

# 电子辐照用的一种扫描仪

郭学义

(上海先锋电机厂)

用于电子辐照的扫描仪是电子加速器的重要装置。为了进一步改善辐照剂量的均匀度,提出了由三角波和正弦波合成的电流所产生的扫描磁场,使扫描均匀度有所提高。

用于高能电子辐照的扫描仪是辐照电子加速器中的重要装置之一。为进一步提高辐照剂量均匀度,我们采用三角波形和正弦波形的合成波所产生的磁场,取得了显著的效果。本文对扫描仪线路作一简要的介绍,并对合成波形进行适当的理论分析,最后列出所取得的一些实验测试数据。

## 一、扫描仪电路特点

本电路适用范围:电子束能量  $0.3 \sim 2\text{MeV}$ , 扫描频率  $50 \sim 200\text{C/sec}$ , 扫描宽度  $40 \sim 150\text{cm}$ ,

剂量均匀度可达百分之九十以上。

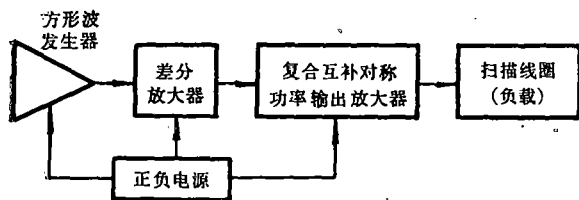


图1 扫描仪电路方块图

整个电路由五部分组成,如图1所示。扫描仪详细电路图如图2所示,为了使装置尽可能小型化,前级采用5G23J固体电路组件,由它构成一个对称的方形波发生器。为减小由电感性负载的失真,采用了复合互补对称功率输

出放大器。为提高扫描均匀度(后面我们将要分析),利用三角波形与正弦波形叠加成的合成波形,这样可使电子束扫描不均匀度减小到百分之一左右。由  $R_{14}$ 、 $R_{15}$  和  $C_{10}$ 、 $C_{11}$  组成的负反馈网络可以改善电路的失真和频响特性,从而得到较好的合成波形。改变电容  $C_{10}$  的数值可改变合成波的波形。本电路在电子加速器上使用,经测试辐照均匀度能达到百分之九十以上,已能满足工业辐照的要求。

## 二、扫描偏转线圈的结构与形状

偏转扫描线圈如图3所示。扫描线圈结构与形状直接影响到扫描均匀度。偏转磁场的均匀性由合理的分布线匝来取得,线匝的分布应当是不均匀的,线圈截面要按余弦分布。目前,国内一般辐照用电子加速器的能量在  $0.3 \sim 2\text{MeV}$ , 偏转线圈安匝数为几百匝,激磁电流为几安培,所用线径粗,线圈外形尺寸大,所以线圈截面要按余弦分布,窗口大小选择要适当。为了减小线圈两端磁场边缘效应对电子束聚焦的影响和增加偏转线圈的有效长度,把线圈两端

