

# 大功率回旋管双阳极电子枪计算机辅助设计\*

王华军\*\* 李宏福 周晓岚

(电子科技大学高能电子所 成都 610054)

**【摘要】** 根据回旋管对电子枪的要求,采用综合法和分析法设计了该双阳极磁控注入电子枪。编制了一套大型的计算程序;利用计算机辅助设计,给出了电极形状、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、层流性好、体积小等特点。该电子枪更能适应大电流工作情况,已经用于制管实验中。由热测实验表明,它具有明显的优点。

**关键词** 回旋管; 电子注; 电子枪; 电极形状; 计算机辅助设计; 数值模拟  
**中图分类号** TN125

回旋管是一种毫米波段、亚毫米波段的高峰值功率和高平均功率器件,具有其他器件无可比拟的优越性。近年来,利用回旋管产生兆瓦级的长脉冲大功率和高平均功率已用于受控热核聚变中的等离子体加热、雷达和陶瓷烧结等。为了得到大功率和高平均功率,除尽可能提高相互作用效率和电子注加速电压外,可致力于改进电子光学系统,力求增大注电流和提高电子注的性能。为此,有关专家提出具有层流电子轨迹的磁控注入枪,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,阴极与磁力线间有较大的倾角,前成形极、后成形极与阴极都有一定的倾角,其倾角大小由综合法确定。并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产品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。

## 1 基本设计原理

### 1.1 电子运动方程

电磁场中的电子的 Lorentz 方程

$$\frac{d(mv)}{dt} = -e(E + v \times B) \tag{1}$$

圆柱坐标系  $(r, \theta, z)$  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

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

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

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

式中  $\eta = \left| \frac{e}{m_0} \right|$  为非相对论电子荷值比;  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$  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)。根据式(1)~(4)可以计算电子在电磁场中的运动轨迹、电子注的参量。

### 1.2 场方程

本文研究的电子注是在强电磁场的作用下的运动。磁场沿轴缓慢连续递增。电场来自电极上的电位产生的电场和电子注自身的空间电荷电场,两种电场相互叠加对电子注形成自洽的电场。因此,

1998年1月19日收稿,1999年3月2日修改定稿

\* 电子部预研基金资助项目

\*\* 男 34岁 博士生

需要求解关于电场的泊松方程。场方程为

$$\nabla^2 U = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{5}$$

$$J = \rho v \tag{6}$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{d\rho}{dt} \tag{7}$$

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \mu_0 J \tag{8}$$

$$B = \nabla \times A \tag{9}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{10}$$

及金属边界条件  $n \times E = 0$  或  $U = \text{常数}$ 。

## 2 数值计算方法

根据上述基本原理设计出电极的锥形，再利用数值计算方法经过计算，最后才能确定电极的形状，并计算出电子注的性能和参量。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。具体方法是：1) 确定问题的基本方程和一定的边界条件，即定解问题，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；2) 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，采用超松弛迭代法求解出网格上的空间电位分布，利用空间电荷电子云法、电荷分配法计算空间电荷分布，结合改进的九点插值法，拉格朗日外推法和泊松外推法计算空间任意点的叠加电场。采用非线性曲线拟合的方法求出沿轴向上的磁场分布，再利用谢尔茨函数展开计算磁场在空间的分布；3) 利用四阶龙格—库塔法求解电子在电磁场中的运动方程，计算出电子的位置、轨迹和电子注的参量。

