

# 前冲谱仪中粒子轨迹的修正

陈廷杨 姚乃国

(南京大学物理系)

何 瑁

(山东大学物理系, 济南)

## 摘 要

本文介绍了在前冲谱仪中对于受到磁场边缘效应而弯曲的粒子径迹的简易修正方法。用数值积分方法求得径迹在分析磁铁前后斜率的修正值, 以消除磁铁边缘效应带来的误差。采用这一方法改善了分析磁铁前后径迹的连接, 并降低了本底, 改善了谱仪的分辨率。

## 一、引 言

在使用前冲谱仪的固定靶高能物理实验中, 由于磁铁的边缘效应以及磁铁外的铁材料的影响, 分析磁铁中磁场的分布有一定的不均匀性, 这种不均匀的磁场分布以及磁铁外边的边缘磁场, 在离线分析时使磁铁前后的粒子径迹识别产生了困难。因为在径迹识别阶段, 一般将磁铁前后径迹作直线外推到磁铁中心处, 根据在磁铁中心处前后径迹的汇合情况, 来判断这对径迹是否是由同一粒子所产生的。这在理想情况下(即在磁铁内磁场是均匀的, 在磁铁外磁场为零)是正确的, 但在实际情况下, 如不对粒子的径迹作一定的修正, 则不可能有这样的结论。因此如果在磁铁中心处对前后两条径迹的交汇误差作严格的限制, 则往往会丢掉好多径迹, 尤其是大角度的径迹。而这种大角度的出射粒子常常是大质量粒子的衰变产物。但另一方面, 如果把在磁铁中心交汇误差的限制放松, 则往往会使前后径迹选错, 使真正的粒子径迹数减少, 增加了本底。在径迹识别阶段还无法用样条函数拟合办法<sup>[1]</sup>来计算其误差, 因此必须考虑用其它办法来进行修正。本文介绍我们在美国费米实验室 E-705 实验中<sup>[2]</sup>所用的一种粒子径迹的简单修正办法。

## 二、方法简介

E-705 实验所使用的谱仪是安装在高强度质子西区实验室 (High Intensity Laboratory of Proton West) 内的大孔径谱仪<sup>[3,5]</sup>, 谱仪由靶、高计数率多丝正比室 (PCB1—PCB3)、多丝正比室 (PC1—PC3)、漂移室 (DC1—DC6)、光子探测器、 $\mu$  介子探测器和

分析磁铁所组成。坐标系是这样选取的： $z$  为束流的入射方向， $y$  为垂直向上方向， $x$ 、 $y$ 、 $z$  构成右螺旋。

入射粒子束为  $p$  (或  $\bar{p}$ 、 $\pi^+$ 、 $\pi^-$ )，其动量为  $300\text{GeV}/c$ ，由于入射粒子能量很高，会产生许多次级粒子，为了防止探测器在大量小角度粒子照射下饱和，在探测器 PC1—PC3 和 DC1—DC6 中间都有一个半径为  $5\text{cm}$  的不灵敏区。另用三个高计数率多丝正比室 PCB1—PCB3 来探测这些小角度高密度的粒子<sup>[4]</sup>。每个 PCB 都是由  $x$ 、 $u$  和  $v$  三个丝平面所组成。 $x$  丝平面的阳极丝为垂直设置，而  $u$  和  $v$  与  $x$  成  $\pm 28^\circ$  角。三个多丝正比室 PC1—PC3 及六个漂移室同样也有  $x$ 、 $u$ 、 $v$  三个丝平面，但  $u$  和  $v$  与  $x$  成  $\pm 16.7^\circ$  角。为了提高  $x$  方向的测量精度，PC1 和 DC4—DC6 还加有一个  $x'$  丝平面。 $x'$  丝平面的阳极丝同样是垂直设置的，但其位置与  $x$  丝平面相差半根丝距。

