实测数据非常吻合的计算结果。通过选择高频电路结构或输入功率、工作电压、工作电流等任一参数作为变化参量,软件可以准确计算出使行波管满足幅相一致技术指标要求的该参数零散可容忍范围。图 1 中 R_a 为螺旋线平均半径, h 为金属翼片高度, R 为管壳半径, ψ 为螺距角。

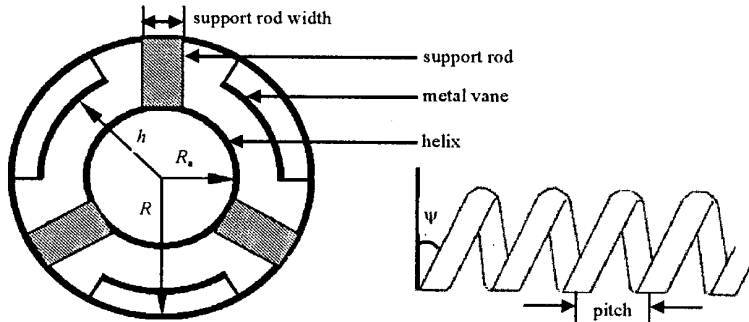


Fig. 1 TWT helical slow wave circuit

图 1 螺旋线高频电路结构

下面分别讨论高频电路中夹持杆宽度、螺距、翼片高度、螺旋线平均半径、夹持杆介电常数等出现零散时增益、相位-频率特性曲线的变化。各图中 Δ 为相应参数变化的步长。输入功率、工作电压、工作电流等外部工作条件对相位频率的影响参见文献[6]。

2.1 夹持杆宽度变化的影响

图 2 中 $\Delta = 0.005\text{mm}$ 。当夹持杆宽度在加工公差 $\pm 0.02\text{mm}$ 范围内变化时,不会影响工作带宽,但在整个频带内相速度会随支持杆宽度的增减而相应减小或增加;同时对轴向相互作用耦合阻抗影响较小,当夹持杆宽度减小时,耦合阻抗有少许增加^[1,3]。反映在注波相互作用效果上,则是增益波动较小,但是对输出相位有显著的影响。要满足幅相一致性要求,必须将夹持杆宽度的加工公差控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内。

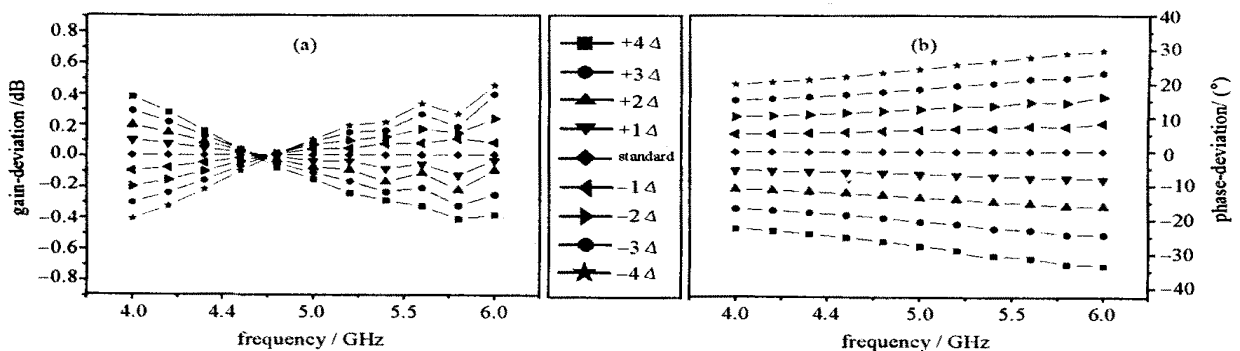


Fig. 2 Gain (a) and phase (b) deviation for variations on support rod width

图 2 夹持杆宽度变化时增益(a)、相位(b)零散曲线

2.2 螺距变化的影响

图 3 中 $\Delta = 0.002\text{mm}$ 。当螺距在制造公差 $\pm 0.02\text{mm}$ 范围内变化时,工作带宽没有变化,但在整个频带内相速度会随螺距的增减而增减。当螺距减小时,耦合阻抗在频率低端有少许增加,在频率高端有少许减小;而螺距增加时,耦合阻抗在频率高端有少许增加,在频率低端有少许减小^[1,2]。图 3(a) 显示螺距较小时在频率低端具有相对高的增益,在频率高端具有相对低的增益,而螺距较大时则相反。图 3 表明螺距变化对于增益影响较小,但是对相位有显著的影响。螺距零散的公差应控制在 $\pm 0.004\text{mm}$ 以内。

