

# BES III 漂移室单元结构和丝层安排的设计与优化

伍灵慧<sup>1,2;1)</sup> 刘建北<sup>1,2</sup> 陈元柏<sup>1</sup> 王贻芳<sup>1</sup> 陈昌<sup>1</sup> 朱启明<sup>1</sup> 刘荣光<sup>1</sup> 马骁妍<sup>1</sup>  
唐晓<sup>1</sup> 金艳<sup>1</sup> 王岚<sup>1</sup> 张丙新<sup>1</sup> 秦中华<sup>1,2</sup> 徐美杭<sup>1</sup> 马媛媛<sup>1</sup> 朱 ■ 萱<sup>1</sup>

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 介绍了 BES III 漂移室单元结构的设计和丝层安排,讨论了如何设置斜丝倾斜角以及直、斜丝交界处存在的问题,并通过对漂移时间与距离关系的模拟优化了漂移室丝层半径。

**关键词** 漂移室 单元结构 倾斜角 漂移时间与距离的关系

## 1 引言

新一代北京谱仪(BES III)将是运行在建造中的北京正负电子对撞机(BEPC II)上的大型通用磁谱仪。BEPC II 的质心能量为 2—5GeV/c。漂移室是 BES III 最重要的子探测器之一,用于测量正负电子对撞产生的末态带电粒子径迹、动量及能量损失( $dE/dx$ )。BES III 漂移室采用小单元结构,He/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>(60/40)混合气体以及 Al 场丝,以减少多次库仑散射,提高动量分辨和  $dE/dx$  分辨。

漂移室的单元结构和丝层安排直接影响漂移室的性能,本文主要介绍 BES III 漂移室单元结构的设计和丝层安排,以及通过对单元漂移时间与距离关系的模拟优化丝层设计。

## 2 单元结构与丝层安排的初步设计

漂移室是 BES III 最内层的子探测器,与束流管相邻,内径和外径分别为 118mm 和 1600mm。为了加速器部件的安装,漂移室端面板采用特殊的阶梯形结构,并因此将室体分成了内室、外室两部分,见图 1。

漂移室的单元形状为类正方形,中心为信号丝,类正方形的 4 个顶点和 4 边的中点各有一根场丝,共 8 根场丝。信号丝加正高压,场丝接地。

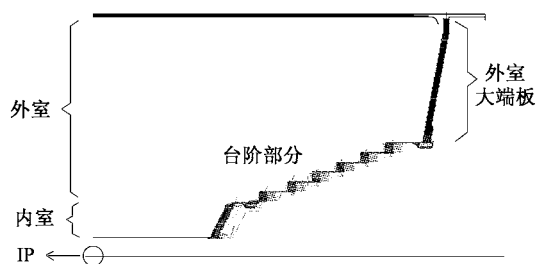


图 1 漂移室总体结构示意图(1/4)

在单元的设计中应考虑:

- (1) 尽可能保持单元形状规则,使单元宽高比接近于 1;
- (2) 为了便于触发判选和离线分析,在  $\phi$  方向上应尽可能采用对称的单元排列;
- (3) 外室大端板部分采用超层结构,每四层丝组成一个超层,同一超层内各丝层具有相同的单元数,超层内所有单元具有相同的单元张角,并且超层内相邻丝层的信号丝相错半个单元,这是为了便于局部径迹段的寻找和满足左右分辨的需要;台阶部分由于结构特殊,每两层采用同一单元张角;内室由于单元少,丝层半径小,为避免单元尺寸差异太大,每一层取一个单元张角值。

漂移室第一层场丝的层半径不小于 73mm,最外层场丝的层半径不超过 780mm。外室部分采用平均

半宽为 8.1mm 的单元. 内室单元平均半宽定为 6mm, 这是由于内室最靠近束流管, 受到的辐照剂量大, 减小单元尺寸, 增加丝数, 可以减少单元所受的平均辐照量, 减缓丝的老化, 延长漂移室的寿命. 为了满足径迹  $Z$  向位置测量的需要, BESⅢ 漂移室还必须有合理的斜丝安排. 综上所述, 我们可以初步确定 BESⅢ 漂移室的丝层安排, 包括丝层数、单元数以及直丝层和斜丝层的排列, 见表 1.

