

微机控制的电子束能量密度分布测量装置的研究

曾 戎工学硕士 丁培璠工学博士、高工

(北京航空工艺研究所)

摘要

本文叙述了微机控制的、用电子束扫描小孔的电子束能量密度分布的直接测量方法。该装置采用DMA双通道的数据采集系统,使用2MHz时钟的微机和2个5μs转换时间的A/D转换器,数据采集速率达400kHz。采集的数据经数据处理后,获得电子束能量密度分布的立体图和等位面曲线。为电子枪性能的评定,研究电子光学系统的理论计算与实际的差异和研究电子束的加工工艺性,提供了准确有效的手段。

主题词 wei neng ce
微机控制 能量密度 测量装置

0 序 言

电子束能量密度分布是直接影响焊缝成形和反映电子枪理论设计合理性的要素,在电子束的参数中是最为重要的。对于焊接来说,电子束焦点具有高的能量密度和小的收敛角,才能使电子束具有更好的穿透力,减小热量散失,获得理想的焊缝。因此有必要研制合理的电子束能量密度分布测量装置,以便进一步进行分析研究。

在过去的几种方法中^[1,2],都存在着各自的缺陷。经过分析比较后,采用了电子束扫描小孔的直接测量方法^[3]。其原理如图1所示:电子束快速扫过孔径很小的小孔,从小孔下方的法拉第筒上得到穿过小孔的电子束信号,该信号放大后进行模数转换,转换后的数据存储在存储区内,读出后进行数据处理。整个测量装置由一台Z80单板机控制执行。

在测量过程中,如图2所示,电子束以一确定速度扫过小孔(x方向),进行一次

测量记录；然后在垂直方向（y方向）偏转电子束一次，改变电子束与小孔的相对位置，进行下一次测量。这样进行多次测量，当整个电子束都扫过小孔后，则可得到电子束能量密度分布的数据。

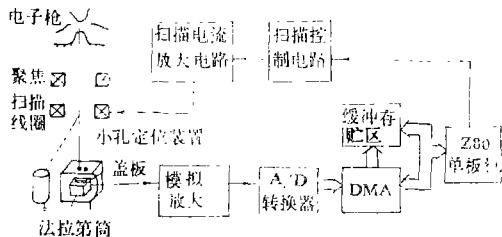


图1 电子束能量密度分布测量装置原理图

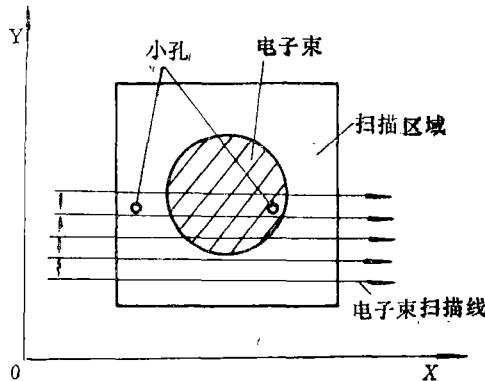


图2 电子束扫描小孔测量法示意图

1 测量装置

测量装置原理如图1。接收器除小孔板用高熔点材料钼外，其余都由铜制成，在钼板上打有两个 $\phi 0.05\text{mm}$ 的小孔。小孔下放法拉第筒，筒上设计有一个开着细槽的盖板，以减少二次电子发射和反射电子产生的误差。测量装置的数据采集系统的工作方式和时间、x和y方向的电子束扫描都由Z80单板机控制。

1.1 电子束扫描装置

电子束的扫描线圈绕制在软磁铁的两对相互垂直的极靴上。由于本测量装置是依靠扫描电子束来改变接收器小孔与电子束的相对位置的，而且本实验所用的电子束焊机加速电压采用的是单相晶闸管控制、倍压整流方式，使束流呈50Hz的波动。为保证测量数据的可靠性，要求扫描装置具有下列性能：

