

用于北京谱仪 II 主漂移室径迹重建的 一种新方法

刘靖¹⁾ 毛泽普 李卫国 张长春 陈光培 严武光
李佩琴 荣刚 赵海文²⁾ 谢昱

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 介绍了一种新的主漂移室径迹重建软件 DCJULIE, 阐述了在径迹重建中模式识别方法的原理和技巧. 经过蒙特卡罗和真实数据的运行和检查, 证明了软件的可靠性.

关键词 模式识别 径迹字典 径迹重建

1 引言

北京谱仪 II (BES-II)³⁾ 是运行在北京正负电子对撞机上的第二代大型通用谱仪. 它主要包括稻草管型的顶点探测器、新的主漂移室 (MDC) 和飞行时间探测器、簇射计数器、 μ 子鉴别器以及磁铁线圈等. 升级后的主漂移室是一个内径 31cm, 外径 230cm, 有效长度 212cm, 包括十个同心丝层的圆桶. 其中奇数丝层为斜丝层, 与 z 轴有 3° — 5° 的夹角; 偶数丝层为轴向丝层, 平行于 z 轴, 分别用于带电粒子空间轨迹 z 坐标和 x, y 坐标的测量. 一到十层在 ϕ 方向分别被划分为 48—128 单元, 全室在 ϕ 方向有 $1/4$ 的对称性, 有利于采用 DCJULIE 方法提高径迹重建速度. 每个单元在径向排列 4 根灵敏丝, 各灵敏丝依次相对单元中心轴左右偏离 $350\mu\text{m}$, 用于径迹的“左右判定”, 单元结构如图 1. 室内工作气体为 $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CH}_4$ (89%:10%:1%), 在漂移区电子的漂移速度约为 $50\mu\text{m}/\text{ns}$. 整个 MDC 安装在 0.4T 的轴向磁场中, 使电子漂移方向与电场方向的夹角为 17° ⁴⁾.

1997-07-29收稿, 1997-12-30收修改稿

1) 中国高等科学技术中心博士后

2) 北大技术物理系博士后

3) 北京谱仪是工作在北京正负电子对撞机上的—台大型探测器, 于1994年至1995年进行了更新, 本文将更新后的北京谱仪称作 BES-II, 更新前的称作 BES-I

4) 王运永, 主漂移室机械设计参数, 内部资料

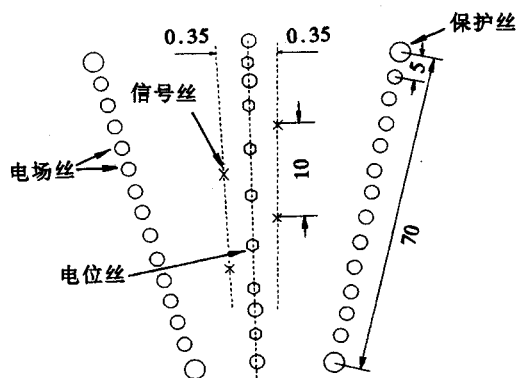


图 1 主漂移室的单元结构(单位: mm)

2 径迹重建原理

正负电子对撞产生的带电粒子穿越漂移室,使漂移室内的工作气体电离,电离电子在电场的作用下向附近的信号丝漂移并产生雪崩放大,在信号丝上产生信号,由此得到电离电子漂移时间.径迹重建的任务就是要根据各信号丝上的漂移时间信息去再现带电粒子飞行径迹的空间位置、动量以及电荷等物理量.

带电粒子在磁场中运动时,所飞行的路径是一条空间螺旋线,它在与磁场方向垂直的平面(ϕ 平面)上的投影是圆弧线.这是漂移室径迹重建的依据.这里介绍的 DCJULIE 方法包括径迹寻找和径迹的螺旋线拟合.

