

倾斜多丝正比室辐射状阴极条感应电荷重心读出的定位性能研究

汪兆民 李 澄 陈宏芳 许咨宗

(中国科技大学近代物理系, 合肥 230026)

摘 要

本文针对倾斜多丝室辐射状阴极条的具体结构,研究了阴极面上感应电荷密度分布,给出了四或五根条取样时重心读出定位修正函数和相应的定位精度,用 ^{55}Fe X 射线进行了定位测量,实验和理论符合得较好.

一、引 言

作为一种位置灵敏的探测器,阴极感应电荷重心读出多丝正比室以其定位精度高、时间分辨好的特点,在高能物理实验中得到广泛的应用.多丝室的两个阴极面通常分别做成与阳极丝平行(X)和垂直(Y)的等宽窄条(线组),人们对这种简单的阴极条结构的定位性能已做了大量研究,并取得了很好的实验结果^[1-5].由于阴极面上的感应电荷密度是呈不同半径的同心圆分布,因此,只要感应电荷的取样对所选择的坐标轴是对称的,则重心读出法也应适用于非直角坐标系.基于这种考虑,我们根据实验的具体要求,在可用于小角度亮度监测系统的倾斜多丝正比室(PIC)探测器^[6]上,设计了一种辐射状阴极条结构,尝试在极坐标中对粒子径迹的极角进行定位,并研究其定位精度.

PIC 探测器是一个由八个结构相同的梯形状多丝室单元组成的八棱锥台,室平面与锥台轴线成 60° 角.阳极丝和室的内外框架平行,它是直径 $20\mu\text{m}$ 的镀金钨丝,丝距为 2mm .各单元丝地址相同的阳极丝均连在一起.上阴极面丝直径为 $100\mu\text{m}$,丝距为 1mm ,下阴极面做成辐射状阴极条结构,如图 1 所示.阴极条相对于顶点 O 是按角度等分的.阴极面与阳极丝平面的距离为 8mm .每个单元有 64 根阳极丝,16 根阴极条,阴极条上感应电荷重心给出入射粒子极角坐标的信息,粒子径迹的矢径

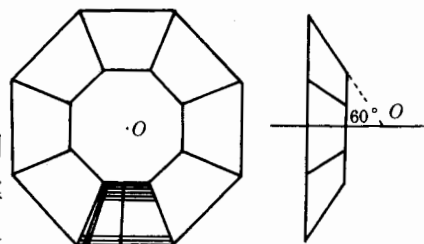


图 1 PIC 室结构示意图

坐标则由电离电子到达阳极丝上的漂移时间分布确定。

在 PIC 室中,不同矢径和极角处的阴极条被阳极丝切割的宽度均不相同,且感应电荷投影在极角坐标轴上的分布与雪崩点的矢径有关,按角度对电荷取样时,各阴极条面积的差异将造成取样不对称,在这种情况下,怎样在尽可能大的丝室灵敏区域内得到好的定位精度,是一个十分重要的问题.我们通过研究阴极条上感应电荷密度的分布,从理论上找出了最佳取样条数和相应的定位修正函数,并用⁵⁵Fe X 射线对 PIC 室的极角定位精度进行了测量,取得了较满意的结果.

二、定位精度的理论估计

作为一种好的近似,可把电子雪崩过程中产生的正离子云看成一个位于阳极丝上的自由点电荷,根据静电学镜像原理,在如图 2 所示的极坐标系中,阳极丝上电量为 Q 的点电荷在无限大阴极平面上任意一点 (r, ϕ) 处的感应电荷密度近似为

$$\sigma(r, \phi, R, \Phi) = - \frac{QL}{2\pi[L^2 + r^2 + R^2 - 2rR\cos(\Phi - \phi)]^{3/2}}, \quad (1)$$

其中极坐标的原点设在辐射状阴极条交点 O 上, (R, Φ) 为点电荷在阴极面上的投影坐标, L 为点电荷到阴极面的距离即丝室的气隙.