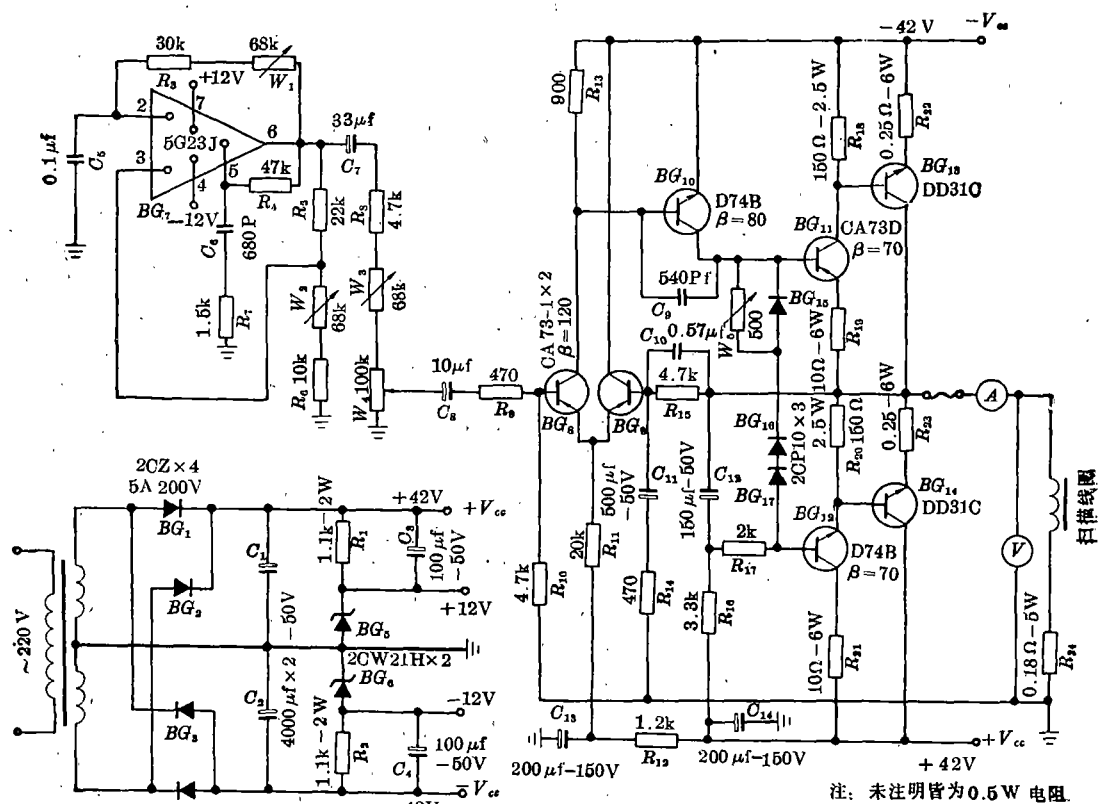


图 2 电子加速器扫描电路图

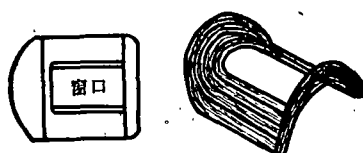


图 3 偏转扫描线圈

向外翘起成马鞍形。但马鞍形扫描线圈的绕制比较难，我们采用手工绕制，经模子整形，效果较好。

### 三、高能电子受磁力作用后的运动描述

高能电子在均匀磁场中运动，受到磁力作用，使电子沿圆周运动，其半径为：

$$R = mv / eB \quad (1)$$

式中： $R$ ——电子偏转半径(cm)， $B$ ——磁感应强度(Gs)， $m$ ——电子的运动质量(g)， $v$ ——电子的运动速度(cm/sec)， $e$ ——电子的电荷(C)。

因为电子在高速情况下运动，其速度接近光速，应考虑相对论修正。在我们所制的扫描仪中，电子束经过一个有限范围磁场，其运动轨迹如图 4 所示。从图 4 很容易得出：

$$X_L = X_i + (L - l/2) \cdot \tan \theta \quad (2)$$

$$\sin\theta = l/R \quad (3)$$

$$X_l = R(1 - \cos\theta) \quad (4)$$

式中,  $l$ ——均匀磁场纵向区域 (cm),  $\theta$ ——偏转角度,  $L$ ——扫描线圈中心至辐照平面的距离 (cm),  $X_L$ ——电子束在辐照平面偏离中心的距离 (cm),  $X_l$ ——电子束在出磁场区域处偏离中心的距离 (cm)。

将(3)式与(4)式代入(2)式, 得:

$$X_L = (1 - \cos\theta)l/\sin\theta + (L - l/2) \cdot \tan\theta \quad (5)$$

利用三角关系, 将(5)式改写为:

$$X_L = (1 - \sqrt{1 - \sin^2\theta})l/\sin\theta + (L - l/2)\sin\theta/\sqrt{1 - \sin^2\theta} \quad (6)$$

为了计算方便起见, 我们令:

$$\rho = \sin\theta = eBl/mv \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式, 经整理后得:

$$X_L = (L + l/2)\rho/\sqrt{1 - \rho^2} + (\sqrt{1 - \rho^2} - 1)l/\rho \cdot \sqrt{1 - \rho^2} \quad (8)$$

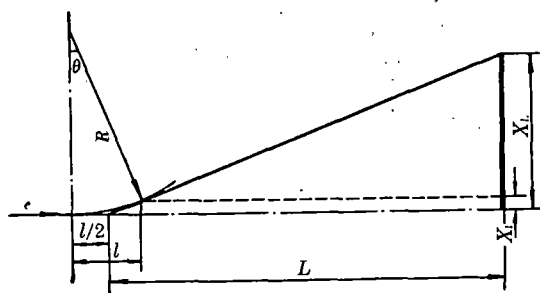


图4 电子在均匀磁场中运动

由(8)式可知, 在偏转系统机械尺寸确定后  $L$  和  $l$  是不变的, 只要求出  $X_L$  和  $\rho$  之关系, 而  $\rho$  值与  $B$  值是一一对应的, 就可以反映出  $X_L$  和  $B$  之关系了。

