

# 北京谱仪 II 顶点探测器的径迹重建<sup>1)</sup>

陈光培 袁野 毛泽普 白景芝 孙汉生 刘靖<sup>1</sup>  
李卫国 张长春 严武光 李佩琴 邱进发 杨杰<sup>2</sup>  
杨春敏 荣刚 郑建平 赵海文<sup>3</sup> 赵萌 谢昱

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1(中国高等科学技术中心 北京 100080)

2(清华大学工程物理系 北京 100084)

3(北京大学技术物理系 北京 100871)

**摘要** 描述了采用模式识别方法的北京谱仪 II 顶点探测器径迹重建软件系统——VCJULI. 经过蒙特卡罗和真实数据的运行检查, 证明该程序能对顶点探测器的径迹给出较好的空间分辨和径迹寻找效率.

**关键词** 模式识别 径迹字典 径迹重建 顶点探测器

## 1 引言

与多丝室相比, 稻草管型顶点探测器具有价格便宜、结构牢固、制作容易等优点. 稻草管型结构使得运行时对断丝的处理比较简单, 且信号的串扰也较小. 采用稻草管顶点探测器通常能获得 45—100 $\mu\text{m}$  的较高的空间分辨率, 这使次级顶点的寻找更为清晰. 正因如此, 稻草管顶点探测器目前已用于许多对撞实验<sup>[1]</sup>.

在北京谱仪(BES)的升级中用 MARKIII 的稻草管顶点探测器(VC)<sup>[2]</sup> 取代了 BES 中心漂移室(CDC). 一方面, 该顶点探测器作为一级触发可以压低因北京正负电子对撞机(BEPC)升级后亮度提高所带来的高本底; 另一方面, 该顶点探测器将参加 BES 的径迹重建有助于改善 BES 探测器立体角的覆盖和带电粒子空间分辨率.

北京谱仪 II 顶点探测器由四部分组成, 即内外筒、内外两组端面板和 640 根稻草管. 稻草管是由厚 0.1mm, 半径 4mm 兼作阴极的镀铝 Mylar 管和直径为 50 $\mu\text{m}$  的中心阳极丝组成. 这 640 根稻草管分布于 12 层, 其中内四层和外四层为轴向丝层, 用于  $r-\phi$  方向寻迹;

1997-12-01收稿

1) 北京谱仪是工作在北京正负电子对撞机上的一个大型探测器, 于1994—1995年进行了更新. 本文将更新后的北京谱仪称作北京谱仪II

中间四层为斜丝层, 用于  $z$  向寻迹. 其排列情况列于表 1 中. 这种非紧致结构使得每根径迹的斜丝击中数较少, 仅 2—3 次, 因而给  $z$  向寻迹带来困难. 鉴于近丝处空间分辨变坏, 在  $z = 0$  处, 每个偶数层的稻草管较它前面那个奇数层(这样的两层称之为一个蛇形层)错开  $1/2$  个管子, 这样可保证每根径迹在内、中、外每四层中至少有两次较高空间分辨的击中; 同时, 这种错位排列也使信号的左右分辨相对容易.

表 1 北京谱仪 II 顶点探测器的几何结构常数

层号	丝数	第一根丝角位移 (rad)	丝的层半径 (cm)	斜角 ( $^{\circ}$ )
1	40	$\pi/40$	5.4200	0
2	40	$\pi/20$	6.0880	0
3	40	$\pi/80$	6.8530	0
4	40	$3\pi/80$	7.4300	0
5	40	$3\pi/80$	8.2339	2.9996
6	40	$5\pi/80$	8.6987	3.1685
7	40	$\pi/80$	9.5031	-3.4608
8	40	$3\pi/80$	9.7793	-3.5612
9	80	$\pi/40$	10.9220	0
10	80	$3\pi/80$	11.5950	0
11	80	$3\pi/160$	12.3650	0
12	80	$5\pi/160$	12.9970	0

内端面板内表面间距 = 83.820 cm; 外端面板外表面间距 = 88.900 cm. 第一根丝角位移及丝的层半径是  $z = 0$  处的值.

## 2 径迹重建原理

在高能物理实验中, 带电粒子的探测是通过在径迹室中测量粒子的电离信息来实现的. 这些信息以及各种噪声的信息以原始数据的方式记录在磁带上. 径迹重建的任务就是从原始数据中找出终态粒子的信息并分析其性质. 该过程可分为寻迹与拟合两个步骤.

