

回旋管双阳极磁控注入电子枪分析与数值计算

王华军, 李宏福

(电子科技大学高能电子学研究所, 四川成都 610054)

摘要: 根据回旋管对电子枪的要求, 考虑相对论效应和空间电荷效应, 编制了一套大型的计算程序. 利用计算机辅助设计, 计算出了电极形状、电子轨迹与电子注参量. 计算表明, 这种电子枪具有速度零散小、层流性较好、体积小等优点.

关键词: 回旋管; 电子注; 电子枪; 电极形状; 数值计算

中图分类号: TN125 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2000)06-0098-04

Analysis and Numerical Calculation of a Double Anode Magnetron Injection Gun for Gyrotron

WANG Huar jun, LI Hong fu

(Inst. of High Energy Electronics, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: According to the requirements for the gyrotrons, the relativistic effect and the space charge effect were taken into account, and a set of large program is developed for CAD. The shape of electrodes, electron trajectory and electron beam parameters are given by the computer aided design. The electron gun has some advantages such as small velocity spread, good laminar flow and small volume etc..

Key words: gyrotron; electron beam; electron gun; electrode shapes; numerical calculation

1 引言

回旋管是一种毫米波段、亚毫米波段的高峰值功率、高平均功率器件. 在这些方面具有其他器件无可比拟的优越性.

为了得到回旋管的大功率和高平均功率, 人们致力于改进电子光学系统. 为此, 前苏联学者提出具有层流电子注的磁控注入枪. 这种电子注能有效地克服空间电荷引起的速度零散. 本文设计的电子枪就是建立在综合法和分析法基础上的层流枪^[1,2]. 本文首先根据综合法进行工程设计, 确定电子枪电极初步形状和尺寸. (综合法基本思想是根据皮尔斯截割原理, 用电极产生的作用代替被截割掉的那部分空间电荷的作用, 使沿作为注边界的电子轨迹上的电位分布及其法向导数保持不变, 从而保证注内电子运动与均匀的理想模型(未被切割时)中的电子运动相同, 从而得到稳定的层流注), 然后, 利用计算机进行辅助设计、进行大量的数值模拟计算和优化选择^[3~5]. 最后, 确定电子枪电极形状和尺寸. 同时, 给出电子注的参量. 本文根据回旋管整管的要求设计的双阳极电子枪与国内外同类相比具有速度零散小、层流性较好、体积小等优点. 同时, 也对空间电荷的作用, 影响速度零散的因素等进行了大量地研究.

2 基本方程

2.1 电子运动方程

电磁场中的电子的 Lorentz 方程为

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

在圆柱坐标系(r, θ, z)中轴对称条件下, 考虑相对论效应时的 Lorentz 方程的分量展开式

$$\dot{r} = -\frac{\eta}{\gamma} \left[E_r \left(1 - \frac{v^2}{c^2} - E_z \frac{\dot{z}}{c^2} + B_r \dot{\theta} \right) \right] + \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

$$\ddot{z} = -\frac{\eta}{\gamma} \left[E_z \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - E_r \frac{\dot{z}}{c^2} - B_r \dot{\theta} \right] \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{\eta}{\gamma} \left[-E_r \frac{\dot{\theta}}{c^2} - E_z \frac{\dot{z}}{c^2} + B_r \frac{\dot{z}}{r} - B_z \frac{\dot{r}}{r} \right] - \frac{2\dot{\theta}}{r} \quad (4)$$

其中 $\eta = e/m_0$ 为非相对论电子荷值比; $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ 为相对论因子; $m = m_0\gamma$ 为电子相对论质量, m_0 为电子静止质量; c 为光速(以下同). 根据以上各式可以计算电子在电磁场中的运动轨迹、电子注的参量.

2.2 场方程

本文研究的电子注是在强的交叉电磁场的作用下的运

动. 磁场沿轴缓慢连续递增. 电场的来源有两个方面, 一是来自电极上的电位产生的电场, 二是来自电子注自身的空间电荷场. 两种电场相互叠加总的电场. 因此, 需要求解关于电场的泊松方程. 场方程为:

$$\nabla^2 U = -(\rho/\epsilon_0) \quad (5)$$

$$J = \rho v \quad (6)$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{d\rho}{dt} \quad (7)$$

及金属边界条件

$$n \times E = 0 \text{ 或 } U = \text{常数} \quad (8)$$

3 数值计算方法

数值计算方法就是在一定的边界条件下求解强流电子光学系统的基本方程.