表 1 BESⅢ 漂移室丝层排列

| 丝层    | 性质    |
|-------|-------|
| 1—4   | 斜丝(-) |
| 5—8   | 斜丝(+) |
| 9—20  | 直丝    |
| 21—24 | 斜丝(-) |
| 25—28 | 斜丝(+) |
| 29—32 | 斜丝(-) |
| 33—36 | 斜丝(+) |
| 37—43 | 直丝    |

注: “+”表示顺时针方向的正角斜丝层, “-”为逆时针方向的负角斜丝层

BESⅢ 漂移室丝层数为 43, 前 8 层位于内室, 9—20 层位于外室台阶部分, 21—43 层位于外室大端板.

### 3 丝层安排的优化

#### 3.1 斜丝层倾斜角的选择

为了测量粒子的纵向位置, 斜丝必须具有一定的倾斜角. 倾斜角  $\epsilon = \text{tg}^{-1}(a/L)$ ,  $\epsilon$  越大, 斜丝下陷  $\delta$  也越大<sup>[1]</sup>. 通常单丝  $z$  向分辨可由下式求得

$$\sigma_z \approx (L/a)\sigma_x,$$

式中,  $L$  为丝长,  $a$  为斜丝两端点在  $r-\phi$  平面上投影点的距离. 所以倾斜角越大, 越有利于  $z$  向分辨的提高. 然而倾斜角越大, 丝的下陷也越大. 斜丝下陷以及相邻丝层下陷的差异都有可能造成单元形状及大小沿丝方向发生变化, 一方面导致信号丝线电荷密度沿丝方向发生变化, 从而导致气体增益沿丝方向发生变化; 另一方面导致单元漂移时间与距离的关系(以下简称  $T-D$  关系)发生变化. BESⅢ 漂移室将工作在 1T 强磁场中, 所以必须合理确定斜丝倾斜角, 满足以下几项要求:

(1) 斜丝在两端面上偏转的角度  $\alpha$  必须是单元半宽对应张角的整数倍, 同一超层的斜丝在两端面

上偏转的角度相等;

(2) 为减小单元  $T-D$  关系沿丝方向的变化, 尽可能减小相邻丝层的下陷差异<sup>[2]</sup>;

(3) 保证  $\sigma_z$  不超过 5mm;

(4) 保证信号丝线电荷密度沿丝方向的变化不超过 0.5%.

结合 Garfield<sup>[3]</sup> 模拟, 得出了 BESⅢ 漂移室各层斜丝的倾斜角, 内室斜丝的倾斜角范围为  $1.6^\circ$ — $2.2^\circ$ , 外室斜丝的倾斜角范围为  $2.4^\circ$ — $3.7^\circ$ .

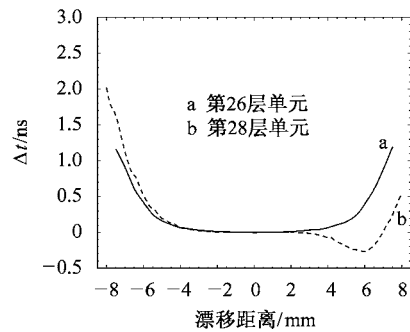


图 2 端面 and 中心平面处漂移时间的差别

图 2 分别为第 26, 28 层单元的模拟结果, 图中  $x$  轴表示漂移距离,  $y$  轴表示同一单元在端面处和在漂移室中心平面处的漂移时间差  $\Delta t$ . 第 26 层位于超层内部, 而第 28 层位于正、负两种不同倾斜角的斜丝层交界处. 由图可知,  $\Delta t$  随漂移距离的增加而增大, 图中单元  $\Delta t$  的最大值约为 2ns, 而相应的漂移时间分辨为 4—5ns, 可见在目前确定的倾斜角条件下, 单元  $T-D$  关系沿丝方向的差异是可以接受的.

一般而言, 斜丝层端面处的漂移时间比中心平面处漂移时间长, 这是因为中心平面处由于斜丝下陷造成单元尺寸变小, 然而工作电压不变, 所以单元内电场变强, 漂移时间变短. 图 2 中的曲线反映出这一点. 第 26 层位于超层内部, 沿丝方向只有单元大小发生变化, 所以径向电场的对称性不变, 因此曲线左右对称. 而第 28 层沿丝方向不仅单元大小改变, 而且单元形状也发生变化, 导致单元内径向电场的对称性沿丝方向发生变化, 所以造成曲线左右不对称(左右  $T-D$  关系详细说明见第 3.3 节).

#### 3.2 直、斜丝交界处的丝层

在直丝与斜丝交界处, 由于斜丝下陷, 造成单元形状和大小沿丝方向的变化很大, 以第 36 层为例, 由表 1 可知, 第 36, 37 层分别为正角斜丝层和直丝

层,图 3 (a)为第 36 层某单元在端面处的漂移线, (b)为该单元在中心平面处的漂移线,由(a), (b)中单元形状和漂移线的对比可知,中心平面处斜丝下陷导致信号丝与外层场丝(直丝)的距离明显变大,漂移特性也发生变化.