2.3 翼片高度变化的影响

图4中 $\Delta = 0.0025\text{mm}$ 。在加工公差 $\pm 0.02\text{mm}$ 范围内改变金属翼片的高度,将对色散特性和轴向相互作用耦合阻抗有较大影响。当翼片高度变小时(翼片更加靠近螺旋线),色散曲线更为平缓,具有展宽频带的作用,但付出的代价是轴向相互作用耦合阻抗略微有所下降^[1,3]。幅相一致行波管对翼片高度有更严格的要求,翼片高度零散的公差必须控制在 $\pm 0.0025\text{mm}$ 以内。

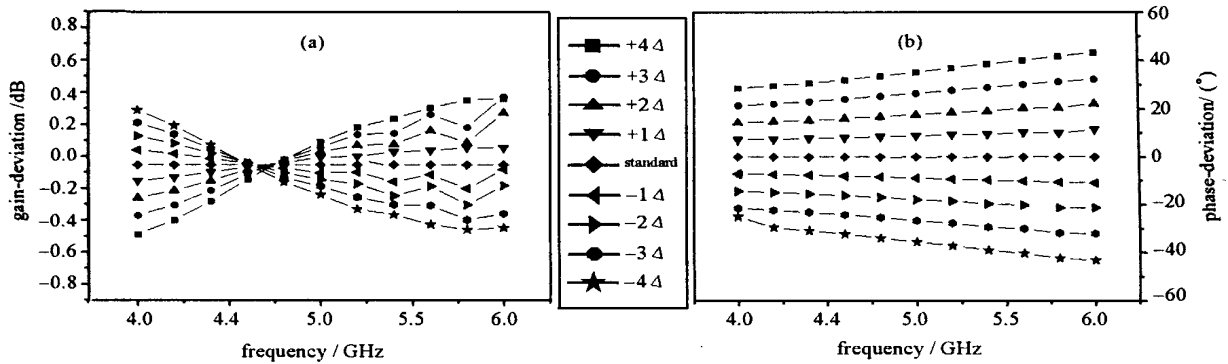


Fig. 3 Gain (a) and phase (b) deviation for variations of pitch

图3 螺距变化时增益(a)、相位(b)零散曲线

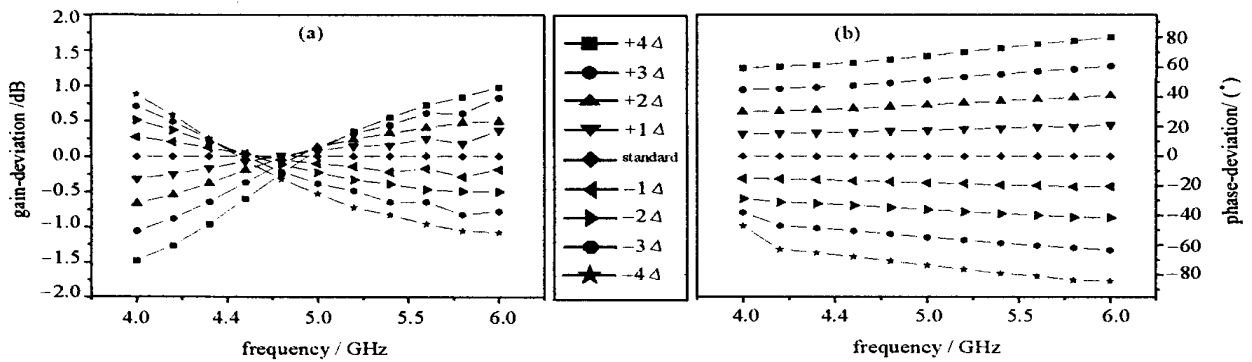


Fig. 4 Gain (a) and phase (b) deviation for variations on vane height

图4 翼片高度变化时增益(a)、相位(b)零散曲线

2.4 螺旋线平均半径变化的影响

图5中 $\Delta = 0.00125\text{mm}$ 。对于螺旋线平均半径的变化,色散特性和轴向相互作用耦合阻抗的反应最明显。当增加螺旋线平均半径时,相对翼片高度减小,翼片更加靠近螺旋线,螺旋线内区域体积相对增加,从而使色散曲线趋于平缓,但由于螺旋线平均半径与电子注半径之比增大,即电子注远离螺旋线,从而导致轴向耦合阻抗呈下降的趋势^[1]。螺旋线平均半径零散的公差必须控制在 $\pm 0.00125\text{mm}$ 以内。