- ① X扫描的起始时间可控；
- ② 锯齿波扫描电流有较好的线性度；
- ③ 扫描范围能够满足测量的需要。

这里，扫描是由Z80单板机控制的。y扫描在x方向扫描每进行完一次测量后，微机改变一次偏转量，信号输出给D/A转换，再经电流放大后，使电子束偏转增加一个固定量。

X扫描锯齿波发生器如图3所示，扫描的开始时刻由微机的软件设定。由于在网路周期内进行测量，微机检测网路信号过零，经延时后，通过PIO发出X扫描开始信号，则控制了X扫描与网路电压的同步，保证每次测量处在相同的相位和束流值上，如图A所示。微机通过PA₂发出驱动脉冲使比较器翻转，输出的方波经单相积分器积分，得到线性

很好的锯齿波。由运算放大器组成的积分器积分常数为 $A_0 R C$ ，其最小积分常数 $\tau_{min} = 11.2s$ ，而测量周期在20ms之内，因此得到的锯齿波具有很好的线性度。积分器积分常数可调，以便确定电子束的扫描速度。

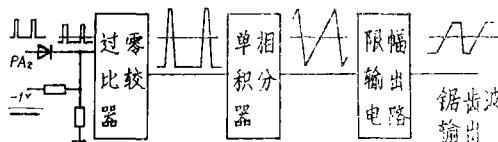


图3 X扫描锯齿波发生器原理图

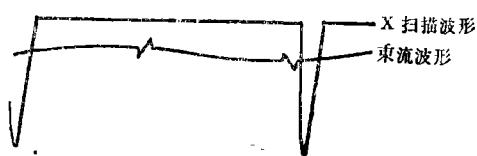


图4 测量时的X扫描波形与束流波形

扫描电流放大是一个对称的甲乙类功率放大电路，改变输出级负载电阻可调节输出电流的大小，以满足测量范围的要求。X扫描线圈电感为3.5mH，在实际测量过程锯齿波扫描时间仅10ms，因此其感抗很小，远小于输出级负载电阻，则输出级可说是电阻性负载，线圈电感产生的微小非线性可忽略不计。当输入为一锯齿波电压时，不考虑晶体管的失真。其输出集电极电流亦是与输入电压波形完全相同的锯齿波。实际测量的扫描电流如图5所示，非线性极小。

综上所述，所设计的电子束扫描装置满足了测量的要求，X扫描的同步性克服了束流波动的影响，并且有好的线性度，保证了每次测量时的束流特性基本不变。

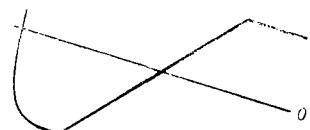


图5 X扫描电流波形

1.2 数据采集系统

数据采集是本测量装置的一个重要环节，它决定了测量电子束的范围及测量精度。只有足够高的采集速率，才能使接收器的小孔不被熔化，而影响测量精度。其功能是把接收器接收到的电子束能量密度分布信号，由模拟量转换为数字量，且存入指定的存储区中。

数据采集系统的采集速率通常取决于3个因素^[4]：①输入模拟量的最高频率，采集速率须满足采样定理；②多路开关及采样保持的响应时间 τ_1 ；③A/D转换时间 τ_2 及数据存储的时间 τ_3 。因此采集系统的上限速率由下式决定：

$$f_o = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} \quad (1)$$

由式(1)得出，高速数据采集系统除了选用高速器件外，关键是减小数据存储时间，选择高速数据传送方式，如DMA技术或双端RAM技术。

通常应用DMA技术，是直接把DMA与CPU相连，在DMA工作时，CPU让出总线，使CPU利用率下降。如果DMA一直在工作，则在该期间内，CPU无法工作。这里，CPU在数据采集期间，还要控制电子束的扫描，因此设计了具有独立总线运动结构的、双DMA进行数据传送与CPU相对独立的高速数据采集系统。其结构如图6所示。