### 2.1 径迹参数与方程

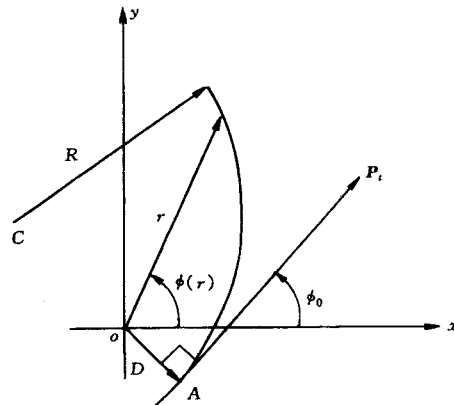
带电粒子在沿  $z$  轴的均匀磁场中的轨迹是一条圆柱螺旋线(见图 1). 该圆柱螺旋线的方程可以用分量的形式写出.

在  $r-\phi$  平面, 其投影为一圆, 方程为

$$\phi(r) = \phi_0 + \arcsin \frac{rC - (1 - CD)D/r}{1 - 2CD}, \quad (1)$$

其中  $\phi(r)$  是圆上径向距离为  $r$  处点的方位角;

$\phi_0$  是径迹离  $z$  轴的最近点处横动量的方位角;  $C$  是曲率的一半, 即  $r-\phi$  平面投影圆半径倒

图 1 圆柱螺旋线在  $r-\phi$  平面上的投影

数的 1/2;  $D$  是紧致参数, 即径迹离  $z$  轴的最近距离. 当  $C \rightarrow 0$  时方程可近似为

$$\phi(r) = \phi_0 - \arcsin \frac{D}{r}. \quad (2)$$

显然, 参数  $C$ 、 $D$  和  $\phi_0$  可由对轴丝层击中点做圆拟合得到. 而径迹到轴丝的漂移距离可表示为

$$d = \frac{1 - \sqrt{4C^2 l^2 + (1 - 2CD)^2 + 4Cl(1 - 2CD) \sin(\phi_0 - \phi_w)}}{2C}, \quad (3)$$

其中  $l$ 、 $\phi_w$  是击中轴丝的层半径和方位角.

在  $r$ - $z$  平面, 有

$$z(r) = z_0 + \frac{\tan\theta}{C} \arcsin \left( C \sqrt{\frac{r^2 - D^2}{1 - 2CD}} \right). \quad (4)$$

其中  $z(r)$  是径向距离为  $r$  处径迹点的  $z$  值;  $z_0$  是径迹离  $z$  轴的最近点的  $z$  值;  $\tan\theta$  是磁倾角的正切值. 当  $C \rightarrow 0$  时有

$$z(r) = z_0 + \tan\theta \sqrt{r^2 - D^2}. \quad (5)$$

在由圆拟合确定  $C$ 、 $D$  和  $\phi_0$  之后, 原则上两个斜丝击中即可确定剩下的另两个参数  $z_0$  和  $\tan\theta$ .

## 2.2 寻迹

寻迹是一种模式识别过程, 属于人工智能的范畴. 它的任务是把一组实验测量点分成两类: 第一类可分为许多子类, 每个子类中的点都是由同一粒子引起, 即对应于同一径迹. 第二类则是在充分可信的程度下无法划分给任何粒子的那些点, 即噪声.

目前, 径迹识别的方法有两类, 即所谓局域的方法和整体的方法<sup>[3]</sup>. 后者较前者速度快, 因此本文采用后一方法来对 VC 中的径迹进行识别.

在整体方法中, 模式匹配的方法具有速度快、效率高的优点. 该方法针对轴丝层进行, 首先产生一个由各种可能的单元组合径迹(模式)的字典, 然后将每个事例中着火单元按字典的内容填入一个探测器的单元映象矩阵中, 再采用类似于人工智能中文字识别的方法将径迹找出来. 该方法最早用于快触发逻辑, MARKIII 则首先利用该方法开发出其寻迹软件系统——JULIE, 其重建速度较 MARKIII 原来的系统——DCFIND——快两倍<sup>[4]</sup>. 根据 JULIE 的思想, 我们针对结构完全不同于主漂移室的顶点探测器独立开发了 VC 的寻迹软件系统——VCJULI.

BESII 顶点探测器在  $r$ - $\phi$  平面能提供较精确的信息, 而斜丝击中点则较少. 因此, 寻迹首先在  $r$ - $\phi$  平面进行, 在找到径迹候选者之后再把斜丝击中分配给它们.

