

## 行波管多级降压收集极 CAD 软件研究与实现

黄桃 杨中海 李斌 胡权 廖莉 肖礼 朱小芳  
(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**摘要:** 该文讨论了行波管多级降压收集极 CAD 理论模型, 在二维轴对称条件下, 对网格自动划分技术、二次电子发射模型、空间电荷效应计算方法、外加磁场影响、收集极效率计算方法等进行了深入研究, 并在现有模型基础上进行了修改, 以获得更好的模拟效果。同时在此基础上, 开发了行波管多级降压收集极 CAD 软件 UESTC\_MDC, 并对该软件的使用进行了简单的介绍。最后根据国外研究发展动向, 对我国行波管多级降压收集极 CAD 软件的发展提出了一些可参考的意见和建议。

**关键词:** 行波管; 多级降压收集极; CAD; 二次电子

**中图分类号:** TN124.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2007)08-2029-04

## Study and Realization of Multistage Depressed Collector CAD Software for Traveling Wave Tubes

Huang Tao Yang Zhong-hai Li Bin Hu Quan Liao Li Xiao Li Zhu Xiao-fang  
(School of Physical Electronics, Univ. of Elec. Sci. and Tech. of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In this paper, the theoretical model of multistage depressed collector for traveling wave tubes, including the technology of automatic mesh generation, the effects of secondary electrons, space charges, magnetic fields and the method of computation of collector's efficiency, is presented in detail. Based on this theory, a two-dimensional software is developed and is used in the design of symmetrical multistage depressed collectors. Finally, the recent development of the theory is summarized and some referable advices are suggested.

**Key words:** Traveling wave tubes; Multistage depressed collector; Computer Aided Design (CAD); Secondary electron

### 1 引言

由于相互作用效率的限制, 行波管整管效率极大地依赖于“作用完”的电子在收集极区域内的能量回收率, 即收集极效率。最理想的情况是“作用完”的电子经过收集极内减速场后, 到达收集极电极上时, 速度接近于 0, 多级降压收集极的采用有可能使其成为现实。

采用计算机模拟计算, 可以快速地多级降压收集极设计, 缩短设计周期, 节约研究成本, 降低资源损耗和浪费, 提高设计水平和设计能力。多级降压收集极 CAD 技术成为当前行波管设计制造过程中不可或缺的重要技术。国内外有不少学者对此问题进行了深入的研究<sup>[1-8]</sup>。

当前我国的行波管多级降压收集极的设计多采用轴对称结构, 因此可以选择其二维截面进行快速、可靠的模拟计算。本文所介绍的多级降压收集极 CAD 软件 (UESTC\_MDC), 是电子科技大学自主研发的“宽带大功率行波管 CAD 集成环境” (简称 TWTCAD)<sup>[9-11]</sup> 中的子模块。其主要特点有: (1) 界面友好, 操作简单, 并有详尽的用户手册; (2) 能够计算任意收集极结构; (3) 能够针对任意边界自动网格划分; (4) 考虑二次电子发射影响; (5) 考虑磁场影响; (6) 能够

和 TWTCAD 中其他模块衔接计算。

### 2 行波管多级降压收集极理论模型

本文所讨论的问题是在二维轴对称的条件下, 对“作用完”的电子在收集极区域内的运动状态进行模拟计算。首先采用有限差分方法迭代求解拉普拉斯方程, 计算没有电子进入收集极时的静电场。然后电子注进入, 采用四阶龙格库塔法求解 Lorentz 运动方程, 求得初级电子运动轨迹及其所产生的二次电子轨迹, 用空间电荷分配方法计算由电子运动产生的空间电荷密度分布, 再迭代求解泊松方程, 重新计算收集极区域内的静电场, 直到两次迭代误差满足收敛条件为止。

#### 2.1 网格划分

由于所研究的几何区域相对较简单, 因此本文选择了计算速度快, 计算稳定性好, 精度适合要求的有限差分方法。软件可实现全自动网格划分, 所有网格点分为 3 种: 内点、边界点、电极内点。内点表示该网格点所对应的 4 条网格线终点都为网格点, 并且该点不在金属电极内; 边界点表示该网格点所对应的 4 条网格线至少有 1 条与边界相交; 电极内点表示该网格点处于金属电极内, 这一类网格点不参与计算, 以节约计算时间。对于内点电位的计算采用等间距差分

