

BES III 触发系统 MDC 子系统的物理设计

徐昊^{1,2;1)} 刘振安¹ 金大鹏¹ 王大勇^{1,2} 赵棣新¹ 过雅南¹

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 介绍北京谱仪 BES III 触发系统 MDC 子系统的物理设计. 该设计根据 BES III 的物理研究目标, 用软件模拟的方法研究了不同触发方案的可行性, 并优化了触发参数. 对触发方案的效率进行了仔细研究, 给出一些重要反应道²⁾ 的触发效率和本底事例率.

关键词 触发 BES III 主漂移室

1 引言

北京谱仪 III (BES III) 是运行在高亮度、多束团的新一代北京正负电子对撞机 (BEPC II) 上的大型探测器^[1], 目前正在设计建造之中. BEPC II 的高流强要求 BES III 触发系统能够在很高的本底下工作, 同时束流的多束团结构也给触发系统的设计带来挑战.

触发主漂移室 (MDC) 子系统使用 MDC 部分丝层信号寻找带电粒子的径迹, 是 BES III 触发系统的一个主要部分. BES III 的物理目标为 τ 粲能区粒子产生和衰变的精确测量, 它对触发 MDC 子系统的物理要求有: 1) 识别带电粒子在 MDC 内的径迹, 提供 MDC 带电粒子的径迹触发条件; 2) 对 J/ψ 事例的触发效率不低于 95%; 3) 提供选择 $B_{\text{had}}B_{\text{had}}$ 事例的触发条件, 用于 $B_{\text{had}}B_{\text{had}}$ 事例的预定标; 4) 降低本底事例率. 为了实现物理研究的要求, 触发 MDC 子系统物理设计用软件模拟的方法, 通过研究典型物理道的触发效率和束流相关本底及宇宙线本底的排斥比, 确定合适的触发条件、设置最优的触发方案参数. 物理设计的主要内容包括设计 MDC 触发寻迹方案、

优化 MDC 触发条件、研究典型物理道的触发效率和本底事例率. 物理设计的结果是触发 MDC 子系统硬件设计的基础.

2 MDC 触发寻迹方案

2.1 MDC 的结构^[1]

BES III 探测器的总体设计要求漂移室的半径 $R = 800\text{mm}$, 立体覆盖角达到 $\cos\theta = 0.93$. MDC 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. MDC 沿径向共有 43 个信号读出层 (内室 8 层, 外室 35 层), 相邻两个信号丝层的各个单元错开半个单元 (如图 1 所示). 触发 MDC 子系统根据其轴向丝层 (AX, 也称直丝) 和斜丝层 (ST) 安排的特点, 以每 4 个信号丝层为一组定义一个超层 (SL), 组成 11 个超层 (第 11 超层只有 3 层), 其中轴向丝 5 个超层, 斜丝 6 个超层. 每个超层内根据其对称性定义第 2 层或第 3 层为基准层 (PL), 基准层的信号丝单元定义为参考单元 (PC). 具体参数见表 1.

2004-07-20 收稿, 2004-10-26 收修改稿

1) E-mail: xuhao@mail.ihep.ac.cn

2) 末态有带电粒子的衰变道, 文中简称为带电道; 末态全部是中性质子的衰变道, 文中简称为中性道.

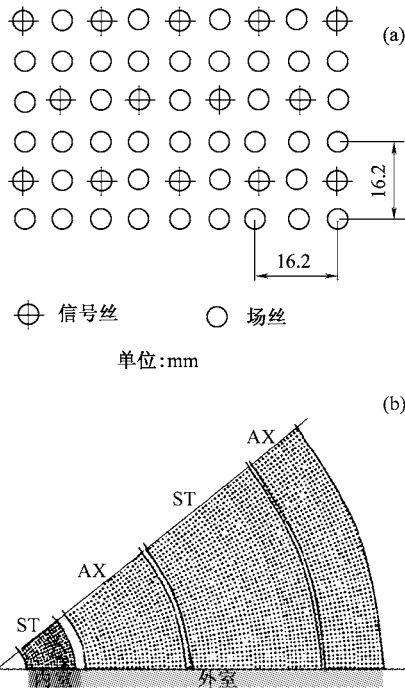


图 1 MDC 几何结构
(a)单元结构, (b)丝层排列.

