

一种束流准直方法及其计算机控制程序

严学道

(中国科学院近代物理研究所)

本文介绍了在束流传输过程中对束流与传输中心相对位置进行测量和把偏移的束流准直到束运线传输中心的方法。由一对校正磁铁、一个四极透镜和一个多丝剖面探针组成的束流准直段能有效地提高束流传输线的传输效率。

关键词: 校正磁铁 四极透镜 多丝剖面探针 偏转磁铁 位移 倾角

在束流传输过程中, 多种原因可以使束流偏离束流传输线的光轴中心, 这将直接影响到束运线的传输效率。因此把束流准直到束流传输线的粒子光轴上是一项非常重要的工作。

采用由一对校正磁铁、一台四极透镜和一个多丝剖面探针组成的准直段是一种结构简单、费用较低而效率较高的方法。它的排列如图1所示。

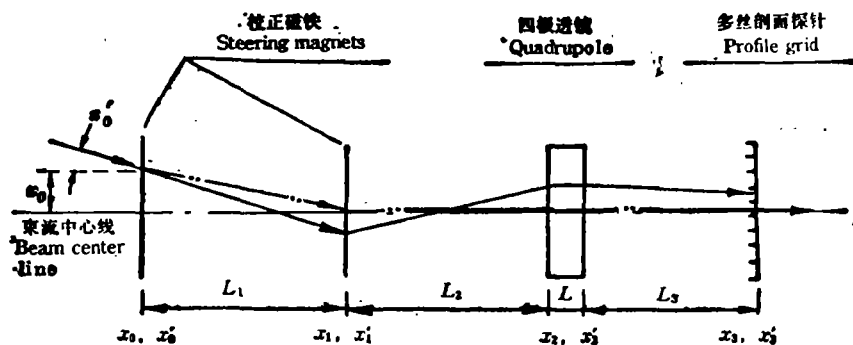


图1 准直段示意图

x 为束流偏离束流中心线的位移; x' 为束流与束流中心线的夹角; — 初始束流 — — — 准直束流

Fig. 1 Schematic diagram of the alignment section

x : Displacement deviated from the center line of beam x' : Slope relative to the center line of beam
— Initial beam — — — Aligned beam

根据带电粒子束流传输理论, 当束流经过一个四极透镜和一段漂移空间后的传输矩阵^[1]

$$M_n = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos KL & 1/K \sin KL \\ -K \sin KL & \cos KL \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $K = \sqrt{B'/B\rho}$, 是四极透镜比例系数, L 为四极透镜长度, L_3 为漂移空间长度; B' 为四极透镜场梯度; $B\rho$ 为带电粒子的磁刚度。

当有束流通过但不在传输线中心时, 给四极透镜置不同的电流值, 则在多丝剖面探针上可以测到不同的位移 $x_3^{(n)}$ 。根据束流传输理论, 方程^[1]

$$\begin{pmatrix} x_3^{(n)} \\ x_3'^{(n)} \end{pmatrix} = M_n \begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} \quad (2)$$

描述了从四极透镜入口到多丝剖面探针之间单个带电粒子的传输状态。

当给四极透镜置两次不同的电流, 可以得到两个不同的传输矩阵

$$M_1 = \begin{pmatrix} M_{11}^{(1)} & M_{12}^{(1)} \\ M_{21}^{(1)} & M_{22}^{(1)} \end{pmatrix} \text{ 和 } M_2 = \begin{pmatrix} M_{11}^{(2)} & M_{12}^{(2)} \\ M_{21}^{(2)} & M_{22}^{(2)} \end{pmatrix}$$

同时在多丝剖面探针上也可以测到两个不同的位移值 $x_3^{(1)}$ 和 $x_3^{(2)}$

$$\begin{pmatrix} x_3^{(1)} \\ x_3'^{(1)} \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x_3^{(2)} \\ x_3'^{(2)} \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} \quad (4)$$

分别展开(3)和(4)式

$$\begin{cases} x_3^{(1)} = M_{11}^{(1)}x_2 + M_{12}^{(1)}x_2' \\ x_3'^{(1)} = M_{21}^{(1)}x_2 + M_{22}^{(1)}x_2' \end{cases} \quad (3')$$

$$\begin{cases} x_3^{(2)} = M_{11}^{(2)}x_2 + M_{12}^{(2)}x_2' \\ x_3'^{(2)} = M_{21}^{(2)}x_2 + M_{22}^{(2)}x_2' \end{cases} \quad (4')$$

