

· 物理电子学 ·

注-波相互作用中的功率流隐含信息分析

雷朝军^{1,2}, 喻 胜², 鄢 然², 刘迎辉², 黄 勇²

(1. 中国人民武装警察部队学院 河北 廊坊 065000; 2. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】该文从功率流观察指令入手,对粒子PIC模拟软件中表征输出功率的曲线图的物理问题进行了理论分析。推导了功率流密度——坡印亭矢量 S 的复数表达式,分析了PIC模拟软件中功率流密度与真实功率之间的关系,解释了在PIC模拟过程中,在不同抽向位置观察到的功率流曲线图不同的现象。并以8 mm二次谐波回旋速调管的非线性相互作用模拟为例,对其输出功率和模拟结果进行了深入分析,提出了PIC模拟中功率流曲线图的内涵及输出功率的正确读取方法。

关键词 模式; 输出功率; 功率流; 坡印亭矢量; 行波
中图分类号 TN129 文献标识码 A

An Analysis of Meaning of Field Power in PIC Simulation

LEI Chao-jun^{1,2}, YU Sheng², YAN Ran², LIU Ying-hui², HUANG Yong²

(1. Chinese People Armed Police Forces Academy Langfang Hebei 065000;

2. School of Physical Electronic, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract A theory analysis of real meaning of the output graph showed in particle simulation code (PIC) is presented in this paper, the field power viewer command is taken into account. The complex function of field power density is deduced, the relationship of field power density and real field power is analyzed, and the phenomena of different graph at different axis location shown in the PIC simulation is explained perfectly. The simulation result of output power on 8mm band second harmonic gyrokystron is analyzed deeply and the real meaning of the output graph and correct pick-up of output power are given out.

Key words mode; output-power; powerstream; Poynting-vector; traveling-wave

高功率微波器件在粒子加速、精确制导和目标探测等方面有着巨大的应用前景,我国在这方面的研究起步较晚,但在国内学者的不懈努力下,近十几年我国的高功率微波技术发展相当迅速,有些方面已处于世界先进水平^[1-3]。由于电真空器件制管工艺复杂、费用昂贵,精度要求高、而且描述注-波相互作用的大信号理论还不够完善或不能准确、迅速地求解。而随着计算技术的快速发展,惯用的研究手段是在大信号理论的基础上,采取相应算法将这些理论编译成计算机代码,利用计算机进行近似求解。国内外的学者都在花费大量的时间和精力来开发用于冷腔设计和热腔计算的优化模拟的程序。实践证明,采取先软件仿真,后按照相关参数制造真空微波管是最有效的科研途径^[4-5]。在仿真8 mm二次谐波回旋速调管注-波相互作用这一非线性过程中,在行波段的不同截面观察输出功率时却得到了不同的功率流输出曲线,针对这一事实,本文结合功率观察命

令得到的模拟数值对功率的提取方法做研究和探讨。

1 注-波相互作用理论

如果采用自治理论来描述高功率微波器件中电子-波相互作用的非线性过程,可分两个方面考虑,一是电子运动激发起高频场,用下面方程描述:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} + \nabla \left(\frac{\rho}{\epsilon_0} \right) \quad (1)$$

其二是电子在波的作用下动力学方程:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \frac{d(\gamma m_0 \mathbf{v})}{dt} = -|e|(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

式中 \mathbf{P} 为电子动量; m_0 为电子静止质量; e 为电子电量。

由于研究的高功率微波管,是由大量电子以一定初始分布函数 $f(p, r, t)$ 进入谐振腔的,真正反映微波管中注-波相互作用的方程组可由刘维尔定理和

收稿日期: 2005-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(DZ0203); 大功率毫米波重点实验室基金资助项目(DZ0203)

作者简介: 雷朝军(1975-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事高功率毫米波回旋类器件方面的研究。

动力学理论得到描述电子流运动相空间的相对论夫拉索夫方程：

$$\mathbf{v} \cdot \Delta f + e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \Delta_p f = 0 \quad (3)$$

结合麦克斯韦方程组和相关的微波管边界条件,可以构成能正确反映注-波互作用的方程组:式(1)~(3)联立成方程组,即伏拉索夫-麦克斯韦方程组^[6]。伏拉索夫方程组中既含有外加电磁场和电子流激发的电磁场,也包含了电子流表现出来的源的贡献,能正确反映微波管中注-波互作用。上述方程组无法得到精确的解析解,为了制管,在大信号理论的基础上,对伏拉索夫-麦克斯韦方程组做线性化处理,可近似求解注-波互作用近似信息。目前,多采用考虑足够量的电子进入高频场,用FDTD算法来仿真求解注-波互作用的这一非线性过程。实践证明,这种方法能够基本正确地反映这一非线性过程。

2 功率模拟结果及数值分析

如果用专业粒子模拟软件来仿真高频结构内的注-波互作用,一般用OBSERVE FIELD_POWER S.DA命令来观察输出横截面上的瞬时功率流来提取输出功率。本文以8 mm(35 GHz)二次谐波回旋速调管注-波互作用作为研究对象,在电子注电压70 kV、电子注电流15 A时进行数值实验的数据,从粒子仿真软件的输出观察命令着手,对其注-波互作用过程中的功率模拟信息展开讨论,来分析讨论模拟结果中隐含的功率信息。