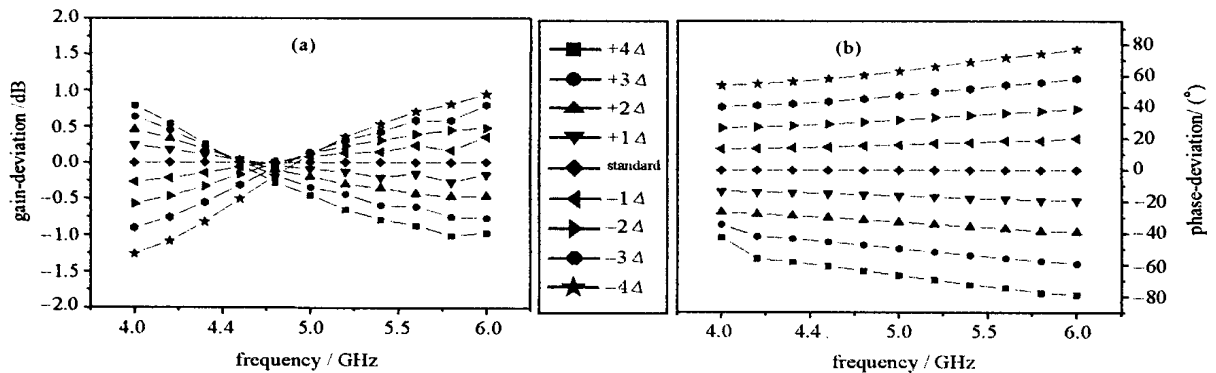


Fig. 5 Gain (a) and phase (b) deviation for variations on helix mean radius

图5 螺旋线平均半径变化时增益(a)、相位(b)零散曲线

2.5 夹持杆介电常数变化的影响

最后我们研究了夹持杆介电常数变化的影响。对于制造夹持杆的常用材料 BeO,即使同一批次的夹持杆其介电常数也可能在 6 到 7.5 之间变化,故软件模拟了这种变化的影响,发现夹持杆介电常数对色散特性及轴向相互作用耦合阻抗有明显的影响。在整个频带范围内,相速度随着介电常数的增减一致性地减增,同时耦合阻抗随介电常数的增减而反向增减^[1,3]。

本文计算的夹持杆介电常数为 6.5。介电常数从 6.25 到 6.75 之间变化,零散步长 $\Delta\epsilon = 0.0625$ 的模拟结果如图 6。该参数的轻微零散将导致输出相位显著的变化。介电常数零散只有控制在 ± 0.0625 之间才能满足相位一致要求。以往在分析螺旋线行波管的高频结构时,对于材料特性关注较少,这或许是造成同一批次行波管的幅相一致性不理想的一个主要原因。通过模拟,我们发现夹持杆的材料特性是引起行波管幅相不一致的一个重要因素。

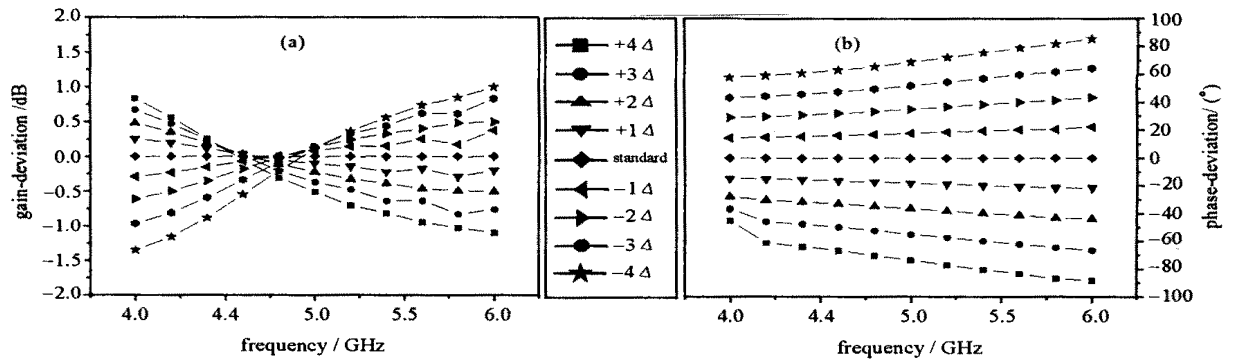


Fig. 6 Gain (a) and phase (b) deviation for variations on support rod effective dielectric constant