公式求解, 对于边界点采用不等间距差分公式求解。采用这种网格点处理方法可以更好地拟合边界, 提高模拟计算的速度和精度。

## 2.2 运动轨迹

在 UESTC\_MDC 中, 电子轨迹的计算考虑了电子的径向、轴向和角向运动情况。由于电子注角向运动产生的轴向自磁场与外部磁场相比, 其值小得多, 因此忽略掉该项, 由于软件考虑的系统仅为轴对称系统, 角向电场也忽略不计。

电子运动方程的数值解公式由 Lorentz 公式推导而得:

$$\frac{d(m\mathbf{V})}{dt} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

经过一系列分解变换, 整理得:

$$\ddot{Z} = -\frac{\eta}{v} \left[ E_z \left( 1 - \frac{\dot{Z}^2}{C^2} \right) - \frac{\dot{R}\dot{Z}}{C^2} E_r - \frac{R\dot{\theta}\dot{Z}}{C^2} E_\theta + \dot{R}B_\theta - R\dot{\theta}B_r \right] \quad (2)$$

$$\ddot{R} = -\frac{\eta}{v} \left[ E_r \left( 1 - \frac{\dot{R}^2}{C^2} \right) - \frac{\dot{R}\dot{Z}}{C^2} E_z - \frac{\dot{R}\dot{\theta}}{C^2} E_\theta + R\dot{\theta}B_z - \dot{Z}B_\theta \right] + R\dot{\theta}^2 \quad (3)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{\eta}{v} \left[ E_\theta \left( \frac{1}{R} - \frac{R\dot{\theta}^2}{C^2} \right) - \frac{\dot{\theta}\dot{Z}}{C^2} E_z - \frac{\dot{R}\dot{\theta}}{C^2} E_r + \frac{\dot{Z}}{R} B_r - \frac{\dot{R}}{R} B_z \right] - \frac{2\dot{R}\dot{\theta}}{R} \quad (4)$$

其中  $\eta = \frac{e_0}{m_0}$ ,  $v = \left( 1 - \frac{V^2}{C^2} \right)^{-1/2}$ 。  $m_0$  为单个电子的质量,

$e_0$  为单个电子的电荷量,  $\eta$  为荷质比。利用四阶龙格库塔法对上述公式进行求解, 可得电子在收集极中的运动状态。在具体实现中, 软件中固定空间步长为  $\Delta l = 0.1$  个网格单位, 因此相应的时间步长为:

$$\Delta T_n = \frac{\Delta l \cdot H}{[V_z^2 + V_r^2 + (R\dot{\theta})^2]^{1/2}} \quad (5)$$

其中  $H$  为网格单位长度,  $V_z$ ,  $V_r$  为速度在  $z$ ,  $r$  方向的分量。

## 2.3 空间电荷密度分布

多级降压收集极 CAD 中的理论模型很多都是直接由电子枪模拟程序<sup>[12]</sup>中得来, 对于空间电荷密度分布, 电子枪模拟程序中普遍采用流管法, 但在多级降压收集极模拟计算中, 电子轨迹发散严重, 甚至有回流的情况, 如果再采用流管法则不适用, 因此本文采用电荷分配方法来计算空间电荷密度分布, 将电子电荷分配到相邻的 4 个网格点上。

电子处于网格中, 如图 1, 则周围 4 个网格点上分配到的电荷分别为:

$Q_1 = Q \times a \times b$ ,  $Q_2 = Q \times c \times b$ ,  $Q_3 = Q \times a \times d$ ,  $Q_4 = Q \times c \times d$  其中  $Q$  为宏电子所携带的电荷量,

$$a = \frac{dz}{hz}, b = \left( 1 - \frac{dr}{hr} \right) \left( 1 - \frac{dr}{2r} \right), c = 1 - a, d = 1 - b$$

再根据空间电荷密度定义公式:

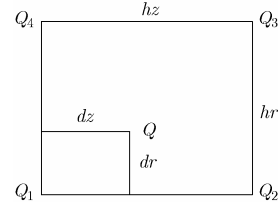


图 1 电荷分配方法

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (6)$$

可得到各网格点的空间电荷密度。

## 2.4 二次电子

在 UESTC\_MDC 中, 考虑了真二次电子和背散射电子两种情况, 其中背散射电子包括多次散射电子和弹性反射电子两种二次电子<sup>[13,14]</sup>。同时软件考虑了二次电子的多次发射问题, 并将二次电子形成的空间电荷效应计入运算中。

首先采用以下公式计算二次电子总发射率:

$$\delta(e, \theta) \approx \delta_{pk}(\theta) \{v(e)e^{[1-v(e)]}\}^\alpha \quad (7)$$