### 2.2.1 VC 径迹字典

顶点探测器径迹字典由三部分组成.

#### A. 模式字典

对顶点探测器而言, 在寻迹时将一个蛇形层中相邻的两根丝作为一个单元, 故每个径

迹模式由四个单元构成. 因为每个径迹模式本身是  $r-\phi$  平面上的一个圆, 在固定参数  $D$  及  $\phi_0$  的情况下, 能与第  $L$  层第  $i$  个稻草管 (记为  $t(L, i)$ ) 相交的径迹圆满足

$$C_m^{t(L,i)}(D, \phi_0) \leq C \leq C_M^{t(L,i)}(D, \phi_0), \quad (6)$$

其中

$$C_m^{t(L,i)}(D, \phi_0) = \frac{l}{l^2 + D^2 - r^2 - 2lD \sin(\phi_0 - \phi_w)} \times \left[ -\sin(\phi_0 - \phi_w) + \frac{D-r}{l} \right], \quad (7)$$

$$C_M^{t(L,i)}(D, \phi_0) = \frac{l}{l^2 + D^2 - r^2 - 2lD \sin(\phi_0 - \phi_w)} \times \left[ -\sin(\phi_0 - \phi_w) + \frac{D+r}{l} \right].$$

推广到蛇形层意义下的单元时, 能与第  $L$  层第  $i$  个单元 (记为  $c(L, i)$ ) 相交的径迹圆满足

$$C_m^{c(L,i)}(D, \phi_0) \leq C \leq C_M^{c(L,i)}(D, \phi_0), \quad (8)$$

其中

$$C_m^{c(L,i)}(D, \phi_0) = \min [C_m^{t(2L-1,i)}(D, \phi_0), C_m^{t(2L,i)}(D, \phi_0)], \quad (9)$$

$$C_M^{c(L,i)}(D, \phi_0) = \max [C_M^{t(2L-1,i)}(D, \phi_0), C_M^{t(2L,i)}(D, \phi_0)].$$

因而对沿径向由里向外的四个单元  $i_1, i_2, i_3$  及  $i_4$  而言, 它们能构成径迹模式的条件是函数

$$C(D, \phi_0) = \max C_m^{c(L,i)}(D, \phi_0) - \min C_M^{c(L,i)}(D, \phi_0) \quad (10)$$

的极小值非正. 采用 MINUIT 技术<sup>[5]</sup> 即可找出在一定的  $D$  及径迹半径  $R$  范围下所有的径迹模式.

### B. 单元字典

单元字典是单元的径迹模式列表, 即每个单元与哪些径迹模式相联系. 显然, 它是模式字典的逆. 单元字典的必要性是与寻迹过程相联系的. 因为把原始数据拆包装后, 得到的是着火单元的有关信息. 根据单元字典的内容, 软件系统可以在图 2 所示的 *PATARY+OVRSEE* 中填入相应内容, 因而找到径迹候选者.

### C. 辅助字典

由于存在着火丝失效的问题, 程序系统必须允许所找到的径迹候选者有一些丝失效, 这样就必然使所找到的候选径迹数多于真实径迹数. 这些赝径迹中有许多是真实径迹的子径迹, 因而在找到较长径迹后要把它们的子径迹剔除掉. 与该子径迹剔除过程相联系的内容即辅助字典. 径迹字典的大小取决于  $|D|$  的最大值及径迹半径  $R$  的最小值. 对顶点探测器而言,  $|D|$  的最大值是与寻迹效率直接相关的.

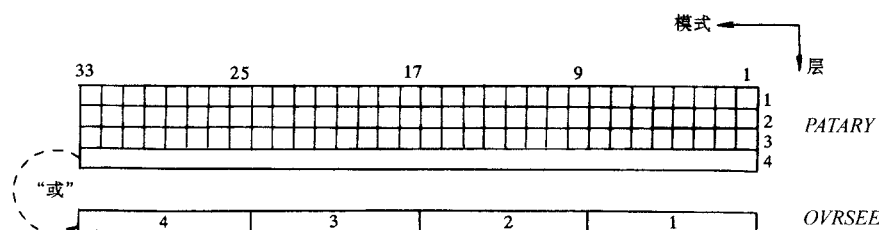


图 2 顶点探测器的单元映象矩阵.

数组 *PATARY* 中 32 个 bits 对应着辅助字典中的 4 个 bytes, 它们的“或”的结果存放于数组 *OVRSEE* 中的第四个 bit.