首先, 确定泊松方程、电流连续性方程、电子运动方程、电磁场基本方程和边界条件等, 构成定解问题.

其次, 利用有限差分法将以上基本方程及其边界条件化为数值方程. 利用计算机进行数值方程的计算.

作者自行设计了一套磁控注入电子枪的大型模拟程序^[5]. 计算结果已应用于制管实验中, 并得到了很好的结果.

3.1 磁场的计算方法

本文研究的系统是一个傍轴系统, 根据沿轴的磁场分布, 按谢尔茨展开可得到空间的磁场分布.

$$B_z(r, z) = B(0, z) - \frac{B''(0, z)}{2} r^2 + \frac{B^{(4)}(0, z)}{2^2 \cdot 4^2} r^4 - \dots \quad (9)$$

$$B_r(r, z) = -\frac{B'(0, z)}{2} r + \frac{B'''(0, z)}{2^2 \cdot 4} r^3 - \frac{B^{(5)}(0, z)}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6} r^5 + \dots \quad (10)$$

利用式(9)、(10)通过数值计算和模拟, 得到如图 1、2 所示的磁场分布. 图 1 表示偏轴 8mm (B_4) 和轴向磁场 (BZZ) 随 Z 变化的分布, 图 2 表示偏轴 2mm、8mm、12mm 处 R 向磁场随 Z 变化的分布. 从图 1 中可以看出轴向磁场 BZZ 是一个沿轴缓慢变化的场. 偏轴位置 r 处的空间磁场 Z 向分量 B_z 与沿轴磁场 BZZ 的变化基本是一致的, 它们的变化曲线几乎重合 (图中横坐标 B 表示 BZZ 或 B_z). 根据式(9)可知, B_z 主要由 BZZ 确定, 说明高阶导数是一个小量. 由图 2 看出偏轴位置的空间磁场 r 处的空间磁场 R 向分量 B_r 的变化 (图中横坐标 B 表示 B_r). 偏离轴越远, B_r 的变化越大. 由式(10)可以看出, 因高阶导数是一个小量, B_r 主要由式(10)中第一项确定. 而第一项与偏轴距离 r 成正比. 由此看见, 数值计算结果与理论一致.

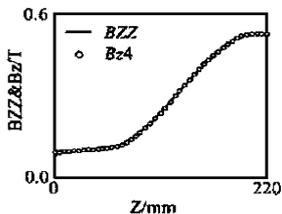


图 1 轴向磁场 BZZ 和空间磁场 Z 向分量 B_z 分布

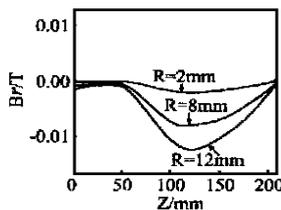


图 2 空间磁场 R 向分量 B_r 分布

3.2 电场的计算方法

为了提高电场计算的准确性, 需要提高电位的计算精度. 本文采用九点插值公式来计算, 计算精度可达 $10^{-5} \sim 10^{-6}$. 具体方法为: 第一步求出 P 点附近网格上九点的电位, 第二步求出 P 点的电位, 第三步求出 P 点的电场.

根据网格上的电位求出 P 点的电位

$$U_P = U_0 + A_1 \Delta r + A_2 \Delta z + A_3 \Delta r^2 + A_4 \Delta z^2 + A_5 \Delta r \Delta z \quad (11)$$

$$\begin{cases} A_1 = \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_o = \frac{U_3 - U_4}{2H} \\ A_2 = \left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_o = \frac{U_1 - U_2}{2H} \\ A_3 = \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right|_o = \frac{U_3 - 2U_0 + U_4}{2H^2} \\ A_4 = \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right|_o = \frac{U_1 - 2U_0 + U_2}{2H^2} \\ A_5 = \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 U}{\partial r \partial z^2} \right|_o = \frac{U_5 - U_6 - U_7 + U_8}{4H^2} \end{cases} \quad (12)$$

根据公式(12)、(13)计算得到 P 点处的电场

$$-(E_r)_P = \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_P = A_1 + 2A_3 \Delta r + A_5 \Delta z \quad (13)$$

$$-(E_z)_P = \left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_P = A_2 + 2A_4 \Delta z + A_5 \Delta r \quad (14)$$

为保持一定精度, 选取节点时应保证 $|\Delta r| \leq H/2$, $|\Delta z| \leq H/2$. 电位插值公式中符号如图 3 所示.

