

# 200kV 电子帘加速器的电子束轨迹的计算

王水清

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 采用法国的 MAFIA 程序计算电场. 编制了 TRAJ 程序, 用逐点跟踪计算电子轨迹, 得到了束流包络. 观察了在高压电场中栅压对束流光学传输的影响, 并获得了在不同能量范围内的栅压聚焦作用, 为栅压调节提供了理论依据, 也为将来对其它规格的电子帘加速器的物理设计积累了十分宝贵的经验.

**关键词** 电子枪 电子轨迹 束流 聚焦电极

## 1 引言

电子帘加速器的物理结构, 特别是电子枪结构和高压电场的形状, 是决定电子帘加速器设计成败的关键. 因这些技术属工业秘密, 国内外在这方面发表的文章从未公开其关键技术. 我们从最基本的物理原理开始, 从阴极灯丝的电子发射直到计算出电子束轨迹, 并反复比较出各种条件下的束流品质, 得到了比较满意的结果.

## 2 加速度表达式的推导

计算电子束轨迹的目的是为加速器运行时对基本参数调节提供理论依据, 也是将来设计长灯丝电子枪、更大流强加速器所做的物理设计的一部分.

在这里作了 3 个假设<sup>[1]</sup>:

1) 由于灯丝下垂挠度很小(最大挠度为 1.4mm), 发生在灯丝中部, 电子枪中心区电场的轴向分量可以忽略不计. 阴极电流的磁场所产生的洛仑兹力沿灯丝方向, 对各截面上的电子的作用都相同, 不影响束流横向和纵向均匀性. 整个结构具有平面对称性.

2) 电子枪直径与轴向长度之比约为 1:6, 两端的边缘场形效应对辐照区影响不大, 电子束包络是条状的.

3) 关于空间电荷的影响, 对于理想二极管空间电荷限制流由 Child - Langmuir 定律 ( $V^{3/2}$  定律) 确定<sup>[2]</sup> 即  $J \propto V^{3/2}$ , 灯丝到栅极之间的引出系统是同轴圆柱面, 采用柱面二极管模型, 在锥角  $\theta$  内单位宽度的空间电荷限制流

$$\frac{J}{H} = \frac{8}{9} \pi \epsilon_0 \sqrt{2} \eta \frac{V_a^{3/2}}{R^2 r_a} \left( \frac{\theta}{360} \right), \quad (1)$$

其中  $r_a$  是加速极的曲率半径,  $\eta = \frac{q}{m}$  是粒子的荷质比,  $H$  是条状束的宽度. 参数  $R = r - \frac{2}{5} r^2 + \frac{11}{120} r^3 - \frac{27}{3300} r^4 + \dots$ ,  $r = \ln \frac{r}{r_c}$ ,  $r_c$  为发射极的曲率半径. 对于电子单位宽度的空间电荷限制流

$$\frac{J_c}{H} = \frac{14.7 \times 10^{-6}}{R^2 r_a} \left( \frac{\theta}{360} \right) V_a^{3/2}. \quad (2)$$

由于电流密度  $J$  很小, 由此得到的电位对原电场的影响很小, 为了简化计算, 在计算过程中不考虑空间电荷的作用. 根据以上假设, 对静电场沿束流方向的任一截面简化为平面对称的二维问题. 静电场中的电子运动方程为

$$\frac{d(m \mathbf{v})}{dt} = -e \mathbf{E}, \quad (3)$$

取直角坐标, 电子速度和电场强度为

$$\mathbf{v} = i\dot{x} + j\dot{y}, \quad \mathbf{E} = iE_x + jE_y, \quad (4)$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (5)$$

这里的  $i$  和  $j$  是单位矢量,  $m$  是电子质量,  $m_0$  是电子的静止质量,  $c$  为光速.

$$\begin{aligned} \frac{d(m \mathbf{v})}{dt} &= \frac{d}{dt} [m_0 (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \mathbf{v}] = \\ &= m_0 (1 - v^2/c^2)^{-3/2} \left[ \frac{v}{c^2} \frac{d\mathbf{v}}{dt} + (1 - v^2/c^2) \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

这里  $\frac{d\mathbf{v}}{dt} = i\ddot{x} + j\ddot{y}$ , 而  $v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$  对速度标量关于时间  $t$  微分得到  $\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{(i\dot{x} + j\dot{y})}{v}$ , 则式(6)变为

$$\begin{aligned} \frac{d(m \mathbf{v})}{dt} &= m_0 \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} \left[ \frac{v}{c^2} \frac{i\dot{x} + j\dot{y}}{v} (i\ddot{x} + j\ddot{y}) + \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) (i\ddot{x} + j\ddot{y}) \right] = \\ &= m_0 \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} \left\{ i \left[ \frac{\dot{x}}{c^2} (\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y}) + \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \ddot{x} \right] + j \left[ \frac{\dot{y}}{c^2} (\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y}) + \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \ddot{y} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

