

文章编号: 1001-4322(2005)01-0126-05

用 5 种不同的电子光学软件对微波管 电子枪进行模拟计算*

肖 礼, 廖 莉, 杨中海, 廖 平, 雷文强, 任俊杰

(电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054)

摘 要: 对 TWTCAD 微机版、工作站版本、EGUN、CAMEO 以及 Orprogr 电子光学软件背景和特点作了一个简单介绍, 并利用其模拟计算了 11 支不同结构的电子枪。将计算得到的导流系数、射程和注腰半径与实验数据列表对比, 结果表明: 不同电子光学软件计算不同类型电子枪其计算精度也不一样。在导流系数方面, EGUN 和 Orprogr 的计算精度较高, 绝对平均误差分别为 7.18% 和 7.4%; 在射程方面, TWTCAD 的计算精度最高, 绝对平均误差为 5.69%; 在注腰半径方面, Orprogr 与实验值偏差较大, 绝对平均误差为 47.43%, 而工作站版本的计算精度最高, 绝对误差仅为 2.29%。

关键词: 电子枪; 电子光学软件; 导流系数; 射程; 注腰半径

中图分类号: TN12 **文献标识码:** A

宽带大功率行波管主要由电子枪、高频系统、聚焦系统、收集极和输入输出部件组成。电子枪产生电子注, 由聚焦系统维持一定的形状通过高频系统, 与行波场相互作用, 产生电子群聚和能量交换, 达到将高频信号放大的目的^[1-4]。电子光学系统涉及电子注的产生、成形、维持和收集, 没有电子枪产生电子注, 没有聚焦系统维持一定截面形状的电子注, 就无法产生能量交换和信号放大。而且, 电子注的质量和参量从根本上决定了诸如效率、增益、工作稳定性和噪声特性这样一些行波管的重要参量。因此, 一些新型器件的研制很大程度上取决于研制相应电子注成形系统所取得的成就。电子光学系统的设计是行波管设计中的重要一环。

国际上已有多个大型电子光学分析软件, 这些软件可以对复杂的几何结构、媒质分布、各种初始条件下的电子光学现象进行数值计算。用于电子枪设计的电子光学软件, 除了我们的工作站版本和微机版本以外, 国外还有许多成熟的如 SLAC 的 EGUN(有限差分法 FDM); SAIC(Science Application International Corporation)的 ARGUS(FDM)和 MICHELLE(3D FEM); Raytheon Corporation 的 UGUN; XGUN; GUN3D(FDM); CPI(Communication and Power Industries)开发的 HGUN 和 TGUN^[5]; 乌克兰的 Orprogr; 以及英国剑桥大学物理系开发的 CAMEO(CAMbridge Electron Optics)等。

模拟计算的结果和真实情况之间存在误差, 这是不可避免的, 国外应用也是如此。关键是经过反复运算, 使用者可以得出一个误差概率, 在实际设计和制作过程中进行校正。同时, 受环境和实验条件的限制, 用实验手段测量的数据和真实情况也存在误差。这就是为什么管子厂家都同时使用多套同类型软件, 以求将结果控制在一个更准确的范围内。本文利用 TWTCAD 微机版、工作站版本、EGUN、CAMEO 以及 Orprogr 软件分别对 11 支不同的电子枪进行模拟计算, 并将计算结果与实验数据对比, 旨在寻找出一些使用这些软件进行 CAD 设计的规律, 验证 TWTCAD 软件包的可靠性和实用性, 以对今后使用 CAD 技术进行电子枪设计起到一定的指导作用。

1 通过模拟计算研究微波管电子枪

“宽带大功率行波管 CAD 集成环境”软件包是在工作站版本基础上开发完成的, 其中电子枪模块采用有限元法对电子枪进行模拟。有限元法将里兹变分法与差分法结合起来, 在理论上以变分原理为基础, 在具体方法上则利用了差分法离散处理的网格思想。首先把求解微分方程化为等价的泛函求极值的变分问题, 然后将求解区域划分为有限个单元。这样, 便把变分问题近似地转化为有限元子空间中的多元函数求极值问题, 将变分问题的近似解作为所求方程的近似解^[6]。由于有限元节点可以完全落在边界上, 因此它不受场域边界形状

* 收稿日期 2004-06-10; 修订日期 2004-08-16
基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题
作者简介: 肖礼(1977—), 男, 助工, 从事电子光学部分的计算和研究工作, E-mail: Xiaoli@uestc.edu.cn.