在多丝剖面探针上第一次测到的位移 $x_3^{(1)}$ 的展开式与第二次测到的位移 $x_3^{(2)}$ 的展开式(3')和(4')可以组成一个新的方程组:

$$\begin{cases} x_3^{(1)} = M_{11}^{(1)}x_2 + M_{12}^{(1)}x_2' \\ x_3^{(2)} = M_{11}^{(2)}x_2 + M_{12}^{(2)}x_2' \end{cases} \quad (5)$$

写成矩阵的形式

$$\begin{pmatrix} x_3^{(1)} \\ x_3^{(2)} \end{pmatrix} = M_m \begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中,

$$M_m = \begin{pmatrix} M_{11}^{(1)} & M_{12}^{(1)} \\ M_{11}^{(2)} & M_{12}^{(2)} \end{pmatrix}$$

解这个方程组就可以得到^[2]

$$\begin{cases} x_2 = (x_3^{(1)}M_{12}^{(2)} - x_3^{(2)}M_{12}^{(1)})/Z \\ x_2' = (x_3^{(2)}M_{11}^{(1)} - x_3^{(1)}M_{11}^{(2)})/Z \end{cases} \quad (7)$$

式中, $Z = M_{11}^{(1)}M_{12}^{(2)} - M_{11}^{(2)}M_{12}^{(1)}$ 。这样就得到了在四极透镜入口处束流相对于光轴的位移 x_2 和倾角 x_2' 。

由校正磁铁组成的导向系统的递推公式^[1]

$$\Phi_n = K_n I_n \quad X_n = X_0 + \sum_{m=1}^n L_m (X_m' + \Phi_m) \quad X_n' = X_0' + \sum_{m=1}^n \Phi_m \quad (8)$$

式中, Φ 为校正磁铁偏转角度; I 为校正磁铁激磁电流; $K_n = L_n \cdot B_n' / B\rho$, 是描述校正磁铁偏转角度与电流关系的系数; B_n' 为校正磁铁激磁系数; $B\rho$ 为束流磁刚度。

可以得到^[2]

$$\begin{aligned} X_0 &= X_2 - (L_1 + L_2)X_2' + L_1 K_2 I_2 \\ x_0' &= x_2' - K_1 I_1 - K_2 I_2 \end{aligned} \quad (9)$$

这样, 通过四极透镜入口处的 x_2 和 x_2' , 利用递推公式, 得到了准直段入口处的位移 x_0 和倾角 x_0' , 它表示束流在进入准直段以前不在输运管道中心上传输。

从图1可知: 如果要把此束流准直到输运线的中心上, 则束流必须穿过第二块校正磁铁的中心, 即 $x_1 = 0$ 。

$$x_1 = x_0 + L_1 x_0' + L_1 K_1 I_1 = 0$$

$$\text{则 } I_1 = -(x_0 + L_1 x_0') / (L_1 K_1) \quad (10)$$

而此时第二块校正磁铁入口处束流的斜率 $x_1' = -x_0/L_1$; $x_2' = x_1' + K_2 I_2 = 0$; $-x_0/L_1 + K_2 I_2 = 0$

$$\text{则 } I_2 = x_0 / (K_2 L_1) \quad (11)$$

这样就得到了将束流准直到输运线光轴上的两块校正磁铁的电流值。

在多丝剖面探针上采集到的位移值 x_3 会有误差, 仅仅用二次改变四极透镜激磁电流得到的二次测量值也并不非常可靠。而且在公式推导过程中采用的某些简化也会使计算结果存在误差积累。为此, 采取减小误差的手段和对误差进行分析是必不可少的。这里采用增加改变四极透镜电流置值的次数和用最小二乘法^[3]来分析测量结果。

束流偏离传输中心位移平方的和 P 必须尽可能地小^[2]:

$$P = \sum (x_3^{(n)} - x_{3R}^{(n)})^2 \rightarrow \text{最小} \quad (12)$$

式中, $x_3^{(n)}$ 为第 n 次多丝剖面探针上测量的位移值; $x_{3R}^{(n)}$ 为参考束流中心值。

由(2)式已知, x_3 与 x_2 和 x_2' 之间存在函数关系, 所以当 $\partial P / \partial x_2 = 0$ 和 $\partial P / \partial x_2' = 0$ 时, 可以找到 P 为极小值时的 x_2 和 x_2' , 由此可以得到比较正确的调节两块校正磁铁的电流值 I_1 和 I_2 。