要研究的问题是扫描线速度  $V_L$  怎样依赖磁场强度 (或激磁电流) 随时间的变化, 使电子束扫描能达到较理想的剂量均匀度。

#### 四、三角波形产生的扫描不均匀度的分析

我们定义扫描线速度  $V_L$  为:

$$V_L = dX_L/dt = dX_L/d\rho \cdot d\rho/dt \quad (9)$$

式中  $d\rho/dt = el/mv \cdot dB/dt$ ,  $dB/dt$  为磁场随时间的变化率,  $dX_L/d\rho$  是由式(8)对  $\rho$  求微商得出。

$$dX_L/d\rho = (L - l/2) / \sqrt{(1 - \rho^2)^3} + l(1/\sqrt{1 - \rho^2} - 1)/\rho^2 \quad (10)$$

要使电子束扫描均匀度高, 就要求扫描线速度  $V_L$  不变或变化很小。当利用三角波形时,  $\rho$  与  $t$  是线性关系, 则  $d\rho/dt = A$  为常数, 于是  $dB/dt = \text{常数}$ , 而  $dX_L/dt$  是  $\rho$  的函数, 所以  $V_L = dX_L/d\rho \cdot d\rho/dt \neq \text{常数}$ 。这表明, 利用三角波形磁场来扫描是不能满足剂量均匀度要求的。当选取  $L = 1355\text{mm}$ ,  $l = 110\text{mm}$  时, 对应  $\rho$  从  $0.02 \sim 0.422$  的  $X_L$ 、 $V_L$ 、 $V_L/V_{L_0}$  ( $V_{L_0}$  为中心点的扫描速度) 和  $\delta\%$  值列于表 1。

从表 1 可知, 当利用三角波形磁场扫描时, 随着扫描宽度  $X_L$  增加,  $\delta\%$  就不能满足均匀度的要求了。例如: 当  $X_L = 400\text{mm}$  时,  $\delta\%$  为  $14\%$ , 当  $X_L = 500\text{mm}$  时,  $\delta\%$  为  $20\%$ 。

表 1

|              |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\rho$       | 0.02007 | 0.0402  | 0.1011  | 0.1805  | 0.2079  | 0.2588  | 0.3007  | 0.360   | 0.4003  | 0.4226  |
| $X_L$        | 27.19   | 54.45   | 137.63  | 248.55  | 288.01  | 362.76  | 426.83  | 522.14  | 590.94  | 630.58  |
| $V_L$        | 1355.78 | 1358.13 | 1386.12 | 1422.54 | 1446.31 | 1500.16 | 1557.62 | 1661.91 | 1751.26 | 1809.96 |
| $V_L/V_{L0}$ | 1.00058 | 1.0023  | 1.022   | 1.051   | 1.0674  | 1.1071  | 1.1495  | 1.2265  | 1.2924  | 1.3358  |
| $\delta \%$  | 0.058   | 0.23    | 2.2     | 5.0     | 6.74    | 10.71   | 14.95   | 22.65   | 29.24   | 33.58   |

## 五、合成波形

当用三角波扫描时,  $X_L$  愈大,  $V_L$  也大; 当用正弦波扫描时, 则相反。因此, 利用这二种波各自的特点, 采用三角波与正弦波叠加的办法是取得补偿、改善扫描均匀度的一种方法。

设有周期和相位相同的三角波和正弦波, 幅值各为  $\rho_{1m}$  和  $\rho_{2m}$ , 周期为  $T$ ,  $\rho_m$  为合成波的幅值, 其波形如图 5 所示。设在 0 到  $T/4$  范围内, 三种波形的幅值分别为:

三角波的幅值:  $\rho_1 = \rho_{1m} 4t/T$ , 其中  $t$  为  $(0, T/4) \dots$  (11)

正弦波的幅值:  $\rho_2 = \rho_{2m} \sin(2\pi t/T)$ , 其中  $t$  为  $(0, T/4)$  (12)