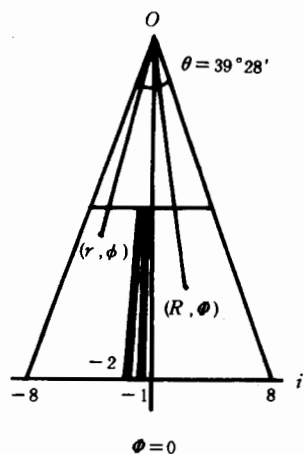


图 2 阴极条在极坐标系中的表示

为计算方便,设 $\Phi=0$, 则(1)式投影在 ϕ 轴上的感应电荷密度可表示为

$$H_1 \quad \sigma(\phi, R) = \int_0^\infty \sigma(r, \phi, R, 0) r dr$$

$$= - \frac{QL(R\cos\phi + \sqrt{L^2 + R^2})}{2\pi(L^2 + R^2\sin^2\phi)}, \quad (2)$$

图 3 表示 $L=8\text{mm}$ 时, $\sigma(\phi, R)$ 的分布,由图可知,随着 R 的增加,分布的峰值 $\sigma_{\max}(0, R)$ 近似成线性增大,而分布宽度则相应变窄(半高宽 $\sim \arccos(1 - \frac{L^2}{R^2})$), 在阴极面四个典型区域 $R \sim 120\text{mm}, 150\text{mm}, 180\text{mm}$ 和 210mm 处, σ_{\max} 之比近似为 $1:1.3:1.5:1.8$, 说明在相同的条宽 $\Delta\phi_w$ 范围内,雪崩发生在靠近室的外框架部分时,将比靠近内框架部分感应更多的电荷.

在 PIC 室阴极条的几何条件下,第 i ($|i|=1-8$) 根阴极条上的感应电荷量由下式决定:

$$Q_i(R, \Phi) = k_1 \frac{k_2(r - k_2) - k_3}{k_3 \sqrt{k_3 + (r - k_2)^2}} \Big|_{r_{i1}}^{r_{i2}}, \quad (3)$$

其中

k_1 为与室结构有关的常数,

$k_2 = R\cos(\Phi - \phi_{i0})$,

$k_3 = L^2 + R^2\sin^2(\Phi - \phi_{i0})$,

$$r_{i1} = \frac{H_1}{\cos(\phi_{i0} - \frac{\theta}{2})},$$

$$r_{i2} = \frac{H_1 + H_2}{\cos(\phi_{i0} - \frac{\theta}{2})}.$$

阴极面对称轴位于 $\phi=0$ 处, ϕ_{i0} 为第 i 根阴极条角平分线对应的极角, θ 为梯形阴极面两腰对原点 O 的张角($\theta=39^\circ 28'$),阴极条和其缝隙对 O 点所张角度之比为 $10:1$, $H_1=111.4\text{mm}$, $H_2=112.0\text{mm}$, $L=8\text{mm}$.计算结果表明,在靠近室内外框架的边角区,对应于不同的 Φ 角,在条上产生的感应电荷量差别很大,最大可达 $20\text{--}30\%$,但在其他区域($R\sim 130\text{--}210\text{mm}$, $|i|\sim 1\text{--}8$),各阴极条对应的内外矢径 r_{i1} , r_{i2} 的差异对 Q_i 的影响不大($\leq 0.5\%$),故不会带来严重的取样不对称性.

以下研究 R 对定位精度的影响.和等宽度直条情况相类似,阴极面上的感应电荷取样总是在少数几根条上进行的,由于取样的精细程度受到电子学噪声的约束,计算求得的电荷重心和实际雪崩发生的位置有系统误差,误差的大小与雪崩在条上的位置、取样方法和室的几何条件等因素有关.从对称性考虑可知,采用奇(偶)数条取样时,误差和雪崩离角平分线(边界)的夹角大致成正比.为了得到高的定位精度,既需要有足够精细的取样和较好的取样对称性,又要使取样的电荷量足够多,以减小测量误差,并要求 R 和 Φ 的变化对定位精度不灵敏,因此,选择适宜的取样条数是十分重要的.

图4为取样条数 $N=1\text{--}7$ 时,根据(3)式计算得到的系统误差的最大值.由于在实验测量中用长度来表示定位误差更为直观,同时也便于和直条的定位精度作比较,所以在图4中用 $\Delta L_{\max}=R|\Delta\phi|_{\max}$ 来代替极角的定位误差 $|\Delta\phi|_{\max}$ (奇数和偶数条取样时,系统误差 $\Delta\phi$ 的符号是相反的,图中误差是绝对值).图中四条曲线代表四个不同 R 值,随着取样条数的增加, ΔL_{\max} 逐渐减小,尤其是当取样条数增加到4时,四条曲线开始逐渐汇合成一条较为平坦的曲线.图5表示雪崩位于条角平分线(边界)上时,取样电荷量与总电荷量之比 f 随取样条数 N 的变化, f 值由4条取样 $R=120\text{mm}$ 时的 68% 递增到5条取样 $R=210\text{mm}$ 时的 87% ,可见,感应电荷的大部分是集中在中间4、5条上的.取样数更多时,虽然 ΔL_{\max} 将进一步减小,但实际上感应电荷的增加并不多,而且,远离最大感应条处的信号和电子学噪声水平相接近(实验结果也证实了这一点),反而会使分辨变差.