其中

$$e = \frac{E_I}{E_{pk}(\theta)}, v(e) = \frac{(e - e_0)}{1 - e_0}, \alpha = \begin{cases} 0.62, & v < 1 \\ 0.25, & v \geq 1 \end{cases}$$

$$\delta_{pk} = F(\theta)\delta_{pk0}, E_{pk} = F(\theta)E_{pk0}, F(\theta) = 1/\sqrt{\cos\theta}$$

$\delta_{pk0}$  和  $E_{pk0}$  是与材料有关的参数,  $\theta$  为入射角度(相对于着陆面的法线方向)。

然后采用以下公式计算背散射电子发射率:

$$\eta_0(E, Z) = E^{m(Z)}C(Z) \quad (8)$$

其中  $m(Z) = 0.13182 - \frac{0.9211}{Z^{0.5}}$ ,  $C(Z) = 0.1904 - 0.2236 \ln Z + 0.1292(\ln Z)^2 - 0.0149(\ln Z)^3$ ,  $\eta(\theta) = B[\eta_0/B]^{\cos\theta}$ 。

其中  $B=0.89$ ,  $\eta_0$  为与材料有关的发射系数,  $\theta$  为入射角度(相对于着陆面的法线方向)。

利用总发射率和背散射电子发射率两者之差即可得到真二次电子的发射率。

关于发射能量和角度, 采用了一个比较简单的处理方法: 真二次电子垂直于着陆面发射出来, 能量为 50eV; 背散射电子出射角度等于入射角度, 能量也等于入射电子的能量。

## 2.5 磁场

在轴对称磁场中, 可以用轴上磁场分布  $B(z)$ , 表达出空间的磁场分布, 该分布在轴附近收敛很快, 随  $r$  的增加收敛变慢。

轴上离散点的磁场强度可以通过实验测试得到, 那么问题归结为如何利用离散点磁场强度值表示对称轴上任意点的磁场强度。

为了避免电子远离轴时的误差, UESTC\_MDC 可以调入 TWTCAD 中静磁场计算模块(UESTC\_PPM)的计算结果, 进行更精确的计算。(该项工作正在进行。)

## 2.6 收集极收集效率计算

收集极的收集效率可采用电流分配方法和能量守恒方法,但电流分配方法不能完整考虑二次电子发射情况和热损耗,因此 UESTC\_MDC 采用能量守恒方法计算收集极效率。首先计算进入收集极的所有电子的初始总动能(包括产生的二次电子的初始能量),然后计算到达收集极边界的所有电子动能(含二次电子),将前者减去后者,得到动能差值,再用该差值与总动能相除即得到收集极的收集效率。

## 3 软件示例

UESTC\_MDC 基于科学计算可视化方法、面向对象建模技术和软件工程思想开发而成。开发平台采用 Microsoft Visual C++ 6.0,总计 10000 余行代码,运行于 Windows 操作系统,支持普通微机和工作站。

软件界面友好,采用菜单进行“可视化”选择,操作简单,运行速度快,可靠性高,计算过程和结果可视化,并且有详尽的用户手册,可用于多级降压收集极设计,有助于提高设计水平,缩短设计时间,降低设计成本和减少资源浪费,现已在国内微波管行业推广应用。

软件示例选用 NASA 报告<sup>[6]</sup>中公布的一个四级收集极结构,但由于输入条件不可知,因此没有对之进行更深入的比较。计算结果如下所示,图 2 为收集极内部的电场电位分布图,图 3 为不考虑二次电子发射的宏电子轨迹图,图 4 为考虑二次电子影响的宏电子轨迹图,图 5 为考虑二次电子发射和磁场影响的宏电子轨迹图。

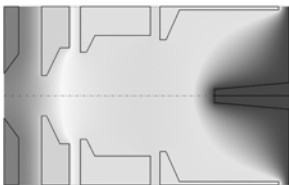


图 2 电场电位

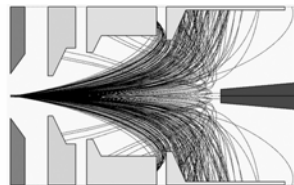


图 3 不考虑二次电子

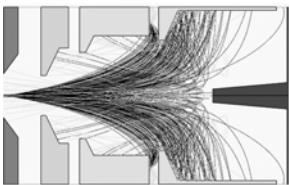


图 4 考虑二次电子

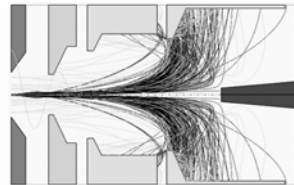


图 5 考虑二次电子及磁场

## 4 结束语

本文从 Lorentz 公式出发,采用数值计算方法求解电子在轴对称静电场中的运动方程。采用有限差分法求解泊松方程,计算静电场电位分布;龙格库塔法求解电子运动方程,计算电子运动轨迹;考虑“真”二次电子和背散射电子的影响;利用空间电荷分配方法计算空间电荷密度分布;利用能量守恒原理计算收集极的收集效率;利用追踪电子运动轨迹求解各收集极上的电流和返回相互作用空间的回流。同时介绍了基于上述理论模型开发的二维多级降压收集极软件