在观察命令下,在同一次模拟中的输出行波段中,在不同横截面上可得到如图1和图2所示的结果。图中反映的模拟输出信息有很大差异,目前国内PIC模拟时一般采用两种方法来读取输出功率:(1)将其中任意一个最大值作为输出功率,则图1中输出功率约为540 kW;图2中输出功率约为488 kW。(2)将其中任意一个最大值的一半作为输出功率,则图1中输出功率约为270 kW;图2中输出功率约为244 kW。同一次模拟中出现不同的输出结果,表明这两种方法有不妥之处。

进一步考察图1,将黑色部分局部放大,就得到图3所示的行波功率流(看到的是输出观察面上的时域功率流在约3~4 ns间的高频分量,这一时间段中高频分量还不稳定,处于上爬阶段);再考察这一行波的功率流频谱,从图3看出,在3.95~4 ns之间,该高频分量有3.5个周期,则它的频率为:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.05/3.5} = 70 \text{ GHz}$$

说明图1中功率流是时域为输入调制信号频率二倍的正弦波。

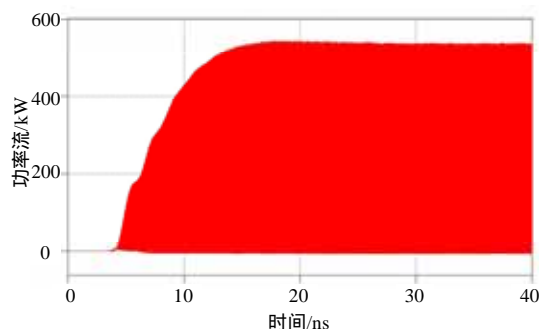


图1 时域输出功率流在距输出口5 mm处的分布

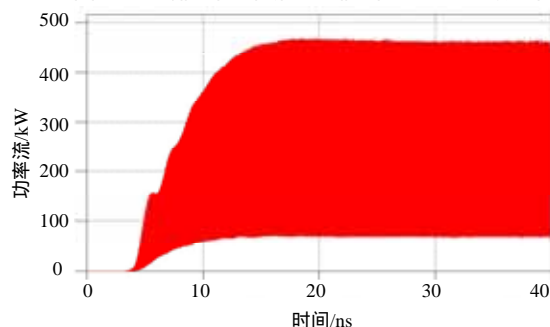


图2 时域输出功率流在距输出口17 mm处的分布

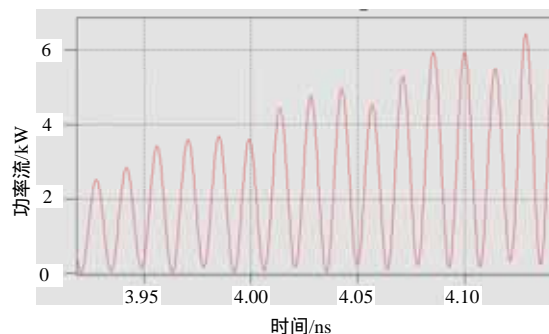


图3 时域输出功率流分布图局部放大图

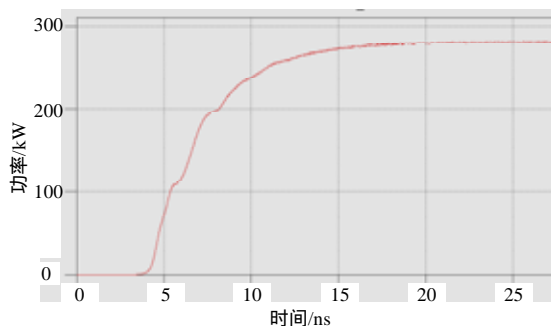


图4 加filter参数后得到的平均功率

从图1、图2中可看出在计算时间约30 ns,输出段的高频场已经稳定,那么,为什么在距输出口不同位置的观察面上的坡印亭矢量面积分反映的功率流幅值会各不相同呢?要得出正确结论,进一步

考查该软件在微波功率观察中的命令的涵义: 该命令是观察瞬时通过某截面的坡印亭矢量的面积分。

根据坡印亭矢量与功率流的复矢量关系, 有:

$$\begin{aligned}
 S(z, t) &= \mathbf{E} \times \mathbf{H} = \\
 & \operatorname{Re}[\mathbf{E}e^{j\omega t - j\beta z}] \times \operatorname{Re}[\mathbf{H}e^{j\omega t - j\beta z}] = \\
 & \frac{1}{2}[\mathbf{E}e^{j\omega t - j\beta z} + (\mathbf{E}e^{j\omega t - j\beta z})^*] \times \\
 & \frac{1}{2}[\mathbf{H}e^{j\omega t - j\beta z} + (\mathbf{H}e^{j\omega t - j\beta z})^*] = \\
 & \frac{1}{4}(\mathbf{E} \times \mathbf{H})e^{2j\omega t - 2j\beta z} + \frac{1}{4}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) + \\
 & \frac{1}{4}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}) + \frac{1}{4}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}^*)e^{2j\omega t - 2j\beta z} = \\
 & \frac{1}{4}\{(\mathbf{E} \times \mathbf{H})e^{2j\omega t - 2j\beta z} + [(\mathbf{E} \times \mathbf{H})e^{2j\omega t - 2j\beta z}]^*\} + \\
 & \frac{1}{4}\{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^* + [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*]^*\} = \\
 & \frac{1}{2}\operatorname{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H})e^{2j\omega t - 2j\beta z} + \frac{1}{2}\operatorname{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)
 \end{aligned} \quad (4)$$

