

北京谱仪III主漂移室快速径迹重建系统*

张晓梅¹⁾ 马秋梅 王喆 王大勇 尤郑云 毛泽普 邓子艳 邱进发 刘怀民 李卫东
张学尧 冒亚军 袁野 黄性涛 蒋林立 臧石磊
(高能物理研究所 北京 100049)

摘要 本文阐述了北京谱仪 III (BESIII)主漂移室径迹重建系统的基本原理和程序结构。通过对蒙特卡罗 (MC) 产生的一些典型的单事例, Babar 事例和双 muon 事例数据的运行结果的分析, 初步证明了程序的可靠性。

关键词 北京谱仪 径迹重建 主漂移室

1 引言

北京谱仪 (BES) 是北京正负电子对撞机 (BEPC) 上的大型通用谱仪。它已经成功地在 τ -粲能区运行了 14 年。在未来几年里, BES/BEPC 将升级改造成为 BESIII/BEPCII。BEPCII 的亮度将比 BEPCI 提高 100 倍, 最高将达到 $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。设计建造中的 BESIII 主要子探测器有主漂移室 (MDC), 电磁量能器, 飞行时间计数器, μ 子计数器及超导磁铁等。它主要用于 τ -粲能区的物理研究如弱电相互作用研究, 强相互作用和新物理的寻找等^[1]。

主漂移室径迹重建是 BES 数据处理中的主要环节之一, 它负责 MDC 原始数据重建, 即对 BES 在线数据进行仔细地分析和处理; 准确计算粒子的空间位置, 动量和电荷等。由于 BEPC2 采用双环和多束团机制^[2], 由 BESIII 在线数据获取系统的时间同步和事例触发系统得到的 BESIII 原始数据的事例起点并不确定, 即每个触发周期将发生三组束团对撞, 因此产生的事例可能来自三个束团中的任何一个, 这就使得各个事例的起点必须由离线数据处理系统来确定, 因此确定事例起点是 BESIII 事例重建中的第一步。主漂移室径迹快速重建系统由主漂移室数据做初步的事例重建, 得到径迹的五个基本参数, 然后由 TOF 数据和主漂移室数据联合做事例起点^[2]的计算^[3]。本文将阐述 BESIII 主漂移室径迹快速重建系统的原理, 方法和初步结果。

2 BESIII 主漂移室的简介

MDC 是 BESIII 的主要子探测器之一, 其主要任务是用于终态带电粒子径迹, 动量的测量和粒子鉴别。MDC 分为内室和外室, 它的漂移单元基于小单元设计。在每个小单元中, 信号丝位于单元的中心位置, 四周有 8 根 (或 9 根) 场丝, 接近于方格分布。图 1 为外室单元结构示意图。外室漂移单元的半宽为 8.1mm。

* 国家自然科学基金 (19991480) 资助

¹⁾ E-mail: zhangxm@mail.ihep.ac.cn

²⁾ BEPCII 设计报告 (内部报告)

³⁾ BESIII 离线数据处理系统 (内部报告)

