

# 大功率电子加速器光学性能的研究

殷学军 刘振灏

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

陈思富

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

**摘要** 利用在 SC 程序基础上的改进程序对一种工业用大功率电子加速器的光学系统性能进行了研究, 经过优化计算并给出了计算结果。

**关键词** 阴极 电子加速器 电子光学

## 引言

工业用大功率电子加速器是一种直流高压型大功率加速器, 它具有效率高, 造价低, 结构紧凑等优点。在燃煤电站工业废气的脱硫脱硝处理, 辐照交联电线电缆绝缘层的改性, 工业废水的净化处理, 谷物杀菌, 汽车轮胎生产中的预硫化, 材料的涂层固化等工农业领域有着广泛的应用前景。

在这种加速器的光学系统中, 电子发射系统采用的是六硼化镧 ( $\text{LaB}_6$ ) 平面阴极, 由于加速器本身没有专门的预聚焦系统, 电子束的聚焦完全是靠加速管前面部分的非均匀场来实现。本文是利用了在 SC 程序基础上改进程序对电子加速器光学性能进行了优化计算并给出了计算结果。实验结果表明, 对电子加速器光学性能的理论计算是完全正确的。

## 1 电子枪结构

加速器的电子枪为平面阴极结构, 如图 1 所示,  $\text{LaB}_6$  圆片直径为  $\phi 10\text{mm}$ ; 阴极外套外径为  $\phi 30\text{mm}$ 。

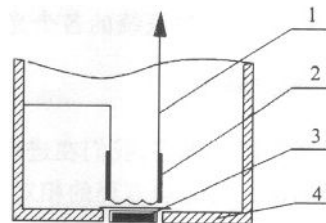


图 1 电子枪结构示意图

1 加热器; 2 热屏蔽层; 3 六硼化镧片; 4 平面阴极(外套)。

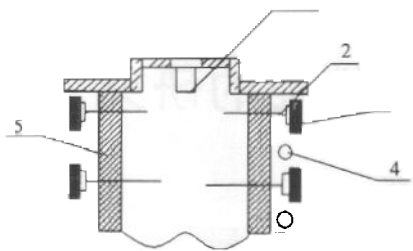


图 2 加速管结构示意图

- 1 电子枪; 2 电极; 3 铜环; 4 分压电阻;  
5 陶瓷环.

## 2 加速管结构

加速管结构如图 2 所示, 电极均为平板电极, 容易加工制造. 第二个电极内径为  $\phi 20\text{mm}$ , 其余电极内径为  $\phi 100\text{mm}$ , 电极厚度为  $1\text{mm}$ , 电极间距是  $20\text{mm}$ . 加速管总体上分为两部分: 变梯度加速管和等梯度加速管.

在设计加速管时, 不仅要考虑加速管的击穿特性, 密封性和绝缘环的强度外, 还要考虑屏蔽因数和气导真空要求.

## 3 电子光学性能的计算

电子枪发射系统的物理模型比聚焦系统要复杂得多, 这是因为前者的电子初速度分布和空间电荷效应会对电子束产生明显的影响, 因此不是一个单纯的电子光学问题. 计算思路:

- 1) 确定计算区域, 并赋初值;
- 2) 令  $\rho = 0$ , 求拉普拉斯方程的数值解;
- 3) 借助平板二极管理论计算距离阴极表面 2 倍步长区域内阴极发射电流;
- 4) 计算二极管区域内的电子轨迹;
- 5) 计算整个空间电荷密度;
- 6) 求解泊松方程式的数值解;
- 7) 重复以上步骤, 直到阴极发射电流稳定;
- 8) 计算发射系统的各个光电参量.

### 3.1 程序简介

基于以上思路, 我们在进行电子光学性能计算时采用的 SC 改进程序, 该程序以荷电粒子的洛伦兹运动方程的相对论形式

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{m_0 \mathbf{v}}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \right\} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

为基础, 在充分考虑了空间电荷效应和电子自身产生磁场的情况编写而成.

在该程序中, 网格的划分采用正方形网格; 解泊松方程采用半迭代切比雪夫法; 解轨迹方程采用四阶龙格-库塔法.

### 3.2 假定条件

计算是在以下假定的条件下进行的:

- 1) 加速管的电压波动很小, 可以忽略不计, 即认为是稳定的直流.