由(3)和(7)两式得到

$$m_0 \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} \left[ \frac{\dot{x}}{c^2} (\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y}) + \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \ddot{x} \right] = -eE_x, \quad (8)$$

$$m_0 \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} \left[ \frac{\dot{y}}{c^2} (\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y}) + \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \ddot{y} \right] = -eE_y, \quad (9)$$

令

$$\beta^2 = \frac{v^2}{c^2} = \frac{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}{c^2},$$

$$\dot{x} (\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y}) + (1 - \beta^2) c^2 \ddot{x} = - \frac{e(1 - \beta^2)^{3/2} c^2}{m_0} E_x, \quad (10)$$

$$\dot{y} (\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y}) + (1 - \beta^2) c^2 \ddot{y} = - \frac{e(1 - \beta^2)^{3/2} c^2}{m_0} E_y, \quad (11)$$

$$[c^2(1 - \beta^2) + x^2] \ddot{x} + x\dot{y}\dot{y} = - \frac{e(1 - \beta^2)^{3/2} c^2}{m_0} E_x, \quad (12)$$

$$x\dot{y}\dot{x} + [c^2(1 - \beta^2) + y^2] \ddot{y} = - \frac{e(1 - \beta^2)^{3/2} c^2}{m_0} E_y, \quad (13)$$

令  $\Lambda = c^2(1 - \beta^2) + x^2, B = x\dot{y}, C = x\dot{y}, D = c^2(1 - \beta^2) + y^2$

$$M = - \frac{e(1 - \beta^2)^{3/2} c^2}{m_0} E_x, N = - \frac{e(1 - \beta^2)^{3/2} c^2}{m_0} E_y.$$

解联立方程

$$\begin{cases} A\ddot{x} + B\dot{y} = M, \\ C\dot{x} + D\ddot{y} = N, \end{cases} \quad (14)$$

$$x = \frac{\Delta \dot{x}}{\Delta} = \alpha(1 - \beta^2)^{1/2} [(c^2 - \dot{x}^2)E_x - \dot{x}\dot{y}E_y], \quad (15)$$

$$y = \frac{\Delta \dot{y}}{\Delta} = \alpha(1 - \beta^2)^{1/2} [(c^2 - \dot{y}^2)E_y - \dot{x}\dot{y}E_x], \quad (16)$$

这里,  $\alpha = - \frac{e}{m_0 c^2}$ , 计算中用 MKSA 单位制.

### 3 电子束轨迹的计算

用 MAFIA 程序计算出的电场将整个区域划分为直角坐标网格, 网格间距 1—2mm,

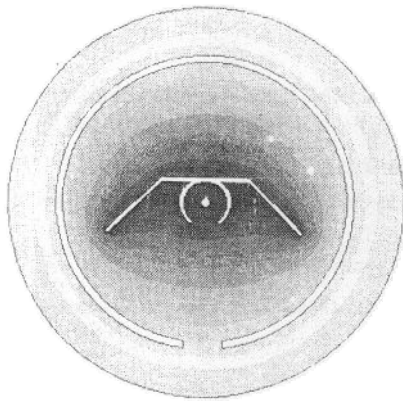


图1 电场场形  
高压 200kV, 栅压 150V.

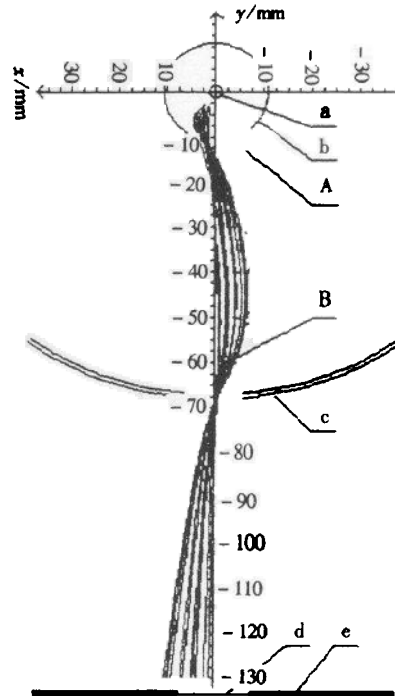


图2 电子束轨迹  
a. 灯丝, b. 悬浮电极, c. 栅极筒, d. 钛窗, e. 外钢筒, A, B 是束流聚焦区域.

