

# 二次发射多丝束流剖面监测器

赵进华 郑建华

(中国科学院近代物理研究所)

**摘要** 本文描述了基于二次发射原理的多丝束流剖面监测器,可测量束流总强度范围为 $10\text{nA}\sim 10\mu\text{A}$ 的束流剖面密度分布,或者以模拟形式在示波器上作直观显示,或者以数字形式由计算机作进一步处理。文中列举了监测器几个应用例。最后提出了进一步改进意见。该剖面监测器已成功地应用于HZRFL重离子加速器SFC—SSC束流传输线的调整。其灵敏度、剖面波形观察以及计算机处理等都得到较为满意的结果。

## 一、引言

复杂加速器的有效运行强烈地依赖于对宽的束流强度范围内相关参数的测量。而且,计算机辅助运行的引入,在线控制的发展和自动束流在线最佳化过程导致对束流诊断的某些进一步要求。

在分离扇重离子回旋加速器系统中,为满足加速器控制必须被测量的束流主要参数是:

1. 束流剖面,即横向束流强度分布;
2. 束流分布中心坐标和直径;
3. 束流能量和能散;
4. 束团相对于高频信号的位置;
5. 在横向和纵向相空间中束流发射度;
6. 束团时间结构。

在许多加速器及其束流传输系统中广泛使用了各种束流剖面监测器。它们可测量上述1, 2项和第5项中的横向发射度等束流特性参数,而多丝剖面监测器显示了它的某些优点:

1. 由于它的透明度高,因此对束流的破坏最小。它可在沿加速器的不同位置上同时地进行剖面测量。这对束流校正,特别是为使加速器运行达到最好状态而由运行人员进行微调时显得十分有用。

2. 使用适当的测量电路则很容易使信

号适合于计算机处理和屏幕显示。

3. 能适应于多种粒子种类和强度。可方便的改变系统增益。

使用二次发射型监测器是为了提高灵敏度<sup>[1]</sup>。当粒子轰击在金属上时,占束流粒子总数百分之几的低能电子从金属表面发射出来。当束流能量增加,二次发射产额则随之下降。它能满意地工作在从几KeV/A到100 MeV/A的能量范围内,但低能时会引起较大的能损。

## 二、剖面监测器的描述

我们这里描述的剖面监测器由丝栅及其气动驱动机构、丝电流扫描测量电路等构成。它的数据获取和控制是由CAMAC组件执行的。按水平和垂直安排的两块丝栅和三块可附加+300V的高压环相间装配成一整体。丝栅由51根25mm直径的镀金钨丝,以1mm的丝间距焊接在环氧玻璃纤维印刷电路板上作成。偏压环提供了对二次电子的清洁场。使用不锈钢焊接波纹管作为有100mm行程的丝栅驱动机构的真空密封连接。

每一根丝拾取的束流电流信号经低漏泄电容器积分转换为电压信号后再由FET模拟多路器逐道选择后送电压放大器作进一步放大。放大器的增益有 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ ,由十六进制码自动程序地选择,常态处于最低灵敏度档。图1表明了系统简图。使用的CMOS4067

模拟多路开关有 $10^{11}\Omega$ 的高输入阻抗,不会引起丝电流的严重衰减。丝栅和测量电路之间通过2m长的低噪声高性能电缆相连接。F3140B型运算放大器有高的输入阻抗和10-1000的宽的增益变化。在我们的情况下,积分电容的充电时间 $T=639t$ ,其中 $1/t$ 为时钟工作频率,我们取为1KHz。在此参数下,x、y剖面测量时间~2秒,这包括丝栅的驱动时间。为在示波器上容易观察到束流分布中心的偏移,电路给出了中心丝标记信号。获取数据时计算机需等待起始道信号和A/D转换同步信号。增益是根据剖面峰值确定。

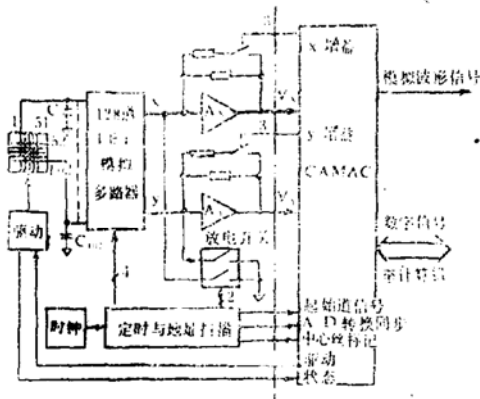


图1 剖面监测器系统简图

的,在一个完整剖面测量过程中是固定的,其值应保存于数据处理。

### 三、束流剖面测量

我们感兴趣的是在实际空间中粒子的密度分布。由此可得到关于束流特性参数的众多信息。在某些应用中需要知道束流剖面宽度,但实际上这是一个不易测准的量。它与监测器的位置、不同的应用、流强及噪声等相关。我们常常使用高斯形分布来拟合剖面分布曲线。在大多数情况下,实际剖面大大地偏离高斯分布。如果必要可使用 Spline拟合。然后求出强度百分比束流宽度。为消除噪声的影响,通常选取所测丝电流强度的95%作为最大剖面宽度。除因加速器特性外,剖面测量的误差主要来自监测器的几何精度

(包括丝栅几何尺寸、高功率束流轰击下丝的变形,安装公差、驱动机械精度及其位置重复性)和弱电流测量(由电容器质量、噪声、放大器的漂移等)引起的。

## 四、剖面监测器的几种应用

### 1. 束团中心轨迹校正

粒子加速器束流传输系统设有若干校正磁铁用于校正偏离束流光轴的束团中心轨迹。数字化的束流剖面信息在计算机控制的自动束流校正过程中呈现许多优点。在加速器中有不同的束流校正配置,因此采取不尽一致的校正方法。它们的差别在于如何测得关于束流中心位移和方向的数据。