根据 MDC 的设计结构, 同时考虑硬件实现, MDC 的触发寻迹分两步: 首先组合同一超层 MDC 丝信号形成径迹段; 然后以找到的径迹段为基础寻找径迹^[2]. 触发寻迹方案的设计中用到了第 1, 2 斜丝超层和第 3, 4, 5, 10 直丝超层的全部信号丝单元.

表 1 触发 MDC 子系统几何参数表

超层序号	丝层序号	每层信号丝个数				层数	总丝数	基准层	参考单元数
		L1	L2	L3	L4				
SL-1	ST-1/2/3/4	40	44	48	56	4	188	3	48
SL-2	ST-5/6/7/8	64	72	80	80	4	296	3	80
SL-3	AX-9/10/11/12	76	76	88	88	4	328	3	88
SL-4	AX-13/14/15/16	100	100	112	112	4	424	3	112
SL-5	AX-17/18/19/20	128	128	140	140	4	536	2	128
SL-6	ST-21/22/23/24	160	160	160	160	4	640	2	160
SL-7	ST-25/26/27/28	176	176	176	176	4	704	2	176
SL-8	ST-29/30/31/32	208	208	208	208	4	832	2	208
SL-9	ST-33/34/35/36	240	240	240	240	4	960	2	240
SL-10	AX-37/38/39/40	256	256	256	256	4	1024	2	256
SL-11	AX-41/42/43	288	288	288	0	3	864	2	288
总		数					6796	/	1784

2.2 径迹段寻找 TSF(Track Segment Finding)

径迹段寻找在超层内 4 个信号丝层进行. 假设有一个大横动量粒子通过某一超层编号为 B1 的参考单元, 粒子在超层中的击中可能有以下几种情况: (1)超层中 4 个信号层都有击中; (2)超层中只有 3 个信号层有击中; (3)超层中只有 2 个或 2 个以下信号层有击中. 对这几种情况分别作逻辑判断: 如果要求只有第(1)种情况才能形成径迹段, 定义为 4 选 4 逻辑(4/4), 这时击中信号丝必为表 2 中 8 个 4/4 组合之一; 如果要求只要满足第(2)种情况就可以形成径迹段, 定义为 4 选 3 逻辑(3/4), 这时击中信号丝必为表 2 中 22 个 3/4 组合之一. 在模拟中发现当

表 2 径迹段寻找逻辑^[1]

4/4 组合	3/4 组合*
A0·B1·C0·D0	A0·B1·C0 + A0·B1·D0 + A0·C0·D0 + B1·C0·D0
A0·B1·C0·D1	A0·B1·C0 + A0·B1·D1 + A0·C0·D1 + B1·C0·D1
A0·B1·C1·D1	A0·B1·C1 + A0·B1·D1 + A0·C1·D1 + B1·C1·D1
A0·B1·C1·D2	A0·B1·C1 + A0·B1·D2 + A0·C1·D2 + B1·C1·D2
A1·B1·C0·D0	A1·B1·C0 + A1·B1·D0 + A1·C0·D0 + B1·C0·D0
A1·B1·C0·D1	A1·B1·C0 + A1·B1·D1 + A1·C0·D1 + B1·C0·D1
A1·B1·C1·D1	A1·B1·C1 + A1·B1·D1 + A1·C1·D1 + B1·C1·D1
A1·B1·C1·D2	A1·B1·C1 + A1·B1·D2 + A1·C1·D2 + B1·C1·D2

* 为体现逻辑关系, 表中列出每一个 4/4 组合对应的所有 3/4 组合, 重复出现的组合用斜体字表示.