图6 夹持杆介电常数变化时增益(a)、相位(b)零散曲线

3 结论

本文采用谐波互作用的行波管大信号非线性理论,模拟了外部工作条件和高频电路结构参数变化对行波管增益、相位的影响。发现了当行波管工作于过饱和区时,相位灵敏度下降的现象。这为合理地选择行波管工作点提供了理论依据,并得到了实验验证。螺旋线高频电路结构参数零散中,翼片高度的变化将会影响工作带宽,对输出相位有明显的影响。而螺旋线平均半径对生产工艺有更苛刻的要求。另外我们发现夹持杆的介电常数是导致行波管幅相不一致的重要因素,在行波管的设计和生产中对行波管的材料特性应引起足够的重视。致谢 在本文的研究工作中,与电子科技大学李建清博士、张勇博士进行了有益的讨论,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 李斌,杨中海. 幅相一致行波管高频电路 CAD 研究[J]. 强激光与粒子束,2002,14(6):882—886. (Li B, Yang Z H. Simulation of slow wave circuit in TWT for phase and gain matched operation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(6):882—886)
- [2] Handy R A, Puri M P. Control of phase and gain deviations in an octave bandwidth EHF TWT[J]. *IEDM IEEE*, 1986, 19(5):508—511.
- [3] Kory CL, Dayton J A Jr. Effect of helical slow-wave circuit variations on TWT cold-test characteristics[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1998, 45(4):972—976.
- [4] Kory CL, Dayton J A Jr. Accurate code-test model of helical TWT slow-wave circuits[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1998, 45(4):966—971.
- [5] Kory CL. Effect of geometric azimuthal asymmetries of PPM stack on electron beam characteristics[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 2001, 48(1):38—44.
- [6] 李斌,杨中海. 行波管相位一致性的理论与计算机模拟[J]. 强激光与粒子束,2001,13(4):479—484. (Li B, Yang Z H. Computational investigation of phase and gain matched operation for helix traveling-wave tube. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(4):479—484)
- [7] Rowe J E. Nonlinear electron-wave interaction phenomena[M]. New York: Academic Press, 1965.
- [8] Gilmour A S Jr. Principles of traveling wave tubes[M]. Boston, London: Artech House, 1994.
- [9] Detweiler H K, Rowe E. Electron dynamics and energy conversion in O-type linear-beam devices[M]. New York and London: Academic Press, 1971.
- [10] Xu L, Yang Z H, Mo YL. Improved three-dimensional model for the nonlinear analysis of helix travelling-wave tubes[J]. *International Journal of Electronics*, 2000, 87(3):377—384.

- [11] Xu L, Yang Z H, Mo Y L. Three-dimensional numerical analysis for millimeter wave TWTs[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, **20**(3):473—481.
- [12] 徐林, 杨中海, 莫元龙. 行波管三维非线性计算机模拟的改进[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(3):342—346. (Xu L, Yang Z H, Mo Y L. Improved three-dimensional nonlinear computer simulation for TWT's. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(3):342—346)

Nonlinear theory and simulation of traveling wave tube for phase and gain matched operation

LI Bin, YANG Zhong-hai, MO Yuan-long

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Designing an octave bandwidth helical traveling wave tube (TWT) for phase and gain matched operation in the EHF region presents many obstacles, for example the dimensional controls. Recent advance in computer modeling offer the possibility to evaluate the effect of slow-wave structure parameter and operating parameter variations, such as manufacturing tolerances, which will enable manufacturers to determine the cost effectiveness of controlling the dimensions of the component parts of the TWT. In this paper, computer code PGM TWT is programmed, which includes helical slow-wave circuit code and 2-Dimensional large-signal including harmonics interaction helical TWT interaction code. The effect on curve of gain and phase dispersion for frequency, when helical slow-wave circuit parameter and operating parameter variate, is analyzed. Using this code it is possible, for the first time, to design a complete TWT via computer simulation.

Key words: TWT; Gain and phase matched; CAD; Deviation