既然OBSERVE FIELD_POWER S.DA命令观察到的是 $\int_s S(s, t) ds$, 那么, 就应该有两部分: 时变成份 $\int_s \frac{1}{2}\operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]e^{2j\omega t - 2j\beta z} ds$ 和时不变部分 $\int_s \frac{1}{2}\operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] ds$ 。显然, 观察区的黑色部分为 $\int_s \frac{1}{2}\operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]e^{2j\omega t - 2j\beta z} ds$, 这部分没有明确的物理含义, 因为在复能流定理中所有功率表示都是指平均功率^[7]; 由于时域采样很密集(模拟中的时间步长到ps级), 所以呈图1、图2所示的外部表现形式。而直流分量就是输出功率 $\int_s \frac{1}{2}\operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] ds$ 。

所以, 出现图1、图2的观察结果, 原因是 $\int_s S(s, t) ds$ 积分中隐含着传播方向的微波场的传播因子 $e^{-j2\beta z}$, 对不同的 z 在截面积分, 功率流的幅值必然有空间上的波动, 这是行波空间传播的能流表现形式; 图3是 $e^{2j\omega t}$ 在时间上的表现形式。去掉高频部分 $\int_s \frac{1}{2}\operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]e^{2j\omega t - 2j\beta z} ds$, 可以得到我们想得到的平均功率。

但在粒子模拟中如果读取幅值后经简单的数值处理得到输出功率, 会引入较大误差; 而这样的专业仿真软件中提供滤波命令filter, 它相当于低通滤波器, 可以滤掉 $\int_s S(s, t) ds$ 中的时、空变化部分 $\int_s \frac{1}{2}\operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]e^{2j\omega t - 2j\beta z} ds$, 得到的输出功率如图4,

降低了因读取而引入的人为误差。

为验证式(4), 在行波段距输出口56 mm距离内间隔1 mm建立56个观察面, 考察同一次数值计算过程中输出行波段中的瞬时功率流, 均得到图4所示的输出功率在时域的变化曲线。

经过上面的理论和模拟结果分析, 得到三个结论: (1) 粒子模拟软件的功率流信息中隐含了平均功率, 不能直接通过简单的幅值读取来获取功率; (2) 在同一模拟过程中, 沿轴向的不同截面观察的功率流 $\int_s S(s, t) ds$, 以 $\int_s \frac{1}{2}\operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]e^{2j\omega t - 2j\beta z} ds$ 幅值的时、空变化表现出来, 可以间接反映行波在空间上能量传播的形式, 为提取功率和对工作模式频谱分析提供了方便; (3) 可以在OBSERVE FIELD_POWER S.DA命令中加上滤波参量filter来完成功率的提取。

4 结束语

通过功率流信息分析, 解读了粒子模拟软件模拟表现出来的隐含信息, 较客观地从功率观察命令中提取了平均功率。通过OBSERVE FIELD_POWER S.DA指令模拟的时域、频域及传播区间上的数值相互验证, 证明了本文对模拟得到的功率流隐含信息的分析是客观可信的。本文实验虽然以输出功率流提取为例, 但同样适应于其他粒子模拟软件(采用FDTD算法求解自恰的含源麦克斯韦方程组的软件)对输入信号功率的提取。在该方法下, 有关8 mm二次谐波注-波相互作用模拟结果与俄罗斯的相关报道基本一致, 也证明了粒子模拟软件能客观反映回旋速调管的注-波相互作用全过程。为以后的回旋速调管研制指出了一条既方便、经济, 又切实可信的途径和手段。

本文的研究工作得到宫玉彬教授的指导, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 喻 胜, 李宏福, 谢仲怜, 等. 渐变复合腔回旋管高次谐波注-波相互作用非线性模拟[J]. 物理学报, 2000, 49(12): 2455-2458.
- [2] 黄 勇, 李宏福, 杜品忠. 三次谐波复合腔回旋管自恰非线性模拟[J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(增刊1): 63-66.
- [3] 杨仕文, 李宏福, 周晓岚, 等. 渐变结构复合腔研究[J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(增刊1): 58-62.
- [4] 梁显锋, 刘濮鲲. Ka波段二次谐波回旋速调管放大器的输出特性[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 113-116.
- [5] 殷 勇, 祝大军, 刘盛纲, 等. 35 GHz, TE021回旋速调管的电磁模拟[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1024-1027.
- [6] 刘盛纲. 相对论电子学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [7] 黄宏嘉. 微波原理[M]. 北京: 科学出版社, 1963.

编 辑 税 红