MDC 丝效率在 95% 以上时, 出现情况(3)的概率小于 1%. 因此径迹段寻找中只考虑情况(1), (2), 不考虑情况(3).

实际用到的参考单元的径迹段组合数据由蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟产生. 产生通过某一参考单元的径迹, 该径迹的动量、角度在限定范围内随机抽取; 然后检查径迹通过本超层中其他层的单元位置, 4 层信号丝的单元位置构成径迹段的组合. 当模拟

次数足够多时(20 000 次), 就可以认为找到了该单元的所有径迹段组合, 并以此作为硬件设计的依据. 在使用径迹段组合时, 将组合范围限定在出现频率比较高的部分组合之内, 既能保证径迹段寻找的效率, 又能简化硬件实现. 研究表明, 对 $p_t \geq 120\text{MeV}/c$ 的径迹, 径迹段寻找采用 8 个组合数就几乎达到 100% 的寻迹效率. 相对应的径迹段寻找所用到的各层单元如图 2 所示.

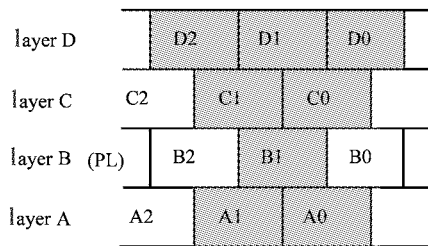


图 2 径迹段寻找信号丝单元

用 3/4 逻辑作为判断条件,在参考单元击中丢失时,一条径迹可能在基准层内相邻的两个单元组合都满足径迹段条件. 解决这个问题的原则是将径迹段优先赋予右侧单元组合. 模拟表明这种方法不会影响触发效率和本底排斥,而且硬件可以实现.

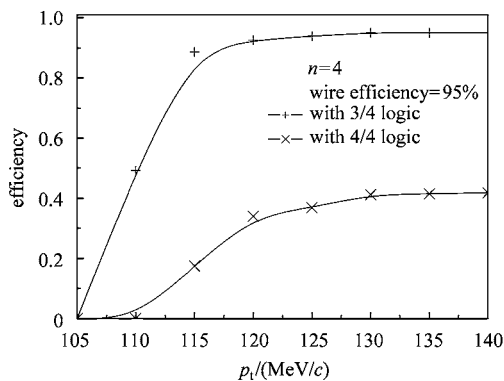
理论上,用 3/4 逻辑的径迹段寻找效率 P 与丝效率 q 的关系为

$$P(q) = q^4 + 4q^3(1 - q), \quad (1)$$

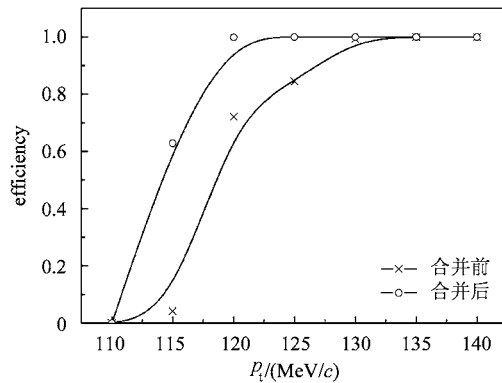
4/4 逻辑的径迹段寻找效率 P 与丝效率 q 的关系为

$$P(q) = q^4. \quad (2)$$

若参加径迹寻找的超层个数为 n ,则相应的寻迹效率为 P^n . 可以看出,在丝效率不是 100% 的情况下,3/4 逻辑非常有利于提高寻迹效率. 模拟结果(图 3)与理论计算相符.

图 3 3/4 与 4/4 逻辑的寻迹效率与横动量 p_t 的关系

MDC 的第 10 信号丝超层远离对撞中心,本底计数率不高^[3]. 如果将第 10 超层内每个信号丝层的相邻单元两两合并,能简化硬件实现、节省大量资源. 合并后第 10 超层内每层的单元数从 256 降为 128,几何位置不变. 模拟结果表明(如图 4 所示),合并第 10 超层并不会降低寻迹效率.