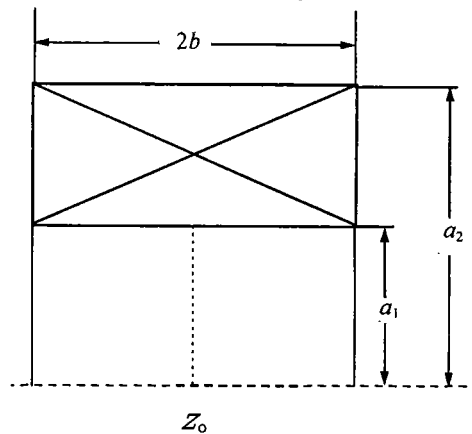


图 1 实际线圈磁场计算公式中的各个参量

### 2.1 磁场的计算方法

本文利用已有的研究结果，用实际线圈或理想线圈的组合来描述沿轴磁场，即

$$B(0, z) = \sum_{i=1}^L K_i \left\{ (z - z_{oi} + b_i) \ln \frac{a_{2i} + \sqrt{a_{2i}^2 + (z - z_{oi} + b_i)^2}}{a_{1i} + \sqrt{a_{1i}^2 + (z - z_{oi} + b_i)^2}} - (z - z_{oi} - b_i) \ln \frac{a_{2i} + \sqrt{a_{2i}^2 + (z - z_{oi} + b_i)^2}}{a_{1i} + \sqrt{a_{1i}^2 + (z - z_{oi} + b_i)^2}} \right\} \tag{11}$$

式中  $L$  为实际线圈的个数； $K_i$  为决定于电流密度的系数； $a_1$ 、 $a_2$  为线圈内、外半径； $z_0$  为线圈中心的位置； $b$  为半宽度，如图 1 表示。角标  $i$  表示第  $i$  个线圈的相应参量（以下同）。

$$B_z(r, z) = B(0, z) - \frac{B''(0, z)}{2^2} r^2 + \frac{B^{(4)}(0, z)}{2^2 \cdot 4^2} r^4 - \dots \tag{12}$$

$$B_r(r, z) = -\frac{B'(0, z)}{2} r + \frac{B'''(0, z)}{2^2 \cdot 4} r^3 - \frac{B^{(5)}(0, z)}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6} r^5 + \dots \tag{13}$$

利用式(11)~(13),其数值计算和模拟结果如图2、3所示。图2表示轴向磁场  $BZ(=B(0,z))$  和偏轴 8 mm( $B_z4$ )、14 mm( $B_z7$ )处  $Z$  向磁场随  $Z$  变化的分布,图3表示偏轴 2 mm( $B_r1$ )14 mm( $B_r7$ )处  $R$  向磁场随  $Z$  变化的分布。从图2中可以看出磁场是一个沿轴缓慢变化的场,由图2可以看出偏轴的位置的  $Z$  向空间磁场  $B_z$  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。根据式(12)可知,  $B_z$  主要由  $BZZ$  确定,说明高阶导数(二阶或二阶以上)是一个小量。由图3看出偏轴的位置的  $r$  向空间磁场  $B_r$  的变化:偏离轴越远,  $B_r$  的变化越大。由式(13)可以看出,因高阶导数(二阶或二阶以上)是一个小量,  $B_r$  主要由式(13)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值一致。

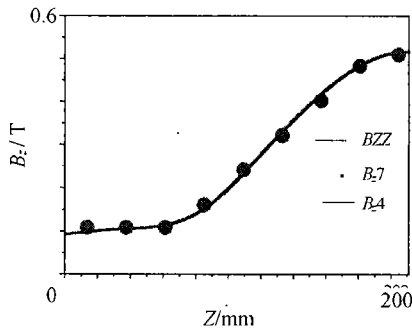


图2 Z向空间磁场分布

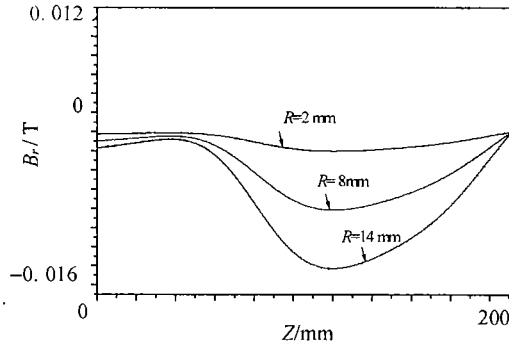


图3 r向空间磁场分布

2.2 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。具体计算方法为

$$U_P = U_o + A_1\Delta r + A_2\Delta z + A_3\Delta r^2 + A_4\Delta z^2 + A_5\Delta r\Delta z \tag{14}$$