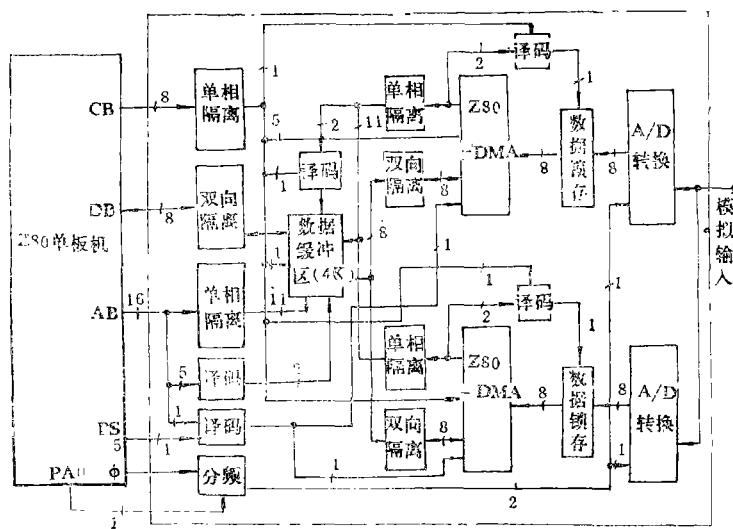


图6 高速数据采集系统方框图

利用三态门隔离总线,使数据采集系统在数据采集期间,有其与CPU相对独立的总线,相互间不产生影响。只有在非采集期间,CPU才可以读写缓冲存贮区及DMA。数据采集周期信号是由CPU通过PIO发出,采集期间DMA按照程序设定的方式进行数据的传送。

本系统采用了TP801作为微机系统。A/D转换器和采样保持器为ADC-EH8B1和SHM-2E。ADC-EH8B1是8位逐次比较的高速转换器,最大转换时间为 $4\mu s$;采样保持器SHM-2E的建立时间为 $1\mu s$,保持电压下降率为 $50\mu V/\mu s$ 。这里采用了两组A/D转换器和采样保持器并行工作结构,按器件最高速度状态工作,每组需 $5\mu s$ 转换一个数据。转换的启动为硬件方式,每 $2.5\mu s$ 启动其中的一个A/D转换器,即在每 $2.5\mu s$ 内完成一个数据的采集。

高速度的数据传送是利用DMA完成。为了能达到A/D器件的最高转换速度,又不丢失数据,确保数据的传送,采用了双Z80-DMA进行。这里设计的DMA传送时间恰好是A/D转换器下一个数据的转换周期。实现方法如下:由于ADC-EH8B1并行输出口在转换完之后,把数据保持在数据总线上直到下一次转换为止。在此采集系统中,A/D转换占 $4\mu s$,采样为 $1\mu s$,所以ADC数据输出保持时间也是 $1\mu s$ 。为此,利用具有3态输出寄存器在采样期间内,把转换好的数据寄存起来,则不会在下一个数据转换时,丢失已转换好的数据。这样在A/D转换下一个数据的 $4\mu s$ 内,DMA从寄存器中读出数据,并按指定地址存入存贮器中。

这里采用的Zilog公司的Z80-DMA,可以方便地利用程序确定其工作方式,控制功能很灵活。其工作方式由程序确定后,在接到数据准备就绪RDY信号有效时,DMA发出总线请求信号BUSRQ。当DMA得到总线回答信号BAI之后,即按规定工作方式进行操作。本系统的DMA工作方式选择如下:

- 工作方式：连续工作方式；
- 操作类型：A口（I/O）到B口（存贮器）数据传送；
- RDY信号：高电平有效；
- 数据长度： $\leq 2k$ 字节（根据需要设定）。

由于Z80-DMA与Z80-CPU的时序完全相同，其标准I/O口读和存贮器写各需4个和3个时钟周期，对于2MHz时钟，一个数据的传送需要 $3.5\mu s$ 。因此，仅用一个DMA对两个ADC的数据进行传送，势必降低采集速率，而一个DMA负责一个ADC的数据传送则恰好可以在下一个数据转换完之前完成。两个DMA有各自的I/O读总线，在写操作时享有共同总线结构，以避免两个DMA抢占总线情况出现。