图 4 合并第 10 超层的寻迹效率与横动量 p_t 的关系

2.3 径迹寻找 TF(Track Finding)

径迹寻找在参与寻迹的直丝超层间进行,方法与径迹段寻找的方法类似. 径迹段寻找完成后,把径迹段作为一个单元应用到径迹寻找中. 在参加寻迹的超层中定义一个超层为基准超层,把基准超层中的径迹段定义为参考径迹段. 通过参考超层的一个径迹段,与大于预设横动量的径迹所击中的其他超层的所有径迹段构成通过这个径迹段的好径迹组合.

根据 MDC 的几何结构,采用第 3,4,5,10 四个直丝超层进行触发寻迹. 为了实现对不同事例的判选,定义经过第 3,4,5,10 超层的径迹为长径迹(long track),定义经过第 3,4,5 超层的径迹为短径迹(short track)(形成一条长径迹必然同时有一条短径迹). 在 1.0T 的磁场下,带电粒子能达到第 10 超层形成长径迹所需要的最小横动量约 110MeV/c,能达到第 5 超层形成短径迹所需要的最小横动量约为 70MeV/c. 为了能从空间和 p_t 方面比较好地排除宇宙线和束流相关本底,根据从对撞点(IP)各向同性地发出的径迹被找到的效率和径迹横动量关系的模拟结果(图 5),确定对带电粒子横动量 $p_t \geq 90\text{MeV}/c$ 进行短径迹判选,对带电粒子横动量 $p_t \geq 120\text{MeV}/c$ 进行长径迹判选.

在径迹寻找中,选取任何一个超层作为参考超层都不会影响触发效率和本底排斥. 但不同参考超层的选择对硬件的实现有很大影响. 表 3 给出了分别以第 10 超层和第 5 超层作为参考超层时,硬件实现需要关联到的其他超层的参考单元. 可以看出,以第 5 超层作为参考超层的寻迹方法大大减少了关联单元数.

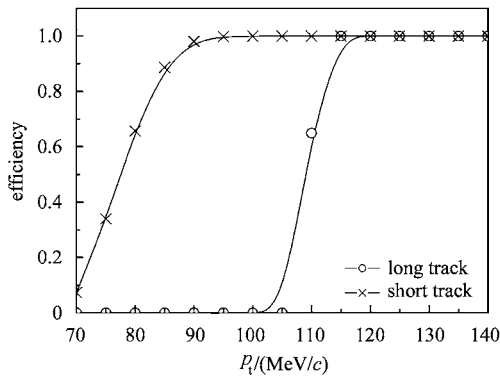


图 5 横动量与寻迹效率关系

表 3 不同参考层在寻迹时相对应的关联单元

超层	第 10 超层为参考超层		第 5 超层为参考超层	
	丝单元号	总数	丝单元号	总数
10	1	1	113—128, 1—15	31
5	117—128, 1—14	26	1	1
4	100—112, 1—13	26	110—112, 1, 2	5
3	77—88, 1—11	23	85—88, 1—3	7
合计	/	76	/	44

3 MDC 触发条件的研究

物理设计的一个重要作用是通过模拟研究, 设定合适的触发条件, 从而提高触发效率、降低本底事例率. 触发 MDC 子系统的模拟是在 BESIII 触发系统的整体模拟框架下完成的, 探测器信号由基于 GEANT3 的软件模拟给出.