如果将这套装置设置在弯曲磁铁或偏转磁铁出口处, 它可以作为一个了解束流经过偏转后与粒子光轴相对位移和夹角的测量装置(如图 2 所示)。与偏转磁铁相配合也可以将束流准直到传输中心线上。

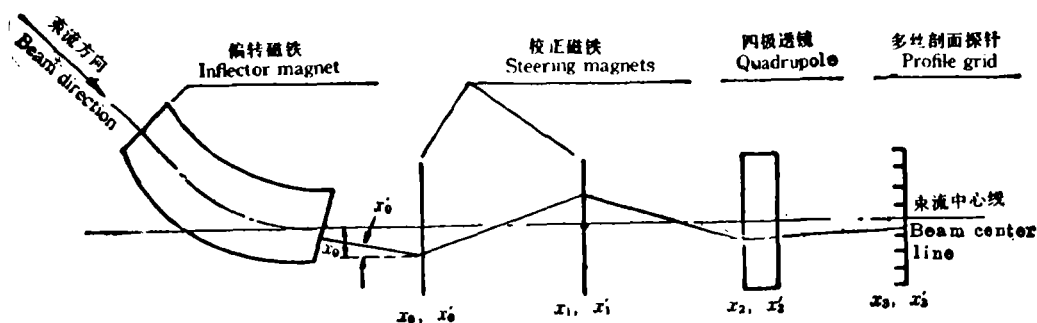


图2 准直段作为测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the alignment section as a measuring set

如前面描述的那样, 当束流经过束运管道时, 利用准直段可以得到第一块校正磁铁入口处的位移 x_0 和倾角 x_0' 。从图 2 可以看出, 这里的 x_0' 就是偏转磁铁出口处束流与光轴的夹角, x_0 与偏转磁铁出口处束流与光轴的位移也有关系。由递推公式已经知道, 偏转磁铁的偏转角度 $\Phi = KI$, 当偏转角有一个增量 $\pm \Delta\Phi$ 时

$$\Phi \pm \Delta\Phi = K(I \pm \Delta I)$$

显然

$$\Delta\Phi = K \cdot \Delta I$$

则

$$\Delta I = \Delta\Phi / K$$

(13)