的限制,能适应各种场域复杂的边界形状,且能根据实际问题的需要,在一部分需要精密求解的区域配置较密的节点,提高计算精度。计算前,我们需要进行粗网格划分,并手工输入 3 个电子枪参数文件(结构文件,网格数据文件,以及电极块边界文件)。该软件的执行环境为 Windows 9X/2000/NT。图 1 和图 2 是用 TWTCAD 软件计算一支典型行波管电子枪的结果图形。

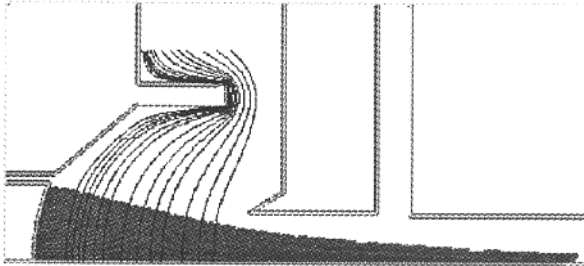


Fig. 1 Electron track computed by the PC edition TWTCAD software

图 1 微机版计算电子枪所得结果电子轨迹图

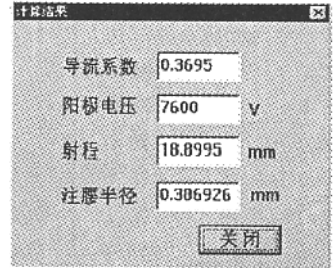


Fig. 2 Data display in the computer edition TWTCAD software

图 2 微机版电子枪计算结果数据显示

工作站版软件包是一个在 SGI Indigo2(R4400)图形工作站上,基于 UNIX 操作系统 IRIX6.2 开发完成的行波管 CAD 软件。电子枪设计部分分为有限元法和有限差分法设计。我们主要使用有限元法设计,其软件计算方法、基本操作及文件输入格式与微机版相似。图 3 是有限元法设计计算的结果图。

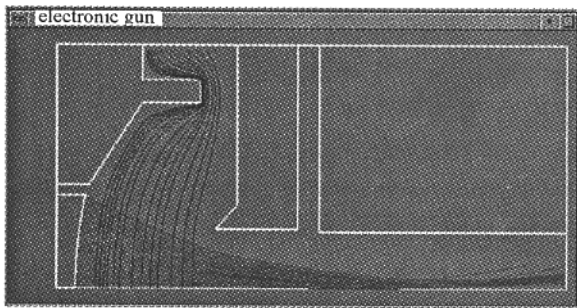


Fig. 3 Electron track computed by the workstation edition

图 3 工作站版本计算电子枪所得电子轨迹图

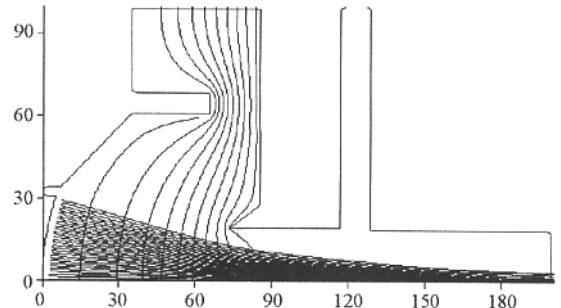


Fig. 4 Electron track computed by EGUN

图 4 EGUN 计算电子枪所得电子轨迹图

EGUN 程序是一个基于 DOS 环境下的电子光学软件。它由美国斯坦福大学线性加速器中心(SLAC)的 William. B. Herrmannsfeldt 等人于 1979 年编写完成,专门用于电子轨迹计算,功能强大,在电子光学系统的研究中起到关键性的作用。通过特定参数的控制,EGUN 可以在直角坐标系或柱坐标系下进行电子轨迹的计算。通过 $3/2$ 定律来计算皮尔斯型阴极或普通空心的或有阴影栅的阴极,或其它无规则形状阴极的发射电流密度,还可以直接在输入文件中输入电子注的初始发射条件作为电子轨迹计算的初始条件。在计算静态电磁场作用下的电子轨迹时,同时考虑了空间电荷效应及自磁场效应。计算后所得的结果可以通过程序以图表的形式显示。经过近十年的应用,EGUN 程序的功能已经发展得较为完备,并且已被应用于多种微波管的电子光学系统的计算中,如回旋管中的磁控注入枪(MIG),普通微波管中的皮尔斯枪,高导流系数枪,空心束电子枪。图 4 是用 EGUN 对同一支电子枪计算得到的结果图形。