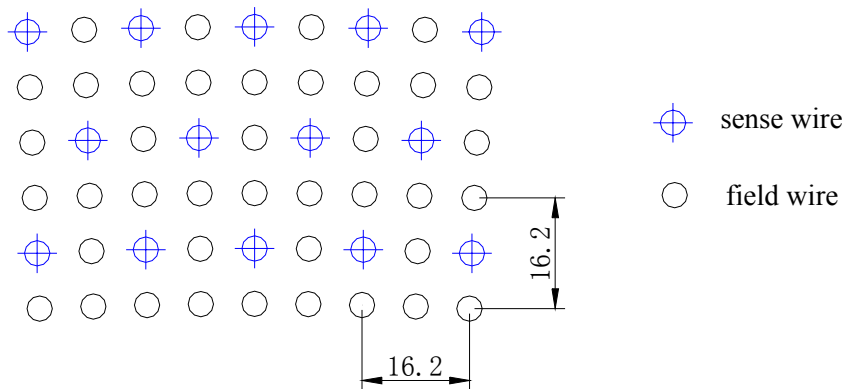


图 1 单元结构示意图

MDC由内室和外室组成，外室是由外桶和两端面板组成。内室内径为 118cm, 外室外半径为 810mm, 外室的两端面板成阶梯状，最长的有效长度为 2306mm。内室和外室沿径向共有 43 个信号读出层。内室 8 个信号读出层，外室 35 个信号读出层。我们将每四个信号读出层定义为一个超层。内室的 2 个超层全部为斜丝层，用来测量小的出射角粒子的Z坐标。外室有八个超层，其中靠内的三个和靠外的两个为轴丝层外，其他三层为斜丝层。这些丝层的信号丝数从 Φ 方向分别分成 44~288 个单元。外室的最大立体覆盖角在斜丝层的倾角范围为 $1.5^\circ \sim 3^\circ$ 。漂移室的单丝空间分辨率设计值为 $130 \mu\text{m}$, 单丝Z向分辨为 $3\text{mm}\sim 5\text{mm}$ 。动量分辨主要由空间分辨和多次库仑散射的联合贡献，在 1Gev时，磁场为 1.0Tesla时，预期可达到 $0.46\%(\sigma_{pt}/Pt)$ 。

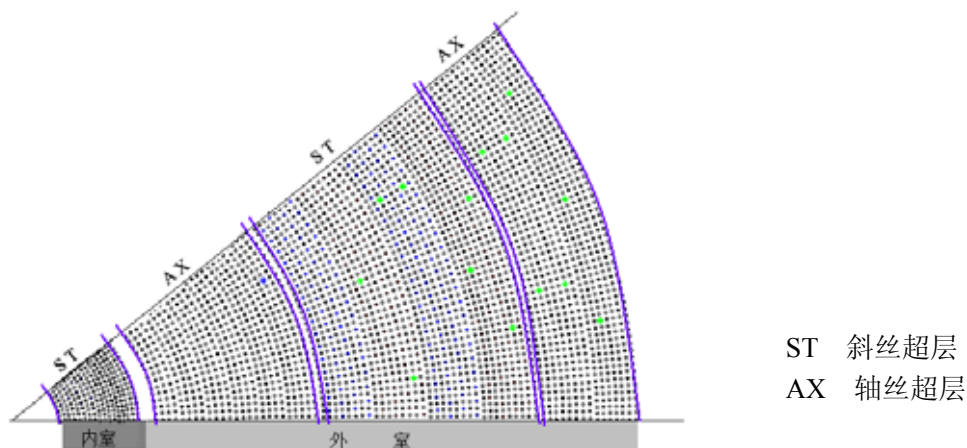


图 2 漂移室的丝层排列

主漂移室选择氨基气体（60%氦气加 40%丙烷）作为工作气体。其饱和漂移速度为 $38 \mu\text{m}/\text{ns}$ ，磁场大小为 1T，方向轴向；有关主漂移室的结构和性能详见文献【1】。

3 BESIII 主漂移室快速重建系统的基本原理和实现过程

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信号丝漂移并在丝附近产生雪崩放大，由与信号丝相连的电子线路输出脉冲信号，这些信号经过处理可得到电离电子漂移时间。径迹重建的任务就是根据各信号丝上的时间信息计算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上的投影是圆弧线，这是主漂移室径迹重建的依据。

MDC 快速重建系统主要分成六个部分，这六个部分分别是数据解包，超层内径迹段寻找， $r-\Phi$ 平面径迹段连接， $r-\Phi$ 平面径迹拟合，斜丝层径迹段连接， S_Z 径迹拟合。图 3 显示了这六个组成部分之间的关系。其中径迹寻找是采用局部方法，首先以超层为单位寻找径迹段，然后再将这些径