在理想条件下, 束流经过偏转后在偏转磁铁出口处的位移和夹角应该等于零。实际上往

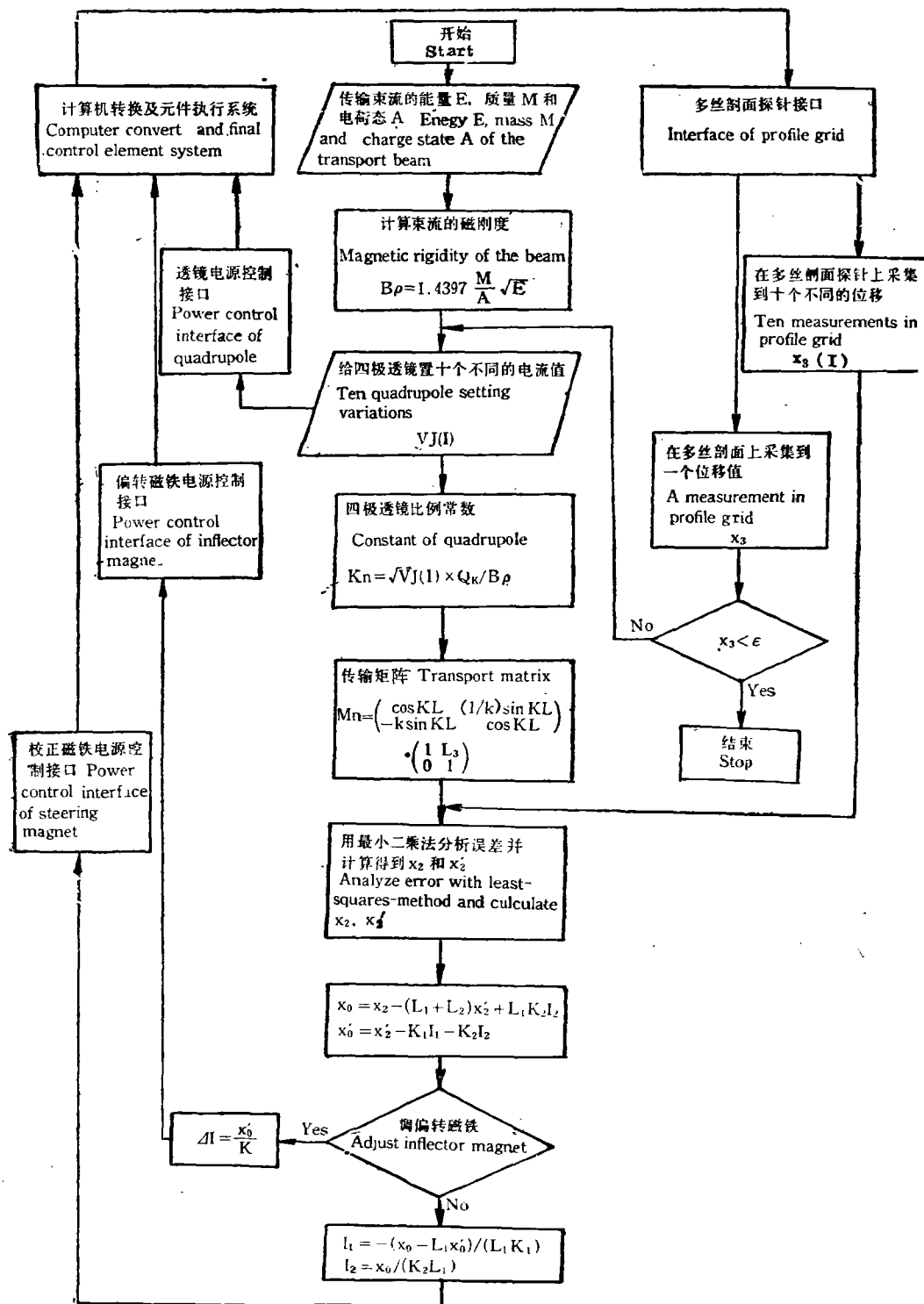


图3 计算机控制程序框图

Fig.3 Block diagram of the computer control program

往不等于零。也就是说偏转角 Φ 存在一个偏差 $\pm \Delta\Phi$, 这个 $\Delta\Phi$ 就是第一块校正磁铁入口处
的倾角 x_0' , 所以 $\Delta I = x_0' / K$ 。将此值对所加偏转磁铁的激磁电流进行调节, 使 x_0' 和 x_0 相应
得到改变。当 x_0' 和 x_0 尽可能小时, 就可以达到提高束运线传输效率的目的。

这种方法与前面介绍的准直段的方法相比其优点是: 由于利用了可以调节偏转磁铁偏转
角大小的功能, 因而可以使测量装置做得比较小, 节省经费。

调节两台校正磁铁或偏转磁铁电流的计算机控制程序已经建立并在 VAX-8350 机上通
过。如果与调节校正磁铁、四极透镜和偏转磁铁的电源控制接口以及从多丝剖面探针采集数
据的接口相连接和配合, 可以组成闭环系统。方框图如图 3 所示。

这项工作得到尹全民、许永兴、王义芳同志的帮助, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 魏开煜, 带电束流传输理论, 科学出版社, 1986.
- [2] L. Dahl and V. Schaa, A method for computer aided alignment of the Unilac beam, GSI Scientific
report, 1980.
- [3] 夏天长, 系统辨识——最小二乘法, 清华大学出版社, 1983.

A way of beam alignment controlled by a computer program

Yan Xuedao

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

Abstract

During beam transport, the beam may be deviated from the center of the beam line
axis for a variety of reasons. In order to improve transport efficiency of the beam trans-
port system, it is necessary to align the beam onto the ion-optical-axis of the beam line.
This paper introduces an alignment section containing a pair of steering magnets, a quadru-
pole and a profile grid. It is simpler, less expensive and more efficient than other ways.

Keywords: Steering magnet Quadrupole Profile grid Inflector magnet
Displacement Indination angle

(1990年4月4日收到)