CAMEO 是一款采用有限元法在 DOS 环境下对电子枪设计进行模拟计算的 2 维电子光学系统,由英国剑桥大学物理系开发完成。在简化版本中,其最大网格数为 30(行) \times 60(列)。主程序分为 BSPEC 和 CIELAS 2 两部分。BSPEC 用于建模,并指定电极、粒子发射、电磁体和绝缘体材料,产生的文本文件可在 MS-DOS 或文本编辑器内进行编辑处理,CIELAS 2 则是调用 BSPEC 或其他相关程序产生的几何数据文件,定义阴极的发射属性,确定电极电压,计算等位线分布和电子运动轨迹。该系统最大的特点是用户在使用中具有较高的机动性,可交互式地定义系统分析特性,建立结构和网格文件,控制计算和结果显示。图 5 是计算另一型号电子枪的结果图形。

Orprogr 是一款基于 DOS 环境运行的 CAD 软件,运行环境为 Windows 98。它由三个模块构成:慢波系统模块、互作用模块以及电子光学模块。电子光学模块可用于许多不同类型的电子光学系统设计。电子枪模拟主要就在该模块中进行。可模拟包括带栅网在内的许多不同结构电子枪和电极表面的二次电子发射,计算具有热初速的带电粒子束,执行不同条件下的轨迹分析,以及计算在静态和动态模式下二次电子发射的多级降压收集极。在计算速度方面,通过在工作区中以动态方式进行文件分配的方法更加有效地利用了内存,使速度得以

提高。电子光学模块提供了几乎 100% 的用户错误诊断,并能自动修正其中的一些错误,把错误信息输出到屏幕和结果文件中。而计算得到的结果数据(譬如电子轨迹、电流密度分布、相位特性等)都是通过一个独立的图形处理程序来显示。计算前需手工建立一个指定格式的结构网格文件。图 6 是我们对某一电子枪进行计算得到的结果图形。

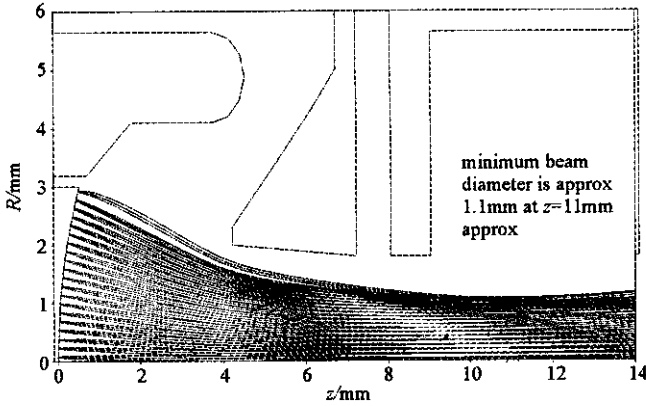


Fig. 5 Electron track computed by CAMEO

图 5 CAMEO 计算的电子枪所得电子轨迹图

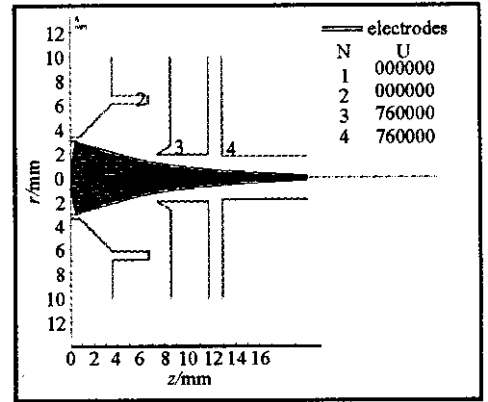


Fig. 6 Electron track computed by Orprogr

图 6 Orprogr 计算电子枪所得电子轨迹图

2 计算结果对比

电子枪加工出来以后,可以用电子注分析仪对电子枪的电流密度、射程、注腰半径等参数进行测试,检查设计效果。因此,我们将不同程序的计算结果和实验值进行了比较,如表 1~3 所示。