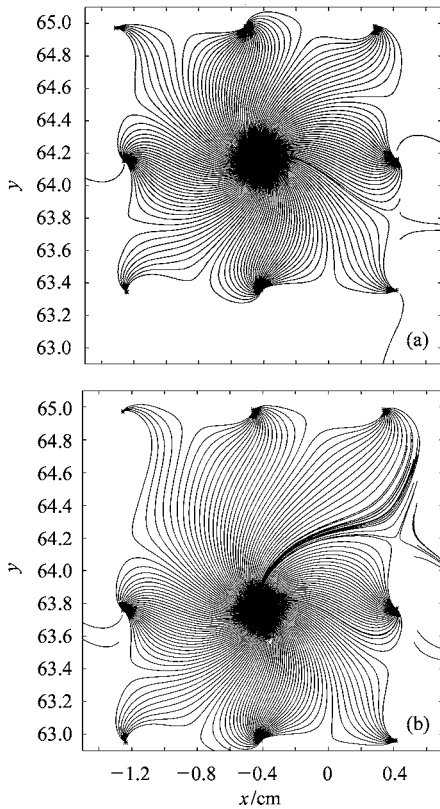


图 3 第 36 层端面处与中心平面处的单元形状和漂移线的对比 (a) 端面处; (b) 中心平面处

图 4 给出了上述两处单元  $T-D$  关系的差异. 由图可以看到,直、斜丝交界处由于单元变形导致单元  $T-D$  关系沿丝方向的差异很明显. 为了避免这种情况,在直丝和斜丝交界处增加一层场丝.

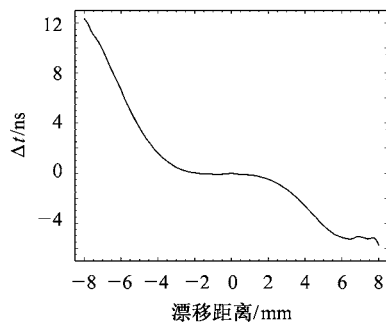


图 4 第 36 层端面处与中心平面处单元  $T-D$  关系的差别

增加场丝层的办法虽然能有效地减小单元形状沿丝方向的差异,但是单元内部径向电场的差异仍然很大. 图 5 中 a, b 分别是第 38 层单元与第 36 层单元(直、斜丝交界处)的左右  $T-D$  关系差异曲线, 可以看到,直、斜丝交界处的单元左右  $T-D$  关系差异很大. 除了直、斜丝交界处的单元外,第一层和最末层的单元也存在这样的问题.

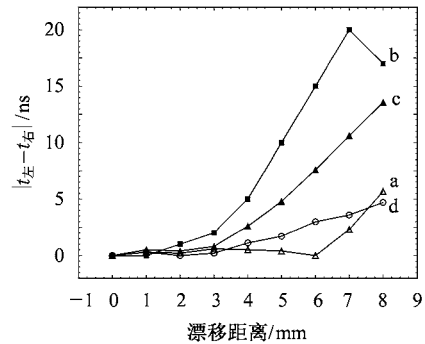


图 5 左右  $T-D$  关系不对称的比较  
a. 第 38 层单元左右  $T-D$  的差别, b. 第 36 层单元初始左右  $T-D$  的差别,  
c. 第 36 层信号丝层半径调整 1mm 后的结果,  
d. 交界处场丝加补偿电压后第 36 层单元的结果.

要减小这种左右不对称,必须要减小单元内径向电场的不对称,可行的办法有两种,一是调整信号丝层的半径,图 5 中 c 是对第 36 层单元信号丝层半径调整了 1mm 后的模拟结果;另一种办法则是在直、斜丝交界处的场丝上加 100—300V 补偿电压,模拟结果见曲线 d. 由图 5 中 b, c, d 的比较可知,在场丝上加补偿电压能最有效地改善单元的左右  $T-D$  关系不对称. 为此,拟采用场丝补偿电压的方法以减小直、斜丝交界处以及第一层和最末层单元的左右  $T-D$  关系不对称.