分析磁铁是口径为高  $91\text{cm}$ 、宽  $182\text{cm}$ 、长  $152\text{cm}$  的电磁铁。在  $2200\text{A}$  的工作电流时能产生  $12\text{kG}$  的磁场强度，因而使带电粒子产生  $0.766\text{GeV}/c$  的水平方向的动量变化。各处的场强均用 NMR 探针进行测量。在入射粒子动量为  $300\text{GeV}/c$  时，谱仪对  $J/\psi$  的接收度随  $x_f$  的变化如图 2 所示，这里  $x_f$  是费曼变量。因为磁铁口径很大，除了极间存在磁场外，磁铁外部从漂移室 DC2 一直到 DC5 都有边缘磁场存在。此外，为了防止磁场对光子探测器产生影响，整个光子探测器安装在铁制外壳的磁屏散室中，而这一屏蔽铁材料又对 DC4 和 DC5 处的磁场产生影响，因此整个谱仪在分析磁铁外部磁场弥散度较大，且很不对称，这些边缘磁场的存在增加了在径迹重建过程中所遇到的困难。

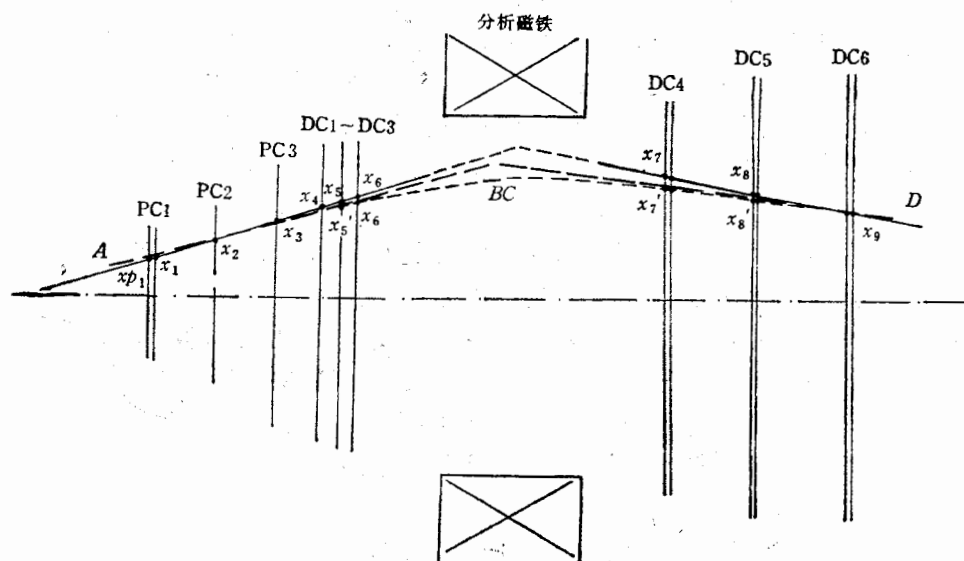


图1 边缘磁场对带电粒子径迹的影响

图1可以说明这些弥散磁场如何使径迹重建产生困难的。如果在磁铁外部的磁场强度为零，则带电粒子径迹在磁铁前探测器上的坐标位置应为  $x_1-x_6$ ，在磁铁后三个探测器上的坐标为  $x_7-x_9$ ，但是因为从探测器5到8存在着弥散磁场，带电粒子在这些磁场中运动时会发生偏转，因而实际上探测器5—8测得的坐标是  $x'_5-x'_8$ ，这样经过线性拟合后重

建的粒子径迹为两条偏转了的直线  $AB$  和  $CD$ , 由于在磁铁前后的弥散磁场不是对称的, 因此  $AB$  和  $CD$  不可能在磁铁中心平面相交, 所以根据在磁铁中心平面处入射和出射径迹的交汇误差作为配对的依据常常会出现错误, 尤其在次级粒子数很高的情况下更是如此. (在 E-705 实验中, 每个事例的平均次级粒子数为  $15^{[4]}$ ), 因此必须对粒子径迹作修正.