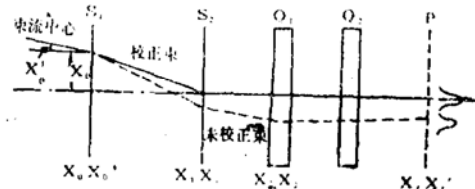


图2. 束流校正配置

图2中列举了借助于两组四极透镜和一个剖面监测器的束流校正段。通过两组透镜多次(例如10次)不同变化,测得相应的剖面分布中心,并通过单粒子变换矩阵和最小二乘法拟合,求得四极透镜 $Q_1$ 入口处束流中心的 $x_2$ 、 $x_2'$ 值,进而容易得到校正磁铁 $S_1$ 入口处的 $x_0$ 和 $x_0'$ ,并据此求出两组校正磁铁的调整量,最终实现束流中心的校准。

如果能使用发射度测量装置测得中心数据,则校正过程变得更为直接了。

### 2. 束流发射度测量

我们在这一节将描述特别感兴趣的涉及使用剖面监测器的三种横向束流发射度测量方法:三距离法、三梯度法和扫描法。前两种方法可附带给关于束流包络的信息;第三种方法则可给出发射度图的真实形状和表明关于密度分布的详细信息。下面我们将就这三种方法分别给予说明:

### (1) 三距离法

此法是利用三个束流剖面监测器分别置于沿束流线漂移空间中的三个不同位置上。这样，传输矩阵是简单已知的。如果我们测得各个监测器位置处的束流剖面，则可导出发射度椭圆的三参数和发射度值。为保证好的测量精度，中间的监测器应在束流腰处，另两个应在其前后的对称位置上。如果空间允许，用5个监测器结果会更佳。图3给出了监测器的排列。

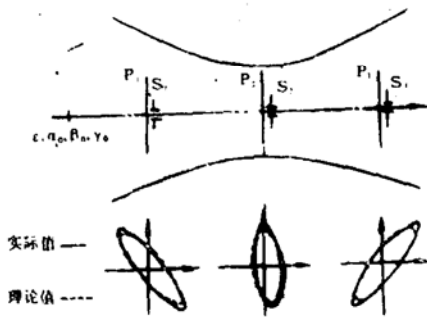


图3. 三距离法横向发射度测量布局

HIRFL重离子加速器 SFC—SSC 传输线中设有如图3中那样排列的发射度监测和限制段<sup>[2]</sup>。图中所示的狭缝 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 用于发射度限制。

### (2) 三梯度法

文献<sup>[3]</sup>中给出了这一方法的一个例子。至少有一个四极透镜处于特定位置，在其下游有一剖面监测器，对应于四极透镜不同的设定值测得其剖面宽度。如果知道透镜与其上游某一点P间的传输矩阵，则同样可由至少三次测量即能确定P点的椭圆参数。这种方法要求有大的束流管道和适当的聚焦元

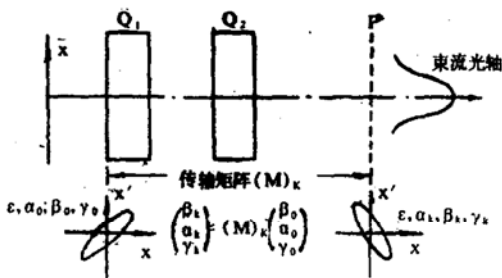


图4. 由四极透镜和监测器组成的测量装置

件。由于束流宽度对精度很灵敏，为得到好的测量精度，三个测量之一必须相应于包络最小的一个，而其它两个则在它的两边。同样可由多于三次测量和使用最小二乘法处理来改善测量精度。其测量原理表明在图4中。

### (3) 扫描法

扫描型或称狭缝型发射度测量装置广泛地被用于许多粒子加速器。它由一可动窄狭缝一步一步地扫描通过束流，在其下游的同样距离上测得相应于所有狭缝位置的剖面密度分布。从这一系列的测量可导得发射度。而所有的密度分布数据使我们可作出发射度图中束流密度的总分布。为提高测量精度，束流应在接近于狭缝处为最小。

## 五、进一步改进

束流发射度匹配在加速器运行控制中具有重要意义。为得到好的精度，要求好的剖面监测器。如将定时电路改为由地址复位来确定起始道，则不会如现有电路要求计算机等待。由于电容的离散性使生产不便，也增加了体积。改进措施是增加同样道数的FET模拟多路开关，不必使每一根丝连一积分电容。实际上对于一台监测器仅需6块这样的开关。这样做也避免了道间差异。对于丝信号通路的开关应选用低至0.1nA的宽范围的线性度和低的道间串扰。丝电流经I/V转换器放大后再作电压积分。若在放大级附加漂移补偿无疑有所得益。在S/H后发出数据准备好的信号提供A/D转换且数据自动送入CAMAC机箱中设置的缓冲寄存器。此寄存器中的数据还包括增益、监测器状态等参数。这有利于中央控制计算机应用程序对数据的读取和处理。另外，有必要进一步提高丝栅的加工工艺和结构。

### 参考文献

1. R. Anne et al., "A Secondary Emission Multiwire Chamber for GANIL Heavy Ion Beam Tuning", IEEE Trans. Nucl. Sci.

NS—26, No.2(1979)2379

2. 尹全民, 何易, “SFC—SSC束流匹配系统的物理设计”, 兰州重离子研究装置进展报告, 第二卷 (1983) 43

3. P. Strehl, “Beam Diagnostic Device for A Wide Range of Currents”, Ninth International Conference on Cyclotron and Their Applications, p545