迹段按照一定的条件挑选出来组成真实的径迹。为了获得较快的速度，在径迹拟合部分 $r-\Phi$ 平面采用了简单的圆拟合，然后进行线性拟合获得 Z 向的参数。

经过线性拟合后，我们获得描述径迹的五个参数^[3]，这五个参数可以来完整的描述一条螺旋线：

d_p — 螺旋线在 $r-\Phi$ 平面上投影离参考点的最近距离。

Φ_0 — 参考点与螺旋线中心连线的方位角。

κ — 曲率，横动量的倒数，它的符号表示粒子电荷的正负。

d_z — 在 Z 方向上螺旋线离参考点的最近距离。

$\text{tg}\lambda$ — 径迹的坡度，用径迹倾角的 tg 值来表示。

在本系统中，我们将参考点设为原点，即 $O(0, 0, 0)$ 。

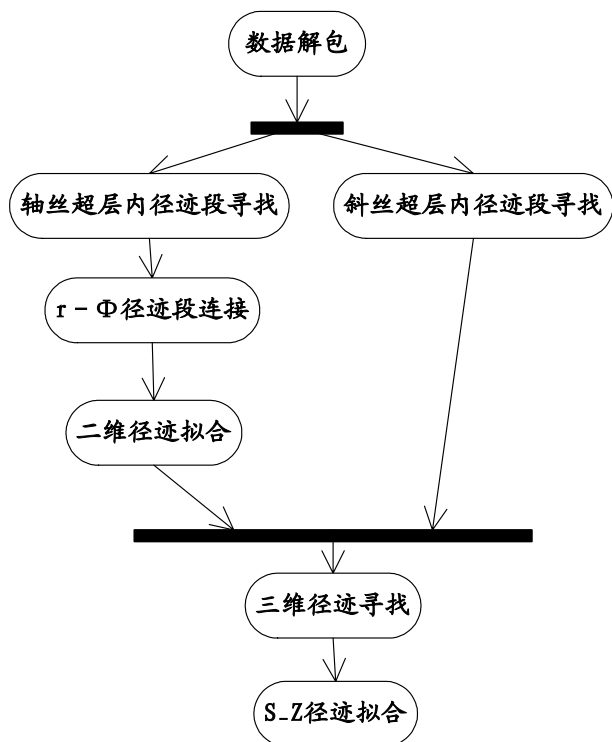


图 3 主漂移室快速径迹重建流程图

3.1 数据解包

通过解包软件可以获得本事例中主漂移室所有击中点的信息，其中包括着火丝所在的层号，丝号，漂移时间。根据着火丝所在层号，将其按超层归类存入相应容器中，这样可以方便下一步径迹段的寻找的实现。为了获得漂移距离，我们采用下列公式将 $\text{TDC}(t)$ 的值转化为漂移距离 (x)：

$$X = \begin{cases} 0 & (t \leq 0) \\ t * v & (0 \leq t) \end{cases}$$

此次实验所用的 MC 数据的 “ $x-t$ ” 为简单的线性关系，其中 v 为漂移速度（现取 $4.0 \mu \text{m/ns}$ ）。

3.2 超层内径迹段的寻找

超层内径迹段寻找主要是通过寻找“邻居”的方法来完成，即由数据解包过程得到的着火丝容器中的第一个着火丝开始，检查它相邻的六个信号丝是否被击中，然后再依靠找到的着火丝，使用同样的方法继续向外寻找着火丝，直到当前着火丝的相邻信号丝找不到未使用过的着火丝为止，收集到的这些着火丝就形成了一个候选径迹段。

径迹段寻找程序主要有三个部分：确定主漂移室中每根信号丝的六个临近信号丝；对超层中的着火丝进行初步过滤，去掉那些在 Φ 方向三个点或三个点以上连续击中的一些复杂的着火单元；对

过滤后的着火丝进行寻找，分类和连接，使之成为最终的候选径迹段。

其中“邻居”的确定是径迹段寻找中重要的一步。由于MDC的每个丝层的信号丝数都不相同，从而使相邻两层的丝层不能象图4那样完全交错排列，即它们的“邻居”就不象图4那样0, 1, 4, 5有规律，我们使用比较丝方位角的方法来确定这四个“邻居”，也就是先确定每根信号丝的方位角，通过比较，获得与原信号丝的方位角差距最小的四个相邻的信号丝。同层的相邻信号丝即图4中2, 3比较简单直接可用该根丝的丝号减一加一获得。

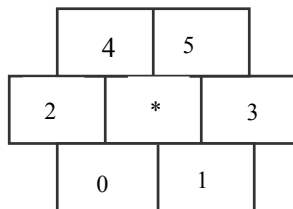


图4 每根信号丝的六个临近信号丝排列图

通过查找“邻居”方法获得的径迹段，如图所示有三种类型：干净的径迹段，短径迹段，复杂径迹段。通常情况我们更多的是得到干净的径迹段，即超层中四层都有合理击中。为了简化过程，节约时间我们只考虑干净径迹段和短径迹段，而将复杂的径迹段去掉，如果是短径迹段，我们利用两个径迹段（或一个径迹段和一个着火丝）中最接近的两个着火丝的方位角差判断是否将它们连接成一个长径迹段或者去掉。