如前所述，采集系统选用了独立总线结构，它不与CPU的总线请求和总线应答信号相连，因此DMA需要自身的总线应答信号逻辑电路。实践证明，如果单纯把 $\overline{\text{BUSRQ}}$ 与 $\overline{\text{BAI}}$ 相连，DMA不会工作。其原因可能是DMA发出 $\overline{\text{BUSRQ}}$ 之后，其内部硬件电路进行下一步——询问 $\overline{\text{BAI}}$ 是否有效需要一定的时间，若直接相连，则DMA询问 $\overline{\text{BAI}}$ 时已经有效，误判断为上一次操作还在继续进行，故不会接收这次RDY信号的请求。实验得到，只有当 $\overline{\text{BUSRQ}}$ 有效，延时 $0.2\mu s$ 以上时 $\overline{\text{BAI}}$ 有效，DMA方接收请求工作。本系统的DMA总线响应逻辑电路及波形如图7所示。

该电路利用ADC的转换结束信号EOC反相后进行积分，然后将积分器电压反相，只有当 V_c 达2.4V左右时反相器才翻转，这样就起到了延时作用。由于本系统的总线独立，即可以把 $\overline{\text{BUSRQ}}$ 和 $\overline{V_c}$ 负逻辑与作为 $\overline{\text{BAI}}$ ($\overline{\text{BAI}} = \overline{\text{BUSRQ}} + \overline{V_c}$)。

实践证明，通过独特新颖的设计方法，这种具有独立总线结构的数据采集系统的最大特点，就是数据的传送利用了A/D转换周期进行，使传送时间不占在采集时间内，对于式(1)， $\tau_3=0$ ，即有 $f_o=\frac{1}{\tau_1+\tau_2}$ ，达到了所用器件的最高转换效率。此外，利用所具有的独立总线结构和DMA的独立操作能力，使采集系统的工作不影响CPU的操作，CPU可以控制整个电子束能量密度分布的整个测量过程，达到一机两用的目的。

2 计算机的数据处理

如图2所示，电子束能量密度分布的测量在带有两个小孔的钼板上进行，其目的是为了确定所测的数据范围，以及每次测量中X扫描的速度。这样即使某种偶然因素使X扫描速度改变，在数据处理过程中，经过计算，可根据所测得的数据按照规定的速度要求拟合出所需的数据。另外，由于测量时间短暂，对线性不甚理想的X扫描，可用两个小孔来计算实际的每次测量的扫描速度。

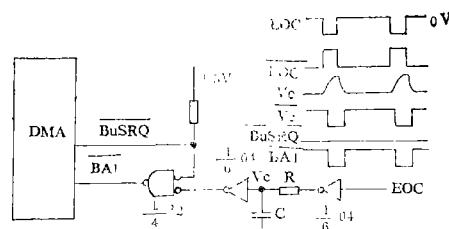


图7 DMA的 $\overline{\text{BAI}}$ 逻辑电路及波形

本测量装置所测的电子束能量密度分布是一组三维的离散数据，从这些数据中直接进行分析是十分困难的。因此把这些数据进行处理，以直观、形象化的图形来表示电子束能量密度分布的外形及特征。通过立体图，可对电子束能量密度分布的全局有非常直观的概念；通过包络面积中电流所含比例相等的等位面曲线图，不仅有全局分布的概念，还易于从中检出所需要的数据。这样就可以直观地分析电子束能量密度分布的形态、焦点几何形状及其尺寸。

立体图最为形象的是网格式立体图。在立体图的作图中，最关键的是消除隐藏线问题，必须对那些不可见的点和线进行处理，画成虚线或干脆不画，这样才能得到清晰的、立体感强的立体图。

