

电子枪束流截面测量系统

姜海峰 朱希恺 黄建鸣 叶伯年 黄漫莉

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 电子枪束流截面测量系统采用单片机控制步进电机驱动测试丝在束流下快速扫描, 同时完成束流的数据采集, 通过 Matlab 实现立体图的输出, 从而判断电子枪的工作情况。用此系统在 5 mA 束流下进行了测试, 得到了束斑直径(13—14 mm)和截面束流密度矩阵。

关键词 单片机, 步进电机, 电子枪, Matlab

中图分类号 TM930.1, TM930.9

电子枪的束流特性是衡量电子枪性能的一个重要指标。强流电子枪的束流截面测试困难, 主要是因为电子枪流强很大, 测试时间过长, 可能导致探测部分熔化, 同时由于电子溅射等原因可能会导致真空系统不能维持, 进而产生很多问题。但是对电子枪束斑的测试又是十分必要的: 可以在电子枪未与整个加速器系统联机前了解它的性能, 避免由于束斑过大而产生损坏加速管或者钛窗边缘等情况。所以设计了这个测试系统来测试电子枪束流的截面束流密度分布。本系统测试丝可以更换, 在后面的实验中采用直径为 0.6 mm 的测试丝, 步进电机每一步推动丝架移动 0.014 mm, 设计流强为 100 mA, 测试时步进电机速度在 3 k 步/s 以上。

1 测量原理

测试装置如图 1 所示, 主要部件有: 步进电机、法兰、推进螺杆、导轨以及 X 形测试丝架。图 2 为三个不同时间束流与 X 形丝架的相对位置示意图

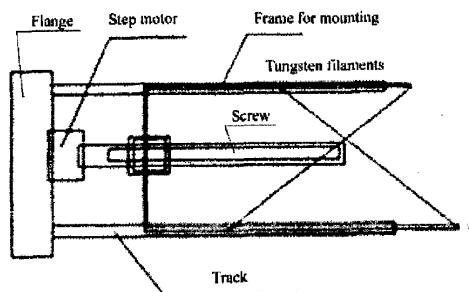


图 1 测试装置

Fig.1 Testing equipment

(图中圆环表示束流; A、B 表示测试钨丝; 箭头表示运动方向)。从图 2 可见, 两根钨丝 A、B 的取向分别相应于束流截面的 X、Y 两个坐标取向。步进电机带动螺杆转动, 从而推动 X 形测试丝架在束流下作往复切向运动。运动方向和 A、B 两丝的方向成 45° 夹角。两根钨丝的交点不在束流的正下方, 所以 X 形测试丝架上的钨丝会分时扫过束流。这样

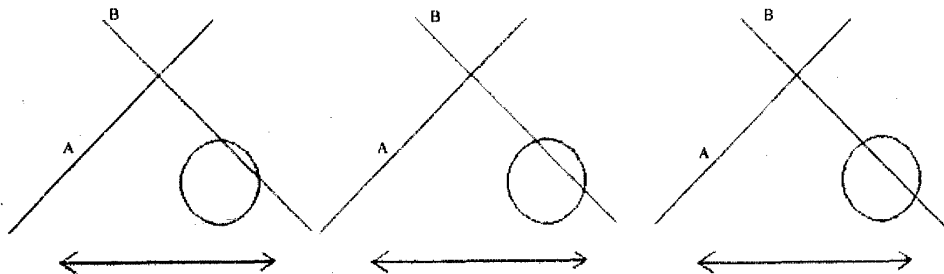


图 2 X 形钨丝的运动

Fig.2 Movement of the X-type tungsten filament

A、B 丝会在扫过束流时导出打在上方的电子,即 X 、

Y 方向上的截面束流密度的积分 $F_X = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X,Y} dy$ 、

$F_Y = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X,Y} dx$; 这种方式属于单丝扫描的改进形

式^[1,2]。首先可以通过这两个电流曲线得到束流的包络,其次根据这两个曲线可以计算出束流截面的密度分布。具体计算如下:首先设 $Y_{n,n}$ 矩阵为束流截面电流密度分布矩阵,其中束流的中心位置为

$y_{\frac{n+1}{2}, \frac{n+1}{2}}$, 也就是矩阵的中心; $F_X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$,