电场分量  $E_x, E_y$  的单位是 V/m, 场形见图 1. 计算轨迹时先在阴极附近的网格上确定由热阴极电子发射的初速度<sup>[3,4]</sup>. 然后判断  $x$  和  $y$  方向的速度, 取较大者位移到下一个网格点, 并计算出位移时间. 计算出在这段时间另一方向的位移坐标, 同时计算出新的网格点上的速度和加速度, 准备下一个网格的位移. 跟踪上述计算过程直到把电子束轨迹计算到加速器束流出口的钛窗口为止. 凡是电子束打到栅极金属上的轨迹都剔除不要, 最终得到了 12 条电子轨迹. 它们的包络清晰地显示出加速器几个主要参数的调节作用. 计算出的电子束轨迹见图 2 所示.

栅极电位决定了 A 区域的束流聚焦作用, 电位较低会使悬浮电极的静电透镜的焦点向下移动, 部分束流将打在悬浮电极上; 反之电位较高使焦点向上移动, 束流向右偏转的角度过大, 部分束流将不能被高压电场在 B 区域的聚焦作用拉回中轴线附近, 而直接飞向栅极. 这两种情况都减小了有效的引出束流. B 区域的聚焦作用与高压有关, 但是考虑到高压比栅极电位高出 3 个数量级, 栅缝下部加速腔内电场的电力线几乎为直线, 且场强  $E$  高达  $10^6$  V/m, 因此低能电子在加速腔内很快沿电力线运动. 不同的高压等级对应一个最佳的栅极电压, 高压电场在 A 到 B 区域之间的渗透, 直接影响 B 区域的聚焦效果, 理想的情况是束流全部打在 50mm 宽的钛窗口上. 必须注意的是, 当部分束流打到与钛窗同一在电气接地的钢筒上时, 采用在高压电路中串接电流表间接测量束流强度的方法是无效的. 因此我们在钛窗口下安装束流接收靶测量实际引出的流强是可靠和精确的. 机械尺寸和形状, 特别是栅极筒直径, 栅极与钛窗之间的距离是束流引出的关键因素, 应该计算束流轨迹并作相应的物理设计.

## 4 结论

电子束轨迹计算的结果, 为 200kV 电子帘加速器在运行中对高压、灯丝电流、栅极电压以及束下传动装置的速度调节提供了理论依据, 并将其计算数据作为控制软件的调节依据. 同时该计算方法为电子帘加速器物理设计提供了一个有力的工具. 目前, 200kV 电子帘加速器运行良好. 最大输出束流 20mA, 束流利用率在 90% 左右.

## 参考文献 (References)

- 1 CHEN PengFei. Physical Design of the Electron Gun in Electrocurtain (in Chinese), Lanzhou: IMP. The Theses of Master Degree, 1996, 25—28  
(陈鹏飞. 电子帘加速器电子枪物理设计. 兰州近代物理所. 硕士学位论文, 1996, 25—28)
- 2 ZHANG HuaShun. Ion Source and Power Neutral Beam Source (in Chinese), Beijing: Atomic Energy Press, 1987, 73—93  
(张华顺. 离子源和大功率中性束源. 北京: 原子能出版社, 1987, 73—93)
- 3 JIANG JianPing. Cathode Electronics and Gas Discharge Principle (in Chinese), Beijing: National Defence Industry Press, 1980, 13—34  
(江剑平. 阴极电子学与气体放电原理. 北京: 国防工业出版社, 1980, 13—34)
- 4 CHENG Huan. Cathode Electronics (in Chinese), Xian: Northwest University of Telecommunications Engineering Press, 1986, 8—21  
(承欢. 阴极电子学. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986, 8—21)

## Calculation of the Electron Trajectory for 200kV Self - shielded Electron Accelerator

WANG ShuiQing

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract** In order to calculate the electron trajectory of 200kV self-shielded electron accelerator, the electric field is calculated with a TRAJ program. In this program, following electron track mesh points one by one, the electron beam trajectories are calculated. Knowing the effect of grid voltage on electron optics and gaining grid voltage focusing effect in the various energy grades, we have gained scientific basis for adjusting grid voltage, and also accumulated a wealth of experience for designing self-shielded electron accelerator or electron curtain in future.

**Key words** electron gun, electron beam, trajectory, focusing electrode