2.1 径迹寻找

径迹寻找一般有两种方法,即所谓局域方法和整体方法. BES-I 的主漂移室重建软件采用前一种寻迹方法^[3],速度较慢, DCJULIE 采用后一种寻迹方法,速度较快,它实际上是一种模式识别过程.其原理是将主漂移室测量到的漂移时间(对应径迹上的坐标点)分成组,每组对应于一根径迹,与径迹无关的点被排除,然后由径迹上的点给出径迹的参数.具体作法是首先产生一个由各种可能构成圆弧径迹的单元组合(模式)而组成的字典,然后将每个事例的着火单元按字典的内容填入一个与字典大小相同的模式数组,最后用一种类似于人工智能的方式将径迹挑选出来.该方法最早用于快触发逻辑, J.J. Becker 等人^[1]首先将该方法用于 MARK-III 漂移室寻迹软件系统.根据这个思想,我们开发了 BES-II 主漂移室径迹寻找和径迹拟合软件系统 DCJULIE.

2.1.1 字典的产生

BES-II 主漂移室的寻迹首先在轴丝层进行,找到轴丝层的圆弧径迹后再把斜丝层的着火信息加在每根径迹上.因此字典中的每根径迹由五个轴丝层单元组成.字典包括三部分:

1) 径迹模式字典

从坐标原点画一条穿过主漂移室的圆弧线,它分别与五个轴丝层相交于五个单元,用这五个单元表示字典中的一根径迹.找出所有这样的单元组合,就构成径迹模式字典.字典的产生由一套纯几何的计算程序完成,产生字典时,限制圆弧半径对应的粒子的横动量应大于 70MeV(粒子要到达 MDC 外层至少要 72MeV 横动量),这种条件下 BES-II 的 MDC 内共产生 10048 条可能径迹.

2) 单元字典

在原始数据中 MDC 的信息是每个着火单元的地址和漂移时间,由此找出与每个单元相联系的径迹模式.单元号与相应径迹模式就构成了单元-径迹字典,它是字典的一个重要部分.

3) 辅助字典

由于允许单元失效存在,或者一些径迹飞到端盖,所以并非每条径迹都有五个轴丝层单元击中.实际上一根有效径迹只要求有两个轴丝层单元击中,我们希望软件能有效地找出这些短径迹.每种径迹模式都有其很多子模式.例如对径迹模式(其中 x 表示未触发单元,数字表示该层触发单元号):

1: 4 4 6 10 12;

2: 4 4 6 10 x ;

3: 4 4 6 x 12;

4: 4 4 x 10 12;

模式 2, 3, 4 并不是真正的径迹模式,而是模式 1 的子模式,必须在模式识别时判断并去掉这些子模式.为此将所有径迹模式的子模式找出,以某种数据结构记录下来形成辅助字典.

以上字典的产生过程首先在 MDC 的第一扇区进行,然后按 MDC 的对称性推演到其它扇区, MDC 的对称程度将直接影响辅助字典的大小及模式识别速度.

2.1.2 模式识别

径迹寻找是从模式识别开始的,模式识别就是查字典.构造一个二维数组,其大小和结构与径迹字典类似,用一个二维数组 $P(I, J)$ 表示,其中 $I = 1, 5$, 与 5 个轴丝层对应, $J = 1, 10048$, 它是计算机内存的一个字节,对应一根径迹的击中模式.

由 MDC 数据拆包后得到着火单元(要求单元中四根信号丝上至少三根丝着火),从字典中取出每层各着火单元对应的径迹模式,将数组 P 的相应位用 x 表示.例如层 i 的单元

表1 填充后的一条径迹的 $P(I, J)$ 分布

径迹号 层号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	15	...	18	...	19	20	...	64	...
10	x	x								
8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	...	x	...	x	...		x
6	x		x	x					x		...	x	...	x	x	...
4	x	x	x	x		x					...	x	...	x	...		x	...	x	...
2	x	x		x		x		x			x	...		x	...	x	...

注: x 表示该层有触发单元

C 对应单元字典的 $K-L$ 列, 则置 $P(I, J) = x$, ($j = K, L$). 这样处理完所有的着火单元后, 检查 P 的每一列, 看它是否满足一条有效径迹的条件 (即该列中 x 的个数是否大于等于 2). 表 1 显示了字典中一条径迹的 $P(I, J)$ 分布.