### 3.3 丝层半径的优化

在上述初步设计中丝层间距是平均分配的,这样得到的单元存在单元内部径向电场不对称的问题. 如图 6 所示某一单元为例,若  $N_1, N_2, N_3$  分别表示 F-, S, F+ 层内总丝数,  $R_1, R_2, R_3$  分别为各丝层的半径,定义丝密度:  $\text{density} = N/R$ , 则这 3 层的丝密度分别为:

$$\begin{aligned} \text{F-} & \quad \text{density}_1 = N_1/R_1, \\ \text{S} & \quad \text{density}_2 = N_2/R_2, \\ \text{F+} & \quad \text{density}_3 = N_3/R_3, \end{aligned}$$

由于  $N_1 = N_2 = N_3, R_1 < R_2 < R_3$ , 因此  $\text{density}_1 > \text{density}_2 > \text{density}_3$ . 令  $d_1 = R_2 - R_1, d_2 = R_3 -$

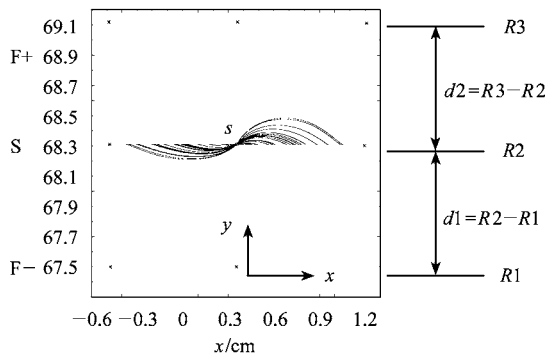


图 6 磁场作用下的漂移曲线(y 方向为室体径向)

$R_2$ , 若  $d_1 = d_2$ , 这样就导致信号丝内侧与外侧电场强度不一致, 而在磁场的作用下, 信号丝左、右两侧的漂移线会分别向不同的方向弯曲, 所以径向电场不对称就会造成信号丝左、右两侧电子漂移速度不一致, 从而导致信号丝左、右两侧  $T-D$  关系不一致, 而且磁场强度越大, 这种现象越明显.

为了解决这个问题, 采用了 CLEOⅢ 漂移室单元结构优化的方法<sup>1)</sup>. 为了减小单元径向电场不对称,  $d_1, d_2$  应分别由以下(1), (2)式进行修正:

$$d_1 = \text{spacing} \sqrt{\frac{\text{density}1}{\text{density}2}}, \quad (1)$$

$$d_2 = \text{spacing} \sqrt{\frac{\text{density}3}{\text{density}2}}, \quad (2)$$

其中  $\text{spacing} = 2\pi R_2 / N_2$ .

然而通过上述方法计算得到的  $d_1, d_2$  通常较大, 而实际情况中漂移室内外径有限制, 所以实际的漂移室丝层间距不能取  $d_1, d_2$  的计算值, 设  $\Delta R_1, \Delta R_2$  分别为实际情况中漂移室丝层间距的取值 ( $\Delta R_1 = R_2 - R_1, \Delta R_2 = R_3 - R_2$ ), 为了保证单元径向电场对称, 应该使  $d_1, d_2, \Delta R_1, \Delta R_2$  恰好满足等式(3):

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{\Delta R_1}{\Delta R_2} = k_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 43, \text{ 为单元所在层号}), \quad (3)$$

若只考虑等式(3), 则  $k_i$  的值并不唯一. 但考虑到宽高比的合理性,  $k_i$  的取值并不是任意的. 因此修改步骤归纳如下:

- (1) 先由上一层单元决定  $R_1$ ;
- (2) 修改  $R_3$ , 得到合适的宽高比;

(3) 修改  $R_2$ , 得到新的  $d_1, d_2$  及  $\Delta R_1, \Delta R_2$ , 代入(3)式, 判断等式是否成立, 若不成立, 继续修改  $R_2$ .

这样由内至外逐层修改, 最后得到新的丝层半径. BESⅢ 漂移室采用了优化后的丝层安排<sup>2)</sup>.

利用 Garfield<sup>[3]</sup> 对单元左右  $T-D$  关系进行模拟计算得到某一单元丝层半径修改前后左右  $T-D$  曲线的对比(图 7). 从图中可以明显看到修改后单元的左右  $T-D$  关系一致性更好了.