$F_Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ 是通过测出的 X 、 Y 丝扫过电子束流时测出的数据处理得出。则有:

$$F_X = Y \times (1, 1, \dots, 1)' \quad (1)$$

$$F_Y = Y' \times (1, 1, \dots, 1)' \quad (2)$$

其次根据束流的轴对称特性(椭圆形分布)改造 Y 矩阵, 设 $a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n$ 为通过束流中心的 X 、 Y 两个方向的电流密度, 也就是 $2n$ 个待定系数: 设:

$$r = \left[\sqrt{\left(x - \frac{n+1}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{n+1}{2}\right)^2} \right] \quad (3)$$

r 为该点到束流中心的距离, 外面的括号取整运算符。

$$\text{当 } r > \frac{n+1}{2} \text{ 时, } Y(x, y) = 0 \quad (4)-1$$

$$\text{当 } r \leq \frac{n+1}{2} \text{ 时, } x, y < \frac{n+1}{2} \text{ 则}$$

$$Y(x, y) = \frac{\left|x - \frac{n+1}{2}\right| b_{\frac{n+1}{2}-r} + \left|y - \frac{n+1}{2}\right| a_{\frac{n+1}{2}-r}}{\left|x - \frac{n+1}{2}\right| + \left|y - \frac{n+1}{2}\right|} \quad (4)-2$$

$$x > \frac{n+1}{2}, y < \frac{n+1}{2} \text{ 则}$$

$$Y(x, y) = \frac{\left|x - \frac{n+1}{2}\right| b_{\frac{n+1}{2}+r} + \left|y - \frac{n+1}{2}\right| a_{\frac{n+1}{2}-r}}{\left|x - \frac{n+1}{2}\right| + \left|y - \frac{n+1}{2}\right|} \quad (4)-3$$

$$x, y > \frac{n+1}{2} \text{ 则}$$

$$Y(x, y) = \frac{\left|x - \frac{n+1}{2}\right| b_{\frac{n+1}{2}+r} + \left|y - \frac{n+1}{2}\right| a_{\frac{n+1}{2}+r}}{\left|x - \frac{n+1}{2}\right| + \left|y - \frac{n+1}{2}\right|} \quad (4)-4$$

$$x < \frac{n+1}{2}, y > \frac{n+1}{2} \text{ 则}$$

$$Y(x, y) = \frac{\left|x - \frac{n+1}{2}\right| b_{\frac{n+1}{2}-r} + \left|y - \frac{n+1}{2}\right| a_{\frac{n+1}{2}+r}}{\left|x - \frac{n+1}{2}\right| + \left|y - \frac{n+1}{2}\right|} \quad (4)-5$$

这样可以近似满足轴对称的特性。根据式(3)、(4)可以得到式(5)。其中 $K_{(x,y)_n}$ 为求出的常数。如何求出 $a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n$ 呢? 用与上面类似的方法可以构造 $T(n, n)$ 矩阵近似表示束流截面电流密度分布矩阵, 使之满足轴对称(圆形分布), 也就是设(5)式满足 $a_k = b_k, k \in (1, \dots, n)$, 并用 a_k 来表示 b_k , 则 $Y(n, n)$ 矩阵就变为了 $T(n, n)$ 矩阵(见(6)式)。

$$Y(n, n) = \begin{pmatrix} K_{(1,1)_1} a_1 + K_{(1,1)_2} a_2 + \dots + K_{(1,1)_{2n}} b_n & \dots & \dots \\ \vdots & K_{(x,y)_1} a_1 + K_{(x,y)_2} a_2 + \dots + K_{(x,y)_{2n}} b_n & \dots \\ \vdots & \vdots & K_{(x,n)_1} a_1 + K_{(x,n)_2} a_2 + \dots + K_{(x,n)_{2n}} b_n \dots \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$T(n,n)=\begin{pmatrix} K_{(1,1)_1}a_1+K_{(1,1)_2}a_2+..+K_{(1,1)_n}a_n & \cdots & \cdots \\ \vdots & K_{(x,y)_1}a_1+K_{(x,y)_2}a_2+..+K_{(x,y)_n}a_n & \cdots \\ \vdots & K_{(x,n)_1}a_1+K_{(x,n)_2}a_2+..+K_{(x,n)_n}a_n & \cdots \end{pmatrix} \quad (6)$$

根据式 (1)、(6) 可知存在 $H(n,n)$, 满足:

$$H\times(a_1, a_2, ..., a_n)'=T\times(1,1,...,1)'$$
$$=Y\times(1,1,...,1)'=(x_1, x_2, ..., x_n)'$$

(7)

并可以证明 $H(n,n)$ 是可逆矩阵, 则:

$$(a_1, a_2, ..., a_n)'=inv(H)\times(x_1, x_2, ..., x_n)'$$

(8)

inv(H)是 H 的逆矩阵。同理有:

$$(b_1, b_2, ..., b_n)'=inv(H)\times(y_1, y_2, ..., y_n)'$$

(9)

得到的结果代入式 (5), 即得到截面电流密度分布。这个结果满足椭圆形分布及等式 (1)、(2)。这个算法的实质也就是我们用待定系数的方法求出的一个符合试验结果,并接近于轴对称的电流分布。因为系统的轴对称性,所以我们有理由相信这个结果比较接近实际分布。