如上所述,系统误差和雪崩位置、取样条数有密切关系.4条取样和5条取样相比较,雪崩发生在条角平分线上时,4条取样误差最大,而5条取样误差最小;雪崩发生在条边界上时,情况则恰好相反,所以,根据雪崩位置选取不同的取样条数,是减小系统误差提高

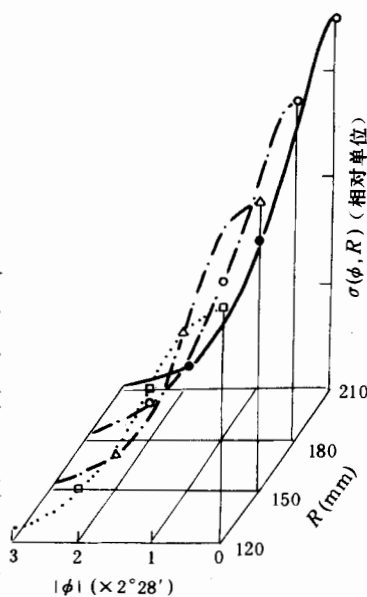


图3 感应电荷密度 $\sigma(\phi, R)$ 的分布

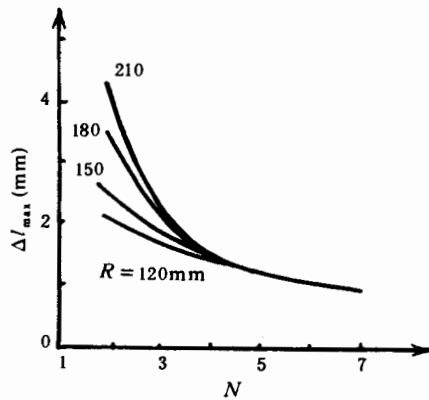


图4 最大误差 Δl_{\max} 随取样条数 N 的变化

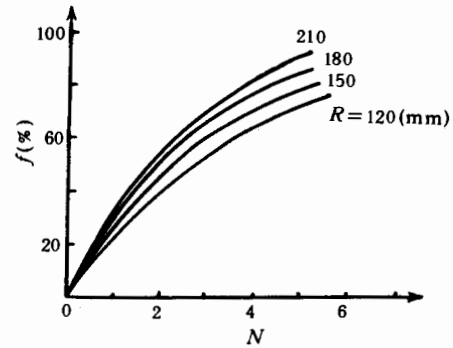


图5 取样电荷量与总电荷量之比 f 随取样条数 N 的变化

测量精度的一种可行方法,雪崩位置不同又反映在条上感应电荷量的差异上,因此,可通过比较最大和次最大条上感应电荷量来决定取样条数.我们取这样的标准:设感应电荷最大的条号为 k ,电荷量为 Q_k ,感应电荷次最大的条号则为 $k+1(k-1)$,电荷量为 $Q_{k+1}(Q_{k-1})$,则

$$(i) \quad \frac{Q_k}{Q_{k+1}(Q_{k-1})} \geq \rho \text{ 时, 5 条取样,}$$

$$\varphi_c = \frac{\sum_i \phi_{i0} Q_i}{\sum_i Q_i}, \quad i = (k-2), \dots, k, \dots, (k+2);$$

$$(ii) \quad \frac{Q_k}{Q_{k+1}(Q_{k-1})} < \rho \text{ 时, 4 条取样,}$$

$$\phi_c = \frac{\sum_i \phi_{i0} Q_i}{\sum_i Q_i}, \quad \begin{array}{l} i = (k-1), k, (k+1), (k+2) \\ \text{或 } i = (k-2), (k-1), k, (k+1), \end{array} \quad \text{这里的 } \rho \text{ 是一个参数, 它}$$

满足在 R 和 Φ 的大部分范围内系统误差较小,通过调试,取 $\rho=1.16$.在以上条件下,在室的大部分区域 ($|i|=1-6$) 定位误差和极角关系如图6所示,误差曲线随极角呈周期振荡,振荡周期正好就是条的张角,这就是所谓条宽效应.计算表明误差曲线随 R 的变化不明显,它可近似表示为两个振幅和周期均不相同的正弦函数的组合,这两个函数分别对应于阴极条及其边界两个区域,误差曲线表明,在阴极条及其边界的中心附近,定位误差最小,其他区域则较大,最大为 $600\mu\text{m}$.我们将采用该曲线作为建立定位修正函数的依据.