合成波形的幅值:  $\rho = \rho_1 + \rho_2 = \rho_{1m} \cdot 4t/T + \rho_{2m} \cdot \sin(2\pi t/T)$  (13)

由(13)式对  $t$  求微商, 可得:

$$d\rho/dt = (2\rho_{1m} + \pi\rho_{2m} \cdot \cos(2\pi t/T))/T \quad (14)$$

从理想合成波中选取两点, 即  $T/8$  与  $T/4$  时, 其  $\rho_{1m}$  和  $\rho_{2m}$  的幅值各为:

$$\rho_{1m} = (0.7071\rho_{T/4} - \rho_{T/8})/0.2071 \quad (15)$$

$$\rho_{2m} = (\rho_{T/8} - 0.5\rho_{T/4})/0.2071 \quad (16)$$

将(10)式与(14)式代入(9)式, 可得这种合成波形的扫描速度为:

$$V_L = 2((L-l/2)/(\sqrt{1-\rho^2})^3 + l(1/\sqrt{1-\rho^2} - 1)/\rho^2) \cdot (2\rho_{1m} + \pi\rho_{2m} \cdot \cos(2\pi t/T))/T \quad (17)$$

利用公式(15)、(16)、(17)及图 6 中  $\rho \sim X_L$  曲线, 对下列各点扫描均匀度的计算列于表 2。

实际上, 对于不同的扫描宽度  $X_L$ , 为得到较理想的均匀度, 存在  $\rho_{2m}/\rho_{1m}$  之最佳值, 其计算结果列于表 3。

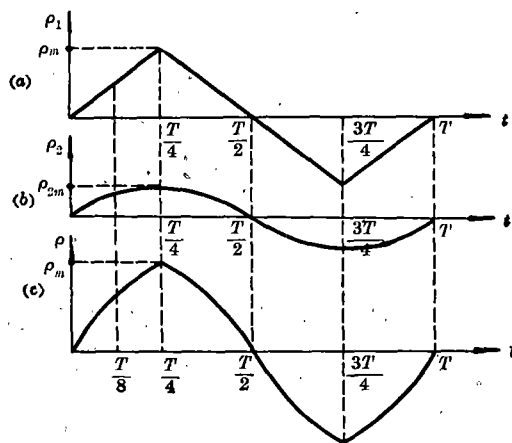


图 5

(a) 理想三角波形 (b) 正弦波形 (c) 合成波形

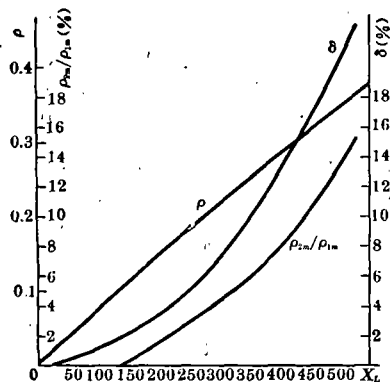


图 6 横向扫描均匀度分布

表 2

| $t/T$ | $X_L(\text{mm})$ | $V_L$    | $V_L/V_{L0}$ | 不均匀度 $\delta\%$ |
|-------|------------------|----------|--------------|-----------------|
| 0     | 0                | 498.64/T |              |                 |
| 0.3   | 150              | 499.56/T | 1.0019       | +0.19           |
| 0.5   | 250              | 498.03/T | 0.9988       | -0.12           |
| 0.8   | 400              | 496.48/T | 0.9957       | -0.43           |
| 1.0   | 500              | 496.31/T | 0.9954       | -0.46           |

表 3

| $X_L(\text{mm})$          | 150     | 200    | 250     | 300     | 350    | 400    | 450   | 500   |
|---------------------------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|-------|-------|
| $\rho_T$                  | 0.1083  | 0.144  | 0.1788  | 0.214   | 0.247  | 0.28   | 0.312 | 0.345 |
| $\rho_{1m}$               | 0.1082  | 0.1416 | 0.1741  | 0.2043  | 0.2349 | 0.2607 | 0.283 | 0.304 |
| $\rho_{2m}$               | 0.00024 | 0.0025 | 0.00483 | 0.00980 | 0.0121 | 0.0193 | 0.029 | 0.041 |
| $\rho_{2m}/\rho_{1m}(\%)$ | 0.22    | 1.77   | 2.78    | 4.75    | 5.15   | 7.41   | 10.25 | 13.50 |