修正的方法如下. 带电粒子在磁场中的运动服从罗伦兹方程:

$$d\mathbf{p}/dt = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

式中  $q$  为粒子的电荷,  $\mathbf{p}$  为动量,  $\mathbf{v}$  为速度,  $\mathbf{B}$  为磁感应强度. 在分析磁铁中  $\mathbf{B}$  主要在  $y$  方向,  $x, z$  方向的分量很小即

$$B_y \gg B_x, B_z.$$

因此, (1) 式可以近似写成:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = q \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \approx q \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \\ 0 & B_y & 0 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\dot{x} = dx/dt$ ,  $\dot{y} = dy/dt$ ,  $\dot{z} = dz/dt$ ,  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  分别代表  $x, y$  和  $z$  方向上的单位矢量. 由(2)式可得:

$$dP_z/dt \approx -qB_y dz/dt; \quad (3)$$

$$dP_x/dt \approx qB_y dx/dt; \quad (4)$$

$$dP_y/dt \approx 0. \quad (5)$$

在前冲谱仪中,  $P_x \gg P_z$ , 即  $dz/dt \gg dx/dt$ , 所以(3)式比(4)式重要得多. 下面作变数替换, 选用  $z$  作为自变量, 因此有

$$x' = dx/dz = (dx/dt)/(dz/dt) = \dot{x}/\dot{z}; \quad (6)$$

$$x'' = d^2x/dz^2 = (\ddot{x}\dot{z} - \dot{x}\ddot{z})/\dot{z}^3; \quad (7)$$

$$p = m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)^{1/2} = m\dot{z}(1 + x'^2 + y'^2)^{1/2}. \quad (8)$$

由于在粒子飞行过程中只受到磁场的作用, 因此它的能量保持不变, 也就是说  $m$  是常数, 所以  $dP_x/dt = md^2x/dt^2$ ,  $dP_z/dt = md^2z/dt^2$ . 从(3)和(4)式可以得到

$$\ddot{x} = d^2x/dt^2 = -\frac{q}{m} \dot{z} B_y; \quad (9)$$

$$\ddot{z} = d^2z/dt^2 = \frac{q}{m} \dot{x} B_y. \quad (10)$$

由(7)、(8)、(9)、(10)得到

$$px'' = p(\ddot{x}\dot{z} - \dot{x}\ddot{z})/\dot{z}^3 = -qB_y(1 + x'^2)(1 + x'^2 + y'^2)^{1/2},$$

所以

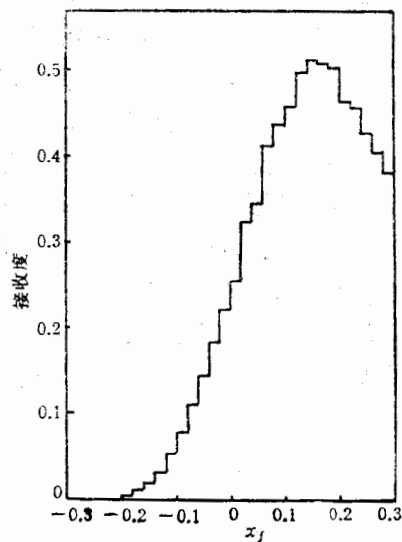


图2  $J/\psi$  的接收度与费曼变量  $x_j$  的关系

$$x'' = -(q/p)B_z(1+x'^2)(1+x'^2+y'^2)^{1/2}.$$

两边对  $z$  积分, 积分上下限为从有磁场的地方开始直到最靠近磁铁的探测器为止:

$$\begin{aligned} \Delta x' &= -(q/p) \int B_z(1+x'^2)(1+x'^2+y'^2)^{1/2} dz \\ &= -(q/p) \int B_z(1+x'^2) dl, \end{aligned} \quad (11)$$

上式中  $dl = (1+x'^2+y'^2)^{1/2} dz$ .

(11)式就是粒子速度由于受到弥散磁场的影响而产生的变化, 显然由于受到磁场的作用, 粒子的轨迹将不再是直线, 而有一定的弯曲. 而从图1可看到, 在积分中  $B_z$  不是均匀的, 因此其轨迹也不是一个圆弧, 而是一条复杂的曲线. 可根据(11)式用数值积分办法求出斜率的变化值  $\Delta x'$ , 对径迹进行修正, 找出正确的人射与出射径迹对.