首先对阴极条区域上的误差曲线(即振幅大的部分)作修正,选取一振荡函数,其振幅为 4mrad ,周期等于条张角,但相位与误差曲线相反,即 $4\sin(\frac{2\pi}{0.0425}\phi)\text{mrad}$.将其作为修正函数,通过计算可知,在条宽的大部分区域内,修正后的误差明显减小,但相应条边界(条号为半整数)附近 $\pm 5\text{mrad}$ 的局部区域,误差反而增大,该区域定位精度变差的原因是修正函数与误差函数同号,我们把该修正函数称为一级修正函数.在此基础上再对边界附近的误差作进一步修正,经过一级修正后,该区域的误差曲线也呈一周期振荡,振幅也近

似为 4mrad , 因此, 可用二级修正函数 $4\sin \frac{2\pi}{0.01}(\phi' - \phi_{k\pm 0.5})\text{mrad}$ 再进行修正, 其中 ϕ' 为一级修正后的极角重心坐标, $\phi_{k\pm 0.5}$ 为最大感应条边界所对应的极角坐标.

通过对一个单元的半个 PIC 室平面上 2400 个雪崩点的定位误差的计算, 结果表明, 经过以上二次修正后, 除靠近室的框架部分外, 在绝大部分区域内的定位精度 Δl_{max} 可达到小于 $200\mu\text{m}$.

三、实验装置和测量结果

^{55}Fe X 射线源和准直器通过一长臂固定在 FW-100 型万能分度头刻度盘的中心转轴上, 分度头精度为 $1 \times 10^{-5}\text{rad}$, 利用激光束将辐射状阴极条交点 O 对准转动轴的中心, 分度头在转动过程中保持准直器和多丝室丝平面相垂直, 准直缝始终和阴极条的矢径相重合. 准直器厚 80mm , 缝宽 $300\mu\text{m}$, 离阳极面 20mm . 多丝室下阴极面尺寸如图 2 所示, 阳极丝加正高压, 阴极接地, 室工作气体为 $\text{Ar}(80\%)$ 和 $\text{CO}_2(20\%)$.

阴极条感应电荷信号分别通过 16 路低噪声电荷灵敏放大器(自制)和成形放大器后, 送到 CAMAC 机箱中 ADC 插件(LRS 2248)的输入端, 电荷灵敏放大器灵敏度为 $0.8\text{V}/\text{pc}$, 上升时间小于 30ns , 非线性小于 0.1% , ADC 量程为 $256\text{pc}(1\text{pc}/\text{ADC 计数})$. ADC 的门信号是由阳极丝信号通过前级放大器和甄别器(Lecroy 623Z)后, 由门脉冲产生器(Lecroy 2255A)和逻辑扇出电路(Lecroy 429)提供的. 门脉冲宽度为 200ns , 它同时作为 TDC(LRS 2228A)的起始信号. TDC 产生的 LAM 信号作为 ADC 接受信号的标志. CAMAC 系统和 IBM/PC 计算机之间通过 3989 控制器以串连方式进行通讯. 调整各路放大倍数、输出电平和 ADC 台基, 使得 ^{55}Fe X 射线全能峰对应于 170ADC 计数左右. 测量前, 先用标准方法对各路电子学系统进行了刻度和噪声测量, 再对 18 个刻度点用最小二乘法作直线拟合, 最后对 16 路刻度曲线进行归一, 刻度结果表明, 除低端和高端线性稍差外, 在大部分 ADC 量程范围内线性很好, 噪声谱的最大均方值约为 4 个 ADC 计数.

开始测量时, 先将放射源对准阴极面中部对称轴附近($R=150\text{mm}$), 然后向一侧转动分度头以改变极角坐标, 实验共测量 22 个点, Φ 角的变化范围相应于从第 1 根至第 6 根阴极条. 在事例样本中, 凡是最大 ADC 计数大于 230 或小于 130 的事例全部删去, 以保证好的线性. 为了获得好的统计性, 每个测量点上共采集 1000 个好事例, 在数据获取和处理的程序中, 好事例记录下来后, 先计算各阴极条的感应电荷相对值, 找出感应电荷最大和次最大条号, 再根据上述判选条件, 决定取样条数, 计算出重心坐标, 并对计算值进行一级和二级修正. 各测量点上的电子学噪声对位置分辨的贡献可通过误差传递公式计算得到, 电子学噪声的平均值 $\sigma_{\text{噪声}} \sim 135\mu\text{m}$, 源宽对位置分辨的贡献为 $\sigma_{\text{源}} \sim 110\mu\text{m}$. 扣除了源宽和电子学噪声的贡献后, 各测量点上的位置分辨(均方误差)如表 1 所示, 位置分辨的平均值