### 2.2.2 寻迹过程

寻迹时, 程序系统先根据径迹字典把击中单元信息填入 *PATARY*, 然后从中找出满足一定的好径迹判选条件的列. 为节省判选时间, 在填 *PATARY* 的同时还填了另一个数组 *OVRSEE*, 它的每一个 bit 是 *PATARY* 中同一层 32 个 bit 的“或”. 这样, 程序先对 *OVRSEE* 作粗选, 只有 *OVRSEE* 某个 byte 合乎判选条件时它相应 *PATARY* 的 32 列中才可能会有符合条件的径迹候选者, 此时程序再对它们作精选.

到此为止, 程序尚未用到着火丝漂移时间的信息. 这样即使对一个束流-气体事例进行寻迹, 程序也会找出许多径迹候选者来. 而利用同一蛇形层中两个子层稻草管排列的相对错位可以减少一些这种误组合. 程序系统先在同一蛇形层中找出所有可能由同一径迹引起的击中情况, 称之为 object, 包括孤立击中稻草管, 及漂移时间之和满足一定条件的两个相邻的相异子层稻草管. 对于后者, 程序认为击中丝的左右分辨已经解决, 即径迹从两管中间穿过; 而对于前者, 左右两边都是可能的.

下一步, 程序把径迹候选者上相应单元换为 object, 并把所有有公共 object 的径迹候选者放到同一径迹束中. 这样, 每一径迹束基本上对应一条真实径迹. 程序对同一径迹束中所有的径迹候选者进行筛选. 第一步首先由漂移时间和漂移速度相乘求出漂移距离, 然后根据漂移距离进行圆拟合或直线拟合(漂移速度的修正将在刻度中进行). 拟合的方法是将方程(3)近似为

$$d \approx D - l \sin(\phi_0 - \phi_w) + \kappa(l^2 - D^2), \quad (11)$$

其中  $\kappa = -C/(1 - CD)$ . 近似的目的是使圆拟合在  $R \rightarrow \infty$  时有稳定解. 对给定的参数矩阵  $a = (\kappa, D, \phi_0)^T$ , 圆拟合过程即寻求

$$\phi \equiv \frac{1}{2} \chi^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left[ \frac{d_i^e - d_i(l_i, \phi_w, a)}{\sigma_i} \right]^2 \quad (12)$$

的最小值. 其中  $l_i$ ,  $\phi_w$ ,  $d_i^e$  和  $\sigma_i$  是第  $i$  根着火丝的层半径、方位角、实验测量到的漂移距离及空间分辨. 下一步, 程序就根据圆拟合或直线拟合的  $\chi^2$  及径迹候选者的击中丝多少对它们进行取舍而得到  $r$ - $\phi$  平面通过圆拟合或直线拟合的真实径迹.

### 2.3 螺旋线拟合

空间螺旋线由五个参数描述. 由圆拟合已经定出其中的三个, 即  $C$ 、 $D$  和  $\phi_0$ , 而另外两个参数  $z_0$  和  $\tan\theta$  必须由斜丝信息确定. 程序先根据斜丝的位置与  $r$ - $\phi$  平面圆拟合或直线拟合好的真实径迹作匹配. 此时所有轴丝的左右分辨均已解决, 而斜丝的左右分辨需要由螺旋线拟合<sup>[6]</sup>决定. 顶点探测器的斜丝排列较为稀疏, 每根径迹上的斜丝击中数在 0—4 之间. 若分配给某根真实径迹的斜丝击中数少于 2, 则无法作螺旋线拟合, 但它的圆拟合信息仍然保存下来. 若斜丝击中数为 2, 则可以有四种左右组合进行螺旋线拟合, 作为初步近似, 程序只能选择  $|z_0|$  最小的一种组合. 若斜丝击中数多于 2, 则程序可根据螺旋线拟合的  $\chi^2$  进行取舍.

## 3 Monte-Carlo 及真实数据检验

该程序系统自 1995 年年初开始开发以来, 中间经过大量调试, 并经过了 Monte-Carlo 检验以及 1996 年年初 BESII 获取的对撞数据和目前所取的宇宙线数据的检验.

从 Monte-Carlo 检验情况来看, 重建程序能够获得与输入数据一致的空间分辨结果;  $\phi$  角的分布也较好;  $\cos\theta$  的分布在形状上与预期的结果基本一致.