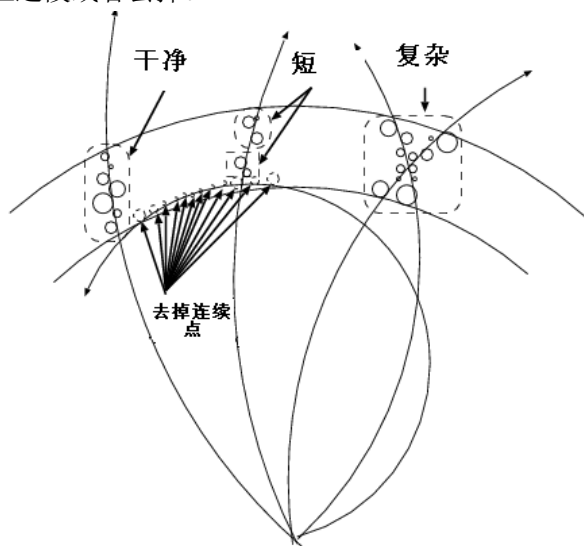


图5 干净，短以及复杂径迹段的图示

3.3 r- Φ 平面径迹段连接

r- Φ 平面径迹段连接是将各轴丝超层的径迹段通过比较方位角和计算曲率 κ 的两种组合方法将它们连接成真实的径迹。由MDC的丝层结构可知，第2, 3, 4以及9, 10分别是相邻的超层，因此它们分别使用方位角比较法来进行候选径迹段的挑选和连接，而第4和9超层之间分隔较远，则采用计算曲率 κ 的方法来连接较为精确。

方位角比较法就是在需要连接的相邻两个轴丝超层中选出最接近的两个着火信号丝，比较它们的方位角的大小，如果它们方位角的差值落在允许的范围，我们认为这两个超层可以存在同一个径迹中。

分别连接完第2, 3, 4和第9, 10超层的径迹段后，我们就可以使用计算曲率 κ 方法^[4]来实现这两组径迹段之间的连接。计算曲率 κ 方法基本原理如图6所示，假设有两个径迹段 i, j ，可以分别计算出它们的曲率 κ_i, κ_j ，然后根据 κ_i 和 κ_j 计算出两个径迹段之间的曲线的曲率 κ_{ij} ，最后根据这三个值来计算得到 x^2 ，如果 x^2 落在允许范围内，我们认为这两个径迹段可以存在同一个径迹

中。计算径迹段的曲率 κ 的公式如下，其中 α 为磁场常数 ($\alpha=1/cB$, c 为光速, B 为磁场强度), $\vec{x}_{i(in)}$, $\vec{x}_{i(out)}$ 分别是最内层和最外层击中点的位置矢量。 $\theta_{i(in),i(out)}$ 是 $\vec{x}_{i(in)}$ 和 $\vec{x}_{i(out)}$ 之间夹角。

$$k_i = 2\alpha \sin \theta_{i(in), i(out)} / \left| \vec{x}_{i(in)} - \vec{x}_{i(out)} \right|$$

计算两个径迹段 i, j 之间曲线的曲率 K_{ij} 的公式如下:

$$k_{ij} = 2\alpha \sin \theta_{i(in), j(out)} / \left| \vec{x}_{i(in)} - \vec{x}_{j(out)} \right|$$

然后我们利用获得的相应曲率 κ 来计算残差 x^2 , 公式如下:

$$x_j^2 = x_i^2 + ((\kappa_i - \kappa_j) / \sigma_j)^2 + ((\kappa_i - \kappa_{i,j}) / \sigma_{ij})^2$$

其中 $\kappa_i, \kappa_j, \kappa_{ij}$ 分别为 i 径迹段, j 径迹段, 以及 i 和 j 径迹段的曲率, σ_j 和 σ_{ij} 为权重, 分别取相应径迹段到原点的平均半径倒数。