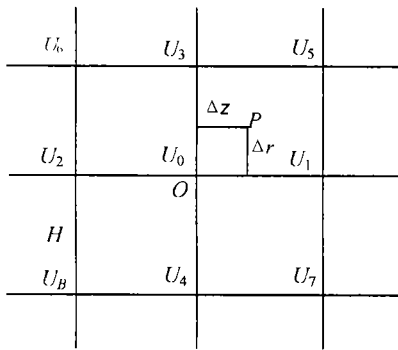


图4 电位插值公式中符号示意图

$$\begin{cases} A_1 = \left(\frac{\partial U}{\partial r}\right)_o = \frac{U_3 - U_4}{2H} \\ A_2 = \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_o = \frac{U_1 - U_2}{2H} \\ A_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}\right)_o = \frac{U_3 - 2U_o + U_4}{2H^2} \\ A_4 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_o = \frac{U_1 - 2U_o + U_2}{2H^2} \\ A_5 = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r \partial z}\right)_o = \frac{U_5 - U_6 - U_7 + U_8}{4H^2} \end{cases} \tag{15}$$

由此计算得到  $P$  点处的电场为

$$-(E_r)_p = \left(\frac{\partial U}{\partial r}\right)_p = A_1 + 2A_3\Delta r + A_5\Delta z \tag{16}$$

$$-(E_z)_p = \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_p = A_2 + 2A_4\Delta z + A_5\Delta r \tag{17}$$

为了保持一定的精度,选取节点时保证  $|\Delta r| \leq \frac{H}{2}$ ,  $|\Delta z| \leq \frac{H}{2}$ 。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,电位插值公式符号如图4所示。

### 2.3 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。经过对几种方法的比较可知, 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, 其具体计算方法为

$$\begin{cases} \varphi_1 = hf(u_n, t_n) \\ \varphi_2 = hf\left(u_n + \frac{1}{2}\varphi_1, t_n + \frac{1}{2}h\right) \\ \varphi_3 = hf\left(u_n + \frac{1}{2}\varphi_2, t_n + \frac{1}{2}h\right) \\ \varphi_4 = hf(u_n + \varphi_3, t_n + h) \\ u_{n+1} = u_n + \frac{1}{6}(\varphi_1 + 2\varphi_2 + 2\varphi_3 + \varphi_4) \end{cases} \quad (18)$$

式中  $h$  为时间步长;  $u$  为待求未知量。

将运动方程 (2) ~ (4) 与式 (18) 结合求解, 就可以求出电子运动轨迹。

## 3 回旋管对电子枪的要求

根据回旋管整管功率和模式选择的需要, 电子枪采用双阳极磁控注入电子枪, 电子注采用空心轴对称电子注。整管对电子枪性能提出了以下要求:

阴极电压	0 V	相互作用区磁场	0.516 T
第一阳极电压	21 kV	阴极区磁场	0.1 T
第二阳极电压	30 kV	横向速度与纵向速度之比	$\geq 1.5$
电子注电流	5 A	电子回旋中心平均半径	6.36 mm
阴极发射电流密度	$4.5 \text{ A/cm}^2$	速度零散 (纵向)	$\leq 5.0\%$

上述参数对电极的电压、注电流和发射电流密度, 出口 (相互作用区入口) 处的回旋平均作用半径、横向速度与纵向速度的比值, 阴极区磁场与注出口 (相互作用区入口) 处磁场等, 以及电极的形状和尺寸、磁场压缩比、横向能量等都有严格的要求。还要求电子枪的体积小, 电子注层流性较好, 速度零散小等, 这对电子枪的设计增加了很大的困难。

## 4 分析和数值计算结果

为了达到上述要求, 除了改进磁场、电场和轨迹的计算方法, 提高数值计算的精度外, 还应对空间电荷的影响和速度零散的改善进行讨论。

### 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, 必须考虑空间电荷的作用。通过比较选择, 空间电荷的计算采用电子云方法, 并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, 考虑空间电荷时, 非等位区变长。与采用辅助网格—集中电流法的结果进行了比较, 计算表明电子云方法计算空间电荷更接近实际情况。

### 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。

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,可以大大地使速度零散减小。如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、反复调整前成形极和后成形极的长度与倾角以及前端圆弧的半径;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,只有对这些因素进行反复调整,才能改善电子注的速度零散。