表 1 电子枪导流系数的实验值与软件计算值对比

Table 1 Comparison of electron gun's experimental perveance with simulation data

| No. | experiment result | TWTCAD computed result | EGUN computed result | CAMEO computed result | Workstation computed result | Orprogr computed result |
|-----|-------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1 | 0.28 | 0.269 | 0.252 | 0.321 | 0.263 | 0.264 |
| 2 | 0.30 | 0.370 | 0.308 | 0.413 | 0.337 | 0.324 |
| 3 | 0.42 | 0.510 | 0.392 | 0.624 | 0.417 | 0.410 |
| 4 | 0.53 | 0.592 | 0.474 | 0.513 | 0.435 | 0.552 |
| 5 | 0.55 | 0.604 | 0.482 | 0.510 | 0.450 | 0.512 |
| 6 | 0.56 | 0.605 | 0.494 | 0.554 | 0.412 | 0.502 |
| 7 | 1.11 | 1.454 | 1.181 | 1.279 | 1.040 | 1.270 |
| 8 | - | 0.732 | 0.583 | 0.811 | 0.520 | 0.617 |
| 9 | - | 0.759 | 0.576 | 0.877 | 0.536 | 0.615 |
| 10 | - | 1.409 | 1.054 | 1.213 | 0.932 | 1.136 |
| 11 | 1.80 | 1.952 | 1.850 | 2.631 | 2.431 | 2.119 |

表 2 电子枪射程的实验值与软件计算值对比

Table 2 Comparison of electron gun's experimental gunshot with simulation data

| No. | experiment result | WTCAD computed result | EGUN computed result | CAMEO computed result | Workstation computed result | Orprogr computed result |
|-----|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1 | 17.00 | 15.908 | 15.887 | 14.93 | 14.547 | 17.000 |
| 2 | 18.47 | 18.899 | 21.977 | 18.052 | 17.796 | 19.200 |
| 3 | 8.00 | 13.388 | 19.154 | 11.944 | 11.600 | 15.600 |
| 4 | 8.30 | 8.231 | 9.580 | 8.682 | 7.241 | 8.226 |
| 5 | 8.70 | 7.442 | 11.442 | 7.601 | 3.975 | 7.400 |
| 6 | 7.88 | 7.193 | 11.256 | 7.367 | 4.922 | 7.200 |
| 7 | - | 9.886 | 12.415 | 10.991 | 7.001 | 10.800 |
| 8 | - | 10.577 | 11.630 | 8.788 | 5.332 | 9.400 |
| 9 | - | 10.095 | 9.300 | 8.933 | 8.749 | 10.700 |
| 10 | - | 10.345 | 11.766 | 10.413 | 7.722 | 12.400 |
| 11 | 38.100 | 37.271 | 42.000 | 36.171 | 34.779 | 31.500 |

表 3 电子枪注腰半径的实验值与软件计算值对比

Table 3 Comparison of the beam waist radius of electron gun between experiment and simulation

| No. | experiment result | TWTCAD computed result | EGUN computed result | CAMEO computed result | Workstation computed result | Orprogr computed result |
|-----|-------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1 | 0.40 | 0.270 | 0.251 | 0.469 | 0.340 | 0.201 |
| 2 | 0.50 | 0.387 | 0.318 | 0.371 | 0.524 | 0.161 |
| 3 | 0.50 | 0.422 | 0.317 | 0.432 | 0.496 | 0.216 |
| 4 | 0.45 | 0.493 | 0.392 | 0.482 | 0.564 | 0.520 |
| 5 | - | 0.448 | 0.422 | 0.421 | 0.558 | 0.298 |
| 6 | - | 0.212 | 0.213 | 0.319 | 0.323 | 0.099 |
| 7 | - | 1.217 | 0.925 | 1.053 | 1.391 | 0.996 |
| 8 | - | 0.539 | 0.411 | 0.795 | 0.808 | 0.381 |
| 9 | - | 0.585 | 0.48 | 0.883 | 0.712 | 0.323 |
| 10 | - | 1.007 | 0.835 | 0.858 | 1.252 | 0.797 |
| 11 | 2.00 | 1.934 | 3.800 | 3.730 | 2.020 | 3.749 |

根据表 1 ~ 表 3 中各组数据,可以发现一个软件在计算不同电子枪时,所得的导流系数、射程和注腰半径的误差范围都不一样。存在着某一软件计算得到的一组导流系数与实验值较接近,而另一软件的射程却与实验值较吻合的情况。为了更直观地了解软件误差范围,确切掌握究竟哪一种软件计算得到的哪一项参数最为准确,利用下式

$$\text{误差百分比} = (\text{实验值} - \text{软件计算值}) / \text{实验值}$$

计算出不同程序的误差百分比,并对同一软件的误差百分比绝对值求和取其平均值,得到绝对平均误差(由于存在实验值准确性和其他方面因素的影响,我们在计算时去掉了其中一个最大误差),如表 4 ~ 6 所示。

表 4 用不同软件计算导流系数的误差对比

Table 4 Error comparison of perveance calculated by different software

| software | TWTCAD | EGUN | CAMEO | Workstation | Orprogr |
|------------------------|--------|-------|-------|-------------|---------|
| absolute average error | 12.3% | 7.18% | 17.9% | 12.6% | 7.4% |