### 三、修正过程

首先用线性拟合方法分别找出分析磁铁前后可能有的径迹, 从上面已知, E-705 实验中, 磁铁前  $x$  方向有 7 个丝面,  $u$  和  $v$  各有 6 个丝面, 因此磁铁前的径迹基本上是可得的. 但在磁铁后面  $x$  有 6 个丝面, 而  $u$  和  $v$  各有 3 个丝面, 因此有好多不确定的径迹, 在前后识别过程中的一个重要目的就是清理这些假线. 对应于一条磁铁前的径迹, 在允许的磁铁中心平面前后两条径迹汇合的误差范围内, 可能有几条磁铁后的径迹. 对于所有可能的前后径迹对, 先按常数  $B_z$ , 从磁铁前后径迹的偏转求出动量  $p$  来, 将  $p$  值代入(11)式进行数值积分, 得到  $\Delta x'$  即斜率的改变, 对磁铁前后的  $x$  方向斜率分别作修正, 然后计算新的  $p$ , 这样经过几次迭代, 对于真正的径迹对, 一般作二次迭代后就会在磁铁中心处相汇, 如果不是真正的一对, 一般会越来越分开, 这样就可以找到正确的一对径迹, 并得到精度更高的粒子动量  $p$  值. 为了检验本方法的可行性, 采用 2、6、10、15、30、60 和 100 GeV/c 的单能电子束进行校验. 调整入射束流的偏转磁场, 使电子束以一定角度入射, 并移去靶室, 因此现在整个谱仪中只有一条已知动量的带电粒子径迹, 此时在分析磁铁前后径迹的