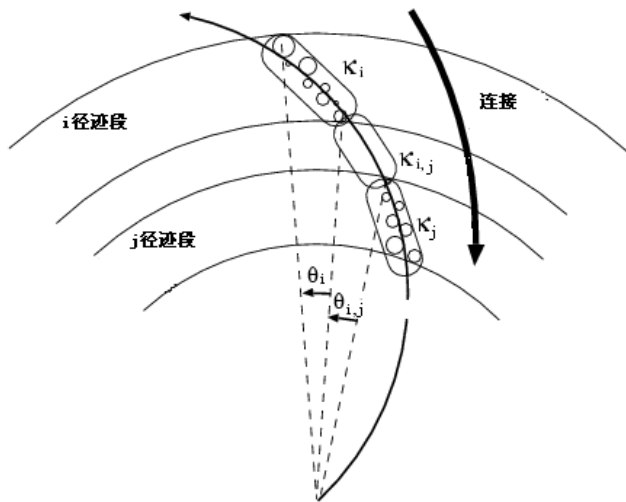


图6 径迹段连接示意图

3.4 二维径迹拟合

在 $r-\Phi$ 平面找到径迹后, 将对这些径迹在 $r-\Phi$ 平面进行圆拟合, 以便对这些径迹上的触发点做进一步的筛选。本系统进行了三次圆拟合, 每次的目的和任务都不尽相同。第一次圆拟合主要是为了去掉径迹上一些“噪声”着火点, 同时它也用来解决“左右判别”问题。“左右判别”问题是径迹寻找中一个重要的参量。当一条径迹从一根丝的左边或右边对称的位置穿过时, 从电子学读出系统得到的TDC计数是一样的, 这就是所谓的径迹的“左右模糊”问题。在第二次拟合中利用各丝的漂移距离和丝位计算各点的 x, y 坐标, 而第一次拟合只用了丝位, 所以第二次拟合的精度比第一次有所提高。第三次拟合考虑了对事例时间的修正。事例时间修正值按如下方法计算: 根据 $r-\Phi$ 平面拟合结果对径迹上的各个着火丝重新计算漂移距离, 并逆向使用 $x-t$ 关系式将计算得到的漂移距离转化成漂移时间, 由此可得到各丝的漂移时间和原始测量时间的差值 ΔT_i , 对该径迹上各点的 ΔT_i 作加权平均得到径迹的 ΔT_j , 然后以各径迹的方差为权重计算所有径迹的 ΔT_j 的平均值得到事例的 ΔT_k , ΔT_k 即作为事例时间修正值。二维拟合后将获得径迹的三个参数: d_p, Φ_0, κ 。

3.5 三维径迹寻找

三维径迹寻找主要是根据斜丝层的着火信息和 $r-\Phi$ 平面拟合结果，完成二维平面上的径迹和斜丝层中径迹段之间的连接，并通过 MDC 几何结构，计算径迹 Z 坐标，从而获得径迹的三维信息。斜丝层径迹段寻找的原理和轴丝层的径迹段寻找的一样，这里不再重述。判断斜丝层中的径迹段属于哪个已知的 $r-\Phi$ 平面径迹，本系统主要做了两个限制（图 7 中假设 A,B 分别是斜丝层的两端在 $r-\Phi$ 平面上的投影，CD 弧为一段径迹在 $r-\Phi$ 平面上的投影，E 点为径迹 CD 与 AB 的交点。F 点为 A 点到径迹的最短距离）。其中一个就是保证该斜丝径迹段中各着火丝在 $r-\Phi$ 平面与当前径迹的距离应该小于斜丝两端在 $r-\Phi$ 平面上的投影距离，即要求图 7 中的 AE 以及 AF 长度应小于 AB。另一个要求斜丝超层的平均 Z 向漂移距离在一定范围内。

平均 Z 向漂移距离 $\langle D_z \rangle$ 的计算方法如下：它是由斜丝上着火点的 Z 坐标和当前径迹上相应击中点的 Z 坐标相减得到的：

$$\langle D_z \rangle = \langle Z \rangle - \langle S \rangle \times \langle \text{tg}\lambda \rangle \quad (\text{tg}\lambda = \Sigma \langle Z \rangle / \Sigma \langle S \rangle)$$

其中 $\langle Z \rangle$ 代表斜丝超层上各着火点 Z 坐标的平均，而每根着火斜丝着火点的 Z 坐标可由下式计算得到：

$$Z = Z_A + d_{AE} / \text{tg}\theta$$

其中 Z_A 是斜丝 A 端 Z 坐标， θ 是斜丝的倾角。 d_{AE} 是图 7 中 AE 的距离，可以利用 $r-\Phi$ 平面的径迹拟合结果计算得到。 $\langle S \rangle \times \langle \text{tg}\lambda \rangle$ 则是当前径迹上与斜丝超层着火单元相对应的径迹段的 Z 坐标平均值。其中 S 表示在 $r-\Phi$ 平面上起点到 F 点的径迹长度，那么 $\langle S \rangle$ 这里则用斜丝超层最外层和最内层着火斜丝的 S 值的平均结果。而 λ 是径迹与 $r-\Phi$ 平面的夹角， $\langle \text{tg}\lambda \rangle$ 这里用径迹上的各斜丝超层求得的 Z, S 的平均值相除得到的。