检查 $P(I, J)$ 的每一列是否满足一条有效径迹的条件时, 逐列检查是很费时的. 利用另一数组 OVRSEE, 它只有 10048/32 列, 它的每一列是 $P(I, J)$ 的 32 列经过字位“或” (OR)

操作而得到, 只要检查 OVRSEE 的每一列, 看它是否满足一条有效径迹的条件. 如能满足, 则在此列对应的 $P(I, J)$ 的 32 列中寻找能满足有效径迹的列. 这样的手段大大加快了模式识别速度. 找到 $P(I, J)$ 中所有能满足有效径迹的列后, 利用辅助字典, 将 $P(I, J)$ 中一些非真实的子模式去掉, 剩下的列对应候选径迹. 下一步对这些候选径迹作进一步挑选.

2.1.3 径迹挑选和圆拟合

到目前为止, 径迹寻找只是用到了单元着火信息, 还没有利用各丝上的漂移时间信息.

图 2 是一条径迹的几何示意图. 由图 2 可见径迹在 $R-\phi$ 平面上的投影是一条圆弧线, 利用主漂移室各信号丝的几何参数和测量到的电离电子的漂移时间, 可由下式计算径迹在 $R-\phi$ 平面上的投影的位置坐标:

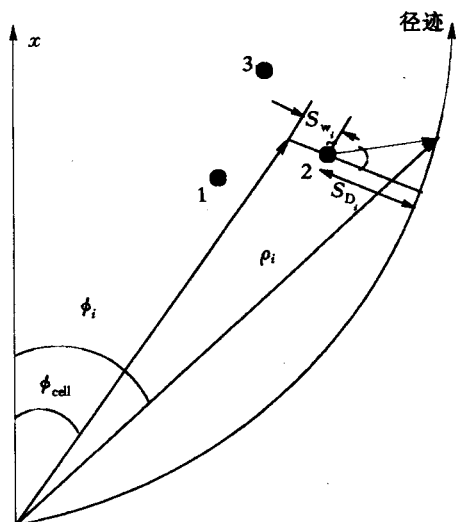


图 2 径迹元参数计算示意图

1, 2, 3 表示信号丝位置.

$$\begin{cases} \rho_i = \rho_{w_i} + S_{D_i} \cdot \operatorname{tg} \theta_L \\ \phi_i = \phi_{\text{cell}} + \frac{(S_{D_i} + S_{w_i})}{\rho_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ_L 为洛伦兹角, 是电离电子漂移方向与电场方向的夹角 (磁场为 $0.4T$ 时, $\theta_L \approx 17^\circ$), 漂移距离 $S_D = \cos \theta_L \cdot T \cdot v_d$, v_d 为电子漂移速度, ρ_{w_i} 为着火灵敏丝处的圆半径, ϕ_{cell} 为该单元中四根信号丝的平均方位角, S_{w_i} 为着火灵敏丝偏离中心的距离, 大小为 $\pm 350 \mu\text{m}$. ρ_i 和 ϕ_i 为径迹在 $R-\phi$ 平面上投影点的坐标. 由下式转换为 xy 坐标:

$$\begin{cases} x_i = \rho_i \cdot \cos \phi_i \\ y_i = \rho_i \cdot \sin \phi_i \end{cases}$$

由着火单元决定的径迹元的曲率半径 R 和径迹方向 ϕ_0 计算如下:

$$\begin{cases} R = \frac{1}{2} \left(\rho^2 + \left(\frac{d\rho}{d\phi} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ \phi_0 = \phi - \sin^{-1} \frac{\rho}{2R} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} d\rho = \rho_3 - \rho_1, \\ d\phi = \phi_3 - \phi_1. \end{cases}$$

由于 MDC 一个单元中四根灵敏丝依次左右偏离单元中心距离 S_{w_i} , 假定某单元中有三个信号丝测量的漂移时间分别为 T_1, T_2, T_3 , 对应漂移距离为 S_1, S_2, S_3 , 则

$$\Delta S = \frac{S_1 + S_3}{2} - S_2 = \pm S_{w_i}, \quad (3)$$

ΔS 的符号表示带电粒子穿过信号丝的左边还是右边, 该法可解决大部分单元的左右判定, 无法判断的单元将在后面的圆拟合中解决. 计算出上述各种信息的着火单元, 叫做 OBJECT.