由以上各式可知, 一旦知道网格节点上的电位, 就可以求出空间任意位置的电场和电场分量.

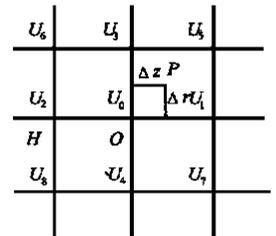


图 3 电位插值公式中符号示意图

3.3 轨迹的计算方法

计算轨迹的方法有许多种, 诸如泰勒法, 欧拉法, 二阶龙格库塔法, 四阶龙格库塔法等等. 经过对几种方法的计算比较可知, 目前四阶龙格库塔法的计算精度最高. 本文采用四阶龙格库塔法进行轨迹的计算. 具体方法为

$$\begin{cases} \varphi_1 = hf(u_n, t_n) \\ \varphi_2 = hf(u_n + \frac{1}{2}\varphi_1, t_n + \frac{1}{2}h) \\ \varphi_3 = hf(u_n + \frac{1}{2}\varphi_2, t_n + \frac{1}{2}h) \\ \varphi_4 = hf(u_n + \varphi_3, t_n + h) \\ \varphi_{n+1} = u_n + \frac{1}{6}(\varphi_1 + 2\varphi_2 + 2\varphi_3 + \varphi_4) \end{cases} \quad (15)$$

其中 h 为时间步长, u 为待求未知量.

将运动方程(1~4)与方程(15)联合求解. 就可以求出电子运动轨迹.

3.4 模拟中电子注层数带来的误差

在计算机模拟中电子注的层数 (电子轨迹条数) 也会给数值计算带来计算误差. 本文也在这个方面进行了研究和探讨, 减小模拟带来的误差. 图 4(a)、(b) 表示电子注的性能和速度

零散与电子注轨迹条数的关系. 计算表明随着电子注轨迹条数的增加, 电子注的平均横向能量与总能量之比、平均横向速度与纵向速度之比几乎向速度零散也趋于稳定. 结果表明, 只有电子轨迹的条数取得较大时, 计算才更准确. 不变化. 当电子注轨迹条数的增加到一定数目后, 它的横向. 电子注的平均横向能量与总能量之比(能量比)和平均横向速度与纵向速率之比(速度比)随电子注轨迹条数的变化, 图 4(b)表示电子注的横向和纵向速度零散随电子注轨迹条数的关系.

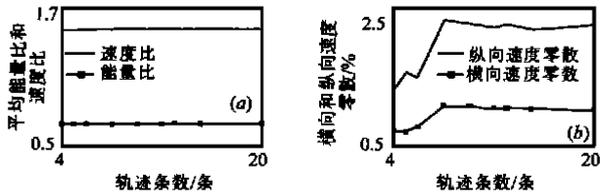


图 4 电子注的性能和速度零散与电子注轨迹条数的关系

4 数值计算结果和分析

本文根据以上的计算方法, 考虑诸多因数的影响, 编制了一套大型的磁注入电子枪的计算程序. 进行了大量的计算, 得到了很好的结果.

4.1 空间电荷的影响

本文设计的双阳极磁控注入电子枪是强流电子枪, 因此, 考虑空间电荷的作用. 通过比较选择, 空间电荷的计算采用更精确的电子云方法. 同时进行了考虑空间电荷和不考虑空间电荷的计算结果的比较. 如图 5 所示. 考虑空间电荷时, 等位线发生了变化, 从而引起了场的变化.

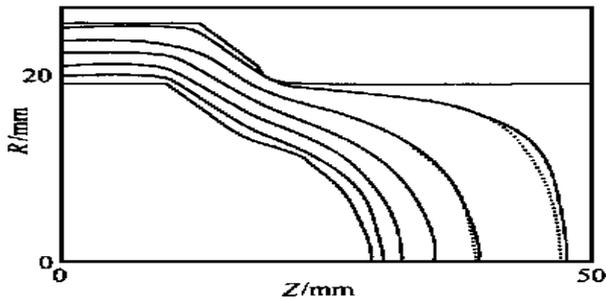


图 5 阴极区等位线分布

图 5 中粗实线表示电极, 细实线表示考虑空间电荷时的阴极区等位线, 虚线表示未考虑空间电荷时的阴极区等位线.

4.2 速度零散的改善

影响电子注的速度零散的因素有许多, 本文主要从以下几个方面来考虑.