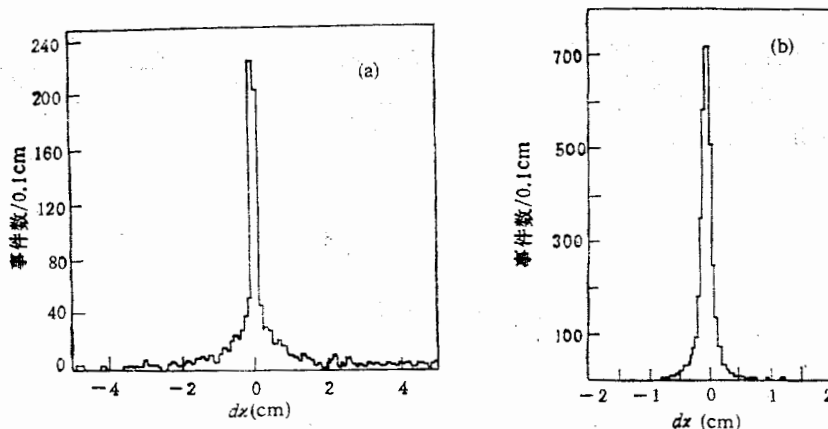


图3 用径迹找得的反应点和入射粒子在靶上的  $x$  方向偏差

重建和识别将没有任何困难。将修正后求得的粒子动量和未经修正求得的粒子动量与已知的人射粒子动量进行比较,结果表明这一方法是可行的。

### 四、结 果

图 3 是动量为  $300\text{GeV}/c$  的质子作为入射粒子时在靶上的  $x$  方向位置和用径迹重建

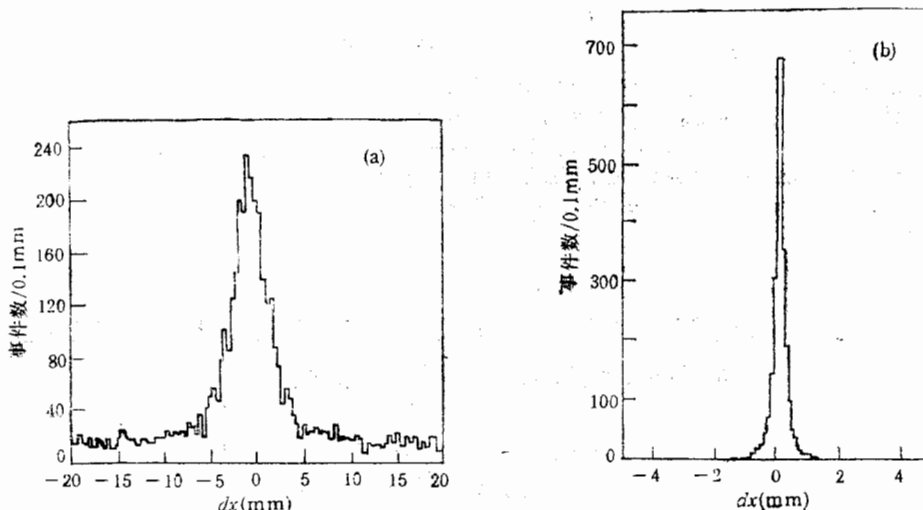


图 4 前后径迹在磁铁中心平面上的交汇偏差

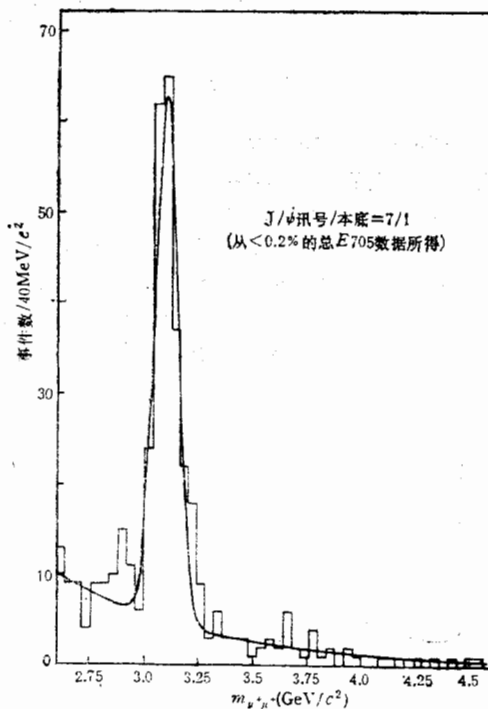


图 5  $\mu^+$ 、 $\mu^-$  合成的质量谱

) 寸 三 卜 金 · 三 磁 能 式 章 目 青 / c 吧 灼

程序求得的反应点  $x$  位置的偏差。图 3(a) 是未经修正的结果, 图 3(b) 是经过修正的结果, 二者比较可看到有较大的改善。图 4 是在分析磁铁前后的粒子径迹在磁铁中心平面处的交汇偏差, 同样也可看到有一定的改善。图 4(a) 为未经修正的结果, 图 4(b) 为用了修正方法后的结果。

图 5 是用加了修正后的径迹重建程序找出的  $\mu^+$ 、 $\mu^-$  合成的  $J/\psi$  粒子的质量谱, 拟合后得到的  $J/\psi$  粒子的质量为  $3.10\text{GeV}/c^2$ ,  $\sigma = 52\text{MeV}/c^2$ 。

### 参 考 文 献

- [1] H. Wind, *Nuc. Ins. & Meth.*, V115 (1974), 431; V153, (1978) 195; V161 (1979) 327.
- [2] M. Binkley et al., Fermilab Proposal E-705. (Oct. 1981),
- [3] E. Anassontzis et al., *Nucl. Ins. & Meth. in Phy. Research.*, A242 (1986), 215—227.
- [4] S. Conetti et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-36 (1989), 112.
- [5] C. M. Jenkins et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-36 (1989), 117.

## THE CORRECTIONS OF CHARGED PARTICLE TRACKS IN A FORWARD SPECTROMETER

CHEN TINGYANG YAO NAIGUO

(Department of Physics, Nanjing University)

HE MAO

(Department of Physics, Shandong University, Jinan)

### ABSTRACT

A simple method is introduced here to correct the bends of the charged tracks, due to the fringe effect of the magnet in a forward spectrometer.

Because of the irregular magnetic fields caused by the fringe effect, the track of a charged particle will be twisted when it passes the magnet. By numerical integration, the slope corrections of the track both before and after the momentum analysis magnet have been made. With this method the before and after magnet track matching has been greatly improved and the background, due to the wrong matching, has been reduced.