寻迹效率是程序工作是否可靠的标志. 它与探测器的工作状况以及粒子的动量等因素有关. 对  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  的 Monte-Carlo 数据而言, 如果单丝效率为 100% 的话, 寻迹效率可以达到 100%. 而对于真实数据, 采用 MDC 重建得到的好 Bhabha 事例来进行 VC 寻迹, 得到 VCJULI 的寻迹效率为 99.5%. 同时得到顶点探测器各层的丝效率见表 2.

表2 顶点探测器各层的丝效率

层号	击中丝数	完全失效的丝数	接受度	丝效率
1	3157	3	94.3%	99.5%
2	2913	1	84.3%	97.5%
3	2538	2	74.4%	98.8%
4	2345	1	68.6%	96.4%
9	3202	1	93.4%	95.5%
10	3031	1	88.1%	95.8%
11	2760	4	82.5%	96.9%
12	2645	4	78.3%	97.8%

空间分辨是顶点探测器的一个重要指标. 它可以采用三丝法得到, 也可以采用径迹拟合中的残差表示:  $\delta = d_F - d_M$ , 其中  $d_M$  是经过校正后的测量漂移距离, 而  $d_F$  是拟合中计算得到的漂移距离,  $\delta$  是点的空间位置差, 是硬件和软件各种误差的综合. 图 3 是采用空间螺旋线拟合并经过刻度后得到的顶点探测器的残差分布. 若采用直线拟合, 得到的空间分辨要大约 10%.

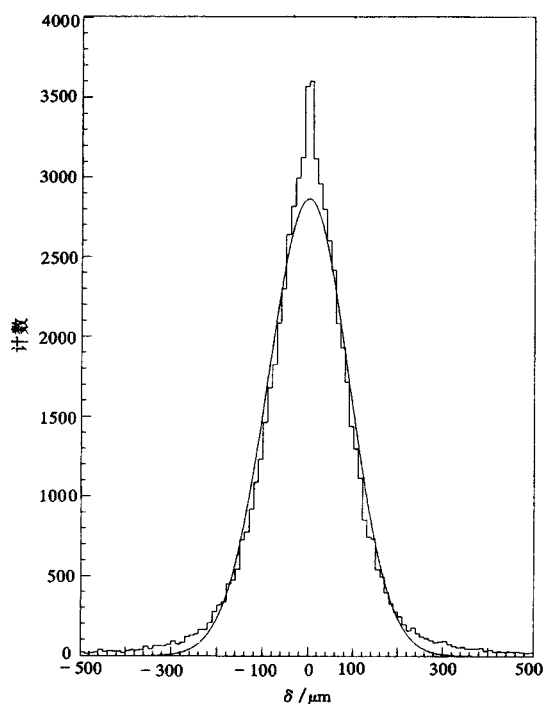


图3 顶点探测器空间螺旋线拟合的残差分布

顶点探测器径迹重建程序的开发与试运行得到了高能物理研究所计算中心的大力协助,同时还得到了 Walter H. Toki 教授, Joseph Izen 教授以及 Russell Malchow 等人的精心协作. 作者在此一并致谢.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Walter H Toki, SLAC-PUB-5232, March, 1990
- [ 2 ] Adler J et al. Nucl. Instr. Meth., 1989, A276:42
- [ 3 ] Grote H, Rep. Prog. Phys., 1987, 50:473
- [ 4 ] Becker J J et al. Nucl. Instr. Meth., 1985, A235:502
- [ 5 ] James F, MINUIT-Users guide, Program Library, CERN, 1992, D506
- [ 6 ] Mao Zepu et al. High Ener. Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1993, 17:193  
(毛泽普等, 高能物理与核物理, 1993, 17:193)

## Track Reconstruction in Vertex Chamber of BES-II

Chen Guangpei Yuan Ye Mao Zepu Bai Jinzhi Sun Hansheng  
Liu Jing<sup>1</sup> Li Weiguo Zhang Changchun Yan Wuguang Li Peiqin  
Qiu Jinfan Yang Jie<sup>2</sup> Yang Chunmin Rong Gang Zhen Jianping  
Zhao Haiwen<sup>3</sup> Zhao Meng Xie Yu

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

*1(Advanced Science and Technology Center of China, Beijing 100080)*

*2(Engineering Physics Department of Tsinghua University, Beijing 100084)*

*3(Technical Physics Department of Peking University, Beijing 100871)*

**Abstract** This paper describes the algorithm of the non-numerical pattern recognition used in the VC of BES-II. The code is good to provide the spacial resolution and the efficiency of the track found by M.C. data and experimental data.

**Key words** pattern recognition, track dictionary, track reconstruction, vertex chamber