由表 2 可以看出,最大的不均匀度应为:  $0.19\% + 0.46\% = 0.65\%$ , 说明采用合成波形比三角波形对提高扫描均匀度是有显著作用的。

## 六、实 验 结 果

在加速器调试中,只要根据不同的扫描宽度,调整正弦波与三角波的幅值之比,即  $\rho_{2m}/\rho_{1m}$  比值,就可以得到较为均匀剂量分布。

我厂已生产的各种不同能量的辐照电子加速器的某些参数见表 4。

表 4

| 电子加速器能量<br>(MeV) | 电子束<br>( $\mu\text{A}$ ) | 磁场真空管道<br>(mm)      | 磁场均匀区<br>(mm) | 扫描夹角       | 扫描宽度<br>(mm)     | 扫描不均匀度<br>(%) |
|------------------|--------------------------|---------------------|---------------|------------|------------------|---------------|
| 2.0              | 200                      | $\phi 60$           | 100           | $23^\circ$ | $400 \times 24$  | $\leq 5.0$    |
| 1.5              | 150                      | $\phi 60$           | 100           | $23^\circ$ | $400 \times 24$  | $\leq 5.0$    |
| 1.2              | 150                      | $\phi 60$           | 90            | $60^\circ$ | $600 \times 30$  | $\leq 5.0$    |
| 0.3              | 5 mA                     | 方管道 $110 \times 60$ | 110           | $60^\circ$ | $1500 \times 60$ | $\leq 8.0$    |

本文得到蒋佐法同志和邓雨生同志的审阅,在此表示衷心的感谢。

(1979年9月12日收到)

(下转第 52 页)

室灵敏度。又因放射源射线的能量一定, 穿透本领有一定限度, 因而极板片数不能无限多。我们用了 25 片 0.5mm 厚的铅黄铜。极片材料用较重金属好些, 可以增加产生次级电子的几率。

(3) 改善气体性质。为了便于对电离室检漏, 除了充  $24\text{kg}/\text{cm}^3$  氙气之外, 还混合了  $1\text{kg}/\text{cm}^3$  氮气。从选择气体来说, 应选隋性气体中电子电离功较小的气体为佳。

关于电极间距离, 电极间距离大了, 会减弱电场强度, 就要提高工作电压, 这对全晶体管化电路不利; 电极间距离过小, 使得次级电子的电离本领不能充分利用, 因而减小电离电流。通过试验, 我们选用的极间距离为 5mm。

### 三、几个措施

为了保证电离室能在较恶劣的环境下工作, 我们在工艺结构上采取了以下几个措施:

(1) 圆筒形电离室的外壁全部采用不锈钢(图 1)。电离室绝缘子是高铝陶瓷, 通过可伐合金与不锈钢焊接, 绝缘子周围还用硅橡胶固化。这样, 在气候潮湿条件下, 也能稳定工作。

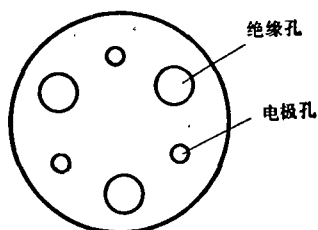


图 2 电极片

(2) 电极间主要采用气体绝缘。为了保证电场分布均匀, 绝缘孔(图 2)直径略大些。原则上使绝缘孔半径减去电极孔半径要大于极间距离。电极板与室壁距离要大于电极间距离。

(3) 为了减少极板的颤动, 在必要部位加了防震弹簧。

(4) 选用了焊接工艺较稳定, 绝缘性能较好的 95 瓷作绝缘子。

(1980 年 1 月 4 日收到)

## A high-pressure gas-filled ionization chamber

Zhang Ting-hua

(Beijing bureau of metrology)

### Abstract

An ionization chamber used in an ore-pulp-density gauge is presented. Its stability, sensitivity, plateau characteristic and the measures adopted in construction are briefly described.

(上接第 28 页)

## A scanning instrument for electron beam irradiation

Guo Xue-yi

(Shanghai Xianfeng Electric Manufacturing Works)

### Abstract

The scanning instrument used in electron irradiation is an important device of the electron accelerator. In order to improve the homogeneity of the radiation dosage, it is proposed that the homogeneity of the scanning can be raised if the scanning magnetic field is produced by the electric current composed of both the trigonometric and sine waves.