利用字典中找出的候选径迹和着火单元的各种信息, 把所有有公共 OBJECT 的候选径迹放在同一径迹束 (BUNDLE) 中, 程序对每一径迹束中所有候选径迹进行筛选, 挑选出真实的径迹. 如果一个 BUNDLE 中只有一根径迹, 则认为它就是一根真实径迹, 直接进入圆拟合; 对 BUNDLE 中有多根径迹的情形, 径迹挑选的任务就是将公用的 OBJECTS 划为正确的径迹, 一般由公用 OBJECT 的 κ, ϕ 值即可将它们划分特定径迹. 如果这种方法不成功, 则在圆拟合中选择 χ^2 最小的 OBJECTS 组合作为真实径迹.

圆拟合是用一种快速非迭代拟合方法^[2], 利用各点的 (x, y) 坐标通过拟合得到径迹的圆参数 (x_0, y_0, R_0) . 圆拟合的 χ^2 定义为:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - R_0^2]^2. \quad (4)$$

2.1.4 z 向坐标重建

根据轴丝层得到的径迹投影圆参数, 利用斜丝层的着火信息, 可得到径迹的 z 向坐标信息. z 向坐标重建分三步进行:

1) 计算每条圆弧径迹与每层着火斜丝的交点. 假定该交点所确定的斜丝单元号为 K , 则在 $K-a$ 到 $K+b$ 单元之间寻找斜丝 OBJECTS, a 和 b 是事先确定的整数. 每根圆弧径迹都可得到一组斜丝 OBJECTS.

2) 计算各斜丝确定的 z 坐标. 计算如下:

对斜丝 i , 它的着火点在 $x-y$ 平面上投影的坐标为 (x_s, y_s) , 可由式(1)算出. 其空间坐标为 $(x_s, y_s, 0)$, 过该点与斜丝 i 平行的直线 l' 的方程为:

$$\begin{cases} x = x_s + T_x \cdot (z - z_s), \\ y = y_s + T_y \cdot (z - z_s), \end{cases}$$

其中 T_x, T_y 是直线 l' 和斜丝 i 夹角的正切,

$$\begin{cases} T_x = \frac{x_n - x_s}{z_n - z_s}, \\ T_y = \frac{y_n - y_s}{z_n - z_s}. \end{cases}$$

显然 $z_s = 0$, 平面圆弧径迹在空间是圆柱面:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2,$$

因此求斜丝 i 决定的径迹的 z 坐标实际上是求直线 l' 与圆柱面的交点, 推导可得:

$$z = -\beta \pm \frac{\sqrt{\delta}}{\alpha},$$

其中 $\alpha = T_x^2 + T_y^2$, $\beta = T_x x_p + T_y y_p$, $\delta = \beta^2 - \alpha\gamma$, $\gamma = x_s^2 + y_s^2 - R^2$, $x_p = x_s - x_0$, $y_p = y_s - y_0$, 式中的 \pm 符号由径迹弯曲方向确定. 每根圆弧径迹都可得到一些 z 坐标的组合.

3) 计算符合程度

对每根斜丝所确定的 z 坐标, 它与径迹起点处的 z 坐标 z_0 关系如下:

$$z = z_0 + \rho \operatorname{tg} \lambda,$$

其中 λ 是径迹与 xy 平面的夹角, ρ 是测量点到 z 轴的距离. 对径迹所有的 z 坐标, 按上式做线性的最小二乘拟合, 找出拟合结果中一组 χ^2 最小的 z 坐标组合, 就是同该径迹相联系的一组斜丝单元, 拟合同时给出螺旋线拟合的初值 $z_0, \operatorname{tg} \lambda$.

2.2 径迹拟合

利用径迹寻找过程得到的径迹参数, 对径迹进行螺旋线拟合, 得到径迹的有关物理量, 如动量、径迹顶点位置、径迹运动方程及误差矩阵等.