2 测试系统

2.1 硬件

电子枪束流截面测试系统硬件包括马达控制器、电源、单片控制测试系统、计算机,其中主要部分是单片控制系统。该系统原理如图 3 所示。

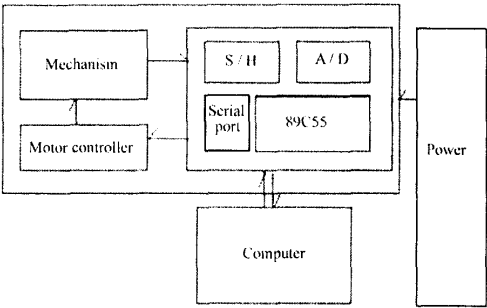


图 3 测试系统
Fig.3 Test system

马达控制器的功能是电流功率放大,也可以采用马达控制芯片来实现;计算机与单片机采用三线连接方式,即地线、RXD、TXD;其中单片机控制部分是核心,主要功能为接收计算机的命令、驱动马达控制器、采集数据、存储数据、采集结束后统一把数据传到计算机;在计算机内完成计算分析。单片机部分原理如图 4 所示。Atmel 89C55 单片机含 12 M 晶振、串行口、3 个定时器、2 个外部中断、256 字节 RAM、20 k 的 Flash, 因为 Flash 比较大所以无需外加程序存储芯片,可以简化设计。Max202 为 TTL 电平与 RS232 电平转化芯片,该芯片使用广泛,电路也比较简单,只需加 4 个 0.1 μ f

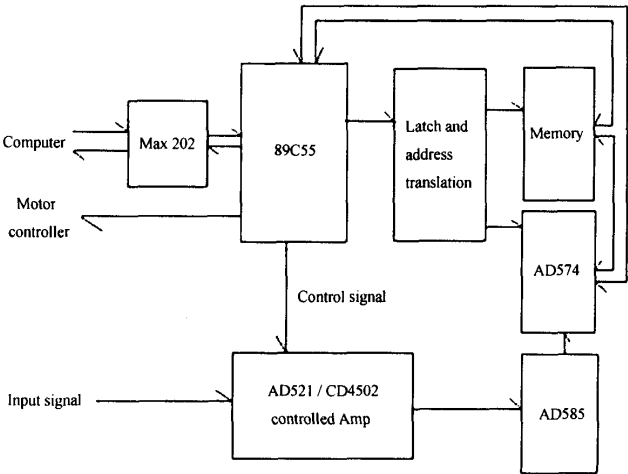


图 4 单片机部分
Fig. 4 Section of microcontroller

的电容即可;存储器为 62C256 (32 k),用于存放采集到的数据;AD574 为逐次比较形 12 位模数转换器,所以必须与 AD585 (holder)相配合使用。AD 的读取采用读存储器方式,通过地址译码电路(74ls00)进行控制^[4]。电流信号可能比较弱,所以采用了程控放大器,由 AD521 (仪表放大器)\CD4502 (模拟开关)组成^[5]。

2.2 软件

系统的软件部分如图 5 所示。图中 1 指的是单片机与计算机的软件通讯部分;计算机部分用 MFC 的 DCB 类进行通讯; 2 指的是 VC++与 Matlab 的通讯部分,本系统采用的是用 Matlab 引擎技术实现立体图显示。其原理是采用客户机/服务器 (client /server)的计算方式^[6,7],通过 Windows 的 Active X 通道与 Matlab 接口。VC 作为前端机通过 Matlab engine 在后台与 Matlab server 建立连接。这种方法实现简单,但是 Matlab 要在后台运行。计算及显示程序模块在 VC++中,但矩阵计算模块实际上是由 Matlab 在后台完成。先对两个方向的数据进行计算,每个点的数据用算术平均的方法得到并显示,然后计算出束流截面密度分布并进行三维图像的显示。

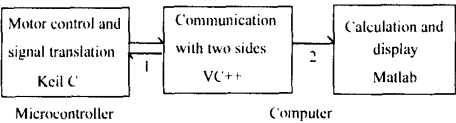


图 5 系统的软件
Fig.5 Software system

3 结果和讨论
3.1 试验结果及分析

用此测试系统对强流电子枪进行了测试。由于真空系统不是很好,故没有在大束流情况下测试,选用了 18、14、5 mA 时在电子枪出口 32 cm 处进行测量。

图 6 两个峰分别为 X、Y 方向扫描时得到的数据,纵轴数据为所测电压值,横轴数据为测试丝所移动的距离;可由此计算得到晕斑直径大小为 13—14 mm、主斑直径大小为 7—8 mm。因为是简易实验装置,精度还需要进一步改进提高,但目前机械的精度还是在 0.1 mm 以上。根据测试的实际波形分析,束斑大小测试的精度在 1 mm 以上。图 7 为 5mA 时束流 3-D (a) 和 2-D (b) 密度分布图。