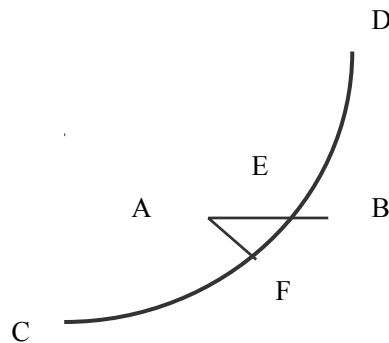


图 7 斜丝层着火丝和径迹的关系示意图

3.6 S_Z 径迹拟合

S_Z 径迹拟合实际上是在前面 $r-\Phi$ 平面的圆拟合结果基础上的线性拟合。对于每根斜丝所确定的 Z 坐标，它与径迹起点处的 Z 坐标 Z_0 (d_z) 的关系如下^[5]：

$$Z = Z_0 + S \times \text{tg}\lambda$$

其中 λ 是径迹与 $r-\Phi$ 平面的夹角，S 为起点到测量点的径迹在 $r-\Phi$ 平面上投影的长度。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 x^2 最小的 Z 坐标组合，这就是同该径迹相联系的一组斜丝单元，拟合的同时也得到螺旋线的另外两个参数 d_z 和 $\text{tg}\lambda$ 。

径迹上每根斜丝的着火点 Z 坐标和径迹长度 S 是利用 $r-\Phi$ 平面的径迹拟合结果和几何关系得出的。和 $r-\Phi$ 平面拟合类似， S_Z 线性拟合共进行了三次。第一次拟合同样是为了解决“左右判别”问题，只用到了 S, Z 的信息。第二次拟合考虑到了 Z 向漂移距离，Z 向漂移距离 D_z 计算公式如下：

$$D_z = D / \text{tg}\theta$$

其中 D 为该根着火丝在 $r-\Phi$ 平面上的漂移距离。 θ 为该斜丝的倾角。为了得到更好的拟合效果，在每次拟合之前都利用前一次拟合结果计算出 Z 向漂移距离的理论值，将该理论值和测量值的差值

限制在一定范围内，从而将一些不合理的着火丝去掉，再重新拟合。经过三次的 S_Z 拟合后五个径迹参数全部获得。

4 BESIII 主漂移室快速重建系统的检测结果

为了检验该系统的可靠性，现在已经通过重建蒙特卡罗(MC)产生的一些典型的单事例(e, muon, pion 单粒子), Babar 事例和双 muon 事例数据。由运行结果分析，各项指标基本上可以达到预期的结果。

4.1 CPU 时间

径迹重建所需的计算机时间是衡量程序工作效率的主要指标^[6]。径迹重建应尽可能快速而准确的找到最佳的径迹参数。而对我们这个快速重建系统更需要在保证重建质量的情况下提高速度。目前对于蒙特卡罗产生的数据平均重建一条径迹大约用了 0.5ms (以普通PC机，主频 2GHz)。图 8 显示了重建两条MC数据 ($J/\psi \rightarrow e^+e^-$) 所需计算机时间的分布，纵轴是事例数，横轴是事例时间。

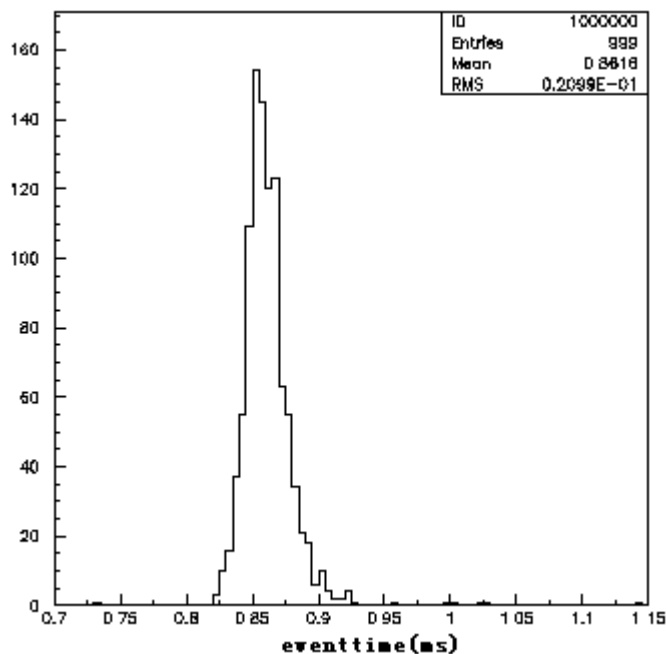


图 8 重建两条MC数据 ($J/\psi \rightarrow e^+e^-$) 计算机时间分布

4.2 寻迹效率

径迹重建效率是程序可靠性的标志。但是它与几何位置，数据质量以及粒子动量等因素有关，因而很难全面估计。我们使用一些典型的MC数据在低噪声下情况进行效率检查，如 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ ， $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ ，以及单径迹各动量段事例，重建效率好于 99%。