为了能方便地消除隐藏线，所作的画法首先是把图8所示的数据点的正方网格位置阵点转换成菱形的网格阵点，其各交点在x—y两个垂直方向相对应（如点划线所示），然后把测得的数据 $P(I, J)$ 值按相应点加到其在菱形网格的y值上，依照由近至远原则，如果该点y值大于同一x值的，前面已经处理过的最大值时，该点为可见点，反之为不可见点，不画出。立体图作图程序的原则如下：

- ①置各x值点上的最大值为零；
- ②坐标变换，计算菱形格的各点x、y值；
- ③把输入的 $P(I, J)$ 值加到各相应点上；
- ④ $i = n \sim 1$ 循环， j 依次增量变化，判断可见点，如果其中有不可见点，则求出父点，并使绘图机用直线逼近作图，直到该行各点完全结束；
- ⑤ $j = 1 \sim n$ 循环， i 依次减量变化，作法与④相同。

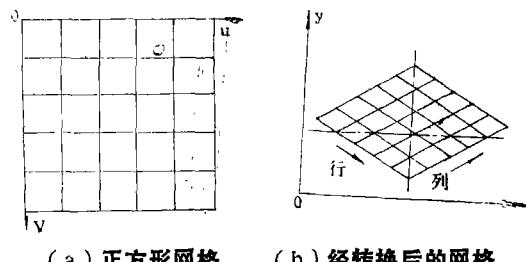
等位面曲线图能直观地分析不同能量时的电子束能量密度分布状态及电子束焦点几何尺寸。计算机等位面曲线作图程序原则如下：

- ①以测得的束流分布图形，近似计算出其体积，即束流；
- ②以某一定值 P_0 横截电子束能量密度分布，算出所截得的曲线包含的束流百分比；
- ③以行作循环，求出所测束流分布 $P(I, J)$ 与 P_0 的交点；
- ④连接各交点，即含束流某百分比等位面曲线；
- ⑤改变 P_0 值，可作出不同百分比束流的等位面曲线。

上述的计算机软件均用 BASIC 语言编写。

3 测量结果

利用本装置进行了电子束能量密度分布的实际测量。电子束扫描小孔的速度为 60 m/s，作为数据处理的有效数据点为 20×20 点，测量范围为 $3 \times 3\text{mm}^2$ ，每次电子束扫过



(a) 正方形网格 (b) 经转换后的网格

图8 网格图的坐标变换

小孔进行测量时，恰好是网路电压过零之时。电子束参数为：加速电压30kV，束流20mA，聚焦电流465mA，灯丝电流6.8A。

实测的结果，经过数据处理后如图9和图10所示。从图中看出，所测电子束出现双峰现象，并有杂散的电子束分布，此外电子束的分布形状也不规则。这种现象的产生，是由于电子枪的灯丝使用时间过长，使灯丝的电子发射不均，加之电子枪的合轴情况不佳等因素造成的。由于灯丝的加工未能保证发射面的正方形形状，使得电子束形状为长形分布。除此，实验用的焊机的偏压调节为晶闸管控制，在大束流时，导通角很小，偏压很难完全平稳，这几个因素促使电子束的形状不可能通过偏压杯后，使电子束的形状为圆形。因此，要获得优良的电子束，除必须要有设计合理的电子枪外，电子枪的精确调整也是一个重要的因素。

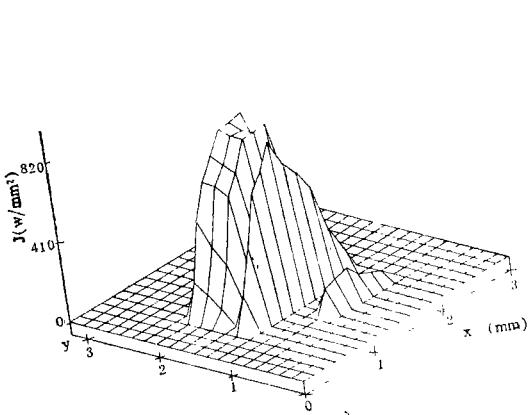


图9 实测的电子束能量密度分布立体图

($u_a = 30\text{kV}$, $I_b = 20\text{mA}$)