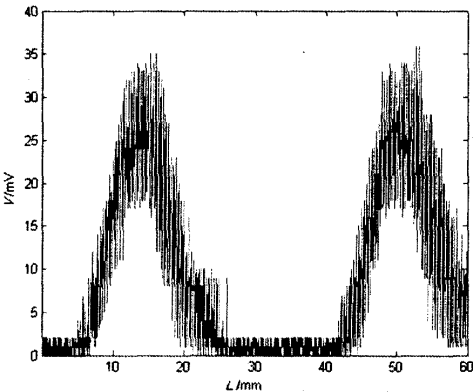


图 6 5 mA 时原始数据采集图
Fig.6 Collected data at a beam current of 5 mA

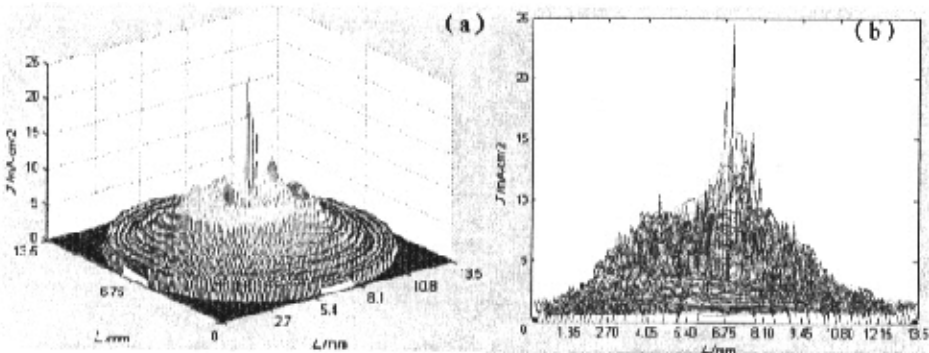


图 7 5 mA 时束流 3-D (a) 和 2-D (b) 密度分布图
Fig. 7 The 3-D(a) and 2-D (b) beam current distributions for a 5 mA beam

图7中纵坐标为电流密度值,横坐标为束流横截面的尺寸。从数据分析结果来看,所测得的束斑轮廓与以往用钛板打孔方法所测得的基本相同,电流密度分布变化平滑、无负值,说明此测试系统所测结果合理,可以完成在线监测电子枪情况的任务;而且所测数据可用于进一步研究电子枪束流理论。

3.2 系统误差

(1)束流截面密度分布算法是基于束流椭圆形分布,且 X 、 Y 方向是椭圆的两个轴向的假设;真实的束流虽然应该近似于圆形,但不会完全与假设相吻合。(2)因为每步移动距离小于测试丝的宽度,所以由原始测试数据计算 F_x 和 F_y 会有一些误差。(3)由于溅射等原因也会产生一些误差。

参考文献

- 1 Jeicki S WoH, Mladenov G, Vacuum, 2000,58: 523—530
- 2 张华顺,万春侯,王耿介,等编著.离子源和大功率中性束源.北京:原子能出版社.1987.322—325

ZHANG Huashun, WAN Chunhou, WANG Gengjie, *et al.* Ion source and high-power neutral beam source. Beijing: Atomic Energy Press. 1987. 322—325

- 3 The Atmel Inc, 8-bit Microcontroller with 20k Bytes Flash AT89C55WD <http://www.atmel.com>
- 4 The Intel Inc, Analog Data I/O Solutions for Intel 8xC196NP Microcontrollers Application Note (AP-707). 2000, Order Number:272658-002
- 5 马明建,周长城,编著.数据采集与处理技术.西安:西安交通大学出版社.1998,48—100
MA Mingjian, ZHOU Changcheng. Data collection and processing technology, Xi'an:Publishing House of Xi'an Jiaotong University. 1998. 48—100
- 6 The MathWorks Inc. Matlab Application Program Interface. 1998
- 7 陶红,袁金荣.计算机工程与应用,2000,(10):100,101,104
TAO Hong, YUAN Jinrong. Computer Engineering and Application,2000(10): 100,101,104

A system for measuring transverse beam of electron gun

JIANG Haifeng ZHU Xikai HUANG Jianming YE Bainian HUANG Manli

(Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A test system for measuring the transverse beam of a high power electron gun is introduced. This system adopts Matlab to realize the output of 3-D figure and AT89C55, which controls a step motor to drive wires scanning rapidly across the electron beam and collect data at the same time. With the system one can judge the operation conditions of the electron gun. By means of this system, 5 mA beam was measured, and the beam diameter (13—14 mm) and the profile current matrix were obtained.

Key words Microcontroller, Step motor, Electron gun, Matlab

CLC TM930.1, TM930.9