4.3 空间分辨

空间分辨 σ_{xy} 是主漂移室的主要指标之一，它不仅是为位置分辨的标志，而且直接影响到动量分辨。影响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，因此不同单元宽度丝的空间分辨是不同的。空间分辨 σ_x 可用径迹拟合中的残差表示： $\Delta D = D_m - D_{fit}$ ，其中 D_m 表示经过校正后的测量漂移距离， D_{fit} 表示拟合曲线上的漂移距离，它是硬件测量误差和软件拟合误差的综合。从分析的MC数据中，可以得到单丝的空间分辨大约为 100 μm ，基本达到设计要求。图 9 为MC数据 ($J/\psi \rightarrow e^+e^-$) 径迹拟合中的残差分布，纵轴是着火丝数，横轴是残差。

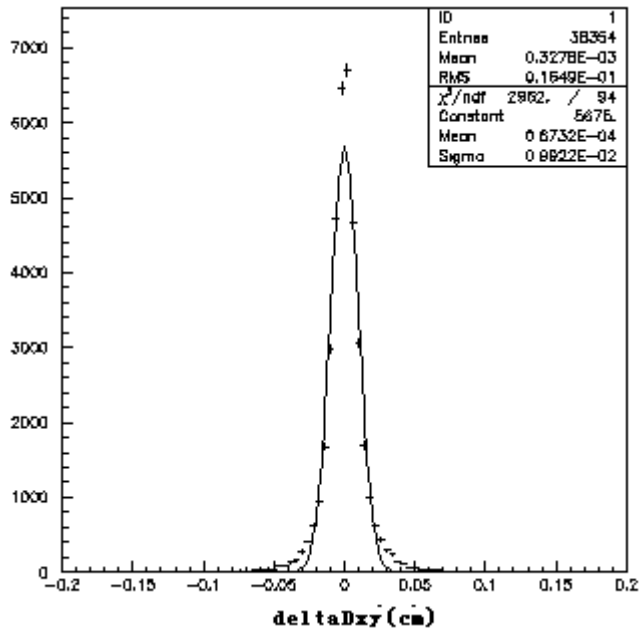


图9 MC数据 ($J/\psi \rightarrow e^+e^-$) 径迹拟合中的残差分布

4.4 Z向分辨

Z向分辨 σ_z 是主漂移室的主要指标之一，它也将影响到粒子的动量分辨，特别是Z向的动量分辨。空间分辨 σ_z 也可用径迹拟合中的残差表示： $\Delta D_z = D_{mz} - D_{fitz}$ ，其中 D_{mz} 表示经过校正后的测量的Z向漂移距离， D_{fitz} 表示拟合曲线上的Z向漂移距离。从分析的MC数据中，可以得到单丝的空间分辨大约为4mm，基本达到设计要求。图10为MC数据 ($J/\psi \rightarrow e^+e^-$) 径迹拟合中的Z向残差分布，纵轴是着火丝数，横轴是残差。

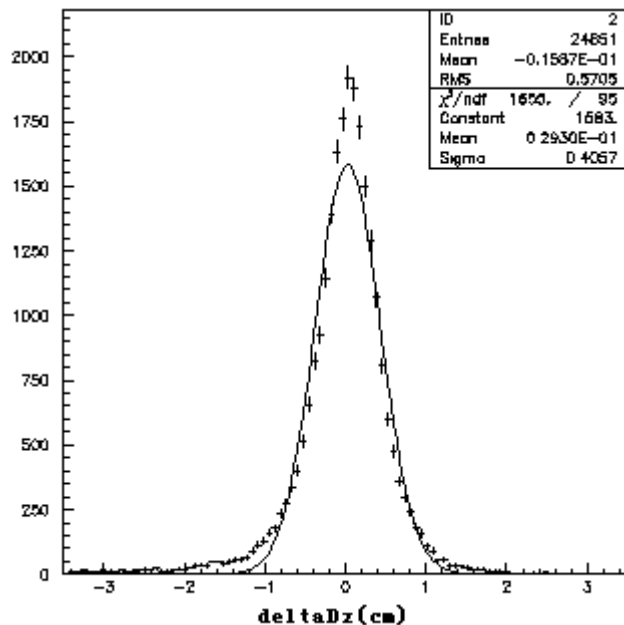


图10 MC数据 ($J/\psi \rightarrow e^+e^-$) 径迹拟合中的z向残差分布

4.5 动量分辨

动量分辨是衡量漂移室性能的另一个主要指标^[7]。理论上影响动量分辨的因素有空间分辨和多

次散射等因素，如漂移室内的磁场和电场的精度和不均匀性，丝触发效率，各丝的刻度常数都对动量分辨有影响。图 11 显示了由MC数据 ($J/\psi \rightarrow e^+e^-$) 得到的一个典型的动量分布，纵轴是径迹数，横轴是动量。目前主漂移室的 σ_p 为 0.01GeV, 计算得到的动量分辨达到 $1.0\% \sqrt{1+p^2}$ 。