2) 由于加速管上每隔一个电极安装一个内嵌砂钢片的铜环来屏蔽外界的电磁场,因此在计算时,仅考虑由分压电阻而产生的静电场,不考虑其他外场的影响。

3) 加速管中的真空度好,在结构设计中又考虑了屏蔽因数,对于二次粒子的影响也予以忽略。

4) 边界的封闭。整个加速管可分为变梯度管段和等梯度管段两部分,在计算时既要考虑不等梯度场的聚焦作用,又要考虑等梯度场的影响,因为在远离不等梯度管段处的任一位置,其等位线几乎垂直于光轴,因而可以作为计算区域的边界,同时后面的电场对前面的计算没有多大影响,在实际计算时,取等梯度管段的第五个电极作为封闭边界。

### 3.3 束流初值的给定

如前所述,对电子加速器来讲,其阴极处于温度限制发射状态下,因此在利用程序计算电子轨迹时不能直接用 Child 理论来计算,只能按实际条件输入初始值。

阴极发射电流的计算核心是建立电子发射初速度分布的模型。在计算时,阴极发射电流密度计算过程如下:

1) 将平面阴极表面划分成若干同心环带(环带中的电子束作为一个整体),圆心和主光轴重合。这些同心环带既是热电子发射源,又是平板二极管的阴极。从这些发射源发出的一系列电子束可以计算出二极管的电流密度和空间电荷。有以下两种划分方法:(1) 等距离法;(2) 等面积法。

2) 给出每个环带的束流值,有两种电流密度计算束流值:

$$(1) \text{ 平均电流密度分布} \quad j_a = \frac{I}{\pi R^2}, \quad (2)$$

$I$  为总电流,  $R$  为阴极半径;

(2) 高斯型电流密度分布

$$\text{设电流密度分布:} \quad j(r) = A e^{-\left(\frac{r}{a}\right)^2}, \quad (3)$$

式中  $A$  为待定常数,由

$$I = \int_0^R j(r) \times 2\pi r dr = A\pi \frac{R^2}{a^2} (1 - e^{-a^2}), \quad (4)$$

得

$$A = \frac{I}{\frac{\pi R^2}{a^2} (1 - e^{-a^2})} = j_a \frac{a^2}{(1 - e^{-a^2})},$$

$$\text{得电流密度分布:} \quad j(r) = j_a \frac{a^2}{1 - e^{-a^2}} e^{-\left(\frac{r}{a}\right)^2}$$

在实际计算时,考虑平面电极的作用,阴极前面的电场可以认为是均匀的,因此阴极边缘的电流密度与阴极中心的电流密度相比,差别不大,计算时取  $a = 0.7$  即可满足这一假设,此时

$$j_{\max} = 1.265 j_a, \quad (7)$$

$$j_{\min} = 0.775 j_a. \quad (8)$$

3) 初始能量给定;

4) 运动方向给定.

### 3.4 光学性能计算

#### 3.4.1 轴上电位分布

电子加速器的电子枪直接处于加速管内,相当于物(阴极)浸没在加速管变梯度部分所形成的透镜场内,因而可把它们看作一个浸没物镜.轴上电位分布见图 3.

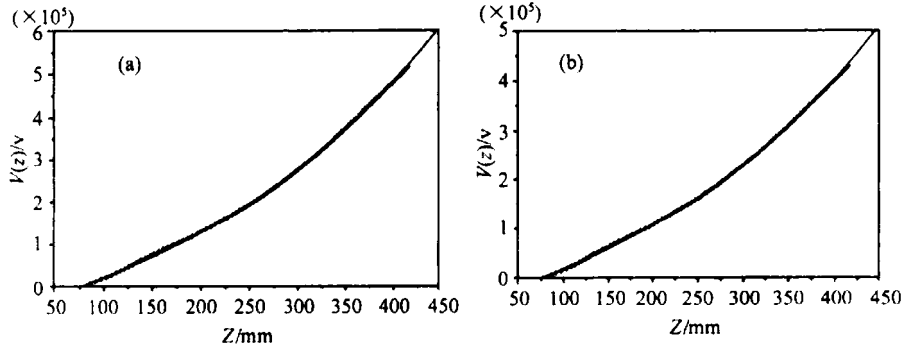


图 3 加速器光学系统的轴上电位分布

(a) — + —  $E_n = 1.2 \text{ MeV}$ ,  $I = 80 \text{ mA}$ , —  $V(Z) = 0.00303 Z^3 + 0.19957 Z^2 + 786.74454 Z - 61397.42714$ ;  
 (b) — + —  $E_n = 1.0 \text{ MeV}$ ,  $I = 40 \text{ mA}$ , —  $V(Z) = 0.00252 Z^3 + 0.16613 Z^2 + 655.64685 Z - 51159.85943$ .