带电粒子在磁场中的运动服从以下方程:

$$M\ddot{\mathbf{x}} = \frac{Q}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{x}),$$

其中 M 为粒子的质量, Q 是粒子电荷, 以电子电荷 e 为单位, \mathbf{v} 和 \mathbf{B} 分别是带电粒子在 \mathbf{x} 点的

速度和磁场. 在 BES-II 的均匀轴向磁场下, 选用与径迹相关的坐标系 $(\hat{n}, \hat{h}, \hat{b})$ [3], [1]. 见图 3. 图中 \hat{h} 为磁场方向, \hat{b}, \hat{n} 是垂直于 \hat{h} 的平面上两个互相垂直的矢量. 带电粒子在沿 z 轴均匀磁场中的运动轨迹是一条空间螺旋线, 由五个参数描述: $\phi, \kappa, S, \xi, \eta$, 其中 ϕ 是径迹在 x, y 平面投影圆弧的初始方位角, $\kappa = \frac{1}{R}$, R 为投影圆弧半径, $S = \operatorname{tg} \lambda$, 是 $\hat{n}-\hat{b}$ 的夹角, ξ 和 η 是粒子在 \hat{n}, \hat{h} 方向的坐标. 粒子经过 ΔS 从 P 点运动到 P' 点时, 径迹的坐标和方向 P' 和 t' 为:

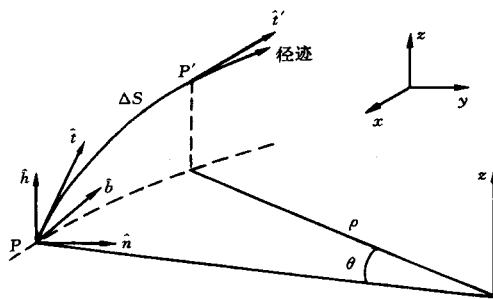


图 3 螺旋线拟合选择的坐标系

粒子经过 ΔS 从 P 点运动到 P' 点时, 径迹的坐标和方向 P' 和 t' 为:

1) Orbit reconstruction program for spear MARK-III detector: ARCS, physics notes, Lawrence Berkeley Laboratory—University of California memo, No. TG-301

$$\begin{cases} \mathbf{P}' = \mathbf{P} + \rho[\sin\theta \hat{b} \pm (1 - \cos\theta) \hat{n} + \theta \cdot \text{tg}\lambda \hat{h}] \\ \mathbf{r}' = (\hat{i}' \cdot \hat{b}) \hat{b} + (\hat{i}' \cdot \hat{n}) \hat{n} + (\hat{i}' \cdot \hat{h}) \hat{h} \\ \quad = \cos\lambda (\cos\theta \hat{b} \pm \sin\theta \hat{n} + \text{tg}\lambda \hat{h}) \end{cases},$$

式中的 \pm 符号与粒子电荷符号相同。

径迹采用分段螺旋线拟合。根据径迹上着火点数将空间螺旋线分为 n 段, 每段长 ΔS , 称为步长。假定 ΔS 内磁场均匀, 并取中点处的磁场值代替。拟合初值 $(x_0, y_0, z_0, \kappa, \phi, \text{tg}\lambda)$ 由寻迹过程给出, 并由它们求得径迹起点的单位矢量 $(\hat{n}, \hat{b}, \hat{h})$, 由上式得径迹经过 ΔS 后的位置 \mathbf{P}' 和方向 \mathbf{r}' , 分别计算理想径迹上点 \mathbf{P}' 到着火线的最小漂移距离 $D_i(\alpha_\mu)$, 根据修正后的漂移时间可计算最小漂移距离 D_i^m 。 (i 表示第 i 根触发丝。)

径迹拟合采用最小二乘法。 χ^2 定义为:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} (D_i(\alpha_\mu) - D_i^m)^2,$$