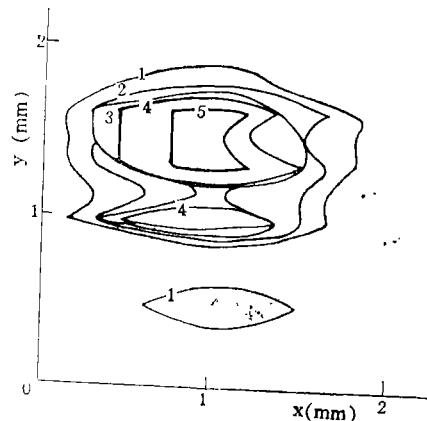


图10 实测的电子束能量密度分布的等位面曲线

($u_a = 30\text{kV}$, $I_b = 20\text{mA}$)

注：图中数字表示各曲线包围的束流百分比

1. 90.8065 2. 79.8114 3. 70.0802 4. 60.5543 5. 45.2357

本测量装置从原理上讲，可适用于各种类型的电子枪，如高压枪、中低压枪。而其测量范围主要是由测量装置的数据采集系统的采集速率所决定，如果采集速率足够高，则可以加快电子束的扫描速度，不至于熔化接收器的小孔。本测量装置若更换更快速的A/D转换器，并作某些适当的改动，也能适用于大功率的电子束能量密度分布的测量。

4 结 论

- 选择了合理的测量电子束能量密度分布的方法，制作出了测量装置，并进行了实测。
- 设计了独特的、具有双DMA独立总线结构的高速数据采集系统，硬件启动两个ADC，采用系统时钟为2MHz的微机，采集速率达400kHz。

3. 采用计算机控制y扫描和x扫描的同步，可使每次测量都处在束流的同相位和等值上，使束流特性基本不变，保证了测量的准确性。

4. 整个测量装置由一台Z80单板机控制，包括测量的程序执行、数据采集、电子束扫描等。

5. 用计算机数据处理，绘出所测量的电子束能量密度分布的立体图及等位面曲线图，并对测得的结果进行了分析。

(1987年12月7日收到)

参考文献

- 1 入江宏定等. 溶接学会誌. 1977, 46(9) : 34~40
- 2 Eugene Edwards. Power Distribution for EBW. NASA CR—161511, 1980.
- 3 Depner K, et al. Automatic measurement of the power Density Distribution of the EB in EBW Machines (in Germany). DVS-Berichte Band qq, Düsseldorf, 1985.
- 4 周明德. 微型计算机硬件软件及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1983.
- 5 沈兰荪. 微机数据采集系统(第九讲) —— 高速数据采集系统. 电子技术应用, 1986(9) : 36
- 6 杨学平. 计算机绘图技术. 北京: 电力工业出版社.
- 7 应根裕. 电子光学. 北京: 清华大学出版社, 1984.

A STUDY OF THE MEASURER FOR THE POWER
DENSITY DISTRIBUTION OF ELECTRON BEAM
UNDER MICRO-COMPUTER CONTROL

M.-Eng Zeng Rong, Dr.-Eng Ding Peifan

(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute)

Abstract

This paper describes a micro-computer controlled method of measuring the power density distribution of EB by scanning the beam over a pinhole. This is a direct measurement for an EB. A DMA with 2 channels was used for the data-accessing of the measurer. With this technique, the data-accessing rate can run up to 400 kHz, when a micro-computer with 2 MHz clock and two A/D converters with 5 μ s converting rate were used. After data-processing, the direct and easily analyzed power distribution figures of profile and "isohypse" can be obtained. The authors provide thus an accurate and effective method of assessing the EB gun, investigating the difference between the theoretical computation and the objective reality of the electron optical system and researching the process technology of EB.

Key words Micro-computer control Power density Measurer