2) 电压的因素。第一阳极相对于阴极的电压、第二阳极相对于第一阳极的电压大小不仅对电子注的纵向速度、横向速度以及它们的相互比值有很大的影响,而且对速度零散有着较大影响。如增大第一阳极的电压或减小第二阳极相对于第一阳极的电压,一方面降低了速度另散,另一方面将增大纵向速度和横向速度的比值。所以,在计算中需要反复改变它们的电压,使其达到理想状态。

综合以上的各种因素,利用已设计的电子光学计算程序进行计算与修改,在计算机模拟中进行大量的计算和优化,最终得出满意的结果。

#### 4.3 电极形状和电子注轨迹

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,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下:

阴极电压	0 V	相互作用区磁场	0.516 T
第一阳极电压	21 kV	纵向速度与横向速度之比	1.6125
第二阳极电压	30 kV	阴极区磁场	0.099 5 T
电子注电流	5.005 A	电子回旋中心平均半径	6.326 8 mm
阴极电流发射密度	4.3 A/cm <sup>2</sup>	纵向速度零散	2.47%
横向速度零散	0.94%		

上述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5所示。计算中电位精度为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ ,能量校核精度为 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 。

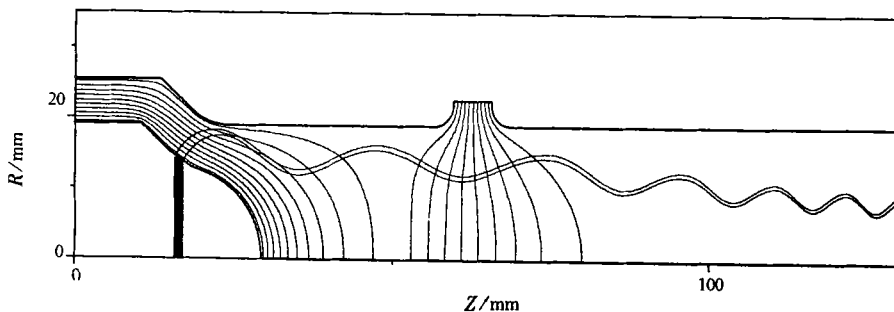


图5 双阳极电子枪电极形状、电位线和电子轨迹

## 5 结束语

电子枪是微波器件的重要组成部分,它提供的电子注质量直接影响微波器件整管的性能。同样,回旋管磁控电子枪提供的回旋电子注的质量直接影响回旋管的整

管的性能。本文研究的双阳极磁控注入电子枪,从理论上设计了电极形状的雏形,并进行了计算机模拟和大量的可视化计算,最后得到了很好的结果,满足了前面提出的对电子枪的要求,速度零散达到的千分之几(横向速度零散)。

## 参 考 文 献

- 1 Raisky Boris V, Tsimring Shulim E. Numerical simulation of nonstationary processes in intense helical electron beams of gyrotrons. IEEE transactions on plasma science, 1996;24(3): 992~998
- 2 Kuftin A N, Lygin V K, Tsimring Sh E, Zapevalov et al. Numerical simulation and experimental study of magnetron-injection guns for powerful short-wave gyrotrons. INT J Electronics, IEEE, 1992,72(5,6): 1 145~1 151
- 3 王华军. 回旋管磁控注入枪 CAD:[学位论文]. 成都: 电子科技大学, 1996
- 4 李家胤, 王华军. 三次谐波回旋管电子枪的设计. 电子科技大学学报, 1994, 25(7): 72~75

## Computer Aided Design of A Double Anode Magnetron Injection Gun for High Power Gyrotron

Wang Huajun    Li Hongfu    Zhou Xiaolan

(UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** The double anode electron gun is designed and calculated according to the requirements for the gyrotrons by this method, which combines synthesis with analysis. A set of computer program is made. The electrode shapes, electron trajectory and electron beam parameters are also given by the computer aided design. The electron gun has such characteristics as small velocity spread, good laminar flow and small volume etc. While the later is more suitable for operating at large current. It is applied in the experiment. The experiment of using the Gyrotron show that the gun has advantages over other guns.

**Key words** gyrotron; electron beam; electron gun; electrode shapes; numerical modelling; computer aided design