UESTC\_MDC。

从国内外研究情况对比分析,可以看出行波管多级降压收集极模拟软件的发展具有如下趋势:(1)模型维数从二维向全三维发展,特别是对于非轴对称系统的模拟,三维模拟才能精确考虑非轴对称性对系统的影响;(2)离散网格类型从正交网格、一致性结构化网格向非结构化、自适应网格发展,从而使数字网格能够更精确“逼近”模型的物理边界,提高场求解精度;(3)数值计算方法开始偏重于边界拟合更好,计算速度更快的有限元法(Finite Element Method, FEM);(4)非结构化网格生成从人工输入、交互产生向自动化程度更高的方向发展,有的甚至实现了全自动生成;(5)将粒子模拟 PIC(particle-in-cell)的方法引入到电子光学系统中,深入分析电子注在电子光学系统中的传输特性,并研究其瞬时和噪声特性。

随着我国行波管设计和制造技术的不断发展,非轴对称结构的多级降压收集极逐渐开始使用,利用二维理论模型已经不能对之进行准确有效的模拟,国外也在近几年发布了多个全三维版本<sup>[7,8]</sup>。因此,我们需要在目前研发二维版本软件的基础上,加大力量开发全三维的多级降压收集极软件,更准确地对任意结构的多级降压收集极进行模拟,以满足设计和制造的需要。

## 参 考 文 献

- [1] 电子管设计手册编委会. 行波管电子光学系统设计手册. 北京:国防工业出版社, 1981.
- [2] 廖平. 行波管电子光学系统 CAD 研究. [博士论文], 成都:电子科技大学, 2004.
- [3] 高讯鸿. 多级降压收集极 CAD 研究. [硕士论文], 成都:电子科技大学, 2004.
- [4] 寇建勇, 马少云, 孙瑜等. 多级降压收集极的模拟仿真软件. 真空电子技术, 2003, 5: 87-90.  
Kou Jian-yong, Ma Shao-yun, and Sun Yu. Simulation software for multistage depressed collector. *Vacuum Electronics*, 2003, 5: 87-90.
- [5] 黄桃, 杨中海, 胡权等. TWTCAD 多级降压收集极 CAD 设计与实现. 中国电子学会真空电子学会第 15 届学术年会, 昆明, 2005: 320-323.
- [6] Ramins P, Kosmahl H G, and Force D A, *et al.* Verification of computer-aided designs of traveling-wave tubes utilizing novel dynamic refocuses and graphite electrodes for the multistage depressed collector. NASA tp-2524, 1985: 155-158.
- [7] Petillo J, Eppley K, and Panagos D, *et al.* The MICHELLE three-dimensional electron gun and collector modeling tool: theory and design. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2002, 30(3): 1238-1264.
- [8] Coco S, Emma F, and Laudani A, *et al.* COCA: A novel 3-D FE simulator for the design of TWTs multistage collectors.

- IEEE Trans. on Electron Device*, 2001, 48(1): 24–31.
- [9] 廖莉, 杨中海, 李斌等. TWTCAD 系统框架设计与软件验证. 中国电子学会真空电子学分会第 15 届学术年会, 昆明, 2005: 12–15.
- [10] Yang Zhonghai, Li Bin, and Liao Li, *et al.* Application and Validation of the TWTCAD Integrated Framework. ICMMT, Beijing, 2004: 723–726.
- [11] Li Bin and Yang Zhonghai. Three-dimensional nonlinear theory of traveling wave tubes and simulation. *Chinese Physics*, 2003, 12(11): 1235–1240.
- [12] Herrmannsfeldt W B. Electron Trajectory Program. America: Stanford, SLAC, 1979.
- [13] Vaughan J R M. Secondary emission formulas. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1993, 40(4): 830.
- [14] Vaughan J R M. A new formula for secondary emission yield. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1989, 36(9): 1963–1967.
- 黄 桃: 男, 1980 年生, 博士生, 研究领域为物理电子学、电子光学、计算电磁学.
- 杨中海: 男, 1944 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 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、真空微电子学等.
- 李 斌: 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 主要研究领域为微波电子学、相对论电子学、计算电磁学等.