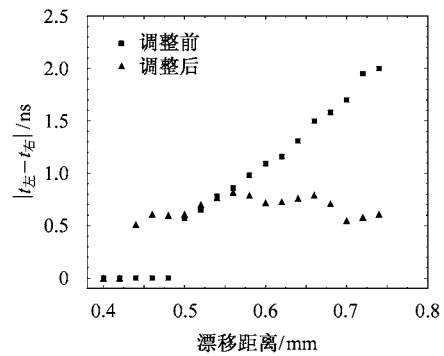


图 7 丝层半径优化前后同一单元左右  $T-D$  关系差异的对比

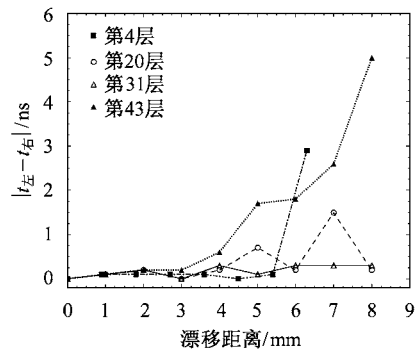


图 8 部分单元左右  $T-D$  关系差异的比较

图 8 是丝层半径优化后部分单元(包括直、斜丝交界处的单元)左右不对称的比较. 从图中可以看到, 距信号丝 4mm 的区域内, 单元的左右  $T-D$  关系非常对称. 单元大部分区域内, 左右  $T-D$  关系的差值不超过 3ns. 而在单元边缘处, 由于电场的畸变, 左右差异会变大, 这是小单元结构的特点.

## 4 漂移室的预期性能

通过 TRACKERR<sup>[4]</sup> 进行模拟计算, 得到在 1.0GeV/c 时, 磁场为 1.0T 下,  $\sigma_{pt}/p_t = 0.46\%$ . 室的

1) Peterson D. 私人通讯

2) BESⅢ 初步设计报告. 高能物理研究所内部资料, 2004

$z$  向分辨主要取决于斜丝的倾斜角和丝层数, BES III 漂移室共有 24 层斜丝, 单丝  $z$  向分辨小于 5mm, 总的  $z$  向分辨小于 2mm. 在 He/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (60/40) 混合气体中, 当取样次数为 43 时,  $\pi$  粒子能损的平均分辨为 5.7%,  $dE/dx$  的预期分辨为 6%—7%<sup>1)</sup>.

## 5 结论和讨论

BES III 漂移室采用小单元结构. 小单元结构有好的空间分辨和  $dE/dx$  分辨, 并适合在高亮度条件下工作. 在 BES III 漂移室单元结构和丝层安排的初

步设计基础上, 综合考虑漂移室  $z$  向分辨和单元  $T-D$  关系沿丝方向的变化等因素, 确定了斜丝的倾斜角, 并对直丝和斜丝交界处存在的问题进行了研究, 采用场丝补偿电压的方法改善由于增加场丝造成的单元左右  $T-D$  关系的不一致. 此外, 参考 CLEO III 漂移室采用的方法, 对 BES III 漂移室丝层安排进行了优化, 以减小单元左右  $T-D$  关系的差异. 通过 TRACKERR 进行模拟计算表明, 在这样的单元结构及丝层安排下, BES III 漂移室具有很好的动量分辨及  $z$  向分辨, 满足 BES III 的物理要求.

## 参考文献 (References)

- 1 Finocchiaro G. The KLOE Drift Chamber Geometry. KLOE Memo n. 48, March, 1996
- 2 Peterson D. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **A478**:142
- 3 Veenhof R. Garfield Help Pages. <http://consult.cern.ch/writeup/garfield/help>
- 4 Innes W. Trackerr, A Program for Calculating Tracking Errors. BABAR Note # 360, February, 1998

## Design and Optimization of Cell Structure and Layer Arrangement of BES III Drift Chamber

WU Ling-Hui<sup>1,2,2)</sup> LIU Jian-Bei<sup>1,2</sup> CHEN Yuan-Bo<sup>1</sup> WANG Yi-Fang<sup>1</sup> CHEN Chang<sup>1</sup>  
 ZHU Qi-Ming<sup>1</sup> LIU Rong-Guang<sup>1</sup> MA Xiao-Yan<sup>1</sup> TANG Xiao<sup>1</sup> JIN Yan<sup>1</sup> WANG Lan<sup>1</sup>  
 ZHANG Bing-Xin<sup>1</sup> QIN Zhong-Hua<sup>1,2</sup> XU Mei-Hang<sup>1</sup> MA Yuan-Yuan<sup>1</sup> ZHU Min-Xuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

<sup>2</sup>(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Design of cell structure and layer arrangement of the BES III drift chamber are presented. The effect of stereo angles and the layers at axial-stereo boundaries on the drift-time-to-distance relation are discussed. In addition, the optimization of layer radius is performed based on the drift-time-to-distance relation.

**Key words** drift chamber, cell structure, stereo angle, drift-time-to-distance relation

Received 10 August 2004

1) BES III 初步设计报告. 高能物理研究所内部资料, 2004.

2) E-mail: wulh@mail.ihep.ac.cn