式中 N 为径迹上着火点总数, $\frac{1}{\sigma_i^2}$ 是第 i 根丝的权重, α_μ 是五个径迹参数。拟合是经过多次迭代, 并不断对五个拟合参数做修正进行的, 直到得出 χ^2 最小值为止, 利用五个拟合参数可得到径迹的物理量, 拟合过程给出误差矩阵。最后根据拟合得到的螺旋线参数将径迹内推到离坐标原点最近处, 得到径迹顶点坐标。所以一条好的径迹必需通过 χ^2 和顶点坐标等参数的切割, 并要求击中数大于 11。

3 运行结果

这套程序自 1994 年开发以来, 对 BES-II 运行所取数据和各种蒙特卡罗事例进行径迹

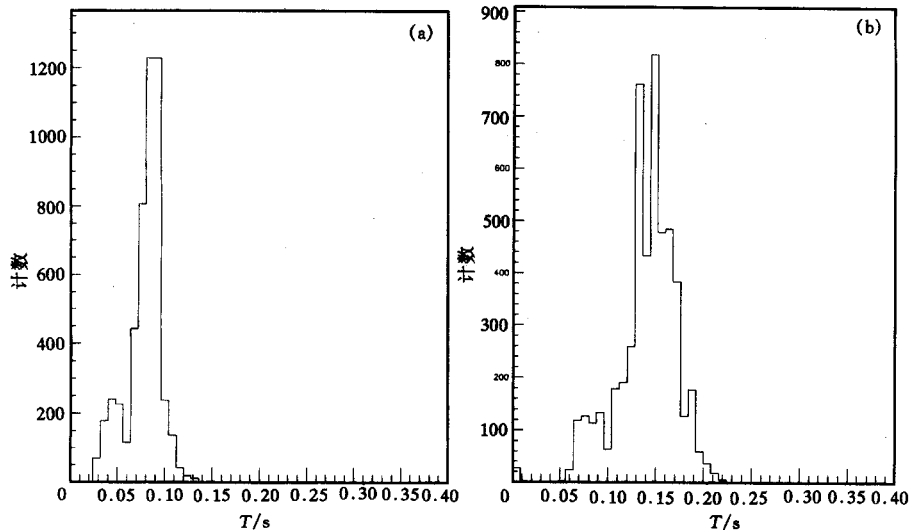


图 4 两种方法重建两条 MC 径迹时平均每根径迹所需的时间分布

(a) DCJULIE 方法; (b) DCFIND 方法。

重建, 结果表明程序的各项指标达到预期结果.

径迹重建所需的计算机时间是衡量程序工作效率的重要指标. DCJULIE 特点是重建速度快. 图 4(a) (b) 分别是用 DCJULIE 和 DCFIND 方法重建两条带电径迹 (MC 数据, $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, 机器为 VAX4090) 时每条径迹所消耗的计算机时间分布, DCJULIE 所需时间为 0.083s, DCFIND 所需时间为 0.144s.

径迹重建效率是程序运行可靠性的标志, 用 MC 数据作检查, 对 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$ 和低动量单径迹作重建, 重建效率好于 98%. 对实验数据, 用单事例扫描法和用簇射计数器挑选 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 事例, 确定应该找到的径迹数, 然后与程序找到的径迹数比较, 得到径迹的重建效率好于 96%.

空间分辨是衡量 MDC 性能的主要指标之一, 它直接影响动量分辨. 影响单丝的空间分辨的主要因素有: 电离电子在漂移过程中的扩散, 电子学读出系统的误差以及电离位置的统计涨落^{1), 2)}. 所以信号丝的空间分辨因漂移单元宽度的不同而改变. 空间分辨可用径迹拟合的残差表示: $\Delta D = D_m - D_{fit}$, 其中 D_m 表示经过校正后的测量漂移距离, D_{fit} 表示理论漂移距离, 它是硬件测量误差和软件拟合误差的综合, 该分布的宽度代表空间分辨 σ_x . 图 5 是分析实验数据得到的 MDC 某层的残差分布, 从残差分布得到的空间分辨 σ_x 约为 200 μm , 基本达到设计指标 ($180\mu\text{m} \leq \sigma_x \leq 220\mu\text{m}$).