计算条件为:(1) 温度限制状态;(2) 高斯型电流密度分布;(3) 初始能量为  $1 \text{ eV}$ ;(4) 运动方向与  $Z$  轴一致.

#### 3.4.2 电子轨迹计算(见图 4)

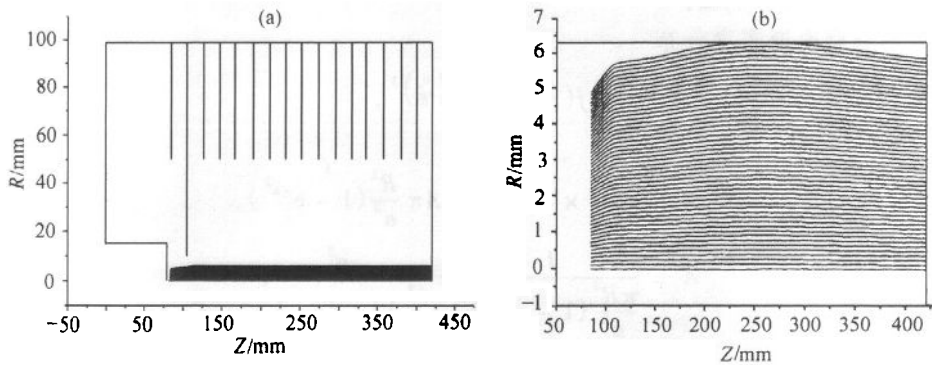


图 4 电子轨迹图

(a) — 温度限制:  $E_n = 1.2 \text{ MeV}$ ,  $I = 80 \text{ mA}$ ; (b) —  $E_n = 1.2 \text{ MeV}$ ,  $I = 80 \text{ mA}$ .

#### 3.4.3 出射斜率的计算(见图 5)

#### 3.4.4 电子初始运动方向(初始角)的影响

前面的计算都是在电子束的初始运动方向与  $Z$  轴一致的情况下进行的.我们也对电子束的初始角取其他值进行了计算.结果表明,它对电子束的聚焦性能的影响很小.

#### 3.4.5 电子热初速度(初始能量)的影响

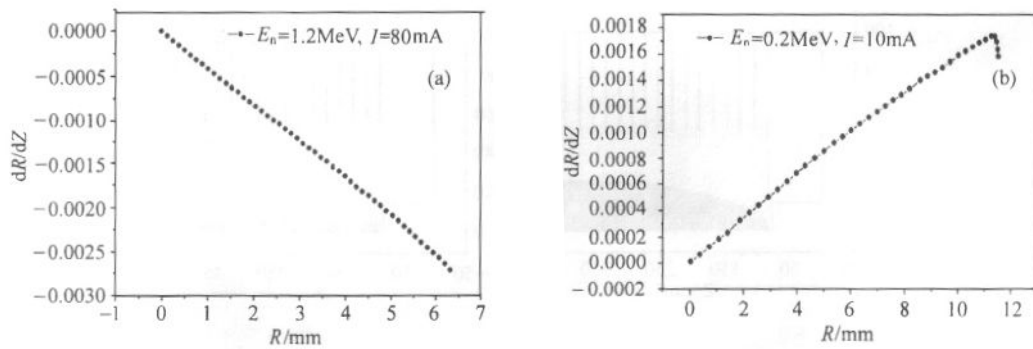


图5 各轨迹的径向大小及出射斜率

在以上计算中,电子束初始能量均为  $1\text{eV}$ . 当把初始能量取其他值时(在每次计算中,电子束都取  $1\text{eV}$  左右的不同值进行计算,结果发现其影响也很小).

#### 3.4.6 阴极平面位置不同而带来的影响

在前面的计算中,阴极平面与加速管的第一电极处在同一平面上,当阴极平面处于不同位置时对电子束聚焦性能的改变情况影响不大.