4.2.1 电极的影响 各电极对电子注的速度零散的影响很大. 调整. 选择适当的电极(阴极、第一阳极和第二阳极)形状和尺寸; 适当增大阴极发射带的倾角、减小发射带的带宽; 在阴极的发射带的倾角、发射带的带宽确定的前提下, 细心地选择、反复调整前成形成极和后成形成极的长度与倾角以及前端圆弧的半径等等, 可以大大地使速度零散减小. 阳极(特别是第一阳极)的形状、倾角、长短, 第一阳极与阴极的相对位置, 第一阳极与第二阳极的相对位置等等, 均对电子速度零散有较

大的影响. 对这些因素进行细心地反复调整, 能够减小电子注的速度零散和改善电子注的性能.

4.2.2 电压的因素 第一阳极电压不仅对电子注的纵向速度、横向速度以及他们的相互比值有很大的影响, 而且对速度零散也有着较大影响. 比如, 增大第一阳极的电压, 一方面降低了速度另散, 如图 6(a)、(b), 另一方面将增大横向速度和纵向速度的比值(即 α 值), 如图 6(c), 电子注的回旋中心平均半径和电子注的平均回旋半径也随之增大, 如图 6(d)、(e). 所以, 在计算中需要反复地改变他们的电压, 使他们达到比较理想的状态.

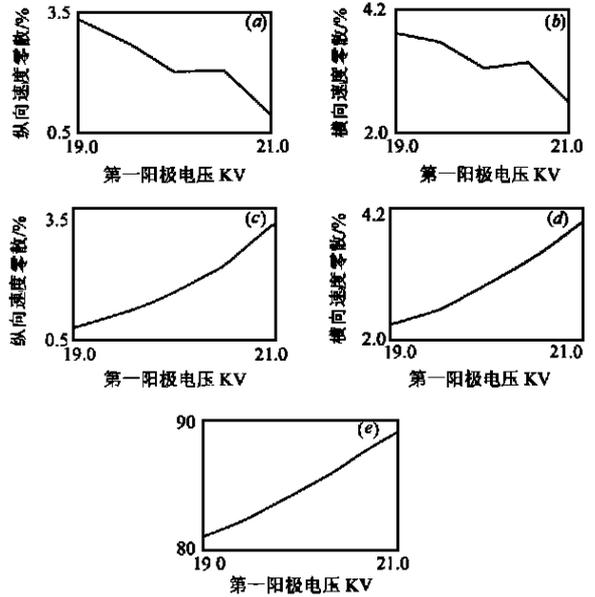


图 6 表示电子注的性能和速度零散随第一阳极电压的变化

4.3 电子注轨迹和电子注参量

根据综合法设计的电极的初步形状和参数作为基础. 利用自己编写的大型程序进行模拟计算. 计算中不断地改进参数, 细心地调整电极的形状和尺寸、电极的电压, 并进行优化和屏幕动态显示. 如此反复的进行. 最终得到了符合参数要求、具有很小的速度零散、高质量电子注的双阳极电子枪. 电子注的性能参数如表 1 所示. 此结果是在考虑空间电荷效应情况下得到的. 电极形状和电子注如图 7 所示. 计算中电位精度为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$, 能量校核精度为 $10^{-10} \sim 10^{-11}$.

表 1 设计和计算结果

阴极电压	0kV	相互作用区磁场	5157.5Gs
第一阳极电压	21.0kV	阴极区磁场	995.1Gs
第二阳极电压	30.0kV	横向速度与纵向速度之比	1.6125
电子注电流	5.005A	电子回旋中心平均半径	6.33mm
阴极电流发射密度	4.3A/cm ²	纵向速度零散	2.47%
横向速度零散	0.94%		

5 结论

本文主要研究双阳极磁控注入电子枪, 首先由理论上设计了电极形状的雏形, 然后进行了计算机模拟, 并进行了大量的可视化计算, 最后得到了很好的结果. 通过大量的数值计

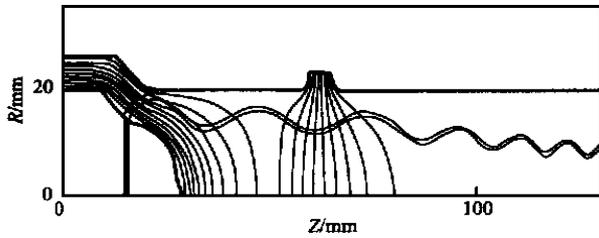


图 7 双阳极电子枪电极形状、电位线和电子轨迹

算,设计了一支性能优良的电子枪。横向速度零散达到的千分之几。此电子枪已用于制管实验中。同时,本文给出的方法与编制的通用软件可为电子枪的分析和设计提供更为可靠的依据和方便。