3.1 MDC 触发条件

为了尽可能多地保留好事例并压低本底, 触发 MDC 子系统对带电粒子在 MDC 中的径迹判选结果进行分类, 组成不同的触发条件送到触发系统的主触发子系统. 主触发选择合适的触发条件加入到触发条件表, 联合其他探测器触发子系统进行总体触发判选. 触发 MDC 子系统有 9 个基本的触发条件:

- $N_{Ltrk} \geq 1$ 长径迹数大于等于 1;
- $N_{Ltrk} \geq 2$ 长径迹数大于等于 2;
- $N_{Ltrk} \geq N$ 长径迹数大于等于 N (N 可预置, 用于排除 MDC 成片着火的事例);
- $N_{Strk} \geq 1$ 短径迹数大于等于 1;
- $N_{Strk} \geq 2$ 短径迹数大于等于 2;
- $N_{Strk} \geq N$ 短径迹数大于等于 N (作用同 $N_{Ltrk} \geq N$);
- STrk-BB 短径迹背对背;

- $N_{Ltrk} \geq 1$ 内两超层击中数大于等于 1;
- $N_{Ltrk} \geq 2$ 内两超层击中数大于等于 2.

3.2 MDC 内室的使用研究

经过模拟, 发现由于束流丢失的本底满足 $N_{Ltrk} \geq 1$ 触发条件的事例率比较高, 因此研究了使用 MDC 内室参与寻迹的触发效果. 内室为斜丝, 且丝长度较短, 在 $r-\phi$ 平面和 z 向都能有效的压缩本底. 比较了只用直丝超层寻迹的效果与使用直丝超层加内室斜丝超层寻迹的效果, 表 4 是用 $J/\psi \rightarrow \text{Anything}$ 事例、宇宙线事例和束流相关本底事例分别通过两种寻迹方法得到的结果.

表 4 两种寻迹方法的事例率、本底事例率的比较

事例类型	直丝超层	直丝超层 + 内室超层
	(通过事例数 / 总事例数)	(通过事例数 / 总事例数)
$J/\psi \rightarrow \text{Anything}^*$	9 490 / 10 000	9 435 / 10 000
宇宙线	197 / 10 000	135 / 10 000
束流相关本底	52 / 1 000 000	28 / 1 000 000

* 未考虑探测器覆盖角度和探测效率的影响

从表 4 可以看出使用内室达到了压低本底的目的, 但同时也降低了好事例的触发效率. 对使用内室后损失的事例进行了事例扫描分析, 发现一部分 Δ , K_L , K_S 粒子因为衰变顶点远离对撞点, 在 MDC 内室没有形成径迹段而造成径迹丢失. 本着在提高触发效率、保留关键事例的原则, 目前的触发方案中没有使用内室参加寻迹. 但要求内室产生独立的触发条件, 供将来本底情况较差时备用.

3.3 径迹背对背条件

由于 BESIII 工作在 τ 粲能区, 尤其在 J/ψ 峰值上运行时事例率非常高. 如果事例率高到数据获取系统无法接受的情况时, 对 BhaBha 事例进行预定标, 只让一定比例的 BhaBha 事例通过触发判选可以有效地降低事例率 (只对端盖 BhaBha 事例做预定标处理). 在 MDC 形成短径迹并打到其他端盖探测器的 BhaBha 事例约占所有 BhaBha 事例的 2/3, 因此用短径迹背对背的触发条件配合其他端盖探测器可以很好地选择小角度 BhaBha 事例, 从而对它们进行预定标. 由于 BESIII 工作在 1.0T 磁场中, 带电径迹在磁场中发生偏转, 因而背对背的判断是在一定角度范围内进行的. 根据 BhaBha 事例两条径迹在 MDC 内 $r-\phi$ 平面的夹角分布 (图 6(a)), 设定夹角在 160° — 200° 以内构成径迹背对背. 在 MDC 内寻迹

时,定义径迹角度为径迹中第 5 超层参考单元的角度,以径迹对面的参考单元个数 n 来设定背对背条件. 经过模拟,当背对背条件 n 达到 15 个单元(约 40°)时,几乎所有的 BhaBha 事例都能构成径迹背对背(图 6(b),(c)),所以定义 15 个单元数为径迹背对背条件.