表 5 用不同软件计算射程的误差对比

Table 5 Error comparison of gunshot calculated by different software

| software | TWTCAD | EGUN | CAMEO | Workstation | Orprogr |
|------------------------|--------|--------|-------|-------------|---------|
| absolute average error | 5.69% | 18.33% | 7.23% | 20.31% | 7.58% |

表 6 用不同软件计算注腰半径的误差对比

Table 6 Error comparison of beam waist radius calculated by different software

| software | TWTCAD | EGUN | CAMEO | Workstation | Orprogr |
|------------------------|--------|--------|--------|-------------|---------|
| absolute average error | 12.78% | 30.63% | 24.63% | 2.29% | 47.43% |

3 结 论

综合比较以上数据,我们可知:在导流系数方面,TWTCAD 微机版计算的结果稍微偏大(平均误差 12.3%),而工作站版本(平均误差 12.6%),EGUN、CAMEO(平均误差 17.9%)以及 Orprogr 偏小,其中 EGUN 和 Orprogr 的精度相对较高,绝对平均误差分别为 7.18% 和 7.4%;在射程方面,EGUN(平均误差 18.33%)的结果偏大,TWTCAD 微机版、工作站版本(平均误差 20.31%)、CAMEO 和 Orprogr 的射程偏小。精度以 TWTCAD 微机版、CAMEO 和 Orprogr 最高,绝对平均误差分别为 5.69%、7.23% 和 7.58%;在注腰半径方面,TWTCAD 微机版(平均误差 12.78%)和 EGUN(平均误差 30.63%)结果偏小,CAMEO(平均误差 24.63%)与工作站版本偏大一些,而 Orprogr 则与实验值偏差较大(平均误差 47.43%)。工作站版本的计算精度最高,绝对平均误差为 2.29%。

根据以上各表,还可建立一个数据库,为结构相似、导流系数接近的电子枪设计提供经验数据,减少新管型

的设计时间,提高工作效率。

由此可以看出,在计算某一支电子枪时,不能单纯地依靠一个软件,需要使用多个软件对同一支枪进行多次计算,根据结果数据进行分析,并结合数据库中相似的结构数据,得到较为符合实际情况的结构参数,最终以指导电子枪设计。

参考文献:

- [1] Kompfner R. The travelling wave tube[J]. *Wireless World* ,1946 **52** 369—372.
- [2] Pierce J R. Theory of beam type travelling wave tube[J]. *Proc IRE* ,1947 **35** :111—123.
- [3] Pierce J R. Travelling wave tubes[M]. Princeton :Van Norstrand ,1950.
- [4] 刘盛纲,李宏福,莫元龙,等. 微波电子学导论[M]. 北京:国防工业出版社,1985.(Liu S G ,Li H F ,Mo Y L ,et al. Microwave electronics. Beijing :National Defence Industry Press ,1985)
- [5] 廖平,杨中海,肖礼,等. 微波管电子枪三维粒子模拟研究[J]. 强激光与粒子束,2004 **16**(3) 353—357. (Liao P ,Yang Z H ,Xiao L ,et al. Study on 3-D MAFIA PIC simulation for microwave tube electron gun. *High Power Laser and Particle Beams* ,2004 **16**(3) 353—357)
- [6] 林公豫,罗恩译. 有限元分析中的数值方法[M]. 北京:科学出版社,1985. (Lin G Y ,Luo E Y. Method of numerical value in finite element analysis. Beijing Science Press ,1985)

Simulation of microwave tube electron gun with five different electron optic softwares

XIAO Li , LIAO Li , YANG Zhong-hai , LIAO Ping , LEI Wen-qiang , REN Jun-jie

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

Abstract : The background and character of five different electron optic softwares(TWTCAD , EGUN , CAMEO , Workstation , Orprogr) were introduced , and the simulation of eleven different construction guns were present by the five softwares. After compared the perveance , gunshot and beam waist radius computed by these softwares with the experiment result , it gives the conclusion that different electron optic software has different precision in computing various electron gun , and then provides the error range of each softwares , which shows that in the perveance , EGUN and Orprogr has the higher precision , its absolute average error is 7.18% and 7.4% . In the gunshot , TWTCAD is the best , which is 5.69% . In the beam waist radius , the Orprogr 's absolute average error is 47.43% , is the worst one , but the Workstation is the best , which is 2.29% .

Key words : Electron gun ; Electron optic software ; Perveance ; Gunshot ; Beam waist radius