参考文献

- [1] G. A. 纳吉, M. 西拉支. 空间电荷光学导论. 北京: 科学出版社, 1983
- [2] Sh. E. Tsimring. Synthesis of Systems for the Formation of Helical Electron Beams. NRL memorandum, Report, 3937
- [3] Boris. V. Raisky and Shulim. E. Tsimring. Numerical Simulation of Nonstationary Processes in Intense Helical Electron Beams of Gyrotrons. IEEE Transactions on plasma science, 1996, 24(3): 992~ 998

- [4] A. N. Kufin, V. K. Lygin, Sh. E. Tsimring and V. E. Zapevalov. Numerical Simulation and experimental study of magnetron injection guns for powerful short wave gyrotrons. Int. J. Electronics, 1992, 72(5, 6): 1145~ 1151
- [5] 王华军. 回旋管磁控注入枪 CAD. 电子科技大学硕士论文, 1996



王华军 副教授, 1986 年获北京师范大学物理学专业理学学士, 同年分配到成都高等专科学校任教。1997 年获电子科技大学工科硕士学位。1997 年至今在电子科技大学高能电子学研究所攻读博士学位。研究方向: 毫米波技术、电子光学系统、数值模拟。



李宏福 现任电子科技大学高能电子学研究所教授, 博士生导师。1960 年毕业于成都电讯工程学院并留校工作。1989 年 8 月至 1990 年 10 月作业高级访问学者和访问教授在德国斯图加特大学进行大功率毫米波传输线方面的合作研究。长期从事微波电子学、微波真空器件、微波技术及电子回旋脉塞的教学与科研工作。已发表学术论文九十多篇, 多次获部省级科研奖及国家发明三等奖。

(上接第 121 页)

参考文献

- [1] M. I. Skolnik. Radar Handbook. Second Edition, New York: McGraw-Hill, 1990: 16. 1~ 16. 8, 18. 1~ 18. 16
- [2] 王永良, 彭应宁. 机载雷达空时二维自适应信号处理的进展与展望. 电子学报, 1999, 3
- [3] 保铮等. 机载雷达空时二维信号处理. 现代雷达, 1994, 16(1): 31~ 39
- [4] H. Wang, Yuhong Zhang and Qingwen Zhang. A view of current status of space time processing algorithm research. IEEE International Conference of Radar, 1995, 635~ 640
- [5] Wang Yongliang, Peng Yingning. Method for simultaneous clutter and jammer rejection in airborne radar. IEE Electronics Letters, 1995, 31(14): 1190~ 1192
- [6] Wang Yongliang, Peng Yingning. Space time joint processing method for simultaneous clutter and jamming rejection in airborne radar. IEE Electronics Letters, 1996, 32(3): 258~ 259
- [7] L. E. Brennan, D. J. Piwinski and F. M. Standaher. Comparison of space time adaptive processing approaches using experimental airborne radar data. The Record of 1993 IEEE National Radar Conference. Massachusetts, U. S. A, Apr. 1993: 176~ 181
- [8] 王永良, 保铮, 彭应宁, 陆大. 空时二维自适应处理的统一理论、模型与局域处理方法. 电子学报, 1996, 24(9): 64~ 69
- [9] Wang Yongliang, Peng Yingning, Bao Zheng. Space time adaptive processing for airborne radar with various array orientation, IEE Proc.-Radar, Sonar Navig., 1997, 144(6): 330~ 340
- [10] 王永良, 保铮, 彭应宁. 阵面在方位上任意放置时机载雷达空时二维信号处理方法. 电子学报, 1996, 24(3): 42~ 46
- [11] P. G. Richardson. Analysis of the adaptive space time processing technique for airborne radar. IEE Proc.-Radar, Sonar Navig., 1994, 141(4): 187~ 195
- [12] P. G. Richardson. Relationships between DPCA and adaptive space time processing techniques for clutter suppression. IEEE International Radar Conference, Paris' 94: 295~ 300
- [13] T. J. Nohara. Comparison of DPCA and STAP for space based radar. IEEE International Radar Conference, 1995: 113~ 119
- [14] L. Lightstone, D. Faubert, G. Rempel. Multiple phase center DPCA for airborne radar. IEEE National Radar Conference, 1991: 36~ 40
- [15] 龚耀寰. 机载雷达相位中心偏移天线系统的性能. 电子学报, 1995, 23(9): 24~ 27