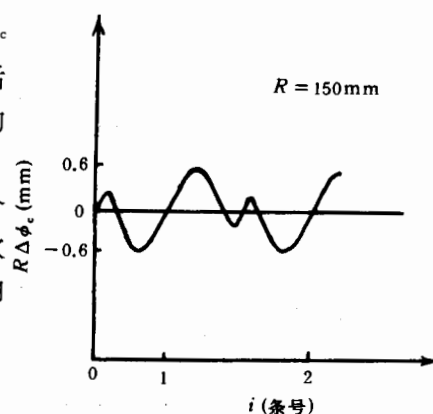


图 6 定位误差和极角的关系

$\bar{\sigma} \sim 205 \mu\text{m}$. 考虑到气体放大过程中电离电子的固有离散等因素, 可知实验值和理论估计值符合较好.

表1 各测量点的位置分辨

测量点号	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma(\mu\text{m})$	156	167	181	193	202	214	191	184
测量点号	9	10	11	12	13	14	15	16
$\sigma(\mu\text{m})$	266	227	182	245	163	169	213	250
测量点号	17	18	19	20	21	22		
$\sigma(\mu\text{m})$	208	150	201	211	276	252		

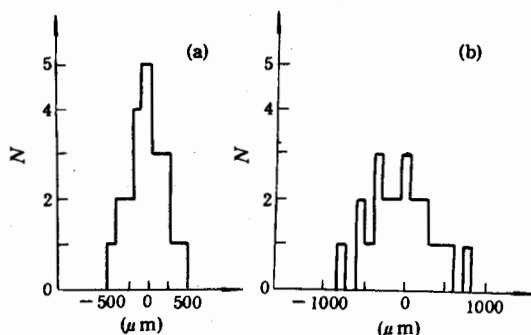


图7 实验点的残差分布

用最小二乘法对 22 个测量点修正后的重心坐标作拟合, 拟合曲线可用斜率近似为 1 的直线方程表示:

$$y = 1.01744x - 0.05363,$$

x 为放射源的坐标, y 为拟合后的重心坐标, 式中采用的是相对单位. 把拟合后的数值作为雪崩的真实位置, 得到如图 7(a) 所示的实验点残差分布, 作为比较, 把用同样方法得到修正前的残差分布画在图 7(b) 中. 修正前后残差分布的均方值分别为 $340 \mu\text{m}$ 和 $250 \mu\text{m}$, 可见修正是有用的, 位置分辨有很大改进.

四、结束语

在 PIC 室的几何条件下, 研究了阴极面上感应电荷分布, 通过选择合适的取样条数和定位修正函数, 可以弥补取样不对称造成的定位系统偏差, 实验结果表明, 其定位精度和直条下的结果相当, 和理论计算的结果也符合得较好, 能满足正负电子对撞机上小角度亮度监测系统对位置分辨的要求.

参 考 文 献

- [1] G. Charpak and Sauli, *Nucl. Instr. and Meth.*, **113**(1973), 381.

- [2] A. Breskin et al. , *Nucl. Instr. and Meth.* , **143**(1977),29.
[3] G. Charpak et al. , *Nucl. Instr. and Meth.* , **148**(1978),471; **167**(1979),455.
[4] N. Awaji et al. , *Nucl. Instr. and Meth.* , **198**(1982),243.
[5] 李澄等,高能物理与核物理,**12**(1988),440.
[6] 王建春等,高能物理与核物理,**15**(1991),673.

Research on Properties of Localization in Inclined MWPC With Radial Cathode Strips Using the Induced Charge Center-of-Gravity Read-out

WANG ZHAOMIN LI CHENG CHEN HONGFANG XU ZIZONG

(University of Science and Technology of China Anhui, Hefei 230026)

ABSTRACT

We studied the density distribution of cathode induced charge on the radial cathode strips of the Incline Proportional Chamber. From the calculation we got the correction function for the center-of-gravity read out with 4 or 5 sampling strips and the position accuracy. Using ^{55}Fe X ray we measured the spatial resolution, the results agree with the calculation pretty well.