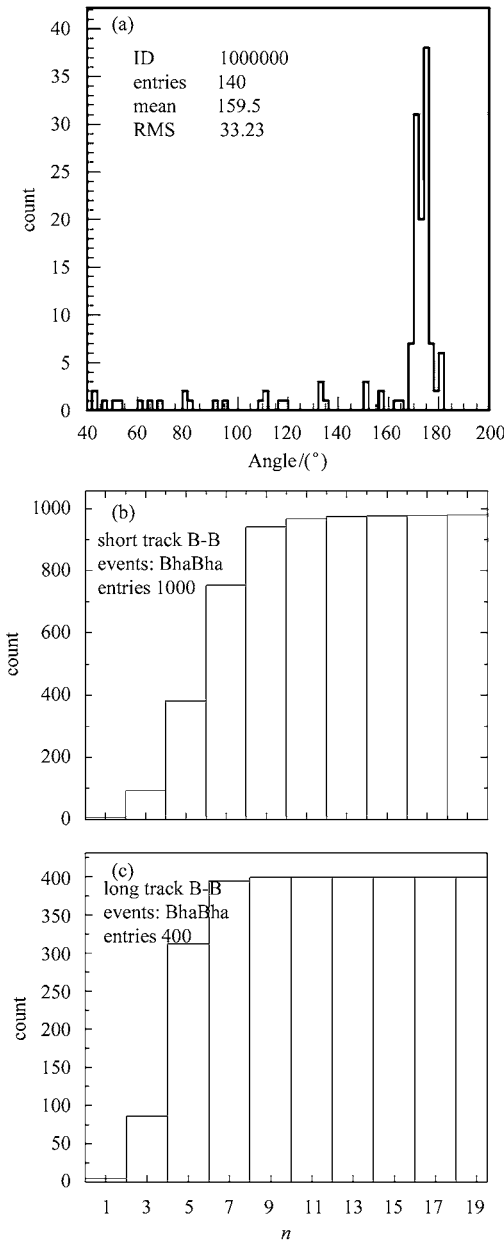


图 6 BhaBha 事例两条径迹在 MDC 内的特点 (a) 夹角角度分布; (b) 不同 n 值时的短径迹背对背相对事例数; (c) 不同 n 值时的长径迹背对背相对事例数.

3.4 触发方案的 Monte Carlo 模拟

对触发方案的模拟表明,当径迹离束流轴的最小距离 $r_0 > 150\text{mm}$ 时,被误认为是好事例径迹的几

率小于 25% (图 7(a)); 当径迹出发点与对撞点(IP)的轴向距离 $z_0 > 50\text{cm}$ 时,被误认为是好事例径迹的几率小于 20% (图 7(b)). 绝大部分偏离对撞点(IP)