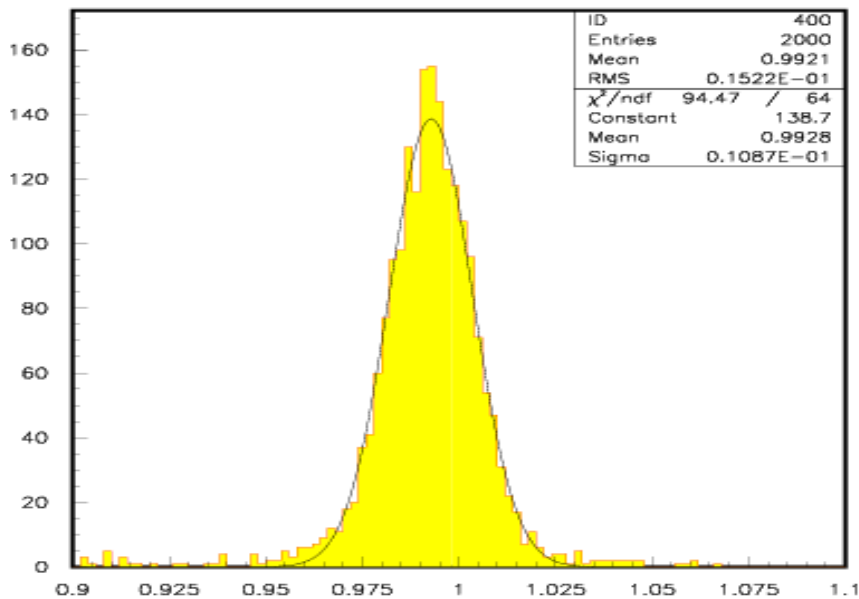


图 11 MC数据 ($J/\psi \rightarrow e^+e^-$) 的动量分布

5 讨论

本系统经过初步检测，径迹寻找和径迹拟合基本正确，性能指标基本达到预期对该系统的要求，但是检测还不够完善，还需要对程序做进一步检查，如系统对噪声的排斥能力，因此需要用更完善的蒙特卡罗数据和真实数据对系统参数的控制变量做进一步研究和优化。

参考文献 (References)

- 1 北京正负电子对撞机重大改造工程 BEPCII 初步设计 2003.11
- 2 S. Behari et al., Belle Note #347, August 20, 2000.
- 3 Y. Ohnishi et al., Belle Note #148, June 17, 1997.
- 4 K. Hanagaki et al., Belle Note #299, March 28, 2000.
- 5 LIU Jing et al. HEP& NP, 1998, 22:587 (in Chinese)
(刘靖等.《高能物理与核物理》,1998, 22:587)
- 6 MAO Ze-Pu et al. HEP& NP, 1993, 17:193-201(in Chinese)
(毛泽普等.《高能物理与核物理》,1993,17:193-201)
- 7 ZENG Yu et al. HEP& NP,2004, 24:1264(in Chinese)
(曾瑜等.《高能物理与核物理》,2004, 24:1264)

Fast Track Reconstruction of the BES Main Drift Chamber III*

Zhang Xiao-Mei¹⁾ Ma Qiu-Mei Wang Zhe Wang Da-Yong You Zhen-Yun Mao Ze-Pu Deng
Zi-Yan Qiu Jin-Fa Liu Huai-Min Li Wei-Dong Zhang Xue-Yao Mao Ya-Jun Yuan-Ye Huang
Xing-Tao Jiang Lin-Li Zang Shi-Lei

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract A detailed description of the software package of the fast charged particle track finding and fitting in the main drift chamber of BES(Beijing Spectrometer) is given. Some main characteristics of the package from some typical Monte Carlo simulation results are presented.

Key words BESIII, track reconstruction, MDC

* Supported by NSFC(19991480)

¹⁾ E-mail: zhangxm@mail.ihep.ac.cn