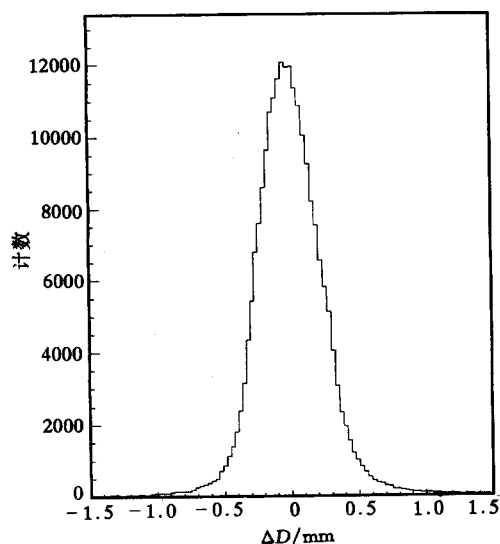


图5 残差分布

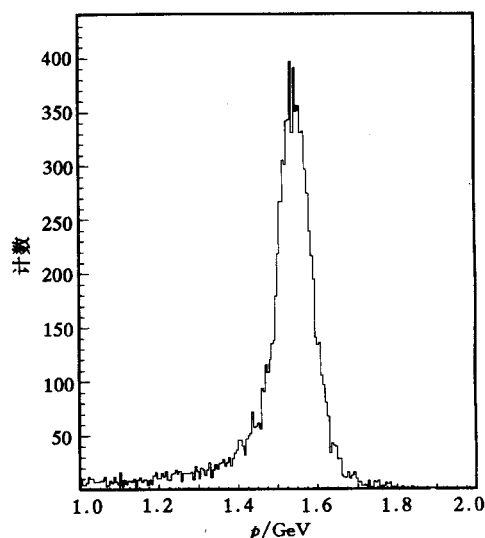


图6 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 的动量分布

动量分辨是衡量漂移室性能的另一主要指标. 理论上影响动量分辨的因素有空间分辨和库仑散射^{3), 4)}. 但是漂移室内磁场和电场的精度和不均匀性、丝触发效率、各丝的刻

1) 见第587页脚注1)

2) 马基茂, 北京谱仪 (BES) 主漂移室 (第一分册), 内部资料, 1985

3) 见第587页脚注1)

4) 见第587页脚注2)

度常数等都对动量分辨有影响. 图 6 是 DCJULIE 软件重建实验数据 (BES-II 较稳定运行取得的数据 RUN10355—RUN10399, $J/\psi \rightarrow e^+e^-$) 得到的动量分布, σ_p 为 51 MeV, 计算得到动量分辨约为 $\frac{\sigma_p}{p} = 1.8\% \sqrt{1+p^2}$, 基本达到了设计指标.

本套软件从开发到调试运行, 高能物理所一室各级领导特别是李金教授给予本工作大力的支持和帮助; 一室刻度组, 数据组及 MC 组的各位同事也给我们很多帮助和建议, 这里表示衷心的感谢. 感谢 MDC 硬件组全体人员给予我们的无私帮助和计算机室全体人员提供的良好的计算机环境.

参 考 文 献

- [1] Becker J J et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research, 1985, A235:502
- [2] Crawford J. Nucl. Instr. and Meth., 1983, 211:223
- [3] Mao Zepu et al. High Energy Phys. and Nucl. phys. (in Chinese), 1993, 17:193—201
(毛泽普等. 高能物理与核物理, 1993, 17:193—201)

A New Method of Track Finding and Fitting in Main Drift Chamber of BES-II

Liu Jing Mao Zepu Li Weiguo Zhang Changchun Chen Guangpei
Yan Wuguang Li Peiqin Rong Gang Zhao Haiwen Xie Yu

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Abstract This paper introduces a new algorithm that is used to find and fit charged particle tracks in MDC of BES-II. The non-numerical pattern recognition technique used in this algorithm is described. The technique is both fast and efficient from the analysed results of M.C. data and experimental data.

Key words Pattern recognition, track dictionary, track reconstruction