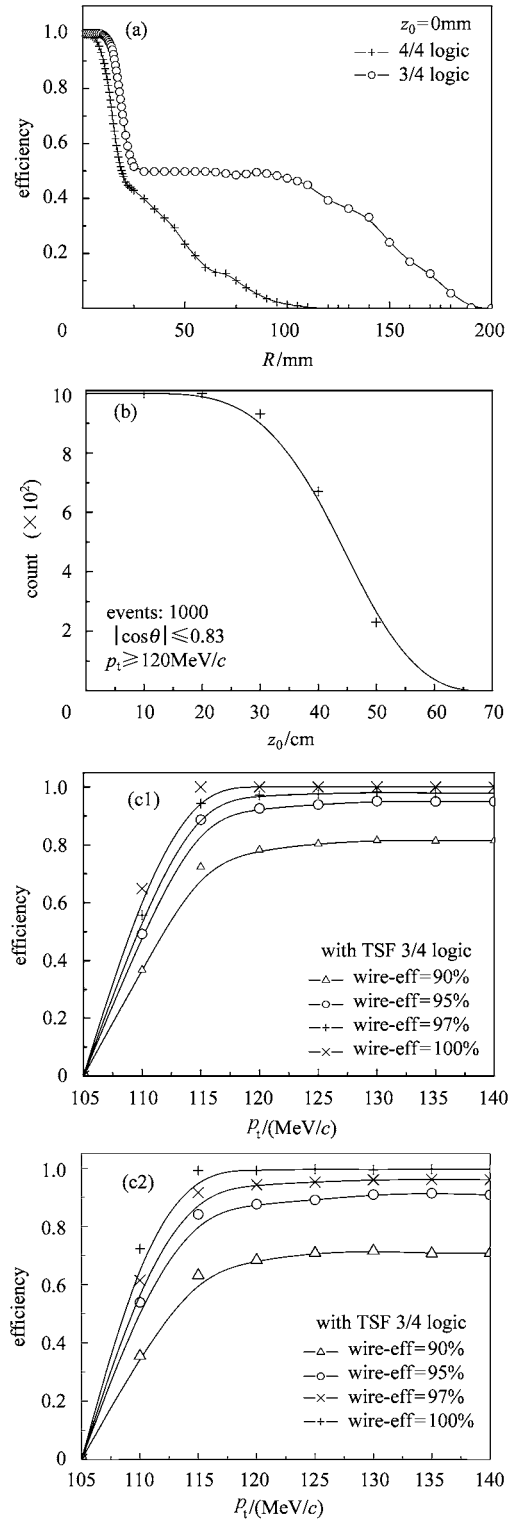


图 7 触发方案的 Monte Carlo 模拟

(a) $r-\varphi$ 平面偏离与触发效率; (b) z 向偏离与触发效率; (c) MDC 单丝效率与触发效率, (c1) 不用内室, (c2) 使用内室.

的丢失电子不能通过径迹判选, 这样从 $r-\varphi$ 平面和 z 向就能很好地排除宇宙线本底和束流相关本底. 图 7(c) 为 MDC 单丝效率对触发效率的影响, 当丝效率为 95% 时, 径迹段寻找采用的 3/4 逻辑对触发效率有很大的弥补作用; 同时可以明显看出使用内室降低了触发效率.

4 触发效率与本底事例率

4.1 触发效率

MDC 寻迹触发条件主要用于带电径迹事例的判选. 根据主触发的模拟结果, 触发系统确定了 3 个带电触发道:

Charge1: $N_{Ltrk} \geq 1 + N_{tof} \geq 1$ (飞行时间计数器击中数大于等于 1) + E_{tot-1} (电磁量能器总能量低阈, 约 200MeV);

Charge2: $N_{Ltrk} \geq 1 + N_{Strk} \geq 2$;

Charge3: S_{Trk-BB} .

表 5 是用典型物理事例通过带电道和总触发的判选结果. 其中总触发用 3 个带电触发道、电磁量能器中性触发道联合触发. 由于探测器覆盖范围 ($|\cos\theta| \leq 0.93$) 小于事例产生空间 (4π 立体角) 和探测器有缝隙等原因造成部分粒子丢失. 用单事例扫描的办法对这些物理道进行了研究, 扣除了丢失粒子事例、含有两个中子的事例、极少数含有衰变顶点远离对撞点的 K_L 事例, 得到表 5 中修正后的总触发效率.

表 5 典型物理事例通过触发判选的结果

事例类型	带电道 通过比例	总触发 通过比例	修正后的 触发效率
$J/\psi \rightarrow \text{Anything}$	95.38%	97.66%	99.79%
$J/\psi \rightarrow K^+ K^- \pi^0$	95.58%	97.39%	99.68%
$J/\psi \rightarrow p\bar{p}$	95.08%	95.82%	99.91%
$\psi' \rightarrow \text{Anything}$	97.72%	99.5%	99.96%
$\psi' \rightarrow D\bar{D} \rightarrow \text{Anything}$	97.85%	99.9%	99.97%

从表中可以看出, 触发 MDC 子系统对带电径迹事例的判选起主要作用, 修正后的触发效率完全达到 BESⅢ 设计指标的要求.