## 4 结果分析

从轴上电位分布来看,曲线的形状是一样的(在空间电荷限制状态也是这样),但3次多项式拟合的表达式不尽相同. 从电子束出射斜率来看,在工作范围的上限(能量较高),出射斜率几乎都是小于零的很小的数( $|dR/dZ| \leq 0.0016$ );在工作范围的下限(能量较低),出射斜率都是一大于零的很小的数. 由于加速管后面的部分没有聚焦功能,而电子之间有空间电荷的排斥作用,斜率稍小于零对电子束能顺利地通过加速管是有利的. 若斜率稍大于零,说明电子束有发散的趋势,加上空间电荷的排斥作用,电子束会在加速管中稍微发散,这对加速器的安全运行不利. 若能量再低,电子束显著发散. 因此可以认为,加速器在正常工作时,它的能量有一定的要求.

从变梯度管段内通过的束流的最大截面的位置来看,若最大值出现在出射位置之前(即封闭边界之前),此时束流的聚焦性能最好. 如果其位置出现在出射位置附近,此时束流的聚焦性能处于临界位置. 从层流束的半径来看,它们都比阴极半径稍大,这是电子束缓慢聚焦的效果.

从电子初始运动速度(方向和能量大小)来看,除了在极端情况下其影响是很小的.

从阴极平面所处的位置对电子束聚焦性能的影响来看,阴极位置无论稍靠前或靠后,电子束聚焦性能变化不大.

另外,在影响聚焦性能方面,分压电阻的接法也是很关键的一步,因为这涉及到电极的电位问题.

在图4(a)中,分压电阻是从第二个电极开始的. 由图6(a)、图4(a)、图6(b)看出,当分压电阻从第一电极开始时,束流是发散的;从第二个电极开始时,束流是聚焦的;而从第

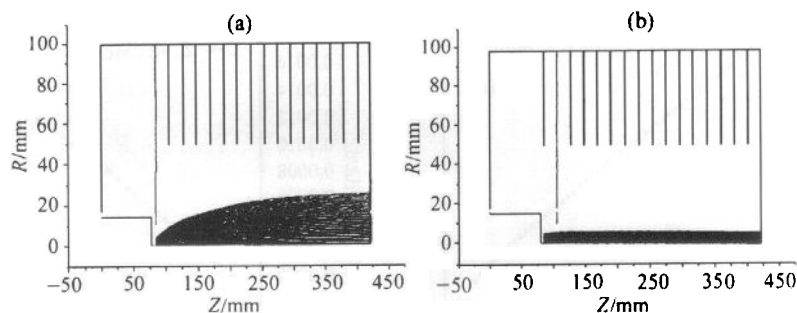


图 6

(a) 分压电阻从第一个电极开始; (b) 分压电阻从第三个电极开始.

(——温度限制:  $E_0 = 1.2 \text{ MeV}$ ,  $I = 80 \text{ mA}$ )

三个电极开始时, 束流出现紊流现象. 因此可以认为在加速器的实际工作状态下, 分压电阻是从第二个电极开始分压的.

### 参考文献 (References)

- 1 Herrmannsfeldt W B. Electron Trajectory Program. Stanford University 1979
- 2 TANG Tian-Tong. Introduction of Applied Charged-Particle Optics. Xi'an: Publishing House of Xi'an Jiaotong University, 1987 (in Chinese)  
(唐天同. 应用带电粒子光学引论. 西安: 西安交通大学出版社, 1987)
- 3 CHU Xuan-Wen, XIE Zhi-Xing. Numerical Analysis of the Electromagnetic Field and Charged Particle Optics System. Hangzhou: Publishing House of Zhejiang University, 1991 (in Chinese)  
(储璇雯, 谢志行. 电磁场及电离子光学系统数值分析. 杭州: 浙江大学出版社, 1991)

## Study on the Electron Optics Property of High-Power Electron Accelerator

YIN Xue-Jun LIU Zhen-Hao

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

CHEN Si-Fu

(Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** This paper studied the electron optics property of a high-power electron accelerator using the improved program based on SC program. Some optimized results were given.

The high-power electron accelerator has many applications in industry. For example, purification of flue gases of thermal power station from Sulphurous oxide and Nitrogen oxide; control and improvement of polyethylene insulation of cables and wires; cleaning of waste water; bactericidal process of grain; presulphuration of tires and study of composite material for soft roofing, etc.

**Key words** cathode, electron accelerator, electron optics

Received 25 June 2001