4.2 本底事例率

本底事例主要有宇宙线本底和束流相关本底. 宇宙线本底模拟中, 根据地平面附近宇宙线的特征^[4]模拟产生了 22 442 765 个宇宙线事例. 其中 500 000 个击中探测器, 约 1.97% 的宇宙线通过了 MDC 触发条件 $N_{Ltrk} \geq 1$. 根据北京地区地表宇宙线通量和探测器面积估算, 相应的事例率约为 18Hz.

利用改进的专用模拟工具 Decay Turtle, 根据 BEPCⅡ 的格点函数 (Lattice)、束团形状和尺寸、储存环不同区域的真空度、束流的能散度等因素, 产生丢失到对撞点左右 5m 范围内的粒子, 构成束流相关本底. 考虑到 MDC 的成形时间及展宽等因素, 把 20 个丢失粒子组成一个本底事例. 研究中总共模拟了 1 000 000 个束流相关本底事例, 束流相关本底按 40MHz 估计^[3], 其通过触发各带电道的结果如表 6 所示.

表 6 束流相关本底通过 MDC 触发条件的情况统计

触发条件	通过事例数	排斥比	事例率/Hz
$N_{Ltrk} \geq 1 + N_{tof} \geq 1 + E_{tot-1}$	39	99.9961%	1560
$N_{Ltrk} \geq 1 + N_{Strk} \geq 2$	0	100%	0
S_{Trk-BB}	0	100%	0

5 总结

BESⅢ 触发系统 MDC 子系统的物理设计, 比较了不同的触发方案、对触发方案中的各种参数进行了优化并研究了触发方案的触发效率和本底排斥能力. 从触发效率可以看出, 触发 MDC 子系统对 J/ψ 物理事例的判选起主要作用. MDC 触发条件联合其他探测器的触发条件后, 对带电物理事例的触发效率在 99% 以上, 同时将本底事例率降低到了可以接受的程度. BESⅢ 触发系统 MDC 触发子系统的物理设计, 实现了物理目标和本底排斥的目的, 达到了 BESⅢ 的设计指标要求; 同时兼顾硬件实现, 为触发 MDC 子系统的硬件设计及简化提供了较好的基础.

作者感谢何康林副研究员的建议和帮助, 感谢苑长征研究员, 苏栋博士的有益讨论.

参考文献 (References)

- 1 Preliminary Design Report of the BES III Detector. IHEP-BEPC II -SB-13, 2004. 14—71; 99—129; 298—319
- 2 LIU Zhen-An. Preliminary Design of BES III Trigger System. In: CHEN H S ed. Proceedings of CHEP 2001, International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics. Beijing, P. R. China, Sep. 2001. Beijing & New York: Science Press, 2001. 642—646
- 3 JIN Da-Peng. Beam-Related Backgrounds Study in the BEPC II / BES III. In: Doctoral Dissertation, Graduate School of the Chinese Academy of Science. Beijing, 2004. 56—92 (in Chinese)
(金大鹏. 北京正负电子对撞机/北京谱仪的束流相关本底研究. 中国科学院研究生院博士学位论文, 北京, 2004. 56—92)
- 4 Review of Particle Physics. The European Physical Journal, 2000, C15(1—4):150—156

Physical Design of Main Drift Chamber Trigger for BES III Experiment

XU Hao^{1, 2;1)} LIU Zhen-An¹ JIN Da-Peng¹ WANG Da-Yong^{1,2} ZHAO Di-Xin¹ GUO Ya-Nan¹

1 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

2 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract This article describes the design and simulation of the scheme of Main Drift Chamber (MDC) trigger for BES III (Beijing Spectrometer III). The algorithm of MDC trigger includes 3 steps: track segments finding (TSF), track finding (TF) and trigger condition formation of MDC tracks. These trigger conditions are studied carefully and the trigger parameters are optimized through simulation. Trigger efficiencies vs. p_t , vertex position r - φ and z are presented. Trigger efficiency exceeds 99% for J/ψ events and some important physics channels. The rejection of beam-related backgrounds exceeds 99.99% and the rate of cosmic rays is about 18Hz.

Key words trigger, BES III, MDC